

Markus Maier

Bremserprobung
Korrelation von realer Erprobung zu
Gesamtfahrzeugprüfstand

DIPLOMARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

Technische Universität Graz
Fakultät für Maschinenbau

Betreuer:

Dipl.-Ing. Daniel Wallner (FTG TU Graz)

Dipl.-Ing. Stefan Eitzinger (MSF)

Graz, im Mai 2012

Gesperrt bis

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei meiner Diplomarbeit, aber auch auf dem Weg dorthin, unterstützt und begleitet haben. Ich möchte mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Univ.-Doz. Arno Eichberger und Herrn Dipl.-Ing. Daniel Wallner vom Institut für Fahrzeugtechnik an der TU Graz für die fachliche Beratung und organisatorische Hilfe bedanken. Großer Dank gebührt auch den Betreuern bei der Firma Magna Steyr Fahrzeugtechnik Graz, Herrn Dipl.-Ing. Stefan Eitzinger und Herrn Dipl.-Ing.(FH) Michael Ruß sowie Herrn Dipl.-Ing. David Stampfl und Herrn Dipl.-Ing. Martin Fabiani, die mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Der größte Dank gebührt meiner Familie. Meinem Vater, der mir so Vieles ermöglicht hat, meiner Freundin Manuela und unserer Tochter Lea die mich immer unterstützen und bedingungslos hinter mir stehen.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen, wörtlich und inhaltlich, entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 5.Mai, 2012

.....

Maier Markus

Statutory declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, 5th May, 2012

.....

Maier Markus

Kurzfassung

Um dem Druck der Konkurrenz standzuhalten müssen Fahrzeughersteller und Zulieferer immer mehr auf Effizienzsteigerung bei gleichzeitiger Reduktion der Kosten achten. Der Einzug der Simulation in den Entwicklungsprozess hat dabei großartige Fortschritte erzielt. Als ein Werkzeug der virtuellen Entwicklung kann die ergänzende Absicherung über Prüfstände genannt werden.

Diese Arbeit untersucht die Eignung eines Rollenprüfstandes für die thermale Auslegung von Bremsanlagen. Der Rollenprüfstand der Firma *Magna Steyr Fahrzeugtechnik* wird für diesen Zweck adaptiert. Die Messreferenz bildet dabei die häufig, zur Absicherung der Bremsanlage, durchgeführte Bergabfahrt vom Großglockner. Um eine zufriedenstellende Korrelation der Messergebnisse von Realerprobung zur Nachbildung dieser am Prüfstand zu erhalten werden in einem iterativen Prozess die Bedingungen am Prüfstand schrittweise angepasst. Zur Beurteilung werden einerseits die Messergebnisse des Selben im Fahrzeug verbauten Messsystems bei Realerprobung und Prüfstand herangezogen, andererseits wird die Strömungssituation am Prüfstand und im Bereich der Radbremse mittels einer Rauchlanze visualisiert. Basierend auf den gemessenen Daten ist das Ergebnis dieser Arbeit eine grundlegende Bewertung der Eignung des bestehenden Rollenprüfstands für Bremserprobungen.

Abstract

To stay competitive on the world market the OEM and suppliers have to increase their efficiency with a simultaneously decrease of costs. In the last decades the simulation moves more and more into the development process and achieved thereby further technical progresses. One of the most important supporting tools of the virtual testing is the validation on test rigs especially on dynamometers.

This diploma thesis deals with the performance of brake testing on a chassis dynamometer and investigates the suitability of this dynamometer for thermal design of brake systems. The measurement reference is the road downhill of the mountain Großglockner. To get a satisfying correlation between testing under real conditions and the test rig runs the conditions on the dynamometer are stepwise improved in an iterative process. For comparison the output of the same installed measurement system of real testing and the test rig is used. Additional to this data the airflow on the dynamometer and around the wheel brakes is visualized by a smoke lance. The result of the present thesis is a general suitability of the test rig to support the design of brake systems. Further work will deal with integration of the test rig into the full vehicle development process.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	i
Eidesstattliche Erklärung.....	ii
Kurzfassung.....	iii
Abstract.....	iv
Inhaltsverzeichnis.....	v
Abkürzungen, Formelzeichen, Indizes.....	viii
1 Einleitung.....	1
1.1 Wirtschaftlicher Faktor.....	1
1.2 Stand der Technik.....	2
1.3 Aufgabenstellung.....	5
2 Grundlagen.....	6
2.1 PKW-Bremsanlagen.....	6
2.1.1 Geschichte.....	6
2.1.2 Bremsdynamik.....	8
2.1.3 Auslegung von Bremsen und Bremssystemen.....	12
2.1.4 Systeme.....	14
2.1.5 Trommelbremsen.....	15
2.1.6 Scheibenbremsen.....	16
2.2 Bremsentechnische Fahrversuche.....	22
2.2.1 Bergabfahrt.....	22
2.2.2 Thermische Leistungstests.....	22
2.2.3 Bremsgeräuschsuche.....	23
2.3 Versuchseinrichtungen.....	24
2.3.1 Bremskomponenten.....	24
2.3.2 Gesamtfahrzeug.....	26
2.4 Messtechnik.....	27
2.4.1 Messtechnische Grundlagen.....	27
2.4.2 Analoge Messtechnik.....	27
2.4.3 Sensoren.....	28
2.4.4 Digitale Messtechnik.....	33
2.4.5 Strömungsmesstechnik.....	34

3	Vorbereitungen für Prüfstandsmessungen.....	36
3.1	Referenzmessungen Großglockner.....	36
3.1.1	Versuchsstrecke Großglockner.....	36
3.1.2	Durchführung der Bremserprobung.....	38
3.2	Fahrzeugkonfigurationen	38
3.2.1	Standardkonfiguration Bergabfahrt	39
3.2.2	Vergleichskonfiguration Bergabfahrt.....	40
3.3	Prüfstandskonfigurationen	42
3.3.1	Großglockner Bergabfahrt.....	43
3.4	Messtechnik.....	49
3.4.1	Messsystem	49
3.4.2	Messstellen und Messgrößen.....	50
4	Prüfstandsversuche.....	52
4.1	Simulation der Bergabfahrt.....	52
4.1.1	Versuchsdurchführung.....	52
4.1.2	Iterativer Prozess.....	54
4.2	Bewertung der Strömung des Fahrtwindgebläses	55
4.2.1	Strömungsvisualisierung.....	55
4.3	Auswertung der Messdaten	58
4.3.1	Bergabfahrtsdiagramm	58
4.3.2	Bremsenergie und Bremsleistung	60
4.3.3	Allgemeine Bewertung der Messdaten.....	63
4.3.4	Korrelation der Messdaten	66
5	Ergebnis der thermischen Bremserprobungen.....	68
5.1	Ergebnis der realen Erprobungsfahrten.....	68
5.1.1	Referenzdaten für die Bergabfahrt (Standardkonfiguration).....	69
5.1.2	Referenzdaten für die Bergabfahrt (generelle Validität)	71
5.2	Ergebnisse der Prüfstandsversuche.....	73
5.2.1	Versuchsreihen der Bergabfahrt (Standardkonfiguration)	74
5.2.2	Versuchsreihen der Bergabfahrt (generelle Validität).....	78

5.3	Analyse der Korrelationen.....	80
5.3.1	Bremsscheibentemperatur.....	80
5.3.2	Bremsschmelztemperatur.....	83
5.3.3	Reproduzierbarkeit der Messungen.....	85
5.3.4	Bremsenergie.....	87
5.4	Ergebnis der Strömungsvisualisierung.....	89
5.4.1	Gebälseströmung.....	89
5.4.2	Anströmung der Bremsen.....	93
5.4.3	Anströmung 18" Leichtmetallfelge symmetrisch und asymmetrisch.....	95
6	Zusammenfassung.....	98
	Literaturverzeichnis.....	I
	Abbildungsverzeichnis.....	II
	Tabellenverzeichnis.....	IV
	Anhang.....	V

Abkürzungen, Formelzeichen, Indizes

Abkürzungen

<i>ABA</i>	Active Brake Assist
<i>ABS</i>	Antiblockiersystem
<i>ACC</i>	Adaptive Cruise Control
<i>ADU</i>	Analog/Digital-Umsetzer
<i>AMS</i>	Auto Motor und Sport (Zeitschrift)
<i>ASR</i>	Antriebsschlupfregelung
<i>ASV</i>	Analoge Signalverarbeitung
<i>ATE</i>	Alfred Teves
<i>CAN</i>	Controller Area Network
<i>CFC</i>	Kohlenfaserverstärkter Kohlenstoff
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>CoP</i>	Conformity of Production
<i>CVS</i>	Constant Volume Sampling
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung
<i>DMS</i>	Dehnmessstreifen
<i>DSV</i>	Digitale Signalverarbeitung
<i>DTV</i>	Disc Thickness Variation
<i>ECE</i>	Economic Commission for Europe
<i>ESP</i>	Elektronisches Stabilitätsprogramm
<i>FEM</i>	Finite Elemente Methode
<i>GAAZ</i>	Gesamtfahrzeug Antriebs Applikations Zentrum
<i>GHS</i>	Großglockner-Hochalpenstraße
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>HBZ</i>	Hauptbremszylinder
<i>HFT</i>	High Speed Fading Test
<i>HIL</i>	Hardware in the loop
<i>Kfz</i>	Kraftfahrzeug

μP	Mikroprozessor
<i>MSF</i>	Magna Steyr Fahrzeugtechnik
<i>MW</i>	Mittelwert
<i>NVH</i>	Noise Vibration Harshness
<i>OBD</i>	Onboard Diagnose
<i>OEM</i>	Original Equipment Manufacturer
<i>PCIe</i>	Peripheral Component Interconnect Express
<i>PKW</i>	Personenkraftwagen
<i>POI</i>	Points of interest
<i>SIL</i>	Software in the loop
<i>SMP</i>	Schwungmassen-Prüfstand

Formelzeichen

Δ	[–]	Differenz
μ	[–]	Kraftschlussbeiwert
ρ	[kg/m^3]	Dichte
φ	[°]	Winkel
χ	[–]	Radstandsbezogene Schwerpunktshöhe
ψ	[–]	Hinterachslastanteil
A	[m^2]	Fläche
A	[J]	Arbeit, Energie
c	[$\mu V/K$]	Seebeck-Koeffizient
C_G	[–]	Schwerpunkt (center of gravity)
C_W	[–]	Radmittelpunkt (center of wheel)
c_x	[–]	Luftwiderstandsbeiwert
F	[N]	Kraft
g	[m/s^2]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Höhe
l	[m]	Länge, Radstand
m	[kg]	Masse

p	[<i>bar</i>]	Druck
p	[%]	Steigung
P	[W]	Leistung
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
R	[Ω]	Elektrischer Widerstand
t	[s]	Zeit
T	[$^{\circ}C$]	Temperatur
U	[V]	Elektrische Spannung
v	[km/h]	Geschwindigkeit
x	[m]	Weg
z	[–]	Abbremsung

Indizes

0	Anfang
1	Zählindex
2	Zählindex
A	Ausschlag
B	Bremse
Bd	Bremsscheibe
Bf	Bremsflüssigkeit
dyn	Dynamisch
Fzg	Fahrzeug
G	Gewichtskraft
ges	Gesamt
h	Hinten
i	Zähler (stellv. für 1,2,3...)
$Korr$	Korrelation
M	Messung
max	Maximal
$norm$	Normiert

<i>Off</i>	Offset
<i>OG</i>	Oberer Grenzwert
<i>Ped</i>	Pedal
<i>Pruef</i>	Den Prüfstand betreffend
<i>Ref</i>	Die Referenzmessungen betreffend
<i>Rep</i>	Reproduzierbarkeit
<i>s</i>	Schwerpunktbezogen
<i>s</i>	statisch
<i>U</i>	Umgebung
<i>UG</i>	Unterer Grenzwert
<i>v</i>	Vorne
<i>VG</i>	Verbindungsgerade
<i>W</i>	Widerstand
<i>x</i>	x-Richtung Fahrzeugkoordinatensystem (longitudinal)

1 Einleitung

1.1 Wirtschaftlicher Faktor

In der Automobilbranche, sowie auch in vielen anderen hoch technologisierten Sparten, geht der Trend hin zu immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten für neue Modelle und einer breit gefächerten Produktpalette. Um die große Anzahl verschiedener Modelle und dem zwangsläufig damit verbundenen Arbeitsaufwand für Entwicklung, Produktion und Vertrieb bewältigen zu können muss in allen diesen Segmenten Zeit, und damit auch Geld, eingespart werden. Der Grundgedanke der Effizienz ist seit jeher ein starker Antrieb für neue Entwicklungen. Eines der besten Beispiele hierfür ist wohl die Perfektionierung des Fließbandes durch Henry Ford Anfang des 20. Jahrhunderts. Durch diese Entwicklung und Revolution der Produktionstechnik wurde der Grundstein für die effiziente Serienfertigung und Massenproduktion gelegt, auf der unsere heutige Konsumgesellschaft beruht.

Prozesse in der modernen Automobilproduktion sind, bedingt durch den hohen technologischen Fortschritt, ungleich umfangreicher und komplexer. Um in diesen Bereichen Erfolge in der Effizienzsteigerung zu erzielen muss an immer neueren technischen Entwicklungen gearbeitet werden. Die heutigen Effizienzsprünge sind in ihrer Größenordnung in keiner Weise mit den revolutionären Errungenschaften am Anfang der Industrialisierung zu vergleichen, sie sind aber trotzdem einer der wichtigsten Faktoren um in internationalen Märkten zu bestehen und konkurrenzfähig zu bleiben. Mit Einzug der Computerisierung im vergangenen Jahrhundert steht nun ein neues und sehr mächtiges Werkzeug zur Verfügung. Die Möglichkeit, rechenintensive Operationen in relativ geringer Zeit durchzuführen, eröffnet völlig neue Wege und Herangehensweisen an Probleme.

Durch diese Entwicklung werden immer mehr kosten- und zeitintensive Prozesse einfach in eine virtuelle Umgebung verlegt. Mit Hilfe der Simulation, sei es nun rein softwaregebunden oder aber auch softwareunterstützt wie es z.B. bei Prüfständen der Fall ist, können Realversuche nachgebildet und teilweise sogar ersetzt werden. Tests in realer Umgebung sind in ihrer Durchführung meist sehr aufwendig. Neben dem hohen zeitlichen Aufwand kommen noch Faktoren wie Material, Personal, Umwelteinflüsse, gesetzliche Bestimmungen, jahreszeitabhängige Wetterlagen usw. zum Tragen. Durch Simulationen mit geeigneten Randbedingungen und der Kenntnis der zwangsläufig entstehenden Unschärfe ist das Steigerungspotential der Effizienz in vielen Bereichen, besonders in der Entwicklung, enorm hoch.

1.2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über heutige Bremsanlagen in Serienautomobilen und Rennfahrzeugen, Fortschritte in der Entwicklung und derzeitige Berechnungsmethoden gegeben. Einzelheiten zu den angeführten Bremsanlagen und Systemen können aus den Kapiteln 2.1.4, 2.1.5 und 2.1.6 entnommen werden.

Für die meisten Fahrzeuge in der Serienfertigung haben sich Scheibenbremsen mit Faustsätteln an Vorder- und Hinterachse durchgesetzt. An den vorderen Rädern sind diese meist als innenbelüftete Scheiben, an den hinteren Rädern als massive Bremsscheiben ausgeführt. Die Betätigung der Scheibenbremse geschieht hydraulisch. Der Hydraulikdruck wird in einem Hauptbremszylinder, meist in Tandembauweise ausgeführt, mittels Pedal aufgebaut. Die durch Muskelkraft bereitgestellte Bremskraft wird zusätzlich durch einen Vakuum-Bremskraftverstärker unterstützt. Als kraftübertragendes Medium dienen Bremsflüssigkeiten auf Basis von Glykolen, Glykolethern und Borsäureestern.

Durch den Einsatz von Bremsregelsystemen im Fahrzeug wird die Sicherheit im Straßenverkehr weiter verbessert. Seit 2004 wird, um das Blockieren der Räder bei einer Bremsung zu verhindern, das *Antiblockiersystem* (ABS) von den europäischen Automobilherstellern in jedes Fahrzeug serienmäßig verbaut. Regelsysteme wie das *elektronische Stabilitätsprogramm* (ESP) [1], welches Einfluss auf die Fahrdynamik nimmt, und die *Antriebschlupfregelung* (ASR) sind seit 2011 in allen EU-Fahrzeugen serienmäßig. Zusätzlich zu diesen Systemen gibt es noch eine Reihe von Fahrerassistenzsystemen die nicht nur in den Bremskreis eingreifen um das Fahrzeug in kritischen Situationen zu stabilisieren sondern auch Bremsungen bis hin zum Stillstand einleiten.

Die Auflistung aller derzeit am Markt verfügbaren Assistenzsysteme (siehe [2]) würde den Rahmen an dieser Stelle sprengen, deshalb wird nur kurz auf die wichtigsten eingegangen. Die *Adaptive Cruise Control* (ACC) regelt selbsttätig den Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen mittels Radarortung und ist nur in einem gewissen Geschwindigkeitsbereich nutzbar. Als Erweiterung zu ACC leitet bei zu geringen Geschwindigkeiten der *Active Brake Assist* (ABA), im Falle einer bevorstehenden Kollision, eine Bremsung ein. Die Intensität des Eingriffs kann von einer leichten Bremsung bis hin zur Notbremsung reichen. Die Serienreife ist noch nicht für alle Systeme gegeben, die Entwicklung auf dem Sektor der Assistenzsysteme läuft jedoch auf Hochtouren und es ist absehbar, dass in naher Zukunft nicht nur Fahrzeuge der Oberklasse sondern alle Neufahrzeuge mit einer Grundkonfiguration von Bremsassistenten und Regelprogrammen ausgerüstet sein werden.

Der Rennsport ist, wie in vielen anderen fahrzeugtechnischen Bereichen auch, bei der Bremse Technologieträger und Motor für neue Entwicklungen. Ableger der Entwicklungen aus dem Rennsport finden sich in der Regel in kleinseriengefertigten Sportwagen wieder. Das Prinzip der Scheibenbremse ist auch hier Standard, jedoch sind komplett andere Materialkombinationen im Einsatz. Der hohen Temperaturbeständigkeit und der Reibwertstabilität wegen, werden Bremscheiben aus Carbon (CFC) oder Carbon-Keramiken (C/SiC) gefertigt. Zusätzlich haben diese Bremscheiben einen enormen Gewichtsvorteil, was sich besonders in den Beschleunigungswerten der Fahrzeuge widerspiegelt. In Tabelle 1.1 sind die wichtigsten Materialeigenschaften von C/SiC und des Serienwerkstoffs GG-20 gegenübergestellt [3]. Die Vorteile der Carbon-Keramik durch geringe Wärmedehnung, hohe Thermoschockbeständigkeit, hoher Verschleißfestigkeit und geringem Gewicht sprechen eine eindeutige Sprache. Nachteil solcher Keramiken ist der aufwendige Fertigungsprozess und die damit verbundenen hohen Kosten, was einen Serieneinsatz nicht rentabel macht. Für kurze Pedalwege und schnelles Ansprechen ist eine hohe Steifigkeit der Bremsanlage unabdinglich.

Durch das Erfassen komplexer Zusammenhänge und der Möglichkeit diese mit leistungsfähigen Computern zu berechnen, werden moderne Bremsanlagen immer sicherer und weniger

Tabelle 1.1: Eigenschaftsvergleich C/SiC und GG-20 [3]

		C/SiC	GG-20
Dichte	[kg/dm ³]	2,3	7,2
spez. Wärmeausdehnung / Gewicht	[kJ/kg K]	0,8	0,5
spez. Wärmespeicherkapazität / Volumen	[kJ/m ³ K]	1,8	3,6
Wärmedehnung ¹	[10 ⁻⁶ K ⁻¹]	1	9
Wärmeleitfähigkeit ²	[W/m K]	40	54
Zugfestigkeit ¹	[Mpa]	20-40	150-250
E-Modul ¹	[GPa]	30	90-110
Bruchdehnung ¹	[%]	ca. 0,3	0,3-0,8
Widerstand gegen Thermorisse	[W/m]	>27000	<14000
Maximale Temperatur	[°C]	ca. 1400	ca. 700

Hinweis: Alle Angaben beziehen sich auf Raumtemperatur sofern keine Temperaturwerte angegeben sind. Kennwerte für C/SiC sind Anhaltswerte und können designabhängig variieren

¹ parallel zur Bremscheibenoberfläche

² in Dickenrichtung der Bremscheibe

fehleranfällig. Bei diesen rechnerischen Simulationen sind Ergebnisse erzielbar, welche sehr nahe an der Realität liegen. Da für die Bremsanlage hauptsächlich die thermische Leistungsfähigkeit von Bedeutung ist, werden meist die wärmetechnischen Vorgänge bei einer Bremsung untersucht und berechnet. Auch von großer Bedeutung sind die Betriebsfestigkeit und das Schwingungsverhalten bei einer Anregung. Um diese Problemstellungen berechnen

und lösen zu können, bedient man sich der Methode der *Finiten Elemente* (FEM). Diese Methode eignet sich für Festkörper und teilt das zu untersuchende Bauteil in diskrete Flächen- oder Volumenteilstücke, den finiten Elementen, auf. Damit lassen sich Szenarien erstellen, in denen die Bauteile einer Bremsanlage an die Grenzen ihrer Belastbarkeit kommen und die jeweilige Komponente kann auf die auftretende Belastung optimiert werden. Als eigenes Fachgebiet hat sich hier die Bremsakustik etabliert.

Durch immer höhere Anforderungen an die Qualität seitens des Kunden ist es enorm wichtig, dass die Bremsanlage in keiner Situation ein unangenehmes Geräusch verursacht. Aus diesem Grund wird vermehrt auf dem Gebiet der Schwingungsentstehung geforscht. Ebenso kann der Wärmehaushalt für eine Auslegung der Bremse [5] berechnet werden. Relevant ist hierbei die Wärmeleitung innerhalb der Bauteile, der Wärmeübergang zwischen den Bauteilen bzw. die Wärmeübergangskoeffizienten für die konvektive Kühlung der Bremsscheibe ermittelt werden. Da bei der Scheibenkühlung zusätzlich eine Luftströmung wirkt, ist das Potential der FE-Berechnung ausgereizt. Zu diesem Zweck wird mittels numerischer Strömungssimulation, den *Computational Fluid Dynamics* (CFD), die Ausbildung der Strömung im Zusammenspiel mit der Bremsanlage berechnet [6]. Das Strömungsbild um eine Scheibenbremse ist in seiner Art sehr kompliziert, da zusätzlich zur Anströmung durch den Fahrtwind eine Strömung durch die Rotation der Scheibe bzw. des Rades mit der Felge erzeugt wird. Mittlerweile ebenfalls Stand der Technik ist die Simulation von Teilzuständen. Besonders in der Entwicklungsphase können einzelne Hardwarekomponenten (in Abbildung 1.1 dargestellt) , *Hardware in the loop* (HIL) oder Softwareversionen, *Software in the loop* (SIL) [4], in ein Simulationsmodell eingebunden werden. Die Methoden machen es möglich z.B. ein elektronisches Steuerungsgerät einer Fremdfirma, dessen Softwaresyntax nicht bekannt ist, als physisches Modell in die Simulation zu integrieren und somit ein realitätsnahes Ergebnis zu erzielen. Die Anwendungsgebiete von Simulationsmethoden in der Auslegung und Berechnung von Bremsanlagen sind breit gefächert und werden in der Zukunft noch mehr an Bedeutung gewinnen.

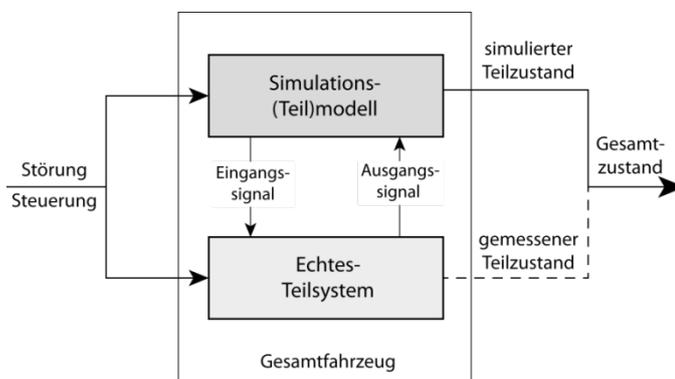


Abbildung 1.1: Hardware in the loop [4]

1.3 Aufgabenstellung

Erprobungen mit Fahrzeugen im realen Umfeld sind sehr stark von der Jahreszeit und dem damit einhergehenden Witterungsbedingungen abhängig. Dieser Umstand begrenzt das nutzbare Zeitfenster auf einige Monate im Jahr. Da die Anzahl von geeigneten Versuchsgeländen bzw. Teststrecken in Europa begrenzt ist, es aber eine größere Anzahl an Fahrzeugherstellern gibt, kommt es vermehrt zu Kapazitätsengpässen der Teststrecken. Aus gegebenen Umständen heraus versucht man einzelne Erprobungen entweder rein virtuell am Computer zu simulieren oder mit realen Fahrzeugen in einer synthetischen, virtuellen Umgebung an Prüfständen nachzubilden.

Für das Unternehmen *Magna Steyr Fahrzeugtechnik* als Engineering-Dienstleister und Fahrzeugentwickler sind genau diese Vorteile der längeren, effektiv nutzbaren Erprobungszeit von großem Nutzen. Um Entwicklungszeit auf zertifizierten Testgeländen zu sparen und schneller zu abgesicherten Ergebnissen zu gelangen wird versucht Varianten- und Prinzipversuche auf die firmeninternen Prüfstände zu verlagern. Dies erhöht einerseits die Auslastung der Prüfstände und verringert andererseits den zeitlichen Aufwand für Rüstarbeiten verschiedener Fahrzeugvarianten, da sich die Werkstätten in unmittelbarer Nähe befinden. Magna Steyr Fahrzeugtechnik verfügt im Speziellen über einen viermotorigen Allrad Rollenprüfstand dessen Haupteinsatzgebiet die CVS-Abgasmessung ist. Da dieser Prüfstand an allen vier Rädern motorisch sowie auch generatorisch betrieben werden kann, eignet er sich besonders für die Nachbildung vorgegebener bzw. realer Straßenabschnitte mit unterschiedlichem Gefälle und unterschiedlich gefahrenen Geschwindigkeiten. Aktuell besteht Bedarf die Großglockner Bergabfahrt für die Validierung von Kühlmaßnahmen im Bereich der Vorderradbremse, eines sich in der Entwicklung befindlichen Fahrzeugs, zu simulieren. Die Abfahrt vom Großglockner (3798 m.ü.A¹) ist einer der gängigsten Bremsversuche und bietet sich besonders für eine Simulation am Prüfstand an, da sie eine der Erprobungen ist, welche ausschließlich bei Schönwetter und in den Sommermonaten durchgeführt werden kann. Somit liegt das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der Untersuchung der allgemeinen Tauglichkeit des Rollenprüfstands für bremstechnische Versuche. In deren Folge könnten nicht nur thermische Belastungstests wie die Großglockner Bergabfahrt, sondern auch thermische Leistungstests (HFT) und Bremsgeräuschmessungen (NVH) im Vorfeld untersucht werden.

¹ Meter über Adria

2 Grundlagen

2.1 PKW-Bremsanlagen

2.1.1 Geschichte

Einfache Einrichtungen zur Geschwindigkeitsreduzierung befanden sich bereits an Streitwagen verschiedener Völker in der Zeit von 1000 bis 500 v.Chr. Bis zum Ende der frühen Neuzeit, Anfang des 19. Jahrhunderts, änderte sich an der Komplexität der Bremseinrichtung wenig bis gar nichts. Die damaligen Kutschen und Fuhrwerke verwendeten Kratzbremsen, die aus einem Hebel bestanden welcher einfach mit dem kürzeren Hebelarm in den Untergrund gedrückt wurde, Bremschuhe, die an Kettenhängend vor die Räder geworfen wurden, und Klotzbremsen, welche durch Andrücken eines Bremsklotzes an das Rad (siehe Abbildung 2.1) die gewünschte Verzögerung erzielten [3].

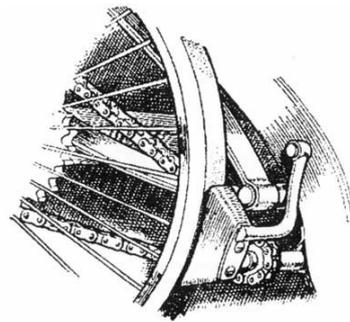


Abbildung 2.1: Klotzbremse an einem Fuhrwerk [3]

Mit Erfindung des Verbrennungsmotors steigerten sich die Fahrleistungen und damit auch die Fahrgeschwindigkeiten. Somit war eine leistungsfähige Bremse unumgänglich. Als erste, für höhere Geschwindigkeiten taugliche, Bremse etablierte sich die rein mechanisch betätigte Trommelbremse. Diese wirkte nicht mehr als Einzelbremse auf die angetriebene Starachse, sondern war bereits ab ca. 1920 als separate Radbremse, an allen vier Rädern, ausgeführt. Bis Mitte des 20. Jahrhunderts wurden größtenteils Trommelbremsen verbaut, welche man jedoch nicht mehr rein mechanisch sondern hydraulisch und mit Unterdruckbremskraftverstärkern betätigte. Heutzutage nimmt ihre Bedeutung immer mehr ab. Sie werden aber immer noch bei leistungsschwächeren Fahrzeugen an der Hinterachse verbaut weil sich die Trommelbremsen durch ihren unkomplizierten Aufbau und die kostengünstige Herstellung auszeichnen.

Anfang der 1960er Jahre hielt die, bis dahin eher vernachlässigte, Scheibenbremse vermehrt Einzug in die Serienproduktion. Dieser Umstand ist unter anderem auf die höheren Bremsleistungen und auf die höhere Fertigungsgenauigkeit zurückzuführen. Mit Einführung der hydraulisch betätigten Scheibenbremse an den Vorderrädern waren die alten Probleme wie Verzug, Fading¹, zu hohe Temperaturen und Quietschen der Trommelbremse schnell beseitigt. Die meisten der genannten Probleme sind auf die schlechtere Wärmeabfuhr bei der Trommelbremse zurückzuführen. Die kurzen Ansprechzeiten der Scheibenbremse und eine ausgereifte Hydraulik ermöglichen die effizientere Nutzung elektronischer Regelsysteme. Die Entwicklung der elektronischen Regelsysteme für Bremsen zieht sich quer durch das Ende des letzten Jahrhunderts. Antiblockiersysteme (ABS) wurden auch für Trommelbremsen entwickelt und verbaut. Die Ansprechzeiten dieser sind jedoch langsamer als die der Scheibenbremsen und deshalb kann das volle Potential der Regelung nicht ausgeschöpft werden. In den 1970er Jahren wurde das erste serientaugliche ABS verbaut. Anschließend, Ende der 1980er, gelang es den Antriebsschlupf zu regeln und Mitte der 1990er wurden ABS und ASR, neben weiteren Funktionen, im sicherheitstechnisch revolutionären *Elektronischen Stabilitätsprogramm* (ESP) integriert. Dieses System regelt durch gezielten Eingriff in das Bremsen- und Motormanagement die Fahrzeugbewegung in Grenzsituationen. Droht die Bewegung eines Fahrzeugs durch bewusste oder unbewusste Fahrmanöver instabil zu werden, d.h. das Heck bricht aus was zu unkontrolliertem Schleudern führt, wirkt das ESP dieser Tendenz entgegen und hält das Fahrzeug im stabilen Bereich [1, 3].

¹ Nachlassen der Bremswirkung bei hohen Temperaturen der Bremsanlage

2.1.2 Bremsdynamik

Die Bremsdynamik befasst sich mit der Darstellung und Berechnung der physikalischen Abläufe während einer Fahrzeugbremsung. In erster Linie werden hierbei die erzielbaren Abbremsungen betrachtet. Das Kriterium der Bremsstabilität bleibt vorerst noch unbehandelt, da in allen Betrachtungen davon ausgegangen werden muss, dass das Fahrzeug in jeder Konfiguration bis zu den höchsten möglichen Abbremsungen stabil bleibt. Der Begriff Bremsstabilität bedeutet hier, dass das Fahrzeug aufgrund seiner Auslegung ungewollte Fahrzeugbewegungen automatisch begrenzt. Dabei ist es egal, ob diese Fahrzeugbewegungen durch (Fehl-)Handlungen des Fahrers oder durch externe Störeinflüsse hervorgerufen werden. Instabil verhält sich ein Fahrzeug dann, wenn bei einer Bremsung das Heck ausbricht, da diese Situation von einem Normalverbraucher nicht beherrschbar ist. Deshalb ist bei der Auslegung und Aufteilung der Bremskräfte ein Überbremsen der Hinterachse auszuschließen. Die im Folgenden beschriebenen physikalischen Zusammenhänge beschränken sich, aufgrund der Komplexität der Bremsdynamik, auf zweiachsige Fahrzeuge und Geradeausfahrt. In Abbildung 2.2 a sind die Kräfte an einem ungebremsten Fahrzeug, in Abbildung 2.2 b Kräfte und deren Wirkabstände zum Schwerpunkt C_g am gebremsten Fahrzeug dargestellt [7].

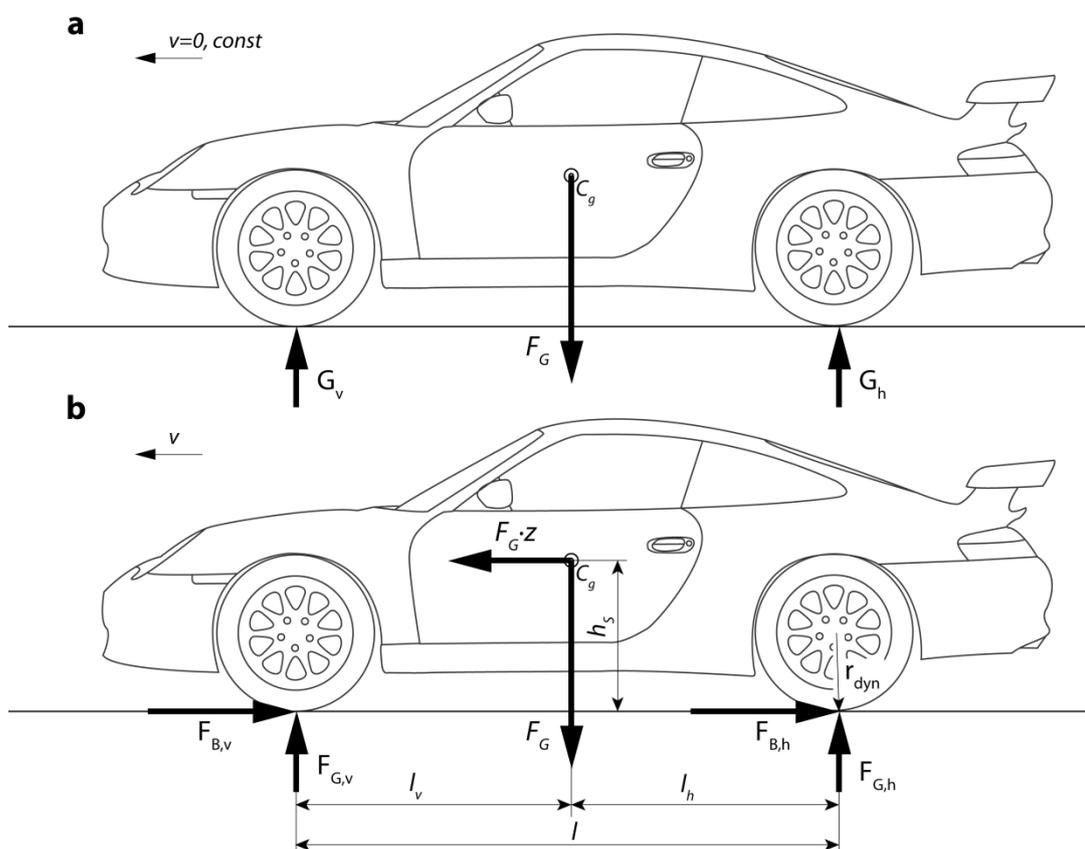


Abbildung 2.2: Kräfte und Abstände am Fahrzeug

Als r_{dyn} wird hier der dynamische oder effektive Reifenradius bezeichnet, welcher für den Abstand von Radmitte zum Momentanpol der Drehbewegung des Rades steht. Aus diesen Kräften und Abmessungen lassen sich weitere Größen ableiten [7]:

Der Hinterachslastanteil wird als ψ bezeichnet.

$$\psi = \frac{G_h}{F_G} = \frac{l_v}{l} \quad (2.1)$$

Unter χ versteht man die auf den Radstand l bezogene Schwerpunkthöhe h_s .

$$\chi = \frac{h_s}{l} \quad (2.2)$$

Aus den Bremskraftanteilen von Vorder- ($F_{B,v}$) und Hinterachse ($F_{B,h}$) lässt sich die Abbremsung z berechnen.

$$z \cdot F_G = F_{B,v} + F_{B,h} \quad \text{oder} \quad \frac{F_{B,v}}{F_G} + \frac{F_{B,h}}{F_G} = z \quad (2.3)$$

Die Abbremsung z kann allgemein als Verhältnis von negativer Verzögerung $-a$ zur Erdbeschleunigung g gesehen werden.

$$z = \frac{-a}{g} \quad (2.4)$$

Durch die Hochlage des Schwerpunkts entsteht bei einer Bremsung eine dynamische Achslastverteilung $\pm \Delta G$ von der Hinterachse auf die Vorderachse. Aus den Bedingungen des Momentengleichgewichts um den Radaufstandspunkt folgt für die *Vorderachse*,

$$F_{G,v} = F_G \cdot \left(\frac{l - l_v}{l} + z \cdot \frac{h_s}{l} \right) = G_v + \Delta G \quad (2.5)$$

und für die *Hinterachse*:

$$F_{G,h} = F_G \cdot \left(\frac{l_v}{l} - z \cdot \frac{h_s}{l} \right) = G_h - \Delta G \quad (2.6)$$

Mit den Größen aus Gleichung (2.1) und (2.2) lassen sich (2.5) und (2.6) umformen in

$$\frac{F_{G,v}}{F_G} = 1 - \psi + z \cdot \chi \quad (2.7)$$

und

$$\frac{F_{G,h}}{F_G} = \psi - z \cdot \chi \quad (2.8)$$

Die Achslasten $F_{G,v}$ und $F_{G,h}$ der Vorder- bzw. Hinterachse sind über das Coulomb'sche Reibungsgesetz mit den Bremskräften $F_{B,v}$ und $F_{B,h}$ verbunden.

$$F_B = \mu_{x,B} \cdot F_G \quad (2.9)$$

Der Ausdruck $\mu_{x,B}$ bezeichnet hierbei den momentan herrschenden Kraftschlussbeiwert zwischen Reifen und Straße.

Wird diese Beziehung aus Gleichung (2.9) auf die Gleichungen (2.7) und (2.8) angewandt so ergibt sich Folgendes:

$$\frac{F_{B,v}}{F_G} = \mu_{x,B,v} \cdot \frac{F_{G,v}}{F_G} = \mu_{x,B,v} \cdot (1 - \psi + z \cdot \chi) \quad (2.10)$$

und

$$\frac{F_{B,h}}{F_G} = \mu_{x,B,h} \cdot \frac{F_{G,h}}{F_G} = \mu_{x,B,h} \cdot (\psi - z \cdot \chi) \quad (2.11)$$

Diese Formeln sind allgemein gültig. Im Sonderfall der gleichen Kraftschlussausnutzung an Vorder- und Hinterachse gilt $\mu_{x,B,v} = \mu_{x,B,h} = \mu_{x,B}$. Dadurch wird

$$\frac{F_{B,v}}{F_G} = \mu_{x,B} \cdot \frac{F_{G,v}}{F_G} \quad \text{und} \quad \frac{F_{B,h}}{F_G} = \mu_{x,B} \cdot \frac{F_{G,h}}{F_G} \quad (2.12)$$

Zusammen mit (2.3) ergibt sich

$$\frac{F_{B,v}}{F_G} + \frac{F_{B,h}}{F_G} = z = \mu_{x,B} \cdot \left(\frac{F_{G,v}}{F_G} + \frac{F_{G,h}}{F_G} \right) \quad (2.13)$$

Die Summe der beiden Achslasten ist definitionsgemäß die Gewichtskraft des gesamten Fahrzeugs. Aussage von Gleichung (2.13) ist nun, dass im Idealfall gleicher Kraftschlussausnutzung an Vorder- und Hinterachse sowie unter Vernachlässigung äußerer Kräfte der Kraftschlussbeiwert $\mu_{x,B}$ gleich der Abbremsung z ist. Wird Gleichung (2.10) in (2.13) eingesetzt so entsteht die Parameterdarstellung einer Kurve, auf der der günstigste Fall der gleichen Kraftschlussausnutzung an Vorder- und Hinterachse herrscht.

$$\frac{F_{B,v}}{F_G} = z \cdot (1 - \psi + z \cdot \chi) \quad (2.14)$$

$$\frac{F_{B,h}}{F_G} = z \cdot (\psi - z \cdot \chi) \quad (2.15)$$

Durch Elimination des Parameters z ergibt sich die Koordinatendarstellung der Kurve.

$$\frac{F_{B,h}}{F_G} = \sqrt{\frac{(1 - \psi)^2}{4 \cdot \chi^2} + \frac{1}{\chi} \cdot \frac{F_{B,v}}{F_G}} - \frac{1 - \psi}{2 \cdot \chi} - \frac{F_{B,v}}{F_G} \quad (2.16)$$

Bei dieser Kurve handelt es sich um eine Parabel (siehe Abbildung 2.3), welche auch „Parabel der idealen Bremskraftverteilung“ genannt wird.

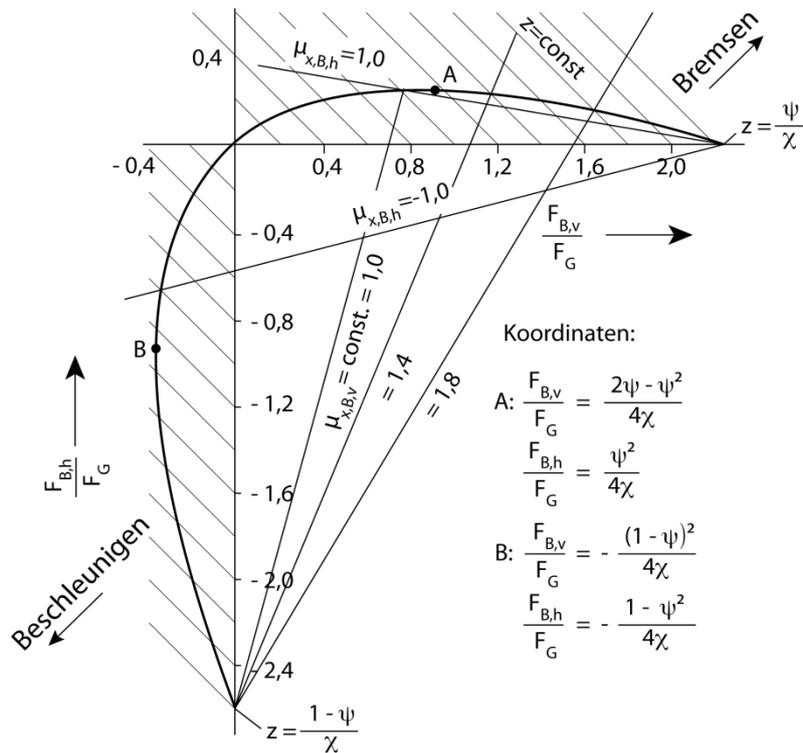


Abbildung 2.3: Diagramm der Bremskraftverteilung [7]

Es werden im *Diagramm der Bremskraftverteilung* Linien konstanter Abbremsung aufgetragen. Bedingt durch die Aussage aus Gleichung (2.3) zeichnen sich diese Linien als Geraden unter -45° ab. Weiters wurde festgestellt, dass auf der Parabel der idealen Bremskraftverteilung stets $\mu_{x,B} = z$ ist. Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen Bremskraft und Radlast durch den Kraftschlussbeiwert, werden weiters Kurven konstanten Kraftschlusses als Linien aufgetragen. Diese Linien sind durch zwei Punkte definiert. Einerseits durch die sogenannten Ausfallspunkte, die sich bei Ausfall der Bremse der jeweils anderen Achse ergeben, und dem Schnittpunkt der *Parabel der idealen Bremskraftverteilung* mit der dazugehörigen Abszisse bzw. Ordinate [7].

2.1.3 Auslegung von Bremsen und Bremssystemen

Die Auslegung von Bremssystemen basiert auf in erster Linie auf theoretischen Berechnungen unter Einbeziehung von grundlegenden Werten der Bremsdynamik, der Radbremsenausführung, der Ausführung der gesamten Bremsanlage und kundenspezifischen Vorgaben. Bei der Auslegung der gesamten Bremsanlage müssen auch die gesetzlichen Anforderungen wie z.B. die Zweikreisigkeit der Betriebsbremse erfüllt werden. Als Zweikreisigkeit wird in diesem Fall die redundante Ausführung einer Betriebsbremse mit zwei voneinander getrennten Bremskreisen bezeichnet. Bei Ausfall eines der beiden Kreise muss vom verbleibenden Bremskreis noch genug Bremsleistung aufgebracht werden können um das Fahrzeug zum Stillstand zu bringen.

Bedingt durch immer leistungsfähigere, computergestützte Berechnungsmethoden verkürzen sich die Entwicklungszeiten von Radbremsen immer mehr. Das Hauptaugenmerk der Entwicklung liegt hier auf drei wichtigen Kriterien. Die Leistungsfähigkeit der Bremse, der gesamte Wärmehaushalt und die Komforteigenschaften. Die Wichtigkeit der einzelnen Kriterien hat sich im Laufe der Zeit stark verändert. Waren in der Vergangenheit Sicherstellung der Bremsleistung und Bauteilsicherheit die Themen für welche der meiste Entwicklungsaufwand betrieben wurde, so entfallen heute ca. 80% der Entwicklungszeit auf die Komfortoptimierung [3].

Zur Auslegung der Bremsleistung zählen Kriterien wie Volumenaufnahme und Systemsteifigkeit, Lebensdauer und Korrosionsverhalten. Unter Volumenaufnahme wird in diesem Zusammenhang das zusätzlich benötigte Bremsflüssigkeitsvolumen durch elastische Verformung des Bremssystems verstanden. Definiert werden diese Zielwerte zu Beginn eines jeden Projekts in einem Lastenheft. Zur Erfüllung dieser Ziele werden die Produktportfolios erweitert und neue Varianten aus Sätteln, Scheiben und Belägen definiert.

Der Wärmehaushalt der Bremsanlage wird maßgeblich durch die konstruktive Ausführung der Bremsscheibe und deren Material beeinflusst. Große und schwere Bremsscheiben besitzen große Wärmespeicherkapazitäten und wirken sich direkt auf die Temperatur der Bremssättel aus. Neben der Fähigkeit die, bei einer Bremsung aus kinetischer Energie umgewandelte, Wärme zu speichern besitzen Bremsscheiben auch die Möglichkeit die Kühlung durch konvektiven Wärmeübergang zu beeinflussen. Wie in Abbildung 2.4 dargestellt ist, wird durch innenbelüftete Bremsscheiben eine zusätzliche Kühlung mittels Konvektion erreicht [3].

Durch Steigerung der Kundenanforderungen sind Bremsenhersteller gezwungen einen hohen Entwicklungsaufwand im Bereich der Komfortoptimierung zu investieren. Die Bremsakustikentwicklung stellt sich als äußerst kompliziert und aufwendig dar.

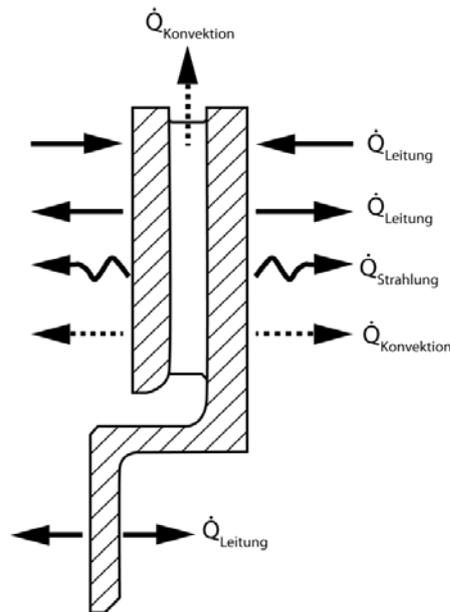


Abbildung 2.4: Energiebilanz einer innenbelüfteten Bremsscheibe [3]

Aufgrund der Vielzahl von Geräuschen über den Frequenzbereich wie Knarzen, Klappern, Muhen, Quietschen usw. und den meist unterschiedlichen Rahmenbedingungen wie Einbindung im Fahrzeug oder Witterungseinflüsse, gibt es keine allgemein gültigen Maßnahmen für eine komplette Unterdrückung der Bremsgeräusche. Wie schon erwähnt, wird sehr viel Aufwand betrieben um zufriedenstellende Ergebnisse zu erzielen. Es werden, noch bevor ein physisches Modell der Bremsanlage besteht, bereits Simulationen und numerische Berechnungen durchgeführt. Diese Berechnungen basieren meist aus Versuchsdaten ähnlicher und bereits ausgeführter Bremsanlagen. Während des Entwicklungsprozesses werden Prüfstandtests mit einzelnen Komponenten der Bremse bis hin zum Verbund mit dem Antriebsstrang durchgeführt. Um jedoch alle Eventualitäten abzudecken müssen, zur finalen Absicherung, Geräuschsuchfahrten mit dem fertigen Gesamtfahrzeug (siehe Kapitel 2.2.3) durchgeführt werden. Als einige der möglichen Maßnahmen zu Reduzierung von Bremsgeräuschen sind die Änderung der Systemsteifigkeit bzw. des Kraftflusses, das Anbringen von Zusatzmassen (Schwingungstilgern), Verbesserung der Fertigungstoleranzen und die Optimierung der Reibpartner zu nennen.

Entscheidend für den Erfolg oder Misserfolg eines Bremsenherstellers sind die anfallenden Kosten und der damit verbundene, erzielbare Marktpreis. In dieses Kriterium fließen auch die Länge der Lebensdauer und der Ersatzteilhandel mit ein.

2.1.4 Systeme

Aus sicherheitstechnischen Gründen sind Bremsanlagen prinzipiell redundant ausgeführt, d.h. sie bestehen aus zwei, voneinander unabhängigen, Bremskreisen. Weiters muss eine Bremsanlage laut ECE-Regelung 13 [8] eine Betriebs-, eine Hilfs- und eine Feststellbremse besitzen. Die Betriebs- und die Hilfsbremse dürfen die selben Teile benützen sofern sie verschiedene Betätigungseinrichtungen besitzen. Diese Ausführung gewährleistet, dass bei Ausfall eines der beiden Bremskreise noch immer ein funktionsfähiger Bremskreis zur Verfügung steht um das Fahrzeug zum Stillstand zu bringen. Der verbleibende Kreis muss hierfür eine gewisse Mindestabbremmung erreichen. Dies kann bei ungünstiger Wahl der Aufteilung bzw. der Bremskraftverteilung auf Vorder- und Hinterachse zu geringen Bremswerten führen. Der schlimmste Fall bei einem Bremskreisausfall muss deshalb schon in der Auslegungsphase genau betrachtet und berechnet werden.

In Abbildung 2.5 sind die fünf möglichen, nach DIN 74000 genormten, Ausführungen ersichtlich. Durchgesetzt hat sich hier im PKW-Bereich die II-Aufteilung bzw. die X-Aufteilung. Beide Bremskreisaufteilungen benötigen ein Minimum an Bremsleitungen und lösbaren bzw. unlösbaren Verbindungen. Die Aufteilungen HI, LL und HH finden sich eher in leichten Nutzfahrzeugen, sind jedoch aufgrund Ihrer Anfälligkeit bei thermischer Überlastung an einem einzelnen Rad und ihren hohen Kosten wenig verbreitet.

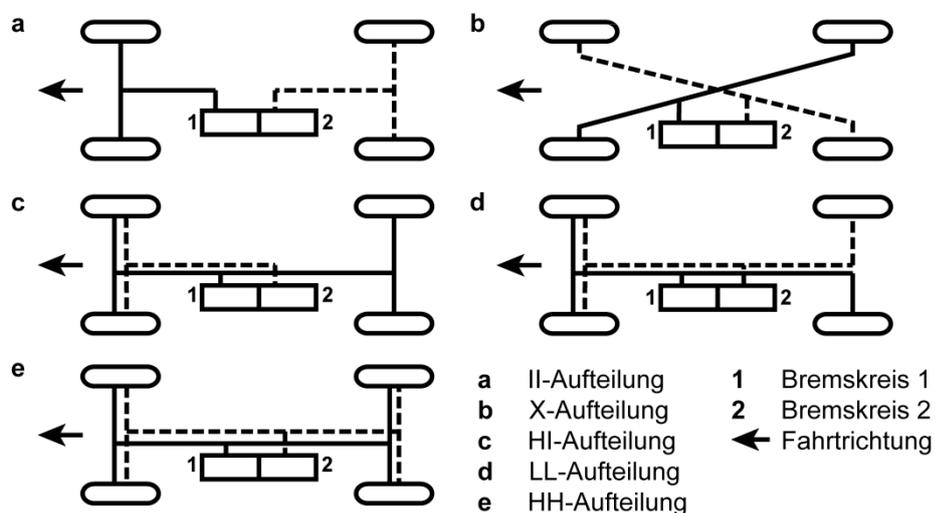


Abbildung 2.5: Bremskreisaufteilung nach DIN 74000 [9]

Die II-Aufteilung, auch Schwarz-Weiß-Aufteilung genannt, wirkt achsweise vorne und hinten und ist besonders bei Fahrzeugen mit hoher Hinterachslast vertreten um bei Ausfall eines Kreises die geforderte Verzögerung zu erreichen.

Am meisten verbreitet ist die diagonale Aufteilung oder X-Aufteilung. Ihr Vorteil ist, dass bei einem Kreislauf auf jeden Fall immer eine Vorderachsbremse und eine Hinterachsbremse im Einsatz sind. Durch die unterschiedliche Bremskraftverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse kommt es bei einer Bremsung mit nur einem Kreis zu einem Giermoment. Diesem Moment kann jedoch durch geeignete Regelsysteme entgegengewirkt werden [3, 9].

2.1.5 Trommelbremsen

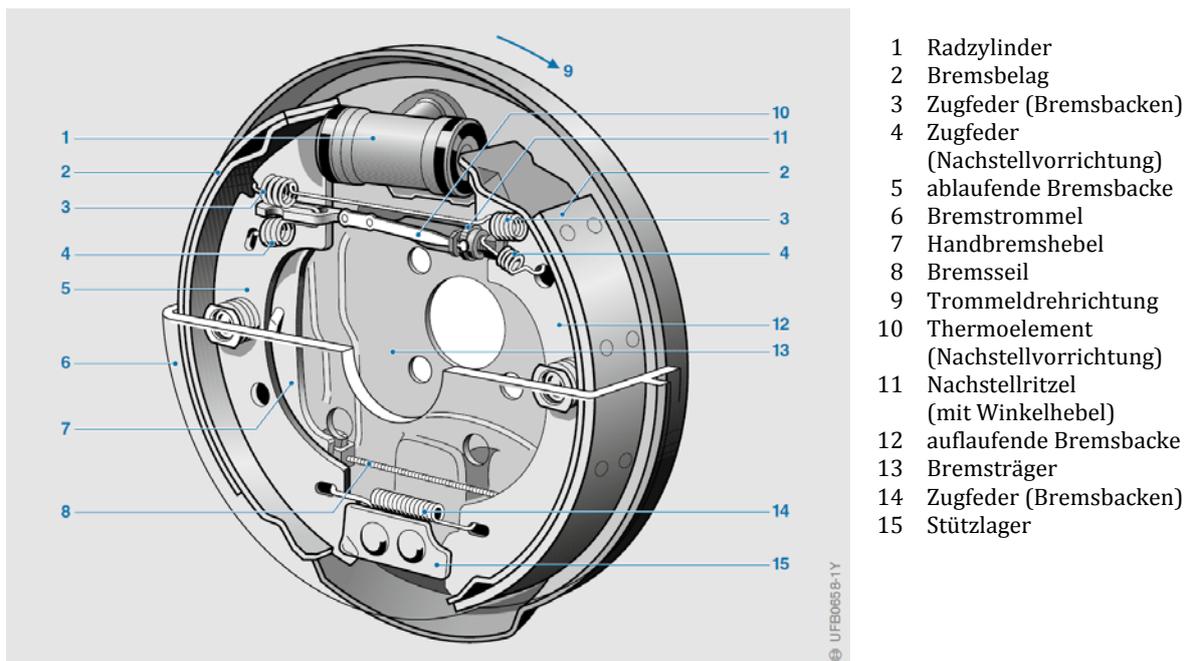


Abbildung 2.6: Simplex-Trommelbremse m. integrierter Feststellbremse [9]

In den Anfängen der Entwicklung von leistungsfähigen Kfz-Bremsen etablierten sich Trommelbremsen zum Standard. Heute sind sie im PKW-Bereich nur mehr selten und an wenig belasteten Hinterachsen verbaut. Weit verbreitet sind sie jedoch noch in leichten Nutzfahrzeugen und schweren Baustellen-LKWs, da sie sehr resistent gegen Verschmutzung sind. Trommelbremsen (wie in Abbildung 2.6) wirken mittels zwei Reibbelägen (2) radial auf die Innenfläche der Bremstrommel (6).

Aufgrund der geometrischen Bedingungen in der Trommelbremse entsteht eine Selbstverstärkung von ca. zwei bis sechs der, durch einen oder mehrere Bremskolben (1), erzeugten Kraft. Diese Selbstverstärkung ist auszeichnend für die Trommelbremse und trägt bedeutend zu ihrer Wirtschaftlichkeit bei.

Der Aufbau der verschiedenen Ausführungsformen ist ähnlich und unterscheidet sich durch die Anzahl der Bremskolben bzw. Zylinder und die Art der Bremsbackenführung [9].

Simplexbremse: In Abbildung 2.6 ist der Aufbau einer Simplex-Trommelbremse dargestellt.

Diese Bremse verfügt über einen doppelwirkenden Bremszylinder (1) und ist in ihrem Aufbau relativ einfach. Aus diesem Umstand leitet sich auch der Namenszusatz „Simplex“ ab. Die Simplexbremse besitzt einen oder zwei feste Drehpunkte (15) und neigt daher zu ungleichmäßigem Verschleiß der Bremsbeläge (2). Der fixe Lagerpunkt ist auch Grund dafür, dass sich bei der Simplexbremse die Selbstverstärkung an der ablaufenden Bremsbacke umdreht und somit die eingesteuerte Bremskraft abschwächt [3, 9].

Duplexbremse: Bei der Duplexbremse werden anstelle eines doppelwirkenden Zylinders zwei einfachwirkende Bremszylinder am oberen und unteren Ende der Bremsbacken eingesetzt. Die Abstützung der Bremsbacken bleibt allerdings fest. Dadurch ergeben sich zwei auflaufende Bremsbacken und eine hohe Selbstverstärkung von etwa 6 [9].

Duo-Duplexbremse: Die Erweiterung der Duplexbremse, die Duo-Duplexbremse, hat statt den beiden einfachwirkenden Zylindern zwei doppelwirkende Bremszylinder. Dadurch werden die Bremsbacken parallel geführt und sind somit beide Male auflaufend. Die Selbstverstärkung ist auch hier entsprechend hoch und liegt ca. bei Faktor 6 [9].

Servobremse: Die Servobremse verfügt nur mehr über einen doppelwirkenden Bremszylinder und einen einseitig beweglich gelagerten Gleitbolzen an dem sich die Backen abstützen. Durch den Wegfall eines Zylinders ist diese Bremse im Aufbau wieder einfacher und weniger stör anfällig. Da die Bremsbacken schwimmend gelagert sind, ergeben sich zwei auflaufende Backen und eine hohe Selbstverstärkung [9].

2.1.6 Scheibenbremsen

Scheibenbremsen bestehen aus einer Bremsscheibe und einem dazugehörigen Bremssattel. Die Bremsscheibe ist fest mit dem Rad, und der Sattel fest mit dem Achsschenkel verbunden. Bei einem Bremsvorgang drücken die im Sattel sitzenden Kolben die Bremsbeläge axial an die Scheibe. Die Betätigung der Kolben geschieht in den meisten Fällen hydraulisch, kann aber auch wie z.B. bei Nutzfahrzeugen mechanisch, über Gestänge oder Spreizkeile, betätigt werden. Durch die hohe thermische Belastbarkeit und das gute Ansprechverhalten ist die Scheibenbremse in den meisten heutigen PKWs verbaut. Im Folgenden wird etwas näher auf die einzelnen Komponenten (siehe Abbildung 2.7) wie Bremsscheibe, Bremssattel und Beläge, und deren verschiedenen Ausführungen, eingegangen.

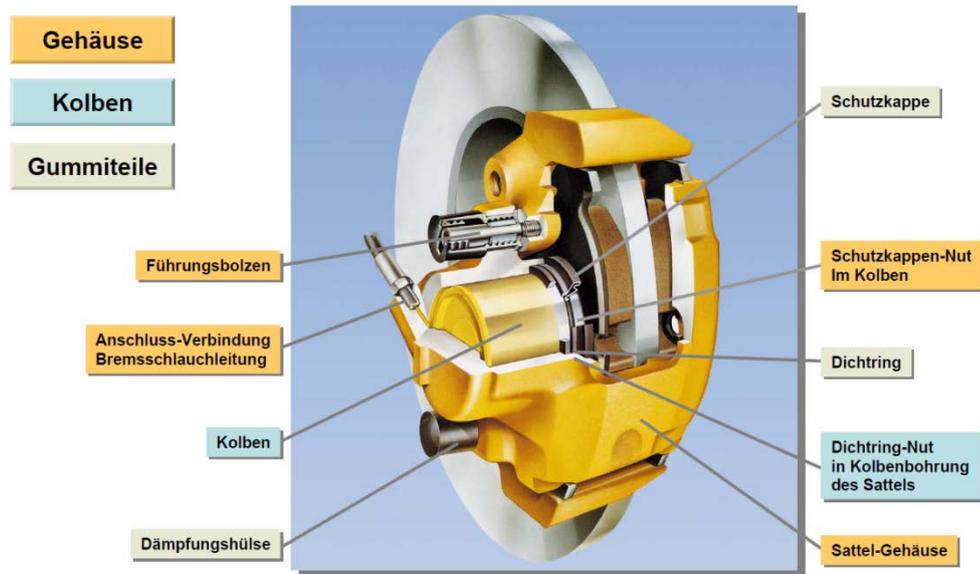


Abbildung 2.7: Scheibenbremse m. Faustsattel (Schnittbild) [10]

Bremsscheiben

Die Bremsscheibe dient bei einer Bremsung als Energieabsorber. Die kinetische Energie des Fahrzeugs wird bei einer Bremsung in Wärme umgewandelt. Die Scheibe nimmt dabei den Großteil der Energie auf und gibt sie anschließend an die Umgebung ab. Der Rest wird im Reifen bzw. der Kontaktstelle Reifen Fahrbahn und umliegenden Bauteilen umgewandelt. Da die Bremsscheiben bei starken Verzögerungen hohe Temperaturen bis ca. 700°C erreichen, wird besonders bei den vorderen Bremsen auf eine gute Kühlung geachtet. Innenbelüftete Bremsscheiben und optimierte Anströmung durch den Unterboden verringern durch zusätzliche Kühlwirkung die Temperaturbelastung der Bremsscheibe. Nuten (siehe Abbildung 2.8) oder eine axiale Lochung verhindern den Aufbau eines Wasserfilms bei Nässe und einer damit verbundenen Abschwächung der Bremsleistung. Ebenso wird dadurch ein ganzflächiger Belagverschleiß erzeugt [3, 10].



Abbildung 2.8: ATE-Power Disc [10]

Aufgrund der allgemein weniger belasteten Bremsen an der Hinterachse fallen diese kleiner aus und sind meist massiv ausgeführt. Als Werkstoff für Bremsscheiben wird heute weitgehend perlitischer Grauguss in den Qualitäten GG15...GG25 verwendet. Ein hoher Kohlenstoffanteil verbessert die Wärmeaufnahmegewindigkeit, zusätzliche Legierungselemente wie Chrom oder Molybdän verbessern die Verschleißigenschaften. In puncto Fertigungsgenauigkeit werden hohe Anforderungen an Bremsscheiben gestellt. Somit dürfen die Dickenschwankung (DTV) und der axiale Scheibenschlag nur ein Minimum sein. Übliche Werte für neue Scheiben liegen für DTV bei $<8\ \mu\text{m}$ und für den Axialschlag bei ca. $50\ \mu\text{m}$ [3]. Diese geforderten Toleranzen sind nur mehr durch Schleifen erreichbar, was die Herstellungskosten erhöht. Innenbelüftete Bremsscheiben müssen zusätzlich, aus Komfortgründen, ausgewuchtet werden.

Bremssattel

Der Bremssattel ist fest mit dem Radträger verbunden und trägt die Bremsbeläge. Im Bremssattel sind auch die Bremskolben, welche die Bremskraft ausüben, untergebracht. Der Bremssattel stützt das Bremsmoment ab und leitet dieses über den Radträger weiter ins Fahrwerk und somit in die Karosserie. Die hohen Belastungen stellen auch hohe Ansprüche an die Werkstoffeigenschaften. Allgemein wird Kugelgraphitguss in den Qualitäten GGG50...GGG60 verwendet. Höchstbelastete Bremssättel im Rennsport werden auch aus Vollmaterialien und spanend hergestellt. Generell gibt es drei unterschiedliche Varianten von Bremssätteln.

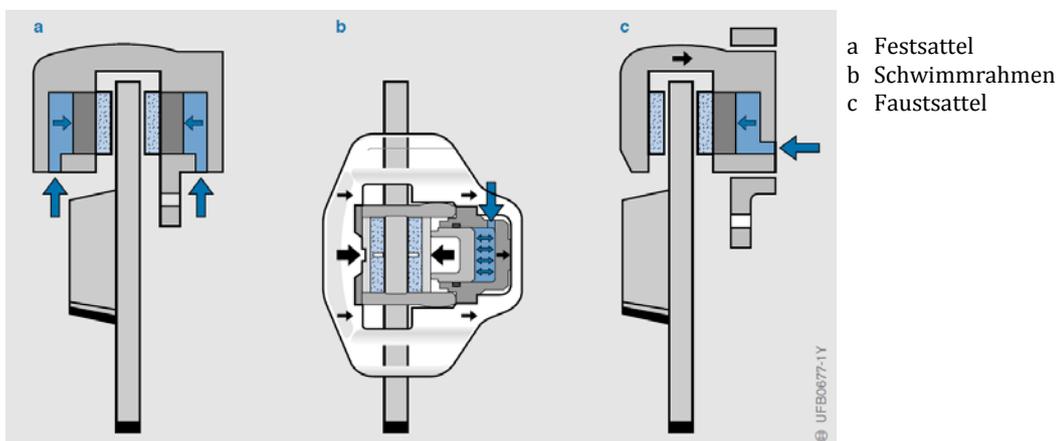


Abbildung 2.9: Übersicht Bremssattelausführungen [9]

Festsattel: Vorwiegend sind Festsättel in schweren oder sportlichen Fahrzeugen mit verbaut. Durch deren große Steifigkeit weisen sie eine geringe Volumenaufnahme und gute Bremsleistungen auf. Weiters besitzen Festsättel mindestens zwei, meist aber mehr Kolben was eine bessere Dosierbarkeit mit sich bringt [3]. Abbildung 2.9a zeigt schematisch den Aufbau eines Festsattels. Der Festsattel beinhaltet mindestens zwei oder mehreren Bremskolben welche gegenüberliegend, links und rechts der Scheibe sitzen. Aufgrund seiner Bauform ist der Festsattel sehr steif und weist eine geringe Volumenaufnahme bei der Bremsung auf.

Rahmensattel: Um bessere kinematische Verhältnisse herzustellen, muss der Bremsattel weiter in das Felgen Innere wandern. Wegen den dortigen beengten Platzverhältnissen muss der Sattel kompakter in seinen Abmessungen sein. Der Schwimmrahmensattel (siehe Abbildung 2.9 b) erfüllt diese Anforderungen [3]. Der Schwimmrahmensattel besteht aus einem festen Bremsträger, welcher einen schwimmend gelagerten Rahmen trägt. Der Rahmensattel besitzt nur einen Bremskolben. Dieser Kolben drückt den inneren Bremsbelag direkt gegen die Bremsscheibe. Der äußere Bremsbelag wird indirekt, über die Verschiebung des Schwimmrahmens, gegen die Scheibe gepresst [9].

Faustsattel: Der Faustsattel ist die Weiterentwicklung der Schwimmrahmensattelbremse. Wie in Abbildung 2.9 c dargestellt verfügt dieser Bremsattel über ein bewegliches Gehäuse, welches den Bremskolben aufnimmt. Durch hydraulische Betätigung des Kolbens, und die dadurch entstehende Verschiebung des Gehäuses, werden die Bremsbeläge innen- und außenseitig an die Scheibe gepresst. Der Faustsattel hat sich aufgrund seiner einfachen und kompakten Bauform als Standard durchgesetzt [3, 9].

Bremsbeläge

Die Reibbeläge, oder auch Bremsbeläge genannt, bilden mit der Bremsscheibe bzw. Bremstrommel ein tribologisches System. Reibung wird verwendet um ein bewegtes System zu verzögern und zum Stillstand zu bringen. Durch Anpressen der Bremsbeläge an eine, mit dem Rad, rotierende Fläche wird diese Reibung erzeugt. Bremsbeläge sollen demnach einen hohen Kraftschlussbeiwert μ mit dem Reibpartner aufweisen. Aufgrund der hohen Reibung unterliegen Reibbeläge zwangsläufig einem Verschleiß und müssen in gewissen Intervallen gewechselt werden.

Die Verschleißmechanismen, welche hier zum Tragen kommen sind folgende:

- *Abrasiver Verschleiß*
Verschleiß durch Schneid-, Furchungs- und Reißprozesse
- *Adhäsiiver Verschleiß*
Bildung und Trennung von atomaren Verbindungen (Mikroverschweißungen) zwischen Bremsbelag und Gegenmaterial (Bremsscheibe bzw. Bremstrommel)
- *Oxidativer Verschleiß*
Bildung von Metalloxiden als Schmierfilm
- *Ablation*
Thermischer Abbau der Polymere (Bindungsmittel)

Um eine einwandfreie Funktion des Bremsbelags bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen zu erhalten ist er in seiner Zusammensetzung ein sehr komplexer Kompositwerkstoff. Die Gestalt eines modernen Bremsbelags für Scheibenbremsen ist in Abbildung 2.10 dargestellt.



Abbildung 2.10: Bremsbelag für Scheibenbremsen [10]

Als Belagmaterial wurde früher, aufgrund seiner ausgezeichneten Temperaturstabilität, Asbest verwendet. Durch ein weitgehendes Verbot von krebserregendem Asbest in vielen Ländern mussten neue Materialien gefunden und entwickelt werden. Wegen der Komplexität des Aufbaus der Reibmaterialien werden an dieser Stelle nur die gängigen Materialkonzepte und deren wesentliche Eigenschaften in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Die Verbreitung der verschiedenen Belagsmaterialien ist länderspezifisch. In Europa haben sich Low Steel Beläge durchgesetzt. In Japan haben sich NAO, in den USA Semimets etabliert.

Tabelle 2.1: Eigenschaften von Reibbelägen [3]

Reibmaterialfamilie	wesentliche Eigenschaften
Semimetallisch	niedriger Scheibenverschleiß hohe Lebensdauer (abhängig von Masse, Energieeintrag, wenig Bremsungen) Belagverschleiß (abhängig von Masse, Energieeintrag, Geschwindigkeit) geringe DTV-Erzeugung keine DTV-Regeneration Haftkorrosion kritisch $\mu < 0,4$ guter Komfort
NAO	niedriger Scheibenangriff geringer Belagverschleiß μ -Performance (abnehmend über Energieeintrag, Masse, Geschwindigkeit) geringe DTV-Erzeugung (über Laufstrecke kumulierend) keine DTV-Regeneration guter Komfort gutes Knarverhalten hoher Scheibenauftrag aus Belagmaterial über Temperatur geringe mechanische Festigkeit
Low Steel	Scheibenangriff höher als bei Semimet und NAO Belagverschleiß höher als bei Semimet und NAO Lebensdauer geringer als bei Semimet und NAO DTV-Erzeugung höher (abhängig vom Reibmaterial, Sattelkonstruktion) DTV-Regeneration (Corrective Liner) abhängig von Materialfamilie Reibwert 0,35-0,5 hohe Fadingstabilität systemabhängige Komfoteigenschaften ausreichende mechanische Festigkeiten
Hybrid	Kombination der Eigenschaftsprofile NAO und Low Steel

Der Aufbau eines Bremsbelags ist in verschiedene Schichten unterteilt. In Abbildung 2.11 ist dieser sandwichartige Aufbau dargestellt. Basis bildet die, meist aus Stahl bestehende, Belagträgerplatte. Auf die Belagträgerplatte ist eine Zwischenschicht, auch *Underlayer* genannt, aufgeklebt. Zwischen *Underlayer* und dem darauf aufgebrachtene eigentlichen Reibbelag ist ebenfalls eine, wenige μm dicke, Schicht aus Klebstoff aufgetragen, welche die Zwischenschicht und den Reibbelag verbindet. Zweck der Zwischenschicht ist die Haftvermittlung zwischen Trägerplatte und Kleber. Aufgrund seiner Materialeigenschaften kann die Reibschicht nicht direkt auf die Grundplatte geklebt werden. [3]

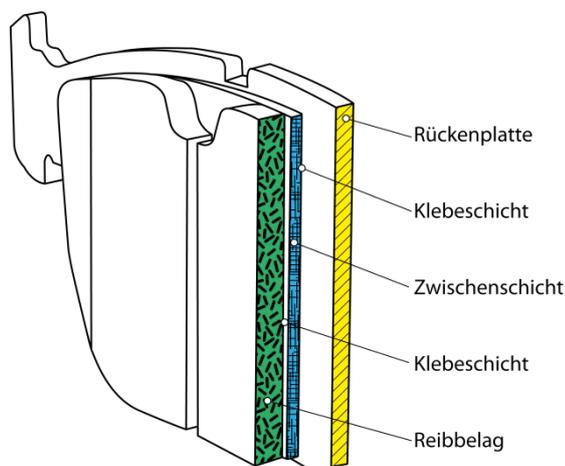


Abbildung 2.11: Aufbau eines Bremsbelags (Schnittbild) [10]

2.2 Bremsentechnische Fahrversuche

Nach erfolgter Grundausslegung und gründlicher Berechnung werden Bremsanlagen auf ihre Tauglichkeit im Gesamtfahrzeug untersucht. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Integration in die bestehende Fahrzeugumgebung und die Wechselwirkung mit dieser gelegt. Aufgrund der vielen verschiedenen Belastungsvarianten gibt es eine Reihe unterschiedlicher Fahrversuche die bis zur endgültigen Freigabe der Bremsanlage durchgeführt werden müssen. Im Folgenden werden einige der wichtigsten Erprobungen näher beschrieben.

2.2.1 Bergabfahrt

Um die thermische Leistungsfähigkeit einer Bremse beurteilen zu können werden Bergabfahrts-Tests durchgeführt. Es gibt zwei klassische, und in Ihrer Art sehr unterschiedliche, Abfahrten. Einerseits die Großglockner Hochalpenstraße für Schleichabfahrten mit konstant 22 km/h Durchschnittsgeschwindigkeit und Vollbeladung und andererseits die Abfahrt am Stilfser-Joch für so genannte Touristenabfahrten mit starken Verzögerungen in den Kehren und der erlaubten Höchstgeschwindigkeit auf den Geraden. Während der Durchführung der Bergtests werden Temperaturen an unterschiedlichen Orten und Bauteilen der Bremsanlage, die zugehörigen Bremsdrücke, Pedalweg und Pedalkraft, Beschleunigung und Geschwindigkeit gemessen. Die gesamte Messung teilt sich in zwei Bereiche. Die eigentliche Messfahrt, in der das Fahrzeug bewegt wird, und die Nachheizphase, bei stehendem Fahrzeug in der sich die Flüssigkeitstemperaturen noch erhöhen. Aufgrund des hygroskopischen Verhaltens von Bremsflüssigkeiten neigen diese bei hoher Temperatur zu Dampfblasenbildung, daher gilt die Temperatur der Bremsflüssigkeit in der Nachheizphase als einer der wichtigsten Zielwerte [3].

2.2.2 Thermische Leistungstests

Die Leistungsfähigkeit einer Bremsanlage ist einer der wichtigsten Kennwerte dieser sicherheitsrelevanten Bauteile. Um diese beurteilen zu können werden verschiedene Tests bei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt. Etabliert haben sich hier Hochgeschwindigkeits Fading Tests, Bergabfahrten und Bremswegversuche unter verschiedenen Voraussetzungen. Die Hochgeschwindigkeitstauglichkeit wird mittels *Hochgeschwindigkeits Fading Tests* (HFT) festgestellt. Hierfür werden auf einer geeigneten Hochgeschwindigkeitsteststrecke Folgebremungen aus $0,9 \cdot v_{max}$ auf 90 km/h mit konstanter Verzögerung von ca. 6 m/s^2 und teilbeladen durchgeführt. Die genauen Parameter der Fading Tests sind von Hersteller zu Hersteller verschieden. Der erforderliche Druckanstieg in den Bremskreisen und der dazugehörige Pedalweg dürfen nicht markant von den vorgegebenen Sollwerten abweichen.

Im alltäglichen Betrieb eines Fahrzeugs ist eine der wichtigsten Kenngrößen der Bremsweg. Zur Ermittlung des sicherheitsrelevanten Bremswegs gibt es eine Vielzahl an Versuchen. Einer der wichtigsten und bekanntesten ist der, nach der gleichnamigen Zeitschrift benannte, Auto Motor und Sport (AMS)-Test. Bei diesem Test werden die erreichten Bremswege bei Folgebremungen aus 100 km/h beurteilt. Da dieser Test von einer Fachzeitschrift mit einer hohen Anzahl an Lesern bzw. Kunden durchgeführt wird ist bei diesen Tests auch immer ein marketingwirksamer Gedanke mit dabei. So werden für besonders kurze Bremswege Faktoren wie die Reifen und die Witterungsverhältnisse mit einbezogen, was die Ergebnisse teilweise relativiert.

2.2.3 Bremsgeräuschsuche

Das Komfortverhalten eines Fahrzeugs, hier im speziellen der Bremsanlage, wird zusammenfassend mit dem Begriff *Noise Vibration Harshness* (NVH) bezeichnet. Darunter versteht man, wie in Abbildung 2.12 dargestellt, das Auftreten von tieffrequenten Schwingungen wie Rubbeln oder Knarzen bis hin zu Schwingungen im Hochfrequenzbereich dem sogenannten Quietschen.

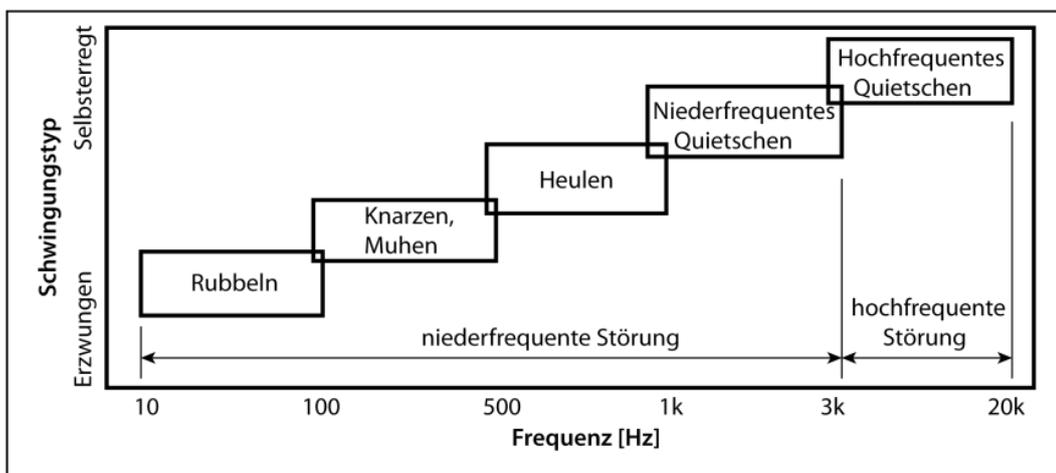


Abbildung 2.12: Einteilung der Schwingungen und Geräusche beim Bremsen [11]

Die Entstehung von Bremsgeräuschen und Schwingungen ist äußerst komplex und lässt sich im Vorfeld nur bedingt berechnen. Viele Faktoren, welche für ein auftretendes Bremsgeräusch verantwortlich sind, können durch Prüfstandtests eruiert und vermieden werden. Als abschließende Absicherung einer Bremsanlage vor der Serieneinführung, sollte jedoch eine Geräuschsuchfahrt mit dem Gesamtfahrzeug durchgeführt werden. Für diese Fahrversuche gibt es herstellerspezifische Manöver und Beurteilungsverfahren. Generell erfolgt die Beurteilung halb subjektiv durch entsprechend geschulte Versuchsfahrer und halb objektiv durch spezielle

Messtechnik und Software. Diese bewerten, unterstützt von akustischer Messtechnik, verschiedene Parameter der Bremse [3]:

- Lautstärke und Intensität der Geräusche bzw. Schwingungen
- Häufigkeit und Reproduzierbarkeit der Geräusche und Vibrationen
- von welchem Personenkreis können auftretende Störungen erkannt werden (von einzelnen Kunden, allen Kunden, aufmerksamen Kunden oder eigens geschulten Beobachtern)
- wie wird die voraussichtliche Kundenreaktion ausfallen (Verärgerung, Enttäuschung, Toleranz)
- Handhabung in der Entwicklung bzw. Serie (Nachbesserung, Rückruf, Sperre)

2.3 Versuchseinrichtungen

Mit Versuchen in der Bremstechnik können sowohl Einzelkomponenten der Bremsanlage (Betätigungseinrichtung, Radbremse, Hydroaggregat, ABS/ESP-Regelung usw.) als auch die komplette Bremse in realer Einbausituation im Gesamtfahrzeug geprüft werden. Der Aufwand und das Prüfverfahren ändern sich mit dem Fortschritt der Entwicklung. Aufgrund der Menge an Versuchen und Versuchseinrichtungen werden im Folgenden die wichtigsten Vertreter von Prüfständen und den damit durchgeführten Messungen angeführt [3].

2.3.1 Bremskomponenten

Versuche mit Bremskomponenten werden meist am Prüfstand mit eigens dafür geeigneten Prüfständen durchgeführt. In Laborversuchen werden sowohl die Funktion im Betrieb der einzelnen Komponenten als auch die grundlegenden Eigenschaften dieser untersucht. Eine der wichtigsten Eigenschaften einer Bremsanlage bzw. ihrer Komponenten ist die Volumenaufnahme. Diese gibt Auskunft darüber, wie viel an Bremsflüssigkeitsvolumen für einen bestimmten Druck aufgewendet werden muss. Hierfür verantwortlich ist das elastische Verhalten der flüssigkeitsführenden Komponenten wie Sattel, Leitungen, Hauptbremszylinder. Dargestellt wird dieser Versuch durch eine präzise Druck-Volumen Messung. Des Weiteren werden im Labor die Dichtigkeit, die Eigenfrequenz der Bremssättel oder die Festigkeitseigenschaften derselben untersucht. Ebenso kann das Verhalten der Bremskomponenten bei Anwesenheit eines korrosiven Mediums (z.B. Streusalz im Winter) mittels eines Salzsprühtests beurteilt werden.

Grundsätzliche Untersuchungen zum Verhalten zweier Reibpartner, üblicherweise Brems Scheibe und Bremsbelag, können mit einem *Reibwert-Prüfstand* durchgeführt werden. Ergebnis einer solchen Messung soll der Reibwert des untersuchten tribologischen Systems

sein. Hierfür werden das auftretende Bremsmoment, die Drehzahl, der hydraulische Bremsdruck und die Temperatur gemessen. Aus diesen Größen kann der Reibwert errechnet werden [3].

Für die Grundlagenforschung eignet sich am Besten der *Schwungmassen-Bremsenprüfstand* (SMP)(siehe Abbildung 2.13). Auf diesem Prüfstand wird die gesamte Radbremse, d.h. Scheibe und Sattel mit Belägen geprüft. Es können beliebige reale Lastzyklen simuliert werden. Der rotierende Teil des Prüfstands, dazu gehören Antriebswelle, kuppelbare Schwungmassen und der Bremsenrotor, wird mittels einem elektrischen Antriebsmotor angetrieben. Die Fahrzeugmasse und zusätzlich auftretende Belastungen werden mittels der erwähnten verschiedenen, kuppelbaren Schwungmassen simuliert. Das auftretende Bremsmoment wird mit Hilfe eines Messflansches auf der Antriebswelle zwischen Bremsscheibe und Schwungmassen gemessen und dient der Ermittlung des Reibwerts μ . Der SMP gehört zu einem der wichtigsten Hilfsmittel in der Bremsenentwicklung.

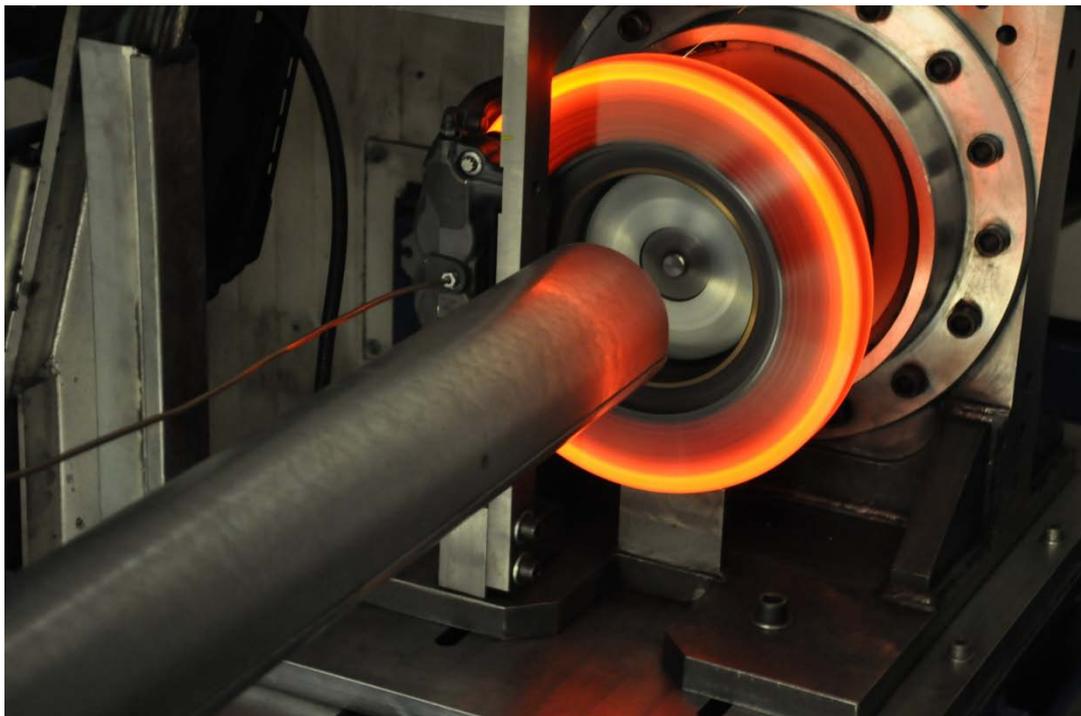


Abbildung 2.13: Schwungmassen-Bremsenprüfstand SMP mit Scheibenbremse [12]

2.3.2 Gesamtfahrzeug

Für Untersuchungen am Gesamtfahrzeug werden üblicherweise Rollen- oder Flachbandprüfstände eingesetzt. Der größte Unterschied zwischen diesen beiden Prüfständen ist die Ausführung der Antriebselemente. Der Antrieb der Räder kann entweder über Rollen oder aber über ein oder mehrere umlaufende, flache Stahlbänder passieren. Aus Kosten und Wartungsgründen werden meist Prüfstände mit Rollen verwendet. Nachteil ist hier jedoch der, durch die Krümmung der Rollen, veränderte Latsch des Reifens in dessen Aufstandspunkt. In Abbildung 2.14 ist ein Rollenprüfstand mit zwei Rollen abgebildet. Diese Art von Prüfstand wird zur schnellen und einfachen Funktionsüberprüfung in Werkstätten für die periodische §57a-Überprüfung verwendet. Es werden aber auch wesentlich kostenintensivere Prüfstände mit vier Rollen verwendet. Allgemein kann auf Gesamtfahrzeugprüfständen die Funktion der Bremse in im Zusammenspiel mit der Fahrzeugumgebung wie z.B. Achse, Federung, Dämpfer, Strömungsverhältnisse im Radhaus usw. betrachtet werden. Auch werden akustische Phänomene und Betriebsfestigkeiten auf Rollenprüfständen untersucht.

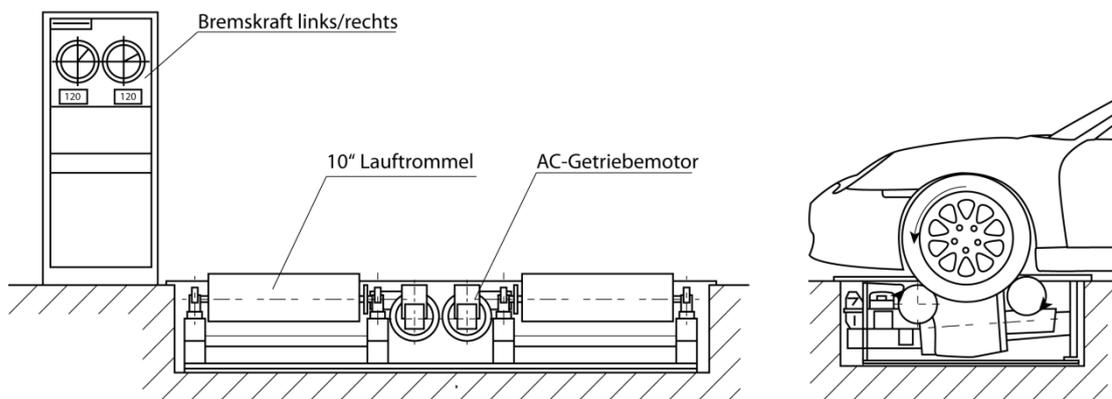


Abbildung 2.14: Gesamtfahrzeug-Rollenprüfstand [3]

Ein großer Vorteil von Gesamtfahrzeugprüfständen ist jener, dass es möglich ist, komplette Erprobungsmanöver auf ihnen zu simulieren. Dieser Umstand macht es möglich den Umfang an kostenintensiven Realversuchen zu minimieren.

2.4 Messtechnik

2.4.1 Messtechnische Grundlagen

„Messen ist das Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich der Messgröße mit einer Maßeinheit“ [13].

Mit dieser Definition ist der grundlegende Zweck und Nutzen des Messens sehr gut beschrieben. Weitere messtechnische Definitionen und Begriffserklärungen sind in DIN 1319 festgehalten. Um eine quantitative Aussage über eine physikalische Größe zu treffen muss diese zuerst definiert werden. Genauer gesagt heißt das wenn eine physikalische Größe gemessen werden soll ist sie eine Messgröße. Eine durchgeführte Messung sollte sinngemäß zu einem Messergebnis führen. Dieses lässt sich, wie folgt, in einer Formel darstellen:

$$\text{Messwert} = \text{Maßzahl} \cdot \text{Maßeinheit} \quad (2.17)$$

Das heißt, dass der quantitative Wert einer Messgröße nur komplett ist, wenn er aus der Maßzahl und seiner dazugehörigen Maßeinheit besteht. Wird nun ein solcher Messwert, mitsamt seiner Information, übertragen, so handelt es sich um ein Messsignal. Um nun ein solches Messsignal zu übertragen bieten sich, aufgrund der fortgeschrittenen Computerisierung, elektrische Signale an. Diese sind meist leicht übertragbar und lassen sich gut weiterverarbeiten. Grundsätzlich kann eine grobe Aufteilung der Messsignale in analoge und digitale Signale gemacht werden. Abschließend sei noch erwähnt, dass jede Messung mehr oder weniger fehlerbehaftet ist. Dieser Umstand ist bekannt und kann durch entsprechende Maßnahmen berechnet, berücksichtigt oder kompensiert werden. In den beiden folgenden Kapiteln werden Analog- und Digitalmesstechnik etwas näher erklärt und einige Beispiele für Messgrößen und Messsensoren, wie sie im Speziellen in der Fahrzeugmesstechnik verwendet werden, angeführt [13].

2.4.2 Analoge Messtechnik

Ein analoges Messsignal, wie in Abbildung 2.15 , ist stufenlos und kann theoretisch jeden beliebigen Wert innerhalb seiner Wertegrenzen annehmen. Physikalische Prozesse verhalten sich fast immer so. Vorteilhaft an analogen Signalen ist, dass die Abbildung zwischen Messsignal und Informationsparameter¹ stets proportional ist. Die Darstellung eines Analogsignals zeichnet sich durch ihre Wert- und Zeitkontinuität aus.

¹ Träger des interessierenden Informationsgehalts innerhalb des Messsignals

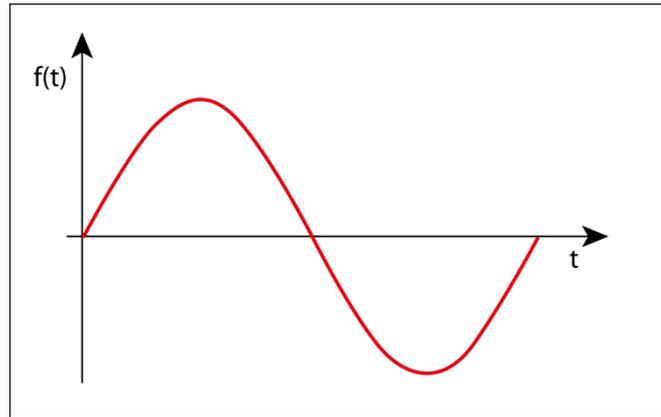


Abbildung 2.15: analoges Messsignal

Nachteilig bei der Übertragung analoger Signale ist die hohe Anfälligkeit auf Störungen. Dies kann sich als stochastisches Störsignal, Rauschen, Temperaturdrift etc. bemerkbar machen. Analoge Messsignale sind vorzugsweise elektrische Signale wie z.B. elektrische Spannung. Es können aber auch andere Größen verwendet werden. Bekannteste Vertreter solcher Größen sind z.B. der Flüssigkeitsstand eines Quecksilberthermometers oder einer Prandtl-Sonde, die Membranverformung eines Dosenbarometers oder die Drehzahl einer Tachowelle usw. Um den Wert der Messgröße sichtbar zu machen benötigt man vorzugsweise ein Messgerät mit einer geeigneten Skala. Die Anzeige auf diesem Messgerät muss definitionsgemäß auch kontinuierlich bzw. stufenlos möglich sein. Sehr gut eignen sich hierfür Zeigerinstrumente. Zeigerinstrumente wandeln das Messsignal, welches als analoges, elektrisches Signal vorliegt, in eine definierte Stellung des Zeigers um. Das passiert meistens durch das Zusammenwirken von drehbaren, elektrischen Spulen und Drehfedern [13].

2.4.3 Sensoren

Im Folgenden werden einige der am häufigsten verwendeten Sensoren in der Fahrzeugmesstechnik aufgelistet.

Thermoelemente:

Beruhend auf dem Seebeck-Effekt, siehe Gleichung (2.18), welcher besagt, dass zwischen den beiden Enden eines metallischen Leiters eine elektrische Spannung entsteht, wenn diese unterschiedliche Temperaturen T_1 und T_2 aufweisen.

$$U_{th} = c \cdot (T_2 - T_1) = c \cdot \Delta T \quad (2.18)$$

Diese Thermospannung U_{th} ist nur von der Temperaturdifferenz ΔT und einem spezifischen Materialkoeffizienten c , dem Seebeck-Koeffizienten, abhängig. Der Messbereich von Thermoelementen liegt bei $\geq 1000^\circ\text{C}$. Wie in Abbildung 2.16, gezeigt, weisen unterschiedliche Materialpaarungen unterschiedliche Thermospannungen und Einsatzbereiche auf [14].

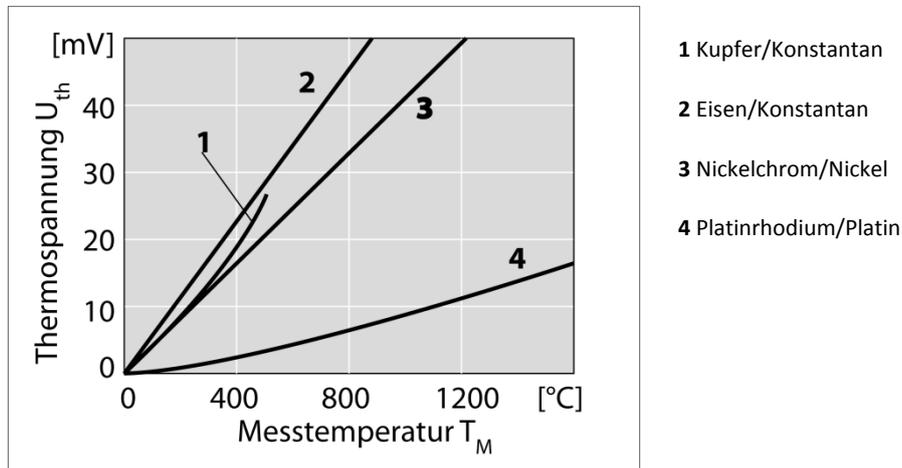


Abbildung 2.16: Kennlinien verschiedener Thermopaare [14]

In Abbildung 2.17 ist der schematische Aufbau eines Thermoelements abgebildet. Zwei *Thermoschenkel* (A/B), aus unterschiedlichen Materialien, welche an der *Messstelle* (1) verlötet sind bilden den Hauptteil. Über die *Ausgleichsleitungen* (3), bestehend aus den gleichen Materialien wie die Schenkel, verlängern diese und führen zum *Referenzpunkt* (4) an dem die *Referenztemperatur* T_R herrscht. Von dieser Referenzstelle wird das Messsignal U_{th} mittels *Kupferleitungen* (5) zum Anzeigegerät geleitet [14].

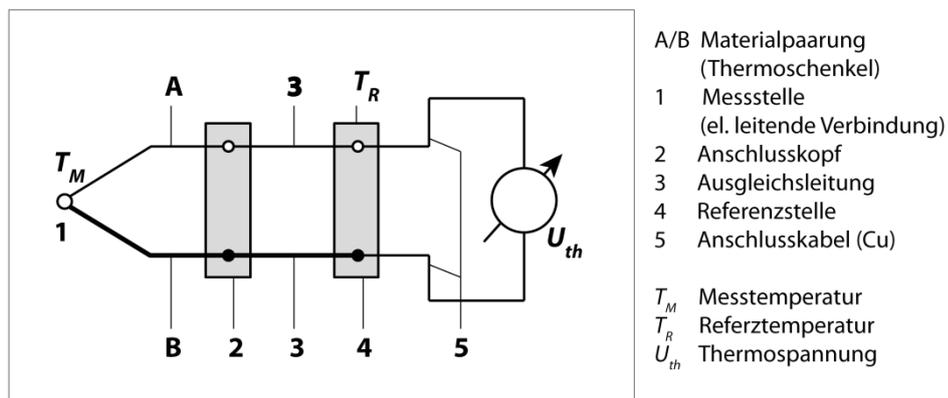


Abbildung 2.17: schematischer Messaufbau eines Thermoelements [14]

Drucksensoren:

Die Druckmessung von Fluiden oder Gasen erfolgt direkt über die Verformung einer Membran, Änderung eines elektrischen Widerstands oder über einen Kraftsensor. In Abbildung 2.18 sind einige der gängigen Druckmessprinzipien angeführt.

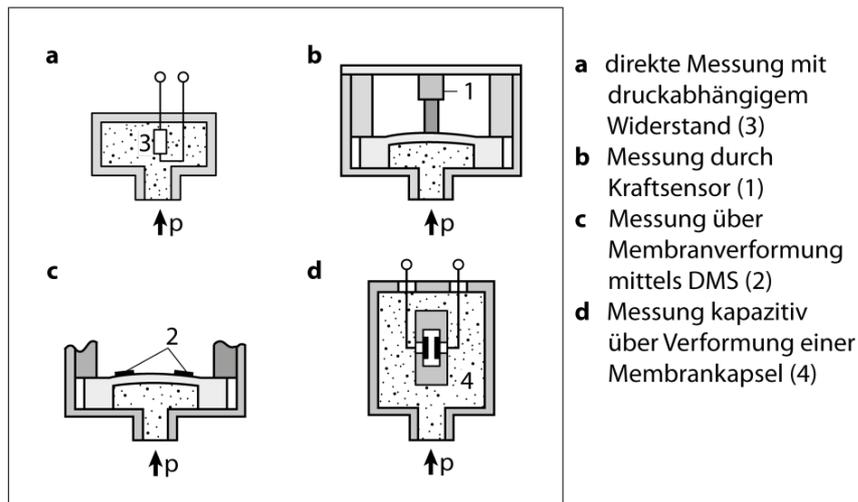


Abbildung 2.18: Druckmessprinzipien [14]

Am weitest verbreiteten sind Membransensoren (wie in Abbildung 2.18 b und c). Hierbei wird die Verformung einer dünnen Haut (Membran) unter dem wirkenden Druck p gemessen. Dies kann durch DMS oder einen Kraftsensor geschehen. Für niedrige Drücke können Membranen mit größerem Durchmesser und geringerer Dicke verwendet werden. Die Durchbiegungen der Membran sind größer und bewegen sich hier im Bereich von 0,1-1mm und können teilweise sogar mittels Wegmessung kapazitiv abgegriffen werden. Bei hohen Drücken sind die Membranen steifer und die Verformungen kleiner deshalb werden hier meist spannungsmessende Verfahren, wie DMS, verwendet.

Beschleunigungssensoren:

Um eine Beschleunigung a zu messen werden nicht die Beschleunigungen direkt, sondern die auf eine bestimmte Masse m ausgeübte Trägheitskraft F_M gemessen, siehe Gleichung (2.19).

$$F_M = m \cdot a \quad (2.19)$$

Die Messung der Kraft erfolgt entweder weg- oder spannungsmessend. In Abbildung 2.19 sind zwei Ausführungen von wegmessenden Systemen dargestellt.

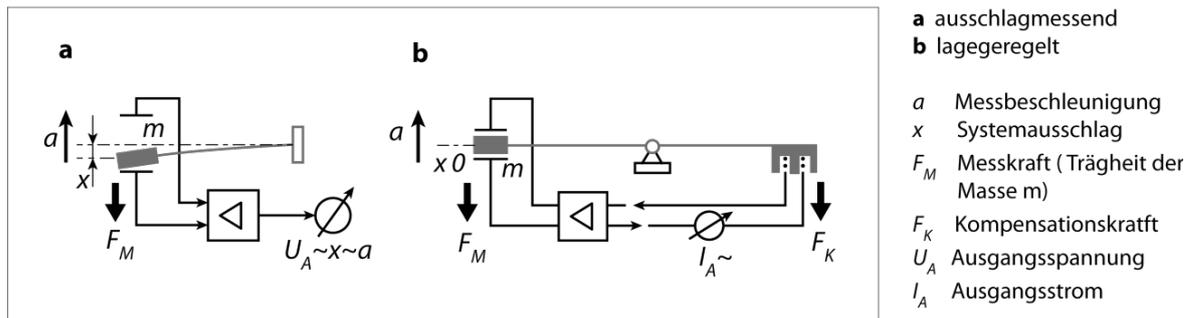


Abbildung 2.19: wegmessende Beschleunigungssensoren [14]

Hierbei wird die seismische Masse m durch die Beschleunigung a um den Weg x ausgelenkt. Diese, der Beschleunigung proportionale, Auslenkung wird kapazitiv gemessen. Bei lagegeregelten Systemen (Abbildung 2.19 b) wird die beschleunigungsbedingte Auslenkung durch eine äquivalente Rückstellkraft F_K ausgeglichen und der Sensor ist somit Teil eines geschlossenen Regelkreises. Als Maß für die Beschleunigung wird dabei die Rückstellkraft herangezogen. Lageregelnde Systeme arbeiten sehr nahe am Nullpunkt der Auslenkung und besitzen somit ein hohes Maß an Linearität. Diese Regelung ermöglicht einen größeren Messbereich und ist lediglich durch die Größe der Rückstellkraft begrenzt [14].

Positionssensoren:

Positionssensoren messen Wege oder Winkel. Bei Positionsgrößen handelt es sich um *extensive Größen*, bei denen die Größe des Sensors maßgeblich von der Messgröße bzw. dem Messbereich bestimmt wird. Da dies für rotatorisch messende Sensoren weniger als für translatorisch messende gilt werden Rotatorische, bei denen der Radius nicht vom zu messenden Winkel abhängt, meist bevorzugt. Positionssensoren sind sehr häufig verwendete Sensoren. Deshalb gibt es auch anwendungsspezifisch eine Vielzahl an Messprinzipien nach denen diese arbeiten. Im Folgenden wird nur das einfachste Prinzip, das Potentiometer, erklärt. Weitere relevante Messmethoden sind die *magnetische Induktion*, *rotierende Wechselfelder*, *galvanomagnetische Effekte (Hall-Effekt)*, *Ultraschall*, *Laser* oder *Radar*. Ein, wie in Abbildung 2.20 dargestelltes, Schleifpotentiometer funktioniert wie folgt.

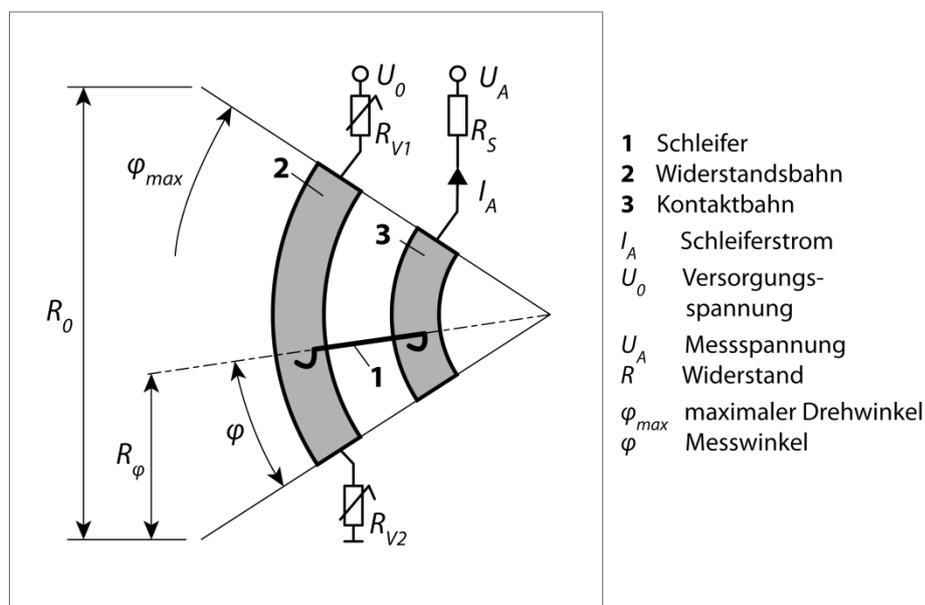


Abbildung 2.20: Schleifpotentiometer [14]

Die durch einen verdrehbaren Schleifkontakt eingestellte Länge des Widerstands der Widerstandsbahn ist proportional dessen Widerstandswert und somit proportional dem Messwinkel φ und der Messspannung U_A . In einer Formel lässt sich dieser Zusammenhang folgendermaßen darstellen:

$$\frac{\varphi}{\varphi_{max}} = \frac{R_\varphi}{R_0} = \frac{U_A}{U_0} \quad (2.20)$$

Daraus folgt:

$$\varphi = \varphi_{max} \cdot \frac{U_A}{U_0} \quad (2.21)$$

Die einstellbaren Vorwiderstände R_{V1} und R_{V2} dienen als Überlastschutz. Potentiometer sind in ihrem Aufbau sehr einfach und sind deshalb auch sehr kostengünstig herzustellen. Zusätzlich kommen Potentiometer ohne Elektronik aus. Nachteilig ist jedoch der mechanische Verschleiß, die Anfälligkeit auf Verschmutzung und Rauschen.

2.4.4 Digitale Messtechnik

Der besseren Verarbeitung wegen und weil fast alle Systeme in irgendeiner Weise automatisiert bzw. computerisiert sind bietet es sich an, digitale Messsignale zu verwenden. Diese Signale können nicht mehr jeden beliebigen Wert sondern nur mehr definierte Zustände zu diskreten Zeitpunkten annehmen (siehe Abbildung 2.21). Die Anzahl dieser definierten Zustände wird über die geforderte Messgenauigkeit bzw. der Leistungsfähigkeit der verwendeten Elektronik geregelt. Digitale Messsignale sind während der Übertragung aufgrund ihrer digitalisierten Informationen nicht auf äußere Störgrößen anfällig und sind deshalb bestens geeignet um über große Entfernungen übertragen zu werden.

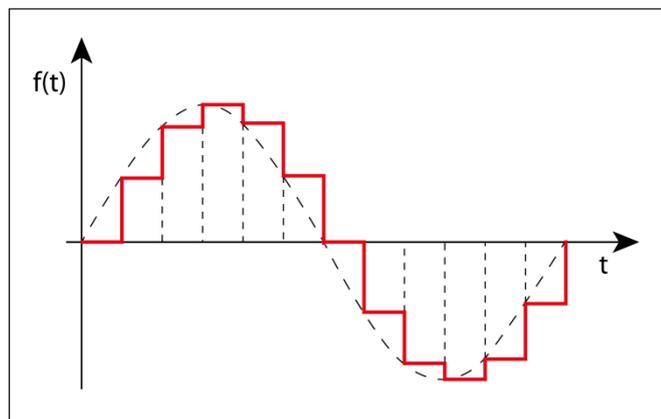


Abbildung 2.21: Digitales Messsignal

Die Messkette eines digitalen Systems ist in Abbildung 2.22 ersichtlich. Grundlage eines digitalen Messsignals bildet eine elektrisches Analogsignal welches durch *analoge Signalverarbeitung* (ASV) und Umwandlung einer zu messenden physikalischen Größen in ein elektrisches Signal, meist Spannung, entstanden ist.

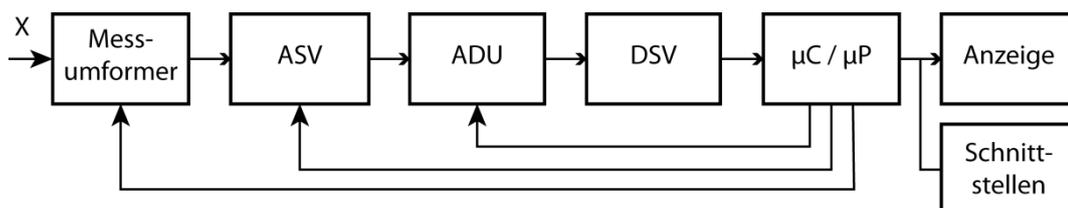


Abbildung 2.22: Blockschaltbild eines allgemeinen digitalen Messsystems [15]

Der größte Unterschied zu einem analogen System besteht im *Analog/Digital-Umsetzer* (ADU). In diesem Bauteil wird das kontinuierliche Signal aus der ASV in ein Digitalsignal umgewandelt. Wichtigste Kenngrößen eines ADU sind die Auflösung und die Wandlungsrate. Da die Messung analog passiert ist das Messsignal vor der analog/digital-Wandlung noch auf Störeinflüsse anfällig. Im nächsten Bauteil, der *digitalen Signalverarbeitung* (DSV), kann das digitale Signal, ähnlich wie im ASV, transformiert, umgerechnet oder gefiltert werden. Die Steuerung und Überwachung des gesamten Systems erfolgt durch einen *Mikroprozessor* (μP) bzw. *Mikrocontroller* (μC). Durch standardisierte Schnittstellen und Netzwerke, wie z.B. CAN-Bussysteme können einzelne Sensoren und Messgeräte zu ganzen Messwerterfassungssystemen zusammengefasst werden [15].

2.4.5 Strömungsmesstechnik

Um Strömungen beurteilen zu können und deren charakteristische Größen zu ermitteln bedient man sich, in der experimentellen Strömungsmechanik, der Strömungsmesstechnik. Durch den großen technischen Fortschritt in der Messtechnik allgemein ist es auch in der Strömungsmesstechnik, dank leistungsfähiger Messrechner, möglich komplexe Strömungsfelder zu analysieren. In Strömungen werden meist die thermodynamischen Zustandsgrößen Druck und Temperatur gemessen. Auch die Geschwindigkeit ist strömungstechnisch von großer Bedeutung da sie eine Aussage über die Ausbildung der Strömung liefert, d.h. ob die Strömung laminar oder turbulent ist. Aufgrund der Relevanz für diese Arbeit wird in diesem Kapitel nur auf die Methoden der Strömungsvisualisierung, der Sichtbarmachung von Strömungen, näher eingegangen.

Eine Sichtbarmachung der Strömung wird meist dann eingesetzt wenn die Qualität der Strömung von Interesse ist. Zusätzlich zu grundlegenden Aussagen der Strömungsphänomene können oft weitere Vorinformationen für den gezielten Einsatz anderer Messmethoden erhalten werden. Die simpelsten Methoden der Strömungsvisualisierung basieren auf Einsetzen einzelner Partikel in die Strömung. Voraussetzung hierfür ist eine schlupffreie Bewegung des Partikels in der Strömung. Durch Beobachtung dieses Partikels erhält man die Bahnlinie seiner Bewegung. Verwendet man viele Partikel so können mittels einer Momentanaufnahme die Stromlinien sichtbar gemacht werden. Bringt man einen dünnen Rauchfaden in die Strömung ein, kann man die sogenannten Streichlinien, welche alle Teilchen die einen bestimmten Punkt passiert haben, sichtbar machen.

Eines der einfachsten und schon lange angewandten Verfahren zur Sichtbarmachung von Strömungen an Oberflächen ist die *Wollfadenmethode*. Hierfür werden einzelne oder zu Bündel gepackte Fäden auf die Oberfläche des umströmten Körpers aufgebracht. Aufgrund der geringen Masse richten sich die Fäden genau in Strömungsrichtung aus.

Durch Zugabe von Partikeln ergibt sich eine Vielzahl von möglichen Verfahren zur qualitativen Beurteilung von Strömungen. Diese Gruppe von Messmethoden wird auch am häufigsten verwendet. Mittels *Laserlichtschnittverfahren* können Partikel, sogenannte Tracer, in der Strömung sichtbar gemacht werden. Diese können aus den unterschiedlichsten Materialien sein, sollten jedoch in ihrem spezifischen Gewicht dem des Fluids ähneln.

Auch das Einleiten von gefärbten Flüssigkeiten in ein Strömungsfeld zeigt den Verlauf der Strömung der Farbpartikel. Wendet man diese *Farbfadenmethode* auf Luftströmungen an, wird anstelle gefärbter Flüssigkeiten Rauch verwendet [16].



Abbildung 2.23: Strömungsvisualisierung mit Rauchlanze [17]

Der mit Hilfe einer Rauchlanze in die Strömung eingebrachte Rauch liefert eine, wie in Abbildung 2.23 gezeigte, Darstellung der momentanen Strömungssituation um ein Hindernis. Anstelle der Rauchlanze mit nur einer rauchabgebenden Öffnung kann auch ein Rauchrechen verwendet werden. Durch solch einen Rechen können mehrere, nebeneinander liegende Streichlinien visualisiert werden. Der eingesetzte Rauch entsteht durch Verdampfen von Flüssigkeiten, meist wässrige Lösungen auf Polyolbasis und sollte nicht gesundheitsschädlich sein [16].

3 Vorbereitungen für Prüfstandsmessungen

Das folgende Kapitel befasst sich mit den grundlegenden Einstellungen und vorbereitenden Tätigkeiten für die Prüfstandsversuche. Es werden unter anderem die Konfiguration für das Fahrzeug, den Prüfstand und die Messtechnik näher erörtert.

3.1 Referenzmessungen Großglockner

Als Grundlage für die Durchführung eines vergleichenden Versuchs am Prüfstand dienen Referenzmessungen unter realen Bedingungen.

3.1.1 Versuchsstrecke Großglockner

Das Großglocknermassiv liegt im österreichischen Teil der Ostalpen an der Grenze zwischen Kärnten, Tirol und Salzburg. Der Großglockner ist mit 3.798 m.ü.A. der höchste Berg Österreichs und zählt zu den höchsten Gipfeln der Ostalpen.

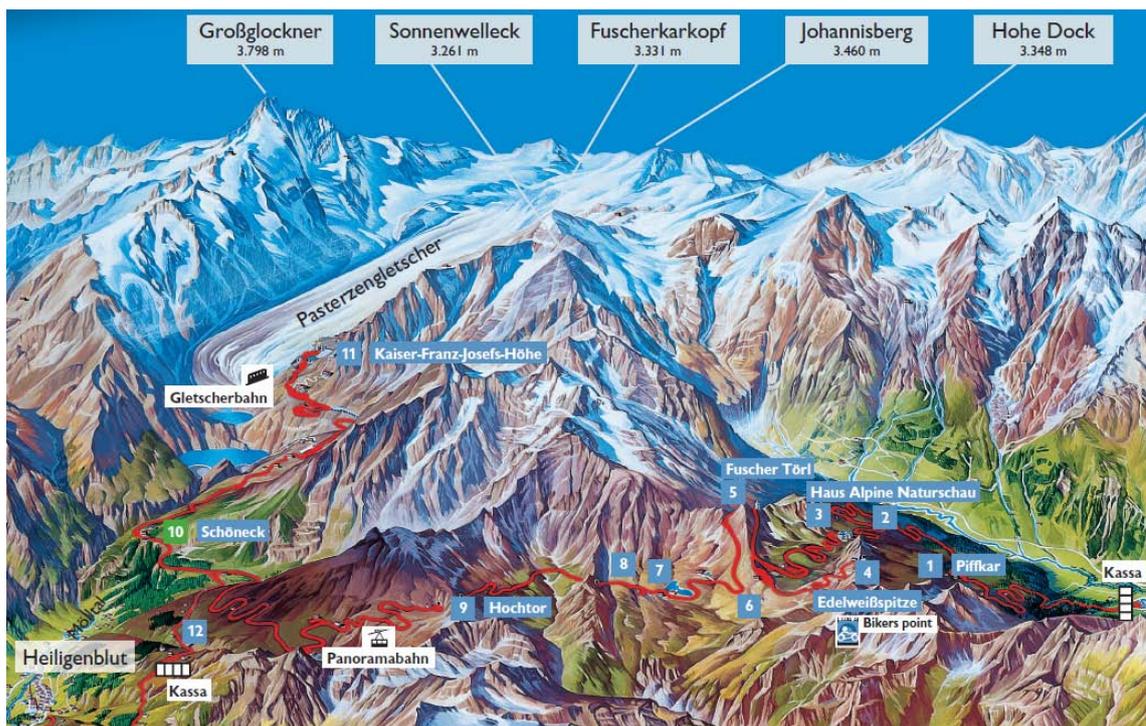


Abbildung 3.1: Panorama Großglockner-Hochalpenstraße [18]

Da am Großglockner hochalpine Verhältnisse herrschen, ist der zur Verfügung stehende Zeitraum für Erprobungen auf die Monate von Mai bis Oktober beschränkt. Als Versuchsgelände für die Abfahrt vom Großglockner dient die in Abbildung 3.1 gezeigte *Großglockner-Hochalpenstraße* (GHS). Die GHS verläuft von Bruck im Salzachtal (Salzburg), östlich des Gipfels, nach Heiligenblut im Mölltal (Kärnten).

Auf 2.428 m.ü.A zweigt beim Fuscher Törl die Panoramastraße zur Edelweißspitze auf 2.572 m.ü.A. ab [18]. Start der 14,8km langen Erprobungsfahrt ist der Parkplatz Edelweißspitze (4). Von der Edelweißspitze geht es über 6 Kehren zum Parkplatz Fuscher Törl. Von dort führt die Strecke nordwärts über 14 Kehren auf 13.2km (Punkte 3, 2 und 1 in Abbildung 3.1) zur Mautstelle Ferleiten. Am Parkplatz der Mautstelle ist das Ende der Erprobungsstrecke. In Abbildung 3.2 ist zur Übersicht das Höhenprofil der Großglockner-Hochalpenstrasse mit den durchschnittlichen Gefällewerten zu sehen. Die Panoramastraße zur Edelweißspitze ist in dieser Grafik nicht abgebildet. Hauptaussage dieser Abbildung ist die Tatsache, dass die Abfahrt an der Nordseite des Großglockners Richtung Salzachtal ein sehr konstantes Gefälle von ca. 9,7% aufweist.



Abbildung 3.2: Höhenprofil der Großglockner-Hochalpenstraße [18]

3.1.2 Durchführung der Bremserprobung

Die Abfahrt vom Großglockner ist eine sogenannte Schleichabfahrt. Auszeichnend hierfür ist die geringe Geschwindigkeit von 22 km/h. Der gesamte Versuch wird, sowohl bei Automatik als auch bei manuellem Getriebe, im Leergang durchgeführt. Start der Erprobungsfahrt ist die Edelweißspitze. Nach dem Erreichen von 22 km/h wird diese Geschwindigkeit lediglich durch Betätigen der Betriebsbremse gehalten. Während der gesamten Abfahrt sind die vorgeschriebenen Messgrößen mittels geeignetem Messsystem aufzuzeichnen. Die einzelnen Messstellen und deren Messgrößen werden in Kapitel 3.4 noch näher beschrieben. Nach erfolgter Abfahrt werden im Stillstand, am Parkplatz Mautstelle Ferleiten, noch Standbremsmessungen in der Nachheizphase der Bremsen durchgeführt. Der genaue Ablauf der Bremserprobung ist von OEM zu OEM verschieden, die Rahmenbedingungen der durchschnittlichen Geschwindigkeit und die Notwendigkeit der Nachheizphase haben jedoch alle gemein.

3.2 Fahrzeugkonfigurationen

Um unterschiedliche Szenarien und Manöver darstellen zu können, ist es nötig, unterschiedliche Konfigurationen des Fahrzeugs zu definieren. Die Konfigurationen des Fahrzeugs sind jeweils, aus Gründen der Nachvollziehbarkeit, für den Prüfstandsversuch und die Referenzmessung ident.

3.2.1 Standardkonfiguration Bergabfahrt

Die Standardkonfiguration für die Prüfstandsversuche des in Entwicklung befindlichen Fahrzeugs muss dessen Standard Serienausstattung ähneln. Sie dient als Basis für die grundlegenden Messungen d.h. sie ist die Grundeinstellung mit welcher die Parametersuche am Prüfstand durchgeführt wird. Die Basiseinstellung des Fahrzeugs besteht hauptsächlich aus den Bauteilen welche peripher mit der Bremsanlage in Verbindung stehen. Wie aus Abbildung 3.3 ersichtlich ist sind dies die Räder, der vordere Unterboden mit den verwirklichten Kühlmaßnahmen und die Auslegung des Bremssystems selbst.



Abbildung 3.3: Standardkonfiguration 17"-Rad

In Tabelle 3.1 sind die Einstellungen genauer beschrieben.

Tabelle 3.1: Parameter der Standardkonfiguration Fahrzeug

Räder	<ul style="list-style-type: none"> • 17-Zoll • Stahl-Felge • Radkappe
Unterboden	<ul style="list-style-type: none"> • geschlossen • alle für das Fahrzeug erarbeiteten Kühlmaßnahmen (Bremsenabdeckblech, Fenderliner, Spoilerlippe)

3.2.2 Vergleichskonfiguration Bergabfahrt

Die Vergleichskonfiguration dient dem Nachweis der allgemeinen Gültigkeit der Standardeinstellung bzw. deren Verfeinerung durch den iterativen Prozess. Als geänderte Konfiguration am Fahrzeug wurde die Verwendung eines unterschiedlichen Rades (siehe Abbildung 3.4) gewählt. Alle anderen Einstellungen am Fahrzeug wurden beibehalten und nicht verändert. Durch die in ihren Abmessungen größere Felge aus Leichtmetall und den größeren Freistellungen zwischen den einzelnen Speichen kommt es zu unterschiedlichen Strömungsverhältnissen an der Radbremse.



Abbildung 3.4: Vergleichskonfiguration F1 18“-Rad 5 Speichen asymmetrische Öffnungen

Anzumerken ist hier jedoch, dass die 18“-Felgen für die Referenzmessungen (siehe Abbildung A-1) ein anderes Fabrikat, als diejenigen am Prüfstand, waren. Diese konnten aufgrund von Beschädigungen für die Prüfstandsmessungen nicht mehr verwendet werden. Die Parameter der Vergleichskonfiguration sind in Tabelle 3.2 nochmals aufgelistet.



Abbildung 3.5: Vergleichskonfiguration F2 18“-Rad 7 Speichen symmetrische Öffnungen

Tabelle 3.2: Parameter der Vergleichskonfigurationen Fahrzeug

Räder	
Felge F1	<ul style="list-style-type: none"> • 18-Zoll Leichtmetall-Felge • 5 Speichen • asymmetrische Öffnung
Felge F2	<ul style="list-style-type: none"> • 18-Zoll Leichtmetall-Felge • 7 Speichen • symmetrische Öffnung
Unterboden	<ul style="list-style-type: none"> • geschlossen • alle für das Fahrzeug erarbeiteten Kühlmaßnahmen (Bremsenabdeckblech, Fenderliner, Spoilerlippe)
Bremsanlage	<ul style="list-style-type: none"> • X-Aufteilung • 2 Bremskreise

Aufgrund der asymmetrischen Form der Felgenöffnungen und der rotorähnlichen Drehung der Speichen wird zusätzlich eine weitere 18“ Leichtmetallfelge für Vergleichsmessungen verwendet (Konfiguration F2). In Abbildung 3.5 ist die Felge mit Rad abgebildet. Hierbei handelt es sich um eine Felge mit 7 Speichen und beinahe symmetrischen Öffnungen. Mit dieser zusätzlichen Konfiguration kann der Einfluss der Felgenform auf die Strömung an den Radbremsen untersucht werden.

3.3 Prüfstandskonfigurationen

Der Prüfstand benötigt für eine saubere Durchführung der Versuche ebenfalls eine dokumentierte Grundeinstellung welche die Basis für alle Prüfstandsläufe bildet. Als Prüfstand wird ein vier-motoriger Rollenprüfstand der Firma *Maha AIP* [19] verwendet. Die vier 48“-Rollen können einzelnen motorisch sowie generatorisch geregelt werden. Diese Regelung macht es auch möglich alle vier Rollen synchron laufen zu lassen. Der auftretende Fehler in der Synchronität beträgt dabei maximal 0,02 km/h zwischen Vorder- und Hinterachse. Durch die Echtzeitmessung der jeweiligen Rollenmomente mittels pendelnd gelagerten Antriebsmotoren und Kraftmessdosen, ist es möglich verschiedenste Drehmomentanforderungen zu simulieren. Es können nicht nur konstante Lastmomente aufgebracht werden sondern, mithilfe der geeigneten Prüfstandssoftware, auch Steigungen oder Gefälle nachgebildet werden. Zu den Einsatzgebieten des Prüfstands zählen Motorleistungstests, Thermalauslegungen, Abgas- und Verbrauchsmessungen für Entwicklung und Konformitätsprüfungen während der Produktion (CoP), Antriebsstranguntersuchungen usw. Neben der gesamten Abgasmesstechnik (1) verfügt der Prüfstand zusätzlich über ein geregeltes Fahrtwindgebläse (2), eine Klimatisierung (3), einen Sonnenlichtsimulator (4) und das Fahrerleitsystem (5). Die Position des Fahrzeugs am Prüfstand wird durch die Fixierungen (6) vorne und hinten fest eingestellt (dargestellt in Abbildung 3.6)



Abbildung 3.6: GAAZ Rollenprüfstand (MSF)

Mithilfe des Fahrerleitsystems kann sich der Fahrer innerhalb der synthetischen Testbedingungen orientieren. Da am Prüfstand keinerlei Rückmeldungen wie Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Streckenverlauf vom Fahrzeug bzw. der Umgebung zum Fahrer kommen werden im Fahrerleitsystem relevante Daten wie Sollgeschwindigkeitsverlauf und Momentangeschwindigkeit angezeigt. Es können auch komplette Zyklen wie z.B. Abgasmesszyklen NEDC und FTP75 oder Höhenprofile abgebildet werden. Diese genormten Fahrzyklen werden am Prüfstandsrechner gespeichert und können jederzeit für jedes Fahrzeug geladen werden.

In Tabelle 3.3 sind die technischen Daten des gesamten Prüfstands und der Peripheriegeräte zusammengefasst.

Tabelle 3.3: technische Daten GAAZ Rollenprüfstand mit Peripherie

Rollenprüfstand	
Antriebsleistung Vorderachse	2 x 150 kW
Antriebsleistung Hinterrachse	2 x 200 kW
Radstand	1.800 mm bis 4.200 mm
Spurweite	900 m bis 2.300 mm
maximale Rollengeschwindigkeit	260 km/h
Gesamtgewichtsimulation	450 kg bis 4.500 kg
Fahrtwindgebläse	
Volumenstrom	199.000 m ³ /h @ 140 km/h 148.000 m ³ /h @ 200 km/h
Düsenquerschnitt	850 mm x 1600 mm bei 140 km/h 460 mm x 1600 mm bei 200 km/h
Klimaanlage	
Temperaturbereich	-35°C bis +55°C
Sonnensimulator	
Spektrum	gesamtes Sonnenlicht
Leistung	1200 W/m ²

3.3.1 Großglockner Bergabfahrt

Als grundlegende Einstellung für die Umgebung in der Prüfkammer wurden für die Temperatur 20°C und für die relative Luftfeuchtigkeit 40% gewählt. Die Umgebungstemperatur von 20°C wurde deshalb gewählt, weil verschiedene OEMs eine Normierung, der Maximalwerte gemessener Temperaturen, auf eben diese 20°C Umgebungstemperatur durchführen. Die Einzelheiten dieser Vorgehensweise werden in Kapitel 4.3.1 noch näher beschrieben. Am Prüfstand fällt der Schritt der Normierung durch die dort herrschenden Verhältnisse weg. Des Weiteren ist es notwendig den Prüfstand auf die geometrischen Abmessungen des Versuchsfahrzeugs einzustellen. Mit Hilfe der beiden hinteren Rollen, welche verschiebbar

gelagert sind, kann der Prüfstand auf den jeweiligen Achsabstand des Fahrzeugs eingestellt werden. Für die Simulation der Großglockner-Hochalpenstraße ist es notwendig die geographischen Daten so aufzubereiten, dass sie für die Software geeignet sind. Die Regelsoftware kann Daten zu Fahrzeit, Geschwindigkeit, gefahrene Strecke und Steigung verarbeiten. Für die Anforderungen der Geländesimulation haben sich gefahrene Strecke und Gefälle als zweckmäßig erwiesen. Das Bearbeiten der, aus einer der Referenzmessungen erhaltenen, GPS-Daten der Großglockner-Hochalpenstrasse ist Kernthema der Prüfstandsvorbereitung für die Simulation der GHS-Abfahrt. Das Mittelmaß zwischen Genauigkeit und Anzahl der einzelnen Datenpunkte, welche mit dem Rechenaufwand innerhalb der Prüfstandsregelung einher geht, ist enorm wichtig. Die gemessenen Ausgangsdaten (siehe Abbildung 3.7) sind teilweise mit Ausreißern und Aussetzern, bedingt durch Verlust des Satellitensignals, behaftet.

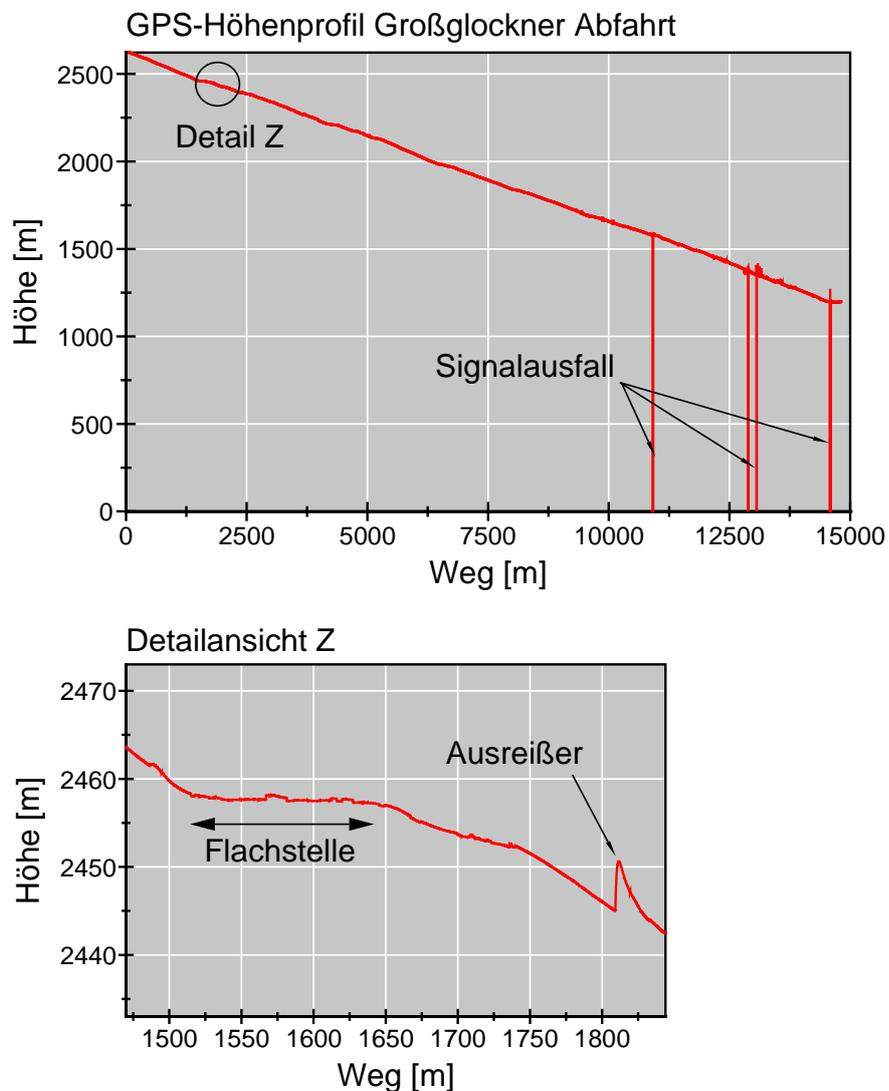


Abbildung 3.7: GPS-Rohdaten Höhenprofil

Um im endgültigen Signal Ausreißer zu vermeiden und die Anzahl an Datenpunkten auf ein überschaubares Maß zu reduzieren wurde das Rohsignal, mit seinen 100 Hz Aufzeichnungsfrequenz das entspricht ca. 330000 Datenpunkten, mit einer geringeren Frequenz nochmals abgetastet. Als sehr gut geeignet hat sich hierbei eine Frequenz von 0,5 Hz herausgestellt. Bei dieser Frequenz ist die Genauigkeit noch ausreichend, die Anzahl der Datenpunkte mit ca. 1700 sehr gering und die Ausreißer und Signalverluste wurden Größtenteils vermieden. Das Signal mit geringerer Abtastrate weist jedoch noch einen sehr kantigen und damit einen sehr unrealistischen Verlauf auf. Aus diesem Grund ist es notwendig diese Signal noch einmal zu glätten um damit die, durch das Herabsetzen der Abtastfrequenz entstandenen, Spitzen abzurunden bzw. zu glätten. Diese Operation bereinigt den Verlauf des Höhenprofils ohne dabei die Anzahl der Datenpunkte zu verändern. Als Methode zur Glättung erscheint hier der gleitende Mittelwert, Gleichung (3.1), mit einer symmetrischen Aufteilung und einer Glättungsbreite $N = 350$ Datenpunkten am geeignetsten.

$$f(y_i) = \frac{1}{2 \cdot N + 1} \sum_{k=i-N}^{k=i+N} y_k \quad (3.1)$$

Der Index i entspricht hierbei dem Zähler für den jeweiligen fortlaufenden Datenpunkt y . Die Datenpunkte mit Index k werden zur Berechnung des Mittelwerts für Punkt y_i herangezogen. Der Wert von k setzt sich aus dem momentanen Punkt y_i und der Glättungsbreite N zusammen. In Abbildung 3.8 sind die Rohdaten (rot), das aufbereitete Signal mit 0,5 Hz (grün) und das geglättete, aufbereitete Signal (blau) gegenübergestellt. Es ist gut zu sehen, dass einerseits die vorhandenen Ausreißer mit einer geringeren Abtastrate eliminiert werden und die damit erkaufte Ungenauigkeit durch die Glättung wieder relativiert wird. Wichtig ist vor Allem, dass die Flachstellen (siehe Abbildung 3.7 *Detail Z*) d.h. die Bereiche mit geringem bis gar keinem Gefälle in den Kehren im bearbeiteten Höhenprofil vorhanden bleiben. In diesen Bereichen wird, im Realfall, die Radbremse komplett gelüftet, was zu einer Regeneration der Bremsscheibentemperatur führt. Um möglichst nahe an der Realität zu sein, müssen diese kurzen Regenerationsphasen auch am Prüfstand durchlaufen werden. Sehr große und über einen längeren Zeitraum bestehende Abweichungen vom Sollverlauf, welche durch die automatisierte Bereinigung der Rohdaten nicht ausgebessert werden, müssen manuell korrigiert werden.

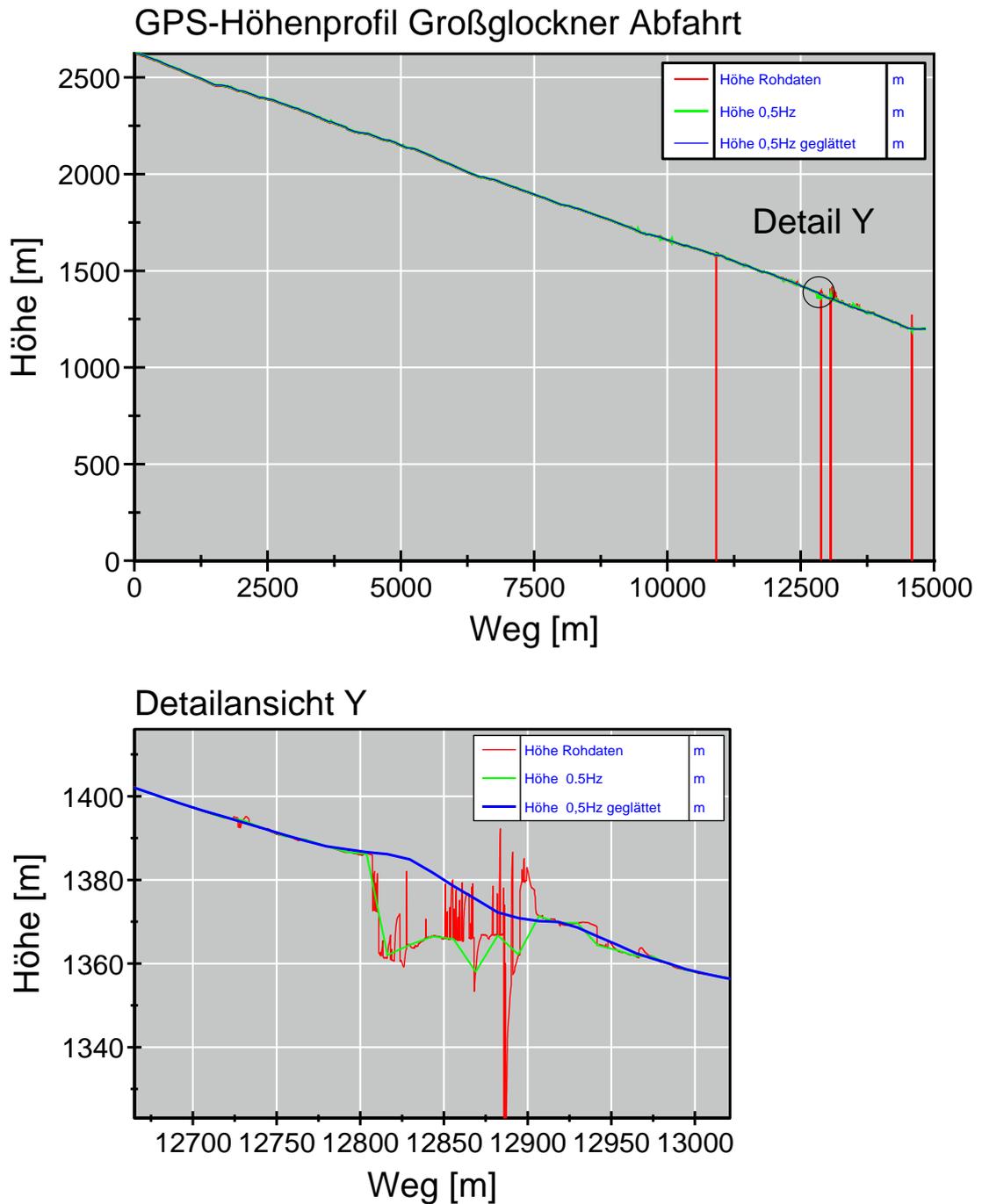


Abbildung 3.8: GPS-Höhenprofile Gegenüberstellung Rohdaten/bearbeitete Daten

Das fertig bearbeitete Höhenprofil kann anschließend für die Prüfstandsoftware aufbereitet werden. Die Datenpunkte für den Weg können übernommen werden. Die Höhe bzw. die Höhendifferenz ΔH zwischen zwei Datenpunkten (siehe Abbildung 3.9) muss in die Steigung p_{VG} der Verbindungsgeraden umgerechnet werden, wie in Gleichung (3.2) gezeigt.

$$p_{VG} = \frac{\Delta H}{\Delta X} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.2)$$

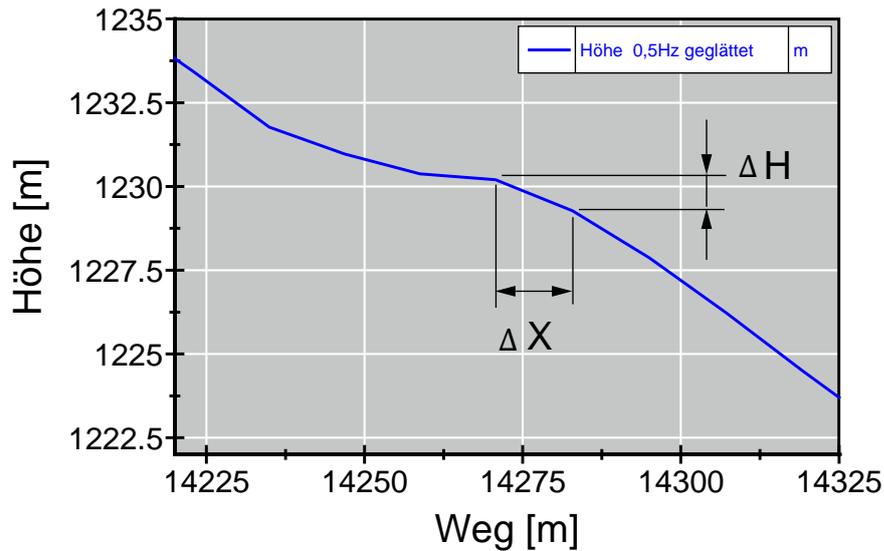


Abbildung 3.9: Steigung der Verbindungsgeraden zweier Datenpunkte

Um dem Fahrer eine gewisse Rückmeldung zu geben wird das Höhenprofil bzw. dessen Steigung visualisiert. Mithilfe dieser Information ist es möglich bereits im Vorhinein auf gewisse Änderungen in der Strecke zu reagieren. Zusätzlich werden noch schriftliche Informationen zu sogenannten *points of interest* (POI) angezeigt. In Abbildung 3.10 ist ein Ausschnitt des Höhenprofils am Fahrerleitsystem, aus Sicht des Fahrers, zu sehen. Der Cursor (3) markiert die momentane Geschwindigkeit und die Kurve (1) zeigt den Verlauf der Steigung bzw. des Gefälles an. Um die Geschwindigkeit besser regeln zu können ist die Sollgeschwindigkeit mit einem Toleranzband (2) von +/- 1 km/h hinterlegt. Die POI (4) sind markante Wegpunkte entlang des Streckenverlaufs der GHS und dienen der exakten Kontrolle von Durchschnittsgeschwindigkeit bzw. Fahrzeit. Neben den POI werden dem Fahrer Flachstellen, mit einer Steigung $p > -2\%$, angezeigt. Die Information wird immer 50 m vor Beginn der Flachstelle angezeigt und beinhaltet Informationen über die Länge des bevorstehenden Flachstücks. Am rechten Rand des Fahrerleitsystems (5) ist der gesamte Strecken- bzw. Steigungsverlauf des Testlaufs im Überblick zu sehen. Sind all diese Vorbereitungen getroffen kann der Versuch am Prüfstand starten.

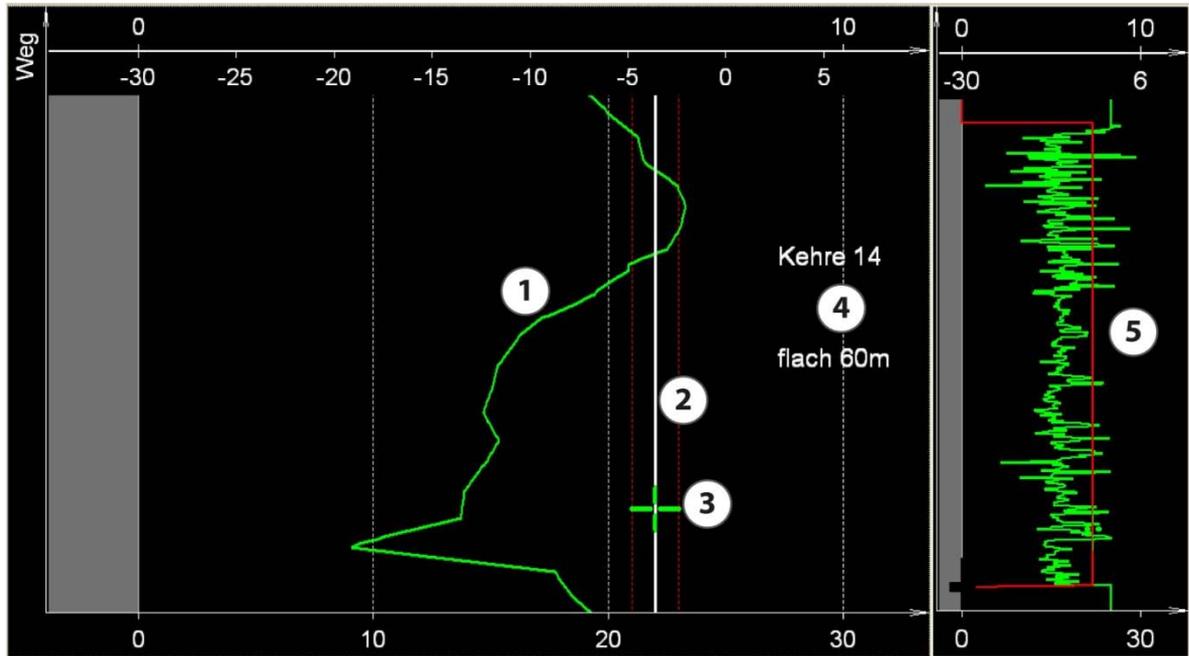


Abbildung 3.10: Fahrerleitsystem mit Zusatzinformationen

3.4 Messtechnik

Jede objektive Beurteilung eines Prozesses bedingt einer Grundlage aufgrund derer der betrachtete Vorgang überhaupt objektiviert werden kann. Im Falle der Bremsprüfung ist dies eine fahrzeugfeste Messtechnik mit bremspezifischen Messgrößen und den dazu gehörigen Messsensoren.

3.4.1 Messsystem

Im Automobil haben sich Datenbusse als Kommunikationsmittel durchgesetzt. Besonders viele Anwendungen kommunizieren mittels CAN-Bus. Durch geeignete Schnittstellen lassen sich diese kommunizierten Informationen auch leicht abfragen. Es liegt nahe eine Messtechnik einzusetzen die ebenfalls auf den System der CAN-Kommunikation basiert. Da Messsignale in der Regel analog, und nicht im digitalen CAN-Format, vorliegen werden diese in entsprechenden analog/digital CAN-Wandlern umgesetzt. Der schematische Aufbau der, für die Durchführung der Bremsmessungen verwendeten, Messtechnik ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

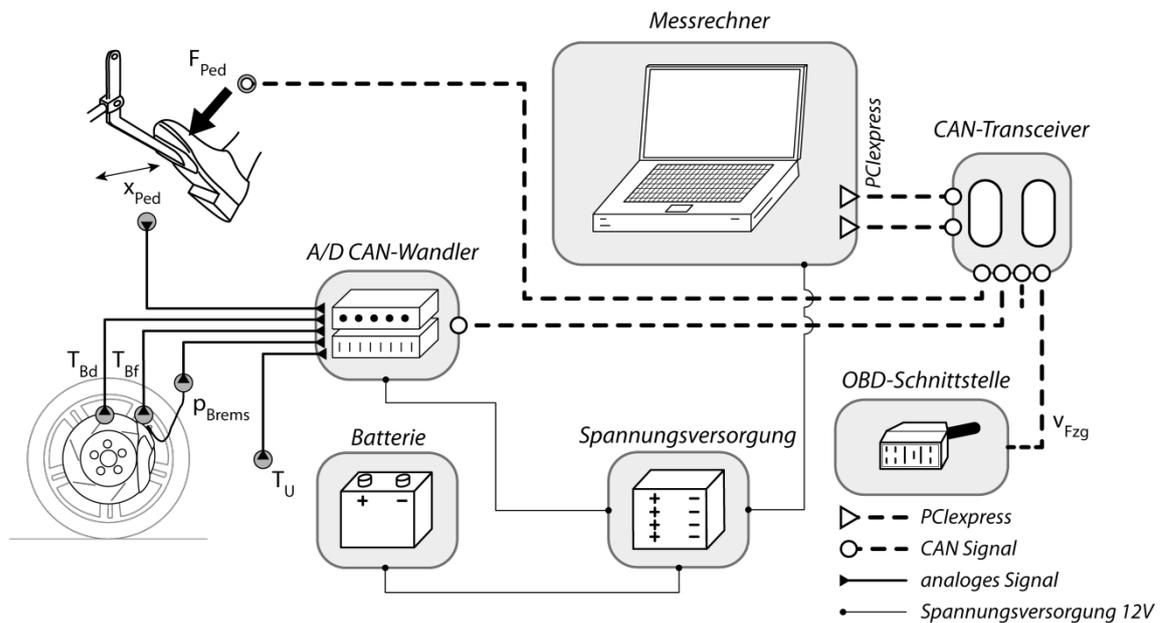


Abbildung 3.11: Schematischer Aufbau der Bremsmesstechnik

Sind alle Messdaten als CAN-Signal vorhanden werden diese mittels zwei CAN-Transceivern gebündelt und über eine PCIexpress Steckkarte in den Messrechner übertragen. Da es sich um digitale Messsignale handelt werden diese nur zu diskreten Zeiten abgetastet. Schnelle Messgrößen wie Geschwindigkeit, Druck oder Pedalkraft werden mit 100 Hz abgetastet.

Temperatursignale, deren Eigenschaft es ist sich langsam zu ändern, werden mit 10 Hz abgetastet. Die unterschiedlich schnellen Messsignale müssen durch die Messsoftware zeitsynchron zusammengeführt werden. Neben der Verarbeitung der Daten ist die Speicherung und Visualisierung Hauptaufgabe der Software. Für diese Aufgaben wird das System DIADEM von National Instruments [20] verwendet. Der Abgleich bzw. die Kalibrierung der verwendeten Sensoren muss ebenfalls in der Messsoftware vorgenommen werden. Die Kalibrierung ist vor jeder Messreihe durchzuführen um ein genaues Messergebnis zu gewährleisten. Aus Abbildung 3.12 ist der tatsächliche Aufbau des Messsystems im Fahrzeug ersichtlich. Aufgrund der hohen Kräfte welche bei Bremsmanövern auftreten muss auf einen festen und sicheren Sitz aller, im Fahrzeug befindlichen, Messtechnik oder sonstiger Gegenstände geachtet werden.



Abbildung 3.12: Verbautes Messsystem im Fahrzeug

3.4.2 Messstellen und Messgrößen

Um eine Aussage über die thermische Leistungsfähigkeit einer Bremse tätigen zu können sind maßgeblich die Temperaturen von Bauteilen und Flüssigkeiten der Bremsanlage von Bedeutung. Um zusätzliche Informationen über die Funktionsfähigkeit des Bremssystems zu erhalten werden noch Drücke, Geschwindigkeiten usw. aufgezeichnet. Aus Abbildung 3.13 sind alle Messstellen und in Tabelle 3.4 die dazugehörigen Messgrößen ersichtlich. Eine gesonderte und aufwendige Messung der Geschwindigkeit mittels GPS oder optischen Messsensoren entfällt am Prüfstand da keine Fahrzeugbewegungen in Längsrichtung auftreten. Das Signal für die gefahrene Geschwindigkeit wird mittels OBD-Schnittstelle aus dem fahrzeugeigenen CAN-Bus System entnommen.

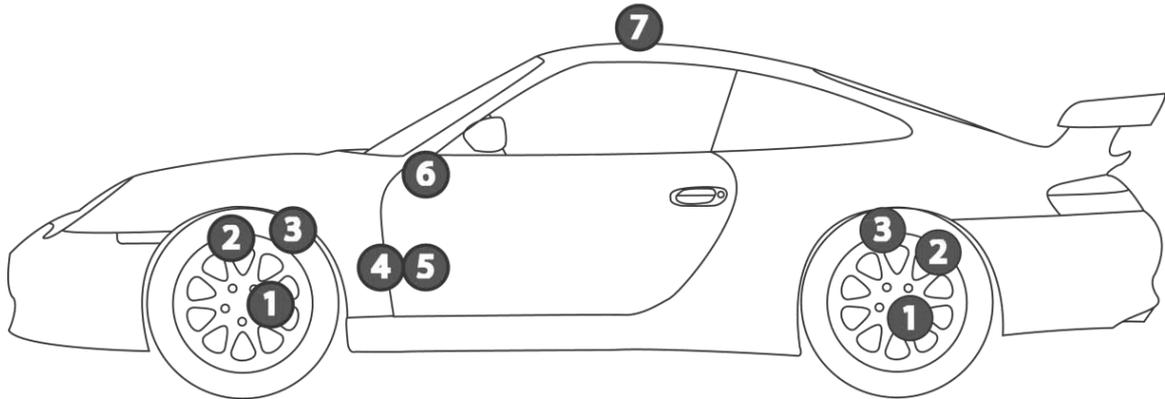


Abbildung 3.13: Messstellen am Fahrzeug

Tabelle 3.4: Messstellen und zugehörige Messgrößen

Nr.	Messgröße	Messstelle	Einheit	Name	Bereich	Anzahl	Sensor	Signalart
①	Bremsscheibentemperatur	Bremsscheibe	°C	T_{Bd}	0 bis 1000	4	Thermoelement Typ-K	analog
②	Bremsfluidtemperatur	Bremsfluid	°C	T_{Bf}	0 bis 250	4	Thermoelement Typ-K	analog
③	Bremssdruck	Bremsleitung	bar	p_{Brem}	0 bis 200	4	Drucksensor	analog
④	Pedalkraft	Bremspedal	N	F_{Ped}	0 bis 2000	1	Kraftmessdose	digital CAN
⑤	Pedalweg	Bremspedal	mm	x_{Ped}	0 bis	1	Seilwegpotentiometer	analog
⑥	Geschwindigkeit	Rad	km/h	v_{Fzg}	0-200	1	Fahrzeug CAN	digital CAN
⑦	Umgebungstemperatur	Fahrzeugdach	°C	T_U	-30 bis 40	1	Thermoelement Typ-K	analog

Um die Temperatur der Bremsscheiben messen zu können, ist an jedem Rad ein Schleifringüberträger verbaut. Diese Übertragungseinrichtung ist drehbar gelagert und ist in der Lage maximal zwei Analogsignale mittels schleifendem Kontakt zu übertragen. Der Schleifringüberträger wird mittig am Rad durch Spannzangen an den Radmuttern fixiert. In Abbildung 5.27 ist der ordnungsgemäß montierte Schleifringüberträger am linken Vorderrad zu sehen. Der Pedalweg wird mit einem Seilwegpotentiometer ermittelt, die zugehörige Pedalkraft mittels einer Kraftmessdose mit CAN-Ausgangssignal.

4 Prüfstandsversuche

Im folgenden Kapitel werden die Durchführung und die Abläufe der verschiedenen Versuche näher erläutert. Es sind dies die Simulation der Großglockner-Hochalpenstraße und die Beurteilung der Strömungssituation am Prüfstand unter Versuchsbedingungen. Diese Ausführungen bilden die Grundlage für nachfolgende Kapitel.

4.1 Simulation der Bergabfahrt

Hauptsächliches Ziel dieser Arbeit ist es, den Erprobungsablauf und die Rahmenbedingungen einer Bremserprobung zur Messung der thermischen Leistungsfähigkeit in einer möglichst realen Umgebung zu simulieren. Grundsätzlich soll mit diesen Erkenntnissen jedes beliebige Testareal bzw. ein für diese Art der Erprobung erforderliche Passstraße nachgebildet werden. Da die Gewinnung solcher Erkenntnisse mit einem dementsprechenden zeitlichen Aufwand verbunden ist, müssen die Ergebnisse eine gewisse Allgemeingültigkeit aufweisen. Es ist daher nötig, eine reale Umgebung, welche für Erprobungsfahrten verwendet wird, als Basis zu definieren. In diesem Fall dient die Großglockner-Hochalpenstraße als Grundlage. Einerseits aufgrund der, in ausreichendem Umfang, vorhandenen Messdaten aus Realerprobungen und andererseits wegen der Vorteile für nachfolgende Projekte in der Entwicklungsphase.

4.1.1 Versuchsdurchführung

Erster Schritt vor Beginn jeder Versuchsdurchführung ist die Kontrolle des Messsystems. Es müssen alle erforderlichen Messkanäle ein plausibles Signal liefern. Ebenso ist es von höchster Wichtigkeit das Messsystem vor der eigentlichen Messung zu kalibrieren. Vor dem Start müssen alle Temperaturen der Scheiben sowie der Flüssigkeit unter 30°C liegen.

Sind alle Vorbereitungen am Prüfstand sowie am Fahrzeug abgeschlossen kann mit der Durchführung des eigentlichen Versuchs bzw. der Messung begonnen werden. Nachdem das Prüfstandsprogramm, d.h. der generierte Höhenverlauf, geladen ist kann dieses von der Prüfstandswarte aus gestartet werden. Nach erfolgtem Start befindet sich das Programm noch in Wartestellung. Der endgültige Auslöser für den Start kommt von Fahrer des Versuchsfahrzeugs nachdem eine erste Standbremsmessung mit einem Bremsdruck von mindestens 160 bar durchgeführt wurde. Für den Start werden die Räder des Fahrzeugs bzw. die Rollen des Prüfstands durch die Kraft des fahrzeugeigenen Verbrennungsmotors auf 22 km/h beschleunigt. Dies geschieht bei Fahrzeugen mit manuellem Getriebe im ersten Gang, bei Fahrzeugen mit Automatikgetrieben in Fahrtstellung D. Nach Erreichen der erforderlichen Geschwindigkeit von 22 km/h wird das Getriebe in den Leergang bzw. Neutralstellung N

geschaltet. Der Motor des Fahrzeugs bleibt während der gesamten Messung in Betrieb. Das selbstständige Anfahren durch den Fahrer ist nötig, da es durch die Regelung des Prüfstands nicht möglich ist, automatisch geregelt aus dem Stillstand hochzufahren. Manuelles Hochfahren des Prüfstands stellt kein Problem dar, ist jedoch für die geforderte Automatisierung des Versuchsablaufes nicht geeignet. Der Prüfstand verarbeitet nun die ihm zur Verfügung stehenden Daten zum momentanen Gefälle und wandelt diese in ein Antriebsmoment der Rollen um. Die geforderte Geschwindigkeit von 22 km/h wird während des gesamten Versuchs nur mit der Betriebsbremse gehalten. Nach Ablauf der 40 minütigen Abfahrtssimulation wird die Geschwindigkeit auf 0 km/h reduziert und eine Standbremsmessung durchgeführt. Anschließend wird das Fahrzeug bei laufendem Motor von der vorderen Fixierung abgehängt und Hitzebleche (siehe Abbildung 4.1) im Bereich der vorderen Räder und des Kühlergrills aufgestellt. Diese Maßnahme verhindert einen kühlenden Einfluss von Luftströmungen auf die Temperatur der Bremsanlage. In der 15 minütigen Nachheizphase werden noch zwei weitere Standbremsmessungen durchgeführt. Eine Messung nach 7 Minuten und eine letzte nach 12 bzw. falls die Temperatur der Bremsflüssigkeiten das Maximum noch nicht erreicht hat nach 15 Minuten. Die Gesamtdauer einer Großglockner Bergabfahrts-Simulation am Prüfstand beträgt mit Rüstzeiten mindestens 1,5 Stunden.



Abbildung 4.1: Fahrzeug mit Hitzeblechen in Nachheizphase

anschließender Auswertung und einer vergleichenden Bewertung mit den Referenzwerten. Die iterative Schleife wird demnach so lange durchlaufen, bis sich ein zufriedenstellendes Ergebnis abbildet und damit allgemein gültige Parameter für reproduzierbare Messungen am Prüfstand vorliegen.

4.2 Bewertung der Strömung des Fahrtwindgebläses

Um die Eignung des Prüfstands für Bremserproben beurteilen zu können, ist es von Nöten die Strömungssituation unter Versuchsbedingungen zu dokumentieren. Gerade für die Bewertung der thermischen Leistungsfähigkeit ist eine möglichst reale Strömung im Bereich der Radbremsen enorm wichtig. Da die Bremsenkühlung überwiegend konvektiv passiert, ist die Abfuhr der erzeugten Wärme und somit die Bremsentemperaturen maßgeblich von der Strömung an der Radbremse abhängig. Ein erheblicher Unterschied zum Versuch unter realen Bedingungen ist der Boden. Aufgrund der konstruktiven Ausführung des Prüfstands steht dieser, im Gegensatz zur Straße, still. Durch den Umstand der fehlenden Relativbewegung zwischen Fahrzeug und Untergrund, kann es zu einer unterschiedlichen Ausbildung der Strömung bzw. des Geschwindigkeitsverlaufs am Unterboden kommen. Laut einer Untersuchung [21] ist dieser Unterschied jedoch für die Strömungsverhältnisse im Bereich der Bremsen nicht von Relevanz. Von größerer Bedeutung wiederum ist die Qualität der Grundströmung. Das Fahrtwindgebläse am Prüfstand verfügt über eine rotierende Walze mit radial angeordneten Schaufeln. Bedingt durch diesen konstruktiven Aufbau besitzt die Grundströmung bereits eine gewisse Turbulenz welche die Strömung um die Bauteile der Bremsanlage beeinflussen kann. Ob und wie weit diese Fakten einen Einfluss auf die erzielten Ergebnisse haben wird mittels Strömungsuntersuchungen beurteilt.

4.2.1 Strömungsvisualisierung

Als Methode zur qualitativen Bewertung der Strömungseigenschaften wurde die Strömungsvisualisierung mittels Rauchlanze gewählt. Dieses Verfahren benötigt keine langen Vorbereitungszeiten und zeichnet sich durch seine Einfachheit aus. In Kapitel 2.4.5 Strömungsmesstechnik sind die grundlegenden Eigenschaften dieses Verfahrens beschrieben. Von Interesse bei diesem Versuch ist die Qualität der Grundströmung und die Zuströmung zu den Radbremsen ganz besonders der Vorderradbremse. Als Instrument zur Sichtbarmachung der sich ausbildenden Strömung dient die Nebelsonde *NS2* der Firma *SAFEX* (siehe Abbildung 4.4). Durch die lange Versorgungsleitung der Sonde lassen sich alle Messstellen auf beiden Seiten des Fahrzeugs ohne zusätzliches Umrüsten leicht erreichen. Als Grundlage der

Strömungsbeurteilungen wird die Geschwindigkeit der Strömung am Fahrtwindgebläse für alle Untersuchungen auf 22 km/h eingestellt. Das zur Fahrtwindgenerierung verwendete Gebläse ist ein Radialgebläse (siehe Abbildung 4.3), mit liegender Drehachse. Das Gebläse ist in seiner Höhe (z-Achse) und die Austrittsdüse in der Länge (x-Achse) beweglich. Da der Austrittsquerschnitt des Gebläses nur eine Breite von 1600 mm aufweist, muss auf die seitliche Umströmung um des Fahrzeugs besonderes Augenmerk gelegt werden.



Abbildung 4.3: Fahrtwindgebläse

Bei den detaillierten Messungen wird zwischen zwei Varianten unterschieden. Einerseits wird die Messung bei stillstehendem Rad, andererseits bei rotierendem Rad durchgeführt. Bei stehendem Rad kann mit der Nebelsonde ganz nahe am Rad und in der Felgenschüssel hantiert werden. Dadurch können prinzipielle Aussagen über die Aerodynamik der Leiteinrichtungen, wie der Innenverkleidung des Radlaufs (Radschale), Ausführung des vorderen Kotflügels (Fender) usw., getroffen werden. Bei bewegtem Rad wird eine zusätzliche Strömung durch die Rotation des Rades bzw. der Felge erzeugt. Aus Sicherheitsgründen ist es hier nicht möglich die Sonde Nahe am Rad zu platzieren. Durch diesen Umstand ist es nur möglich, einen größeren Bereich der Strömung zu untersuchen.

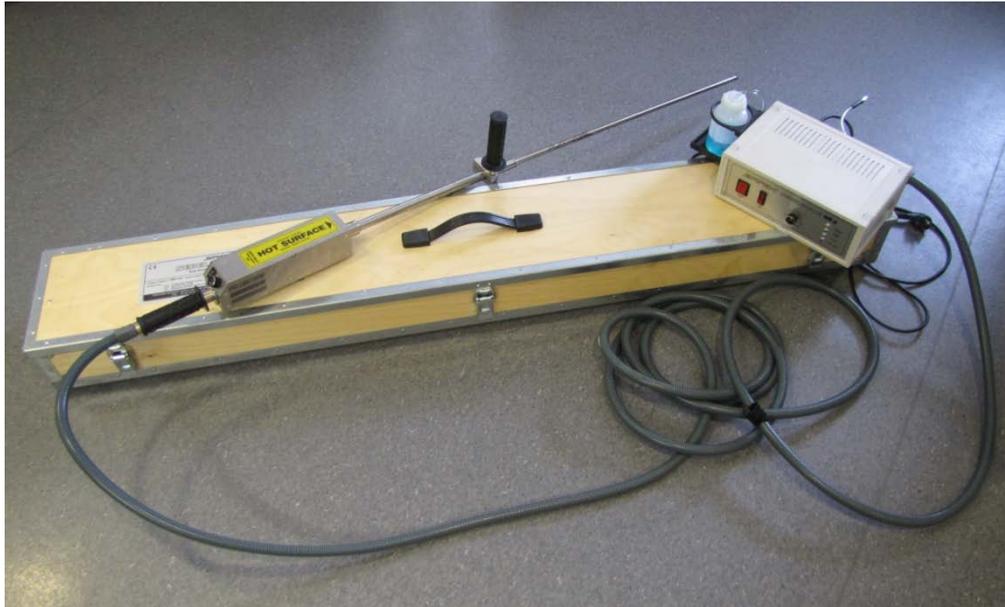


Abbildung 4.4: SAFEX Nebelsonde NS2

Zu Beginn der Strömungsmessungen werden die verbauten Maßnahmen zur Kühlung der vorderen Radbremsen untersucht. Für diese Messungen stehen alle Räder still. Die Austrittsdüse der Nebelsonde wird vom Bereich vor der Stoßstange langsam zum Fahrzeug hin, in einem Abstand von ca. 100mm vom Boden, unter das Fahrzeug bewegt. Ebenfalls mit stehenden Rädern wird die Saugwirkung durch die Felgen betrachtet. Durch die seitlich am Fahrzeug bzw. an den Rädern vorbei strömende Luft entsteht im Bereich der Räder und des Radkastens ein Unterdruck. Dieser Sog ist wichtig für das Abströmen der, von den Bremsen, erwärmten Luft.

Der zweite Teil der Strömungsbeurteilungen findet mit rotierenden Rädern statt. Bei diesen Untersuchungen liegt das Hauptaugenmerk auf dem Gesamtbild der Strömung, d.h. wie verhält sich die Fahrtwindströmung im Beisein eines Hindernisses, dem Fahrzeug und der durch die Raddrehung entstehenden Strömung im Bereich der Felgen. Am Wichtigsten ist, dass der gesamte Volumenstrom vorhanden bleibt und sich sauber um das Fahrzeug legt. Es wird demnach genau darauf geachtet, ob es Teilströmungen gibt, welche vorzeitig in die Umgebung abweichen. Um die Grundströmung in gewissem Maße zu lenken, können Leiteinrichtungen eingesetzt werden. Die Auslegung einer sauberen und stetigen Grundströmung ist das primäre Ziel der Strömungsuntersuchungen.

4.3 Auswertung der Messdaten

Um eine Aussage über Qualität und Quantität der erhaltenen Messdaten treffen zu können, ist es hilfreich Standards zu definieren, nach welchen diese Daten ausgewertet werden. Einige Methoden zur Auswertung von Bremsproben sind international standardisiert, wobei es zwischen den jeweiligen OEMs meist kleine Unterschiede gibt. Für andere Zwecke, welche speziell diese Arbeit betreffen, werden eigene Auswertemethoden und spezifische Kennwerte definiert. Diese sind genau auf die jeweilige Problemstellung zugeschnitten und geben somit einen genauen Überblick über den Sachverhalt. Ebenso dienen sie als Indikatoren für den Fortschritt und die Qualität der Arbeit.

4.3.1 Bergabfahrtsdiagramm

Das in Abbildung 4.5 dargestellte Bergabfahrtsdiagramm ist ein von vielen OEMs, verwendeter und anerkannter Standard zur Darstellung von Bergabfahrten wie z.B. vom Großglockner oder Stilfser Joch. Dieses Auswertungsblatt enthält eine Vielzahl von Grundinformationen (1). Die Messdaten sind zusätzlich in die Abfahrts- und Nachheizphase aufgeteilt. Des Weiteren werden auch Standbremsmessungen (4) dargestellt. Wichtigste Messgrößen sind die Temperaturen der Brems Scheiben und der Bremsflüssigkeit in den jeweiligen Bremsnippeln. Die Daten geben Auskunft über die Leistungsfähigkeit der Bremse und werden deshalb über die gesamte Dauer der Messung dargestellt und bilden das Hauptfenster (2) des Auswertblattes. Neben der gefahrenen Geschwindigkeit wird die, auf das Fahrzeug wirkende, Verzögerung dargestellt. Ebenso wird der Verlauf des gemittelten Bremsdrucks beider Bremskreise und des dazugehörigen Pedalwegs dargestellt (5). Diese Messgrößen zeigen die Funktionstüchtigkeit der Bremsanlage an und geben, mit gewissen Einschränkungen, Auskunft über den Zustand der Bremsbeläge. Ein Kriterium, welches immer erfüllt werden muss, ist das Erreichen des vorgegebenen Mindestdrucks in den Standbremsmessungen, welcher vom jeweiligen OEM abhängt. Um das Erfüllen dieser Voraussetzung sichtbar zu machen, werden die Standmessungen in einem separaten Diagramm dargestellt. Neben all den zeitlichen Verläufen der Messgrößen über die Versuchsdauer sind zum Zweck der schnellen Übersicht die wichtigsten Kenngrößen mit deren Zahlenwerten aufgeführt (6). Dies sind die Maximaltemperaturen und Temperaturspreizungen zwischen links und rechts, die Mittelwerte von Pedalweg, Bremsdruck und Geschwindigkeit, die Abfahrtsdauer und die Anzahl der Einzelbremsungen. Die vier verschiedenfarbigen Marker (7) auf der Zeitachse (bei Beginn der Messung und bei Beginn, sieben und 15 Minuten in der Nachheizphase) zeigen jeweils die Zeitpunkte der Standbremsmessungen an.

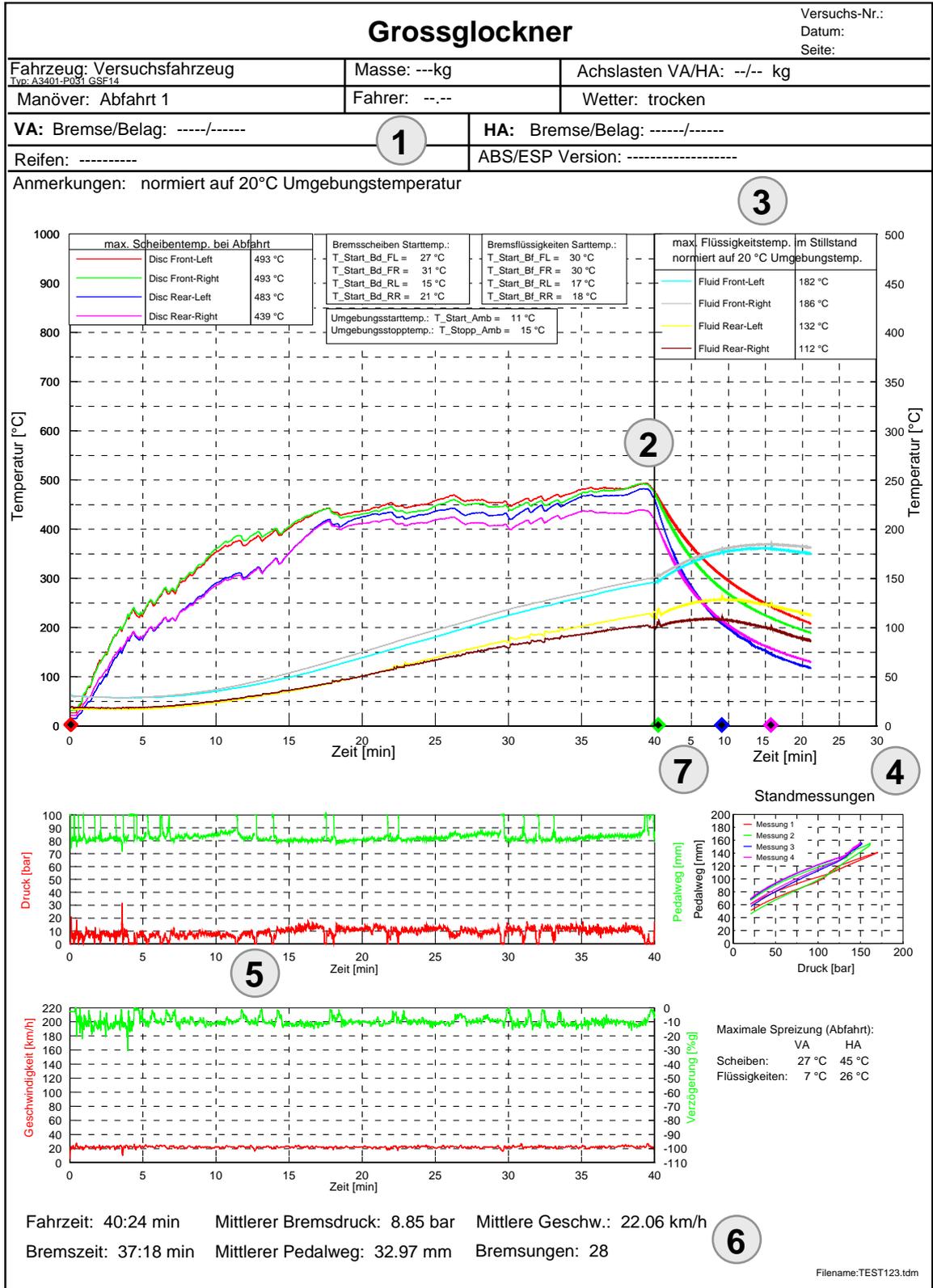


Abbildung 4.5: Bergabfahrtsdiagramm

Die in Abbildung 4.5 unter Nummer (3) dargestellten Bremsflüssigkeitstemperaturen sind auf 20°C Umgebungstemperatur normiert. Diese Normierung auf 20°C gleicht den Unterschied von der tatsächlich herrschenden Umgebungstemperatur auf 20°C aus.

Der Ausgleich passiert durch einen zusätzlichen Temperaturoffset T_{Off} auf die Maximaltemperatur der jeweiligen Bremsflüssigkeitsmessstelle. Der Offset ist durch die Formel

$$T_{Off} = 20 - \frac{T_{U,Start} + T_{U,Ende}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (4.1)$$

definiert. Der Wert 20 steht hier für die normierte Umgebungstemperatur von 20°C. Von diesem Wert wird der arithmetische Mittelwert aus den Umgebungstemperaturen am Beginn $T_{U,Start}$ und am Ende $T_{U,Ende}$ der Messung am Großglockner subtrahiert. Der berechnete Offset beinhaltet gewisse Ungenauigkeiten, da lediglich eine mittlere Temperaturdifferenz zur gemessenen Temperatur $T_{M,max}$ addiert wird, siehe Gleichung (4.2), und auf die physikalischen Hintergründe der Konvektion bzw. Wärmeleitung keine Rücksicht genommen wird.

$$T_{norm,20^{\circ}C} = T_{M,max} + T_{Off} \quad [^{\circ}C] \quad (4.2)$$

Dieses Vorgehen wird jedoch aufgrund seiner Einfachheit in der Praxis von vielen OEMs angewandt und gilt als ausreichend genaue Näherung für den Umgebungstemperatureinfluss.

4.3.2 Bremsenergie und Bremsleistung

Sehr gute Aussagen über die Vergleichbarkeit von Prüfstand und Realabfahrt liefert eine Energiebilanz. Primärer Energieinhalt des Fahrzeugs ist dessen potentielle Energie am Start der Abfahrt. Diese potentielle Energie wird am Beginn des Versuchs in kinetische Energie umgewandelt. Da bei dieser Erprobung die Geschwindigkeit annähernd konstant gehalten wird, handelt es sich um eine Beharrungsbremung welche die kinetische Energie in Wärme umwandelt. Abhängig von den Systemgrenzen ist noch eine Verlustarbeit durch Fahrwiderstände zu berücksichtigen. Geht man von ein und demselben geografischen Höhenprofil im Realversuch und im simulierten Prüfstandsversuch aus, so müssen die vollbrachten Bremsarbeiten ident sein. Mithilfe der berechneten Bremsenergien können die Parameter des Prüfstands bzw. dessen Regelung auf ihre Richtigkeit überprüft werden.

Als Grundlage dienen die Referenzmessungen am Großglockner. Durch die vorhandenen Messdaten lässt sich eine Gesamtbremsarbeit $A_{B,Ref,ges}$ inkl. der Arbeit des gesamten Fahrwiderstands $F_{W,Ref}$ berechnen. Die Gesamtverzögerungskraft $F_{B,Ref,ges}$ kann mittels dem gemessenen Hangabtriebsanteil der Erdbeschleunigung a_{Ref} und der Fahrzeugmasse m_{Fzg} berechnet werden.

$$F_{B,Ref,ges} = m_{Fzg} \cdot a_{Ref} \quad [N] \quad (4.3)$$

Die gesamte Bremsarbeit berechnet sich dann mit der Abfahrtsstrecke s wie folgt:

$$A_{B,Ref,ges} = F_{B,Ref,ges} \cdot s \quad [J] \quad (4.4)$$

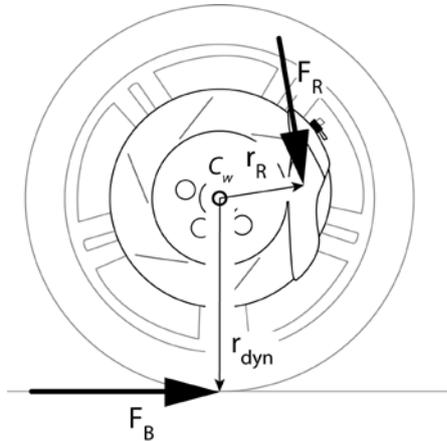


Abbildung 4.6: Kräfte am gebremsten Rad

Der Wert der gesamten Bremsarbeit der Realmessung dient als Referenzwert. Da bei den Messungen am Prüfstand keine Messdaten über die Verzögerung vorliegen, muss hier ein anderer Weg gefunden werden um die Arbeit zu berechnen. Die Gesamtarbeit $A_{B,Pruef,ges}$ muss zuerst in zwei Teile, welche separat berechenbar sind, zerlegt werden. Das ist zum einen die reine von den Bremsen geleistete Arbeit $A_{B,Pruef}$ und zum anderen der Widerstandsarbeit $A_{W,Pruef}$. Aus Abbildung 4.6 ist die Kräftesituation am gebremsten Rad ersichtlich. Durch das Coulomb'sche Reibungsgesetz setzt sich die Reibkraft an der Bremsscheibe folgendermaßen zusammen.

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad [N] \quad (4.5)$$

Die Normalkraft F_N , welche senkrecht auf die Scheibenoberfläche wirkt, ergibt sich durch die hydraulischen Gesetze der Bremsanlage wobei N für die die Anzahl der Kolben, A_{Kolben} für deren Wirkfläche und p_B für den wirkenden Bremsdruck steht.

$$F_N = p_B \cdot A_{Kolben} \cdot N \quad [N] \quad (4.6)$$

Diese Gleichungen führen zu

$$F_R = 2 \cdot \mu \cdot p_B \cdot A_{Kolben} \cdot N \quad [N] \quad (4.7)$$

wobei die Normalkraft F_N , aufgrund von zwei Reibflächen, doppelt gerechnet wird. Durch ein Momentengleichgewicht um den Radmittelpunkt C_W erhält man die Bremskraft F_B .

$$F_B = F_R \cdot \frac{r_R}{r_{dyn}} \quad [N] \quad (4.8)$$

Die Bremskraft ist maßgeblich durch das Verhältnis von mittlerem Reibradius r_R der Bremsscheibe bzw. Bremstrommel zu dynamischem Reifenradius r_{dyn} , dem Abstand vom Radmittelpunkt zum Momentanpol des drehenden Rades, bestimmt.

Diese Berechnungen beziehen sich jeweils nur auf ein Rad und müssen achsweise mit den jeweiligen Werten für Vorder- und Hinterachse zu $F_{B,A,vo}$ und $F_{B,A,hi}$ berechnet werden.

$$F_{B,Pruef} = F_{B,A,vo} + F_{B,A,hi} \quad [N] \quad (4.9)$$

Die reine Bremsarbeit $A_{B,Pruef}$ berechnet sich anschließend zu

$$A_{B,Pruef} = F_{B,Pruef} \cdot s \quad [J] \quad (4.10)$$

Der zweite Teil, die Widerstandsarbeit $A_{W,Pruef}$, wird durch die fahrzeugspezifischen Werte A , B , und C , welche für den statischen, den linearen und den quadratischen Fahrwiderstand stehen und üblicherweise aus Versuchen ermittelt werden, zusammen. Die einzelnen Koeffizienten setzen sich wie folgt zusammen.

$$A = m_{Fzg} \cdot g \cdot R_A \quad [N] \quad (4.11)$$

$$B = \frac{m_{Fzg} \cdot g \cdot R_B}{3,6} \quad \left[\frac{N \cdot km}{h} \right] \quad (4.12)$$

$$C = \frac{0,5 \cdot \rho \cdot c_w \cdot A + m_{Fzg} \cdot g \cdot R_C}{12,96} \quad \left[\frac{N \cdot km^2}{h^2} \right] \quad (4.13)$$

Die Werte R_A , R_B und R_C stehen jeweils für den statischen, den linearen und den quadratischen Widerstandsbeiwert. Des weiteren finden sich in diesen Formeln die Masse des Fahrzeugs m_{Fzg} , die Erdbeschleunigung g , die Dichte der Luft ρ , die Stirnfläche des Fahrzeugs A und der Luftwiderstandsbeiwert c_w . Mit Hilfe dieser Koeffizienten lässt sich die Ausrollkurve d.h. der zeitliche Geschwindigkeitsverlauf bei Ausrollen des Fahrzeugs aus einer Anfangsgeschwindigkeit annähernd nachbilden. Die somit durch den Prüfstand simulierte Widerstandskraft $F_{W,Pruef}$ als Polynomansatz berechnen.

$$F_{W,Pruef} = A + B \cdot v + C \cdot v^2 \quad [N] \quad (4.14)$$

$$A_{W,Pruef} = F_{W,Pruef} \cdot s \quad [J] \quad (4.15)$$

Die Gleichungen (4.14) und (4.15) stehen folglich für die, durch die Widerstandskraft verrichtete Arbeit. Die Geschwindigkeit v des Fahrzeugs ist hier in km/h einzusetzen.

Die gesamte Arbeit am Prüfstand setzt sich abschließen zu

$$A_{B,Pruef,ges} = A_{B,Pruef} + A_{W,Pruef} \quad [J] \quad (4.16)$$

zusammen. Vergleich man nun die am Großglockner verrichtete Arbeit $A_{B,Ref,ges}$, welche mit Hilfe der gemessenen Fahrzeuggesamtverzögerung a_{Ref} berechnet wurde, mit der aus Widerstandsarbeit und Bremsarbeit zusammengesetzten Arbeit $A_{B,Pruef,ges}$ so erhält man eine gute Aussage, ob die Basiseinstellungen am Prüfstand und der Prozess der Versuchsdurchführung am Prüfstand mit der Realabfahrt vergleichbar sind.

Die jeweiligen Leistungen setzen sich definitionsgemäß zu

$$P_i = \frac{A_i}{t_{ges}} \quad [W] \quad (4.17)$$

zusammen, wobei A_i für die jeweilige Arbeit und t_{ges} für die gesamte Dauer des Versuchs bzw. der Abfahrt steht

4.3.3 Allgemeine Bewertung der Messdaten

Um Messdaten bewerten zu können ist es nötig, gewisse Ziel- und Grenzwerte zu definieren. Diese Werte werden aus Referenzmessungen, welche als Ausgangsbasis dienen, erstellt.

Zielwerte sind definierte Zahlenwerte und beziehen sich auf zulässige Maximalwerte der jeweiligen Messgröße. Diese zulässigen Höchstwerte geben Auskunft über die Erfüllung von vorgegebenen technischen Anforderungen an die Anlage. Deshalb existieren Zielwerte für alle relevanten Messgrößen wie Temperatur, Druck, Geschwindigkeit, Pedalkraft und Pedalweg. Die Ziele der Prüfstandsmessungen werden aus Referenzmessungen übernommen, welche die realen Anforderungen für eine technische Freigabe einer Bremsanlage erfüllen.

Zusätzlich zu den Zielwerten werden speziell für die gemessenen Temperaturen Grenzwerte erstellt. Für die Generierung von Grenzwerten müssen mehrere verschiedene Einflüsse berücksichtigt werden. Die Grenzwerte bilden sich als Grenzwertband mit der Kontur des Referenzmittelwerts und der Breite B , siehe Gleichung (4.18), ab. Grundsätzlich bildet sich die Breite des Grenzwertbandes aus der Spreizung, d.h. aus dem Unterschied, der Referenzmessungen. Die, unter identischen Bedingungen durchgeführten, Referenzmessungen weisen bereits eine stochastische Spreizung S der Messwerte auf, wie z.B. die Temperatur der Bremsscheibe am linken Vorderrad (siehe Abbildung 4.7).

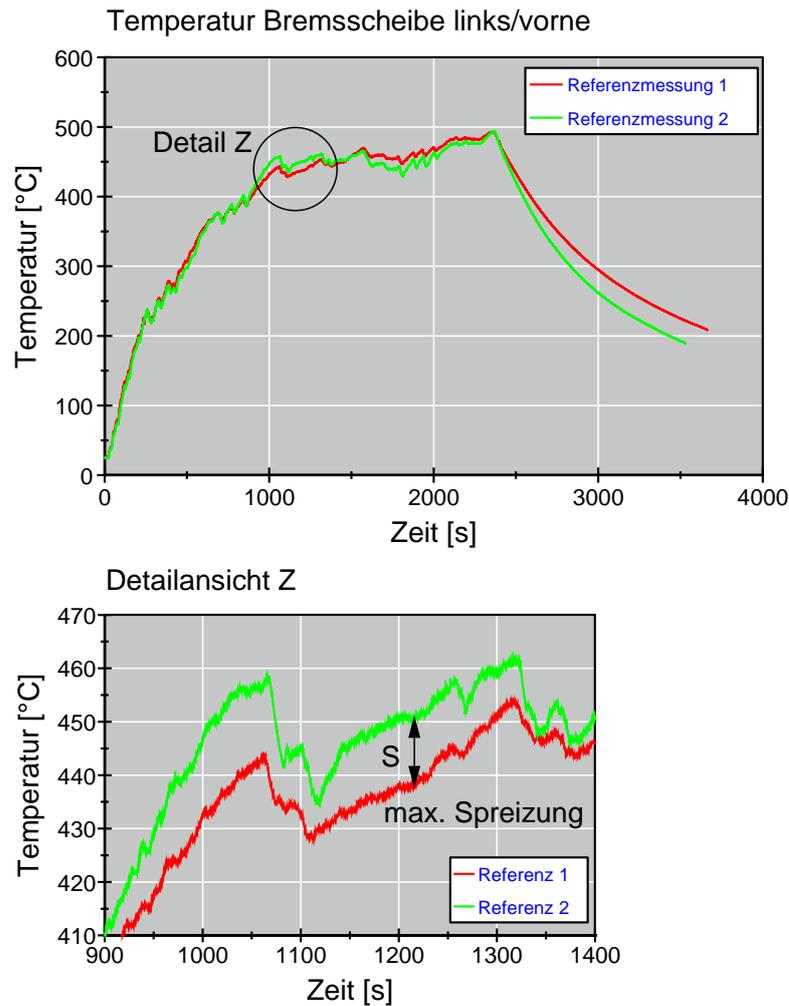


Abbildung 4.7: Temperaturspreizung S der Referenzmessungen

Die Größe dieser real auftretenden Spreizung ist somit für den Verlauf der Messgröße am Prüfstand ebenso vertretbar.

Die Umgebungsbedingungen, genauer die Umgebungstemperaturen, sind im Realversuch meist anders als am Prüfstand. Die Versuche am Prüfstand werden bei konditionierten 20°C Umgebungstemperatur durchgeführt welche deshalb als konstant angesehen werden kann. Aufgrund der in Abbildung 4.8 dargestellten, unterschiedlichen Umgebungstemperaturen, welche auf verschiedene Weise Einfluss auf die gemessenen Temperaturen haben, wird die Breite um einen zusätzlichen Umgebungsoffset U erweitert. Der Umgebungstemperaturoffset U wird nur bei gemessenen Temperaturen angewandt und ist für alle Temperaturgrenzwerte, im Gegensatz zur Spreizung, gleich.

$$B = S + U \quad (4.18)$$

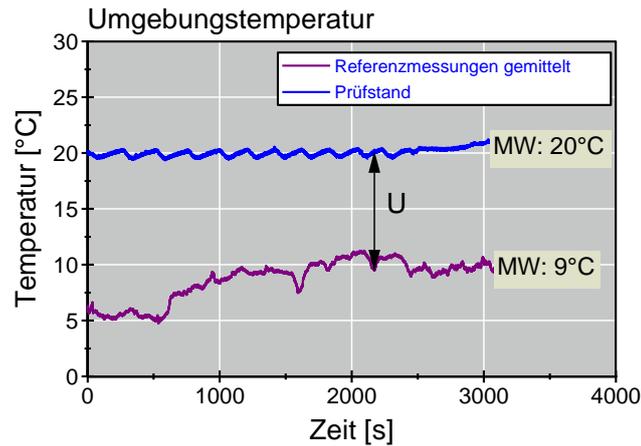


Abbildung 4.8: Differenz der Umgebungstemperaturen

Für jede Messgröße bzw. jede Messstelle gibt es ein spezifisches Grenzwertband. Grundlage für das Grenzwertband ist der jeweilige gemittelte Messwertverlauf aus den Referenzmessungen (siehe Abbildung 4.9). Der Wert der halben Spreizung $S/2$ dieser Messgröße wird einmal nach unten und einmal nach oben aufgetragen. Bedingt durch die höhere Umgebungstemperatur am Prüfstand wird bei Temperaturen der obere Grenzwert um den Umgebungsoffset U erweitert.

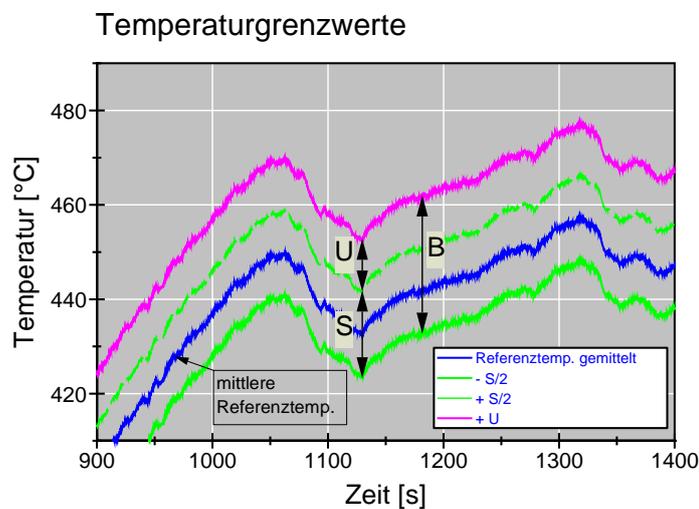


Abbildung 4.9: Gemittelte Referenztemperatur mit zugehörigen Grenzwerten

Mit Hilfe der Darstellung des Messgrößenverlaufs vom Prüfstand und dem Grenzwertband kann eine schnelle Beurteilung über das Erfüllen der geforderten Kriterien erfolgen. Das Grenzwertband wird nur für den Verlauf der Messgrößen während der Abfahrt verwendet. Für die Maximalwerte der gemessenen Daten gelten nach wie vor die Zielwerte aus den Referenzmessungen. Werden Grenzwertband und gemessener Verlauf übereinander gelegt kann sofort eine Aussage über die Qualität der Messung getroffen werden.

4.3.4 Korrelation der Messdaten

Als Werkzeug zur Beurteilung der Korrelation von Prüfstands- zu Realversuch dient der Differenzenverlauf (wie in Abbildung 4.10 dargestellt). Dieser Verlauf stellt die Differenz der jeweiligen Messgröße von zwei Messungen dar. Diese Differenz kann einerseits aus einer Prüfstandsmessung und einer Referenzmessung oder andererseits aus zwei Prüfstandsmessungen gebildet werden. Durch die Verwendung unterschiedlicher Messungen können verschiedene Aspekte betrachtet werden. Die Veranschaulichung der Vorgehensweise wird im Folgenden mit Temperaturen als allgemeine Messgröße durchgeführt. Die Differenztemperaturen $\Delta T_{Korr,i}$ zwischen Prüfstand $T_{Pruef,i}$ und Realversuch $T_{Ref,i}$ sind ein Maß für die Korrelation von Realversuch zu Simulation am Prüfstand und beschreiben den Fortschritt und die Richtigkeit der gewählten Prüfstandsparameter und Fahrzeugkonfigurationen.

$$\Delta T_{Korr,i} = T_{Pruef,i} - T_{Ref,i} \quad [K] \quad (4.19)$$

Im Idealfall ist die Differenz über den gesamten Verlauf $\Delta T_{korr,i} = 0$. Da jedoch am Prüfstand aus Sicherheitsgründen immer vom schlechteren Fall ausgegangen werden muss, ist es nicht von Nachteil, wenn die Temperaturdifferenz innerhalb der Grenzwerte

$$0 \leq \Delta T_{korr,i} \leq \Delta T_{Korr,OG,i} \quad [K] \quad (4.20)$$

liegt. $\Delta T_{Korr,OG,i}$ steht für hier die obere Grenztemperaturdifferenz und ist gleich der Grenzwertbandbreite B der jeweiligen Temperatur.

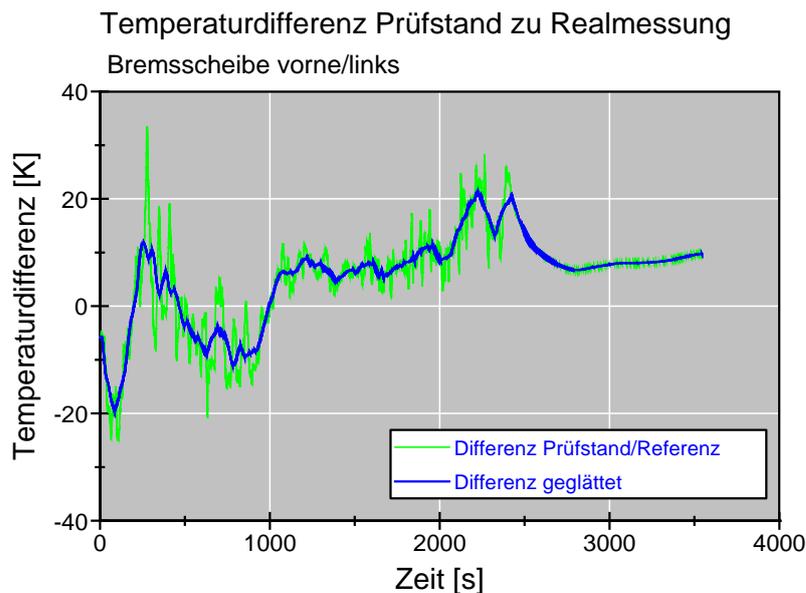


Abbildung 4.10: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Prüfstand und Realmessung

Falls es zu einem technischen Gebrechen oder einer Fehlfunktion aufgrund zu hoher Temperatur kommt, ist das Ausmaß der Folgen am Prüfstand sehr gering und führt zu keinen lebensbedrohlichen Situationen.

Durch die Bildung der Temperaturdifferenz $\Delta T_{Rep\ 21,i}$ zweier Messungen $T_{2,i}$ und $T_{1,i}$, welche am Prüfstand durchgeführt wurden, erhält man eine Aussage über deren Reproduzierbarkeit. Es wird jeweils die Differenz $\Delta T_{Rep\ 21,i}$ der Temperaturen der selben Messstelle i aus zwei Prüfstandsmessungen oder zwei Referenzmessungen gebildet.

$$\Delta T_{Rep\ 21,i} = T_{2,i} - T_{1,i} \quad [K] \quad (4.21)$$

Bei einer vollständigen Reproduzierbarkeit liegt der Wert der Temperaturdifferenz bei $\Delta T_{Rep\ 21,i} = 0$. Dieses Ergebnis würde durch zwei idente Messungen entstehen. Realistisch ist dieses Ergebnis jedoch nicht. Aus diesem Grund bewegt sich Die Temperaturdifferenz innerhalb von Grenzwerten um Null.

$$\Delta T_{Rep,UG,i} \leq \Delta T_{Rep\ 21,i} \leq \Delta T_{Rep,OG,i} \quad (4.22)$$

Die Höhe der unteren $\Delta T_{Rep,UG,i}$ und oberen Grenzwerte $\Delta T_{Rep,OG,i}$ beruht wieder auf den Erkenntnissen der Spreizung der Referenzmessungen, wie in Kapitel 4.3.3 genau beschrieben. Die untere Grenze liegt bei $-S/2$, die obere bei $+S/2$. Bei Vergleich von Realversuch und Prüfstandsmessung können die zuvor erhaltenen Grenzwerte komplett übernommen werden. Bei einer vergleichenden Beurteilung zwei Prüfstandsmessungen wird, aufgrund der gleichen Umgebungstemperatur, der Temperaturoffset U nicht berücksichtigt.

5 Ergebnis der thermischen Bremserprobungen

Im folgenden Kapitel werden die Einzelergebnisse dargestellt und diese analysiert. Generelles Kriterium für eine saubere Messung ist ein vergleichbarer bzw. ähnlicher Temperaturverlauf. Aus diesem Grund und um den Umfang überschaubar zu halten werden alle Ergebnisse der jeweiligen Messreihen tabellarisch zusammengefasst und nur die Verläufe der gemessenen Temperaturen graphisch dargestellt. In den Übersichtstabellen sind zusätzlich die Bremsensatznummern angeführt, da das Ergebnis auch davon abhängt wie alt, bzw. wie viele Abfahrten mit der Bremsanlage schon durchgeführt wurden. In den folgenden Kapiteln wird jeweils nur der beste Versuch exemplarisch analysiert. Die Ergebnisse der übrigen Versuche sind im Anhang zu finden.

5.1 Ergebnis der realen Erprobungsfahrten

Da es Ziel ist die allgemeine Tauglichkeit des Prüfstands zu beurteilen werden die Ergebnisse von verschiedenen Referenzkonfigurationen angeführt. Aufgrund der geforderten Aussagekraft über die nachfolgenden Prüfstandsversuche werden die gleichen Messgrößen wie für eine Freigabebremserprobung auf der realen Teststrecke als Referenzgrößen herangezogen. Zusätzlich zu den, aus den gemessenen Werten, erhaltenen Zielwerten werden die, nach Kapitel 4.3.3 berechneten, Grenzwerte für die jeweilige Messgröße angeführt. Die Erprobungen unter realen Bedingungen wurden im Oktober 2011 auf der Großglockner-Hochalpenstraße durchgeführt. Aufgrund der jahreszeittypischen, niedrigen Umgebungstemperaturen kann davon ausgegangen werden, dass diese Einfluss auf die Temperaturen der Bremsanlage genommen haben. Diese Einflüsse werden jedoch in der Auswertung berücksichtigt und dokumentiert.

Tabelle 5.1: Übersicht der Referenzmessungen

VersuchsNr.	Beschreibung	BremsensatzNr. ¹
R1	Referenzmessung Großglockner (Standardkonfiguration)	1
R2	Referenzmessung Großglockner (Standardkonfiguration)	1
R3	Referenzmessung Großglockner (Vergleichskonfiguration)	1

¹ kompletter Bremsensatz für alle Räder bestehend aus Bremsscheibe, Bremssattel und Belägen

5.1.1 Referenzdaten für die Bergabfahrt (Standardkonfiguration)

Die Ermittlung der Referenzdaten für die Bergabfahrt mit Standardkonfiguration beruht auf zwei durchgeführten Messungen. Die genauen Einstellungen der Standardkonfiguration können aus Kapitel 3.2.1 entnommen werden. Allgemein kann man im Zuge der Standardkonfiguration von einer Fahrzeugausführung mit 17-Zoll Stahlfelgen sprechen.

In Tabelle 5.2 sind die wichtigsten Ergebnisse der Referenzmessungen aufgelistet.

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Referenzmessungen

Referenz Nr.	Temperaturen Tmax																				Start	Ende
	Brems Scheibe						Bremsflüssigkeit norm ¹						Bremsflüssigkeit n.norm						Start	Ende		
	VL [°C]	VR [°C]	HL [°C]	HR [°C]	SV [°C]	SH [°C]	VL [°C]	VR [°C]	HL [°C]	HR [°C]	SV [°C]	SH [°C]	VL [°C]	VR [°C]	HL [°C]	HR [°C]	SV [°C]	SH [°C]				
R1	493	493	482	439	27	45	189	193	139	119	7	26	182	186	132	112	7	26	11	15		
R2	494	487	477	449	27	41	192	205	135	125	20	18	174	187	118	108	19	17	1	4		

Referenz Nr.	Bremsdrücke p gemittelt					Geschwindigkeit v gemittelt [km/h]
	VL [bar]	VR [bar]	HL [bar]	HR [bar]	Mittel [bar]	
R1	8,77	9,04	9,17	8,43	8,85	22,06
R2	6,31	6,55	6,69	6,18	6,38	21,82

VL...vorne links
 VR...vorne rechts
 HL...hinten links
 HR...hinten rechts
 SV...Spreizung Vorderachse
 SH...Spreizung Hinterachse

¹ Temperaturen auf 20°C Umgebungstemperatur normiert
 (Berechnung siehe Kapitel 4.4.1 Bergabfahrtsdiagramm)

Aus diesen Ergebnissen bzw. aus den jeweiligen zeitlichen Verläufen (siehe Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2) der Messgrößen leiten sich die Ziel und Grenzwerte für die Prüfstandsmessungen, analog der Beschreibung in Kapitel 4.3.3, ab.

In Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 sind aufgrund ihrer maßgeblichen Bedeutung die Verläufe der Temperaturen der Brems Scheiben und der Bremsflüssigkeit dargestellt.

Ergebnis der thermischen Bremsprobenungen

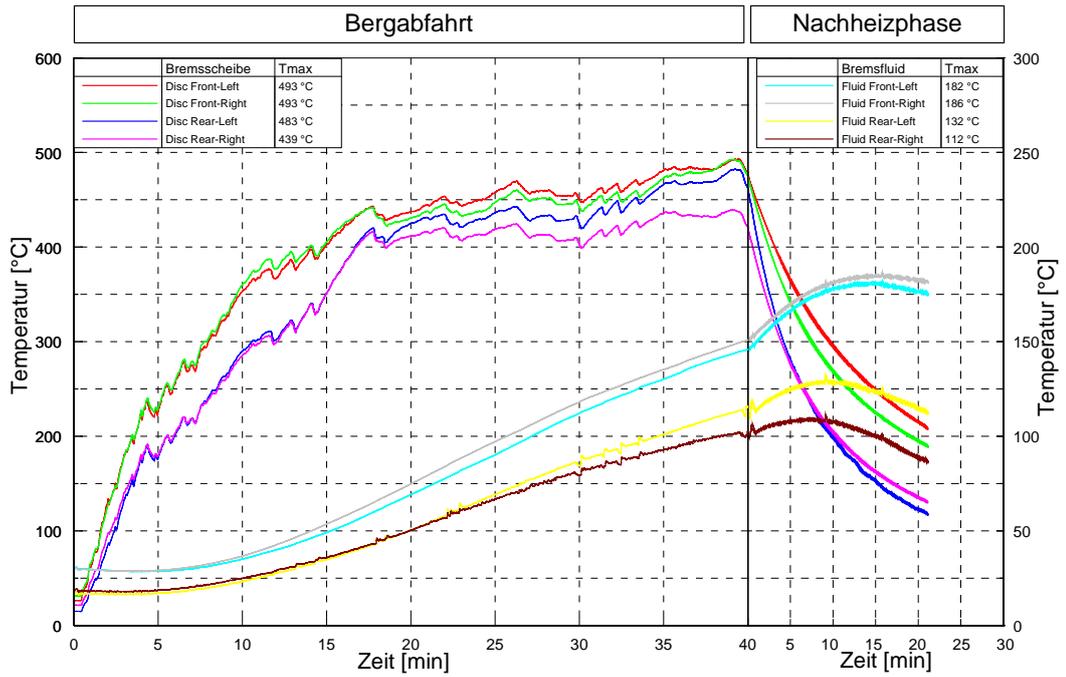


Abbildung 5.1: Temperaturverläufe der Referenzmessung R1

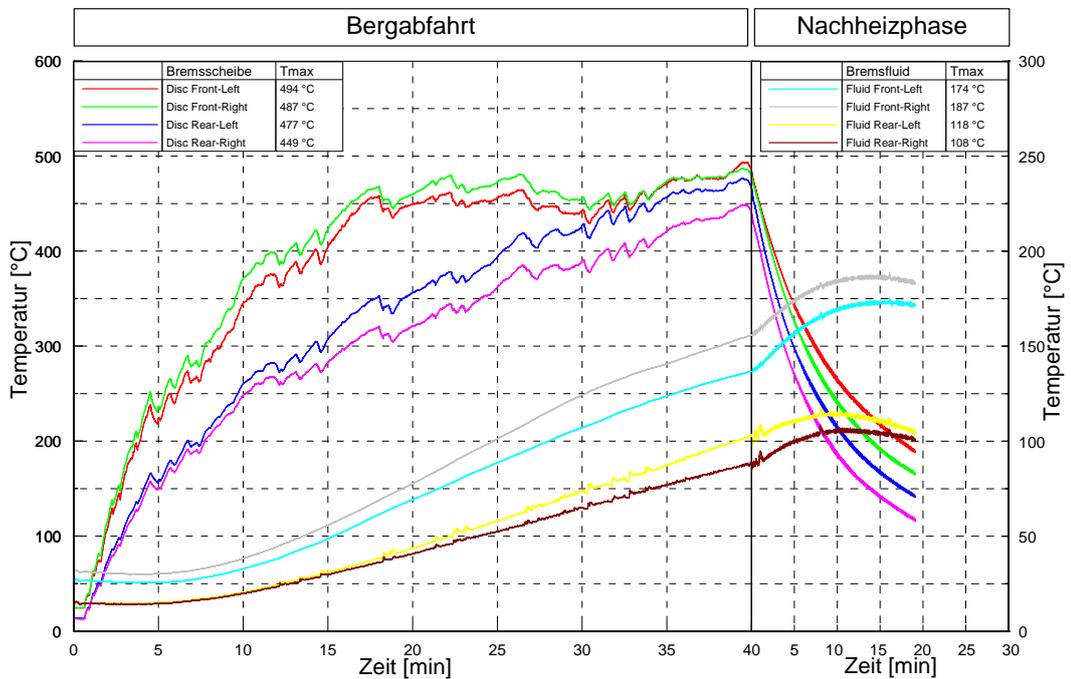


Abbildung 5.2: Temperaturverläufe der Referenzmessung R2

Aus den Formeln in Kapitel 4.3.3 lassen sich die Werte der Grenzwertbandbreite der jeweiligen Temperaturen berechnen. Die Zielwerte bilden sich aus den gemittelten Maximaltemperaturen der Bremscheiben und der Bremsflüssigkeiten.

Tabelle 5.3: Grenzwertband und Zielwerte für Bergfahrt Standardkonfiguration

	Temperaturen							
	Bremscheibe				Bremsflüssigkeit			
	VL [°C]	VR [°C]	HL [°C]	HR [°C]	VL [°C]	VR [°C]	HL [°C]	HR [°C]
Spreizung S ¹	31,77	40,85	76,9	99,59	11,26	6,72	18,42	19,2
Offset U ¹	11				11			
Breite B ¹	42,77	51,85	87,9	110,6	22,26	17,72	29,42	30,2
Zielwert	500				200 (180)			

¹ Berechnung analog Kapitel 4.4.3

Für die Erfüllung der gesetzlichen Bestimmungen bzw. für eine Freigabe der Bremsanlage darf eine Maximaltemperatur der Bremsflüssigkeit von 180°C nicht überschritten werden. Bei dem verwendeten Versuchsfahrzeug und der gewählten Konfiguration bestehen jedoch Probleme mit der Bremsenkühlung. Da bei den Versuchen auf die Korrelation zwischen Prüfstand und Realerprobung geachtet wird, wird der Zielwert der Flüssigkeitstemperatur auf 200°C erhöht, um der ebenfalls zu hohen Realmessung gerecht zu werden. Dieser Umstand hat keinen Einfluss auf die Bewertung der Tauglichkeit des Prüfstands für Bremsproben jedoch ist der Maximalwert für eine generelle Freigabe der Bremsanlage zu hoch.

5.1.2 Referenzdaten für die Bergabfahrt (generelle Validität)

Aus Zeitmangel und wegen einem witterungsbedingten Abbruch der Erprobungen am Großglockner kann für die Erstellung der Referenzwerte zum Nachweis der allgemeinen Gültigkeit der Prüfstandsversuche nur eine einzige Realmessung herangezogen werden. Bedingt durch diesen Umstand können auch keine exakten Messwertspreizungen aus Folgemessungen ermittelt werden.

Für die Referenzmessung R3 wird am Versuchsfahrzeug die Konfiguration für die Beurteilung der generellen Validität, wie in Kapitel 3.2.2 gewählt. Allerdings unterliegt die Konfiguration für die allgemeine Gültigkeit, wie im angegebenen Kapitel bereits erwähnt, einer gewissen Einschränkung. Die verwendeten Leichtmetallfelgen für die Realerprobung wurden bei einer Abfahrt zerstört. Modellbedingt können diese Felgen nicht mehr wiederbeschafft werden, deshalb werden am Prüfstand Felgen verwendet welche sich konstruktiv möglichst gering von den Realversuchfelgen unterscheiden.

Im Anhang Abbildung A-1 ist die, für Referenzmessungen verwendete, Leichtmetallfelge mit ihren symmetrischen Felgenöffnungen zu sehen. Zusätzlich zum Umstand der unterschiedlichen Felgen kommt hinzu, dass durch den Felgenschaden auch der Reifen während der Referenzmessung zerstört wurde. Dadurch ändern sich die wirkenden Fahrwiderstände drastisch und die aufgezeichneten Messwerte sind nur bis zur 31. Minute der Messung verwertbar.

Abbildung 5.3 zeigt die Verläufe der gemessenen Temperaturen mit Reifenschaden in der 31. Minute. Ab diesem Zeitpunkt ist eine eindeutige Änderung in den Temperaturen der Bremscheiben zu erkennen. Die Bremscheibentemperatur reagiert sehr viel schneller auf Änderungen der Randbedingungen, in diesem Fall dem geringeren, eingesteuerten Bremsdruck, als die relativ träge Bremsflüssigkeitstemperatur. Da die Messung nicht ordnungsgemäß beendet werden konnte, fehlen auch die exakten Maximalwerte für die Bremscheibentemperatur am Ende der Abfahrt und der Bremsflüssigkeitstemperatur in der Nachheizphase.

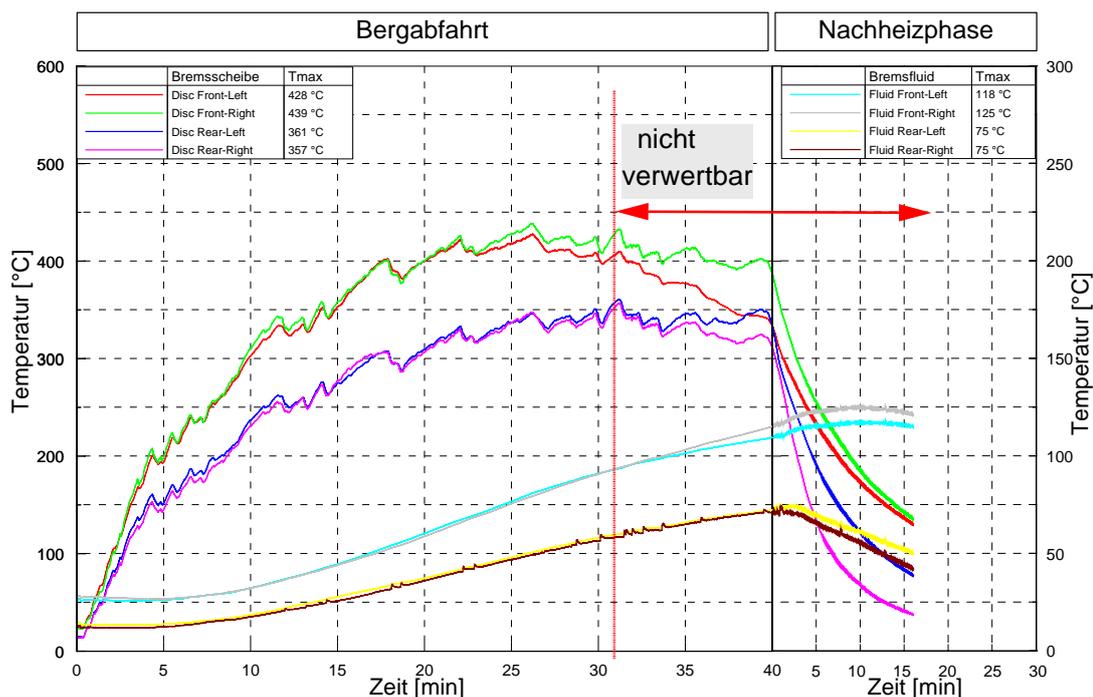


Abbildung 5.3: Temperaturverläufe der Referenzmessung R3

In Tabelle 5.4 sind die ungefähren Zielwerte der Referenzmessung für die Vergleichsmessungen aufgelistet. Aus Erfahrung ist bekannt, dass das Versuchsfahrzeug mit dieser Konfiguration die gesetzlichen Bedingungen (Bremsflüssigkeitstemperatur < 180°C) erfüllt und deshalb kann davon ausgegangen werden, dass alle Temperaturen geringer ausfallen. Die Breite des Grenzwertbandes wurde aus den Referenzmessungen R1 und R2 mit

Standardkonfiguration (Tabelle 5.3) übernommen. Dieser Schritt beinhaltet einige Ungenauigkeit, ist jedoch zu ungefähren Beurteilung der Messwertverläufe aus den Prüfstandsversuchen ausreichend.

Tabelle 5.4: Grenzwertband und Zielwerte für Bergfahrt Vergleichskonfiguration

	Temperaturen							
	Brems Scheibe				Bremsflüssigkeit			
	VL [°C]	VR [°C]	HL [°C]	HR [°C]	VL [°C]	VR [°C]	HL [°C]	HR [°C]
Spreizung S ¹	31	40	76	99	11	6	18	19
Offset U ¹	10				10			
Breite B ¹	41	50	86	109	21	16	28	29
Zielwert	ca. 439				< 180			

¹ Aufgrund fehlender Messdaten gerundete Werte aus Messungen R1 und R2 übernommen

5.2 Ergebnisse der Prüfstandsversuche

Ziel der Prüfstandsversuche ist eine allgemein gültige Einstellung des Prüfstands für vergleichbare Messungen welche im Vorfeld der Bremsenentwicklung für eine Bewertung der Leistungsfähigkeit herangezogen werden können. Im Folgenden werden auch die Zwischenergebnisse der Optimierungsschleife aufgezeigt. In diesem Prozess der Optimierung der Ergebnisse steckt der eigentliche Aufwand der Prüfstandsversuche. Es werden weiters die einstellbaren Parameter des Iterationsprozesses, welche als Steuerelemente der erzielbaren Messdaten dienen, dargestellt. Ebenso wird der Versuch einer Prüfstandserprobung mit geänderter Fahrzeugkonfiguration aber gleichen Prüfstandsparametern genauer beschrieben.

Tabelle 5.5 zeigt eine Auflistung aller durchgeführten Versuche am Prüfstand und führt einen kurze Beschreibung dieser an.

Tabelle 5.5: Übersicht der Prüfstandsversuche

VersuchNr.	Beschreibung	BremsensatzNr. ¹
V1	Ist-Standsmessung Prüfstand	2
V2	Messungen mit geänderten Parametern (iterative Zwischenergebnisse)	2
V3		
V4	Messung erfüllt alle Sollwerte	2
V5	Messungen zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit (Einstellungen gleich wie V4)	3
V6		
V7	Messung zu Beurteilung der allgemeinen Gültigkeit (Vergleichskonfiguration F1)	3
V8	Messung zu Beurteilung der allgemeinen Gültigkeit (Vergleichskonfiguration F2)	3

¹ kompletter Bremsensatz für alle Räder bestehend aus Brems Scheibe, Bremsattel und Belägen

5.2.1 Versuchsreihen der Bergabfahrt (Standardkonfiguration)

Um auf die optimalen Einstellungen für Prüfstand und Fahrzeug zu kommen bedarf es einer Reihe von Versuchen welche sich sukzessiv dem gewünschten Ergebnis nähern. Aus Abbildung 4.2 ist der Messablauf bzw. die Vorgehensweise ausgehend von den Referenzmessungen bekannt. Die in diesem Kapitel beschriebenen Versuchsreihen bewegen sich innerhalb der iterativen Schleife. Um diesen iterativen Prozess verlassen und abschließen zu können müssen die Parameter und deren Zusammenwirken derart abgestimmt sein, dass die Ergebnisse der Folgemessungen reproduzierbar sind. In Tabelle 5.6 sind alle im Vorfeld der Messungen definierten Parameter aufgelistet und beschrieben.

Diese Parameter werden in der iterativen Schleife verändert und deren Einfluss auf das erzielte Ergebnis der Prüfstandsuntersuchung dokumentiert. Idealerweise wird nur ein Parameter und eine Einstellung des selbigen pro Iterationsschritt verändert. Aus zeitlichen Gründen ist es jedoch von Nöten immer mehrere Parameter zu ändern. Die Wirkung eines einzelnen Parameters kann dabei nicht eruiert werden. In Abbildung 5.4 sind die einzelnen Iterationsschritte und die Änderungen der Parameter grafisch dargestellt. Ausgehend von einem Grundzustand, dem Ist-Stand mit vereinfachten Basiseinstellungen, sind die Zwischenschritte bis zum gewünschten Sollwert, der mit den Werten der Realerprobung gut korreliert, zu sehen.

Tabelle 5.6: Prüfstandsparameter

Parameter	Beschreibung	Einstellung
Höhenprofil	Weg und zugehörige Steigungswerte der Abfahrt Großglockner-Hochalpenstrasse	Genauigkeit (vereinfacht; segmentiert; GPS-Daten) Zusatzinformationen (Hilfestellung für Fahrer)
Strömungsgeschwindigkeit	Austrittsgeschwindigkeit der Luftströmung aus dem Fahrtwindgebläse	simultan (gleich mit Fahrgeschwindigkeit) konstant (Fixwert +/- Offset)
Lufttemperatur	Umgebungstemperatur in der Prüfstandskammer	konstant (20°C Normzustand) variabel (während Versuch linear verändern)
Düsenposition	Position der Austrittsdüse des Fahrtwindgebläses relativ zum Fahrzeug	x-Position (0; näher am Fahrzeug) z-Position (0; über Boden)
Leiteinrichtung	bauliche Maßnahmen zur Beeinflussung der Fahrwindströmung	Position (seitlich; oben; Winkel) Anzahl (0; 2; 4)
Fahrzeugposition	Position des Fahrzeugs am Prüfstand relativ zur Gebläsemitte	y-Position (mittig; links; rechts;)
Widerstandskennwerte	spezifische Widerstandskennwerte A, B, C des Versuchsfahrzeugs	Größe (je nach Fahrzeugmasse)

Die Ergebnisse der Versuchsreihen mit Standardkonfiguration sind in Tabelle 5.7 erfasst. Die relevanten Temperaturverläufe von Brems Scheiben- und Bremsflüssigkeitstemperatur sind lediglich für den Ist- und den Soll-Zustand als Grafik dargestellt. Die Verläufe der Zwischenergebnisse finden sich im Anhang von Abbildung A-3 bis Abbildung A-6.

Tabelle 5.7: Ergebnisse der Prüfstandsmessungen

Referenz Nr.	Temperaturen Tmax																		Umgebung	
	Brems Scheibe						Bremsflüssigkeit norm						Bremsflüssigkeit n.norm							
	VL [°C]	VR [°C]	HL [°C]	HR [°C]	SV [°C]	SH [°C]	VL [°C]	VR [°C]	HL [°C]	HR [°C]	SV [°C]	SH [°C]	VL [°C]	VR [°C]	HL [°C]	HR [°C]	SV [°C]	SH [°C]	Start [°C]	Ende [°C]
V1	477	534	487	451	62	43	Normierung nicht nötig T _{Umgebung} am Prüfstand ist 20°C						183	211	132	137	30	10	20	20
V2	478	572	457	446	95	45							199	237	109	127	39	20	20	20
V3	486	538	433	416	54	44							187	213	112	116	26	8	20	20
V4	511	497	422	431	40	19							193	198	107	119	9	15	20	20
V5	490	495	465	432	-	37							193	214	114	119	21	9	20	20
V6	491	486	450	434	-	36							192	210	105	113	19	11	20	20

Referenz Nr.	Bremsdrücke p gemittelt					Geschwindigkeit v gemittelt [km/h]
	VL [bar]	VR [bar]	HL [bar]	HR [bar]	Mittel [bar]	
V1	10,56	11,05	11,09	10,66	10,84	22,11
V2	6,46	6,9	7,01	6,35	6,68	22,21
V3	5,28	5,78	5,69	5,41	5,54	22,22
V4	5,68	5,71	5,73	5,77	5,7225	22,02
V5	8,35	8,34	8,4	8,39	8,37	22,19
V6	6,26	6,35	6,42	6,36	6,3475	22,24

VL...vorne links
 VR...vorne rechts
 HL...hinten links
 HR...hinten rechts
 SV...Spreizung Vorderachse
 SH...Spreizung Hinterachse

Aus Abbildung 5.4 ist ersichtlich, dass der Ist-Stand bzw. die Messung V1 über ein vereinfachtes, aus 19 Segmenten bestehendes, Höhenprofil der Großglocknerabfahrt verfügt. Dieser Umstand bedingt auch den sehr kantigen und abgehackten Verlauf der Brems Scheibentemperaturen des ersten Prüfstandversuchs (siehe Abbildung 5.5).

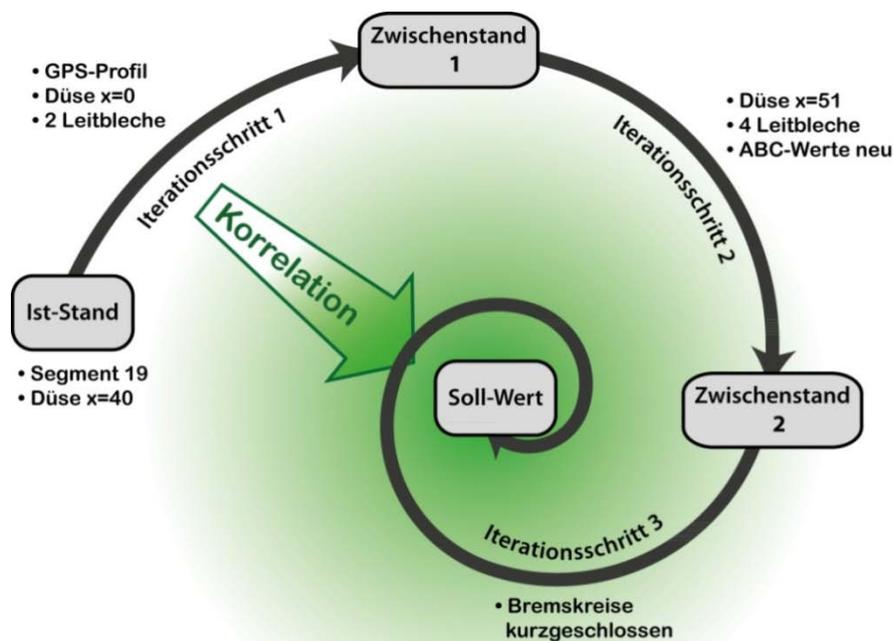


Abbildung 5.4: Iterationsschritte

Die Qualität des Ergebnisses bzw. die Korrelation mit den Realmessungen nimmt mit jedem Iterationsschritt zu. Im Gesamten wurden drei Iterationsschritte mit Parameteränderungen durchgeführt.

In *Iterationsschritt 1* wurde das segmentierte Höhenprofil durch ein geografisch genaues GPS-Höhenprofil ersetzt, die Düse des Fahrtwindgebläses soweit wie möglich von der Fahrzeugfront entfernt und zwei seitliche Leitbleche zur Verbesserung der Strömungsqualität montiert.

In *Iterationsschritt 2* wurde der Düsenaustritt um 51 cm zum Fahrzeug hin verlegt, zwei weitere Luftleitbleche montiert und eine Neuberechnung der Widerstandswerte für die Prüfstandsregelung mit 2213 kg anstelle von 1945kg durchgeführt.

Im letzten *Iterationsschritt 3* wurden die beiden bestehenden Bremskreise des Fahrzeugs durch eine zusätzliche Leitung kurzgeschlossen um im ganzen System ein und denselben Druck zu erreichen.

Durch diese Vorgehensweise ist die tendenzielle Richtung der einzelnen Einstellungen ersichtlich. Verglichen mit den Temperaturverläufen der Referenzmessungen R1 und R2, wie in Kapitel 5.1.1 dargestellt, wirken die Verläufe der gemessenen Temperaturen aus Versuch V1 sehr synthetisch und weisen keine erwähnenswerten Gemeinsamkeiten mit den Realdaten auf. Weiters ist zu sehen, dass die jeweiligen Bremsscheiben- und Bremsflüssigkeitstemperaturen große Spreizungen bzw. Differenzen zwischen links und rechts aufweisen.

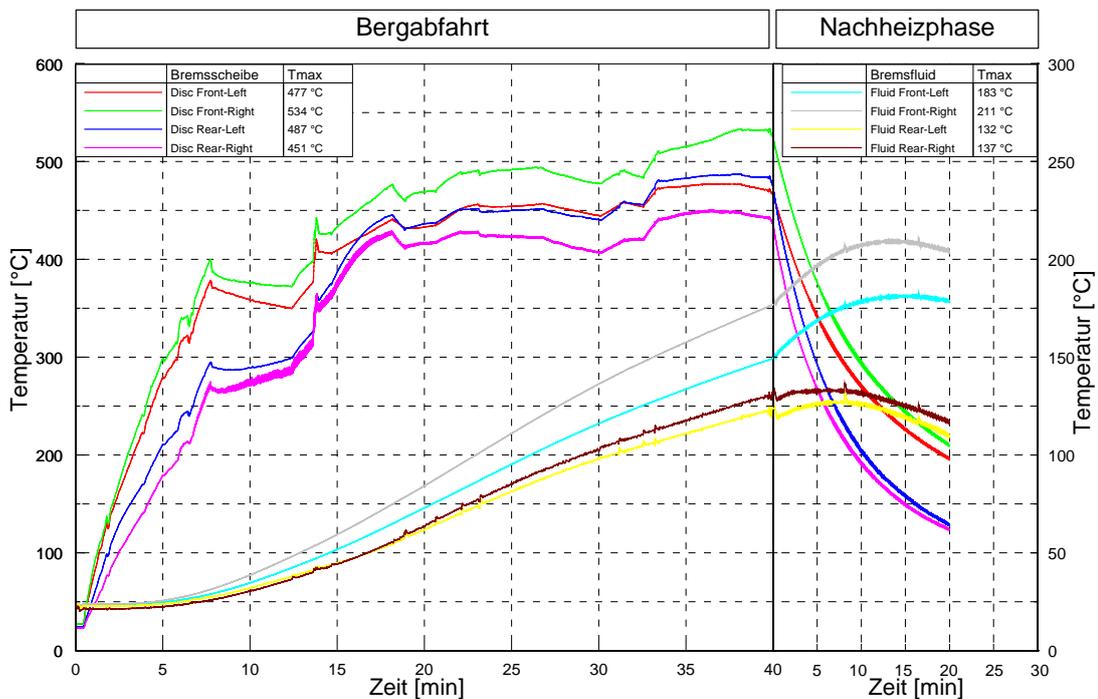


Abbildung 5.5: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V1

Das Ergebnis nach den iterativen Parameteränderungen ist in Abbildung 5.6 zu sehen. Die Verläufe der jeweiligen Temperaturen ähneln denen der Referenzmessungen sehr stark. Zusätzlich zur guten Übereinstimmung der Temperaturverläufe erfüllt die Messung V4 auch die geforderten Zielwerte (siehe Tabelle 5.3). Somit werden die eingestellten Parameter für diese Messung als gültiger Standard definiert.

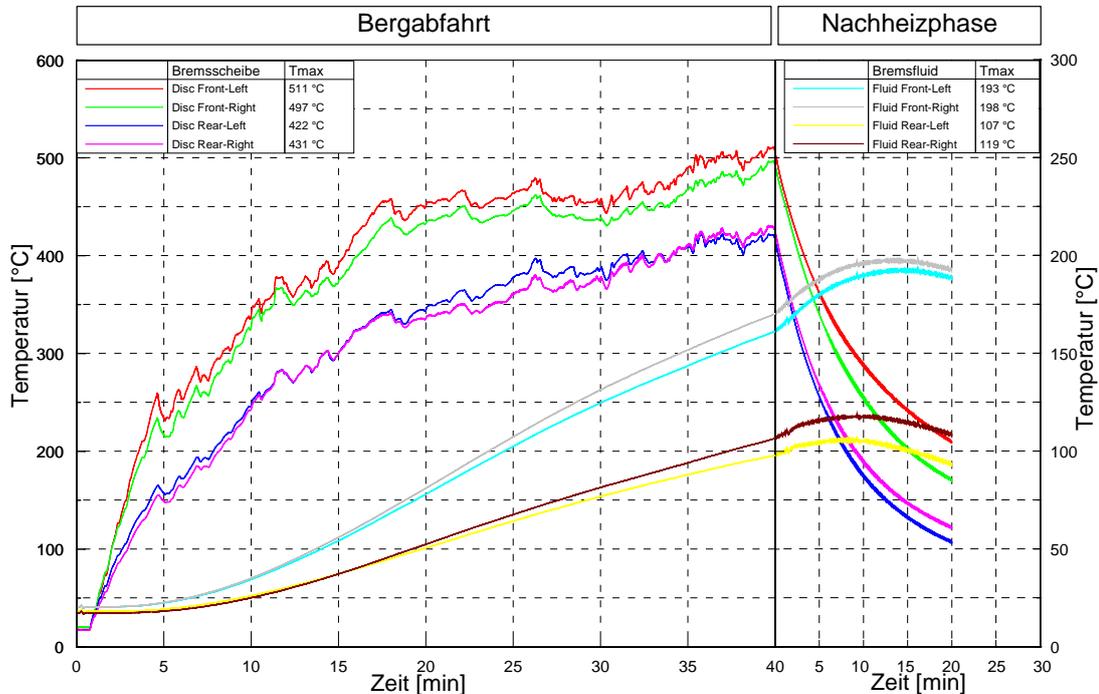


Abbildung 5.6: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V4

Um den Grund der Temperaturspreizung zwischen linker und rechter Seite zu eruieren wurden vor der Versuchsmessung V4 beide Bremskreise durch eine Zwischenleitung kurzgeschlossen (siehe Anhang Abbildung A-2). Bedingt durch den konstruktiven Aufbau des Bremssystems und der diagonalen Bremskreisaufeilung tritt eine Druckdifferenz zwischen erstem und zweitem Bremskreis von ca. 1 bar auf. Bei einem mittleren Bremsdruck von ca. 6 bar über die Dauer des Versuchs liegt diese Spreizung in der Größenordnung von 20%. Durch Verbinden beider Bremskreise herrscht im gesamten System der gleiche Bremsdruck und der Faktor des einseitig höheren Bremsdruckes, welcher erheblich zur einseitigen Temperaturerhöhung beiträgt, kann eliminiert werden. Die auftretende Temperaturspreizung ist nun nur mehr von der Bremsenkühlung durch Anströmung mit Fahrtwind abhängig. Da die Temperaturspreizung an den Bremsscheiben sowie in der Bremsflüssigkeit sehr gering ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Anströmung der Bremsen links und rechts gleich bzw. sehr ähnlich ist. Die kurzgeschlossenen Bremskreise werden für alle weiteren Bremsversuche am Prüfstand

beibehalten, um das Ergebnis nicht durch unterschiedliche Reibungsverhältnisse und den damit verbundenen Druckverlusten im Hydrauliksystem der Bremse zu verfälschen. Diese Maßnahme ist definitiv nur für den Prüfstand geeignet, da Aufgrund eines Komplettausfalls der Bremse bei Defekt einer Radbremse, die Erprobung im realen Umfeld mit nur einem Bremskreis lebensgefährlich ist.

5.2.2 Versuchsreihen der Bergabfahrt (generelle Validität)

Um die allgemeine Gültigkeit der Prüfstandskonfiguration mit den erarbeiteten Parametereinstellungen zu untersuchen bzw. diese zu beweisen wird das Fahrzeug anders konfiguriert. Die verwendete Vergleichskonfiguration ist in Kapitel 3.2.2 beschrieben und besteht hauptsächlich aus den verwendeten 18"-Leichtmetallfelgen. Als Vergleichsdaten dienen die Messwerte der Referenzmessung R3. Die Temperaturverläufe und Zielwerte sind in Kapitel 5.1.2 zu finden. Aufgrund der bereits beschriebenen Einschränkung, bedingt durch einen Reifenschaden, werden die erhaltenen Messdaten für die generelle Validität auch nur bis zur 31. Minute untersucht. Die gemessenen zeitlichen Verläufe der Temperaturen während des Prüfstandversuchs sind in Abbildung 5.7 gezeigt. Da nur eine Referenzmessung zur Beurteilung der Messwerte herangezogen werden kann werden, wie schon zuvor erwähnt, die Grenzwerte der Messungen mit Standardkonfiguration herangezogen.

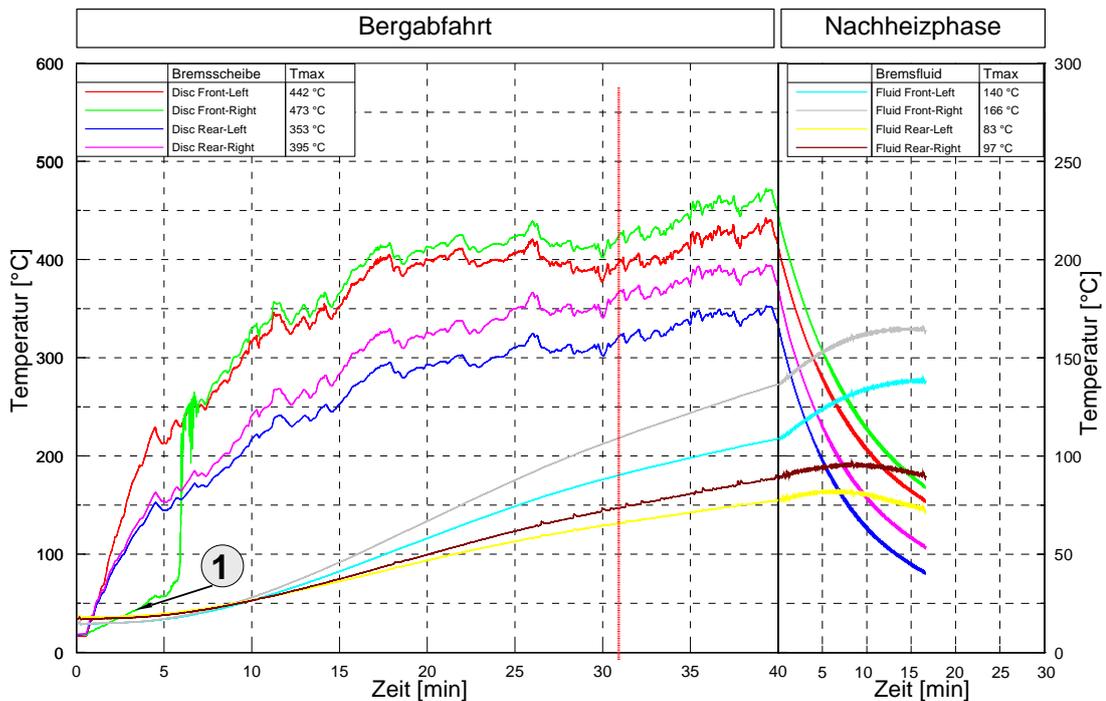


Abbildung 5.7: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V7

In Abbildung 5.7 (1) ist die fehlerhafte Funktion eines Thermoelements in der rechten vorderen Bremsscheibe zu erkennen. Aufgrund eines thermischen Defekts wird die Temperatur zu Beginn der Messung nicht am Sensorende sondern an der Pressverbindung Kabel/Sensor gemessen.

Erst ab der 7. Minute wird die Temperatur wieder an der richtigen Messstelle, der Bremsscheibenoberfläche, gemessen. Die Funktionsfähigkeit des Messensors bleibt anschließend bis zum Ende der Messung erhalten. Neben dieser Unzulänglichkeit tritt weiters wieder eine größere Temperaturspreizung der Bremsscheiben und der Flüssigkeiten auf. Die Ursache dieses Phänomens wird mit Hilfe einer Vergleichsmessung mit symmetrischer Felge und einer lokalen Strömungsbeurteilung der Fahrtwindströmung an den Bremsen in Kombination mit den asymmetrischen 18"-Leichtmetallfelgen untersucht. (siehe Kapitel 5.4.3)

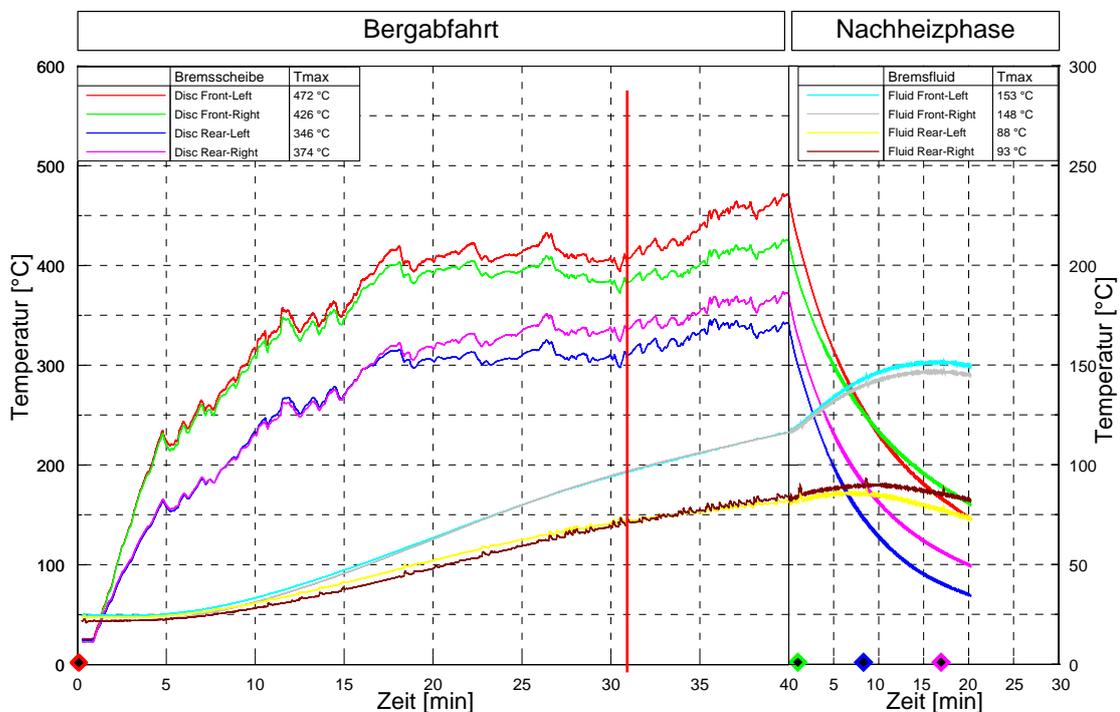


Abbildung 5.8: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V8

Die Messung V8 wurde mit der Vergleichskonfiguration F2 (Felge mit symmetrischen Felgenöffnungen) durchgeführt. Die Temperaturen an den Bremsscheiben spreizen ab der 18. Minute immer mehr, die Temperaturen der Bremsflüssigkeiten sind jedoch links und rechts beinahe ident. Dieses Ergebnis lässt auf eine gute und auf beiden Seiten gleich starke Kühlwirkung durch die Fahrtwindströmung schließen.

Allgemein weisen beide Versuche mit Vergleichskonfiguration (V7 und V8) gute Werte der gemessenen Temperaturen auf und erfüllen alle Anforderungen in puncto Maximaltemperaturen.

5.3 Analyse der Korrelationen

Um eine Aussage über die Qualität der Messungen und die Korrelation der Prüfstandversuche mit den Realerprobungen treffen zu können wird der Verlauf der Messwertdifferenz als Werkzeug verwendet. In Kapitel 4.3.4 wird das Vorgehen zur Bildung der Differenzen und deren Darstellung genauer beschrieben. Nochmals anzumerken ist hier, dass der Wert der Differenzen am Prüfstand aufgrund von Sicherheitsreserven gleich oder größer 0 sein soll. Die folgenden Kapitel beinhalten jeweils die Differenzen der gemessenen Temperaturen zum Mittelwert der Referenzwerte bzw. für die Darstellung der Reproduzierbarkeit die Differenz der Folgemessungen. Die Ergebnisse sind nach den jeweiligen Messgrößen, Brems Scheibentemperatur und Bremsflüssigkeitstemperatur, gegliedert. Des Weiteren werden auch die aufgewendeten Energien analysiert und gesondert beurteilt. Als Grundlage hierfür dienen die Formeln aus Kapitel 4.3.2 .

Exemplarisch werden in den folgenden Kapiteln nur die Temperaturen der Vorderachse, mit genauem Augenmerk auf die des rechten vorderen Rades dargestellt. Diese Radbremse weist bereits in den Referenzmessungen die höchste thermische Belastung auf und ist deshalb primärer Maßstab für die Prüfstandsergebnisse. Die restlichen Ergebnisse zur Beurteilung der Prüfstandseignung sind der Vollständigkeit halber im Anhang abgebildet.

5.3.1 Brems Scheibentemperatur

Die Brems Scheibentemperatur reagiert sehr schnell auf Änderungen des eingesteuerten Bremsdrucks bzw. der Anpresskraft der Beläge. Aus diesem Grund lässt sich aus dem Verlauf der Brems Scheibentemperaturen eine gute Aussage treffen, wie gut das simulierte Straßenprofil mit dem Realen übereinstimmt. Ebenso lässt sich über die momentane Temperatur und den vorhergehenden Verlauf dieser der Energieeintrag in die Scheibe abschätzen. Sind sich die Verläufe der Brems Scheibentemperaturen aus Prüfstandsversuch und Realversuch ähnlich d.h. weisen diese eine gute Korrelation auf, kann man davon ausgehen, dass die Umgebungsbedingungen am Prüfstand mit denen des realen Umfelds übereinstimmen. Die Ergebnisse der Messungen aus der Iterationsschleife V1 bis V4 sind in Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 dargestellt.

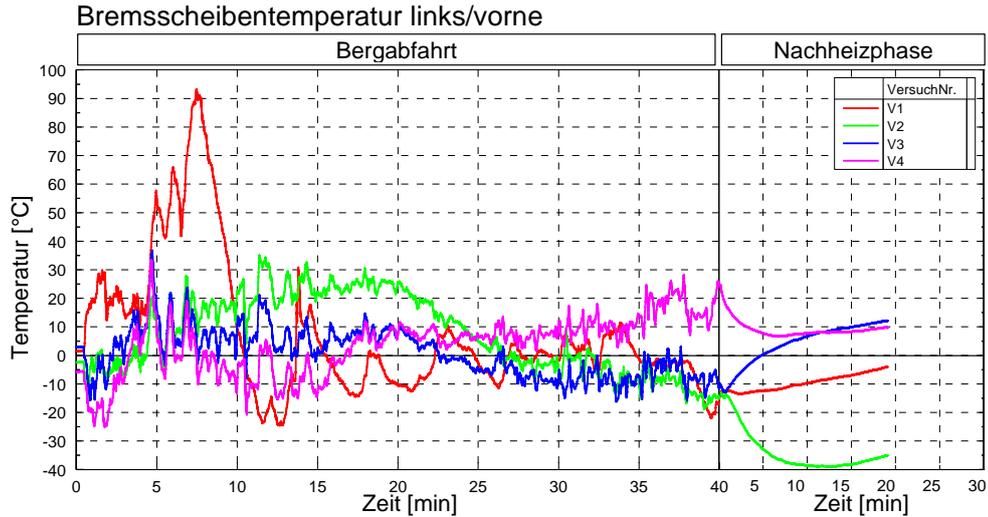


Abbildung 5.9: Temperaturdifferenz Brems Scheibe links/vorne V1 bis V4

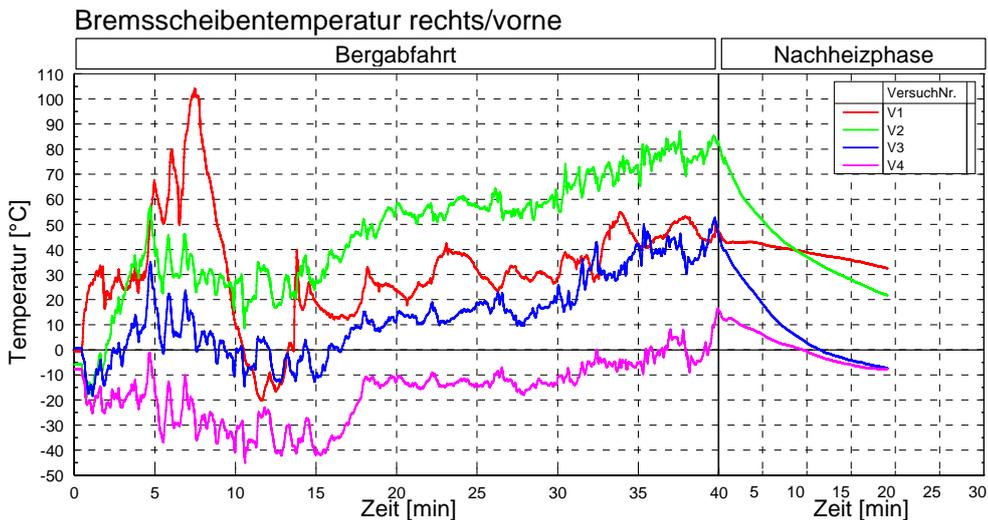


Abbildung 5.10: Temperaturdifferenz Brems Scheibe rechts/vorne V1 bis V4

Der relevanteste Punkt für die Brems Scheibentemperatur ist das Ende der Abfahrt, da hier die Maximaltemperatur erreicht wird. Wenn in diesem Punkt, bei Minute 40, die Temperaturdifferenz einen sehr geringen positiven Zahlenwert nahe Null aufweist, kann von einem guten Ergebnis gesprochen werden. In Abbildung 5.10 ist die sukzessive Verbesserung von Iteration zu Iteration sehr gut erkennbar. Die Versuche V1 und V2 weisen eine unzulängliche Korrelation auf. Versuch V4 liefert, bezogen auf die vorderen Brems Scheibentemperaturen, die besten Ergebnisse.

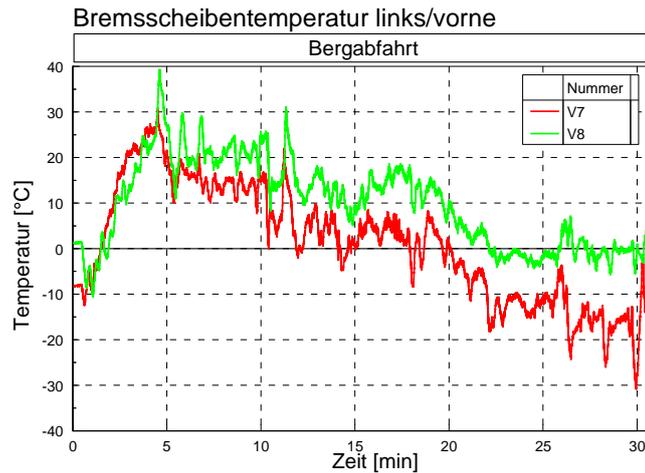


Abbildung 5.11: Temperaturdifferenz Bremsscheibe links/vorne V7 und V8

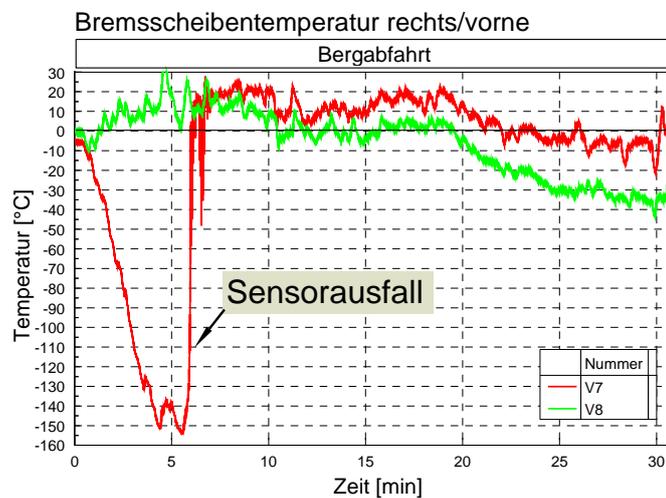


Abbildung 5.12: Temperaturdifferenz Bremsscheibe rechts/vorne V7 und V8

Die Versuche, welche mit den Vergleichskonfigurationen F1 und F2 (siehe Tabelle 3.2 bzw. Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5) durchgeführt wurden sind in Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12 dargestellt. Durch die bedingt verwertbaren Referenzdaten (in Kapitel 5.1.2 Referenzdaten für die Bergabfahrt (generelle Validität) bereits ausgeführt) sind die Differenzverläufe nur bis zur 31. Minute dargestellt. Diese Daten weisen jedoch eine gute Korrelation mit der Referenzmessung R3 auf. Aufgrund eines Sensorschadens in der rechten vorderen Bremsscheibe während der Messung V7 sind die Temperaturmessdaten dieser Messstelle nur bedingt verwertbar.

Allgemein kann festgehalten werden, dass alle Messungen, sowohl mit Standard- als auch mit Vergleichskonfiguration, die mit den erarbeiteten Prüfstandsparametern aus Versuch V4 durchgeführt wurden, eine gute Korrelation mit den Bremsscheibentemperaturen der Referenzmessungen aufweisen.

5.3.2 Bremsflüssigkeitstemperatur

Hauptkriterium für eine, unter hoher thermischer Belastung, funktionierende Fahrzeugbremse ist eine möglichst niedrige Temperatur der Bremsflüssigkeit. In den folgenden Abbildungen ist die Abweichung der gemessenen Bremsfluidtemperaturen von der Referenztemperatur als Verlauf der Temperaturdifferenz dargestellt. Wie auch bei den Brems Scheibentemperaturen werden hier nur die Temperaturen der vorderen Radbremsen betrachtet. Die übrigen Ergebnisse sind im Anhang zu finden.

Abbildung 5.13 zeigt den Verlauf der Temperaturdifferenz der Bremsflüssigkeit am linken Vorderrad. Hier liegt die Qualität der Versuchsmessung V4 eher im Mittelfeld. An der thermisch höher belasteten rechten Seite weist Messung V4, wie in Abbildung 5.14 zu sehen, jedoch die besten Ergebnisse auf.

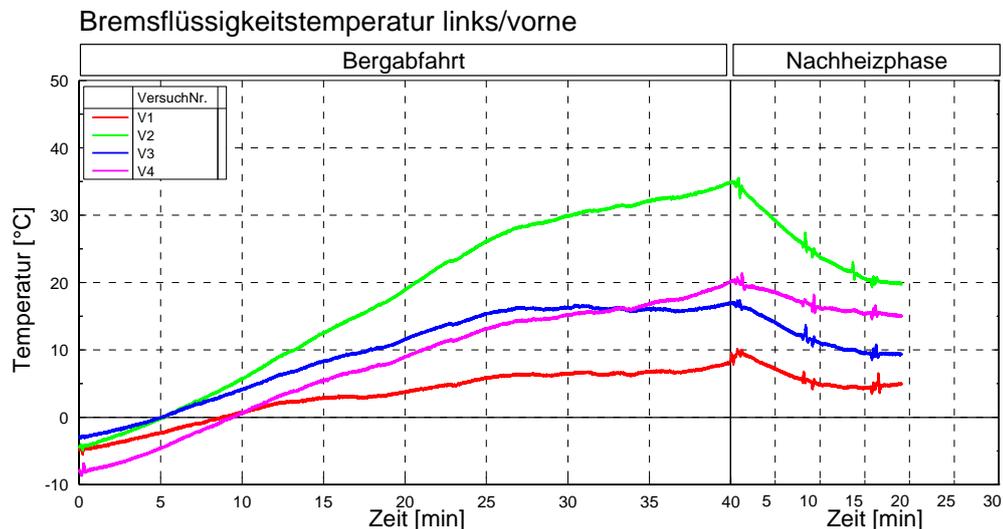


Abbildung 5.13: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit links/vorne V1 bis V4

Dieser Umstand festigt weiter die Parametereinstellungen von Versuch V4. Die Ergebnisse der Versuche mit Vergleichskonfiguration fallen ähnlich positiv aus. Die Parametereinstellungen des Prüfstands sind für Messung V7 und V8 die Selben wie für Messung V4. Die Differenzverläufe aus Messung V7 und V8 liegen auf beiden Seiten innerhalb der Grenzwerte und weisen somit ein zufriedenstellendes Ergebnis auf (siehe Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16).

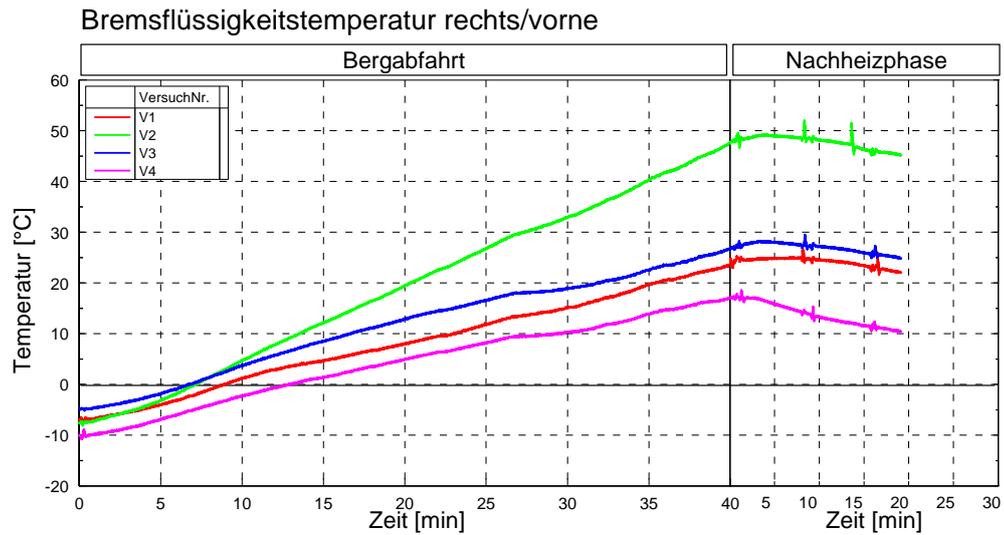


Abbildung 5.14: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit rechts/vorne V1 bis V4

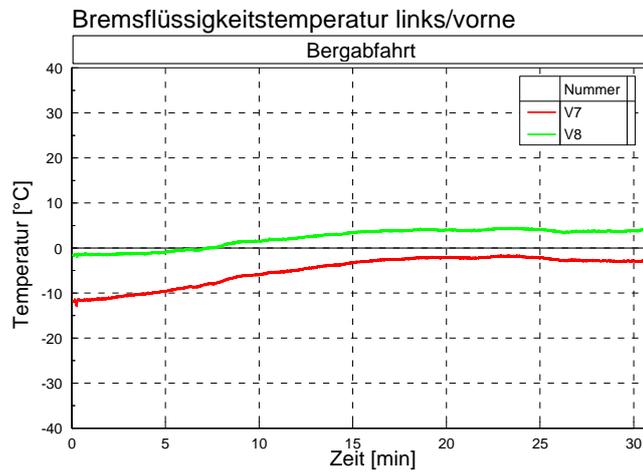


Abbildung 5.15: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit links/vorne V7 und V8

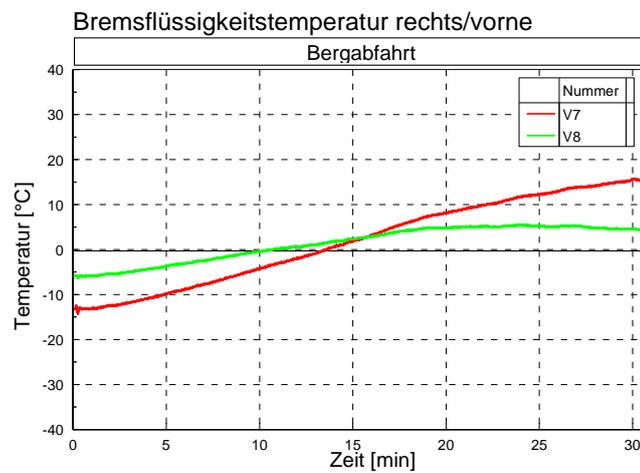


Abbildung 5.16: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit rechts/vorne V7 und V8

5.3.3 Reproduzierbarkeit der Messungen

Die Ergebnisse der Versuchsmessung V4 erfüllen, wie in den vorigen Kapiteln dargestellt, die Anforderungen an die Temperaturwerte. Es ist jedoch nicht nur das einmalig Erfüllen der Anforderungen von Interesse, sondern auch die Reproduzierbarkeit der Messungen mit den erarbeiteten Prüfstandsparametern. Für diesen Zweck wurden die zusätzlichen Messungen V5 und V6 mit Standardkonfiguration durchgeführt. Die Reproduzierbarkeit wird im Folgenden als Differenz der jeweiligen Messwerte von V5 und V6 dargestellt. Je kleiner der Betrag dieser Differenz ist, umso größer ist die Wiederholgenauigkeit. Wie schon in den vorigen Kapiteln erläutert sind die Messdaten der rechten vorderen Bremsscheibe aus Bremsensatz #3 aufgrund eines Sensorausfalls nur bedingt verwertbar.

Abbildung 5.17 zeigt den Verlauf der Temperaturdifferenzen der Bremsscheibentemperaturen aus Versuch V5 und V6. Für die Bremsscheiben ist der Zeitpunkt der maximalen Temperatur am Ende der Bergabfahrt ausschlaggebend. Wie zu erkennen ist, sind in diesem Punkt, bei der 40. Minute, die Beträge der Temperaturdifferenzen an allen vier Bremsscheiben sehr gering, was auf eine gute Reproduzierbarkeit der Maximalwerte hinweist. Etwa in der Mitte der Abfahrt bewegen sich die Temperaturwerte der vorderen Scheiben stärker auseinander, was sich in einem größeren Differenzbetrag von ca. 90°C niederschlägt.

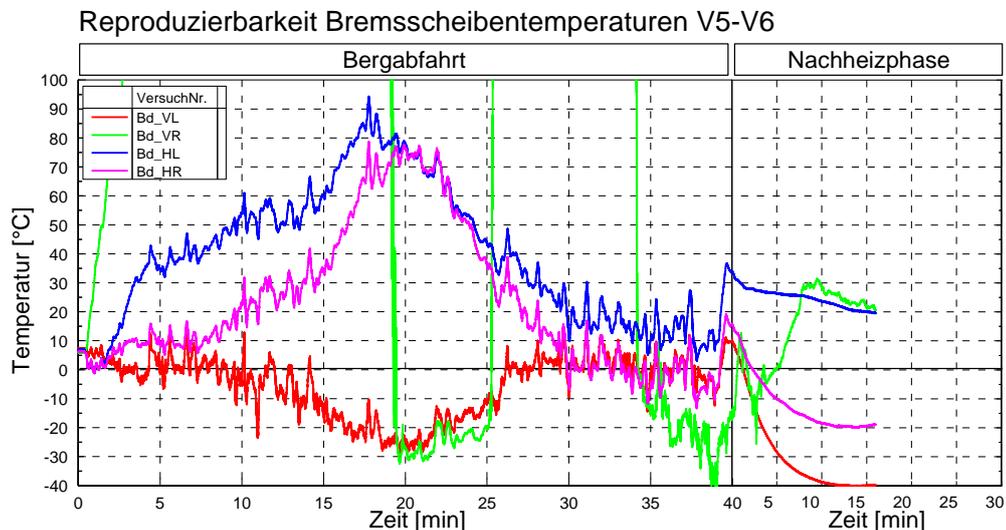


Abbildung 5.17: Temperaturdifferenz Bremsscheiben V5-V6

Die Ergebnisse der Reproduzierbarkeit der Bremsflüssigkeitstemperaturen sind in Abbildung 5.18 dargestellt. Die Differenzverläufe der Bremsflüssigkeitstemperaturen der thermisch hochbelasteten Vorderachse weisen sehr geringe Beträge über den gesamten Verlauf der Messung und im Speziellen in der Nachheizphase auf. Dieser Umstand zeugt von einer sehr guten Reproduzierbarkeit.

Die Beträge der Differenzen an der Hinterachse (siehe Anhang) sind nur leicht höher und stehen ebenfalls für eine gute Wiederholgenauigkeit. Es kann also festgehalten werden, dass mit den eingestellten Prüfstandsparametern und gleichen Umgebungsbedingungen Messungen mit einer guten Reproduzierbarkeit durchgeführt werden können.

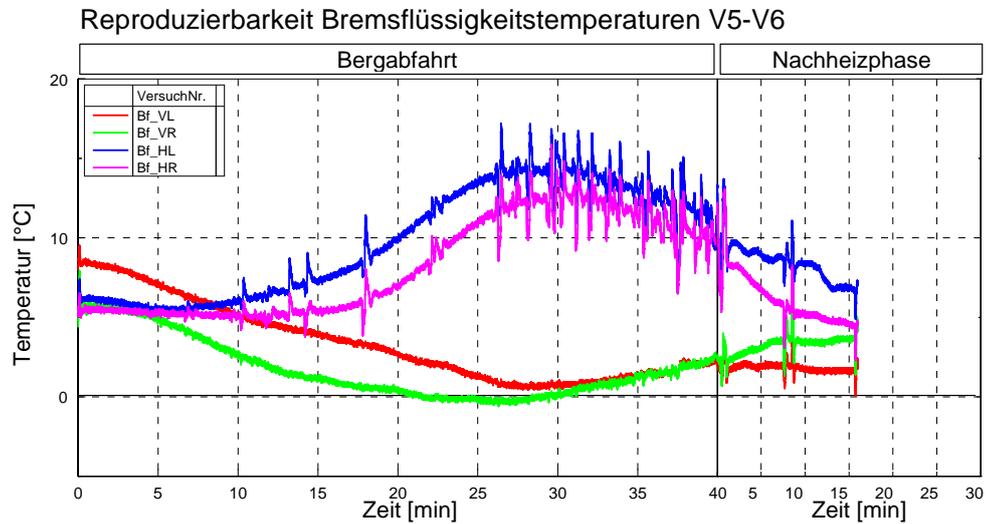


Abbildung 5.18: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit V5-V6

5.3.4 Bremsenergie

Voraussetzung für eine gute Korrelation der Temperaturen der Bremsanlage ist die gleiche umzusetzende Energie am Prüfstand wie im Realversuch. Wie die Berechnung der jeweiligen Energie für Realabfahrt bzw. Prüfstandsversuch erfolgt ist in Kapitel 4.3.2 beschrieben. In Abbildung 5.19 ist die gesamte Bremsenergie der Realerprobung am Großglockner der Gesamtenergie des Prüfstands gegenübergestellt. Die Verzögerungsenergie der Realerprobung ist eine berechnete Größe aus der, im Fahrzeug mittels Beschleunigungssensor, gemessenem Hangabtriebsanteil der Erdanziehung. Sie beinhaltet deshalb alle Widerstandskräfte, welche zusätzlich zur Bremskraft eine Verzögerung bewirken.

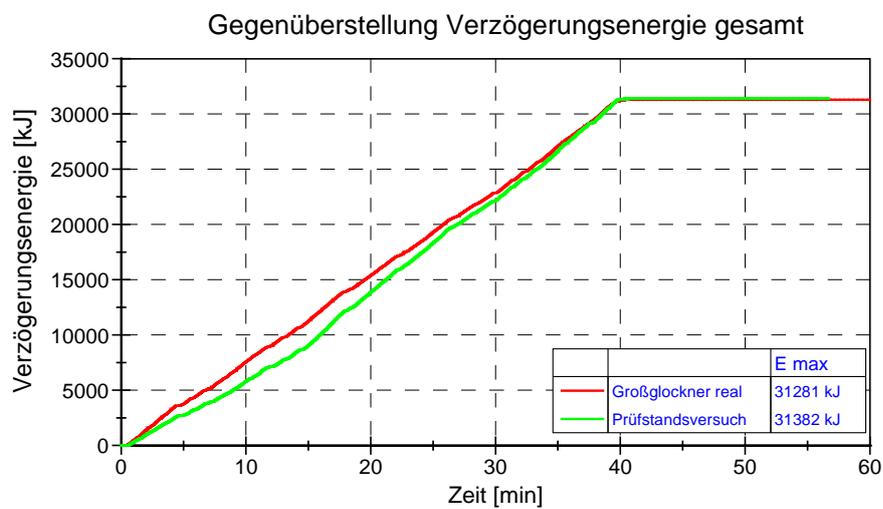


Abbildung 5.19: Gegenüberstellung der Verzögerungsenergien

Die Gesamtbremsenergie des Prüfstands setzt sich aus der reinen Bremsenergie, welche durch hydraulisches Anpressen der Beläge an die Bremsscheibe entsteht, und der Energie aus der, vom Prüfstand mittels A, B, C-Widerstandswerten (siehe Kapitel 4.3.2) simulierten, Widerstandskraft zusammen (siehe Abbildung 5.20).

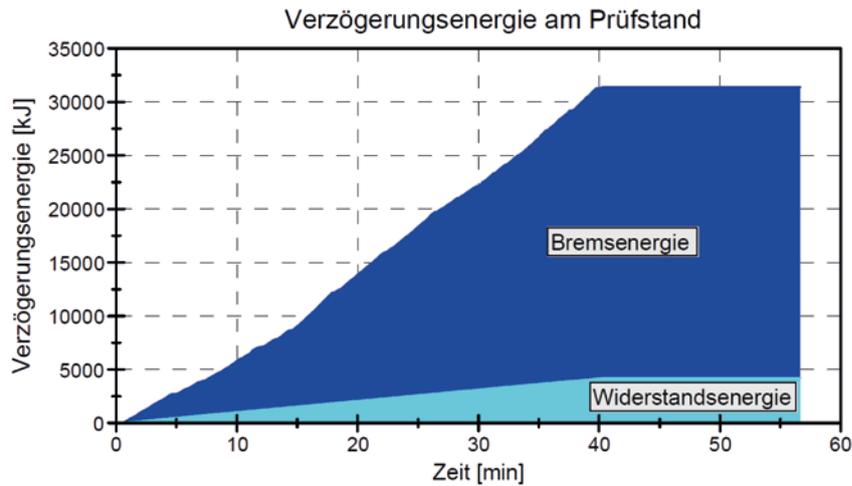


Abbildung 5.20: Zusammensetzung der Verzögerungsenergie am Prüfstand

Die Energie der Realerprobung stimmt sehr gut mit der des Prüfstandversuchs überein. Dieses Ergebnis bedingt eine gute Übereinstimmung der Umgebungsbedingungen und ist Grundlage für eine zufriedenstellende Korrelation der Temperaturwerte. Aufgrund der konstanten Fahrgeschwindigkeit von 22 km/h während des Versuchs und des relativ konstanten Gefälles der Großglockner-Hochalpenstrasse ist der Energieverlauf annähernd linear. Wichtig ist hierbei anzumerken, dass beide Versuche mit einer komplett neuen Bremsanlage durchgeführt wurden. Dieser Umstand ist relevant, da beobachtet wurde, dass der Reibwert der Bremsbeläge mit jeder Abfahrt bzw. Versuchsdurchführung zunimmt und sich stabilisiert. Dieses Phänomen wird allgemein als „Einfahren“ der Bremsen bezeichnet und ist auf materialtechnische Veränderungen der Bremsbeläge zurück zu führen.

Die umgesetzte Energie von 31281 kJ während der 40 minütigen Abfahrt vom Großglockner führt zu einer Gesamtbremsleistung $P_{Brems,ges}$ von 13 kW.

5.4 Ergebnis der Strömungsvisualisierung

Ein Erfolgsfaktor für eine optimale Bremsentemperatur ist die Anströmung der Bremsanlage mit Kühlluft. Diese strömt systembedingt mit der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs. Um die genauen Umstände zu definieren ist es nötig nicht nur die Gesamtströmung am Prüfstand zu untersuchen sondern auch die genauen Strömungen an den Radbremsen und den verwendeten Felgen. Grundvoraussetzung um die vorhandene Strömung zu beurteilen ist eine saubere Grundströmung des Gebläses. Die Beurteilung erfolgt ausschließlich mit strömungsvisualisierenden Methoden. Im Speziellen wurde für diese Zwecke eine Rauchlanze eingesetzt. In Kapitel 2.4.5 ist die angewandte Messmethode und in Kapitel 4.2 die Versuchsdurchführung genauer beschrieben.

5.4.1 Gebläseströmung

Ob eine Messung mittels einer Rauchlanze durchgeführt werden kann, hängt maßgeblich von der Qualität der Strömung ab, d.h. im Idealfall liegt eine laminare Strömung vor. Die Grundströmung besitzt eine gewisse Turbulenz, ist jedoch für den Einsatz der Rauchlanze ausreichend geeignet.

Aufgrund der geringeren Breite des Fahrtwindgebläses gegenüber der des Versuchsfahrzeugs kommt es zu unsauberen Strömungsverhältnissen seitlich des Fahrzeugs und der Austrittsdüse wie in Abbildung 5.21 ersichtlich. Diese Verwirbelungen führen zu einem Abströmen der, zur Kühlung der Bremsen benötigten, Luft.

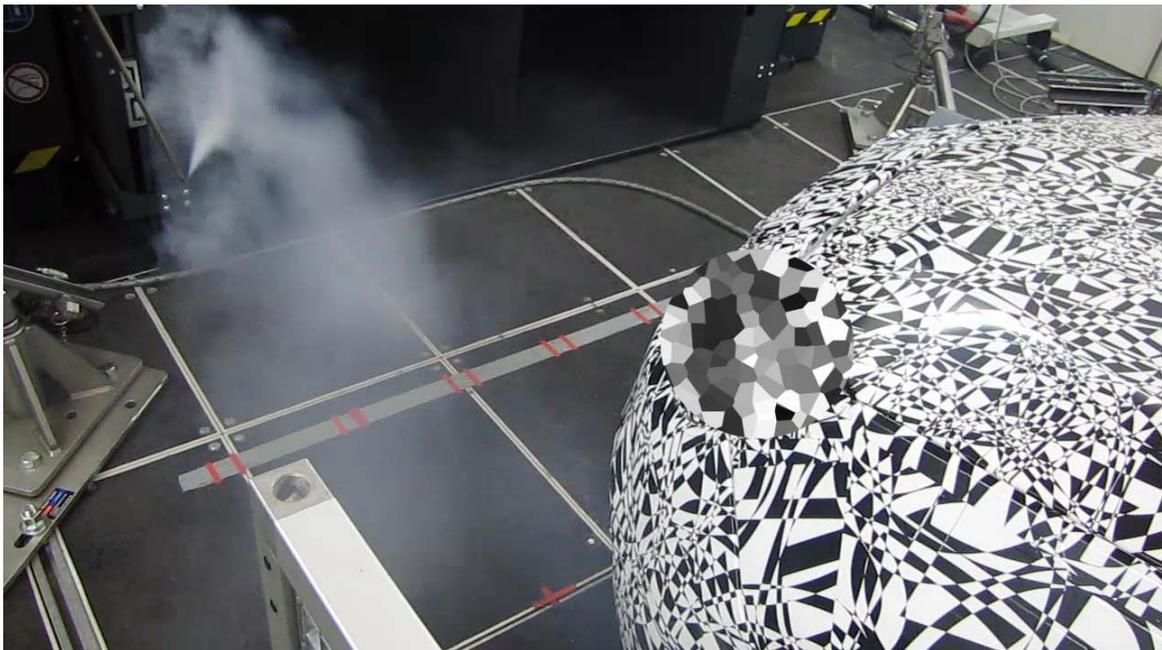


Abbildung 5.21: Verwirbelungen am Düsenaustritt

Um diese Verwirbelungen zu unterbinden werden seitliche Leitbleche montiert. Die Strömung legt sich je nach Winkel der Leiteinrichtung sauber an diese an (siehe Abbildung 5.22). Zusätzlich verhindern die Bleche ein seitliches Abströmen der Kühlluft.

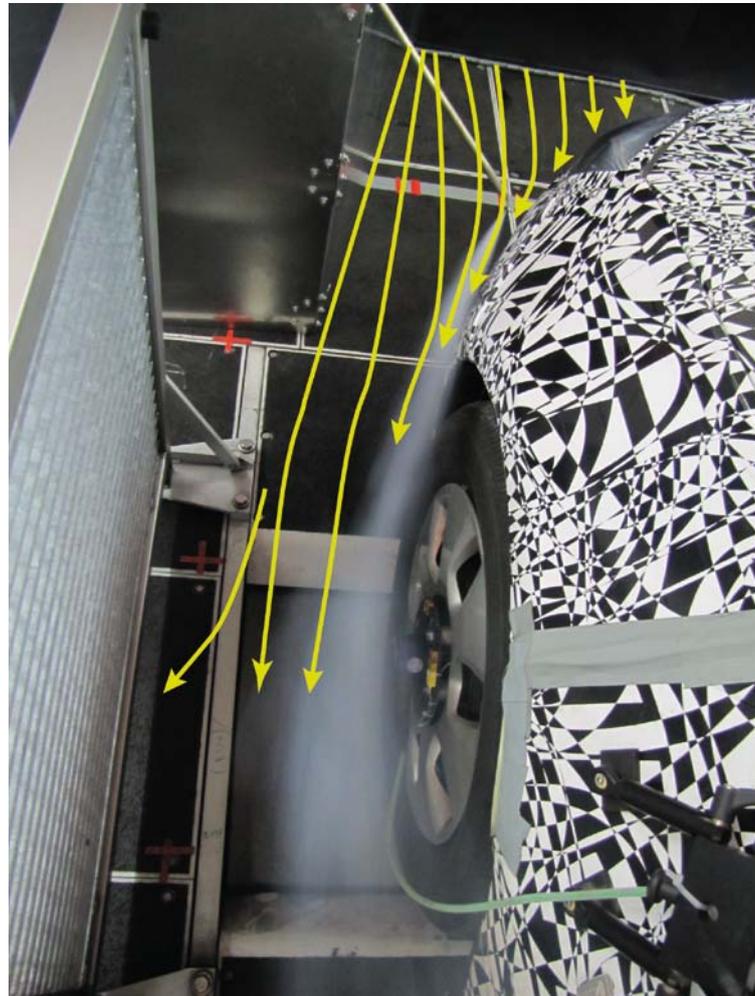


Abbildung 5.22: Gebläseströmung mit zwei Leitblechen

Um die Strömung noch mehr zu kanalisieren und die Verlustströmungen weiter zu minimieren werden zwei weitere Leitbleche angebracht (dargestellt in Abbildung 5.24). Diese richten die Strömung wieder parallel zum Fahrzeug aus und verhindern ein Abströmen durch die Schutzgittern der Prüfstandsrollen (siehe Abbildung 5.23)



Abbildung 5.23: Verlustströmung durch Schutzgitter

Die x-Position der Austrittsdüse wurde ebenfalls variiert. Bei einer x-Position von 0, was einer komplett eingefahrenen Düse entspricht, ist der Abstand zwischen Fahrzeug und Düsenaustritt am größten. Diese Tatsache bedingt eine große, freie Strömungslänge bei der zusätzliche Störeinflüsse und Turbulenzen auftreten können. Dem gegenüber steht ein flacher Diffusorwinkel, was eine saubere, ablösungsfreie Strömung an den Leitblechen erzeugt.



Abbildung 5.24: Gebläseströmung mit vier Leitblechen

Die Position in x-Richtung der Düse wurde schrittweise weiter zum Fahrzeug hin verlegt und die Ergebnisse mit der Rauchlanze visualisiert. Um die optimale Einstellung zu finden werden zusätzlich die Ergebnisse der Bremsentemperaturmessungen berücksichtigt, da diese ebenso Auskunft über Qualität der Bremsenanströmung geben. Als beste Einstellung erweist sich die Düsenposition $z=0$ und $x=51\text{cm}$. Mit dieser Einstellung gelangt die Gebläseströmung mit wenig Geschwindigkeitsverlust an die Bremsanlage und kann diese gut kühlen. Eine Verschlechterung der seitlichen Strömung an den Leitblechen, bedingt durch den steileren Winkel der Leitbleche, ist nicht erkennbar bzw. beeinflusst der etwas steilere Winkel die Strömungssituation an den Radbremsen nicht.

Eine Störung der Strömung durch die notwendige Fixierung des Fahrzeugs am Prüfstand (in Abbildung 5.25 zu sehen) besteht zwar, jedoch sind keinerlei Einflüsse auf das Messergebnis bemerkbar.

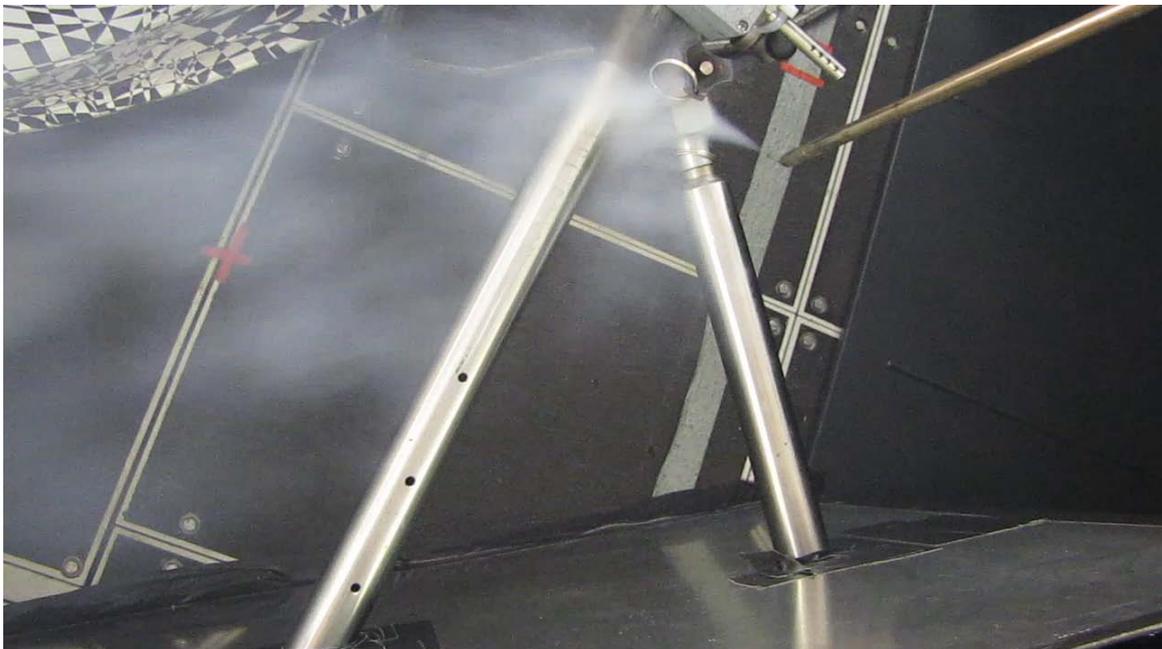


Abbildung 5.25: Strömungsbehinderung durch Fahrzeugfixierung (Draufsicht)

Abschließend kann gesagt werden, dass mit den zusätzlichen Leitblechen die Fahrtwindströmung am Prüfstand so kanalisiert werden kann, dass sie einer Strömung unter realen Bedingungen ohne Einflüsse von zusätzlichem Wind entspricht.

5.4.2 Anströmung der Bremsen

Ziel der verbauten aerodynamischen Maßnahmen ist es, eine ausreichende Kühlung der Bremsanlage zu ermöglichen. Dafür ist es notwendig genug Kühlluft zu den Radbremsen hin und die erwärmte Luft wieder weg zu befördern.

Durch eine diffusorähnliche Kontur der Radschalen wird die Unterbodenströmung aufgerichtet und zu den Brems scheiben hin geführt. Dieser Effekt ist in Abbildung 5.26 am linken Vorderrad dargestellt.

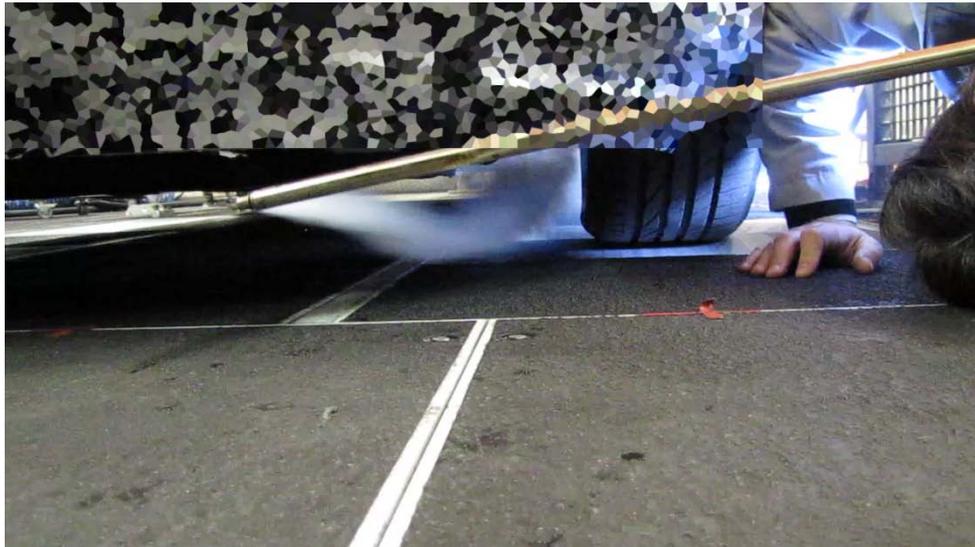


Abbildung 5.26: Anströmung der vorderen linken Radbremse

Durch die ungehinderte Zuströmung der Kühlluft zu den Radbremsen werden die Maximaltemperaturen der Brems scheiben und Bremsflüssigkeiten begrenzt. Ebenso wichtig wie eine gute Zuströmung ist das Abströmen der erwärmten Luft von den Radbremsen. Dies geschieht einerseits wieder am Unterboden des Fahrzeugs und andererseits strömt die Luft an den Bremsen vorbei durch die Felgen an die Außenseite des Fahrzeugs. Der durch den seitlich an den Rädern vorbeiströmenden Fahrtwind erzeugte Unterdruck an den Felgen wirkt unterstützend und saugt zusätzlich die erwärmte Luft aus den Radkästen. Bei der Qualität der Felgendurchströmung spielt die Größe und Form der Felge eine maßgebliche Rolle. In Abbildung 5.27 ist die Saugwirkung bei stehendem Rad mit Standardkonfiguration zu sehen. Aus vorher genannten Gründen ist die Saugwirkung bei der kleineren 17“ Stahlfelge mit montierten Radkappen, welche einen Großteil der Felgenöffnungen bedecken, am geringsten. Die Standardkonfiguration weist durch diese Bedingungen auch die höheren Maximaltemperaturen der Bremsanlage auf.



Abbildung 5.27: Saugwirkung in den Radkästen (Felge Standardkonfiguration)

Die Durchströmung der Radbremse und der Felgen ist bei den Vergleichskonfigurationen, bedingt durch die größeren Öffnungen in der Felge, besser. Die Asymmetrie der Vergleichskonfiguration F1 bewirkt jedoch möglicherweise eine unterschiedliche Felgenströmung an linker und rechter Seite. Dieser mögliche Effekt wird im nächsten Kapitel genau untersucht.

Das Ergebnis der Strömungsuntersuchungen an den Radbremsen ist sehr zufriedenstellend, da die verbauten Kühlmaßnahmen wie ein geschlossener Unterboden im Motorbereich und geänderte Radschalen die gewünschte Wirkung erzielen und eine ausreichende Kühlluftströmung an den vorderen Bremsen bewirken.

5.4.3 Anströmung 18" Leichtmetallfelge symmetrisch und asymmetrisch

Aufgrund des großen Unterschieds zwischen links und rechts der Bremsflüssigkeitstemperaturen in Versuch V7 (in Abbildung 5.7 zu sehen) wird eine genauere Strömungsuntersuchung an den Felgen durchgeführt. Hauptaugenmerk liegt auf der durch die Drehung der Felgen generierten Strömung. Die verwendete Felge aus Versuch V7 weist asymmetrische Öffnungen auf (siehe Abbildung 3.4). Zusätzlich sind die Felgenspeichen rotorähnlich ausgebildet, was eine Drehrichtungsabhängigkeit der entstehenden Strömung mit sich bringt. Aus Versuch V7 ist ersichtlich, dass die Temperaturen der linken vorderen Radbremse viel geringer sind als die der rechten vorderen Radbremse. Dieser Umstand bedingt eine bessere Kühlung und somit eine bessere Felgenströmung an der linken Radbremse. In Abbildung 5.28 ist die Strömung durch die asymmetrische Felge des linken Vorderrads zu sehen. Das Rad dreht sich dabei mit einer Drehzahl von $172,2 \text{ min}^{-1}$ was einer Fahrtgeschwindigkeit von 22 km/h entspricht. Die Geschwindigkeit des Fahrtwinds beträgt ebenfalls 22 km/h . Die Strömung führt sauber durch die Felge an der Bremsscheibe und dem Bremssattel vorbei. Die, durch das Profil der Felgenspeichen entstehende, Saugwirkung unterstützt die Durchströmung der Felgen zusätzlich und führt zu einer besseren Kühlung.

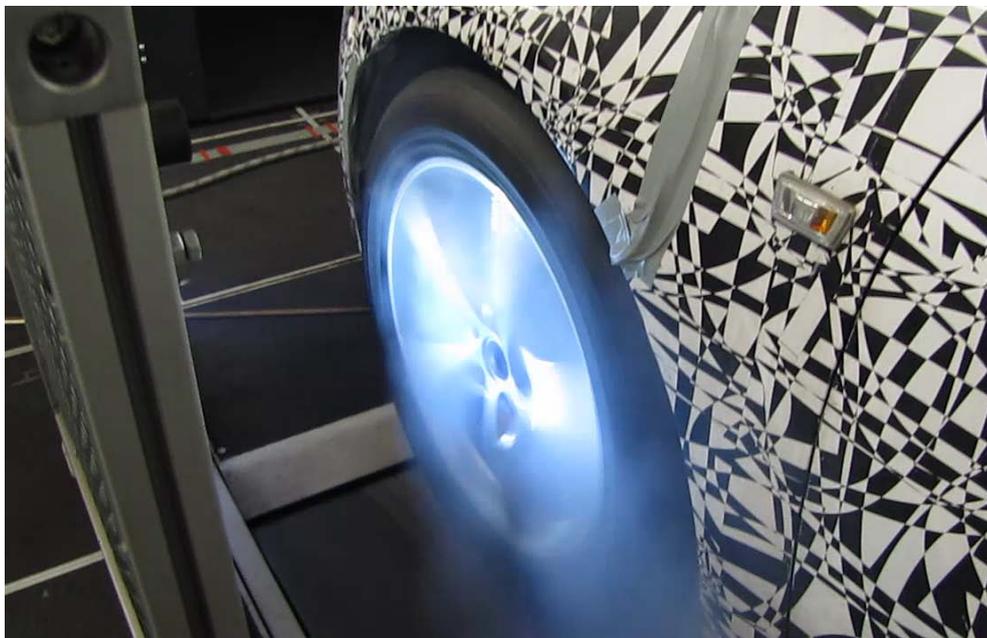


Abbildung 5.28: Felgenströmung asymmetrische Felge F1 links

Die Durchströmung der Felgen auf der rechten Seite des Fahrzeugs ist in Abbildung 5.29 zu sehen. Durch die Drehung der Felge in die entgegengesetzte Richtung wie links vermindert sich die Saugwirkung des Felgenprofils. Es ist erkennbar, dass die Kühlluft welche vom Unterboden zu Radbremse strömt nicht mehr ganz durch die Felge geht, sondern eher durch den Spalt zwischen Reifen und Radhaus austritt. Dadurch wird die erwärmte Luft nicht so schnell von der Bremsanlage wegtransportiert. Dies bedingt eine etwas schlechtere Kühlwirkung an der rechten vorderen Radbremse, was sich auch mit den Ergebnissen der Temperaturmessungen aus Versuch V7 deckt.

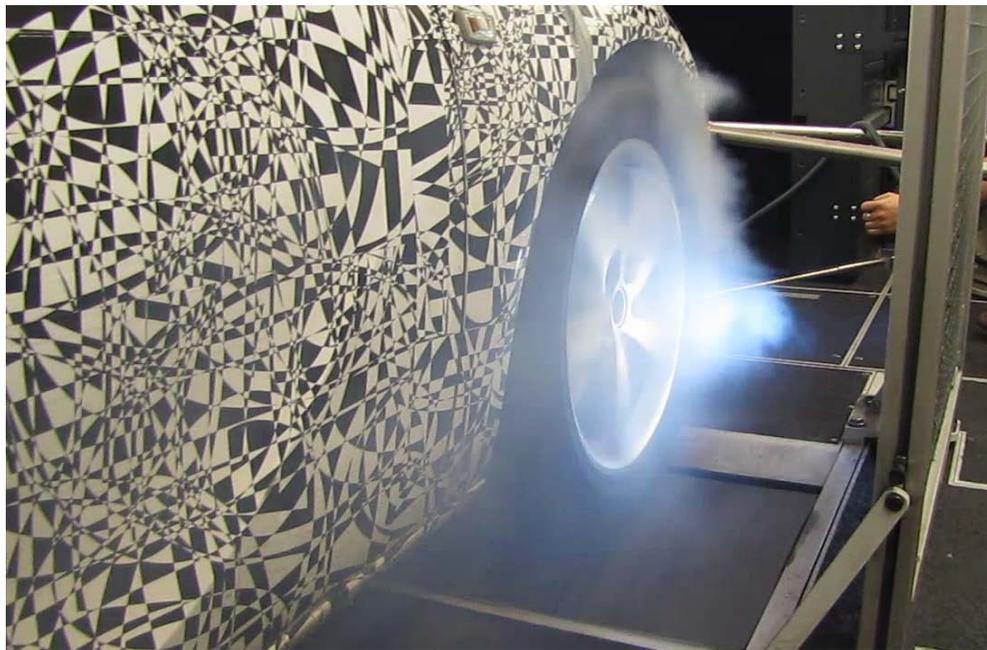


Abbildung 5.29: Felgenströmung asymmetrische Felge F1 rechts

Um die unterschiedlichen Strömungsbedingungen an linker und rechter Seite zu vermeiden wird als zusätzliche Vergleichskonfiguration die symmetrische Felge F2 (Abbildung 3.5) verwendet. Durch die symmetrische Form der Felgenöffnungen wird eine Abhängigkeit der Strömung durch die Felge von der Drehrichtung und somit von der Montage-seite umgangen. In Abbildung 5.30 ist die Strömungssituation der Vergleichskonfiguration F2 zu sehen. Die Strömung verläuft sauber vom Unterboden, an der Bremsanlage vorbei, durch die Felge zur seitlichen Fahrtwindströmung.



Abbildung 5.30: Felgenströmung symmetrische Felge F2 links

Die auftretende Kühlluftströmung an den vorderen Radbremzen ist durch die Symmetrie der Felgen links und rechts gleich ausgeprägt. Dies bedingt bei gleichem Wärmeeintrag in die Bremsanlage auf der linken sowie der rechten Seite eine geringe Spreizung der Bremsflüssigkeitstemperaturen. Diese Erkenntnis geht mit den Messergebnissen der Temperaturen aus Versuch V8 einher (siehe Abbildung 5.8).

6 Zusammenfassung

Grundlegendes Qualitätskriterium einer Bremsanlage ist das Erfüllen vorgegebener thermischer Grenzwerte. Das Einhalten dieser Werte werden in, meist sehr zeit- und kostenintensiven, Erprobungen nachgewiesen. Um Kosten zu sparen und somit einen Vorteil im Wettbewerb zu erzielen werden Realerprobungen mit gewissen Einschränkungen virtuell oder auf Prüfständen durchgeführt. Der Versuch, mit dieser Arbeit, eine ausreichend genaue Korrelation zwischen der Erprobung unter realen Bedingungen und Prüfstandsbedingungen herzustellen ist ein Schritt in diese Richtung. Als eines der KO-Kriterien für die thermale Belastung von Bremsen gilt die Schleichabfahrt auf der Großglockner-Hochalpenstrasse. Aus diesem Grund und aufgrund der großen Anzahl von Referenzmessdaten wurde dieses Manöver als Grundlage für die Untersuchungen am Prüfstand herangezogen.

Als generell zu erfüllendes Kriterium, welchem auch gesetzliche Vorschriften im Rahmen der §57a Überprüfung unterliegen, kann die Temperatur der Bremsflüssigkeit mit 180°C als Maximalwert in der Nachheizphase der Erprobung genannt werden.

Um eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Messdaten zwischen Referenz und Prüfstandsversuch herzustellen werden diese in einem iterativen Prozess schrittweise verbessert. Ausgehend von einer Ist-Stands Erhebung werden definierte Parameter am Prüfstand geändert und die Auswirkungen dokumentiert. Nach vier Messungen bzw. drei Iterationsschritten zeigen die Messergebnisse eine ausreichend genaue Korrelation. Zur Festigung der Richtigkeit der Ergebnisse folgen zwei Messungen mit den gleichen Parametern und es wird somit ein Nachweis für die Reproduzierbarkeit der Messungen geliefert. Um die Ergebnisse nicht nur auf einen definierten Zustand hin zu trimmen werden zusätzliche Versuche mit geänderten Fahrzeugkonfigurationen gefahren. Die Vergleichskonfigurationen unterscheiden sich hauptsächlich in der Ausführung und der Größe der Räder. Es werden zwei verschiedene Räder mit 18“ Leichtmetallfelgen mit asymmetrischen (Konfiguration F1) und symmetrischen (Konfiguration F2) Felgenöffnungen eingesetzt. Als begleitende Messungen wird die Strömung am Prüfstand und im Bereich der vorderen Radbremsen beobachtet. Als Methode zur Beurteilung der Strömungssituation wird die Luftströmung durch den Einsatz einer Rauchlanze visualisiert.

Die Ergebnisse der Prüfstandsmessungen weisen gute Korrelationen mit den Realversuchen auf. Die gemessenen Temperaturen am Prüfstand sind tendenziell etwas höher als die Referenztemperaturen. Diese Tatsache ist auf die konstante Umgebungstemperatur am Prüfstand von 20°C, welche um $\Delta T=11^\circ\text{C}$ höher als jene am Großglockner ist, zurückzuführen.

Dieser Umstand ist nicht störend da am Prüfstand die Ergebnisse prinzipiell schlechter, das bedeutet mehr Sicherheit in der Realerprobung, ausfallen sollen.

Die Beurteilung der Strömungsverhältnisse mittels einer Rauchlanze zeigte, dass durch die gegenüber dem Fahrzeug geringere Breite des Fahrtwindgebläses die Strömung nicht sauber um das Fahrzeug geleitet wird, sondern schon vorher seitlich abströmt. Um dieser Strömung entgegenzuwirken werden zusätzliche, seitliche Leitbleche montiert. Durch diese Maßnahmen wird die Strömung kanalisiert und legt sich sauber an die Fahrzeugseiten an. Des Weiteren konnte durch die Strömungsvisualisierung die Drehrichtungsabhängigkeit der 18“ Leichtmetallfelgen mit asymmetrischen Speichen nachgewiesen werden. Diese Erkenntnis ist von großer Bedeutung, da nun bei zukünftigen Bremsmessungen am Prüfstand darauf geachtet werden kann, dass Felgen mit symmetrischen Öffnungen verbaut sind. Durch diese Maßnahme kann davon ausgegangen werden, dass links und rechts die gleichen bzw. sehr ähnliche Strömungsverhältnisse an den Radbremsen herrschen.

Diese Arbeit zeigt einen möglichen Weg auf wie mittels iterativer Messungen ein vorhandener Prüfstand zum Zweck der Durchführung von bremstechnischen Versuchen adaptiert werden kann. Die Ergebnisse der Messung stellen den vorhandenen Rollenprüfstand der Firma *Magna Steyr Fahrzeugtechnik* als durch aus geeignet für die thermische Bremserprobung dar. Der damit entstandene Vorteil, dass nur mehr einige wenige Erprobungsfahrten im realen Umfeld für die endgültige Absicherung einer neuen Bremsanlage notwendig sind kann die Entwicklungszeit und damit die Entwicklungskosten stark minimieren.

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus dieser Arbeit könnten in Zukunft nicht nur Bergabfahrten simuliert werden, sondern auch weitere thermische Versuche oder Bremsgeräuschuntersuchungen durchgeführt werden. Speziell für die Untersuchung von Bremsgeräuschen wie z.B. Knarzen beim Anfahren oder einfach eine allgemeine Bremsgeräuschsuche eignet sich der Rollenprüfstand hervorragend, da durch die Vollklimatisierung des Prüfraums verschiedene Witterungsszenarien bezüglich Temperatur und Luftfeuchtigkeit nachgebildet werden können. Der Luftfeuchtigkeit ist hier besondere Bedeutung zu zumessen. Als weitere thermische Bremserprobungen könnte das Aufheiz- und Abkühlverhalten der Bremsanlage in Hochgeschwindigkeits-Fading Tests analysiert werden.

Ebenso ist es denkbar den Prüfstand für die Untersuchung von Schwingungsphänomenen wie *Brake Judder* (Bremsenruckeln) zu verwenden. *Judder* ist das Ergebnis von *Hotspots* (Hitzefflecken) auf der Bremsscheibe, die anschließend das Bremssystem drehzahlabhängig, und somit fahrgeschwindigkeitsabhängig, zum Schwingen anregen.

Es steht also eine breite Palette von möglichen Versuchen im Rahmen der Bremserprobung zur Verfügung, welche durch den Einsatz eines Prüfstands durchaus Potential in der Steigerung ihrer Effizienz besitzen.

Literaturverzeichnis

- [1] Isermann R., Hrsg.: *Fahrdynamik-Regelung*, Vieweg, 2006.
- [2] Winner H., Hakuli S.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* 1.Auflage, Wolf G., Hrsg., Vieweg + Teubner, 2009.
- [3] Breuer B.: *Bremsenhandbuch-Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik*, 3.Auflage, Vieweg, 2006.
- [4] Hirschberg W., Waser H.: *Fahrzeugdynamik*, Vorlesungsskriptum TUGraz, 2011.
- [5] Tonchev A.: *Co-Simulation von Fahrzeugbremsen unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens*, TU Graz, Dissertation, 2008.
- [6] Hettegger M.: *Simulation und Validierung des Abkühlverhaltens einer Bremsscheibe unter Berücksichtigung der gesamten Radgeometrie*, TU Graz, Diplomarbeit, 2008.
- [7] Burckhardt M.: *Fahrwerktechnik-Bremssynamik und PKW.Bremsanlagen*, 1.Auflage, V. F. Kraftfahrzeugtechnik, Hrsg., Prof. Dipl.-Ing. Jörnßen Reimpell, 1991.
- [8] UN-ECE: *ECE-Regelung 13: Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung von fahrzeugen der Klassen M, N und O hinsichtlich der Bremse*, Änderung 09, Ergänzung 9 vom 13.10.2004
- [9] Reif K., Hrsg.: *Bosch-Bremsen und Bremsregelsysteme*, Vieweg und Teubner, 2010.
- [10] „Continental Teves AG & Co. oHG,“ Verfügbar unter: www.ate.de. [Zugriff am 17. 02. 2012].
- [11] Allgeier R.: *Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Bremsenquietschen*, Düsseldorf: VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 481, 2002.
- [12] Archiv Institut für Fahrzeugtechnik FTG, Technische Universität Graz, 2012.
- [13] Parthier R.: *Messtechnik*, 3.Auflage, Wiesbaden: Vieweg, 2006.
- [14] Reif K., Hrsg.: *Bosch-Autoelektrik und Autoelektronik*, 6.Auflage, Vieweg, 2011.
- [15] Mühl T.: *Einführung in die elektrische Messtechnik*, 3.Auflage, Wiesbaden: Vieweg, 2008.
- [16] Nitsche W.: *Strömungsmesstechnik*, 2.Auflage, Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
- [17] „Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart,“ Verfügbar unter: www.fkfs.de [Zugriff am 01. 03. 2012].
- [18] „Archiv Großglockner Hochalpenstraßen AG,“ Verfügbar unter www.grossglockner.at [Zugriff am 05. 03. 2012].
- [19] „Maha AIP Ges.m.b.H Automotive Industry Products,“ Verfügbar unter: www.maha-aip.de/german/ecdm48l.aspx. [Zugriff am 26. 03. 2012].
- [20] „National Instruments,“ Verfügbar unter: www.ni.com/diadem [Zugriff am 26. 03. 2012].
- [21] Körner M., Decker F., Dreyer M., Radespiel R.: *Untersuchung der Bremsscheibeströmung an Einem Windkanalmodell des VW Phaeton mit durchsichtigem Vorderrad* in: *Fortschritt-Berichte VDI der Reihe 12-Bd. 657/27 Internationales μ -Symposium*, Düsseldorf, 2007.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Hardware in the loop [4].....	4
Abbildung 2.1: Klotzbremse an einem Fuhrwerk [3].....	6
Abbildung 2.2: Kräfte und Abstände am Fahrzeug.....	8
Abbildung 2.3: Diagramm der Bremskraftverteilung [7].....	11
Abbildung 2.4: Energiebilanz einer innenbelüfteten Bremsscheibe [3].....	13
Abbildung 2.5: Bremskreisaufteilung nach DIN 74000 [9].....	14
Abbildung 2.6: Simplex-Trommelbremse m. integrierter Feststellbremse [9].....	15
Abbildung 2.7: Scheibenbremse m. Faustsattel (Schnittbild) [10].....	17
Abbildung 2.8: ATE-Power Disc [10].....	17
Abbildung 2.9: Übersicht Bremssattelausführungen [9].....	18
Abbildung 2.10: Bremsbelag für Scheibenbremsen [10].....	20
Abbildung 2.11: Aufbau eines Bremsbelags (Schnittbild) [10].....	21
Abbildung 2.12: Einteilung der Schwingungen und Geräusche beim Bremsen [11].....	23
Abbildung 2.13: Schwungmassen-Bremsenprüfstand SMP mit Scheibenbremse [12].....	25
Abbildung 2.14: Gesamtfahrzeug-Rollenprüfstand [3].....	26
Abbildung 2.15: analoges Messsignal.....	28
Abbildung 2.16: Kennlinien verschiedener Thermopaare [14].....	29
Abbildung 2.17: schematischer Messaufbau eines Thermoelements [14].....	29
Abbildung 2.18: Druckmessprinzipien [14].....	30
Abbildung 2.19: wegmessende Beschleunigungssensoren [14].....	31
Abbildung 2.20: Schleifpotentiometer [14].....	32
Abbildung 2.21: Digitales Messsignal.....	33
Abbildung 2.22: Blockschaltbild eines allgemeinen digitalen Messsystems [15].....	33
Abbildung 2.23: Strömungsvisualisierung mit Rauchlanze [17].....	35
Abbildung 3.1: Panorama Großglockner-Hochalpenstraße [18].....	36
Abbildung 3.2: Höhenprofil der Großglockner-Hochalpenstraße [18].....	37
Abbildung 3.3: Standardkonfiguration 17“-Rad.....	39
Abbildung 3.4: Vergleichskonfiguration F1 18“-Rad 5 Speichen asymmetrische Öffnungen.....	40
Abbildung 3.5: Vergleichskonfiguration F2 18“-Rad 7 Speichen symmetrische Öffnungen.....	40
Abbildung 3.6: GAAZ Rollenprüfstand (MSF).....	42
Abbildung 3.7: GPS-Rohdaten Höhenprofil.....	44
Abbildung 3.8: GPS-Höhenprofile Gegenüberstellung Rohdaten/bearbeitete Daten.....	46
Abbildung 3.9: Steigung der Verbindungsgeraden zweier Datenpunkte.....	47
Abbildung 3.10: Fahrerleitsystem mit Zusatzinformationen.....	48
Abbildung 3.11: Schematischer Aufbau der Bremsmesstechnik.....	49
Abbildung 3.12: Verbautes Messsystem im Fahrzeug.....	50
Abbildung 3.13: Messstellen am Fahrzeug.....	51
Abbildung 4.1: Fahrzeug mit Hitzeblechen in Nachheizphase.....	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.2: Messablauf mit iterativem Prozess.....	54
Abbildung 4.3: Fahrtwindgebläse.....	56
Abbildung 4.4: SAFEX Nebelsonde NS2.....	57
Abbildung 4.5: Bergabfahrtsdiagramm.....	59
Abbildung 4.6: Kräfte am gebremsten Rad.....	61
Abbildung 4.7: Temperaturspreizung S der Referenzmessungen.....	64
Abbildung 4.8: Differenz der Umgebungstemperaturen.....	65
Abbildung 4.9: Gemittelte Referenztemperatur mit zugehörigen Grenzwerten.....	65
Abbildung 4.10: Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Prüfstand und Realmessung.....	66
Abbildung 5.1: Temperaturverläufe der Referenzmessung R1.....	70
Abbildung 5.2: Temperaturverläufe der Referenzmessung R2.....	70
Abbildung 5.3: Temperaturverläufe der Referenzmessung R3.....	72
Abbildung 5.4: Iterationsschritte.....	75
Abbildung 5.5: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V1.....	76
Abbildung 5.6: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V4.....	77
Abbildung 5.7: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V7.....	78
Abbildung 5.8: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V8.....	79
Abbildung 5.9: Temperaturdifferenz Bremsscheibe links/vorne V1 bis V4.....	81
Abbildung 5.10: Temperaturdifferenz Bremsscheibe rechts/vorne V1 bis V4.....	81
Abbildung 5.11: Temperaturdifferenz Bremsscheibe links/vorne V7 und V8.....	82
Abbildung 5.12: Temperaturdifferenz Bremsscheibe rechts/vorne V7 und V8.....	82
Abbildung 5.13: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit links/vorne V1 bis V4.....	83
Abbildung 5.14: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit rechts/vorne V1 bis V4.....	84
Abbildung 5.15: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit links/vorne V7 und V8.....	84
Abbildung 5.16: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit rechts/vorne V7 und V8.....	84
Abbildung 5.17: Temperaturdifferenz Bremsscheiben V5-V6.....	85
Abbildung 5.18: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit V5-V6.....	86
Abbildung 5.19: Gegenüberstellung der Verzögerungsenergien.....	87
Abbildung 5.20: Zusammensetzung der Verzögerungsenergie am Prüfstand.....	88
Abbildung 5.21: Verwirbelungen am Düsenaustritt.....	89
Abbildung 5.22: Gebläseströmung mit zwei Leitblechen.....	90
Abbildung 5.23: Verlustströmung durch Schutzgitter.....	91
Abbildung 5.24: Gebläseströmung mit vier Leitblechen.....	91
Abbildung 5.25: Strömungsbehinderung durch Fahrzeugfixierung (Draufsicht).....	92
Abbildung 5.26: Anströmung der vorderen linken Radbremse.....	93
Abbildung 5.27: Saugwirkung in den Radkästen (Felge Standardkonfiguration).....	94
Abbildung 5.28: Felgenströmung asymmetrische Felge F1 links.....	95
Abbildung 5.29: Felgenströmung asymmetrische Felge F1 rechts.....	96
Abbildung 5.30: Felgenströmung symmetrische Felge F2 links.....	97

Abbildung A-1: Leichtmetallfelge 18" mit symmetrischen Öffnungen (Realerprobung) V
Abbildung A-2: Bremsleitungen am HBZ mit Kurzschlussleitung (1)..... V
Abbildung A-3: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V2..... VI
Abbildung A-4: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V3..... VI
Abbildung A-5: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V5..... VII
Abbildung A-6: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V6..... VII
Abbildung A-7: Temperaturdifferenz Brems Scheibe links/hinten V1 bis V4 VIII
Abbildung A-8: Temperaturdifferenz Brems Scheibe rechts/hinten V1 bis V4 VIII
Abbildung A-9: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit rechts/hinten V1 bis V4 IX
Abbildung A-10: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit links/hinten V1 bis V4 IX
Abbildung A-11: Temperaturdifferenz Brems Scheibe rechts/hinten V7 und V8 X
Abbildung A-12: Temperaturdifferenz Brems Scheibe links/hinten V7 und V8 X
Abbildung A-13: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit links/hinten V7 und V8 XI
Abbildung A-14: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit rechts/hinten V7 und V8 XI

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Eigenschaftsvergleich C/SiC und GG-20 [3] 3
Tabelle 2.1: Eigenschaften von Reibbelägen [3]..... 21
Tabelle 3.1: Parameter der Standardkonfiguration Fahrzeug..... 39
Tabelle 3.2: Parameter der Vergleichskonfigurationen Fahrzeug 41
Tabelle 3.3: technische Daten GAAZ Rollenprüfstand mit Peripherie 43
Tabelle 3.4: Messstellen und zugehörige Messgrößen 51
Tabelle 5.1: Übersicht der Referenzmessungen 68
Tabelle 5.2: Ergebnisse der Referenzmessungen..... 69
Tabelle 5.3: Grenzwertband und Zielwerte für Bergfahrt Standardkonfiguration..... 71
Tabelle 5.4: Grenzwertband und Zielwerte für Bergfahrt Vergleichskonfiguration..... 73
Tabelle 5.5: Übersicht der Prüfstandsversuche..... 73
Tabelle 5.6: Prüfstandsparameter 74
Tabelle 5.7: Ergebnisse der Prüfstandsmessungen 75

Anhang



Abbildung A-1: Leichtmetallfelge 18" mit symmetrischen Öffnungen (Realerprobung)



Abbildung A-2: Bremsleitungen am HBZ mit Kurzschlussleitung (1)

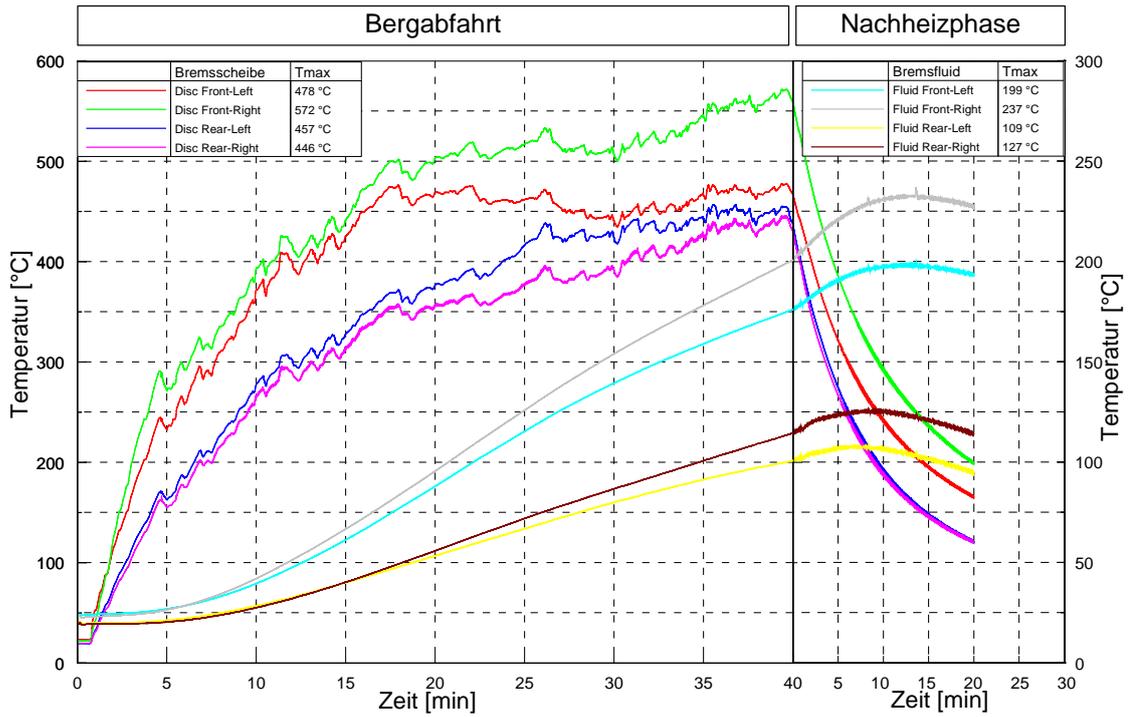


Abbildung A-3: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V2

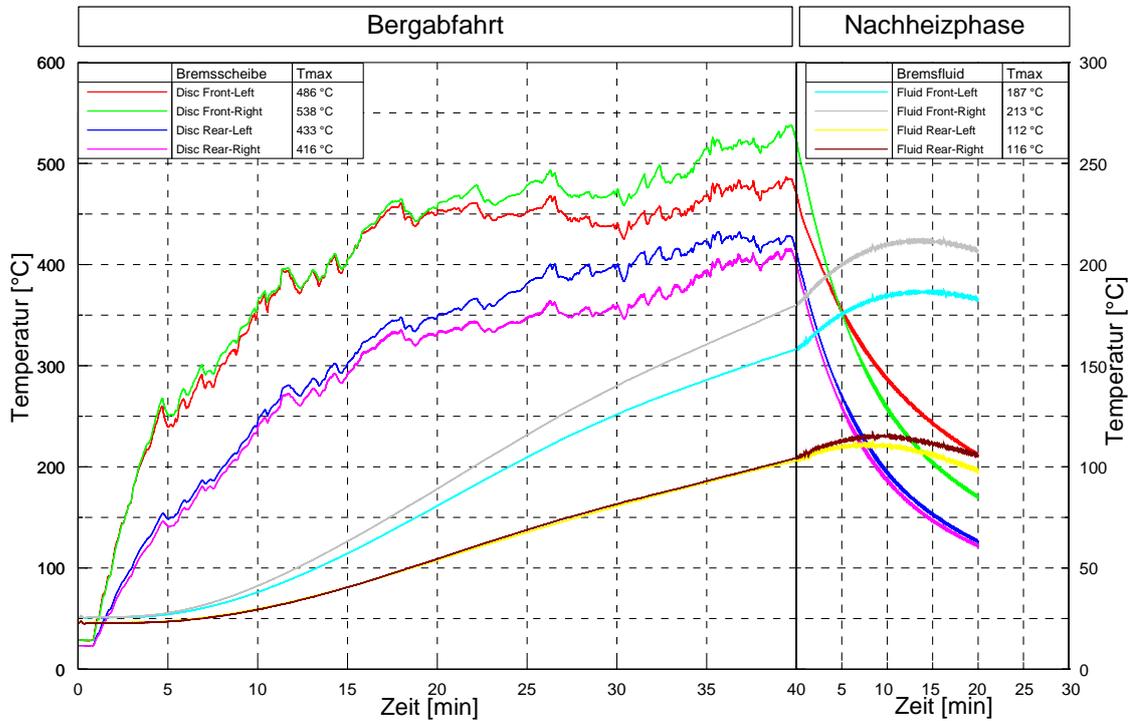


Abbildung A-4: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V3

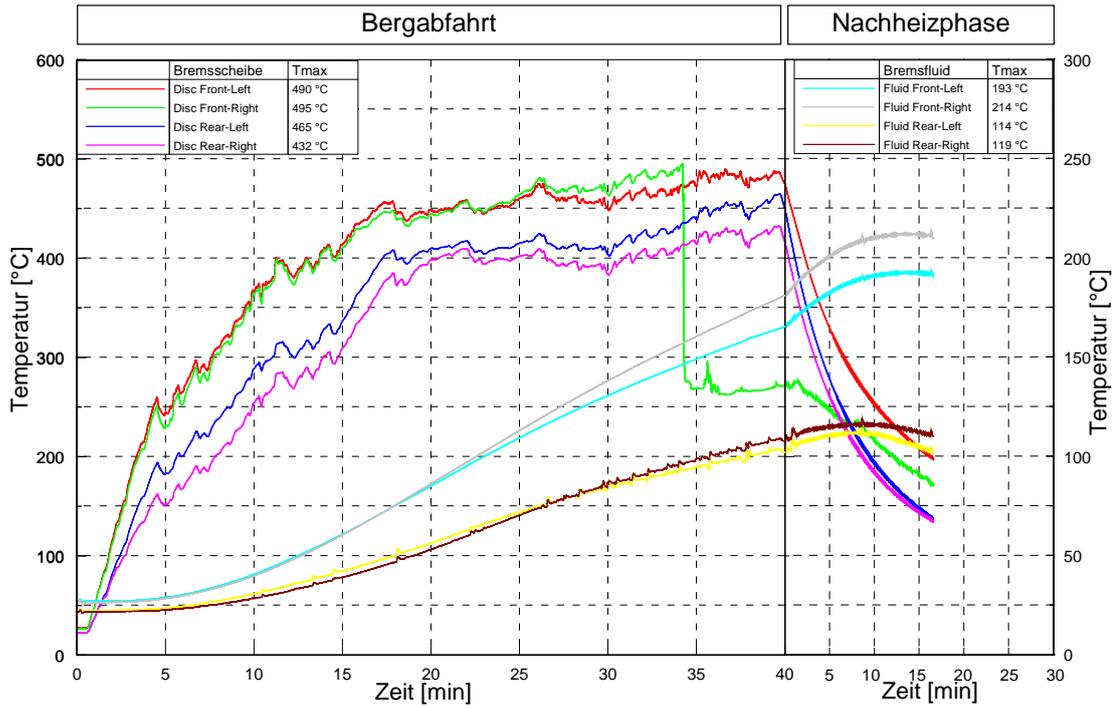


Abbildung A-5: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V5

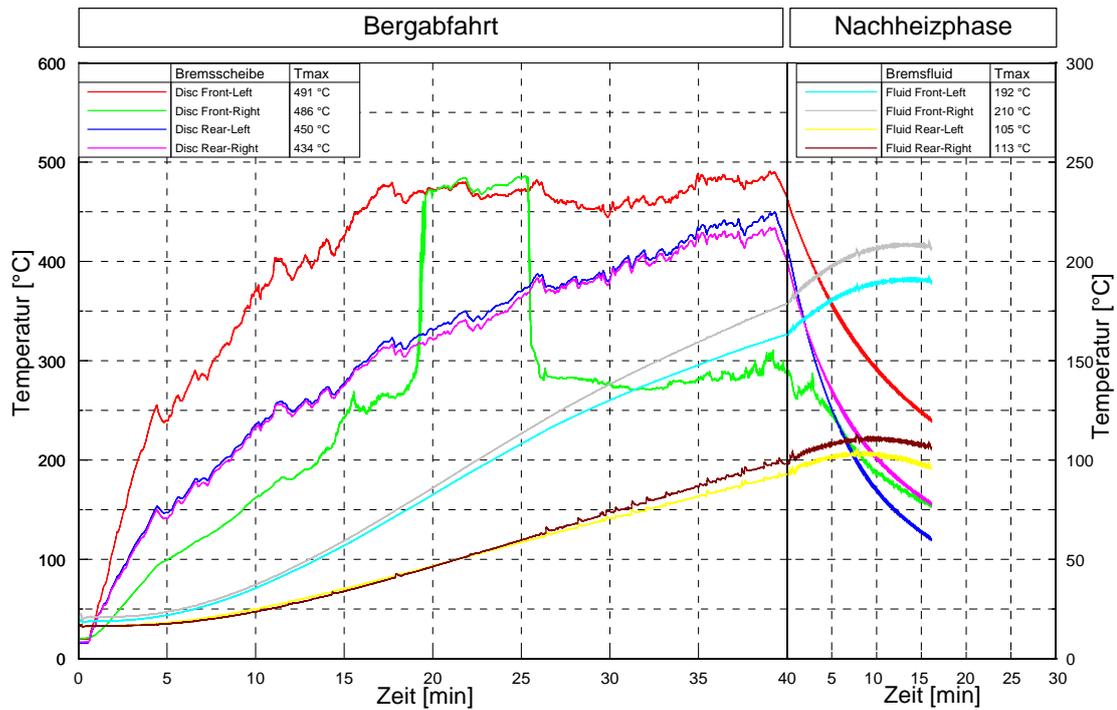


Abbildung A-6: Temperaturverläufe der Versuchsmessung V6

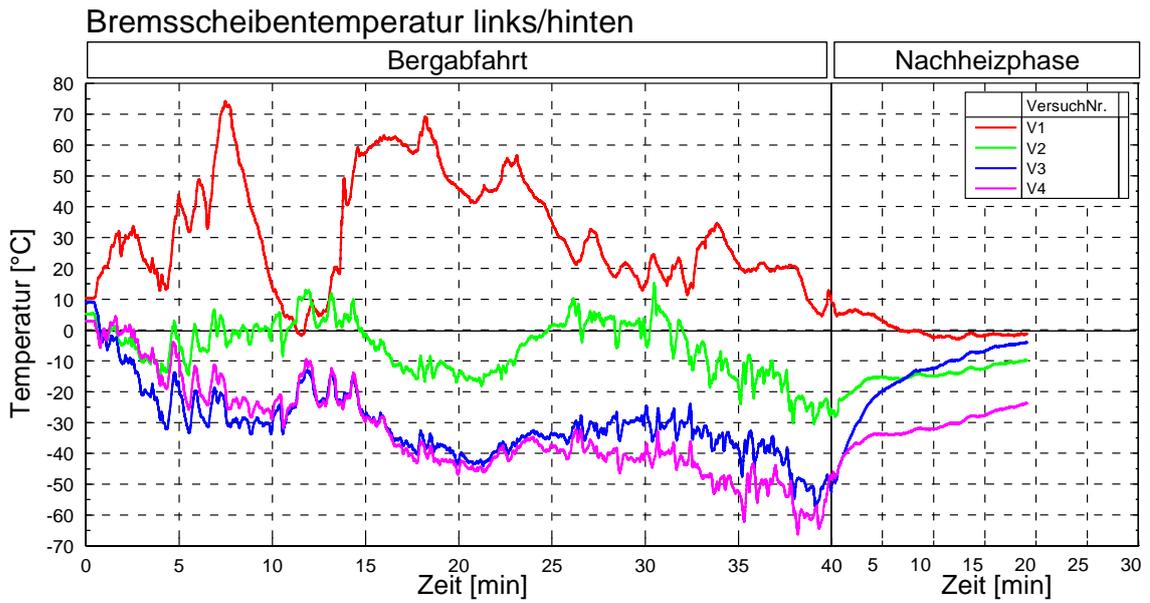


Abbildung A-7: Temperaturdifferenz Bremsscheibe links/hinten V1 bis V4

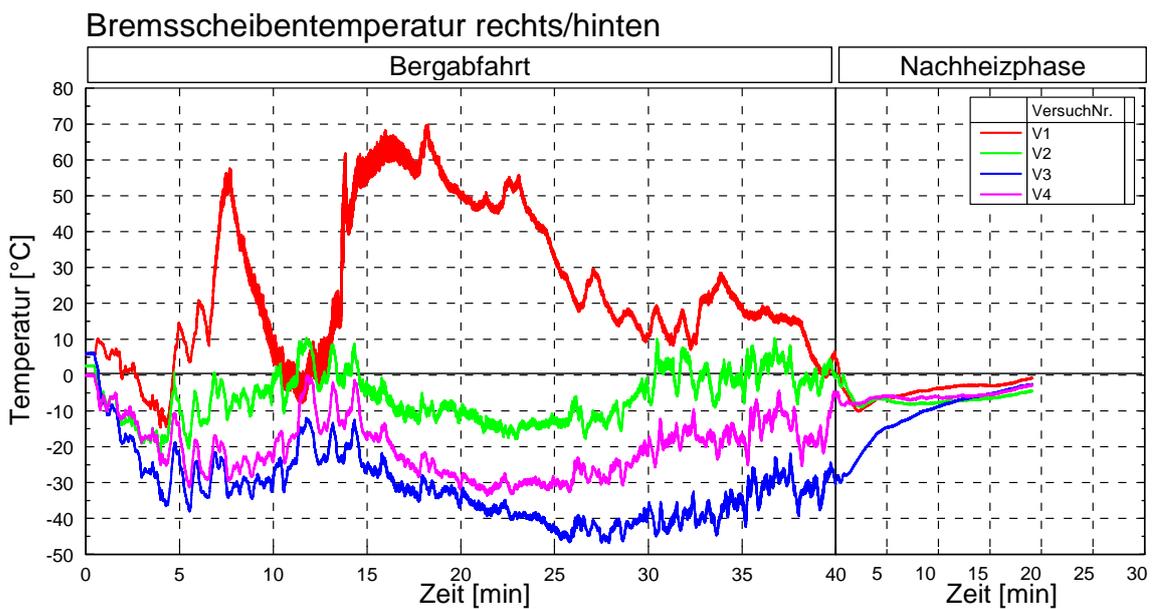


Abbildung A-8: Temperaturdifferenz Bremsscheibe rechts/hinten V1 bis V4

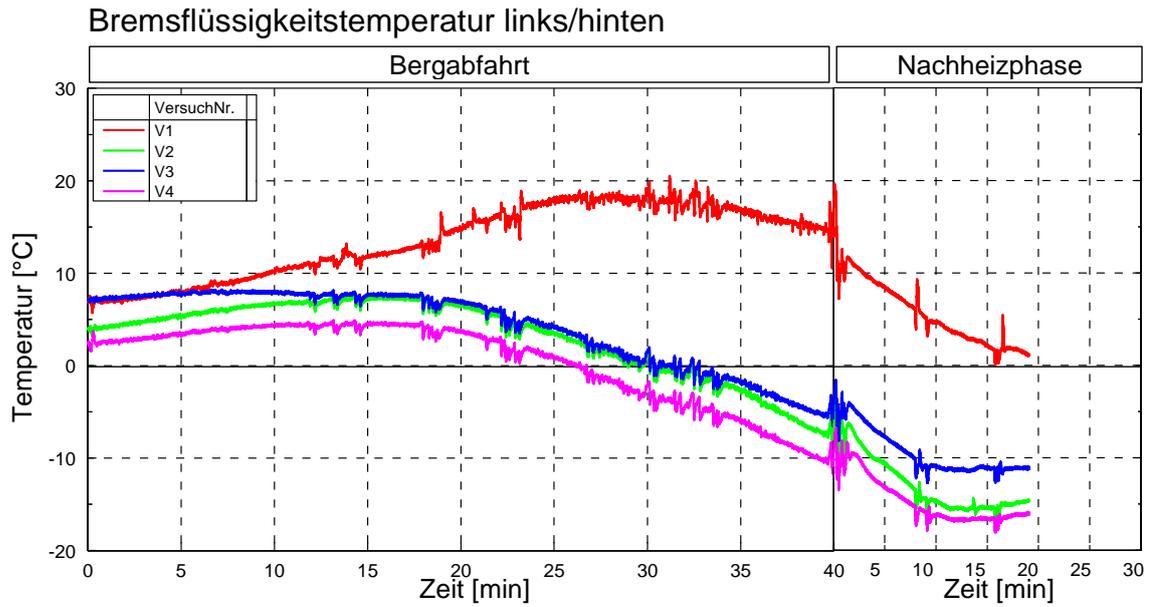


Abbildung A-10: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit links/hinten V1 bis V4

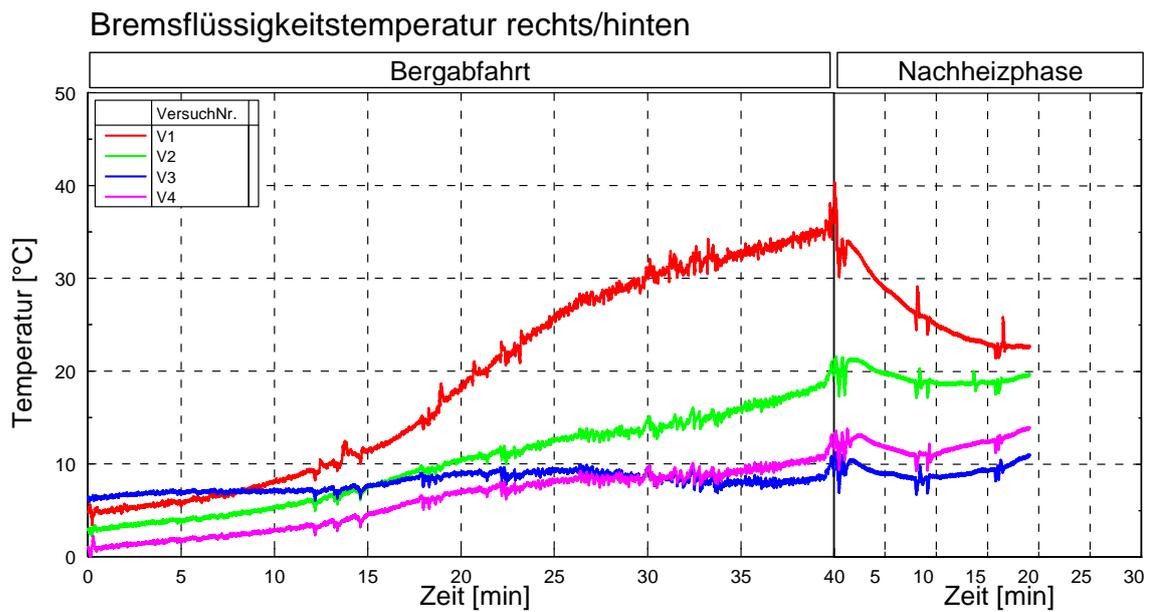


Abbildung A-9: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit rechts/hinten V1 bis V4

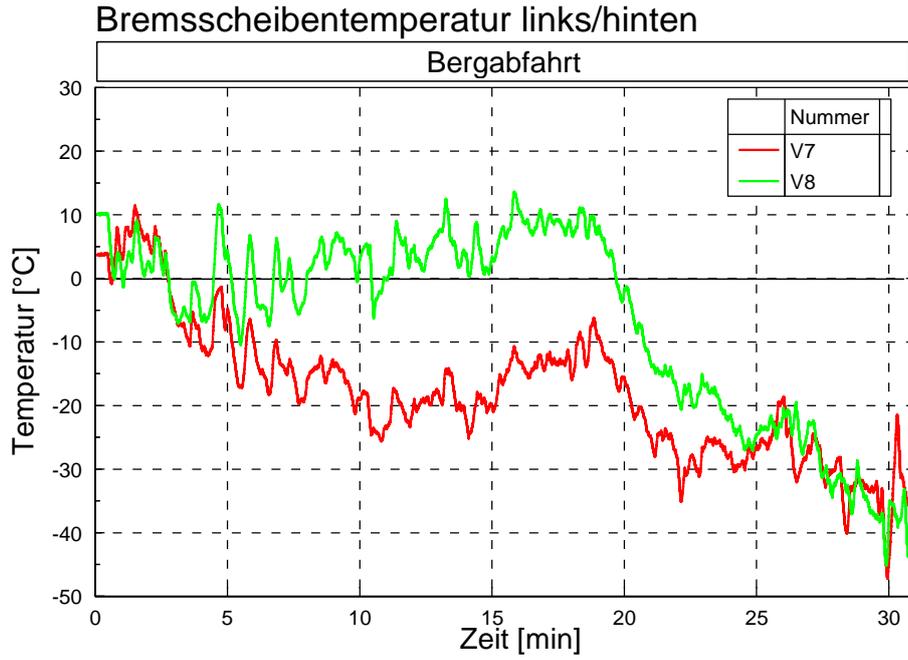


Abbildung A-12: Temperaturdifferenz Bremsscheibe links/hinten V7 und V8

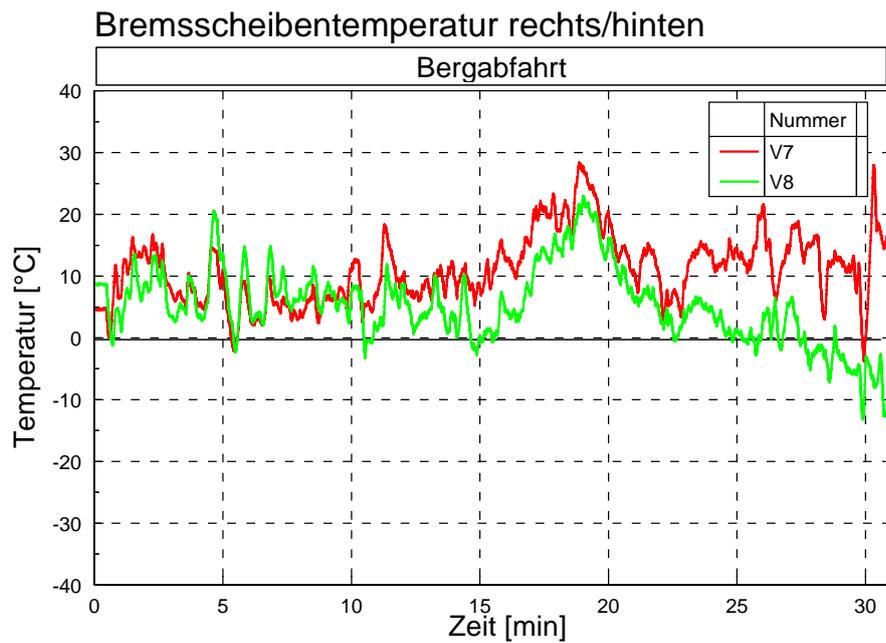


Abbildung A-11: Temperaturdifferenz Bremsscheibe rechts/hinten V7 und V8

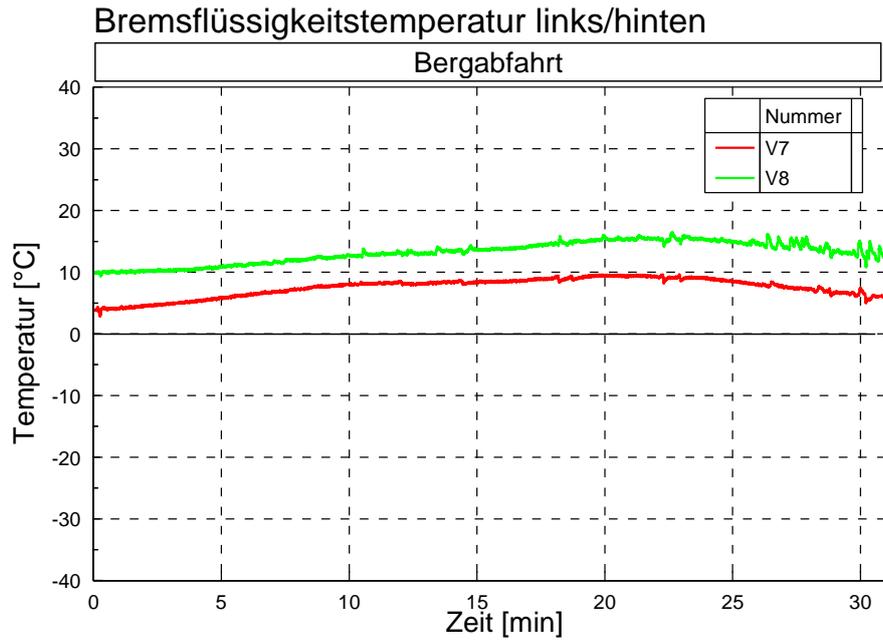


Abbildung A-13: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit links/hinten V7 und V8

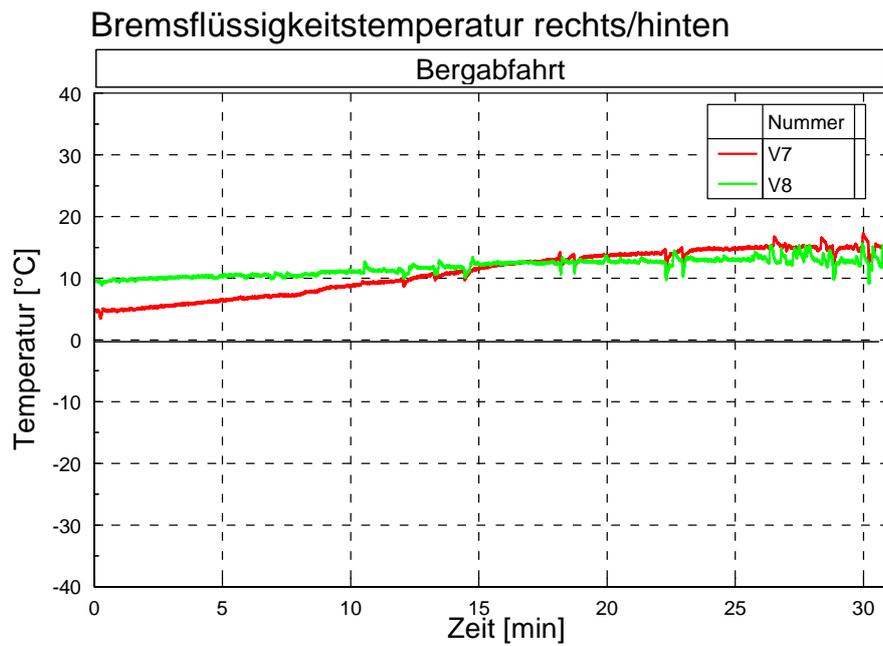


Abbildung A-14: Temperaturdifferenz Bremsflüssigkeit rechts/hinten V7 und V8