



Markus Wallner, BSc

Berührungsloses Temperaturmessen an Schienenfahrzeugbremsen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium
Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing.Dr.mont. Martin Leitner, MBA
Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik

Zweitbetreuer/in

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Brunnhofer
Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik
Dipl.-Ing. Anna Poms, BSc
Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik

Graz, Mai 2024

Vorwort

Zu Beginn dieser Arbeit möchte ich ein paar Sätze zu meinem Studium zu Papier bringen. Eine lange Zeit, die einen definitiv prägt. Über zwanzig Jahre nach meinem ersten Schultag im Jahr 2003 komme ich so zum vorläufigen Ende der Ausbildungslaufbahn, zumindest der formalen. Denn ausgelernt hat man nie, veränderte Umstände erfordern immer neue Lösungen.

Als ich 2016 das Maschinenbaustudium an der TU Graz begonnen habe, hatte ich gerade am Anfang nicht immer daran geglaubt, das Studium auch zu schaffen. Denn eines sei hier erwähnt: Die Realgymnasium-Matura als Vorbereitung für das Studium ist definitiv nicht ausreichend. Das Gymnasium ermutigt einen nicht, sich mehr anzustrengen als notwendig. Als jemand, der nie viel für die Schule tun musste, war die vorgelebte Überheblichkeit sicher kontraproduktiv.

Umso größer war die Lernkurve auf der Universität. Und dabei war sie definitiv am größten, wenn eine Prüfung einmal nicht positiv absolviert wurde. Aus diesem Grund bin ich der TU-Graz sehr dankbar für die ausgezeichnete und fordernde Ausbildung!

Ich möchte hier auch ein großes Danke an alle Gesprächspartner und Unterstützer ausrichten, die mir sowohl bei dieser Arbeit, als auch während meinem gesamten Studium zur Seite gestanden sind. Allen voran meinem Vater Martin, der mir schon vor meinem ersten Schultag die Faszination Eisenbahn nähergebracht hat, die auch in den folgenden Zeilen noch immer spürbar ist.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| INHALTSVERZEICHNIS..... | IV |
| FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN | VI |
| ZUSAMMENFASSUNG | VIII |
| ABSTRACT | IX |
| 1 EINLEITUNG | 1 |
| 2 SCHIENENFAHRZEUGBREMSEN | 2 |
| 2.1 FAHRWERK | 2 |
| 2.2 ANFORDERUNGEN AN SCHIENENFAHRZEUGBREMSEN | 2 |
| 2.3 ARTEN VON SCHIENENFAHRZEUGBREMSEN..... | 3 |
| 2.3.1 Klotzbremse..... | 3 |
| 2.3.2 Wellenbremsscheibe..... | 3 |
| 2.3.3 Radbremsscheibe..... | 3 |
| 2.3.4 Generatorische Bremse..... | 3 |
| 2.3.5 Magnetschienenbremse..... | 4 |
| 2.4 BLENDING..... | 4 |
| 2.5 ARTEN VON BREMSUNGEN | 4 |
| 2.6 BREMSHUNDERTSTEL | 5 |
| 2.7 AUSGEWÄHLTE KOMPONENTEN VON DRUCKLUFTBREMSANLAGEN | 5 |
| 2.7.1 Bremsscheiben..... | 7 |
| 2.7.2 Bremsbeläge..... | 7 |
| 2.8 VERSCHLEIß..... | 8 |
| 2.9 DIN 14535-3: PRÜFVERFAHREN VON WELLENBREMSSCHEIBEN | 9 |
| 2.10 DIN 15328 BREMSBELÄGE | 9 |
| 3 STAND DER TECHNIK VON BERÜHRUNGSLOSEN TEMPERATURMESSUNGEN..... | 10 |
| 3.1 VDI 3511 TECHNISCHE TEMPERATURMESSUNG - STRAHLUNGSTHERMOMETRIE | 10 |
| 3.2 INFRAROT STRAHLUNG..... | 10 |
| 3.3 ATMOSPHÄRISCHE FENSTER | 12 |
| 3.4 PLANCK'SCHES GESETZ..... | 13 |
| 3.5 STEFAN BOLTZMANN GESETZ | 13 |
| 3.6 WIEN'SCHES VERSCHIEBUNGSGESETZ..... | 14 |
| 3.7 RÜCKRECHNEN VON EMISSIONSKOEFFIZIENTEN..... | 15 |
| 3.8 THERMOGRAFIE | 15 |
| 3.9 PYROMETRIE..... | 17 |
| 3.10 FOTODIODE UND LICHTWELLENLEITER | 17 |
| 3.11 SICHTKEGEL DES LICHTWELLENLEITERS | 18 |
| 3.12 KALIBRIERUNG VON STRAHLUNGSTHERMOMETERN..... | 19 |
| 3.13 KALIBRIERUNG VON THERMOELEMENTEN LAUT DEUTSCHEM KALIBRIERDIENST | 19 |
| 3.14 KORREKTUR DES EMISSIONSGRADES..... | 19 |
| 3.15 KONTROLLE DES WÄRMEÜBERGANGS MITTELS BIOT-ZAHL..... | 20 |
| 4 MOTIVATION FÜR DIESE ARBEIT..... | 23 |
| 5 VERSUCHE ZUM BERÜHRUNGSLOSEN TEMPERATURMESSEN..... | 24 |
| 5.1 ISOLIEREN VON PARAMETERN | 24 |
| 5.2 PRINZIPVERSUCH MIT THERMOGRAFIE | 25 |
| 5.2.1 Aufbau und Durchführung | 25 |
| 5.2.2 Ergebnisse..... | 25 |
| 5.2.3 Resultat..... | 26 |
| 5.3 ERSTE VERSUCHSREIHE ZUR KALIBRATION EINES PYROMETERS MIT EINEM LICHTWELLENLEITER.... | 26 |
| 5.3.1 Aufbau und Durchführung | 26 |
| 5.3.2 Ergebnisse..... | 28 |
| 5.3.3 Resultat..... | 28 |
| 5.4 ZWEITE VERSUCHSREIHE ZUR KALIBRATION EINES PYROMETERS MIT EINEM LICHTWELLENLEITER . | 28 |
| 5.4.1 Aufbau und Durchführung | 28 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.4.2 | <i>Ergebnisse</i> | 29 |
| 5.4.3 | <i>Resultat</i> | 30 |
| 5.5 | Dritte Versuchsreihe zur Kalibration eines Pyrometers mit einem Lichtwellenleiter.. | 30 |
| 5.5.1 | <i>Aufbau und Durchführung</i> | 30 |
| 5.5.2 | <i>Ergebnisse</i> | 30 |
| 5.5.3 | <i>Resultat</i> | 31 |
| 5.6 | Vierte Versuchsreihe zur Kalibration eines Pyrometers mit einem Lichtwellenleiter.. | 32 |
| 5.6.1 | <i>Aufbau und Durchführung</i> | 32 |
| 5.6.2 | <i>Ergebnisse</i> | 32 |
| 5.6.3 | <i>Resultat</i> | 33 |
| 5.7 | Fünfte Versuchsreihe zur Kalibration eines Pyrometers mit einem Lichtwellenleiter . | 35 |
| 5.7.1 | <i>Aufbau und Durchführung</i> | 35 |
| 5.7.2 | <i>Ergebnisse</i> | 37 |
| 5.7.3 | <i>Resultat</i> | 42 |
| 6 | ERGEBNISSE | 43 |
| 7 | Schlussfolgerungen und Ausblick | 45 |
| | Abbildungs- und Tabellenverzeichnis | 46 |
| | Literatur | 49 |
| | Anhang 1 - Prüfprogramm | 51 |
| | Anhang 2 - Datenblätter Fotodioden | 52 |
| | Anhang 3 - Bremsscheiben | 53 |

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

| | | |
|-------|--------------------|--|
| A | m^2 | Fläche |
| Bi | - | Biot Zahl |
| c_p | J/kgK | Spezifische Wärmekapazität |
| Gr | - | Grashof Zahl |
| L | m | Spezifische Länge |
| L_s | | spektrale Strahldichte eines schwarzen Strahlers |
| M | W/m^2 | Spezifische Ausstrahlung |
| m | kg | Masse |
| Nu | - | Nusselt Zahl |
| Pr | - | Prandtl Zahl |
| t | $^{\circ}\text{C}$ | Celsius-Temperatur |
| T | K | thermodynamische Temperatur |
| U | m | Umfang |

Konstanten

| | | |
|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| $c = 2,9979 \cdot 10^8$ | m/s | Lichtgeschwindigkeit im Vakuum |
| $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ | Js | Plancksches Wirkungsquantum |
| $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ | $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ | Stefan Boltzmann Konstante |
| $k_B = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ | J/K | Boltzmann-Konstante |
| $\pi = 3,141592654$ | - | Pi |

Griechische Formelzeichen

| | | |
|-----------------|----------------------------------|--|
| α_K | - | Anteil der absorbierten Strahlung |
| α | $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ | Wärmeübergangskoeffizient |
| β | $1/\text{K}$ | Isobarer Wärmeausdehnungskoeffizient |
| ρ_K | - | Anteil der reflektierten Strahlung |
| τ_K | - | Anteil der durchlässigen Strahlung |
| τ | s | Zeit |
| ε_K | - | Emissionsgrad |
| λ | μm | Wellenlänge |
| λ_s | $\text{W}/(\text{m K})$ | Wärmeleitungskoeffizient fester Körper |
| Φ | W | Strahlleistung |
| ν | m^2/s | Kinematische Viskosität |
| ρ | kg/m^3 | Dichte |

Operatoren und Bezeichnungen

| | |
|------------|------------------------------|
| d | vollständiges Differential |
| δ | unvollständiges Differential |
| ∂ | partiell Differential |

Weitere Indices und Abkürzungen

| | |
|-----------|----------------------------|
| EU | Europäische Union |
| MG-Bremse | Magnetschienenbremse |
| MWIR | Middle Wavelength Infrared |
| LWIR | Long Wavelength Infrared |

| | |
|-----|---|
| UIC | Französisch: Union Internationale des Chemins de fer = internationaler Eisenbahnverband |
| WBK | Wärmebildkamera |

Zusammenfassung

Im Sinne des Zeitgeistes, den Verkehr mit Schienenfahrzeugen massiv auszubauen, nimmt auch die Entwicklung dieser Fahrzeuge einen immer größer werdenden Teil der technischen Innovationen ein. So wird versucht, die Fahrzeuge in Punkto Komfort und Lebensdauer zu optimieren. Von Interesse ist somit auch die Bremsanlage eines solchen Schienenfahrzeugs. Für die Auslegung der mechanischen Reibungsbremsen wird bisher auf veraltete, berührungshafte Temperaturmessverfahren in Prüfläufen zurückgegriffen. Im Zuge dieser Arbeit wird der Versuch gestartet, ein optisches und damit berührungsloses Messverfahren, in dem ein Lichtwellenleiter die Infrarotstrahlung zu einer Fotodiode überträgt, auf Schienenfahrzeugbremsen zu übertragen. Somit soll eine genauere und optimierter Entwicklung der mechanischen Reibungsbremse ermöglicht werden. Dabei wird ausgehend von internationalen Standards versucht, das entwickelte Messverfahren auf eine solide, normenbasierte Grundlage zu stellen und im Rahmen einer umfangreichen Parameterstudie Größen zu identifizieren, die einen Einfluss auf das Messverfahren üben. Das Resultat ist ein solider Grundstock an Kenntnissen für die Anwendung von optischen Temperaturmessverfahren auf Schienenfahrzeugbremsen mit dem Ziel, diese in Zukunft für Prüfverfahren qualifizieren zu können. Dabei wurde nachgewiesen, dass die unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten einen geringen Einfluss auf das Messverfahren haben. Weiters wurde auch eine Konfiguration aus Fotodiode im passenden Wellenlängenbereich und Lichtwellenleiter identifiziert, die für eine Messung an einem Prüfstand in Frage kommt. Mit dem Resultat dieser Arbeit kann ein Prüflauf auf einem Versuchsstand mit einem Lichtwellenleiter und einer Fotodiode mitgemessen werden, um so noch weitere Erfahrung für eine Qualifizierung dieses Messverfahrens zu sammeln.

Abstract

In terms of our time, to expand traffic operated by railways, also the development of these vehicles is taking up an increasing part of technical innovations. A lot of effort is being put into making these vehicles more comfortable and to expand their lifetime. Hence the railway's braking system is also a matter of interest. So far, previously outdated contact temperature devices are used for the monitoring of mechanical friction brakes during test runs. As part of this thesis, the approach of using an optical, non-contact measurement device, consisting of an optical fiber which transmits the signal to a photodiode, is taken to be transmitted to rail vehicle brakes. This should enable an optimized and more accurate design and development of the mechanical friction brake. Starting at international standards, the developed method should be based on a respectable basis and within the frame of a considerable parameter study, important influences on the measurement result should be identified. The result is a solid basis of knowledge for the usage of optical temperature measurement devices in cases of railway-brakes with the aim to qualify this method in future testing procedures. It was proven that the different surface properties have a minor influence on the measurement process than expected. Furthermore, a configuration of photodiodes in the appropriate wavelength range and optical fibers was identified, which could be used on a test bench. The result of this thesis allows to carry out a test run, where the non-contact measurement method, consisting of an optic fiber and a photodiode, can be used to gain additional experience for qualifying this measurement method.

1 Einleitung

Für Prüfverfahren von Schienenfahrzeugbremsen gibt es ein sehr umfangreiches Normungswerk. Das reicht von den Dimensionen der Komponenten, dem Prüfprogramm bis hin zu den einzelnen Messverfahren der vorgeschriebenen Tests. Da die Auslegung der mechanischen Reibungsbremsen vor allem auf die auftretenden Temperaturen Bedacht nimmt [11], ist das angewendete Temperaturmessverfahren von besonderem Interesse. Zurzeit wird dies in Prüfversuchen mit Thermoelementen, die knapp unter der Oberfläche der Scheibe eingebaut sind, oder mit Schleifkontakten durchgeführt. Beide Varianten haben den Nachteil, dass sie berührende Messverfahren sind und so einerseits aufwändig zu installieren sind, als auch die Messung selbst beeinflussen. Abhilfe bei diesen Nachteilen würde ein berührungsloses, optisches Messverfahren bieten.

Diese Arbeit soll dem Abhilfe schaffen und ein optisches Temperaturmessverfahren an Schienenfahrzeugbremsen untersuchen. So wird ausgehend von einer Einführung in die Bremsanlage von Schienenfahrzeugen in Kapitel 2 erläutert, wann mechanische Reibungsbremsen notwendig sind und welche Bauteile hier zur Anwendung gelangen. Anschließend werden in Kapitel 3 die gängigsten optischen Temperaturmessverfahren mit ihren physikalischen Hintergründen erläutert, um dem Leser die nachfolgenden Auswertungen nachvollziehbar zu gestalten. Nach einem kurzen Exkurs zum Thema Kalibrierung von Temperaturmessverfahren und einer Betrachtung der Wärmeübergänge folgt der praktische Teil der Arbeit. Ausgehend von der Ausformulierung der hier vorliegenden Problemstellung in Kapitel 4, werden in Kapitel 5 eine Reihe von Versuchen zu optischen Temperaturmessverfahren mit einer Fotodiode präsentiert und dabei verschiedene Einflussgrößen bewertet. Diese sollen dazu dienen, die Größenordnung von Störgrößen quantifizierbar zu machen. Der Einsatz von Wärmebildkameras wird dabei ebenfalls geprüft. In Kapitel 6 werden die wichtigsten Ergebnisse kompakt zusammengefasst, um in weiterer Folge in Kapitel 7 eine Handlungsanweisung zu liefern, wie ein technisch korrektes Temperaturmessverfahren gestaltet sein muss.

2 Schienenfahrzeugbremsen

Seit jeher ist die Thematik „Bremsen von Schienenfahrzeugen“ von großem technischem Interesse – große Massen, hohe Geschwindigkeiten, niedrige Kraftschlussbeiwerte, hohe Sicherheitsvorgaben – bilden die Eckpunkte der immer noch vorhandenen Herausforderungen in der Konstruktion. Dabei wird die mechanische Reibungsbremse immer mehr zum „notwendigen Übel“. Die kontinuierliche Verbesserung der Elektromotoren bedingte, dass auch bei niedrigen Geschwindigkeiten immer öfters elektrodynamisch gebremst wird, also die Elektromotoren im Generatorbetrieb genutzt werden. Die Reibungsbremse wird somit im Betrieb immer seltener verwendet, ist aber für die einzuhaltenden Sicherheitsvorschriften unerlässlich.

2.1 Fahrwerk

Die meisten schienengebunden Fahrzeuge bestehen aus einem Wagenkasten, in dem Personen und Güter transportiert werden, und einem Fahrwerk, dass den Wagenkasten in der Spur hält und die Kräfte des Fahrbetriebs überträgt. In den Fahrwerken befinden sich auch die Bremsanlagen. Ein Fahrwerk besteht grundlegend aus einem Radsatz, einer primären Federung, einem Rahmen, und einer sekundären Federung, die an den Wagenkasten angebunden ist [10]. Eine schematische Darstellung kann in Abbildung 2-1 gefunden werden. Hier ist zu erkennen, dass der Radsatz eine ungefederte Masse darstellt. Bremskomponenten, die direkt am Radsatz montiert sind, erhöhen somit die ungefederten Massen und beeinflussen die Schädigung an der Infrastruktur und Rahmen maßgeblich. Daraus folgt auch die Motivation, die Auslegung von Bremsen kontinuierlich zu verbessern.

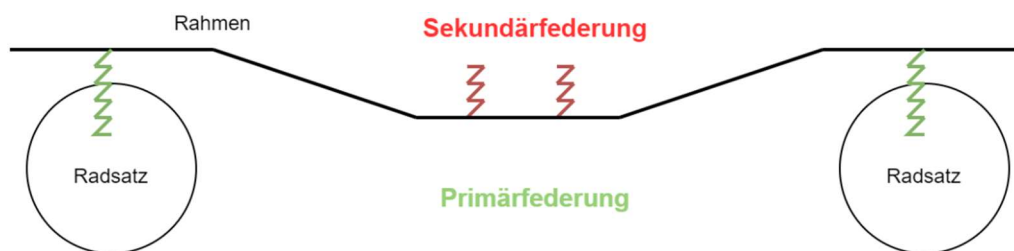


Abbildung 2-1: Fahrwerk

2.2 Anforderungen an Schienenfahrzeugbremsen

Bedingt durch viele kleinere und größere Zwischenfälle, gibt es eine Menge an Anforderungen für Schienenfahrzeugbremsen. Dabei gibt es für jedes Land eigene Regelwerke, wobei die UIC (franz. Union Internationale des Chemins de fer = internationaler Eisenbahnverband) versucht, diese zu vereinheitlichen. So müssen Schienenfahrzeugbremsen unerschöpflich, durchgängig und selbsttätig sein. In diesem Kontext bedeutet unerschöpflich, dass die Bremsen auch nach mehrmaligen Lastzyklen betriebsbereit sein müssen. Durchgängig wird gefordert, um mit nur einer Leitung den gesamten Zug bremsen zu können. Und zu guter Letzt ist die Selbsttätigkeit dafür verantwortlich, dass es bei einer Trennung der Bremsleitung zu einer sofort eingeleiteten Bremsung kommt [11].

Gemäß der Regulative der EU, die für die Interoperabilität des Schienenverkehrs Sorge tragen soll ([12],[13]), gelten für reguläre, über Grenzen hinweg verkehrende Züge (Vollbahnen) andere Vorgaben, als für Züge, die nur in einem definierten Bereich (Metro, Straßenbahn, Grubenbahn) bewegt werden. Zur Prüfung für die Bremsausrüstung der Vollbahnen wird die DIN 14535 angewandt. Sie gibt die Anforderungen an aufzunehmender Energie, den Messaufbau und den Zustand der Prüflinge vor.

2.3 Arten von Schienenfahrzeugbremsen

Diese unter 2.2 genannten Anforderungen können mit verschiedenen Konfigurationen aus Bremsanlagen erreicht werden. Im Folgenden sollen nun die häufigsten Varianten vorgestellt werden

2.3.1 Klotzbremse

Klotzbremsen finden vor allem in Güterwagen Anwendung. Ihre sehr einfache Funktionsweise und ihr geringes Gewicht sind ausschlaggebend dafür. Nachteilig ist aber der Verschleiß der Laufflächen, da die Klötze direkt darauf wirken.

2.3.2 Wellenbremsscheibe

Wie auch im Straßenverkehr, hat sich auch im Schienenverkehr die Bremsscheibe bei schweren Anwendungen weitgehend durchgesetzt. Dabei werden die Scheiben auf der Radsatzwelle positioniert. Ein großer Nachteil der Wellenbremsscheibe ist jedoch, dass sie eine ungefederte Masse darstellt und viel Bauraum benötigt. Aus diesem Grund kommt sie häufig auf Lauffahrwerken, die keinen Antrieb haben, zur Anwendung. In Abbildung 2-2 wird eine Wellenbremsscheibe auf einem Prüfstand gezeigt.



Abbildung 2-2: Wellenbremsscheibe als Kompakteinheit auf einem Prüfstand [21]

2.3.3 Radbremsscheibe

Die Vorteile der Bremsqualität der Wellenbremsscheibe und der geringe Bauraum der Klotzbremse verbindet die Radbremsscheibe. Die Wärme wird hier nun aber wieder auf das Rad übertragen und beeinflusst damit in geringem Maße den Rad-Schiene Kontakt [27].

2.3.4 Generatorische Bremse

Elektrisch angetriebene Triebfahrzeuge nutzen für die Bremsung zu einem Großteil ihren Antrieb. Dafür gibt es zwei Betriebsarten. Entweder wird der Elektromotor in den Generatorbetrieb geschaltet und der Strom ins Netz zurückgespeist oder die Leistung wird über elektrische Widerstände in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben [11].

2.3.5 Magnetschienenbremse

Eine vom Rad-Schiene Kontakt unabhängige Bremse ist die Magnetschienenbremse (MG-Bremse). Ein Balken mit Magneten, die durch ein Feld oder permanent erregt sind, wird auf die Schiene abgelassen und verzögert das Fahrzeug durch zwei Effekte: Einerseits durch das magnetische Feld zwischen MG-Bremse und Schiene, andererseits durch die Reibung zwischen den Polschuhen und der Schiene. Die MG-Bremse ist somit auch verschleißbehaftet. Zur Anwendung kommt sie bei Schnell- und Notbremsungen, wenn die gewöhnlichen Bremsen, wie die elektrodynamische Bremse und Reibungsbremse, nicht ausreichend Bremswirkung bereitstellen. Das kann zum Beispiel bei Geschwindigkeiten über 140 km/h bei Personenzügen sein, aber auch im Bereich der U- und Straßenbahnen. Die Bremskraft der MG-Bremse ist dabei nicht regelbar und steigt bei niedrigen Geschwindigkeiten stark an, deswegen wird sie nicht bis zum Stillstand verwendet, um einen zu großen Halteruck zu vermeiden ([11] S. 360 und [10] S.127-130).

2.4 Blending

Die unterschiedlichen Bremsen müssen so zusammenwirken, sodass die ideale Kombination aus Verzögerung und Verschleiß realisiert werden kann. Dieses Zusammenspiel wird als Blending bezeichnet [11]. Die elektrodynamische Bremse wirkt vor allem bei höheren Geschwindigkeiten besser, wie in Abbildung 2-3 verdeutlicht ist. Diese Minderleistung bei niedrigen Geschwindigkeiten wird durch die Reibungsbremsen ausgeglichen.

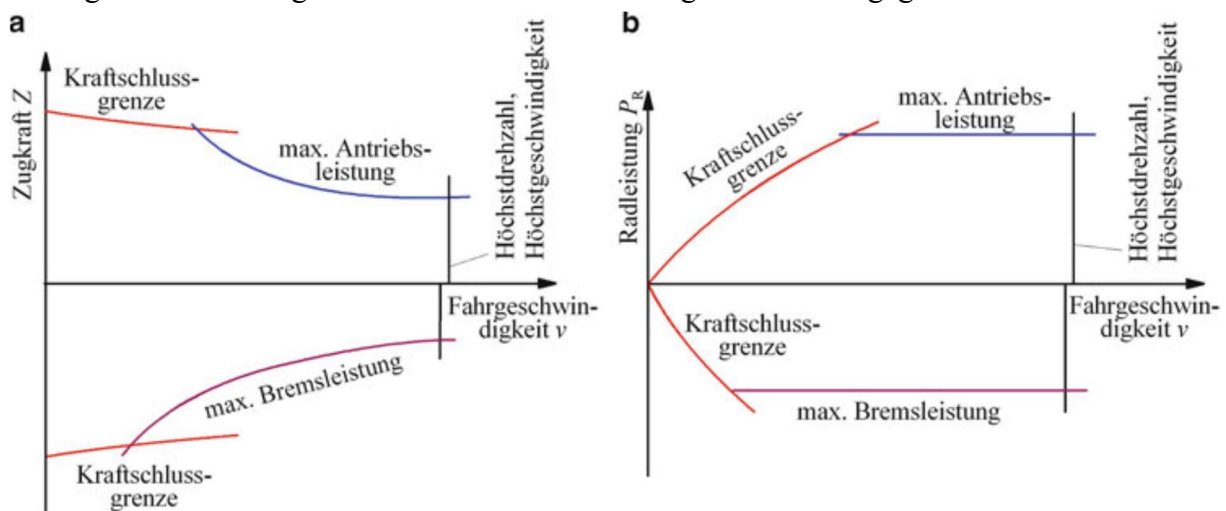


Abbildung 2-3: Liefer-/Bedarfskennfeld Elektromotor [10]

2.5 Arten von Bremsungen

Für die Bewertung der Bremsleistungen soll ein kurzer Überblick über die Bremsarten in Tabelle 2-4 gegeben werden:

| Bremsart | Charakterisierung |
|------------------|--|
| Betriebsbremsung | Normaler Bremsvorgang zum Erreichen der vorgeschriebenen Fahrzeuggeschwindigkeit (meist mit elektrodynamischer Bremse) |
| Vollbremsung | Maximale Betriebsbremsung |
| Dauerbremsung | Fahrzeuggeschwindigkeit im Gefälle konstant halten |
| Regulierbremsung | Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird auf einen bestimmten Wert abgesenkt |

| | |
|---------------------------|--|
| Schnellbremsung | Maximale Bremsleistung in minimalster Zeit erreichen |
| Ablöse- und Haltebremsung | Bei niedrigen Geschwindigkeiten werden die unzureichend wirkenden Elektrodynamischen Bremsen durch Reibungsbremsen ersetzt. |
| Zwangsbremsung | Vom Zug ausgelöste Bremse bei Trennung oder durch Zugbeeinflussung |
| Notbremsung | Durch Fahrgast ausgelöste Bremsung, kann vom Fahrer überbrückt werden (um z.B. einen Tunnel zu verlassen) |
| Gefahrenbremsung | Bei Straßenbahnen relevant, da sie im normalen Straßenverkehr betrieben werden und es hier zu unvorhergesehenen Situation kommen kann. |

Tabelle 2-4: Arten von Bremsungen [11]

2.6 Brems-hundertstel

Anders als bei Straßenfahrzeugen, können die Gewichte und damit die Bremsanforderungen von Zügen sehr stark variieren. Je nach Anzahl der Wagen, deren Beladung und auch der Streckengeometrie ändern sich die Anforderungen. Um nun in der Praxis leicht ermitteln zu können, ob ein bestimmter Zug eine bestimmte Strecke bremsstechnisch bewältigen kann, wurde die sogenannte Brems-hundertstel definiert. Es lässt sich wie folgt ermitteln (vgl. [10] S.138):

$$\text{Brems-hundertstel [\%]} = \frac{\text{Gesamtbremsgewicht [t]}}{\text{Gesamtzuggewicht [t]}} \cdot 100 \quad (2-1)$$

Dabei ist das *Gesamtbremsgewicht* weder Masse noch Gewicht, sondern eine Bewertungsgröße [11]. Es gibt Aufschluss über das Bremsvermögen eines Eisenbahnfahrzeugs und wird durch Versuche bestimmt.

Sollte nun die bekannten Mindestbrems-hundertstel für einen bestimmten Abschnitt nicht erreicht werden, müssen betriebliche Maßnahmen, wie zum Beispiel Verringerung der Geschwindigkeit, ergriffen werden [10].

Elektrodynamische Bremsen werden in den Brems-hundertstel nicht berücksichtigt, das Fahrzeug muss somit mit den mechanischen Bremsen vollständiges Auslangen finden.

2.7 Ausgewählte Komponenten von Druckluftbremsanlagen

Hier soll der Aufbau von Druckluftbremsanlagen kurz erläutert werden, um zu verstehen, an welchen Stellen das Temperaturmessen von besonderer Bedeutung ist.

Im Bereich der Schienenfahrzeuge hat sich die indirekt wirkende Druckluftbremse durchgesetzt. Das bedeutet, dass das Fahrzeug die Hauptluftleitung (HL-Leitung, gelb in Abbildung 2-5) entlüftet, damit die Bremse anspricht [11].

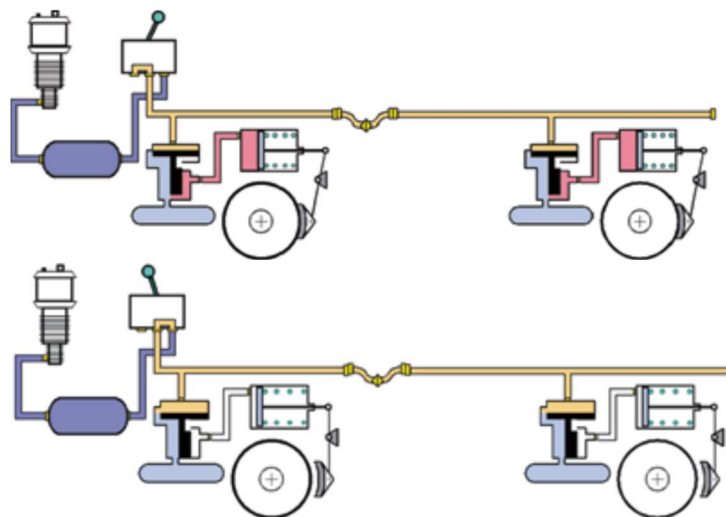


Abbildung 2-5: Indirekt wirkende Druckluftbremse [11]

Abbildung 2-5 zeigt oben eine entlüftet HL- Leitung. Das Fahrzeug ist gebremst. In der unteren Darstellung ist die HL-Leitung belüftet und somit ungebremst. Das hat den Vorteil, dass alle Wagen über eine Leitung angesteuert und versorgt werden. Je nach Fahrzeug und Betriebsart gibt es unterschiedliche Anforderungen an die Löse- und Füllzeiten der Bremszylinder. Dabei ist es auch möglich, dass das Entlüften vom Betriebsdruck (i.d.R. 5 bar) auf verschiedene Niveaus zu unterschiedlich starken Bremsanforderungen führt.

In Abbildung 2-6 ist eine Federspeicherbremse dargestellt. Dabei wurde das zuvor dargestellte Prinzip technisch umgesetzt. Der Kolben ist durch Schraubenfedern vorgespannt und wird im entlüfteten Zustand von der Bremsscheibe weggedrückt. Weiters ist die Anordnung der einzelnen Komponenten gut sichtbar. Für die auftretende Wärme ist die Reibpaarung von Bremsscheibe und Bremsbelag von Interesse, auf die genauer eingegangen werden soll.

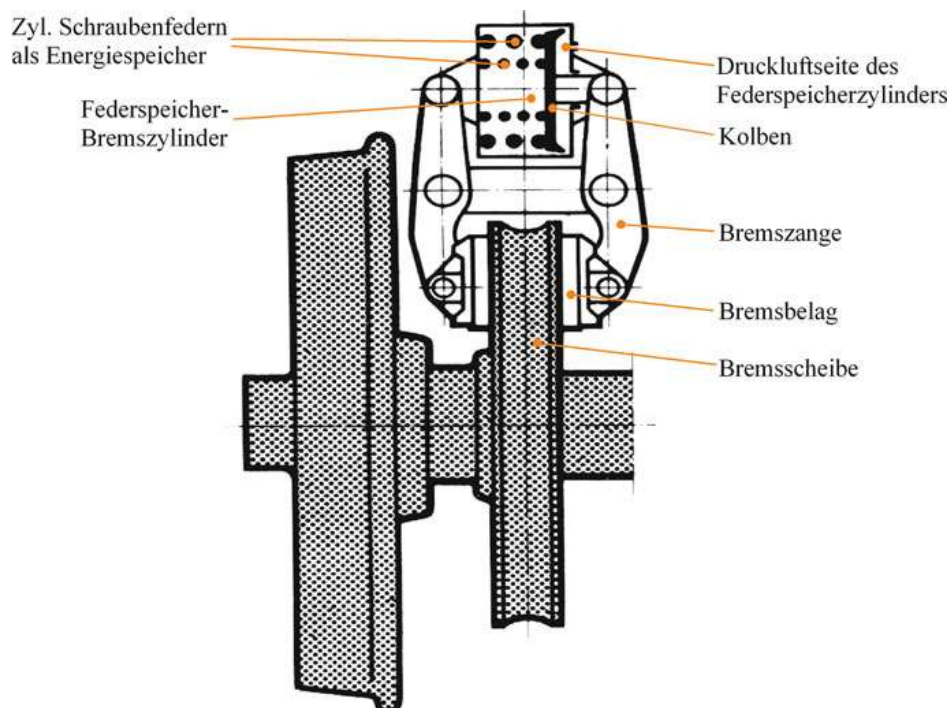


Abbildung 2-6: Aufbau einer Bremse [10]

2.7.1 Bremsscheiben

Wellenbremsscheiben sind in ihren Abmessungen durch die DIN 14535-1 genormt. Die Ausführung ist in der Regel so, dass zwei Reibringe durch Stege für die Belüftung verbunden sind. Als Material kommt für einfache Anwendungen Grauguss, für anspruchsvollere Aufgaben aber auch Aluminium und Stahlguss zum Einsatz [11]. In Abbildung 2-7 ist eine Straßenbahnbremsscheibe aus Spezialgrauguss zu sehen. Dabei ist zu beachten, dass Straßenbahnbremsscheiben nicht durch die DIN 14535 genormt sind, diese ist nur für Vollbahnen gültig (siehe Abschnitt 2.2).



Abbildung 2-7: Aufbau einer Wellenbremsscheibe

2.7.2 Bremsbeläge

Für Anwendungen bis 350°C kommen organische Bremsbeläge in Kombination mit Gussscheiben zum Einsatz, für höhere Temperaturen von bis zu 800°C werden Sinterbeläge mit Stahlgussscheiben eingesetzt. Ein organischer Bremsbelag ist in Abbildung 2-8 dargestellt.



Abbildung 2-8: Bremsbelag [28]

2.8 Verschleiß

Über die Lebensdauer verschleißt sowohl der Belag als auch die Scheibe. Das führt dazu, dass die Oberflächen sich geometrisch und optisch verändern. Verschlissene Scheiben sind nicht gleichmäßig abgenutzt, es stellt sich ein sogenannter Hohllauf ein, wie in Abbildung 2-9 links der Markierung 6 zu sehen ist [23]. Dabei ist links eine abgenutzte, ungefaste und rechts eine neue, gefaste Bremsscheibe dargestellt.

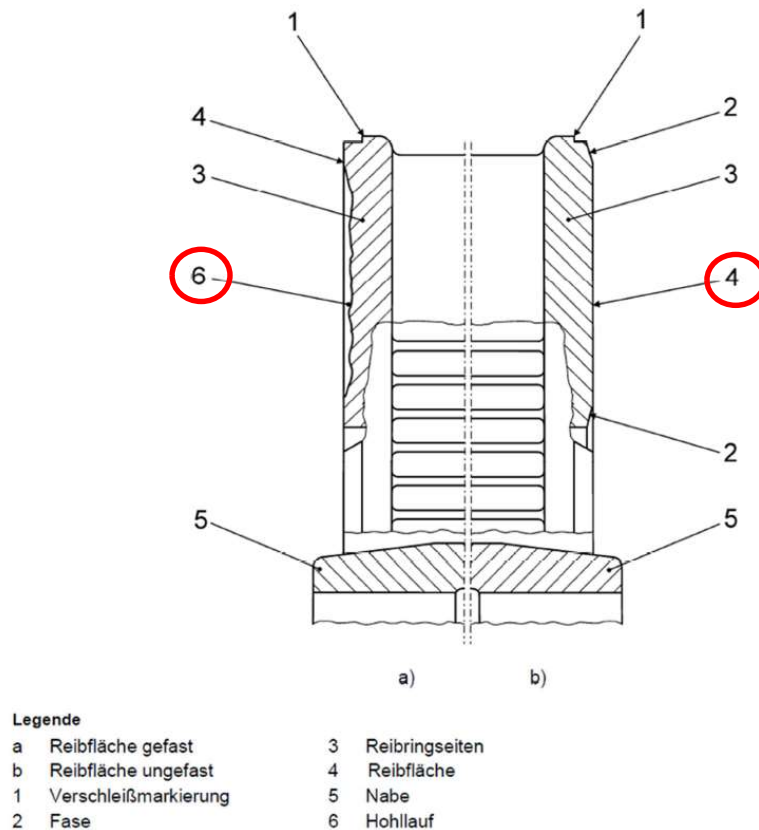


Abbildung 2-9: Verschleiß bei Wellenbremsscheiben [23]

Weiters ist auch der Bremsstaub für zukünftige Anwendungen von Interesse. Die EU-Kommission hat mit Ende 2022 einen Vorschlag für eine Euro 7 Verordnung für Kraftfahrzeuge präsentiert [24]. Dieser sieht auch erstmals Grenzwerte von Nicht-Abgasemissionen, also Schadstoffe von Brems- und Reifenabrieb, vor. Aufgrund der allgemeinen hohen Feinstaubbelastungen in urbanen Bereichen und dem dort auch stark vorhanden Schienenverkehr, ist durchaus davon auszugehen, dass auch die Bremsemissionen von Schienenfahrzeugen betrachtet werden. Als Feinstaub gilt dabei jedes Partikel, dass von den Bremsen emittiert wird.

Für etwaige Untersuchungen ist hier wiederum eine verbesserte Messtechnik auf Bremsenprüfständen von Interesse.

2.9 DIN 14535-3: Prüfverfahren von Wellenbremsscheiben

Für Prüfverfahren sind derzeit Temperatursensoren vorgeschrieben, die in die Reibfläche der Bremsscheibe eingebracht sind. Pro Fläche sind laut Norm drei Sensoren, jeweils um 120° versetzt, 1mm unterhalb der Reiboberfläche, davon einer am mittleren Radius, zwei je $\pm 40\text{mm}$ zum mittleren Radius anzubringen. Sollte dies nicht möglich sein, sind schleifende Thermoelemente zu verwenden [4].

Diese Bestimmungen bringt einige Herausforderungen mit sich. Die Sensoren in der Scheibe sind schwierig zu applizieren, denn die Scheibe muss dafür mechanisch bearbeitet werden. Weiters misst man nur die Temperaturen an drei Stellen und hat keine Möglichkeit, die Verteilung über die Scheibe zu ermitteln. Vor allem beim Auftreten von Hotrings, die nicht zyklisch und an verschiedenen Positionen auftreten, kann man Ergebnisse schwer reproduzieren. In Abbildung 2-10 können diese unterschiedlich glühenden Umfänge gut erkannt werden.

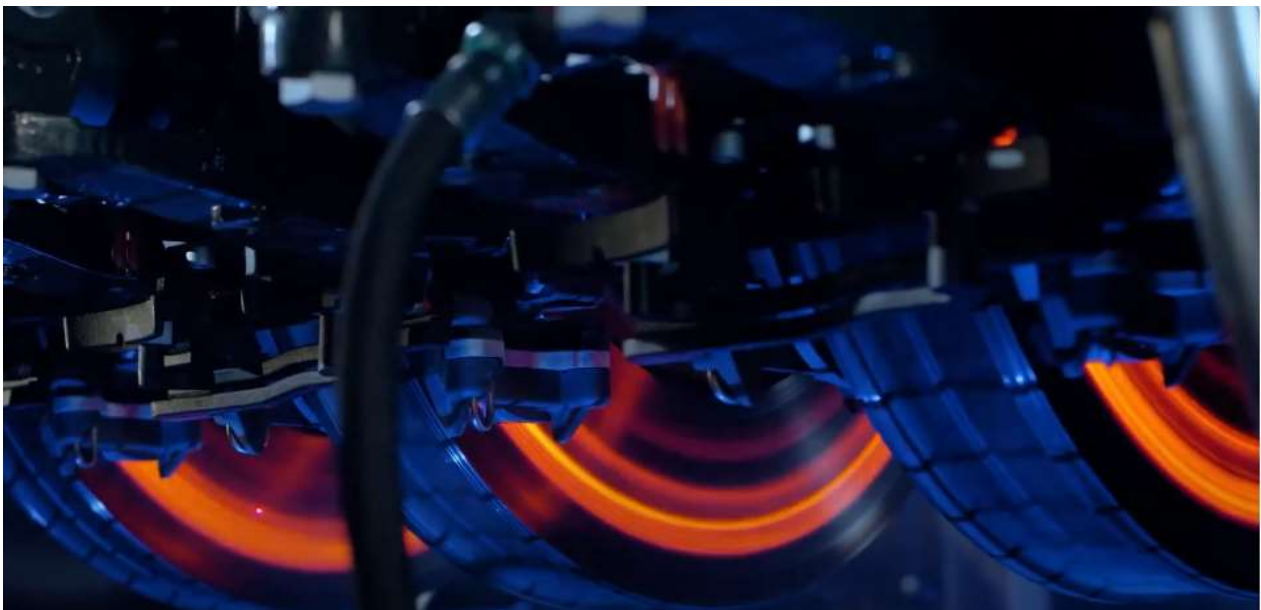


Abbildung 2-10: Hotrings auf Wellenbremsscheiben [22]

Für die einzelnen Scheiben gibt es dann verschiedene Klassen, für die jeweils die umzusetzenden Energien und Leistungen sowie Prüfzyklen vorgeschrieben sind. Auch die Belüftung der Scheibe ist dabei festgelegt.

Weiters regelt die Norm eine Wärmeabgabeproofung, bei der die thermische Abgabeleistung der Scheiben untersucht wird.

2.10 DIN 15328 Bremsbeläge

Grundsätzlich werden bis ca. 350°C organische Materialien für die Beläge verwendet, darüber Metallsinterbeläge, die bis zu 800°C erreichen können. Hier regelt die DIN 15328 die Prüfung der Bremsbeläge. In dieser wird wieder ein Prüfprogramm festgelegt, dass die Beläge positiv bestehen müssen. Dabei wird auch verlangt, dass die Temperaturverteilung möglichst gleichmäßig sein soll, ohne dabei quantitative Ziele zu nennen. Während der Prüfung darf es unter keinen Umständen zu Flammen, Abplatzungen über 10% der Fläche oder zu Materialablagerungen an der Bremsscheibe kommen. Auch die Qualitätssicherung des Werkstoffes ist geregelt. Für die Oberfläche gibt es ebenfalls Anforderungen an die Rauheit [5].

3 Stand der Technik von berührungslosen Temperaturmessungen

Die genaue Kenntnis von Temperatur ist in vielen wissenschaftlichen Anwendungen von großem Interesse. Besonders berührungslose Verfahren sind dabei das Mittel der Wahl – haben sie doch viele Vorteile. Standardverfahren, die einen direkten Kontakt brauchen, sind oft schwierig zu installieren und oft beeinflussen sie die Messung auch selbst. Der Grund dafür ist, dass sie direkt auf die zu messende Oberfläche angebracht werden und auch immer nur ihre Eigentemperatur messen. Doch auch berührungslose Verfahren haben viele Schwachstellen, auf die geachtet werden muss. Im Folgenden soll nun ein Vergleich der zwei gängigsten Verfahren, nämlich Pyrometrie und Thermografie und ihrer theoretischen Grundlagen gezogen werden.

3.1 VDI 3511 Technische Temperaturmessung - Strahlungsthermometrie

Die VDI-Richtlinie 3511, Blatt 4, regelt die technische Temperaturmessung mit Strahlungsthermometrie. Dabei wird neben dem Vermitteln der physikalischen Grundlagen in weiteren Blättern die korrekte Kalibrierung, der korrekte Betrieb und die praktische Anwendung beschrieben [14].

3.2 Infrarot Strahlung

Wärme kann auf drei verschiedene Arten übertragen werden:

- Leitung
- Konvektion
- Strahlung

Wie aus dem Kontext geschlossen werden kann, ist hier die Wärmestrahlung von Interesse. Jeder Körper über 0 Kelvin emittiert thermische Strahlung. Die Wellenlänge dieser Strahlung ist sehr unterschiedlich, wie man am elektromagnetischen Spektrum in Abbildung 3-1 erkennen kann.

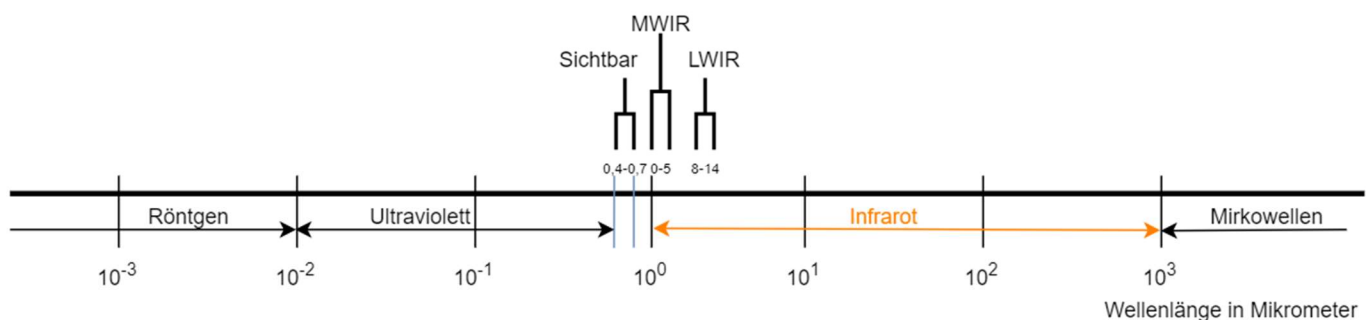


Abbildung 3-1: Elektromagnetisches Spektrum

Nun möchte man diese Strahlung quantifizieren. Man beginnt mit der Strahlungsleistung Φ , die wie folgt definiert ist:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} [W] \quad (3-1)$$

wobei Q die Strahlungsenergie über den kompletten Wellenlängenbereich ist. Eine Herleitung zur Strahlungsenergie Q , abhängig von den auftretenden Photonen, kann in [8] gefunden

werden. Da bei undurchlässigen Körpern nur die Oberfläche Strahlung emittiert oder absorbiert, bezieht man diese Strahlungsleistung auf die Oberfläche und nennt M die spezifische Ausstrahlung:

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3-2)$$

Durch die Energieerhaltung gilt für die Strahlung eines beliebigen, realen Körpers [9]:

$$\alpha_K + \rho_K + \tau_K = 1 \quad (3-3)$$

wobei

α_K = Anteil der absorbierten Strahlung

ρ_K = Anteil der reflektierten Strahlung

τ_K = Anteil der durchlässigen Strahlung

ist. Nun unterscheidet man das Modell eines schwarzen Strahlers, der immer das Maximum an Strahlung absorbiert, eines grauen Strahlers, der nur einen gewissen Anteil absorbiert, dies aber für das ganze Spektrum konstant, und selektiver Strahler, die wellenlängenabhängige Absorptionskoeffizienten haben. Alle technischen Körper sind streng genommen selektive Strahler. Für gewöhnliche, undurchlässige graue Körper kann der Anteil τ_K zu Null gesetzt werden und man erhält nach Kirchhoff [8]:

$$\alpha_K = 1 - \rho_K = \varepsilon_K \quad (3-4)$$

wobei

ε_K = Emissionsgrad

gilt. Somit sind folgende wichtige Eigenschaften grauer Körper aus Gleichung 3-4 erkennbar:

- Absorption = Emission
- $\varepsilon_K < 1$

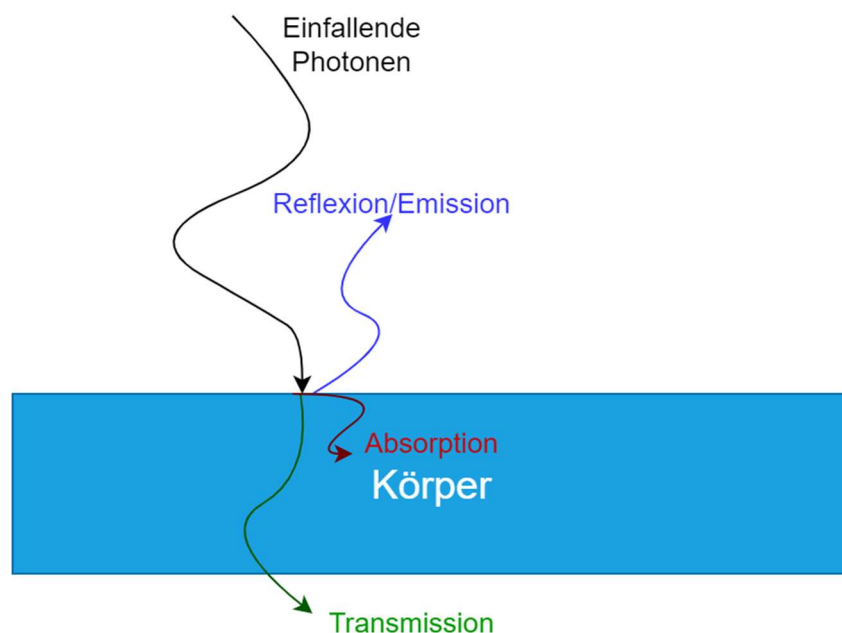


Abbildung 3-2: Transmission, Reflexion und Absorption

Der Emissionsgrad ε_K wird von einigen Faktoren beeinflusst. Dazu zählen:

- Strahlung aus der Umgebung, Reflexion
- Transmissionsgrad der Übertragungsstrecke

Eben diese Einflussfaktoren müssen für eine valide Berechnung korrigiert werden [8].

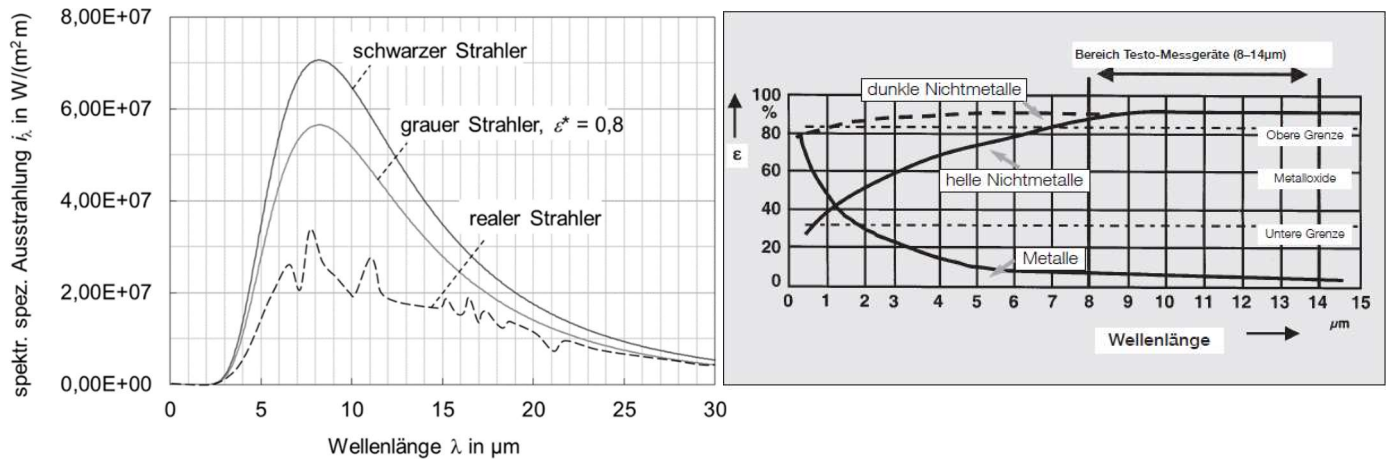


Abbildung 3-3: Emissionskoeffizient [29] [30]

3.3 Atmosphärische Fenster

Möchte man nur die Temperatur eines Objektes messen, so ist zwischen dem Messaufnehmer und dem zu beobachtenden Körper in der Regel Luft vorhanden. Um nun die ganze Strahlung des Körpers detektieren zu können, sollte Luft einen Transmissionsgrad τ_K nahe 1 haben. Doch dieser Transmissionsgrad von Luft ist zum einem von der Temperatur des strahlenden Körpers, als auch dem Wellenlängenbereich abhängig. Man nutzt nun sogenannte „Atmosphärische Fenster“ aus, die einen Transmissionsgrad nahe 1 besitzen [8].

| Temperaturmessbereich | Wellenlängenbereich |
|--|---|
| $T > 1000^\circ\text{C}$ | $\lambda \leq 1 \mu\text{m}$ |
| $200^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C}$ | $1,5 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1,8 \mu\text{m}$ |
| | $2,0 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 2,5 \mu\text{m}$ |
| | $3,4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 4,2 \mu\text{m}$ |
| | $4,5 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 5,0 \mu\text{m}$ |
| $T < 200^\circ\text{C}$ | $8,0 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 13 \mu\text{m}$ |

Abbildung 3-4: Günstige Wellenlängenbereiche in atmosphärischer Luft [8]

3.4 Planck'sches Gesetz

Von besonderer Bedeutung ist das idealisierte Modell des schwarzen Strahlers. Ein schwarzer Strahler emittiert bzw. absorbiert das Maximum an Strahlung.

Das Planck'sche Gesetz stellt nun den Zusammenhang zwischen der Temperatur T eines schwarzen Körpers und der spektralen spezifischen Ausstrahlung im Vakuum her und lautet folgendermaßen [8]:

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B}} - 1} \left[\frac{W}{\mu m \cdot m^2} \right] \quad (3-5)$$

Damit kann man nun eine direkte Relation zwischen spektraler spezifischer Ausstrahlung M und Temperatur T herstellen, was zu folgendem Diagramm für verschiedenen Temperaturen T führt:

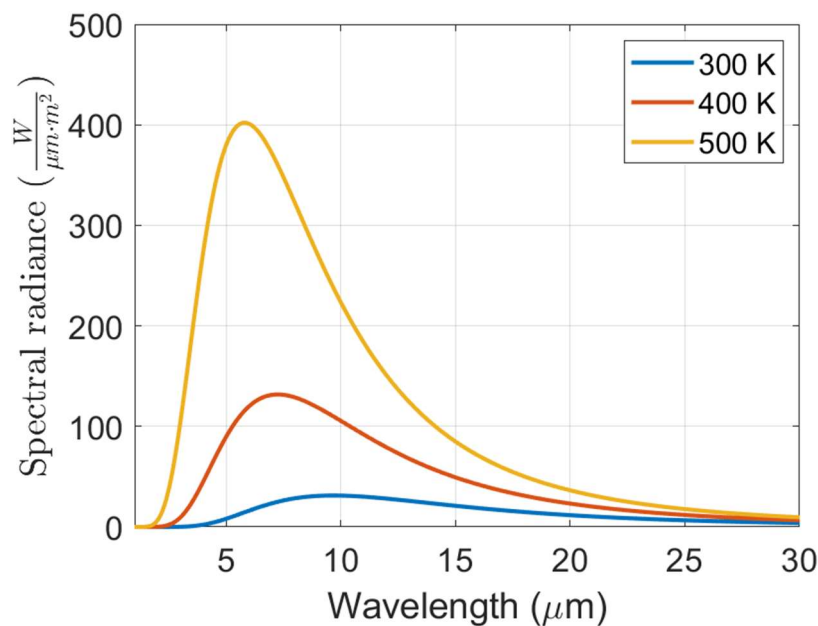


Abbildung 3-5: Spektrale Ausstrahlung [3]

Es kann anhand von Abbildung 3-5 festgestellt werden, dass schwarze Strahler besonders viel Strahlung im Bereich von 2 bis 15 μm emittieren. Das lässt den Schluss zu, dass für die Pyrometrie genutzte Sensoren wie Fotodioden in diesem Bereich messen sollen [3].

3.5 Stefan Boltzmann Gesetz

Das Stefan Boltzmann Gesetz stellt einen sehr eleganten Zusammenhang zwischen der Temperatur T und der spezifischen Ausstrahlung M her. Für die Herleitung beginnt man wie folgt:

Auf Raumwinkeleinheit Ω bezogene Strahlungsleistung Φ bezeichnet man als Strahlstärke I :

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \left[\frac{W}{rad} \right] \quad (3-6)$$

Nun folgt die Strahldichte L eines Strahlers:

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \varphi} = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot d\Omega \cdot \cos \varphi} \left[\frac{W}{m^2 rad} \right] \quad (3-7)$$

Die Spektrale Strahldichte L_λ ist definiert als:

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \left[\frac{W}{m^3 rad} \right] \quad (3-8)$$

Dividiert man die spektrale spezifische Ausstrahlung

$$M_S(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \left[\frac{W}{\mu m \cdot m^2} \right] \quad (3-9)$$

durch $\pi \Omega$, erhält man die spektrale Strahldichte, wobei der Index S für einen schwarzen Strahler steht.

$$L_S(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\pi \Omega} \frac{1}{\lambda^5 e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \left[\frac{W}{m^3 rad} \right] \quad (3-10)$$

Durch Integration der spektralen Strahldichte über den gesamten Wellenlängenbereich erhält man das Stefan-Boltzmann Gesetz:

$$L = \int_{\lambda=0}^{\infty} L_S(\lambda, T) d\lambda = \frac{\sigma}{\pi \Omega} T^4 \left[\frac{W}{m^2 rad} \right] \quad (3-11)$$

wobei σ die Stefan Boltzmann Konstante ist.

Für die spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers folgt nun der elegante Zusammenhang:

$$M = \int_{\lambda=0}^{\infty} M_S(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3-12)$$

Aus den vorangegangenen Überlegungen lässt sich der Emissionsgrad nach Kirchhoff auch noch wie folgt darstellen, nämlich als Verhältnis der spektralen Strahldichte zu jener eines schwarzen Strahlers:

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} L_\lambda(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\infty} L_{\lambda,S}(\lambda, T) d\lambda} \quad (3-13)$$

3.6 Wien'sches Verschiebungsgesetz

Möchte man nun wissen, wo das Maximum der spektralen Strahldichte liegt, um ein möglichst großes Messsignal zu erhalten, so muss man Gleichung (3-10) ableiten und erhält durch Ermittlung der Nullstellen das Wien'sche Verschiebungsgesetz, das nun lautet:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,8978 \cdot 10^{-6} [\mu m \cdot K] \quad (3-14)$$

In Abbildung 3-6 ist erkennbar, dass sich das Maximum bei höheren Temperaturen zu niedrigeren Wellenlängen verschiebt [8].

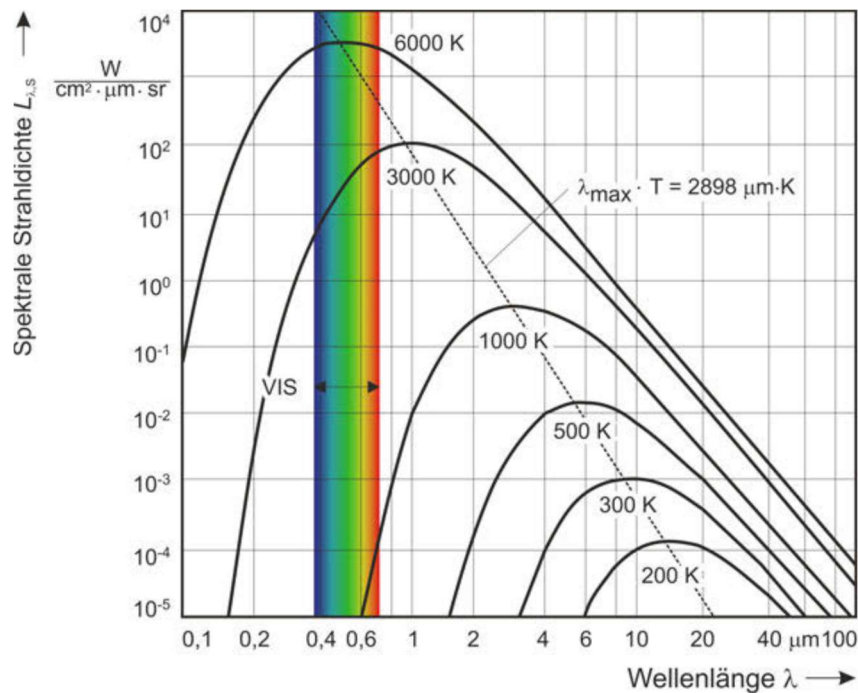


Abbildung 3-6: Wien'sches Verschiebungsgesetz [8]

3.7 Rückrechnen von Emissionskoeffizienten

Die Übernahme von Literaturwerten zu Emissionskoeffizienten sollte nach [9] vermieden werden, da der Emissionskoeffizient sehr stark oberflächenabhängig ist. So führen schon einfache Verschmutzungen oder Oberflächenveränderungen zu Unterschieden der Emissionskoeffizienten. Zur besseren Einordnung von verschieden beschaffenen Oberflächen können diese aus Messungen aber rückgerechnet werden. Aus den Überlegungen in Gleichung 3-12 und 3-13 kann der Emissionsgrad auch als Verhältnis von emittierter Wärmeleistung zur Strahlungsleistung verstanden werden. Daraus folgt nach [8]:

$$\varepsilon_{\Omega} = \frac{m \cdot c_p}{\sigma A (T^4 - T_U^4)} \cdot \frac{dT}{d\tau} \quad (3-16)$$

3.8 Thermografie

Thermografie nennt man die Bestimmung der örtlichen und zeitlichen Temperaturverteilung eines Messfeldes. Dabei wird die Verteilung der Infrarotstrahlung meist in den sichtbaren Bereich überführt, um ein Wärmebild zu erhalten [8].

Nun ist es naheliegend, Wellenlängenbereiche und Temperaturbereiche auszunutzen, in denen kleine Temperaturänderungen zu großen Änderungen der spezifischen Ausstrahlung führt, also das Integral

$$\frac{\partial M}{\partial T} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{\partial M_{\lambda,s}(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda \quad (3-17)$$

für einen grauen Körper maximiert wird. Im Wellenlängenbereich von 3-5 μm und einer Temperatur des schwarzen Strahlers von 750 K nimmt das Integral dabei relativ hohe Werte an, verglichen mit der Tabelle aus Abbildung 3-7.

| Spektralbereich $\lambda_1 \cdots \lambda_2$ in μm | Temperatur T_S eines Schwarzen Strahlers | | | | | | | |
|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 270 K | 280 K | 290 K | 300 K | 310 K | 373 K | 500 K | 750 K |
| Ausstrahlung $M_S(\Delta\lambda, T)$ in mW/cm^2 | | | | | | | | |
| 3 ... 5 | 0,175 | 0,270 | 0,403 | 0,585 | 0,833 | 5,09 | 52,6 | 580 |
| 3 ... 5,5 | 0,360 | 0,535 | 0,773 | 1,09 | 1,51 | 8,11 | 72,2 | 705 |
| 8 ... 12 | 7,03 | 8,35 | 10,2 | 12,1 | 14,2 | 31,8 | 91,1 | 273 |
| 8 ... 13 | 8,78 | 10,6 | 12,6 | 14,8 | 17,2 | 37,8 | 105 | 307 |
| 8 ... 14 | 10,4 | 12,5 | 14,7 | 17,3 | 20,0 | 42,9 | 116 | 334 |
| 0,6 ... 35 | 27,2 | 31,7 | 36,8 | 42,4 | 48,7 | 105 | 347 | 1762 |
| 0 ... ∞ | 30,1 | 34,8 | 40,1 | 45,9 | 52,4 | 110 | 354 | 1793 |
| Numerische Werte des Integrals nach Gleichung (14.13) | | | | | | | | |
| 3 ... 5 | 7,79 | 11,2 | 15,6 | 21,3 | 28,4 | 123 | 738 | 3822 |
| 3 ... 5,5 | 14,7 | 20,4 | 27,6 | 36,7 | 47,8 | 182 | 954 | 4446 |
| 8 ... 12 | 141 | 159 | 178 | 198 | 218 | 346 | 574 | 848 |
| 8 ... 13 | 169 | 190 | 211 | 233 | 256 | 397 | 644 | 936 |
| 8 ... 14 | 193 | 216 | 239 | 263 | 287 | 439 | 699 | 1003 |
| 0,6 ... 35 | 428 | 480 | 536 | 594 | 657 | 1159 | 2800 | 9374 |
| 0 ... ∞ | 446 | 498 | 553 | 612 | 675 | 1176 | 2834 | 9565 |

Abbildung 3-7: Numerische Werte des Integrals nach Gleichung 3-17 [8]

Eine wichtige Größe in der Thermografie ist der Strahlungscontrast C . Er ist das Verhältnis zwischen der Differenz der spezifischen Ausstrahlung von Objekt und Umgebung zur Summe ihrer spezifischen Ausstrahlung. Ist er beispielsweise negativ, scheinen Objekte gleicher Temperatur, aber niedrigerer Emissionsgrade, auf dem Wärmebild kälter. Eine mathematische Herleitung kann in [8] gefunden werden.

Auch in der Thermografie sind die schon erwähnten atmosphärischen Fenster im nahen und fernen Infrarot von Interesse. Dabei sind Kameras, die im nahen atmosphärischen Fenster (MWIR, vgl. Abbildung 3-1) arbeiten, für höhere Temperaturen einzusetzen. Im fernen Infrarot (LWIR, vgl. Abbildung 3-1) sind sie hingegen für einen weiten Temperaturbereich verwendbar, wie in Abbildung 3-6 ersichtlich ist.

Thermografie Kameras bestehen im Wesentlichen aus einer Optik, einem Sensor und der dazu zugehörigen Signalverarbeitung, wie es in Abbildung 3-8 skizziert ist. Die Optik muss dabei im verwendeten Wellenlängenbereich transmissiv sein [9] und hat den Zweck, die vom Messobjekt emittierte Strahlung auf den Sensor zu fokussieren, wie auch bei normalen Kameras im sichtbaren Bereich. Für Sensoren gibt es zwei zu unterscheidende Arten. Zum einen thermische Sensoren, die ihre elektrischen Eigenschaften abhängig von der Temperatur des Sensors ändern, zum anderen Photonen – Sensoren, die ihre Ausgangsspannung abhängig zu den absorbierten Photonen ändern [9].

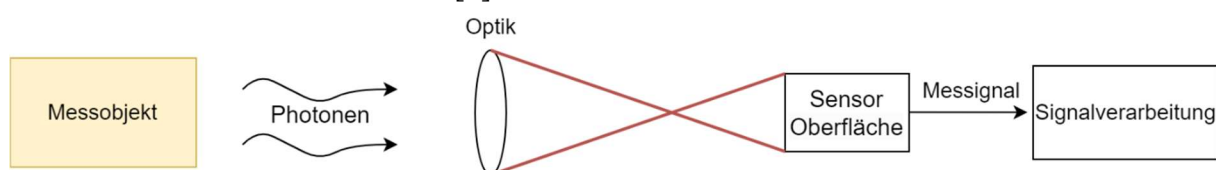


Abbildung 3-8: Prinzipskizze Thermografie

3.9 Pyrometrie

Unter Pyrometrie versteht man im Allgemeinen das Temperaturmessen der mittleren, örtlich begrenzten Strahlung [8]. Im Unterschied zur Thermografie wird hierbei nur ein Bereich aufgenommen und keine Verteilung bestimmt.

Aus der vom Messobjekt emittierten Infrarotstrahlung soll nun ein Temperatur-Messsignal gewonnen werden. Eine Fotodiode soll nun die Oberflächentemperatur des Messobjekts ermitteln. Abbildung 3-9 zeigt eine Prinzipskizze „Fotodiode mit Lichtwellenleiter“.

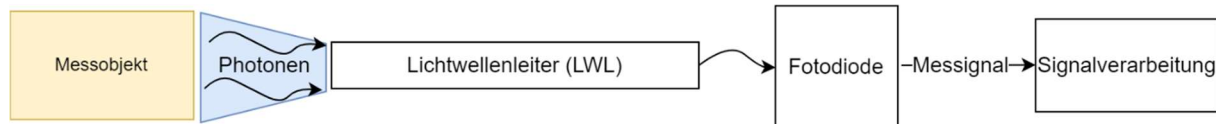


Abbildung 3-9: Prinzipskizze Fotodiode mit Lichtwellenleiter

3.10 Fotodiode und Lichtwellenleiter

Ein Lichtwellenleiter ist eine Glasfaser, in der es zu einer Totalreflexion der Strahlung kommt. In ihr wird das Infrarotsignal zur Fotodiode übertragen. Zum besseren mechanischen Schutz ist er in der vorliegenden Anwendung von einem Stahlkapillar umgeben [25].

Wählt man nun einen Lichtwellenleiter, der beispielsweise im Bereich von 1 bis 3 μm eine hohe Transmissivität hat, so muss auch die Fotodiode in diesem Wellenlängenbereich eine hohe Detektivität aufweisen [3]. Für den Lichtwellenleiter stehen viele Materialien zu Verfügung, jedoch haben viele dafür giftige Bestandteile. Möchte man giftige Bestandteile ausschließen, wählt man einen Lichtwellenleiter aus Silizium.

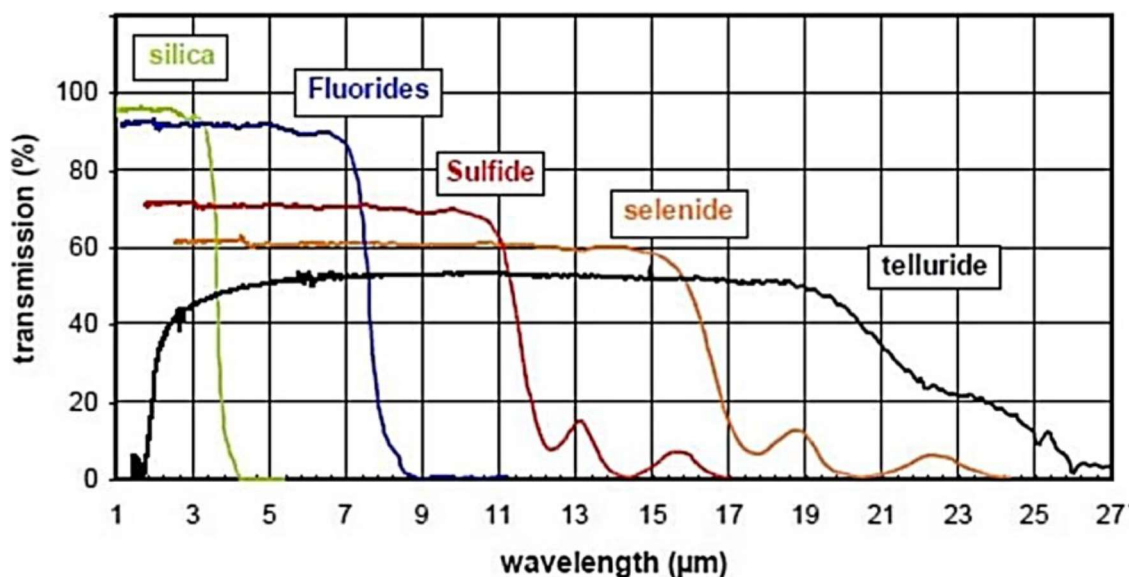


Abbildung 3-10: Transmission in verschiedenen Materialien [3]

Wie in Abbildung 3-10 ersichtlich, haben Siliziumfasern einen kleinen Wellenlängenbereich mit hoher Transmissivität bis 3 μm .

Nun muss eine Fotodiode im Wellenlängenbereich des Lichtwellenleiters ausgewählt werden.

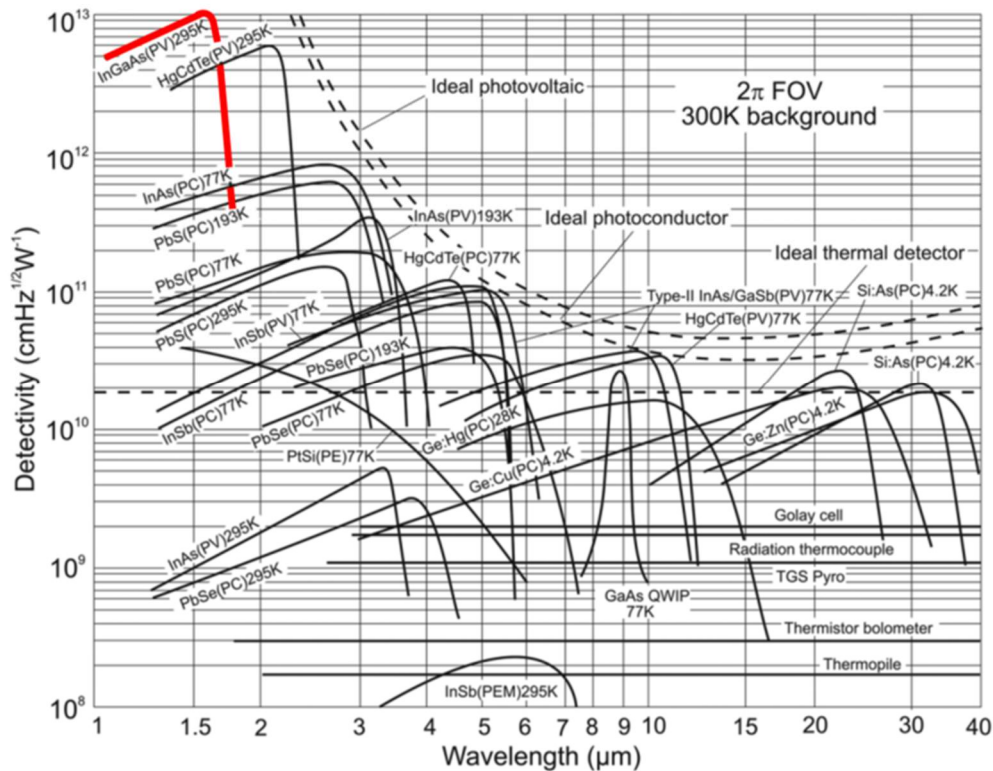


Abbildung 3-11: Detektivität von ausgewählten Fotodioden [3]

Um auch schwache Signale messen zu können, sollte die „Detectivity“ so hoch als möglich sein. Die „Detectivity“ ist das Maß für die Sensitivität der Fotodiode [3]. Gleichzeitig muss auf die vorgeschriebene Betriebstemperatur der Fotodioden Rücksicht genommen werden, die in der Materialbezeichnung in Abbildung 3-11 aufgeführt ist. Man kann feststellen, dass Fotodioden, die in einem Wellenlängenbereich über 2 μm operieren, gekühlt werden müssen, um die vorgeschriebene Temperatur zu erreichen, oder eine sehr niedrige „Detectivity“ haben. Somit fiel die Wahl auf eine InGaAs Fotodiode.

3.11 Sichtkegel des Lichtwellenleiters

Der Lichtwellenleiter kann nur einfallende Strahlung übertragen, die auch zu seinem Sichtkegel passt, also deren Winkel gleich oder kleiner α ist, siehe Abbildung 3-12. Der Sichtkegel ist dabei von der numerischen Apertur NA und dem Brechungsindex n_o des Lichtwellenleiters abhängig [3].

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{NA}{n_o} \right) \quad (3-18)$$

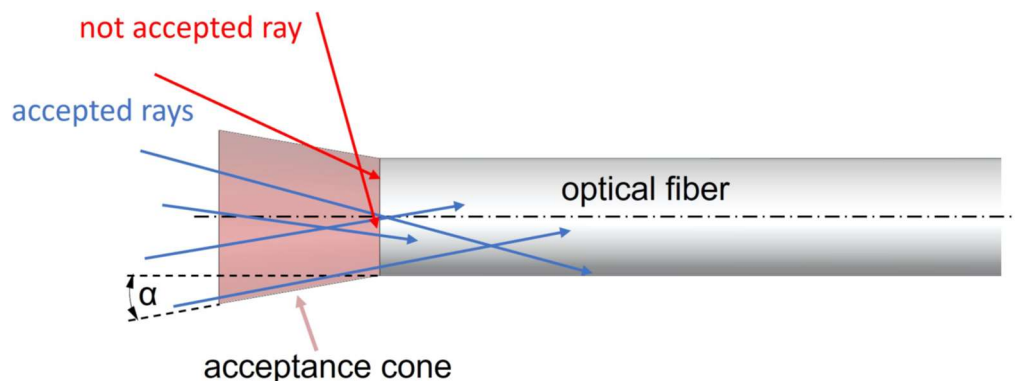


Abbildung 3-12: Sichtkegel eines Lichtwellenleiters [3]

3.12 Kalibrierung von Strahlungsthermometern

In Blatt 4.4 der VDI „Technische Temperaturmessung mit Strahlungsthermometrie“ werden unterschiedliche Kalibrierverfahren genau erklärt. Im vorliegenden Fall wurde auf die Variante „Kalibrierung mit Berührungsthermometer“ zurückgegriffen [14]. Dafür ist es wichtig, dass die verwendeten Berührungsthermometer ebenfalls kalibriert sind, um in der Messkette nur bekannte Fehler und Abweichungen zu haben. Um nun die Temperatur T_{Rad} einer Referenzstrahlungsquelle zu ermitteln, muss die Temperaturdifferenz ΔT zwischen der Temperatur T_{Probe} des Berührungsthermometres und der Oberflächentemperatur T_{Surf} bekannt sein. Nun errechnet sich die Temperatur T_{Rad} aus:

$$T_{Rad} = T_{Probe} - \Delta T - \Delta T_{\varepsilon} \quad (3-19)$$

wobei ΔT_{ε} einen Korrekturfaktor durch den Emissionsgrad ε der Referenzstrahlungsquelle angibt, welcher bekannt sein muss.

3.13 Kalibrierung von Thermoelementen laut Deutschem Kalibrierdienst

Ein Thermoelement nutzt den sogenannten „Seebeck-Effekt“ aus. Er besagt, dass die Differenzspannung zweier verschiedener Metalle, die in einem Punkt verbunden sind, ungefähr proportional zur Temperaturänderung des Verbindungspunktes ist [2]. Nun ist es aber nicht ausreichend, die Fotodiode mit einem beliebigen Thermoelement zu kalibrieren, selbstverständlich muss die ganze Messkette korrekt kalibriert sein. Gemäß der DIN 17025 [7], die für jedes Laboratorium, unabhängig des Fachbereichs, gilt, wird eine metrologische Rückführbarkeit der Temperaturen auf eine durchgängige Kalibrationskette gefordert. In Österreich wird diese gesetzliche Aufgabe vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) überwacht. Mittels natürlicher Fixpunkte (beispielsweise Tripelpunkt von Wasser: 0,01°C, Erstarrungspunkt von Indium: 156,5985°C; usw.) wird die angezeigte Temperatur eines Thermoelements auf die internationale Temperaturskala „ITS 90“ zurückgeführt [19]. Auf Nachfrage beim BEV gibt es für Österreich keine Anweisung für diese Kalibrierung, hier kann aber auf die Deutsche und europäische Richtlinie zurückgegriffen werden. Die Physikalisch Technische Bundesanstalt gibt dafür die Richtlinie „DKD-R 5-3 Kalibrierung von Thermoelementen (09/2018)“ heraus [1]. Sie stellt für Labore, die sich mit der Kalibrierung von Thermoelementen befassen, einen Leitfaden für die korrekte Vorgehensweise und den zu berücksichtigenden Einflussgrößen an. Als Grundlage kann hier die DIN EN 60584-1 [6] herangezogen werden, die für verschiedene Fixpunkte die zugehörige Thermospannung eines bestimmten Thermoelements angibt.

3.14 Korrektur des Emissionsgrades

Im vorliegenden Fall wurde ein Bandstrahlungsthermometer verwendet, das dadurch gekennzeichnet ist, dass nur Strahlung in einem gewissen Wellenlängenbereich gemessen wird. Nach VDI muss nun der Einfluss des Emissionsgrades berücksichtigt werden. In [8] wird für die Korrektur der angezeigten Temperatur T_A bei einer Messobjekttemperatur T_M folgender Ansatz herangezogen, sofern $T_A \gg T_U$ (Temperatur der Umgebung) gilt:

$$\frac{1}{T_M} = \frac{1}{T_A} + \frac{\lambda_{eff}}{C_2} \cdot \ln \varepsilon_B \quad (3-20)$$

Wobei ε_B der Bandemissionsgrad ist, C_2 die Konstante aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz [8] und die effektive Wellenlänge λ_{eff} berücksichtigt, dass die Wellenlänge nicht mehr als temperaturunabhängig angesehen werden kann. In einem Temperaturbereich von T_1 (hier 450°C) bis T_2 (hier 20°C) und einem Wellenlängenbereich von $1,2\ \mu\text{m}$ bis $2,6\ \mu\text{m}$ kann nun λ_{eff} berechnet werden mit:

$$\lambda_{eff} = \frac{C_2}{\ln \frac{X_{A,P}(T_1)}{X_{A,P}(T_2)}} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (3-21)$$

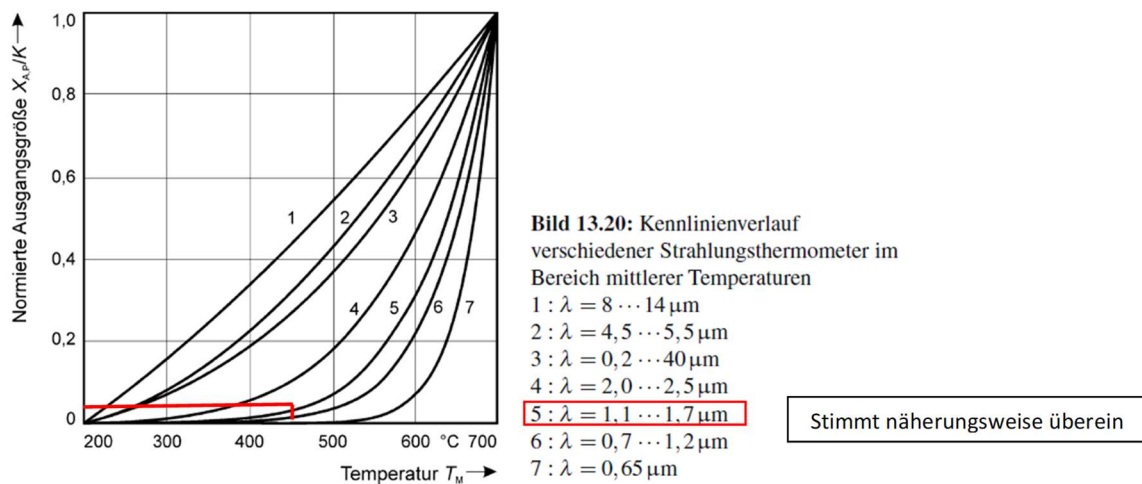


Abbildung 3-13: Kennlinien verschiedener Strahlungsthermometer [8]

Aus Abbildung 3-13 kann erkannt werden, dass die Ausgangsgrößen $X_{A,P}(T_2 = 450^\circ\text{C})$ sehr klein sind, somit kann näherungsweise $X_{A,P}(T_1 = 450^\circ\text{C}) \cong X_{A,P}(T_2 = 20^\circ\text{C})$. Somit folgt $\lambda_{eff} = 0$. Auch im Wellenlängenbereich von $2,0\ \mu\text{m}$ bis $2,5\ \mu\text{m}$ bleibt die Ausgangsgröße klein.

Daraus ergibt sich nun $\frac{1}{T_M} = \frac{1}{T_A}$. Eine Korrektur der Temperatur ist in diesem Bereich somit nicht erforderlich, da die Wellenlänge nicht stark temperaturabhängig ist.

3.15 Kontrolle des Wärmeübergangs mittels Biot-Zahl

Die Betrachtung der Bremsscheibe mit punktförmigen Messverfahren, wie es ein Thermoelement ist, setzt voraus, dass die Temperaturverteilung zeitlich und örtlich homogen ist. Auch wenn die inhomogene Druckverteilung des Bremsbelags zu unterschiedlichen Temperaturen auf der Bremsscheibe führt, stellt sich die Frage, ob diese Verteilung zumindest auf einem Umfang homogen ist. Eine dafür verwendete Kennzahl ist die Biot-Zahl. Sie stellt den Wärmeübergang von Oberfläche mit seiner Umgebung ins Verhältnis mit der Wärmeleitung im Körper selbst [15].

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda_s} \quad (3-22)$$

Kleine Biot Zahlen, also der Grenzfall $Bi \rightarrow 0$, sagen aus, dass es zu jedem Zeitpunkt eine gleichmäßige Körpertemperatur gibt und der Körper in einer großen Zeit die Temperatur der Umgebung annimmt. Gültig ist diese Aussage für Biot Zahlen $Bi < 0,1$.

Große Biot Zahlen $Bi \rightarrow \infty$ hingegen geben an, dass der Körper, als auch seine Umgebung, eine nichtkonstante Temperaturverteilung besitzen [15].

Vor allem für die Kalibrierversuche, in denen die ganze Scheibe auf eine Temperatur gebracht wird, ist diese Einordnung von Bedeutung.

Quantifiziert man die Gleichung nun mit den vorhandenen Parametern, die wie folgt lauten:

Wärmeleitungskoeffizient Stahl $\lambda_s \approx 50 \frac{W}{mK}$

Die Charakteristische Länge L berechnet sich aus der im Strahlungsaustausch stehenden Fläche zum in Strömungsrichtung vorhandenen Umfang wobei $d_{Scheibe} = 0,64 m$, mit

$$L = \frac{A}{U_{Proj}} = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi}{\frac{d}{2} \pi} = 0,32 m \quad (3-23)$$

Im Fall der Kalibrierung liegt die Scheibe horizontal auf und wird nicht bewegt. Es kommt somit zu einer freien Konvektion. Mit dem Formelwerk aus [16] ist nun der Wärmeübergangskoeffizient α für Luft bestimmbar.

Die Stoffwerte von Luft bei Umgebungstemperatur wurden bei $T_0 = 20^\circ C$ und Umgebungsdruck (1 bar) ermittelt, die Wandtemperatur der Scheibe beträgt $T_w = 450^\circ C$ [20].

| | |
|-----------|---------------------------|
| λ | $0,0257 \frac{W}{m^2 K}$ |
| c_p | $1006,4 \frac{J}{kg K}$ |
| ν | $0,0000153 \frac{m^2}{s}$ |
| β | $0,00343 \frac{1}{K}$ |
| ρ | $1,19 \frac{kg}{m^3}$ |

Nun muss die dimensionslose Grashofzahl wie folgt berechnet werden:

$$Gr = \frac{g L^3 \beta (T_w - T_0)}{\nu^2} = 2,0253 \cdot 10^9 \quad (3-24)$$

Danach folgt die ebenso dimensionslose Prandtl-Zahl:

$$Pr = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda} = 0,7129 \quad (3-25)$$

Zusammen ist damit die Rayleigh-Zahl bestimmbar:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 1,444 \cdot 10^9 \quad (3-26)$$

Das führt zur Funktion f_2 :

$$f_2(Pr) = (1 + 0,536 \cdot Pr^{-\frac{11}{20}})^{-\frac{20}{11}} = 0,4043 \quad (3-27)$$

Für den Fall $Ra \cdot f_2(Pr) \geq 7 \cdot 10^4$ ist die Nusselt-Zahl bestimmbar:

$$Nu = 0,15[Ra \cdot f_2(Pr)]^{\frac{1}{3}} = 125,36 \quad (3-28)$$

Woraus nun der Wärmeübergangskoeffizient bestimmbar ist:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} = 10,06 \frac{W}{m^2 K} \quad (3-29)$$

Damit folgt nun:

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda_s} = \frac{10,06 \cdot 0,32}{50} = 0,06444 \quad (3-30)$$

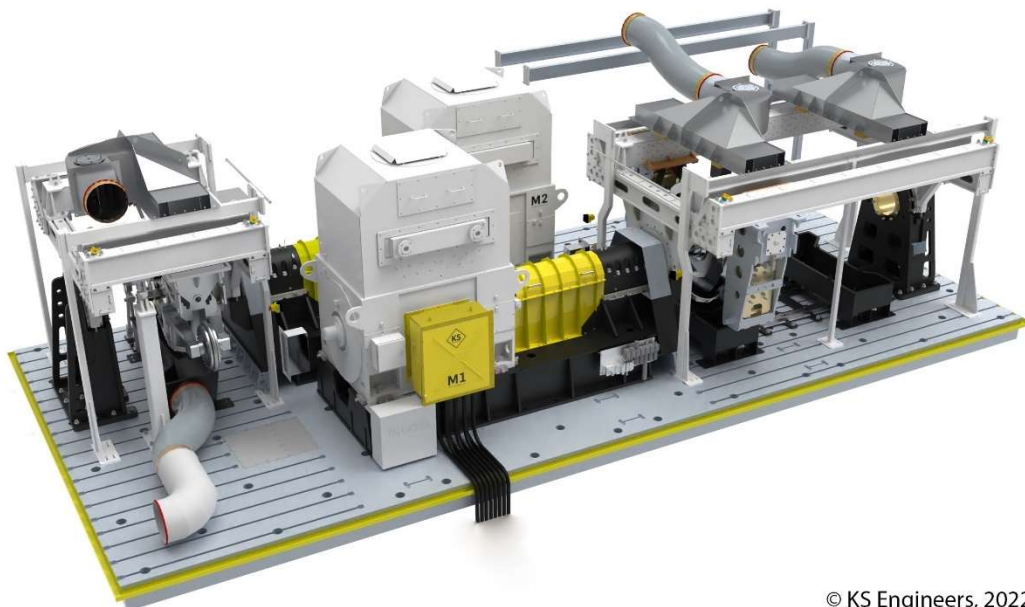
Und erfüllt damit die Anforderung $Bi < 0,1$.

Eine punktförmige Betrachtung ist somit zulässig.

4 Motivation für diese Arbeit

Im Jahr 2023 hat das Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik einen neuen Bremsenprüfstand in Betrieb nehmen dürfen. Dieser soll in absehbare Zeit die notwendigen Zertifizierungen erhalten, um danach gemäß DIN 14535 Bremscheiben prüfen zu können. Das Besondere am Prüfstand ist die Gestaltungsfreiheit in den Prüfzyklen. Haben bisherige Anlagen mit Schwungmassen gearbeitet, die nach Bedarf gekuppelt wurden, ist dieser Prüfstand mit zwei Elektromotoren mit je 1.400 kW ausgestattet, die in zwei unabhängigen Prüfkammern alle erdenklichen Szenarien abfahren können. Weiters ist besonders die Regelungstechnik des Prüfstandes hervorzuheben, die wie keine andere Sollwerte des Realbetriebs ohne Ober- oder Unterschwinger erreichen kann [21]. In Abbildung 4-1 ist links die Prüfkammer für Komponenten und rechts für ganze Fahrwerke zu sehen.

Nun stellt sich natürlich die Frage, welche Messdaten am Prüfstand erhoben werden können. Dies geschieht aktuell nach Norm für die Prüfung von Bremsen für Schienenfahrzeuge mit Schleifkontakten oder Thermoelemente unter der Scheibe. Da die Scheibe aber vor allem auf die Temperatur ausgelegt wird, stellt sich die Frage, ob diese Messverfahren schon das Optimum darstellen. Das berührende Verfahren mit Schleifkontakten hat den Nachteil der Eigenreibung und damit Messbeeinflussung, die Thermoelemente unter der Oberfläche, dass an nur drei Punkten gemessen wird und auch hier nicht die wahre Oberflächentemperatur gemessen wird. So stellt sich die Frage, ob auch optische, berührungslose Messverfahren auf diesen Verwendungsfall übertragbar sind. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, welche Einflussgrößen für berührungslose Temperaturmessverfahren bei Schienenfahrzeugbremsen von Relevanz sind, wie eine korrekte Kalibrierung dieser durchzuführen ist und welche Genauigkeit und Stabilität damit erreichbar ist.



© KS Engineers, 2022

Abbildung 4-1: Bremsenprüfstand TU Graz, KS Engineers [21]

5 Versuche zum berührungslosen Temperaturmessen

Im nun folgenden Abschnitt werden die zuvor beschriebenen Messverfahren praktisch angewandt und ihre Vor- und Nachteile sichtbar gemacht. Die dabei verwendeten Bremsscheibenprüflinge werden im Anhang 3 näher beschrieben.

Nicht alle Versuche der folgenden Versuchsreihen lieferten brauchbare Ergebnisse, nachfolgend soll nur auf die jeweils brauchbaren Versuche eingegangen werden. Eine Aufstellung aller Versuche kann in Anhang 1 sowie die Daten der verwendeten Fotodioden in Anhang 2 gefunden werden.

5.1 Isolieren von Parametern

Das Ziel dieser Arbeit, die zwei optischen Temperaturmessverfahren Pyrometrie und Thermografie für die Anwendung an einem Schienenfahrzeugbremsprüfstand zu applizieren, wird mit einer umfassenden Parameterstudie zum Einfluss von verschiedenen Größen auf das Messergebnis begründet. Es wird eine Kalibrierkurve der Fotodiode bei Aufheizen und Abkühlen der Scheibe mit unterschiedlichen Bedingungen (Oberfläche, Material, Verschleißzustand) ermittelt. Diese verschiedenen Kalibrierkurven werden dann verglichen. Dabei werden zur besseren Übersicht Emissionskoeffizienten aus den Versuchen rückgerechnet, da die Übernahme von Literaturwerten meist falsche Ergebnisse liefern. Durch diesen Vergleich werden relevante Einflussgrößen ermittelt.

So werden aufgrund der zuvor beschriebenen Grundlagen die folgenden Größen berücksichtigt:

Statische Versuche – Berücksichtigte Größen

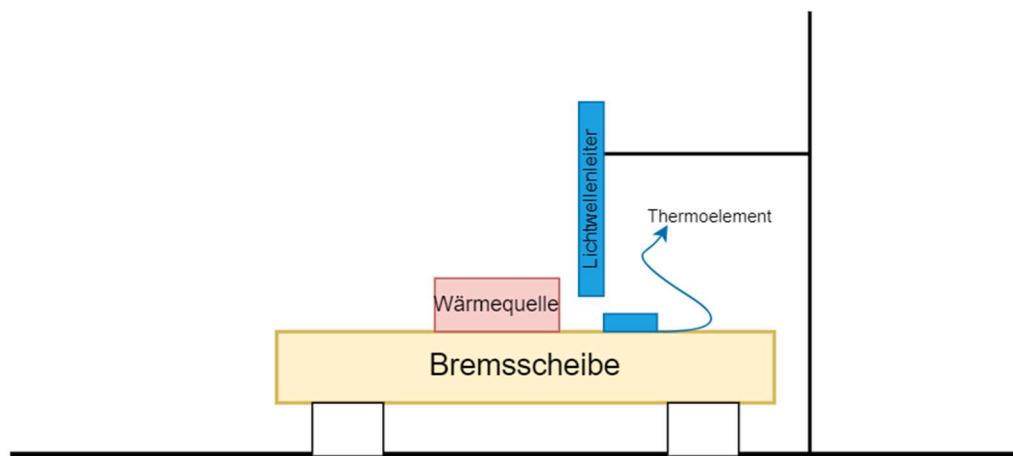


Abbildung 5-1: Grundlegender Aufbau für statische Versuche

Der Aufbau der statischen Versuche wurde nach Abbildung 5-1 durchgeführt. Für diese Kalibrierversuche des Pyrometers werden folgende Größen berücksichtigt, die für das Rückrechnen auf den Emissionsgrad relevant sind:

- Oberflächenbeschaffenheit und Rauheit der Bremsscheibe (Verschleiß, Rost)
- Abmessungen, Material und Masse der Bremsscheibe
- Reflexion durch andere Oberflächen in den Sichtkegel der optischen Verfahren

Dynamische Versuche – Berücksichtigte Größen

Zusätzlich zu den Größen der statischen Versuche müssen beim dynamischen Versuch noch folgende Parameter erhoben werden:

- Drehzahl der Bremsscheibe für die korrekte Ortsauflösung
- Staubentwicklung, gegebenenfalls freiblasen des Sensorkopfs mit Druckluft erforderlich

5.2 Prinzipversuch mit Thermografie

Um eine Einschätzung der erreichbaren Temperaturen mit den vorhandenen Gerätschaften sowie der zu beachtenden Randbedingungen zu bekommen, wurde im ersten Prinzipversuch ganz bewusst ein sehr rudimentärer Aufbau gewählt, deren Schwächen in den nun folgenden Versuchen Schritt für Schritt beseitigt werden sollen.

5.2.1 Aufbau und Durchführung

Die Bremsscheibe wurde auf zwei Auflagepunkten auf einem Tisch aufgelegt. Die verwendete Bremsscheibe stammt von einer Straßenbahn und wurde von der Fa. Knorr-Bremse aus Spezial-Grauguss hergestellt. Mittels Systemprofilen wurde der Heißluftföhn als auch die Wärmebildkamera gehalten, wie in Abbildung 5-2 ersichtlich ist.

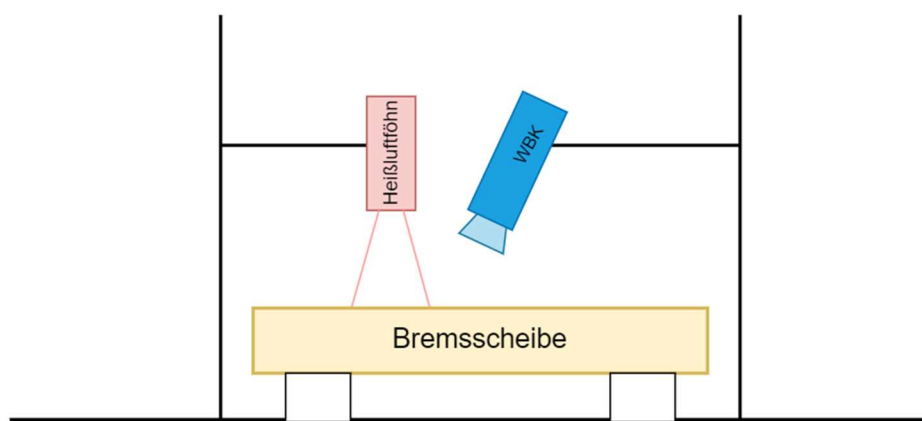


Abbildung 5-2: Aufbau Prinzipversuch 1

Mit diesem Aufbau wurde eine Aufheiz- und Abkühlkurve der Bremsscheibe gemessen. Dazu wurde der Heißluftföhn gestartet und nach Erreichen einer bestimmten Temperatur abgeschaltet. Die Wärmebildkamera zeichnete davon ein Video auf. Das Thermoelement (Typ K) wurde für jede Messung auf den heißesten Punkt der Scheibe laut Wärmebildkamera gelegt (Fabrikat: Hti HT-19).

5.2.2 Ergebnisse

Die jeweils höchste Temperatur laut Wärmebildkamera wurde in einem Video festgehalten und im Abstand von ca. einer Minute notiert, zum gleichen Zeitpunkt wurde mit dem Thermoelement gemessen. Das führt zu dem in Abbildung 5-3 gezeigten Temperaturverlauf. Aufgrund des schnellen Aufheizens des Föhns ist die Scheibe oberflächlich sehr schnell auf einer hohen Temperatur.

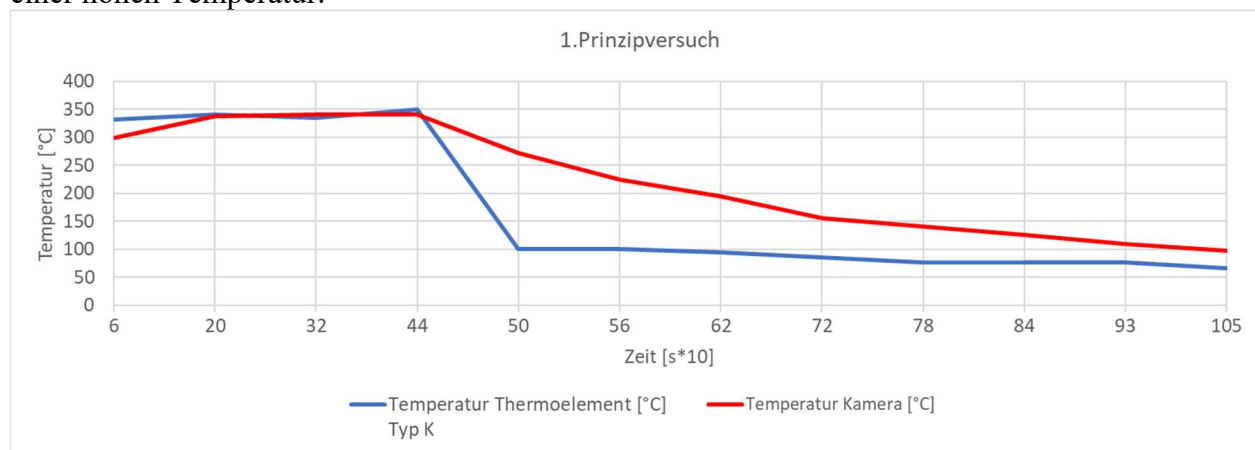


Abbildung 5-3: Ergebnisse Prinzipversuch 1

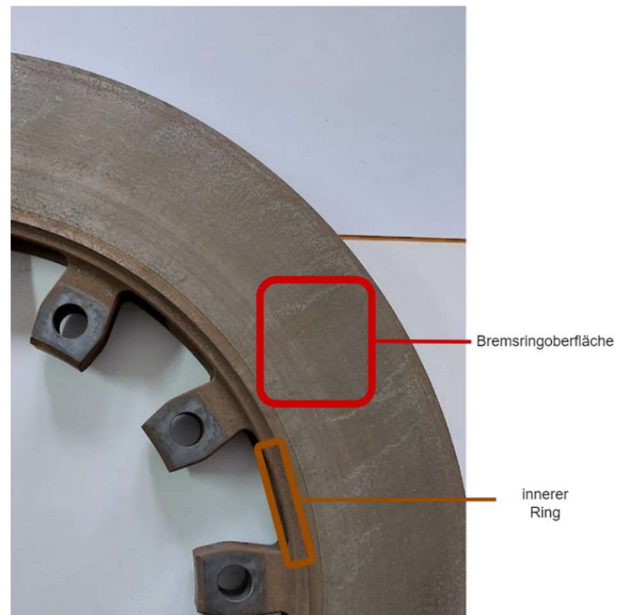
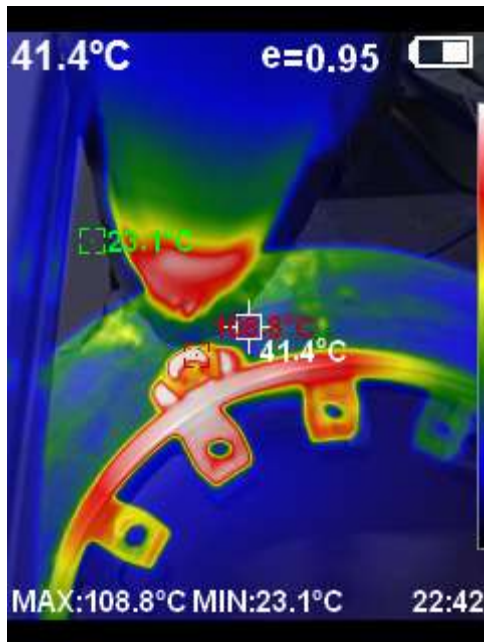


Abbildung 5-4: Wärmebild Prinzipversuch 1 Abbildung 5-5: unterschiedliche Oberflächen

5.2.3 Resultat

Anhand des Temperaturverlaufs in Abbildung 5-3 kann erkannt werden, dass für ein Erreichen von Oberflächentemperaturen von über 400°C, eine lange Aufheizzeit bei diesem Versuchsaufbau benötigt wird. Der sehr unstetige Knick der Thermoelementtemperatur zeigt, dass es nicht ausreichend ist, dass das Thermoelement nur für die Messung die Oberfläche berührt. Denn das Thermoelement misst immer nur die eigene Temperatur. Auch für diese Messung ist ein Wärmeübergang von der Oberfläche der Scheibe zum Thermoelement notwendig. Für zukünftige Versuche sollte das Thermoelement auf der Scheibe fixiert werden.

Auf dem Wärmebild des 1.Prinzipversuchs in Abbildung 5-4 kann schon gut erkannt werden, warum Wärmebilder kritisch zu betrachten sind. So wurde zwar die Reiboberfläche und der innere Bremsring aufgeheizt, doch am Wärmebild scheint es, als ob der innere Ring die heißeste Oberfläche ist. Da dieser rostiger als die Bremsringoberfläche ist, wie auf Abbildung 5-5 zu sehen, ist sein Emissionsgrad höher als die im Vergleich dazu glattere Bremsringoberfläche. Hier soll auf den Abschnitt 3.8 mit dem Absatz Strahlungscontrast verwiesen werden. Wie auch im Wärmebild erkennbar, ist der Emissionskoeffizient mit 0,95 sehr hoch eingestellt und stimmt eher mit dem rostigen, inneren Ring als der glatten Bremsringoberfläche überein.

5.3 Erste Versuchsreihe zur Kalibration eines Pyrometers mit einem Lichtwellenleiter

5.3.1 Aufbau und Durchführung

Der in Abbildung 5-1 gezeigte Versuchsaufbau wurde entweder mit Plattenheizelementen oder einer Induktionsplatte durchgeführt, wie am Vergleich in Abbildung 5-6 zu sehen ist. Der Lichtwellenleiter hatte dabei einen Abstand von ca. 5 mm zur Scheibe. Um die Genauigkeit zu verbessern, wurden zwei Thermoelemente des Typ K verwendet. Diese waren, wie in Abbildung 5-7 ersichtlich ist, direkt an der mit dem Lichtwellenleiter gemessenen Stelle angebracht. Dazu wurden die Thermoelemente mit einem kleinen Gewicht beschwert, der Draht des Thermoelements hatte nun einen leichten Druck gegen die Bremsscheibe. Nun wurden verschiedenen Konfigurationen aus Scheibe und Heizmethodik für die Messungen aufgebaut und verglichen. Im Prüfprogramm im Anhang 1 kann eine genaue Auflistung der Konfigurationen

gefunden werden. Als Detektor wurde für die erste Versuchsreihe die Fotodiode 1, eine InGaAs Fotodiode mit dem Wellenlängenbereich 1,2-2,57 μm und einer Auflösung von 100kHz, ungekühlt verwendet. Dieser Wellenlängenbereich ist zum einen teilweise in einem atmosphärischen Fenster (vgl.

Abbildung 3-4), zum anderen ist auch das Maximum der emittierten Strahlung in diesem Bereich zu erwarten (vgl. Abbildung 3-6). Die in Abschnitt 3.12 erläuterte Kalibration wurde aufgrund der in dieser Arbeit geforderten Genauigkeit von $\pm 5 \text{ K}$ nicht durchgeführt, jedoch wurden zwei Thermoelemente verwendet, um die Messwerte auf Plausibilität prüfen zu können.

Beim Lichtwellenleiter handelte es sich um einen Siliziumfaser. Die ungekühlte Fotodiode hat den Nachteil, dass sie ihre Grundspannung immer verändert, da das gesamte Bauteil mit fortlaufender Einschaltzeit wärmer wird.

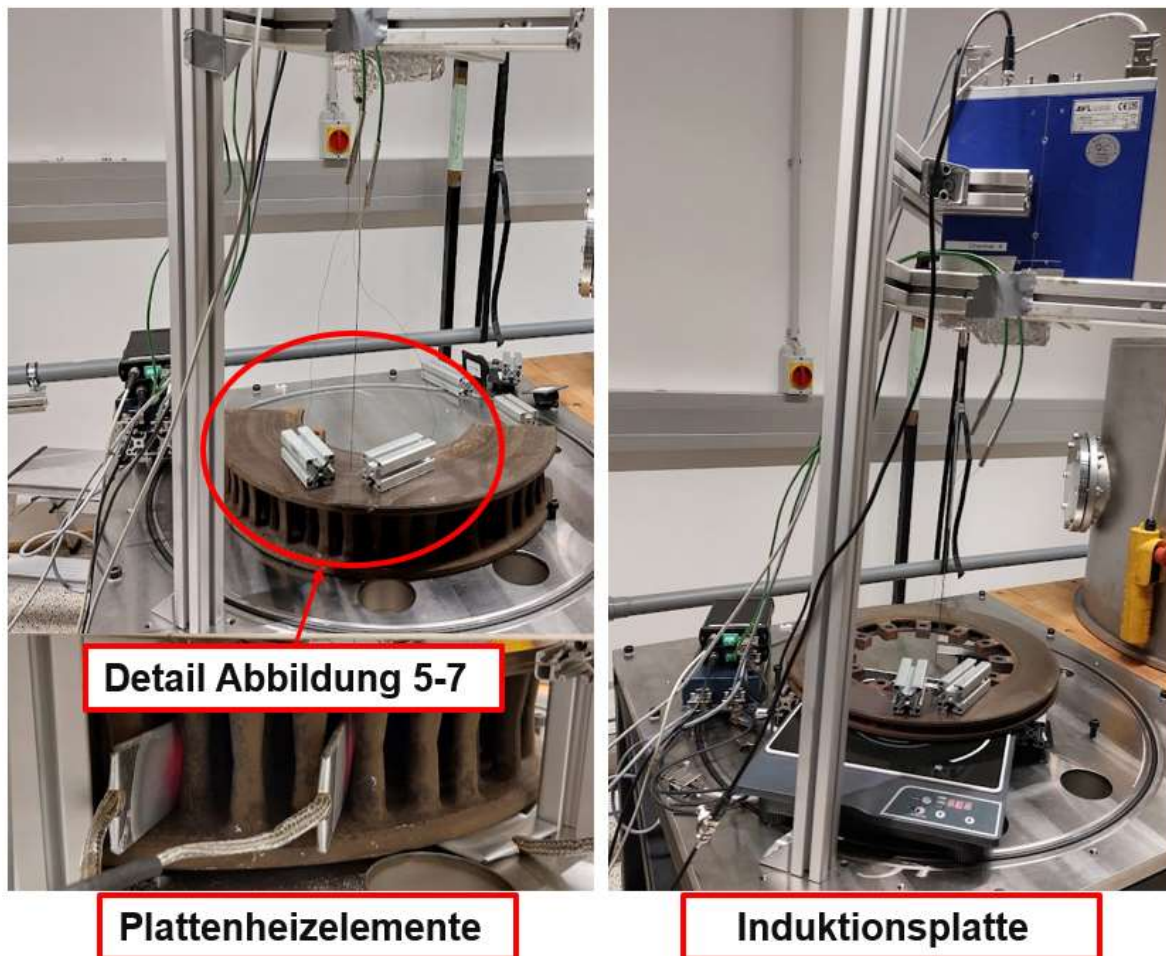


Abbildung 5-6: Aufbau erste Versuchsreihe

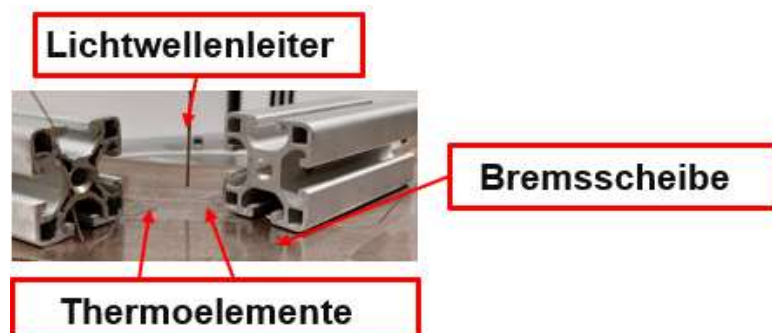


Abbildung 5-7: Thermoelement und Lichtwellenleiter

5.3.2 Ergebnisse

Die Messungen mit der ungekühlten Fotodiode führten zu den in Abbildung 5-8 gezeigten Spannungs- und Temperaturverläufen, wobei die Messwerte in allen Versuchen in einem 10 Sekunden Intervall gemittelt wurden. Zwischen Erreichen der höchsten Temperatur und Erreichen der höchsten Spannung lag ein großer Zeitverzug. Die Verläufe korrelierten aber prinzipiell.

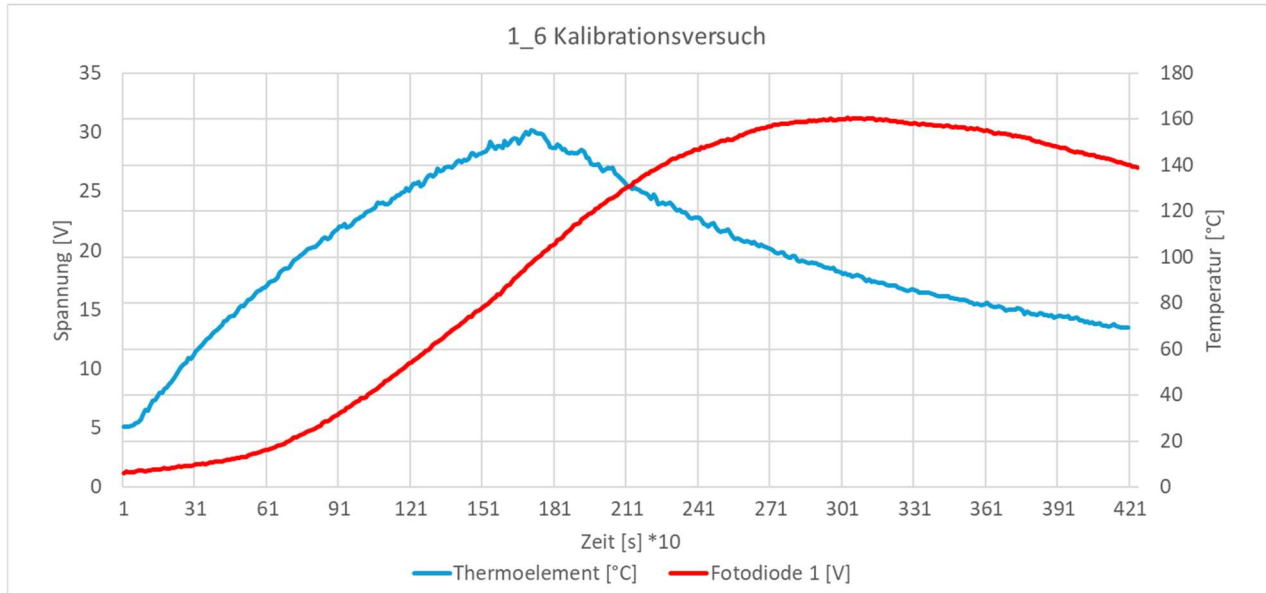


Abbildung 5-8: Ergebnisse erste Versuchsreihe

5.3.3 Resultat

Das Verfahren ist in dieser Form noch nicht dynamisch genug bzw. für Vergleiche von verschiedenen Scheiben geeignet. Es scheint, als ob die Temperatur der Fotodiode selbst eine große Rolle auf die ausgegebene Spannung hat und nach Abschalten der Heizelemente die Scheibe noch auf die Fotodiode nachstrahlt. Mit einer Kühlung der Fotodiode soll dem Abhilfe geschaffen werden und die Messung von Kalibrationskurven der verschiedenen Bremscheiben möglich gemacht werden. Weiters ist es neben den genannten Problemen ratsam, die Fotodiode nicht über der erhitzten Scheibe zu platzieren.

5.4 Zweite Versuchsreihe zur Kalibration eines Pyrometers mit einem Lichtwellenleiter

5.4.1 Aufbau und Durchführung

Der Aufbau wurde geändert, indem der Lichtwellenleiter nun von unten auf die Scheibe schaut und sich so auch die Fotodiode unter dem Versuchstisch befindet. Es wurde wieder ein Silizium Lichtwellenleiter und die Fotodiode 1 verwendet, diesmal aber durch ein Peltierelement gekühlt. Die verwendeten Thermoelemente waren wieder vom Typ K.



Abbildung 5-9: Aufbau zweite Versuchsreihe

5.4.2 Ergebnisse

Durch die Kühlung wurde keine Besserung erzielt. Das Ausgangssignal korrelierte nun gänzlich nicht mehr mit der Temperatur.

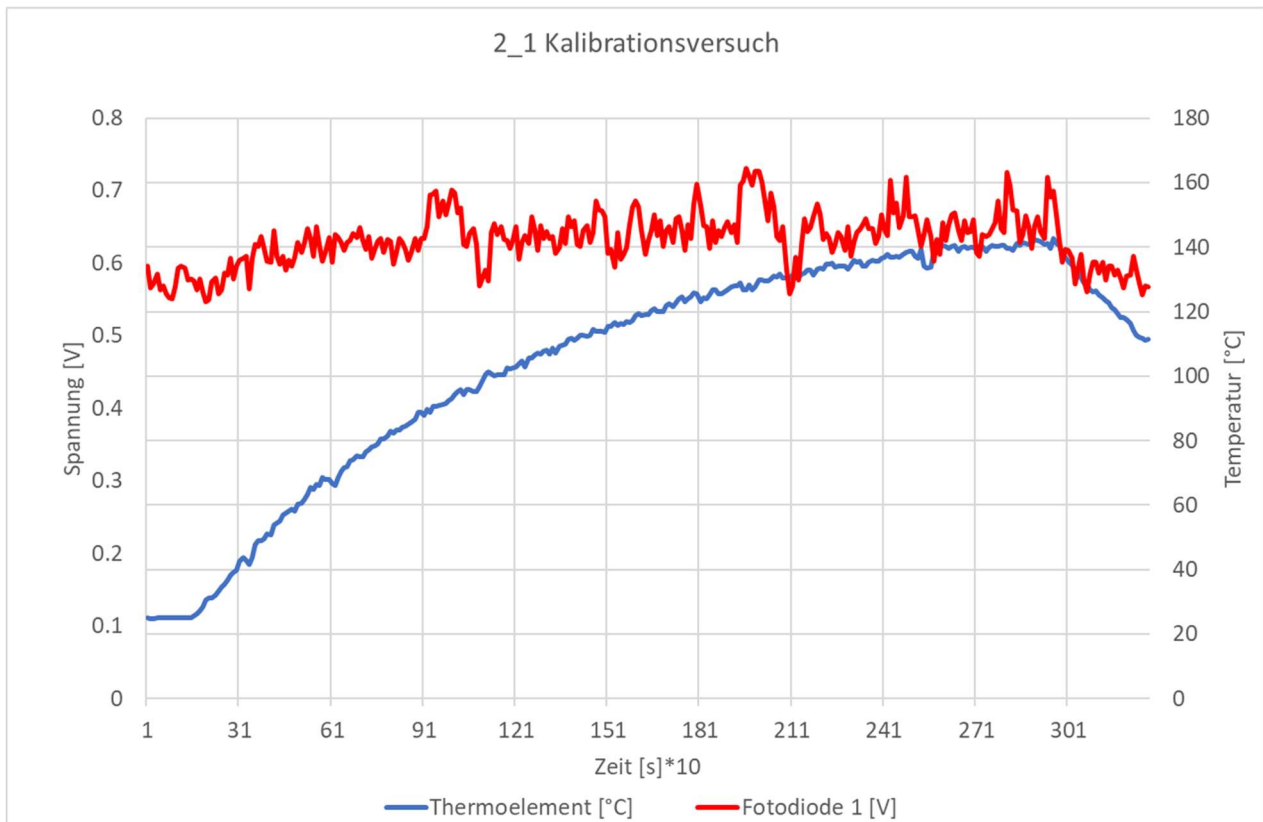


Abbildung 5-10: Ergebnisse zweite Versuchsreihe

5.4.3 Resultat

Mit den nun gewonnen Ergebnissen kann man festhalten, dass in der ersten Versuchsreihe nur die Infrarotstrahlung an der Fotodiode gemessen wurde. Die unter der Schaltung liegende, heiße Scheibe hatte mehr Strahlung direkt an die Schaltung abgegeben, als durch den Lichtwellenleiter übertragen wurde. Die gesamte Schaltung liefert aufgrund der hohen Zeitauflösung ein zu schwaches Signal in diesem Temperaturbereich, wie auch aus den Versuchen in [25] nachzuvollziehen ist. In jener Arbeit wurde erst ab 175 °C ein verwertbares Signal ermittelt. Aus diesem Grund ist die hier verwendete Fotodiode für den vorgesehenen Einsatz ungeeignet.

5.5 Dritte Versuchsreihe zur Kalibration eines Pyrometers mit einem Lichtwellenleiter

5.5.1 Aufbau und Durchführung

Für die dritte Versuchsreihe wurde die Fotodiode 2, eine InGaAs Fotodiode im Wellenlängenbereich von 1-1,66 μm , 100 Hz, gekühlt mit einem Silizium Lichtwellenleiter, Durchmesser 3mm, verwendet, zur Temperaturmessung zwei Thermoelemente Typ K. In Versuch 3_3 wurden die Heizelemente unter der Bremsscheibe angebracht. Um den Einfluss von externen Strahlern (hier: die Heizelemente) auf das Messergebnisse zu minimieren, wurde die Scheibe in Versuch 3_4 plan auf den Tisch aufgelegt und die Heizelemente in den Kühlrippen der Scheibe platziert. Somit wird nun nur die heiße Oberfläche der Bremsscheibe gemessen. Der Aufbau aus Versuch 3_4 wird in Abbildung 5-11 gezeigt. Die verwendeten Bremsscheiben können mit Anhang 1 nachvollzogen werden.

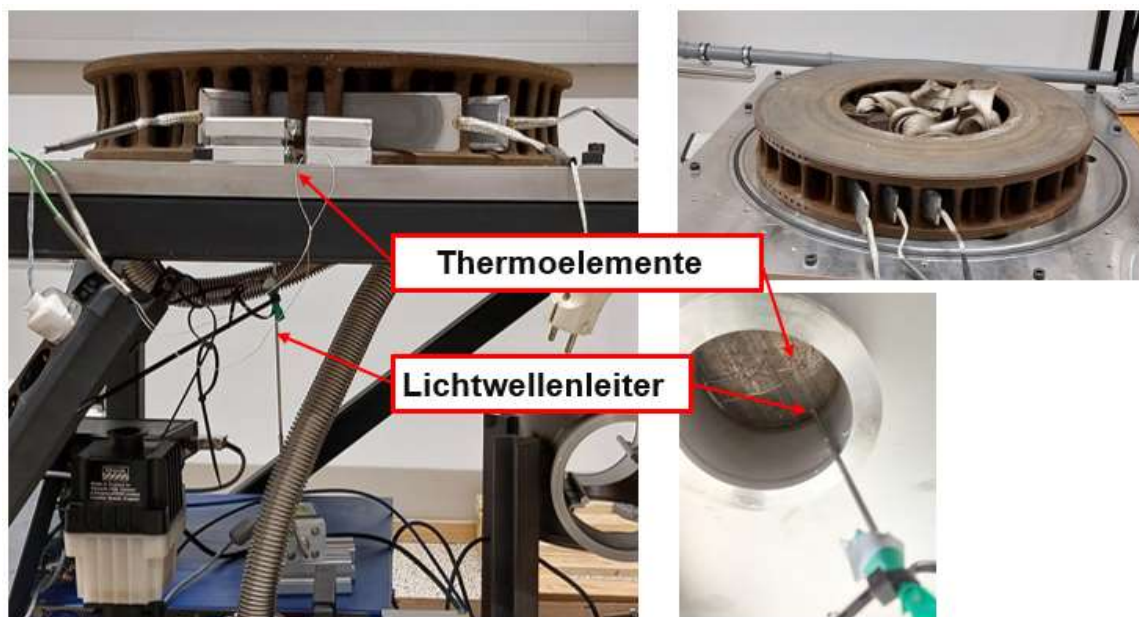


Abbildung 5-11: Aufbau dritte Versuchsreihe

5.5.2 Ergebnisse

Die Temperatur- und Spannungsverläufe korrelieren mit dieser Fotodiode besser. Es ist in Abbildung 5-12 erkennbar, dass bei einem langsameren Aufheizen (Versuch 3_3) eine bessere Korrelation besteht. In Abbildung 5-13 sind zwei Spannungshysteresen der dritten Versuchsreihe dargestellt. In diesen wird die gemessene Spannung über die Temperatur dargestellt. Das ist wichtig, um zeigen zu können, dass die Messwerte der Spannung unabhängig vom Prozess des Abkühlens oder Aufheizens sind. Für eine gute Qualität des Kalibrationsversuchs sind Spannungshysteresen deswegen gute Indikatoren.

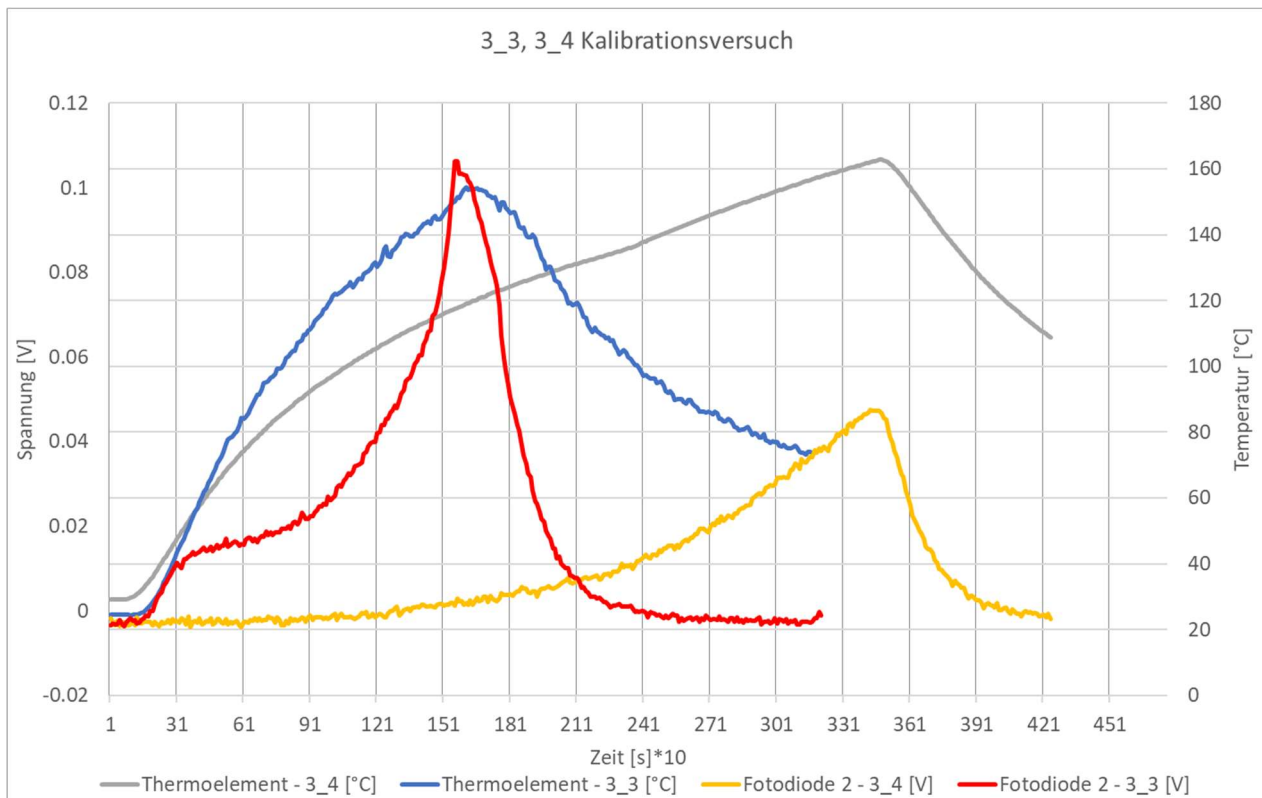


Abbildung 5-12: Ergebnisse dritte Versuchsreihe (1)

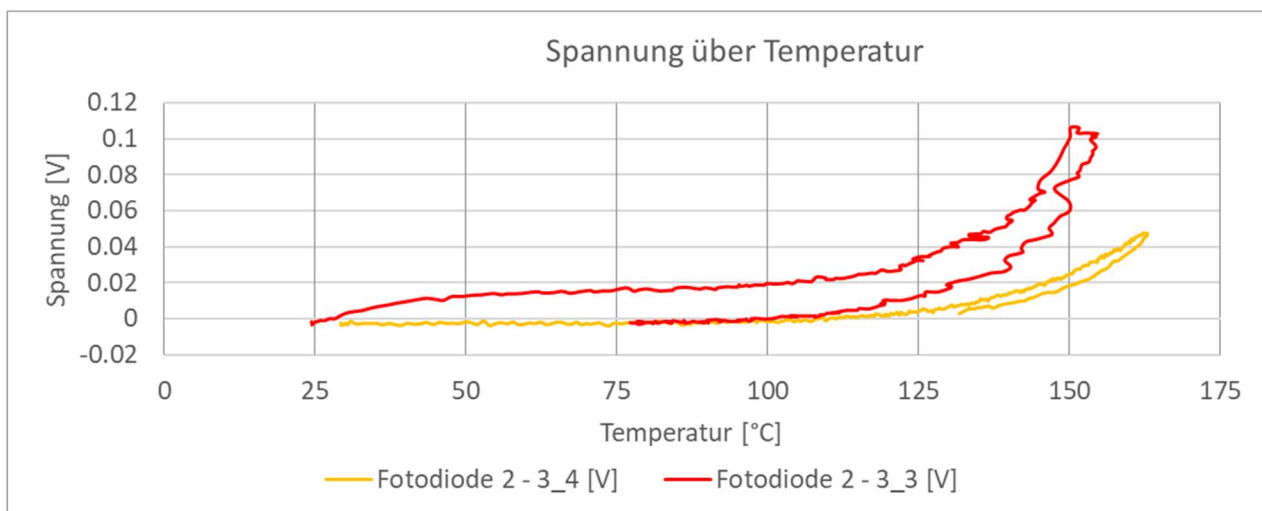


Abbildung 5-13: Ergebnisse dritte Versuchsreihe (2)

5.5.3 Resultat

Der Verlauf der Spannungshysterese ist in Versuch 3_3 unstetig und zwischen Aufheizen und Abkühlen sehr unterschiedlich. In Versuch 3_4, in dem die Heizelemente für die Fotodiode nicht mehr sichtbar sind, da sie in den Kühlrippen positioniert sind, hat die Hysterese einen gleichmäßigeren Verlauf. Der Nachteil an dieser Fotodiode ist, dass sie sehr nahe am sichtbaren Bereich arbeitet und die Messstelle somit vom Tageslicht abgeschirmt sein muss. Dies ist auch im Spannungsverlauf von Versuch 3_3 erkennbar. Nach dem Einschalten der Heizelemente dauert es eine Weile, bis diese rot glühen. Genau diesen Effekt sieht man in den ersten 300 Sekunden.

5.6 Vierte Versuchsreihe zur Kalibration eines Pyrometers mit einem Lichtwellenleiter

5.6.1 Aufbau und Durchführung

Für die vierte Versuchsreihe kam die Fotodiode 3, eine InGaAs Fotodiode im Wellenlängenbereich von 2-2,6 μm , einer Auflösung von 0,5 Hz, gekühlt zum Einsatz. Dieser Detektor ist wieder weit genug vom sichtbaren Bereich entfernt und liegt auch in einem atmosphärischen Fenster (vgl.

Abbildung 3-4). Parallel zu dieser Fotodiode (Fotodiode 3) wurde auch noch jene aus der dritten Versuchsreihe aufgezeichnet (Fotodiode 2). Der Lichtwellenleiter war wieder aus Silizium und hatte einen Durchmesser von 1 mm. Der Aufbau war analog zur dritten Versuchsreihe, die Heizelemente wurden in den Kühlrippen positioniert. Im Versuch 4_1 wurde konstant geheizt, in Versuch 4_2 wurden mehrere Ein- und Ausschaltvorgänge durchgeführt, um das dynamische Verhalten bewerten zu können. Versuch 4_1 und 4_2 wurden an zwei verschiedenen Bremscheiben gemessen.

5.6.2 Ergebnisse

Die Versuche führten zu den in Abbildung 5-14 und 5-15 dargestellten Temperatur- und Spannungsverläufen.

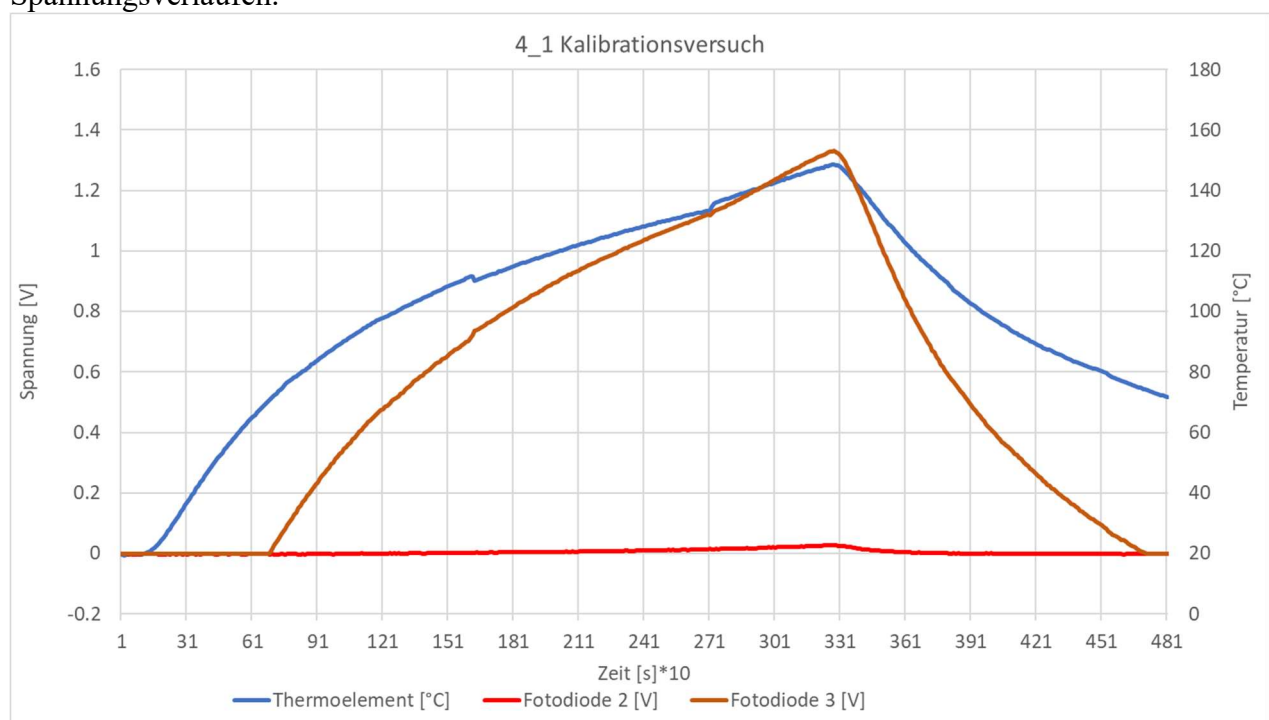


Abbildung 5-14: Ergebnisse vierte Versuchsreihe (1)

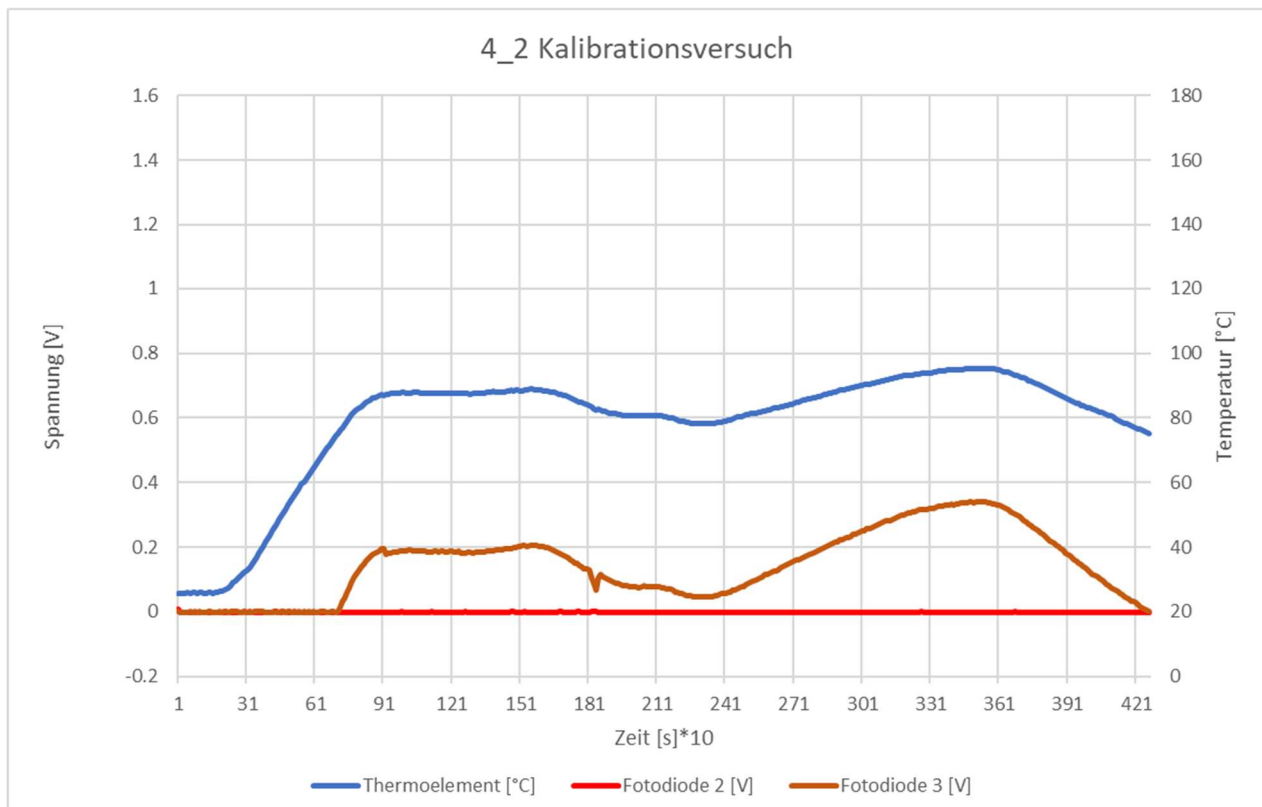


Abbildung 5-15: Ergebnisse vierte Versuchsreihe (2)

5.6.3 Resultat

Im Vergleich der zwei Fotodioden ist klar erkennbar, dass die Stärke des Signals als auch das dynamische Verhalten der Fotodiode 3 um einiges besser ist. Der Arbeitsbereich der Fotodiode startet erst bei 70°C, deckungsgleich zur Angabe des Herstellers. Mit den nun gewonnen Spannungsverläufen aus Versuch 4_2 wurde nun versucht, die Kalibration des Versuchs 4_1 zur Temperaturbestimmung zu verwenden. In Excel wurden zum jeweilig gleichwertigen Spannungssignal das bekannte Temperatursignal aus Versuch 4_1 herausgeschrieben. Die Formeln finden dabei erst ab ca. 70°C Werte, da die Fotodiode zuvor nichts detektiert. Damit kommt man auf das Temperatursignal in Abbildung 5-16. In der ersten 700 Sekunden kommt es deswegen auch zu einer großen Differenz der errechneten und gemessenen Temperatur in Abbildung 5-16.

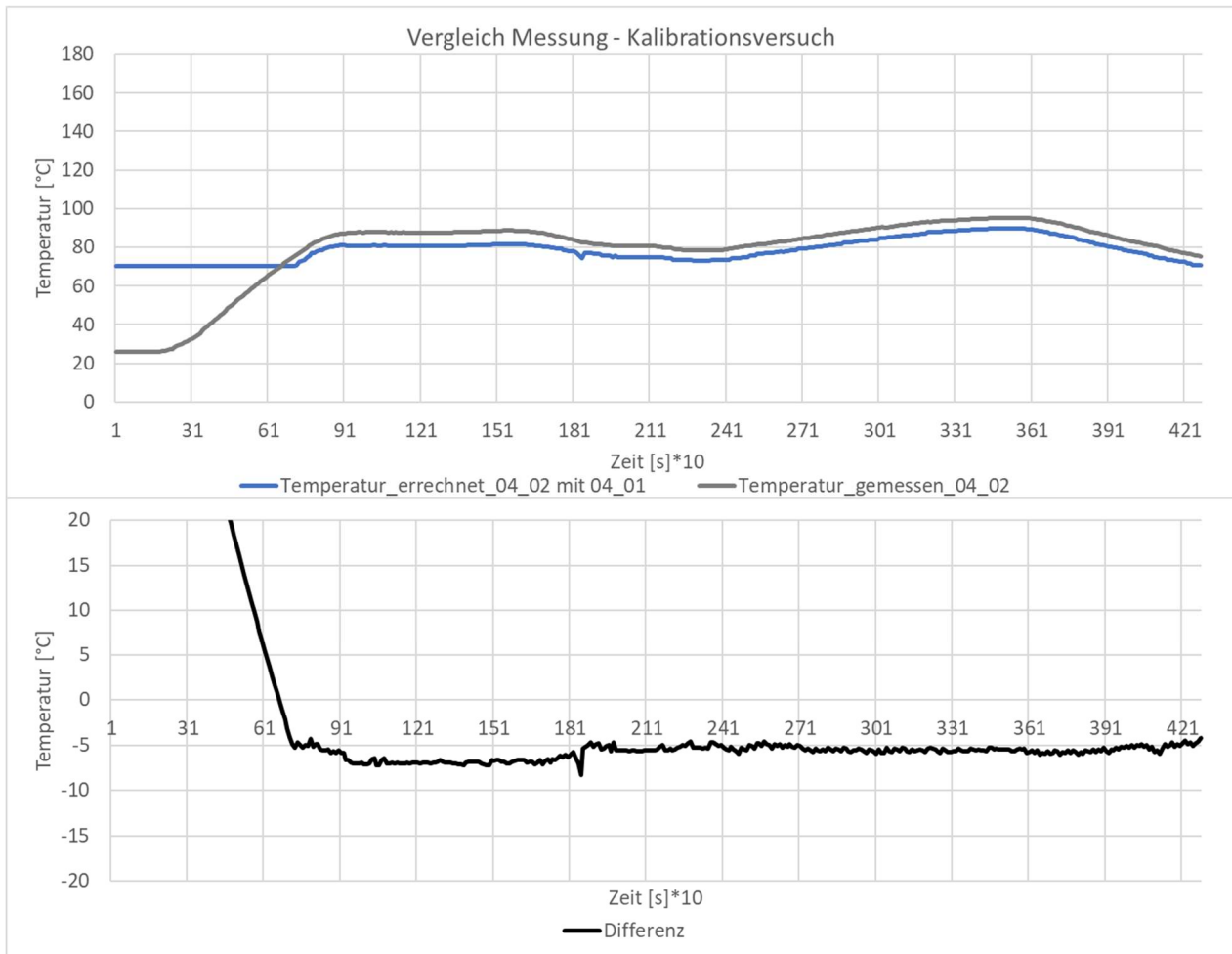


Abbildung 5-16: Temperatur über Spannung errechnen

Es ist erkennbar, dass die Abweichung über weite Teile konstant bleibt. Das liegt daran, dass zwei verschiedene Scheibenoberflächen verglichen werden. Der Unterschied ist somit der unterschiedliche Emissionskoeffizient. Um zu kontrollieren, ob die Formeln in der Exceldatei richtig arbeiten, wurde das Spannungssignal von Versuch 04_02 eingegeben. Wie in Abbildung 5-17 erkennbar, sind die Formeln in der Exceldatei korrekt.

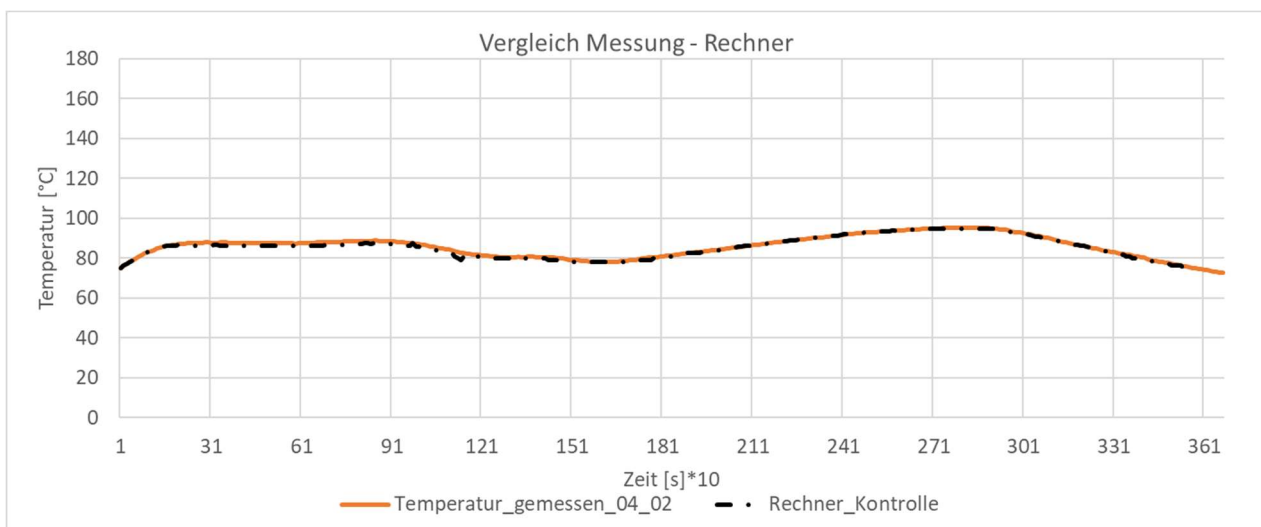


Abbildung 5-17: Vergleich Messung - Rechner

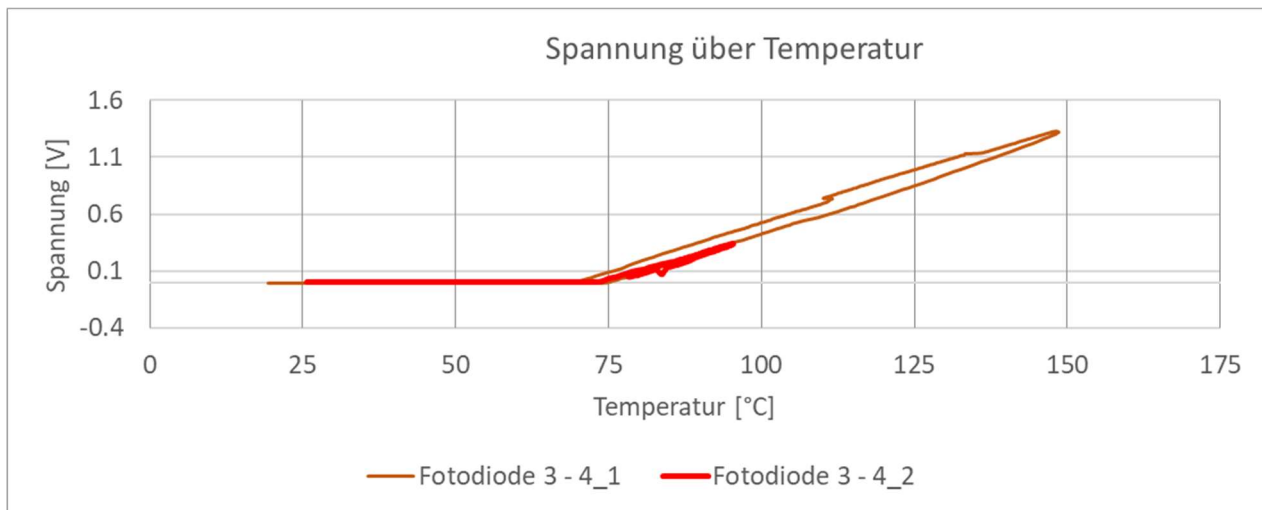


Abbildung 5-18: Spannung-Temperatur-Hysterese

Die Hysterese in Abbildung 5-18 zwischen Aufheizen und Abkühlen des Versuchs 4_1 ist relativ gering und beträgt ca. 5 Kelvin.

Die Fotodiode 3 (InGaAs 2-2,6 μm , 0,5 Hz) ist aus diesen Gründen die Auserwählte für die weiteren Versuche.

5.7 Fünfte Versuchsreihe zur Kalibration eines Pyrometers mit einem Lichtwellenleiter

5.7.1 Aufbau und Durchführung

In der fünften Versuchsreihe wurde auf verschiedenen Positionen der Bremsscheibe mit Fotodiode 3 gemessen, um eine Aussage darüber treffen zu können, wie groß der Einfluss der Oberfläche auf das Messergebnis ist. Zur besseren Vergleichbarkeit des Emissionskoeffizienten wurde auch ein Messpunkt mattschwarz lackiert, der nach der Theorie einen Wert von nahezu 1 annehmen sollte. Die Messtechnik war analog zur vierten Versuchsreihe und die Wärmebildkamera zum ersten Prinzipversuch. Damit die definierten Messpunkte genau erreicht werden können, wurde ein Führungsstück für den Lichtwellenleiter angefertigt, in dem der Stahlkapillar genau geführt war. Der Versuchsaufbau wurde des Weiteren noch modifiziert, indem die Bremsscheibe auf Fliesenstücke aufgelegt war, um die Wärmeleitung an die Tischplatte zu minimieren. Die Anordnung der Messpunkte kann in Abbildung 5-19, die verschiedenen Oberflächen in Abbildung 5-20 – 5-22 nachvollzogen werden.

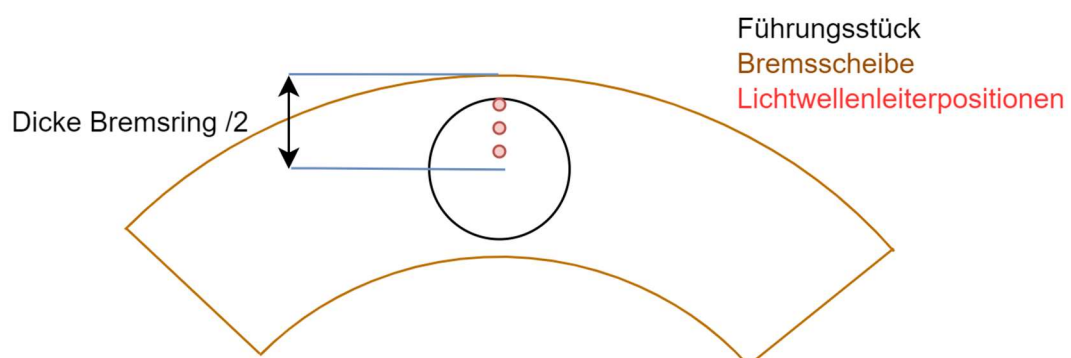


Abbildung 5-19: Messpunkte

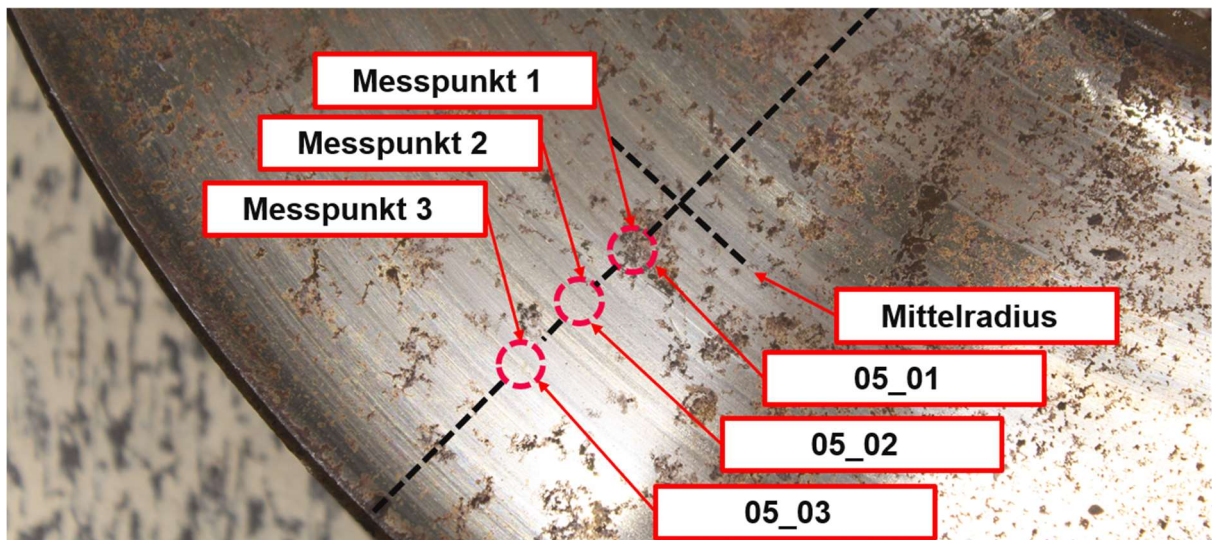


Abbildung 5-20: Messpunkte Bremsscheibe Triebzug

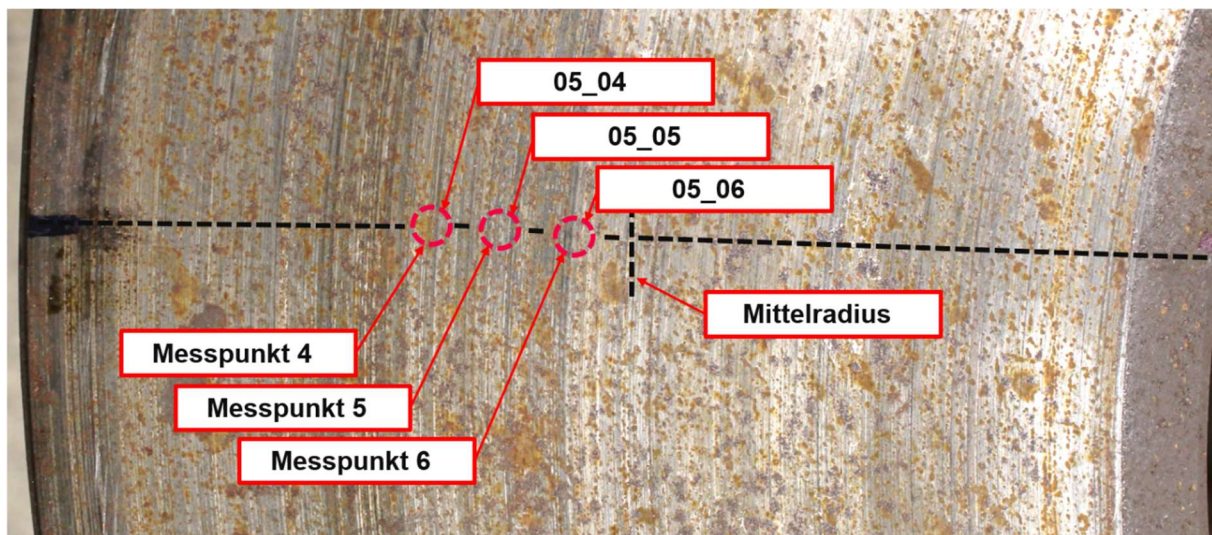


Abbildung 5-21: Messpunkte Bremsscheibe Lok

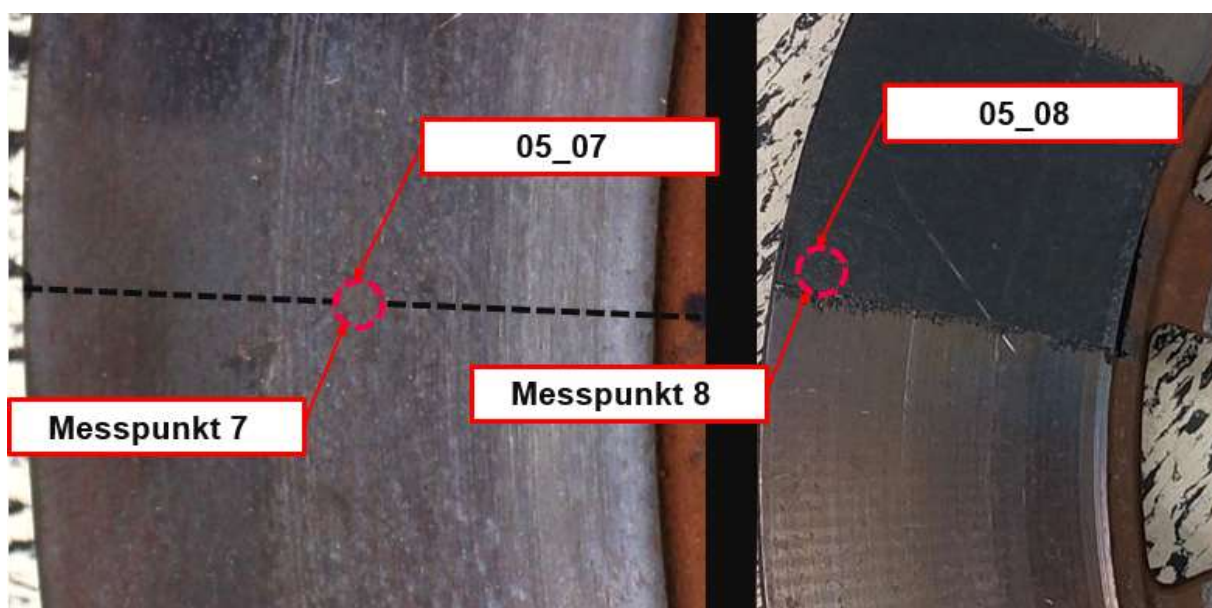


Abbildung 5-22: Messpunkte Bremsscheibe Straßenbahn

5.7.2 Ergebnisse

Die Temperatur- und Spannungsverläufe sind hier nicht mehr von besonderem Interesse, da sie grundsätzlich ähnlich zu den zuvor beschriebenen Versuchen verlaufen. Hier soll vor allem die Vergleichbarkeit der drei unterschiedlichen Messpunkte bewertet werden. Die Hysteresen der Spannungsverläufe sind in den Abbildungen 5-23 – 5-25 dargestellt.

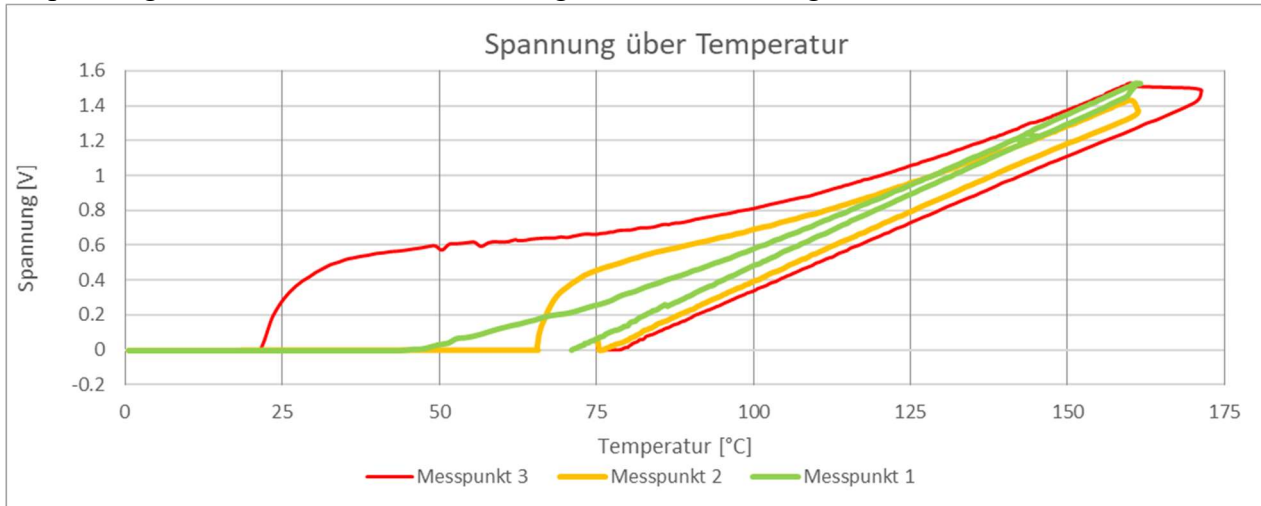


Abbildung 5-23: Spannungshysteresen an den Messpunkten Bremsscheibe Triebzug

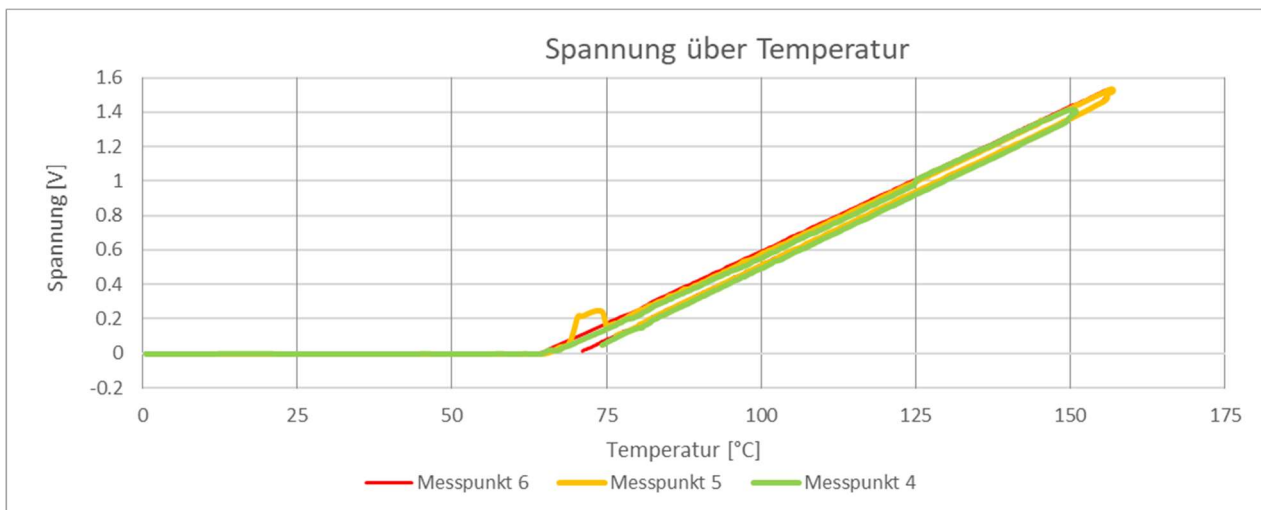


Abbildung 5-24: Spannungshysteresen an den Messpunkten Bremsscheibe Lok

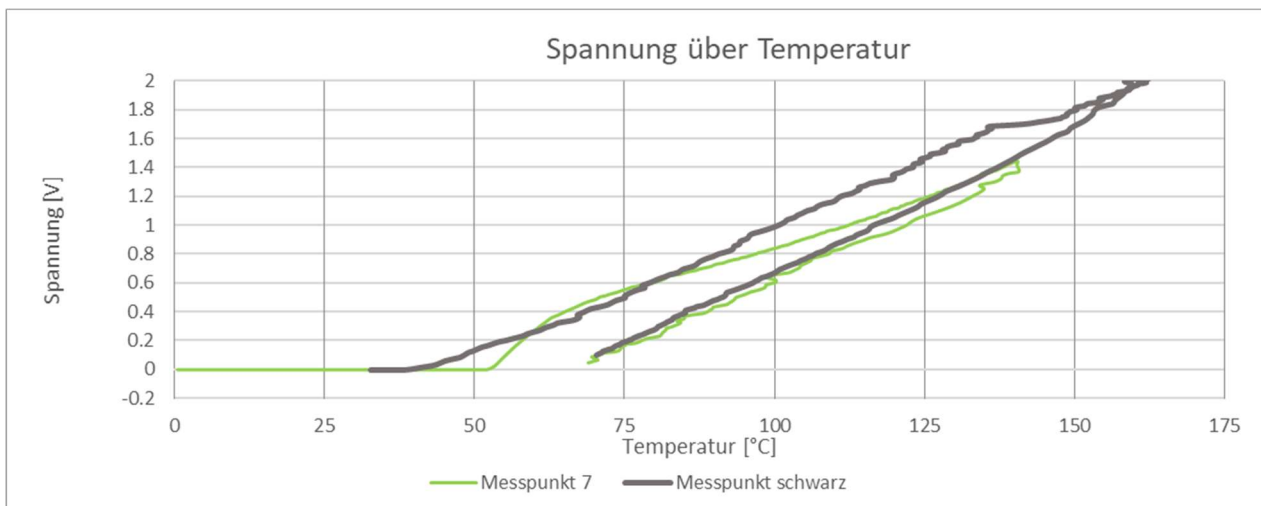


Abbildung 5-25: Spannungshysteresen an den Messpunkten Bremsscheibe Straßenbahn

An der Bremscheibe Straßenbahn wurde ein Messpunkt schwarz lackiert, um den Unterschied im Emissionsgrad sichtbar zu machen. Wie in Abbildung 5-25 erkennbar ist, bleibt dieser Unterschied aber äußerst gering zwischen blanker (Messpunkt 7) und schwarzer (Messpunkt 8) Oberfläche. Erkennbar ist, dass vor allem die Aufheizkurve (oberer Teil der Hysterese) aber stabiler ist, da Reflexionen von außen eine geringere Rolle spielen. In Abbildung 5-26 ist ein Thermografiebild aus Versuch 5_8 dargestellt, wobei der rote Teil auf dem Bild schwarz lackiert und der grüne Teil blank war. Die Wärmebildkamera hatte einen Emissionskoeffizienten von 0,95 eingestellt, der für den Messpunkt 8 zutreffen sollte. Generell überschätzt die Wärmebildkamera aber trotzdem die Temperatur (siehe erster Prinzipversuch), da sie mit einem höheren Emissionsgrad rechnet, als Metalle in diesem Wellenlängenbereich besitzen. Der Arbeitsbereich der Wärmebildkamera liegt dabei zwischen 8-14 μm (vgl. Abbildung 3-3).

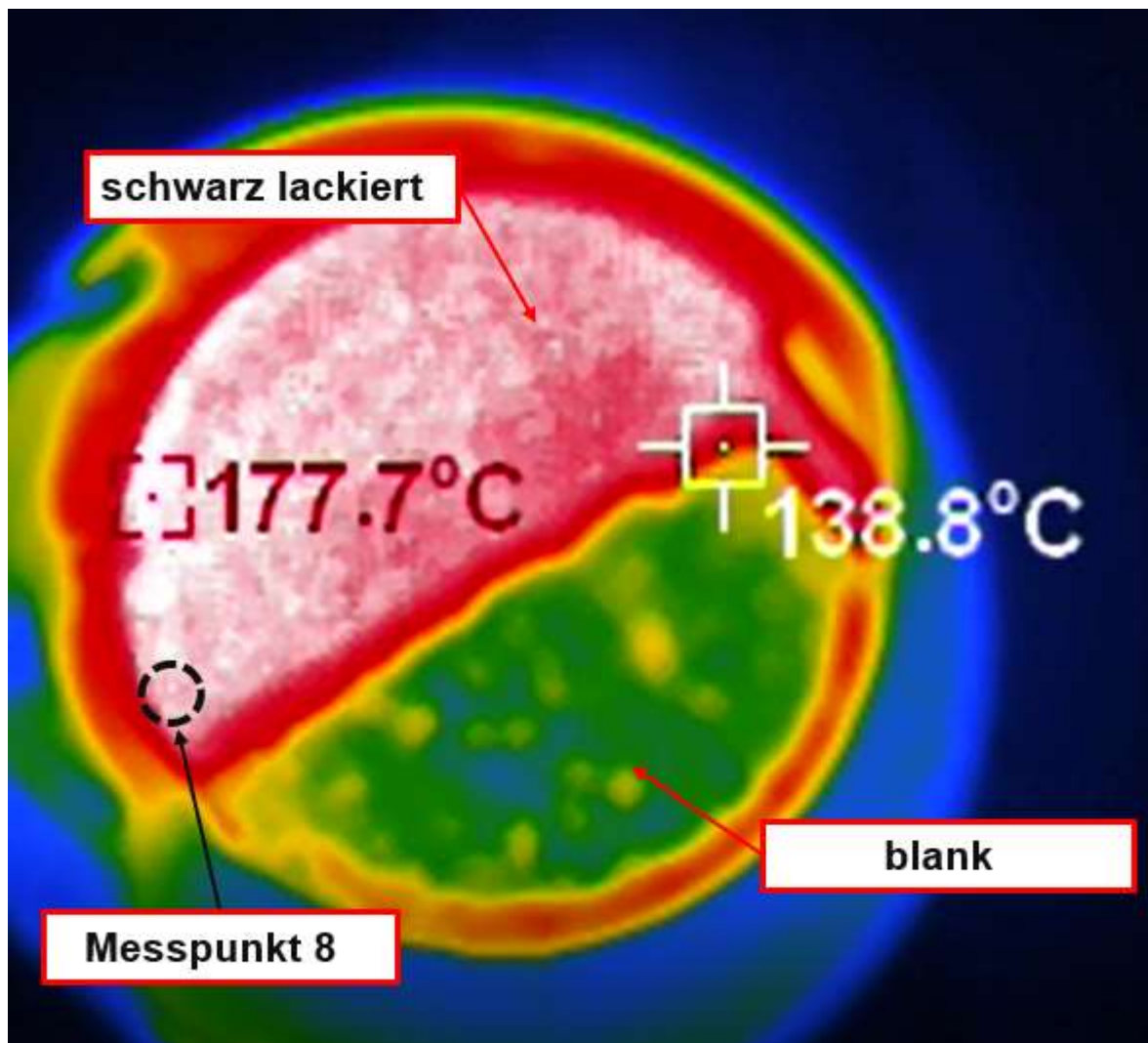


Abbildung 5-26: Thermografie Bild Bremscheibe Straßenbahn

Mit den gewonnenen Spannungs- und Temperaturverläufen wurde nun versucht, die verschiedenen Scheiben und Oberflächenbeschaffenheiten als Kalibrationsgrundlage zu vergleichen. In Abbildung 5-27 wurde der Messpunkt 4 mit dem Messpunkt 7 als Kalibrationsgrundlage errechnet, wobei zwei unterschiedliche Brems Scheiben verglichen werden. Der Messpunkt bei Versuch 05_04 war stark angerostet, der Messpunkt bei Versuch 05_07 blank. Hier wurden als Berechnungsgrundlage die stetigere Abkühlkurve für das Errechnen der Aufheizkurve verwendet. Es kann festgestellt werden, dass die Differenz konstant zwischen 5 und 10 Kelvin liegt, also genau den unterschiedlichen Emissionskoeffizienten widerspiegelt.

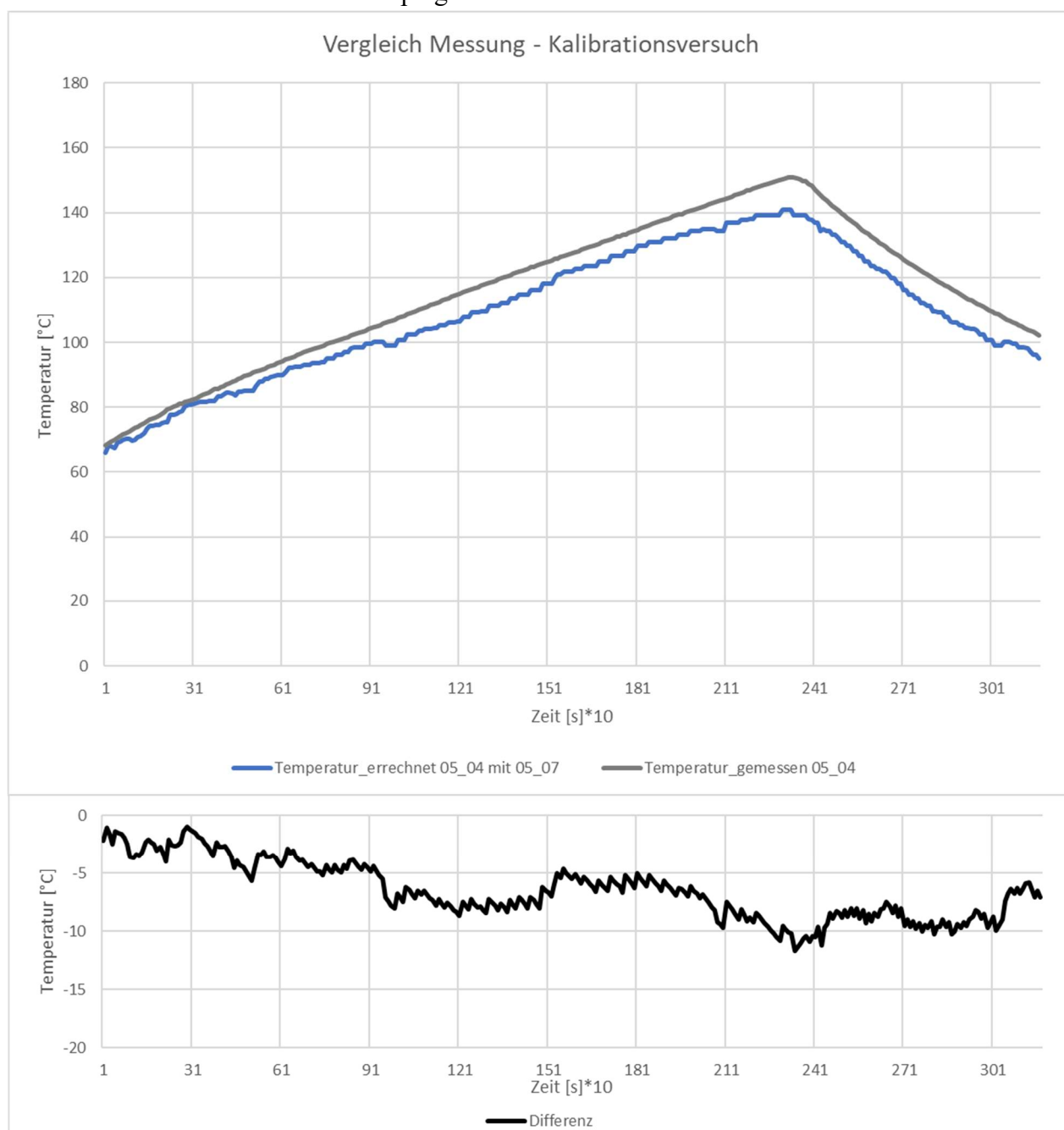


Abbildung 5-27: Vergleich Messung - Kalibrationsversuch (1)

Als zweiten Vergleich wurden zwei blanke Messpunkte von unterschiedlichen Bremsscheiben herangezogen, nämlich jener aus Messung 05_02 mit jenem aus Messung 05_07. In den in Abbildung 5-28 dargestellten Temperaturverlauf ist nur die Aufheizkurve aufgrund der geringeren Maximalwerte in Versuch 05_07 dargestellt. Hier wurden aber als Berechnungsgrundlage die Aufheizkurve aus 05_07 für das Errechnen der Aufheizkurve 05_02 verwendet. Es kann festgestellt werden, dass die Differenz minimal 7 Kelvin und maximal 18 Kelvin beträgt.

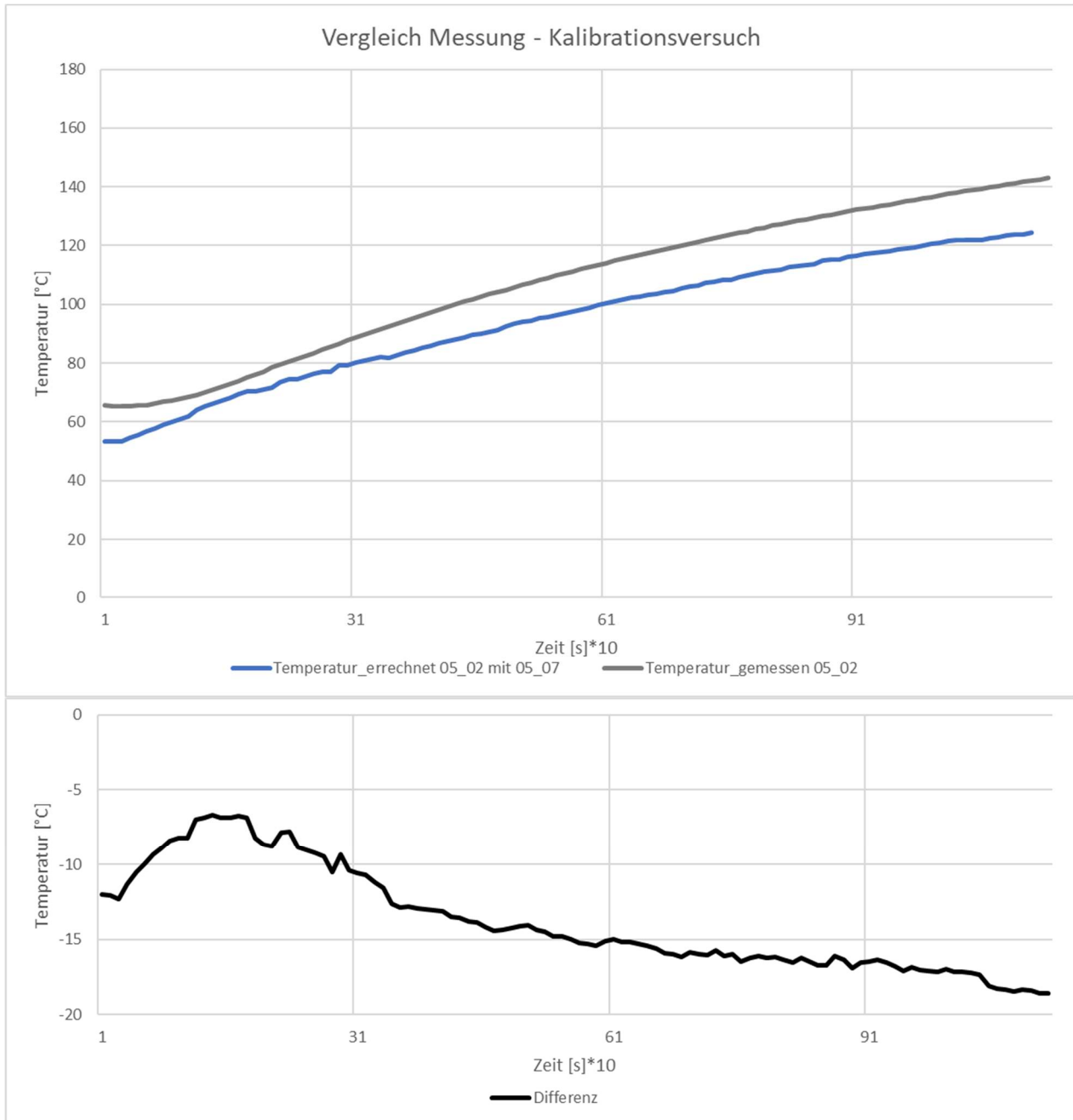


Abbildung 5-28: Vergleich Messung - Kalibrationsversuch (2)

Parallel dazu wurde versucht, den Emissionsgrad nach Abschnitt 3.7 zu errechnen. Dafür wurden die folgenden Stoffwerte für die Bremsscheibe Triebzug (Grauguss) verwendet:

| | |
|----------|--|
| m | 26 kg |
| c_p | $0,477 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} [26]$ |
| A | $0,0025 \text{ m}^2$ |
| T_U | 20 °C |
| σ | $5,67032 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ |

Nun wurden die Temperatur- und Zeitwerte für jeden Zeitschritt in die Formel 5-1 eingesetzt:

$$\varepsilon_{\Omega} = \frac{m \cdot c_p}{\sigma A (T_{x+1}^4 - T_U^4)} \cdot \frac{T_{x+1} - T_x}{\tau_{x+1} - \tau_x} \quad (5-1)$$

Damit kommt man auf den Abbildung 5-29 gezeigten Emissionsgradverlauf.

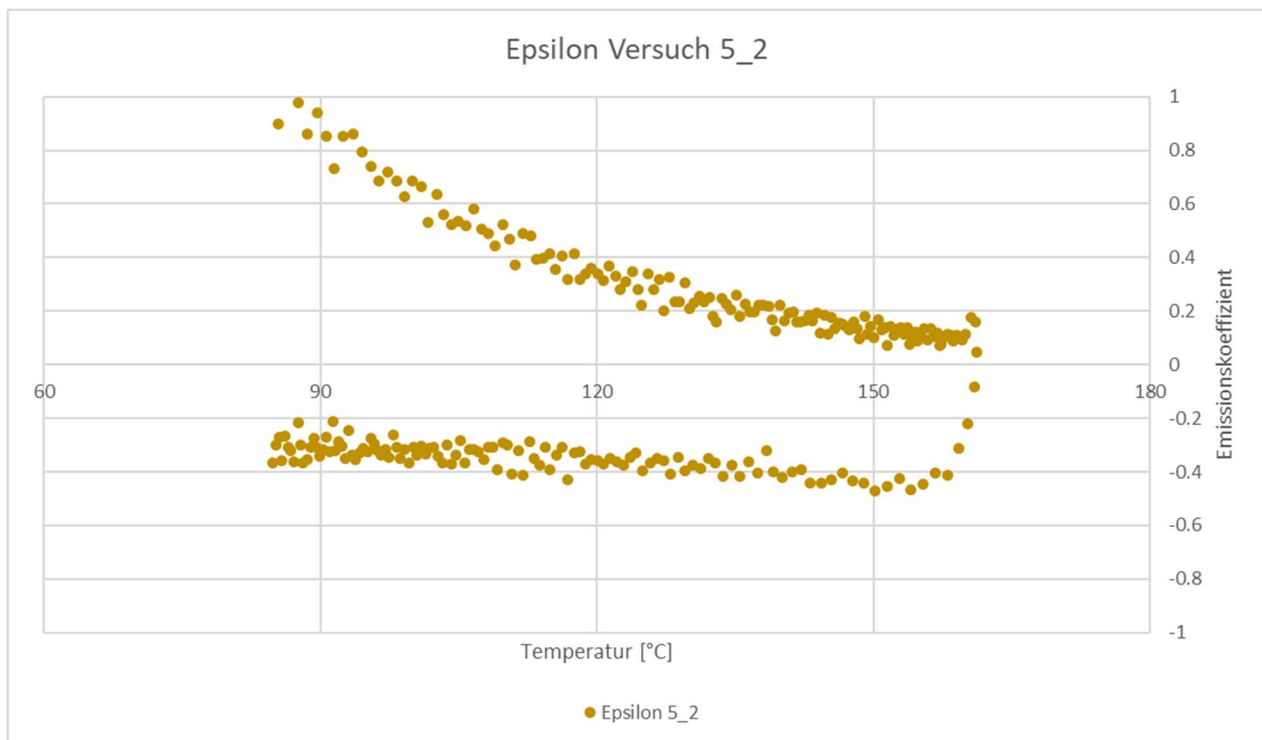


Abbildung 5-29: Emissionsgrad – Kalibrationsversuch 05_02

5.7.3 Resultat

In den Spannungshysteresen in Abbildung 5-23 bis 5-25 kann erkannt werden, dass die Aufheizkurve umso unstetiger ist, umso blanker die Oberfläche ist. So stechen etwa die Messpunkte 3 und 7 mit einem Ansprechen der Fotodiode weit vor ihrem Messbereich ab 70°C heraus. Auch am Messpunkt 5 gibt es zu Beginn der Aufheizkurve eine Unstetigkeitsstelle zum Zeitpunkt, als ein Stück Alufolie über den Versuchsaufbau gelegt war. Das lässt darauf schließen, dass der Lichtwellenleiter Reflexionen von anderen Wärmequellen überträgt. Doch die Größenordnung ist nur im unteren Temperaturbereich von Relevanz. Umso wärmer die Bremsscheibe war, umso mehr schmiegt sich die Aufheizkurve der Hysterese an die Abkühlkurve an. An den Vergleichen der Kalibrationskurven kann erkannt werden, dass die unterschiedlichen Oberflächenzustände einen geringeren Einfluss auf das Messergebnis haben, als vermutet. Die Differenz zweier blanker Stellen ist in derselben Größenordnung wie der Vergleich zwischen blanker und rostiger Messstelle, wobei die Abkühlkurven als Grundlage aber stabiler Ergebnisse liefern. Auch der schwarz lackierte Messpunkt lieferte hier keine anderen Ergebnisse. Er hat zwar einen konstanteren Verlauf der Spannungshysterese, vor allem in der Aufheizkurve, deckt sich aber sonst weitgehend mit der des blanken Messpunkts.

Der errechnete Emissionsgrad in Abbildung 5-29 ist sehr unstetig, vor allem beim Aufheizen (positive Emissionsgrade). Der Grund dafür liegt zum einen daran, da es bei Versuch 5_2 Reflexionen beim Aufheizen gab (siehe Abbildung 5-23), zum anderen, da die Masse der ganzen Bremsscheibenhälfte für die Berechnung verwendet wurde, aber nicht die ganze Masse wirklich aufgeheizt wurde. Beim Abkühlen pendeln sich die Messwerte ein, sind aber noch immer in einer Bandbreite zwischen 0,5 bis 0,2 (Anm.: Die negativen Werte in der Abbildung resultieren aus dem negativen Temperaturgradient, der Emissionsgrad kann nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen.). Auch der schwarz lackierte Messpunkt lieferte keinen stetigeren Ergebnisse.

6 Ergebnisse

Hier sollen nun die wesentlichen Resultate der Versuchsreihen dargestellt werden.

Die zuvor durchgeführten Versuche beschäftigten sich vor allem mit der Auswahl eines geeigneten Fotodioden/Lichtwellenleiter Paares. Dabei ist das Ergebnis in Tabelle 6-1 dargestellt, weitere technische Daten der Fotodioden können dem Anhang 2 entnommen werden.

| | Fotodiode 1 | Fotodiode 2 | Fotodiode 3 |
|---------------------|------------------------|------------------------------------|---------------------|
| Typ | G8373 | G12483 | IGA 320/23-LO |
| Hersteller | Hamamatsu | Hamamatsu | Advanced Energy |
| Material | InGaAs | InGaAs | InGaAs |
| Wellenlängenbereich | 1,2-2,57 μm | 1-1,66 μm | 2-2,6 μm |
| Auflösung | 100 kHz | 100 Hz | 0,5 Hz |
| Kühlung | Nein | Ja | Ja |
| Eignung | Nein | Nein, zu nah am sichtbaren Bereich | Ja |

Tabelle 6-1: Vergleich Fotodioden

Für die Verwendung bei weiteren Versuchen wird somit die Fotodiode 3 in einem Wellenlängenbereich von 2-2,6 μm empfohlen.

Da vor allem die Aufheizkurven Abweichungen zum linearen Verhalten aufgewiesen haben, soll zur Zusammenfassung die Abkühlkurven präsentiert werden. Diese Anteile der Spannungshysteresen bewegen sich dabei in einem relativ ähnlichen Bereich. In Abbildung 6-2 sind sie für drei verschiedene (siehe Anhang 3 bzw. Abbildung 5-20 bis 5-22) Brems scheiben zusammengefasst.

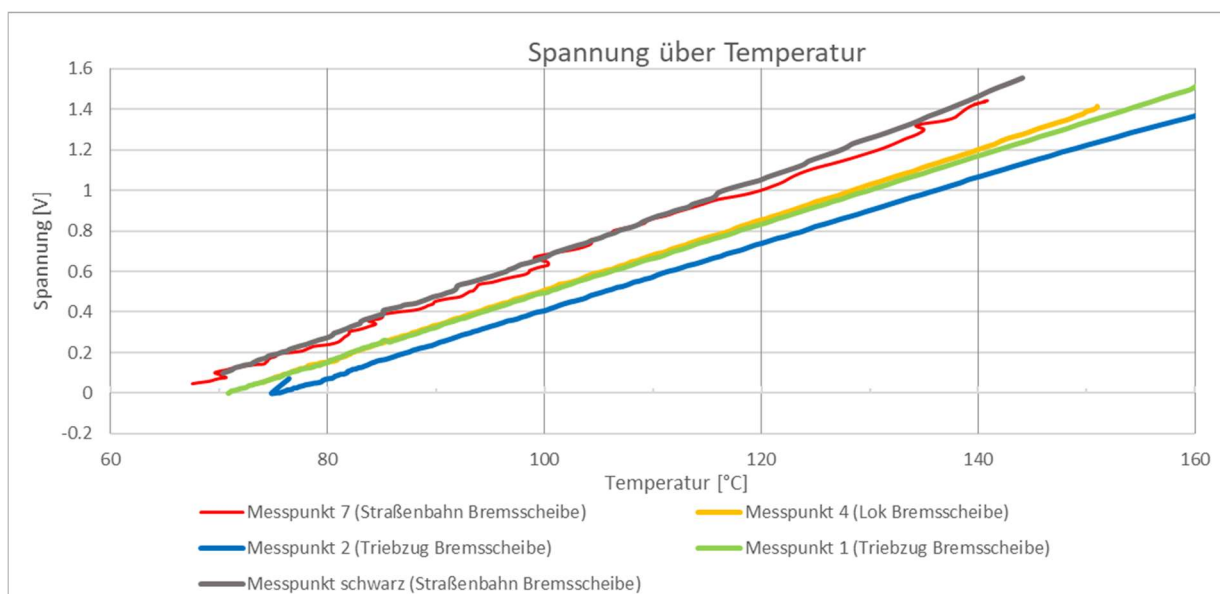


Abbildung 6-2: Vergleich Abkühlkurven

Auch die Unterscheidung in rostige Messpunkte (Messpunkt 1, 4) und blanke Messpunkte (1,7) liefert dabei, selbst bei Vergleich der unstetigeren Aufheizkurven von unterschiedlichen Bremsscheiben, Temperaturunterschiede von ca. 10-20 Kelvin (Abbildung 5-27 und 5-28). Somit kann schlussgefolgert werden, dass das Verfahren bei Verwendung von Messpunkten gleicher Oberflächenbeschaffenheit und Unterbindung von Reflexionen in den Sichtkegel, stabile Messergebnisse ermittelt werden können.

Die Temperatur- und Spannungsverläufe korrelierten mit der Fotodiode 3 sehr gut, wie in Abbildung 6-3 erkennbar ist.

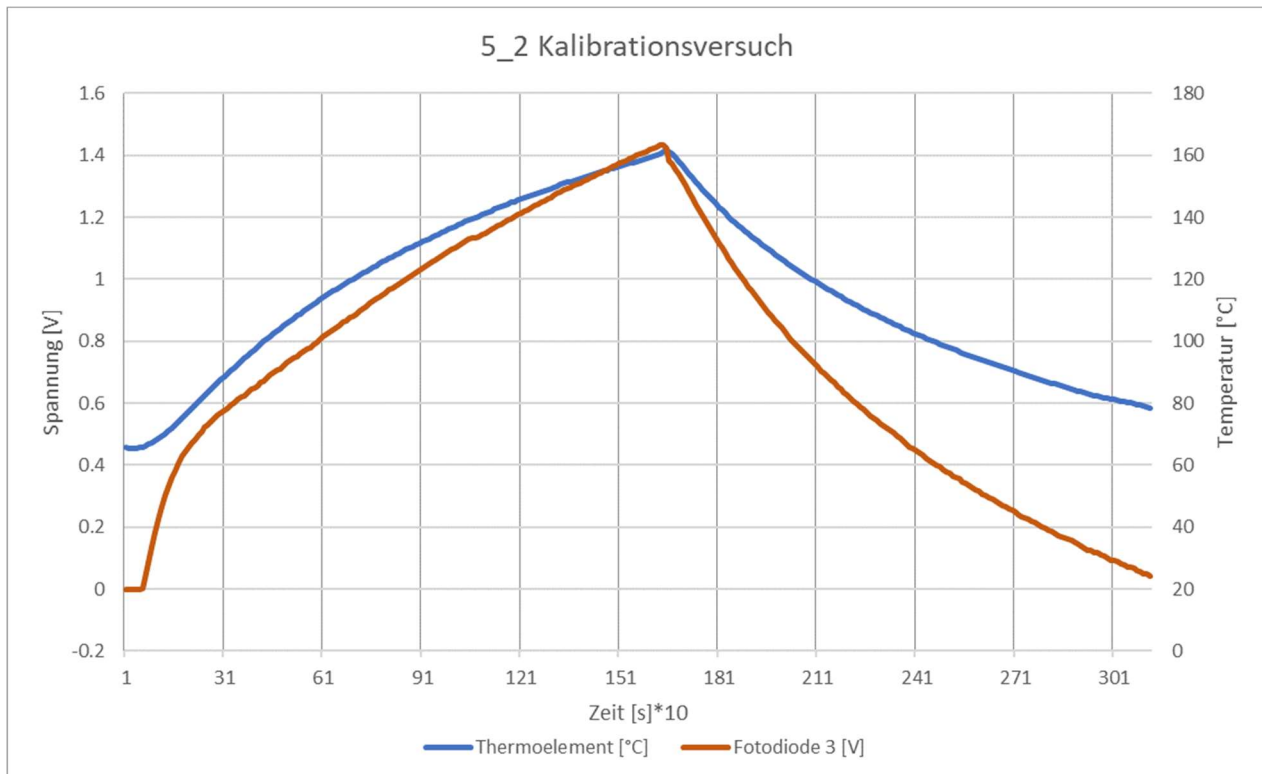


Abbildung 6-3: Temperatur- und Spannungsverläufe eines Prüflaufs

Aufgrund des Datenblatts der Fotodiode 3 (Einsatzbereich 85°C bis 600°C) ist bei höheren Temperaturen, die in Bremsanwendungen erreicht werden, ein gleich lineares Verhalten zu erwarten und die Fotodiode damit auch für den Einsatz bis 600°C geeignet.

Das Rückrechnen des Emissionsgrad der Bremsscheiben lieferte keine einwandfreien Ergebnisse. Die dabei verwendete Berechnung, die auf dem Formelwerk aus Abschnitt 3.7 fußt, lieferte sehr unstetige Ergebnisse. Der Grund dafür dürfte sein, dass die Masse der Bremsscheibe weit größer war als die effektiv aufgeheizte Masse. So wurde nicht die ganze Bremsscheibe, sondern lediglich Teile davon mit Heizelementen auf Temperatur gebracht.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Abschließend lässt sich sagen, dass eine Fotodiode in Verbindung mit einem Lichtwellenleiter, gut für die Messaufgabe geeignet ist, sofern die Wellenlängenbereiche von Lichtwellenleiter und Fotodiode kompatibel und für das Messobjekt geeignet sind. Vorsicht ist bei Objekten in der Umgebung des Messkopfs geboten, die heißer als die Bremsringoberfläche sind. Diese können in den Sensor reflektieren und das Messsignal verfälschen.

Von der Verwendung einer Wärmebildkamera wird abgeraten, da bei einem Einsatz einer solchen nur eine Oberfläche sichtbar sein sollte und diese einen bekannten Emissionsgrad besitzen muss. Das Bestimmen eines Emissionsgrades ist aber äußerst anspruchsvoll und konnte auch in dieser Arbeit nicht zufriedenstellend erreicht werden.

Es ist daher ratsam, die Fotodiode mit berührenden Verfahren auf die verwendete Brems Scheibe zu kalibrieren. Damit können dann leicht mehrere Messpunkte aufgenommen werden, da die verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten keinen großen Einfluss auf das Spannungssignal der Fotodiode haben. In den hier durchgeführten Versuchen war die Differenz zwischen blanken und rostigen Scheiben im Bereich von 10 Kelvin. Mit der Verwendung von mehreren Lichtwellenleitern und Fotodioden kann eine sehr feinmaschige und leicht installierbare Messtechnik auf Bremsenprüfständen realisiert werden.

Da die Prüfläufe, aufgrund der normativen Bestimmungen, ohnehin noch mit Thermoelementen durchgeführt werden müssen, wird in einem ersten Schritt zur simultanen Verwendung von berührenden- und optischen Verfahren geraten. So können noch mehr Daten gesammelt und das Temperaturmessverfahren besser abgesichert werden.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------------|---|------|
| Abbildung 2-1 | Fahrwerk | S.2 |
| Abbildung 2-2 | Wellenbremsscheibe als Kompakteinheit auf einem Prüfstand | S.3 |
| Abbildung 2-3 | Liefer-/Bedarfskennfeld Elektromotor | S.4 |
| Tabelle 2-4 | Arten von Bremsungen | S.5 |
| Abbildung 2-5 | Indirekt wirkende Druckluftbremse | S.6 |
| Abbildung 2-6 | Aufbau einer Bremse | S.6 |
| Abbildung 2-7 | Aufbau einer Wellenbremsscheibe | S.7 |
| Abbildung 2-8 | Bremsbelag | S.7 |
| Abbildung 2-9 | Verschleiß bei Wellenbremsscheiben | S.8 |
| Abbildung 2-10 | Hotrings auf Wellenbremsscheiben | S.9 |
| Abbildung 3-1 | Elektromagnetisches Spektrum | S.10 |
| Abbildung 3-2 | Transmission, Reflexion und Absorption | S.11 |
| Abbildung 3-3 | Emissionskoeffizient | S.12 |
| Abbildung 3-4 | Günstige Wellenlängenbereiche in atmosphärischer Luft | S.12 |
| Abbildung 3-5 | Spektrale Ausstrahlung | S.13 |
| Abbildung 3-6 | Wien'sches Verschiebungsgesetz | S.15 |
| Abbildung 3-7 | Numerische Werte für Integral nach Gleichung 3-17 | S.16 |
| Abbildung 3-8 | Prinzipskizze Thermografie | S.16 |
| Abbildung 3-9 | Prinzipskizze Fotodiode mit Lichtwellenleiter | S.17 |
| Abbildung 3-10 | Transmission in verschiedenen Materialien | S.17 |
| Abbildung 3-11 | Detektivität von ausgewählten Fotodioden | S.18 |
| Abbildung 3-12 | Sichtkegel eines Lichtwellenleiters | S.18 |
| Abbildung 3-13 | Kennlinien verschiedener Strahlungsthermometer | S.20 |
| Abbildung 4-1 | Bremsenprüfstand TU Graz, KS Engineers | S.23 |
| Abbildung 5-1 | Grundlegender Aufbau für statische Versuche | S.24 |
| Abbildung 5-2 | Aufbau Prinzipversuch 1 | S.25 |

| | | |
|----------------|---|------|
| Abbildung 5-3 | Ergebnisse Prinzipversuch 1 | S.25 |
| Abbildung 5-4 | Wärmebild Prinzipversuch 1 | S.26 |
| Abbildung 5-5 | unterschiedliche Oberflächen | S.26 |
| Abbildung 5-6 | Aufbau erste Versuchsreihe | S.27 |
| Abbildung 5-7 | Thermoelement und Lichtwellenleiter | S.27 |
| Abbildung 5-8 | Ergebnisse erste Versuchsreihe | S.28 |
| Abbildung 5-9 | Aufbau zweite Versuchsreihe | S.29 |
| Abbildung 5-10 | Ergebnisse zweite Versuchsreihe | S.29 |
| Abbildung 5-11 | Aufbau dritte Versuchsreihe | S.30 |
| Abbildung 5-12 | Ergebnisse dritte Versuchsreihe (1) | S.31 |
| Abbildung 5-13 | Ergebnisse dritte Versuchsreihe (2) | S.31 |
| Abbildung 5-14 | Ergebnisse vierte Versuchsreihe (1) | S.32 |
| Abbildung 5-15 | Ergebnisse vierte Versuchsreihe (2) | S.33 |
| Abbildung 5-16 | Temperatur über Spannung errechnen | S.34 |
| Abbildung 5-17 | Vergleich Messung - Rechner | S.34 |
| Abbildung 5-18 | Spannung-Temperatur-Hysterese | S.35 |
| Abbildung 5-19 | Messpunkte | S.35 |
| Abbildung 5-20 | Messpunkte Bremsscheibe Triebzug | S.36 |
| Abbildung 5-21 | Messpunkte Bremsscheibe Lok | S.36 |
| Abbildung 5-22 | Messpunkte Bremsscheibe Straßenbahn | S.36 |
| Abbildung 5-23 | Spannungshysteresen an den Messpunkten Bremsscheibe Triebzug | S.37 |
| Abbildung 5-24 | Spannungshysteresen an den Messpunkten Bremsscheibe Lok | S.37 |
| Abbildung 5-25 | Spannungshysteresen an den Messpunkten Bremsscheibe Straßenbahn | S.37 |
| Abbildung 5-26 | Thermografie Bild Bremsscheibe Straßenbahn | S.38 |
| Abbildung 5-27 | Vergleich Messung – Kalibrationsversuch (1) | S.39 |
| Abbildung 5-28 | Vergleich Messung – Kalibrationsversuch (2) | S.40 |
| Abbildung 5-29 | Emissionsgrad – Kalibrationsversuch 05_02 | S.41 |
| Tabelle 6-1 | Vergleich Fotodioden | S.43 |

| | | |
|---------------|---|------|
| Abbildung 6-2 | Vergleich Abkühlkurven | S.43 |
| Abbildung 6-3 | Temperatur- und Spannungsverläufe eines Prüflaufs | S.44 |

Literatur

- [1] Physikalisch Technische Bundesanstalt: Kalibrierung von Thermoelementen. Richtlinie DKD-R 5-3, Braunschweig, 2018
- [2] Parthier R.: Messtechnik. 10.Auflage, Springer Vieweg Wiesbaden, 2022
- [3] Poms A.; Schweighofer B.; Wegleiter H.: System Evaluation of a Pyrometer Combined with an Optical Fiber. Paper, TU Graz and AVL List, 2023
- [4] DIN EN 14535-3:2015-07, Bahnanwendungen; Brems scheiben für Schienenfahrzeuge; Teil 3: Brems scheiben, Leistung der Brems scheibe und der Reibpaarung, Klassifikation
- [5] DIN EN 15328:2020-06, Bahnanwendungen; Bremsen-Bremsbeläge
- [6] DIN EN 60584-1:2013-10, Thermoelemente; Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen (IEC 60584:2013)
- [7] DIN EN ISO/IEC 17025:2017-xx, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017)
- [8] Bernhard F.: Handbuch der Technischen Temperaturmessung. 2.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014
- [9] Astarita T.; Carlomagno G.: Infrared Thermography for Thermo-Fluid-Dynamics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [10] Ihme J.: Schienenfahrzeugtechnik. 2.Auflage, Springer Vieweg Wiesbaden, 2019
- [11] Breuer B.; Bill K. (Hrsg): Bremsenhandbuch. 4.Auflage. Springer Vieweg Wiesbaden, 2012
- [12] Richtlinie (EU) 2016/797 des Europäischen Parlaments über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union
- [13] Richtlinie (EU) 2016/798 des Europäischen Parlaments über Eisenbahnsicherheit
- [14] VDI/VDE 3511:2005-07; Technische Temperaturmessung; Strahlungsthermometrie; Kalibrierung von Strahlungsthermometern
- [15] Herwig H.; Moschallski A.: Wärmeübertragung. 4.Auflage. Springer Vieweg Wiesbaden, 2019
- [16] Hochenauer Ch.: Wärmetechnik 1. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2018
- [17] Rieberer R.: Energietechnisches Mess-und Versuchswesen. Präsentation zur Vorlesung, Teil B. Technische Universität Graz, 2022
- [18] Löffler-Mang M.: Optische Sensorik. 1.Auflage. Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, 2012
- [19] <https://www.bev.gv.at/Themen/Mess-und-Eichwesen/Messtechnische->

Fachbereiche/Temperatur-Waermemenge/Temperatur.html Zugriff am 20.11.2023

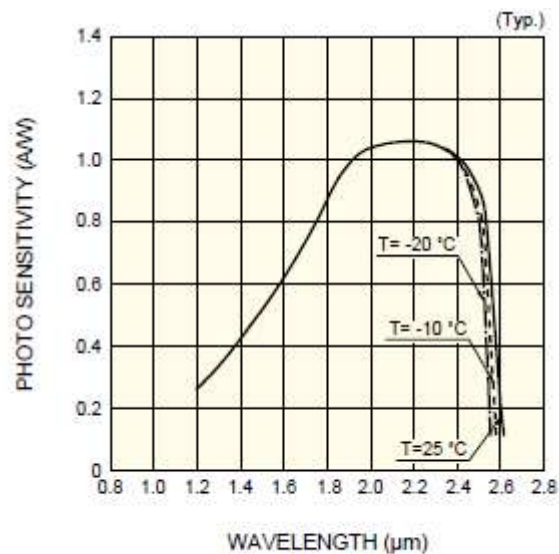
- [20] https://www.schweizer-fn.de/stoff/luft/luft_dummy/luft_stoff_p.php Zugriff 02.12.2023
- [21] <https://www.tugraz.at/institute/bst/infrastruktur/bremsenpruefhalle> Zugriff 09.12.2023
- [22] <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=y4FGiZMiBes> Knorr Bremse AG; Min 2:04; Zugriff 10.12.2023
- [23] Eibenberger P.: Geografischer / Streckentechnischer Brems Scheibenverschleiß der ÖBB Personentriebzugflotte Rh 5022 (Desiro). Diplomarbeit, Hochschule Mittweida, 2012
- [24] Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates für eine Euro 7 Norm für Kraftfahrzeuge (COM(2022) 586 final)
- [25] Poms A.: Non-contact rotor temperature measurements for e-mobility performance optimization. Master Thesis, TU Graz, 2021
- [26] https://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/wkapazitaet_metall.php Zugriff 28.03.2024
- [27] Kleinschuster Ch.: Verfahren zur Abschätzung des thermischen Kontaktwiderstandes für Radbremsscheibensysteme. Diplomarbeit, TU Graz, 2018
- [28] <https://rail.knorr-bremse.com/de/at/produkte/bremssysteme/friction/> ; Zugriff 12.05.2024
- [29] https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-58682-2_8/figures/9; Zugriff 17.05.2024
- [30] http://www.pewa.de/DATENBLATT/DBL_TESTO_INFRAROTMESSTECHNIK_FACHAUFSATZ_DEUTSCH.pdf; Zugriff 17.05.2024

Anhang 1 - Prüfprogramm

| Prüfprogramm | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------|----------|------------|-----------------|--------------|-----------|---|---------------|------------------------------------|--------------|
| Versuch Nr. | Bremsscheibe | stat/dyn | Heizung | Thermoelementen | Thermografie | Fotodiode | Kommentar | Datenqualität | Thermoelemente | LWL |
| 1.Versuchsreihe | | | | | | | | | | |
| 01_01 | Grauguss Tram | stat | Induktion | Ja | Nein | InGaAs | | brauchbar | InGaAs 1,2-2,57, 100 kHz ungekühlt | Silizium |
| 01_02 | Grauguss GKB | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs | | brauchbar | InGaAs 1,2-2,57, 100 kHz ungekühlt | Silizium |
| 01_03 | Grauguss GKB | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs | GKB Widerstand inkl. Schirmung LWL | brauchbar | InGaAs 1,2-2,57, 100 kHz ungekühlt | Silizium |
| 01_04 | Grauguss GKB | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs | GKB Widerstand inkl. Schirmung LWL | unbrauchbar | InGaAs 1,2-2,57, 100 kHz ungekühlt | Silizium |
| 01_05 | Grauguss GKB | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs | GKB Widerstand inkl. Schirmung LWL | brauchbar | InGaAs 1,2-2,57, 100 kHz ungekühlt | Silizium |
| 01_06 | Grauguss GKB | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs | GKB Widerstand inkl. Schirmung LWL | brauchbar | InGaAs 1,2-2,57, 100 kHz ungekühlt | Silizium |
| 2.Versuchsreihe | | | | | | | | | | |
| 02_01 | Grauguss Tram | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs | gekühlte Fotodiode | brauchbar | InGaAs 1,2-2,57 gekühlt | Silizium |
| 02_02 | Eisenstück | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs | gekühlte Fotodiode | brauchbar | InGaAs 1,2-2,57 gekühlt | Silizium |
| 3.Versuchsreihe | | | | | | | | | | |
| 03_01 | Grauguss Tram | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V2 | - | unbrauchbar | InGaAs 1-1,66 µm, 100 Hz, gekühlt | Silizium 3mm |
| 03_02 | GKB Scheibe | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V2 | schwarzer Strahler | unbrauchbar | InGaAs 1-1,66 µm, 100 Hz, gekühlt | Silizium 3mm |
| 03_03 | GKB Scheibe | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V2 | schwarzer Strahler | brauchbar | InGaAs 1-1,66 µm, 100 Hz, gekühlt | Silizium 3mm |
| 03_04 | ÖBB Scheibe | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V2 | schwarzer Strahler | brauchbar | InGaAs 1-1,66 µm, 100 Hz, gekühlt | Silizium 3mm |
| 4.Versuchsreihe | | | | | | | | | | |
| 04_01 | ÖBB Scheibe | | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V3 | schwarzer Strahler, schwarzer Strahler, dynamisches Verhalten | brauchbar | | Silizium 1mm |
| 04_02 | GKB Scheibe | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V3 | | brauchbar | | Silizium 1mm |
| 5.Versuchsreihe | | | | | | | | | | |
| 05_01 | GKB Scheibe | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V3 | Messpunkt 1 | brauchbar | | Silizium 1mm |
| 05_02 | GKB Scheibe | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V3 | Messpunkt 2 | brauchbar | | Silizium 1mm |
| 05_03 | GKB Scheibe | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V3 | Messpunkt 3 | brauchbar | | Silizium 1mm |
| 05_04 | ÖBB Scheibe | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V3 | Messpunkt 4 | brauchbar | | Silizium 1mm |
| 05_05 | ÖBB Scheibe | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V3 | Messpunkt 5 | brauchbar | | Silizium 1mm |
| 05_06 | ÖBB Scheibe | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V3 | Messpunkt 6 | brauchbar | | Silizium 1mm |
| 05_07 | Grauguss Tram | stat | Widerstand | Ja | Nein | InGaAs_V3 | Messpunkt 7 | brauchbar | | Silizium 1mm |
| 05_08 | Grauguss Tram | stat | Widerstand | Ja | Ja | InGaAs_V3 | Messpunkt schwarz | brauchbar | | Silizium 1mm |

Anhang 2 - Datenblätter Fotodioden

Fotodiode 1 - Hamamatsu G8373



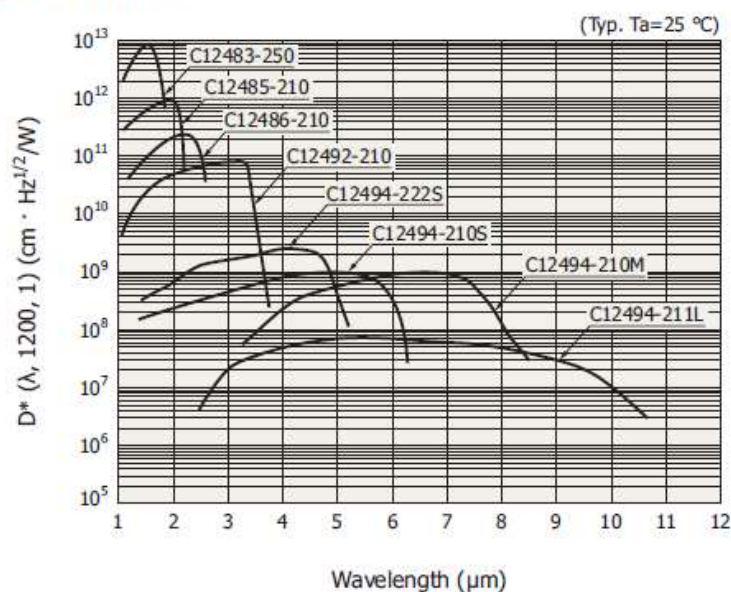
KRD60218EA

■ Electrical and optical characteristics (Typ. unless otherwise noted)

| Type No. | Measurement condition | Spectral response range λ | Peak sensitivity wavelength λ_p | Photo sensitivity $S_{\lambda=\lambda_p}$ | Dark current I_D $V_R=1\text{ V}$ | | Cut-off frequency f_c $V_R=1\text{ V}$ $R_L=50\ \Omega$ -3 dB (MHz) | Terminal capacitance C_t $V_R=1\text{ V}$ $f=1\text{ MHz}$ | Shunt resistance R_{sh} $V_R=10\text{ mV}$ | D^* $\lambda=\lambda_p$ | NEP $\lambda=\lambda_p$ |
|----------|-----------------------|--------------------------------------|--|--|---|------------------------|---|---|--|------------------------------|----------------------------|
| | Element temperature | | | | Typ. (μA) | Max. (μA) | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| G8423-03 | 25 | 1.2 to 2.6 | | | 2 | 20 | 60 | 40 | 30 | 5×10^{10} | 7×10^{-13} |
| G8423-05 | | | | | 5 | 50 | 50 | 60 | 15 | | 1×10^{-12} |
| G8373-01 | | | | | 15 | 75 | 15 | 200 | 3 | | 2×10^{-12} |
| G8373-03 | | | | | 150 | 1500 | 1.5 | 1800 | 0.3 | | 8×10^{-12} |

Fotodiode 2 - Hamamatsu G12483

■ Spectral response



K3RDH0158ER

❏ Optical characteristics (Typ. $T_a = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)

| Type no. | Chip temperature at rated supply voltage T_{chip} ($^\circ\text{C}$) | Peak sensitivity wavelength λ_p (μm) | Cutoff wavelength λ_c (μm) | Photosensitivity ^{*3} S $\lambda = \lambda_p$ | | Noise equivalent power NEP $\lambda = \lambda_p$ | |
|------------------------|---|---|---|--|-------------------|--|--------------------------------|
| | | | | Min. (V/W) | Typ. (V/W) | Typ. (W/Hz ^{1/2}) | Max. (W/Hz ^{1/2}) |
| C12483-250 | -15 | 1.55 | 1.66 | 3.3×10^7 | 5.8×10^7 | 5.2×10^{-14} | 7×10^{-13} |
| C12485-210 | | 1.95 | 2.05 | 1.1×10^8 | 1.8×10^8 | 1×10^{-13} | 3×10^{-12} |
| C12486-210 | | 2.3 | 2.56 | 1×10^8 | 2×10^8 | 4×10^{-13} | 6×10^{-12} |
| C12492-210 | -28 | 3.25 | 3.45 | 0.8×10^7 | 1×10^7 | 6×10^{-12} | 1×10^{-11} |
| C12494-222S NEW | | 4.1 | 5.1 | 5×10^2 | 7×10^2 | 8×10^{-10} | 1.2×10^{-9} |
| C12494-210S | | 4.9 | 5.9 | 5×10^5 | 7.5×10^5 | 1×10^{-10} | 3×10^{-10} |
| C12494-210M | | 6.7 | 8.3 | | | | |
| C12494-211L | | 5.6 | 10.2 | | | | |

*3: $f = 100\text{ Hz}$ (C12483-250, C12485-210, C12486-210), $f = 1.2\text{ kHz}$ (C12492-210, C12494-210S/-210M), $f = 600\text{ Hz}$ (C12494-211L/-222S)

*4: Uniform irradiation on the entire photosensitive area.

Fotodiode 3 - Advanced Energy IGA 320/23-LO

| Measurement Specifications | |
|--|---|
| Temperature Ranges | 85 to 600°C (185 to 1112°F) (MB 6) |
| | 100 to 700°C (212 to 1292°F) (MB 7) |
| | 150 to 1200°C (302 to 2192°F) (MB 12) |
| Sub Range | Any range adjustable within the temperature range, min span 51°C |
| Spectral Range | 2 to 2.6 μm (main wavelength 2.3 μm) |
| Resolution | 0.1°C on interface |
| | < 0.025% of the adjusted temperature sub range at the analog output |
| Emissivity ε | 10.0 to 100.0%, adjustable via interface in steps of 0.1% |
| Transmittance τ | 10.0 to 100.0%, adjustable via interface in steps of 0.1% |
| Measurement Uncertainty ^{*2} ($\varepsilon = 1$, $t_{90} = 1\text{ s}$, $T_{\text{amb}} = 23^\circ\text{C}$) | < 400°C: 2°C |
| | > 400°C: 0.3% of measured value in $^\circ\text{C} + 1^\circ\text{C}$ |
| Repeatability ^{*2} ($\varepsilon = 1$, $t_{90} = 1\text{ s}$, $T_{\text{amb}} = 23^\circ\text{C}$) | 0.1% of measured value in $^\circ\text{C} + 1^\circ\text{C}$ |

Anhang 3 - Bremsscheiben

| | Bremsscheibe 1 - Straßenbahn | Bremsscheibe 2 - Triebzug | Bremsscheibe 3 - Lok |
|--|--|---|---|
| Betreiber | Holding Graz | GKB | ÖBB |
| Material | Spezial-Grauguss (Knorr Bremse) | Grauguss | Grauguss |
| Abmessungen $D_A = \text{Außenringdurchmesser}$ $D_I = \text{Innenringdurchmesser}$ $d_G = \text{Dicke gesamt}$ $d_S = \text{Dicke Bremsring}$ | $D_A = 450\text{ mm}$ $D_I = 300\text{ mm}$ $d_G = 30\text{ mm}$ $d_S = 10\text{ mm}$ | $D_A = 520\text{ mm}$ $D_I = 260\text{ mm}$ $d_G = 100\text{ mm}$ $d_S = 15\text{ mm}$ | $D_A = 610\text{ mm}$ $D_I = 310\text{ mm}$ $d_G = 100\text{ mm}$ $d_S = 17\text{ mm}$ |
| Zustand | Angerostet, verschlissen, Kratzer | Stark angerostet, verschlissen, Kratzer | Leichter Flugrost, verschlissen, Kratzer |
| Gewicht | 13 kg | 51 kg | 82 kg |

Bremsscheibe 1**Bremsscheibe 2****Bremsscheibe 3**