

Jonas Kniel

**Potentiale der Temperaturverteilungsmessung  
zur Analyse trockenlaufender Friktionssysteme  
auf Basis neuer Messtechnik**

Potentials of the temperature distribution  
measurement for the analysis of dry running friction  
systems based on new measurement technology

Band 109

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen  
(Hrsg.)



Forschungsberichte

Jonas Kniel

**Potentiale der Temperaturverteilungsmessung zur  
Analyse trockenlaufender Friktionssysteme auf Basis  
neuer Messtechnik**

Potentials of the temperature distribution measurement  
for the analysis of dry running friction systems based  
on new measurement technology

Band 109

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright: IPEK ■ Institut für Produktentwicklung, 2017  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft  
Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen  
06224-7697915

ISSN 1615-8113

# **Potentiale der Temperaturverteilungsmessung zur Analyse trockenlaufender Friktionssysteme auf Basis neuer Messtechnik**

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften**  
der Fakultät für Maschinenbau  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte  
**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Jonas Kniel  
aus Bruchsal

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2017  
Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers  
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer



## Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe<sup>1</sup> am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

---

<sup>1</sup> Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)



## Vorwort zu Band 109

Einer der stärksten und stabilsten Entwicklungstrends im Maschinen- und Fahrzeugbau über Jahrzehnte ist die kontinuierliche Steigerung der Leistungsdichte in allen Teilsystemen und Produkten. Diese Steigerung der Leistungsdichte führt für den Kunden zu neuen Anwendungspotenzialen, insgesamt kostengünstigeren und effizienteren technischen Lösungen und gleichzeitig neuen Anwendungsmöglichkeiten. Gleichzeitig führt dieser Trend in der Produktentwicklung allerdings auch dazu, dass von Produktgeneration zu Produktgeneration die Auslegungen kritischer werden müssen, um diese Steigerung der Leistungsdichte, das heißt die Steigerung des Leistungsumsatzes im gleichen Bauraum, überhaupt realisieren zu können. Dazu ist ganz allgemein ein verstärktes und tiefes Verständnis der Prozesse und Vorgänge in den Wirksystemen, den Wirkflächenpaaren und den Strukturen der Maschine zwingend erforderlich.

Eines der herausforderndsten Maschinenelemente sind in diesem Kontext die Kupplungssysteme. Insbesondere die schaltbaren Kupplungen mit den für die Funktion entscheidenden Wirkflächenpaaren des Friktionskontaktes, stellen ein sehr anspruchsvolles Wirksystem dar. Der die Funktion realisierende Effekt ist dabei die im Wirkflächenpaar auftretende Reibung, die beim Friktionssystem der schaltbaren Kupplung zur Übertragung von Drehmomenten zwischen Wellensystemen bei Relativgeschwindigkeit genutzt wird. In diesem System entsteht zwingend immer bei der Schaltfunktion auch Wärme, da unter Relativbewegung im Friktionskontakt Kräfte übertragen werden. Diese Wärme beeinflusst das Kupplungssystem ganz entscheidend und ist einer der zentralen Auslegungsfaktoren. Die Kupplungen werden dabei heute zunehmend mit immer leistungsfähigeren Kupplungsbelagssystemen ausgerüstet. Die Bauarten können trockenlaufend oder ölgeschmiert – auch als nasslaufend bezeichnet – ausgeführt werden. Während beim nasslaufenden System die Wärmeabfuhr ganz maßgeblich durch das, das Kupplungssystem durchströmende Kühlöl erfolgt, muss beim trockenlaufenden Friktionssystem die Wärmeabfuhr im Wesentlichen durch Wärmespeicherung in den Bauteilen der Kupplung und dann Abgabe der Wärme über die Konvektion und Abstrahlung in die Umgebung erfolgen. Bei trockenlaufenden Kupplungen ist der Wärmehaushalt heute kritisch. Insbesondere auch bei den neuen Doppelkupplungslösungen kommt einer sicheren thermischen Auslegung und dabei einer wärmeflussgeeigneten Gestaltung des Systems eine entscheidende Rolle zu.

Hierbei ist zu bedenken, dass in den Reibsystemen nicht, wie man annehmen könnte, eine gleichmäßige Wärmebelastung in dem Wirkflächenpaar auftritt, sondern die Wärmeverteilung äußerst extrem lokal verteilt ist. Das führt dann zu lokalen Überbeanspruchungen im makroskopischen WFP durch die in diesem beim Reibvorgang entstehenden lokalen Mikro-Wirkflächenpaare auf der nächst tieferen Betrachtungsebene. Diese lokal ungleichmäßige Wärmeverteilung in den Wirkflächenpaaren möglichst

weitestgehend zu reduzieren durch entsprechende konstruktive Gestaltung der Elemente, ist eine große Herausforderung, birgt allerdings auch ein erhebliches Potential zur weiteren Steigerung der Leistungsdichte.

Um dies tun zu können, muss der Temperaturzustand während der Reibphasen bekannt sein. Deshalb wird bereits seit vielen Jahren versucht, den Wärmehaushalt im Wirkflächenpaar und den umgebenden Elementen des Kupplungssystems möglichst genau zu erfassen. Hierbei kommen unterschiedliche Temperaturmesssysteme zum Einsatz. Eine wirkliche In-situ-Messung ist dabei äußerst schwierig. Das übliche Verfahren ist die Temperaturmessung mit Thermoelementen, die aber keine hohe lokale Auflösung erlauben. An dieser Stelle setzt die wissenschaftliche Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Jonas Kniel an. Er hat in seiner Arbeit neue Messverfahren zur Temperaturverteilungsmessung in trockenlaufenden Friktionssystemen gezielt gesucht und daraus ein neues Messverfahren abgeleitet, mit dem ein tieferes Verständnis des Wärmehaushaltes in Trockenkupplungssystemen gewonnen werden kann. Dies ist dann Basis für die Gestaltung neuer Kupplungs- und auch Bremssysteme. Die Arbeit leistet einen entscheidenden Beitrag zur zukünftigen meßtechnischen Erfassung von Temperaturverteilungen in hoch beanspruchten Wirksystemen.

Dezember, 2017

Albert Albers

## Kurzfassung

Die Herausforderungen an ein neues Produkt und die Entwicklung dieses sind vielfältig und die Durchführung des richtigen Entwicklungsprozesses ist nicht trivial. In nahezu jeder technischen Branche, aber besonders in der Automobilbranche, müssen neue Produkte hinsichtlich des Energiebedarfs ihre zugeordnete Aufgabe möglichst effizient erledigen. Um dies gewährleisten zu können, werden neue Produkte immer grenzwertiger ausgelegt, zum Beispiel soll möglichst kein Material „durch die Gegend geschleppt werden“, welches keinen Beitrag zur Funktionserfüllung hat. Zusätzlich steigen die Leistungsanforderungen an ein neues Produkt. Jedoch darf auch unter diesen Umständen ein Funktionsausfall beim Endkunden auf keinen Fall auftreten. Ein solcher Funktionsausfall hätte im schlimmsten Falle eine Rückrufaktion zur Folge, welche im Normalfall einen großen Imageschaden für das Unternehmen zu Folge hat.

Um die Anforderungen an die Energieeffizienz und die Performancesteigerung mit der notwendigen Funktionssicherheit in Einklang zu bringen, wird in der vorliegenden Arbeit eine Methode zur Weiterentwicklung bestehender Systeme auf Basis der räumlich hochauflösenden Temperaturverteilungsmessung entwickelt.

Mit den bekannten Messmethoden ist es schwer einen weiteren Erkenntnisgewinn zu erreichen, weshalb zuerst nach neuen Messmethoden gesucht wurde. Dabei zeigte die verteilt messende faseroptische Sensorik ein hohes Potential, welches zunächst in einer Machbarkeitsstudie bestätigt wurde. Anschließend wurde eine Fehlerbetrachtung der Messmethode durchgeführt, wobei Empfehlungen zur Integration der Messtechnik im weiterzuentwickelnden System abgeleitet wurden. An zwei unterschiedlichen trockenlaufenden Reibpaarungen konnte die Anwendbarkeit und der Nutzen der Temperaturverteilungsmessung gezeigt werden. Zum Beispiel wurden die Potenziale der räumlich hochauflösenden Messung der Temperaturverteilung für die Optimierung von trockenlaufenden Kupplungssystemen aufgezeigt, indem das thermo-mechanische Verhalten bei unterschiedlichsten Beanspruchungen analysiert und verglichen wird, um auf Basis dieser Erkenntnisse zum Systemverhalten, welches bisher Messtechnik nicht ermittelt werden konnte, Optimierungsmaßnahmen zu definieren.

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Beschreibung der gewinnbringenden Anwendung der räumlich hochauflösenden Temperaturverteilungsmessung als Werkzeug zur Erweiterung des Systemverständnisses. Dazu wurde eine Methode entwickelt, welche im Sinne der PGE - Produktgenerationsentwicklung die zielgerichtete Gestaltoptimierung unterstützt.



## **abstract**

The challenges a new product and its development faces are diverse and choosing the right development process is not trivial. In almost every technical sector, but especially in the automotive sector, new products have to fulfil their intended task as efficiently as possible regarding the energy demand. To ensure this, new products are designed more and more borderline, for example no material should be "dragged through the area", which does not contribute to functional fulfillment. In addition, the performance requirements increase to a new product. However, even under these circumstances, the end-user may not experience any functional loss. Such a loss of function would, in the worst case, result in a product recall action, which normally results in a considerable damage to the manufacturer's image.

In order to harmonize the requirements energy efficiency and performance enhancement with the necessary functional safety, a method for the further development of existing systems based on the spatially high-resolution temperature distribution measurement is developed.

With the known measurement methods, it is difficult to achieve a further gain in knowledge, which is why the search was made for new measurement methods. The fiber-optic sensor technology showed a high potential, which was initially confirmed in a feasibility study. Subsequently, possible sources of errors were analyzed, whereby recommendations for the integration of the measuring technology in the system were derived. The applicability and the benefit of the temperature distribution measurement are shown on two different dry running friction pairings. For example, the potentials of the spatially high-resolution temperature distribution measurement for the optimization of dry-running coupling systems were demonstrated by analyzing and comparing the thermo-mechanical behavior under different stresses in order to targeted optimize the system behavior.

The focus of the work is on the description of the profitable application of the spatially high-resolution temperature distribution measurement as a tool for improving the system understanding. To this end, a method has been developed that allows the targeted shape optimization in the sense of the PGE – Product Generation Engineering.



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit. Während meiner Zeit am Institut hat er mich stets gefordert und gefördert, wodurch er mich maßgeblich in meiner fachlichen und persönlichen Weiterentwicklung positiv prägte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, Leiter des Bereiches Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung des wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Herrn Sascha Ott und Herrn Benoit Lorentz möchte ich für die mir übertragene Verantwortung, das mir entgegengebrachte Vertrauen und vor allem für das offene Ohr und die Unterstützung bei meiner Tätigkeit am IPEK danken, wodurch ich ebenfalls viel gelernt habe. Dem gesamten IPEK-Team möchte ich für die kollegiale und konstruktive Zusammenarbeit danken, insbesondere den aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Fasanengarten.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Allen voran meiner Frau, ohne die ich nicht derselbe wäre. Nur mit deiner Unterstützung war es möglich diese Arbeit zu schreiben. Und natürlich meinen Kindern, welche mir immer wieder gezeigt haben was wirklich wichtig ist im Leben. Meinen Eltern möchte ich danken für das, was sie mir mitgegeben und ermöglicht haben.

Jonas Kniel



„Ehe man eigene Kinder hat, hat man nicht die leiseste Vorstellung davon, welches Ausmaß die eigene Stärke, Liebe oder Erschöpfung annehmen kann.“

(Peter Gallagher)



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Forschung</b> .....	<b>3</b>
2.1	Produktentwicklungswerkzeuge .....	3
2.1.1	Problemlösemethoden .....	3
2.1.2	Funktionsgerechte Gestaltung technischer Systeme .....	6
2.1.3	Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess .....	10
2.1.4	Produktgenerationsentwicklung .....	13
2.2	Grundlagen fremdbetätigte schaltbare kraftschlüssige Kupplungen .....	15
2.2.1	Funktion und Wirkungsweise von Wellenkupplungen .....	16
2.2.2	Einteilung von Wellenkupplungen .....	16
2.2.3	Fremdbetätigte schaltbare kraftschlüssige Kupplungen .....	17
2.2.4	Thermische Auslegung von fremdbetätigten schaltbaren kraftschlüssigen Kupplungen .....	20
2.3	Technische Temperaturmessung .....	25
2.3.1	Übersicht Temperaturmesstechnik .....	26
2.3.2	Thermoelemente .....	29
2.3.3	Thermografie .....	33
2.3.4	Faseroptische Sensortechnik .....	36
2.4	Temperaturmessung in Reibkupplungen .....	44
2.4.1	Messung mit berührenden Messmethoden .....	44
2.4.2	Messung mit optischen Messmethoden .....	68
2.5	Zwischenfazit .....	80
<b>3</b>	<b>Motivation und Zielsetzung</b> .....	<b>83</b>
3.1	Motivation .....	83
3.2	Zielsetzung .....	84
3.2.1	Forschungsbedarf und -lücke .....	85
3.2.2	Forschungshypothesen .....	85
3.2.3	Forschungsfragen .....	86
3.2.4	Zielsetzung .....	87
<b>4</b>	<b>Forschungsansatz</b> .....	<b>89</b>
4.1	Testumgebung .....	89
4.2	Methodenentwicklung .....	90
4.3	Struktur der Arbeit .....	91
<b>5</b>	<b>Entwicklung der Temperaturverteilungsmessung</b> .....	<b>93</b>
5.1	Auswahl Messtechnik .....	93
5.1.1	S – Situationsanalyse .....	93
5.1.2	P – Problemeingrenzung .....	97

5.1.3	A - Alternative Lösungen .....	98
5.1.4	L – Lösungsauswahl .....	102
5.1.5	T – Tragweitenanalyse .....	104
5.1.6	E - Entscheiden und umsetzen.....	104
5.1.7	N - Nachbereiten und Lernen .....	114
5.2	Weiterentwicklung faseroptische Messtechnik .....	114
5.2.1	Eigenschaften und Kenndaten des Messgerätes .....	114
5.2.2	Analyse der Anpressplatte aus der Machbarkeitsstudie .....	115
5.2.3	Bewertung der Einflussgrößen auf die Temperaturmessung .....	118
5.3	Zwischenfazit .....	131
<b>6</b>	<b>Anwendung der Temperaturverteilungsmessung.....</b>	<b>134</b>
6.1	Trockenlaufende Reibpaarung organischer Reibbelag / Stahl.....	134
6.1.1	Versuchsaufbau .....	134
6.1.2	Vergleich von Sensorfaser- und Thermoelementtemperatur .....	137
6.1.3	Analyse unterschiedlicher Verschraubungssituationen.....	145
6.1.4	Analyse unterschiedlicher Reibleistungen .....	147
6.1.5	Analyse der Homogenität der Temperaturverteilung .....	149
6.2	Trockenlaufende Reibpaarung organischer Reibbelag / Guss.....	160
6.2.1	Versuchsaufbau .....	160
6.2.2	Analyse der reibaktiven Bereiche .....	161
6.3	Hochtemperaturmessung ohne Faserbeschichtung .....	166
6.4	Zwischenfazit .....	170
<b>7</b>	<b>Integration der Temperaturverteilung im C&amp;C<sup>2</sup>-Ansatz.....</b>	<b>172</b>
7.1	Analyse und Synthese anhand der Wirkkontaktfläche.....	172
7.2	Zwischenfazit .....	178
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>180</b>
8.1	Zusammenfassung .....	180
8.2	Ausblick .....	181
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>184</b>
	Betreute Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten .....	198
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>199</b>

## Formelzeichen

f	Hz	Frequenz in Hertz
$F_N$	N	Normalkraft
i	-	Übersetzung
J	kgm <sup>2</sup>	Trägheit
K	°K	Temperatur in Grad Kelvin
M	Nm	Drehmoment
n	1/min	Drehzahl pro Minute
p	N/mm <sup>2</sup>	Pressung, Druck
Q	J	Reib- / Schaltarbeit
$\dot{Q}$	W	Reib- / Schaltleistung
r	mm	Radius
t	s	Zeit in Sekunden
T	°C	Temperatur in Grad Celsius
U	V	Elektrische Spannung in Volt
v	m/s	(Gleit-) Geschwindigkeit
$\mu$	-	Reibungszahl
$\lambda$	W/m * K	Wärmeleitfähigkeit
$\omega$	rad/s	Winkelgeschwindigkeit



# 1 Einleitung

Neue Produkte sollen ihre Aufgaben immer möglichst effizient erfüllen, was dazu führt das diese immer grenzwertiger, also mit immer kleineren Sicherheitsreserven, ausgelegt werden. Für den Endkunden eines Kraftfahrzeuges zählt hinsichtlich einer konventionellen Anfahrkupplung jedoch rein die zuverlässige Funktionserfüllung<sup>2</sup>. Im Kano-Modell<sup>3</sup>, welches den Zusammenhang von Ausprägungsgrad einer Produkteigenschaft mit der Kundenzufriedenheit herstellt, kann die Funktion der Kupplung eines Kraftfahrzeugs als Basisfunktion eingeordnet werden. Die Funktionserfüllung wird als selbstverständlich vorausgesetzt. Das bedeutet ein Kunde wird durch diese Funktion nicht begeistert werden, jedoch wird sich bei Nichterfüllung sofort Unzufriedenheit einstellen.<sup>2</sup> Deshalb ist die Robustheit bzgl. der Funktionserfüllung weiterhin das wichtigste Entwicklungsziel, welches oft mit großen Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung gewährleistet wird. Dies widerspricht jedoch der angestrebten möglichst grenzwertigen Auslegung.

Im Sinne der PGE - Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS ET AL.<sup>4</sup> geht es somit darum, im Zuge der Neu- und Weiterentwicklung die Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung zu reduzieren. Konkret bedeutet dies für die Kupplung eine Leistungssteigerung im selben Bauraum oder das Realisieren derselben Leistungsfähigkeit auf kleinerem Bauraum. Diesem Spannungsfeld aus möglichst effizientem und gleichzeitig robustem System ist der Produktentwickler ausgesetzt. Seine Aufgabe kann der Entwickler dann erfolgreich meistern, wenn er das entsprechend umfangreiche Systemverständnis besitzt oder sich dieses sich durch geeignete Analysemethoden erarbeiten kann.

Eine wichtige Anwendungsgrenze bei Anfahrkupplungen ist die Maximaltemperatur, bei welcher die angedachte Funktion noch erfüllt wird. Zur Analyse der räumlich verteilten Temperaturentwicklung gibt es aktuell keine Messmethode, welche in ausreichender räumlicher Auflösung die Verteilung der Temperatur eines Kupplungssystems erfassen kann. Deshalb beschäftigt sich die vorliegende Arbeit am Beispiel trockenlaufender Kupplungen mit der Entwicklung und Anwendung einer Messmethode zur räumlich hochauflösenden Erfassung der Temperaturverteilung nahe dem Reibkontakt. Aus der Analyse des Verhaltens der Temperaturverteilung wird das Systemverständnis erweitert und auf Basis dessen gezielte Optimierungs-

---

<sup>2</sup> Albers; Ott, 2015

<sup>3</sup> Marx, 2014

<sup>4</sup> Albers et al., 2015c

Maßnahmen abgeleitet. Die Durchführung von zielgerichteten Anpassungen ermöglicht es, letztlich effiziente und gleichzeitig robuste Produkte zu entwickeln.

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen und den Stand der Forschung, auf welchem die vorliegende Arbeit aufbaut.

Zuerst werden in Abschnitt 2.1 die verwendeten Produktentwicklungswerkzeuge beschrieben. In Abschnitt 2.2 wird auf das im Weiteren untersuchte technische System, eine trockenlaufende Reibkupplung, eingegangen. Die Grundlagen zur technischen Temperaturmessung werden in Abschnitt 2.3 erläutert, um abschließend in Abschnitt 2.4 auf den Stand der Forschung der Temperaturmessung in Reibkupplungen einzugehen. Ein Zwischenfazit zum Stand der Forschung wird in Abschnitt 2.5 gezogen.

### 2.1 Produktentwicklungswerkzeuge

Bei einer Produktentwicklung geht es nicht nur wie in Kapitel 1 beschrieben um eine möglichst grenzwertige und zugleich robuste Auslegung, es sind noch einige andere Faktoren zu beachten, damit sich das Produkt erfolgreich am Markt durchsetzt. Hierfür ist eine ganzheitliche Planung des Entwicklungsprozesses und der Einsatz von Produktentwicklungswerkzeugen unabdingbar. EBEL beschreibt dies wie folgt: „Produktentstehungsprozesse müssen zum Ziel haben, mit der immanenten Komplexität und Unsicherheit heutiger Produktentstehung erfolgreich umzugehen und damit Produkte hervorzubringen, die im Markt erfolgreich sind. Hierzu müssen individuelle Problemlösungsprozesse und Aktivitäten auf Entwicklungsebene ebenso berücksichtigt werden, wie die übergeordnete Planung und Steuerung ganzer Entwicklungsprojekte auf Managementebene mittels Phasen und Meilensteinen. Nur durch eine ganzheitliche Betrachtung von Aktivitäten und Phasen, den zugrundeliegenden Zielen und resultierenden Objekten sowie der Vernetzung all dieser Elemente, können heutige, stark iterativ verlaufende Produktentstehungsprozesse abgebildet und damit geplant und gesteuert werden.“<sup>5</sup>

Im Folgenden wird auf spezielle Produktentwicklungswerkzeuge näher eingegangen, da diese Werkzeuge für die vorliegende Arbeit Relevanz haben.

#### 2.1.1 Problemlösemethoden

Aus Sicht eines Konstrukteurs beschreibt SAUER ET AL. die Notwendigkeit von Problemlösemethoden wie folgt: „Konstruieren bedeutet (...) auch, eine Aufgabe oder ein Problem zu lösen. Dabei unterscheiden sich die beiden Begriffe dadurch, dass bei

---

<sup>5</sup> Ebel, 2015, S. 56

einem Problem die Lösung nicht bekannt ist und auch nicht direkt mit bekannten Mitteln erreicht werden kann.“<sup>6</sup> Um Problemen fachgerecht und effizient zu begegnen, benötigt man eine systematische Vorgehensweise und geeignete Arbeitstechniken.

Bekannte Problemlösemethoden sind zum Beispiel die VDI 2221<sup>7</sup>, das TOTE-Schema<sup>8</sup>, der allgemeine Problemlösungsprozess nach PAHL ET AL.<sup>9</sup> und der Vorgehens- und Systemanalysezyklus nach EHRENSPIEL<sup>10</sup>. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurde die SPALTEN-Methode verwendet, welche im Folgenden Abschnitt näher beschrieben wird.

#### 2.1.1.1 SPALTEN

SPALTEN ist eine universell einsetzbare Methodik zur Problemlösung, sowohl von technischen sowie nichttechnischen Problemen. Ein Problem ist hierbei die Abweichung zwischen dem beliebig unbekanntem IST-Zustand und einem gewünschten beliebig vagen SOLL-Zustand, wobei der Weg vom IST- zum SOLL-Zustand zumindest teilweise unbekannt ist. Der Mensch neigt zu lösungsorientiertem Denken und Handeln, wodurch oft die erstbeste Lösung umgesetzt wird, nicht aber die Beste. Die Problemlösungsmethodik SPALTEN wirkt dem entgegen, indem der Problemlöser einer vorgegebenen chronologischen Reihenfolge folgt und so die vorschnelle Auswahl einer Lösung verhindert wird.<sup>11</sup>

---

<sup>6</sup> Sauer et al., 2008b, S. 7

<sup>7</sup> VDI 2221, 1993

<sup>8</sup> Pahl et al., 2007, 358 ff.

<sup>9</sup> vgl. Pahl et al., 2007

<sup>10</sup> vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm, 2013

<sup>11</sup> vgl. Albers et al., 2016g

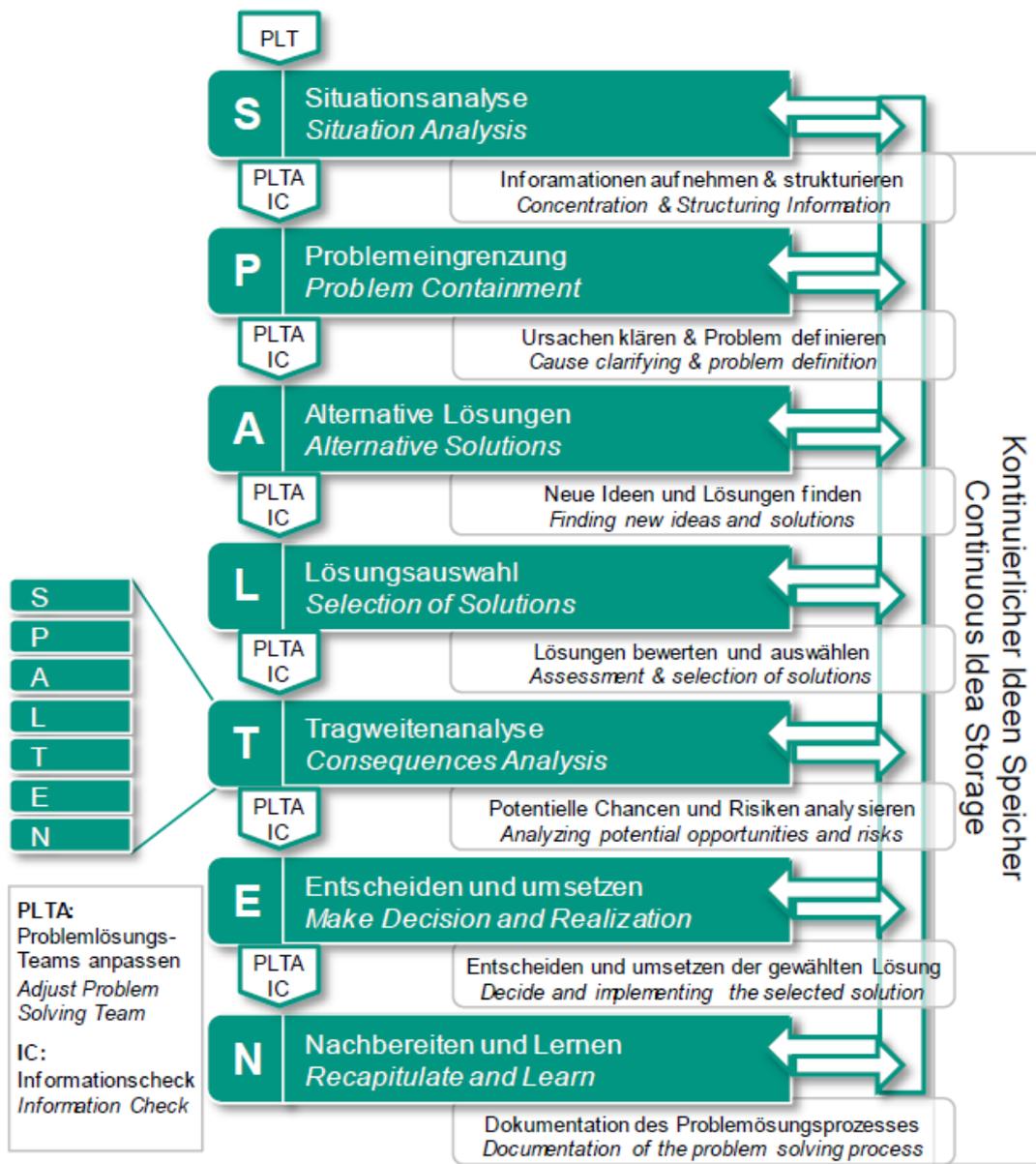


Abbildung 2.1 Bedeutung des Akronyms SPALTEN<sup>12</sup>

Diese Reihenfolge an Arbeitsschritten wird mit dem Akronym SPALTEN beschrieben. Die Bedeutung der einzelnen Buchstaben von SPALTEN wird in Abbildung 2.1 ausgeführt. Die Methode SPALTEN ist fraktal und somit für Probleme in jeglichem Abstraktionsgrad anwendbar. Beispielsweise ist in Abbildung 2.1 dargestellt, dass der Schritt T-Tragweitenanalyse wiederum durch eine SPALTEN-Methode bearbeitet werden kann. Das heißt, dass zu Beginn des Schrittes T-Tragweitenanalyse eine Situationsanalyse durchgeführt werden muss, welche zum Beispiel analysiert ob für die Tragweitenanalyse alle nötigen Informationen vorliegen. Zu Beginn des SPALTEN-Prozesses und vor jedem Schritt muss ein geeignetes Problemlösungsteam (PLT) zusammengestellt und ein Informationscheck (IC)

<sup>12</sup> Albers et al., 2016g

durchgeführt werden. Eine Anpassung des Problemlösungsteams kann daher sinnvoll sein, da die einzelnen Schritte unterschiedliche Kompetenzen erfordern können. Genauso ist es aber auch möglich, dass das Problemlösungsteam aus nur einer Person besteht. Während des kompletten SPALTEN-Prozesses wird ein kontinuierlicher Ideenspeicher (KIS) gepflegt. Dieser dient dazu, aufkommende Ideen in jeglicher Form kontinuierlich zu speichern. Dies ist zum einen darin begründet, dass die meisten Ideen nicht während der Ideenphase entstehen und zum anderen, dass es dem einzelnen Anwender dabei hilft nicht direkt in den Schritt A-Alternative Lösungen zu springen. Dies ist vor allem bei den Schritten S-Situationsanalyse und P-Problemeingrenzung hilfreich, da man nach dem Ablegen der Idee leichter wieder objektiv zurückkehren kann zur Situationsanalyse oder der Problemeingrenzung.<sup>13 14</sup>

### 2.1.2 Funktionsgerechte Gestaltung technischer Systeme

Nachdem im Produktentwicklungsprozess die Funktionen des zu entwickelnden Produktes spezifiziert worden sind, geht es im nächsten Schritt darum diese Funktion gestalterisch zu realisieren. Hierbei helfen dem Konstrukteur verschiedene Werke zur Konstruktionslehre, wie zum Beispiele SAUER ET AL.<sup>15</sup>, PAHL ET AL.<sup>16</sup>, ROTH<sup>17</sup>, HUBKA<sup>18</sup> und BIRKHOFFER<sup>19</sup> oder der C&C<sup>2</sup>-Ansatz<sup>20</sup>. ALBERS UND MATTHIESEN beschreiben den Bedarf, welcher zur Entwicklung des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes geführt hat, wie folgt: „Die Suche nach Lösungsprinzipien zur Erfüllung einer Produktfunktion wird konstruktionsmethodisch von vielen Methoden unterstützt. Damit die Funktion Letztendlich vom Produkt erfüllt werden kann, muss das Produkt funktionsgerecht gestaltet werden. Der Schritt vom Lösungsprinzip zur konstruktiven Gestalt des zu entwickelnden Produkts stellt häufig die größten Herausforderungen an den Produktentwickler. Der Zusammenhang von Gestalt und Funktion wird konstruktionsmethodisch von einigen Autoren betrachtet. (...) Aufgrund der Zurückführung jeglicher technischer Funktion auf die Interaktionen im Wirkflächenpaar und der sich daran anschließenden Leitstützstruktur entsteht ein eindeutiges und leistungsfähiges Vorgehenskonzept für die Gestaltdefinition unter allen Randbedingungen und unter Einbezug der Systemumgebung.“<sup>21</sup>

---

<sup>13</sup> vgl. Albers et al., 2016g

<sup>14</sup> vgl. Albers WS 2011/2012

<sup>15</sup> vgl. Sauer et al., 2008b & Sauer et al., 2006a

<sup>16</sup> vgl. Pahl et al., 2007

<sup>17</sup> vgl. Roth, 2000

<sup>18</sup> vgl. Hubka, 1984

<sup>19</sup> vgl. Birkhofer, 1980

<sup>20</sup> vgl. Albers; Wintergerst, 2014

<sup>21</sup> Albers; Matthiesen, 2002, S. 55

### 2.1.2.1 C&C<sup>2</sup>-Ansatz - Contact and Channel Approach

Der Contact and Channel Approach (C&C<sup>2</sup>-Ansatz) ist eine Methode zur Analyse und Synthese von technischen Systemen. Der C&C<sup>2</sup>-Ansatz basiert auf der Feststellung von ALBERS UND MATTHIESEN<sup>22</sup>, dass eine Wirkfläche alleine keine Funktion erfüllen kann. Für die Funktionserfüllung sind immer zwei Komponenten notwendig, welche in Interaktion miteinander sind und somit einen Energie-, Material- und Informationsfluss ermöglichen. Der Schlüssel zum Systemverständnis, welches für eine erfolgreiche Produktentwicklung unabdingbar ist, ist die beschreibbare Verknüpfung von Gestalt und Funktion. Der C&C<sup>2</sup>-Ansatz ermöglicht die Beschreibung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs eines technischen Systems auf beliebigem Abstraktionslevel, indem das System in beliebig viele Teilsysteme aufgeteilt wird, um die zugehörigen Funktionen zu beschreiben.<sup>23</sup>

Für die Funktionsbeschreibung sind die Elemente Wirkflächenpaar (WFP), Leitstützstruktur (LSS) und Connector (C) notwendig, welche in ALBERS ET AL.<sup>24</sup> wie folgt definiert sind:

„**Wirkflächenpaare** (WFP) werden gebildet aus zwei Wirkflächen, die in Wirkkontakt (WK) stehen, d.h. in denen Energie, Stoff und/oder Informationen zu einem bestimmten Betrachtungszeitpunkt übertragen werden. Wirkflächen sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise im Wirkkontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen.“<sup>25</sup>

„**Leitstützstrukturen** (LSS) sind gestaltungsrelevante Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzten Räumen, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und eine Leitung von Stoff, Energie oder Information zwischen den Wirkflächenpaaren eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes ermöglichen. Eine Leitstützstruktur kann sich abhängig vom Detaillierungsgrad der Modellbildung über Systeme oder Subsysteme hinweg erstrecken. Leitstützstrukturen existieren gemeinsam mit den zugehörigen Wirkflächenpaaren ausschließlich im Zeitraum der Funktionserfüllung.“<sup>25</sup>

„**Connectoren** (C) integrieren die wirkungsrelevanten Eigenschaften, die außerhalb des Betrachtungsbereichs liegen, in die Systembetrachtung. Connectoren sind eine für die Beschreibung der betrachteten Funktion relevante Abstraktion der Systemumgebung. Sie haben eine repräsentative Wirkfläche und ein damit

---

<sup>22</sup> vgl. Albers; Matthiesen, 2002

<sup>23</sup> vgl. Albers; Wintergerst, 2014

<sup>24</sup> vgl. Albers et al., 2016b

verknüpftes Modell der relevanten Systemumgebung. Sie liegen nicht im betrachteten System und somit nicht im Gestaltungsraum.“<sup>26</sup>

Da in einem technischen System in einem bestimmten Zustand oft nur einzelne Wirkflächen ein Wirkflächenpaar bilden, werden die für diesen Zustand aktiv an der Funktionserfüllung beteiligten physischen Strukturen als sogenanntes **Wirk-Netz** (WN) bezeichnet. Alle möglichen Wirk-Netze zusammengenommen bilden die sogenannte **Wirk-Struktur** (WS). Zum Beispiel sind bei einem Zahnradpaar zu einem bestimmten Zeitpunkt immer nur eine kleine Anzahl an Wirkflächen aktiv an der Funktionserfüllung beteiligt. Alle Wirkflächen auf den Zahnradern zusammen sind die Wirk-Struktur des Systems, da bei sich drehenden Zahnradern über fortschreitende Zeit die einzelnen Wirkflächen nacheinander zum Wirk-Netz gehören.<sup>26</sup>

In Abbildung 2.2 ist beispielhaft der Gestalt-Funktions-Zusammenhang eines Kugellagers mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes beschrieben und anhand von einem Minimalmodell und einem Modell mit erhöhter Detailtiefe der fraktale Charakter des Ansatzes aufgezeigt. Auf der linken Seite der Abbildung werden die Grundbausteine der Gestalt zugeordnet, auf der rechten Seite wird die Funktion beschrieben. Im Minimalmodell verbindet das Kugellager mit einem WFP Welle/Lager über das Lager als LSS hin zum WFP Lager/Gehäuse die Welle mit dem Gehäuse. Betrachtet man nun das Kugellager mit erhöhter Detailtiefe, taucht das WFP Lagerinnenring/Kugel und das WFP Kugel/Lageraußenring zusätzlich auf.<sup>25</sup>

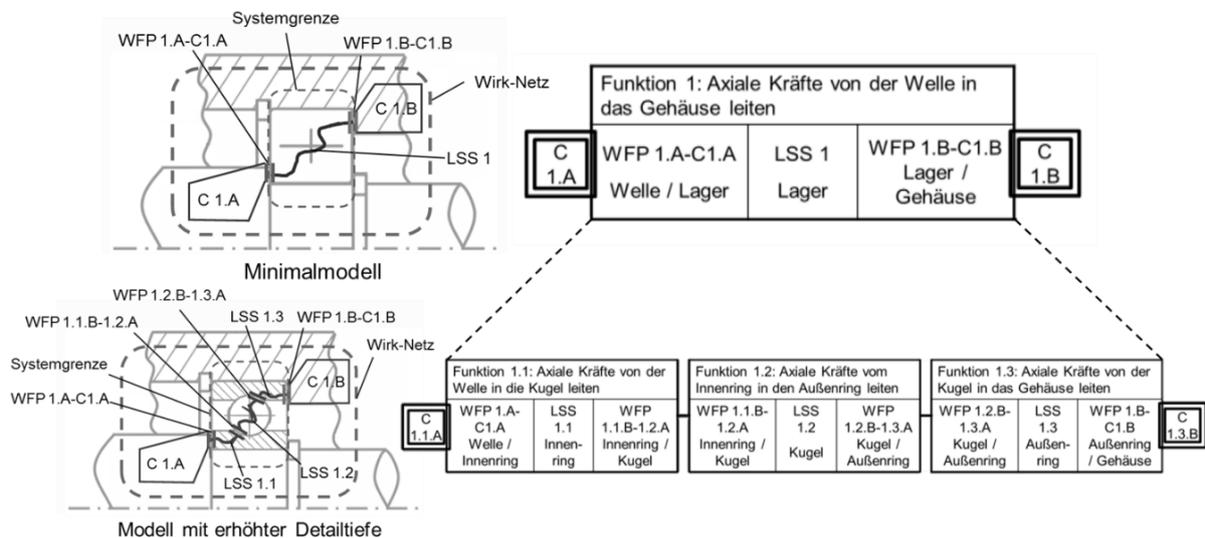


Abbildung 2.2 Beschreibung eines Kugellagers mit Hilfe des C&C<sup>2</sup>-Ansatzes<sup>26</sup>

<sup>25</sup> vgl. Albers et al., 2016b

<sup>26</sup> Albers et al., 2016b, S. 3

Um zum einen den Wissenstransfer mittels C&C<sup>2</sup>-Modellen und zum anderen die Nachverfolgbarkeit von Energie-, Material- und Informationsfluss zu optimieren, wurde die Beschreibung der Funktion wie in Abbildung 2.3 abgebildet erweitert.<sup>27</sup>

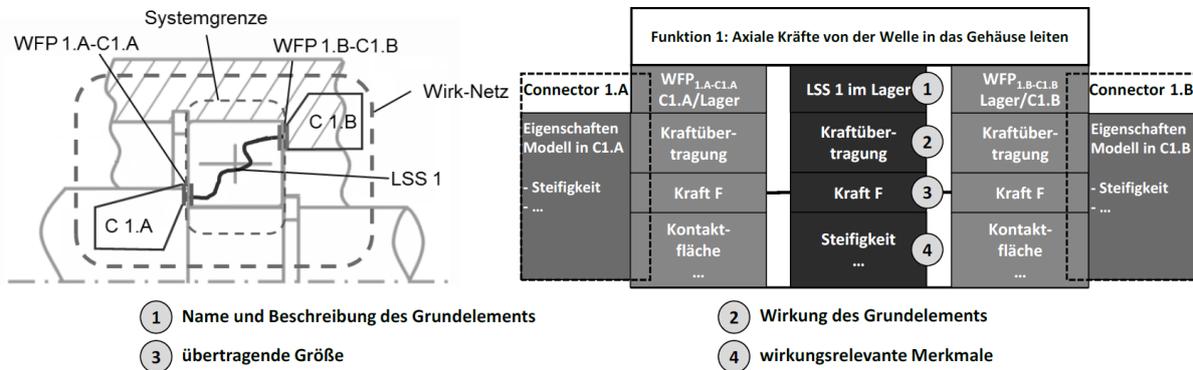


Abbildung 2.3 Formalisierung der Funktionsbeschreibung<sup>28</sup>

Zur Unterstützung der Synthese von neuen Produkten wird in ALBERS ET AL.<sup>29</sup> beschrieben, wie Versuchsergebnisse in ein C&C<sup>2</sup>-Modell integriert werden können. Dabei ist das Ziel für das vereinfachte, angenommene WFP, die tatsächlichen Wirkkontakte in diesem WFP zu ermitteln und zu visualisieren. Dies hilft dem Entwickler bei der zielgerichteten Weiterentwicklung seines Produktes, da er die Information hinsichtlich Position, Fläche und Verteilung der Wirkkontakte nutzen kann. In Abbildung 2.4 ist der beschriebene Vorgang graphisch aufbereitet.

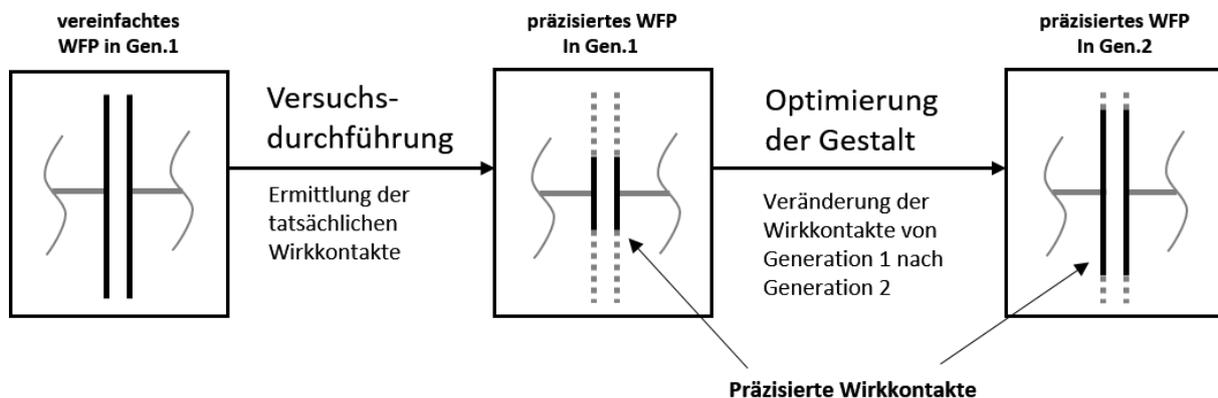


Abbildung 2.4 Unterstützung der Synthese mittels Integration von Versuchsdaten<sup>30</sup>

<sup>27</sup> vgl. Albers et al., 2016b

<sup>28</sup> Albers et al., 2016b, S. 5

<sup>29</sup> Albers et al., 2016b, S. 5 f

<sup>30</sup> Albers et al., 2016b, S. 6

### 2.1.3 Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess

Zuerst soll der Unterschied zwischen Verifikation und Validation dargelegt werden. In der VDI 2206 sind die beiden Begriffe wie folgt definiert:

„Verifikation meint allgemein den Nachweis der Wahrheit von Aussagen. Übertragen auf technische Systeme ist hierunter die Überprüfung zu verstehen, ob eine Realisierung (z.B. ein Software-Programm) mit der Spezifikation (in diesem Fall mit der Algorithmenbeschreibung) übereinstimmt. Bei der Überprüfung der Gültigkeit eines Programms wird auch von der Programmverifikation gesprochen. Die Verifikation wird im Allgemeinen formal realisiert. Umgangssprachlich ist die Verifikation die Beantwortung der Frage: Wird ein korrektes Produkt entwickelt?“<sup>31</sup>

„Validierung meint ursprünglich die Gültigkeitsprüfung einer Messmethode in der empirischen Sozialforschung, das heißt inwieweit die Testresultate tatsächlich das erfassen, was durch den Test bestimmt werden soll. Übertragen auf technisch Systeme ist hierunter die Prüfung zu verstehen, ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt. Hier geht die Erwartungshaltung der Fachexperten und des Anwenders ein. Die Validierung beinhaltet z.B. die Prüfung, ob die Beschreibung eines Algorithmus mit dem zu lösenden Problem übereinstimmt. Sie ist im Allgemeinen nicht formal durchzuführen. Umgangssprachlich ist die Validierung die Beantwortung der Frage: Wird das richtige Produkt entwickelt?“<sup>32</sup>

Die Validierung ist nach ALBERS ET AL. eine zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess, welche sicherstellen muss, dass ein System die angedachten Funktionen vollumfänglich erfüllt.<sup>33</sup> „Dabei ist der Grundgedanke, dass durch eine kontinuierliche Validierung im Entwicklungsprozess ein steter Abgleich zwischen den Zielen und Zwecken des Produktes sowie dem jeweils erreichten Entwicklungsstand durchgeführt wird. So verstanden, steuert die Validierungsaktivität den kompletten Produktentstehungsprozess (...).“<sup>34</sup>

Wie die Validierung im Produktentstehungsprozess methodisch unterstützt werden kann, wird von KLINGLER wie folgt beschrieben: „Je nach Entwicklungsphase und damit Reifegrad des zu entwickelnden technischen Systems werden unterschiedliche Validierungsmethoden/-ansätze eingesetzt. Dies reicht von reinen *Model-in-the-Loop-Verfahren* (MiL) meist in sehr frühen Phasen der Entwicklung bis hin zu realen

---

<sup>31</sup> VDI 2206, 2004, S. 38

<sup>32</sup> VDI 2206, 2004, S. 39

<sup>33</sup> Albers et al., 2016f, 541 ff.

<sup>34</sup> Albers et al., 2016f, S. 541

Fahrversuchen im Falle der Fahrzeugentwicklung kurz vor Serienstart. Dazwischen finden je nach Teilsystem und Integrationsebene *Software-in-the-Loop- und Hardware-in-the-Loop-Verfahren (SiL und HiL) Anwendung (...)*.<sup>35</sup> KRIMMEL ET AL. haben dies in Abbildung 2.5 visualisiert.

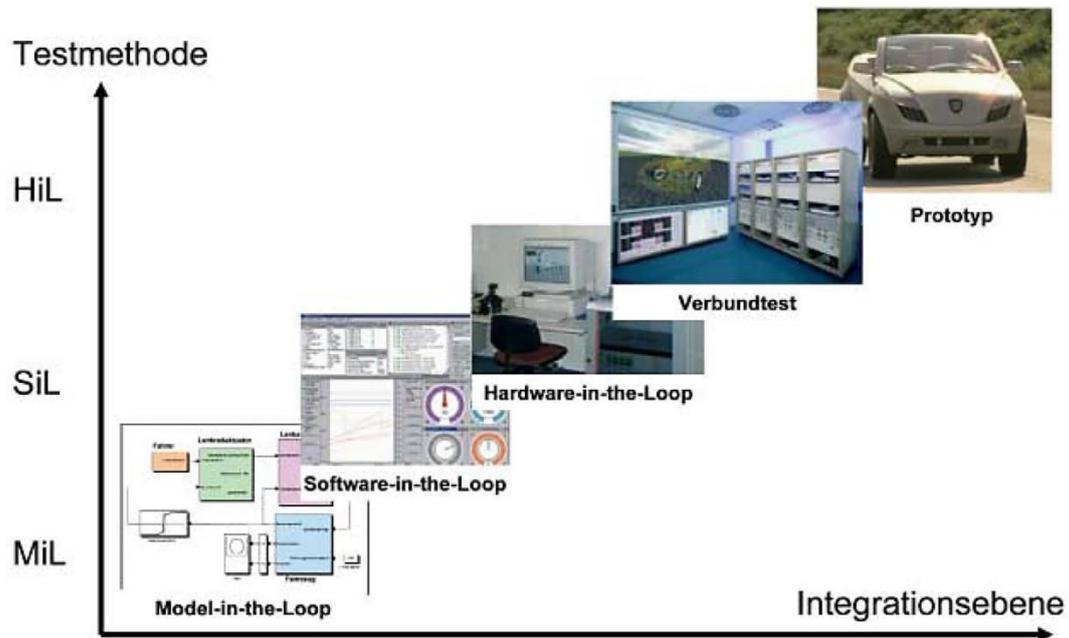


Abbildung 2.5 Einordnung Validierungsansätze zur Integrationsebene<sup>36</sup>

### 2.1.3.1 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz

Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz führt die zuvor vorgestellten Validierungsansätze in einem ganzheitlichen Ansatz zusammen. ALBERS ET AL. beschreiben dies wie folgt: „Der IPEK-X-in-the-Loop-(IPEK-XiL)-Ansatz (...) greift diese etablierten Ansätze auf, integriert die jeweiligen Vorteile und erweitert diese konsequent um die Belange der Mechanik bzw. Mechatronik sowie der Entwickler aus unterschiedlichen Fachdisziplinen. Somit beschreibt der IPEK-XiL-Ansatz das grundlegende Verständnis in der Validierung eines Teilsystems, dieses in das Gesamtsystem, die Umwelt und auch evtl. weitere interagierende Systeme wie bspw. den Fahrer einzubinden.“<sup>37</sup> Am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung ist dies in Abbildung 2.6 dargestellt.<sup>38</sup>

<sup>35</sup> Klingler, 2017, 22 f.

<sup>36</sup> Krimmel et al., 2006

<sup>37</sup> Albers et al., 2016f, S. 559

<sup>38</sup> vgl. Albers et al., 2016f



Abbildung 2.6 Anwendung des IPEK-X-in-the-loop-Ansatz auf die Antriebsstrangentwicklung<sup>39</sup>

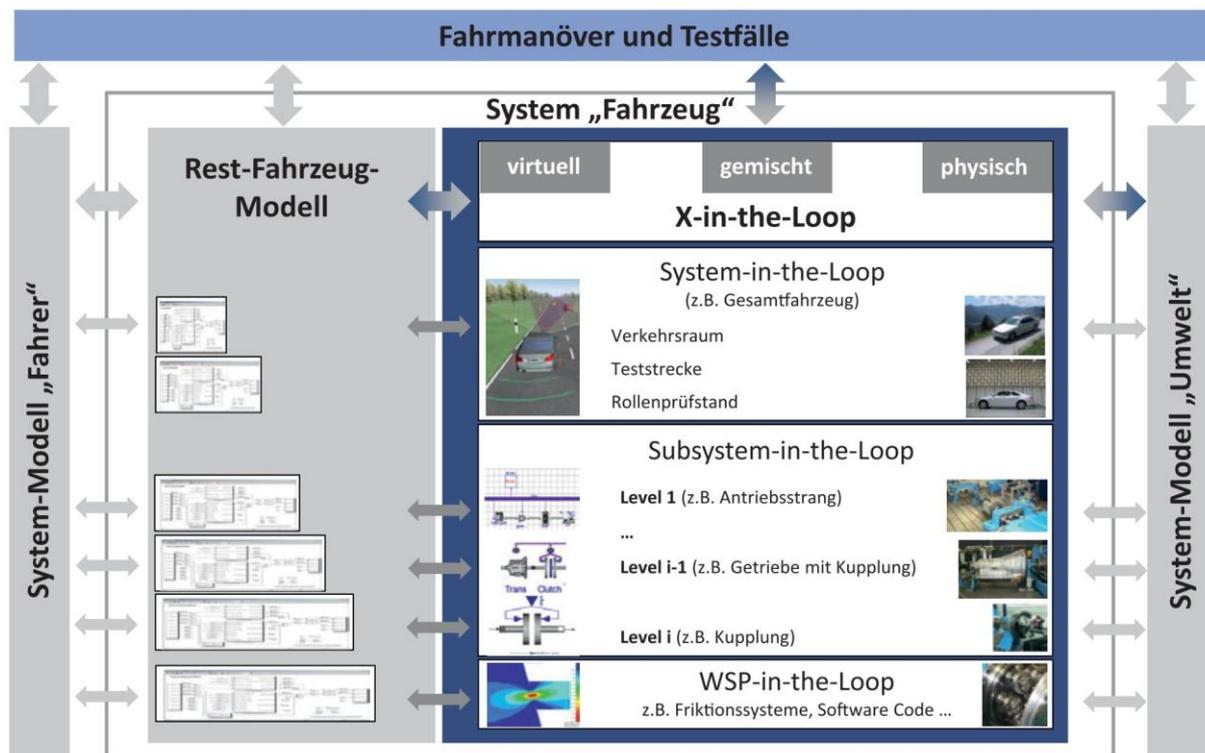
Der IPEK-XiL-Ansatz beschreibt somit, dass ein Teilsystem nur eingebettet im Gesamtsystem validiert werden kann. Dazu müssen auch die Wechselwirkungen der Umgebung und aller interagierenden Systeme, welche Connected Systems genannt werden, modelliert werden, sobald diese Rückwirkung auf das zu untersuchende Teilsystem haben könnten. Die Connected Systems können sowohl virtuell oder physisch eingebunden werden, was im Einzelfall unter Berücksichtigung des Validierungsziels entschieden werden muss. Die unterschiedlichen Systeme, Test-Ausprägungen und System-ebenen des betrachteten Teilsystems spannen das IPEK-X-in-the-Loop-Framework (XiL-Framework) auf, siehe Abbildung 2.7. Der Buchstabe „X“ steht dabei für das physische und/oder virtuelle (Teil)-System, auf welchem das Augenmerk der Validierungsaktivität liegt. Dies ist aus Sicht des Produktentwicklers meistens das (Teil)-System, welches er verantwortet und wird im Kontext des XiL-Ansatzes auch als System-in-Development (SiD) bezeichnet.<sup>40</sup>

Die Validierungsaktivität findet immer in einer Testumgebung statt, wobei die Testumgebung in der KaSPRO - Karlsruher Schule für Produktentwicklung wie folgt definiert ist: „Eine Testumgebung beinhaltet die Gesamtheit aller physischen und virtuellen Modelle bzw. Originale, die notwendig sind, um einen oder mehrere Testfälle durchzuführen und das erwartete Systemverhalten zu erfassen.“<sup>41</sup>

<sup>39</sup> Albers et al., 2016f, S. 559

<sup>40</sup> vgl. Albers et al., 2016f

<sup>41</sup> IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2017

Abbildung 2.7 IPEK-X-in-the-Loop-Framework<sup>42</sup>

## 2.1.4 Produktgenerationsentwicklung

Kein Produkt wird von Grund auf neu entwickelt, sondern aus wirtschaftlichen Gründen mit möglichst geringem Anpassungsanteil aus Referenzprodukten und/oder etablierten Lösungen heraus entwickelt. Deshalb wurde von ALBERS ET AL. ein Ansatz zur Beschreibung der Produktgenerationsentwicklung entwickelt, welcher nachfolgend näher beschrieben wird.<sup>43</sup>

### 2.1.4.1 PGE - Produktgenerationsentwicklung

Die Forschung zur Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS ET AL.<sup>44</sup> ist eine zentrale Aktivität am IPEK - Institut für Produktentwicklung und wird Forschungsfeld übergreifend vorangetrieben. „Als Produktgenerationsentwicklung wird die Entwicklung technischer Produkte verstanden, die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmevariation (ÜV) als auch durch eine Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist. Darin eingeschlossen sind sowohl die Entwicklung einer neuen Produktgeneration, als auch deren Derivate bzw. Varianten. Die Anteile technischer Neuentwicklungen einzelner Funktionseinheiten können sowohl durch die Aktivität Gestaltvariation (GV) als auch durch die Variation von Lösungsprinzipien – im Folgenden als Aktivität Prinzipvariation (PV) bezeichnet – erfolgen. Neue

<sup>42</sup> Albers et al., 2016f, S. 560

<sup>43</sup> vgl. Albers et al., 2015c

<sup>44</sup> Albers et al., 2015c

Produktgenerationen basieren immer auf Referenzprodukten, die große Bereiche der grundsätzlichen Struktur vorgeben. Als Referenzprodukt wird ein Vorgänger- oder ein Wettbewerbsprodukt verstanden, auf dessen Grundlage die Entwicklung einer neuen Produktgeneration angegangen werden soll. Durch die Neuentwicklungsanteile einer neuen Produktgeneration sollen Differenzierungsmerkmale zum Referenzprodukt erzielt werden.“<sup>45</sup>

Dabei besteht eine neue Produktgeneration aus der Menge aus der drei möglichen Variationsanteilen, welche wie folgt beschrieben werden:

- *Übernahmevariationsanteil (ÜV)*: Teilsysteme des neuen Produktes, welches ohne, oder mit möglichst geringen Anpassungen aus der vorhergehenden Produktgeneration übernommen werden kann
- *Gestaltvariationsanteil (GV)*: Teilsysteme des neuen Produktes, welches durch Gestaltvariation weiterentwickelt worden sind
- *Prinzipvariationsanteil (PV)*: Teilsysteme des neuen Produktes, welches mittels Prinzipvariation weiterentwickelt worden sind

Die neue Produktgeneration  $G_{n+1}$  setzt sich aus einer Menge an Teilsystemen (TS) zusammen und wird nach ALBERS ET AL.<sup>46</sup> mathematisch wie folgt beschrieben werden:

$$G_{n+1} = \dot{U}S_{n+1} \cup GS_{n+1} \cup PS_{n+1} \quad (1)$$

Beispiele für die Produktgenerationsentwicklung sind in Abbildung 2.8 dargestellt.

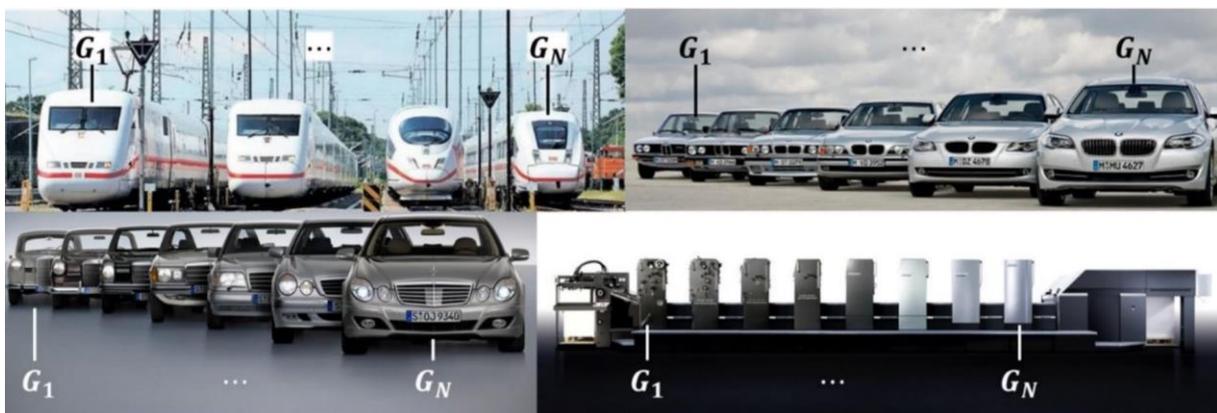


Abbildung 2.8 Beispiele der PGE<sup>47</sup>. ICE der Deutschen Bahn, 5er Reihe der BMW AG, E-Klasse der Daimler AG, Druckmaschinen der Heidelberger Druckmaschinen AG

Der Nutzen der Produktgenerationsentwicklung ist in ALBERS ET AL. wie folgt beschrieben: „Auf Grundlage der Variationsanteile können künftige Entwicklungsprozesse geplant, kontrolliert und gesteuert werden. Um ein Produkt mit möglichst großer Innovationsfähigkeit bei begrenztem technischem und

<sup>45</sup> Albers et al., 2015c, S. 4

<sup>46</sup> vgl. Albers et al., 2015c, S. 5

<sup>47</sup> Albers et al., 2016d, S. 7

wirtschaftlichem Risiko zu entwickeln, ist es sinnvoll, Basisattribute durch die mit wenigen Änderungen verbundene Übernahme betreffender Teilsysteme in neue Produktgenerationen zu erfüllen während der Großteil vorhandener Mittel für die Entwicklung von Leistungs- und Begeisterungsattributen zur Differenzierung eingesetzt wird (...). Im Gegensatz dazu, dass sich dem Gebiet des Innovationsmanagements zuzurechnende Forschungsarbeiten hauptsächlich mit der Verwendung neuer Lösungsprinzipien beschäftigen, macht die GV den Hauptteil der Produktentwicklungsaktivitäten aus. Im Vergleich zur Neuentwicklung, die mit PV beginnt, ist dieser Vorgang jedoch nicht weniger komplex oder Kreativität fordernd. Vielmehr können die Resultate genauso inventiv und innovativ sein. (...) Große Innovationspotentiale durch PGE mit bedeutenden GV-Anteilen finden sich z.B. in vielen Beispielen aus dem Bereich des Leichtbaus<sup>48</sup>.

Als Fazit aus einer Fallstudie zur Produktgenerationsentwicklung des Zweimassenschwungrades (ZMS)<sup>49</sup> wurde festgehalten, dass ein hoher Anteil von Prinzipvariation bei der PGE ein hohes Entwicklungsrisiko mit sich bringt. Die Gestaltvariation stellte im Allgemeinen auch eine komplexe Herausforderung bei der Entwicklung dar. Jedoch kann bei der Gestaltvariation die Validierung der neuen Systeme auf Basis vorhandenen Wissens durchgeführt werden kann, wodurch ein geringeres Risiko besteht als bei der Prinzipvariation. Zusätzlich wurde festgestellt, dass immer dann ein erhöhtes Risiko vorliegt, wenn das angewendete Prinzip für den Entwickler neu ist. Die Produktgenerationsentwicklung muss also auch immer im Kontext des Wissens des Entwicklers betrachtet werden.<sup>50</sup>

## **2.2 Grundlagen fremdbetätigte schaltbare kraftschlüssige Kupplungen**

Wellenkupplungen im Allgemeinen stellen das wichtigste Verbindungselement in der Antriebstechnik dar. Das Einsatzgebiet reicht vom Fahrzeugbau, Industrieanlagen und gewerblich nutzbaren Anlagen bis hin zu handgeführten mechanischen und elektrischen Geräten sowie Haushaltsgeräten. Sie werden als Anfahr- und Schaltkupplungen eingesetzt, als Sicherheitskupplung, als Ausgleichkupplung oder als Freilauf.<sup>51</sup> Eine fremdbetätigte schaltbare kraftschlüssige Kupplung ist eine bestimmte Art von Wellenkupplungen, welche wie im Weiteren ausgeführt zum Beispiel als Anfahrkupplung in Kfz eingesetzt wird. Nachfolgend wird dieser Kupplungstyp in die Wellenkupplungen eingeordnet und der Aufbau und die thermische Auslegung näher beschrieben.

---

<sup>48</sup> Albers et al., 2016d, S. 7

<sup>49</sup> Albers et al., 2016e, S. 796

<sup>50</sup> vgl. Albers et al., 2016d, S. 9 ff

<sup>51</sup> Sauer et al., 2006a, 281 ff.

## 2.2.1 Funktion und Wirkungsweise von Wellenkupplungen

Alle Wellenkupplungen haben dieselben beiden Grundfunktionen. Verbinden von Wellenelementen und die Übertragung von Leistung in Form von Drehmoment und Drehzahl. Zusätzlich können Wellenkupplungen, je nach Ausführung, unterschiedliche Zusatzfunktionen übernehmen. Dies wären zum Beispiel die Zusatzfunktionen „Schaltbarkeit“, „Ausgleich von Wellenversatz“ oder die Beeinflussung der Dynamik des Triebstranges durch das Übertragungsverhalten der Kupplung.<sup>52</sup>

Für die Grundfunktion der Übertragung von Energie stehen drei mögliche Wirkprinzipien zur Verfügung. Mittels Kraft-, Form- oder Stoffschluss kann die Grundfunktion erfüllt werden. Auch eine Kombination dieser Wirkprinzipien ist möglich, wie z.B. bei Synchronisierungen eines mechanischen Schaltgetriebes, welches für den Drehzahlgleich den Kraftschluss verwendet, die eigentliche Kraftübertragung bei Drehzahlgleichheit wird durch einen Formschluss realisiert.<sup>52</sup>

## 2.2.2 Einteilung von Wellenkupplungen

Prinzipiell werden Wellenkupplungen nach Abbildung 2.9 gegliedert. Dabei wird zuerst nach der Eigenschaft „nichtsichtbar“ und „sichtbar“ gegliedert. Bei den sichtbaren Kupplungen wird weiterhin zwischen fremdbetätigten und selbstbetätigten Kupplungen unterschieden. Für die weitere Arbeit sind die fremdbetätigten sichtbaren Kupplungen, welche kraftschlüssig ihre Funktion erfüllen von Relevanz, weshalb im Folgenden Abschnitt 2.2.3 explizit auf diesen Typ eingegangen wird.

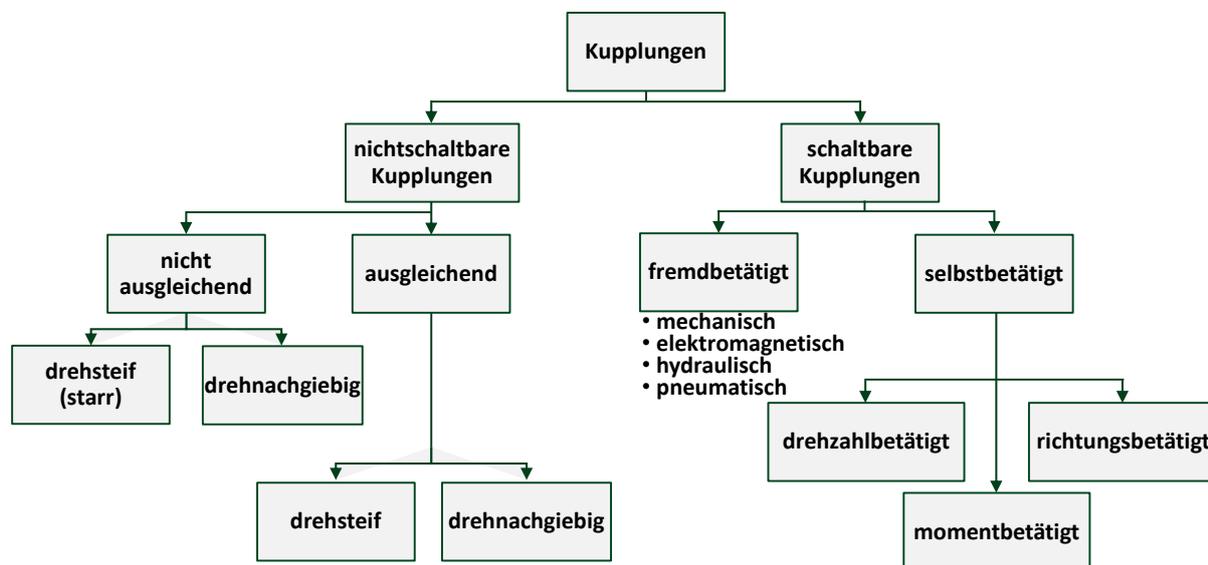


Abbildung 2.9 Klassierung von Kupplungen<sup>52</sup>

<sup>52</sup> Sauer et al., 2006a, S. 287, eigene Darstellung

### 2.2.3 Fremdbetätigte schaltbare kraftschlüssige Kupplungen

Die Leistungsübertragung bei fremdbetätigten schaltbaren kraftschlüssigen Kupplungen erfolgt durch das Aufbringen einer Anpresskraft, welche die beiden Wirkflächen gegeneinanderpresst. Diese Anpresskraft wird durch ein Betätigungssystem bereitgestellt und kann durch dieses aufgebracht oder aufgehoben werden.<sup>53</sup>

Die Auslegung dieser Kupplungen erfolgt auf Basis der VDI 2241 - BLATT 1<sup>54</sup>. Gültig ist die VDI 2241 für schaltbare fremdbetätigte Wellenkupplungen, welche kraftschlüssig den Antrieb mit dem Abtrieb verbinden. In dieser Norm werden Benennungen von Bauformen und Einzelteilen eingeführt, ebenso wird der Stand der Technik bzgl. Berechnung von Reibkupplungen aufgezeigt.<sup>55</sup>

Grundsätzlich kann zwischen zwei Betätigungsprinzipien unterschieden werden. Eine *schließende Kupplung* stellt den Reibschluss bei Aufbringen der Betätigungskraft her. Daher nennt man diese Kupplungen auch „normally open“. Eine *öffnende Kupplung* hebt den Reibschluss bei Aufbringen der Betätigungskraft auf, weshalb diese Kupplungen als „normally closed“ bezeichnet werden.<sup>55</sup>

#### 2.2.3.1 Aufbau einer Einscheibenkupplung

Der prinzipielle Aufbau einer trockenlaufenden Einscheibenkupplung ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Dabei wird auf der linken Seite der eingekuppelte Zustand dargestellt, bei dem Drehmoment übertragen wird, und auf der rechten Seite der ausgekuppelte Zustand, bei dem kein Drehmoment übertragen wird. Diese Kupplung ist eine öffnende Kupplung, also „normally closed“. Eine heute ebenfalls übliche Bauart einer Einscheibenkupplung ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Das Zweimassenschwungrad ist mit der Kurbelwelle verschraubt. Die Druckplatte ist über den Kupplungsdeckel mit dem Zweimassenschwungrad verbunden. Die Kupplungsscheibe befindet sich zwischen Zweimassenschwungrad und Druckplatte und ist per Keilverzahnung mit der Getriebeeingangswelle verbunden. Durch drücken des Kupplungspedals wird über eine hydraulische Strecke das Ausrücklager über einen hydraulischen Nehmerzylinder nach links gedrückt und somit die Anpresskraft zuerst reduziert und letztlich aufgehoben, nach dem gleichen Prinzip wie in Abbildung 2.10. Die Baugruppen Zweimassenschwungrad und Druckplatte können nun unabhängig von der Kupplungsscheibe rotieren, die Leistungsübertragung von Antriebsmotor an den Antriebsstrang ist unterbrochen.<sup>55</sup>

---

<sup>53</sup> Sauer et al., 2006a, S. 281 ff.

<sup>54</sup> vgl. VDI 2241 - Blatt 1, 1982

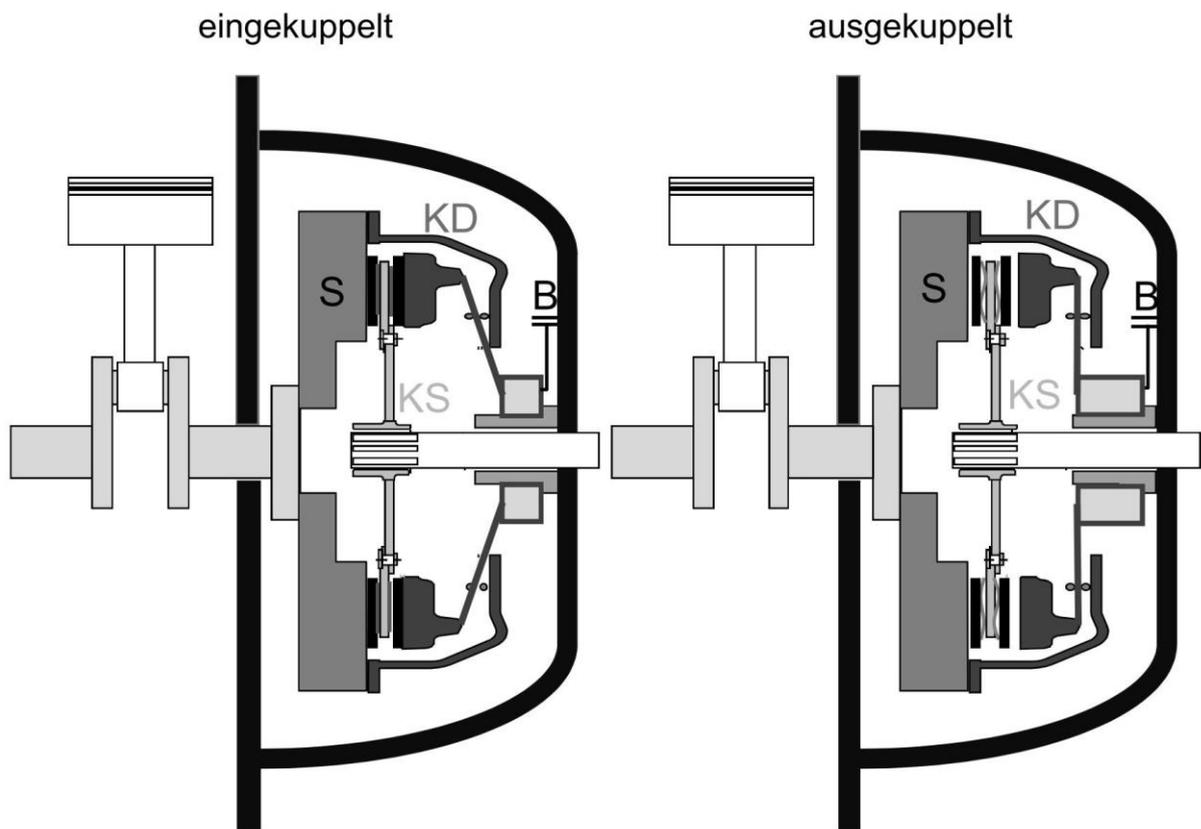


Abbildung 2.10 Schnittdarstellung einer Einscheibenkupplung<sup>55</sup>

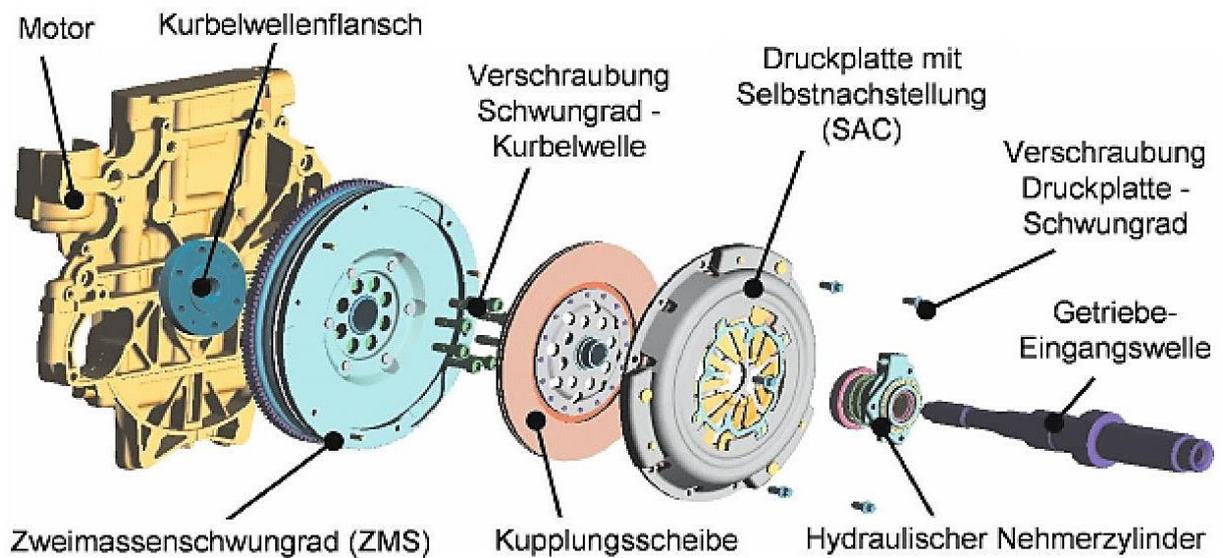


Abbildung 2.11 Einbausituation einer trockenlaufenden Einscheibenkupplung<sup>56</sup>

<sup>55</sup> Mitariu-Faller, 2009, S. 14

<sup>56</sup> Kirchner, 2007., S. 114

### 2.2.3.2 Aufbau einer Lamellenkupplung

Ein aktuelles Doppelkupplungssystem von Volkswagen, welche als nasslaufende Lamellenkupplung ausgeführt ist, ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Die Schnittdarstellung dieser Lamellenkupplung ist in Abbildung 2.13 gezeigt. Der Kraftschluss findet zwischen Außen- (2) und Innenlamellen (1) statt. Durch ein meist fluidisches Druckmittel wird im dargestellten Fall der Kolben (5) gegen die erste Außenlamelle gedrückt, wodurch das gesamte Lamellenpaket zusammengepresst wird. Abgestützt wird die Kolbenkraft über eine Stützscheibe. Bei der inneren Teilkupplung sorgt eine Druckfeder (6) dafür, dass die Kupplung geöffnet wird, sobald der Druck des Druckmittels aufgehoben wird. Um Drehmoment und Drehzahl mit einer Lamellenkupplung zu übertragen, muss dauerhaft ein Druck auf den Kolben realisiert werden.<sup>56</sup>

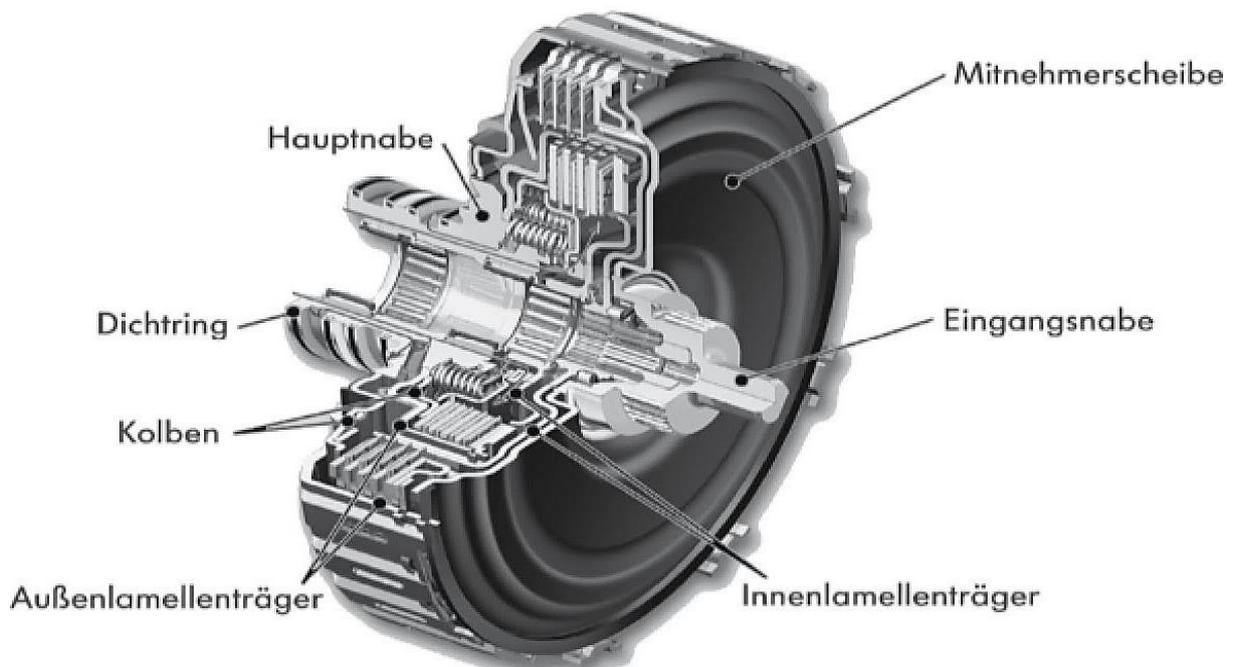


Abbildung 2.12: Nasslaufende Doppelkupplung von Volkswagen<sup>57</sup>

<sup>57</sup> Götte; Pape, 2004

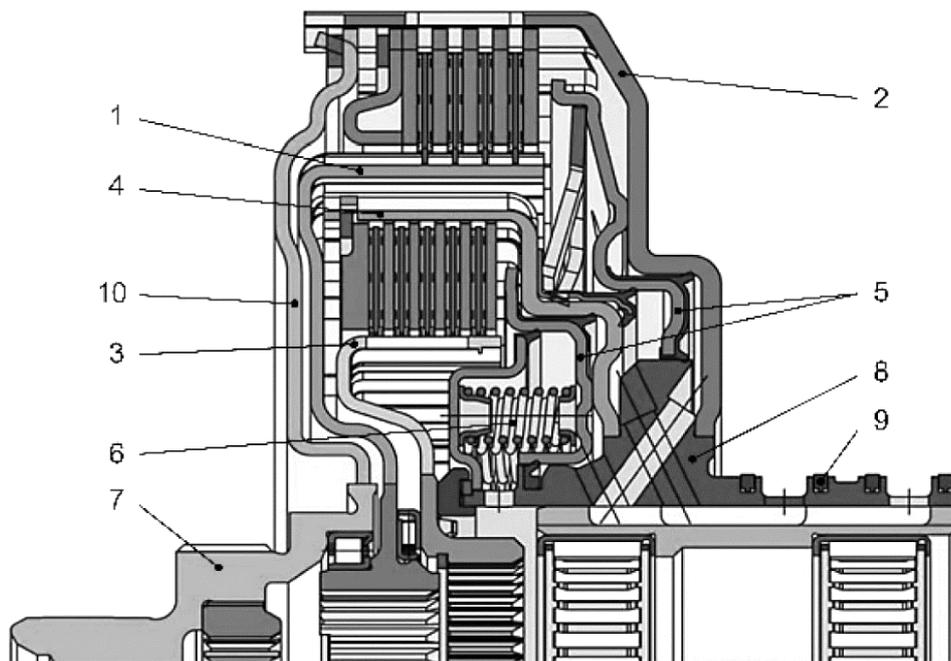


Abbildung 2.13 Schnittdarstellung der nasslaufenden Doppelkupplung des VW Doppelkupplungsgetriebes DSG<sup>58</sup>

#### 2.2.4 Thermische Auslegung von fremdbetätigten schaltbaren kraftschlüssigen Kupplungen

Um den thermischen Haushalt einer Reibkupplung zu beschreiben, wird an dieser Stelle zuerst auf den Synchronisationsvorgang eingegangen. In Abbildung 2.14 ist der Zeitschrieb einer Synchronisation dargestellt. Zuerst liegt eine relative Winkelgeschwindigkeit  $\Delta\omega$  zwischen den beiden Seiten vor. Durch Betätigen der Kupplung steigt im Zeitraum  $t_1$  das Kupplungsmoment  $M_K$  an, wodurch die relative Winkelgeschwindigkeit  $\Delta\omega$  bis auf 0 reduziert wird. Die Rutschzeit  $t_3$  beschreibt die Dauer des Synchronisierungsvorgangs.<sup>59</sup>

In Abbildung 2.15 wird das auf die Kupplung reduzierte Massensystem und die Winkelgeschwindigkeitsverläufe eines Synchronisierungsvorganges dargestellt. In diesem Falle rotiert  $J_A$  schneller als  $J_L$ . Deshalb wird im Zeitraum  $t_3/t_r$  in der Kupplung, genauer im Wirkflächenpaar, die überschüssige Energie mittels Reibung in Wärme umgesetzt. Dies ist in Abbildung 2.16 visualisiert. Diese Wärme wird von den am Reibvorgang beteiligten Bauteilen, in Abhängigkeit ihrer Materialeigenschaften, aufgenommen. Die Schaltarbeit  $Q$  kann vereinfacht wie folgt berechnet werden:

$$Q = \frac{(w_{10} - w_{20})^2}{2} * \frac{J_A * J_L}{J_A \left(1 - \frac{M_L}{M_K}\right) + J_L \left(1 - \frac{M_A}{M_K}\right)} \quad (2)^{59}$$

<sup>58</sup> Naunheimer et al., 2007, S. 396

<sup>59</sup> VDI 2241 - Blatt 1, 1982, S. 15

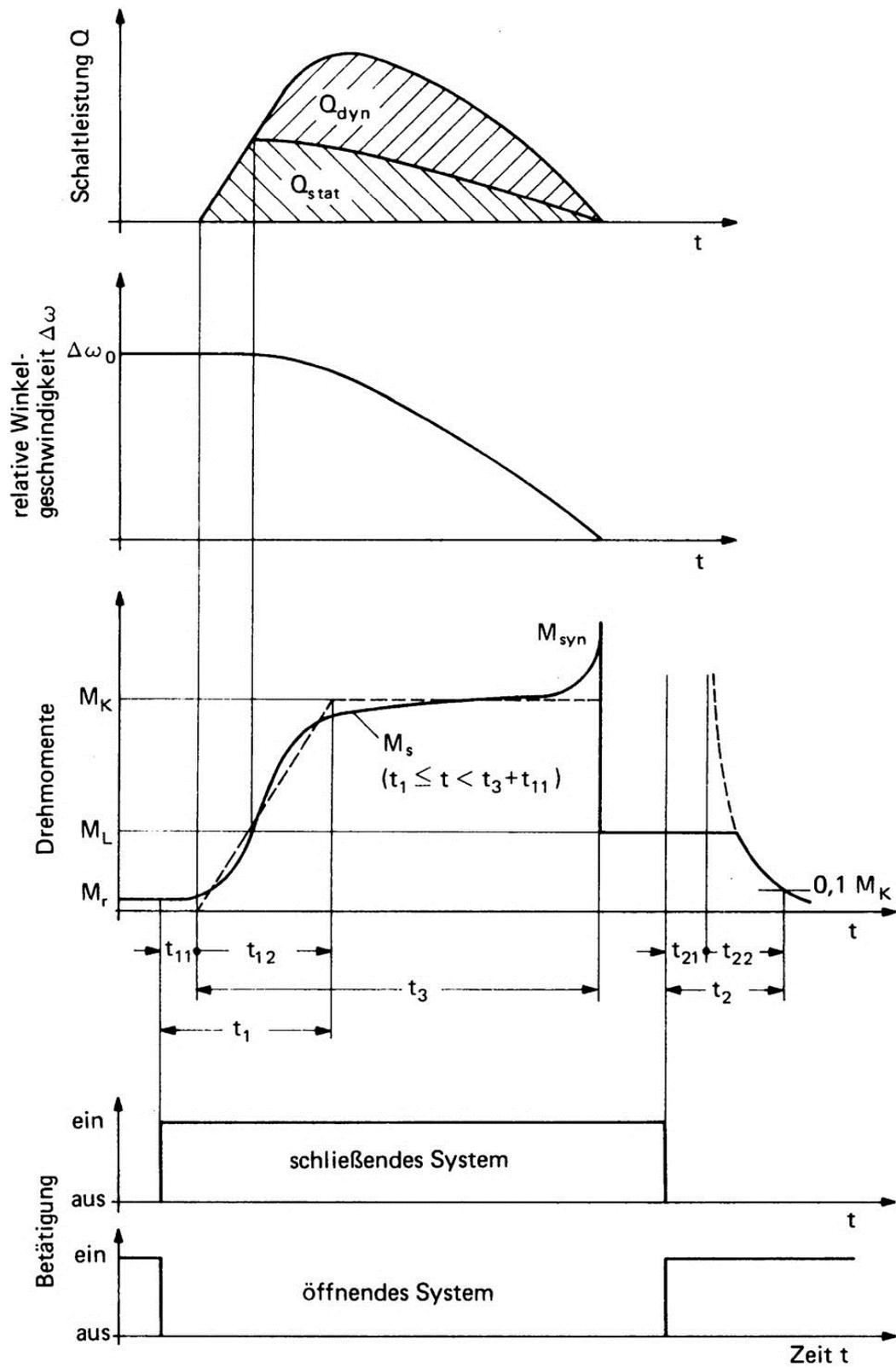


Abbildung 2.14 Schaltvorgang einer fremdbetätigten schaltbaren Kupplung<sup>60</sup>

<sup>60</sup> VDI 2241 - Blatt 1, 1982, S. 12

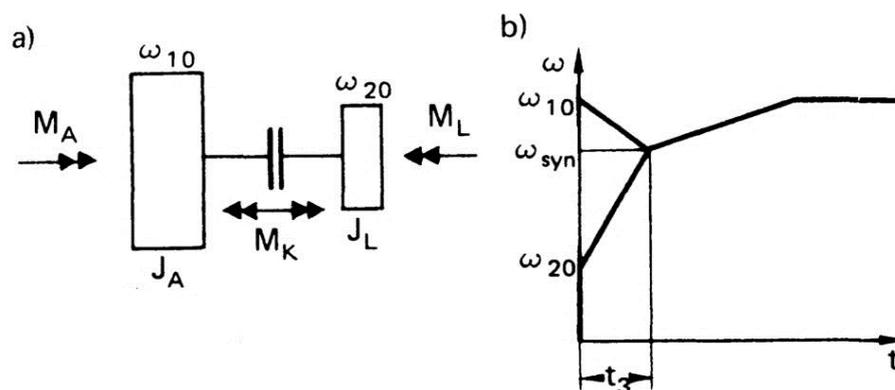


Abbildung 2.15 a) Massenreduzierung Kupplung b) Winkelgeschwindigkeitsverläufe<sup>61</sup>

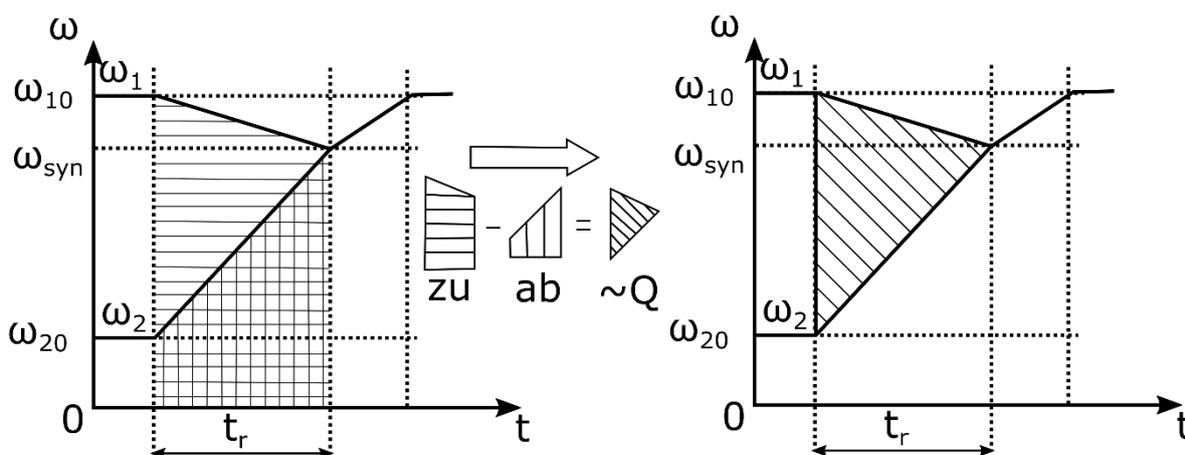


Abbildung 2.16: Visualisierung des Wärmeeintrags  $Q$ <sup>62</sup>

Man unterscheidet weiterhin zwischen der zulässigen Schaltarbeit  $Q_{zul}$  und der zulässigen Schaltarbeit bei einmaliger Schaltung  $Q_E$ . Die zulässige Schaltarbeit  $Q_{zul}$  beschreibt die maximal zulässige Arbeit, welches das System dauerhaft aufnehmen kann, ohne thermisch geschädigt zu werden. Sie hängt zum einen von der Schalthäufigkeit ab, zum anderen von der Kühlung des Systems und von der Höhe des Energieeintrages pro Schaltung. Die zulässige Schaltarbeit bei einmaliger Schaltung  $Q_E$  hingegen, beschreibt die thermische Grenze des Systems, die während einer Schaltung nicht überschritten werden darf. Hier ist die Reibleistung  $\dot{Q}$ , also die Kombination aus anfänglicher Relativgeschwindigkeit, Flächenpressung und zu beschleunigende Masse, von ausschlaggebender Bedeutung.<sup>63</sup>

Die Reibleistung  $\dot{Q}$  ist meistens zu Beginn einer Schaltung am größten, wie in Abbildung 2.17 dargestellt. Danach nimmt Sie mit abnehmender Differenzdrehzahl zwischen  $w_1$  und  $w_2$ , unter der Annahme eines konstanten anliegenden Momentes  $M_K$ ,

<sup>61</sup> VDI 2241 - Blatt 1, 1982, S. 15

<sup>62</sup> Sauer et al., 2006a, S. 339, eigene Darstellung

<sup>63</sup> VDI 2241 - Blatt 1, 1982, S. 7

kontinuierlich ab. Der maximale Reibleistungseintrag in das System ist auch abhängig vom Verhältnis  $M_{KK}/M_L$ , wie in Abbildung 2.18 dargestellt. Hier steht  $M_{KK}$  für das Kupplungskennmoment. Ist dieses Kupplungskennmoment  $M_{KK}$  deutlich größer als das Lastmoment  $M_L$ , entsteht eine deutlich größere Reibleistung  $\dot{Q}$ , als wenn  $1 < M_{KK}/M_L < 2$  gilt. In Abhängigkeit der thermischen Massen des auszulegenden Systems muss das Kupplungskennmoment  $M_{KK}$  so ausgelegt werden, dass es zu keiner Schädigung innerhalb einer Schaltung kommt, aber das Verhältnis  $M_{KK}/M_L \leq 1$  nicht gilt. Ist die Anpassung des Kupplungskennmoments  $M_{KK}$  nicht zielführend, muss zum Beispiel die thermische Masse des Systems erhöht werden, damit eine größere Reibleistung  $\dot{Q}$  ertragen werden kann und somit das Kupplungskennmoment  $M_{KK}$  erhöht werden kann.<sup>64</sup>

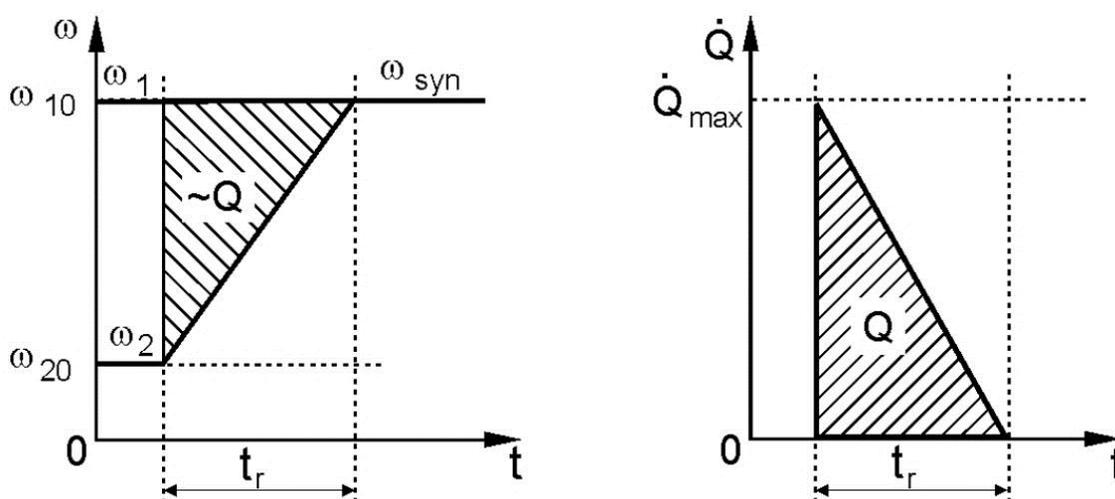


Abbildung 2.17: Beschreibung Wärmeeintrag und zugehörige Wärmeleistung<sup>65</sup>

Bei der Auslegung von fremdbetätigten schaltbaren kraftschlüssigen Kupplungen ist der thermische Haushalt oft die bestimmende Größe und nicht die mechanischen Werte wie Drehmoment und Schaltzeiten.<sup>66</sup> Dies ist auch darin begründet, dass der Einfluss des Fahrers bei einer fremdbetätigten Reibkupplung sehr stark variiert und deshalb bei der Auslegung dieser Systeme vom worst case ausgegangen werden muss. Ein besonders kritischer Anwendungsfall ist das wiederholte Anfahren am Berg mit voll beladenem Fahrzeug mit Anhänger. Dieser Fall wird im Automobilbau in Form der ABE-Prüfung getestet, um eine Kupplung freizugeben. Hierbei muss das System sowohl hohe Schaltarbeiten und Schaltleistungen, sowie eine hohe Schalthäufigkeit ohne Funktionsausfall ertragen, siehe Abbildung 2.19.

<sup>64</sup> Sauer et al., 2006a, S. 337 ff.

<sup>65</sup> Sauer et al., 2006a, S. 341

<sup>66</sup> vgl. VDI 2241 - Blatt 1, 1982, S. 15, Abschnitt 3.3

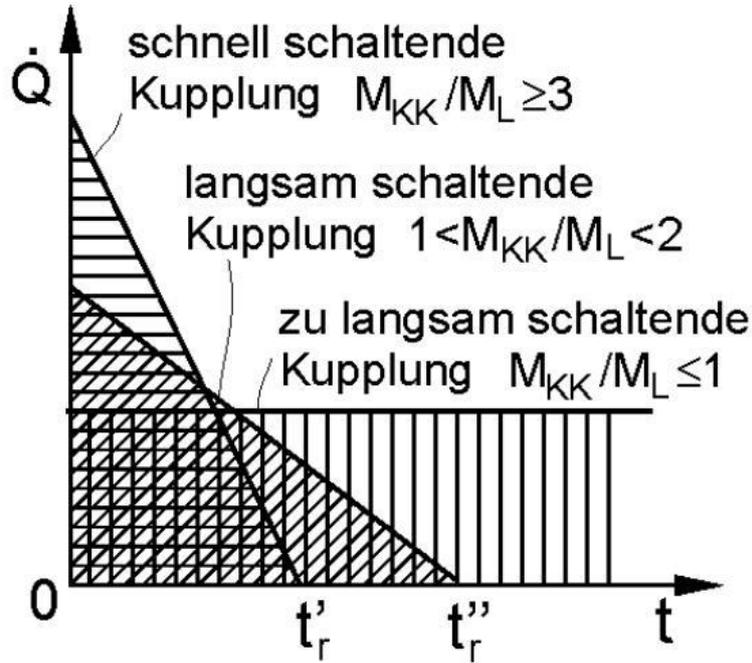


Abbildung 2.18: Einordnung Wärmeleistung  $\dot{Q}$  zu Schaltzeit<sup>67</sup>

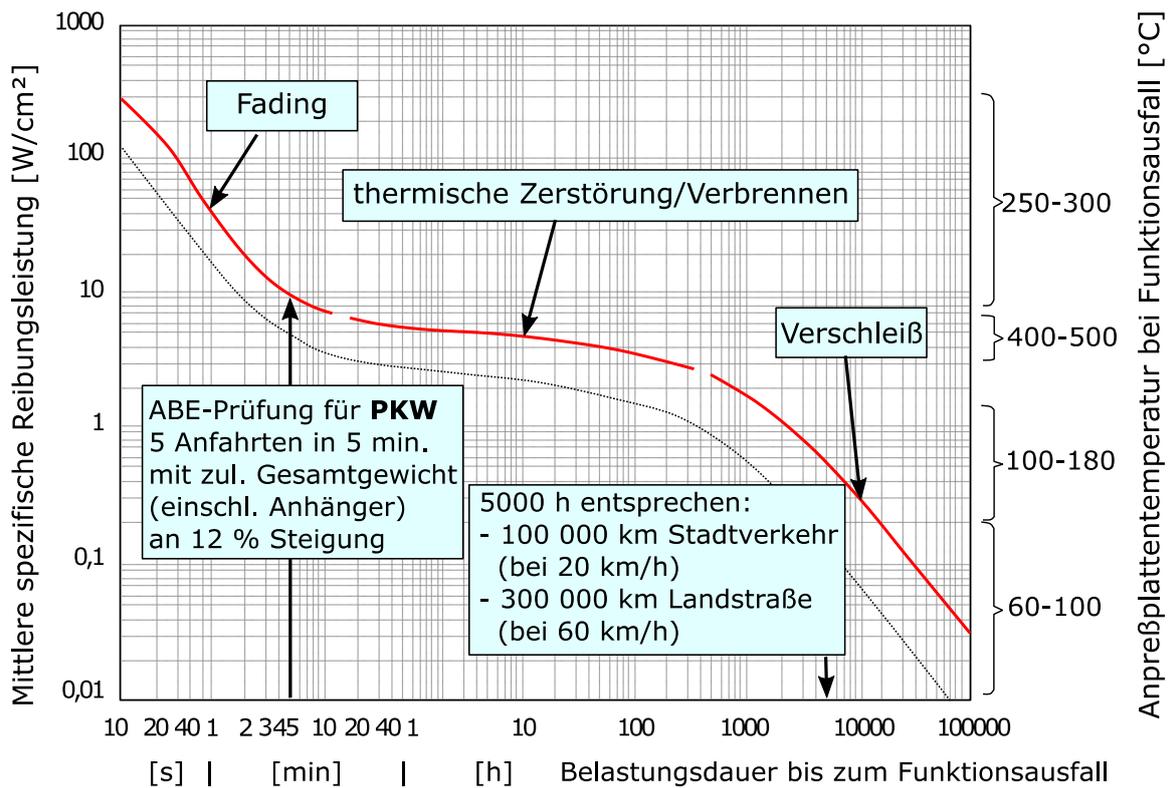


Abbildung 2.19: Einordnung ABE-Test für trockenlaufende Anfahrkupplungen zur ertragbaren Reibleistung<sup>68</sup>

<sup>67</sup> Sauer et al., 2006a, S. 342

<sup>68</sup> Drexler, 1997, eigene Darstellung

### 2.3 Technische Temperaturmessung

Die physikalische Größe „Wärme“ wurde mit der Erfindung der Dampfmaschine größere Aufmerksamkeit zuteil und systematisch untersucht. Im Jahr 1760 beschrieb *J. Black*, dass bei Zufuhr derselben Wärmemenge sich unterschiedliche Stoffe unterschiedlich stark erwärmen. Gegen Ende des 18. Jahrhunderts wurde „Wärme“ erstmals von *B. Thompson* und *H. Davy* als Schwingungsphänomen beschrieben. In seinen Arbeiten beschreibt *S. Carnot* „Wärme“ als Energie, welche mittels einer Dampfmaschine in mechanische Energie umgewandelt werden kann. Die Gedanken zu der Umkehrung dieses Vorganges, wie man mechanische Energie in Wärme umsetzen kann, führten zum Grundgedanken der Energieerhaltung. Dies führte letztlich zum 1. Hauptsatz der Thermodynamik, dem Energieerhaltungssatz. Durch die mathematischen Grundlagen von *J. C. Maxwell* und *L. Boltzmann* zur kinetischen Gastheorie, konnte über die Molekülbewegung ein besseres Verständnis von „Wärme“ geschaffen werden. Somit konnte nach *J. C. Maxwell* die Temperatur eines Körpers als Messgröße erklärt werden, welche den thermischen Energieinhalt beschreibt.

Der älteste bekannte Thermometer geht auf *Heron von Alexandria*, aus dem Jahr 120 v. Chr. zurück, welches auf der Ausdehnung von Luft basiert. Die Funktionsweise von Flüssigkeitsthermometern stammt aus dem Jahr 1654 und werden *Großherzog Ferdinand II von Toskana* zugeschrieben. 1714 optimierte *D. G. Fahrenheit* das Flüssigkeitsthermometer und führte die Skala Fahrenheit ein. Die heute weitverbreitete Celsiusskala geht auf *A. Celsius* zurück, welcher im Jahr 1740 eine Skala mit hundert Intervallen einführte.

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurde begonnen die Ausdehnung von Metallen zur Temperaturmessung zu verwenden. 1800 wurde der erste Bimetallthermometer von *A.L. Brèguet* gebaut. 1818 wurde die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Temperatur von *H. Cr. Oersted* entdeckt und 1821 wurde von *H. Davy* ein erstes Thermolement konstruiert. *Lord Kelvin* stellt 1852 eine thermodynamische Temperaturskala auf, welche von allen Stoffeigenschaften unabhängig ist. Diese ist über den kompletten Temperaturbereich gültig und unabhängig von den Eigenschaften der verwendeten Materialien reproduzierbar.

In der heutigen Wissenschaft ist die Temperatur ein Maß für die statistisch gemittelte Geschwindigkeit der Moleküle eines Körpers. Wieviel Energie benötigt wird, um einen Körper von der Temperatur  $T_1$  auf  $T_2$  zu erwärmen, hängt von der Anzahl und Größe der vorhandenen Moleküle ab. Die Richtung des Wärmeflusses ist definiert von der

höheren zur niedrigeren Temperatur. Die Temperatur  $T$  in Kelvin ist eine der sieben SI-Einheiten, welche in der ITS-90<sup>69</sup> definiert ist.<sup>70</sup>

### 2.3.1 Übersicht Temperaturmesstechnik

Einen allgemeinen Überblick über die technischen Temperaturmessverfahren geben Abbildung 2.20 und Abbildung 2.21, mit der Einordnung in den möglichen Messbereich.

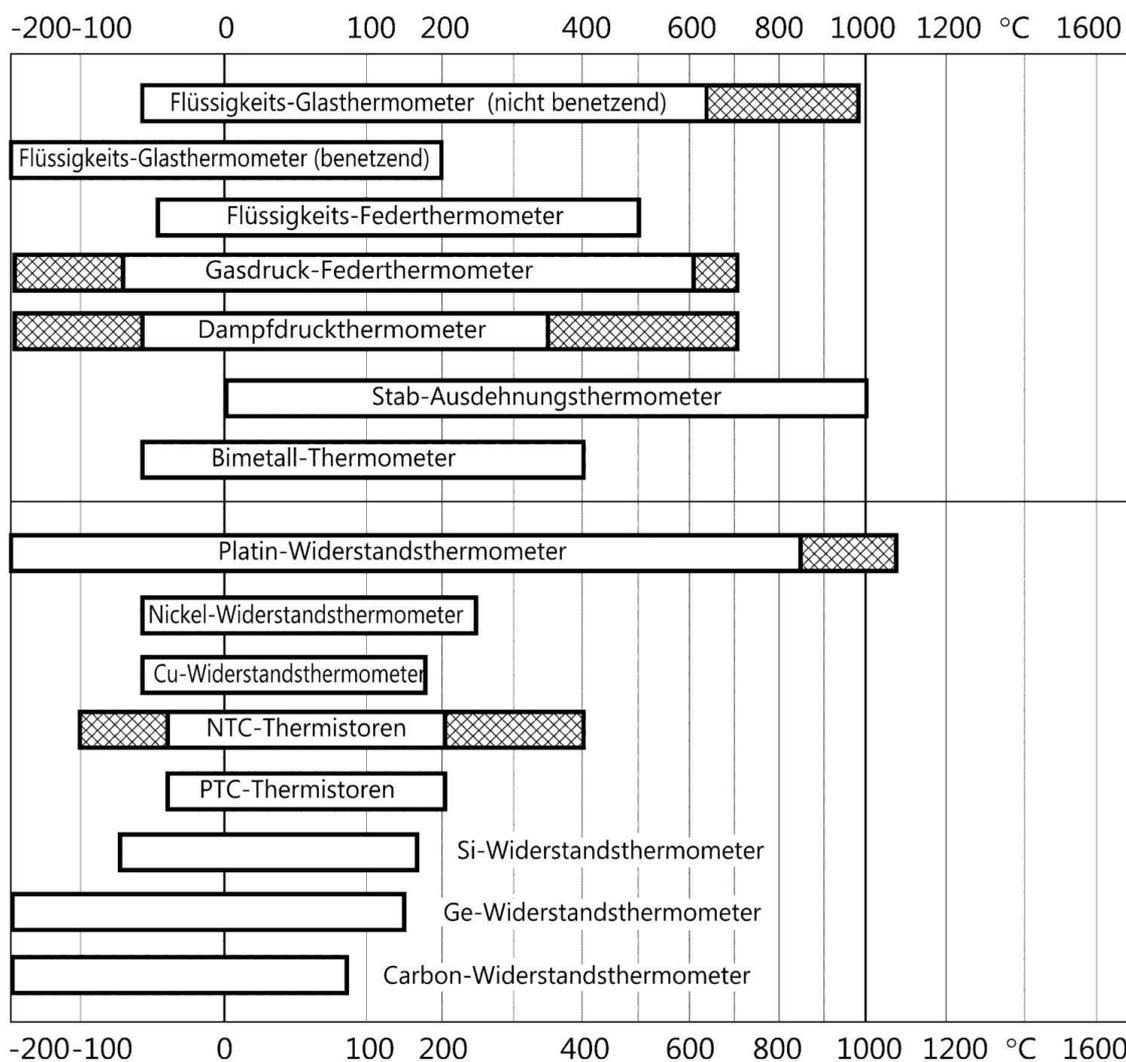


Abbildung 2.20: Übersicht technischer Temperaturmessverfahren und ihrer Messbereiche  
Teil 1<sup>71</sup>

<sup>69</sup> Quinn, 1990

<sup>70</sup> vgl. Antoni, 2000, S. 15–22

<sup>71</sup> Bernhard, 2014, S. 5

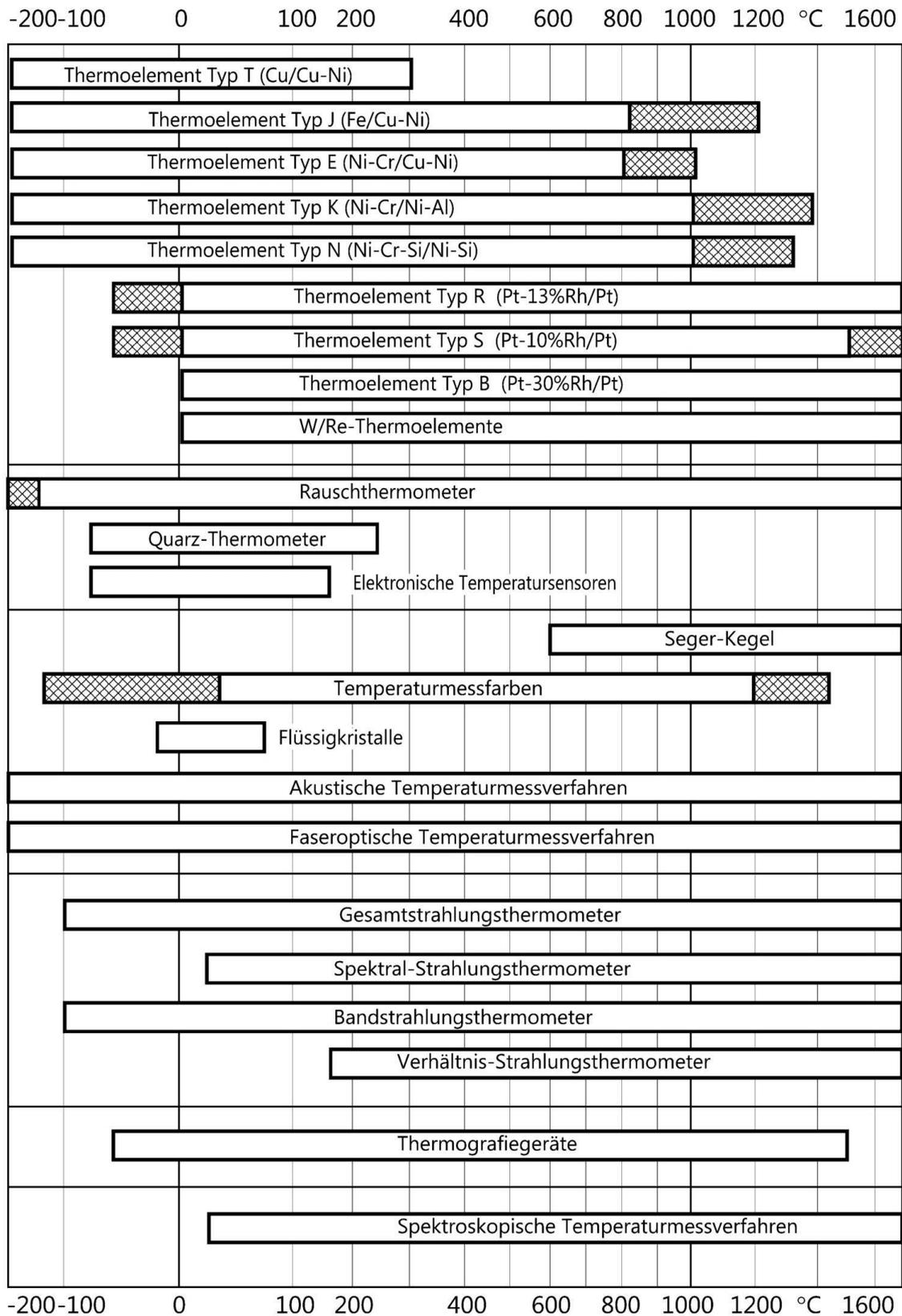


Abbildung 2.21: Übersicht technischer Temperaturmessverfahren und ihrer Messbereiche  
Teil 2<sup>72</sup>

<sup>72</sup> Bernhard, 2014, S. 6

Die Schwierigkeiten der Temperaturmessung in tribologischen Systemen wird von CZICHOS UND HABIG wie folgt beschrieben: „Die Bestimmung oder Berechnung reibbedingter Temperaturerhöhungen bereitet sowohl in experimenteller Hinsicht infolge der Unzugänglichkeit der Kontaktgrenzfläche als auch in theoretischer Hinsicht wegen der Komplexheit der elastisch-plastischen Kontaktdeformationsprozesse, der stochastischen Natur der Energiedissipationsmechanismen und der Temperaturabhängigkeit relevanter Eigenschaften der Kontaktpartner erhebliche Schwierigkeiten“.<sup>73</sup> Ein Überblick über die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Temperaturmessung in Gleitreibsystemen ist in Abbildung 2.22 dargestellt.<sup>74</sup>

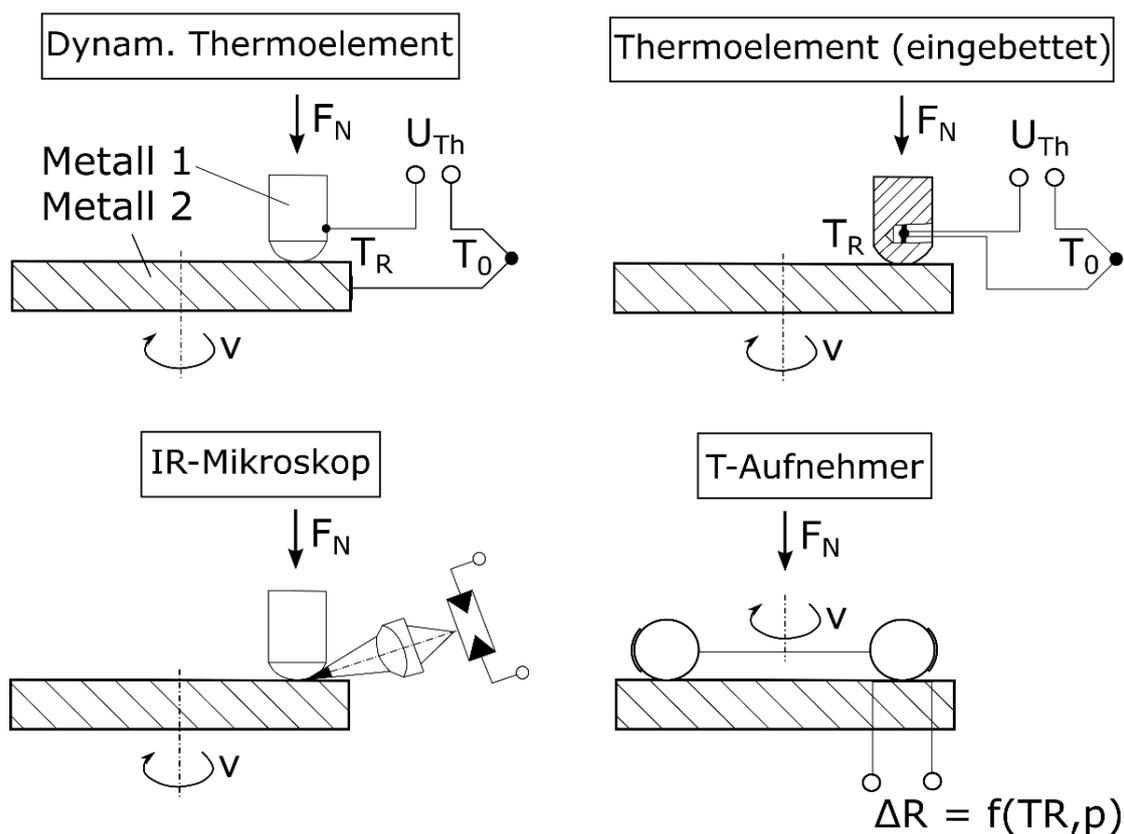


Abbildung 2.22: Überwiegend verwendete Messtechnik zur Ermittlung der Temperatur<sup>75</sup>

Die vier im Wesentlichen benutzten Messtechniken werden wie folgt beschrieben:

„**Dynamisches Thermoelement** Hierbei wirken die beiden Kontaktpartner, wenn sie aus unterschiedlichen Metallen bestehen, als Elemente der Thermopaarung. Obwohl mit dieser Methode bereits in den 30er Jahren von Bowden und Mitarbeitern Temperaturmessungen durchgeführt wurden, ist eine Zuordnung der gemessenen Thermospannungen zu den reibbedingten Temperaturen infolge verschiedener

<sup>73</sup> Czichos; Habig, 2015, S. 79

<sup>74</sup> vgl. Czichos; Habig, 2015

<sup>75</sup> Czichos; Habig, 2015, S. 80, eigene Darstellung

verfälschender Einflüsse, wie z. B. von Oxidfilmen, Oberflächenverunreinigungen etc., nur näherungsweise möglich.

**Thermoelement (eingebettet)** Die am häufigsten verwendete Methode zur Bestimmung reibbedingter Temperaturerhöhungen besteht darin, Thermoelemente in die Prüfkörper einzubetten. Obwohl damit relativ genaue Temperaturbestimmungen möglich sind, ist die Extrapolation der im Volumen der Kontaktpartner gemessenen Temperaturen auf die Temperaturen in der realen Kontaktfläche schwierig.

**Infrarot-Mikroskopie** Mit Hilfe der IR-Mikroskopie wird aus der temperaturbedingten Wärmestrahlung, die von der Reibstelle ausgeht, auf die Temperatur geschlossen. Die Schwierigkeiten liegen hier in dem unterschiedlichen Emissionsvermögen der Reibpartner und der Unzugänglichkeit der Kontaktstelle, sodass in Grundlagenuntersuchungen optisch transparente Kontaktpartner verwendet werden.

**Temperaturaufnehmer (aufgedampft, eingebettet)** Mit aufgedampften bzw. eingebetteten Temperaturaufnehmern ist es heute möglich, Temperaturen direkt in der Kontaktstelle zu messen. Genutzt wird der Effekt der elektrischen Widerstandsänderung infolge Temperatur. Die aufgedampften Aufnehmer haben in der aktiven Zone eine Breite von 10 bis 15  $\mu\text{m}$ , die eingebetteten Drahtaufnehmer eine Dicke von etwa 20 bis 30  $\mu\text{m}$ . Die Probleme bei dieser Methode liegen in dem Verschleiß der Aufnehmer bei Festkörperreibungsbedingungen.<sup>76</sup>

Für die vorliegende Arbeit ist die Messung der Temperatur mittels eingebrachten Thermoelementen, mittels Thermographie und die in Abbildung 2.21 aufgelisteten faseroptischen Temperaturmessverfahren relevant, weshalb diese nachfolgend detaillierter beschrieben werden.

### 2.3.2 Thermoelemente

Ein in der technischen Forschung und Praxis häufig eingesetzter Temperatursensor ist das sogenannte Thermoelement, siehe Abbildung 2.23.

Die Funktionsweise dieser Temperatursensoren basiert auf dem Seebeck-Effekt. Dieser beschreibt, dass eine elektrische Spannung entsteht, wenn zwei unterschiedliche Metalle an deren Ende miteinander verbunden werden, siehe Abbildung 2.24. Meistens werden die Enden miteinander verschweißt. Die gemessene Thermospannung ist von der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Verbindungsstellen und maßgeblich von den verwendeten Materialien abhängig, siehe Abbildung 2.25.<sup>77</sup>

---

<sup>76</sup> Czichos; Habig, 2015, S. 80–81

<sup>77</sup> vgl. Antoni, 2000

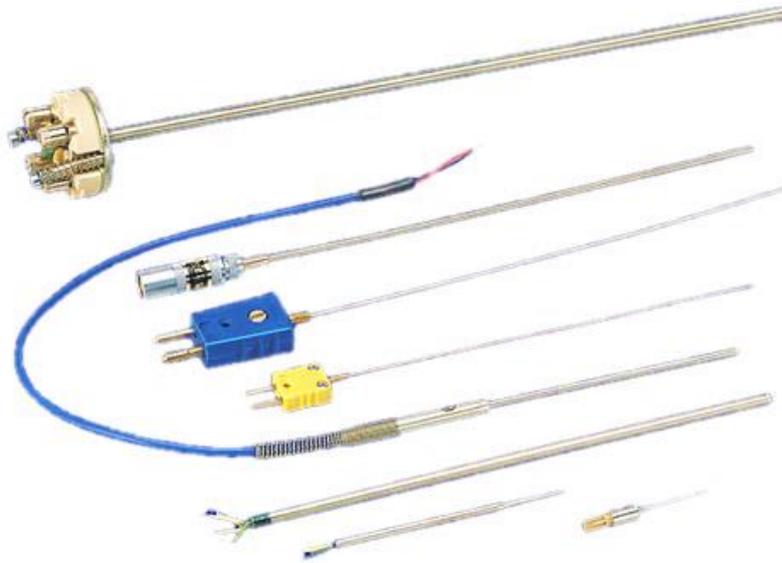


Abbildung 2.23 Mantelthermoelemente mit unterschiedlichen Anschlussmöglichkeiten<sup>78</sup>

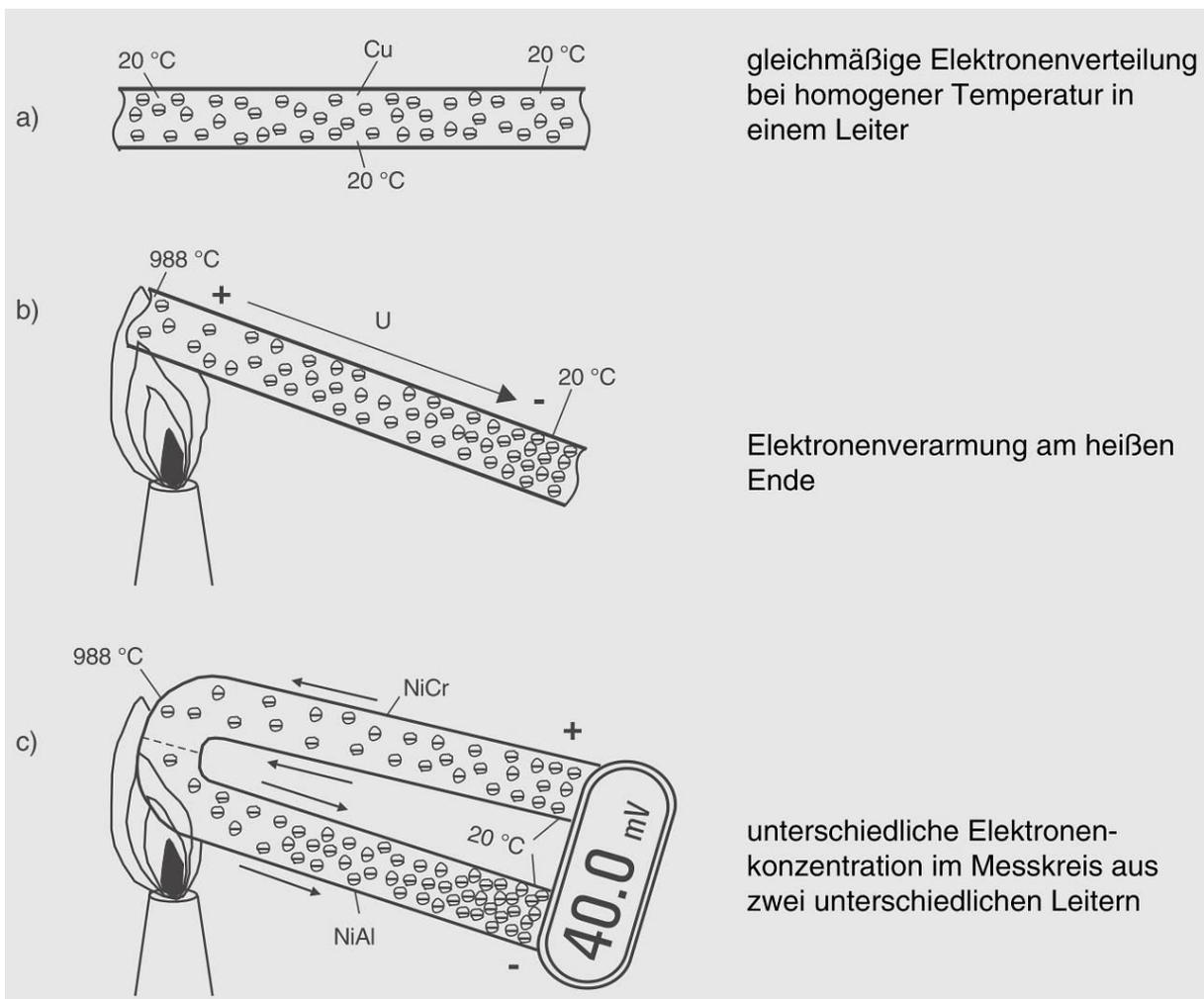


Abbildung 2.24 Entstehung der Thermospannung<sup>79</sup>

<sup>78</sup> Fa. RECKMANN GMBH, 2016

<sup>79</sup> Antoni, 2000, S. 25

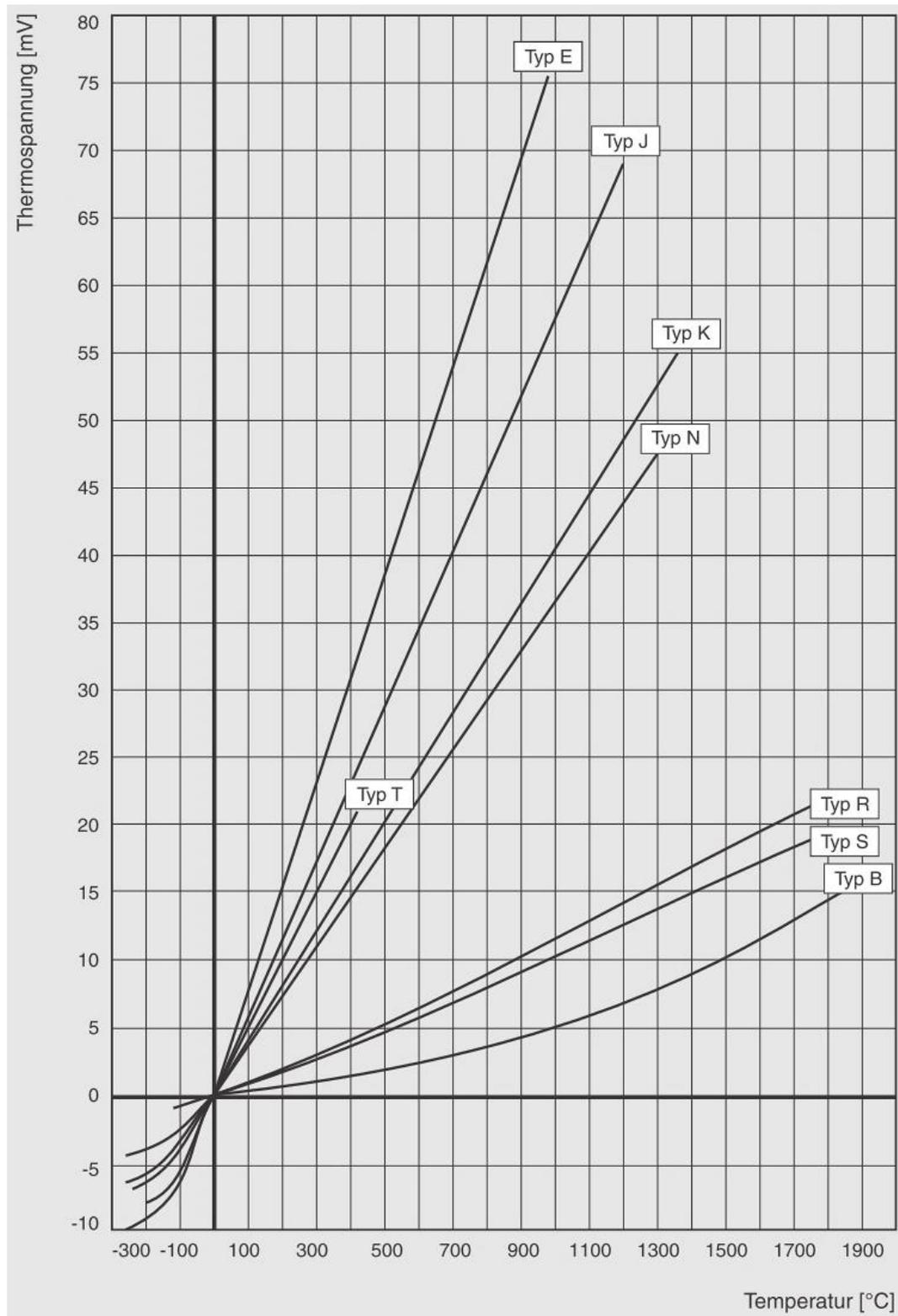


Abbildung 2.25 Thermospannungen unterschiedlicher Thermopaarungen<sup>80</sup>

Ein Fehler bei der Verwendung von Thermoelementen ist die Wahl der falschen Eintauchtiefe der Messspitze. Ein Berührungsthermometer kann immer nur seine eigene Temperatur messen, nicht die des zu messenden Bauteils. Daher ist die Wahl

<sup>80</sup> Antoni, 2000, S. 40

des Messpunktes von besonderer Bedeutung. Je nachdem ob eine positive oder negative Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Messstelle vorliegt, kann durch den Temperatursensor Wärme abgeleitet, oder Wärme der Messstelle zugeführt werden. Dieser Fehler kann für diesen Einbaufall anhand von Abbildung 2.26 quantifiziert werden. Hier wird der Messfehler in % über der n-fachen Eintauchtiefe des Außendurchmessers des Thermoelementes aufgetragen.<sup>81</sup>

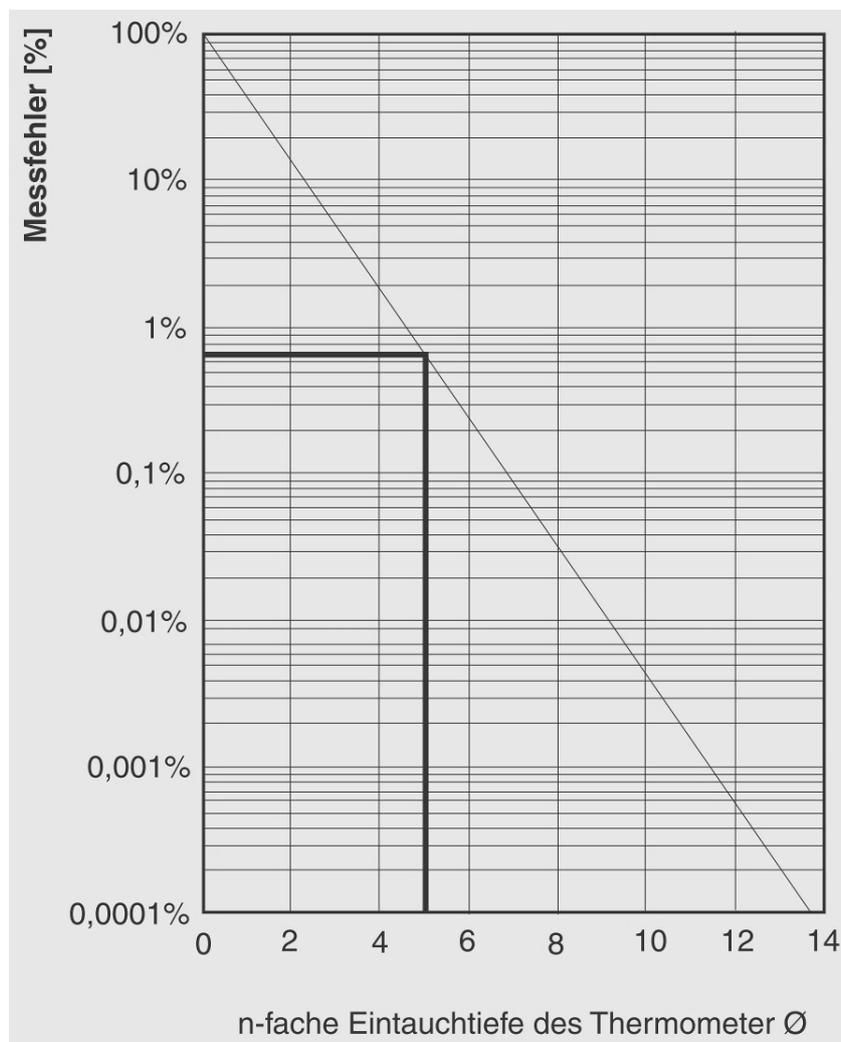


Abbildung 2.26 Messfehler in Bezug auf die Eintauchtiefe eines Thermoelementes<sup>82</sup>

### 2.3.2.1 Thermoelement Typ J

In der vorliegenden Arbeit wurden bei experimentellen Untersuchungen am IPEK immer Mantelthermoelementen des Typs J, Güteklasse 1, zur Temperaturmessung eingesetzt. Typ J steht für die Materialpaarung Eisen und einer Kupfer-Nickel-Legierung (Fe-CuNi). Der Einsatzbereich dieser Paarung geht von -210 °C bis +1200 °C. Für die Genauigkeitsklasse 1 wird eine maximale Abweichung des IST-Wertes von

<sup>81</sup> Antoni, 2000, S. 195–199

+/- 1,5 K im Bereich von -40 °C bis 375 °C und +/- 0,4 % von 375 °C bis 750 °C von der Referenzfunktion, siehe Abbildung 2.27.<sup>82</sup>

Typ	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
<b>Typ J</b>			
Temperaturbereich	-40...375 °C	-40...333 °C	–
Grenzabweichung	± 1,5 °C	± 2,5 °C	–
Temperaturbereich	375...750 °C	333...700 °C	–
Grenzabweichung	± 0,004 x [t] °C	± 0,0075 x [t] °C	–

Abbildung 2.27 Grenzabweichung Mantelthermoelement Typ J<sup>83</sup>

### 2.3.3 Thermografie

In diesem Abschnitt wird auf die Grundlagen der Thermografie eingegangen werden, welche die Möglichkeit bietet, eine örtliche Temperaturverteilung bildlich darzustellen und auswertbar zu machen.

#### 2.3.3.1 Physikalische Grundlagen

Die Thermographie basiert auf der Detektion der thermischen Strahlung eines Körpers. BERNHARD beschreibt die Strahlung eines Körpers wie folgt:

„Wird ein physikalisches System aus einem Zustand  $W_2$  in einen energieärmeren Zustand  $W_1$  überführt, wird elektromagnetische Strahlung abgegeben. Ist diese allein durch die Temperatur des Körpers bedingt, so spricht man von Wärme- oder Temperaturstrahlung. Daher sendet jeder Körper oder Stoff bei Temperaturen oberhalb des absoluten Nullpunkts eine thermisch angeregte elektromagnetische Strahlung aus. Bis etwa 4000 K wird sie im Wesentlichen durch Atomschwingungen bzw. Bewegungen der Moleküle verursacht. Bei höheren Temperaturen treten Dissoziations- und Ionisationsvorgänge in den Vordergrund.“

Bei festen nichtransparenten Körpern und nichttransparenten Flüssigkeiten wird die Strahlung nur von der Oberflächentemperatur bestimmt.<sup>83</sup>

Der Unterschied zur Strahlungstemperaturmessung<sup>84</sup>, bei der die mittlere Temperatur eines kleinen Messfeldes bestimmt wird, liegt bei der Thermographie darin, dass die örtliche Verteilung der Temperatur und die zeitliche Änderung eines meist deutlich größeren Messbereiches als bei der Strahlungstemperaturmessung erfasst werden. Grundlage ist dabei wie beschrieben, dass jeder Körper entsprechend der Temperatur eine thermische Eigenstrahlung besitzt, welche unter anderem auch als Wärmestrahlung bezeichnet wird. Durch das Planck'sche Strahlungsgesetz lässt sich für einen idealen Strahler ein Zusammenhang von Wellenlänge und Temperatur

<sup>82</sup> Ehinger et al., 2013, S. 48

<sup>83</sup> Bernhard, 2014, S. 1163

<sup>84</sup> Bernhard, 2004, siehe Seite 975 ff.

herstellen, wodurch die Temperatur des strahlenden Bereiches ermittelt werden kann. In der technischen Praxis findet man allerdings selten ideale Strahler vor, was durch den Emissionsgrad berücksichtigt wird. Das Messergebnis wird durch das Anpassen des Emissionsgrades berichtigt. Dieser Emissionsgrad muss entweder bekannt sein, oder vor der Messung ermittelt werden.<sup>85</sup>

Von einer Thermokamera wird nicht nur die Wärmestrahlung erfasst, sondern auch sonstige von Raum oder darin befindlichen Gegenständen reflektierte, gestreute oder selbst ausgesandte Strahlung. Dies muss bei der Messung als mögliche Fehlerquelle beachtet werden. Weiterhin ist die Kenntnis oder die Ermittlung des spektralen Emissionsgrades<sup>86</sup> des Messobjektes und eine möglicherweise vorliegende örtliche Verteilung des Emissionsgrades wichtig, um den Messfehler möglichst klein zu halten. Letztlich muss die Kamera an sich und die verwendete Optik auf die Messaufgabe abgestimmt sein.<sup>87</sup>

Bei der Thermographie kommt es besonders auf die Ermittlung von Temperaturdifferenzen im Messbereich an, wobei die thermische Messauflösung den minimal zu ermittelten Temperaturunterschied beschreibt. Eine wichtige Größe ist dabei auch der Strahlungscontrast, welcher über die Differenz von Objekttemperatur und Umgebungstemperatur, sowie den verwendeten Wellenlängenbereich bestimmt werden kann.<sup>88</sup>

### 2.3.3.2 Aufbau von Thermographiegeräten

Ein Thermographiegerät besteht aus mechanischen und elektrischen Elementen, wie zum Beispiel einer Linse, Spiegeln und einem Detektor, sowie der dazugehörigen Bildverarbeitung. Diese hat die Aufgabe, die vom Detektor aufgezeichneten Signale in eine bildhafte Darstellung umzusetzen. Die Wärmestrahlung kann dabei wie in Abbildung 2.28 dargestellt über drei mögliche Varianten einem Einzel-Detektor, einer eindimensionalen Detektorzeile oder einem Detektorarray zugeführt werden. Die Variante mit einem Detektorarray ist die Weiterentwicklung der beiden anderen Varianten und zeigt die beste Bildhomogenität, da die einzelnen Pixel nicht mehr durch eine Optik abgetastet werden, sondern elektronische Einheiten die Pixel des Arrays sehr viel schneller auslesen. Der messbare Bereich und die örtliche Auflösung hängen von Messabstand und der Pixelanzahl ab, siehe Abbildung 2.29. Wird eine kleine Messentfernung gewählt, wird das Messfeld klein, aber die Pixeldichte und damit die örtliche Auflösung ist hoch. Im Gegensatz dazu wird das Messfeld groß, wenn die

---

<sup>85</sup> vgl. Bernhard, 2004

<sup>86</sup> Bernhard, 2004, Seite 1032 ff.

<sup>87</sup> vgl. Bernhard, 2004, Seite 1151 ff.

<sup>88</sup> vgl. Bernhard, 2004, Seite 1157 ff.

Messentfernung vergrößert wird, wodurch aber auch die Pixeldichte sinkt, da bei gleicher Pixelanzahl eine deutlich größere Fläche erfasst wird.<sup>89</sup>

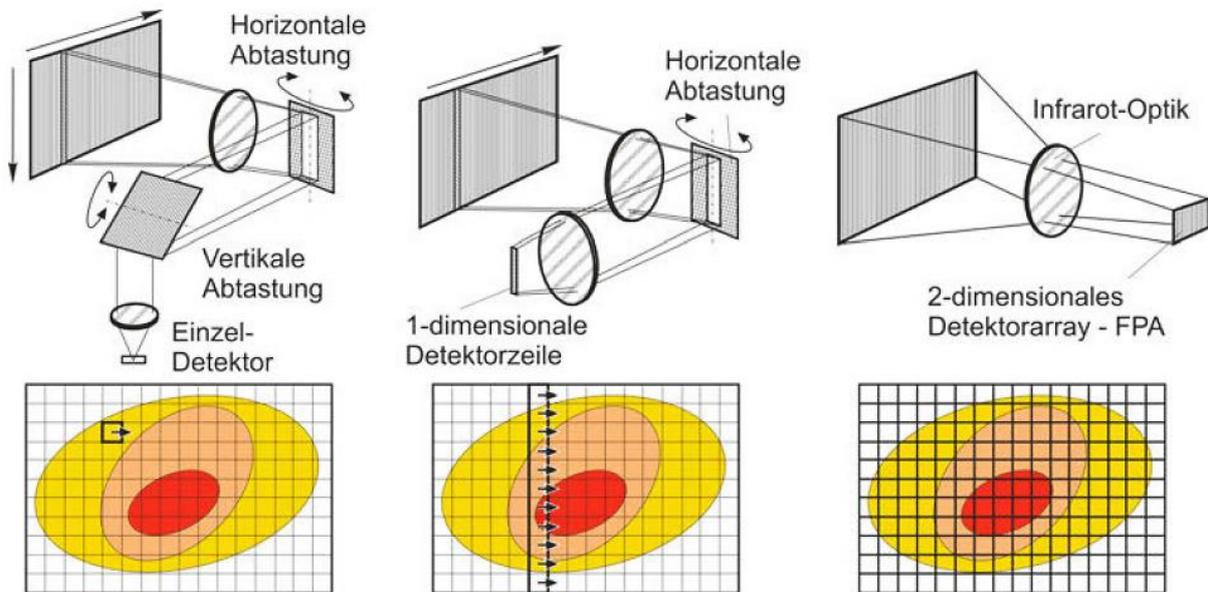


Abbildung 2.28 Arbeitsprinzipien von Thermographiekameras<sup>90</sup>

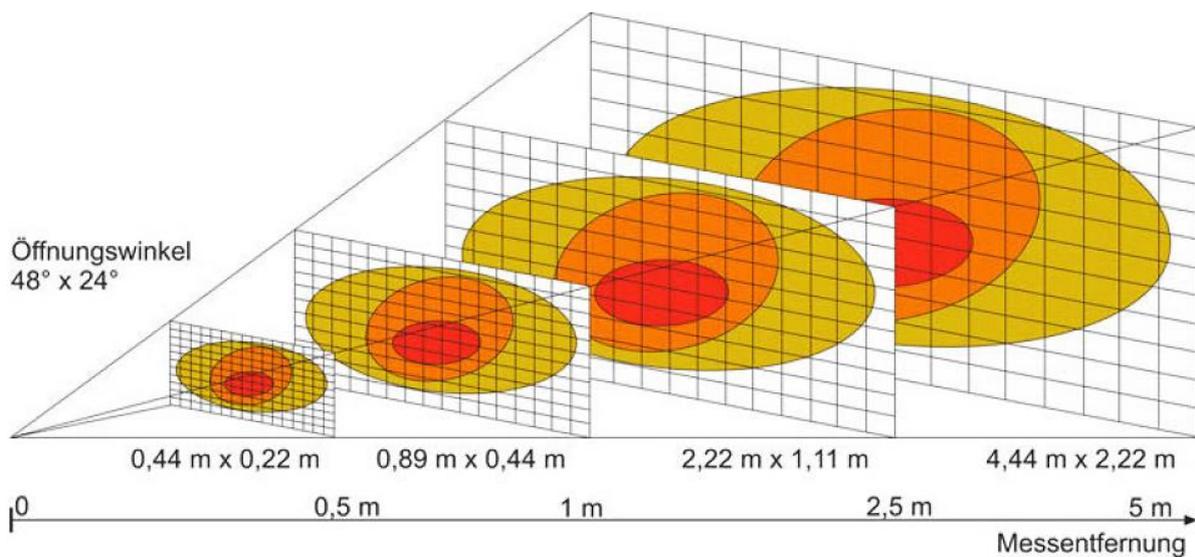


Abbildung 2.29 Messbereich einer Array-Kamera in Abhängigkeit der Entfernung<sup>91</sup>

Aktuell erhältliche Systeme gibt es in verschiedensten Ausführung. Meist steht entweder eine hohe örtliche Auflösung im Vordergrund oder eine sehr schnelle Bilderfassungsfrequenz. Um die örtliche Auflösung zu verbessern, werden Detektorarrays mit einer hohen Pixelanzahl eingesetzt, zum Beispiel mit 1280 x 1024 Pixeln. Um sehr schnelle thermische Änderungen erfassen zu können, gibt es

<sup>89</sup> Bernhard, 2004, Seite 1170 ff.

<sup>90</sup> Bernhard, 2014, S. 1417

<sup>91</sup> Bernhard, 2014, S. 1425

Systeme mit bis zu 1.000 Hz Vollbildfrequenz oder noch schnellere Bilderfassung, wenn nur Teilbilder, also nur eine geringere Anzahl an Pixel, ausgelesen werden. Als Beispiel für ein Thermographiebild ist in Abbildung 2.30 die Aufnahme der örtlichen Temperaturverteilung bei einem Bremsvorgang dargestellt.

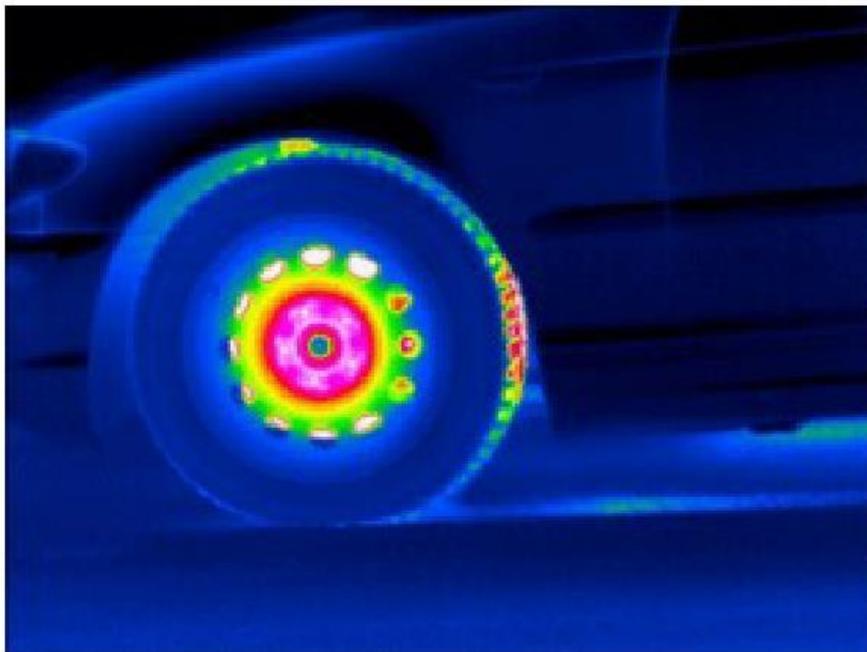


Abbildung 2.30 Thermographieaufnahme eines Bremsvorgangs<sup>92</sup>

Das Prinzip der berührungslosen Temperaturmessung hat einen entscheidenden Vorteil gegenüber den berührenden Thermometern: Selbst bei extrem hohen Temperaturen, bei denen ein Berührungsthermometer nicht mehr einsetzbar ist, kann mittels Thermographie die Temperatur gemessen werden. Dabei reicht der Messbereich von  $-20\text{ °C}$  bis  $+2.000\text{ °C}$ , in Spezialfällen bis  $+3.000\text{ °C}$ . Im Vergleich dazu reicht der Messbereich von Thermoelementen im Normalfall bis  $800\text{ °C}$ , für die Typen R, S und B maximal bis  $1.400\text{ °C}$ .

### 2.3.4 Faseroptische Sensortechnik

In diesem Abschnitt sollen die Grundlagen der faseroptischen Sensortechnik im allgemeinen und besonders die Funktionsweise der in dieser Arbeit verwendeten verteilt messenden faseroptischen Sensorik erläutert werden.

#### 2.3.4.1 Physikalische Grundlagen

Die Lichtwellenleiter Sensortechnik beruht auf der Ausbreitung von elektromagnetischer Wellen in einem Leiter. Die elektromagnetischen Wellen werden von einer Lichtquelle, üblicherweise einem Laser, in den Leiter, üblicherweise eine Glasfaser, eingebracht und vom einem Detektor empfangen. Dabei wird der Bereich

---

<sup>92</sup> InfraTec, 2016

der optischen Strahlung verwendet, welcher den infraroten, den sichtbaren und den ultravioletten Bereich des Spektrums elektromagnetischer Strahlung vereint. Dieses Prinzip kann zum einem zur Datenübertragung, zum anderen als Sensorsystem genutzt werden. Dabei war zuerst nur die Lichtintensität von Bedeutung<sup>93</sup>, bei aktuellen Systemen wird auch die Information von Frequenz und Phase ausgewertet. Die Glasfaser hat dabei die Aufgabe der Strahlführung, welche durch Brechzahländerung an den Grenzflächen nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz beschrieben werden kann. Wegen dem zylindrischen Aufbau einer Glasfaser ist die Grenzsicht um die Faser herum dieselbe mit derselben Brechzahl  $n$ . Bei der Einkopplung des Lichtes ist der Akzeptanzwinkel  $\delta$  die relevante Größe, siehe Abbildung 2.31. Der Grenzwinkel der Totalreflexion wird durch  $\alpha_G$  beschrieben,  $n$  ist die Brechzahl außerhalb der Faser,  $n_1$  und  $n_2$  die Brechzahlen des Kern- und Mantelbereiches und  $a$  beschreibt den Kernradius. Wenn der Winkel mit der das Licht in die Faser eingebracht wird kleiner ist als der Akzeptanzwinkel  $\delta$ , kommt es zur Totalreflexion an der ersten und jeder weiteren Grenzfläche und somit zur Strahlführung.<sup>94</sup>

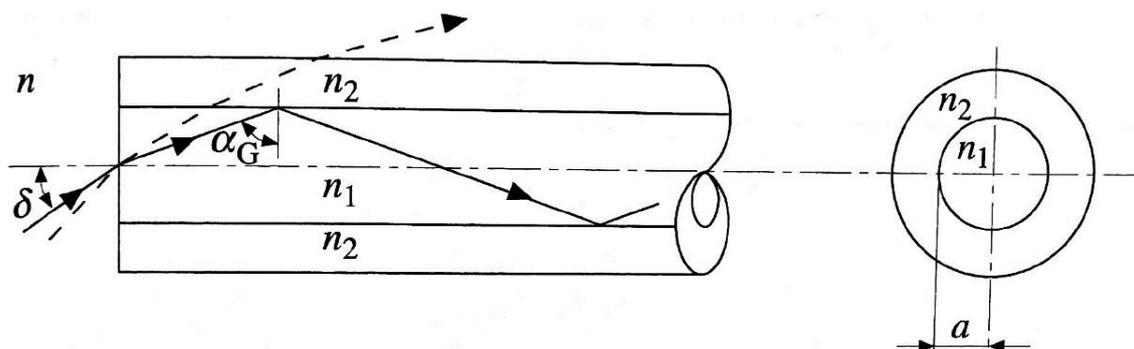


Abbildung 2.31 Glasfaser mit Kern- und Mantelbereich<sup>95</sup>

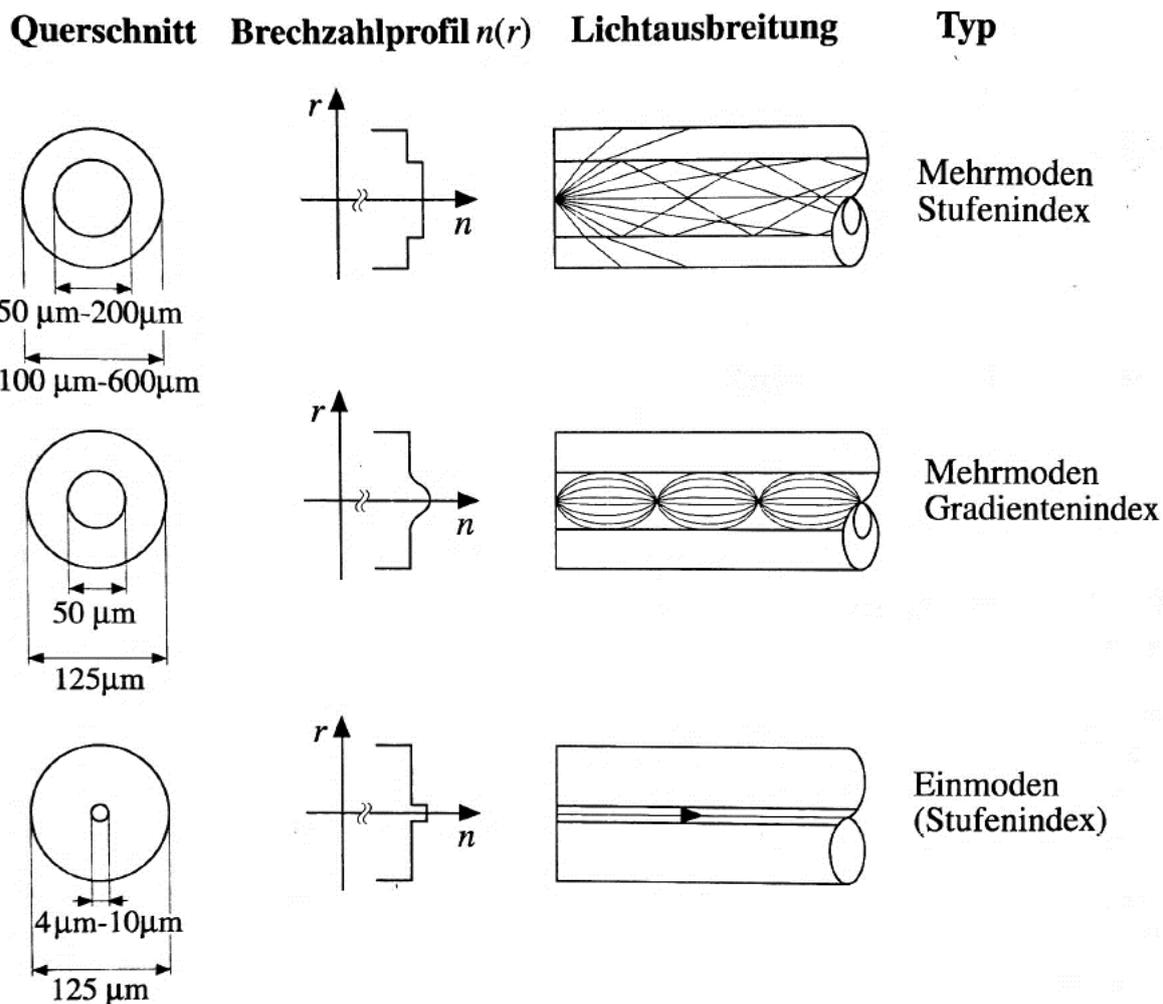
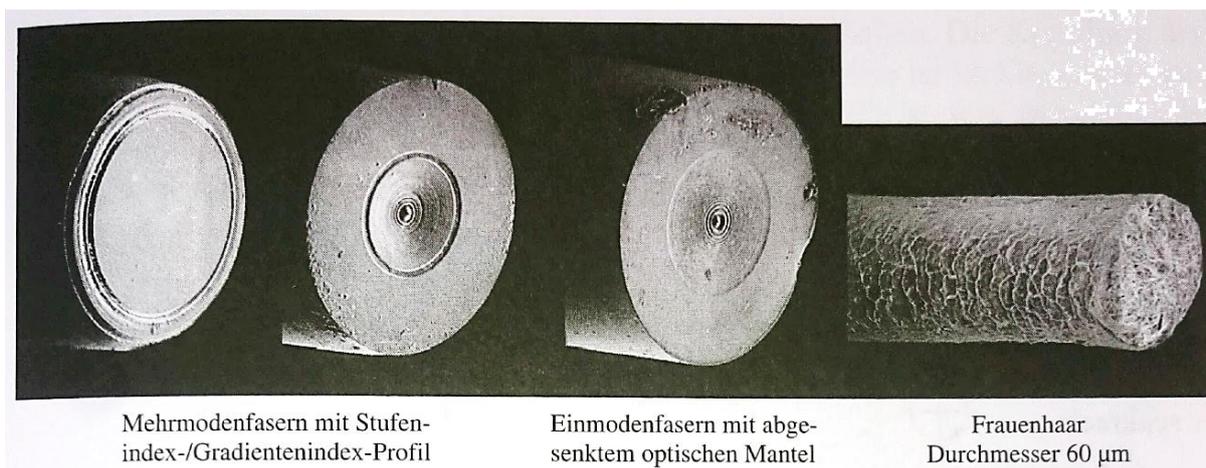
Die drei wichtigsten Fasertypen sind in Abbildung 2.32 dargestellt. Dabei wird zum einen zwischen Stufen- und Gradientenindexfasern, zum anderen zwischen Mehrmoden- und Einmodenfasern unterschieden. Eine Mode beschreibt eine Lichtwelle, die bei einem bestimmten Eintrittswinkel mittels Totalreflexion in der Faser weitergeleitet wird. In Single-Mode-Fasern kann nur die Grundmode des Lichts geführt werden, alle anderen Moden werden nicht geleitet, siehe Abbildung 2.32. In Abbildung 2.33 sind die drei Faserendflächen der drei Typen mittels Rasterelektronenmikroskop aufgenommen worden und in einen Größenvergleich mit einem Frauenhaar gesetzt.<sup>96</sup>

<sup>93</sup> Zur Datenübertragung wird die Laserleistung am Ausgang moduliert und mittels eines intensitätssensitiven Detektors empfangen

<sup>94</sup> vgl. Strobel, 2014

<sup>95</sup> Strobel, 2014, S. 41

<sup>96</sup> vgl. Strobel, 2014

Abbildung 2.32 Gegenüberstellung der drei wichtigsten Fasertypen<sup>97</sup>Abbildung 2.33 Aufnahme der verschiedenen Fasertypen mit einem Rasterelektronenmikroskop und Größenvergleich mit einem Frauenhaar<sup>98</sup><sup>97</sup> Strobel, 2014, S. 48<sup>98</sup> Strobel, 2014, S. 49

In der Praxis verwendete Lichtwellenleiter bestehen wie in Abbildung 2.34 dargestellt normalerweise aus drei Schichten. Kern und Fasermantel haben die Aufgabe der Lichtführung. Die Beschichtung ist hauptsächlich zum mechanischen Schutz von Kern und Fasermantel zuständig.<sup>99</sup>

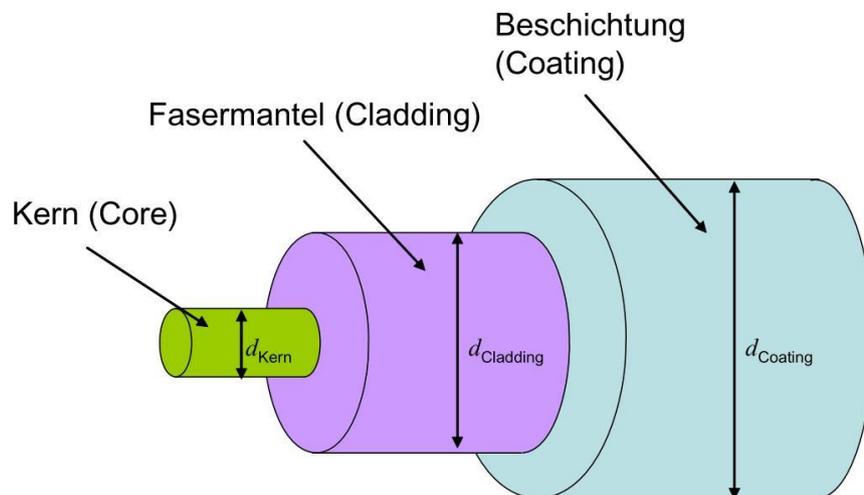


Abbildung 2.34 Schematischer Aufbau von in der Praxis verwendeten Lichtwellenleiter<sup>100</sup>

Zur Temperaturmessung werden faseroptische Sensoren schon seit vielen Jahren eingesetzt. Besonders, wenn elektrische Systeme an Anwendungsgrenzen stoßen, zum Beispiel bei starken elektromagnetischen Feldern oder chemisch kritischen Einsatzorten.

#### 2.3.4.2 Punktförmig messende Sensorsysteme

Bei punktförmig messenden Sensorsystemen werden entweder Faser-Bragg-Gitter in die Sensorfaser eingeschrieben oder ein Halbleiterkristall am Faserende angebracht und somit ein Endpunktsensor realisiert. Die Faser-Bragg-Gitter werden mittels UV-Laserstrahlung und einer mittels Phasenmasken oder Interferometer strukturierten Belichtung in den Kern der Sensorfaser eingeschrieben. Diese Gitter reflektieren Licht einer bestimmten Wellenlänge, welche als Bragg-Wellenlänge  $\lambda_B$  bezeichnet wird, siehe Abbildung 2.36. Diese Bragg-Wellenlänge  $\lambda_B$  ist vom Dehnungszustand und/oder der Temperatur der Faser in diesem Punkt abhängig. Die Temperaturabhängigkeit eines einzelnen Gitters ist in Abbildung 2.35 dargestellt. Eine Änderung der Temperatur verschiebt die Mittenwellenlänge  $\lambda_B$ , wodurch die Temperaturänderung berechnet werden kann. Der Halbleiterkristall am Faserende hat ein temperaturabhängiges Absorptionsverhalten und somit ist die Temperaturmessung möglich. Ein großer Nachteil bei dieser Sensorart ist jedoch, dass

<sup>99</sup> vgl. Schlüter, 2010, S. 18

<sup>100</sup> Schlüter, 2010, S. 24

nur an diskreten Orten gemessen wird, welche vor der Messung festgelegt werden müssen. Besonders bei den Faser-Bragg-Gittern sind die Kosten abhängig von der Anzahl an eingeschriebenen Gittern, was bedeutet das eine Vielzahl an Messstellen die Sensorkosten stark erhöht.<sup>101,102,103</sup>

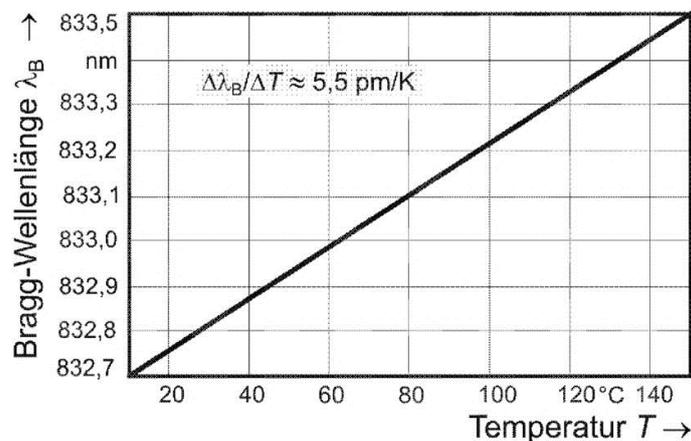


Abbildung 2.35 Temperaturabhängigkeit der Bragg-Wellenlänge eines Faser-Gitters<sup>104</sup>

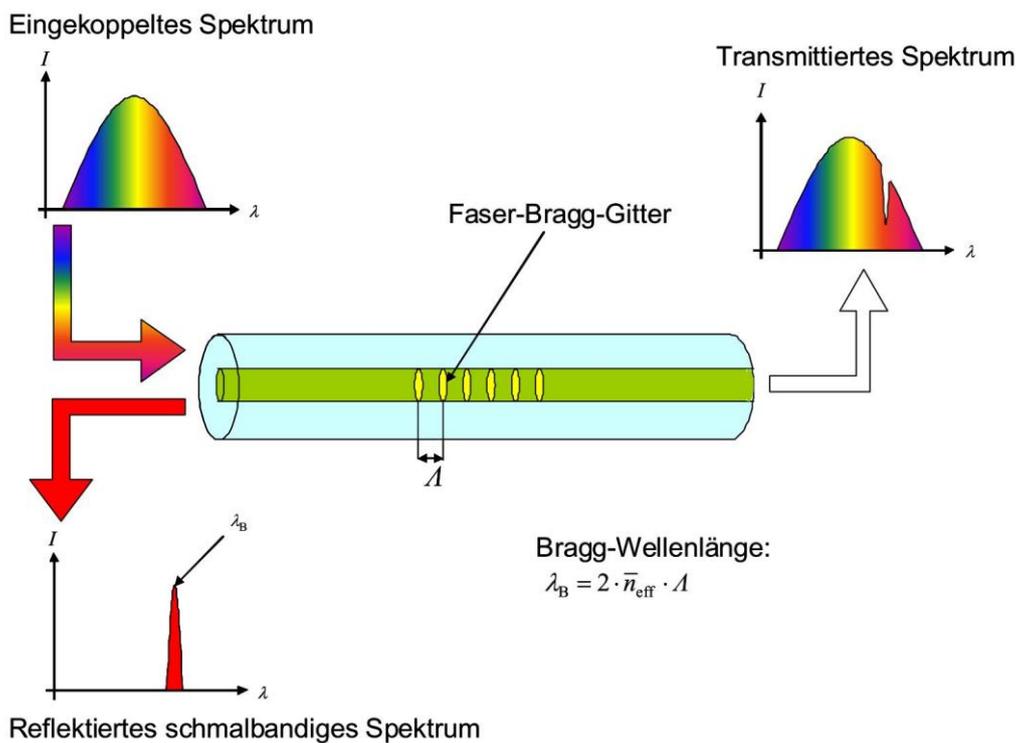


Abbildung 2.36 Funktionsweise der Faser-Bragg-Gitter Messmethode<sup>105</sup>

<sup>101</sup> vgl. Bernhard, 2014, S. 1142 ff.

<sup>102</sup> vgl. Samiec, 2011, S. 34

<sup>103</sup> vgl. Schlüter, 2010, S. 11 f

<sup>104</sup> Bernhard, 2014, S. 1443

<sup>105</sup> Schlüter, 2010, S. 12

Vielversprechende Anwendungsgebiete<sup>106</sup> von Faser-Bragg-Gittern sind

- die Bauwerksüberwachung, zum Beispiel zur Überwachung von Rissbildung in Brücken
- Überwachung von Energieanlagen, zum Beispiel die Temperaturüberwachung in Kraftwerksgeneratoren
- Luft- und Raumfahrt, zum Beispiel als Structural Health Monitoring System

#### 2.3.4.3 Verteilt messende Sensorsysteme

Am Schwachpunkt der punktförmig messenden Sensorsysteme, der Möglichkeit nur an diskreten Orten zu messen, setzt das Prinzip der verteilt messenden Sensorsysteme an. Diese Systeme nutzen das von der Glasfaser selbst zurückgestreute Licht. Genutzt wird für die Messung die Rayleigh-Streuung, welche STROBEL wie folgt beschreibt: „Bei der linearen Streuung, der Rayleigh-Streuung (nach Lord Rayleigh benannt), sind statische Brechzahlschwankungen die Ursache. Dies ergibt sich aus der regellosen Molekülstruktur der verwendeten Wellenleiter (meist SiO<sub>2</sub>). Die Brechzahl variiert innerhalb von Bereichen, die klein gegenüber der Lichtwellenlänge sind. Die einfallende Lichtwelle wird an diesen räumlichen Inhomogenitäten gestreut, wobei die gestreute Leistungsverteilung der eines Hertz'schen Dipols entspricht.“<sup>107</sup>. Wenn man mittels OFDR die Rayleigh-Streuung einer unbehandelten Glasfaser ermittelt, ergibt sich ein charakteristischer Intensitätsverlauf entlang der Faser, also ein charakteristischer „Fingerabdruck“. Ändert sich die Temperatur entlang der Faser, wird dieser „Fingerabdruck“ gestreckt oder gestaucht. Das Sensorsystem besteht üblicherweise aus einer Ausleseeinheit, welche Lichtquelle und Detektor in einem ist, und einer Sensorfaser. Ein durchstimmbarer Laser bringt Licht in die Sensorfaser ein und der Detektor wertet das zurückgestreute Licht aus. Dies ist in Abbildung 2.37 graphisch verdeutlicht.<sup>108</sup>

---

<sup>106</sup> vgl. Bernhard, 2014, S. 1145

<sup>107</sup> Strobel, 2014, S. 52

<sup>108</sup> vgl. Samiec, 2011, S. 34

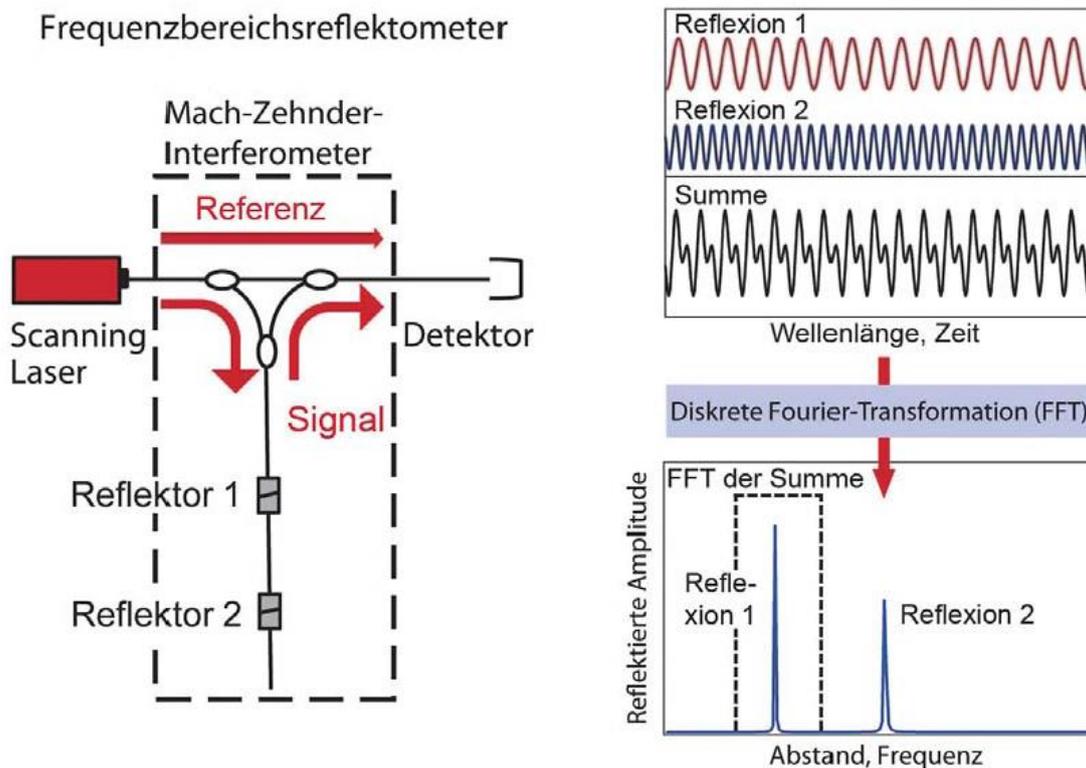


Abbildung 2.37 Abstandsbestimmung der Reflektorpunkte bei der Frequenzbereichsreflektometrie (OFDR)<sup>109</sup>

Dieses Prinzip wird in der verteilt messenden faseroptischen Sensorik von Luna Technologies<sup>110</sup>, dem ODiSI B, umgesetzt. Dabei wird die Sensorfaser in Auswertefenster eingeteilt und in den Frequenzbereich transformiert. Eine Temperaturänderung an einem bestimmten Ort der Faser führt zu einer Frequenzverschiebung in diesem Bereich des „Fingerabdruckes“, woraus die Temperaturänderung in diesem Bereich berechnet werden kann, siehe Abbildung 2.38. Dabei kann eine räumliche Auflösung von aktuell minimal 1,28 mm realisiert werden. Das heißt alle 1,28 mm entlang der Sensorfaser befindet sich ein Messpunkt, somit sind das für eine 10 m lange Sensorfaser rechnerisch 7.812,5 Messpunkte. Da während der Messung die Summe aller Reflektionen aufgezeichnet wird, können mittels Postprocessing alle Messpunkte synchron ausgewertet werden, das heißt für jeden Zeitschritt liegt die Information aller Messpunkte vor. Die Messwiederholgenauigkeit ist im Datenblatt<sup>111</sup> mit  $\pm 0,01\%$  angegeben, bei einer Messauflösung von  $< 0,1$  °C. Dabei können viele herkömmliche Glasfasern verwendet werden, was die Sensorfaser sehr preisgünstig macht. In Abhängigkeit der erwarteten Maximaltemperatur im Anwendungsgebiets muss eine Sensorfaser mit geeigneter Beschichtung ausgewählt werden.

<sup>109</sup> Samiec, 2011, S. 34

<sup>110</sup> Produktbeschreibung von Luna Inc.

<sup>111</sup> Luna Inc., 2016

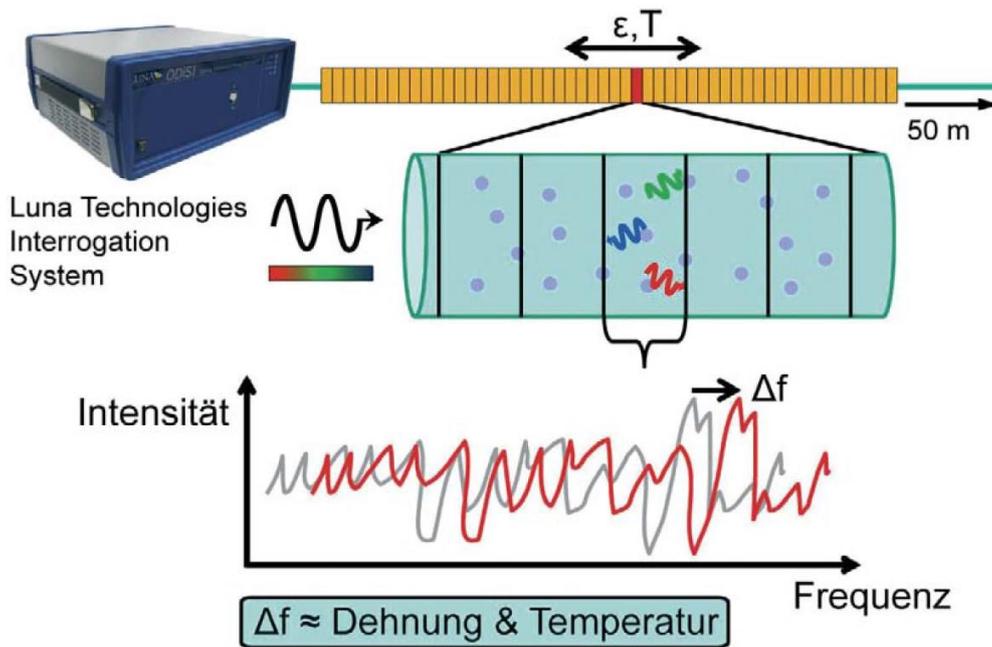


Abbildung 2.38 Auswertung der Rayleigh-Streuung entlang der Sensorfaser<sup>112</sup>

In Abbildung 2.39 ist ein Beispiel der Temperaturverteilungsmessung in einem Ofen dargestellt, bei den eingestellten Ofentemperaturen  $200^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$ ,  $600^{\circ}\text{C}$  und  $800^{\circ}\text{C}$ . Dabei wurde eine mit Gold beschichtete Glasfaser benutzt, welche bis  $800^{\circ}\text{C}$  einsetzbar ist.<sup>113</sup>

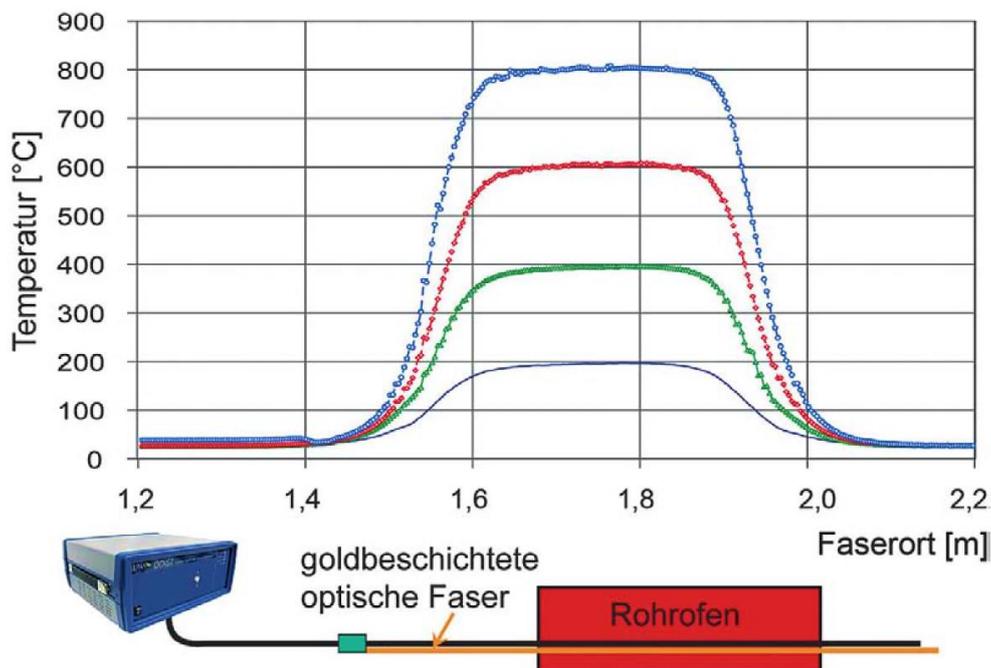


Abbildung 2.39 Messung der Temperaturverteilung bei unterschiedlichen Temperaturen<sup>114</sup>

<sup>112</sup> Samiec, 2011, S. 35

<sup>113</sup> vgl. Samiec, 2011

<sup>114</sup> Samiec, 2011, S. 37

## 2.4 Temperaturmessung in Reibkupplungen

Für die Entwicklung von Kfz-Anfahrkupplungen ist die Temperaturmessung ein sehr wichtiger Bestandteil. Einerseits kann mit der Kenntnis der sich einstellenden Temperatur und -verteilung, bei einer Anfahrt oder einem Fahrzyklus, das Systemverhalten analysiert werden und andererseits ist zum Beispiel die erreichte Maximaltemperatur bei Abnahmetests eine freigaberelevante Größe.

Ohne dabei auf die eigentliche Temperaturmessung einzugehen, beschreibt BERGHEIM die thermischen Grenzen von Kupplungssystemen mit organisch gebundenen Reibbelägen, welche sehr häufig im Kfz eingesetzt werden. Oberhalb von 350°C beginnt sich die aus organischen Bindemitteln bestehende Matrix des Reibbelags zu zersetzen, wodurch zum einen der Verschleiß dramatisch zunimmt und zum anderen sich die tribologischen Eigenschaften bis hin zum Funktionsausfall stark verändern.<sup>115</sup>

Die Temperatur ist einerseits als maximal ertragbare Temperatur die begrenzende Größe eines Kupplungssystems, andererseits lassen sich durch die Beobachtung des Wanderns der Bereiche hoher Temperatur im Wirkflächenpaar die aktuell tribologisch hochbelasteten Bereiche identifizieren. Im Nachfolgenden wird auf relevante Veröffentlichungen in Bezug auf die vorliegende Arbeit eingegangen, welche sich mit der Temperaturmessung mittels Thermoelementen und/oder Thermographiekamera in trockenlaufenden Reibkupplungen beschäftigen.

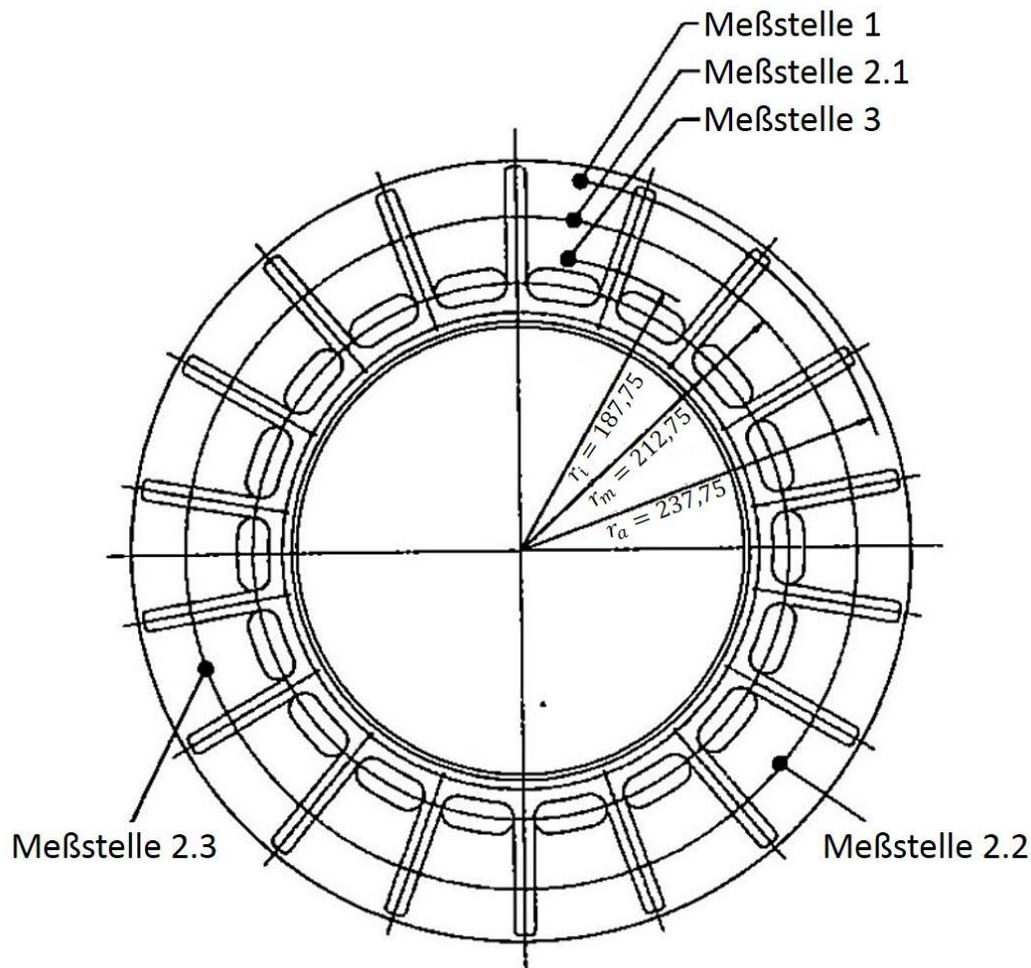
### 2.4.1 Messung mit berührenden Messmethoden

GAUGER benutzt in seinen Untersuchungen zu den Wirkmechanismen und Belastungsgrenzen von Reibpaarungen trockenlaufender Kupplungen Thermoelemente an definierten Orten der C45-Reibscheibe. Zum einen wurde mit drei Thermoelementen Typ K, mit 0,5 mm Manteldurchmesser, nahe dem mittleren Reibradius 120° verteilt gemessen. Ergänzend dazu werden bei Bedarf noch zwei weitere Messstellen zur radialen Temperaturverteilung erfasst, siehe Abbildung 2.40. Die Temperaturen wurden 0,5 mm unter der Reibfläche gemessen, um nicht räumlich zufällige Spitzentemperaturen zu messen, sondern die mittlere Temperatur in dem der Messspitze umgebenden reibflächennahen Flächenelementes.<sup>116</sup>

---

<sup>115</sup> vgl. Bergheim, 1997

<sup>116</sup> vgl. Gauger, 1998, S. 34 ff

Abbildung 2.40 Anordnung der Thermoelemente<sup>117</sup>

Aus der Veränderung der lokalen Reibflächentemperatur zieht er folgende Rückschlüsse auf das Systemverhalten:

„Eine Vielzahl von Versuchsergebnissen zeigt, daß die Temperatur nicht gleichmäßig über die Reibfläche verteilt ist, und sie in den einzelnen Flächenelementen ständig ihre Größe wechselt. Daraus, und aus anderen Versuchen läßt sich schließen, daß auch die Reibkraft nicht gleichmäßig über die Reibfläche verteilt ist, und daß in jedem Augenblick sich jeweils nur wenige Flächenbereiche der Gesamtreibfläche an der Reibkraftübertragung beteiligen. Die Orte maximaler thermischer Belastung ändern ständig ihre Lage, und zwar in der Regel umso häufiger, je größer die von außen aufgeprägte Belastung ist. Die Reibpaarung kann dann als thermisch überlastet gelten, wenn ein vorher geschädigtes Flächenelement der Reibschicht anschließend nicht ausreichend Zeit hat, um zu regenerieren, bis es wieder voll gefordert wird. Dies macht sich dann nach außen hin durch einen starken Abfall der mittleren Reibungszahl und durch einen Anstieg des Verschleißes bemerkbar.“

<sup>117</sup> Gauger, 1998, S. 35, eigene Darstellung

Die Temperaturmessung in der Reibfläche, möglichst an mehreren Stellen gleichzeitig, liefert ein Abbild über die Vorgänge in der Reibfläche. Zur Dokumentation des Gesagten dient Bild 5.1 (siehe Abbildung 2.41). Es zeigt zwei Temperaturkurven, die mit dem gleichen Temperatursensor in der gleichen Meßstelle bei derselben äußeren, mittleren thermischen Belastung zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb einer langzeitigen Versuchsreihe aufgezeichnet wurden.

Beide Temperaturkurven beschreiben also einen augenblicklichen Belastungszustand des betrachteten Reibflächenelements, wobei die Größe der maximal gemessenen Temperatur als Maß für die lokal thermische Belastung angesehen werden kann.<sup>118</sup>

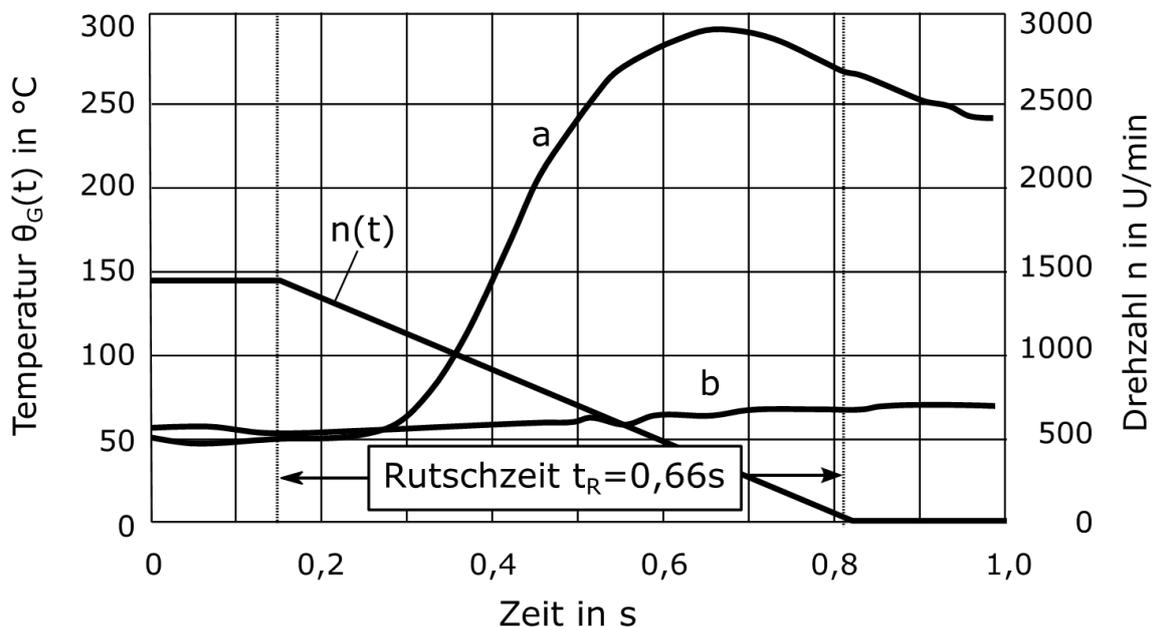


Abbildung 2.41 Vergleich von Temperaturmessschrieben desselben Messpunktes für zwei unterschiedliche Schaltungen<sup>119</sup>

Die ungleichmäßigen Belastungen eines Flächenelementes rund um die Temperaturmessstellen zeigt auch Abbildung 2.42. Mit einer Schalthäufigkeit von 50 Schaltungen pro Stunde wird Energie in das Kupplungssystem eingetragen. Besonders Schaltung 13 und die darauffolgenden Schaltungen zeigen ein auffälliges Verhalten. Die gemessene Temperatur zeigt bei Schaltung 13 eine sehr große Temperaturänderung, wohingegen die darauffolgenden Schaltungen einen deutlich geringeren Temperaturhub aufweisen. Aus diesem Verhalten schließt der Autor, dass bei Schaltung 13 die Fläche nahe dem Thermoelement überlastet war und geschädigt wurde und in den darauffolgenden Schaltungen kaum mehr am Reibprozess beteiligt

<sup>118</sup> Gauger, 1998, S. 42

<sup>119</sup> Severin et al., 1996, S. 27, eigene Darstellung

war. Die moderate Temperaturerhöhung während des Energieeintrages ist mit der Wärmeleitung in der Gegenreibeischeibe erklärbar.<sup>120</sup>

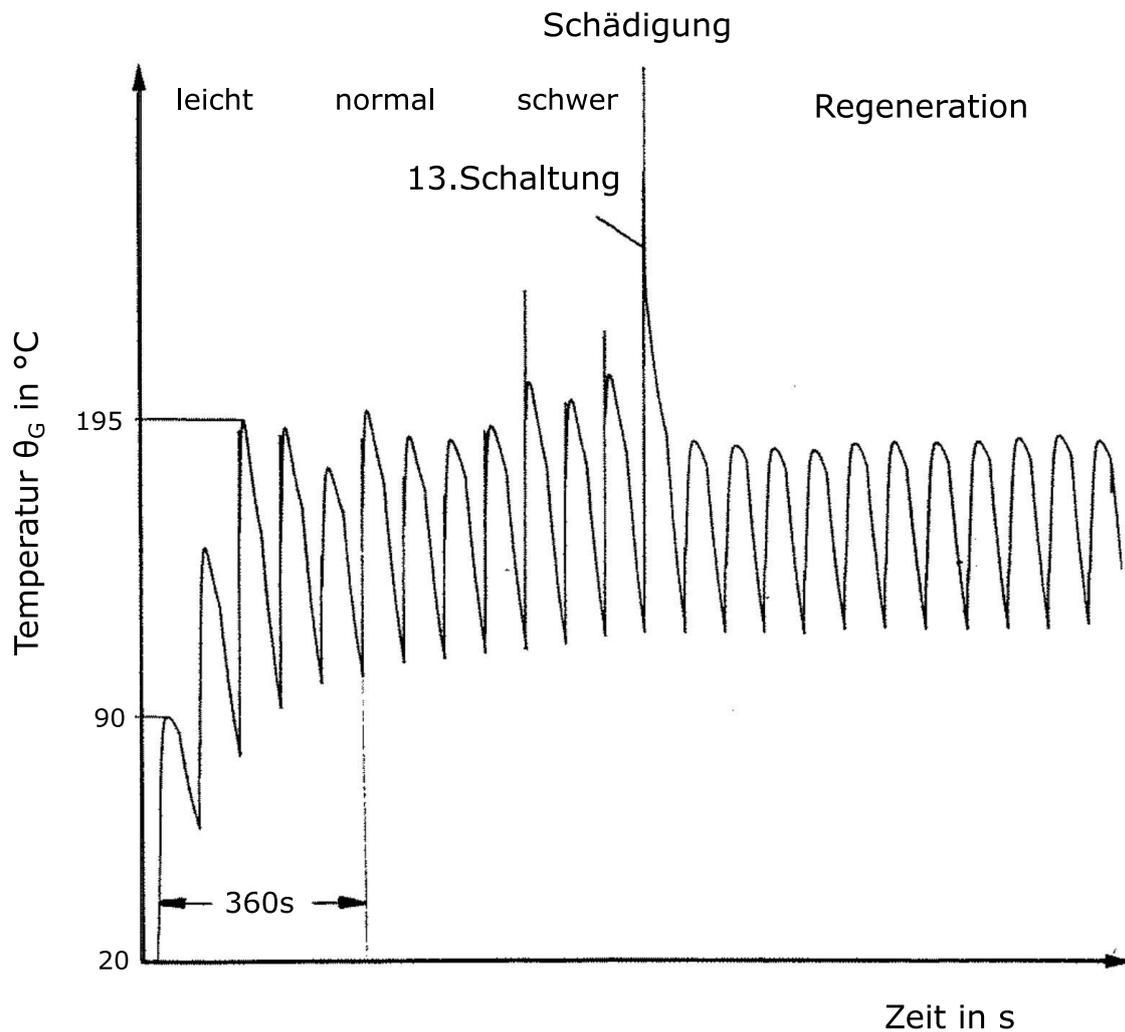


Abbildung 2.42 Temperaturverlauf eines Messpunktes mit unterschiedler Belastung im Reibprozess<sup>121</sup>

Die radiale Anordnung der Thermolemente in Abbildung 2.43 zeigt eine periodische Verlagerung der Temperatur vom Außen- zum Innenradius und zeigt somit das Wandern von reibaktiven Bereichen. Diese beiden Sachverhalte unterstützen die Aussage, dass nicht alle Bereiche der Reibfläche gleichmäßig belastet werden, wobei die Inhomogenität der Temperatur als Indikator dafür dient.<sup>122</sup>

<sup>120</sup> vgl. Severin et al., 1996

<sup>121</sup> Severin et al., 1996, S. 31, eigene Darstellung

<sup>122</sup> vgl. Gauger, 1998, S. 47 ff

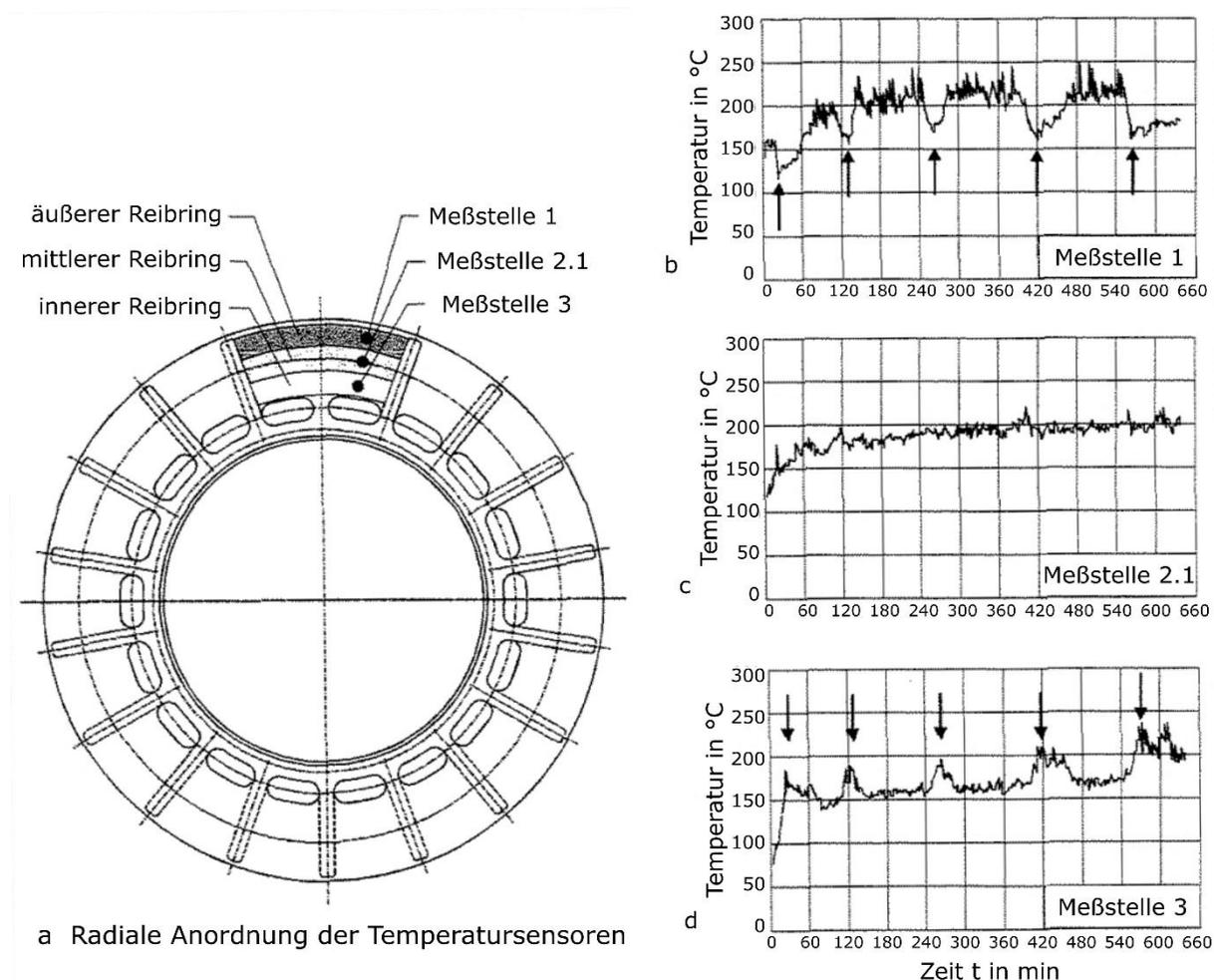


Abbildung 2.43 Periodische Verlagerung der Temperatur zwischen Außen- und Innendurchmesser<sup>123</sup>

Nach OEDEKOVEN<sup>124</sup> ist die Beschreibung des Temperverhaltens per Berechnung am sinnvollsten, was er wie folgt begründet:

„In der vorliegenden Arbeit wird die numerische Berechnung der instationären Temperaturfelder mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente durchgeführt, um die räumliche und zeitliche Verteilung der Temperaturen im Kupplungsteilen sichtbar zu machen. Die Messung im Versuch wird lediglich benutzt um die Randbedingungen der numerischen Berechnung zu überprüfen.

Dieses Vorgehen begründet sich wie folgt: Durch Vorversuche konnte gezeigt werden, daß eine experimentelle Untersuchung der maximal auftretenden Temperatur an der Reibfläche beim einzelnen Schaltvorgang nicht möglich ist. Weder mit Hilfe von Strahlungs-pyrometern noch mit Hilfe von Thermoelementen läßt sich die Temperatur an der Reibfläche messen. Es ist lediglich möglich, die Temperatur in einem gewissen

<sup>123</sup> Gauger, 1998, S. 54, eigene Darstellung

<sup>124</sup> vgl. Oedekoven, 1989

Abstand unter der Reibfläche zu messen und auf die Temperatur der Reibfläche zurückzurechnen.

Dies ist aber aus zwei Gründen fragwürdig: Zum einen wird durch den Einbau des Thermoelements und der damit notwendigen Bohrungen und Isolierungen das Temperaturfeld beeinflusst. Zum zweiten ist die Trägheit des Thermoelements zu groß um die bei kurzen Rutschzeiten auftretenden starken zeitlichen Temperaturgradienten richtig wiedergeben zu können. Außerdem treten häufig umlaufende Temperaturnester auf, die das Meßergebnis beeinflussen.“<sup>125</sup>

Um die Berechnungsergebnisse zu verifizieren, appliziert OEDEKOVEN 6 Thermoelemente in der Prüfkupplung und ermittelt den Wärmeübergang mittels einem 12 stufigen Versuchsplan, sowohl mit und ohne äußere Isolation des Kupplungssystems. Daraus resultiert letztlich die Berechnung der Temperaturverteilung während des Reibvorganges, wie sie in Abbildung 2.44 dargestellt ist. Eine Validierung dieser Verteilung wird nicht durchgeführt.<sup>126</sup>

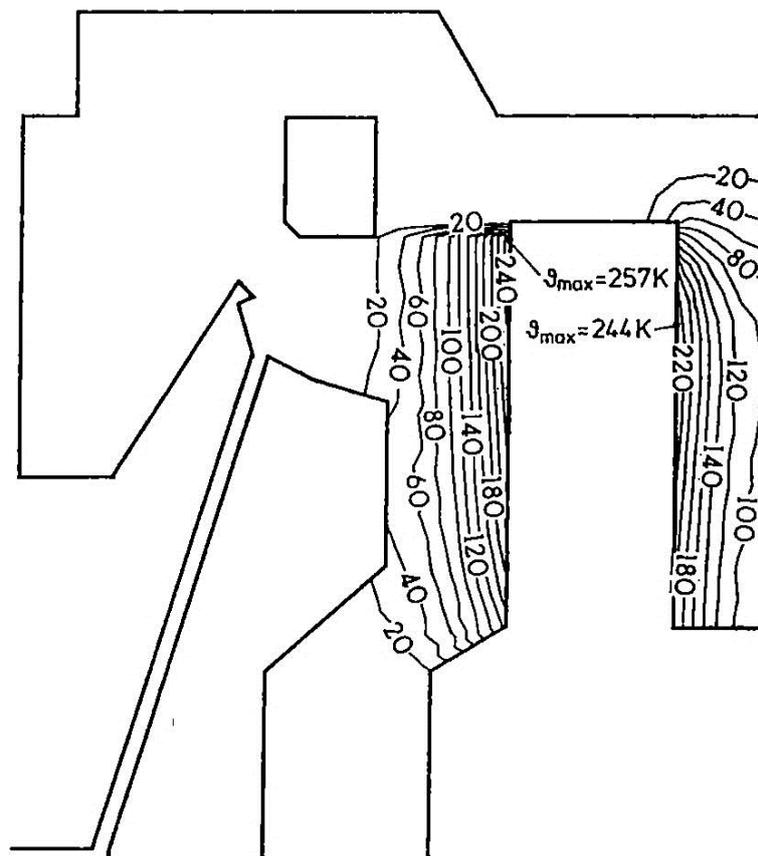


Abbildung 2.44 Berechnete Temperaturverteilung nach 1s von 2s Rutschzeit<sup>127</sup>

<sup>125</sup> Oedekoven, 1989, S. 22–23

<sup>126</sup> vgl. Oedekoven, 1989

<sup>127</sup> Oedekoven, 1989, S. 124

BEITLER<sup>128</sup> beschäftigt sich in seiner Arbeit mit dem Temperatur- und Wärmeabgabeverhalten einer Einscheiben-Trockenkupplung. Das Ziel seiner Arbeit beschreibt BEITLER wie folgt: „Die zentrale Zielsetzung der Arbeit besteht darin, das für Auslegungszwecke wichtige Abkühlverhalten der Kupplung entlang ihres Temperaturgefälles von der Reibfläche bis zur Umgebung mit den drei Wärmeübertragungsarten darzustellen und mathematisch zu beschreiben.“<sup>129</sup> In Bezug auf die Temperaturmessung im Kupplungssystem wurden Thermoelemente des Typs K verwendet. Dabei wurden alle relevanten Bauteile mit Sensoren ausgerüstet, um Versuche zur Wärmeleitung und Wärmeübergang durch Strahlung und Konvektion durchzuführen. In Abbildung 2.45 wird die berechnete Temperaturverteilung zweier Anpressplatten dargestellt, welche beide simulativ mit demselben Wärmeeintrag von 70kJ innerhalb von 8s beaufschlagt wurden. Deutlich zu sehen sind die Temperaturunterschiede direkt in der Reibfläche und in das Bauteil hinein. Um die Wärmeleitung in der Druckplatte zu erfassen, wurden wie in Abbildung 2.46 dargestellt mehrere Thermoelemente an ausgewählten Stellen angebracht. Für die Messung im Fahrzeug wurde dann wie in Abbildung 2.47 dargestellt, die Kupplungsglockenluft mit einem Thermoelement gemessen.

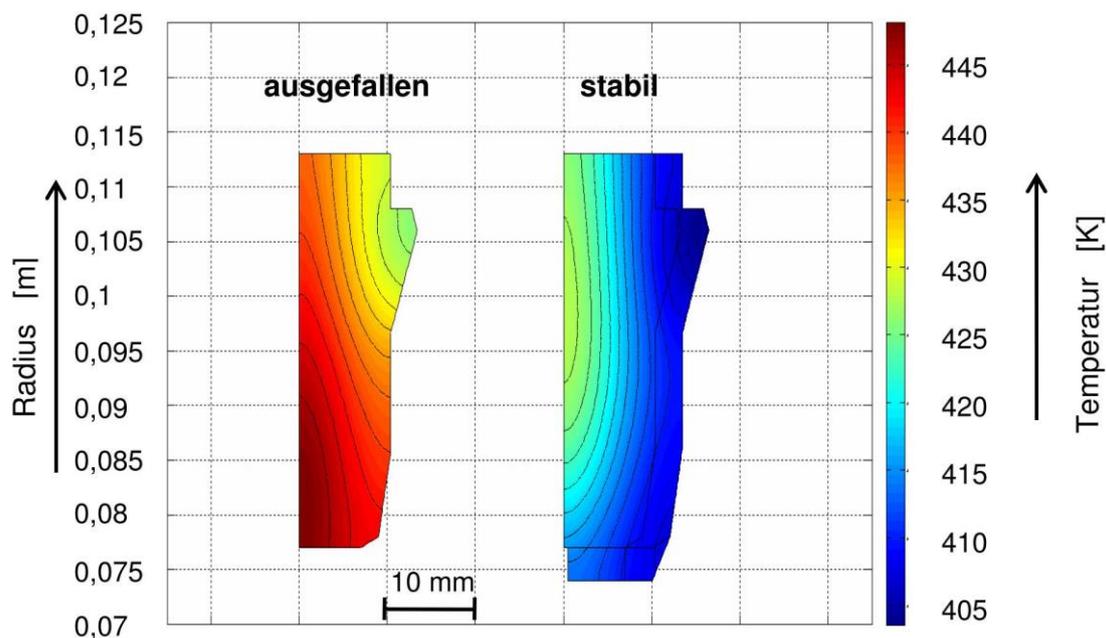


Abbildung 2.45 Berechnete Temperaturverteilung in zwei unterschiedlichen Anpressplatten<sup>130</sup>. Links bei Versuchsfahrten wegen thermischer Überlastung der Anpressplatte ausgefallenes System, rechts thermisch stabiles Verhalten der Anpressplatte.

<sup>128</sup> vgl. Beittler, 2008

<sup>129</sup> Beittler, 2008, Kurzfassung

<sup>130</sup> Beittler, 2008, S. 124

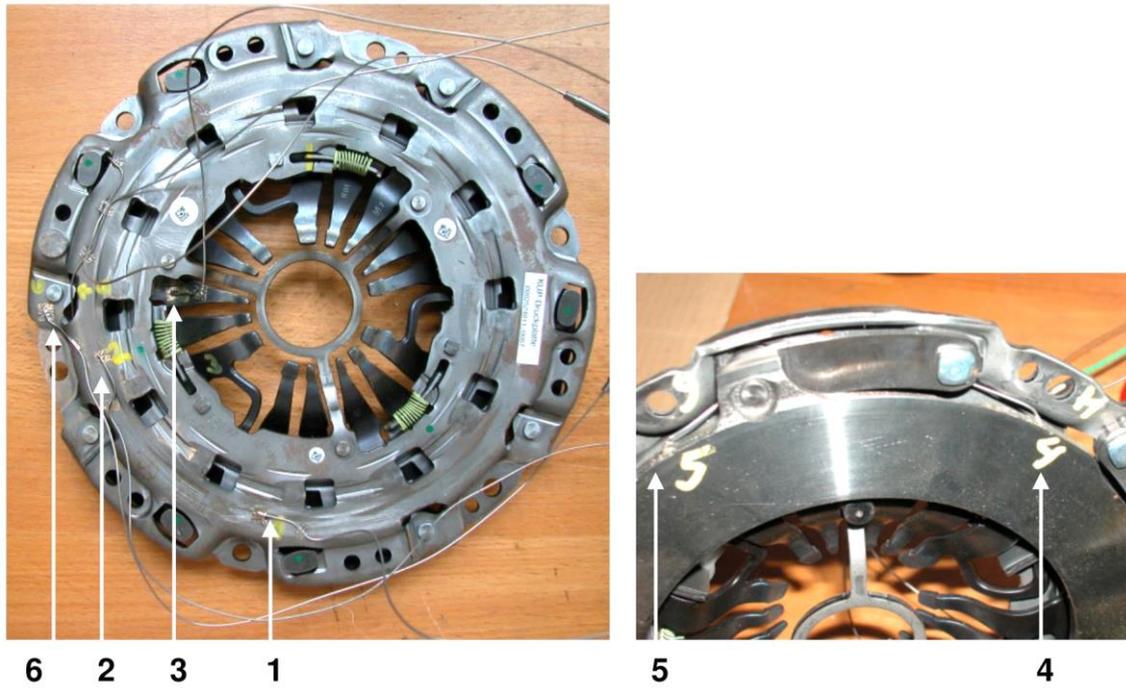


Abbildung 2.46 Positionen der Thermoelemente zur Charakterisierung des Wärmeübergangs in einer trockenlaufenden Einscheibenkupplung<sup>131</sup>

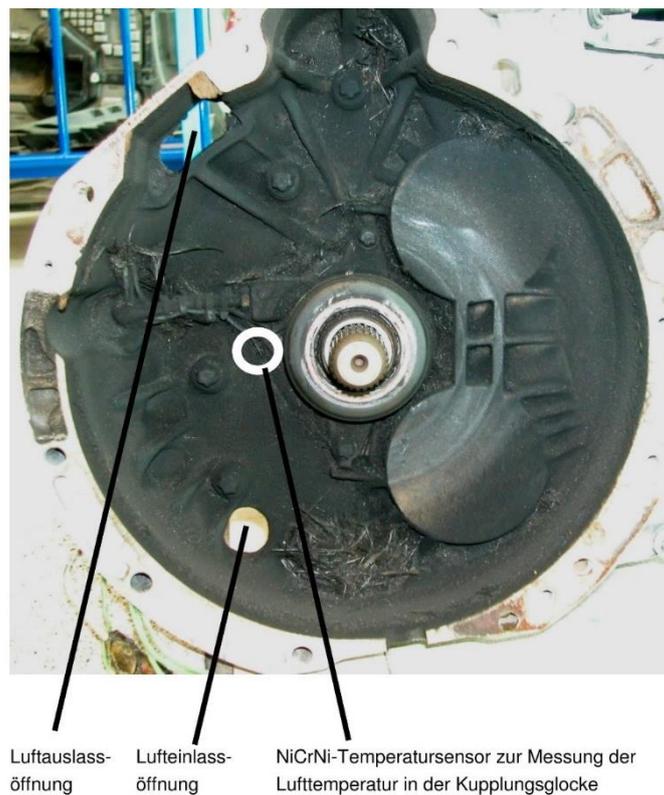


Abbildung 2.47 Messung der Kupplungsglockentemperatur mittels Thermoelement<sup>132</sup>

<sup>131</sup> Beittler, 2008, S. 132

<sup>132</sup> Beittler, 2008, S. 175

WOHLLEBER<sup>133,134</sup> beschreibt in seiner Arbeit den thermischen Haushalt nasslaufender Lamellenkupplungen. „Als wichtiges Beurteilungskriterium sowohl hinsichtlich Spontanschäden als auch im Hinblick auf Langzeit-Schadensfortschritt (Veränderung der Reibcharakteristik) und Verschleiß hat sich die im Reibkontakt auftretende Spitzentemperatur gezeigt“<sup>135</sup>. Dabei liegt in seiner Arbeit das Hauptaugenmerk auf der Weiterentwicklung des FVA-Programm KUPSIM, mit welchem 2D und 3D Temperaturverläufe in Lamellenkupplungen berechnet werden können. Zur Absicherung der berechneten Verläufe wird bei den experimentellen Untersuchungen immer mit einer Messlamelle gearbeitet, in der bis zu vier Thermoelemente (Typ K) eingebracht werden, siehe Abbildung 2.48.

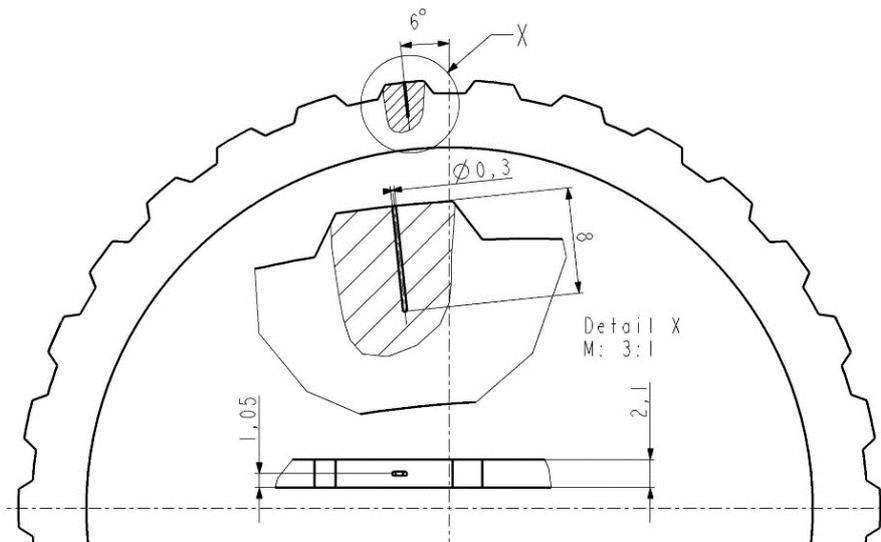


Abbildung 2.48 Messlamelle zur Temperaturmessung<sup>136</sup>

Der Messschieb der jeweils um 90° versetzt applizierten Thermoelemente zeigt, dass sich die Spitzentemperaturen in der Stahllamelle über den Umfang um ca. 10°C unterscheiden, siehe Abbildung 2.49.

<sup>133</sup> vgl. Wohlleber, 2012

<sup>134</sup> vgl. Wohlleber et al., 2011

<sup>135</sup> Wohlleber, 2012, S. 5

<sup>136</sup> Wohlleber et al., 2011, S. 18

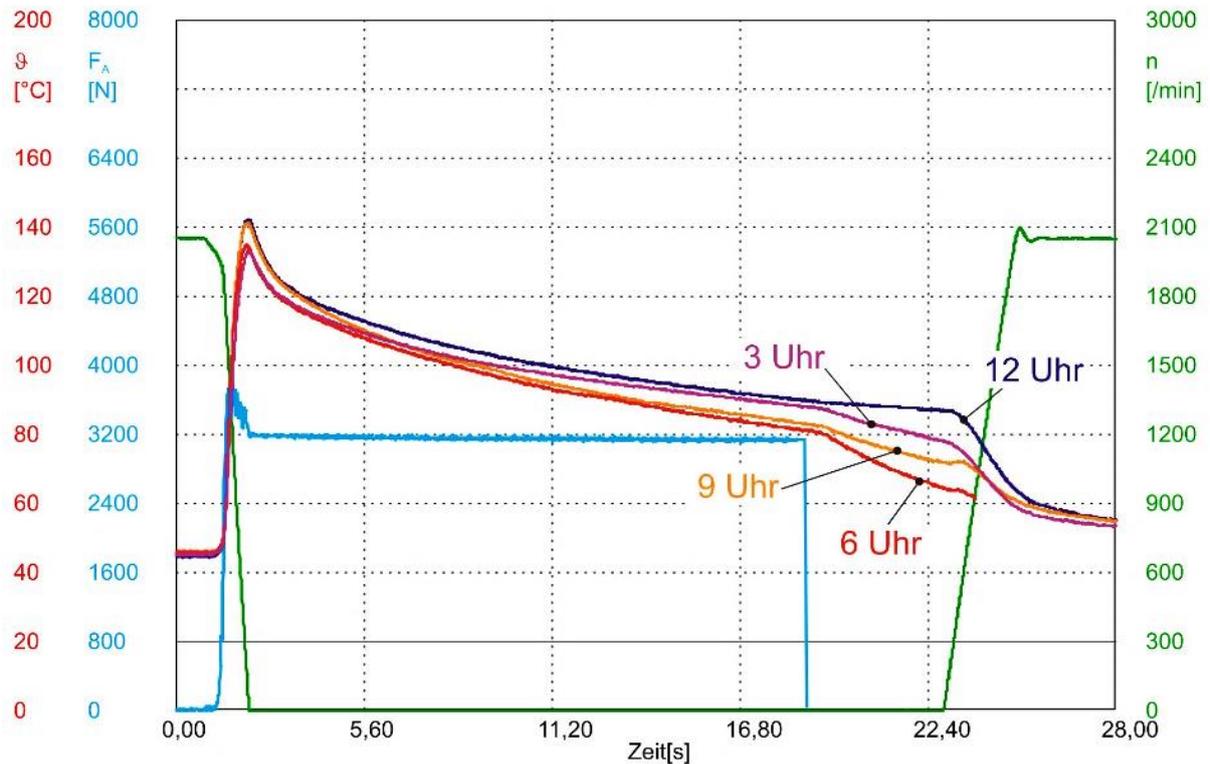


Abbildung 2.49 Temperaturverlauf von 4 Messstellen in der Messlamelle<sup>137</sup>

Bei der Verwendung von sinusgewellten Stahllamellen<sup>138</sup> wurde eine über den Umfang sich stark inhomogene Temperaturentwicklung festgestellt. „Versuche mit sinusgewellten Stahllamellen hatten einen über dem Umfang ungleichmäßigen Temperatureintrag gezeigt, der eine Auswertung dieser Versuche hinsichtlich Wärmeübergangszahlen für KUPSIM unmöglich machte. Die Wiederholung dieser Versuche mit planen Stahllamellen zeigte eine deutlich gleichmäßigere Erwärmung der Messlamelle.“<sup>139</sup>

Das in vorangegangenen Arbeiten entwickelte Berechnungsmodell KUPSIM wurde von VÖLKE ET AL.<sup>140,141</sup> um eine axiale Wärmeleitung im Kupplungspaket und die Berechnung von über den Umfang ungleichmäßigen Temperaturen erweitert. Zusätzlich wurde die Möglichkeit geschaffen, ein komplettes Lamellenpaket zu berechnen. Ausgehend von den Systemgrenzen aus Abbildung 2.50 wurde die Berechnung auf sechs Reibflächen erweitert, siehe Abbildung 2.51.

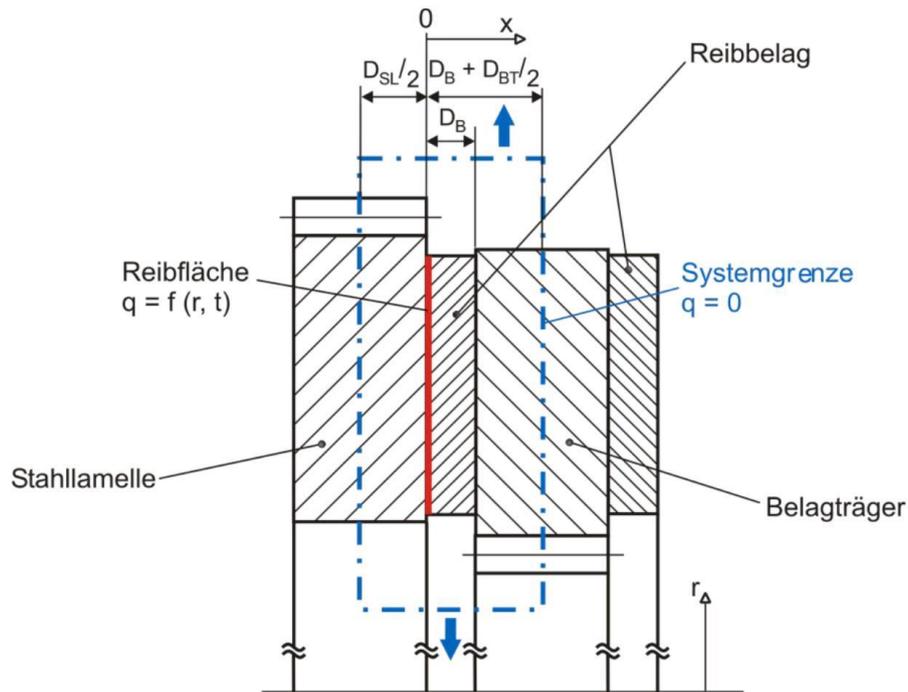
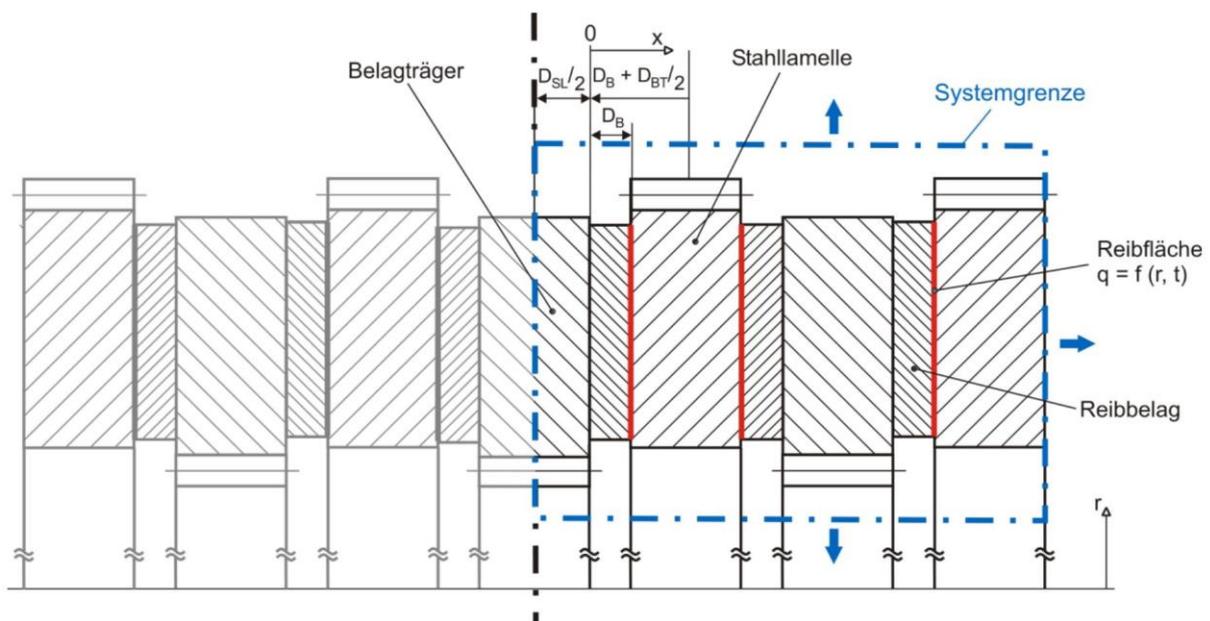
<sup>137</sup> Wohlleber et al., 2011, S. 49

<sup>138</sup> d.h. die Stahllamelle ist nicht wie in der Draufsicht in Abbildung 2.48 dargestellt eben, sondern über den Umfang sinusförmig gewellt

<sup>139</sup> Wohlleber et al., 2011, S. 104

<sup>140</sup> Völkel et al., 2014

<sup>141</sup> Völkel et al., 2016

Abbildung 2.50 Bisherige Systemgrenzen KUPSIM<sup>142</sup>Abbildung 2.51 Erweiterung Systemgrenzen KUPSIM auf sechs Reibflächen<sup>143</sup>

Um den Wärmefluss bestimmen zu können wurde die Prüfkupplung wie in Abbildung 2.52 dargestellt mit Temperaturmessstellen versehen. Dabei wurde zusätzlich zur Darstellung auch noch an zwei Positionen in der Stahllamelle gemessen, welche 180° voneinander versetzt waren. Hier war ein großer Unterschied bei Bremsungen mit stehenden Reiblamellen im Ölbad festzustellen, siehe Abbildung 2.53. Dieser

<sup>142</sup> Völkel et al., 2016, S. 430

<sup>143</sup> Völkel et al., 2014, S. 6

Temperaturunterschied ist damit zu erklären, dass die Messstelle in der Stahllamelle im halb gefüllten Ölbad die im Reibprozess erzeugt Wärme an das Öl abgeben kann, wohingegen die Wärmeleitung von der in der Luft befindlichen Messstelle deutlich schlechter ist.

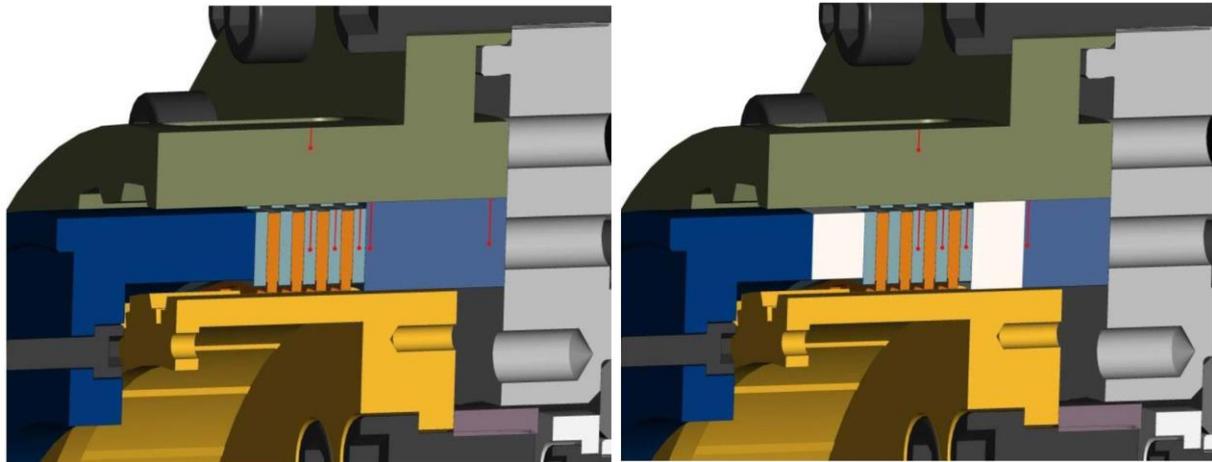


Abbildung 2.52 Anordnung Thermoelemente im Lamellenpaket<sup>144</sup>

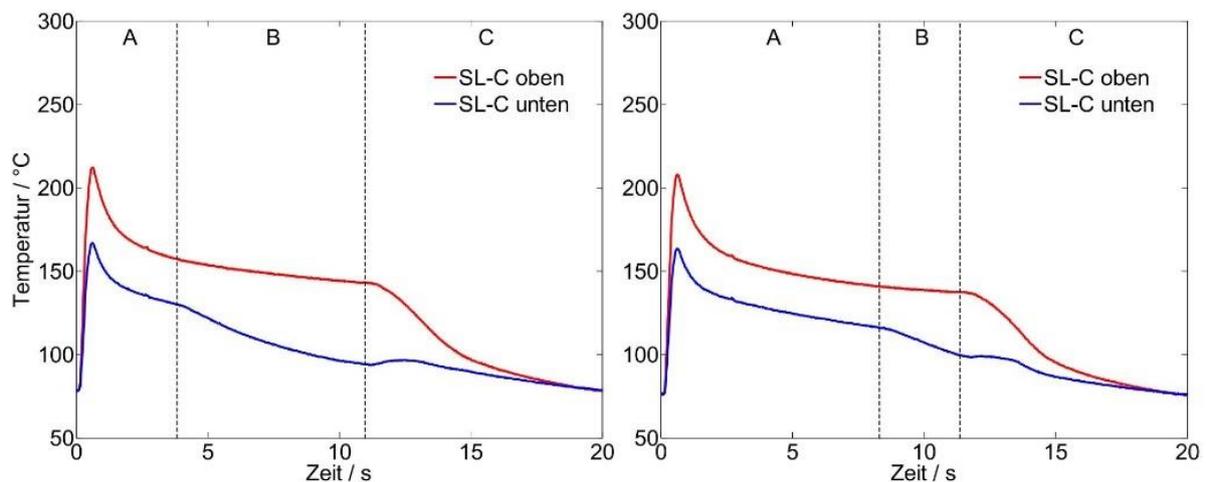


Abbildung 2.53 Temperaturverläufe der Messstellen oben/unten bei Bremsbetrieb im Ölbad<sup>145</sup>

HOIC ET AL. beschreiben den Einfluss der thermischen Ausdehnung der Bauteile einer Doppelkupplung auf die anliegende Anpresskraft im Wirkflächenpaar. Dabei wird zuerst experimentell das Verhalten charakterisiert und aus diesen Erkenntnissen ein mathematisches Modell erstellt. Das untersuchte Doppelkupplungssystem, ein System mit Zentralplatte, ist in Abbildung 2.54 dargestellt. Als rote Punkte sind die Temperaturmesspunkte in der Zentralplatte (FW), der Anpressplatte 2 (PP2) und im Deckel (YO) abgebildet. Die Prüfumgebung ist in Abbildung 2.55 dargestellt. Zur Ermittlung des Einflusses der thermischen Ausdehnung wurde die Kupplung auf

<sup>144</sup> Völkel et al., 2014, S. 8

<sup>145</sup> Völkel et al., 2014, S. 14

200 °C aufgeheizt und dann bei der Abkühlphase immer wieder das sich einstellende Drehmoment bei einer vorgegebenen Aktorposition aufgezeichnet. Die Temperaturmessung wird nicht näher spezifiziert, aus den Abbildungen ist jedoch erkennbar, dass Thermoelemente benutzt wurden. Eine räumliche verteilte Messung über den Umfang oder den Radius, um eventuell auftretende thermomechanische Verformungen zu erfassen, wurde nicht durchgeführt.<sup>146</sup>

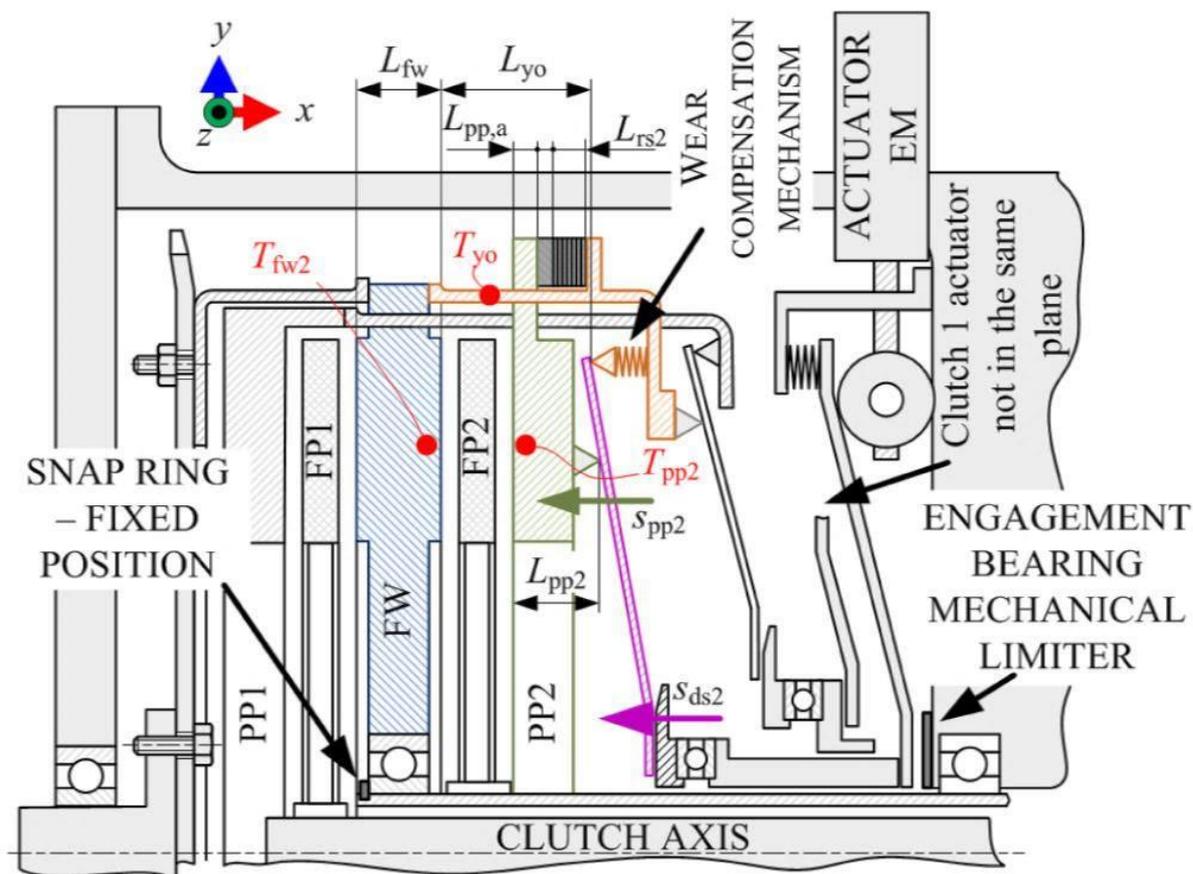
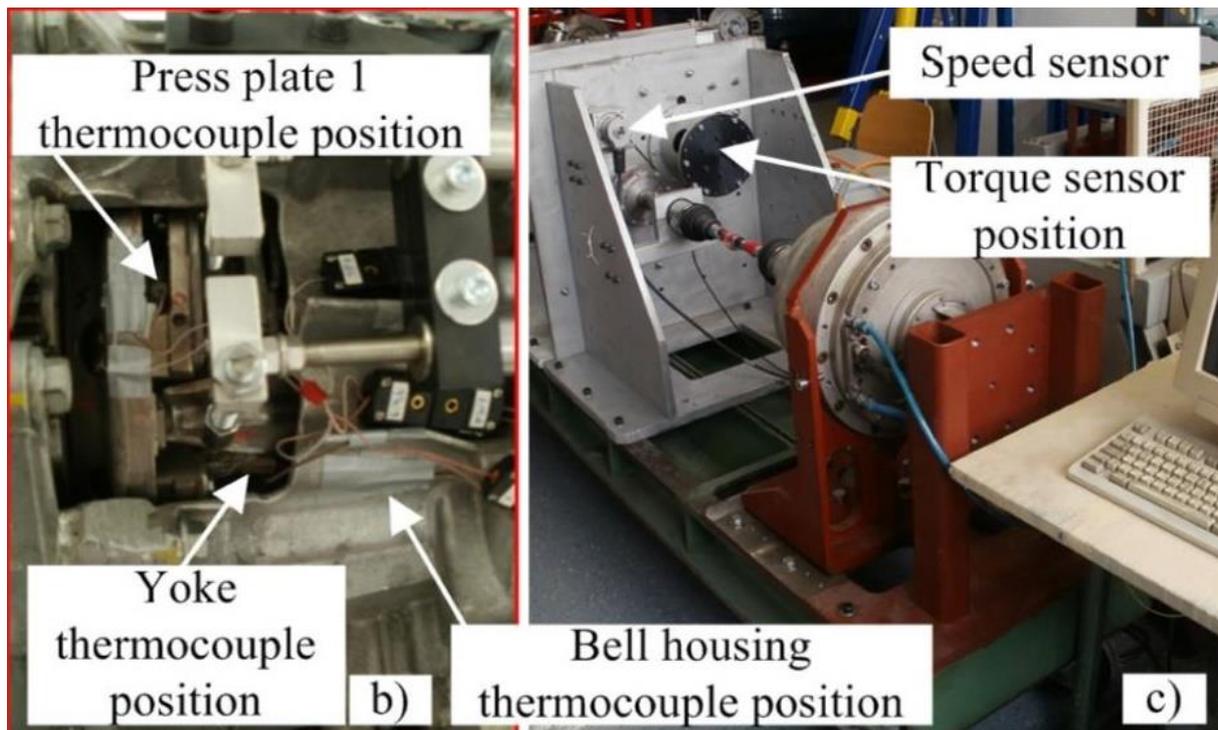


Abbildung 2.54 Schematische Darstellung Doppelkupplungssystem mit Temperaturmesspunkten<sup>147</sup>

<sup>146</sup> vgl. Hoic et al., 2013

<sup>147</sup> Hoic et al., 2013, S. 776

Abbildung 2.55 Prüfaufbau<sup>148</sup>

HEBBALE ET AL.<sup>149</sup> entwickelten ein Thermomodell für eine trockenlaufende Doppelkupplung, siehe Abbildung 2.56 und Abbildung 2.58. Die Notwendigkeit eines solchen Berechnungsmodells beschreibt der Autor wie folgt: „In dry clutches with current linings, above a critical temperature, the friction system starts to suffer permanent damage. In addition, the clutch friction characteristics are a function of the clutch interface temperature. Because a reliable, low-cost temperature sensor is not available for this application, the clutch control engineers rely on a good thermal model to estimate the temperature of the clutches.“<sup>150</sup> Um die Parameter für das Berechnungsmodell bestimmen zu können, wurde ein Fahrzeug mit Messtechnik ausgestattet. So wurden im Fahrbetrieb die Temperaturen der Anpressplatten C1 und C2, die Zentralplattentemperatur und die Temperatur der Anbindungen der beiden Anpressplatten Pulling Cover 1 und Pulling Cover 2 gemessen. In Abbildung 2.57 ist dargestellt, wie die Thermoelemente in die Anpressplatte C1 eingebracht worden sind. Das letztlich erstellte Thermomodell kann aber nur eine mittlere Temperatur jedes Bauteils ausgeben. Eine mögliche Temperaturverteilung in dem jeweiligen Bauteil kann nicht berechnet werden mit diesem Modell. Dies genügt aber auch den Anforderungen, eine für das System kritische Temperatur im Fahrzeug berechnen zu können.<sup>151</sup>

<sup>148</sup> Hoic et al., 2013, S. 776

<sup>149</sup> vgl. Hebbale et al., 2015

<sup>150</sup> Hebbale et al., 2015, S. 1

<sup>151</sup> vgl. Hebbale et al., 2015

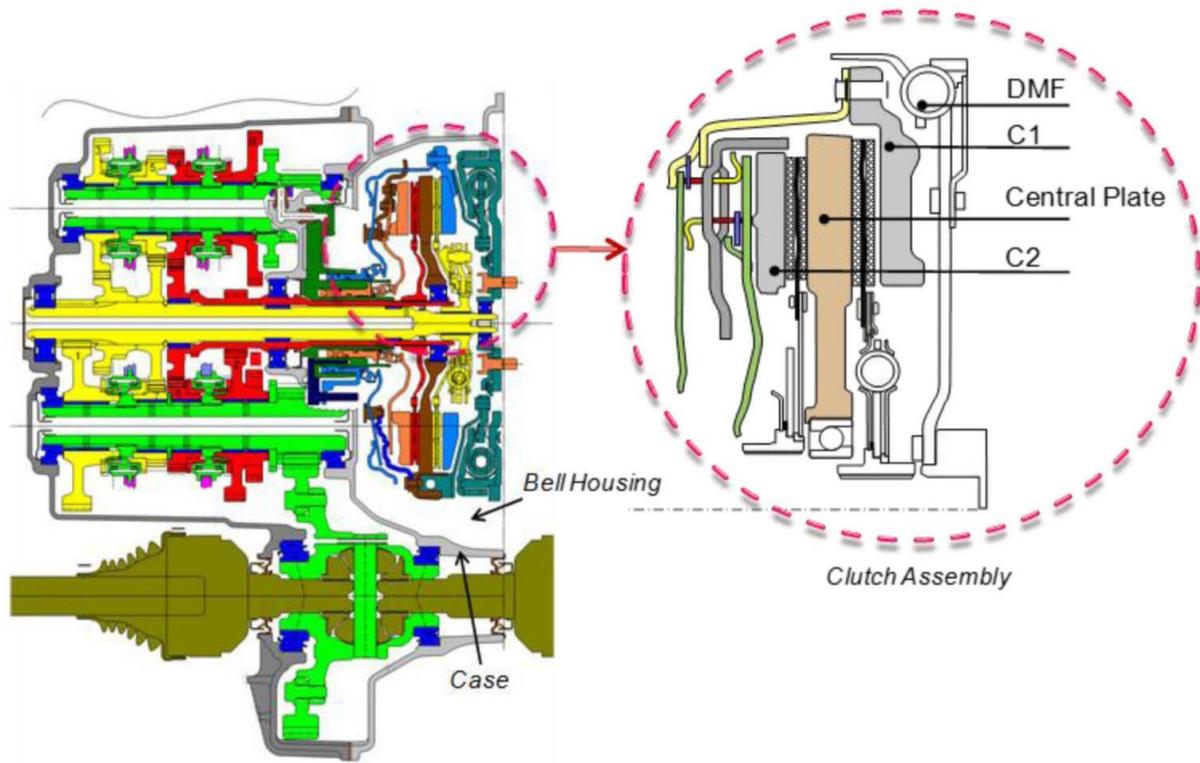


Abbildung 2.56 Schnittdarstellung der untersuchten Doppelkupplung<sup>152</sup>



Abbildung 2.57 Applizierte Thermolemente in der Anpressplatte C1<sup>153</sup>

<sup>152</sup> Hebbale et al., 2015, S. 2

<sup>153</sup> Hebbale et al., 2015, S. 4

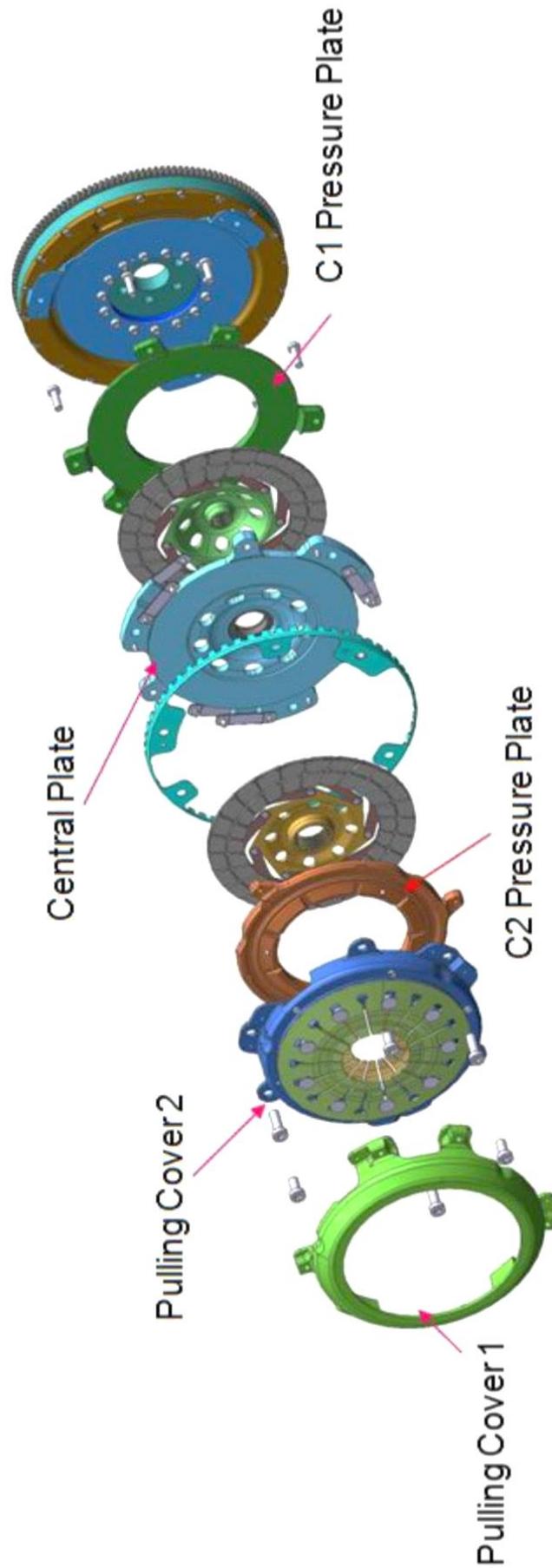


Abbildung 2.58 Explosionsansicht des untersuchten Doppelkupplungssystems<sup>154</sup>

In seiner Arbeit zur Modellierung des Temperaturverhaltens und der Untersuchung des Einflusses der Reibbelagsgeometrie auf das Reibungszahlverhalten trockenlaufender Friktionssysteme beschäftigt sich MERKEL<sup>155,156</sup> mit der Messung und simulativen Berechnung der Temperaturverteilung der Prüfkupplung. Die untersuchte Prüfkupplung ist in Abbildung 2.59 und Abbildung 2.60 dargestellt. Die Temperaturmessung findet in der Gegenreibscheibe statt, wie in Abbildung 2.61 dargestellt.

Zu Beginn wird der Einfluss der Gestalt der Prüfkupplung untersucht, indem die Anschraubsituation der Gegenreibscheibe und die damit einhergehenden Verschiebungen der Reibfläche simulativ variiert werden. Wie in Abbildung 2.61 zu sehen ist, kann die Gegenreibscheibe sowohl innerhalb und außerhalb der Reibfläche angeschraubt werden. Die berechneten Anschraubsituationen sind in Abbildung 2.62, das Ergebnis der Rechnung in Abbildung 2.63 dargestellt. Deutlich zu sehen ist in Abbildung 2.63, dass die innen und außen verschraubte Gegenreibscheibe die geringste Verschiebung der Reibfläche zeigt. „Die Verformung aller Varianten (gemessen auf einem Radius oberhalb des inneren Teilkreisdurchmesser der inneren Verschraubung) (...). Variante 1 weist die niedrigsten Verformungen auf und liegt deutlich unter den Werten aller anderen Varianten. In allen Verläufen sind drei über den Umfang verteilte Bereiche mit erhöhter Verformung zu erkennen. Diese Verformungen sind durch die drei Längsbohrungen im Belagträger (...) zu erklären. Bei der Variante 3 treten die höchsten Verformungen auf, da die Auswertung auf einem Radius kurz oberhalb des Teilkreisdurchmessers der inneren Verschraubung durchgeführt wurde. Damit ist auch das Verhalten der Variante 2 erklärbar. Neben den drei bereits genannten Bereichen erkennt man deutliche Schwingungen zwischen diesen Bereichen. Die Maxima befinden sich immer zwischen zwei Schrauben, wo sich die Gegenreibscheibe nach oben wölbt.“<sup>157</sup> Der Zusammenhang zwischen Verschiebung der Reibfläche und der Temperaturverteilung auf der Reibfläche beschreibt der Autor wie folgt. „Die Auswertung der Temperatur zeigt das gleiche qualitative Verhalten, d.h. der Temperaturverlauf über den Umfang ist identisch zu den Verformungen und eine hohe Verformung hat eine hohe Temperatur zu Folge.“<sup>158</sup>

---

<sup>154</sup> Hebbale et al., 2015, S. 4

<sup>155</sup> vgl. Merkel, 2015

<sup>156</sup> vgl. Albers et al., 2013b

<sup>157</sup> Merkel, 2015, S. 59

<sup>158</sup> Merkel, 2015, S. 59

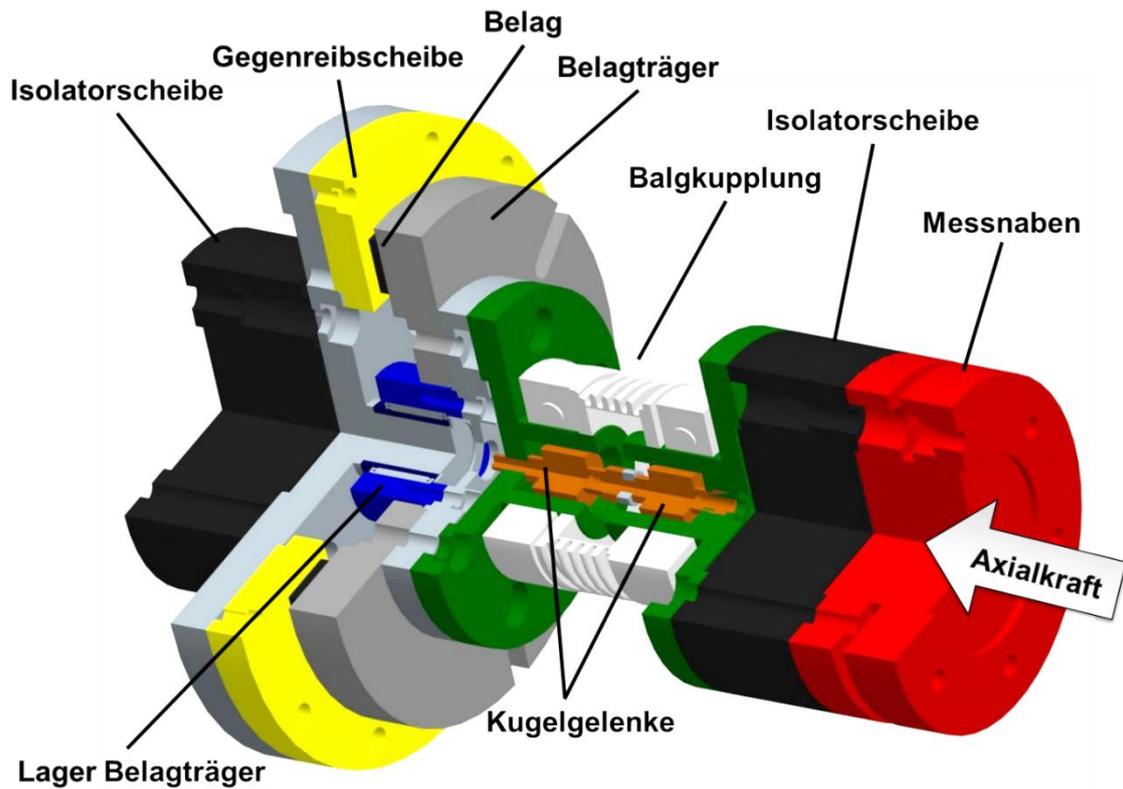


Abbildung 2.59 Schnittdarstellung der Prufkupplung<sup>159</sup>

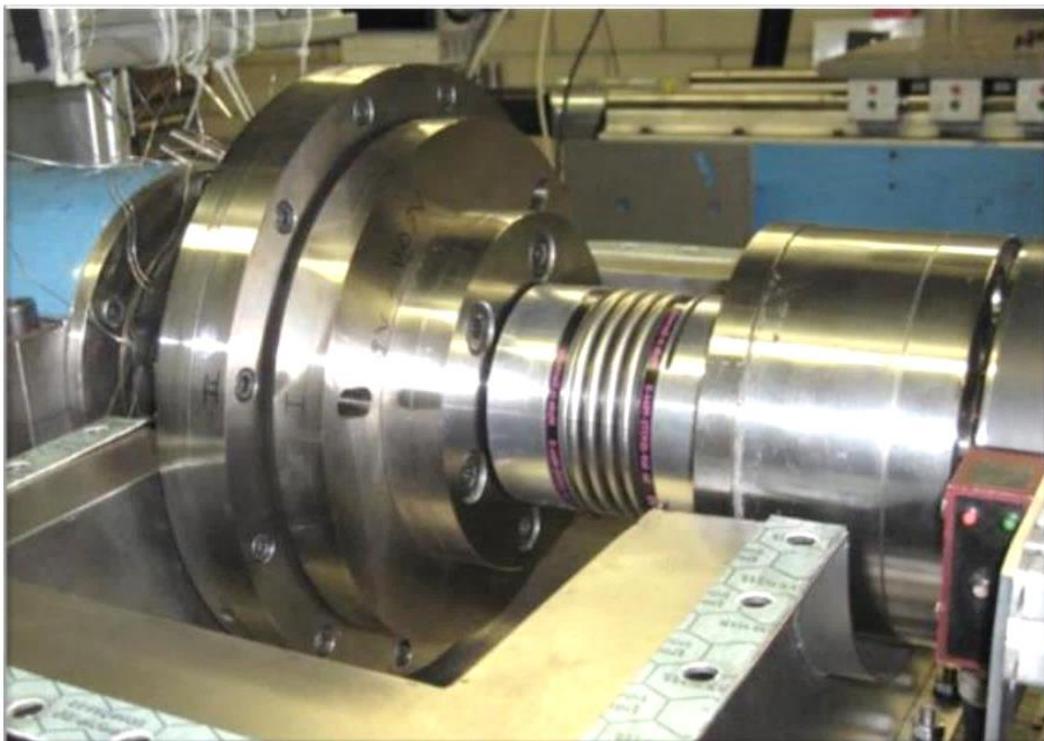


Abbildung 2.60 Montierte Prufkupplung<sup>160</sup>

<sup>159</sup> Albers et al., 2013c, S.14

<sup>160</sup> Merkel, 2015, S. 55

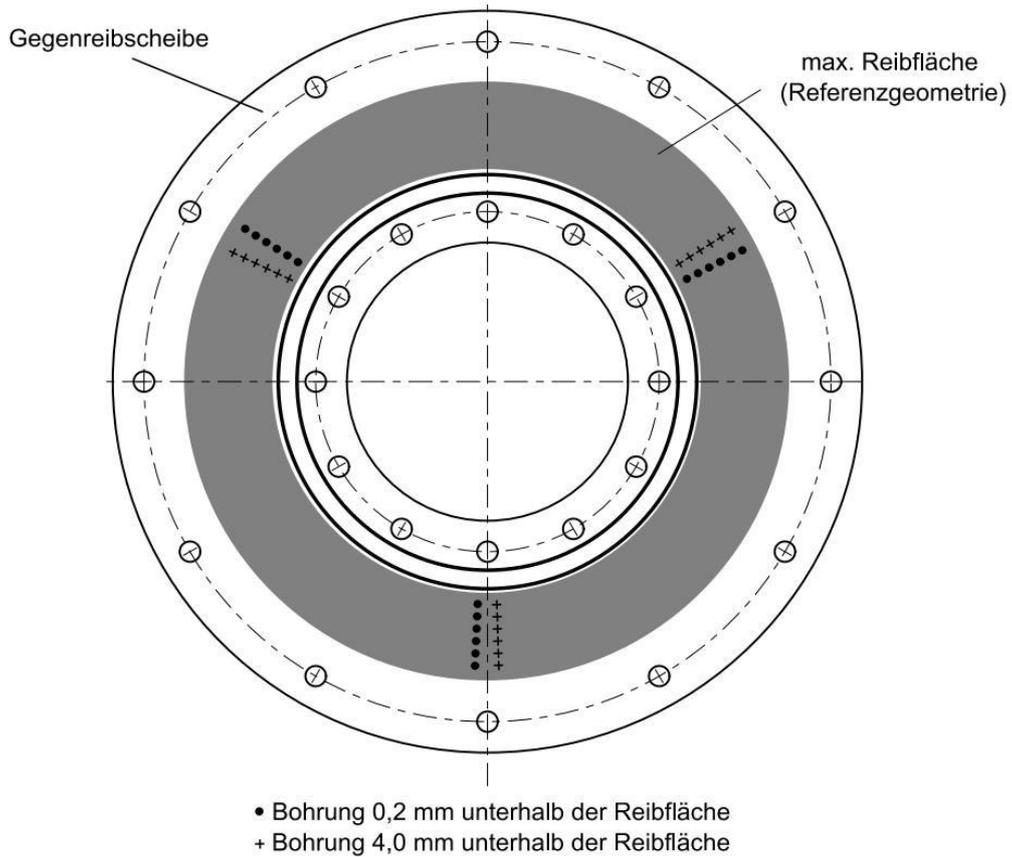


Abbildung 2.61 Anordnung Temperaturmessstellen in der Gegenreibeischeibe<sup>161</sup>

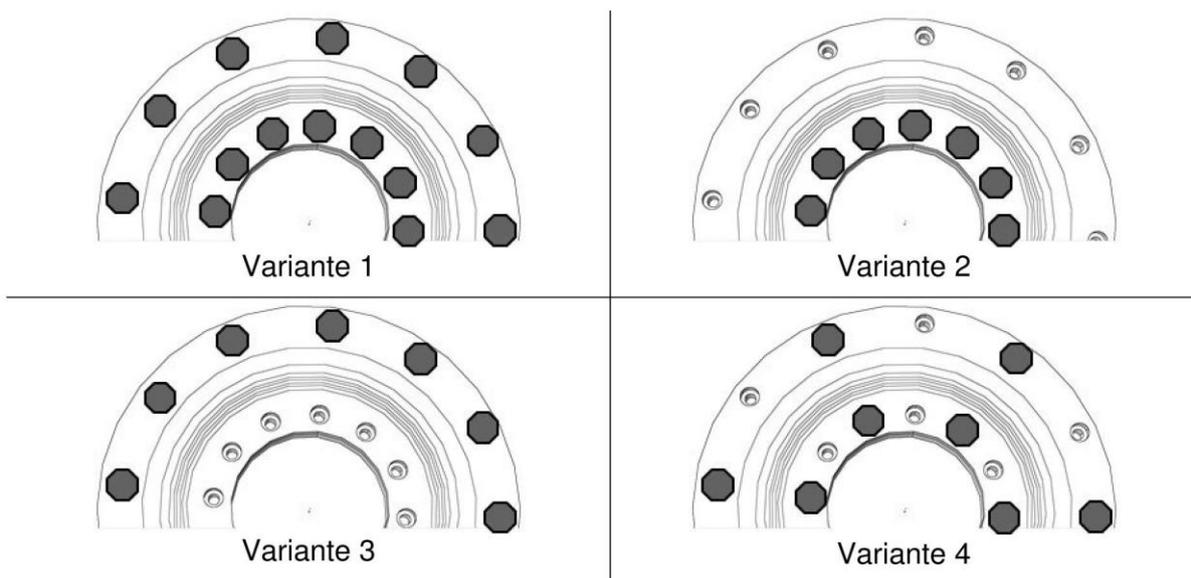


Abbildung 2.62 Varianten der Anbindung der Gegenreibeischeibe<sup>162</sup>

<sup>161</sup> Merkel, 2015, S. 54

<sup>162</sup> Albers et al., 2013c, S.58

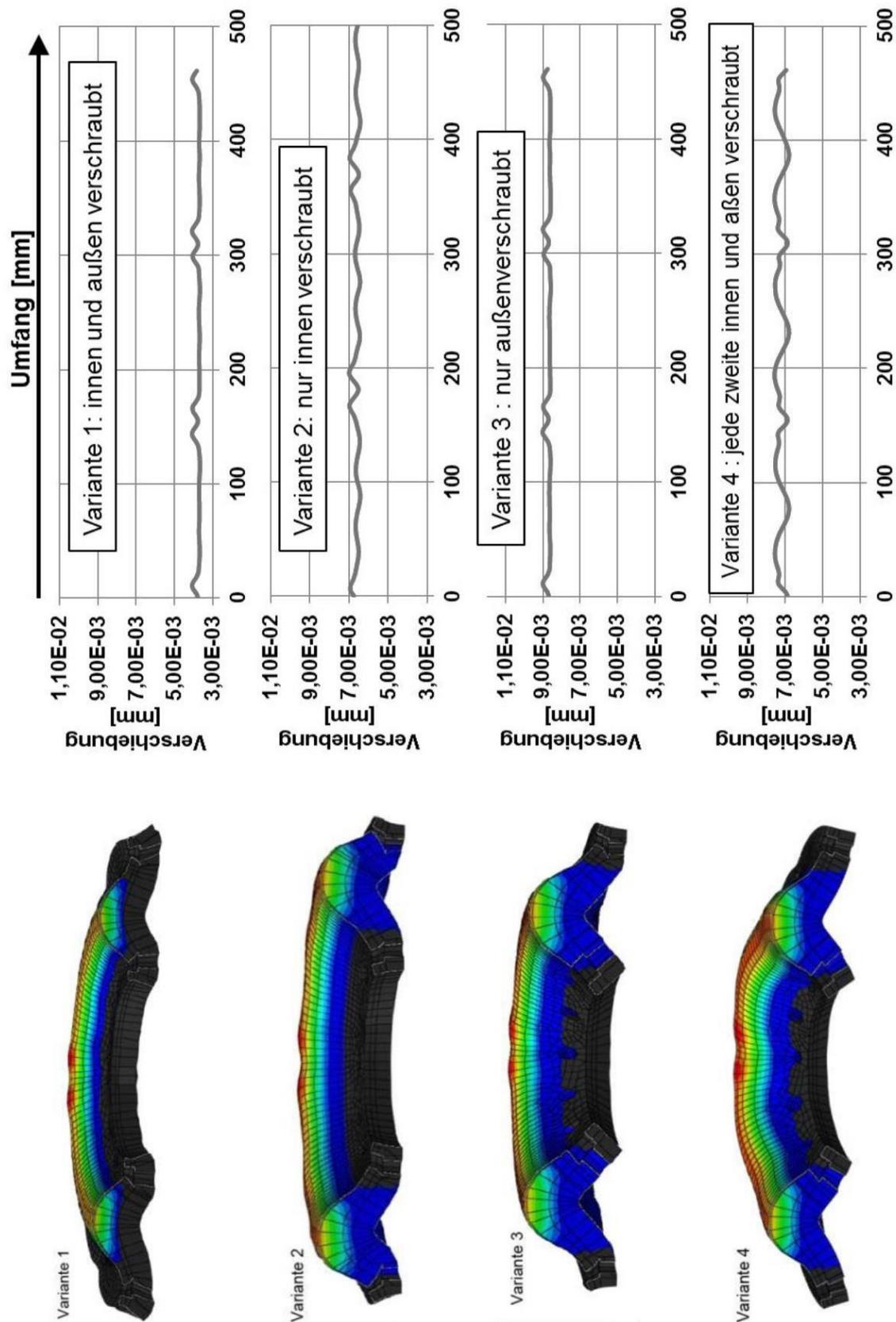


Abbildung 2.63 Berechnete Verschiebung der Gegenreibrscheibe in Abhängigkeit der Anschraubsituation<sup>163</sup>

<sup>163</sup> Merkel, 2015, S. 59

Die experimentellen Untersuchungen wurden als Bremsversuche durchgeführt. Das schematische Verhalten der Größen Drehzahl, Axialkraft, Drehmoment und Temperatur ist in Abbildung 2.64 dargestellt, wobei der Temperaturverlauf nur exemplarisch für eine Messstelle eingezeichnet ist.

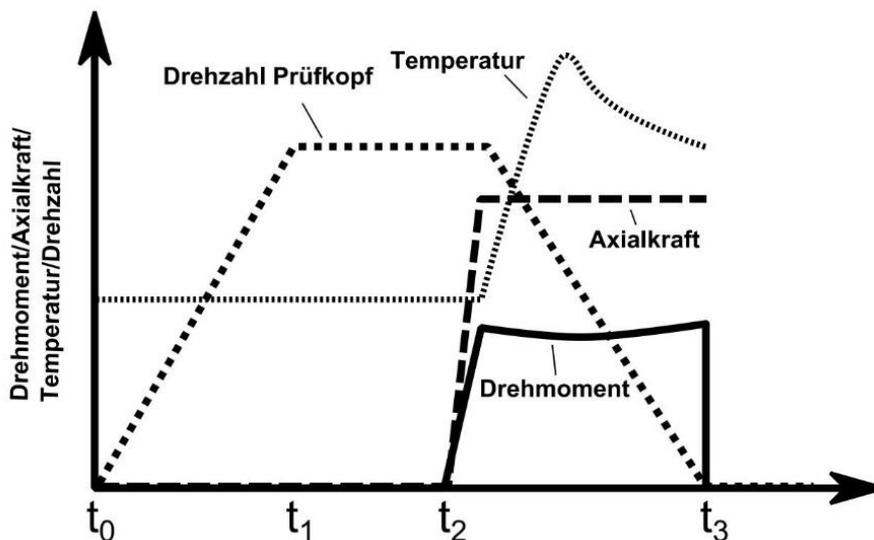


Abbildung 2.64 Versuchsablauf Bremsung<sup>164</sup>

In Abbildung 2.65 ist der Temperaturverlauf einer radialen Messstrecke mit 6 Messstellen einer Bremsung dargestellt. In Abbildung 2.66, Abbildung 2.67 und Abbildung 2.68 ist die radiale Temperaturverteilung einer Messstrecke über 100 Schaltungen dargestellt. Dabei wird die Reibringbreite von 25 mm, 20 mm zu 15 mm kontinuierlich kleiner. Besonders in Abbildung 2.66 ist eine unruhige Temperaturverteilung erkennbar. Dies ist ebenfalls im Verlauf der Reibungszahl sichtbar, siehe Abbildung 2.69.

MERKEL spricht hier von einem Reibwert, wobei diese Größe in der vorliegenden Arbeit als Reibungszahl benannt wird. In dieser Forschungsarbeit wird als Reibwert der tatsächlich physikalische Reibwert verstanden, welcher aber messtechnisch nicht ermittelbar ist. Die aus den gemessenen Daten berechnete und somit ermittelbare Größe wird als Reibungszahl bezeichnet.

Aus seinen Beobachtungen zieht MERKEL folgende Schlussfolgerungen, wobei im Kontext der vorliegenden Forschungsarbeit wiederum die Reibungszahl gemeint ist und nicht der Reibwert:

1. „Steigt die Ringbreite an, so ist mit Reibwertschwankungen des mittleren Reibwerts zu rechnen. Die Reibwertschwankungen sind auf die Änderung des

<sup>164</sup> Albers et al., 2013c, S.34

tatsächlichen Reibradius zurückzuführen, die anhand der Temperaturmaxima bestimmt werden kann.“<sup>165</sup>

2. „Aufgrund des hohen Einflusses der Reibbelagsgeometrie und der nicht zu vermeidenden Verformung der Gegenreibeischeibe kann bei der Ermittlung des Reibwerts nicht zwischen den reinen Werkstoffeinflüssen und den sich aufgrund der Gestalt ergebenden Einflüssen unterschieden werden. Folglich kann nur von einem Systemreibwert gesprochen werden.“<sup>166</sup>

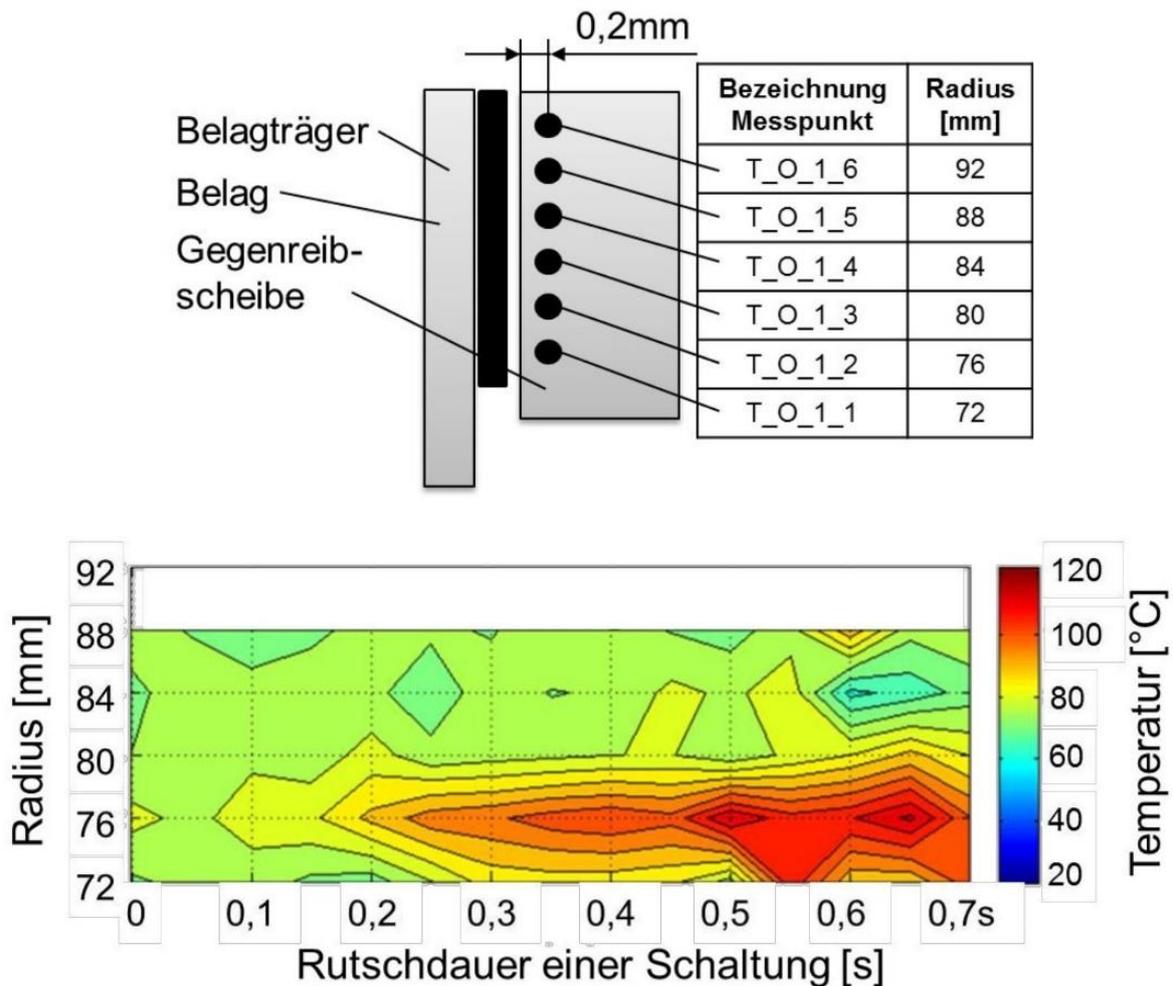


Abbildung 2.65 Messstellen und Temperaturverlauf während der Rutschphase<sup>167</sup>

<sup>165</sup> Merkel, 2015, S. 96

<sup>166</sup> Merkel, 2015, S. 96

<sup>167</sup> Merkel, 2015, S. 85

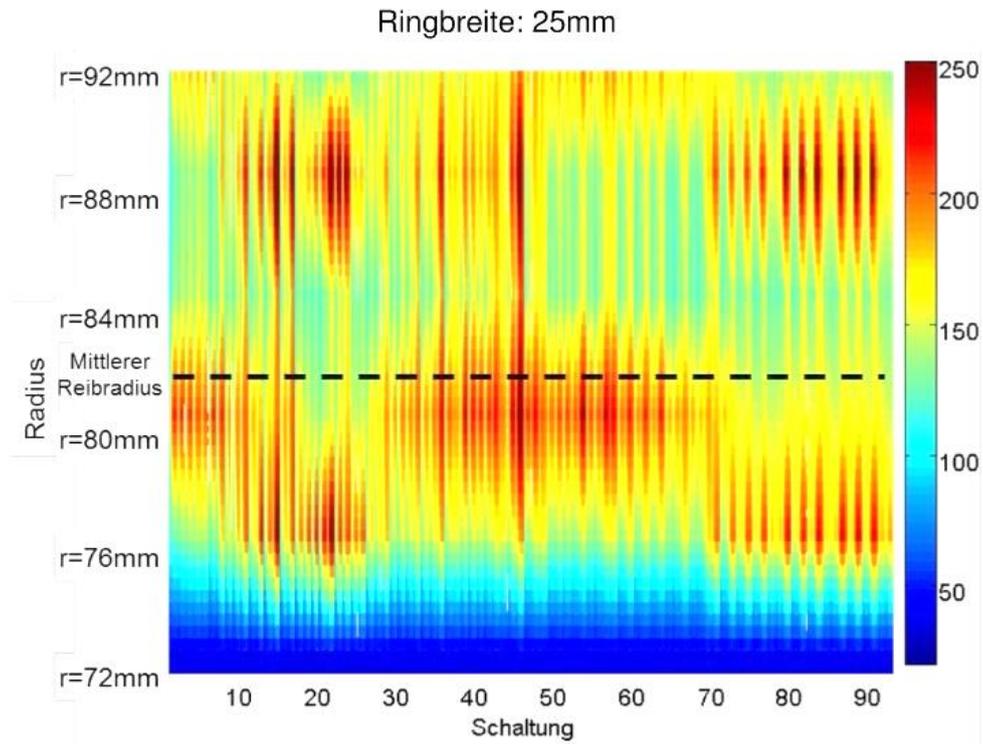


Abbildung 2.66 Temperaturverteilung 25 mm Reibringbreite<sup>168</sup>

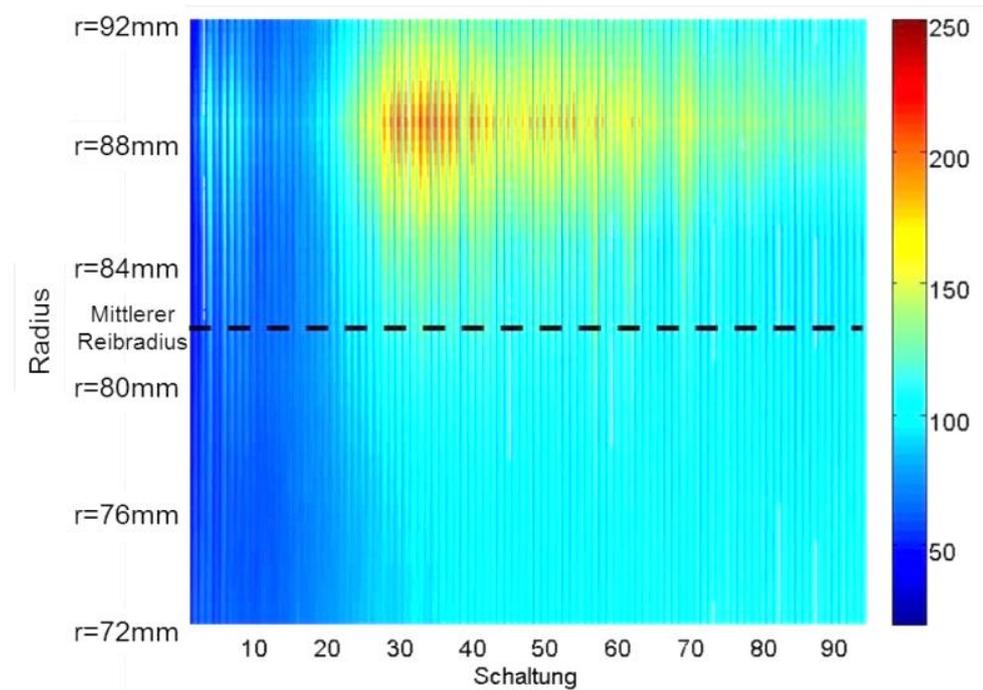


Abbildung 2.67 Temperaturverteilung 20 mm Reibringbreite<sup>169</sup>

<sup>168</sup> Merkel, 2015, S. 88

<sup>169</sup> Merkel, 2015, S. 89

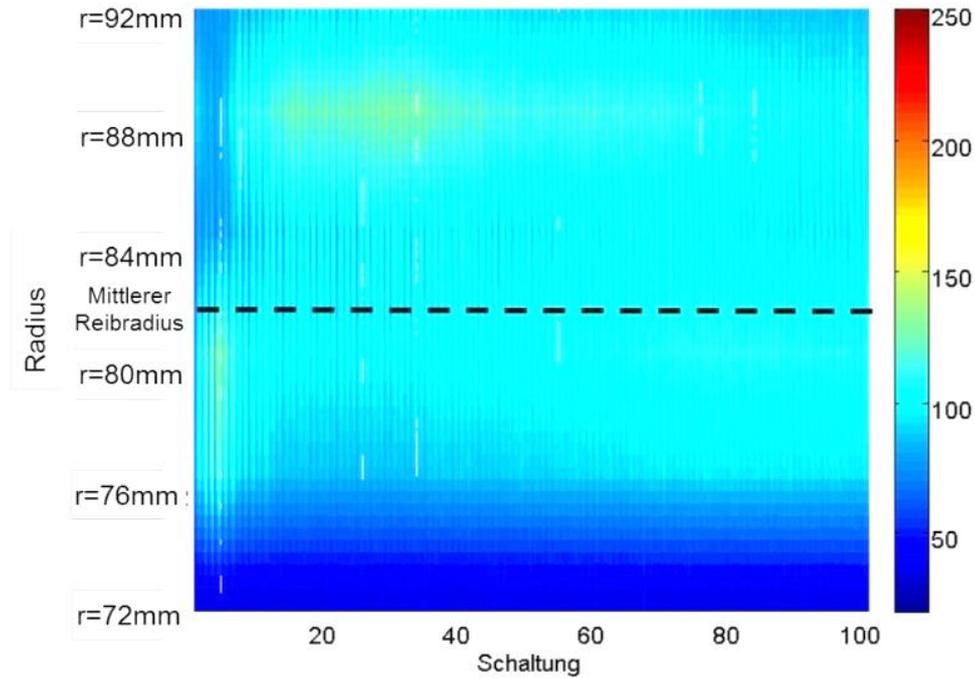


Abbildung 2.68 Temperaturverteilung 15 mm Reibringbreite<sup>170</sup>

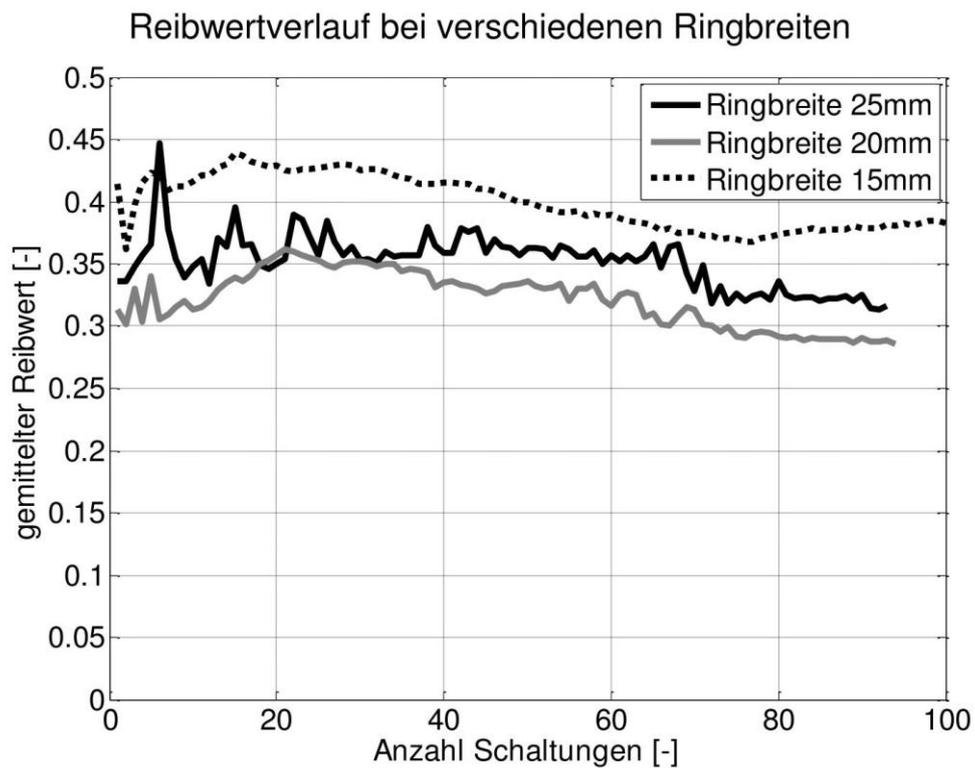


Abbildung 2.69 Reibungszahlverlauf unterschiedlicher Reibringbreiten<sup>171</sup>

<sup>170</sup> Merkel, 2015, S. 89

<sup>171</sup> Merkel, 2015, S. 88

### 2.4.2 Messung mit optischen Messmethoden

In Ihrer Forschungsarbeit untersuchten HAN ET AL.<sup>172</sup> die Temperaturverteilung der Stahllamelle von naslaufenden Reibkupplungen. In experimentellen Untersuchungen an einem Komponentenprüfstand werden Infrarotsensoren zur Temperaturmessung eingesetzt. Damit ein optischer Zugang besteht, werden Germaniumfenster eingebracht und die Rückseite der im Reibkontakt befindlichen Stahllamelle vermessen. Als Hauptvorteil der Messung mit den Infrarotsensoren wird zum einen die deutlich schnellere Messung der Oberflächentemperatur im Vergleich zur Messung mit Thermoelement genannt, und zum anderen die Möglichkeit eine Temperaturverteilung zu messen. Gemessen wurde die radiale Temperaturverteilung an einer Position am Umfang, siehe Abbildung 2.70. Nachteil dieses Messaufbaus ist, dass nur im Bereich des eingebrachten Fensters gemessen werden kann.

Als Ergebnis aus den experimentellen Untersuchungen stellen die Autoren fest, dass die Temperaturverteilung nicht homogen ist und teilweise Temperaturunterschiede während dem Energieeintrag von bis zu 200°C gemessen wurden.<sup>173</sup>

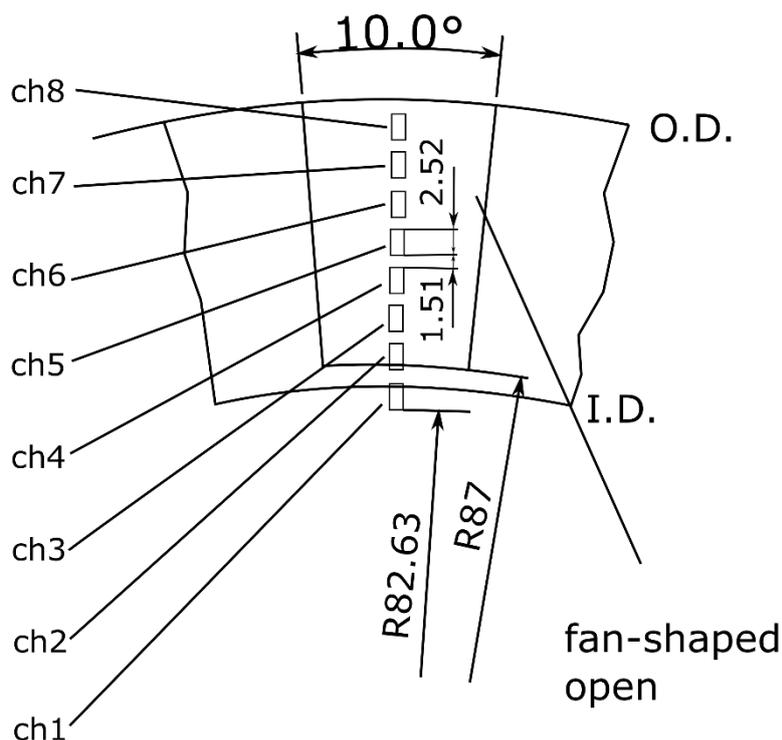


Abbildung 2.70 Anordnung der Messstellen<sup>174</sup>

Die Arbeit von DÖRSCH zur periodischen Veränderung lokaler Kontaktgrößen in Reibpaarungen trockenlaufender Bremsen baut auf den Arbeiten von LÜHRSEN,

<sup>172</sup> vgl. Han et al., 1992

<sup>173</sup> vgl. Han et al., 1992

<sup>174</sup> Han et al., 1992, S. 2, eigene Darstellung

MUSIOL und GAUGER auf. Als Quintessenz aus diesen Arbeiten fasst er unter anderem zusammen:

„Die Belastung in der Kontaktfläche technischer Reibpaarungen ist nicht gleichmäßig. Vielmehr bilden sich Zonen mit unterschiedlich großen Temperaturen aus, die sich im Laufe des Bremsprozesses verlagern.“<sup>175</sup>

Der Ansatz von DÖRSCH beruht, wie beschrieben, auf den Vorarbeiten bezüglich der Untersuchungen der Vorgänge in der Kontaktzone, wobei er als Schwachpunkt der vorangegangenen Arbeiten folgendes feststellt: „Die Messungen erfolgten bei den drei genannten Autoren durch Thermoelemente an drei oder vier festen Orten in der Fläche des rotierenden metallischen Reibkörpers. Dem diesen Beobachtungen zugrundeliegenden Mechanismus soll in dieser Arbeit mit einem hier zu entwickelnden Messsystem, das die quasidirekte Beobachtung der gesamten Reibfläche ermöglicht, nachgegangen werden. Diese Versuchseinrichtung wird im Folgenden als Reibintensitätsmesssystem (RIM) bezeichnet.“<sup>176</sup>

Der prinzipielle Aufbau des von DÖRSCH verwendeten RIM ist in Abbildung 2.71 dargestellt. Mit diesem Aufbau ist es möglich, die Temperaturverteilung des kompletten Wirkflächenpaares auf der Rückseite des Reibbleches zu messen. Da das Reibblech mit 0,1mm sehr dünn ausgeführt wird, ist nur eine geringe Dämpfung der tatsächlich im Reibkontakt sich einstellende Temperaturentwicklung zu erwarten. Dabei ist die Messung der Reibintensität nur im kontinuierlichen Reibbetrieb möglich, wobei die Flächenpressung durch Druckfedern vor Versuchsbeginn eingestellt wird und mittels Variation der Drehzahl unterschiedliche thermische Beanspruchungen dargestellt werden. Die Aufnahme der Temperaturverteilung zu einem Zeitpunkt ist in Abbildung 2.72 dargestellt. Um die Ergebnisse zu visualisieren, ist in Abbildung 2.74 die mittlere Ringtemperatur dreidimensional dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das Wandern der Spitztemperatur über den Radius. Weiterhin ist in Abbildung 2.73 die periodische Schwankung der Temperatur von zwei ausgewählten Radien dargestellt, die sich in Abhängigkeit der Flächenpressung ändert. Diese flächigen Informationen sind nur mittels Thermographie erfassbar. Um den Informationsgewinn greifbar zu machen, wird in Abbildung 2.75 eine Messung dargestellt, bei der sowohl mittels Thermographie und Thermoelementen parallel die Temperatur erfasst wurde. Die Notwendigkeit der Temperaturmessung mittels Thermographie beschreibt der Autor wie folgt: „Um den Vorteil der Thermographie gegenüber der Messmethode mit in der Reibfläche lokal fest positionierten Thermoelementen deutlich zu machen, sind in Bild 6.6 (hier Abbildung 2.65) für beide Kurven die gleichzeitig an vier Punkten der

---

<sup>175</sup> Dörsch, 2004, S. 3

<sup>176</sup> Dörsch, 2004, S. 24

Reibfläche mit Thermoelementen gemessenen Temperaturwerte eingetragen. Die Spitzen der Thermoelemente liegen ca. 0,5 mm unterhalb der Reibfläche. Aus dem Vergleich der nach bei den Methoden gewonnenen Messergebnisse lassen sich die folgenden Erkenntnisse gewinnen.

- Die wirkliche Temperatur und deren Verteilung über der Reibflächenbreite lässt sich mit Hilfe von Thermoelementen nicht bestimmen. (...)<sup>177 178</sup>

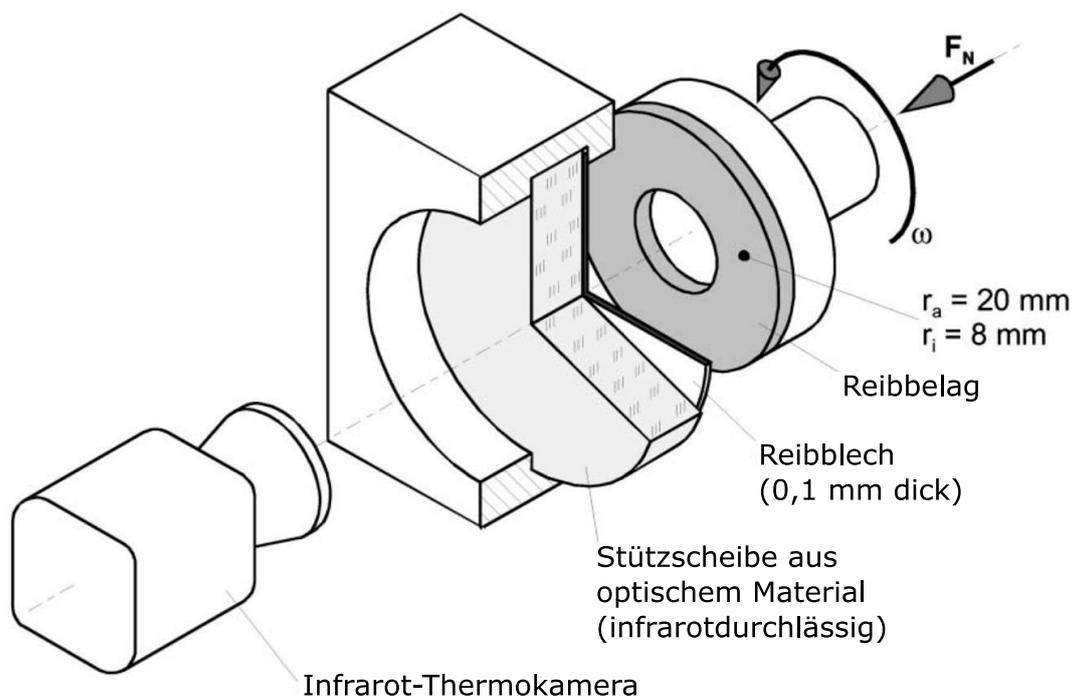


Abbildung 2.71 Aufbau Reibintensitätsmessung<sup>179</sup>

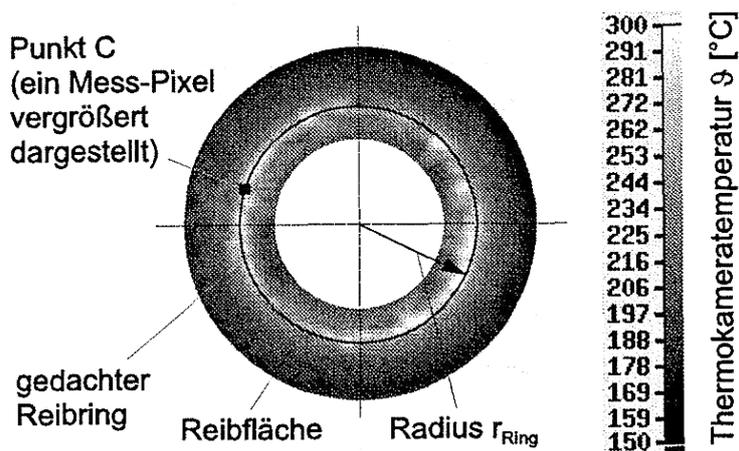


Abbildung 2.72 Aufnahme Temperaturverteilung mittels Thermokamera<sup>180</sup>

<sup>177</sup> Dörsch, 2004, S. 73

<sup>178</sup> vgl. Dörsch, 2004

<sup>179</sup> Severin und Dörsch, 2001, S. 773, Beschriftung ergänzt

<sup>180</sup> Dörsch, 2004, S. 32

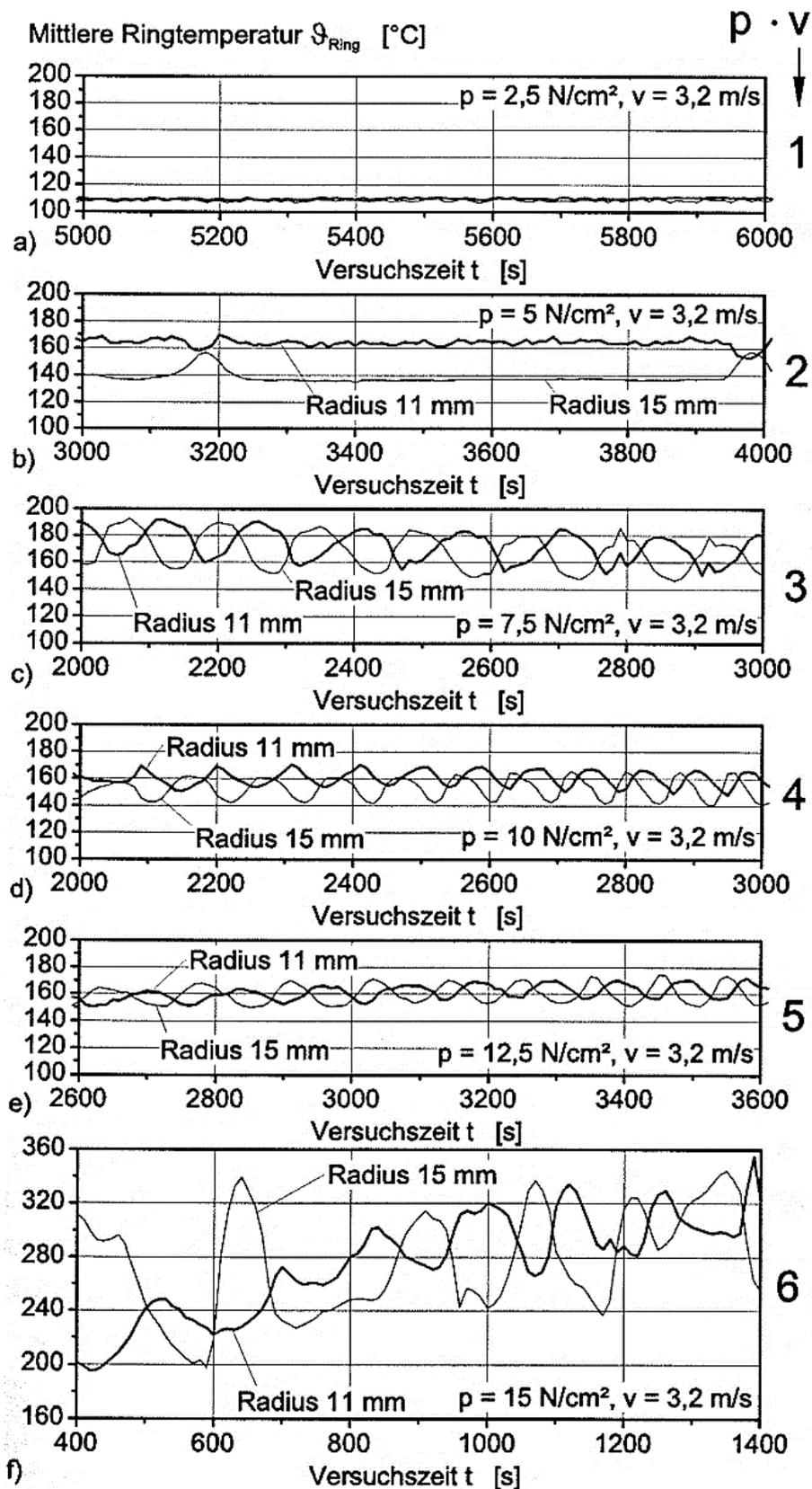
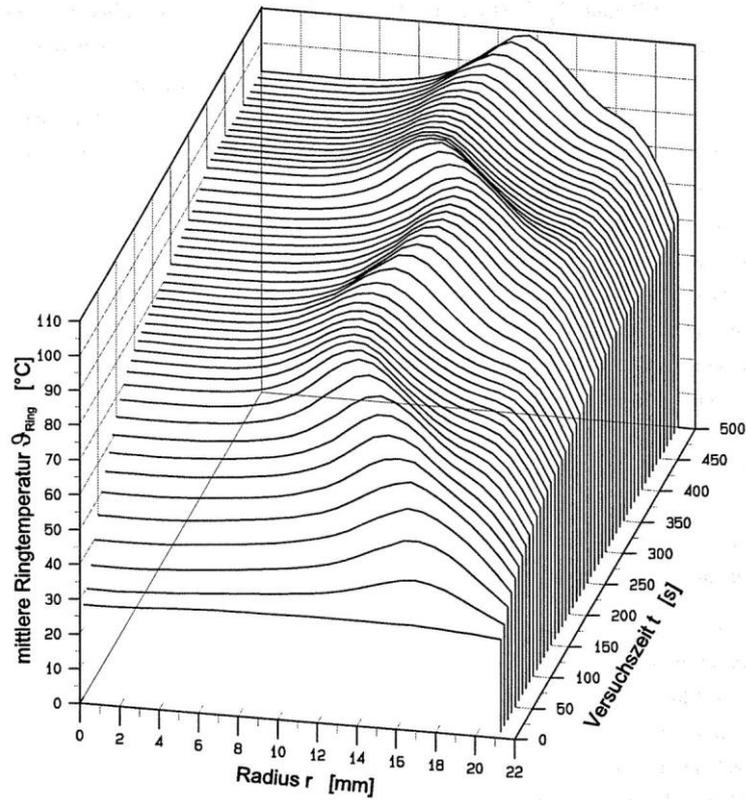
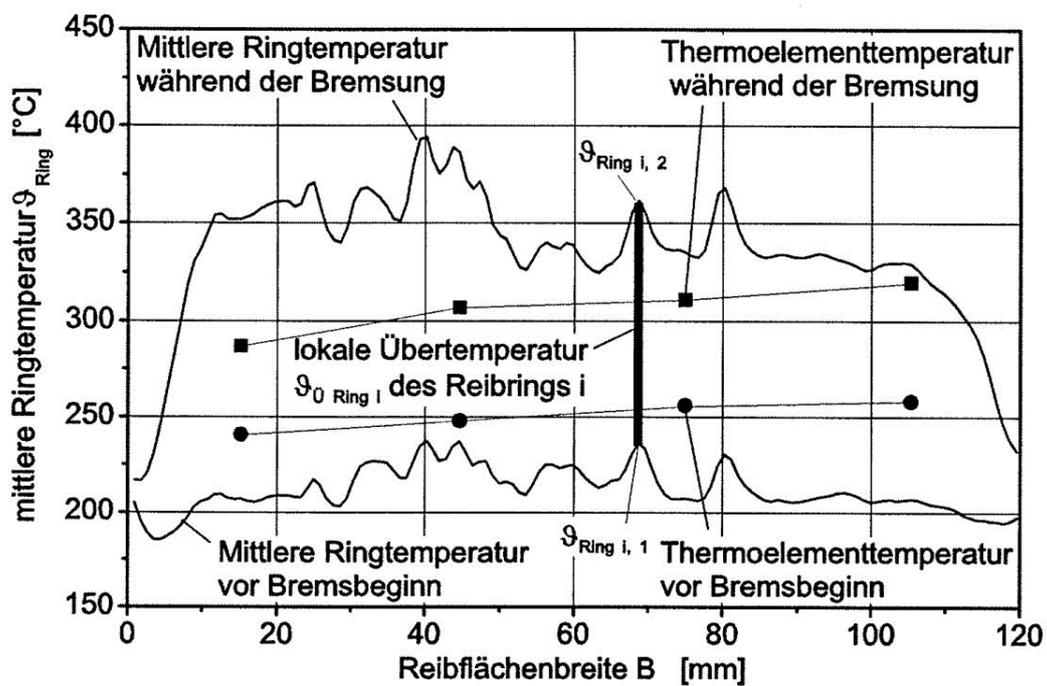


Abbildung 2.73 Darstellung periodische Temperaturschwankung ausgewählter Radien bei unterschiedlichen Pressungen<sup>181</sup>

<sup>181</sup> Dörsch, 2004, S. 51

Abbildung 2.74 3D-Darstellung des Temperaturverlaufes<sup>182</sup>Abbildung 2.75 Vergleich Informationsgehalt Thermographiemessung und Thermoelementmessung<sup>183</sup><sup>182</sup> Dörsch, 2004, S. 34<sup>183</sup> Dörsch, 2004, S. 71

KLEINLEIN untersucht unter anderem ob auch im praktischen Kupplungsbetrieb der unter idealen Bedingungen gefundene gesetzmäßige Wechsel der lokalen Reibintensität auftritt. Dazu führt er Messungen zur Temperaturverteilung mit einer Kupplungsreibpaarung aus der Praxis in zwei verschiedenen Weisen durch. Die grundlegenden Untersuchungen zur Charakterisierung der Systemeigenschaften werden im Bremsbetrieb durchgeführt, wobei mittels dreier Thermoelemente an einer Position am Umfang die radiale Verteilung der Temperatur gemessen wird, siehe Abbildung 2.76.

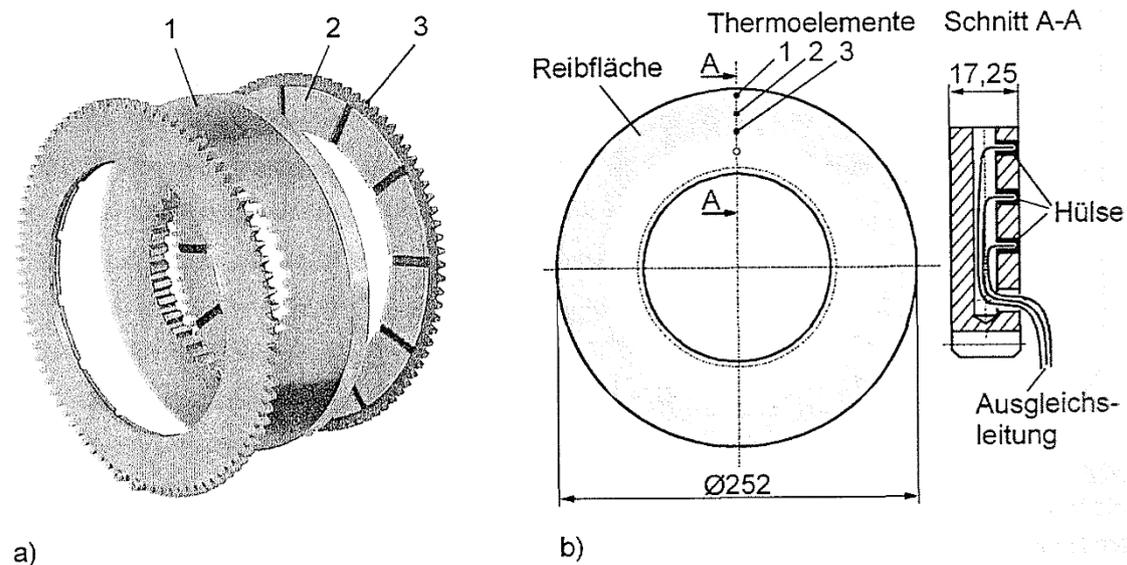


Abbildung 2.76 Messung der radialen Temperaturverteilung in einer Reibpaarung<sup>184</sup>

Um den Reibprozess über die gesamte Kontaktzone hinweg analysieren zu können, wurde mittels Thermokamera eine Reibintensitätsmessung nach dem Vorbild von DÖRSCH durchgeführt, siehe Abbildung 2.77. Die Thermokamera blickt dabei auf die Rückseite eines in diesem Falle  $0,2\text{ mm}$  dicken Reibbleches. Eine Aufnahme der Temperaturverteilung ist in Abbildung 2.78 dargestellt, mit der dazugehörigen Darstellung des Temperaturverlaufes über einen Reibring hinweg und über den Reibradius. In diesem Falle ist gut zu erkennen, dass die Temperatur über den abgewickelten Radius nahezu konstant bleibt, wohingegen die Temperatur über den Reibflächenradius große Abweichungen zeigt. Die Analyse der Vorgänge im Reibkontakt können mit dem RIM-Aufbau nur im kontinuierlichen Betrieb durchgeführt werden. KLEINLEIN hat die Erkenntnisse von DÖRSCH, dass die Reibintensität in Langzeitreibmessungen im nicht geschädigten Bereich radial periodisch schwingt, auf ein Kupplungssystem mit praxisnahem Abmessungen übertragen, siehe Abbildung 2.79.<sup>185</sup>

<sup>184</sup> Kleinlein, 2006, S. 31

<sup>185</sup> vgl. Kleinlein, 2006

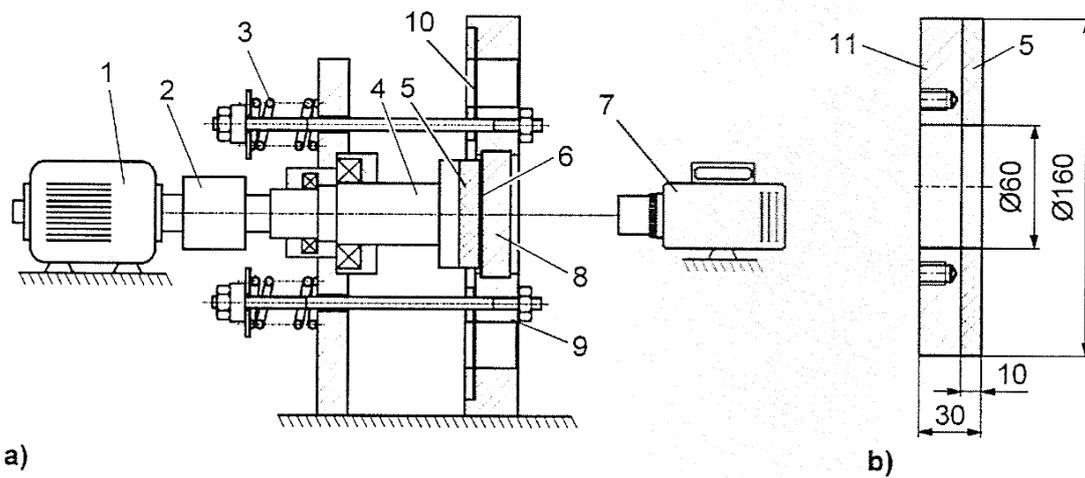


Abbildung 2.77 Aufbau zur Reibintensitätsmessung und Abmessungen der untersuchten Paarung<sup>186</sup>

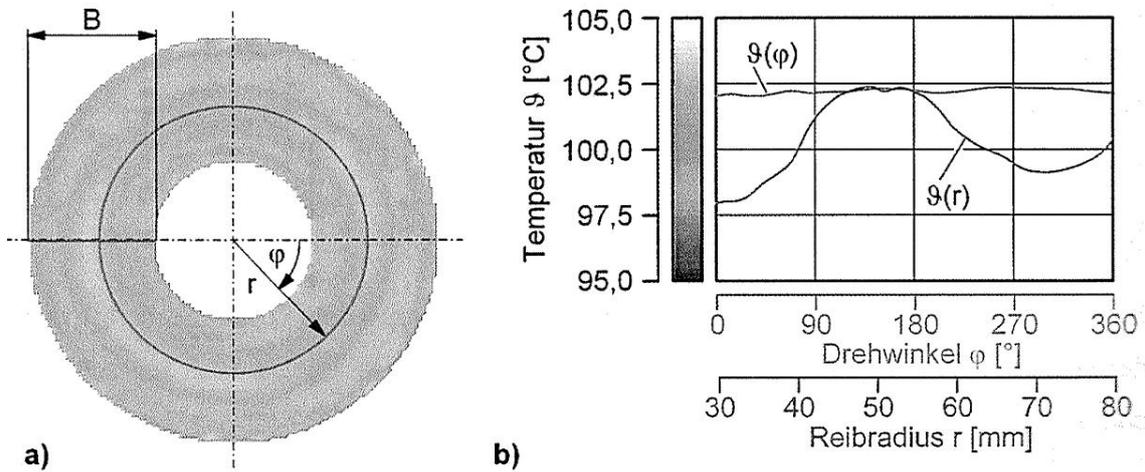


Abbildung 2.78 Wärmebildaufnahme und Darstellung des Temperaturverlaufes über Drehwinkel / Reibflächenradius<sup>187</sup>

<sup>186</sup> Kleinlein, 2006, S. 34

<sup>187</sup> Kleinlein, 2006, S. 35

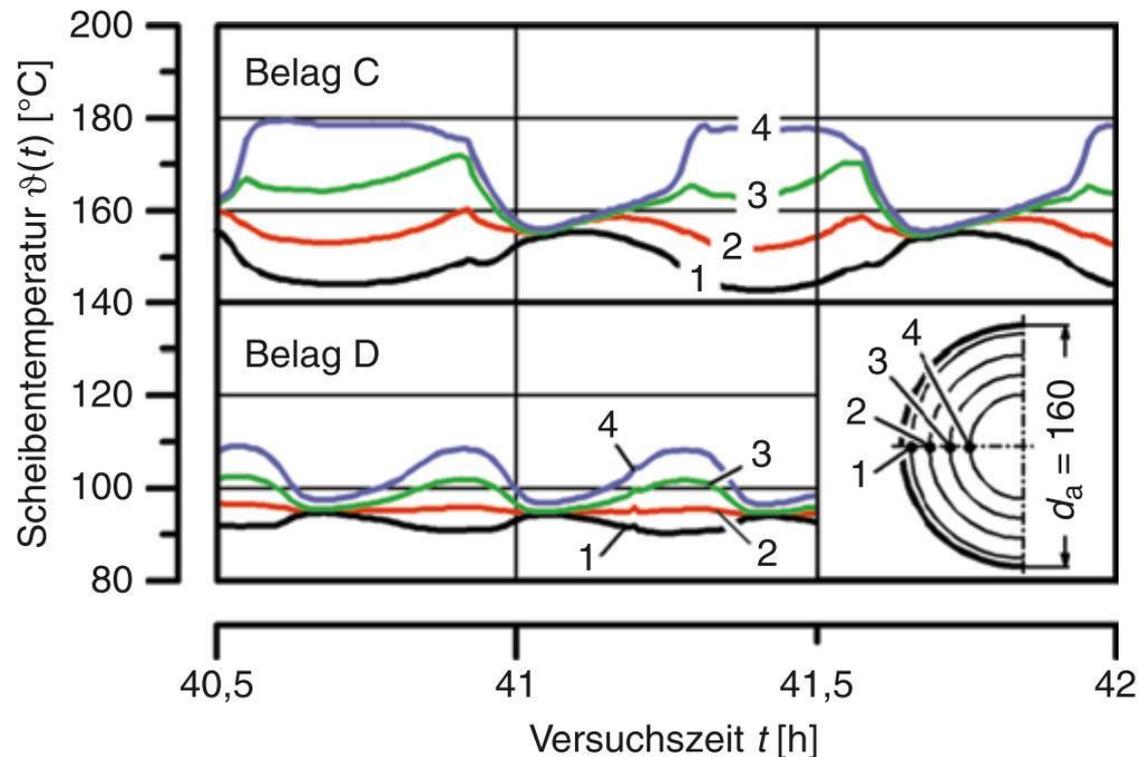


Abbildung 2.79 Schwingende Temperatur im kontinuierlichen Reibbetrieb zweier unterschiedlicher Reibbeläge bei gleicher Belastung<sup>188</sup>

Im Rahmen des Sonderforschungsbereich 483<sup>189</sup> beschäftigen sich ALBERS ET AL.<sup>190,191</sup> mit der Entwicklung eines trockenlaufenden Kupplungssystems mit Ingenieurkeramik als Friktionswerkstoff. Dabei liegt ein Hauptaugenmerk auf der keramikgerechten Gestaltung der Kupplungsscheibe. Die Art und Weise der Einbindung und die geometrische Form der Keramikpellets waren dabei die umfangreichsten Entwicklungsaufgaben. In Abbildung 2.80 ist auf Basis einer kreisrunden Keramikpelletform die zu erwartende effektive Friktionsfläche dargestellt. Das erwartete Verhalten wurde experimentell mittels gleichzeitiger Thermographieaufnahme und Thermoelementmessung verifiziert, wobei mit den beiden Messtechniken unterschiedliche Aspekte analysiert werden. Dies wird vom Autor wie folgt beschrieben:

„Die Erfassung der globalen Bauteiltemperaturen erfolgt mit Hilfe von Thermoelementen, die in die drehenden metallischen Gegenreißscheiben über Senkbohrungen eingeführt werden. Die Übertragung an die Datenerfassung des Prüfstands erfolgt über eine Telemetrieinheit. Die Messstelle der Thermoelemente befindet sich  $s_{FT} = 0,5$  mm unterhalb des Friktionskontakts. Die Ermittlung der

<sup>188</sup> Breuer, 2012, S. 539

<sup>189</sup> Siehe Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2000 - 2011

<sup>190</sup> vgl. Albers et al., 2006c

<sup>191</sup> vgl. Mitariu-Faller, 2009

mittleren Bauteiltemperatur der Gegenreibscheibe erfolgt in Bauteilmitte auf dem mittleren Reibradius  $r_m$  (...)

Parallel wird mit Hilfe eines Pyrometers der Fa. Infrapoint die zylindrische Fläche abgetastet und die Temperatur der metallischen Gegenreibscheibe bestimmt. (...)

Für die Untersuchungen der lokalen Temperaturverteilung im Friktionskontakt und der globalen Temperaturverteilung im Kupplungssystem wird eine Thermographiekamera bzw. Infrarotkamera der Fa. Raytheon eingesetzt.“<sup>192</sup>

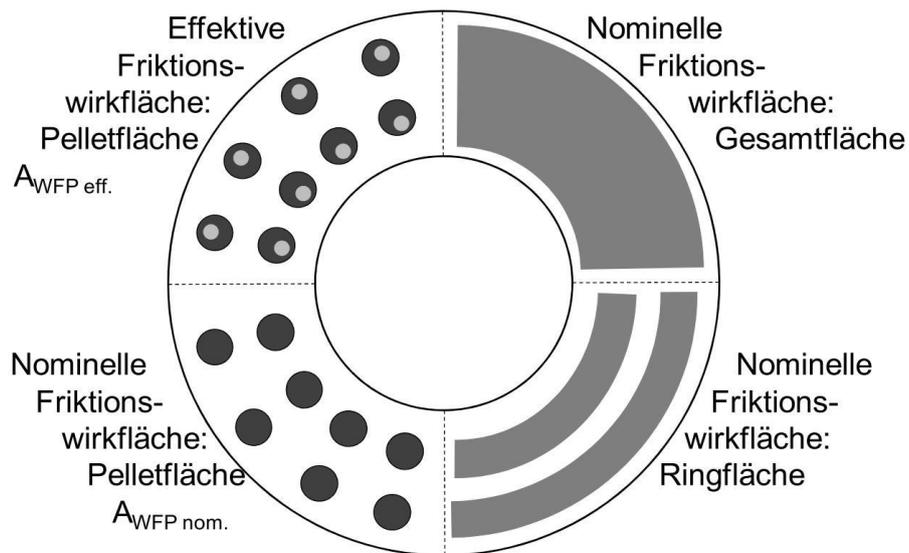


Abbildung 2.80 Erwartete effektive Friktionswirkfläche der Kupplung mit IPEK Gen. II Kupplungsscheibe<sup>193</sup>

Der Aufbau zur Aufnahmen der lokalen Temperaturverteilung im Friktionskontakt ist in Abbildung 2.81 schematisch dargestellt. „Das Thermographiebild wird kurz nach dem Kontakt mit dem metallischen Gegenpartner erstellt. Die Thermographiekamera, die durch ein Triggersignal vom Prüfstand gesteuert wird, zeichnet pro Umdrehung ein stehendes Thermographiebild der Oberflächenkontakttemperatur auf. Die Auswahl eines oder mehrerer benachbarter Pellets wird durch eine Phasenverschiebung zum Nulldurchgang der Abtriebswelle realisiert.“<sup>194</sup>

<sup>192</sup> Mitariu-Faller, 2009, S. 85

<sup>193</sup> Mitariu-Faller, 2009, S. 70

<sup>194</sup> Mitariu-Faller, 2009, S. 86

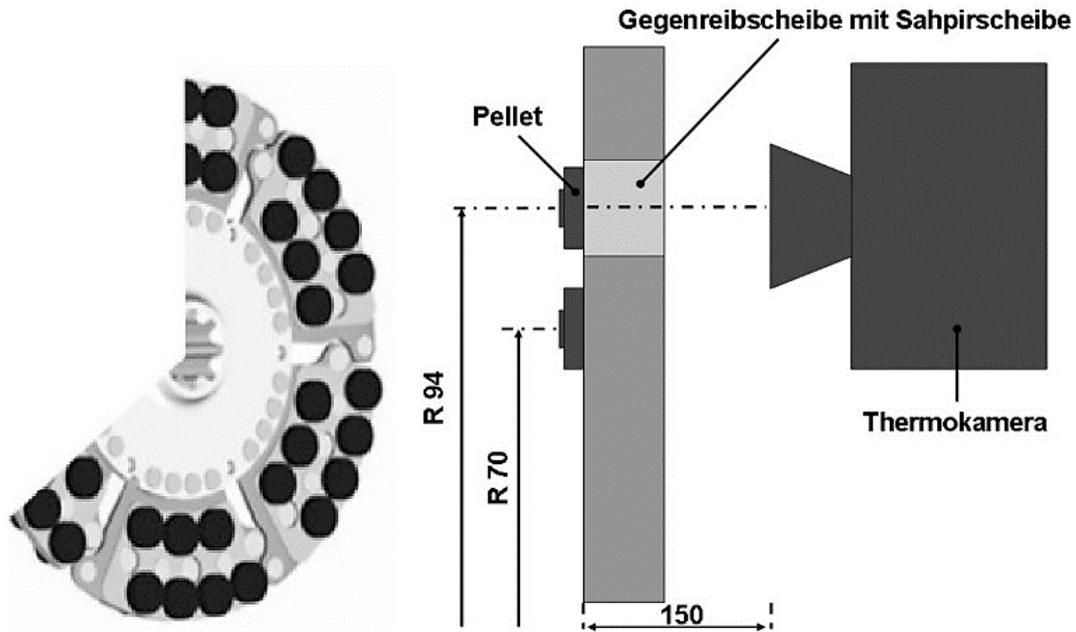


Abbildung 2.81 Ermittlung der Temperaturverteilung mittels Thermographieaufnahmen<sup>195</sup>

In Abbildung 2.82 sind Ergebnisse der Temperaturmessung mittels Thermoelemente dargestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass die Position und der Abstand von der Reibfläche einen großen Einfluss bei der Detektion von lokal auftretenden Temperaturen während des Reibprozesses hat. Die Grundtemperatur des Systems kann mit den beiden Messstellen  $T_a$  und  $T_m$  bestimmt werden. Die während des Reibprozesses sich schnell ändernde Temperatur nahe der Reibfläche kann nur mit der Messstelle  $T_a$  betrachtet werden. Die Analyse der gemessenen Temperaturverteilung ist in Abbildung 2.83 dargestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass nur ein kleiner Teil der zur Verfügung stehenden Wirkfläche der Keramikpellets tatsächlich am Reibprozess beteiligt ist. Ausgewertet wird dabei die Temperaturverteilung entlang einer Linie über den Durchmesser des Pellet.

<sup>195</sup> Mitariu-Faller, 2009, S. 86

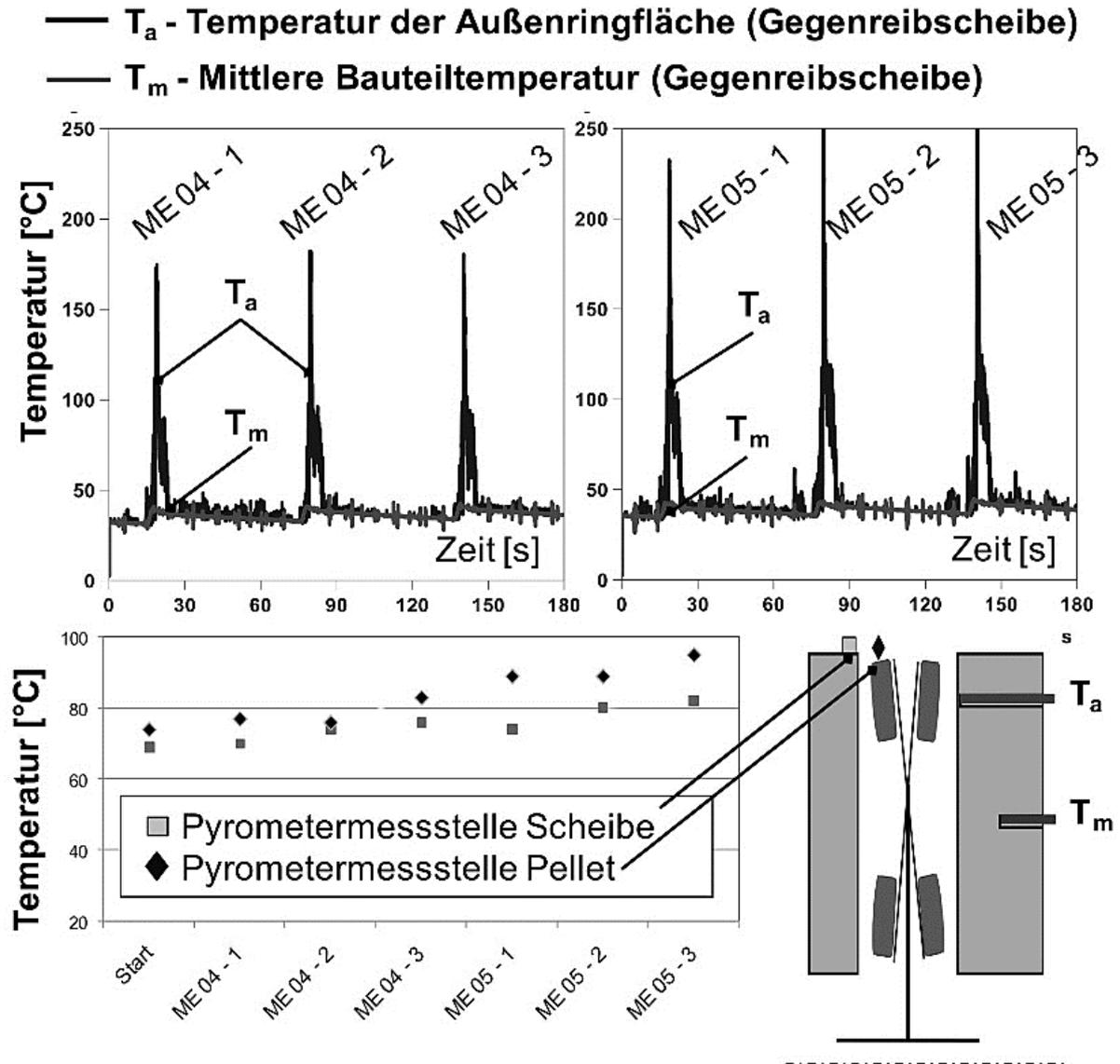


Abbildung 2.82 Gemessene Temperaturen der Friktionspaarung AL24WT/C45E<sup>196</sup>

<sup>196</sup> Mitariu-Faller, 2009, S. 120

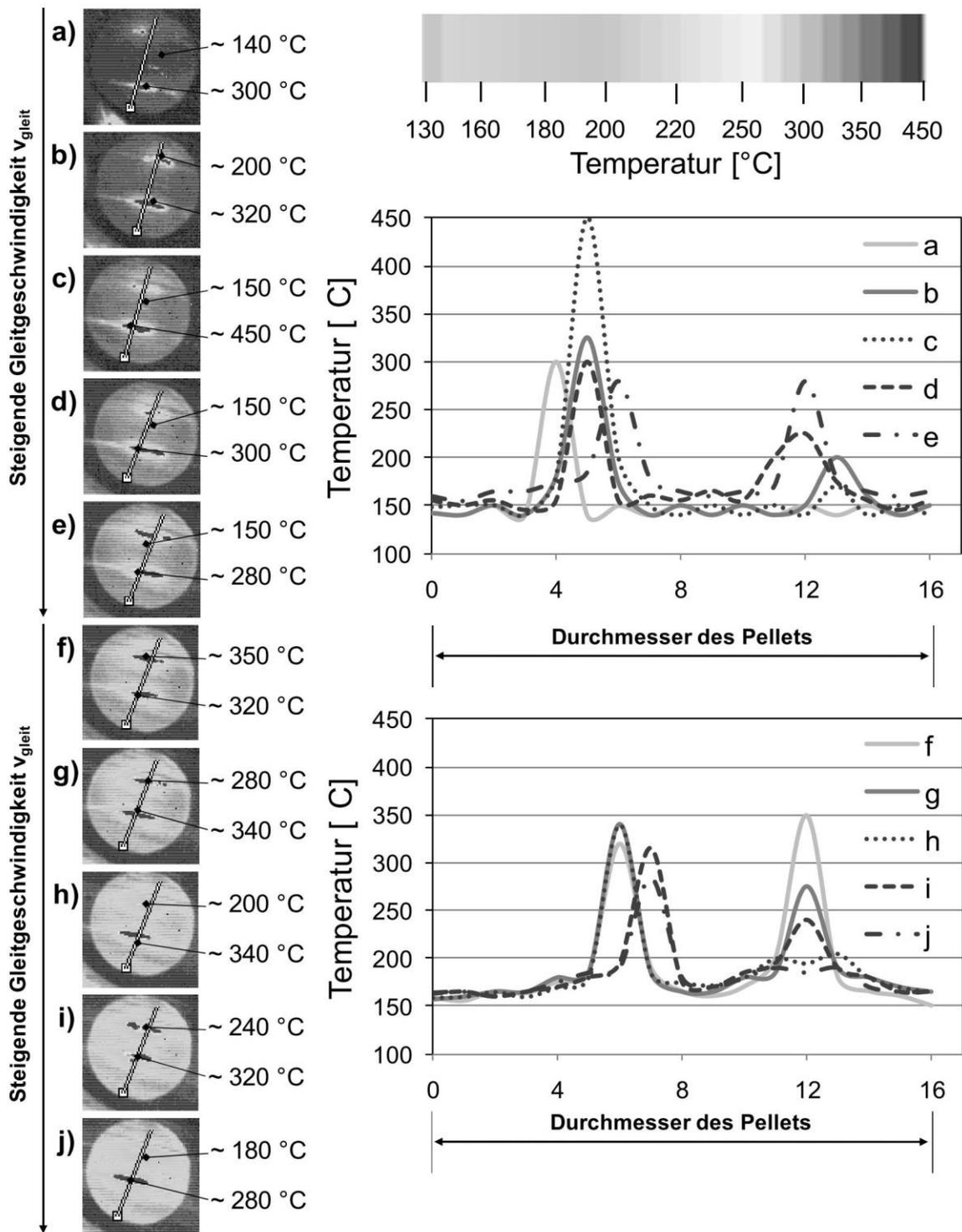


Abbildung 2.83 Messung der Temperaturverteilung im Wirkflächenpaar mittels Thermokamera<sup>197</sup>

<sup>197</sup> Mitariu-Faller, 2009, S. 122

## 2.5 Zwischenfazit

Wie aus den Arbeiten in Kapitel 2.4 hervorgeht, kann die Temperaturverteilung als Indikator herangezogen werden, um zu zeigen, dass nicht alle Bereiche des Wirkflächenpaares gleichmäßig thermisch belastet werden. Dies gilt für sowohl bei trockenlaufenden als auch bei nasslaufenden Reibkupplungen.

Die in Kapitel 2.4 beschriebenen Arbeiten zur Temperaturmessung in Reibsystemen verwenden entweder eine berührende Temperaturmessung mittels Thermoelementen, eine berührungslose Temperatur- oder Temperaturverteilungsmessung mittels Pyrometer und Thermographiekamera, oder eine Kombination der beiden von Messtechniken. Um einen Eindruck der Temperaturverteilung zu bekommen ist eine Vielzahl von Thermoelementen notwendig, was aber eine deutliche Veränderung des thermischen Haushalts mit sich bringt. Werden nur wenige Thermoelemente verwendet, kann lediglich die Grundtemperatur des Systems erfasst werden. Die Veränderung der Reibpaarung bei der Messung mittels Thermokamera, wobei ein optisch durchlässiges Medium als Gegenreibeisbe verwendet werden muss, reduziert drastisch den Erkenntnisgewinn. Wird bei der Messung mit optischen Methoden nur ein sehr kleiner optischer Zugang realisiert, ist zwar die geringe Veränderung des Systems vorteilhaft, aber es kann dann nur ein sehr kleiner Bereich vermessen werden.

Zur Einordnung der unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Messung der Temperatur / Temperaturverteilung in Reibkupplungen wird an dieser Stelle ein Portfolio eingeführt, welches den Erkenntnisgewinn in Abhängigkeit des Messaufwandes bewertet, siehe Abbildung 2.84. Dabei wird qualitativ zum einen der Erkenntnisgewinn der durchgeführten Messung aufgetragen, zum anderen der entstandene Aufwand von Messung und Auswertung der Daten festgehalten. Der Erkenntnisgewinn wird dabei mit steigender Anzahl an gemessenen Temperaturen erhöht, aber die Verfälschung des Systems durch die Messmethode, zum Beispiel durch das Einbringen von sehr vielen Thermobohrungen in zu messenden Bauteil oder das Einbringen einer Glasscheibe als optischen Zugang in die Reibpaarung, wieder vermindert. Im Falle der vielen Thermobohrungen wird der thermische Haushalt und der Wärmefluss des zu messenden Bauteils unter Umständen stark verändert, im Falle des optischen Zugangs mittels Glasscheibe wird die eigentliche Reibpaarung verändert. Beides wirkt sich negativ auf den Erkenntnisgewinn aus, da sich ein Kupplungssystem ohne Messtechnik anders verhalten wird im Betrieb, als das vermessene Kupplungssystem mit applizierter Messtechnik. Die Reibintensitätsmessungen mit dem beschriebenen Aufbau führt ebenfalls nicht zu einem deutlich gesteigerten Erkenntnisgewinn, da hier die Reibkupplungen ausschließlich im Dauerschlupf betrieben werden kann. Wiederholte realitätsnahe Energie- und Reibleistungseinträge sind mit dieser Methode nicht durchführbar.

Nach der Einordnung in Abbildung 2.84 ist ersichtlich, dass das Zielgebiet für die neue Messmethode die Steigerung des Erkenntnisgewinnes bei nicht größer werdendem Aufwand sein sollte.

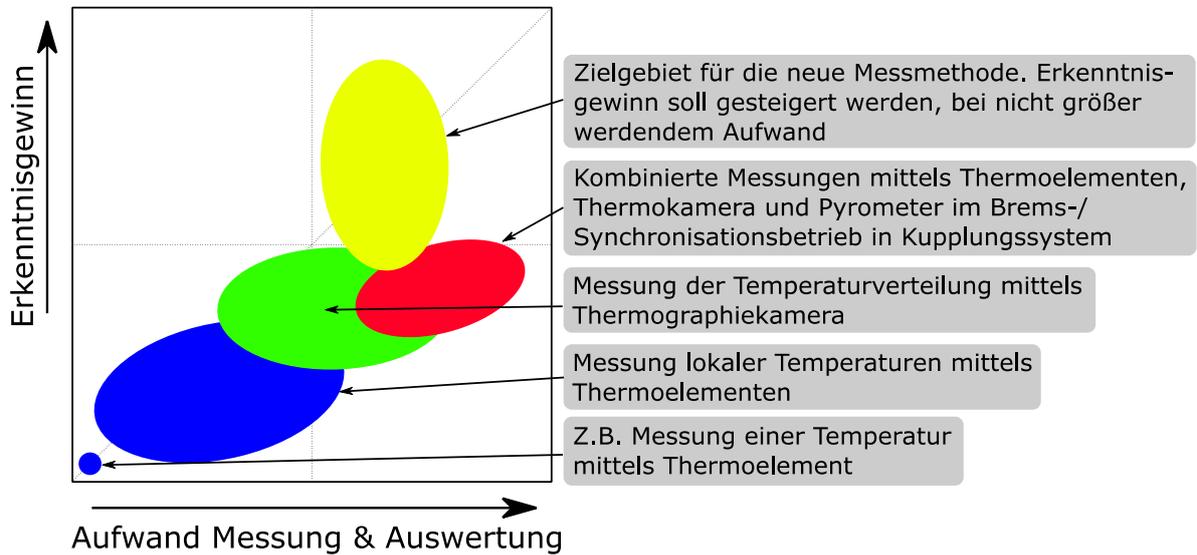


Abbildung 2.84 Portfolio zur Einordnung der Vorgehensweisen zur Temperaturmessung



## 3 Motivation und Zielsetzung

In diesem Kapitel wird die Motivation der Arbeit begründet und daraus die Zielsetzung abgeleitet.

### 3.1 Motivation

Die Motivation dieser Arbeit begründet sich auf dem in den Abschnitten 2.4 und 2.5 beschriebenen Defizit an Systemverständnis hinsichtlich der Temperaturverteilung bei trockenlaufenden kraftschlüssigen Kupplungen. Wie in Abschnitt 2.4 gezeigt wurde, gibt es einige Ansätze wie die Temperaturverteilung erfasst oder berechnet werden kann. Aber besonders bei der experimentellen Erfassung der Temperaturverteilung ist entweder die Messpunktzahl zu gering um das Verhalten hinreichend genau zu beschreiben, oder das zu vermessende System wird so stark abgeändert, dass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse nicht mehr gegeben ist.

Auf den ersten Blick ist eine trockenlaufende fremdbetätigte schaltbare kraftschlüssige Kupplung<sup>198</sup> ein einfaches System. Die genauere Betrachtung der Schlupfphase zeigt ein anders Bild. Die tatsächlich ablaufenden Prozesse bei der kraftschlüssigen Kraftübertragung, besonders während einer Schlupfphase, sind komplexe Vorgänge. Diese Vorgänge zu erfassen, die zugrundeliegenden Mechanismen voneinander zu trennen und zu bewerten ist keinesfalls trivial.

Bei der Auslegung nach der VDI 2241<sup>199</sup> lassen sich jedoch einige Vereinfachungen und Annahmen finden. Als Beispiel kann die Berechnung der Schaltarbeit  $Q$  aufgeführt werden, wobei zur Vereinfachung die Anstiegszeit  $t_{12}$  vernachlässigt und das Antriebsmoment  $M_A$  gleich dem Kennmoment  $M_K$  gesetzt wird.<sup>200</sup> Diese Vereinfachungen haben Ihren Grund zum einem in der einfachen Anwendbarkeit der Richtlinie, zum anderen aber im fehlenden Systemverständnis und damit den fehlenden Möglichkeiten bestimmte Effekte bei der Auslegung zu berücksichtigen.

Die Anforderungen an ein Kupplungssystem hingegen sind sehr umfangreich. TISSOT<sup>201</sup> fasst für einen vergleichenden Test mit mehreren Reibpaarungen die Anforderungen an ein Kupplungssystem in der Bewertungsspinne in Abbildung 3.1 zusammen. Der Wunsch eines Kupplungsentwicklers wäre eine Reibpaarung, welche alle Aspekte aus Abbildung 3.1 in maximaler Ausprägung erfüllt. Diese hohen Anforderungen an eine Reibkupplung hinsichtlich Komfort, Regelbarkeit, NVH-Verhalten, Verschleißverhalten, Drehzahlstabilität, Massenträgheit, Geruch,

---

<sup>198</sup> Siehe Kapitel 2.2.3

<sup>199</sup> Siehe Kapitel 2.2.4

<sup>200</sup> VDI 2241 - Blatt 1, 1982, S.15, Abschnitt 3.1.21

<sup>201</sup> Tissot, 2013

Umweltverträglichkeit und natürlich Kosten werden aber aktuell durch keine Reibpaarung erfüllt.

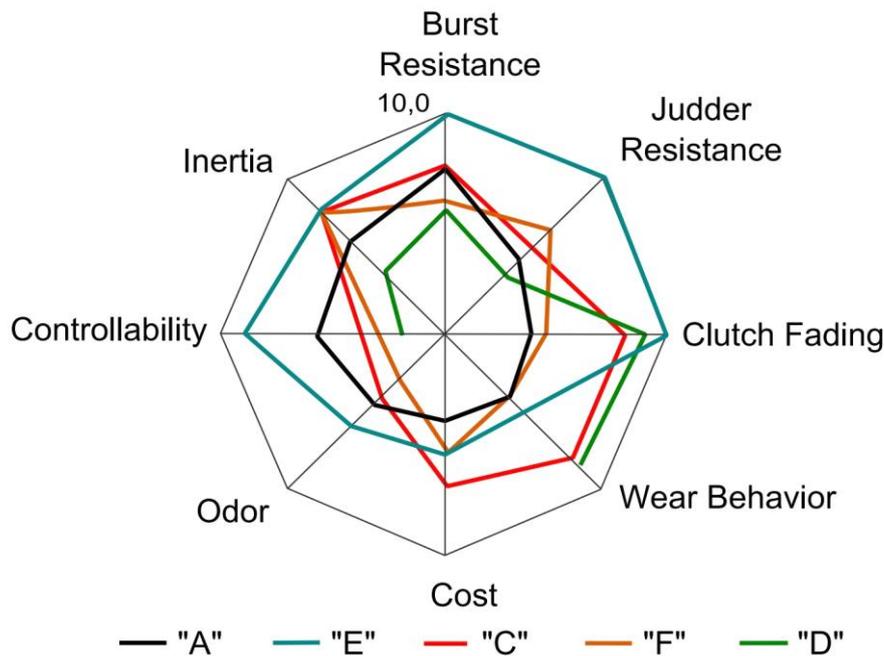


Abbildung 3.1 Anforderungen an ein Kupplungssystem<sup>202</sup>

Teilweise stehen sich die Anforderungen entgegengesetzt gegenüber, was bedeutet das bei Verbesserung der einen Eigenschaft eine andere Eigenschaft verschlechtert wird. Diese Gegensätzlichkeit wird ebenfalls am Beispiel der Reibbelagsentwicklung durch FELGER ET AL. dargestellt. Da der Reibbelag nur eine Wirkfläche darstellt und nur in Kombination mit einer zweiten Wirkfläche, der Gegenreibfläche, eine Funktion erfüllt, können diese Gegensätzlichkeiten direkt auf das Kupplungssystem übertragen werden. Zum Beispiel besteht ein Konflikt zwischen dem Wunsch nach einer möglichst hohen Reibungszahl, einem möglichst guten Komfortverhalten und einer möglichst kleinen Verschleißrate.<sup>203</sup> Aufgabe der Entwicklung und Weiterentwicklung von Reibkupplungen ist es einen für die spezifische Anwendung bestmöglichen Kompromiss auszuwählen, bei dem die Grundfunktion der Kupplung unter allen möglichen und teilweise oft schwer vorherzusehenden Belastungssituationen und -verläufen erfüllt wird. Diese Aufgabe kann nur auf Basis eines umfangreichen Systemverständnisses erfolgreich bewältigt werden.

### 3.2 Zielsetzung

Auf Basis vorangehenden Motivation wird in diesem Abschnitt die Zielsetzung der Arbeit beschrieben. Dazu wird zuerst der Forschungsbedarf und die -lücke aufgezeigt,

<sup>202</sup> Tissot, 2013

<sup>203</sup> vgl. Felger et al., 2006

dann werden Forschungshypothesen formuliert und daraus Forschungsfragen abgeleitet, um letztlich die Zielsetzung zu definieren.

### 3.2.1 Forschungsbedarf und -lücke

Der Forschungsbedarf liegt in der Erweiterung des Systemverständnisses von trockenlaufenden Friktionssystemen, wodurch zielgerichtete Änderungen der Gestaltung trockenlaufender Friktionssysteme ermöglicht werden soll. Weitergehend besteht Bedarf an der Möglichkeit der gezielten Auslegung hinsichtlich kritischer Betriebspunkte, was die Zuverlässigkeit steigern würde. Die Bedeutung von rechnergestützten Methoden in der Produktentwicklung nimmt stetig zu. Hier ist zu beachten, dass die Güte der zugrundeliegenden Modelle dabei an das Systemverständnis des Erstellers gekoppelt ist und die Validierung der Ergebnisse stark von der zu Verfügung stehenden Datenbasis abhängig ist. Hier besteht in Bereich von trockenlaufenden Friktionssystemen ebenfalls ein Forschungsbedarf.

Im Rahmen der Produktgenerationsentwicklung geht es darum, die Gestaltvariation methodisch zu unterstützen, sodass die Funktionalität neuer Produkte gesteigert werden kann.<sup>204</sup>

Die Forschungslücke besteht in der fehlenden Messmethode zur räumlich hinreichend fein aufgelösten Messung der Temperaturverteilung bei möglichst geringer Veränderung des zu prüfenden Systems, wie in Abschnitt 2.4 dargelegt.

### 3.2.2 Forschungshypothesen

Die nachfolgenden Forschungshypothesen wurden auf Basis der Grundlagen aus Kapitel 2 und des Forschungsbedarfes formuliert. Wie das Wort Hypothese<sup>205</sup> aussagt, sind die nachfolgenden Forschungshypothesen unbewiesene Annahmen, welche durch die Arbeit bestätigt oder widerlegt werden sollen.

#### **Forschungshypothese 1: Erweiterung Systemverständnis**

Mittels Messung der Temperaturverteilung in hinreichend feiner räumlichen Auflösung kann identifiziert werden, wo der Reibprozess tatsächlich stattfindet. Somit kann das thermische und thermo-mechanische Verhalten eines trockenlaufenden Friktionssystems analysiert werden, um das Systemverständnis zu erweitern.

---

<sup>204</sup> vgl. Kapitel 3.1

<sup>205</sup> „von Widersprüchen freie, aber zunächst unbewiesene Aussage, Annahme“.  
<http://www.duden.de/rechtschreibung/Hypothese>, abgerufen am 07.09.2016

**Forschungshypothese 2: Werkzeug zur Gestaltvariation**

Die Messung der Temperaturverteilung in hinreichend feiner räumlichen Auflösung kann bei der Produktgenerationsentwicklung zur gezielten Gestaltvariation von trockenlaufenden Friktionssystemen eingesetzt werden.

**3.2.3 Forschungsfragen**

Aus der Zielsetzung und den Forschungshypothesen lassen sich Forschungsfragen ableiten. Die Beantwortung der Forschungsfragen soll als zielgerichtete Orientierung bei der Bearbeitung des Forschungsthemas dienen und die Erreichung der Zielsetzung absichern.

**Forschungsfrage 1: Geeignete Messmethoden**

Gibt es geeignete Messmethode(n) für die räumlich hochauflösende Messung der Temperaturverteilung von trockenlaufenden Friktionssystemen? Wenn ja, ist die Einsetzbarkeit bei Prüfstandsuntersuchungen möglich?

**Forschungsfrage 2: Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung**

Wie muss der Prüfaufbau gestaltet werden, um die Messmethode bei Prüfstandsuntersuchungen anzuwenden? Wo liegen die Grenzen der Messmethode? Wie groß sind die zu erwartenden Fehler?

**Forschungsfrage 3: Charakterisierung Systemverhalten**

Wie kann die Messung der Temperaturverteilung in hinreichend feiner räumlichen Auflösung eingesetzt werden, um das Systemverhalten zu charakterisieren?

**Forschungsfrage 4: Methodische Gestaltvariation**

Wie kann auf Basis der Messung der Temperaturverteilung in hinreichend feiner räumlichen Auflösung die Gestaltvariation im Sinne der PGE methodisch unterstützt werden?

### 3.2.4 Zielsetzung

Bevor die Zielsetzung der Arbeit erläutert wird, soll zuerst die Eingliederung in die KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung<sup>206</sup> vorgenommen werden.

Zur Produktgenerationsentwicklung soll durch die Entwicklung einer Methode zur zielgerichteten Gestaltvariation ein Beitrag geleistet werden. Der Beitrag zum C&C<sup>2</sup>-Ansatz liegt in der beispielhaften Integration der Messdaten der Temperaturverteilungsmessung zur Analyse und Optimierung von technischen Systemen.

Weiterhin soll an dieser Stelle der Bezug der vorliegenden Arbeit in die umfangreiche Forschung des IPEK rund um trockenlaufende Friktionssysteme hergestellt werden. Grundsätzlich lassen sich die Arbeiten in diesem Gebiet in folgende Bereiche gliedern:

- Arbeiten zur Charakterisierung und Auslegung des dynamischen Verhaltens der Kupplung in Wechselwirkung mit dem Gesamtantriebsstrang
- Arbeiten zur simulativen Vorhersage des Systems- bzw. Reibungsverhaltens
- Arbeiten im Bereich des thermischen Verhaltens von Gesamtsystem oder Wirkflächenpaar

Mit der Beschreibung und Bewertung von dynamischen Wechselwirkungen von Reibkupplung und Gesamtantriebsstrang und deren Berücksichtigung bei der Produktentwicklung beschäftigen sich KRÜGER<sup>207,208</sup>, Ott<sup>209</sup>, MITARIU-FALLER<sup>210,211</sup>, KARRAR<sup>212,213</sup> und STIER<sup>214,215</sup>. ARSLAN-HÜRST<sup>216,217</sup> untersucht die Verwendung von Ingenieurkeramiken in trockenlaufenden Kupplungen. Die Arbeit von LORENTZ<sup>218,219</sup> beschäftigt sich mit der Modellierung der Reibung von trockenlaufenden und geschmierten Systemen mit dem Ziel der rechnergestützten Vorhersage des Reibungsverhaltens. HAUSCHILD<sup>220</sup> beschreibt einen Weg zur ebenfalls

---

<sup>206</sup> Wintergerst, 2015, Vorwort zu Band 86

<sup>207</sup> Krüger, 2003

<sup>208</sup> Albers et al., 2001a; Albers et al., 2003b; Albers et al., 2001b

<sup>209</sup> Albers et al., 2003a; Albers; Ott, 2006; Albers et al., 2007a

<sup>210</sup> Mitariu-Faller, 2009

<sup>211</sup> Albers et al., 2009; Albers et al., 2006d, 2007c, 2007d

<sup>212</sup> Karrar, 2009

<sup>213</sup> Albers et al., 2006a, 2006b, 2007b, 2007e

<sup>214</sup> Stier, 2015

<sup>215</sup> Albers; Stier, 2010, 2011; Albers et al., 2013d

<sup>216</sup> Arslan-Hürst, 2005

<sup>217</sup> Arslan-Hürst und Albers, 2001; Arslan; Albers, 2002; Albers; Arslan, 2004b, 2004a

<sup>218</sup> Lorentz, 2013

<sup>219</sup> Albers; Lorentz, 2010a, 2010b, 2011, 2012; Albers et al., 2010; Lorentz und Albers, 2013

<sup>220</sup> Hauschild, 2015

rechnergestützten Bestimmung des Wärmeübergangsverhalten von trockenlaufenden Reibkupplungen. Hierbei ist das Verständnis des Thermomanagements des Gesamtsystems im Mittelpunkt. Möglichkeiten zur Berechnung des thermischen Verhaltens eines Wirkflächenpaares eines trockenlaufenden Friktionssystems wird von MERKEL<sup>221,222</sup> vorgestellt. In seiner Arbeit beschreibt BEITLER<sup>223</sup> wie auf Basis von empirisch ermittelter Größen ein Thermomodell einer Einscheiben-Trockenkupplung aufgebaut wird. Mit diesem Modell kann eine mittlere Temperatur in den funktionsrelevanten Bauteilen berechnet und somit kritische Betriebspunkte identifiziert werden.

Als Grundlage und Anknüpfungspunkt für die vorgelegte Arbeit dient die von MERKEL beschriebene Gegenüberstellung von mittlerer Reibungszahl und Temperaturverteilung<sup>224</sup>. Die an einer Umfangposition radial verteilten Messstellen zeigen, dass anhand der Temperaturentwicklung Bereiche identifiziert werden können, wo der Reibprozess stattfindet.<sup>225</sup> Jedoch ist die Betrachtung von nur einer Position am Umfang nicht ausreichend, um das Systemverhalten ausreichend genau zu beschreiben.

Daraus ergibt sich als Ziel dieser Forschungsarbeit die Entwicklung einer neuartigen Messmethode zur Erfassung der Temperaturverteilung in hinreichend feiner räumlichen Auflösung nahe einem trocknen Friktionskontakt. Für die Produktgenerationsentwicklung soll die Messung und Analyse der Temperaturverteilung als Methode zur zielgerichteten Gestaltvariation von Friktionskontakten aufbereitet werden.

---

<sup>221</sup> Merkel, 2015

<sup>222</sup> Albers et al., 2013e; Albers et al., 2013c

<sup>223</sup> Beitler, 2008

<sup>224</sup> Merkel, 2015, S. 85 ff.

<sup>225</sup> siehe auch Abschnitt 2.4.1

## 4 Forschungsansatz

In diesem Kapitel wird ausgehend von den beschriebenen Grundlagen und der Motivation und Zielsetzung der Arbeit der Forschungsansatz beschrieben. Es wird die genutzte Testumgebung gezeigt und die für die Arbeit verwendete Definition einer Methode beschrieben. Abschließend wird die Struktur der Arbeit erläutert.

### 4.1 Testumgebung

Als Testumgebung zur Überprüfung der Einsetzbarkeit der Temperaturmesstechniken und anschließender Anwendung stand für diese Arbeit der Trocken-Reib-Prüfstand zur Verfügung, welcher in Abbildung 4.1 gezeigt wird.

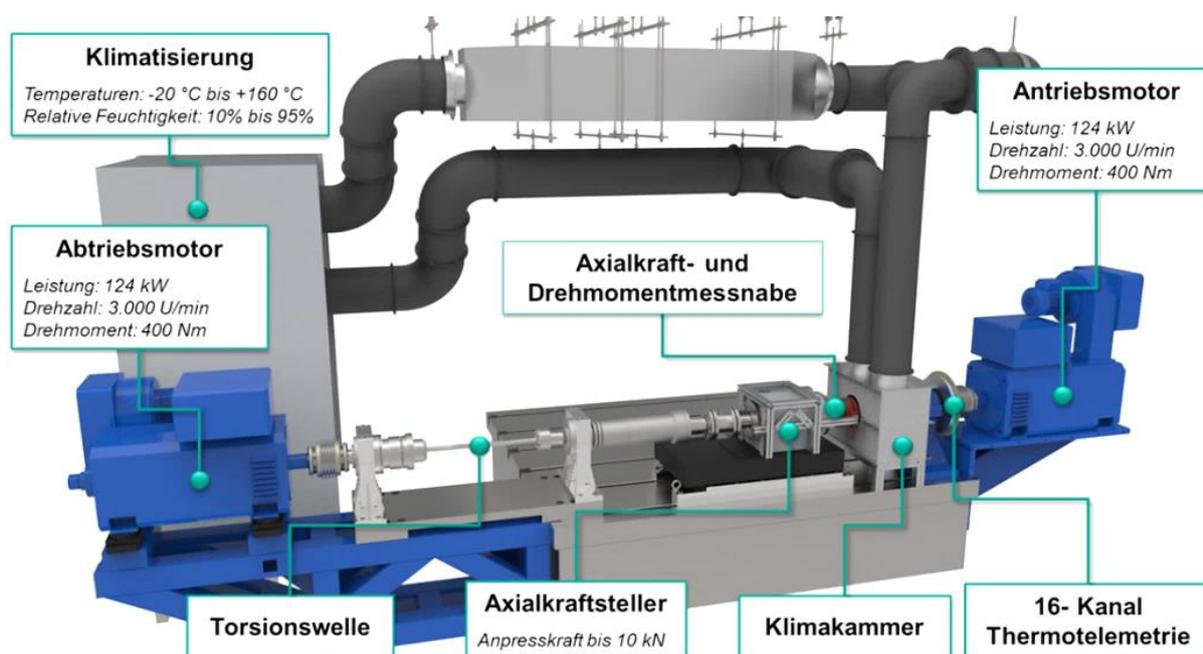


Abbildung 4.1 Aufbau Trocken-Reib-Prüfstand (TRP)<sup>226</sup>

Der Prüfstand besteht aus zwei E-Motoren, welche den Antrieb und den Abtrieb darstellen. Mit dem Antrieb wird der Prüfkopf, welcher die Prüfkupplung darstellt, angetrieben. Direkt nach dem Prüfkopf wird sowohl Drehmoment, sowie Anpresskraft gemessen. Die Anpresskraft wird mit dem Axialkraftsteller geregelt aufgebracht. Die Keilwelle dient dabei als axial verschiebbares Element zur Drehmomentübertragung. Mit der sich anschließenden Torsionswelle kann die Eigenfrequenz des Aufbaus eingestellt werden, indem der Durchmesser der Welle vergrößert oder verkleinert wird. Der Abtrieb stellt die Massenträgheit des zu untersuchenden Systems dar. Mit diesem Aufbau ist es möglich sowohl Synchronisationsversuche, Bremsversuche, Dauerschlupfversuche oder Losbrechversuche durchzuführen. Dabei kann eine

<sup>226</sup> Albers et al., 2015a, S. 62

gewünschte Axialkraft eingestellt werden, welche mittels der Axialkraftmessnabe nachgeregelt wird. Der Abtriebsmotor kann zum einen Drehzahl geregelt betrieben werden, sodass vorgegebene Drehzahlrampen abgebildet werden können. Zum anderen kann eine sogenannte Massensimulation realisiert werden, wobei eine gewünschte rotatorische Trägheit der Abtriebsseite eingeregelt wird.

Für die Untersuchungen wurde der in Abbildung 4.2 abgebildete Prüfkopf verwendet. Dieser Prüfkopf bietet zum einen eine einfache Anbindung von unterschiedlichsten Gegenreibeischeiben und Reibbelägen, zum anderen zeichnet er sich durch eine gute Zugänglichkeit für Messtechnik aus. Zusätzlich sind durch die Reduzierung auf einen Reibkontakt und die damit mögliche direkte Lagerung des Belagträgers auf der Trägerscheibe der Gegenreibeischeibe nur geringe geometrische Fehler zu erwarten. Durch den rotationssymmetrischen Aufbau ist eine homogen anliegende Axialkraft zu erwarten.

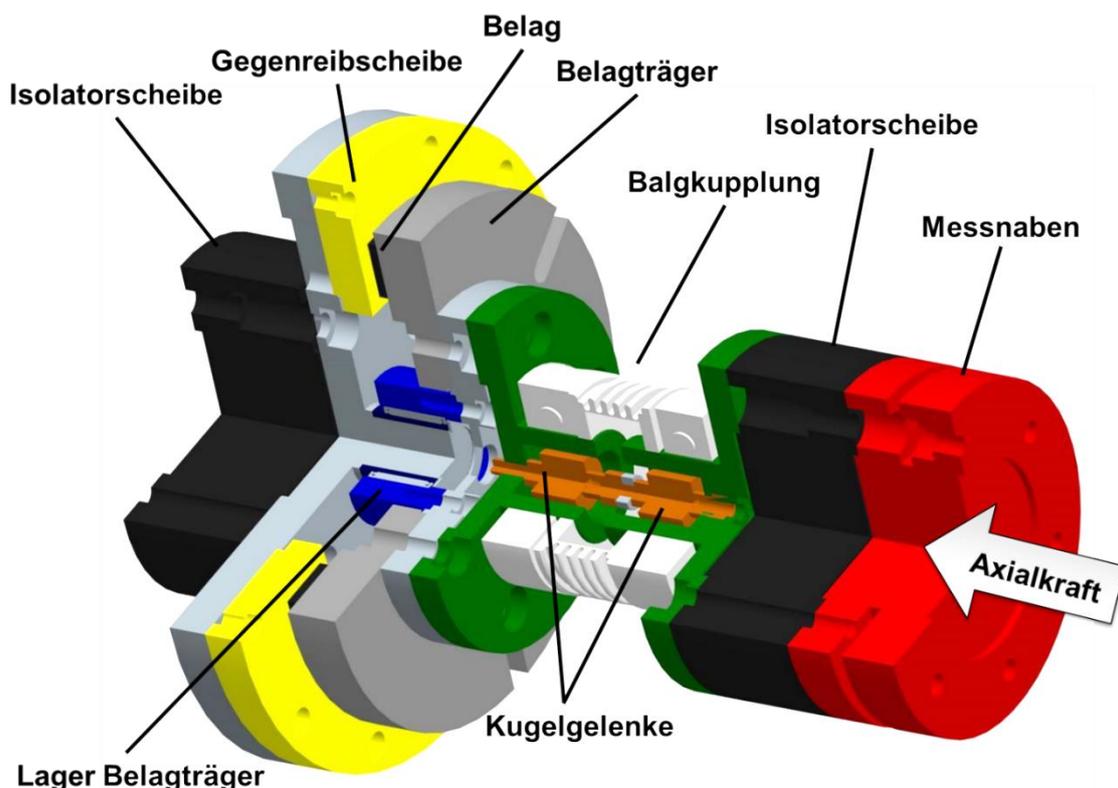


Abbildung 4.2 Schnittdarstellung Prüfkopf<sup>227</sup>

## 4.2 Methodenentwicklung

Ein Ziel der Arbeit ist die Aufbereitung der Messung und Analyse der Temperaturverteilung als Methode für die Produktgenerationsentwicklung zur zielgerichteten Gestaltvariation von Friktionskontakten. Dafür soll an dieser Stelle beschrieben werden wie eine Methode verstanden wird, um in den folgenden Kapiteln

<sup>227</sup> Merkel, 2015, S. 55

die Methodenentwicklung durchführen zu können. In dieser Arbeit wird eine Methode nach der Definition der KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung verstanden, die wie folgt lautet: „Methoden beschreiben ein zielgerichtetes Vorgehen. Sie haben einen deskriptiven Charakter und bilden das verallgemeinerte Wissen zu bestimmten Anwendungsfällen ab. Sie sollen dem Anwender als Hilfestellung zur Erreichung eines Ziels dienen. Der Ausgang der Anwendung einer Methode ist offen.“<sup>228</sup>

### **4.3 Struktur der Arbeit**

Inhaltlich ist die Arbeit in acht Kapitel gegliedert. Eine Hinleitung zum Forschungsthema wird in Kapitel 1 gegeben.

In Kapitel 2 wird auf die notwendigen Grundlagen und den Stand der Forschung eingegangen. Dies umfasst die relevanten Produktentwicklungswerkzeuge, die Einordnung und Beschreibung der untersuchten Wellenkupplung und die Grundlagen und der Stand der Forschung bezüglich der technischen Temperaturmessung.

In Kapitel 3 wird die zugrundeliegende Motivation erläutert, Forschungshypothesen und Forschungsfragen formuliert und daraus die Zielsetzung abgeleitet.

In Kapitel 4 wird der Forschungsansatz erläutert, wobei die verwendete Testumgebung und das zugrundeliegende Verständnis einer Methode beschrieben wird.

In Kapitel 5 wird die Entwicklung der neuartigen Temperaturverteilungsmessung beschrieben. Zuerst wird eine geeignete Messtechnik gesucht, welche den Anforderungen der Zielsetzung genügt. Die ausgewählte Messtechnik wird in einer Machbarkeitsstudie hinsichtlich der grundsätzlichen Verwendbarkeit untersucht. Im nächsten Schritt wird eine Fehlerbetrachtung durchgeführt, um die Grenzen und Möglichkeiten der Messmethode zu bewerten.

In Kapitel 6 wird die Anwendung der Temperaturverteilungsmessung für zwei Beispielsysteme gezeigt, bei welchen die neuartige Messmethode erfolgreich zur Steigerung des Systemverständnisses eingesetzt wurde.

In Kapitel 7 wird die entwickelte Temperaturverteilungsmessung methodisch aufgearbeitet, um in Verknüpfung mit dem C&C<sup>2</sup>-Ansatz dem Produktentwickler ein Optimierungswerkzeug an die Hand geben zu können.

Abschließend wird in Kapitel 8 die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick formuliert, in welchem Anregungen zu anknüpfenden Forschungsthemen aufgezeigt werden.

---

<sup>228</sup> IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2017



## 5 Entwicklung der Temperaturverteilungsmessung

In diesem Kapitel soll die Auswahl einer Messtechnik durchgeführt werden, welche der Zielsetzung entspricht. Darüber hinaus soll die ausgewählte Messtechnik mittels einer Fehlerbetrachtung genauer analysiert werden. Ziel dieses Kapitels ist die Beantwortung der Forschungsfragen 1 und 2.<sup>229</sup>

### 5.1 Auswahl Messtechnik

Zur Auswahl der Messtechnik wird in diesem Abschnitt die Problemlösungsmethodik SPALTEN<sup>230</sup> angewendet. Dabei wurde die Zusammenstellung und Überprüfung des Problemlösungsteams (PLT) und der Informationscheck (IC) zwischen jedem Schritt durchgeführt, jedoch im Nachfolgenden nicht explizit beschrieben.

#### 5.1.1 S – Situationsanalyse

Der Zielsetzung in Abschnitt 3.2.4 folgend wird eine Messtechnik gesucht, mit welcher die Temperatur in einem Kupplungssystem räumlich hochauflösend erfasst werden kann. Das bedeutet entweder die vollständig flächige Messung der Temperaturverteilung oder die Messung von hinreichend vielen Einzelmesspunkten. Gemessen werden soll im oder möglichst nahe am Friktionskontakt. Im besten Falle soll die Messung im Originalaufbau stattfinden.

In einem Kupplungssystem besteht der Friktionskontakt aus den in Abbildung 5.1 dargestellten Wirkflächenpaaren<sup>231</sup>. Die Wirkflächenpaare sind folgende:

- WFP Reibkontakt 1:
  - Wirkfläche „Reibfläche auf Schwungrad / Sekundärseite des Zweimassenschwungrades (ZMS)“
  - Wirkfläche „Zugewandte Reibfläche des Reibbelags der Kupplungsscheibe“
- WFP Reibkontakt 2:
  - Wirkfläche „Reibfläche auf Anpressplatte“
  - Wirkfläche „Zugewandte Reibfläche des Reibbelags der Kupplungsscheibe“

---

<sup>229</sup> Siehe Abschnitt 3.2.3

<sup>230</sup> Siehe Abschnitt 2.1.1

<sup>231</sup> Siehe auch Abbildung 2.10 und Abbildung 2.11

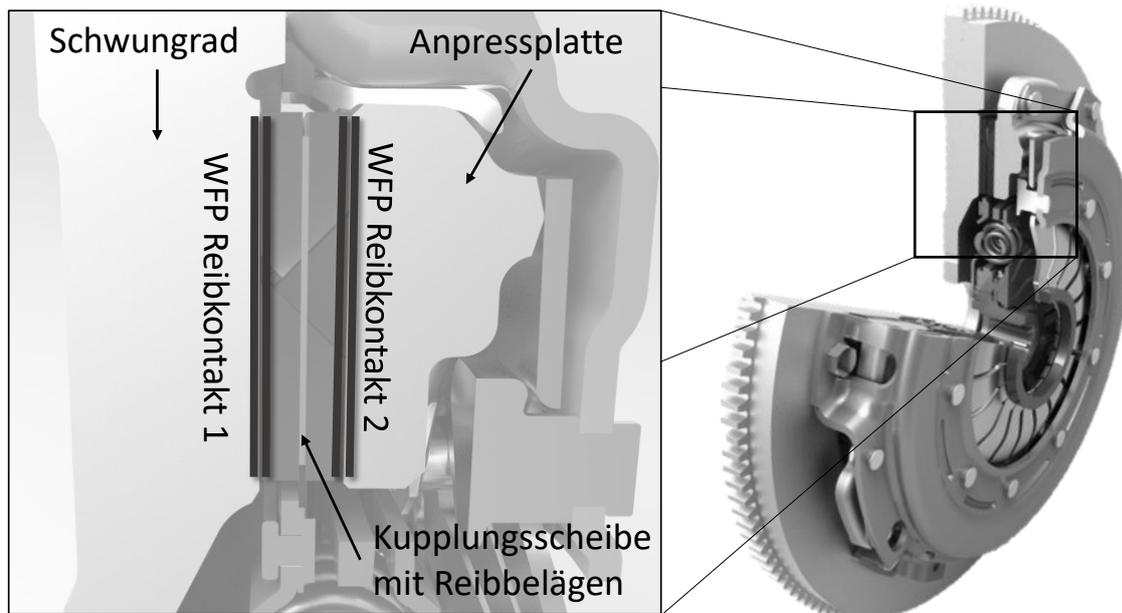


Abbildung 5.1 Wirkflächenpaare im Reibkontakt einer trockenlaufenden Anfahrkupplung<sup>232</sup>

Eine Temperaturänderung des Systems findet zum einen bei einem Energieeintrag, zum anderen beim Angleichen an die Umgebungstemperatur statt. In das System wird Energie eingetragen und das System erwärmt sich durch einen Reibprozess, wobei eine Differenzdrehzahl der beiden Wirkflächen im Wirkflächenpaar bei gleichzeitiger Pressung zwischen den Wirkflächen vorherrscht. Beim Angleichen an die Umgebungstemperatur kann sich die Kupplung entweder im geöffneten Zustand befinden oder es herrscht keine Relativbewegung zwischen den beiden Wirkflächen. Der Energieeintrag in einer Fahrzeuanfahrkupplung findet normalerweise in einem kurzen Zeitraum von  $<1$  s bis hin zu 10 s statt. Das Angleichen an die Umgebungstemperatur hingegen findet fortlaufend statt. Um der Zielsetzung zu entsprechen, muss die gesuchte Messtechnik beide Zustände erfassen können.

In der Zielsetzung wird eine räumlich hochauflösende Erfassung der Temperaturverteilung verlangt, weshalb an dieser Stelle die genaue Bedeutung diskutiert werden soll. Wenn man von einer ideal homogenen Wärmequelle ausgeht, wie sie in Abbildung 5.2 für einen Zeitpunkt dargestellt ist, wäre die Temperatur über den Radius bei gleicher Entfernung von der Reibfläche überall identisch. Wäre dies der Fall, würde ein Messpunkt für einen bestimmten Abstand zum Friktionskontakt ausreichen.

Bei genauerer Betrachtung der Wirkflächen des Friktionskontaktes erkennt man, dass die beiden technischen Oberflächen Rauheiten besitzen. Das Friktionssystem mit seinen Rauheiten ist schematisch in Abbildung 5.3 dargestellt. Da sowohl der

<sup>232</sup> Aus Albers et al., 2016b. Um Beschriftung der relevanten Bauteile ergänzt.

Grundkörper wie auch der Gegenkörper raue Körper sind, kann es immer nur vereinzelt zu Punkt oder kleineren linienförmigen Kontakten kommen. Dass eine inhomogene Temperaturverteilung im Wirkflächenpaar eines Friktionssystems vorliegt, ist durch den Stand der Forschung in Abschnitt 2.4 bereits belegt. Der Energieeintrag durch punktförmige Wärmequellen, also Stellen an denen tatsächlich Reibung stattfindet, ist in Abbildung 5.4 vereinfacht dargestellt.

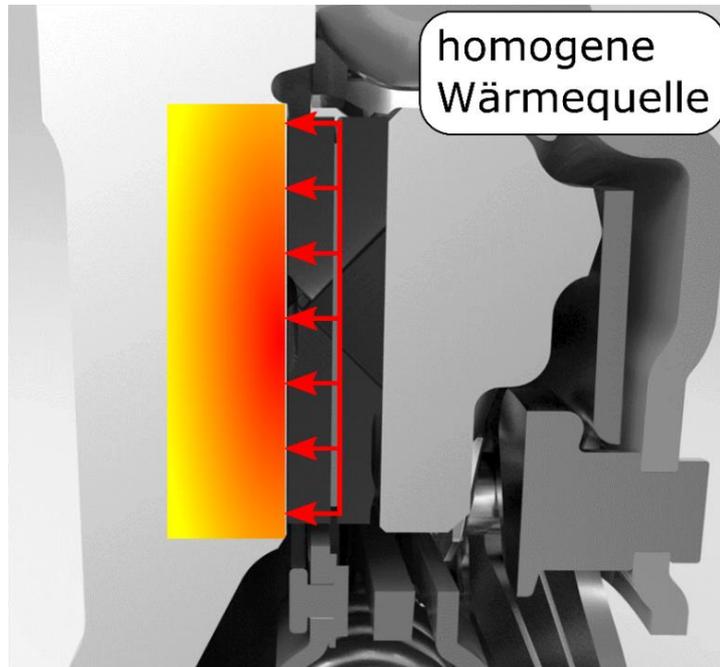


Abbildung 5.2 Qualitativer Temperaturverlauf bei homogener Wärmequelle

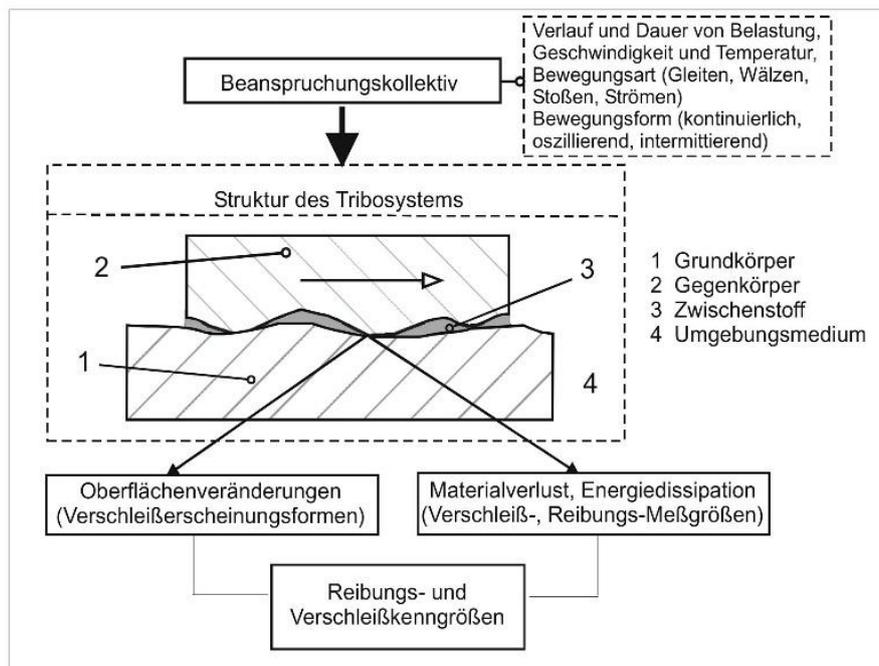


Abbildung 5.3 Schema eines tribologischen Systems<sup>233</sup>

<sup>233</sup> Deters, 2002, S. 6

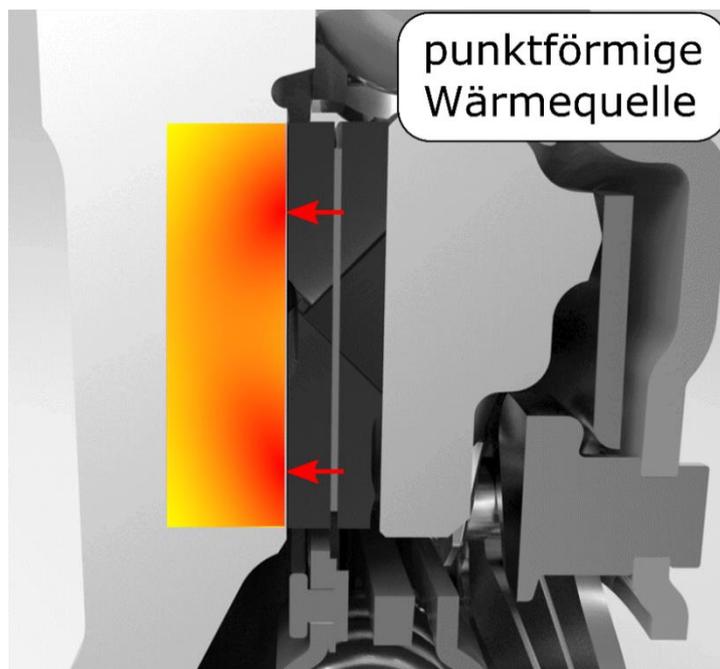


Abbildung 5.4 Qualitativer Temperaturverlauf bei punktförmigen Wärmequellen

Als Reibbelag werden im Kfz-Bereich fast ausschließlich organische Reibeläge verwendet, weshalb an dieser Stelle ein organischer Reibbelag für die weiteren Untersuchungen angenommen wird. Die Bauteile Schwungrad / Sekundärseite des ZMS und Anpressplatte sind üblicherweise aus Gusseisen oder Stahl. Der organische Reibbelag ist im Vergleich zu den metallischen Bauteilen ein guter thermischer Isolator. Um dies zu belegen sind in Tabelle 1 die Wärmeleitfähigkeiten eines organischen Reibbelags denen von C45, EN-GJL-250, EN-GJS-500 und EN-GJV-300 gegenübergestellt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung Wärmeleitfähigkeiten

Material	Reibbelag R-218	C45	GG25 EN-GJL-250	GGG50 EN-GJS-500	GGV30 EN-GJV-300
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in $W/(m * K)$	2,3 <sup>234</sup>	42,6 <sup>235</sup>	49 <sup>236</sup>	35,2 <sup>237</sup>	44 <sup>237</sup>

<sup>234</sup> Siehe Albers et al., 2013a, S. 20

<sup>235</sup> Siehe Deutsche Edelstahlwerke GmbH, 2011, S. 2

<sup>236</sup> Siehe Berns und Theisen, 2008, S. 146

<sup>237</sup> Eisengießerei O. Gattermann GmbH & Co. KG, 2017, S. 2

Die zur Temperaturmessung prinzipiell einsetzbaren Messtechniken, wie in Abschnitt 2.3.1 erläutert, sind folgende:

- Dynamisches Thermoelement
- Thermoelement (eingebettet)
- Infrarot-Mikroskopie
- Temperaturlaufnehmer (aufgedampft, eingebettet)
- Faseroptische Sensorik – Punktförmig mit Faser-Bragg Gitter
- Faseroptische Sensorik – Verteilt messendes Prinzip

### 5.1.2 P – Problemeingrenzung

Zuerst soll bei der Problemeingrenzung auf die möglichen Messstellen zur Erfassung der Temperaturverteilung im Kupplungssystem eingegangen werden. Nach Abbildung 5.1 gibt es für jedes der beiden Wirkflächenpaare genau drei Stellen wo die Temperatur gemessen werden kann, welche nachfolgend aufgelistet und diskutiert werden.

- *Metallische Wirkfläche*  
Aufgrund der guten thermischen Leitfähigkeit ist eine Messung in der metallischen Wirkfläche möglichst nahe am Reibkontakt mit geringfügig reduziertem Erkenntnisgewinn realisierbar.
- *Wirkfläche Reibbelag*  
Aufgrund der schlechten thermischen Leitfähigkeit des organischen Reibbelages ist die Messung der Temperaturverteilung nahe dieser Wirkfläche nicht sinnvoll, da kaum Rückschlüsse auf die vorliegenden Oberflächentemperaturen gezogen werden können.
- *Direkt im Friktionskontakt*  
Die Messung der Temperaturverteilung direkt im Reibkontakt ist nur mit optischen Messtechniken möglich, indem eine Wirkfläche zumindest teilweise durch ein optisch durchlässiges Medium ersetzt wird. Als kritisch zu sehen ist hierbei jedoch die Änderung des Wirkflächenpaares, was den Erkenntnisgewinn der Messung reduziert.

Weiterhin soll auf die notwendige Messpunktdichte eingegangen werden. Wird eine optische Messtechnik eingesetzt, entfällt dieser Punkt, da bei dieser der erfasste Bildbereich vollständig ausgewertet werden kann. Werden Messtechniken verwendet, welche mit Einzelsensoren arbeiten, ist auf eine möglichst hohe Messpunktzahl zu achten. Dies ist notwendig, um mittels Messung nahe am Friktionskontakt das Systemverhalten detailliert zu erfassen. In Abbildung 5.5 ist die Notwendigkeit hinreichend vieler Messpunkte vereinfacht visualisiert. Dargestellt sind 7 Messstellen

und eine punktförmige Wärmequelle, wobei für den dargestellten Zeitpunkt Messstelle 4 den besten Messwert liefert. Dahingegen würden Messstellen 1 und 7 den Temperaturanstieg zum dargestellten Zeitpunkt nicht detektieren.

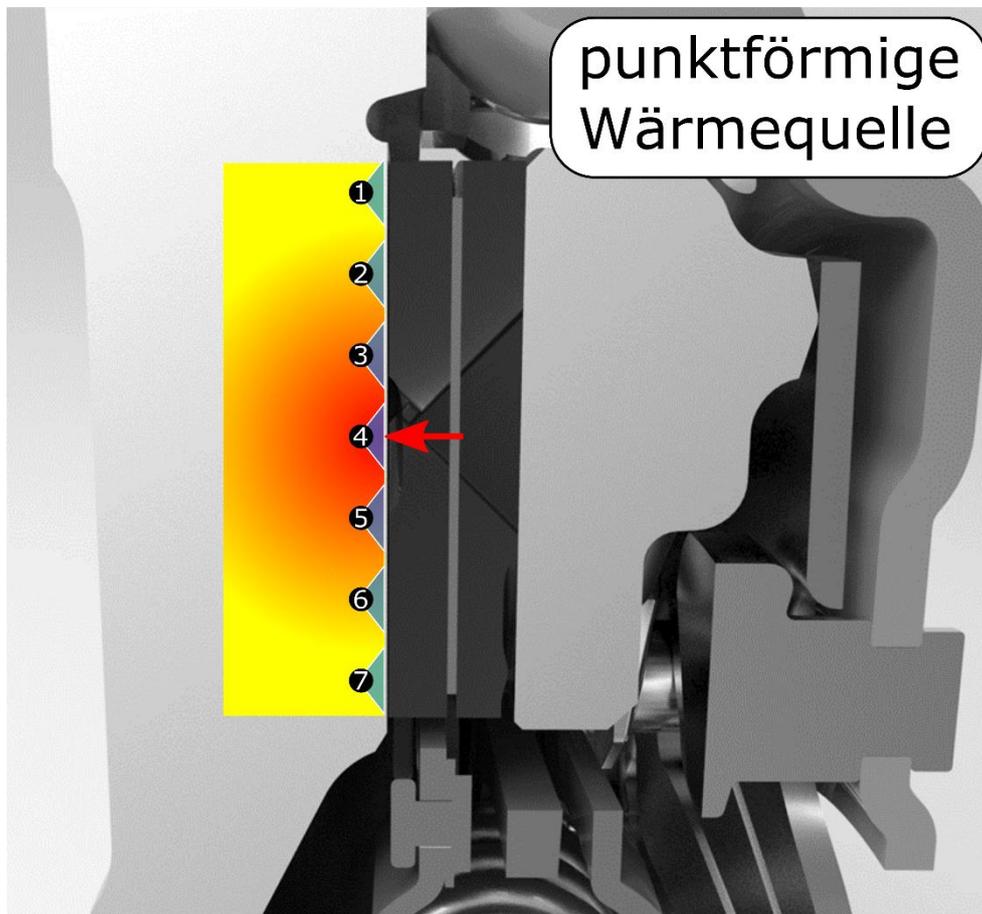


Abbildung 5.5: Temperaturmessstellen bei punktförmiger Wärmequelle

### 5.1.3 A - Alternative Lösungen

Die in der Situationsanalyse genannten Möglichkeiten der Temperaturmessung sollen unter Berücksichtigung der Problemeingrenzung im Nachfolgenden diskutiert werden:

- *Dynamisches Thermoelement*  
Die Temperaturmessungen mittels des Prinzips des dynamischen Thermoelementes ist in einem Friktionssystem stark negativ beeinflusst durch entstehende Oxidschichten und unterschiedlichste Oberflächenverunreinigungen. Zusätzlich erhält man mit dieser Messtechnik keine räumlich hochauflösende Temperaturinformation. Damit kommt diese Möglichkeit nicht in Frage und wird nicht weiter betrachtet.
- *Thermoelement (eingebettet)*  
Die Temperaturmessung mittels Thermoelementen wird bereits zur Forschung und industriell angewandt. Bei Verwendung von vielen Einzelsensoren ist prinzipiell die räumlich hochauflösende Erfassung der Temperaturverteilung in

einem Kupplungssystem möglich. Für jedes Thermoelement müsste eine Bohrung gefertigt werden, wie in Abbildung 5.6 angedeutet. Die Thermoelemente müssten über Umfang und Radius verteilt werden, um ein räumlich hochauflösendes Bild der gesamten Temperaturverteilung ermitteln zu können. Aus Fertigungsgründen ist die Einbringung der Bohrungen normal oder parallel zur Wirkfläche zweckmäßig.

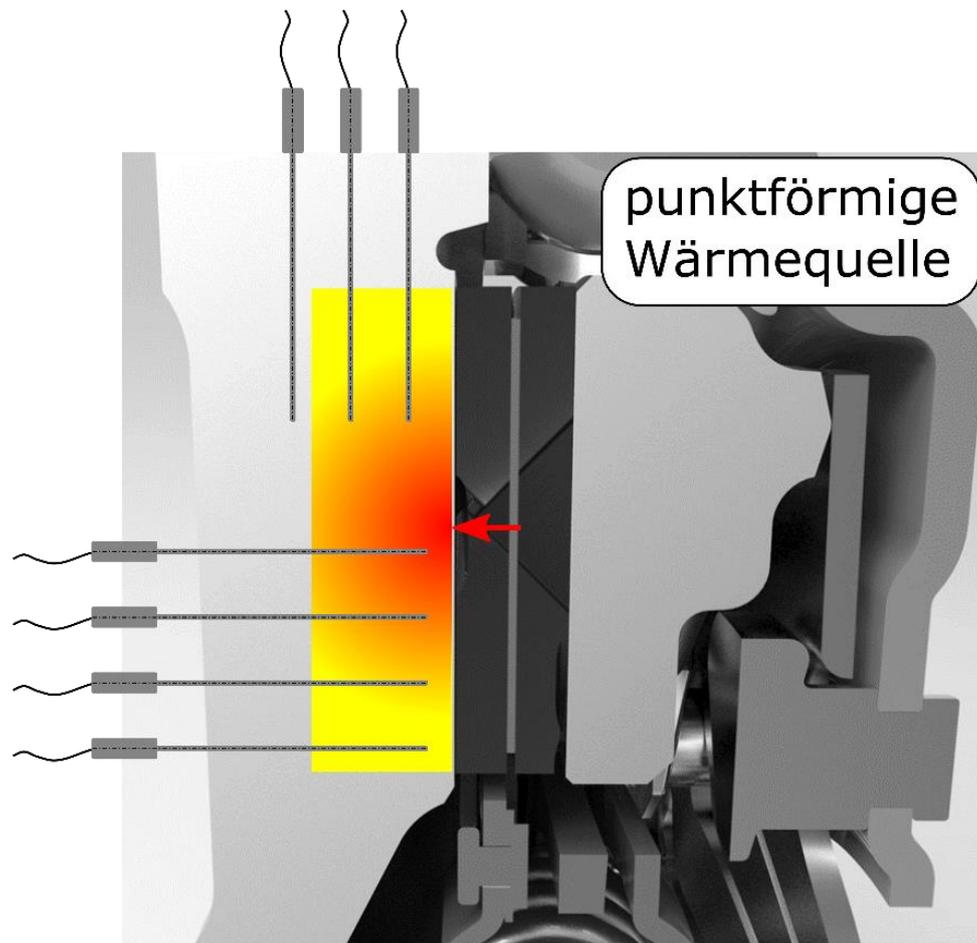


Abbildung 5.6 Messmöglichkeiten mit Thermoelementen

- *Infrarot-Mikroskopie*

Die Temperaturmessung mittels Thermographie wird bereits zur Forschung und industriell angewandt. Durch Einbringen eines optisch durchlässigen Mediums ist prinzipiell die räumlich hochauflösende Erfassung der Temperaturverteilung in einem Kupplungssystem möglich. Für die Messung müsste wie in Abbildung 5.7 dargestellt, ein optisch durchlässiges Medium eingebracht werden, sodass direkt im oder sehr nahe am Reibkontakt die Temperaturverteilung erfasst werden kann. Eine räumlich hochauflösende Erfassung der Temperaturverteilung wäre durch das Ersetzen der metallischen Wirkfläche oder durch die Einbringung mehrerer über den Umfang verteilter „Fenster“ möglich.

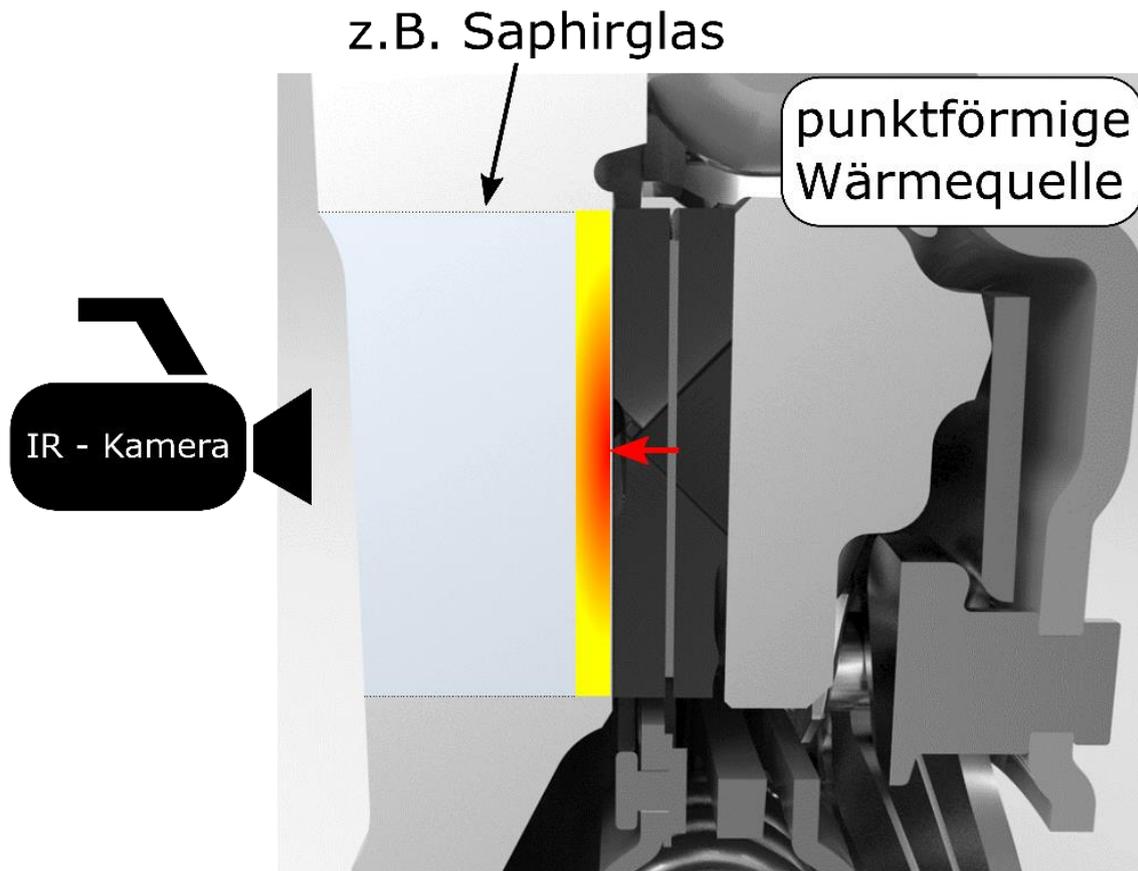


Abbildung 5.7 Messung mit Thermographie

- Temperaturaufnehmer (aufgedampft, eingebettet)*  
 Temperaturaufnehmer werden direkt in die Kontaktfläche aufgedampft oder eingebettet. Da es in einer Anfahrkupplung naturgemäß zu Verschleiß beider Wirkflächen kommt, kann diese Messtechnik nicht verwendet werden. Weiterhin befindet sich die Messtechnik hinsichtlich des Einsatzes bei Misch- und Festkörperreibung noch in der Erforschung<sup>238</sup> und kann konventionell nicht ohne weiteres verwendet werden.
- Faseroptische Sensorik – Punktförmig mit Faser-Bragg Gitter*  
 Die Temperaturmessung mittels punktförmig messender faseroptischer Sensorik wird bereits in anderen Bereichen zur Forschung und industriell angewandt. Durch Einbringung von vielen Faser-Bragg Gittern, wodurch viele Einzelmesspunkte entstehen, ist prinzipiell die räumlich hochauflösende Erfassung der Temperaturverteilung in einem Kupplungssystem möglich. Als zweckmäßig und fertigbar werden Bohrungen mit möglichst kleinem Durchmesser parallel zur Wirkfläche angesehen, siehe Abbildung 5.8.

<sup>238</sup> GEPRIS – Geförderte Projekte der DFG

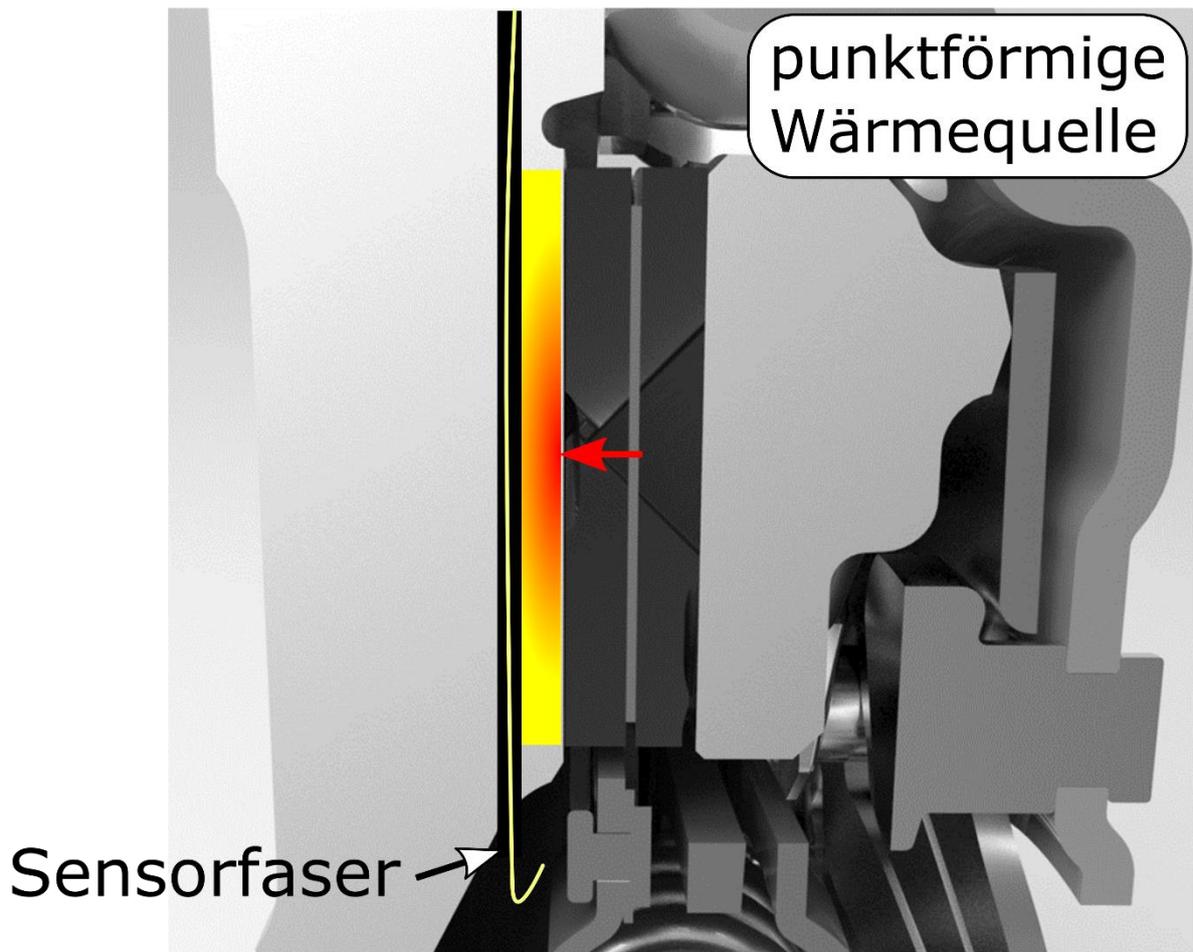


Abbildung 5.8 Messung mit Sensorfaser

- *Faseroptische Sensorik – Verteilt messendes Prinzip*

Die Temperaturmessung mittels verteilt messender faseroptischer Sensorik wird bereits in anderen Bereichen zur Forschung und industriell angewandt. Da dieses Prinzip von sich aus viele Einzelsensoren mitbringt, ist prinzipiell die räumlich hochauflösende Erfassung der Temperaturverteilung in einem Kupplungssystem möglich. Für die Einbringung der Sensorfaser müssten Durchgangsbohrungen gefertigt werden, damit die Faser vollständig durchgefädelt werden kann, was ausfolgendem Grund notwendig ist: Das eingebrachte Licht am Ende der Sensorfaser muss an der Reflektion gehindert werden. Dazu wird eine Terminierung am Faserende angebracht. Diese Terminierung ist bei konventionell erhältlichen Sensorfasern nur bis 70 °C einsetzbar, weshalb Sie nicht im metallischen Bauteil verbleiben kann. Als zweckmäßig und fertigbar werden Bohrungen mit möglichst kleinem Durchmesser parallel zur Wirkfläche angesehen, siehe Abbildung 5.8.

### 5.1.4 L – Lösungsauswahl

Aus den in den alternativen Lösungen beschriebenen Messtechniken, ist der Einsatz von Thermoelementen, Thermografie und die beiden faseroptischen Messtechniken prinzipiell denkbar. Zum Teil wurden die Alternativen schon im Fazit zu den Grundlagen und dem Stand der Forschung bewertet, siehe Abschnitt 2.5. Bewertet wurden der Erkenntnisgewinn gegenüber dem Aufwand für Messung und Auswertung. Die Messung mittels Thermoelementen und Thermographie-Kamera werden anhand des Fazits aus Abschnitt 2.5 beurteilt. Bei der faseroptischen Sensorik gibt es keine Literatur bezüglich des Einsatzes in einem Kupplungssystem, sodass hier anhand der bekannten Eigenschaften bewertet wird. Die Bewertung wird mit einer „+ / 0 / -“ Skala durchgeführt.

- *Thermoelement (eingebettet)*
  - + Etablierte Messtechnik im Kupplungsbereich
  - o Kosten für die Vielzahl von Thermoelementen sind als mittel einzustufen, die Kosten für die Auswerteeinheit sind gering
  - o Erfassung der Temperaturverteilung nur durch Vielzahl an Einzelsensoren
  - o Thermische Masse bei Mantelthermoelementen mit einem Außendurchmesser  $\leq 0,5$  mm klein
  - Beeinflussung des Erkenntnisgewinns durch eine Vielzahl von Bohrungen, welche den thermischen Haushalt der Anpressplatte verändern. Zusätzlich verstimmt das Einbringen von thermischen Massen durch die Thermoelemente den Wärmefluss im Bauteil
  - Änderung der mechanischen Eigenschaften des zu messenden Bauteils durch Bohrungen für Thermoelemente
  - Applikationsaufwand für die Vielzahl an Thermoelementen hoch
  
- *Infrarot-Mikroskopie*
  - + Etablierte Messtechnik im Kupplungsbereich
  - + Erfassung flächiger Temperaturverteilung
  - + Keine thermische Masse
  - o Beeinflussung des thermischen Haushalts durch optische Zugänge
  - Änderung der Reibpaarung im erfassten Bereich
  - Änderung der mechanischen Eigenschaften des zu messenden Bauteils durch Einbringung von optischen Zugängen
  - Applikationsaufwand für Einrichtung und Kalibrierung hoch
  - Kosten für Thermographie Kamera mit hoher Auflösung und schneller Bildwiederholungszahl sehr hoch

- *Faseroptische Sensorik – Punktförmig mit Faser-Bragg Gitter*
  - + Einzelsensoren in einer Sensorfaser angeordnet, wodurch keine fertigungsbedingte Streuung der Messwerte der Einzelsensoren einer Sensorfaser zu erwarten sind
  - + Sehr geringe thermische Masse
  - o Beeinflussung des thermischen Haushalts durch Bohrung
  - o Erfassung der Temperaturverteilung nur durch Vielzahl an Einzelsensoren möglich
  - o Applikationsaufwand mittel
  - Änderung der mechanischen Eigenschaften des zu messenden Bauteils durch Einbringung von Bohrungen
  - Üblicherweise werden nur 10 bis 13 Bragg Gitter in eine Sensorfaser geschrieben, sodass für eine räumlich hochauflösende Temperaturverteilungsmessung einige Sensorfasern benötigt werden
  - Kosten für einige Sensorfasern mit vielen Bragg Gittern sehr hoch
  
- *Faseroptische Sensorik – Verteilt messendes Prinzip*
  - + Alle Einzelsensoren in einer Sensorfaser realisiert, wodurch keine fertigungsbedingte Streuung der Messwerte der Einzelsensoren einer Sensorfaser zu erwarten sind
  - + Bei einem minimal einstellbaren Messpunkt Abstand von 1,25 mm können entlang einer 10 m langen Sensorfaser gleichzeitig 8.000 Einzelmesspunkte erfasst werden
  - + Sehr geringe thermische Masse
  - o Da für dieses Messprinzip eine unbearbeitete Glasfaser verwendet werden kann, sind die Kosten für die Sensorfaser gering. Jedoch sind die Kosten für die Auswerteeinheit hoch
  - o Beeinflussung des thermischen Haushalts durch Bohrung
  - o Erfassung der Temperaturverteilung nur durch Vielzahl an Einzelsensoren
  - o Applikationsaufwand mittel
  - Änderung der mechanischen Eigenschaften des zu messenden Bauteils durch Einbringung von Bohrungen

Als Ergebnis aus der Bewertung der einzelnen Alternativen scheint die Verwendung der faseroptischen Sensorik mit verteilt messendem Prinzip am geeignetsten. Diese Entscheidung wurde auch auf Basis des Portfolios zur Einordnung der Vorgehensweisen zur Temperaturmessung getroffen, siehe Abbildung 2.84. Das

größte Potential zur Erreichung des angestrebten Bereichs im Portfolio mit hohem Erkenntnisgewinn zeigt die verteilt messende faseroptische Sensorik.

### 5.1.5 T – Tragweitenanalyse

Als Chance bei der Verwendung der verteilt messenden faseroptischen Sensorik sticht die sehr hohe Messpunktdichte und die geringen Kosten für die Sensorfaser heraus. Die einmaligen Anschaffungskosten sind zwar hoch, jedoch sind die laufenden Kosten für den täglichen Einsatz gering, besonders in Relation mit dem erwarteten Erkenntnisgewinn.

Als Risiko muss gesehen werden, dass es keinerlei Erfahrungswerte zur Verwendung der faseroptischen Messtechnik im Kupplungsbereich gibt. Laut Vertrieb der Messtechnik ist die faseroptische Messtechnik vibrationsanfällig, was für die Messung in einem Kupplungssystem als kritisch angesehen werden muss.

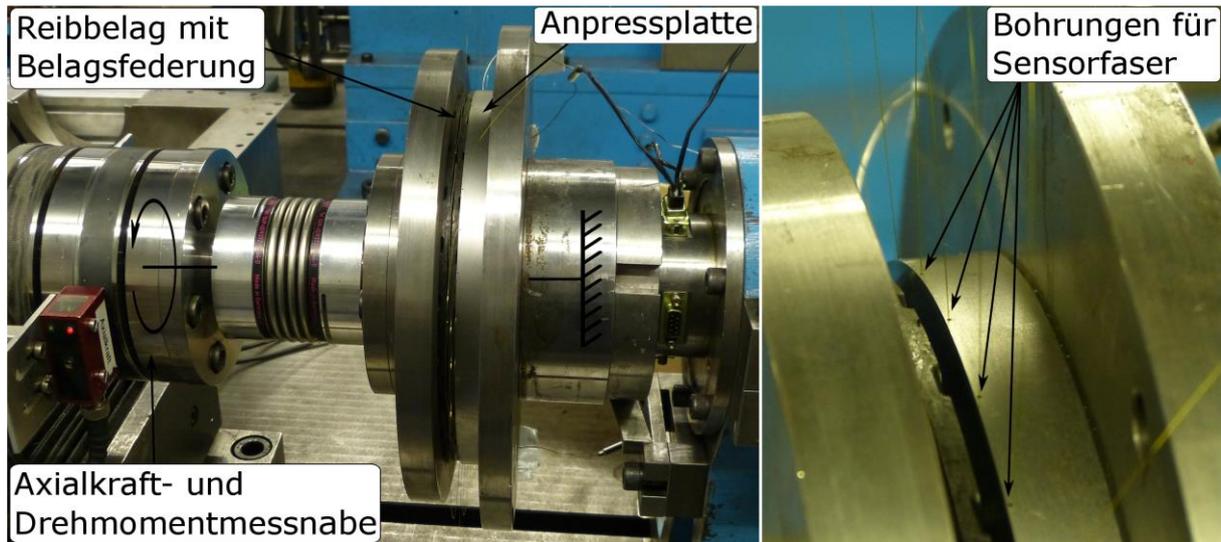
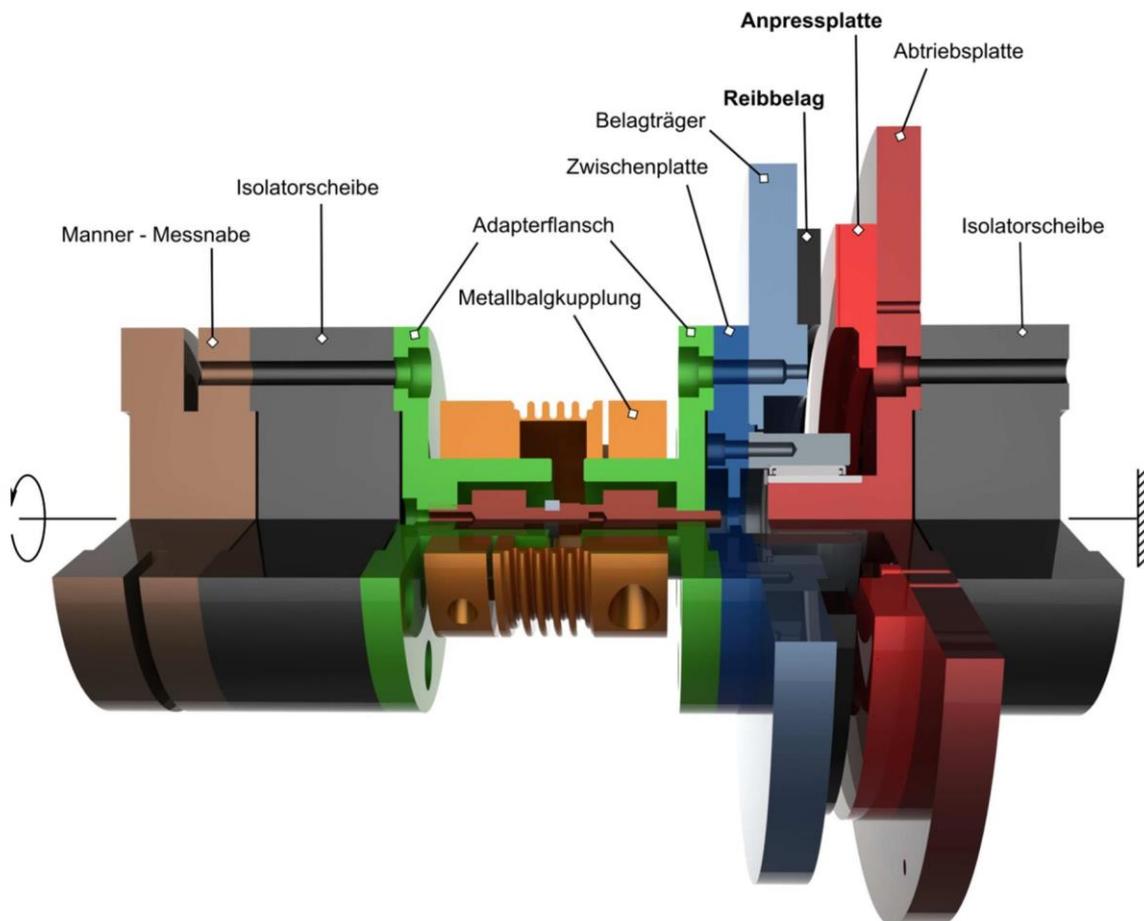
### 5.1.6 E - Entscheiden und umsetzen

Ausgehend von der Lösungsauswahl und der Tragweitenanalyse ergibt sich die Entscheidung, dass die verteilt messende faseroptische Sensorik die geeignetste Messtechnik ist, um die formulierte Zielsetzung zu erreichen. Im Rahmen seiner Masterarbeit hat GOMMERINGER<sup>239</sup> eine Machbarkeitsstudie zur Einsetzbarkeit der faseroptischen Messtechnik bei Prüfstandsuntersuchungen durchgeführt. Im Folgenden werden die Herangehensweise, die Durchführung und die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie beschrieben.

Als Testumgebung wurde der Trocken-Reib-Prüfstand (TRP) und der Prüfkopf verwendet, welche in Abschnitt 4.1 beschrieben wurden. Für die Machbarkeitsstudie wird der Prüfkopf wie in Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 an die Zielsetzung der Machbarkeitsstudie angepasst. Der Aufbau bildet lediglich eine Reibfläche eines Kupplungssystems ab, was vorteilhaft für die Zugänglichkeit der faseroptischen Messtechnik ist. Die Sensorfaser ist in der mechanisch fixierten Anpressplatte verlegt. Der Reibbelag, angefedert mittels Belagsfederung, kann auf eine gewünschte Drehzahl beschleunigt werden. Der Reibbelag hat die Abmessungen 134 mm Innen- und 200 mm Außendurchmesser. Die Reibpaarung wurde vor dem Versuch eingelaufen.

---

<sup>239</sup> vgl. Gommeringer, 2014, betreute Abschlussarbeit

Abbildung 5.9 Prüfkopf der Machbarkeitsstudie<sup>240</sup>Abbildung 5.10 Aufbau Prüfkopf für Machbarkeitsstudie<sup>241</sup>

<sup>240</sup> Albers et al., 2017a, S. 5

<sup>241</sup> Gommeringer, 2014, S. 22, betreute Abschlussarbeit

In Abbildung 5.11 ist ein Schnitt durch den Prüfkopf dargestellt, welcher eine Bohrung für die Sensorfaser zeigt. Die Anpressplatte wurde nach dem Vorbild von Abbildung 5.8 gestaltet mit 32 radial verlaufenden Bohrungen mit 0,5 mm Durchmesser, siehe Abbildung 5.12. Diese Bohrungen wurden erodiert, da eine normale Bohrung mit einem Durchmesser von 0,5 mm mit einer Länge von 35,5 mm nicht fertigbar ist. Zusätzlicher Vorteil des Senkerodierens ist eine sehr gute Oberflächengüte der Bohrungsflächen, was sich vorteilhaft auf die Reibung zwischen Sensorfaser und Bohrung auswirkt. Vereinfacht ausgedrückt wird bei der Temperaturmessung die Ausdehnung der Sensorfaser gemessen und dann mittels bekanntem thermischem Ausdehnungskoeffizienten die Temperaturänderung berechnet. Dies bedeutet, dass zur Temperaturmessung möglichst keine Reibung zwischen Sensorfaser und Bohrung stattfinden sollte. In 28 der 32 Bohrungen wurde die Sensorfaser eingefädelt, in die übrigen 4 Bohrungen wurden Thermolemente eingebracht. Diese werden nachfolgend als Referenztemperaturen zum Vergleich der erfassten Temperaturen der faseroptischen Sensorik verwendet. Die Sensorfaser wurde so verlegt, dass sehr kleine Biegeradien vermieden werden, um eine möglichst geringe Reibung zwischen Faser und Bohrung zu erreichen. Die gewählte Faserverlegung und die Nummerierung der Messstrecken ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

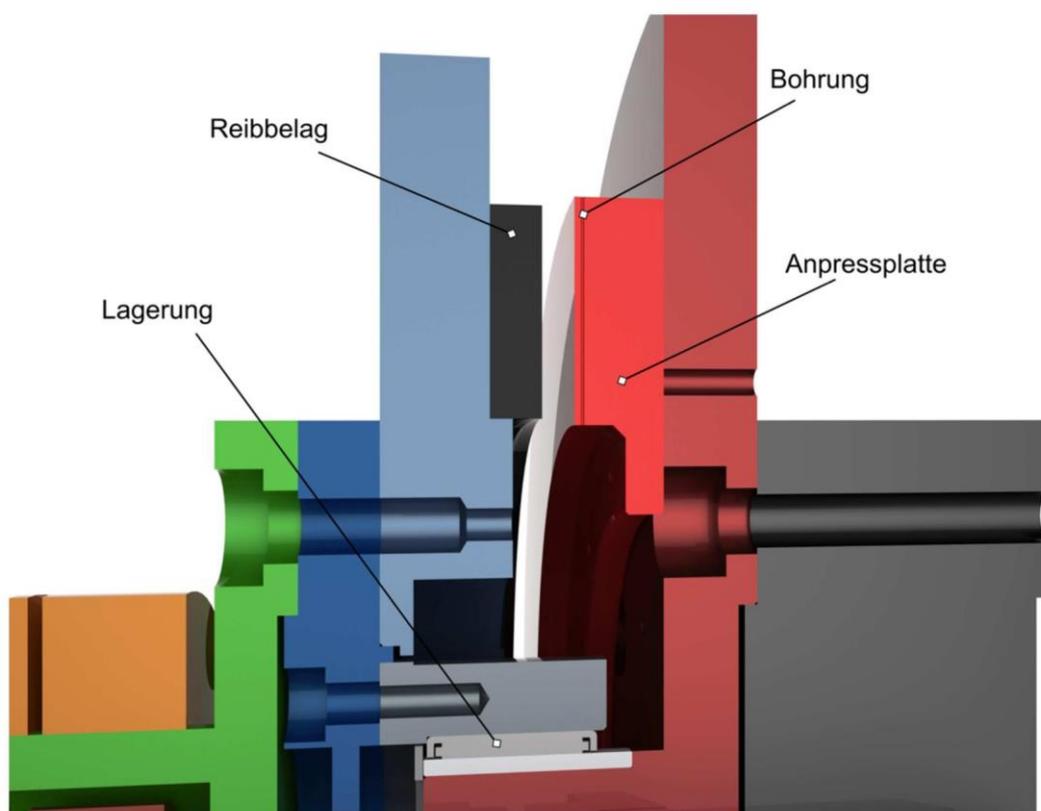
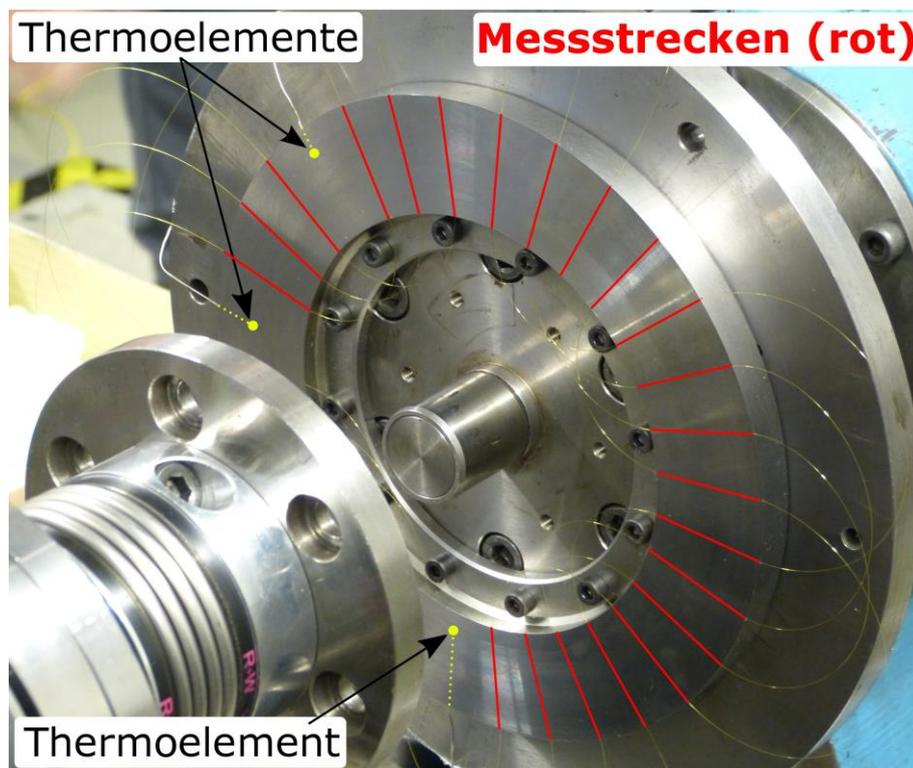
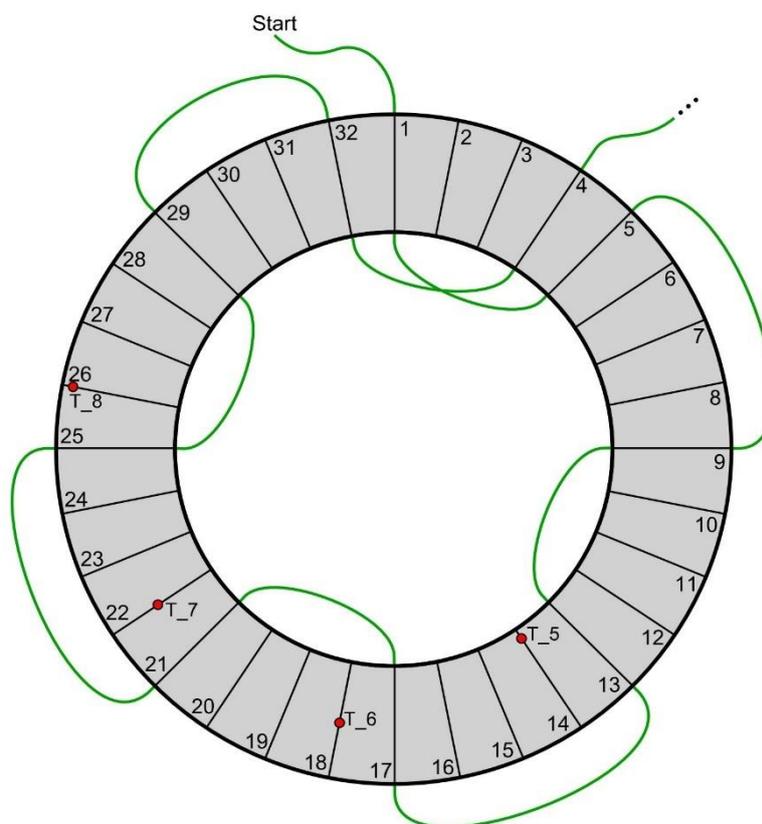


Abbildung 5.11: Detailansicht Bohrung für Sensorfaser<sup>242</sup>

<sup>242</sup> Albers et al., 2016a, S. 478. Ins Deutsche übersetzt

Abbildung 5.12: Anpressplatte mit 32 Bohrungen im Aufbau<sup>243</sup>Abbildung 5.13: Verlegung der Sensorfaser und Nummerierung der Bohrungen<sup>244</sup>

<sup>243</sup> Kniel et al., 2015, S. 1006. Ins Deutsche übersetzt.

<sup>244</sup> Gommeringer, 2014, S. 25, betreute Abschlussarbeit

Alle Versuche der Machbarkeitsstudie wurden als Bremsung ausgeführt, wobei die Anpressplatte die stillstehende Seite war. In Abbildung 5.14 ist der Zeitschrieb einer Bremsung dargestellt. Bei geöffneter Kupplung wird der Reibbelag auf Zieldrehzahl beschleunigt, im Zeitraum von 0,5 s bis 1,5 s. Anschließend wird die Anpresskraft geregelt vorgegeben (bei  $t = 3,0$  s), mit welcher einhergehend sich ein Drehmoment aufbaut und der Reibbelag bis auf Drehzahl 0 abgebremst wird (bei  $t \approx 9,3$  s). Gemessen werden dabei die Anpresskraft, das Drehmoment, die Drehzahl des Reibbelags und die Temperaturen der Thermoelemente und der faseroptischen Sensorik. Der Bereich in dem die Größen Startdrehzahl, Flächenpressung und Massenträgheit in der Machbarkeitsstudie variiert wurden, ist in Tabelle 2 beschrieben.

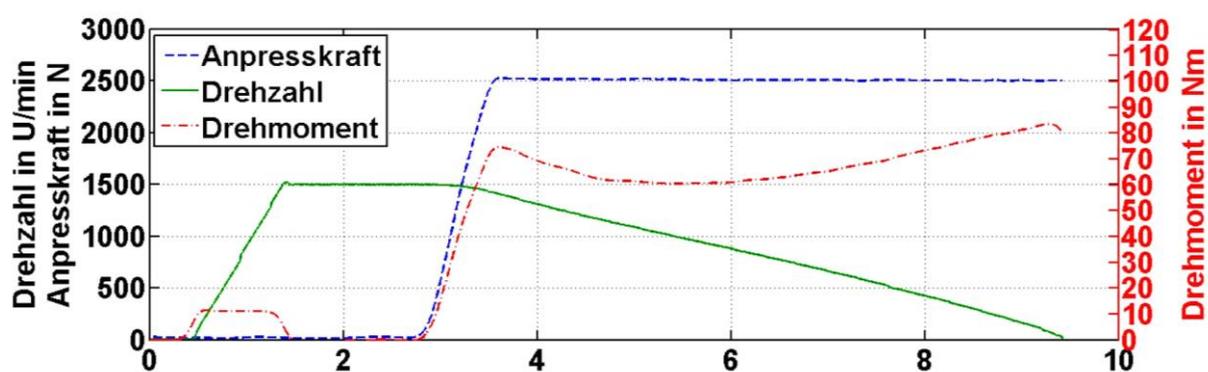


Abbildung 5.14: Exemplarischer Zeitschrieb einer Bremsung<sup>245</sup>

Tabelle 2: Variationsbereich bei Machbarkeitsstudie

	Variationsbereich
<b>Startdrehzahl</b> in $U/min$	500 bis 2.000
<b>Flächenpressung</b> in $N/mm^2$	0,09 bis 0,2
<b>Massenträgheit</b> in $kgm^2$	0,3 bis 3

Von der Auswertereinheit, dem ODiSI B, werden die Rohdaten zuerst im .odb-Format gespeichert. In einem postprocessing Schritt werden die Rohdaten in Temperaturwerte umgerechnet und in einer Textdatei (.txt) abgespeichert. Als nächster Schritt wird die Textdatei in Matlab eingelesen und die Messstrecken aus dem gesamten Messschrieb extrahiert. Letztlich hat man somit für jede Messstrecke eine Matrix, wobei die Spalten für die Messpunkte und die Zeilen für die Zeitschritte stehen.

<sup>245</sup> Albers et al., 2015a, S. 68

In Abbildung 5.15 ist, aufgrund der Übersichtlichkeit, nur jede zweite erfasste Temperatur der faseroptischen Sensorik als Raute eingezeichnet für eine Messstrecke zu einem Zeitpunkt. Aus den Einzelmesspunkten kann für den dargestellten Fall die Temperaturverteilung über den Radius gut dargestellt werden. Verwendet wird der räumlich hochauflösendste Modus, wobei alle 0,64 mm entlang der Sensorfaser ein Messpunkt aufgezeichnet wird. Als Sensorfaser wird eine 10 m lange Polyimid beschichtete Faser verwendet. Die erfasste Messstrecke ist 33 mm lang, sodass in allen 28 Messstrecken zusammen über 1.400 Messpunkte erfasst werden. Alle Messpunkte können gleichzeitig mit bis zu 23,8 Hz abgetastet werden. Der zeitliche Verlauf der Temperaturverteilung zweier Messstrecken für eine Bremsung ist in Abbildung 5.16 dargestellt.

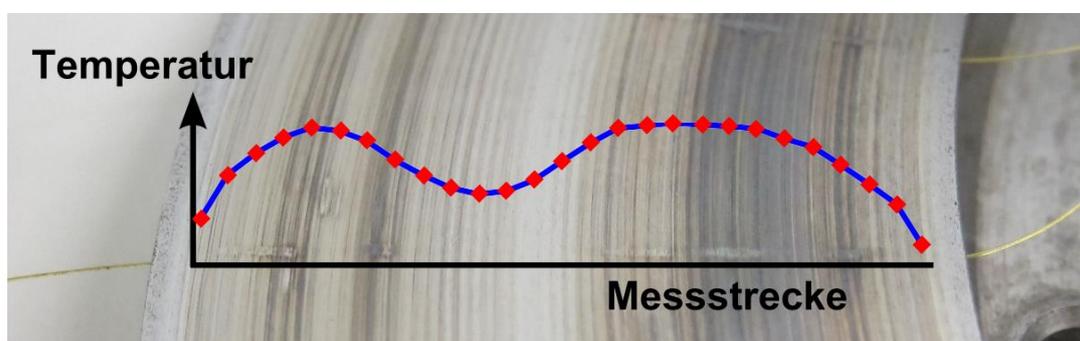


Abbildung 5.15: Messdaten einer Messstrecke zu einem Zeitpunkt<sup>246</sup>

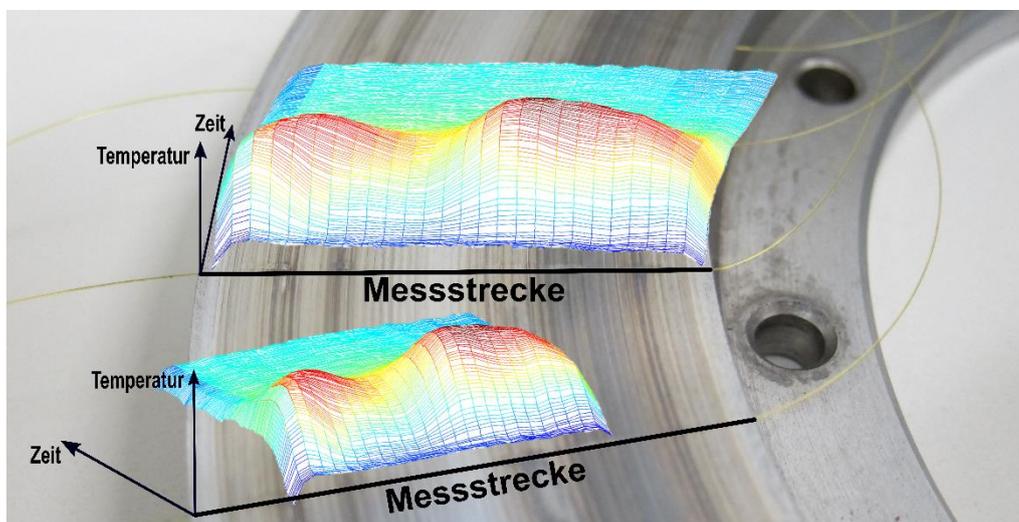


Abbildung 5.16: Zeitlicher Verlauf einer Bremsung für zwei Messstrecken<sup>247</sup>

Die Erfassung der Temperaturen mit der faseroptischen Sensorik war bei den experimentellen Untersuchungen problemlos möglich. Wie aus Abbildung 5.17 zu schließen ist, in der alle 28 Messstrecken über den Radius für einen Zeitpunkt dargestellt sind, ist das Verhalten aller Messstrecken sehr ähnlich. Was jedoch auffällt

<sup>246</sup> Kniel et al., 2015, S. 1007. Ins Deutsche übersetzt

<sup>247</sup> Kniel et al., 2015, S. 1005. Ins Deutsche übersetzt

ist, dass die Bohrungen Nummer 5 bis 7 die höchsten und Bohrungen 19 bis 23 die tiefsten Temperaturen zeigen. Diese Beobachtung kann durch einen Planschlag der Anpressplatte und eine geringfügige Änderung des Abstandes der Bohrungen zur Reibfläche erklärt werden. Beide Fehler variieren nicht willkürlich, sondern abhängig von der Winkelposition. Die Vermessung ergab, dass bei den Bohrungen 5 bis 7 die Anpressplatte ~ 0,025 mm dicker ist als im Bereich der Bohrungen 19 bis 23.

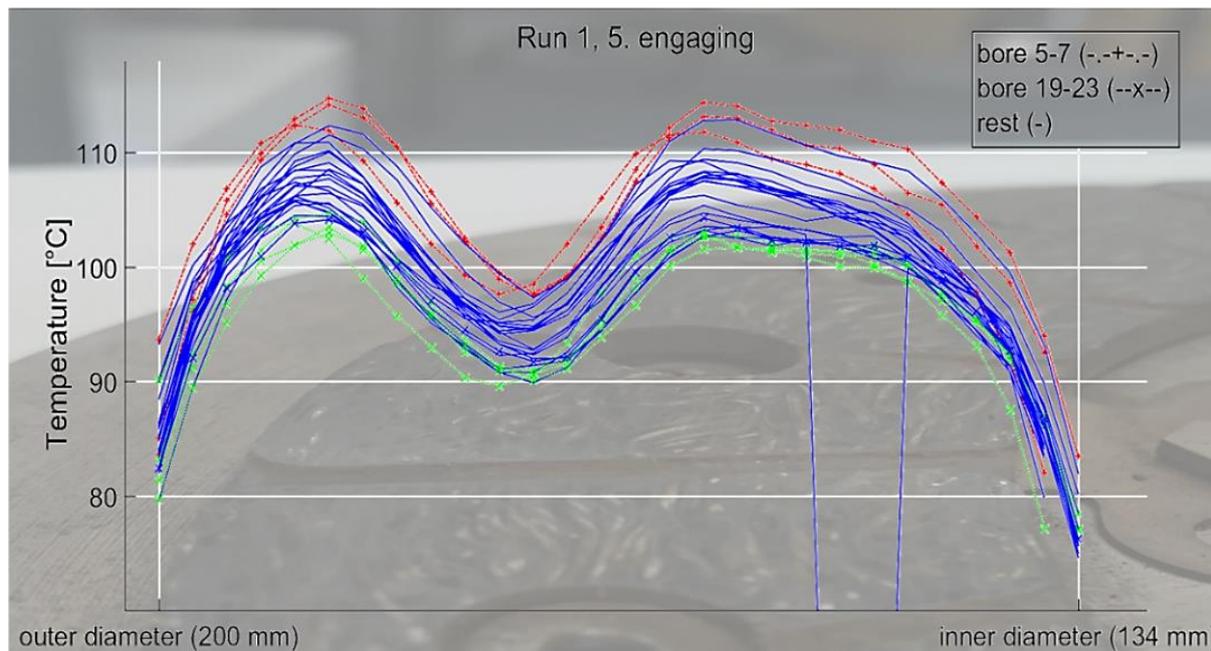


Abbildung 5.17: Alle 28 erfassten Messstrecken zu einem Zeitpunkt<sup>248</sup>

Nachdem wie vorangehend beschrieben die Erfassung der Temperaturverteilung mit der verteilt messenden faseroptischen Sensorik möglich ist, sollen nachfolgend die erfassten Temperaturen verifiziert werden. Dazu werden die Temperaturen der Sensorfaser mit den Thermoelementtemperaturen für die in Tabelle 3 aufgelisteten Versuchsstufen 1, 4 und 5 verglichen.

Tabelle 3: Verwendete Versuche für den Temperaturvergleich

Versuch	Drehzahl in $U/min$	Flächenpressung in $N/mm^2$	Massenträgheit in $kgm^2$	Reibenergie in $kJ$	Reibleistung in $kW$
1	750	0,14	3	9,25	2,91
4	1500	0,14	3	37,01	5,81
5	2000	0,14	3	65,80	7,75
6	1000	0,2	3	16,45	3,88

<sup>248</sup> Albers et al., 2016a, S. 473

Für den Vergleich wird der Messpunkt der Sensorfaser verwendet, welcher sich auf dem gleichen Radius befindet wie die Thermoelementspitze in der nächstgelegenen Bohrung. In Abbildung 5.18 ist für Versuch 1 der Vergleich mit Thermoelement T8 dargestellt, in Abbildung 5.19 für Versuch 5 mit Thermoelement T5. Die Verläufe der Temperaturen stimmen sehr gut überein, bis auf die wiederkehrende Abweichung der Spitzentemperatur bei einer Bremsung. In Abbildung 5.19 ist außerdem ersichtlich, dass die Differenz zwischen Sensorfaser und Thermoelement nur bei schneller Änderung der Temperatur auftritt. Ändert sich die Temperatur langsamer, wie im Bereich ab Sekunde 5 in Abbildung 5.19 dargestellt, stimmen die beiden Temperaturen exakt überein. Eine Vermutung für die Differenz bei der Spitzentemperatur ist die deutlich geringere thermische Masse der Sensorfaser im Vergleich zum verwendeten Mantelthermoelement mit 0,5 mm Außendurchmesser.

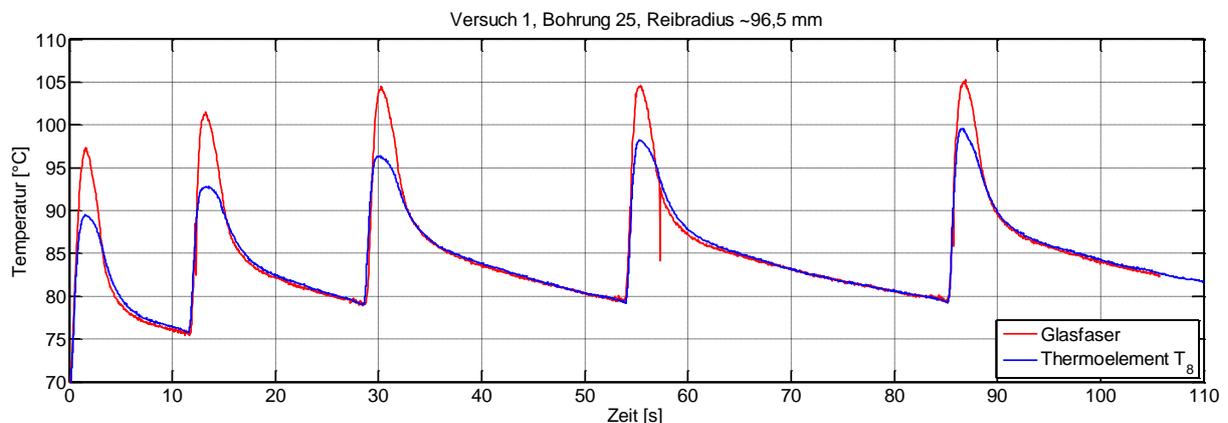


Abbildung 5.18: Vergleich Sensorfaser und Thermoelement bei Versuch 1<sup>249</sup>

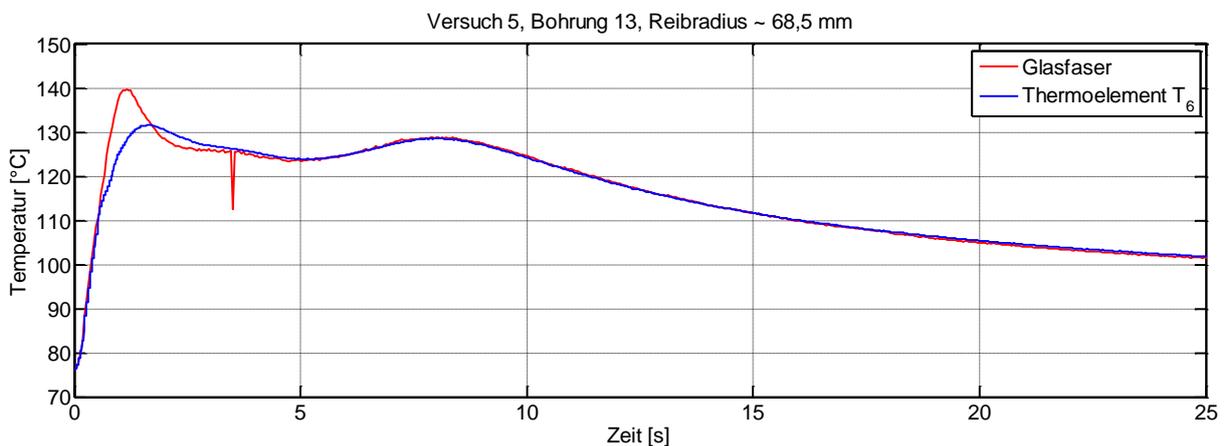


Abbildung 5.19: Vergleich Sensorfaser und Thermoelement bei Versuch 5<sup>250</sup>

<sup>249</sup> Kniel et al., 2015, S. 1007

<sup>250</sup> Kniel et al., 2015, S. 1007

Die Darstellung der Temperaturverteilung von Messstrecke 1 von allen Betätigungen für Versuch 1 zeigt, dass die faseroptische Sensorik über 5 Bremsungen hinweg funktioniert. Zusätzlich ist zu sehen, dass die Temperaturverteilung über alle 5 Betätigungen hinweg gleichbleibt. Abbildung 5.21 zeigt eine ausgewählte Betätigung von den in Tabelle 3 aufgelisteten vier Versuchen. Bei allen Versuchen war die Temperaturverteilungsmessung mit der faseroptischen Sensorik möglich.

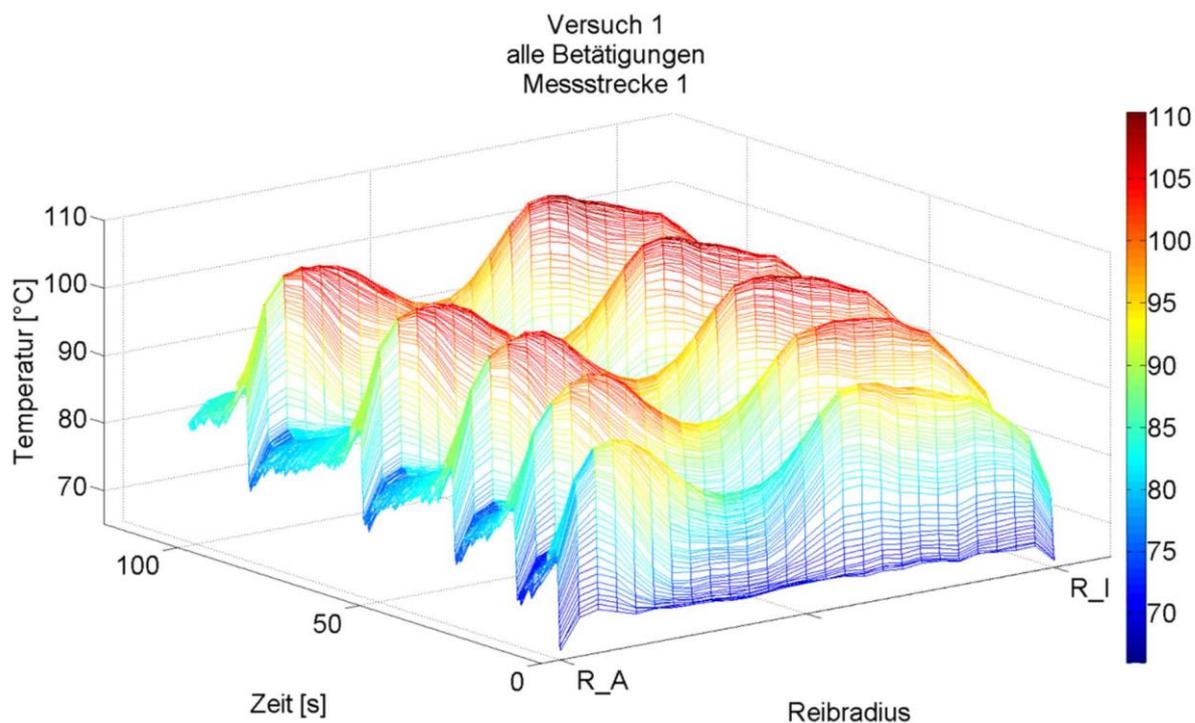


Abbildung 5.20: Alle Betätigungen von Versuch 1<sup>251</sup>

<sup>251</sup> Gommeringer, 2014, S. 39, betreute Abschlussarbeit

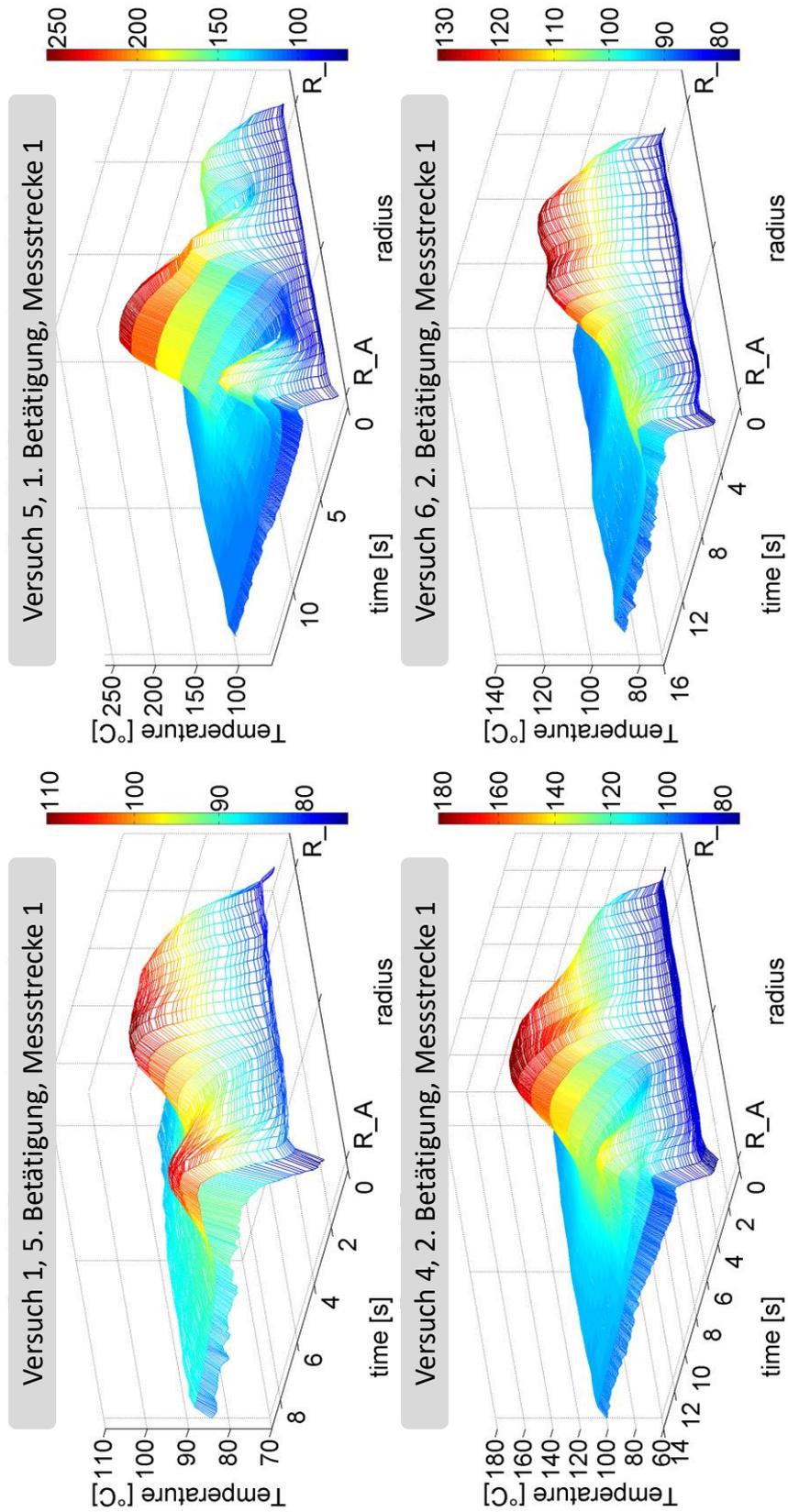


Abbildung 5.21: 3D-Diagramme einer Betätigung für die Versuche 1, 4, 5 und 6<sup>252</sup>

<sup>252</sup> Kniel et al., 2015, S. 1009. Zum Teil ins Deutsche übersetzt

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die ausgewählte verteilt messende faseroptische Sensorik in der durchgeführten Machbarkeitsstudie ihre Eignung für die Erfassung der Temperaturverteilung bei Prüfstandsuntersuchungen von Kupplungssystemen gezeigt hat.

### **5.1.7 N - Nachbereiten und Lernen**

Die Nachbereitung des SPALTEN-Prozesses ist mit der Dokumentation des Prozesses und den Ergebnissen abgeschlossen. Der Schritt „Lernen“ lief zum einen kontinuierlich während des Problemlösungszykluses, zum anderen wird im nachfolgenden Abschnitt 5.2 die Machbarkeitsstudie im Detail analysiert. Es wird sowohl eine Fehlerbetrachtung hinsichtlich des erfassten Temperaturwertes mit der faseroptischen Messtechnik im Vergleich zu Thermoelementen durchgeführt, als auch Optimierungspotentiale bei der Einbringung der Messtechnik in das Kupplungssystem herausgearbeitet.

## **5.2 Weiterentwicklung faseroptische Messtechnik**

Nachdem die Messtechnikauswahl erfolgreich abgeschlossen werden konnte, hat EISELE<sup>253</sup> im Rahmen seiner Masterarbeit eine Fehlerbetrachtung zur verteilt messenden faseroptischen Messtechnik durchgeführt. Hierbei liegt ein Schwerpunkt auf der Analyse der Temperaturmessung der Machbarkeitsstudie, um daraus Verbesserungsvorschläge abzuleiten. Zum anderen werden anhand eines akademischen Beispiels, zu verstehen als möglichst einfache Abbildung der thermischen Vorgänge eines Kupplungssystems, die Einflussgrößen auf Messung und Korrektheit der Messergebnisse bewertet. Ziel ist es, die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messtechnik zu begutachten.

### **5.2.1 Eigenschaften und Kenndaten des Messgerätes**

Die Firma Luna, gibt im Datenblatt des ODiSI B für die verwendete HD-Sensorfaser bei 23,8 Hz Abtastfrequenz folgende Kenndaten an, siehe auch Abbildung 5.22:

- Temperaturauflösung:  $< 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Wiederholbarkeit:  $\pm 0,06 \%$

---

<sup>253</sup> Eisele, 2014, betreute Abschlussarbeit

PARAMETER	SPECIFICATION								UNITS
	100 Hz		250 Hz		23.8 Hz		50 Hz		
Mode of Operation <sup>1</sup>	HD	HS	HD	HS	HD	HS	HD	HS	
<b>Sensor Configurations</b>									
Maximum Sensor Length	10	5	2	-	10	5	20	-	m
Gage Length	5.2	5.2	5.2	-	1.3	1.3	5.2	-	mm
Gage Pitch <sup>2</sup>	2.6	2.6	2.6	-	0.65	0.65	2.6	-	mm
<b>Measurement Performance - Strain</b>									
Range <sup>3</sup>	±10000	±1400	±10000	-	±10000	±7500	±10000	-	µε
Resolution	< 1	< 1	< 1	-	< 1	< 1	< 1	-	µε
Accuracy <sup>4</sup>	±30	±15	±30	-	±25	±35	±25	-	µε
Repeatability at zero strain <sup>5</sup>	< ±5	< ±5	< ±10	-	< ±20	< ±10	< ±5	-	µε
Repeatability across full strain range <sup>6</sup>	±0.15	±1.0	±0.15	-	±0.55	±0.35	±0.10	-	%
Dynamic Loading Rate HD (Based on 2m sensor length at ±1000µε) <sup>7</sup>	1.8	-	4	-	0.4	-	0.8	-	Hz
Dynamic Loading Rate HS (based on 2m sensor length @ ± 600µε) <sup>8</sup>	-	> 10	-	-	-	> 10	-	-	Hz
<b>Measurement Performance - Temperature</b>									
Maximum Temperature <sup>9</sup> (Based on standard sensor. Custom sensors available upon request.)	220	200	220	-	220	200	220	-	°C
Minimum Temperature (Based on standard sensor. Custom sensors available upon request.)	-40	-40	-40	-	-40	-40	-40	-	°C
Resolution	< 0.1	-	< 0.1	-	< 0.1	-	< 0.1	-	°C
Accuracy (consult factory)	-	-	-	-	-	-	-	-	°C
Repeatability	±0.01	-	±0.01	-	±0.06	-	±0.01	-	%
<b>Data Acquisition / Processing Rate</b>									
Data Acquisition Rate <sup>10</sup>	100	100	250	-	23.8	23.8	50	-	Hz
Data Processing Rate <sup>11</sup>	5	100	22	-	1.25	23.8	2.5	-	Hz

Abbildung 5.22: Spezifikation des ODiSI-B aus Datenblatt<sup>254</sup>

## 5.2.2 Analyse der Anpressplatte aus der Machbarkeitsstudie

Bei der Betrachtung des Tragbildes der gelaufenen Anpressplatte ist eine Verfärbung der Reibfläche über den Messbohrungen auffällig, siehe Abbildung 5.23.

Abbildung 5.23: Tragbild der Anpressplatte nach der Machbarkeitsstudie<sup>255</sup>

<sup>254</sup> Luna Inc., 2016

<sup>255</sup> Entnommen aus Albers et al., 2015a, S. 67

Nachfolgend wird untersucht, ob das Einbringen der Bohrungen das Verhalten der Anpressplatte beeinflusst hat. Ziel ist es letztlich die Messbohrungen so zu gestalten, dass die Reibfläche nicht verändert wird. Um den Grund der Verfärbungen zu identifizieren, wurde die Oberfläche mit einem Konfokalmikroskop<sup>256</sup> vermessen. In Abbildung 5.24 ist der Messschrieb der Reibfläche über einer Bohrung dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass sich eine Aufwölbung mit einer Höhe von ca.  $1 \mu\text{m}$  bildet, welche sich über der Bohrung befindet.

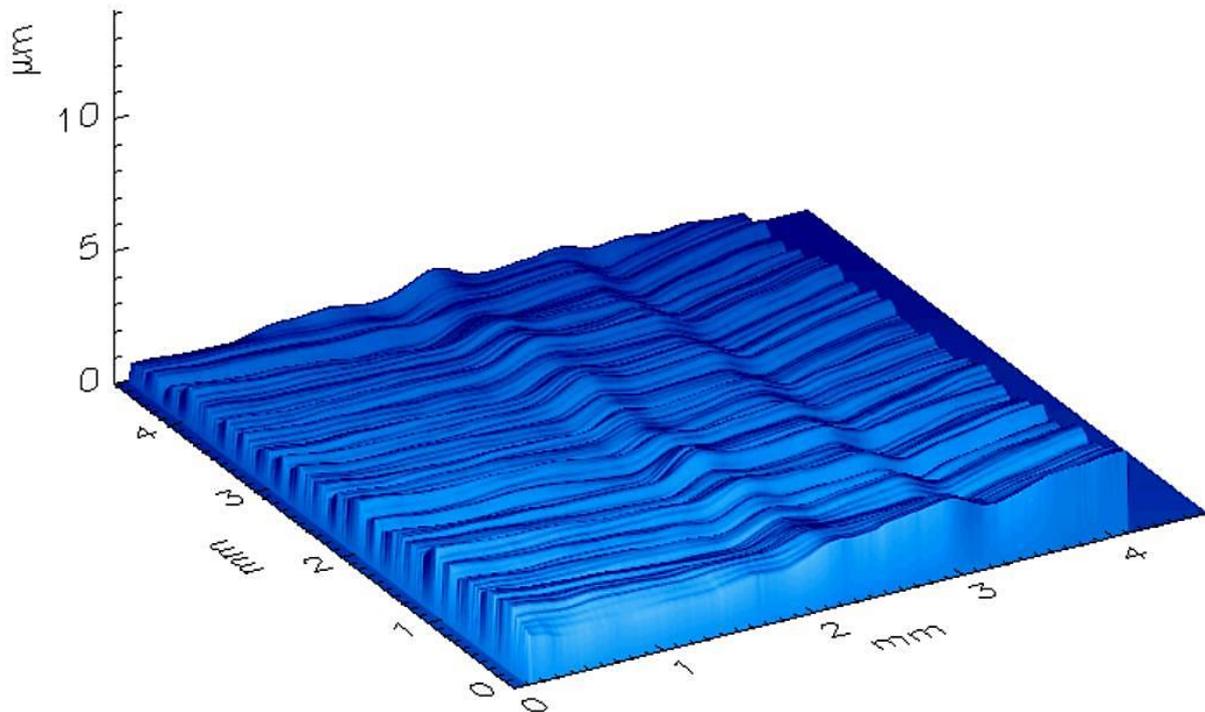


Abbildung 5.24: Höhenmessung der Reibfläche über einer Messbohrung<sup>257</sup>

Es wurde mit der folgenden Berechnung ausgeschlossen, dass sich die Wölbung wegen der Einbringung der Erodierbohrung ausgebildet hat. In Abbildung 5.25 sind dazu die Ergebnisse der Berechnung des Spannungszustandes rund um die Bohrung bei einer Temperaturdifferenz von  $175 \text{ K}$  dargestellt. Die entstehende Verformung ist in gegensätzlicher Richtung zu der gemessenen Wölbung.

<sup>256</sup> Borlinghaus, 2016

<sup>257</sup> Albers et al., 2016a, S. 474

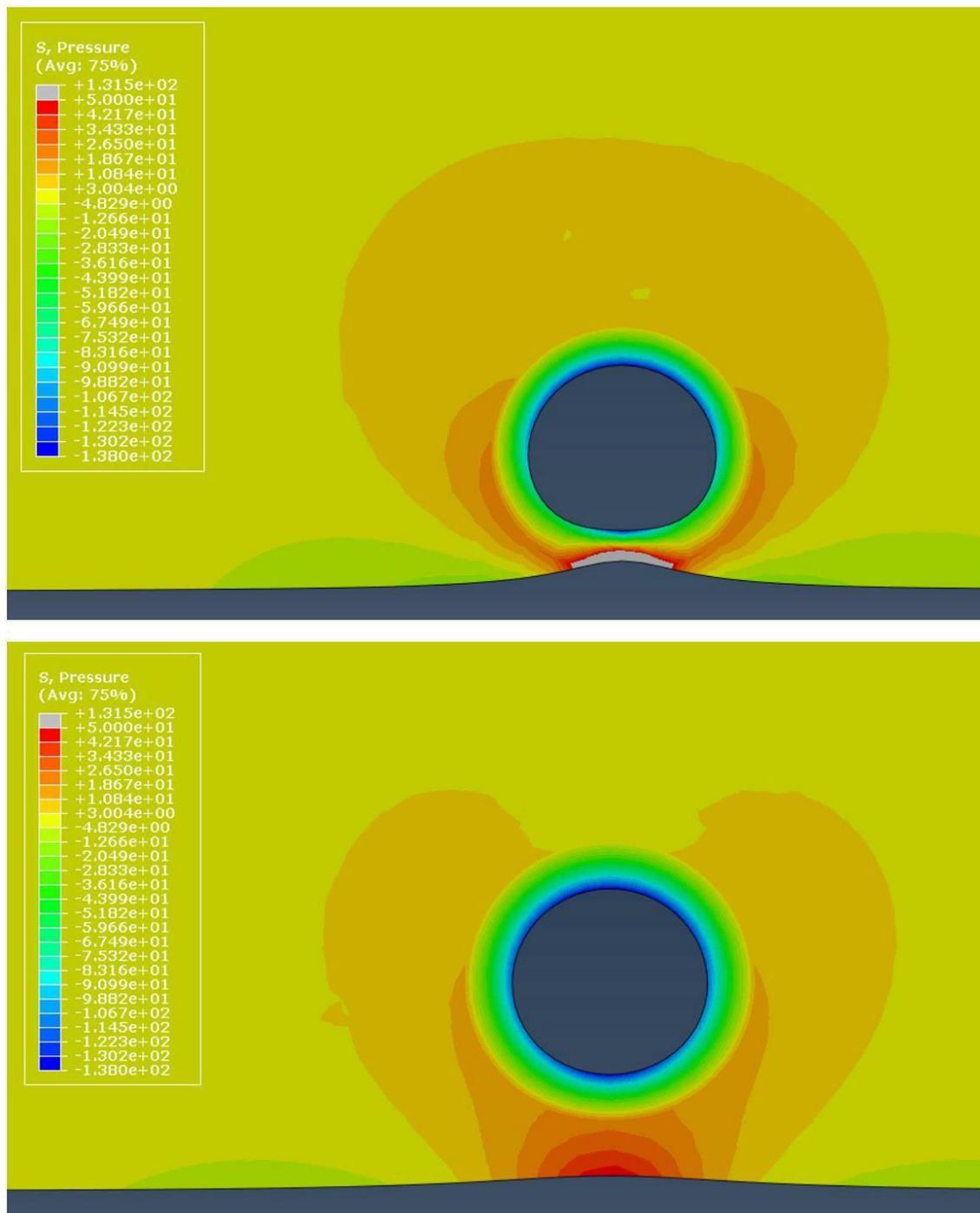


Abbildung 5.25: Berechnete Spannungen an einer erodierten Bohrung. Oben mit 0,1mm Abstand zu Bauteilrand, unten mit 0,3 mm Abstand<sup>258</sup>

Auffällig bei Abbildung 5.24 ist, dass die Wölbung normal zu den Drehriefen ausgerichtet ist. Daraus resultiert der Erklärungsansatz, dass die Bearbeitungsreihenfolge die Ursache für die Wölbung sein könnte. Bei der in der Machbarkeitsstudie verwendeten Anpressplatte wurde zuerst das Halbzeug hergestellt, dann die Messbohrungen erodiert und danach die Reibfläche bis zu einer

<sup>258</sup> Eisele, 2014, S. 38, betreute Abschlussarbeit

definierten Entfernung zu den Messbohrungen abgedreht. Beim Schneidvorgang übt die Schneide des Drehmeißels punktuell eine hohe Pressung senkrecht auf das Bauteil aus. Die Steifigkeit des Bauteils ist direkt über einer Bohrung jedoch reduziert im Vergleich zu den Bereichen ohne Bohrung, was zu einer reduzierten Pressung zwischen Drehmeißel und Bauteiloberfläche über der Bohrung führt. Somit wird über der Bohrung weniger Material abgetragen, was zu der erfassten Wölbung über der Bohrung passen würde.

Um dies zu bestätigen wurden einfache Probekörper mit unterschiedlichen Bearbeitungsschritten angefertigt und vermessen. Zum einen wurden Probekörper vermessen, bei denen keine mechanische Nachbearbeitung nach dem Erodierprozess mehr vorgenommen wurde. An diesem Probekörper konnte bei Raumtemperatur keine Wölbung der Oberfläche gefunden werden. Bei einem weiteren Probekörper wurde nach dem Erodierprozess die Oberfläche abgefräst. Durch den flächig abtragenden Schneidprozess beim Fräsen sind keine Wölbungen auf der Oberfläche entstanden. Damit gilt als bewiesen, dass die Wölbung auf der Reibfläche der Anpressplatte aus der Machbarkeitsstudie durch den nachträglichen Drehprozess entstanden sind. Daher ist es wichtig für die weitere Anwendung der Temperaturverteilungsmessung das Erodieren der Messbohrungen möglichst als letzten Bearbeitungsschritt durchzuführen.

### 5.2.3 Bewertung der Einflussgrößen auf die Temperaturmessung

Um die Zuverlässigkeit der Messergebnisse bewerten zu können, wurden folgende Einflussgrößen identifiziert, welche anhand von Berechnungen und experimentellen Untersuchungen beurteilt werden sollen. Dabei soll auch auf das Phänomen eingegangen werden, dass die Sensorfaser während der Aufheizphasen mit großer Temperaturänderung immer eine höhere Temperatur aufweist als das Thermoelement, siehe Abbildung 5.18. Die zu untersuchenden Einflussgrößen sind:

- Einflussgröße Faserverlegung
- Einflussgrößen auf das Messobjekt
  - Abstand der Bohrung zur Bauteiloberfläche
  - Bohrungsform
- Einflussgrößen auf die Messgüte
  - Wärmeleitmedium in der Bohrung
  - Bohrungsform
  - Faserfixierung
  - Schwingungseinfluss
  - Biegeradius

### 5.2.3.1 Einflussgröße Faserverlegung

Die Faserverlegung muss aufgrund des Messprinzips der verteilt messenden faseroptischen Sensorik analysiert werden. Vereinfacht ausgedrückt wird bei der Temperaturmessung die Ausdehnung der Sensorfaser gemessen und dann mittels bekanntem thermischem Ausdehnungskoeffizienten die Temperaturänderung berechnet. Dies bedeutet, dass zur Temperaturmessung möglichst keine Reibung zwischen Sensorfaser und Bohrung stattfinden sollte. Ein Kontakt zwischen Sensorfaser und Bauteil ist jedoch nicht zu vermeiden. Mögliche Kontaktbedingungen zwischen Sensorfaser und Bauteil sind in Abbildung 5.26 in Abhängigkeit der Art und Weise der Faserverlegung dargestellt. Die oberste Abbildung weist 2 Punktkontakte und einen Linienkontakt auf, wie Sie bei spiralförmiger Verlegung der Faser mit kleinen Biegeradien entsteht. Der mittleren Abbildung liegt ebenfalls eine spiralförmige Verlegung zugrunde, diesmal aber mit größeren Biegeradien, wodurch sich nur ein Linienkontakt einstellt. Wie in Abbildung 5.13 gezeigt, wurde die Sensorfaser bei der Machbarkeitsstudie mäanderförmig verlegt. Die sich daraus einstellende Kontaktbedingung ist in Abbildung 5.26 in der untersten Abbildung dargestellt.

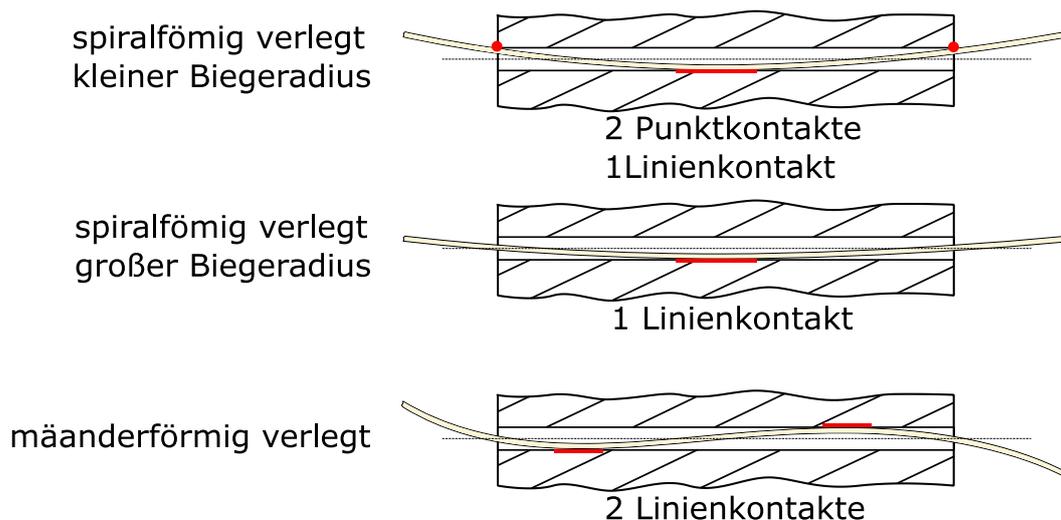


Abbildung 5.26: Mögliche Kontaktbedingungen zwischen Sensorfaser und Bauteil<sup>259</sup>

Wie vorrangig beschrieben, sollte sich die Sensorfaser möglichst reibungsfrei ausdehnen und zusammenziehen können, da bei einer Behinderung dieses Vorgangs der Messwert verfälscht werden würde. Deshalb sind die beiden Punktkontakte der obersten Darstellung aus Abbildung 5.26 negativ zu bewerten, da es hier lokal zu höheren Pressungen kommt als bei den Linienkontakten. Zusätzlich könnten noch vorhandene Grate oder ähnliches zu Eingrabungen in die Beschichtung der Sensorfaser kommen und so die Dehnung stark behindert werden. Die mäanderförmige Verlegung bietet im Vergleich zu der spiralförmigen Verlegung den

<sup>259</sup> Eisele, 2014, S. 31, betreute Abschlussarbeit. Beschreibung ergänzt.

Vorteil engere Biegeradien realisieren zu können, ohne dass es zu Punktkontakten an den Bohrungsenden kommt.

Weiterhin soll abgeschätzt werden, welchen Einfluss die Kontakte zwischen Sensorfaser und Bohrung auf die Temperaturmessung haben. Dazu wird bei den Linienkontakten von Coulombscher Reibung ausgegangen. Um eine Änderung der gemessenen Temperatur von  $1\text{ K}$  hervorzurufen, wird eine bestimmte Reibkraft benötigt, welche sich wie folgt berechnen lässt.

$$F_{\text{Reib}} = \alpha_{\text{Faser}} * \Delta T * E_{\text{Faser}} * A_{\text{Faser}} \quad (3)$$

Der Ausdehnungskoeffizient wird mit  $\alpha_{\text{Faser}} = 0,55 * 10^{-6} * 1/\text{K}$ ,  $\Delta T = 1\text{ K}$ , der E-Modul der Glasfaser mit  $E_{\text{Faser}} = 68.000\text{ MPa}$  angenommen, die Querschnittsfläche  $A_{\text{Faser}} = 0,01227\text{ mm}^2$ . Daraus errechnet sich eine Reibkraft  $F_{\text{Reib}} = 4,6 * 10^{-7}\text{ N}$ , um eine Temperaturänderung von  $1\text{ K}$  zu erzeugen. Bei einem worst case Gleitreibungskoeffizient von  $\mu_{\text{gleit,PI/Stahl}} = 0,24$ <sup>260</sup> muss nach (4)  $F_N = 1,92 * 10^{-3}\text{ N}$  sein.

$$F_R = \mu * F_N \quad (4)$$

Die durch die Biegung entstehende Normalkraft wurde experimentell nachgestellt, indem drei Windungen der Sensorfaser auf eine Präzisionswaage gedrückt wurden. Ausgehend von einem Durchmesser von  $95\text{ mm}$  werden die drei Windungen auf einen Biegeradius von  $20\text{ mm}$  zusammengedrückt, wobei sich pro Windung eine gemessene Kraft von  $2,45 * 10^{-3}\text{ N}$  ergab. Somit ergibt sich bei einer spiralförmigen Verlegung der Sensorfaser mit einem Biegeradius von  $20\text{ mm}$  ein Messfehler durch Reibung der Sensorfaser in der Bohrung von  $1,28\text{ K}$ . Da dies einer worst case Abschätzung entspricht und bei mäanderförmiger Verlegung dieser Messfehler deutlich kleiner sein wird, kann der Messfehler durch Reibung der Faser in der Bohrung bei mäanderförmiger Verlegung vernachlässigt werden.

### 5.2.3.2 Bewertung der Einflussgrößen auf das Messobjekt

Die Bewertung der Einflussgrößen Bohrungsabstand und Bohrungsform findet anhand eines FE-Modells statt. Ziel der Untersuchung ist es, die Auswirkung der eingebrachten Bohrung auf die Temperaturverteilung in der Anpressplatte bewerten zu können.

Da die Bohrungen für die Sensorfaser in die metallische Wirkfläche eingebracht werden, wird diese im Modell abgebildet. Der Energieeintrag in die Anpressplatte wird durch einen ideal flächigen Wärmefluss mit einer spezifischen Wärmestromdichte  $\dot{q}_w = 0,3\text{ W/mm}^2$  dargestellt. Der ideale Energieeintrag und die damit gleichmäßige Erwärmung des Prüfkörpers bildet zwar nicht den im Reibsystem tatsächlich

---

<sup>260</sup> Cellpack AG, 2017

ablaufenden Aufwärmprozess ab, ermöglicht aber die nachvollziehbare Bewertung des Einflusses der Bohrung auf die Temperaturverteilung.

In einer Parameterstudie werden für die Bohrung mit einem Durchmesser von  $0,55\text{ mm}$  unterschiedliche Abstände zu Reibfläche untersucht. Variiert wird dieser Abstand ausgehend von  $0,1\text{ mm}$ , über  $0,3\text{ mm}$  bis hin zu  $0,5\text{ mm}$ . Dabei werden jeweils zwei Faserpositionen in der Bohrung betrachtet. Einmal ist die Sensorfaser der Wärmequelle möglichst nahe (Messpunkt Faser unten), zum anderen möglichst fern (Messpunkt Faser oben). Berechnet wird aufgrund der Symmetrie der Bohrung nur ein Halbschnitt, welcher in Abbildung 5.27 dargestellt ist. In der Parameterstudie wird die Abweichung zwischen Faserkerntemperatur und Referenzmesspunkte mit demselben Abstand zur Reibfläche im unbeeinflussten Bereich des Bauteils und die Differenz der Oberflächentemperatur direkt unter der Bohrung und einer Oberflächentemperatur im unbeeinflussten Bereich des Bauteils bewertet. Die Paare aus Messpunkt und Referenzmesspunkte, welche sich immer im selben Abstand von der Reibfläche befinden, sind in Abbildung 5.27 dargestellt.

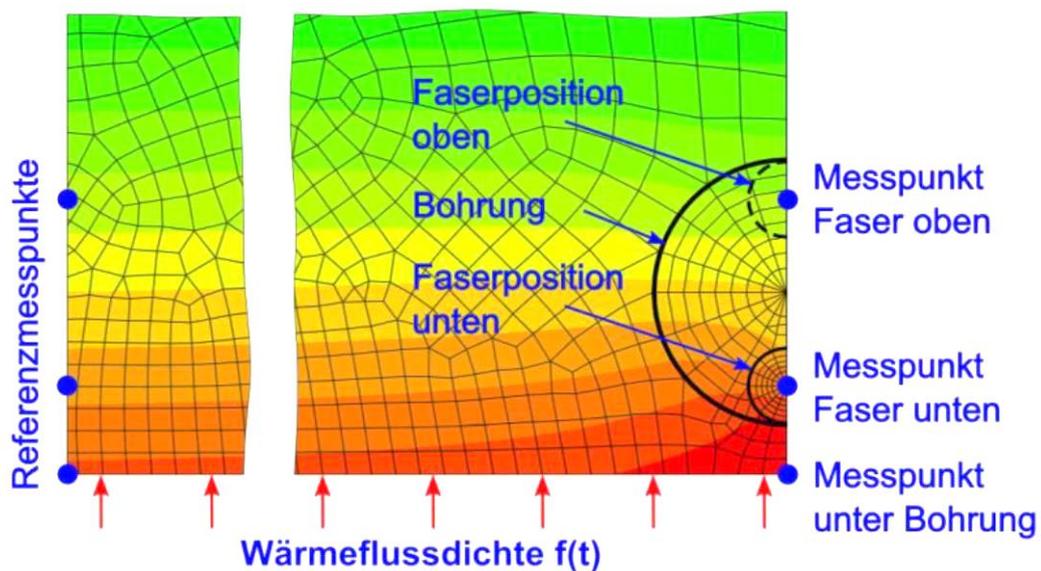


Abbildung 5.27: 2D-FE-Modell mit einfacher Bohrung<sup>261</sup>

In Abbildung 5.28 ist das Ergebnis für die Bohrung mit  $0,3\text{ mm}$  Abstand zur Reibfläche dargestellt. Aufgetragen ist in den Diagrammen die Temperaturdifferenz  $\Delta T = \text{Temperatur bei Bohrung} - \text{Temperatur am Referenzmesspunkt}$ . Ist  $\Delta T > 0$  wird die Temperatur durch Einbringen der Bohrung im Bereich der Bohrung erhöht, bei  $\Delta T < 0$  ist die Temperatur am Referenzmesspunkt höher. Im oberen Diagramm sind die zeitlichen Verläufe der Temperaturdifferenzen für die Faserposition oben dargestellt. Zum einen ist erkennbar, dass die Temperatur am Messpunkt unter der Bohrung

<sup>261</sup> Albers et al., 2016a, S. 476. Ins Deutsche übersetzt

knapp über  $1\text{ K}$  wärmer ist als der Referenzmesspunkt, die im Faserkern abgegriffene Temperatur ist  $\sim 0,3\text{ K}$  kälter als die Referenztemperatur. Ist die Sensorfaser der Reibfläche möglichst nahe, also Faserposition unten, sind beide Differenzen positiv. Die Temperatur an der Oberfläche unter der Bohrung ist maximal  $1,15\text{ K}$  höher als am Referenzmesspunkt, der Faserkern ist  $\sim 0,8\text{ K}$  wärmer als die Referenz.

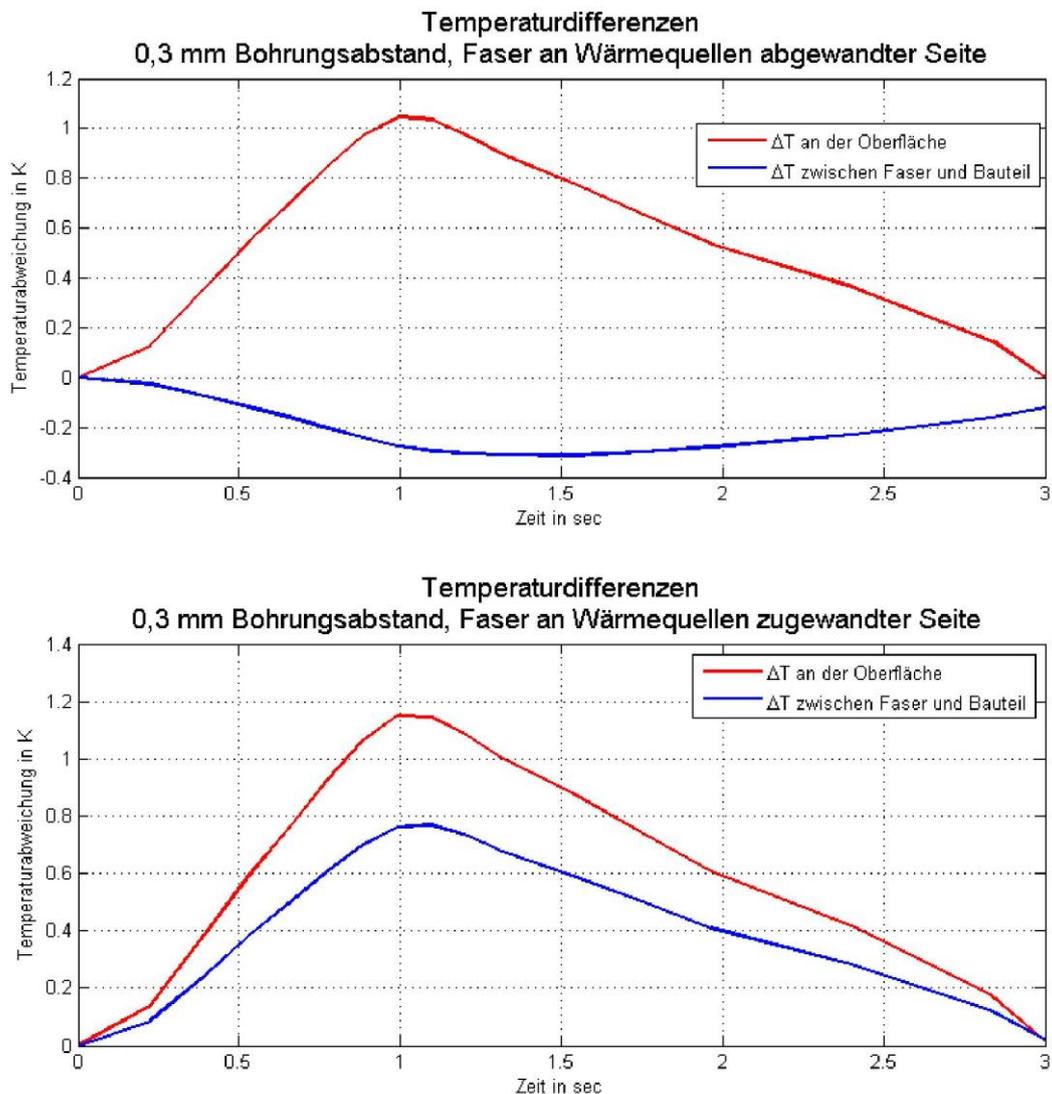


Abbildung 5.28: Temperaturabweichungen bei einem Bohrungsabstand von  $0,3\text{ mm}$  zur Reibfläche<sup>262</sup>

Erwartungsgemäß ergibt sich bei einem Abstand der Bohrung von  $0,1\text{ mm}$  zur Reibfläche die größte Überhöhung der Oberflächentemperatur, welche in der Simulation maximal  $2\text{ K}$  betrug. Die Abweichung von Sensorfasertemperatur zu Referenztemperatur ist immer kleiner als die Differenz an der Oberfläche. Somit muss besonders auf die entstehende Überhöhung an der Reibfläche geachtet werden. In Abbildung 5.29 ist die Entstehung des Temperaturstaus um die Bohrung herum

<sup>262</sup> Eisele, 2014, S. 44, betreute Abschlussarbeit

visualisiert. Je weiter die Bohrung von der Reibfläche entfernt ist, desto geringer ist der durch die Bohrung erzeugte Wärmestau, was durch Berechnungsergebnisse bestätigt wurde. Bei einem Abstand der Bohrung von  $0,1\text{ mm}$  zur Reibfläche ist die Temperaturdifferenz maximal  $2\text{ K}$ , welche sich auf  $0,8\text{ K}$  bei  $0,5\text{ mm}$  Abstand reduziert.

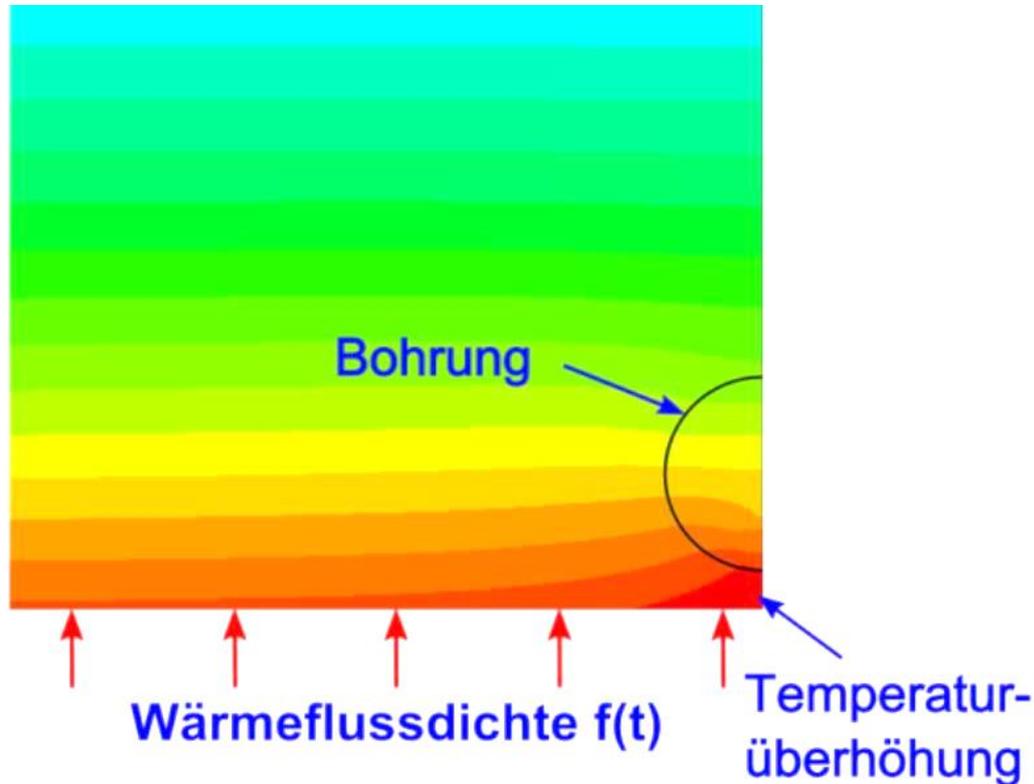


Abbildung 5.29: Entstehung der lokalen Temperaturüberhöhung durch die Bohrung<sup>263</sup>

Die Erfassung der Oberflächentemperatur mit der Sensorfaser gelingt dann am besten, wenn die Bohrung möglichst nahe an der Reibfläche ist, siehe Abbildung 5.30. Dargestellt wird der berechnete zeitliche Verlauf eines Energieeintrages von der Oberflächentemperatur ohne Bohrung und der erfassten Temperatur im Faserkern bei den drei unterschiedlichen Abständen zur Reibfläche, siehe Legende von Abbildung 5.30. Zu beachten ist, dass bei der Temperatur der Faser  $0,5\text{ mm}$  von der Reibfläche entfernt die der Wärmequelle abgewandten Position ausgewählt wurde. Dies stellt eine worst case Betrachtung dar und resultiert in einer Abweichung von maximal  $\sim 6\text{ K}$  in Bezug auf die Oberflächentemperatur.

<sup>263</sup> Albers et al., 2016a, S. 475. Ins Deutsche übersetzt

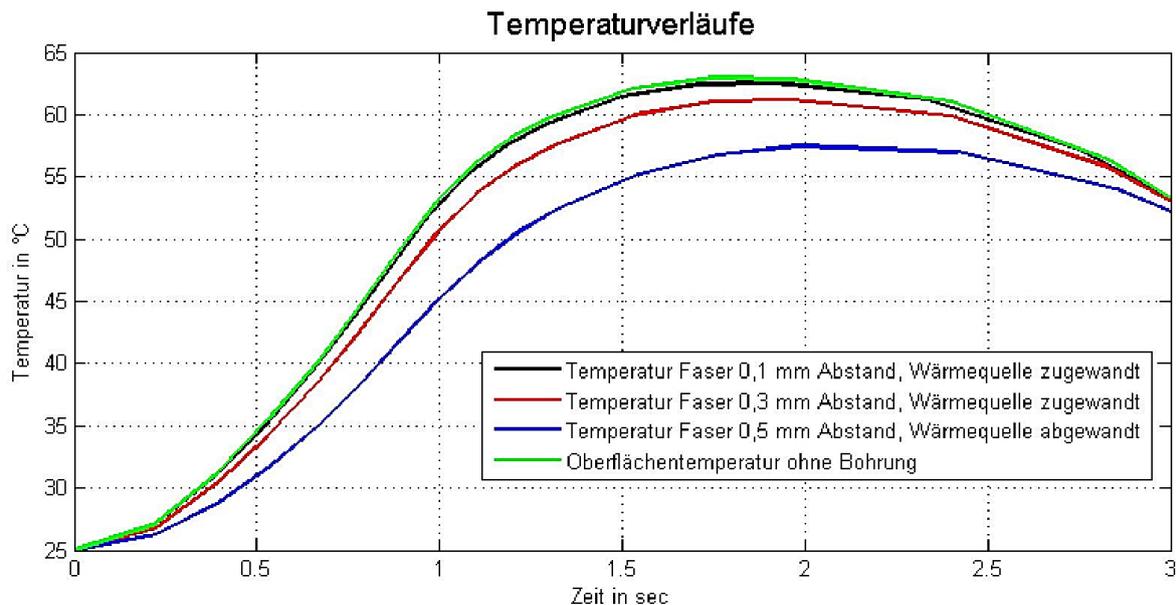


Abbildung 5.30: Berechnete Temperaturverläufe bei unterschiedlichen Abständen zur Reibfläche<sup>264</sup>

Somit besteht der Konflikt darin die Bohrung nah an der Reibfläche zu platzieren, um die Oberflächentemperatur möglichst exakt zu erfassen, aber den Wärmestau und die damit einhergehende Temperaturüberhöhung unter der Bohrung durch die Vergrößerung des Abstandes von Bohrung zu Reibfläche zu minimieren.

Ausgehend von diesem Konflikt, wurde nach Möglichkeiten gesucht, den Einfluss der Bohrung auf den Wärmefluss in der Anpressplatte zu minimieren. Bisher wurde der Bohrungsdurchmesser aus fertigungsbedingten Restriktionen als fest angenommen. Jedoch kann man aus Abbildung 5.29 folgern, dass auch der Bohrungsdurchmesser die Temperaturüberhöhung beeinflusst. Je kleiner die Bohrung, desto geringer sollte der Wärmestau sein. Die fertigungsbedingte Restriktion des Durchmessers bei  $0,55\text{ mm}$  gilt für das Senkerodierverfahren. Für die Bohrungslänge von  $35,5\text{ mm}$  können deutlich kleinere Geometrien dargestellt werden, indem nach dem Senkerodieren des Startloches drahterodiert wird. Ausgehend von den Möglichkeiten des Drahterodierens wurde eine Bohrungsform entwickelt, bei der zuerst eine Bohrung mit  $0,55\text{ mm}$  Durchmesser senkerodiert wird und anschließend ein dünnerer Schlitz mit einer Breite von  $0,2\text{ mm}$  in Richtung Reibfläche drahterodiert wird, siehe Abbildung 5.31. Abbildung 5.31 zeigt den Halbschnitt des Modells der Schlüssellochbohrung. Um eine möglichst gute thermische Leitfähigkeit zu erreichen, soll nach dem Verlegen der Sensorfaser das Startloch wieder mit einem Draht aufgefüllt werden. So wird zusätzlich erreicht, dass die Sensorfaser ihre Position normal zur Reibfläche nur minimal ändern

<sup>264</sup> Eisele, 2014, S. 46, betreute Abschlussarbeit

kann. Das Verhalten dieser „Schlüssellochbohrung“ wird nachfolgend, analog zum Vorgehen der normalen Bohrung, mittels 2D-FE-Modell untersucht.

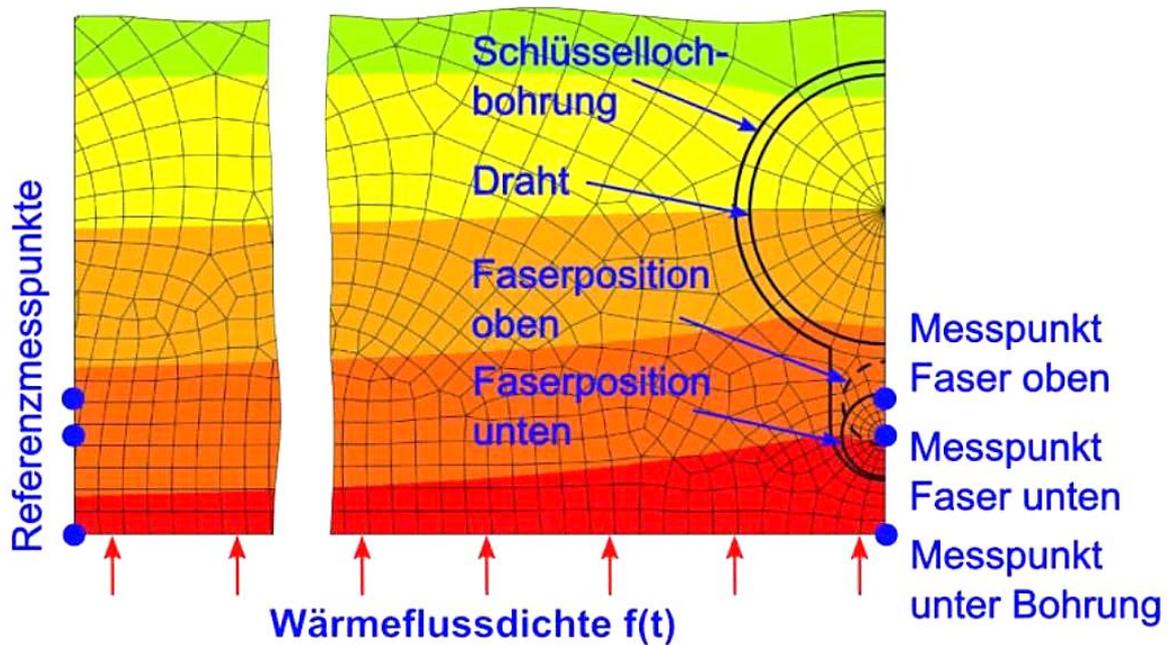


Abbildung 5.31: 2D-FE-Modell der Schlüssellochbohrung<sup>265</sup>

In der Berechnung wird der Abstand des Schlitzes ausgehend von  $0,1\text{ mm}$  über  $0,3\text{ mm}$  und letztlich  $0,5\text{ mm}$  variiert. Die Faserposition (unten / oben) wird nur exemplarisch bei einem Abstand von  $0,3\text{ mm}$  variiert, da hier keine signifikanten Unterschiede erwartet werden. Wie erwartet zeigt die Berechnung, dass das Schlüsselloch den Wärmefluss weniger behindert als die normale Rundlochbohrung. Vergleicht man die Ergebnisse der Bohrungen mit  $0,1\text{ mm}$  Abstand von der Reibfläche, kann durch die mit Draht wieder aufgefüllte Schlüssellochbohrung die Temperaturüberhöhung an der Reibfläche von  $2\text{ K}$  bei der Rundlochbohrung auf  $1\text{ K}$  halbieren werden. Auch die im Faserkern berechneten Temperaturen weichen weniger stark vom der Temperatur des Referenzmesspunkt ab. In Abbildung 5.32 ist das Ergebnis der mit Draht aufgefüllten Schlüssellochbohrung mit  $0,3\text{ mm}$  Abstand zur Reibfläche dargestellt. An der Oberfläche erreicht die Temperaturüberhöhung einen Wert von  $0,5\text{ K}$ , die von der Faser gemessene Temperatur ist nur  $\sim 0,25\text{ K}$  höher als die Referenztemperatur. Dass die Verschiebung der Faser in der Schlüssellochbohrung einen vernachlässigbaren Einfluss hat, zeigt Abbildung 5.33. Sowohl die Differenz zwischen den Oberflächentemperaturen, als auch die Differenz der im Faserkern erfassten Temperaturen ist sehr klein.

<sup>265</sup> Albers et al., 2016a, S. 476. Ins Deutsche übersetzt

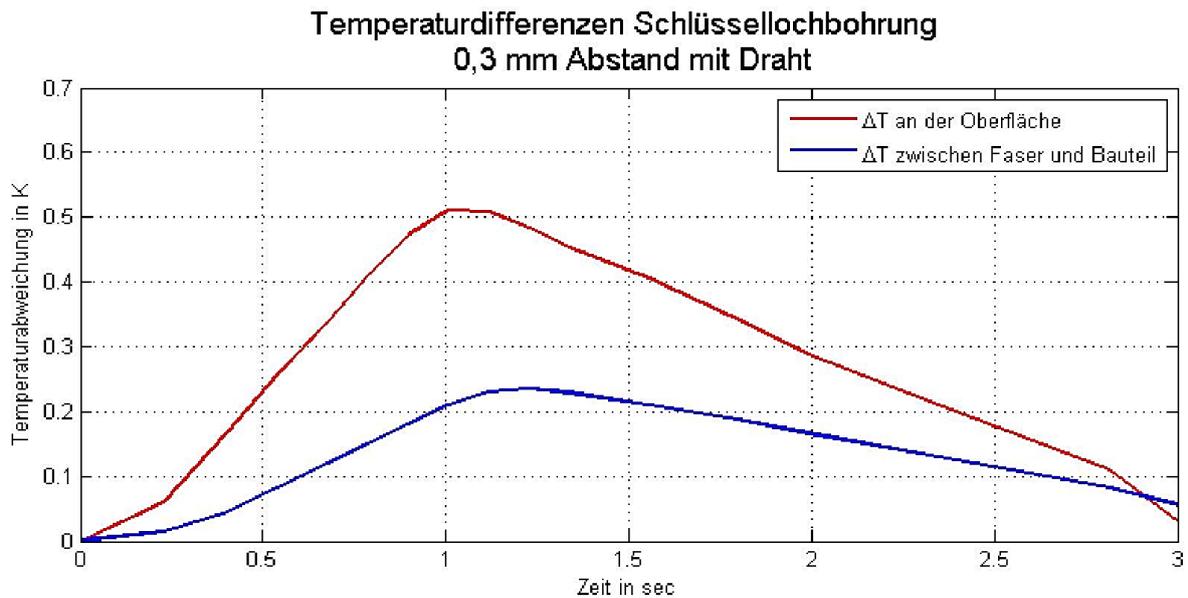


Abbildung 5.32: Berechnete Temperaturdifferenzen mit aufgefüllter Schlüssellochbohrung<sup>266</sup>

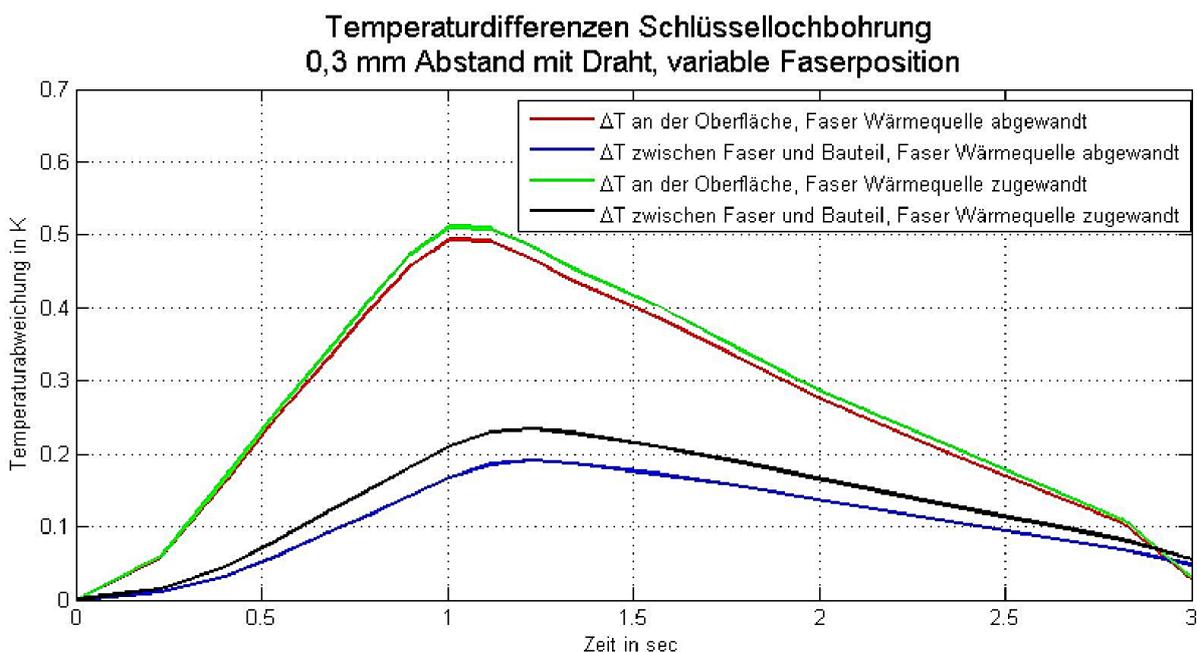


Abbildung 5.33: Ergebnis der Variation der Faserposition im Schlüsselloch<sup>267</sup>

Da die Schlüssellochbohrung deutliche Vorteile gegenüber der normalen Rundlochbohrung zeigt, soll diese für die nachfolgende experimentelle Bewertung der Einflussgrößen auf die Messgüte bereits mitbetrachtet werden.

### 5.2.3.3 Bewertung der Einflussgrößen auf die Messgüte

Eine Bewertung der Einflussgrößen auf die Messgüte und damit die Beurteilung der Wiederholbarkeit und der Reproduzierbarkeit der Messung wird an einem

<sup>266</sup> Eisele, 2014, S. 53, betreute Abschlussarbeit

<sup>267</sup> Eisele, 2014, S. 54, betreute Abschlussarbeit

akademischen Beispiel durchgeführt. Unter einem akademischen Beispiel wird verstanden, die Komplexität der Messaufgabe zu senken und somit unerwünschte Wechselwirkungen und Einflussgrößen möglichst zu reduzieren. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf der Modellbildung, da der zu untersuchende Effekt natürlich vollständig abgebildet sein muss.

Nachgestellt werden sollen Aufheizvorgänge, wie sie die faseroptische Messtechnik in der Machbarkeitsstudie aufgezeichnet hat. In einem Reibprozess wird sich jedoch durch die Unebenheit der Wirkflächen immer eine inhomogene Flächenpressung einstellen, was zu einer inhomogenen Aufheizung führt. Für das akademische Beispiel soll sichergestellt werden, dass eine möglichst gleichmäßig flächige Aufheizung eines Prüfkörpers stattfindet. So lassen sich gemessene Temperaturen besser miteinander vergleichen. Jedoch soll ähnlich wie bei einem Reibvorgang eine schnelle Temperaturänderung möglich sein, da es besonders hier zu einer Differenz zwischen den gemessenen Temperaturen der Sensorfaser und Thermoelement kam. Die Aufheizung der Prüfkörper wird durch ein Aluminiumbauteil realisiert. Der Aluminiumblock wird zuerst in einem Ofen erwärmt und dann auf den Prüfkörper gedrückt, um diesen sprunghaft zu erwärmen. Um einen flächigen Wärmeeintrag sicherzustellen, wurden Vorversuche mit Wärmeleitpasten und Wärmeleitfolien durchgeführt. Die Verwendung einer Wärmeleitpaste stellte sich dabei als zielführend heraus. Aus den genannten Anforderungen ist der Versuchsaufbau entwickelt worden, wie er in Abbildung 5.34 ohne die Aufheizkörper dargestellt ist. Die Prüfkörper sind in Abbildung 5.35 nochmals vergrößert dargestellt.

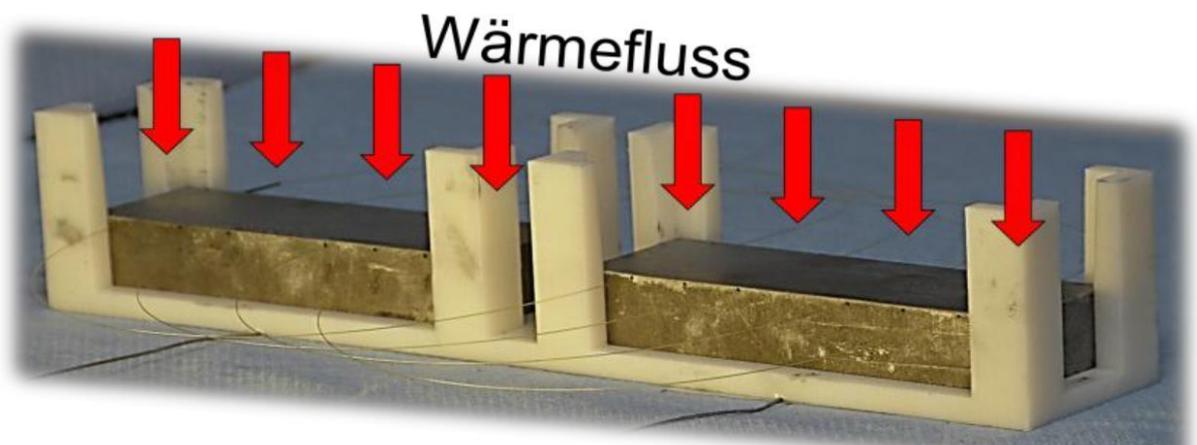


Abbildung 5.34: Testumgebung des akademischen Beispiels<sup>268</sup>

<sup>268</sup> Albers et al., 2015b, S. 299

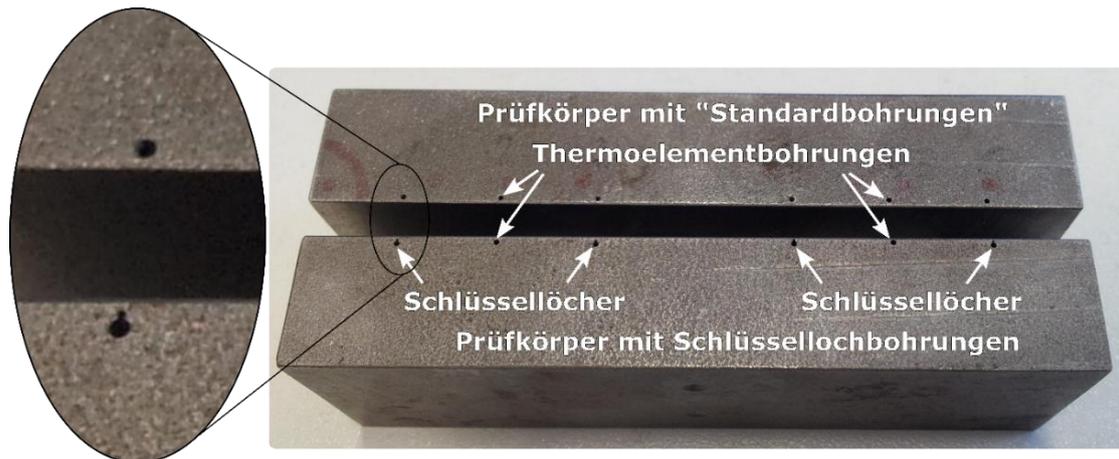


Abbildung 5.35: Prüfkörper des akademischen Beispiels<sup>269</sup>

Bei den experimentellen Untersuchungen wird der Bohrungsabstand von  $0,1\text{ mm}$  nicht betrachtet, da zum einen hier die stärkste Verfälschung der Obertemperatur stattfindet und zum anderen durch einen möglichen kleinen Verschleiß der metallischen Wirkfläche die Beeinflussung noch weiter zunehmen wird. Im worst case könnte es sogar zu einem Freilegen der Bohrung an der Reibfläche kommen, wodurch die Messung dann unbrauchbar werden würde. Deshalb werden nur die Abstände  $0,3\text{ mm}$  und  $0,5\text{ mm}$  betrachtet. Die zwei unterschiedlichen Bohrungsformen werden untersucht, siehe Abbildung 5.35. Die Faserverlegung wird in Form von zwei unterschiedlichen Biegeradien betrachtet, um den in Abschnitt 5.2.3.1 bereits behandelten Einfluss der Kontaktreibung zwischen Sensorfaser und Bohrung zu bewerten. Des Weiteren soll die Schwingungsanfälligkeit der unterschiedlichen Bohrungsformen der Sensorfaser untersucht werden.

Neben der Messung der Temperaturen mittels der faseroptischen Sensorik werden wieder Referenztemperaturen mittels Thermoelementen erfasst. Um die beiden Messsysteme zeitsynchron auswerten zu können, wird mit einem externen Pulssignalgeber gearbeitet. Dieser Signalgeber gibt alle  $5\text{ s}$  einen Puls aus, welcher bei der Datenerfassung der Thermoelemente kontinuierlich mit aufgezeichnet wird und bei der Datenerfassung der faseroptischen Sensorik (ODiSI B) als Triggersignal zum Beenden der Messung genutzt wird. Dazu wird erst nach abgeschlossener Erwärmung der Prüfkörper das Triggersignal an das ODiSI B angeschlossen. Somit können die getrennt voneinander erfassten Temperaturmessdaten auf dieselbe Zeitskala gebracht werden. Die verwendete Sensorfaser wurde vor der Durchführung der Versuche mehrere Stunden bei  $100\text{ °C}$  in einem Ofen getempert. Dies führt zu einem reproduzierbaren Verhalten der Faser bis zu diesem Temperaturbereich. Die Halterung der Prüfkörper, siehe Abbildung 5.34, dient gleichzeitig dazu die Position

<sup>269</sup> Eisele, 2014, S. 58, betreute Abschlussarbeit. Ergänzt um Detailansicht

der beiden Prüfkörper zueinander zu definieren, wodurch die Biegeradien bei Verlegung der Faser durch beide Prüfkörper leicht eingestellt werden können.

Erstes Ergebnis der Untersuchung war die Erkenntnis, dass der Aufbau der Sensorfaser, siehe Abbildung 2.31, zum Teil für die Temperaturüberhöhung bei hohen Temperaturgradienten verantwortlich ist. Die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Polyimid Beschichtung und des Glaskerns, wobei der Ausdehnungskoeffizient von Polyimid größer ist als der des Glaskerns, führen zu einem Messfehler. Bei schneller Aufheizung wird eine zu hohe Temperatur erfasst, beim schnellen Abkühlen eine zu niedrige. Bei der Temperaturmessung von drei nacheinander folgenden Aufheizungen kann man die in Abbildung 5.36 dargestellte Differenz von Sensorfasertemperatur und Thermoelement sowohl über den Temperaturgradienten, als auch über die Absoluttemperatur nachvollziehen.

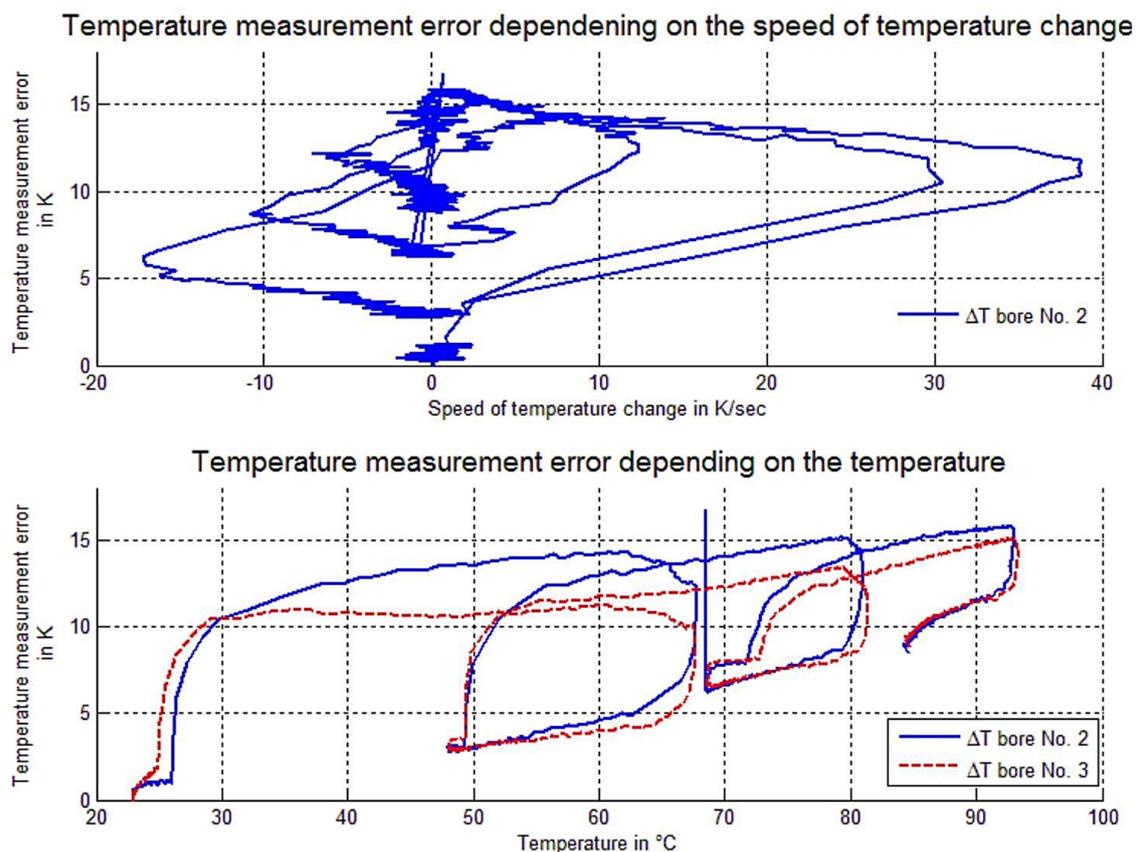


Abbildung 5.36: Temperaturdifferenz von Faser und Thermoelement bei drei nacheinander folgenden Aufheizvorgängen<sup>270</sup>

Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass die Abweichung von bis zu 16 K nicht ausschließlich dem Effekt der Polyimidbeschichtung der Faser geschuldet sind, sondern auch aus der deutlich geringeren thermischen Masse der Sensorfaser resultieren. Welcher Effekt welchen Anteil an der Abweichung hat, wird an dieser Stelle

<sup>270</sup> Albers et al., 2016a, S. 477

nicht untersucht. Aus den Daten kann aber ermittelt werden, dass die mittels Sensorfaser erfasste Temperatur im Vergleich zu der Thermoelementtemperatur  $\sim 0,1 s$  früher auf einen Temperaturanstieg und Temperaturabfall reagiert, was die höhere Dynamik der Messung mittels Sensorfaser bestätigt.

Hinsichtlich der Biegeradien konnte durch den Versuch ermittelt werden, dass kleine Biegeradien bei äußerer Schwingungsanregung, zum Beispiel durch Luftverwirbelung der rotierenden Teile am Prüfkopf der Machbarkeitsstudie, vorteilhaft sind. Zusätzlich wirkt sich eine einseitige Fixierung günstig auf die Schwingungsanfälligkeit aus. Die geringste Schwingungsanfälligkeit zeigt die mit Draht aufgefüllte Schlüssellochbohrung.

Die einseitige Fixierung der Sensorfaser hat keinen Einfluss auf die Temperaturmessung gezeigt. Ein signifikanter Einfluss der Bohrungsform auf die Temperaturmessung konnte ebenfalls nicht ermittelt werden. Kleinere Biegeradien zeigen tendenziell einen kleinen negativen Einfluss auf die Temperaturmessung, was die Überlegungen aus Abschnitt 5.2.3.1 bestätigt.

Abschließend sind die Erkenntnisse aus Abschnitt 5.2 in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Übersicht der bewerteten Einflussgrößen auf die Messgüte

Parameter	Beschreibung	Empfehlung
<b>Faserverlegung</b>	Art und Weise, wie die Faser durch die Messstrecken im Bauteil verlegt wird	Eine mäanderförmige Verlegung sollte gewählt werden, um die Reibungskräfte zwischen Sensorfaser und Bohrungswand zu minimieren
<b>Bohrungsform</b>	Wie sollte die Bohrung aussehen, welche später als Messstrecke dient	Es ist eine Schlüssellochbohrung empfehlenswert, da diese Form den Wärmefluss am geringsten behindert. Zusätzlich ist das Auffüllen der Grundbohrung mit einem Draht empfehlenswert, da dadurch nochmals der Wärmestau minimiert und gleichzeitig die Position der Sensorfaser in der Messstrecke festgelegt wird

<b>Abstand der Bohrung zur Reibfläche</b>	Welcher Mindestabstand zur Reibfläche sollte mit der Bohrung eingehalten werden?	Es sollte bei Schlüsselbohrungen, welche mit einem Draht aufgefüllt werden, mindestens ein Abstand von $0,3\text{ mm}$ zur Reibfläche eingehalten werden, um die Beeinflussung der Messstelle klein zu halten
<b>Faserfixierung</b>	Einfluss der Möglichkeit die Sensorfaser an einer Seite der Messstrecke zu fixieren	Eine einseitige Faserfixierung ist empfehlenswert, da zum einen die Position der Messpunkte in der Messstrecke definiert wird, zum anderen hilft die Fixierung der Schwingungsanfälligkeit der Messtechnik vorzubeugen
<b>Biegeradius</b>	Radius, welche bei der spiral oder mäanderförmigen Verlegung der Sensorfaser entsteht	Es ist ein eher kleiner Biegeradius empfehlenswert, da dieser dazu führt, dass die Sensorfaser unempfindlicher gegenüber Schwingungsanregung wird
<b>Wärmeleitmedium in der Bohrung</b>	Auffüllen der Bohrung mit Wärmeleitpaste, um die Wärme besser an die Sensorfaser zu leiten	Die Verwendung von Wärmeleitpaste ist nicht empfehlenswert, da es zu zusätzlicher Reibung von Sensorfaser und dem Wärmeleitmedium kommt, welche die Temperaturmessung beeinträchtigt

### 5.3 Zwischenfazit

Mittels des beschriebenen SPALTEN-Prozesses wurde mit der verteilt messenden faseroptischen Sensorik eine Messtechnik gefunden, welche die formulierte Zielsetzung<sup>271</sup> erfüllt. Die räumlich hochauflösende Temperaturverteilungsmessung in der Anpressplatte einer trockenlaufenden Reibpaarung wurde erfolgreich umgesetzt.

Als Ergebnis aus Abschnitt 5.2.3 lässt sich zusammenfassen, dass für zukünftige Messungen Schlüsselbohrungen mit einem Abstand von mindestens  $0,3\text{ mm}$  zur Reibfläche verwendet werden sollten. Die Sensorfaser sollte mäanderförmig mit einem

<sup>271</sup> Siehe Abschnitt 3.2.4

eher kleinen Biegeradius verlegt und auf einer Seite fixiert werden. Das Auffüllen der Bohrung mit Wärmeleitpaste wirkt sich negativ auf die Messgüte aus und ist deshalb nicht empfehlenswert.

Zusätzlich soll an dieser Stelle verdeutlicht werden, dass die in Abbildung 5.36 gezeigte Differenz zwischen Sensorfaser und Thermoelement, besonders bei großen Temperaturgradienten, nicht den Erkenntnisgewinn des eigentlichen Einsatzzwecks minimieren. Die Zielsetzung ist die Erfassung der Temperaturverteilung im Bauteil. Die Temperaturverteilung kann mittels faseroptischer Sensorik korrekt erfasst werden, worauf der bekannte Fehler bezüglich der Absoluttemperatur keinen Einfluss hat. Möglicherweise werden die absoluten Temperaturunterschiede über eine Messstrecke hinweg in geringem Maße verstärkt dargestellt. Es ist jedoch für die Zielsetzung viel wichtiger, dass die Bereiche hoher und niedrigerer Temperatur zuverlässig ermittelt werden. Die korrekte Erfassung der Temperaturverteilung konnte durch die Machbarkeitsstudie und die Fehlerbetrachtung gezeigt werden.

Somit können die Forschungsfragen 1 und 2 wie folgt beantwortet werden:

#### **Forschungsfrage 1: Geeignete Messmethoden**

Gibt es geeignete Messmethode(n) für die räumlich hochauflösende Messung der Temperaturverteilung von trockenlaufenden Friktionssystemen? Wenn ja, ist die Einsetzbarkeit bei Prüfstandsuntersuchungen möglich?

#### **Antwort**

Ja, mit der verteilt messenden faseroptischen Sensorik kann die Temperaturverteilung bei Prüfstandsversuchen räumlich hochauflösend gemessen werden. Vorteil dieser Messmethode liegt darin, dass sich alle 0,64 mm entlang der Sensorfaser ein Messpunkt befindet. Dies bedeutet, dass bei dem untersuchten System in der Machbarkeitsstudie über 1.400 Messpunkte realisiert werden konnten. Eine Einschränkung der verteilt messenden faseroptischen Sensorik ist, dass das zu vermessende Bauteil nicht rotieren darf.

**Forschungsfrage 2: Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung**

Wie muss der Prüfaufbau gestaltet werden um die Messmethode bei Prüfstandsuntersuchungen anzuwenden? Wo liegen die Grenzen der Messmethode? Wie groß sind die zu erwartenden Fehler?

**Antwort**

Als Fazit der durchgeführten Fehlerbetrachtung sind konkrete Gestaltungshinweise formuliert worden, welche die Einbringung der Sensorfaser in das Kupplungssystem bei möglichst geringer Beeinflussung des zu vermessenden Bauteils beschreiben. Die Grenzen der Messmethode liegen zum einen im maximal möglichen Temperaturbereich bei den beschichteten Sensorfasern (-40°C bis 220 °C), wobei hier die Verwendung einer Sensorfaser ohne Beschichtung möglich ist. Ohne die Schutzbeschichtung ist die Messung von Temperaturen weit über 500 °C durchführbar. Eine weitere Anwendungsgrenze liegt in der Vibrationsanfälligkeit der Messtechnik, welche aber mit den Gestaltungshinweisen zur Integration der Sensorfaser deutlich minimiert wurde. Für Prüfstandsuntersuchungen ist die Messtechnik somit verwendbar.



## 6 Anwendung der Temperaturverteilungsmessung

In diesem Kapitel soll die Anwendung der verteilt messenden faseroptischen Sensorik an zwei Beispielsystemen gezeigt werden. Zum einen wird das WFP organischer Reibbelag gegen eine Anpressplatte aus Stahl, zum anderen organischer Reibbelag gegen eine Anpressplatte aus Gusseisen untersucht. Dabei soll demonstriert werden, wie auf Basis des gewonnenen Wissens aus Kapitel 2 und 5.2 die Messtechnik integriert wird und welche neuen Erkenntnisse aus den Messungen gezogen werden können. Ziel dabei ist die Beantwortung der Forschungsfrage <sup>3272</sup>, indem anhand der Beispiele dargelegt wird, inwiefern das Systemverständnis gesteigert werden kann.

### 6.1 Trockenlaufende Reibpaarung mit WFP organischer Reibbelag / Stahl

Für die nachfolgende experimentelle Untersuchung der Temperaturverteilung wird die faseroptische Messtechnik unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Machbarkeitsstudie<sup>273</sup> und der Fehlerbetrachtung<sup>274</sup> angewandt. In diesem Abschnitt werden an der Reibpaarung organischer Reibbelag / Stahl beispielhafte Analysen der Messdaten vorgestellt.

#### 6.1.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen wurde die in Abschnitt 4.1 vorgestellte Testumgebung verwendet. Dabei wurde wieder der angefederte organische Reibbelag ( $\varnothing_{\text{außen}} = 200 \text{ mm}$ ,  $\varnothing_{\text{innen}} = 134 \text{ mm}$ ) gegen eine neu gestaltete Gegenreibe untersucht, siehe Abbildung 5.9, Seite 105. Im Vergleich zur Machbarkeitsstudie wurde die Anpressplatte so ausgeführt, dass diese sowohl innerhalb der Reibfläche, als auch außerhalb der Reibfläche an die Trägerscheibe angeschraubt werden kann, siehe Abbildung 6.1. Ebenfalls dargestellt sind die Messstrecken, welche bei den Untersuchungen in der Anpressplatte aus C45 erfasst wurden. Für die Messung der Temperaturverteilung wurde die Konfiguration mit dem geringsten Messpunkt Abstand verwendet, sodass alle  $0,64 \text{ mm}$  entlang der Sensorfaser ein Messpunkt aufgezeichnet wurde. Insgesamt sind in diesem Aufbau 28 radial verlaufende Messstrecken vorhanden. Davon befinden sich 12  $0,3 \text{ mm}$  unterhalb der Reibfläche, weitere 12  $1,0 \text{ mm}$  und 4  $4,0 \text{ mm}$  unterhalb der Reibfläche. Zum Vergleich der gemessenen Temperatur der faseroptischen Sensorik mit einer Referenztemperatur sind 4 Mantelthermoelemente appliziert.

---

<sup>272</sup> Siehe Abschnitt 3.2.3

<sup>273</sup> Siehe Abschnitt 5.1.6

<sup>274</sup> Siehe Abschnitt 5.2

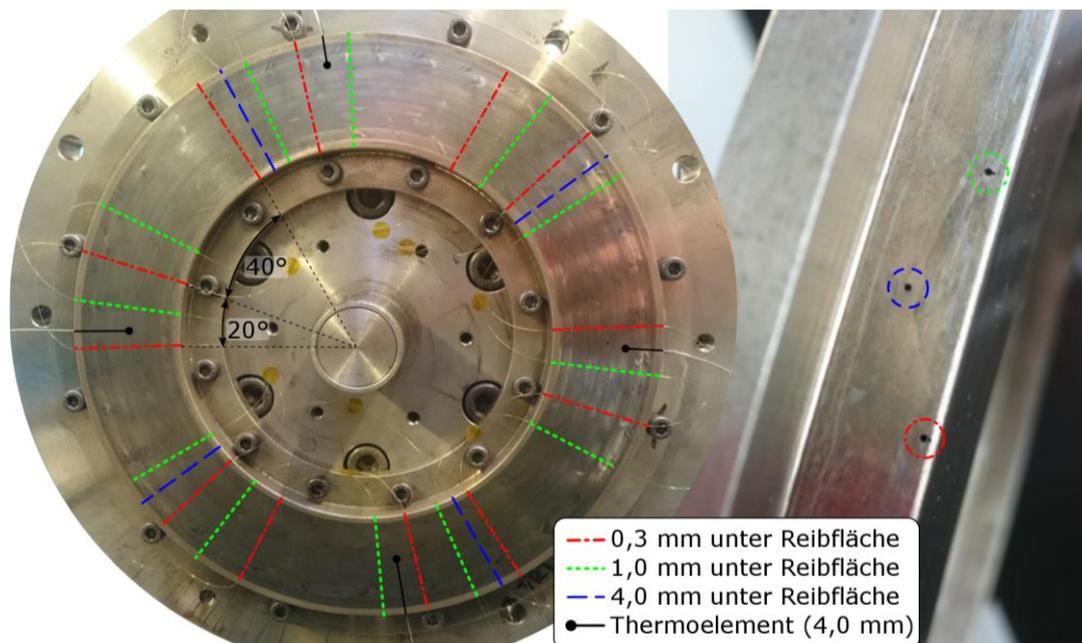


Abbildung 6.1: Zuordnung der Messstrecken und Entfernung von der Reibfläche<sup>275</sup>

Die mit der faseroptischen Sensorik erfasste Temperaturverteilung von einer Messstrecke ist in Abbildung 6.2 für 4 aufeinander folgende Schaltungen abgebildet. Auf der 33 mm langen Messstrecke werden 52 Messpunkte erfasst. Die dargestellte Messstrecke ist dabei nur eine von insgesamt 28 Messstrecken. Deutlich zu erkennen ist, dass die Temperatur in dieser Versuchsstufe über den Radius hinweg nicht gleichmäßig verteilt ist.

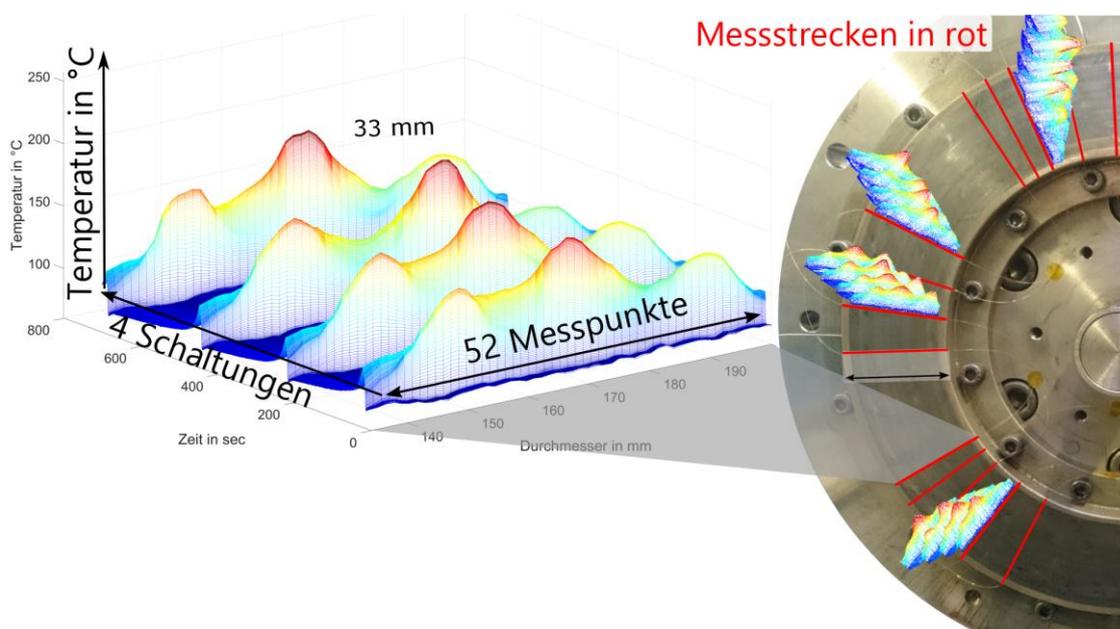


Abbildung 6.2: Beispielhafter Messschrieb der räumlich hochauflösenden Messung der Temperaturverteilung<sup>276</sup>

<sup>275</sup> Albers et al., 2016c, S. 8. Ins Deutsche übersetzt.

<sup>276</sup> Albers et al., 2017b, S. 2.

Bei der Einbringung der Bohrungen für die Sensorfaser in die Anpressplatte wurde die Empfehlungen aus Abschnitt 5.2.3 gefolgt. Bei der Fertigung der Anpressplatte wurde das Erodieren der „Schlüssellocher“ als letzter Fertigungsschritt durchgeführt. Um zu überprüfen, ob die Oberfläche eine Beeinflussung durch die Bohrungen erfahren hat, wurde diese mit demselben Konfokalmikroskop vermessen, wie die Anpressplatte der Machbarkeitsstudie<sup>277</sup>. In Abbildung 6.3 ist das Ergebnis der Oberflächenmessung zusammengefasst. Erfasst wurde ein rechteckiger Bereich mit einer Kantenlänge von 15 mm, welcher sich über 3 Bohrungen mit unterschiedlichem Abstand zur Reibfläche befindet. Im Messschrieb sind keine Wölbungen erkennbar, womit die Wirksamkeit der Änderung des Herstellprozesses bestätigt werden kann. Ein Einfluss der Bohrungen auf die Wirkfläche, außer dem bereits betrachteten Wärmestau, kann also ausgeschlossen werden.

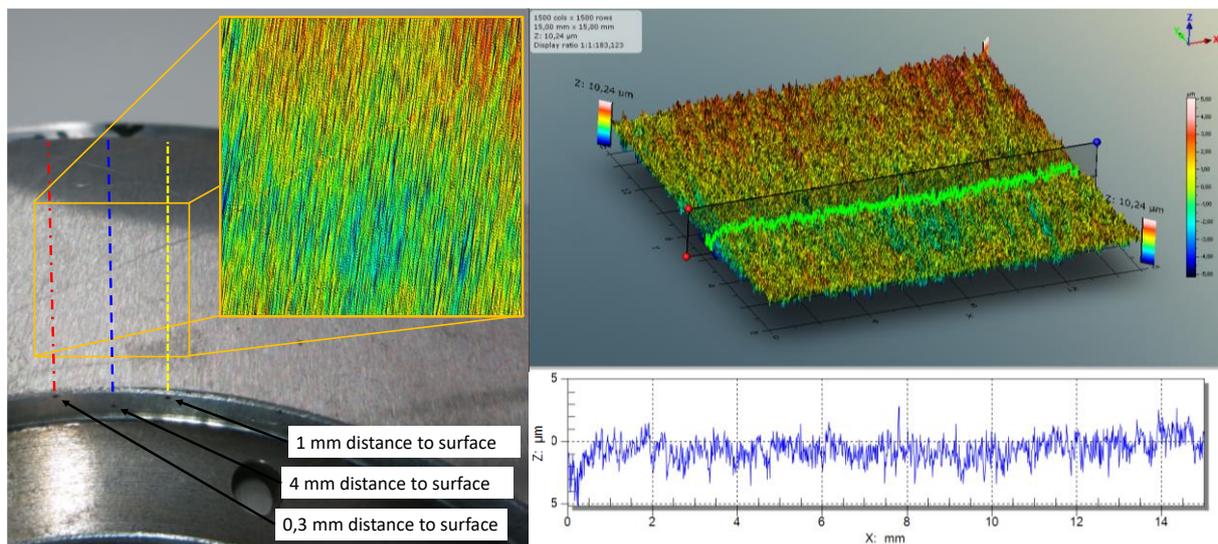


Abbildung 6.3: Oberflächenvermessung der Wirkfläche nach dem Einbringen der Messbohrungen<sup>278</sup>

Wie in Abbildung 6.1 zu sehen ist, wurde die Sensorfaser mit Klebepunkten fixiert, wodurch die empfohlene einseitige Fixierung realisiert wurde. Die Bohrungen mit 0,3 mm und 1,0 mm Abstand zur Reibfläche wurden als Schlüssellochbohrung ausgeführt und nach dem Verlegen der Sensorfaser mit Draht aufgefüllt. Bei den Bohrungen mit einem Abstand von 4,0 mm wurde auf eine Schlüssellochbohrung verzichtet, da hier der Nutzen als sehr gering eingeschätzt wird und somit die höheren Kosten bei der Fertigung nicht rechtfertigt. Die Verlegung erfolgte mäanderförmig, mit kleinen Biegeradien. Somit wurden die Empfehlungen aus der Fehlerbetrachtung in diesem Aufbau vollständig umgesetzt.

<sup>277</sup> Siehe Abschnitt 5.1.6

<sup>278</sup> Albers et al., 2016c, S. 9

In Abbildung 6.4 ist die Einordnung der durchgeführten Versuche in spez. Reibleistung über spez. Reibarbeit aufgetragen. Die nachfolgend beschriebenen Versuche sind bei stillstehender Anpressplatte durchgeführt. Bei geöffnetem Prüfkopf<sup>279</sup> wird der Reibbelag auf die gewünschte Drehzahl beschleunigt, dann wird die Axialkraft aufgebracht und bei vorgegebener rotatorischer Massenträgheit bis zu Drehzahl  $0 \text{ U}/\text{min}$  abgebremst, analog zum Vorgehen in der Machbarkeitsstudie<sup>280</sup>. In allen Versuchsstufen wurden bei der gleichen Starttemperatur von  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  vier aufeinanderfolgende Schaltungen durchgeführt. Die Variation von Reibarbeit und –leistung wurde durch die Variation der Startdrehzahl, der Anpresskraft und der Massenträgheit realisiert. Durch Anpassung der Startdrehzahl wird bei sonst konstanten Größen sowohl die Reibarbeit, wie auch die Reibleistung verändert. Bei Erhöhung der Anpresskraft wird lediglich die Reibleistung, bei Erhöhung der Massenträgheit nur die Reibarbeit erhöht.

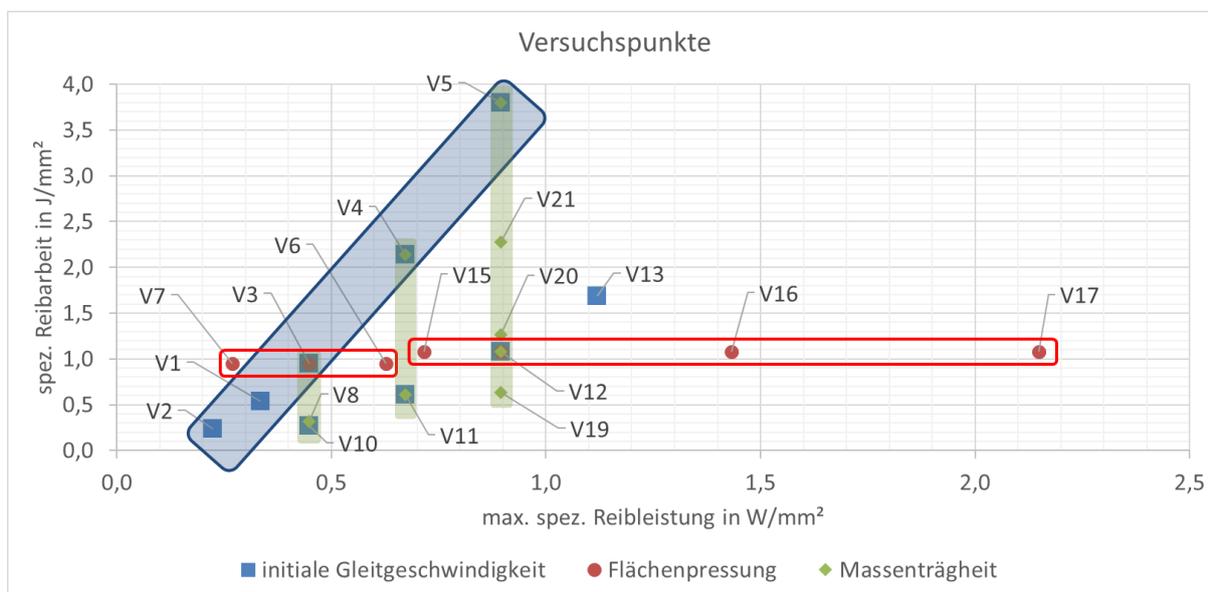


Abbildung 6.4 Einordnung der Versuchsstufen<sup>281</sup>

### 6.1.2 Vergleich von Sensorfaser- und Thermoelementtemperatur

Zuerst soll an dieser Stelle ein Vergleich der Sensorfaser- mit der Thermoelementtemperatur für unterschiedliche Versuchsstufen erfolgen. Abgebildet sind im Folgenden der Vergleich für

- Versuchsstufe 4, siehe Abbildung 6.6
- Versuchsstufe 15, siehe Abbildung 6.7 und Abbildung 6.8
- Versuchsstufe 16, siehe Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10
- Versuchsstufe 17, siehe Abbildung 6.11 und Abbildung 6.12

<sup>279</sup> Siehe Abbildung 5.9

<sup>280</sup> Siehe Abbildung 5.14

<sup>281</sup> Albers et al., 2017a, S. 6

Um die Temperaturverläufe von faseroptischer Sensorik und Thermoelement über der Zeit miteinander vergleichen zu können, müssen die Messpunkte möglichst nahe beieinanderliegen. Deshalb wurden jeweils die drei Messpunkte der faseroptischen Temperaturmessung in der 5° versetzten Messstrecke auf demselben Radius wie die Spitze des jeweiligen Thermoelements ausgewählt, siehe Abbildung 6.5. Die Thermoelemente sind 4 mm von der Wirkfläche entfernt, die Messstrecken der faseroptischen Sensorik 1 mm. Der Abstand der Thermoelemente von 4 mm zur Reibfläche wurde gewählt, da dies eine übliche Messposition in der Industrie ist.

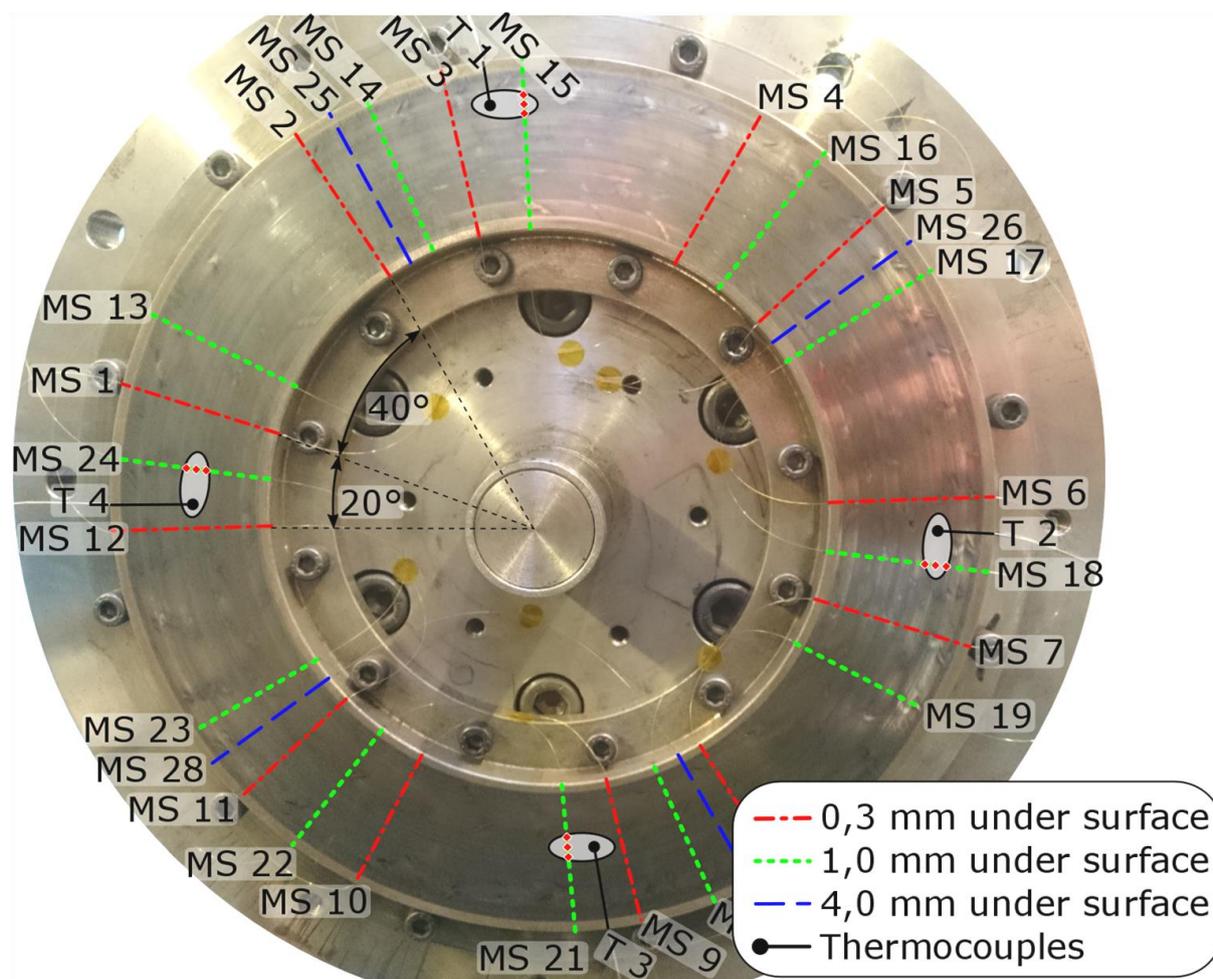


Abbildung 6.5: Positionen des Vergleichs von Faser- mit Thermoelementtemperatur

In Abbildung 6.6 oben ist der Vergleich von Thermoelement 1 mit der gemittelten Temperatur der Messpunkte 17, 18 und 19 der Messstrecke 15, unten von Thermoelement 2 mit der gemittelten Temperatur der Messpunkte 37, 38 und 39 der Messstrecke 18 dargestellt. Beide Verläufe stimmen sehr gut überein, bis auf den bekannten Unterschied bei der Spitzentemperatur. Der Vergleich der Temperaturen für Versuchsstufe 15, 16 und 17 bestätigt das Verhalten der Versuchsstufe 4, siehe Abbildung 6.8 bis Abbildung 6.12. Bei den Versuchsstufen 15, 16 und 17 wird, wie in Abbildung 6.4 dargestellt, bei konstanter Reibarbeit die Reibleistung gesteigert. In den Detailansichten des Thermoelementes 1 wird die Steigerung der Reibleistung dadurch

deutlich, dass die Maximaltemperatur der faseroptischen Messtechnik von  $\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , über  $\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis hin zu  $\sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$  sich kontinuierlich erhöht. Im Vergleich dazu ist die Steigerung der Maximaltemperatur des Thermoelementes 1 deutlich geringer. Der Titel der Abbildung 6.6 bis Abbildung 6.12 beschreibt dabei welches Thermoelement mit welchen drei gemittelten Messpunkten der jeweiligen Messstrecke verglichen wurden. Zum Beispiel steht „Comparison T1 / fiber section 15 #17/18/19“ für den Vergleich von Thermoelement T1 mit dem Mittelwert von Messpunkten 17,18 und 19 von Messstrecke 15, siehe Abbildung 6.5.

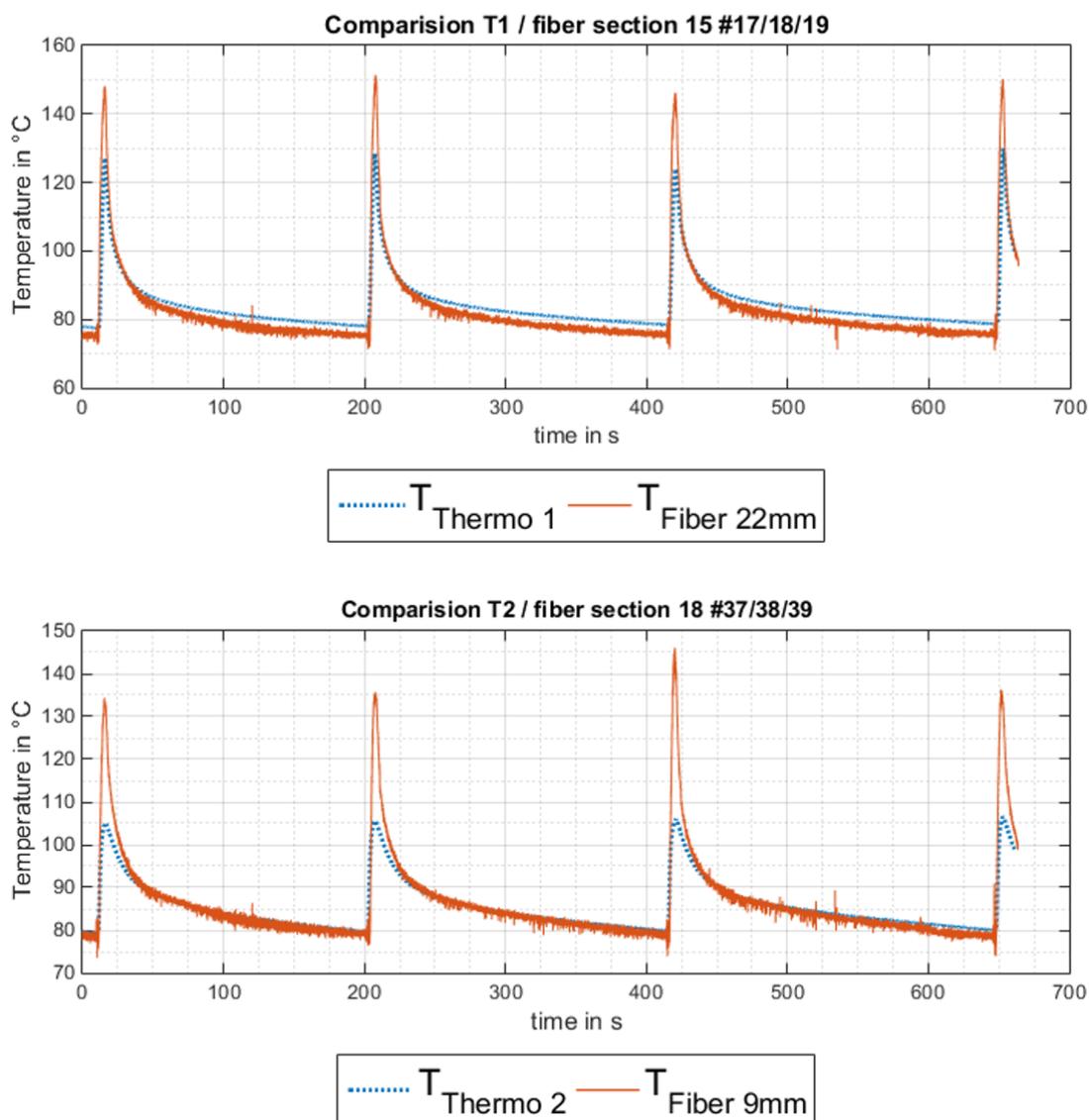


Abbildung 6.6: Vergleich zwischen Sensorfaser- mit Thermoelementtemperatur für Versuchsstufe 4<sup>282</sup>

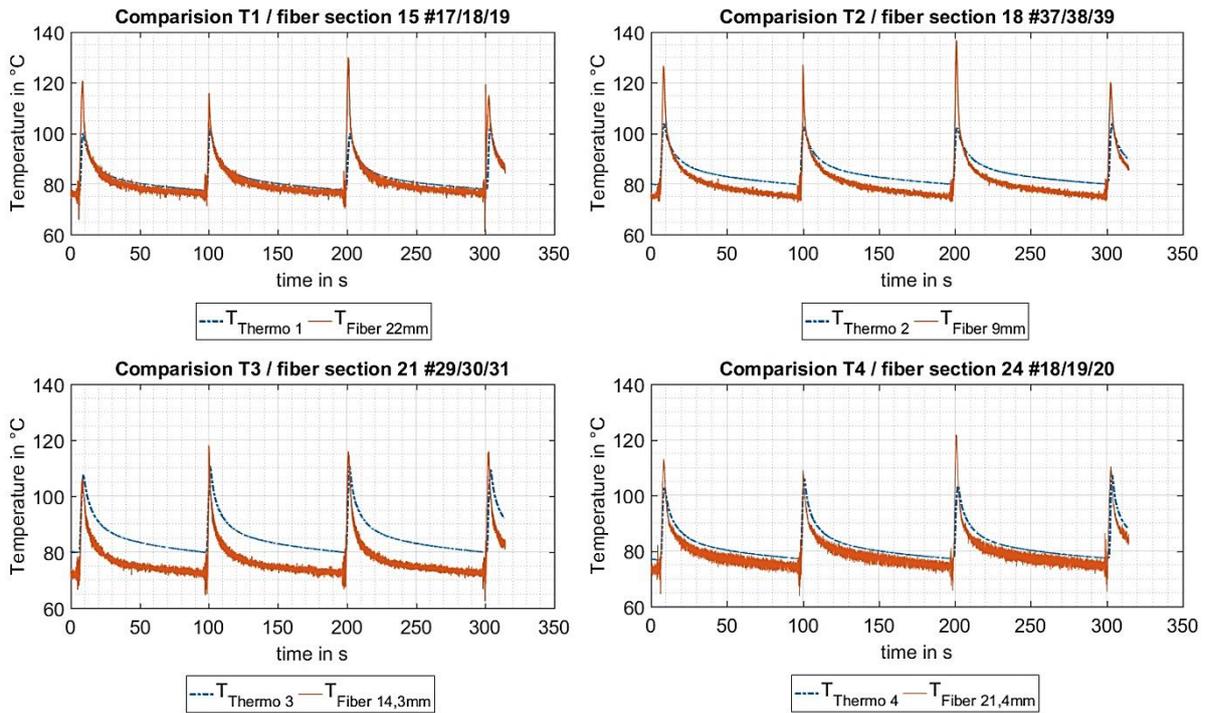


Abbildung 6.7: Vergleich zwischen Sensorfaser- mit Thermoelementtemperatur für Versuchsstufe 15

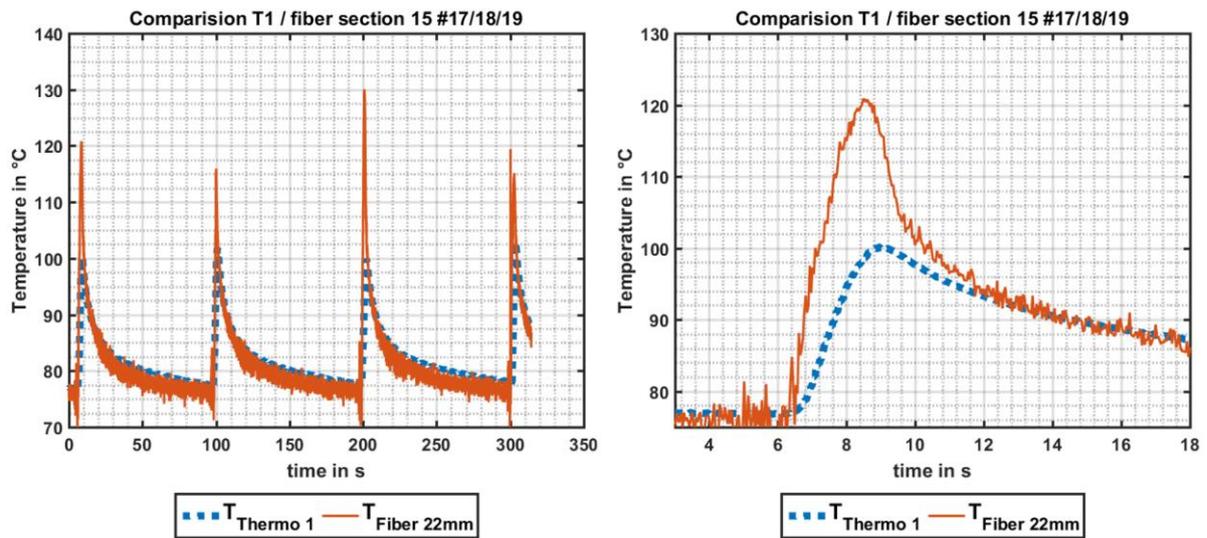


Abbildung 6.8: Detailansicht Temperaturvergleich Versuchsstufe 15<sup>283</sup>

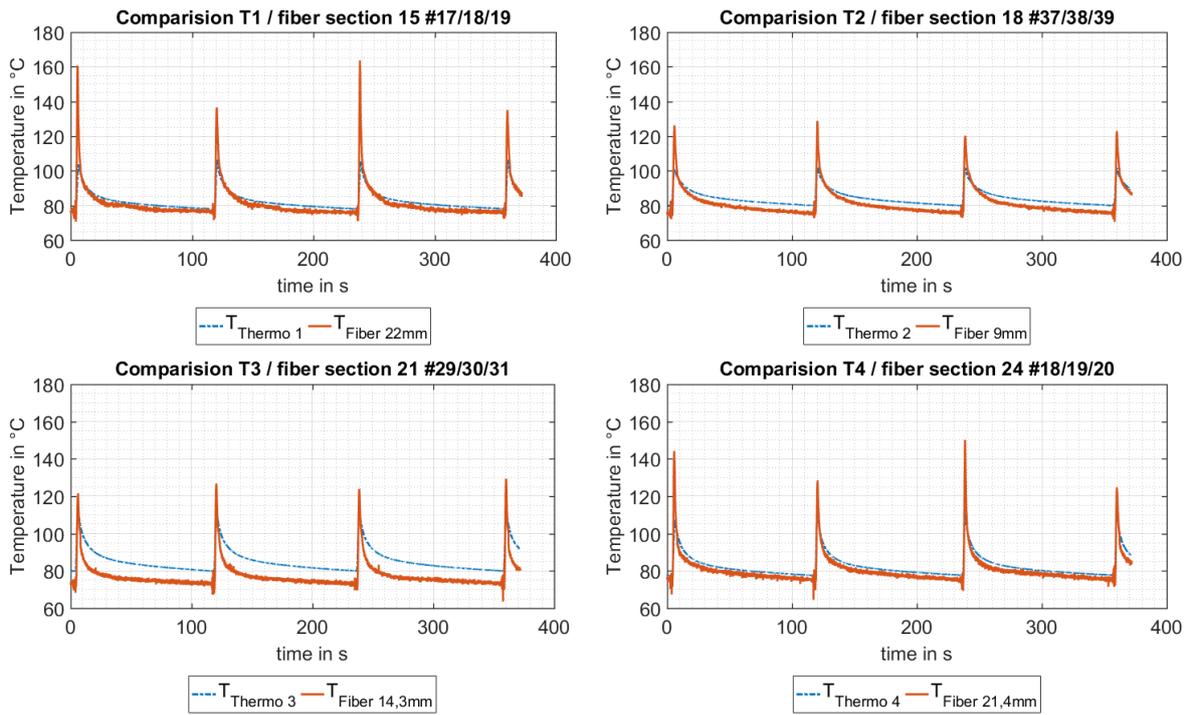


Abbildung 6.9: Vergleich zwischen Sensorfaser- mit Thermoelementtemperatur für Versuchsstufe 16

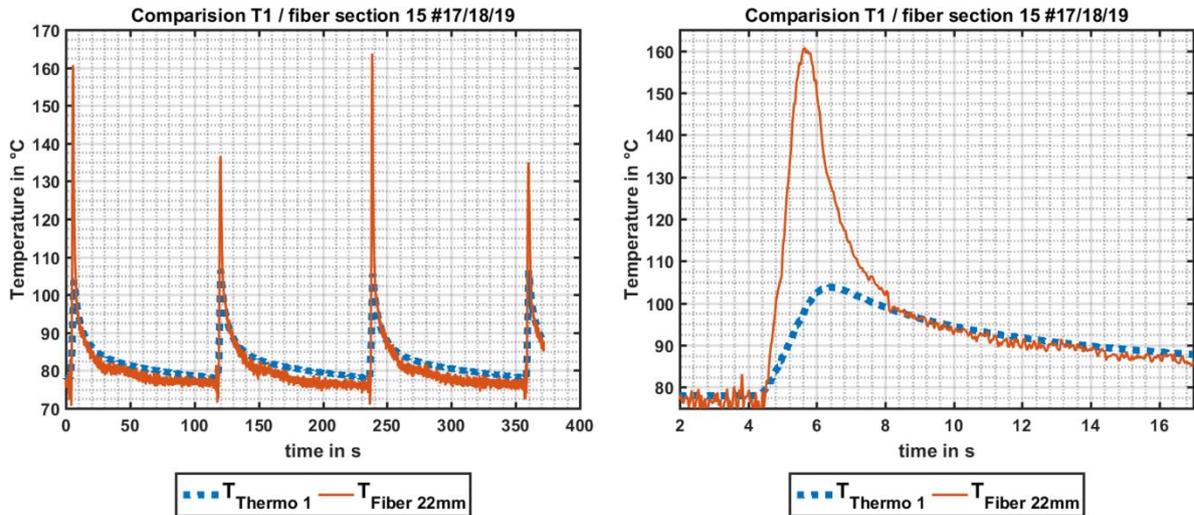


Abbildung 6.10: Detailansicht Temperaturvergleich Versuchsstufe 16<sup>284</sup>

<sup>284</sup> Albers et al., 2016c, S. 11

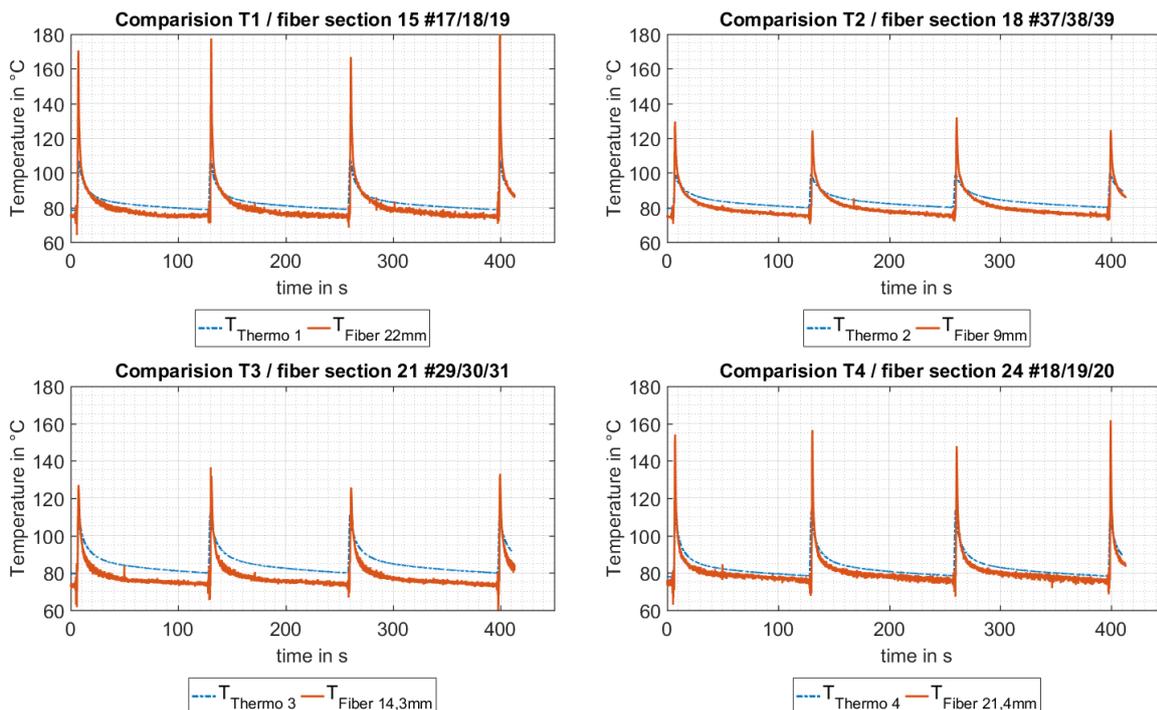


Abbildung 6.11: Vergleich zwischen Sensorfaser- mit Thermoelementtemperatur für Versuchsstufe 17

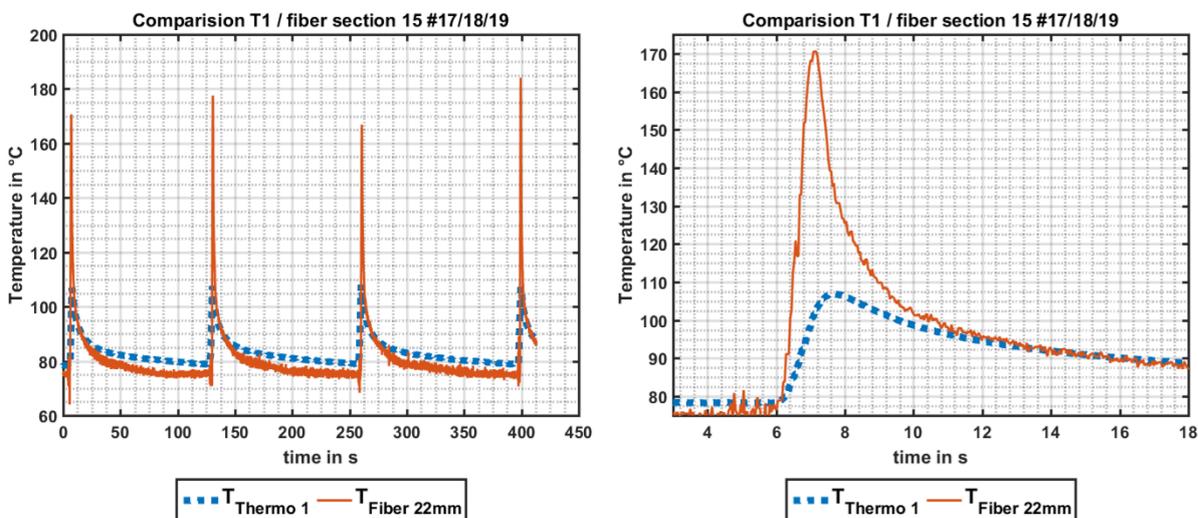


Abbildung 6.12: Detailsicht Temperaturvergleich Versuchsstufe 17<sup>285</sup>

Ebenfalls ein Argument für die korrekte Erfassung der Temperatur mittels faseroptischer Sensorik sind die Temperaturverläufe in Abbildung 6.13 und Abbildung 6.14. In Abbildung 6.13 ist der zeitliche Verlauf der Temperatur des Messpunktes auf Durchmesser 168,56 mm aller 28 Messstrecken aufgetragen. Die erste Bremsung ist zusätzlich vergrößert dargestellt. Durch die farbige Kennzeichnung der unterschiedlichen Abstände zur Reibfläche ist gut zu erkennen, dass die Messstellen welche 0,3 mm von der Reibfläche entfernt sind am schnellsten einen Temperaturanstieg detektieren und die höchsten Absoluttemperaturen zeigen. Beachtlich dabei ist die Differenz der erfassten Temperaturen zwischen den Messstrecken nahe am Reibkontakt und denen mit 4,0 mm Abstand. Da dies nur das Verhalten für diesen Durchmesser beschreibt, ist in Abbildung 6.14 die Temperaturverteilung über dem Durchmesser für zwei Zeitpunkte aufgetragen. Der erste Zeitpunkt ist kurz vor Erreichung der Maximaltemperatur der Bremsung zum Zeitpunkt 15,69 s und zeigt eine Temperaturverteilung mit drei lokalen Hochpunkten. Die Messstrecken welche sich 4,0 mm unter der Reibfläche befinden, zeigen zu diesem Zeitpunkt nur einen sehr geringen Temperaturanstieg im Vergleich zur Starttemperatur von  $T_{start} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zum Zeitpunkt 18,83 s beginnen sich alle Temperaturen aneinander anzugleichen. Die Temperaturverteilung über den Durchmesser zeigt nur noch einen Hochpunkt und die Temperaturen aller Messtiefen zeigen qualitativ denselben Verlauf. Da die erfassten Temperaturen mit den Erwartungen der physikalischen Modelle aus Abschnitt 5.1 übereinstimmen, kann dies als weitere Bestätigung der validen Erfassung der Temperaturverteilung mit der verteilt messenden faseroptischen Sensorik angesehen werden.

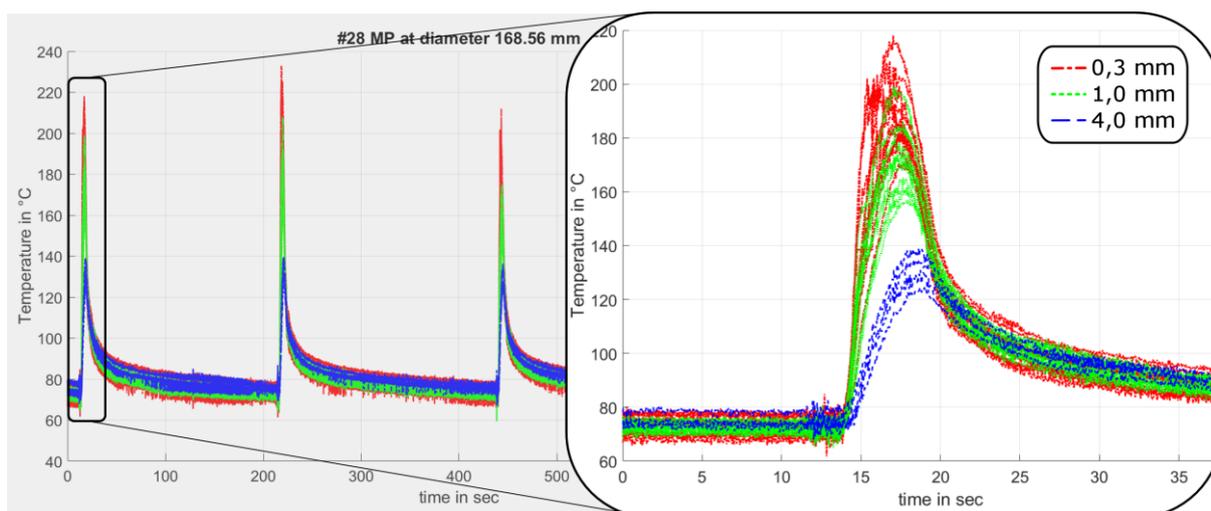


Abbildung 6.13: Zeitschrieb aller Temperaturen erfasst auf Durchmesser 168,56 mm<sup>286</sup>

<sup>286</sup> Albers et al., 2016a, S. 482

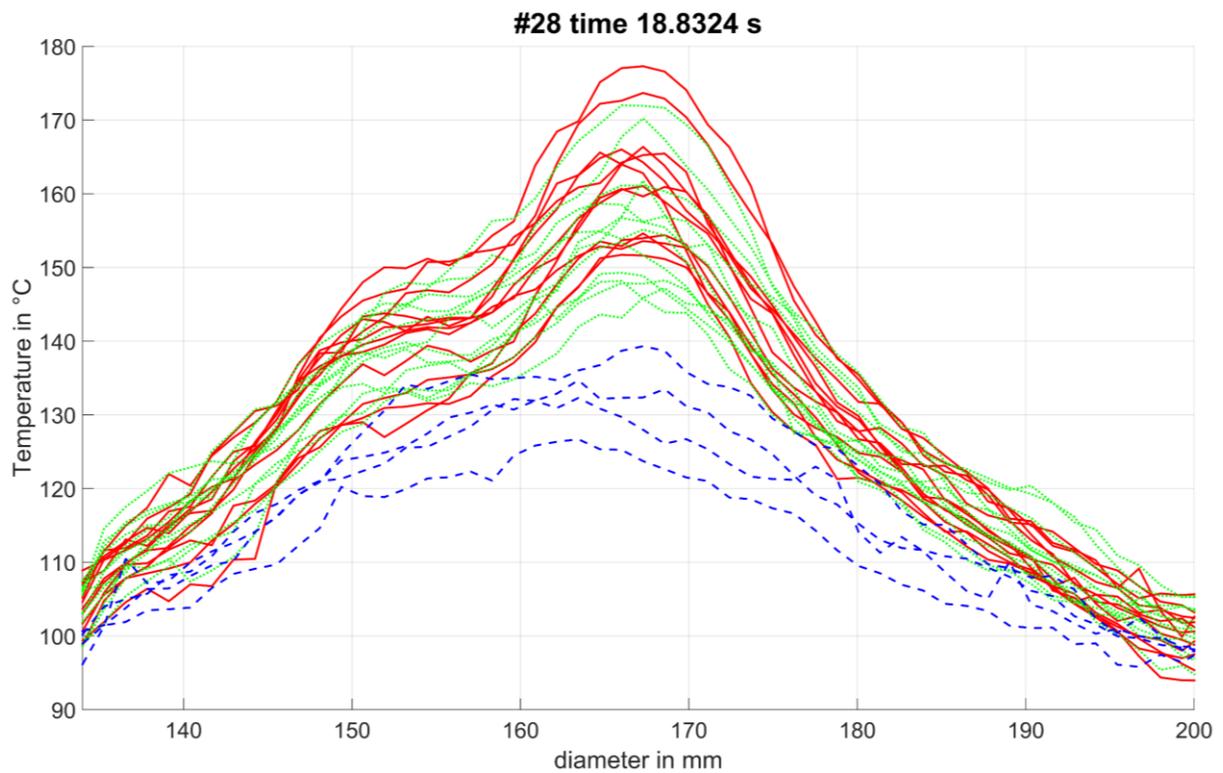
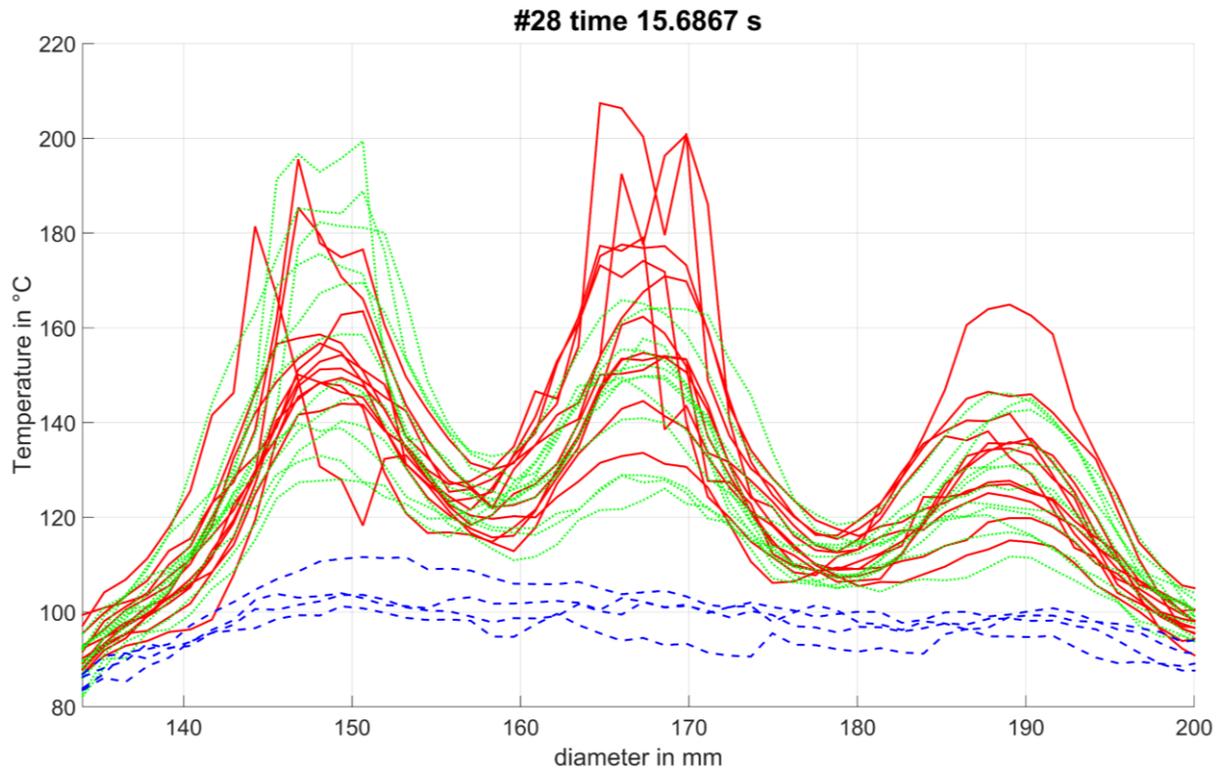


Abbildung 6.14: Alle Messpunkte über den Durchmesser aufgetragen für zwei Zeitpunkte<sup>287</sup>

<sup>287</sup> Albers et al., 2016a, S. 482

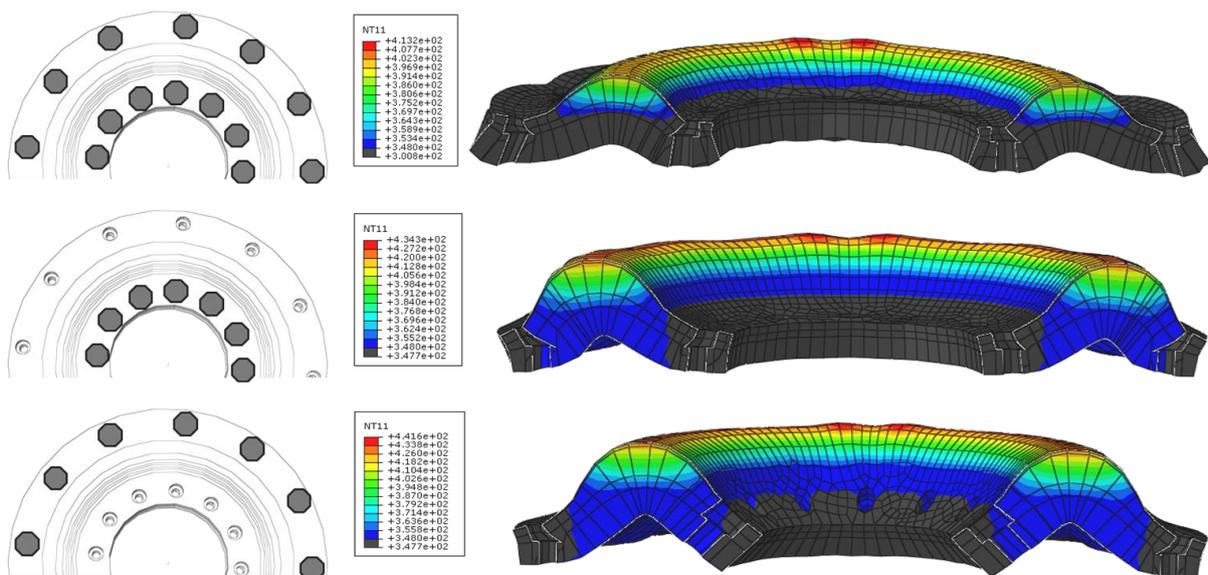
### 6.1.3 Analyse unterschiedlicher Verschraubungssituationen

Bei dem vorgestellten Aufbau war es zusätzlich möglich die Verschraubung der Anpressplatte mit der Trägerscheibe zu verändern. In Abbildung 6.15 sind die drei möglichen Verschraubungssituationen dargestellt. Durch das mögliche Einschränken oder Freigeben von Freiheitsgraden sollte sich das thermomechanische Verhalten der Anpressplatte verändern. Diesen Einfluss der Verschraubungssituation auf das zu erwartende thermomechanische Verhalten hat MERKEL<sup>288</sup> bereits simulativ untersucht. In Abbildung 6.16 ist als Ergebnis der Berechnung der Verschiebungen normal zur Wirkfläche durch thermomechanische Verformung dargestellt. Ergebnis der Berechnung der Verschraubungssituation war, dass die beidseitig verschraubte Anpressplatte die geringste axiale Verformung von Bereichen der Reibfläche während der Schlupfphase zeigt, welche letztlich zu einer inhomogenen Anpresskraftverteilung führen. Somit müsste die gemessene Maximaltemperatur für die innen und außen verschraubte Variante am geringsten sein.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der FE-Berechnung der unterschiedlichen thermomechanischen Verschiebungen für die drei Verschraubungssituationen experimentell bestätigt werden. Dazu wird dieselbe Versuchsstufe für alle drei Varianten durchgeführt. Da diese Versuchsstufen direkt aufeinanderfolgend gefahren wurden und die Verschraubung nur so geändert wurde, dass immer mehrere Schrauben die Anpressplatte in ihrer Position hielten, wird davon ausgegangen, dass ein Montageeinfluss vernachlässigt werden kann. Zum Beispiel wurde bei dem Wechsel von nur innen auf nur außen verschraubt zuerst die Schrauben außen angezogen und danach die Schrauben innen entfernt. Anhand der Messdaten aus Versuchsstufe 4 wird der Einfluss des thermomechanischen Verhaltens erläutert. In Versuchsstufe 4 werden  $37,01 \text{ kJ}$  ( $2,14 \text{ J/mm}^2$ ) Reibarbeit in das Wirkflächenpaar eingebracht, bei einer maximalen Reibleistung von  $11,62 \text{ kW}$  ( $0,67 \text{ W/mm}^2$ ).

---

<sup>288</sup> Merkel, 2015, S. 56 ff.

Abbildung 6.15 Unterschiedliche Anschraubsituationen der Anpressplatte<sup>289</sup>Abbildung 6.16: Ergebnisse der FE-Berechnung der unterschiedlichen Verschraubungssituationen<sup>290</sup>

Wie aus dem vorangegangenen Abschnitt hervorgeht, ist es für den Vergleich der unterschiedlichen Verschraubungssituationen sinnvoll sich die Messstreifen anzuschauen, welche den geringsten Abstand zur Reibfläche haben. Mit diesen Messstreifen ist es am besten möglich, die im Wirkflächenpaar entstehende Temperaturverteilung zu erfassen. Deshalb sind in Abbildung 6.17 die Maximalwerte der Messstreifen mit einem Abstand von  $0,3 \text{ mm}$  zur Reibfläche in einem Kontourplot

<sup>289</sup> Albers et al., 2016a, S. 480. Ins Deutsche übersetzt.

<sup>290</sup> Zusammengestellt aus Merkel, 2015, S. 59

aufgetragen. Dargestellt sind für jede Verschraubungssituation 8 s der vierten und damit letzten Bremsung des jeweiligen Zyklus. Der Bereich der Temperaturskala ist bei allen Diagrammen gleich gewählt. Wie durch die Berechnung vorhergesagt, zeigt die innen- und außenverschraubte Variante die niedrigste Maximaltemperatur. Anhand des Kontourplots kann dies mit der besten Verteilung der eingetragenen Temperatur erklärt werden. Bei den beiden an nur einer Position verschraubten Varianten konzentrieren sich die Stellen in einem schmälere Bereich über den Durchmesser. Dies lässt darauf schließen, dass bei Verschraubungsvarianten 2 und 3 die eingetragene Energie durch eine kleinere Fläche aufgenommen wird als bei Variante 1 und sich somit dort eine höhere Temperatur einstellt.

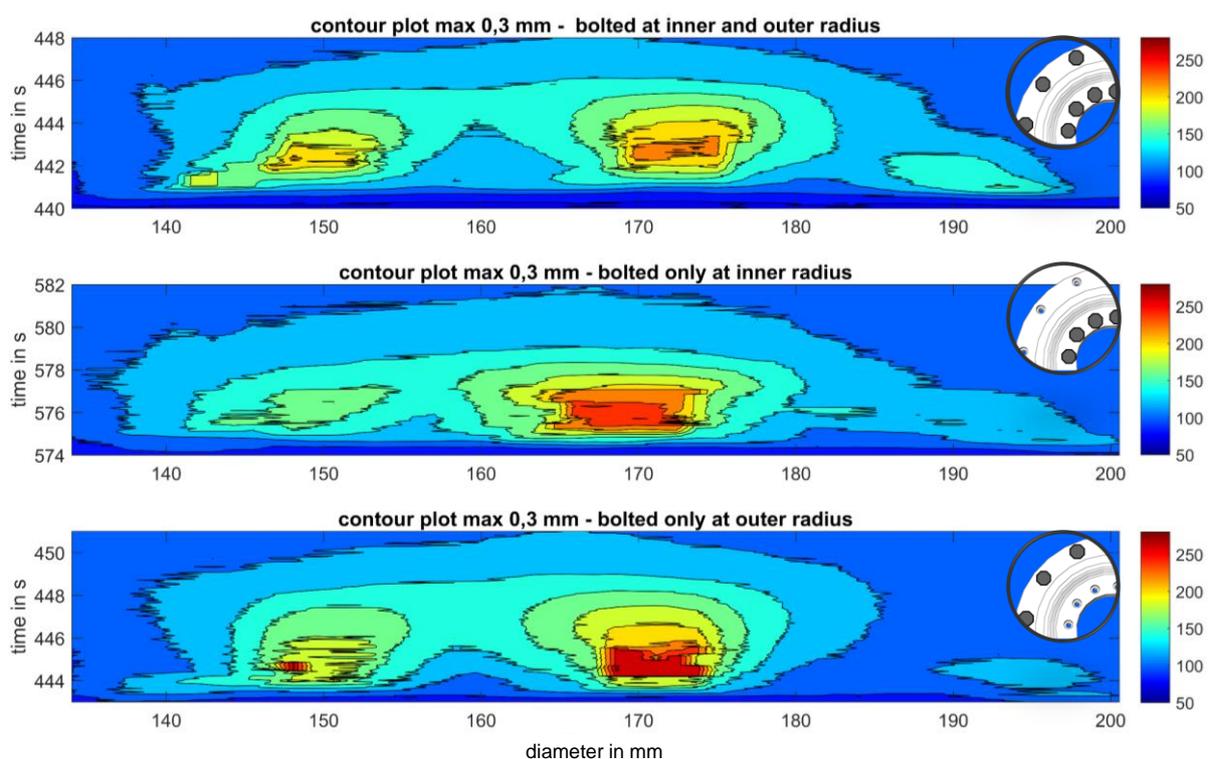


Abbildung 6.17: Maximalwerte der Messstrecken 0,3 mm unter der Reibfläche bei den drei Verschraubungssituationen<sup>291</sup>

#### 6.1.4 Analyse unterschiedlicher Reibleistungen

In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, dass die faseroptische Messtechnik auch zeitlich kurze Bremsungen, bei hoher Reibleistung, erfassen kann. Dazu soll bei gleichbleibender Reibarbeit die Zeit, die das Kupplungssystem zum Abbremsen des Reibelags benötigt, verkürzt werden, was durch eine Erhöhung der Flächenpressung erreicht wird. Dazu werden nachfolgend die Versuchsstufen 15, 16 und 17 miteinander verglichen. Die Anpressplatte war dabei immer Innen und Außen verschraubt. Die eingestellten Belastungsparameter sind in Tabelle 5 aufgelistet.

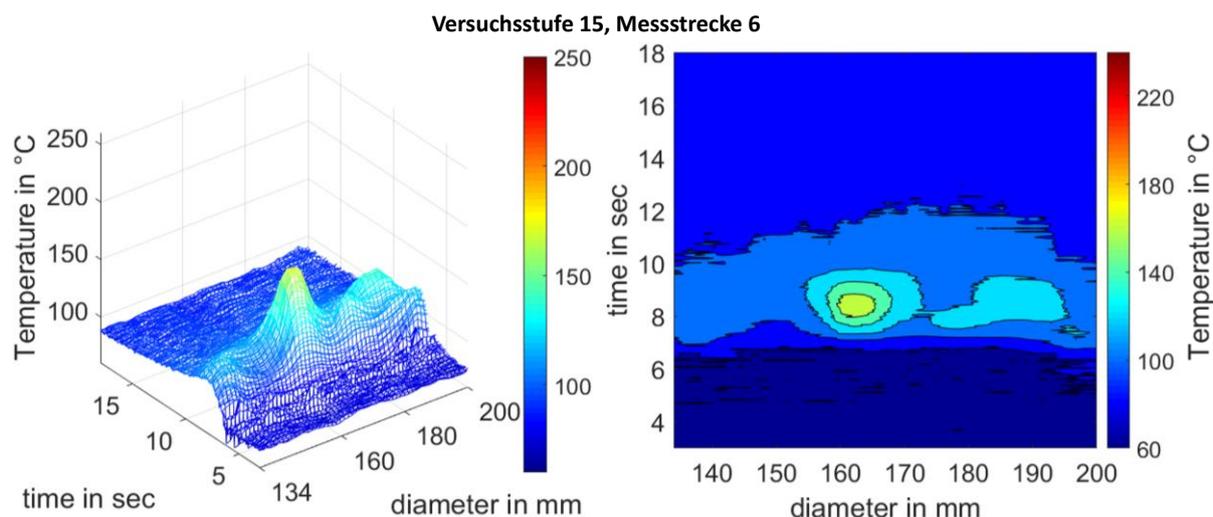
<sup>291</sup> Albers et al., 2016a, S. 483

Tabelle 5: Belastungsparameter Versuchsstufe 15, 16 und 17

Versuchsstufe	Drehzahl in $U/min$	Flächenpress- ung in $N/mm^2$	Massenträgheit in $kgm^2$	Reibenergie in $kJ$	Reibleistung in $kW$
15	2.000	0,11	0,85	18,64	12,4
16	2.000	0,23	0,85	18,64	24,8
17	2.000	0,35	0,85	18,64	37,2

Auch an dieser Stelle soll wieder ein Vergleich der Temperaturverteilungen anhand von Kontourplots durchgeführt werden. In den Abbildungen 6.10, 6.11 und 6.12 ist jeweils das 3D-Diagramm und der zugehörige Kontourplot für eine Bremsung für die Messstrecke 6 dargestellt. Diese Messstrecke ist  $0,3\text{ mm}$  von der Reibfläche entfernt. Der Bereich der Temperaturskala ist bei allen Abbildungen derselbe, genauso wie in allen Abbildungen ein Zeitraum von  $15\text{ s}$  dargestellt ist. Zuerst kann festgehalten werden, dass die Temperaturverteilung aller Versuchsstufen mit der faseroptischen Messtechnik erfasst werden kann. Dabei betrug bei Versuchsstufe 17 die Zeit zum Abbremsen des Reibbelages von  $2.000\text{ }U/min$  auf  $0\text{ }U/min$  gerade einmal  $\sim 0,9\text{ s}$ . Die erwartete Verkürzung der Zeit in der die Reibarbeit in das System eingetragen wird, ist auch im Messschrieb der Temperatur gut ersichtlich.

Besonders bei der Versuchsstufe 17 wird zusätzlich die ineffektive Nutzung der prinzipiell zur Verfügung stehenden Wirkfläche aufgezeigt. Aus der Temperaturverteilung über den Radius kann man schlussfolgern, dass allein der Bereich von Durchmesser  $150 - 160\text{ mm}$  aktiv am Reibprozess beteiligt ist.

Abbildung 6.18: 3D-Diagramm und Kontourplot der Messstrecke 6 bei Versuchsstufe 15<sup>292</sup>

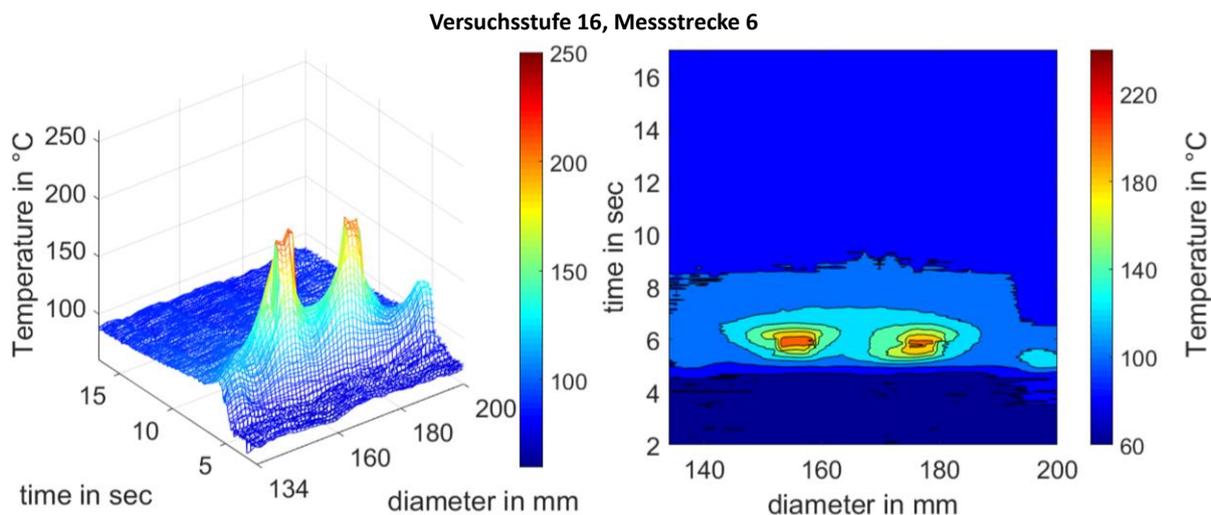


Abbildung 6.19: 3D-Diagramm und Konturplot der Messstrecke 6 bei Versuchsstufe 16<sup>293</sup>

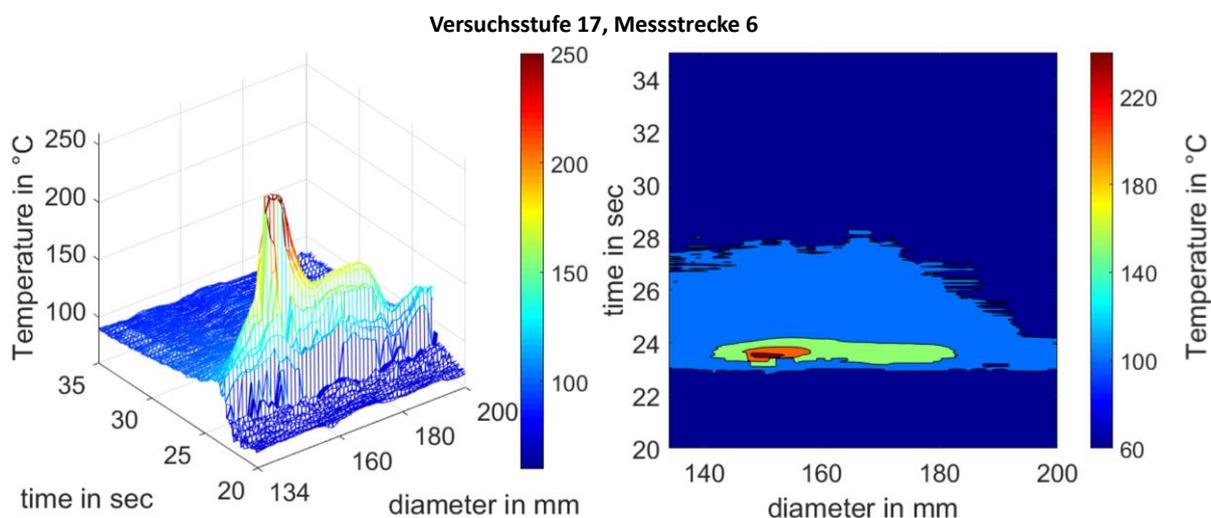


Abbildung 6.20: 3D-Diagramm und Konturplot der Messstrecke 6 bei Versuchsstufe 17<sup>294</sup>

### 6.1.5 Analyse der Homogenität der Temperaturverteilung

Im Folgenden soll eine weitere Möglichkeit erläutert werden die Temperaturverteilung zu bewerten. Um eine vergleichende Bewertung von einer Vielzahl an Versuchsstufen durchführen zu können, ist es notwendig eine bewertbare Zielgröße festzulegen. Aus dem Stand der Forschung ist bezüglich der Bewertung der Temperaturverteilung keine standardisierte Größe vorhanden, wie z.B. Reibungszahl und Reibungszahlgradient. In den Arbeiten zur Analyse des thermischen Verhaltens, siehe Abschnitt 2.4, findet die Bewertung der Temperaturverteilung ausschließlich an händisch ausgewählten Messpunkten oder Zeitpunkten statt. Da die verwendete faseroptische Messtechnik für jeden Zeitschritt über 1.400 Temperaturmesspunkte erfasst, bei einer Abtastrate von 23,5 Hz, ist das Auswählen bestimmter Messstrecken, Messpunkte oder Zeitpunkte

<sup>293</sup> Albers et al., 2017c, S. 8

<sup>294</sup> Albers et al., 2017c, S. 8

per Hand nicht zielführend. Daher ist es für die vergleichende Bewertung der durchgeführten Versuchsstufen notwendig, eine bewertbare Zielgröße zu entwickeln. Wenn durch eine solche Zielgröße eine besonders auffällige Versuchsstufe gefunden wird, kann diese dann im Detail analysiert werden. Dazu ist es sinnvoll die Messdaten von Hand im Detail zu sichten und in Form von 3D-Diagrammen, Kontourplots, Videos der gemessenen Temperaturentwicklung oder ähnlichem darzustellen, um das Verhalten in dieser Stufe zu analysieren. In Abbildung 6.21 sind die ermittelten Messdaten eines Zeitpunktes auf den Reibring projiziert. Erstellt man eines der beiden Diagramme für jeden Zeitpunkt, kann dies zu einem Video zusammengefügt werden. Ein Video bietet den Vorteil, dass man sich den zeitlichen Verlauf der Temperaturverteilung projiziert auf die vorliegende Geometrie in beliebiger Geschwindigkeit anschauen und somit leicht Bereiche hoher Temperaturen über Umfang und Radius erkennen kann.

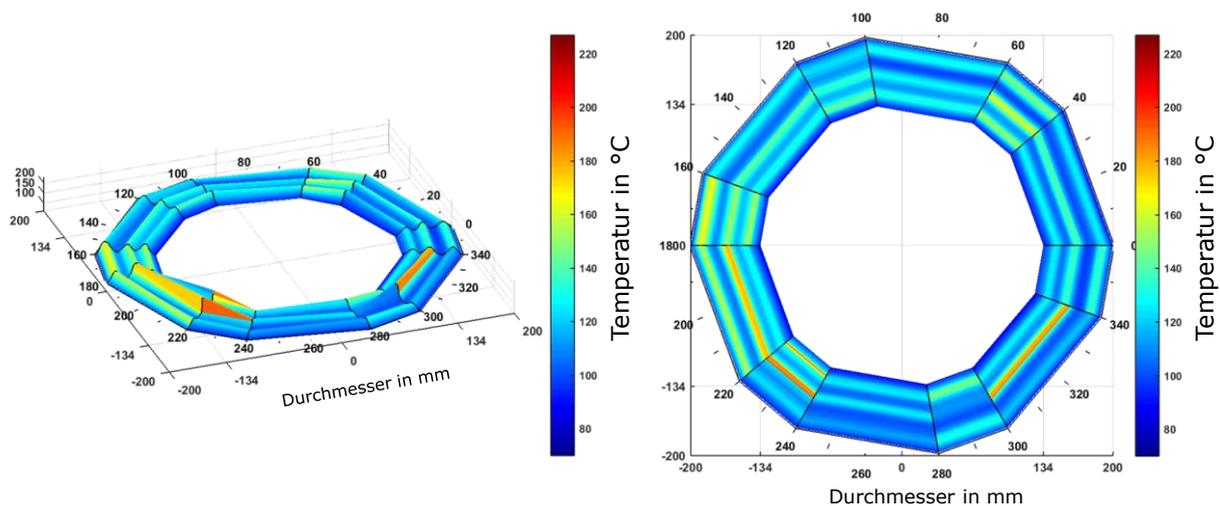


Abbildung 6.21: Darstellung der Temperaturverteilung auf dem Reibring für einen Zeitpunkt<sup>295</sup>

Der für den nachfolgenden Vergleich gewählte Ansatz ist die Bewertung der Homogenität der Temperaturverteilung. Mit anderen Worten: Ein Reibsystem wird dann optimal ausgenutzt, wenn alle Bereiche der Reibfläche so beansprucht werden, dass die Temperatur über die Reibfläche hinweg überall gleich ist. Die Temperaturverteilung wäre dann homogen.

In Abbildung 6.22 wird die Zuordnung der Messdaten zu Radius und Umfang visualisiert, um die in Abschnitt 6.1.5 folgende Analyse der Homogenität der Temperaturverteilung nachvollziehen zu können.

<sup>295</sup> Albers et al., 2017a, S. 7

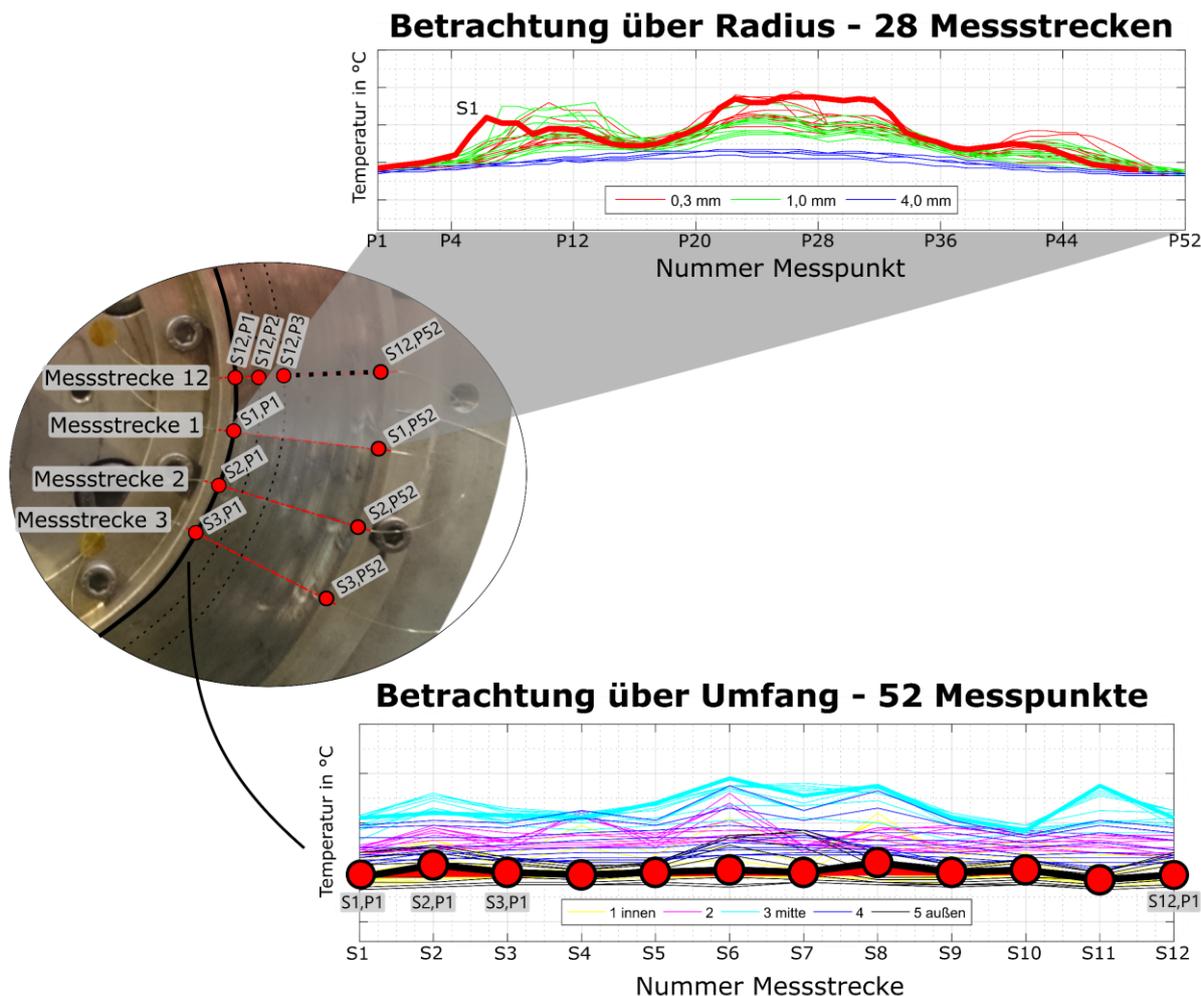


Abbildung 6.22 Erklärung zum Vorgehen der Auswertung der Temperaturverteilung über Radius und Umfang<sup>296</sup>

Um die Homogenität einer Versuchsstufe anhand eines Kennwertes bewerten und mit anderen Stufen vergleichen zu können, wurde die im Folgenden beschriebene Auswertung entwickelt, siehe Abbildung 6.25. Das erste Diagramm in Abbildung 6.25 beschreibt die Abweichung von Radius und Umfang über der Zeit. Dazu wird die Abweichung über den Radius für jeden Zeitpunkt berechnet, indem für jede Messstrecke die Summe aus der Differenz von maximal auftretender Temperatur und jedem Messpunkt dieser Strecke gebildet wird. Anschließend werden alle Summen wiederum addiert. Die Berechnungsvorschrift wurde in MATLAB wie in Abbildung 6.23 gezeigt umgesetzt. Die Variable „Messstrecken“ ist ein 28x1 cell array, welche die Daten der Temperaturmessung der 28 Messstrecken beinhaltet.

<sup>296</sup> Albers et al., 2017b, S. 5

```

% Homogenitätssumme über Radius

%Schleife, um alle aufgezeichneten Zeitpunkte durchzulaufen
for i_step = 1:length(Messstrecken{1,1})
    %Schleife, um die Messstrecken 1 bis 12 durchzulaufen.
    %Diese befinden sich 0,3 mm unter der Reibfläche
    for i_strecke = 1:12
        %Schleife, um die Messpunkte der jeweiligen Messstrecke durchzulaufen
        for i_mp = 1:length(Messstrecken{1,1}(1,:))
            temp_max_value_step_strecke(i_mp) = Messstrecken{i_strecke,1}(i_step,i_mp);
        end
        max_value_step_strecke(i_step,i_strecke) = max(temp_max_value_step_strecke);
        diff_max_step_strecke(i_step,i_strecke) =
            sum(max_value_step_strecke(i_step,i_strecke) -
                Messstrecken{i_strecke,1}(i_step,:));
    end
    homogenitaetssumme_radius(i_step,1) = sum(diff_max_step_strecke(i_step,:))/12/53;
end

```

Abbildung 6.23 Berechnungsvorschrift Homogenitätssumme über Radius

Die Berechnung der Abweichung über den Umfang verläuft analog, nur das hier z.B. die Summe der Differenz des Maximalwertes aller Messpunkte Nummer 1 aller Messstrecken und von allen Messpunkten Nummer 1 bestimmt wird und anschließend die Summen aller Umfangsmesspunkte aufsummiert. Beide Ergebnisse werden dann noch mit der Gesamtanzahl an Messpunkten normiert und über der Zeit aufgetragen, siehe Abbildung 6.24.

```

% Homogenitätssumme über Umfang

%Schleife, um alle aufgezeichneten Zeitpunkte durchzulaufen
for i_step = 1:length(Messstrecken{1,1})
    %Schleife, um die Messpunkte der jeweiligen Messstrecke durchzulaufen
    for i_mp = 1:length(Messstrecken{1,1}(1,:))
        %Schleife, um die Messstrecken 1 bis 12 durchzulaufen.
        %Diese befinden sich 0,3 mm unter der Reibfläche
        for i_strecke = 1:12
            temp_max_value_step_mp (i_strecke) =
                Messstrecken{i_strecke,1}(i_step,i_mp);
        end
        max_value_step_mp(i_step,i_mp) = max(temp_max_value_step_mp);
        diff_max_step_mp(i_step,i_mp) = sum(max_value_step_mp(i_step,i_mp) -
            temp_max_value_step_mp);
    end
    homogenitaetssumme_umfang(i_step,1) = sum(diff_max_step_mp(i_step,:))/12/53;
end

```

Abbildung 6.24 Berechnungsvorschrift Homogenitätssumme über Umfang

Für die in Abbildung 6.25 dargestellte Versuchsstufe 4 ist deutlich zu erkennen, dass die Abweichung und somit die Inhomogenität über den Radius deutlich größer ist als die über den Umfang. Deshalb werden im Weiteren nur die Temperaturverläufe über den Radius analysiert. Das mittlere Diagramm aus Abbildung 6.25 zeigt alle 28 Messstrecken über dem Durchmesser zum Zeitpunkt der maximal auftretenden Temperatur. Aufgetragen werden alle Messstrecken über den Radius zu diesem Zeitpunkt. Wie zu erwarten, zeigen die Messstrecken, welche sich 0,3 mm unter der

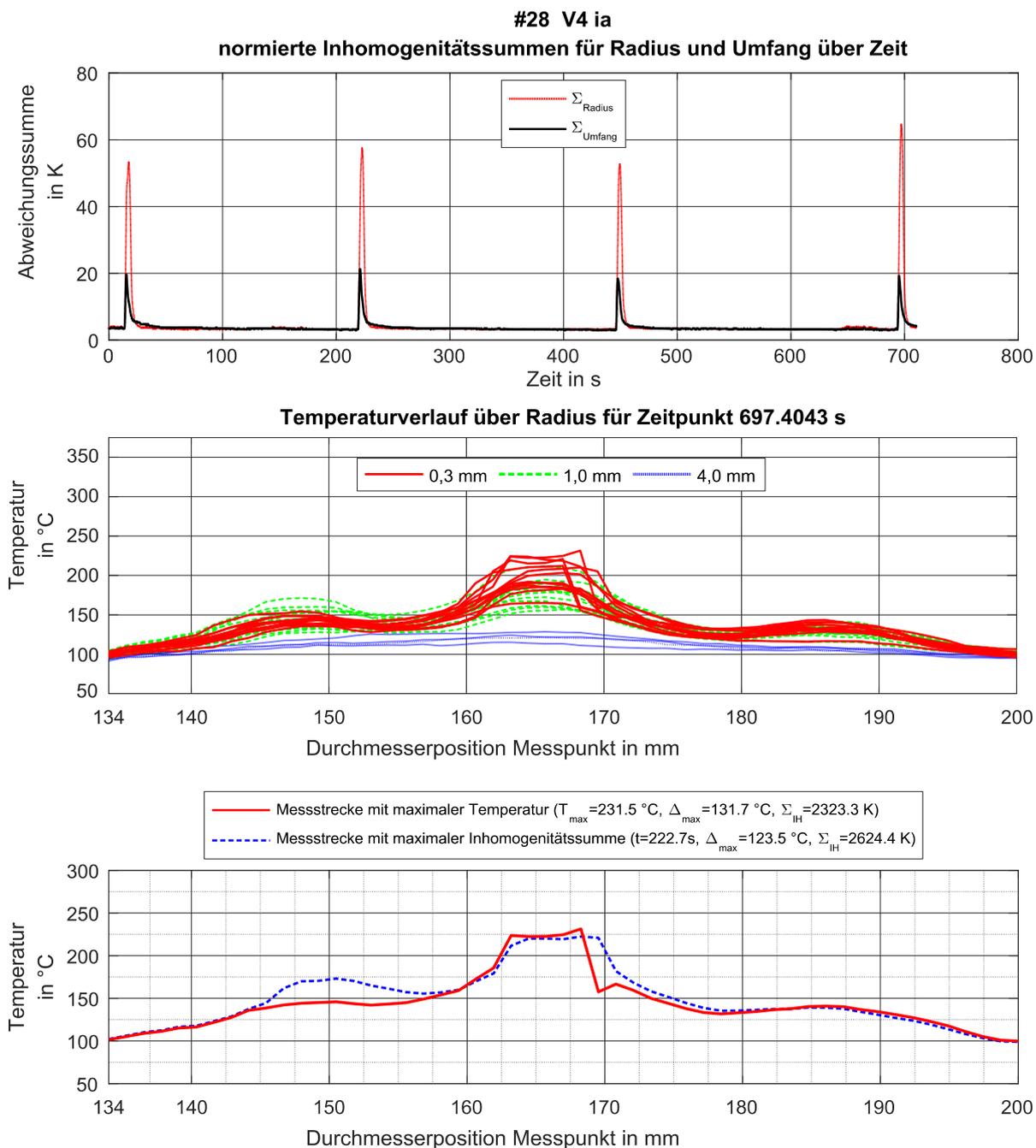


Abbildung 6.25 Auswertung der Homogenität der Temperaturverteilung<sup>297</sup>

Reibfläche befinden, die höchsten Maximaltemperaturen. Im unteren Diagramm wird dann die Messstrecke mit der maximalen Temperatur und zusätzlich noch die Messstrecke mit der höchsten Inhomogenitätssumme aufgetragen. Diese Messstrecke wird ermittelt, indem für jeden Zeitpunkt für alle Messstrecken die Inhomogenitätssumme berechnet und dann anschließend das Maximum gesucht wird. Als weitere Information wird die Maximaltemperatur, das Delta von min- zu max-Wert und der Wert der Inhomogenitätssumme im Diagramm festgehalten.

In Abbildung 6.26 ist die Ermittlung der Inhomogenitätssumme visualisiert, welche in Abbildung 6.25 im unteren Diagramm zu finden ist. Zur Berechnung der Inhomogenitätssumme wird die eingeschlossene Fläche zwischen horizontaler Linie bei der minimal auftretenden Temperatur und dem Temperaturverlauf ermittelt, siehe Abbildung 6.26. Dieser Wert ist in der Legende des Diagramms als  $\Sigma_{IH}$  festgehalten. Im besten Falle wäre die Temperatur aller Messpunkte dieselbe, was bedeuten würde, dass in Abbildung 6.26 nur eine horizontale Linie zu sehen und dann  $\Sigma_{IH} = 0$  wäre. Umso größer  $\Sigma_{IH}$  wird, umso größer ist die maximal vorliegende Inhomogenität der Temperaturverteilung.

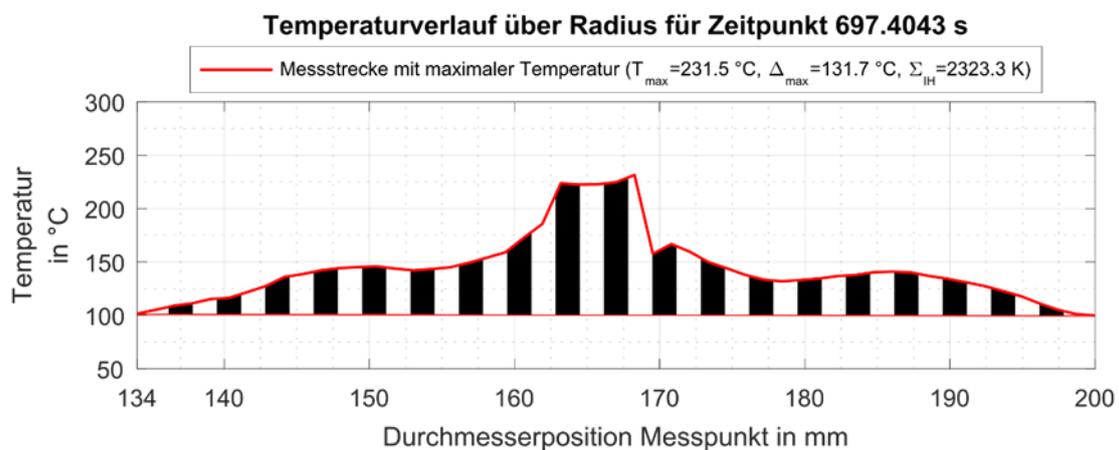


Abbildung 6.26: Ermittlung der Inhomogenitätssumme<sup>298</sup>

Die Berechnung der Inhomogenitätssumme wurde in MATLAB wie Abbildung 6.27 gezeigt umgesetzt.

```
% Zeitpunkt mit maximaler Homogenitätssumme finden
[homogenitaetssumme_radius_max,homogenitaetssumme_radius_max_t] =
max(homogenitaetssumme_radius);

% Inhomogenitaetssumme berechnen und Maximum finden
%Schleife, um alle aufgezeichneten Zeitpunkte durchzulaufen
for i_step = 1:length(Messstrecken{1,1})
    %Schleife, um die Messstrecken 1 bis 12 durchzulaufen.
    %Diese befinden sich 0,3 mm unter der Reibfläche
    for i_strecke = 1:12;
        min_value_t(i_strecke) = min(Messstrecken{i_strecke, 1}(i_step,:));
        %Schleife, um die Messpunkte der jeweiligen Messstrecke durchzulaufen
        for i_mp = 1:53
            values_inhomogenitaetssumme (i_mp) = Messstrecken{i_strecke, 1}
                (i_step,i_mp) - min_value_t(i_strecke);
        end
        area_inhomogenitaetssumme(i_step,i_strecke) = sum(values_inhomogenitaetssumme);
    end
end

[area_inhomogenitaetssumme_max, area_inhomogenitaetssumme_max_ms] =
max(area_inhomogenitaetssumme);
[area_value_plot, area_value_plot_ms] = max(area_inhomogenitaetssumme_max);
```

Abbildung 6.27 Berechnungsvorschrift Inhomogenitätssumme

<sup>298</sup> Albers et al., 2017b, S.7

### 6.1.5.1 Analyse der Homogenität über den Versuchsstufen

In Abbildung 6.28 bis Abbildung 6.30 ist der Vergleich der Inhomogenitätssummen geordnet nach den Variationsarten Gleitgeschwindigkeit, Flächenpressung und Massenträgheit dargestellt. Die Diagramme auf der linken Seite zeigen die Inhomogenitätssummen der einzelnen Versuchsstufen, die Diagramme auf der rechten Seite den Zusammenhang zwischen spez. Reibarbeit / -leistung und der Inhomogenitätssumme für die jeweilige Variationsart. Gut zu erkennen ist, dass die Inhomogenitätssumme für die untersuchte Kupplung von Stufe zu Stufe, also mit steigender Beanspruchung, zunimmt. Aus dieser Erkenntnis lässt sich für das untersuchte System schlussfolgern, dass bei größer werdender Reibarbeit die Temperaturverteilung immer stärker inhomogen wird. Dies bedeutet wiederum, dass die Prüfkupplung im kritischen Bereich hoher Reibarbeit besonders ineffizient arbeitet.

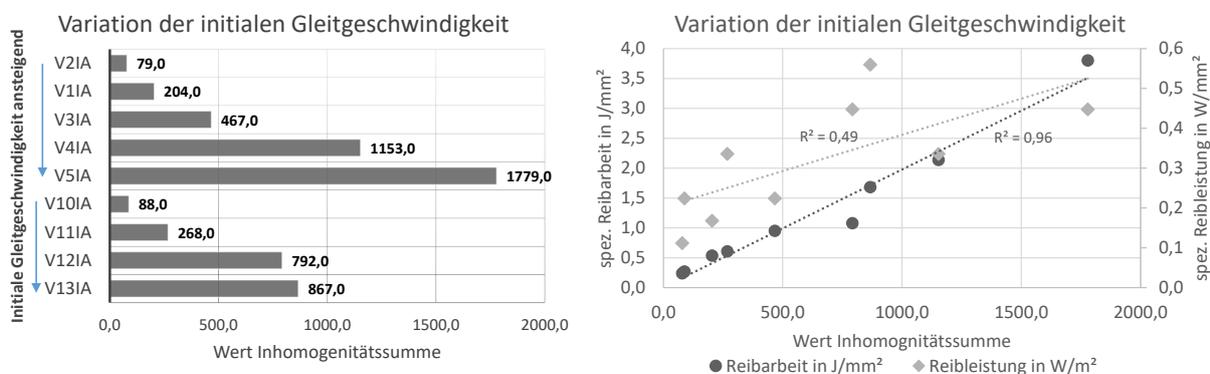


Abbildung 6.28: Inhomogenitätssummen bei Variation der initialen Gleitgeschwindigkeit<sup>299</sup>

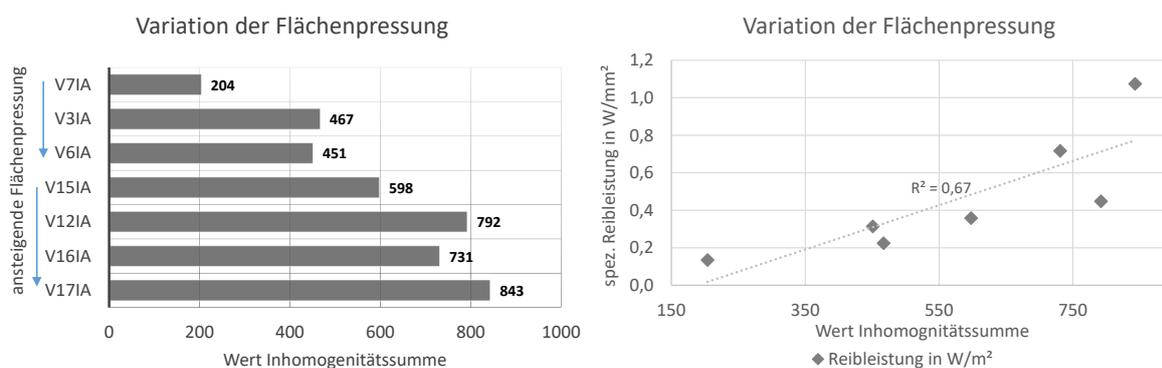
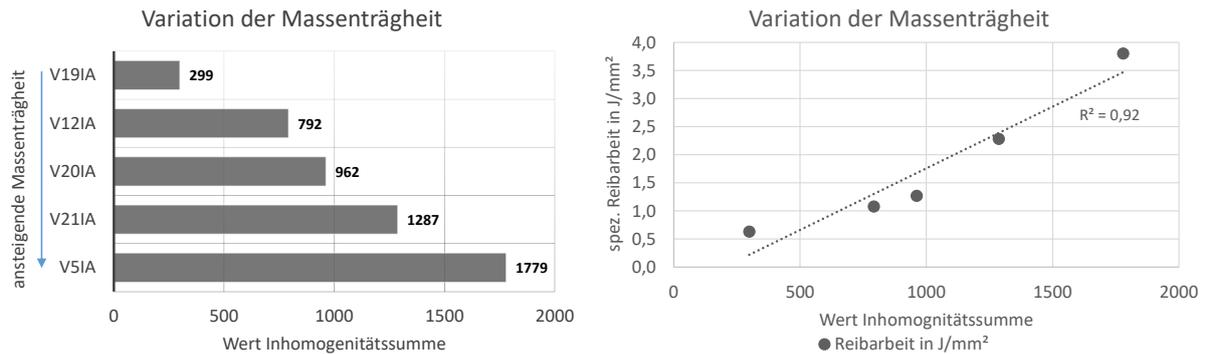


Abbildung 6.29: Inhomogenitätssummen bei Variation der Flächenpressung<sup>299</sup>

Abbildung 6.30: Inhomogenitätssummen bei Variation der Massenträgheit<sup>299</sup>

### 6.1.5.2 Analyse der Homogenität bei unterschiedlichen Anschraubsituationen

Um das Potenzial der Temperaturverteilungsmessung zur Ableitung von Maßnahmen zur Leistungssteigerung aufzeigen zu können, wird nachfolgend ein Vergleich von zwei ausgewählten Versuchsstufen bei den bereits beschriebenen unterschiedlichen Verschraubungssituationen der Anpressplatte durchgeführt.

Für die Versuchsstufen 4 und 13<sup>300</sup>, wird nachfolgend exemplarisch der Vergleich zwischen den Verschraubungssituationen durchgeführt. In Abbildung 6.31 ist dazu der Vergleich der maximalen Temperaturdifferenz und der Inhomogenitätssummen der beiden Stufen dargestellt. Ein wichtiges Kriterium zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Reibsystems ist neben der Inhomogenitätssumme die maximale Temperaturdifferenz über Radius und Umfang. Ergänzend dazu ist die Betrachtung der sich einstellenden Maximaltemperatur sinnvoll. Ist die Temperaturdifferenz z.B. über den Radius während der Schlupfphase groß, muss davon ausgegangen werden, dass nur kleine Bereiche aktiv am tribologischen Prozess beteiligt sind. Die restliche Wirkfläche wird dann hauptsächlich durch Wärmeleitung im Bauteil erwärmt. Im Vergleich dazu kann bei geringer Temperaturdifferenz davon ausgegangen werden, dass ein großer Bereich der Reibfläche auch tatsächlich am tribologischen Prozess beteiligt ist. Dies sollte sich in der sich einstellenden Maximaltemperatur widerspiegeln. Wird die eingetragene Reibenergie auf eine große Fläche verteilt, wird sich eine kleinere Spitzentemperatur ergeben, als wenn dieselbe Energiemenge nur in einen kleinen Bereich eingetragen wird. Die maximale Temperaturdifferenz ist für beide Versuchsstufen für die innen und außen verschraubte Variante wie zu erwarten war am geringsten. In Versuchsstufe 4 ist die Inhomogenitätssumme der innen und außen verschraubten Variante ebenfalls am geringsten. Bei Versuchsstufe 13 sind die Summen der Varianten innen und außen und der nur außen verschraubten Variante nahe beieinander. Nur die nur innen verschraubte Variante zeigt in beiden Stufen größere Inhomogenitätswerte als die

<sup>300</sup> Siehe Abbildung 6.4

innen und außen verschraubte Variante. Somit kann festgehalten werden, dass um Unterschiede hinsichtlich der Leistungsfähigkeit verschiedener Varianten bewerten zu können die Kombination aus Temperaturdifferenz und Inhomogenitätssummen analysiert werden muss.

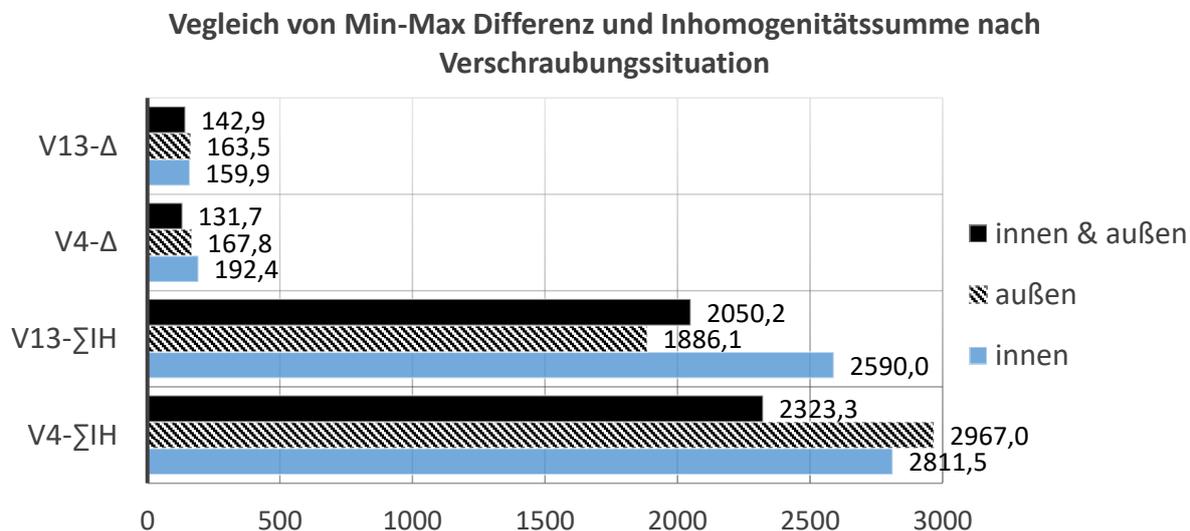


Abbildung 6.31: Min-Max Differenz und Inhomogenitätssummen nach Verschraubungssituation für 4 und 13<sup>301</sup>

Um den Vergleich der Verschraubungssituationen bewerten zu können, muss die Auswertung der Temperaturverteilung genauer betrachtet werden. In Abbildung 6.32 sind dazu die Temperverteilungen über den Radius, welche auch zur Berechnung der jeweiligen Inhomogenitätssumme verwendet wurden, von den drei unterschiedlichen Verschraubungssituationen übereinandergelegt. Das Kürzel „ia“ steht dabei für die innen und außen verschraubte, „a“ für die nur außen verschraubte und „i“ für die nur innen verschraubte Variante. Deutlich zu erkennen sind die Unterschiede in der maximal auftretenden Temperatur der unterschiedlichen Verschraubungssituationen. Als Ergebnis dieses Vergleichs kann festgehalten werden, dass die beidseitig verschraubte Anpressplatte bei beiden Versuchsstufen die geringste Maximaltemperatur aufweist.

<sup>301</sup> Albers et al., 2017a, S. 12

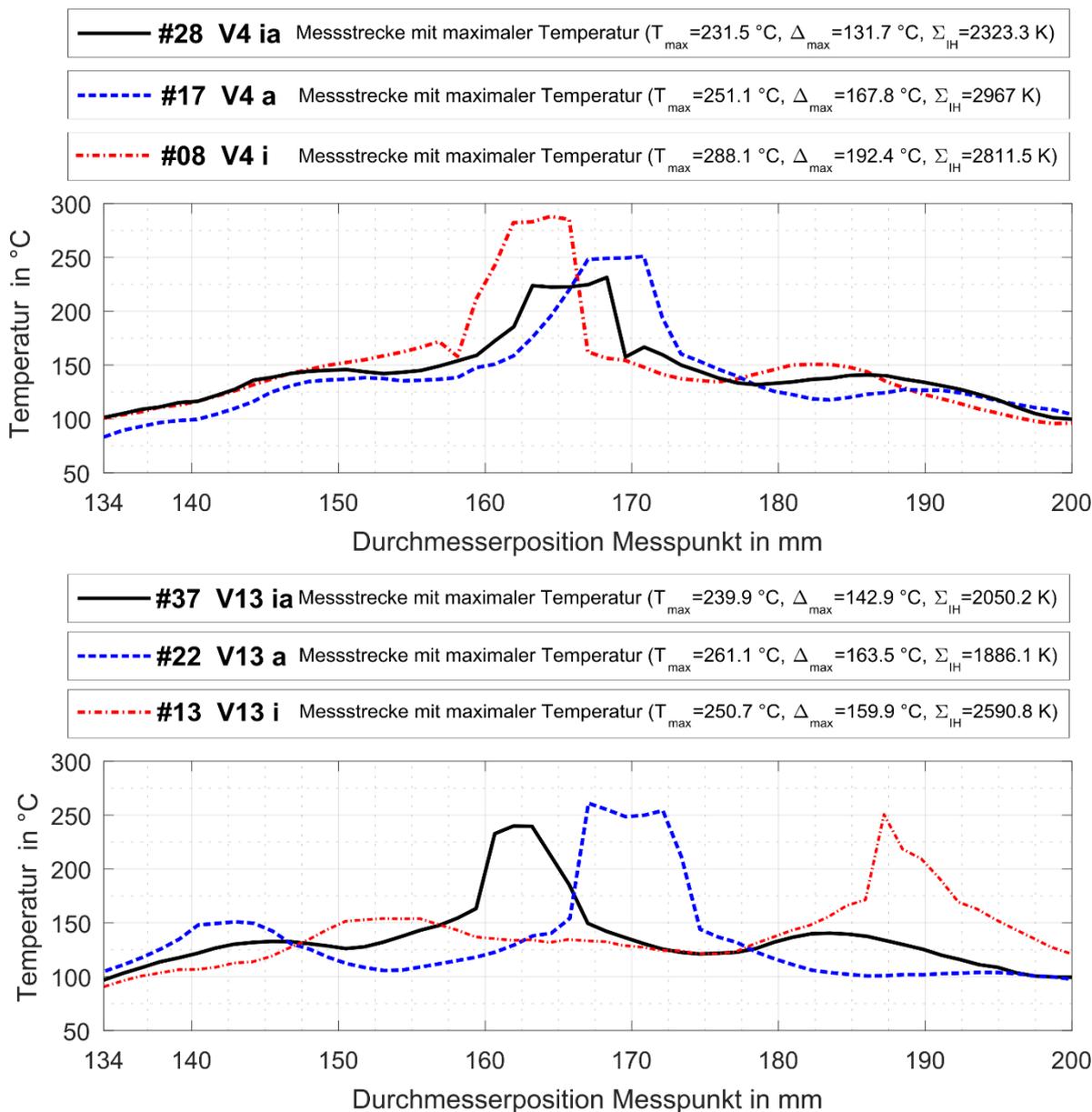


Abbildung 6.32: Vergleich der Temperaturverteilung der Versuchsstufen 4 und 13<sup>302</sup>

Außerdem geht aus den Diagrammen hervor, dass die Erfassung der Maximaltemperatur mittels weniger Thermoelemente an definierten Positionen nicht möglich ist, da vor einem Versuch nicht bekannt ist, an welcher Position über den Durchmesser die Maximaltemperatur auftreten wird. Zum Beispiel wäre bei der Messung der Temperatur mit einem Thermoelement auf Höhe des mittleren Reibradius  $r_m = 84,6\text{ mm}$  bei Versuchsstufe 13i, also nur innen verschraubt, die Maximaltemperatur von  $251\text{ °C}$  nicht erfasst worden. Möglicherweise wäre diese Verschraubungsvariante sogar als beste Variante aus einem Vergleich hervorgegangen, da sie auf Höhe des mittleren Reibradius die geringste Temperatur

<sup>302</sup> Albers et al., 2017b, S. 10

aufzeigt. Ein solcher Informationsverlust und die damit einhergehende falsche Bewertung kann mit der räumlich hochauflösenden Messung der Temperaturverteilung verhindert werden.

Letztlich folgt weiterhin aus Abbildung 6.32, dass bei beiden Versuchsstufen noch Optimierungspotenzial besteht, da die Bereiche am inneren und am äußeren Durchmesser scheinbar nicht genutzt werden. Eine Temperaturdifferenz von 132 °C bis hin zu 192 °C über den Radius zeigt, dass nur ein kleiner Bereich der verfügbaren Reibfläche tatsächlich am tribologischen Kontakt beteiligt ist. Zur Optimierung sollten Gestaltänderungen durchgeführt werden, sodass ein größerer Bereich der Reibfläche genutzt wird und somit die großen Temperaturunterschiede über den Radius verringert werden.

## 6.2 Trockenlaufende Reibpaarung mit WFP organischer Reibbelag / Guss

Da bei den meisten Fahrzeugkupplungen die Anpressplatte aus Gusseisen gefertigt ist, soll nachfolgend gezeigt werden, dass die verteilt messende faseroptische Sensorik auch für die Reibpaarung organischer Reibbelag gegen eine Anpressplatte aus EN-GJV-300 (GGV 30) einsetzbar ist.

### 6.2.1 Versuchsaufbau

Für die experimentellen Untersuchungen wird wieder die Testumgebung wie in Abschnitt 4.1 beschrieben verwendet, wobei eine Anpressplatte aus EN-GJV-300 verwendet wurde, siehe Abbildung 6.33. Diese Anpressplatte wurde aus einer Fahrzeugkupplung ausgebaut und die Bohrungen für die faseroptische Sensorik wurden mittels Senkerodieren eingebracht, siehe Abbildung 6.34. Dabei wurden 3 Rundlochbohrungen  $0,5\text{ mm}$  entfernt von der Reibfläche eingebracht, 4 Rundlochbohrungen mit  $4\text{ mm}$  Abstand zur Reibfläche. Die Sensorfaser wurde mäanderförmig verlegt und einseitig fixiert. Wie bei den vorangegangenen experimentellen Untersuchungen sind zusätzlich Thermoelemente appliziert als Referenz für die faseroptische Sensorik. Der organische Reibbelag, siehe Abbildung 6.33 links unten, ist aus demselben Kupplungssystem wie die Anpressplatte. Zur Anbindung an den Aufbau wurde die Nabe der Kupplungsscheibe entfernt und der Reibring mit Belagsfederung auf einer Aufnahme festgeschraubt. Somit ist ein ähnliches Verhalten des Wirkflächenpaares wie im Fahrzeug zu erwarten.

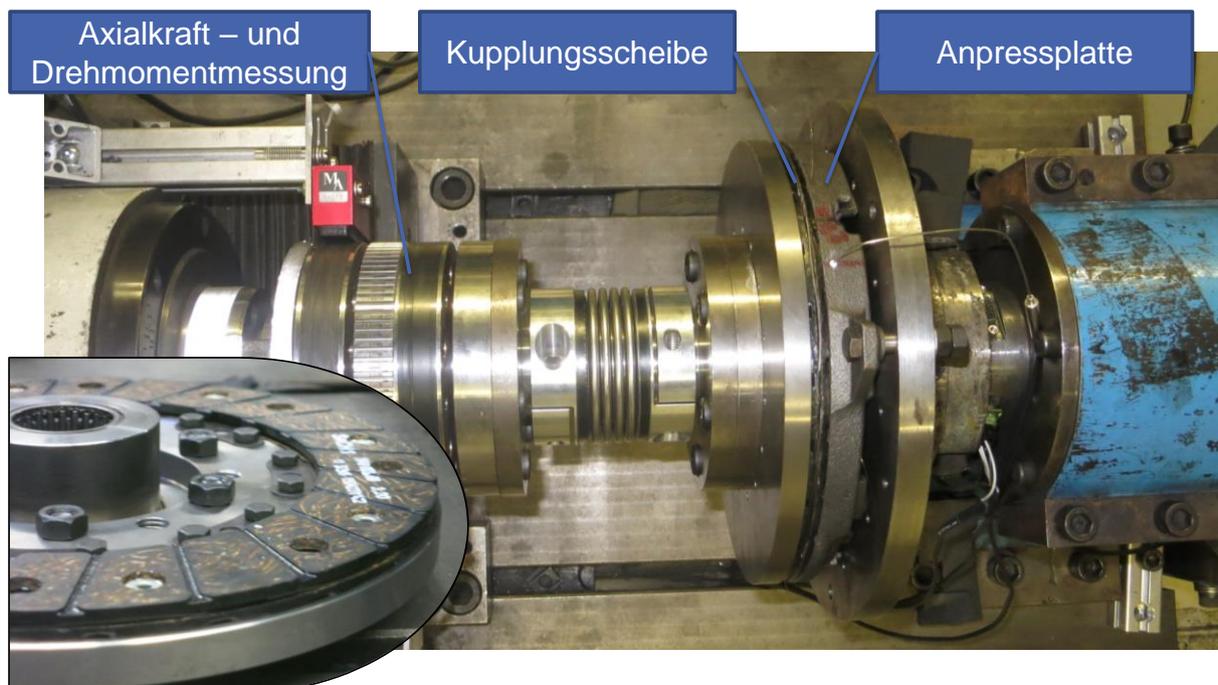


Abbildung 6.33 Prüfaufbau Reibpaarung organischer Reibbelag / EN-GJV-300

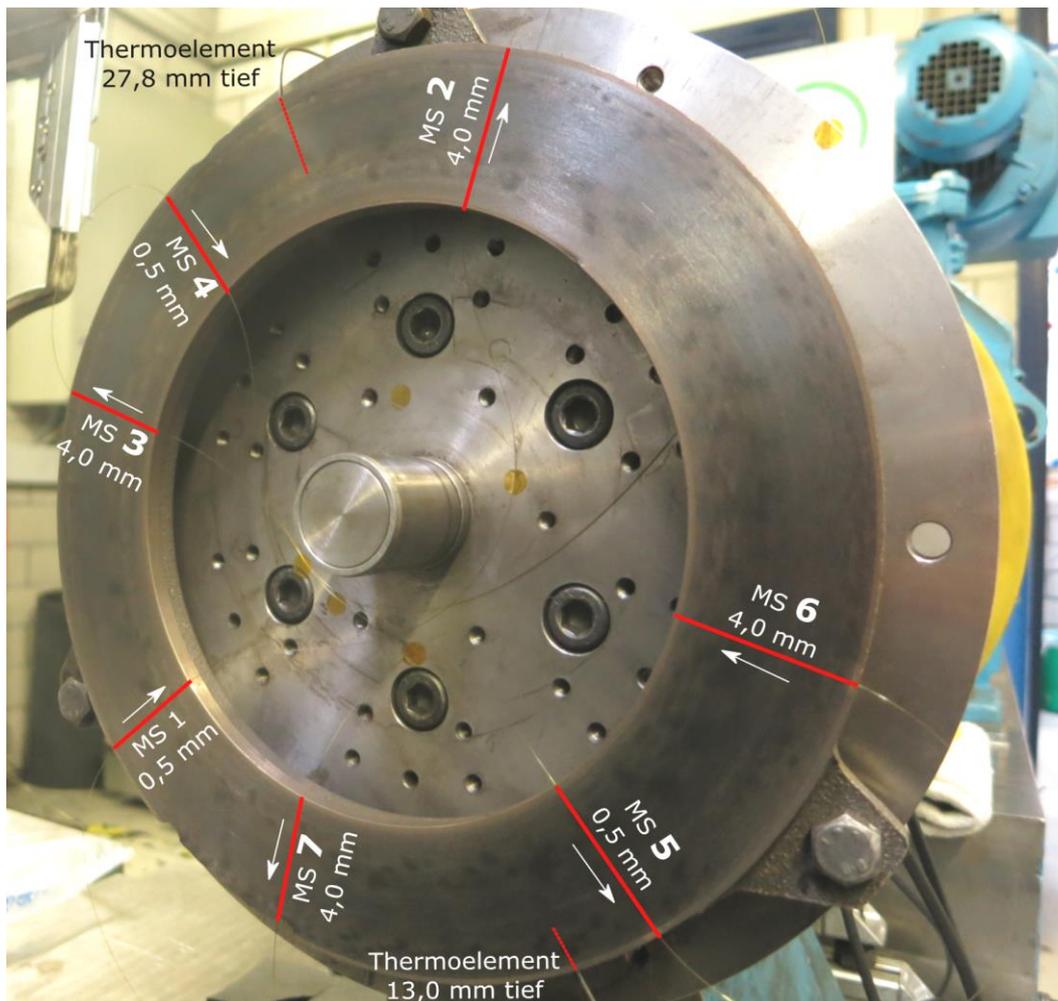


Abbildung 6.34 Messstrecken in gusseiserner Anpressplatte

### 6.2.2 Analyse der reibaktiven Bereiche

Mit dem beschriebenen Aufbau wurden ebenfalls Bremsungen durchgeführt<sup>303</sup>. Nach einem Einlauf der Reibpaarung wurden zur Überprüfung der Einsetzbarkeit der Messtechnik Bremsungen im Bereich von  $5\text{ kJ}$  bis  $50\text{ kJ}$  Reibarbeit durchgeführt. Da im Vergleich zu einer Fahrzeugkupplung<sup>304</sup> bei diesem Aufbau nur ein Wirkflächenpaar vorhanden ist, wäre dies vergleichbar mit einem Energieeintrag zwischen  $10\text{ kJ}$  und  $100\text{ kJ}$  in die Anfahrkupplung. Die  $10\text{ kJ}$  Energieeintrag sind mit einer normalen Anfahrt, die  $100\text{ kJ}$  sind mit einer Anfahrt mit Anhänger und voll beladenem Fahrzeug an einer Steigung vergleichbar. Die eingestellten Versuchsparameter sind in Tabelle 6 aufgelistet.

<sup>303</sup> Siehe Abbildung 5.14

<sup>304</sup> Siehe Abschnitt 2.2.3.1

Tabelle 6 Versuchsparameter Reibpaarung Organik / Guss

Versuchsstufe	1	2	3	4	5	6
Startdrehzahl in $U/min$	1500	1000	2000	2100	2500	2000
Flächenpressung in $N/mm^2$	0,07	0,07	0,10	0,11	0,12	0,18
Massenträgheit in $kgm^2$	0,41	1,00	0,70	1,20	1,48	0,70
Reibenergie in $kJ$	5,1	5,5	15,4	29,0	50,7	15,4
max. Reibleistung in $kW$	6,4	4,24	12,1	14,4	18,5	21,92

Bei allen Versuchsstufen war die Erfassung der Temperaturverteilung problemlos möglich. Für die Versuchsstufe 5, welche sich sowohl durch die höchste Startdrehzahl und den höchsten Energieeintrag auszeichnet, sind die Temperaturverläufe von 4 ausgewählten Messstrecken in Abbildung 6.35 dargestellt.

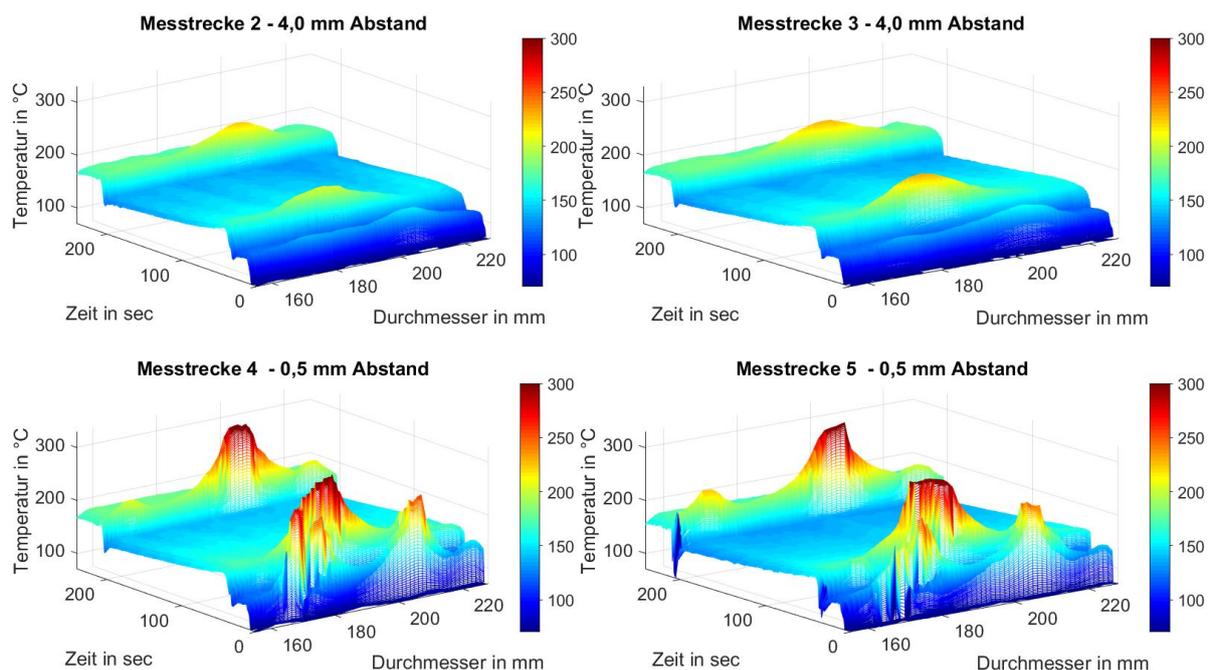


Abbildung 6.35: 3D-Diagramme von zwei Messstrecken mit 4,0 mm und zwei Messstrecken mit 0,5 mm Abstand zur Reibfläche der Versuchsstufe 5

Der Vergleich der Sensorfasertemperatur mit den jeweiligen Thermoelementtemperaturen ist in Abbildung 6.36 für drei aufeinander folgende Bremsungen dargestellt. Bei der Temperatur der Sensorfaser werden drei Messpunkte auf demselben Radius der Spitze des Thermoelementes gemittelt. Der qualitative Verlauf stimmt bis auf einen Ausreißer bei dem zweiten Energieeintrag sehr gut überein. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass in diesem Fall die für den Vergleich

verwendeten Messstellen nicht direkt nebeneinanderliegen. Zum Beispiel wird die Thermoelementtemperatur  $T_{Thermo\ 13\ mm}$  mit dem Mittelwert der Messpunkt 19,20 und 21 von Messstrecke 7 verglichen. Zwischen der Messstelle  $T_{Thermo\ 13\ mm}$  und Messstrecke 7 sind 30° Abstand, siehe Abbildung 6.34. Allein durch den räumlichen Abstand zwischen den Messorten ist während des Energieeintrages nicht zwingend der gleiche Temperaturverlauf zu erwarten.

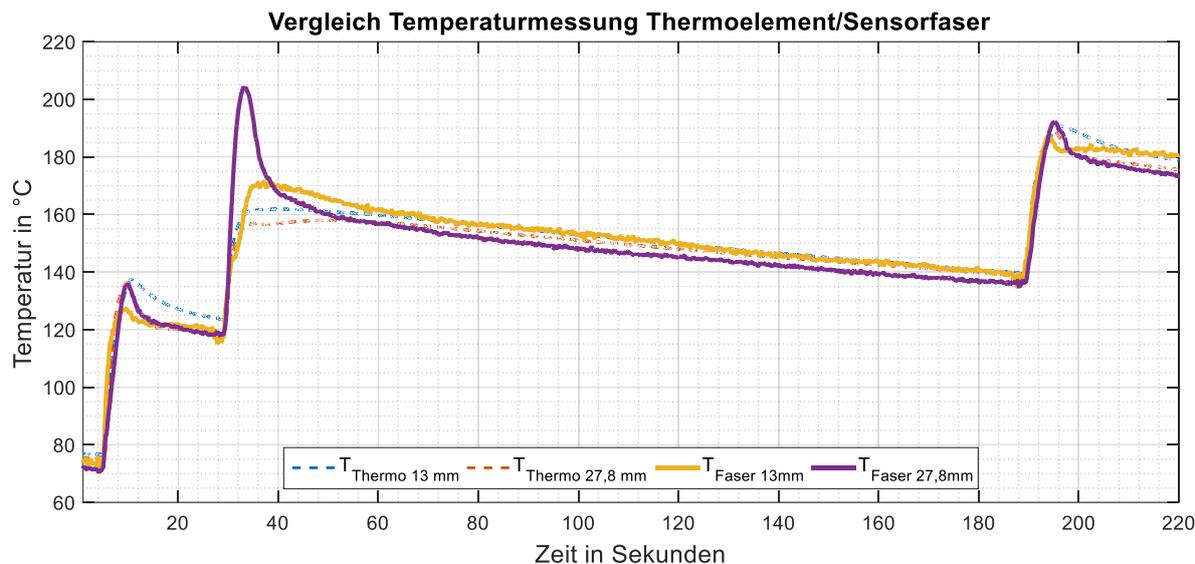


Abbildung 6.36: Vergleich Sensorfaser- mit Thermoelementtemperaturen für die Versuchsstufe 5

An dieser Stelle soll anhand von Konturplots gezeigt werden, dass die Identifizierung der hauptsächlich am Reibprozess beteiligten Bereiche für die untersuchte Reibpaarung möglich ist. Dazu sind in Abbildung 6.37 bis Abbildung 6.40 immer die drei gleichen Messstrecken für die Versuchsstufen 1, 3, 4 und 5, siehe Tabelle 6, dargestellt. Mit den roten Linien wird für jede Schaltung der Bereich über den Radius eingezeichnet, wo ein deutlicher Temperaturanstieg erkennbar ist. Als Trend von Versuchsstufe 1, siehe Abbildung 6.37, bis hin zu Versuchsstufe 5, siehe Abbildung 6.40, lässt sich feststellen, dass die an der Reibung beteiligten Bereiche für das untersuchte System immer geringer werden mit zunehmendem Reibenergie- und Reibleistungseintrag.

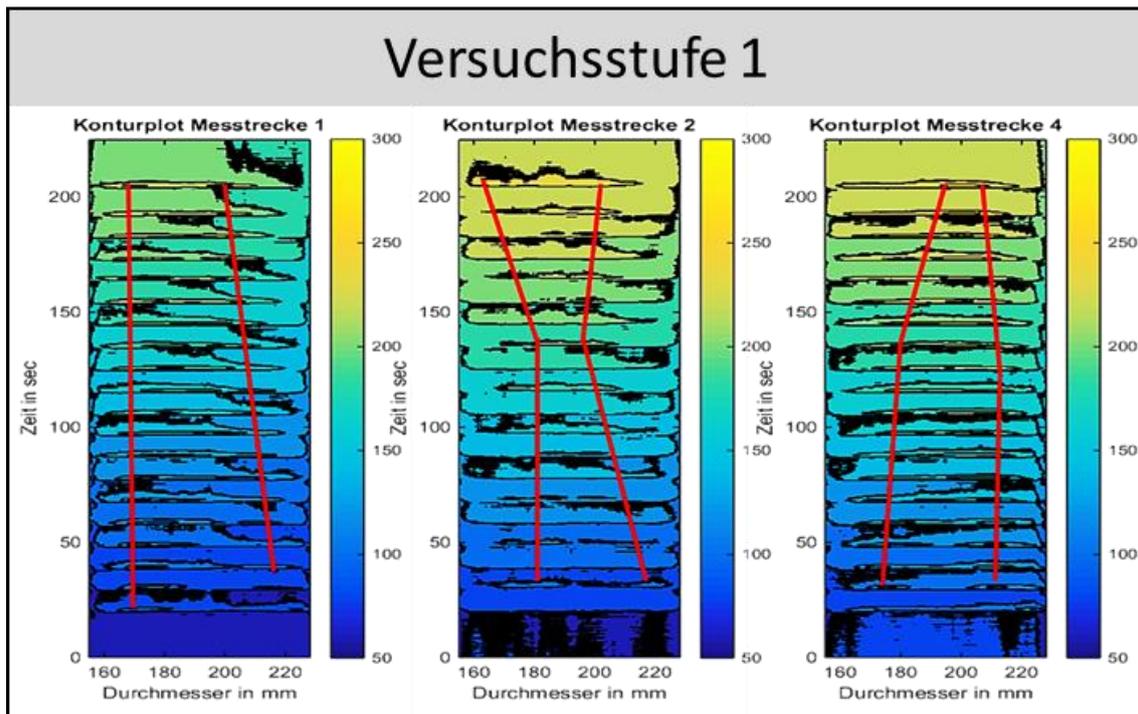


Abbildung 6.37 Vergleich der hauptsächlich an der Reibung beteiligten Bereiche in Versuchsstufe 1

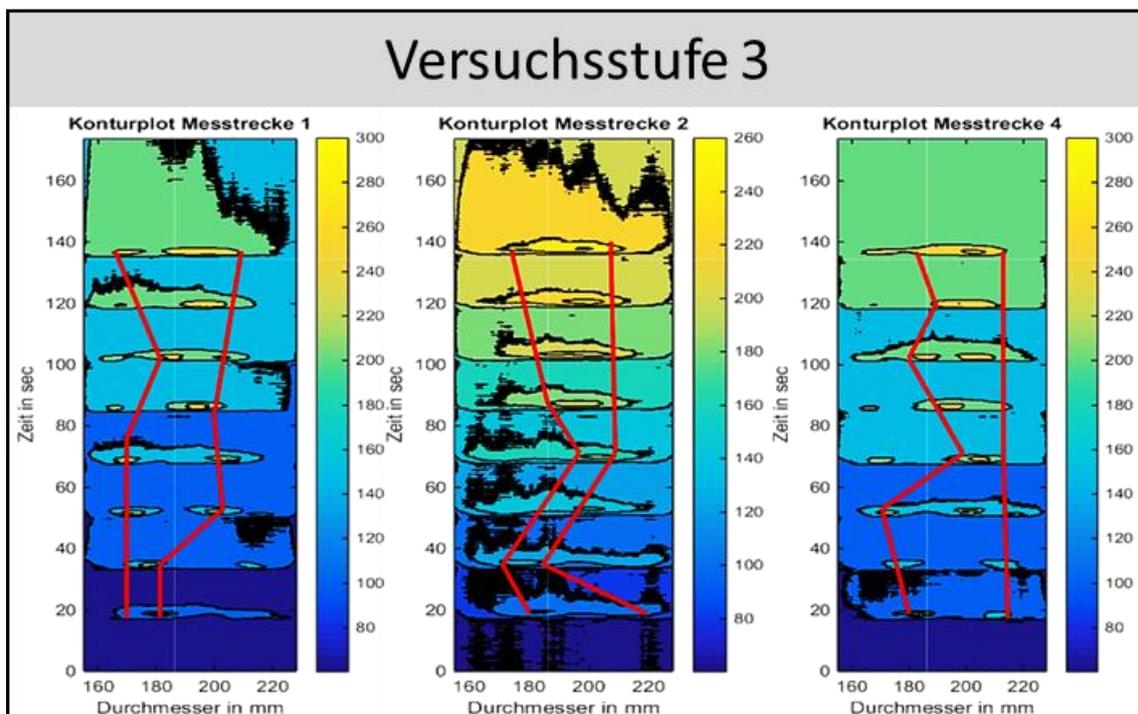


Abbildung 6.38 Vergleich der hauptsächlich an der Reibung beteiligten Bereiche in Versuchsstufe 3

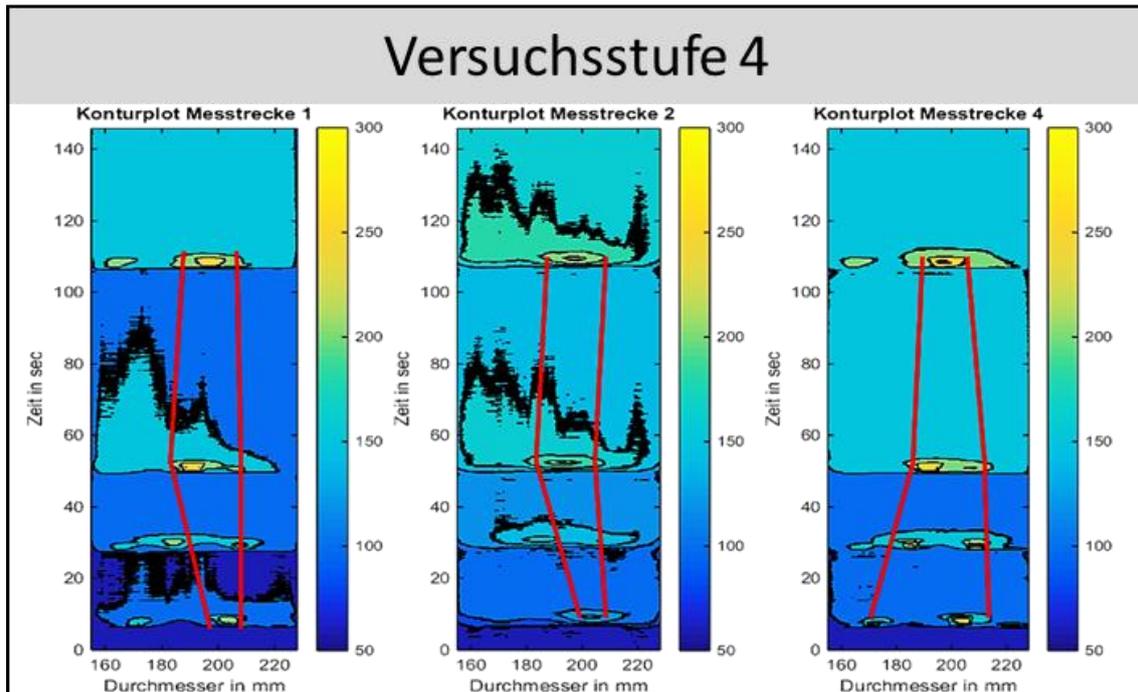


Abbildung 6.39 Vergleich der hauptsächlich an der Reibung beteiligten Bereiche in Versuchsstufe 4

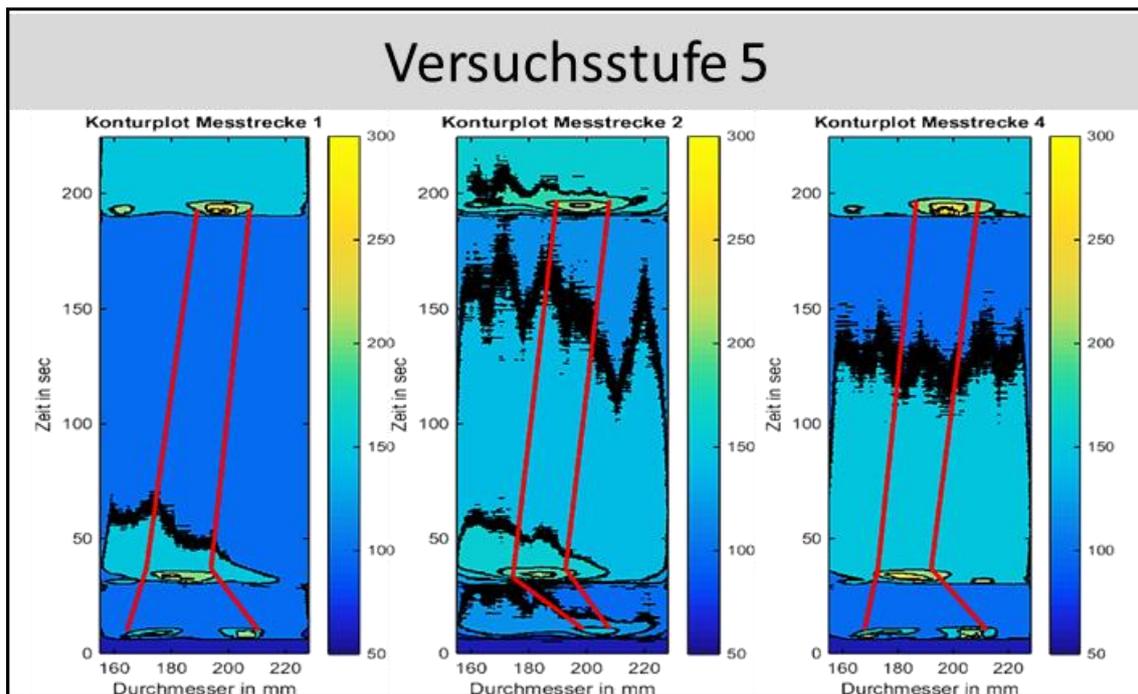


Abbildung 6.40 Vergleich der hauptsächlich an der Reibung beteiligten Bereiche in Versuchsstufe 5

### 6.3 Hochtemperaturmessung ohne Faserbeschichtung

Bei den bisher gezeigten experimentellen Untersuchungen wurde eine Sensorfaser mit Polyimid-Beschichtung verwendet, welche zwei Probleme mit sich bringt. Zum einen verursacht diese Beschichtung bei schnellen Temperaturänderungen eine Verfälschung des Messwertes<sup>305</sup>, zum anderen beschränkt die Beschichtung den Einsatzbereich der Sensorfaser auf  $-40\text{ °C bis }220\text{ °C}$ . Da die Beschichtung jedoch nur zum Schutz der Glasfaser dient und nicht notwendig ist für die Messung, kann diese entfernt werden. Dadurch könnte sowohl der Einfluss der Beschichtung bei hohen Temperaturgradienten verhindert werden, als auch die maximale Einsatztemperatur deutlich erhöht werden.

Die Untersuchung der Möglichkeiten zur Entfernung der Beschichtung einer Sensorfaser, auch entcoaten der Sensorfaser genannt, war Teil der Bachelorarbeit von SCHÖNHOFF<sup>306</sup>. Prinzipiell kann die Beschichtung chemisch, thermisch oder mechanisch entfernt werden. Als geeignetste Möglichkeit hat sich das mechanische Entfernen herausgestellt, welches wie folgt durchgeführt wurde. „Für das Entcoaten der Faser wird eine Abisolierzange mit einer Klinge, die eine V-Öffnung aufweist, verwendet. Damit soll das Verkratzen und Einkerbten des Lichtwellenleiters verhindert werden. Mit der Zange lassen sich 1-2 cm lange Stücke des Coatings entfernen. Bei längeren Stücken muss die Faser fixiert werden, da der Kraftaufwand sonst zu groß wird und die Faser sich nicht mit der Hand festhalten oder zurückziehen lässt. Durch wiederholtes Entfernen kurzer Beschichtungsstücke (ca. 1 cm) lassen sich relativ große Längen der Beschichtung entfernen. (...) Auf Biegung reagiert die Faser selbst bei langen entcoateten Stücken nur geringfügig empfindlicher. Es sind sogar Biegeradien von  $< 5\text{ mm}$  möglich, ohne dass die Faser bricht. Da die Abisolierzange die Beschichtung abstreift, ist es nur möglich die Faserenden zu entcoaten. Eine Entfernung der Beschichtung in der Mitte der Faser ist mit diesem Verfahren nicht möglich.“<sup>307</sup> Abbildung 6.41 zeigt eine Sensorfaser, bei der die Polyimid-Beschichtung nach dem beschriebenen Verfahren entfernt wurde.

Nachfolgend wird beschrieben, wie eine Temperaturverteilungsmessung mit einer Sensorfaser durchführbar ist, bei der die Beschichtung entfernt wurde. Die Polyimid-Beschichtung kann mechanisch nur an einem Ende der Sensorfaser entfernt werden. Dazu wurde eine Sensorfaser durchgebrochen und dann mit der Abisolierzange in kleinen Stücken die Beschichtung entfernt. Der entcoatete Teil der Sensorfaser wird durch die Messbohrung gefädelt und im Aufbau mit dem zuvor abgebrochenen Stück der Sensorfaser wieder verbunden. Das Verbinden von zwei Glasfaserenden nennt

---

<sup>305</sup> Siehe Abschnitt 5.2.3.3

<sup>306</sup> Schönhoff, 2015, betreute Abschlussarbeit

<sup>307</sup> Schönhoff, 2015, S. 42, betreute Abschlussarbeit

man Spleißen, was wie folgt beschrieben werden kann: „Um zwei Fasern miteinander zu verbinden werden nicht lösbare optische Verbindungen, Spleiße, eingesetzt. (...) Am weitesten verbreitet ist jedoch die Lichtbogenschweißtechnik. Dabei werden mit der Abisolierzange Sekundär- und Primärcoating entfernt. Nachdem die Faserbeschichtungen entfernt sind, muss die Glasfaser mit Alkohol gereinigt werden. Damit die Dämpfung an der Koppelstelle möglichst gering ist, sind ebene 90° Stirnflächen erforderlich. Die Endflächen werden mit Diamantwerkzeugen angeritzt und unter definierter Zugspannung torsionsfrei gebrochen. So entstehen Brüche mit hoher Oberflächengüte und Winkelfehlern  $< 1^\circ$ . (...) Die präparierten und ausgerichteten Faserenden werden bei ca. 2300°C direkt miteinander verschweißt.“<sup>308</sup> In Abbildung 6.42 ist der so umgesetzte Prüfaufbau gezeigt, wobei der Messbereich vergrößert dargestellt ist. Erkennbar ist, dass bei dem Stück der Sensorfaser, welche sich in der Bohrung befindet, keine Polyimid-Beschichtung vorhanden ist.

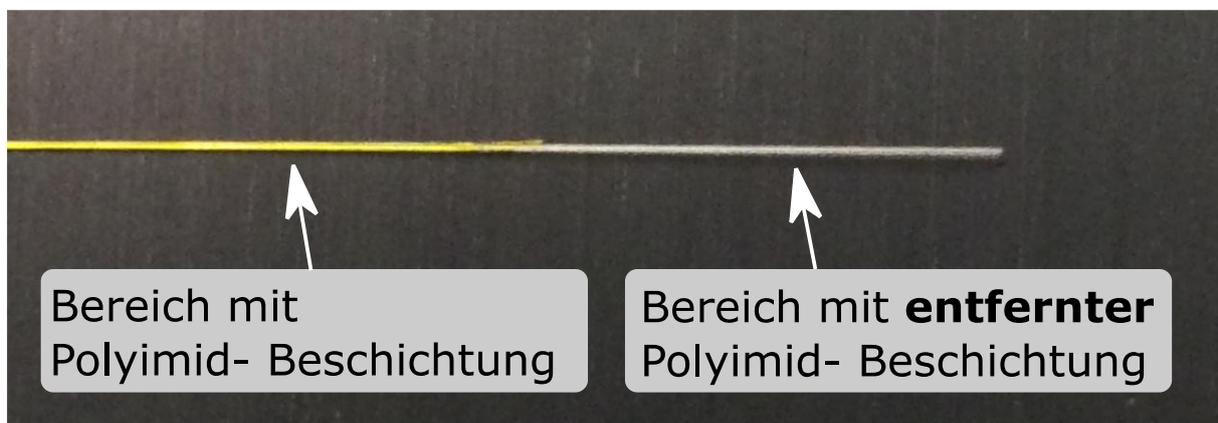


Abbildung 6.41 Sensorfaser mit teilweise entfernter Beschichtung

<sup>308</sup> Schönhoff, 2015, S. 12, betreute Abschlussarbeit

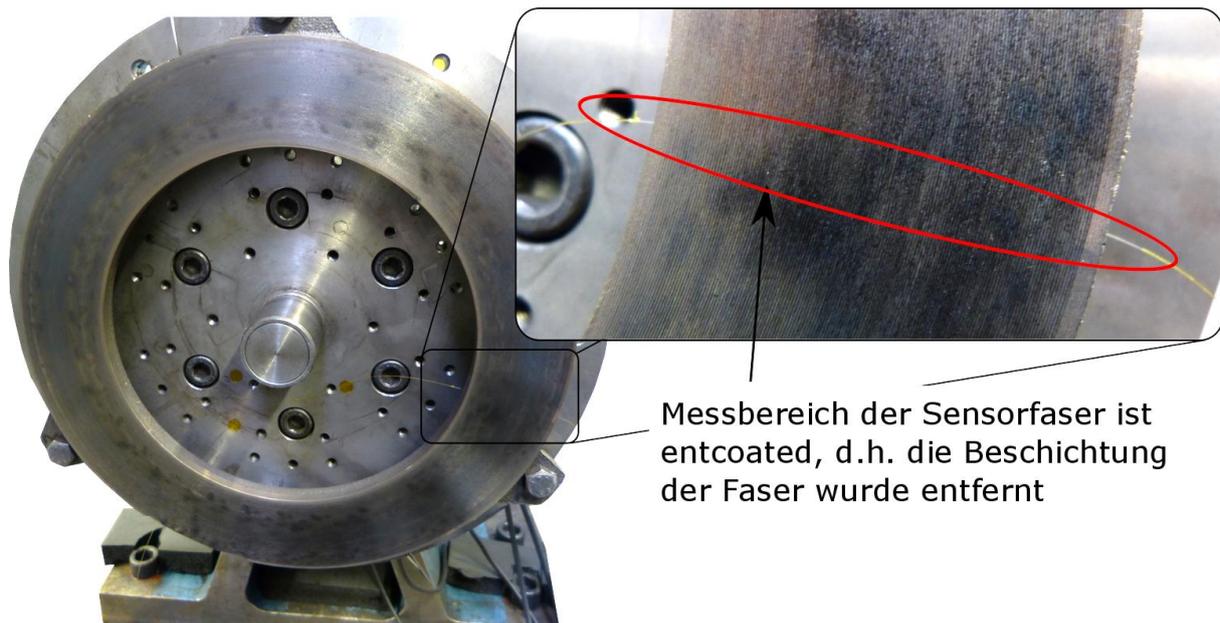


Abbildung 6.42: Temperaturverteilungsmessung mit entfernter Beschichtung der Sensorfaser

Um die Hochtemperaturbeständigkeit der entcoateten Sensorfaser zu zeigen, wurde die Anpressplatte beginnend bei Raumtemperatur mit der Versuchsstufe 4<sup>309</sup>, bei einer festen Zykluszeit von 22 s, kontinuierlich erwärmt. Abbildung 6.43 stellt die erfassten Messdaten dar, welche zeigen, dass die Temperaturverteilung mit der faseroptischen Sensorik erfasst werden konnte. Das Diagramm oben links zeigt den Vergleich von Sensorfaser- und Thermoelementtemperatur. Qualitativ zeigen die beiden Kurven den selben Verlauf. Bei den kurzen Abkühlphasen zwischen den Bremsungen zeigt die Sensorfaser eine niedrigere Temperatur als das Thermoelement. Das kann damit erklärt werden, dass die Sensorfaser nur 0,5 mm Abstand zur Reibfläche hatte, wohingegen das Thermoelement in einem Abstand von 4,0 mm platziert war. Da direkt nach der Bremsung die Kupplung wieder geöffnet wird, gelangt Umgebungsluft an die Reibfläche, wodurch reibflächennahe Bereiche schneller abkühlen. Sowohl das 3D-Diagramm unten links, als auch der Kontourplot unten rechts zeigen, dass die Temperaturverteilung vollständig erfasst wurde. Der Verlauf der Temperatur zum Zeitpunkt  $t = 438,7 s$  über den Durchmesser soll verdeutlichen, dass mittels der faseroptischen Sensorik im Hochtemperaturbereich Optimierungspotenziale ermittelt werden können. Die Bereiche am Innendurchmesser  $< 170 mm$  und die am Außendurchmesser  $> 210 mm$  scheinen nicht am Reibprozess beteiligt zu sein. Dies bedeutet, dass nur  $\sim 55\%$  der zur Verfügung stehenden Wirkfläche tatsächlich genutzt wird.

<sup>309</sup> Siehe Abbildung 6.4

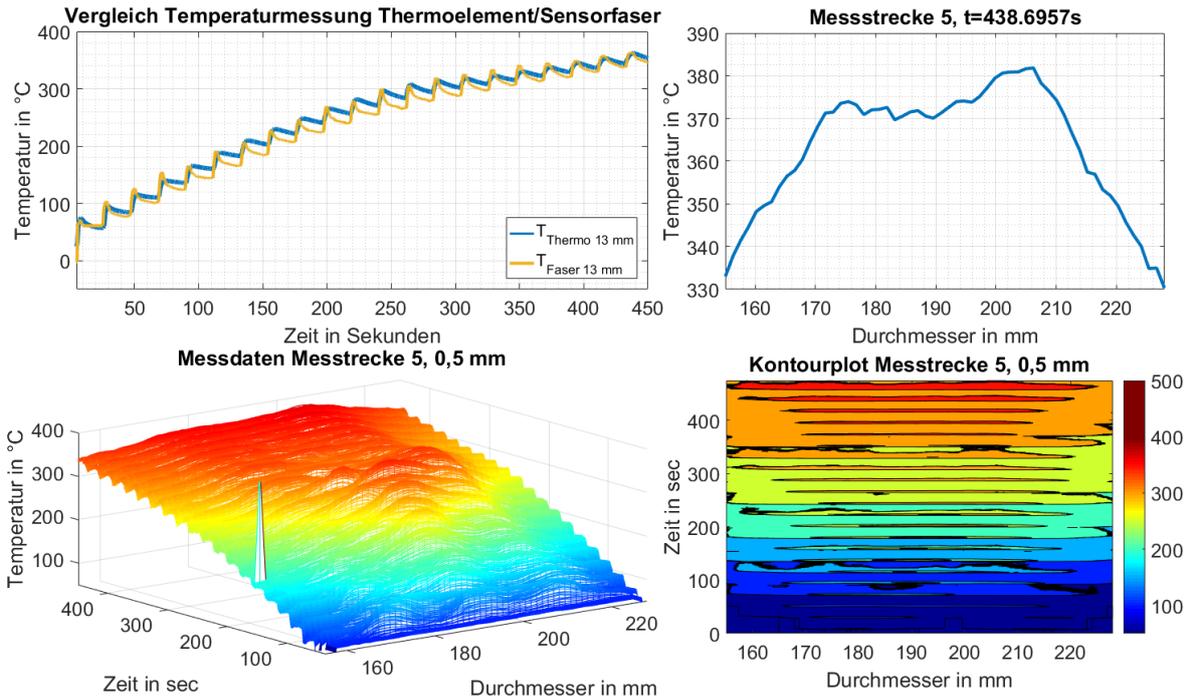


Abbildung 6.43: Messschrieb des Hochtemperaturversuches. Oben links: Vergleich Thermoelement- mit Sensorfasertemperatur. Unten links: 3D-Diagramm der Messstrecke. Oben rechts: Radiale Temperaturverteilung zum Zeitpunkt 438.7 s. Unten rechts: Kontourplot der Messstrecke.

## 6.4 Zwischenfazit

Mit der verteilt messenden faseroptischen Sensorik war es bei allen durchgeführten Versuchsstufen möglich, die Temperaturverteilung für die beiden Reibpaarungen zu erfassen. Es konnten Unterschiede der Temperaturverteilungen bei unterschiedlichen Verschraubungsvarianten gemessen werden. Weiterhin war es möglich zeitlich sehr kurze Reibprozesse  $< 1\text{ s}$  zu erfassen und Temperaturen bis zu  $\sim 360^\circ\text{C}$  aufzuzeichnen.

Es wurde gezeigt, dass die Temperaturverteilung Rückschlüsse auf das Systemverhalten ermöglicht, zum Beispiel anhand der Betrachtung von Kontourplots. Weiterhin wurden durch die Analyse der Homogenität der Temperaturverteilung einer trockenlaufenden Reibkupplung zweierlei Potenziale zur Leistungssteigerung aufgezeigt. Erstens wurde für die untersuchte Reibkupplung ein Zusammenhang zwischen Zunahme der Inhomogenität der Temperaturverteilung und der Zunahme von Reibarbeit und -leistung gezeigt. Dies ist daher besonders ungünstig, da besonders im Bereich hoher Reibarbeit / -leistung ein Reibsystem benötigt wird, welches die ihm zur Verfügung stehende Reibfläche möglichst vollständig nutzt. Zweitens konnte durch den Vergleich unterschiedlicher Verschraubungssituationen der Anpressplatte gezeigt werden, dass die auftretende Maximaltemperatur nahe der Reibfläche vom thermomechanischen Verhalten abhängig ist.

Mit der räumlich hochauflösenden Messung der Temperaturverteilung ist es also möglich, das Verhalten des zu untersuchenden Systems detailliert zu analysieren. Somit kann die Forschungsfrage 3 wie folgt beantwortet werden:

### **Forschungsfrage 3: Charakterisierung Systemverhalten**

Wie kann die Messung der Temperaturverteilung in hinreichend feiner räumlichen Auflösung eingesetzt werden, um das Systemverhalten zu charakterisieren?

#### **Antwort**

Wenn die faseroptische Sensorik nach den Empfehlungen der Fehlerbetrachtung eingesetzt wird, kann die Temperaturverteilung des Systems mit sehr geringer Beeinflussung des zu vermessenden Bauteils erfasst werden.

Gezeigt wurde, dass anhand von 3D-Diagrammen, Kontourplots und der entwickelnden Kenngröße „Inhomogenitätssumme“ das Systemverhalten im Detail analysiert werden kann. Dabei muss darauf geachtet werden, wann welches Werkzeug eingesetzt wird. Die Bewertung der Inhomogenitätssumme ist dafür geeignet, ein umfangreiches Versuchsprogramm vergleichend zu bewerten. Zur Analyse kritischer Versuchsstufen müssen die Messdaten dann im Detail betrachtet werden, zum Beispiel mittels 3D-Diagrammen oder Kontourplots.



## 7 Integration der Temperaturverteilung im C&C<sup>2</sup>-Ansatz

Ein Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur zielgerichteten Gestaltvariation von Friktionskontakten im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung<sup>310</sup>. In den beiden vorangehenden Kapiteln wurde gezeigt, wie das Systemverständnis mittels der Temperaturverteilungsmessung erweitert werden kann. Dazu wurde, ausgehend von der Messtechnikauswahl und einer Fehlerbetrachtung, im Detail erklärt wie die Messung und Auswertung der räumlich hochauflösenden Temperaturverteilung durchgeführt werden muss. An dieser Stelle soll diese Messmethode in den C&C<sup>2</sup>-Ansatz integriert werden, um so dem Produktentwickler ein zielgerichtetes Vorgehen zur Gestaltoptimierung des weiter zu entwickelnden Systems zur Verfügung zu stellen. Ziel dieses Kapitel ist die Beantwortung von Forschungsfrage 4<sup>311</sup>.

### 7.1 Analyse und Synthese anhand der Wirkkontaktfläche

In ALBERS ET AL.<sup>312</sup> wird der Ausgangspunkt zur Verknüpfung von C&C<sup>2</sup>-Modellen und Messdaten wie folgt beschrieben: „Ausgehend vom Stand der Forschung können durch Simulationen oder experimentelle Versuche ermittelte Wirkkontakte nicht direkt in C&C<sup>2</sup>-Modellen abgebildet werden. Stattdessen wird das betreffende Wirkflächenpaar fraktal in Teil-Wirkflächenpaare zerlegt bis die Wirkflächen den Wirkkontakten entsprechen. Das Resultat sind sehr feingranulare Modelle mit eng gezogenen Systemgrenzen, die einen effizienten Wissenstransfer erschweren. Eine Abstraktion der so bestimmten Wirkkontakte auf übergeordnete Modellebenen ist nach dem Stand der Forschung nicht möglich. Im Allgemeinen erlauben Modellabstraktionen jedoch dem Produktentwickler eine Vereinfachung und Fokussierung der Entwicklungsaufgabe. Modellabstraktionen unterstützen so einen effizienteren Wissenstransfer zwischen Produktentwicklern über Produktgenerationen hinweg. Zusammenfassend resultiert ein Bedarf nach einem Vorgehen zur Visualisierung von Wirkkontakten auf abstrakteren Modellierungsebenen mittels C&C<sup>2</sup>-A, um dadurch einen effizienteren Wissenstransfer zu unterstützen.“<sup>313</sup>

Wirkkontakte sind nach der KaSPro wie folgt definiert: „Der Wirkkontakt (WK) ist der Teil eines Wirkflächenpaares, in dem aktuell die Wechselwirkungen stattfinden.“<sup>314</sup>

Das Vorgehen zur Integration von Messdaten in ein C&C<sup>2</sup>-Modell ist in allgemeiner Form in Abschnitt 2.1.2.1 bereits beschrieben. In Abbildung 7.1 wird das Vorgehen auf

---

<sup>310</sup> Siehe Abschnitt 2.1.4

<sup>311</sup> Siehe Abschnitt 3.2.3

<sup>312</sup> Albers et al., 2016b

<sup>313</sup> Albers et al., 2016b, S. 4

<sup>314</sup> IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2017

den Reibkontakt, also das funktionserfüllendes Wirkflächenpaar einer Reibkupplung, übertragen. Zuerst muss das zu untersuchende WFP im Modell ausgewählt werden, wobei zu diesem Zeitpunkt noch keine Informationen zu den tatsächlichen Wirkkontakten im WFP vorliegen. Die Wirkkontakte für die Entwicklungsgeneration 1 müssen mittels geeigneter Analyseverfahren ermittelt und in das WFP projiziert werden. Ausgehend vom präzisierten WFP in Entwicklungsgeneration 1 kann der Produktentwickler zielgerichtete Maßnahmen ergreifen, um das Systemverhalten zu optimieren. Das optimierte System, Entwicklungsgeneration 2, wird nun möglichst mit derselben Analyseverfahren untersucht wie die Entwicklungsgeneration 1. Damit ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse gewährleistet und es kann bewertet werden, ob eine Verbesserung erzielt wurde.

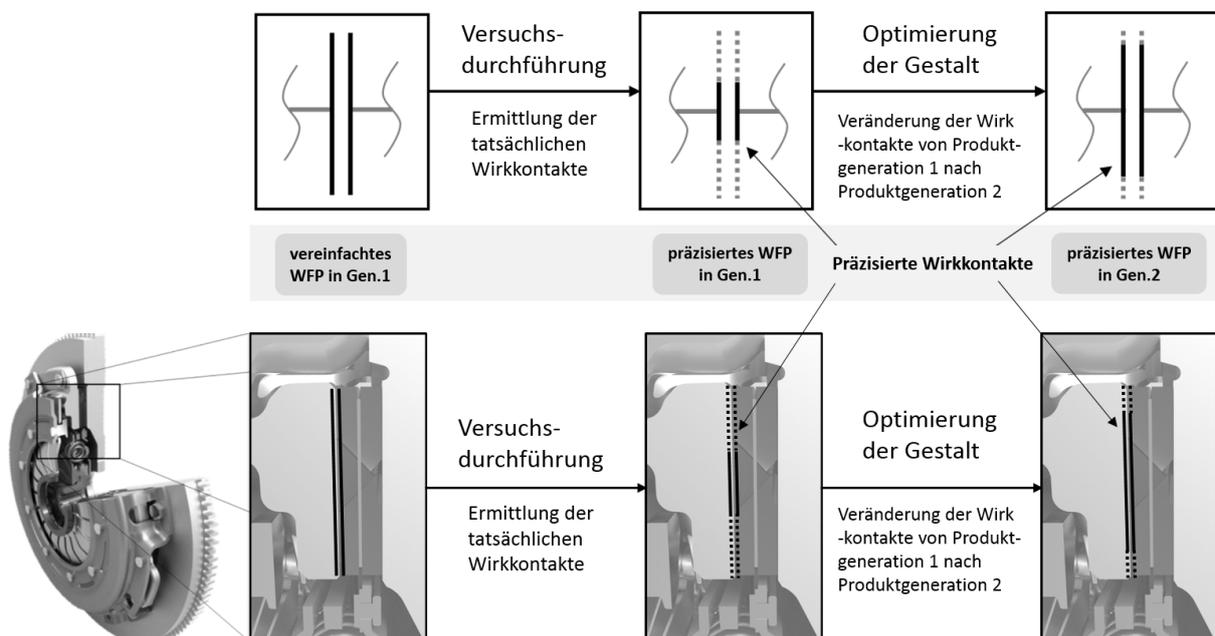


Abbildung 7.1 Unterstützung der Synthese mittels Integration von Versuchsdaten<sup>315</sup>

Das allgemein beschriebene Vorgehen soll im Folgenden für die Weiterentwicklung einer trockenlaufenden Kfz-Anfahrkupplung beispielhaft durchgeführt werden. Entwicklungsziel ist die Erhöhung des übertragbaren Drehmomentes der Nachfolge-Generation. Dazu wurde zuerst ein C&C<sup>2</sup>-Modell der aktuellen Kupplung aufgebaut, welches in Abbildung 7.2 vereinfacht dargestellt ist. Die Systemgrenze wird dabei um das gesamte Kupplungssystem gezogen.

Für die Steigerung der Drehmomentenkapazität der Kupplung müssen nur die Zustände „synchronisierend“ und „geschlossen“ betrachtet werden. Das übertragbare Kupplungsmoment  $M_K$  kann nach SAUER ET AL.<sup>316</sup> wie folgt berechnet werden:

<sup>315</sup> Auf Basis von Albers et al., 2016b, S. 6

<sup>316</sup> Sauer et al., 2006a, S. 324

$$M_K = n * \mu * r_m * F_N \tag{5}$$

Dabei steht  $n$  für die Anzahl der an der Drehmomentübertragung beteiligten WFPs,  $\mu$  ist die Reibungszahl,  $r_m$  steht für den mittleren Reibradius und  $F_N$  ist die anliegende Normalkraft, auch Anpresskraft genannt. Der flächenbezogene mittlere Reibradius wird wie folgt berechnet<sup>317</sup>:

$$r_m = \frac{2 (r_a^3 - r_i^3)}{3 (r_a^2 - r_i^2)} \tag{6}$$

Als Restriktion bei der Entwicklung ist festgelegt, dass die Nachfolge-Generation in den selben Bauraum integrierbar sein soll wie die Generation 1. Deshalb kommt eine Vergrößerung von  $r_m$  nicht in Frage. An der Anzahl der Reibflächen  $n$  kann wegen der Bauraumrestriktion ebenfalls nichts geändert werden. Somit bestehen noch die Möglichkeiten die Reibungszahl  $\mu$ , oder die Anpresskraft  $F_N$  zu erhöhen.

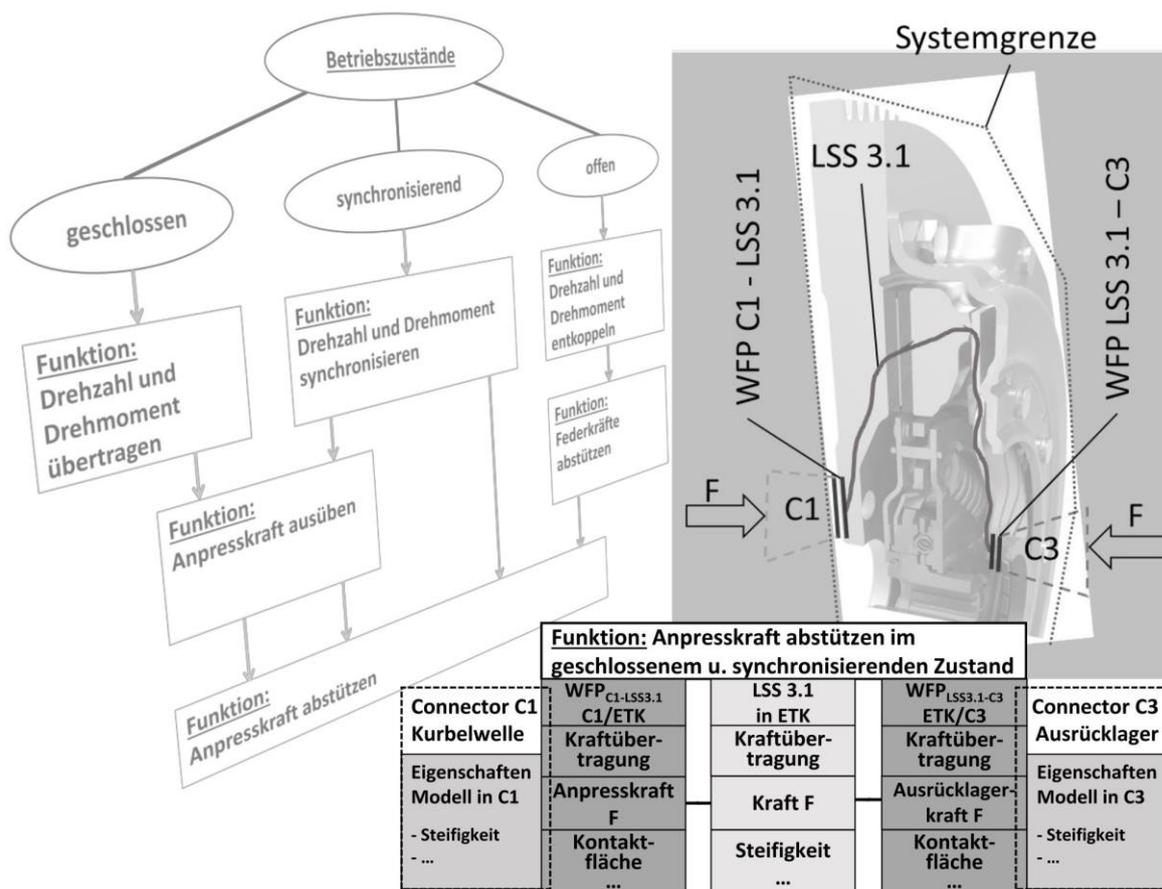


Abbildung 7.2: C&C<sup>2</sup>-Modell der trockenlaufenden Einscheibenkupplung<sup>317</sup>

Zuerst soll die Erhöhung der Anpresskraft  $F_N$  diskutiert werden. Dazu kann die Systemgrenze aus Abbildung 7.2 beibehalten werden. Die Steigerung der Anpresskraft hat bei erster Betrachtung den gewünschten Effekt erzeugt, nämlich die

<sup>317</sup> Albers et al., 2016b, S. 7

Steigerung des übertragbaren Drehmoments. Jedoch muss das Kupplungssystem bei einem höheren übertragenen Drehmoment zu Beginn des Reibprozesses eine höhere Reibleistung aufnehmen.<sup>318</sup> Da an der Geometrie der Reibflächen aufgrund der Bauraumrestriktion nichts geändert wurde, muss die höhere Reibleistung durch dieselbe Fläche aufgenommen werden. Das führt zu höheren lokalen Temperaturen an der Reibfläche. Dies könnte zum Beispiel bei einer freigaberelevanten Abnahmeprüfung, siehe Abbildung 2.19, bei welcher wiederholte Anfahrten an einer 12 % Steigung bei maximal beladenem Fahrzeug mit Anhänger durchgeführt werden, zum Ausfall des Systems führen. Somit kann diese Anfahrkupplung nicht für den Serieneinsatz freigegeben werden. Mit der Erhöhung der Reibungszahl  $\mu$  wird ebenfalls das übertragbare Drehmoment gesteigert. Aber wie bereits bei der Erhöhung der Anpresskraft beschrieben, führt dies zu einem erhöhten Reibleistungseintrag und letztlich möglicherweise zum Funktionsausfall bei der Abnahmeprüfung.

Um eine der beiden beschriebenen Maßnahmen zur Steigerung der Drehmomentkapazität trotzdem umsetzen zu können, muss die thermische Belastung der Funktionsflächen im Detail betrachtet werden. Dies wird nach dem geschilderten Vorgehen aus Abbildung 7.1 durchgeführt. Die Systemgrenze wird dazu um die beiden Reibflächen gezogen, da es für die Analyse ausreichend ist die beiden WFPs Reibkontakt 1 und Reibkontakt 2 zu betrachten, siehe Abbildung 7.3.

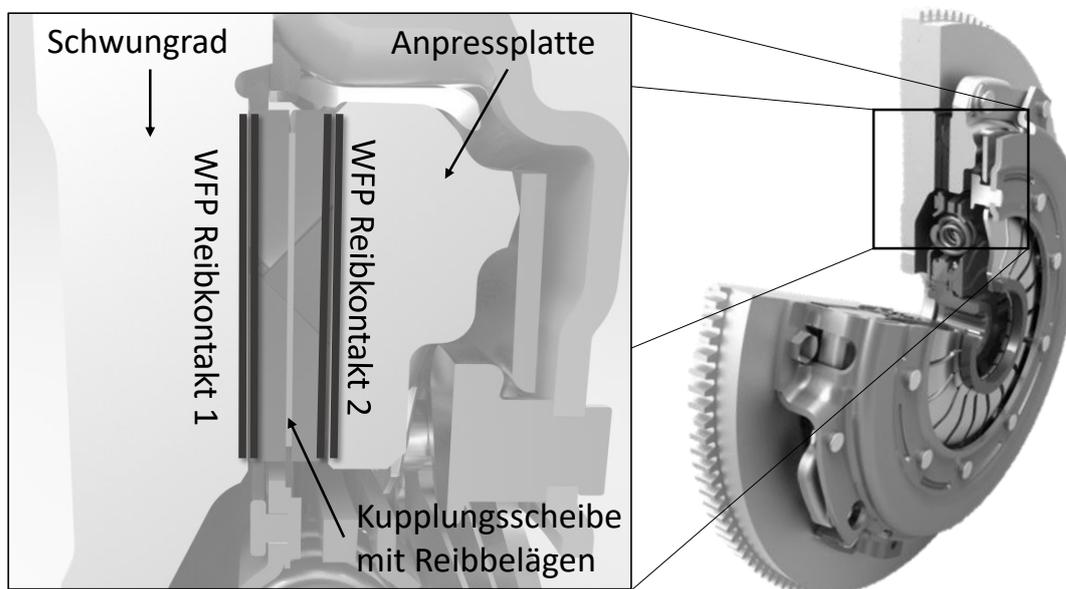


Abbildung 7.3: Wirkflächenpaare im Reibkontakt einer trockenlaufenden Anfahrkupplung<sup>319</sup>

Der erste Schritt ist die messtechnische Erfassung der tatsächlich wirksamen Wirkkontakte. Dazu wird an dieser Stelle auf die Ergebnisse aus Abschnitt 6.1 zurückgegriffen, da dieser Aufbau das WFP Reibkontakt 2 repräsentiert.

<sup>318</sup> Siehe Abschnitt 2.2.4

<sup>319</sup> Albers et al., 2016b, S. 8

Die mittlere Darstellung aus Abbildung 7.4 zeigt die auf das WFP projizierte gemessene Temperaturverteilung für die Entwicklungsgeneration 1 zum Zeitpunkt der maximal auftretenden Temperatur. Dabei kann ein Bereich hoher Temperatur auf der Reibfläche als Ergebnis eines lokal stattfindenden Reibprozesses interpretiert und somit in diesem Fall als Indikator für die tatsächlichen Wirkkontakte genutzt werden. Deutlich zu erkennen ist, dass nur ein kleiner Bereich des zur Verfügung stehenden Wirkflächenpaares genutzt wird. Ein großer Bereich am Außenradius des WFPs wird nahezu nicht genutzt. Diese Erkenntnis kann der Entwickler zur Optimierung des Systems nutzen.

Zum Beispiel können gezielte konstruktive Maßnahmen ergriffen werden, sodass die aufzunehmende Reibleistung auf eine größere Fläche verteilt wird. Wie schon bei der Analyse der unterschiedlichen Anschraubvarianten in Abschnitt 6.1.5.2 gezeigt, wäre bei dem untersuchten Modellsystem eine mögliche Maßnahme die zusätzliche Anschraubung der Anpressplatte am inneren Durchmesser, siehe auch Abbildung 6.15. Die Temperaturverteilung für die beidseitig verschraubte Variante ist in der rechten Darstellung in Abbildung 7.4 in das C&C<sup>2</sup>-Modell integriert. Im Vergleich zu dem präzisierten WFP in Entwicklungsgeneration 1 sind die Maximaltemperaturen im präzisierten WFP von Entwicklungsgeneration 2 deutlich geringer. Dabei ist wichtig, dass bei beiden Messungen dieselbe Reibarbeit und -leistung in das System eingebracht wurde. Erklärung ist die bessere Verteilung der aufgenommenen Energie auf die zur Verfügung stehende Wirkfläche.

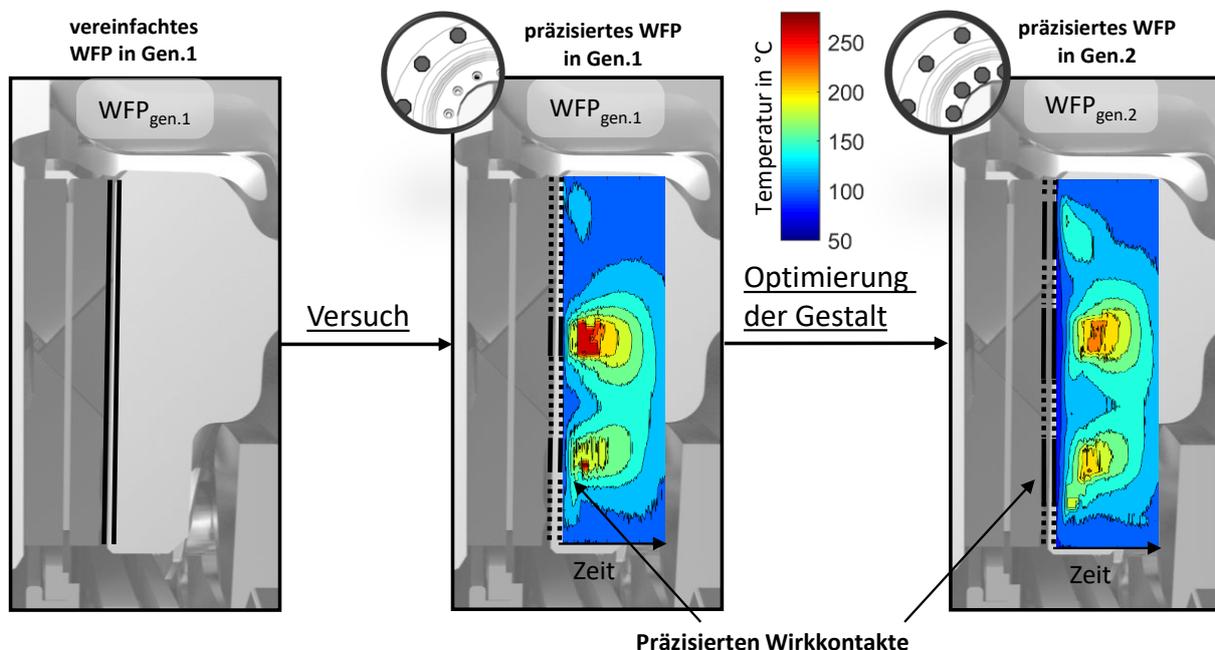


Abbildung 7.4: Vorgehen zur Gestaltanalyse und -optimierung<sup>320</sup>

<sup>320</sup> Albers et al., 2016b, S. 9. Ergänzt um Verschraubungsdarstellung.

Als abschließende Aufgabe muss eine Bewertung durchgeführt werden, ob die erzielte Verbesserung dem zuvor gesetzten Ziel entspricht. In diesem Fall ist dies einfach zu prüfen, indem das Kupplungssystem in Entwicklungsgeneration 2, z.B. mit erhöhter Anpresskraft  $F_N$ , dem vorher beschriebenen Abnahmetest unterzogen wird. Wird der Abnahmetest bestanden, ist die Optimierung abgeschlossen. Falls Entwicklungsgeneration 2 den Abnahmetest<sup>321</sup> ebenfalls nicht besteht, müssen ausgehend von der Temperaturverteilung von Entwicklungsgeneration 2 erneut Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden. Dazu ist es auch sinnvoll, eine Anpassung der gewählten Systemgrenze zu prüfen. Nach erneuter Optimierung muss wiederum eine Bewertung der umgesetzten Maßnahmen durchgeführt werden. Somit entsteht ein iterativer Prozess, welcher als Ablaufdiagramm in Abbildung 7.5 dargestellt ist.

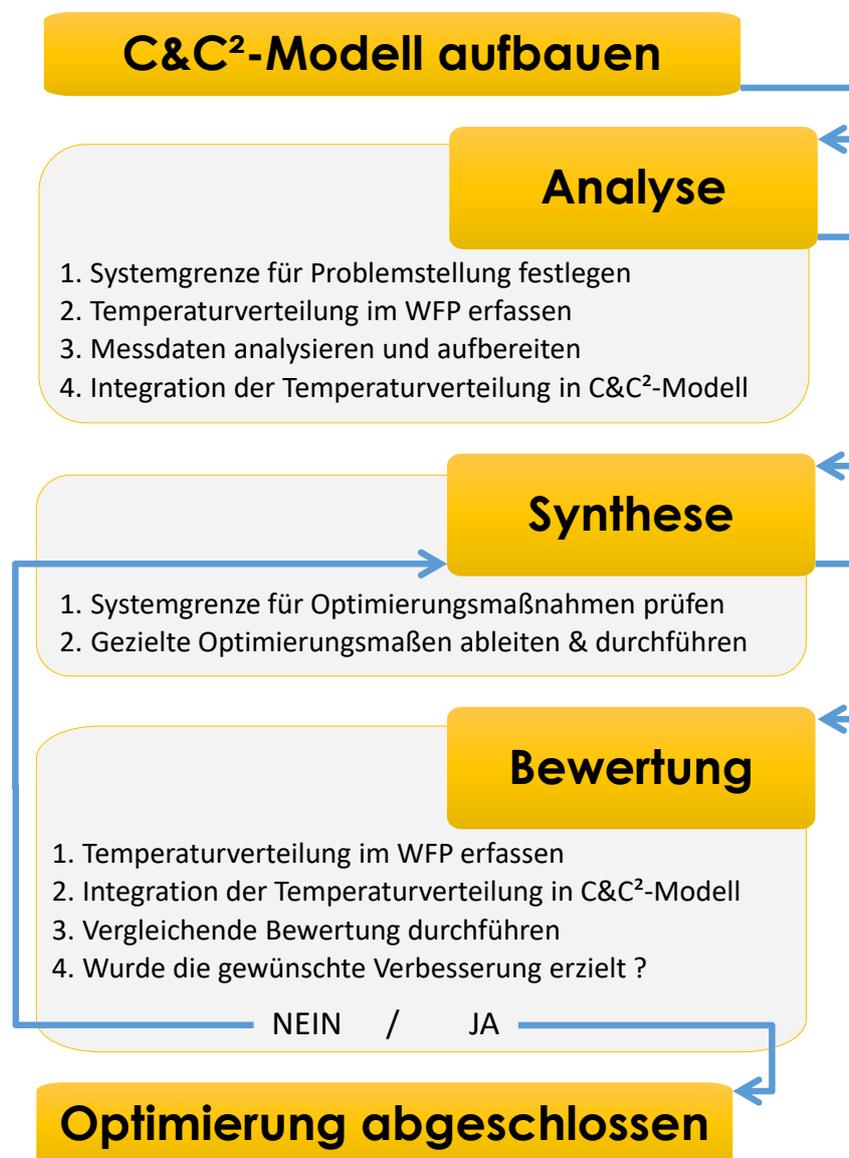


Abbildung 7.5: Ablaufdiagramm der Optimierungsmethode

<sup>321</sup>siehe Abbildung 2.19

## 7.2 Zwischenfazit

Für die Weiterentwicklung von Kupplungen wurde eine Methode zur zielgerichteten Gestaltoptimierung beschrieben. Mittels Integration der Temperaturverteilungsmessung in das C&C<sup>2</sup>-Modell der weiterzuentwickelnden trockenlaufenden Einscheibenkupplung wird sowohl die Analyse des Systemverhaltens, sowie auch die Synthese, also die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen, unterstützt. Es wurde ein zielgerichtetes Vorgehen beispielhaft beschrieben, welches im Sinne der PGE zur begründeten Gestaltvariation verwendet werden kann.

Somit kann die Forschungsfrage 4 wie folgt beantwortet werden:

### **Forschungsfrage 4: Methodisch Gestaltvariation**

Wie kann auf Basis der Messung der Temperaturverteilung in hinreichend feiner räumlichen Auflösung die Gestaltvariation im Sinne der PGE methodisch unterstützt werden?

### **Antwort**

Durch die Integration der Ergebnisse der Temperaturverteilungsmessung in das C&C<sup>2</sup>-Modell des weiterzuentwickelnden Systems, wurde die Messmethode in ein methodisches Vorgehen eingebettet. Mit dem beschriebenen zielgerichteten Vorgehen wird der Produktentwickler im Sinne der PGE unterstützt, indem eine zielgerichtete Gestaltvariation auf Basis der Temperaturverteilung ermöglicht wird. Dabei wird durch die Größe „präzisierte Wirkkontaktfläche“ eine Bewertung der Verbesserung durch getroffene Optimierungsmaßnahmen ermöglicht.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend sollen die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche weiterführende Forschungsaktivitäten gegeben werden.

### 8.1 Zusammenfassung

Ergebnis der Forschungsarbeit ist die in Kapitel 7 beschriebene Methode zur zielgerichteten Gestaltoptimierung von Friktionssystemen anhand der Messung der Temperaturverteilung. Auf Basis der zuvor definierten Zielsetzung wurde eine Messtechnik ausgewählt, mit welcher es möglich ist, die Temperaturverteilung nahe einem Friktionskontakt räumlich hochauflösend zu erfassen. Mittels einer Machbarkeitsstudie wurde die prinzipielle Einsetzbarkeit bei Prüfstandsversuchen dargelegt. Weiterhin wurde eine Fehlerbetrachtung hinsichtlich der Validität der faseroptischen Temperaturmessung durchgeführt, aus welcher Empfehlungen zur Integration der Messtechnik in das zu untersuchende System abgeleitet wurden. Mit der beschriebenen Anwendung der Temperaturverteilungsmessung bei trockenlaufenden Reibkupplungen, zum Beispiel der Auswertung der Homogenität der Temperaturverteilung, konnten Möglichkeiten zur Leistungssteigerung aufgezeigt werden. Das größte Potenzial zur Erhöhung der Leistungsdichte, ohne dabei an Robustheit einzubüßen, besteht darin, mit der entwickelten Methode dem Kupplungsentwickler ein Werkzeug zur Erweiterung seines Systemverständnisses an die Hand zu geben. Mit der Möglichkeit das Verhalten seines entwickelten Systems im Detail zu verstehen, also einen Schritt tiefer in das System hineinzuschauen als es bisher möglich war, können bei der Weiterentwicklung begründete, zielgerichtete Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden. In Abbildung 8.1 wird die entwickelte Messmethode in das in Abschnitt 2.5 eingeführte Portfolio eingeordnet. Mittels der Temperaturverteilungsmessung konnte der Erkenntnisgewinn gegenüber den bekannten Vorgehensweisen gesteigert werden.

Durch die Integration der Messdaten in den C&C<sup>2</sup>-Ansatz bei zeitgleicher Berücksichtigung der PGE wurde die Messtechnik in die vorhandenen Entwicklungswerkzeuge eingebettet. Durch die Definition einer Zielgröße, z.B. der Inhomogenitätssumme, ist es möglich, die durchgeführten Verbesserungsmaßnahmen zu bewerten. Die Analyse, Synthese und Bewertung kann in einem iterativen Prozess so lange durchgeführt werden, bis das gewünschte Ergebnis erzielt wird.

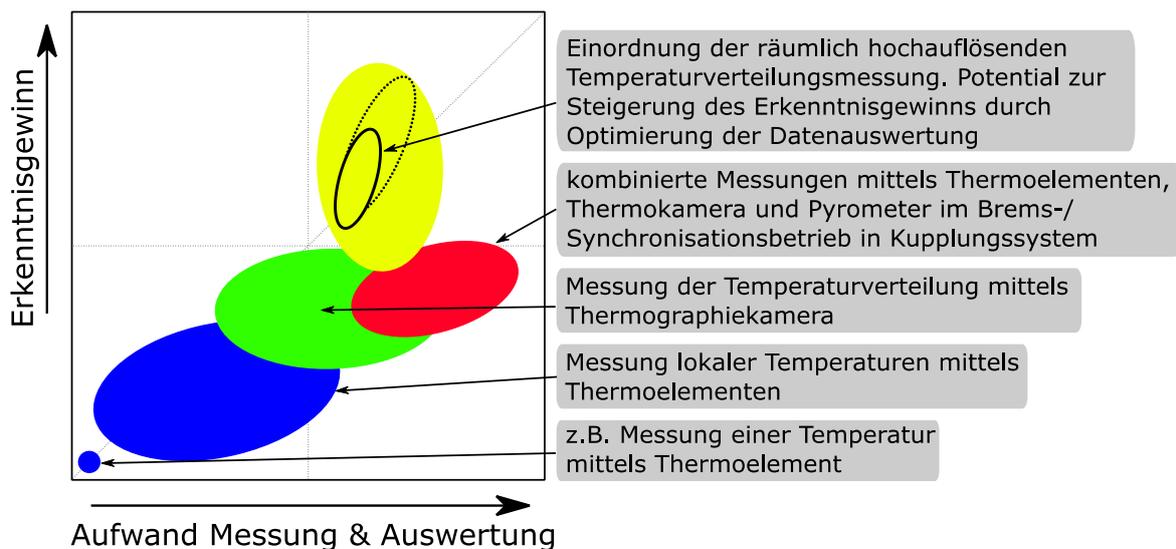


Abbildung 8.1: Einordnung der räumlich hochauflösenden Temperaturverteilungsmessung im Portfolio zur Einordnung der Vorgehensweisen zur Temperaturmessung

## 8.2 Ausblick

Anknüpfende Forschungsaktivitäten zur Temperaturverteilungsmessung sollten so ausgerichtet sein, dass das Systemverständnis noch weiter ausgebaut wird. Dazu sollten zunächst die Messdaten der gezeigten Messmethode hinsichtlich weiterer Effekte ausgewertet werden. Zum Beispiel ist es denkbar, anhand der Temperaturverteilung im Wirkflächenpaar auf vorliegende geometrische Fehler im System zu schließen oder eine Art „aktiven Reibradius“ zu bestimmen. Beides könnte zur Systemcharakterisierung genutzt werden. Weiterhin könnte die gezeigte Messmethode gewinnbringend zur Validierung von Thermomodellen eingesetzt werden. Mittels der räumlich hochauflösenden Messung der Temperaturverteilung ist es möglich, einen räumlich exakten Vergleich von Simulation und Messung durchzuführen und auf Basis der detaillierten Messdaten die Modelle zu optimieren. Die Messungen hoher Temperaturen im Bereich  $> 300^{\circ}\text{C}$  mittels entcoateter Sensorfaser, siehe Abschnitt 6.3, sollte weiterverfolgt werden. Hierbei gilt es Kalibrationsversuche und eine erneute Fehlerbetrachtung durchzuführen, da in diesem Temperaturbereich keine verlässlichen Parameter zum Verhalten einer entcoateten Sensorfaser vorliegen. In der detaillierten Untersuchung des Verhaltens bei Grenztemperaturen liegt die Chance die Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung von Kupplungssystemen zu reduzieren, was letztlich zu einer besseren Ausnutzung des Systems führt.

Um den Erkenntnisgewinn noch weiter zu steigern, wäre der Einsatz von optischen Drehübertragungssystemen zu prüfen. Mit solchen Drehübertragungssystemen ist es prinzipiell möglich, die faseroptische Sensorik im rotarischen Betrieb einzusetzen.

Hierzu gibt es schon erste Ansätze in der Abschlussarbeit von SÄNGER<sup>322</sup>, eine Machbarkeitsstudie steht aber noch aus. Hier gilt es zu beantworten, bis zu welchen Drehzahlen eine ausreichende Lichtintensität empfangen werden kann und bis zu welchen Drehzahlen aktuell erhältliche optische Drehübertragungssysteme eingesetzt werden können. Außerdem gilt es eine geeignete Methode zu entwickeln, welche die Längung der Faser auf Grund des Fliehkrafterinflusses unter Rotation kompensiert, um nur die Änderung durch thermische Ausdehnung zu erfassen.

Zum anderen wäre es sinnvoll, die gewonnenen Erkenntnisse in die vorhandenen Auslegungsrichtlinien<sup>323</sup> einfließen zu lassen. Bei der Auslegung von Kupplungssystemen werden sogenannte Sicherheitsfaktoren eingeführt, um letztlich das fehlende Verständnis der im Detail ablaufenden Prozesse zu kompensieren. Die Berücksichtigung der Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit würde dazu beitragen, Sicherheitsfaktoren bei der Auslegung verkleinern zu können.

---

<sup>322</sup> Sängler, 2016, betreute Abschlussarbeit

<sup>323</sup> VDI 2241 - Blatt 1, 1982 & VDI 2241 - Blatt 2, 1984



## 9 Literaturverzeichnis

### **Albers et al. 2001a**

Albers, A.; Albrecht, M.; Krüger, A.; Lux, R.: New Methodology for Power Train Development in the Automotive Engineering - Integration of Simulation, Design and Testing. Paper No. 2001-01-3303. In: SAE Automotive & Transportation Technology Congress. Barcelona, 1.10 - 3.10.2001, S. 239–245, 2001.

### **Albers et al. 2001b**

Albers, A.; Krüger, A.; Lux, R.; Albrecht, M.: Prüfen von Antriebssträngen am Beispiel des Kupplungsrupfens - Ganzheitliche Antriebsstrangentwicklung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 103, S. 44–49, 2001.

### **Albers et al. 2003a**

Albers, A.; Ott, S.; Nowicki, L.: Ganzheitliche Untersuchungsmethode von friktionskontaktinduzierten Schwingungen in Antrieben. In: VDI Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2003; Tagung Fellbach, 7. und 8. Oktober 2003. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 1786), 2003.

### **Albers et al. 2003b**

Albers, A.; Krüger, A.; Behrendt, M.: Kupplungssysteme im Automobilbau - Trends, Anforderungen und Lösungen. In: VDI Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2003; Tagung Fellbach, 7. und 8. Oktober 2003. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 1786), S. 3–30, 2003.

### **Albers et al. 2006a**

Albers, A.; Ott, S.; Karrar, C.: Forschungsvorhaben 442 - Reibschwingungen Trockenlauf. Frankfurt (FVA Abschlussberichte), 2006.

### **Albers et al. 2006b**

Albers, A.; Ott, S.; Karrar, C.: Reibschwingungen beim Trockenlauf. In: *antriebstechnik*, 2006.

### **Albers et al. 2006c**

Albers, A.; Ott, S.; Mitariu-Faller, M.: Tribologische Systemuntersuchungen an Fahrzeugkupplungen mit integrierten ingenieurkeramischen Komponenten. In: Getriebe in Fahrzeugen 2006; Friedrichshafen, 27. und 28. Juni 2006. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 1943), 2006.

### **Albers et al. 2006d**

Albers, A.; Ott, S.; Mitariu, M.: Tribologische Systemuntersuchungen an Fahrzeugkupplungen mit integrierten ingenieurkeramischen Komponenten. In: Getriebe in Fahrzeugen 2006; Friedrichshafen, 27. und 28. Juni 2006. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 1943), S. 445–468, 2006.

**Albers et al. 2007a**

Albers, A.; Ott, S.; Wang, J.: Attempt of Prediction of Vehicle Longitudinal Dynamic Performance Using Artificial Neural Networks (ANN). In: ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Las Vegas, Nevada, USA, 4–7,09.2007, S. 1061–1065, 2007.

**Albers et al. 2007b**

Albers, A.; Ott, S.; Karrar, C.: Experimentelle und simulative Untersuchung des Systemverhaltens einer Kombination aus unterschiedlichen Friktionspaarungen. In: VDI Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben. VDI-Berichte Nr. 1987. Wiesloch, 25.04.2007.

**Albers et al. 2007c**

Albers, A.; Ott, S.; Mitariu, M.: Innovative schaltbare Kupplungssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Friktionswerkstoffe. In: VDI Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben. VDI-Berichte Nr. 1987. Wiesloch, 25.04.2007.

**Albers et al. 2007d**

Albers, A.; Ott, S.; Mitariu, M.: Innovative trockenlaufende Reibkupplungen auf Basis ingenieurkeramischer Friktionswerkstoffe - Tribologische Charakterisierung auf Systemebene. In: Tagungsband Tribologie-Fachtagung. GfT - Gesellschaft für Tribologie. Göttingen, 24.09 - 26.09.2007.

**Albers et al. 2007e**

Albers, A.; Ott, S.; Karrar, C.: Model based method for a sophisticated dimensioning of clutch systems in view of the occurrence of frictional vibration. In: ICED - International Conference on Engineering Design. Cite des Sciences et de L'industrie. Paris, 2007.

**Albers et al. 2009**

Albers, A.; Mitariu, M.; Ott, S.: Unlubricated Clutch System based on the Function Relevant Friction Pairing Advanced Non-Oxide Ceramic vs. Steel. In: Proceedings of 33rd International Conference & Exposition on Advanced Ceramics and Composites. Daytona Beach, USA, 18.-23. Januar 2009.

**Albers et al. 2010**

Albers, A.; Lorentz, B.; Nowicki, L.: Numerical investigations in mixed friction systems. In: *International Journal of Multiphysics* 4 (1), S. 95–107, 2010.

**Albers et al. 2013a**

Albers, A.; Ott, S.; Schepanski, N.: FVA 442 III: Werkstoffkenngrößen Trockenlauf III. Analyse des Einflusses der Leitstützstruktur organischer Friktionswerkstoffe auf den

Reibwert, die Reibwertstabilität und das Verschleißverhalten organischer Friktionspaarungen (FVA Abschlussberichte, 1068), 2013.

**Albers et al. 2013b**

Albers, A.; Ott, S.; Merkel, P.: FVA 607: Kupplungsmodell zur Bearbeitung der Übertragbarkeit tribologischer Prüfergebnisse von Teilbelag auf Bauteiluntersuchungen (FVA Abschlussberichte 1067), 2013.

**Albers et al. 2013c**

Albers, A.; Ott, S.; Merkel, P.: FVA Forschungsvorhaben 607 I Kupplungsmodell zur Beschreibung der Übertragbarkeit tribologischer Prüfergebnisse von Teilbelag- auf Bauteiluntersuchungen (FVA Abschlussberichte), 2013.

**Albers et al. 2013d**

Albers, A.; Stier, C.; Geier, M.: Herausforderungen von Kupplungssystemen in modernen Antriebssystemen. In: VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben. Karlsruhe, 05. und 06. März 2013. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2206), 2013.

**Albers et al. 2013e**

Albers, A.; Ott, S.; Merkel, P.: Methods for clutch dimensioning. In: Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Beijing, 27–30 November 2012. Berlin, New York: Springer (Lecture notes in electrical engineering, v. 196), 2013.

**Albers et al. 2015a**

Albers, A.; Ott, S.; Aschoff, M.; Schepanski, N.; Kniel, J.: Analyse wirksamer tribologischer Phänomene durch innovative Mess- und Versuchsmethoden. In: VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2015. Karlsruhe, 28. und 29. April 2015. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2245), S. 59–70, 2015.

**Albers et al. 2015b**

Albers, A.; Ott, S.; Kniel, J.; Lorentz, B.: Neuer Ansatz zur Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens trockenlaufender Reibkupplungen durch faseroptische Sensorik mit hoher räumlicher Messdichte. In: VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2015. Karlsruhe, 28. und 29. April 2015. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2245), S. 297–300, 2015.

**Albers et al. 2015c**

Albers, A.; Bursac, N.; Wintergerst, E.: Produktgenerationsentwicklung - Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Binz, B. (Hg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2015.

**Albers et al. 2016a**

Albers, A.; Ott, S.; Lorentz, B.; Kniel, J.; Eisele, M.: A new approach for higher first gear ratios by increasing the clutch performance using fiber sensing technology. In:

VDI Fachtagung Getriebe in Fahrzeugen 2016, VDI-Berichte 2276, S. 469–484, 2016.

**Albers et al. 2016b**

Albers, A.; Gladysz, B.; Kniel, J.; Aschoff, M.; Meyer, A.: Integration von Versuchsergebnissen in C&C<sup>2</sup>-Modellen zur Wiederverwendung in der Produktgenerationsentwicklung am Beispiel eines trockenlaufenden Kupplungssystems. In: KT 2016 - 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 6.10. - 7.10.2016. Rostock, 2016.

**Albers et al. 2016c**

Albers, A.; Ott, S.; Lorentz, B.; Kniel, J.; Eisele, M.: Investigation of the thermo-mechanical behaviour of clutches using fiber optic sensing technology with high spatial measurement density. In: Proceeding of Nordtrib 2016. The 17th Nordic Symposium on Tribology. Hämeenlinna, Finland, 14-17 June 2016.

**Albers et al. 2016d**

Albers, A.; Bursac, N.; Rapp, S.: PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. In: Bertram, T., Kabelac, S. und Stahl, K. (Hg.): Forschung im Ingenieurwesen, 2016.

**Albers et al. 2016e**

Albers, A.; Bursac, N.; Rapp, S.: PGE-PRODUCT GENERATION ENGINEERING-CASE STUDY OF THE DUAL MASS FLYWHEEL. In: DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference, 2016.

**Albers et al. 2016f**

Albers, A.; Behrendt, M.; Klingler, S.; Matros, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Lindemann, U. (Hg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag, S. 541–569, 2016.

**Albers et al. 2016g**

Albers, A.; Reiß, N.; Bursac, N.; Breitschuh, J.: 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. In: Proceedings NordDesign 2016.

**Albers et al. 2017a**

Albers, A.; Ott, S.; Kniel, J.; Basiewicz, M.: Studie zur Ermittlung von Potenzialen zur Leistungssteigerung von trockenlaufenden Kupplungssystemen mittels Temperaturverteilungsmessung. In: VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme 2017. Karlsruhe, 17. und 18. Mai 2017. Düsseldorf: VDI-Berichte 2309, S. 65–82, 2017.

**Albers et al. 2017b**

Albers, A.; Ott, S.; Kniel, J.; Basiewicz, M.: Studie zur Ermittlung von Potenzialen zur Leistungssteigerung von trockenlaufenden Kupplungssystemen mittels

Temperaturverteilungsmessung. In: Forschung im Ingenieurwesen (2017).  
ISSN:1434-0860. DOI: 10.1007/s10010-017-0256-7

**Albers et al. 2017c**

Albers, A.; Ott, S.; Kniel, J.; Eisele, M.; Basiewicz, M.: Investigation of the thermo-mechanical behaviour of clutches using fibre optic sensing technology with high spatial measurement density. In: *Proc IMechE Part J: Journal of Engineering Tribology*, im Druck. DOI: 10.1177/1350650117740011

**Albers / Arslan 2004a**

Albers, A.; Arslan, A.: Increasing the Performance of Motor Vehicle Clutches by the Use of Ceramics and the Resulting Effects on System Design. In: FISITA 2004 World Automotive Congress. Barcelona, 23 - 27 Mai.2004.

**Albers / Arslan 2004b**

Albers, A.; Arslan, A.: Potenzial von keramischen Belägen in trockenlaufenden Kupplungssystemen zur Übertragung höherer Motorleistungen in Fahrzeugantriebssträngen. In: VDI Fachtagung Getriebe in Fahrzeugen. VDI-Berichte Nr. 1827. Friedrichshafen: VDI Verlag, S. 549-565, 2004.

**Albers / Lorentz 2010a**

Albers, A.; Lorentz, B.: A numerical approach to investigate mixed friction systems in the micro scale. In: ASME 10th biennial conference engineering systems and design analysis 2010.

**Albers / Lorentz 2010b**

Albers, A.; Lorentz, B.: Numerical investigations of mixed lubricated systems taking into account surface roughness. In: GFT Fachtagung für Tribologie 2010.

**Albers / Lorentz 2011**

Albers, A.; Lorentz, B.: A Numerical Approach to Investigate Mixed Lubrication Phenomena. In: NAFEMS 2011.

**Albers / Lorentz 2012**

Albers, A.; Lorentz, B.: A numerical way for investigating the impact of surface roughness on mixed lubrication friction. In: Proceedings of the 15th Nordic Symposium on Tribology 2012.

**Albers / Matthiesen 2002**

Albers, A.; Matthiesen, S.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zur Analyse und Synthese technischer Systeme. In: Springer-VDI-Verlag (Hg.): Konstruktion. Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe, Band 54, S. 55–60, 2002.

**Albers / Ott 2006**

Albers, A.; Ott, S.: A tribological system measuring technique for the identification of nvh-relevant effects in the working surface pair of a vehicle clutch. In: ICMT - International Conference on Mechanical Transmissions. Chongqing University, 25.-29. September, 2006.

**Albers / Ott 2015**

Albers, A.; Ott, S.: Innovationsstrategie und Kupplungsgenerationsentwicklung. Material-, Gestalt und Funktionsvariationen für innovative Kupplungssystemlösungen. In: VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2015. Karlsruhe, 28. und 29. April 2015. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte 2245) 2015.

**Albers / Stier 2010**

Albers, A.; Stier, C.: Analysis of geometrical deviations in clutch systems and their interdependencies in relation to the excitation of judder vibrations. In: FISITA 2010 World Automotive Congress. Budapest, 30 May – 4 June 2010.

**Albers / Stier 2011**

Albers, A.; Stier, C.: Experimentelle Analyse der Dämpfung in PKW-Antriebssträngen in Hinblick auf die Übertragung von Anfahrtschwingungen. In: VDI Fachtagung Schwingungsdämpfung. VDI-Berichte 2164. Leonberg, 16. und 17. November 2011. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 169–179 2011.

**Albers / Wintergerst 2014**

Albers, A.; Wintergerst, E.: The Contact and Channel Approach (C&C2-A): Relating a System's Physical Structure to Its Functionality. In: Chakrabarti, A. und Blessing, L. T. M. (Hg.): An anthology of theories and models of design. Philosophy, approaches and empirical explorations. London: Springer, S. 151–171, 2014.

**Albers WS 2011/2012**

Albers, A.: Vorlesungsunterlagen Integrierte Produktentwicklung. Karlsruhe. WS 2011/2012

**Antoni 2000**

Antoni, M.: Praxis der industriellen Temperaturmessung. 1. Aufl. Alzenau: ABB Automation Products, 2000.

**Arslan / Albers 2002**

Arslan, A.; Albers, A.: Trockenkupplung mit keramischen Reibelementen. In: Tagungsband zum Statuskolloquium. Sonderforschungsbereich 483, 22.01.2002, S. 143–152 2002.

**Arslan-Hürst 2005**

Arslan-Hürst, A.: Integration ingenieurkeramischer Werkstoffe in das

funktionsrelevante Wirkflächenpaar einer Kupplung. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 16. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2005. ISSN: 1615-8113.

**Arslan-Hürst / Albers 2001**

Arslan-Hürst, A.; Albers, A.: Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe. [1.] Statuskolloquium am 22. Januar 2002. Karlsruhe: DFG-SFB 483, 2001.

**Beitler 2008**

Beitler, H.: Untersuchung zum temperatur-und Wärmeabgabeverhalten einer Einscheiben-Trockenkupplung. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 31. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2008. ISSN: 1615-8113.

**Bergheim 1997**

Bergheim, M.: Organisch gebundene Kupplungsbelaege Moeglichkeiten und Grenzen. In: Kupplungen in Antriebssystemen. Tagung Fulda, 3. und 4. März 1997, VDI Berichte 527. Düsseldorf: VDI-Berichte 1323, S. 527–548 1997.

**Bernhard 2004**

Bernhard, F.: Technische Temperaturmessung. Physikalische und meßtechnische Grundlagen, Sensoren und Meßverfahren, Meßfehler und Kalibrierung ; Handbuch für Forschung und Entwicklung, Anwendungspraxis und Studium. Berlin [u.a.]: Springer (VDI-Buch), 2004.

**Bernhard 2014**

Bernhard, F. (Hg.) (2014): Handbuch der Technischen Temperaturmessung. 2. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch).

**Berns / Theisen 2008**

Berns, H.; Theisen, W.: Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.

**Birkhofer 1980**

Birkhofer, H.: Analyse und Synthese der Funktionen technischer Produkte, Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ, Düsseldorf, 1980.

**Borlinghaus 2016**

Borlinghaus, R. T.: Konfokale Mikroskopie in Weiß. Optische Schnitte in allen Farben. Springer Science and Business Media, 2016.

**Breuer 2012**

Breuer, B.: Bremsenhandbuch. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik. 4., überar. u. erw. Aufl. 2012. Wiesbaden: Vieweg (ATZ-MTZ Fachbuch), 2012.

**Cellpack AG 2017**

Cellpack AG: Werkstoffdaten Thermoplaste, 2017. Online verfügbar unter [http://kunststofftechnik.cellpack.com/fileadmin/user\\_upload/bbcgroup.biz/gallery/plasticttech/Werkstoffdaten\\_Thermoplaste\\_132-137\\_dt.pdf](http://kunststofftechnik.cellpack.com/fileadmin/user_upload/bbcgroup.biz/gallery/plasticttech/Werkstoffdaten_Thermoplaste_132-137_dt.pdf), zuletzt geprüft am 02.03.2017.

**Czichos / Habig 2015**

Czichos, H.; Habig, K.-H. (Hg.) (2015): Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Unter Mitarbeit von Jean-Pierre Celis, Richard S. Cowan, Alfons Fischer, Klaus Gerschwiler, Thomas Gradt, Erich Kleinlein et al. 4., vollst. überarb. u. erw. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

**Deters 2002**

Deters, L.: Tribologie. Verschleiß, Reibung ; Definitionen, Begriffe, Prüfung. Ausg. Sept. 2002. Moers: GfT, Ges. für Tribologie (GfT-Arbeitsblatt // Gesellschaft für Tribologie, 7), 2002.

**Deutsche Edelstahlwerke GmbH 2011**

Deutsche Edelstahlwerke GmbH: Unlegierter Vergütungsstahl C45E/C45R. Hg. v. Deutsche Edelstahlwerke GmbH, 2011. Online verfügbar unter [https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/Baustahl/1.1191\\_1.1201\\_de.pdf](https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/Baustahl/1.1191_1.1201_de.pdf), zuletzt aktualisiert am 08.2011, zuletzt geprüft am 04.01.2017.

**Dörsch 2004**

Dörsch, S.: Periodische Veränderung lokaler Kontaktgrößen in Reibpaarungen trockenlaufender Bremsen. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2003, 2004.

**Drexl 1997**

Drexl, H.-J.: Kraftfahrzeugkupplungen. Funktion und Auslegung. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie (Die Bibliothek der Technik, 138), 1997.

**Ebel 2015**

Ebel, B.: Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 85. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015. ISSN: 1615-8113.

**Ehinger et al. 2013**

Ehinger, K.; Flach, D.; Gellrich, L.; Horlebein, E.; Huck, R.; Ilgner, H. et al.: Industrielle Temperatur-Messtechnik. Grundlagen und Praxis, 2013.

**Ehrlenspiel / Meerkamm 2013**

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser, 2013.

**Eisengießerei O. Gattermann GmbH & Co. KG 2017**

Eisengießerei O. Gattermann GmbH & Co. KG: Grauguss. Gusseisen mit Lamellengrafit. Hg. v. Eisengießerei O. Gattermann GmbH & Co. KG, 2017. Online verfügbar unter [http://www.gattermannguss.de/pdf/Werkstoffliste\\_Gattermann.pdf](http://www.gattermannguss.de/pdf/Werkstoffliste_Gattermann.pdf), zuletzt geprüft am 04.01.2017.

**Fa. RECKMANN GMBH 2016**

Fa. RECKMANN GMBH: Bild Mantelthermoelemente, 2016. Online verfügbar unter <http://www.reckmann.de/produkte/mantelthermoelemente.htm>, zuletzt geprüft am 29.06.2016.

**Felger et al. 2006**

Felger, R.; Spandern, C.; Häßler, M.; Elison, H.-D.: Innovative Kupplungsbeläge. Coole Beläge für heiße Anwendungen. In: LuK GmbH & Co. KG (Hg.): 08. LuK Kolloquium 2006. „LuK Forward“. Baden-Baden, 04./05.05.2006.

**Gauger 1998**

Gauger, D.: Wirkmechanismen und Belastungsgrenzen von Reibpaarungen trockenlaufender Kupplungen. Düsseldorf: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente 301, 1998.

**GEPRIS – Geförderte Projekte der DFG**

GEPRIS – Geförderte Projekte der DFG: Entwicklung von hochbelastbaren Dünnschichtsensoren zur Untersuchung von Druck- und Temperaturverteilung in Mischreibungskontakten, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. Online verfügbar unter <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/278665175>, zuletzt geprüft am 24.01.2017.

**Götte / Pape 2004**

Götte, T.; Pape, T.: DSG - das Direktschaltgetriebe von Volkswagen. Innovative Getriebetechnik mit Doppelkupplung. In: VDI Fachtagung Getriebe in Fahrzeugen. VDI-Berichte Nr. 1827. Friedrichshafen: VDI Verlag, S. 35–49. 2004.

**Han et al. 1992**

Han, Z.-p.; Song, W.-y.; Dai, B.-r.: Measuring Surface Temperature Distributions on Clutch Discs. In: Worldwide Passenger Car Conference and Exposition. Passenger Car Conference & Exposition. Dearborn, Michigan, September 28-October 1: SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States (SAE Technical Paper Series) 1992.

**Hauschild 2015**

Hauschild, J.: Entwicklung einer Vorgehensweise zur Bestimmung und Verifikation von Wärmeübergangsparametern aus CFD Simulationen von Trockenkupplungssystemen. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 91.

Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015. ISSN: 1615-8113.

#### **Hebbale et al. 2015**

Hebbale, K.; Samie, F.; Kish, J.: Dry Dual Clutch Transmission (DCT) Thermal Model. In: SAE 2015 World Congress & Exhibition, APR. 21, 2015: SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States (SAE Technical Paper Series) 2015.

#### **Hoic et al. 2013**

Hoic, M.; Herold, Z.; Kranjcevic, N.; Deur, J.; Ivanovic, V.: Experimental Characterization and Modeling of Dry Dual Clutch Thermal Expansion Effects. In: *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 6 (2), S. 775–785 2013.

#### **Hubka 1984**

Hubka, V.: Theorie Technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Zweite, völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer (Hochschultext), 1984.

#### **InfraTec 2016**

InfraTec: High-Speed Thermografie, 2016. Online verfügbar unter <http://www.infratec.de/de/thermografie/anwendungsgebiete/forschung-entwicklung/high-speed-thermografie.html>, zuletzt geprüft am 24.10.2016.

#### **IPEK - Institut für Produktentwicklung 2017**

IPEK - Institut für Produktentwicklung: Glossar der KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung, 2017. Online verfügbar unter [https://vm-glossar.ipek.kit.edu/\\_layouts/15/start.aspx#/SitePages/Homepage.aspx](https://vm-glossar.ipek.kit.edu/_layouts/15/start.aspx#/SitePages/Homepage.aspx), zuletzt geprüft am 17.07.2017.

#### **Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 2000 - 2011**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Hg.) (2000 - 2011): Sonderforschungsbereich 483. Statuskolloquium. <https://www.sfb483.kit.edu/>. Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://www.sfb483.kit.edu/>.

#### **Karrar 2009**

Karrar, C.: Ein Beitrag zur Entwicklung, Dimensionierung und Prüfung trockenlaufender Kupplungen und Bremsen in Antriebsstrangsystemen im Hinblick auf die Vermeidung von Reibschwingungen. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 35. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2009. ISSN: 1615-8113.

#### **Kirchner 2007.**

Kirchner, E.: Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben. Grundlagen der

Auslegung, Entwicklung und Validierung von Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten. Berlin, New York: Springer (VDI), 2007.

**Kleinlein 2006**

Kleinlein, C.: Beschreibung von Reibpaarungen in trocken laufenden Kupplungen und Bremsen durch ihre globalen und lokalen Reibungs- und Verschleißseigenschaften. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente 388, 2006.

**Klingler 2017**

Klingler, S.: Eine Methode zur effizienten und effektiven Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Im Druck. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2017. ISSN: 1615-8113.

**Kniel et al. 2015**

Kniel, J.; Gommeringer, M.; Lorentz, B.: A new approach for the optimization of the thermo-mechanical behaviour of dry-running clutches using fibre-optic sensing technology with high spatial measurement density. In: *Proc IMechE Part J: Journal of Engineering Tribology* 229 (8), S. 1003–1010 2015. DOI: 10.1177/1350650115580186

**Krimmel et al. 2006**

Krimmel, H.; Maschmann, O.; Sedit, S.; VOGT, D.: Chancen und Grenzen von HiL-Tests. In: *ATZelektronik*. ISSN: 1862-1791, Bd. 4. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 18–25, 2006.

**Krüger 2003**

Krüger, A.: Kupplungsrupfen - Ursachen, Einflüsse und Gegenmaßnahmen-. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 10. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2003. ISSN: 1615-8113.

**Lorentz 2013**

Lorentz, B.: An approach to investigate surface roughness influence on non-lubricated and lubricated contacts by means of the finite element analysis. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 63. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2013. ISSN: 1615-8113.

**Lorentz / Albers 2013**

Lorentz, B.; Albers, A.: A numerical model for mixed lubrication taking into account surface topography, tangential adhesion effects and plastic deformations. In: *Tribology International* 2013.

**Lührsen 1987**

Lührsen, B.: Wirkung der thermischen Belastung auf die Reibpaarungen großer Trommel- und Scheibenbremsen, 1987.

**Luna Inc.**

Luna Inc.: FIBER OPTIC SENSING. Online verfügbar unter [https://lunainc.com/wp-content/uploads/2012/08/3567\\_Luna\\_Sensing\\_Brochure\\_FINAL\\_111414.pdf](https://lunainc.com/wp-content/uploads/2012/08/3567_Luna_Sensing_Brochure_FINAL_111414.pdf), zuletzt geprüft am 10.03.2016.

**Luna Inc. 2016**

Luna Inc.: Data Sheet ODiSI B. Optical Distributed Sensor Interrogator, 2016. Online verfügbar unter [http://lunainc.com/wp-content/uploads/2016/07/ODB5.0\\_DataSheet\\_071916\\_final.pdf](http://lunainc.com/wp-content/uploads/2016/07/ODB5.0_DataSheet_071916_final.pdf), zuletzt geprüft am 07.10.2016.

**Marx 2014**

Marx, D.: Das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit: Ein Modell zur Analyse von Kundenwünschen in der Praxis. Hamburg: Igel Verlag (21. Juli 2014), 2014.

**Merkel 2015**

Merkel, P.: Modellierung des Temperaturverhaltens und experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Reibbelagsgeometrie auf das Reibwertverhalten am Beispiel trockenlaufender Friktionssysteme. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 88. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015. ISSN: 1615-8113.

**Mitariu-Faller 2009**

Mitariu-Faller, M.: Methoden und Prozesse zur Entwicklung von Friktionssystemen mit Ingenieurkeramik am Beispiel einer trockenlaufenden Fahrzeugkupplung. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 38. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2009. ISSN: 1615-8113.

**Musiol 1994**

Musiol, F.: Erklärung der Vorgänge in der Kontaktzone von trockenlaufenden Reibpaarungen über gesetzmäßig auftretende Phänomene im Reibprozeß. Dissertation, TU Berlin, Berlin, 1994.

**Nauheimer et al. 2007**

Nauheimer, H.; Bertsche, B.; Lechner, G.; Ryborz, J.; Novak, W.: Fahrzeuggetriebe. Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion. 2., bearbeitete und erw. Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch), 2007.

**Oedekoven 1989**

Oedekoven, A.: Temperaturverhalten von trockenlaufenden Reibungskupplungen.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Hochsch., Diss. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, 181), 1989.

**Pahl et al. 2007**

Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.

**Quinn 1990**

Quinn, T. J.: Temperature. 2nd ed. London, San Diego: Academic (Monographs in physical measurement), 1990.

**Roth 2000**

Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre. 3. Auflage, erweitert und neu gestaltet. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, 2000.

**Saak 2006**

Saak, M.: Entwicklung eines Konzeptes und eines Prototypen für ein rechnergestütztes Werkzeug zum effizienten Einsatz der Problemlösungsmethodik „Spalten“. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 23. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2006. ISSN: 1615-8113.

**Samiec 2011**

Samiec, D.: Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung. In: *Photonik* (6), S. 34–37 2011.

**Sauer et al. 2006a**

Sauer, B.; Albers, A.; Deters, L.; Feldhusen, J.; Leidich, E.; Linke, H. et al.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2. Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben. Fünfte, vollständig neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (SpringerLink : Bücher), 2006.

**Sauer et al. 2008b**

Sauer, B.; Albers, A.; Deters, L.; Feldhusen, J.; Leidich, E.; Linke, H. et al.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1. Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (SpringerLink : Bücher), 2008.

**Schlüter 2010**

Schlüter, V. G.: Entwicklung eines experimentell gestützten Bewertungsverfahrens zur Optimierung und Charakterisierung der Dehnungsübertragung

oberflächenapplizierter Faser-Bragg-Gitter-Sensoren. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (BAM-Dissertationsreihe, 56), 2010.

#### **Severin et al. 1996**

Severin, D.; Lühresen, B.; Gauger, D.: Leistungsgrenzen von Trockenkupplungen. Abschlußbericht ; Forschungsvorhaben Nr. 215 Reibkupplungen (Trockenlauf). Frankfurt: FVA (Forschungsheft / Forschungsvereinigung Antriebstechnik, 508), 1996.

#### **Severin / Dörsch 2001**

Severin, D.; Dörsch, S.: Friction mechanism in industrial brakes. In: *Wear* 249 (9), S. 771–779, 2001.

#### **Stier 2015**

Stier, C.: Ein Beitrag zur Validierung von Antriebssystemen mit Bezug auf kupplungs- und motorinduzierte Schwingungen. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 82. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015. ISSN: 1615-8113.

#### **Strobel 2014**

Strobel, O.: Lichtwellenleiter-Übertragungs- und Sensortechnik. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: VDE-Verl., 2014.

#### **Tissot 2013**

Tissot, A.: Analysis and selection of dry clutch linings with focus on system requirements. In: VDI-Fachtagung Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben. Karlsruhe, 05. und 06. März 2013. VDI-Berichte 2206, 2013.

#### **VDI 2206 2004**

VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Design methodology for mechatronic systems. Düsseldorf: Beuth Verlag, 2004.

#### **VDI 2221 1993**

VDI 2221. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth Verlag (VDI-Richtlinien), 1993.

#### **VDI 2241 - Blatt 1 1982**

VDI 2241 - Blatt 1: Schaltbare fremdbetätigte Reibkupplungen und -bremsen. Begriffe, Bauarten, Kennwerte, Berechnungen. Berlin: Beuth Verlag (VDI-Richtlinien, 2241,1), 1982.

#### **VDI 2241 - Blatt 2 1984**

VDI 2241 - Blatt 2: Schaltbare fremdbetätigte Reibkupplungen und -bremsen. Systembezogene Eigenschaften, Auswahlkriterien, Berechnungsbeispiele. Berlin: Beuth Verlag (VDI-Richtlinien, 2241,2), 1984.

**Völkel et al. 2014**

Völkel, K.; Pflaum, H.; Stahl, K.: Sachstandsbericht FVA 150 VII - KUPSIM 3.0. Erweiterung der Simulationsmethodik zur Berechnung des instationären Temperaturverhaltens nasslaufender Lamellenkupplungen (FVA Abschlussberichte), 2014.

**Völkel et al. 2016**

Völkel, K.; Pflaum, H.; Stahl, K.: Erweiterung der Simulationsmethodik zur Berechnung des instationären Temperaturverhaltens nasslaufender Lamellenkupplungen. FVA 150 VII: KUPSIM 3.0. In: FVA Forschungsreport 2016. FVA-Informationstagung 2016, Bericht-Nr.: 5297. FVA-Informationstagung 2016. Würzburg, 29. und 30. November. 2 Bände, S. 427–444 2016.

**Wintergerst 2015**

Wintergerst, E.: Leitfaden zur deduktiven Gestaltvariation durch Ermittlung der funktionsbestimmenden Stellgrößen in der Produktgenerationsentwicklung. In: IPEK - Forschungsberichte. Hrsg. von A. Albers. Bd. 86. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015. ISSN: 1615-8113.

**Wohlleber et al. 2011**

Wohlleber, F.; Pflaum, H.; Höhn, B.-R.; Stahl, K.: Wärmeübergang Lamellenkupplungen. Ermittlung von Wärmeübergangsverhalten und Schluckvermögen von Lamellenkupplungen und Verifizierung und Erweiterung der Modellierung des Wärmeübergangs in KUPSIM. Forschungsvorhaben Nr. 413 II + III (Heft 985), 2011.

**Wohlleber 2012**

Wohlleber, F.: Thermischer Haushalt nasslaufender Lamellenkupplungen. Zugl.: München, Technische Universität, Diss., 2012. München: Dr. Hut (Lehrstuhl für Maschinenelemente, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau, 184), 2012.

## **Betreute Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten**

Nachfolgend sind die durch den Autor im Rahmen der Forschungsarbeit betreuten Abschlussarbeiten auflistet.

### **Eisele 2014**

Eisele, M.; Co-Betreuer: Kniel, J.; Betreuer: Matthiesen, S.: Validierung eines faseroptischen Temperaturmessverfahrens anhand eines akademischen Beispiels. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014.

### **Gommeringer 2014**

Gommeringer, M.; Co-Betreuer: Kniel, J.; Betreuer: Albers, A.: Machbarkeitsstudie zur Temperatur- und Anpresskraftmessung mit faseroptischer Messtechnik in Kupplungssystemen. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2014.

### **Sänger 2016**

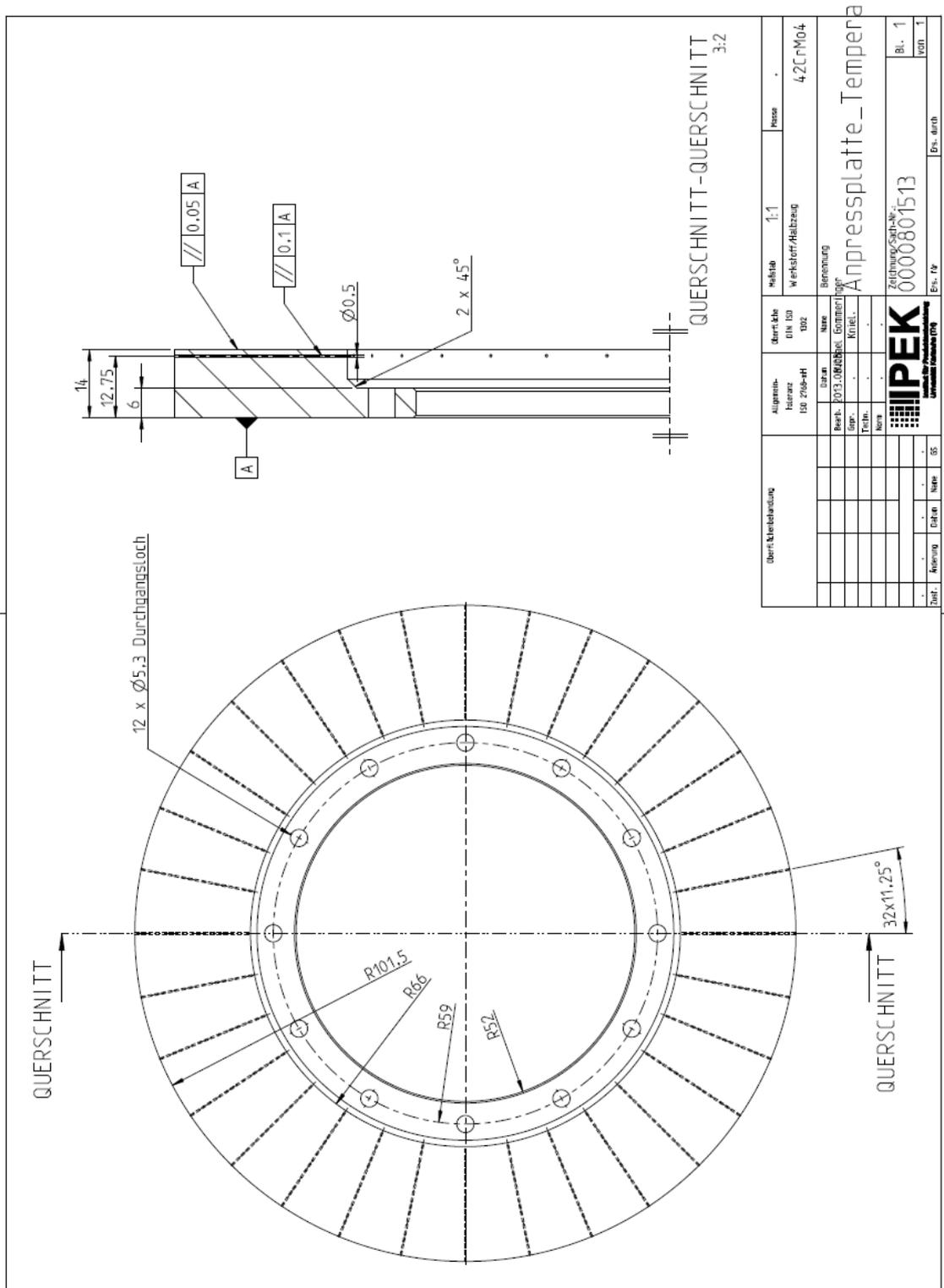
Sänger, J.; Co-Betreuer: Kniel, J.; Betreuer: Albers, A.: Machbarkeitsstudie zur Temperaturverteilungsmessung eines Friktionskontaktes mittels faseroptischer Sensorik in einem rotierenden System. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2016.

### **Schönhoff 2015**

Schönhoff, C.; Co-Betreuer: Kniel, J.; Betreuer: Albers, A.: Entwicklung eines Versuchsaufbaus für die faseroptische Temperaturverteilungsmessung in einer Anpressplatte. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2015.

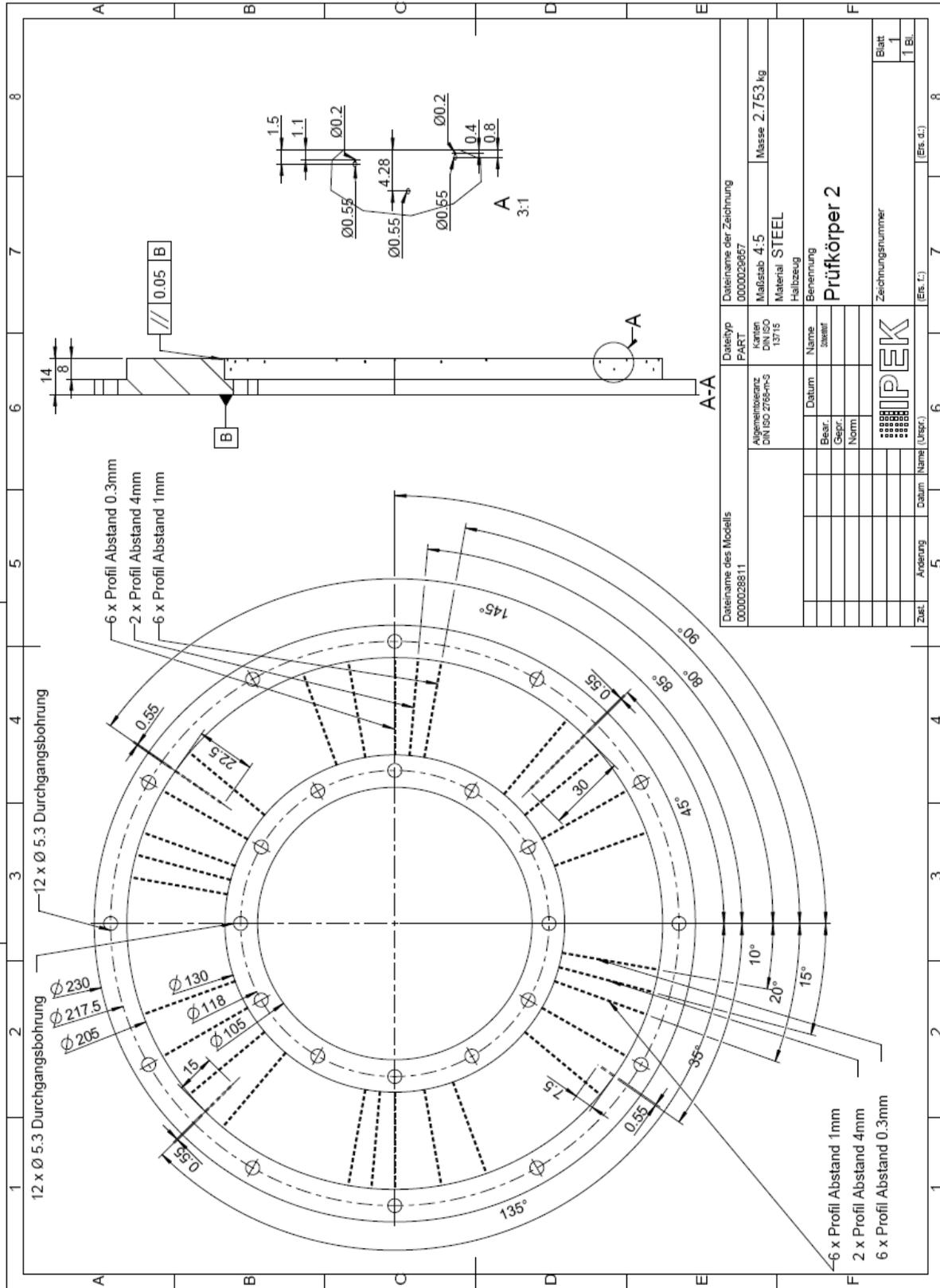
# 10 Anhang

Anpressplatte aus der Machbarkeitsstudie



Oberflächenelement		Maßstab	1:1	Prozess	
Allgemeine Information		Material	Werkstoff/Haltzeug	42CrMo4	
DIN 102		1002			
Bezeichnung		Name	Anpressplatte_Tempera		
Bauh.		013.0000000	Zeichnungs-Nr.: 0000801513		
Sap.			Bl. 1		
Teiln.			VON 1		
Norm			Ers. Nr.		
IPEK		Ers. Nr.			
Datei		05			

Anpressplatte für Anwendung der Temperaturverteilungsmessung



## Werkstoffdaten C45 aus DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH

## 1.1191/1.1201

## Unlegierter Vergütungsstahl

C45E/C45R

C 0,42 – 0,50 Si max. 0,40 Mn 0,50 – 0,80 S max. 0,035 / 0,020 – 0,040

<b>Normenzuordnung</b>	EN 10083-2	1.1191/1.1201	C45E/C45R	
	EN 10269	1.1191	C45E	
	ASTM		A194 Gr. 2	
	BS		080M46	
	AFNOR		XC45, XC42H1/ XC48H1, XC48H1u	
	DIN 17200	1.1191/1.1201	Ck45/Cm45	
	SIS	1672		
	UNE	F1140/F1145	C45K/C45 K-1	
	ISO 683-1		C45E4/C45M22	
<b>Hauptanwendung</b>	Der Vergütungsstahl C45E bzw. C45R wird für Bauteile des Automobilbaus und des allgemeinen Maschinenbaus verwendet, die verhältnismäßig niedrigen Belastungen unterliegen.			
<b>Technischer Lieferzustand</b>	Vergütet	600 – 850 MPa		
	Weichgeglüht	Max. 207 HB		
	Kaltscherfähig gegläht	Max. 255 HB		
<b>Schweißen</b>	C45E bzw. C45R sind nur schwer schweißbar und sollten daher in Schweißkonstruktionen nicht eingesetzt werden.			
<b>Warmumformung</b>	C45E bzw. C45R werden bei 1100 °C – 850 °C warm umgeformt und sollen anschließend langsam abgekühlt werden.			
<b>Physikalische Eigenschaften</b>	Dichte (kg/dm <sup>3</sup> )	7,70		
	Elastizitätsmodul (10 <sup>3</sup> MPa)	210		
	Elektr. Widerstand bei 20 °C (Ω mm <sup>2</sup> /m)	0,19		
	Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C (W/m K)	42,6		
	Spez. Wärmekapazität bei 20 °C (J/kg K)	470		
	Wärmeausdehnung			
	im weichgeglühten Zustand (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )			
	20 – 100 °C	11,1		
	20 – 200 °C	12,1		
	20 – 300 °C	12,9		
20 – 400 °C	13,5			
<b>Mechanische Eigenschaften</b>	Im vergüteten Zustand bei Raumtemperatur			
	Durchmesser (mm)	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 100
	Streckgrenze (MPa)	490	430	370
	Zugfestigkeit (MPa)	700 – 850	650 – 800	630 – 780
	Bruchdehnung (L <sub>0</sub> = 5 d <sub>0</sub> ) (%)	14	16	17
	Brucheinschnürung (%)	35	40	45
	Kerbschlagarbeit ISO - V (J)	25	25	25

Hinweis: Diese typischen Werte gelten für Längsproben, die bis 25 mm Durchmesser aus dem Kern, über 25 mm aus der Randzone, und zwar mit einem Randabstand von 12,5 mm herausgearbeitet werden. Abweichende Anforderungen können auf Anfrage berücksichtigt werden.

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE

Providing special steel solutions



## Werkstoffdaten EN-GJL-250 (GG25) und EN-GJV-300 (GGV30) aus BERNIS UND THEISEN

Tabelle B.1.2 Eigenschaften von Grauguss bei Raumtemperatur: Ausgesuchte graue Gusseisen für die allgemeine Verwendung

Bezeichnung	Zug- festigkeit		0.2 % Dehn- grenze		Bruch- dehnung		Schlagzähig- keit <sup>7)</sup>		Kerbschlag- zähigkeit <sup>8)</sup>		E-Modul [GPa]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Wärmeleit- fähigkeit [W/(m·K)]	Graphitform	Matrix- gefüge
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[J]	[J]	[J]	[GPa]	[W/(m·K)]					
GJL-150 <sup>1)</sup>	150-250	98-165 <sup>2)</sup>	0.3-0.8	4	—	—	—	78-103	7.1	53 <sup>6)</sup>	—	7.1	—	lamellar	F / P
GJL-250 <sup>1)</sup>	250-350	165-228 <sup>2)</sup>	0.3-0.8	5	—	—	—	103-118	7.2	49 <sup>6)</sup>	—	7.2	—	lamellar	P / F
GJL-350 <sup>1)</sup>	350-450	228-285 <sup>2)</sup>	0.3-0.8	—	—	—	—	123-143	7.3	46 <sup>6)</sup>	—	7.3	—	lamellar	P
GJS-400	370-400	250	15-30	98-196	10-19	10-19	10-19	160-180	6.9	38.5	—	6.9	—	sphärolitisch	F
GJS-600	550-600	380	3-8	39-78	3.5-10	3.5-10	3.5-10	170-180	7.0	32.9	—	7.0	—	sphärolitisch	P / F
GJS-800	800	500	2-4	9-29	—	—	—	170-180	7.1	32	—	7.1	—	sphärolitisch	P
GJV-300 <sup>3)</sup>	300-375	220-295	1.5	15-35	3-6	3-6	3-6	140-160	7.0	44	—	7.0	—	vermicular	F
GJV-400 <sup>3)</sup>	400-475	300-375	1.0	6-10	≤ 3	≤ 3	≤ 3	150-170	7.0	41	—	7.0	—	vermicular	P / F
GJV-500 <sup>3)</sup>	500-575	380-455	0.5	—	—	—	—	160-180	7.1	38.5	—	7.1	—	vermicular	P
GJMB-350	350	200	10	90-130	≥ 14	≥ 14	≥ 14	170	7.2-7.5	45-63	—	7.2-7.5	—	Temperkohle	F
GJMB-600	600	390	3	25	3-5	3-5	3-5	175-195	7.2-7.5	45-63	—	7.2-7.5	—	Temperkohle	P
GJMB-800	800	600	1	—	30-70	30-70	30-70	—	7.2-7.5	45-63	—	7.2-7.5	—	Temperkohle	M
GJMW-360	280-370	170-200	7-16	130-180	14	14	14	175-195	7.8	42-63	—	7.8	—	graphitfrei	F
GJMW-550	490-570	310-350	3-5	30-80	6	6	6	175-195	7.3-7.8 <sup>5)</sup>	42-63	—	7.3-7.8 <sup>5)</sup>	—	Temperkohle <sup>4)</sup>	F / P

1); getrennt gegossene Proben mit  $\varnothing$  30 mm

2); 0.1 % Dehngrenze

3); wegen fehlender Euronorm Bezeichnungen gemäß VDG-Merkblatt W 50 ohne "EN"

4); im Kern, graphitfrei im Rand

5); abhängig vom Entkohlungsgrad

6); bei 100°C

7), 8); ungerbte, gekerbte DVM-Proben

F=Ferrit

P=Perlit

M=Martensit

# Werkstoffdaten EN-GJS-500 (GGG 50) aus EISENGIEßEREI O. GATTERMANN GMBH & Co. KG



## SPHÄROGUSS (Gusseisen mit Kugelgrafit)

### TECHNOLOGISCHE UND PHYSIKALISCHE WERTE

Werkstoffbezeichnung nach Europa-Norm DIN EN 1563			EN-GJS-350-22-LT	EN-GJS-400-18-LT	EN-GJS-400-15	EN-GJS-400-18	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3	EN-GJS-700-2
Werkstoffbezeichnung nach DIN 1693			GGG-35.3	GGG-40.3	GGG-40	GGG-40	GGG-50	GGG-60	GGG-70
Werkstoff-Nr.			EN-JS 1015	EN-JS 1025	EN-JS 1030	EN-JS 1020	EN-JS 1050	EN-JS 1060	EN-JS 1070
Brinellhärte	<i>HB 30</i>		110-150	120-160	140-190	140-190	170-220	200-250	230-280
Zugfestigkeit	<i>R<sub>m</sub> min.</i>	<i>N/mm<sup>2</sup></i>	350	400	400	400	500	600	700
0,2 %-Dehngrenze <sup>1)</sup>	<i>R<sub>p 0,2</sub> min.</i>	<i>N/mm<sup>2</sup></i>	220	240	250	250	320	380	440 <sup>2)</sup>
Bruchdehnung <sup>1)</sup>	<i>A<sub>5</sub> min</i>	<i>%</i>	22	18	15	18	7	3	2
Gefüge			ferritisch	ferritisch	vorwiegend ferritisch	vorwiegend ferritisch	ferritisch perlitisch	perlitisch ferritisch	perlitisch
ISO-V-Kerbschlagarbeit (Mittel aus 3 Proben)									
bei -40 °C	<i>A<sub>v</sub> min.</i>	<i>J</i>	12						
bei -20 °C	<i>A<sub>v</sub> min.</i>	<i>J</i>		12					
bei +23 °C	<i>A<sub>v</sub> min.</i>	<i>J</i>	17 <sup>3)</sup>	17 <sup>3)</sup>	14 <sup>3)</sup>				
Scherfestigkeit	<i>σ<sub>B</sub></i>	<i>N/mm<sup>2</sup></i>	315	360	360	360	450	540	630
Torsionsfestigkeit	<i>τ<sub>B</sub></i>	<i>N/mm<sup>2</sup></i>	315	360	360	360	450	540	630
Elastizitätsmodul (Zug und Druck)	<i>E<sub>t</sub></i>	<i>kN/mm<sup>2</sup></i>	169	169	169	169	169	174	176
Dauerfestigkeit bei Zug-Druck-Beanspruchung		<i>N/mm<sup>2</sup></i>	*-100	*-110	*-110	± 110	*-150	*-175	*-200
Druckfestigkeit	<i>σ<sub>D</sub></i>	<i>N/mm<sup>2</sup></i>	-	700	700	700	800	870	1000
Bruchzähigkeit	<i>K<sub>IC</sub></i>	<i>N/mm<sup>3/2</sup></i>	310	300	300	300	250	200	150
Wärmeleitfähigkeit bei 300 °C	<i>λ</i>	<i>W/(K · m)</i>	36,2	36,2	36,2	36,2	35,2	32,5	31,1
Spezifische Wärmekapazität 20 °C bis 500 °C	<i>c</i>	<i>J/(kg · K)</i>	515	515	515	515	515	515	515
Therm. Längenausdehnungskoeffizient 20 °C bis 400 °C		<i>μm/(m · K)</i>	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Dichte		<i>g/cm<sup>3</sup></i>	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,2	7,2
Maximale Permeabilität	<i>μ</i>	<i>μH/m</i>	2136	2136	2136	2136	1596	866	501
Hystereseverlust	<i>(B = IT)</i>	<i>J/m<sup>3</sup></i>	600	600	600	600	1345	2248	2700
Spez. elektrischer Widerstand		<i>Ω · mm<sup>2</sup> · m</i>	0,50	0,50	0,50	0,50	0,51	0,53	0,54

Anmerkung:

Probestücke nach DIN EN 1563 bzw. DIN 1693, Teil 1.

1 N/mm<sup>2</sup> = 1 MPa

1) Eigenschaften im getrennt gegossenen Probestück

2) Bei Vergütungen höhere Werte

3) Richtwerte