

Eine Methode zur Simulation der Temperatur- und Strömungsverteilung in lichttechnischen Geräten

Zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik
der Universität Paderborn
vorgelegte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Sascha Nolte

aus Bad Driburg

Referent: Prof. Dr.-Ing. Frank Dörrscheidt
Korreferent: Dr.-Ing. habil. Volker Schöppner

Tag der mündlichen Prüfung: 06.12.2005

Bad Driburg, den 30.12.2005
Diss. 14/209

Diese Arbeit entstand im L-LAB (Light-Laboratory), einem Institut, das im Rahmen einer Public-Private-Partnership zwischen der Universität Paderborn und der Hella KGaA Hueck & Co. im Jahr 2000 gegründet wurde. In diesem Institut werden Projekte rund um das Thema Licht bearbeitet, wobei ein Schwerpunkt auf der Kfz-Lichttechnik liegt. Das Projekt, in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist, beschäftigt sich mit der Simulation der Betauungsbildung an Abschluss Scheiben von Kfz-Scheinwerfern.

Inhalt

1 Einleitung	1
2 Problemstellung und Zielsetzung	3
2.1 Problemstellung	3
2.2 Stand der Technik	6
2.2.1 Numerische Strömungssimulation	6
2.2.2 Temperatur- und Strömungsmesstechnik	8
2.3 Zielsetzung	9
2.4 Lösungsweg	9
3 Grundlagen	11
3.1 Begriffe der Thermodynamik	11
3.2 Wärmetransportmechanismen	12
3.3 Strömungsmechanische Grundlagen	18
3.4 Numerische Strömungssimulation	20
4 Parameter und Randbedingungen der Simulation	23
4.1 Wärmeübergangskoeffizient für unterschiedliche Betriebszustände	24
4.1.1 Betriebszustände	24
4.1.2 Theoretische Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten	25
4.1.3 Alternative Bestimmung mittels CFD	35
4.2 Randbedingungen für Leuchtmittel	39
4.2.1 Halogenleuchtmittel	39
4.2.2 Prinzip der Wärmeübertragung von Leuchtmitteln	42
4.2.3 Glühlampenmodell	45

5 Simulation der gerichtet reflektierten Strahlung	53
5.1 Lichttechnische Simulationswerkzeuge	53
5.2 Zusammenhang zwischen Lichtstrom und Wärmestrom	54
5.3 Einbringen des Wärmestroms in das CFD-Programm	56
5.3.1 Methode der Enthalpieerhöhung	57
5.3.2 Anpassung der unterschiedlichen Modelle	61
5.4 Praktische Umsetzung	64
5.5 Alternative Methoden zur Berechnung der gerichtet reflektierten Strahlung	67
5.6 Parameter zur Strahlungssimulation	69
6 Validierung der Simulationsergebnisse	71
6.1 Messtechnik	71
6.1.1 Meßgrößen	71
6.1.2 Temperaturmessung	71
6.1.3 Strömungsmessung	76
6.2 Erweiterung einer Klimakammer	83
6.3 Verifizierung und Validierung der Methode	89
6.3.1 Musterscheinwerfer	89
6.3.2 Realer Scheinwerfer	93
6.3.3 Grenzen der erarbeiteten Simulationsmethode	102
7 Zusammenfassung und Ausblick	105
8 Literaturverzeichnis	108
9 Formelzeichen und Konstanten	112

1 Einleitung

Lichttechnische Geräte gehören im Bereich des Automobils zu den wichtigsten Sicherheitskomponenten. Sie sollen unter dem Motto „Sehen und gesehen werden“ für eine optimale Ausleuchtung der Fahrbahn sorgen, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu beeinträchtigen. Sie markieren die Abmaße eines Fahrzeugs und erhöhen so seine Sichtbarkeit bei eingeschränkten Sichtverhältnissen. Sie dienen zur Übermittlung von Informationen zwischen den Fahrzeugführern, wie z.B. der Information „das vorausfahrende Fahrzeug verlangsamt“ durch Aufleuchten der Bremslichtfunktion oder der Anzeige eines Richtungswechsels durch den Fahrtrichtungsanzeiger. Weiter dienen diese Geräte zur Beleuchtung der Instrumente oder zur Ausleuchtung des Innenraumes.

Ein Ausfall, eine Funktionseinschränkung oder eine Fehlbedienung der Lichttechnik am Fahrzeug kann zu einer kritischen Situation oder zu einem Unfall führen. Daher ist eine einwandfreie Funktion der lichttechnischen Geräte ebenso wichtig wie der zahlreichen Einrichtungen, die das Führen eines Kfz sicherer machen, wie z.B. Airbag, ABS¹ und ESP².

Die lichttechnischen Geräte haben durch ihre Position in der Karosserie auch eine starke Auswirkung auf das Design eines Fahrzeugs. Besonders die Hauptscheinwerfer in der Front und die Signalleuchten am Heck des Fahrzeugs haben einen großen Einfluss auf sein Erscheinungsbild. Sie werden daher als Stilelement des Designs benutzt.

Die Geräte müssen Design und Technik in einem hohen Maße vereinen, ohne dabei die Sicherheit zu beeinträchtigen. Dieses gelingt nur durch den Einsatz modernster Materialien, Entwicklungs- und Fertigungsmethoden.



Bild 1.1: Modernes Scheinwerfersystem

¹ ABS: Anti Blockier System

² ESP: Elektronisches Stabilitätsprogramm

Bild 1.1 zeigt ein modernes Scheinwerfersystem, und Bild 1.2 die wichtigsten Stationen in der Entwicklung der Scheinwerfertechnik.

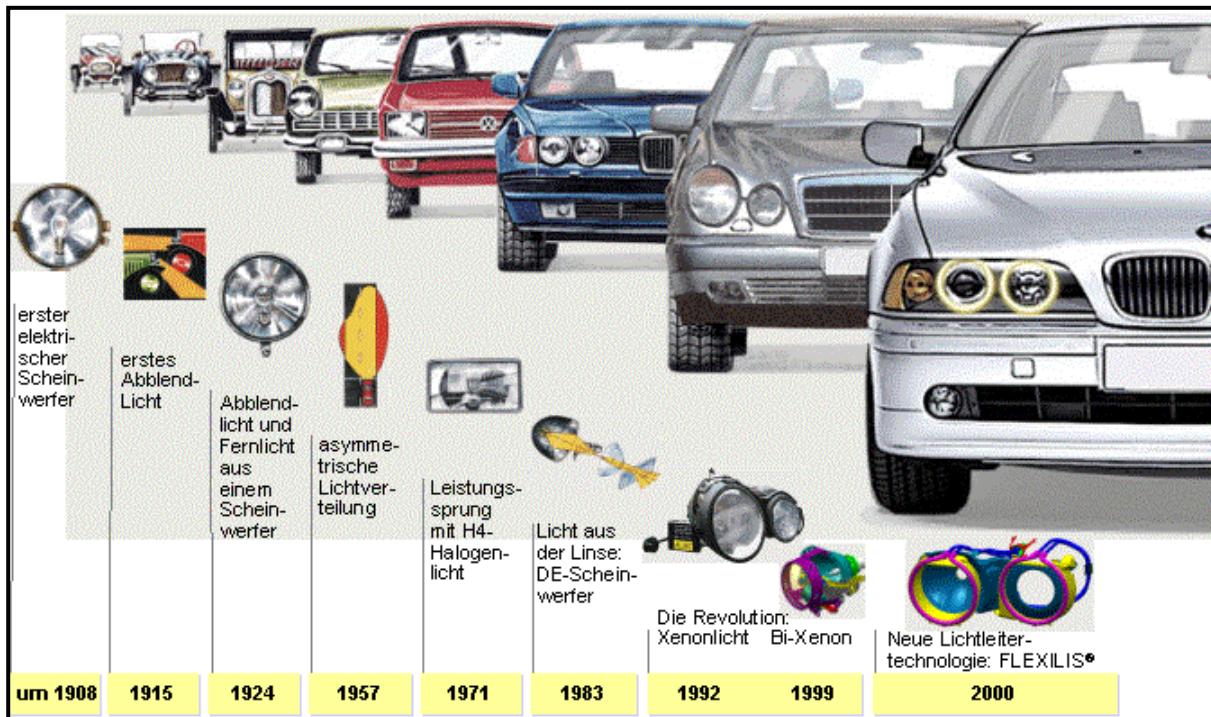


Bild 1.2: Entwicklung in der Scheinwerfertechnik [41]

Während vor 15 Jahren noch hauptsächlich Stahlblech und Glas die dominierenden Materialien in einem lichttechnischen Gerät waren, sind es heute die Kunststoffe. Dieses ist zum einen eine Folge des bereits erwähnten Einbezuks der Geräte in das Design, da sich mit Kunststoffen komplexere Geometrien nachbilden lassen. Zum anderen können durch die Verwendung von Kunststoffen die Herstellungskosten gesenkt werden. Die Automobilhersteller, und damit einhergehend auch die Zuliefererindustrien, geraten unter einen immer stärker werdenden Kostendruck. Um diesen auffangen zu können ist es notwendig, die Material-, Herstellungs- und Entwicklungskosten zu senken. Eine Minimierung der Kosten für die Entwicklung eines neuen Gerätes geht einher mit der Verkürzung der Entwicklungszeit und der Reduzierung von Zusatzkosten, wie sie zum Beispiel durch den Bau von Prototypen für Prüfungen zur Minderung von Entwicklungsrisiken entstehen.

Derartige Risiken werden immer häufiger im Rahmen der präventiven Qualitätssicherung durch den Einsatz moderner Simulationsverfahren bereits in einer frühen Phase der Entwicklung aufgedeckt. Dieses spart Zeit und Kosten durch den Entfall aufwendiger Konstruktions- und Werkzeugänderungen zu einem späteren Zeitpunkt in der Entwicklung.

2 Problemstellung und Zielsetzung

2.1 Problemstellung

Das Licht moderner Scheinwerfersysteme wird heutzutage zum größten Teil mit Hilfe von Halogen-Leuchtmitteln erzeugt; diese nutzen eine Technik zur Lichterzeugung, die bereits seit über 100 Jahren im Einsatz ist. In diesen „Glühlampen“ (Temperaturstrahlern) wird ein metallischer Draht mit Hilfe eines elektrischen Stromes auf eine Temperatur von ca. 3000 K erhitzt; dieser sendet aufgrund seiner hohen Temperatur elektromagnetische Strahlung auch im sichtbaren Wellenlängenbereich aus. Nur ein geringer Teil der dem Leuchtmittel zugeführten elektrischen Leistung verlässt allerdings den Scheinwerfer als sichtbares Licht, da der größte Teil in Verlustwärme umgewandelt wird. Bei modernen Scheinwerfersystemen entsteht das Licht mit Hilfe von Gasentladungslampen (Xenon) oder LEDs. Auch diese Lichtquellen erzeugen, neben Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich, Wärme, die jedoch hauptsächlich durch Konvektion und Wärmeleitung transportiert wird.

Die hauptsächlich aus Gründen des Designs und der Kostenoptimierung durchgeführte Umstellung der Kfz-Scheinwerfersysteme von Glas und Metall auf Kunststoffe führt zu Qualitätsproblemen, die im Vorfeld dieser Umstellung so nicht bekannt waren. Zum einen muss bei der Umstellung der Werkstoffe von Glas auf das viel weniger wärmeresistente und wärmeabführende Polycarbonat darauf geachtet werden, dass die Scheiben durch Wärmestrahlung nicht thermisch überbelastet werden. Zum anderen werden durch den Wegfall der Streuoptiken die Scheinwerfersysteme für jeden einsehbar, so dass schon geringste Schädigungen im Bereich der hochglänzenden Reflektorflächen oder der Blenden auffallen. In einem besonderen Maß trifft dies für thermische Schädigungen, wie zum Beispiel das Irisieren der hochglanz bedampften Reflektorflächen, zu. Eine Minderung der Reflektionseigenschaften oder eine Verformung der Reflektorflächen kann Auswirkungen auf den vom Scheinwerfer ausgesandten Lichtstrom haben und ist damit als ein sicherheitsrelevantes Problem anzusehen.

Zur Qualitätssicherung in diesem Bereich werden zu verschiedenen Zeiten der Entwicklung thermische Belastungsprüfungen durchgeführt. Die thermodynamischen Anforderungen an diese Prüfungen sind in kundenspezifischen Lastenheften festgelegt. Die Ergebnisse der Prüfung müssen dokumentiert und archiviert werden, da sie relevant für die Abnahme des Gerätes durch den Kunden und die Zulassungsbehörden sind. Dazu werden Prototypen den festgeschriebenen Prüfabläufen unterzogen. Die Ergebnisse der Tests fließen anschließend in die weitere Konstruktion ein. Der allgemein herrschende Zwang zur Minimierung der Herstellungskosten und die damit einhergehende Verkürzung der Entwicklungszeiträume bei den Automobilherstellern zwingt auch die Automobilzulieferindustrie, ihre Produkte schneller und günstiger an den Markt zu bringen. Dieses soll unter anderem durch eine verstärkte

präventive Qualitätssicherung erreicht werden. Dazu sollen die oben erwähnten Belastungsprüfungen bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung durchgeführt werden, damit Qualitätsprobleme rechtzeitig erkannt und behoben werden können. Dieses spart vor allem Zeit und Kosten, die sonst als umfangreiche Änderungen zu einem späteren Zeitpunkt anfallen würden.

Moderne Simulationsmethoden sollen dazu dienen, die virtuellen Produkte den vorgeschriebenen Qualitätsprüfungen zu unterziehen. Hier seien zum Beispiel *Computer Aided Lighting* (CAL)-, *Finite-Elemente-Methode* (FEM)- oder *Computational Fluid Dynamic* (CFD)- Programme genannt, die bei der Entwicklung von Scheinwerfern eingesetzt werden und die entsprechenden Prüfungen nachbilden sollen. Dies ist jedoch nur ein kleiner Auszug aus der Gesamtheit der Software-Werkzeuge, die bei der Entwicklung eingesetzt werden und sich unter dem Begriff CAE¹ zusammenfassen lassen.

Ein Simulationsprogramm, dass zur präventiven Qualitätssicherung in dem Gebiet der thermischen Untersuchungen eingesetzt werden soll, muss die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Berechnung der Temperaturverteilung.
- Nachbildung der Geometrie des Scheinwerfers.
- Berücksichtigung aller Wärmetransportmechanismen.
- Vorgabe unterschiedlicher Wärmequellen und Umgebungsbedingungen.

Eine Betrachtung der unterschiedlichen Simulationsmethoden zeigt, dass die CFD-Methode diesen Anforderungen am Nächsten kommt.

Die Wärmetransportmechanismen und die Wärmequellen, die auf die Materialien in einem Scheinwerfer wirken, sind in Bild 2.1 dargestellt.

¹ CAE: Computer Aided Engineering

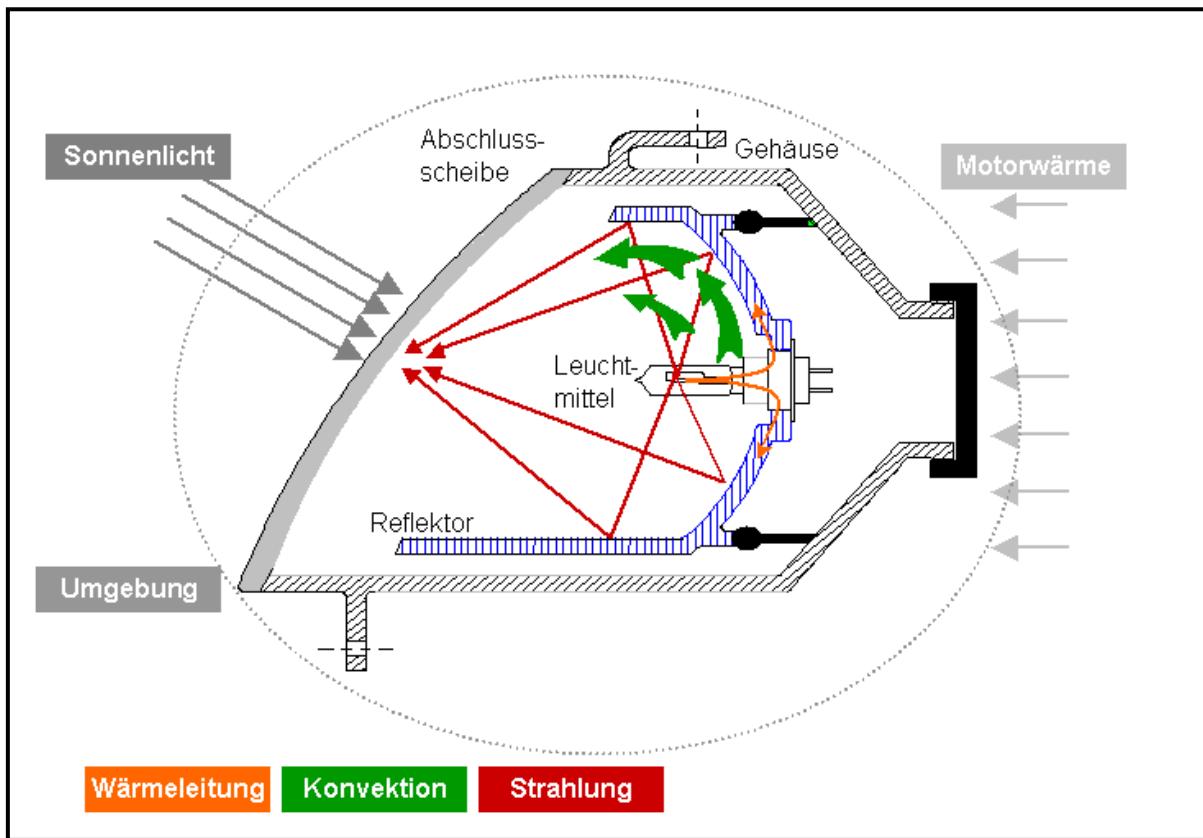


Bild 2.1: Thermische Belastung eines Scheinwerfersystems

Die Hauptbestandteile eines Scheinwerfers (Gehäuse, Abschluss Scheibe, Reflektor und Blende) sind in Bild 2.1 dargestellt. Ebenso das Leuchtmittel als interne Wärmequelle, von dem sich die Wärme durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung im System ausbreitet. Neben den internen Wärmeströmen hat auch die Umgebung einen großen Einfluss auf die thermischen Gegebenheiten im Scheinwerfer. Diese Bedingungen, die hier am Beispiel eines Scheinwerfers gezeigt werden, gelten in ähnlicher bzw. gleicher Weise für alle lichttechnischen Geräte. Diese Phänomene müssen bei den thermischen Prüfungen und damit auch bei den Simulationen mit berücksichtigt werden.

Das folgende Bild 2.2 zeigt Schädigungen am Scheinwerfer, die durch thermische Überlastung der Materialien hervorgerufen wurden.

Kunststoffmaterialien sind einerseits aufgrund ihrer Verformbarkeit und ihres geringen Gewichtes bestens zur Herstellung von geometrisch komplexen Bauteilen geeignet, andererseits häufig nur beschränkt wärmebeständig. Auch wenn der Kunststoffmarkt heute hoch wärmebeständige Kunststoffe bereitstellt, sind diese verhältnismäßig teuer und lassen sich nur aufwendig verarbeiten. Daher werden häufig Materialien ausgewählt, die während des Betriebs des Scheinwerfers an der Grenze ihrer Belastbarkeit sind.

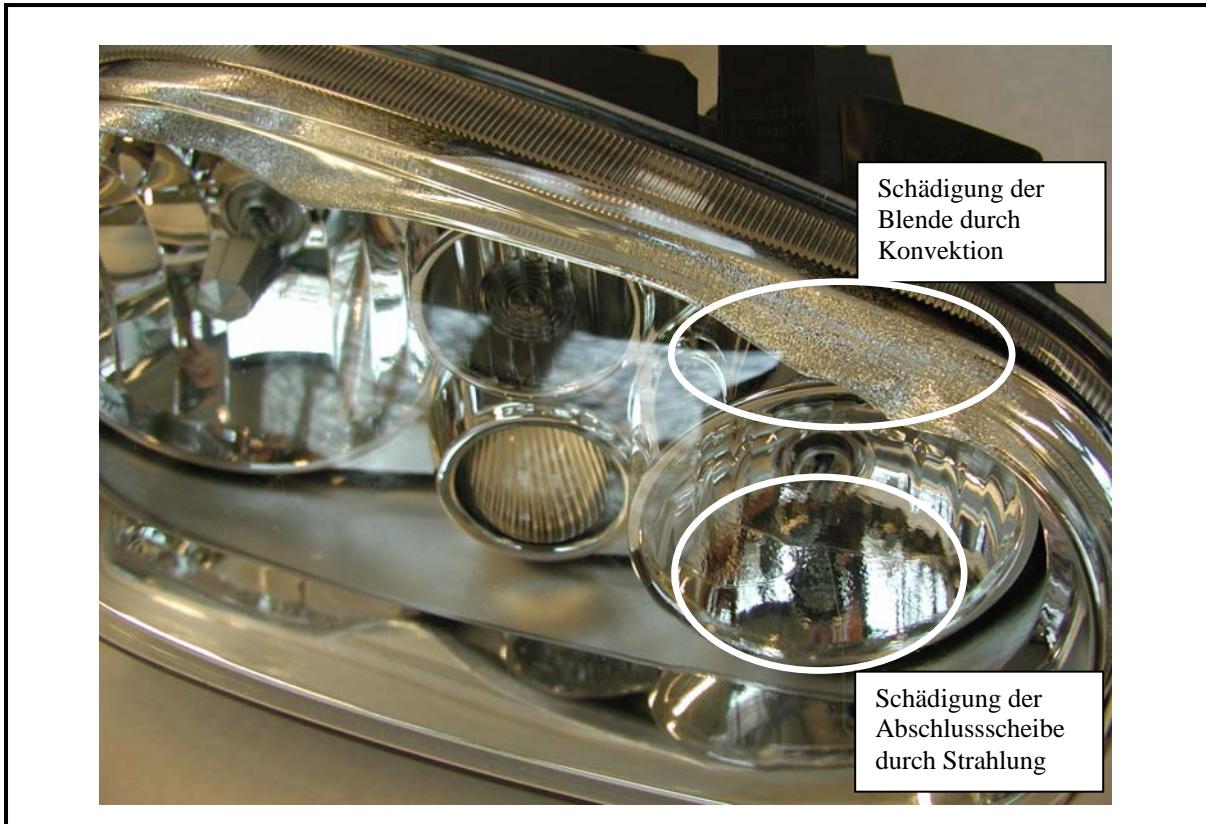


Bild 2.2: Thermische Schädigung an einem Kfz-Scheinwerfersystem

2.2 Stand der Technik

In den folgenden beiden Unterkapiteln wird der aktuelle Stand der Technik der Numerischen Strömungssimulation und der Temperatur- und Strömungsmesstechnik beschrieben.

2.2.1 Numerische Strömungssimulation

Ebenso schnell, wie sich in den letzten Jahren die Computertechnik entwickelt hat, haben sich auch die Anwendungsprogramme für technische Simulationen entwickelt. Durch die enorme Steigerung der Rechenkapazität ist die Möglichkeit zur Lösung komplexer Gleichungssysteme gestiegen. Auch im Bereich der Modellgenerierung wurden Verfahren entwickelt, die es ermöglichen geometrisch und technisch komplexe Systeme in berechenbare Modelle fast vollautomatisch umzuwandeln. Der Markt bietet heute eine Vielzahl an Programmen, mit denen mechanische, elektrische oder thermische Aufgabenstellungen gelöst werden können. Ein großer Teil dieser Programme nutzt zur Lösung die Finite-Elemente-Methode oder die Finite-Volumen-Methode. Die Ursprünge dieser Methoden gehen bis zu Eudoxos (408 – 355 v. Chr.) und Archimedes von Syrakus (287 – 212 v. Chr.) zurück [18]. Sie führten die Lösungen von Problemen in komplexen Geometrien auf die Lösung für einfache Geometrien zurück und bildeten so die Grundlage für die FEM. Nachdem zwischen dem 17. und 18. Jahrhundert der Grundstein zur Lösung komplexer Gleichungssysteme unter anderen durch

Leonhard Euler (1707 – 1783) und Jakob Bernoulli (1655 – 1705) gelegt wurde, brachte die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts den großen Durchbruch für diese Methoden. Vor allem die Entwicklung der Computertechnik trug maßgeblich dazu bei.

Moderne Computersysteme und Simulationsprogramme lösen Probleme mit mehreren Millionen finiten Elementen binnen weniger Stunden. Die Modellbildung, also die Umwandlung einer vorgegebenen Geometrie in ein Berechnungsmodell, benötigt gar nur Minuten.

Die Lösung von Temperatur- und Strömungsproblemen, bei denen die drei Wärmetransportmechanismen Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung gekoppelt sind, werden mit *Computational Fluid Dynamic* Programmen gelöst. Diese Programme leiten sich aus der Finite-Elemente-Methode ab und gehören zu den Finite-Volumen Programmen. Sie benutzen numerische Lösungsverfahren zum Berechnen der Ergebnisse der umfangreichen Gleichungssysteme.

Im Bereich des Automobilbaus werden diese CFD-Codes für unterschiedlichste Anwendungen eingesetzt. Diese sind zum Beispiel:

- c_w^2 -Wert Bestimmung,
- Temperatur- und Strömungsverteilung im Motorraum,
- Innenraumklimatisierung,
- Auslegung von Abgasanlagen,
- Motorkühlung,
- Auslegung von Einspritzanlagen,
- Temperaturbelastung von Elektronikbauteilen.

Dies ist nur ein kleiner Auszug aus dem Anwendungsbereich solcher Programme.

Im Bereich des Hella-Konzerns kommen diese Programme hauptsächlich im Bereich der Temperatursimulation an Elektronikbauteilen und bei der Auslegung lichttechnischer Geräte zur Anwendung. Dabei ist das Hauptaugenmerk auf die Detektion der maximalen Wärmebelastung unterschiedlicher Bauteile gerichtet.

Es sind verschiedene CFD-Programme kommerziell zu erhalten, weiterhin gibt es eine Vielzahl von Codes, die für spezielle Anwendungen in den Universitäten, Instituten und Industrieunternehmen zum Einsatz kommen. Trotz dieser Bandbreite an unterschiedlichen Programmen müssen die implementierten Modelle an die nachzustellenden Gegebenheiten angepasst werden, damit realitätsnahe Ergebnisse erreicht werden können. Weiterhin erfordert

² c_w -Wert: Luftwiderstandsbeiwert eines Körpers

eine Simulation die Eingabe umfangreicher Parametersätze aus den Bereichen der Materialeigenschaften, Umgebungsbedingungen oder der numerischen Mathematik. Auch diese Werte und Parameter unterscheiden sich von Problemstellung zu Problemstellung und müssen identifiziert und in die Programme eingegeben werden. Daraus ergibt sich eine hohe Anforderung an den Anwender, wenn er eine neuartige Problemstellung mit einem Simulationsprogramm nachstellen oder lösen will.

Die kommerziell erhältlichen Programme bieten eine Vielzahl an Berechnungsmöglichkeiten für physikalische und chemische Problemstellungen an; allerdings sind die hinterlegten Modelle teilweise recht einfach und müssen vom Anwender häufig überarbeitet und verbessert werden, damit sie die physikalischen Vorgänge realitätsnäher beschreiben können. Für die Simulation von lichttechnischen Geräten wie Scheinwerfern sind die in den Programmen implementierten Modelle für die Berechnung des Wärmetransportes durch Strahlung unzureichend und müssen erweitert werden.

Für vorliegende Arbeit wurde das CFD-Programm **STAR-CD** (Simulation of Turbulent Flows in Arbitrary Regions der Firma Computational Dynamics - Adapco Ltd.) gewählt. Es bietet gegenüber den vergleichbaren Programmen keine besonderen Vorzüge oder Nachteile, die Hauptprobleme einer solchen Simulation sind bei allen verfügbaren Programmen annähernd gleich.

2.2.2 Temperatur- und Strömungsmesstechnik

Die Messtechnik stellt zur Erfassung der Temperaturen umfangreiche berührende und berührungslose Verfahren zur Verfügung, die eine hohe Genauigkeit aufweisen. Besonders hervorzuheben sind hier die Temperaturmessung durch Widerstandsthermometer, Thermoelemente und die Thermografie. Diese Methoden sind der aktuelle Stand einer Entwicklung der letzten dreitausend Jahre. In dieser Zeit wurde aus der groben Schätzung von Temperaturen ein verlässliches Messen. Durch Vergleichsmessungen in internationalen Eichinstituten mit festgelegten Methoden reduzierten sich die systematischen Messfehler in den Fixpunkten und Vergleichstabellen dergestalt, dass die interpolierten Zwischenwerte heute bis auf wenige Millikelvin Messunsicherheit genau sind [40]. Internationale Gremien sorgen auch heute noch für eine Weiterentwicklung des Temperaturmessung.

Anders ist die Situation bei der Messung von Strömungen mit geringen Geschwindigkeiten. Zwar bietet die Messtechnik auch hier berührende und berührungslose Verfahren an, diese sind aber nicht so weit entwickelt wie bei der Temperaturmesstechnik. Die berührenden Messaufnehmer können aufgrund ihrer Trägheit nicht zur Messung kleiner Volumenströme herangezogen werden, da sie das Messergebnis verfälschen und die Strömung zu stark beeinflussen. Die berührungslosen Messverfahren, wie **Laser-Doppler-Anemometrie** (LDA) oder **Particle Image Velocimetrie** (PIV) sind noch in der Entwicklungsphase und nur eingeschränkt für den industriellen Einsatz brauchbar. Besonders das PIV Verfahren eine

laseroptische Methode zur simultanen Geschwindigkeitsmessung von ganzen Strömungsfeldern wird sich in Zukunft besonders gut eignen Ergebnisse der Strömungsverläufe aus Messung und Simulation miteinander zu vergleichen.

2.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine verifizierte und validierte Simulationsmethode zur Temperatur- und Strömungssimulation zu entwickeln, die es zulässt, die thermische Belastung in lichttechnischen Geräten, wie sie bei den spezifizierten Wärmeprüfungen auftritt, bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung zu bestimmen. Die Ergebnisse sollen dann in die Konstruktion der Geräte einfließen und so Zeit und Kosten sparen, indem die Konstruktion frühzeitig hinsichtlich der Vermeidung von thermischen Schädigungen optimiert und auf reale Prüfungen an Prototypen teilweise verzichtet werden kann.

Die Methode soll alle relevanten Mechanismen der Wärmeübertragung in lichttechnischen Geräten berücksichtigen, wobei ein besonderes Augenmerk auf die Temperaturstrahlung zu legen ist. Weiterhin soll die Genauigkeit der Methode mit Messwerten validiert werden und die zu erwartende Genauigkeit der Simulationsergebnisse abgeschätzt werden.

Da diese Methode für den industriellen Einsatz verwendet werden soll, muss auf geringe Simulationszeiten geachtet werden.

2.4 Lösungsweg

Das CFD-Simulationsprogramm *STAR-CD* soll den Kern der zu entwickelnden Methode bilden. Dazu müssen erst einmal alle notwendigen Simulationsparameter und äußeren Randbedingungen, die bei den thermischen Prüfungen auftreten, identifiziert und in für das Programm verwertbare Größen umgewandelt werden. In einem zweiten Schritt ist es notwendig, die Leuchtmittel mit ihren Eigenschaften im Bereich der Temperaturstrahlung möglichst einfach zu beschreiben, damit der Berechnungsaufwand gering bleibt. Die Strahlungseigenschaften der Leuchtmittel und die physikalischen Bedingungen eines lichttechnischen Gerätes stellen eine besondere Anforderung an das Modell für die Strahlungsberechnung. Dieses ist in den bekannten CFD-Programmen nicht ausreichend implementiert und muss verbessert werden, was durch eine Kopplung der Software mit einem Programm zur Simulation der lichttechnischen Auslegung erreicht werden soll. Abschließend soll die entwickelte Methode mit Messwerten aus realen Versuchen validiert werden. Zusätzlich wird ein Versuchsstand aufgebaut, mit dem es möglich ist, die thermischen Belastungen des Scheinwerfers zu bestimmen, wenn dieser in einem Fahrzeug eingebaut ist und die Simulationsergebnisse mit Hilfe von Messungen zu validieren. Er dient unter anderem zur Bestimmung der Einflüsse der externen Wärmequellen auf die Temperaturverteilung im Inneren des Scheinwerfers.

Das Bild 2.3 zeigt grafisch den hier beschriebenen Lösungsweg

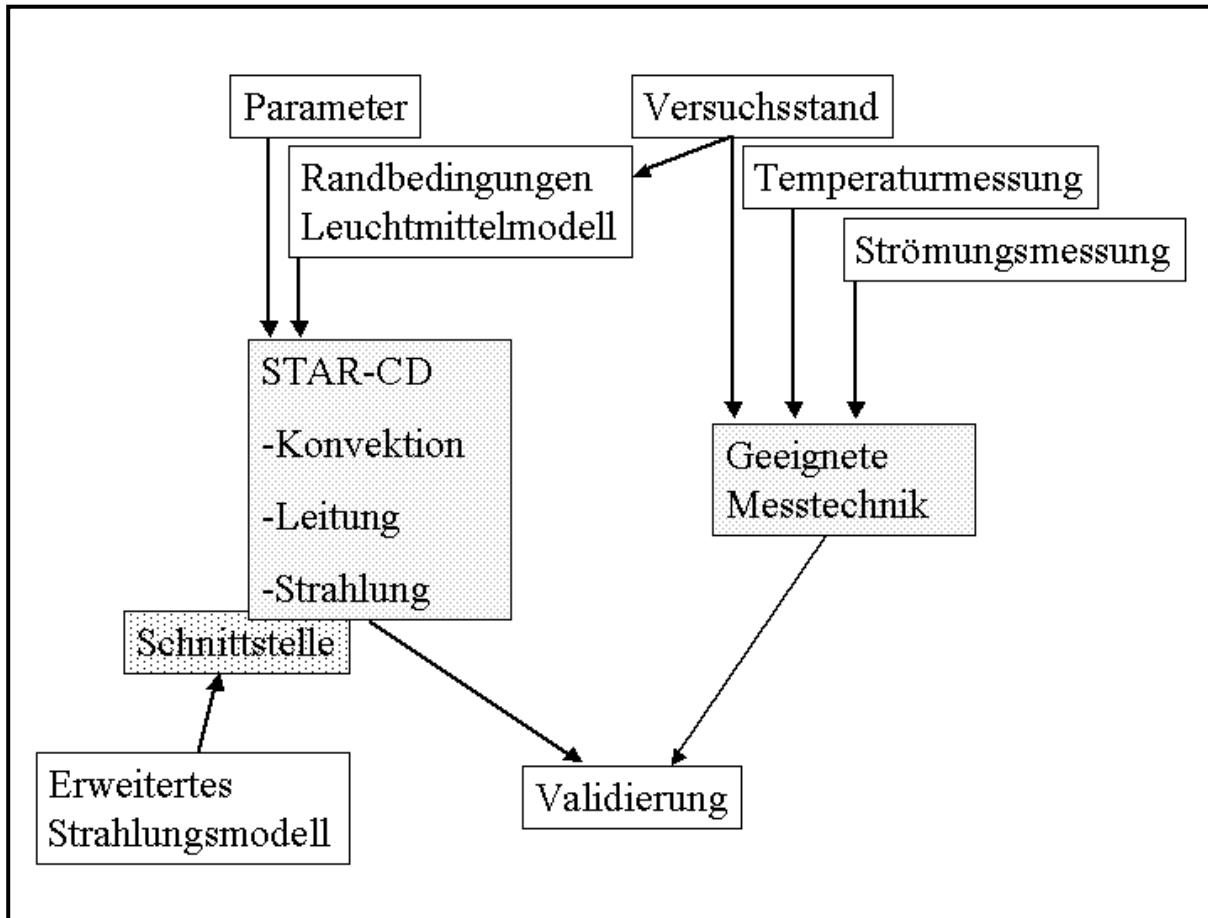


Bild 2.3: Struktur Lösungsweg

3 Grundlagen

Im Scheinwerfer findet eine Umwandlung der elektrischen Energie in Wärmeenergie statt, die durch unterschiedliche Mechanismen im System transportiert wird. Daher ist die Thermodynamik das Teilgebiet der Physik, das diese Phänomene beschreibt [9]. Dieses Kapitel soll dazu beitragen, das Verständnis der komplexen Vorgänge in diesem Bereich durch die Erläuterung der wichtigsten Begriffe und der wichtigsten Gesetze zu verbessern. Der zweite Teil dieses Kapitels beschäftigt sich mit den Grundlagen der numerischen Strömungssimulation. Da es sich hierbei um einen sehr umfangreichen Bereich der Simulationstechnik handelt, wird nur auf Grundlagen eingegangen, die für das Verständnis dieser Arbeit von Bedeutung sind. Die erläuterten Begriffe und Mechanismen werden in den folgenden Kapiteln immer wieder auftauchen.

3.1 Begriffe der Thermodynamik

System, Systemgrenze, Umgebung

Ein thermodynamisches System, oder kurz *System*, bezeichnet das materielle Gebilde, dessen thermodynamische Eigenschaften untersucht werden sollen. Das System wird durch die sogenannte *Systemgrenze* von der Umwelt, der *Umgebung* getrennt [9]. Systemgrenzen sind für die Simulation besonders wichtig. Hier muss das Verhalten der angrenzenden Umgebung durch Randbedingungen vorgegeben werden. Die Beschreibung dieser Randbedingungen spielt in dieser Arbeit eine zentrale Rolle.

Wärme, Wärmestrom, Wärmestromdichte

Die Energie, die ohne Verrichtung von Arbeit zwischen zwei Systemen oder zwischen einem System und seiner Umgebung ausgetauscht wird, wird als *Wärme* bezeichnet [9]. Wärme wird in dieser Arbeit mit dem Formelzeichen Q bezeichnet und hat die Einheit Joule.

Diejenige Wärme, die pro Zeitintervall von einem System an das andere übergeht, wird als *Wärmestrom* bezeichnet.

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad (3.2)$$

Wird der Wärmestrom auf eine Fläche A des Übergangs bezogen, ergibt sich die *Wärmestromdichte*

$$\dot{q} = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{A} \dot{Q}. \quad (3.3)$$

Die Einheit der Wärmestromdichte ist hier W/m^2 .

Enthalpie

Die Enthalpie bezeichnet die innere Energie, die in einem Stoff gespeichert ist. In einem Material, das eine absolute Temperatur größer als 0 K besitzt, bewegen sich die Atome und Moleküle, aus denen der Stoff besteht. Die Energie, die in diesen bewegten Teilen steckt, wird als innere Energie oder Enthalpie H bezeichnet. Die Aufnahmefähigkeit eines Stoffes wird unter anderem durch die Wärmekapazität C beschrieben. Es ergibt sich für die Enthalpie eines Feststoffes [15]

$$dH = C \cdot dT . \quad (3.4)$$

3.2 Wärmetransportmechanismen

In der Thermodynamik wird die Energie, welche die Grenze eines Systems überschreitet, dann als Wärme bezeichnet, wenn der Energietransport allein durch einen Temperaturunterschied zwischen dem System und seiner Umgebung bewirkt wird. Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik fließt die Wärme stets in Richtung fallender Temperatur.

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik macht keine Aussage darüber, in welcher Weise der zu übertragende Wärmestrom vom treibenden Temperaturgefälle abhängt, und wie schnell oder intensiv der irreversible Prozess der Wärmeübertragung abläuft. Diese Gesetzmäßigkeiten zu klären, ist die Aufgabe der Lehre von der Wärmeübertragung. Dabei werden drei Arten des Wärmetransports unterschieden [2]:

- Wärmeleitung,
- konvektiver Wärmeübergang und
- Wärmestrahlung.

Wärmeleitung

Bei der Wärmeleitung wird Wärme zwischen direkt benachbarten Atomen oder Molekülen fester Körper oder unbewegter Flüssigkeiten bzw. Gasen übertragen.

Der Energietransport wird in einem anisotrop wärmeleitenden Material durch das Vektorfeld der Wärmestromdichte beschrieben; nach dem *Fourierschen Gesetz* [12] gilt

$$\vec{q} = -\Lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \vec{e}_x \right) - \Lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \vec{e}_y \right) - \Lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \vec{e}_z \right) \quad (3.5)$$

oder für isotrope Materialien

$$\vec{q} = -\Lambda \cdot \text{grad} T . \quad (3.6)$$

Hierin beschreibt Λ die Wärmeleitfähigkeit des Materials, in dem der Wärmetransport stattfindet. Die Temperatur verteilt sich in einem Körper in alle drei Raumrichtungen. Damit findet auch die Wärmeleitung in alle drei Raumrichtungen statt.

Die Ursache des Energietransportes durch Wärmeleitung sind Temperaturgradienten im Material.

Das in Gleichung (3.5) auftretende Minuszeichen berücksichtigt den 2. Hauptsatz der Thermodynamik: Wärme strömt in Richtung des Temperaturgefälles. Die in Gleichung (3.5) und (3.6) stehende Proportionalitätskonstante ist eine Materialeigenschaft, die Wärmeleitfähigkeit

$$\Lambda = \Lambda(T, p). \quad (3.7)$$

Sie hängt in der Regel von der Temperatur T ab. Werden Fluide betrachtet ist sie auch von dem Druck p abhängig. In Gemischen ist zusätzlich die Zusammensetzung für die Größe der Wärmeleitfähigkeit entscheidend.

Die Wärmeleitfähigkeit gehört zu den wichtigsten Materialeigenschaften der Wärmeübertragung.

Für den eindimensionalen Fall der Wärmeleitung kann Gleichung (3.5) vereinfacht dargestellt werden, dabei reduziert sich der Gradient auf eine Differenz und die vektorielle Gleichung vereinfacht sich zu einem Skalar

$$\dot{q} = -\Lambda \cdot \frac{dT}{dx}. \quad (3.8)$$

Hierin ist dT der Temperaturunterschied, der zwischen den Orten einstellt, die dx von einander entfernt liegen.

Die Erstellung des thermischen Modells für die numerische Simulation benötigt im Zusammenhang mit der Wärmeleitung noch eine weitere, aus dieser abgeleitete Größe.

Hierbei handelt es sich um den Wärmewiderstand R_x des wärmeleitenden Körpers, der analog zum elektrischen Widerstand als Verhältnis von Spannung und Strom aus Temperaturdifferenz und Wärmestrom bestimmt wird. Er ergibt sich aus der Betrachtung der integralen Formulierung von (3.5). Damit ergibt sich der Wärmestrom, der senkrecht durch ein Materialstück der Dicke Δx und der Fläche A fließt zu

$$\dot{Q} = A \dot{q} = -\Lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.9)$$

oder, abweichend von der partiellen Darstellung:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\Delta x / (\lambda A)} = \frac{\Delta T}{R_x} \quad (3.10)$$

mit dem Wärmewiderstand

$$R_x = \frac{\Delta x}{\lambda A}. \quad (3.11)$$

Konvektion

Handelt es sich um ein strömendes Medium (Fluid), so wird die Energie nicht nur durch Wärmeleitung, sondern auch durch die makroskopische Bewegung des Fluids transportiert. Durch eine im Fluid ortsfest aufgespannte Fläche fließen somit Wärme und kinetische Energie. Dies wird dann allgemein als Konvektion oder konvektiver Wärmetransport bezeichnet [2].

Grundsätzlich wird zwischen erzwungener und freier bzw. natürlicher Konvektion unterschieden. Die erzwungene Konvektion beruht darauf, dass die Strömung durch äußere Kräfte vorgegeben wird, wie dies z.B. bei der Kühlung eines Motors durch ein Gebläse der Fall ist. Bei der freien oder natürlichen Konvektion hingegen sind temperaturbedingte Druck- und Dichteunterschiede innerhalb des Mediums die Ursache für die Strömung, wie dies z.B. bei einem Heizkörper der Fall ist.

Der von einem Fluid mit der mittleren Temperatur T_F an eine Fläche mit der Oberflächentemperatur T_W übertragene Wärmestrom wird nach der von Newton angegebenen Beziehung

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_F - T_W) \quad (3.12)$$

ermittelt. Der Wärmeübergangskoeffizient α ist schwer zu bestimmen, da er von vielen Faktoren abhängt, dennoch ist die Formel (3.12) für die Wärmelehre wichtig. Die genaue Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α wird im Kapitel 4 beschrieben.

Auch für den konvektiven Wärmeübergang lässt sich ein Wärmeübergangswiderstand $R_{\bar{u}}$ angeben. Dieser ergibt sich nach [11] zu

$$R_{\bar{u}} = \frac{1}{\alpha A}. \quad (3.13)$$

Wärmewiderstände

Wie schon oben beschrieben stellen die Wärmewiderstände eine wichtige Randbedingung für die Simulation dar. Sie tragen dazu bei das Modell des thermischen Systems realitätsnah zu beschreiben. Analog zur Elektrotechnik lassen sich thermische Ersatzschaltbilder aufstellen und die Wärmewiderstände durch elektrische Widerstände darstellen. Bild 3.1 zeigt das Schaltbild für den Wärmedurchgang durch eine Wand.

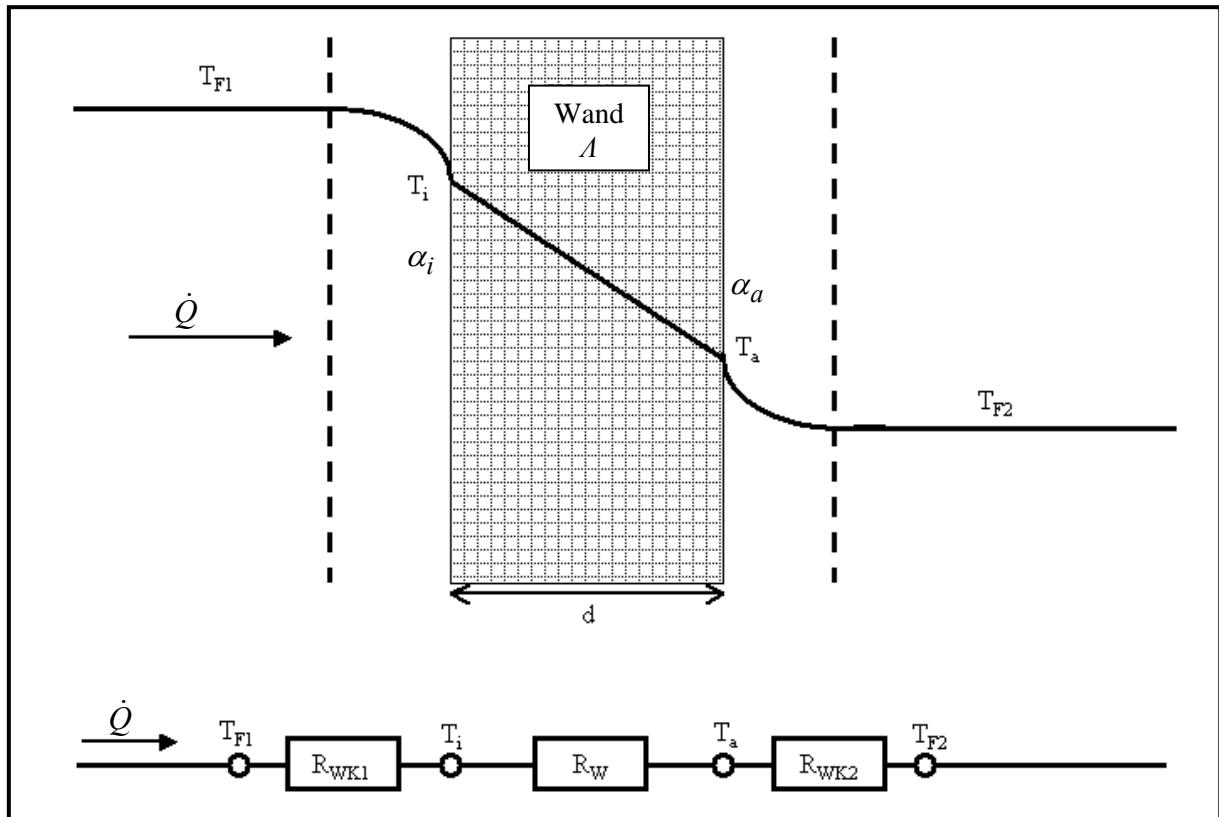


Bild 3.1: Ersatzschaltbild für den Wärmewiderstand einer Wand.

Aus der in Bild 3.1 gezeigten Reihenschaltung der Widerstände und der oben bereits erläuterten Berechnung der Wärmeübergänge ergibt sich der sogenannte Wärmedurchgangskoeffizient \tilde{k} für eine ebene Wand zu [12]

$$\frac{1}{\tilde{k}} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a}. \quad (3.14)$$

Wärmestrahlung

Bei der Temperatursimulation lichttechnischer Systeme spielt die Wärmestrahlung eine besonders wichtige Rolle, da die am häufigsten verwendeten Lichtquellen nicht nur Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich, sondern auch im infraroten Bereich ausstrahlen (siehe Kapitel 4).

Jeder Körper, mit einer Temperatur, die über 0 K liegt, gibt Energie durch elektromagnetische Wellen an seine Umgebung ab. Diese Art der Energieabgabe wird Temperaturstrahlung oder auch thermische Strahlung genannt.

Emission oder Aussendung von Strahlung bedeutet die Umwandlung der inneren Energie des Körpers in Energie, die durch elektromagnetische Wellen abtransportiert wird. Treffen dagegen elektromagnetische Wellen auf Materie, so absorbiert diese einen Teil der mit ihnen transportierten Energie, während der Rest reflektiert oder transmittiert wird. Die von einem Körper absorbierte Strahlungsenergie wird in innere Energie des Körpers umgewandelt.

Wärmestrahlung bewirkt somit eine besondere Art der Wärmeübertragung, die als Strahlungsaustausch bezeichnet wird. Zum Strahlungsaustausch selbst ist keine Materie notwendig, da elektromagnetische Wellen sich auch im leeren Raum ausbreiten können (z.B. die Wärmestrahlung der Sonne). Somit kann Wärme auch über große Entfernungen zwischen zwei Körpern übertragen werden. Gase, Flüssigkeiten und transparente Festkörper lassen Wärmestrahlung nur teilweise hindurch. Daher finden auch Emission und Absorption von Strahlung im Inneren von Gas- und Flüssigkeitsräumen statt. Die Absorption erfolgt dabei gemäß dem Lambert-Beer'schen Absorptionsgesetz.

Für die Emission von Wärmestrahlung gibt es eine obere Grenze, die nur von der thermodynamischen Temperatur T des strahlenden Körpers abhängt. Die maximal mögliche Wärmestromdichte der von der Oberfläche eines Körpers ausgesandten Wärmestrahlung ist durch

$$\dot{q}_S = \sigma \cdot T^4 \quad (3.15)$$

gegeben [11]. Dieses Naturgesetz wurde 1879 von J. Stefan aufgrund von Experimenten angegeben und 1884 von L. Boltzmann aus der elektromagnetischen Theorie der Strahlung mit Hilfe des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik hergeleitet. Es enthält eine universelle Konstante, die Stefan-Boltzmann-Konstante σ , deren Bestwert [1]

$$\sigma = (5,6696 \pm 0,00025) \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

beträgt.

Ein Strahler, dessen spezifische Ausstrahlung (also die durch Strahlung abgegebene Wärmestromdichte) den Maximalwert \dot{q}_S nach (3.15) erreicht, heißt *Schwarzer Körper*. Er ist

ein idealer Strahler, dessen spezifische Ausstrahlung von keinem anderen Körper gleicher Temperatur übertroffen werden kann. Anderseits absorbiert der Schwarze Körper alle auftreffende Strahlung. Die spezifische Ausstrahlung technischer Strahler wird mit Hilfe eines „Korrekturfaktors“ ε beschrieben. Es gilt

$$\dot{q} = \varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3.16)$$

mit den Emissionsgrad $\varepsilon(T) \leq 1$ des Strahlers. Der Emissionsgrad hängt nicht nur vom Material, sondern auch von der Temperatur und der Rauigkeit der Oberfläche ab.

Trifft Strahlung auf einen Körper, so wird ein Teil reflektiert, ein Anteil absorbiert und der Rest transmittiert. Diese Anteile werden durch den Absorptionsgrad a_{Ab} , den Reflexionsgrad r und den Transmissionsgrad τ gekennzeichnet. Diese drei Verhältnisgrößen sind keine reinen Materialeigenschaften des bestrahlten Körpers, sondern hängen auch von der Art der auftreffenden Strahlung ab, insbesondere davon, wie die Strahlungsenergie auf das Spektrum der auftreffenden elektromagnetischen Wellen verteilt ist.

Die Strahlungskoeffizienten müssen stets der Bedingung

$$a_{Ab}(T, \lambda) + r(T, \lambda) + \tau(T, \lambda) = 1 \quad (3.17)$$

genügen, da die Summe aus absorbiert, reflektiert und transmittierter Leistung wieder die gesamte einfallende Strahlungsleistung ergeben muss.

Die Energie, die in einem bestimmten Wellenlängenbereich transportiert wird, lässt sich mit Hilfe des Planckschen Verteilungsgesetzes bestimmen.

Max Planck leitete aus der Quantentheorie eine Beziehung für die Verteilung der Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers über der Wellenlänge ab. Das Plancksche Verteilungsgesetz für die in einem engen Wellenlängenbereich emittierte monochromatische oder spektrale Strahlungsintensität lautet [27]

$$\dot{q}_\lambda = \frac{c_1 \lambda^5}{\exp[c_2 / \lambda T] - 1} \quad (3.18)$$

Die Konstanten c_1 und c_2 lassen sich durch das Plancksche Wirkungsquantum h , die Boltzmann-Konstante k und die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 durch

$$c_1 = 2\pi h c_0^2 \quad (3.19)$$

und

$$c_2 = h c_0 / k \quad (3.20)$$

ausdrücken.

Durch Integration lässt sich hiermit die in einem bestimmten Wellenbereich ausgesandte Wärmestrahlungsleistung bestimmen.

Der bis jetzt betrachtete Energieaustausch beruht auf der von einem Körper auf Grund seiner Temperatur emittierten Strahlung, die in alle Richtungen gleichmäßig abgestrahlt und als diffuse Strahlung bezeichnet wird. Diese Betrachtungsweise der Strahlung reicht in den meisten technischen Anwendungsfällen aus. Bei lichttechnischen Geräten dagegen wird die Strahlung durch Reflexion umgelenkt und im System verteilt. Daher reicht hier ein diffuses Strahlungsmodell nicht aus. Die gerichtet reflektierte Strahlung genügt den optischen Reflexionsgesetzen. In realen Problemen tritt sowohl diffuse als auch gerichtete Strahlung auf und müssen getrennt behandelt werden (siehe Kapitel 5) [5].

3.3 Strömungsmechanische Grundlagen

Neben den Grundlagen für den Wärmetransport sind auch die Grundgleichungen für den Stofftransport von entscheidender Bedeutung für die numerische Strömungssimulation.

Grenzschichttheorie

Die Temperaturverläufe in Bild 3.1 weisen auf ein Phänomen hin, das hier nur kurz angerissen werden soll, da eine ausführliche Betrachtung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Es fällt auf, dass die Fluidtemperaturen in der Nähe der Wand nicht linear verlaufen. Dieses ist ein Effekt, der sich aufgrund der sich ausbildenden Strömungs- und Temperaturgrenzschicht entsteht. Zur Vertiefung dieser Problematik sei hier auf die entsprechende Literatur [9, 10] hingewiesen. Für die Simulation ist es wichtig diesen Effekt zu kennen, da er bei der Erstellung der Finite-Volumen Modelle bei der Verteilung der Zellgrößen berücksichtigt werden muss. Im Bereich von Wänden sollte das Netz eine bestimmte Zellgröße nicht überschreiten, damit der Wärmeübergang realitätsnah abgebildet werden kann.

Kontinuitätsgleichung

In einem geschlossenen System gilt das Prinzip der Massenerhaltung. Bei einer stationären Betrachtung muss der aus einem System ausströmende Massenstrom gleich dem einströmenden sein. Für die Simulation eines Finite-Volumen Modells bedeutet dies, dass der in ein finites Volumen ein- und ausströmende Massenstrom gleich sein muss. Es gilt also [10]

$$\dot{m} = A_1 w_1 \rho_1 = A_2 w_2 \rho_2 = \text{konst.} \quad (3.21)$$

oder in differentieller Schreibweise

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial w_i}{\partial x_i} = 0. \quad (3.22)$$

Darin ist A die Grenzfläche des Volumens, ρ die Dichte des strömenden Mediums, w die Geschwindigkeit.

Bernoulli-Gleichung (Bewegungsgleichung)

Die Bernoulligleichung leitet sich aus dem Impulssatz ab, der besagt, dass die Impulsänderung der sich in einem ortsfesten Kontrollvolumen (finites Volumen) zum Zeitpunkt t befindlichen Masse dm gleich der Summe der an diesem Masselement angreifenden Kräfte ist [10]. Für eine instationäre Strömung längs eines Stromfadens ergibt sich

$$\frac{1}{2} \rho w^2 + p + \rho g z + \rho \int \frac{\partial w}{\partial t} ds = \text{konst.} \quad (3.23)$$

Darin ist p der im Volumen herrschende Druck, g die Erdbeschleunigung und z die Höhe in der sich das Kontrollvolumen befindet. Für stationäre Betrachtungen ist der vierte Summand gleich 0 und kann somit vernachlässigt werden [9].

Damit sind alle Gleichungen bekannt, die zur Lösung thermofluidischer Problemstellungen notwendig sind; Tabelle 3.1 fasst noch einmal die Grundgleichungen der Thermofluidik zusammen [10].

Tabelle 3.1: Grundgleichungen der Thermofluidmechanik

	<i>Gleichung</i>	<i>Größe</i>
Erhaltungssätze:		
<ul style="list-style-type: none"> - Massenerhaltung - Impulserhaltung - Energieerhaltung <ul style="list-style-type: none"> - mechanische Energie - thermische Energie 	<p>Kontinuitätsgleichung Bernoulli-Gleichung Allgemeine Energiegleichung Mechanische Energiegleichungen Thermische Energiegleichungen</p> <p>ρ w $w^2/2 + gz$ U, H</p>	
Stoffgesetze	<p>Zustandsgleichung</p> <ul style="list-style-type: none"> - thermische Zustandsgleichung - kalorische Zustandsgleichung 	<p>$\rho(p, T)$ $U(p, T); H(p, T)$</p>

Damit ergibt sich für die Beschreibung der thermofluidischen Zustände in einem Kontrollvolumen ein Gleichungssystem mit 6 abhängigen (Dichte, Druck, Temperatur,

Strömungsgeschwindigkeit in die 3 Raumrichtungen) und 4 unabhängigen Variablen (Ortskoordinaten, Zeit).

3.4 Numerische Strömungssimulation

Das thermofluidische Differentialgleichungssystem kann für beliebige Kontrollvolumen mit Hilfe numerischer Lösungsverfahren gelöst werden. Im folgenden werden die wichtigsten Punkte, die für ein Verständnis der Methode und für die richtige Einschätzung der sich ergebenden Ergebnisse notwendig sind, erläutert. Für einen tieferen Einblick in diese Berechnungsmethoden sei auf die Fachliteratur verwiesen [13].

Finite-Volumen-Methode

Mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation lassen sich thermische und fluidische Vorgänge in beliebigen Systemen und für beliebig komplexe Geometrien berechnen. Dabei wird ein Verfahren angewandt, das das Problem in einfache, mathematisch und physikalisch zu beschreibende Teilsysteme aufteilt. Diese Systeme mit einer sehr einfachen Geometrie werden als finite Volumen bezeichnet. Unter der Vorgabe von Randbedingungen an den Grenzen dieser Systeme lassen sich selbst komplizierteste Gleichungssysteme lösen. Die Umwandlung der vorgegebenen Geometrie in die finiten Volumen wird Diskretisierung genannt. Er wird in den meisten Fällen von Programmen durchgeführt, die für diese Anwendung spezialisiert sind. Sie wandeln die meistens in einem CAD-Format gegebenen Geometrien in ein Finite-Volumen-Gitter um.

Ein solches Finite-Volumen-Gitter besteht aus Knoten und Zellen. Die Knoten definieren dabei die Eckpunkte einer Zelle, die typischerweise ein Tetraeder oder ein Hexaeder darstellt. Welcher Zelltyp benutzt wird, ist abhängig von der Problemstellung, der Geometrie, dem verwendeten Simulationsprogramm und der geforderten Genauigkeit der Ergebnisse, wobei auch Hybridgitter zur Anwendung kommen. Um eine gewisse Stabilität der numerischen Lösungsalgorithmen zu gewährleisten, ist eine bestimmte Qualität der Zellen erforderlich. Dabei ist vor allem auf die Längenverhältnisse der Zellkanten und die Verteilung der Winkel zwischen den Kanten zu achten. Je weiter diese Werte von denen eines Würfels abweichen, desto instabiler werden die numerischen Lösungsverfahren. Es ist weiter zu beachten, dass die Qualität der Zellen einen starken Einfluss auf die Berechnungszeit und auf die Genauigkeit der Ergebnisse hat.

Die über die Knoten gekoppelten Zellen tauschen über ihre Randflächen die Informationen über die sich einstellenden Wärme- und Massenströme aus. An den Zellenflächen, die an der Systemgrenze liegen, werden diese Informationen durch Randbedingungen vorgegeben.

Randbedingungen

Die Randbedingungen haben die Aufgabe, die physikalischen Eigenschaften des das System umgebenden Raumes nachzubilden. Sie werden auf der Aussenfläche des Finiten-Volumengitters definiert und können folgende physikalische Eigenschaften abbilden [3]

- Temperatur,
- Druck,
- Wärmestrom,
- Wärmewiderstand,
- Strömungsgeschwindigkeit.

Ausgehend von diesen Vorgaben als Rand- bzw. Startbedingungen werden die Gleichungssysteme für die finiten Volumina gelöst.

Die richtige Wahl der Systemgrenze und der dort herrschenden Randbedingung hat außerdem einen starken Einfluss auf die Modellgröße und damit auf die Berechnungszeit.

Es ist jedoch zu beachten, dass eine zu starke Abstrahierung des Systems eine Entfernung von der Realität mit sich führt. Die Findung eines Kompromisses ist unumgänglich und muss vor jeder Modellbildung erfolgen.

VFS-Strahlungsmodell

Die *View Factor Scaling*-Methode (vfs) zur Strahlungsberechnung ist im Bereich der CFD-Programme weit verbreitet. Sie ermöglicht die Berechnung des Energieaustauschs zwischen verschiedenen Oberflächen durch Wärmestrahlung. Dabei wird jedoch nur der direkte Austausch der Energie zwischen zwei Flächen berücksichtigt. Die Eigenschaften der geometrischen Optik, wie zum Beispiel die gerichtete Reflexion, werden bei dieser Methode vernachlässigt.

Das *View Factor Scaling* beruht auf der Annahme, dass jede Fläche mit einer Temperatur über 0 K Strahlung aussendet. Diese verteilt sich gleichmäßig in alle Raumrichtungen, ohne eine Abstrahlcharakteristik aufzuweisen. Es kann hier also von einer diffusen Strahlung gesprochen werden. Da das Programm nicht mit unendlich vielen Strahlen rechnen kann, wird der Raum über der Fläche in sogenannte *View Factors* aufgeteilt. In jeden dieser *View Factors* wird dann die entsprechende Strahlungsenergie abgegeben. Befindet sich eine weitere Fläche in diesem Teilraum, so empfängt diese die Energie und wandelt sie gemäß der vorgegebenen Werte für Emission, Reflexion und Transmission in eine Temperatur um. Diese Temperatur bestimmt dann zusammen mit der reflektierten Strahlung die Energie, die von dieser Fläche abgestrahlt wird. Die Richtungsinformation der einfallenden Strahlungsenergie geht dabei verloren, so dass auch diese Fläche die Strahlung nur diffus aussenden kann.

Numerische Lösungsverfahren

Die Lösungsverfahren werden hier nicht näher beschrieben, da jede Software ihre speziellen Methoden einsetzt. Die Kenntnis dieser Verfahren ist für das Verständnis dieser Arbeit nicht notwendig. Daher sei hier auf die Fachliteratur bzw. auf die Bedienungsanleitungen der Software verwiesen [3].

Subroutinen

Die Erweiterung und Anpassung der in den Simulationsprogrammen bereits implementierten physikalischen Abläufe ist erforderlich. Ein großer Teil der kommerziell erhältlichen Programme gibt dem Benutzer die Möglichkeit die notwendigen Änderungen mit Hilfe von Unterprogrammen einzufügen. Im Falle der hier verwendeten Software *STAR-CD* ist ein Eingriff in die Berechnung der Zustandsgrößen durch sogenannte Subroutinen möglich. Diese frei programmierbaren Programmteile erlauben es, während der Berechnung die Zustandsgrößen zu manipulieren bzw. die physikalischen Modelle zur Bestimmung der Größen zu erweitern.

4 Parameter und Randbedingungen der Simulation

Parameter und Randbedingungen sind für eine Simulation ebenso wichtig wie die genaue Nachbildung der Geometrie. Während das Simulationsmodell die örtliche Diskretisierung der Differenzengleichungen vorgibt, füllen die Parameter diese mit Leben, und die Randbedingungen bestimmen die an den Systemgrenzen angreifenden Lasten. Eine genaue Kenntnis der Parameter und Randbedingungen ist daher für eine realitätsnahe Simulation unverzichtbar.

In den folgenden Abschnitten wird aufgezeigt, welche Parameter und Randbedingungen besonders wichtig sind und wie diese bestimmt werden. Hierbei wird hauptsächlich auf diejenigen Werte eingegangen, die nicht aus bekannten Tabellen bzw. aus einfachen Messungen ermittelt werden können. Diese meist stoffabhängigen Größen sind in Tabellenwerken enthalten und bedürfen keiner weiteren Erläuterung. Die hier untersuchten Parameter sind spezifisch für die Modelle von Kfz-Scheinwerfern und daher nicht aus allgemeinen Untersuchungen abzuleiten. Dieses sind die Wärmeübergangskoeffizienten, die Einfluss auf die Energieabfuhr an der äußeren Systemgrenze haben, und die Randbedingungen für die unterschiedlichen Leuchtmittel. Die Energiezufuhr und Energieabfuhr an den Grenzen des Modells wird aus diesen Parametern bestimmt, und damit die Gleichgewichtslage des Systems.

Es sind hauptsächlich zwei Regionen der Systemgrenze zu unterscheiden. Zum einen die äußere Berandung, an der das System Energie mit der Umgebung, die nicht im Modell enthalten ist, austauscht. Zum anderen die innere Modellgrenze, an der Energie in das System eingeleitet wird. Dieses geschieht in den hier betrachteten Systemen über die Leuchtmittel. Die Wahl der Lage der Systemgrenzen ist entscheidend für die Realitätsnähe der Simulationsergebnisse. Die äußeren Randbedingungen sind hauptsächlich über eine Temperatur und den Wärmeübergangskoeffizienten definiert, wo die Temperatur eine messbare Größe ist, während der Wärmeübergangskoeffizient theoretisch bestimmt werden muss. An der inneren Brandung ist es entscheidend durch welche Art des Wärmetransportes die Energie in das System gelangt, denn dieses ist massgeblich für die Ausbreitung der Wärme im Modell.

4.1 Wärmeübergangskoeffizient für unterschiedliche Betriebszustände

Das Newtonsche Abkühlungsgesetz (Gleichung 4.1) [12] beschreibt die Abfuhr der durch Konvektion aus dem System abgeleiteten Wärmeenergie. In den Temperaturbereichen, die an der Außenseite eines Scheinwerfersystems zu erwarten sind, ist die Konvektion die entscheidende Größe für die Wärmeabfuhr [33]. Die Emissionskoeffizienten sind vom Material, von der Temperatur und von den Oberflächeneigenschaften abhängig und damit weitestgehend aus Tabellen ablesbar. Anders ist dies bei den Wärmeübergangskoeffizienten, die im Newtonschen Abkühlungsgesetz die Energieabfuhr durch Konvektion beschreiben. Diese sind abhängig von den Strömungseigenschaften des Fluids an der betrachteten Oberfläche und damit von der Geometrie und der Temperaturverteilung. Dies bedeutet, dass die Koeffizienten für jede Geometrie und technische Anwendung neu bestimmt werden müssen.

Diese Aussage lässt sich etwas relativieren, wenn die Spezifikationen für die Temperaturprüfungen näher untersucht werden. Diese teilen sich grob in zwei Bereiche auf: Zum einen die Temperaturtests, bei denen die Scheinwerfer frei im Raum aufgestellt und betrieben werden. Hierbei wird die Energie nur durch freie Konvektion und Strahlung aus dem System heraus befördert. Zum anderen in sogenannte Klimaschranktests, bei denen der Scheinwerfer in einem Klimaschrank installiert wird, in dem eine konstante Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit herrscht. Hier wird die Energie durch eine erzwungene Konvektion abgeführt. Bei der erzwungenen Konvektion zeigt sich, dass die Wärmeübergangskoeffizienten nicht mehr so stark von der Geometrie abhängen. Dieses vereinfacht die Definition der äußeren Randbedingungen bei der Simulation und die Verallgemeinerung des Wärmeübergangskoeffizienten auf beliebige Geometrien.

Die Literatur [1] bietet die Möglichkeit der theoretischen Bestimmung der Wärmeübergangszahl für einfache Geometrien. Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der theoretisch bestimmten Koeffizienten auf beliebige Geometrien werden die Ergebnisse der CFD-Simulation mit Messungen an einem realen Scheinwerfer verglichen.

4.1.1 Betriebszustände

Zweck der Simulation ist es die Belastungen, die in der Realität auftreten, so gut wie möglich zu beschreiben und aus den Ergebnissen mögliche Überlastungen des Systems zu erkennen. Diese Belastungen werden durch die Prüfspezifikationen für die einzelnen Scheinwerfer festgelegt und beschreiben die Größen für die Umgebungstemperatur, die Strömungsgeschwindigkeit der den Scheinwerfer umgebenden Luft und deren Feuchtigkeit. Für einige profilierte Vorgaben aus diesen Spezifikationen werden im Folgenden die Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt. Zur Vereinfachung werden diese Koeffizienten wiederum für die

Außenflächen des Musterscheinwerfers bestimmt, bevor sie am realen Scheinwerfer validiert werden.

Die Eigenschaften der Umgebung ergeben sich aus den folgenden Prüfbedingungen, wobei jeweils nur der thermisch eingeschwungene Endzustand betrachtet wird:

- Der Scheinwerfer wird frei stehend in einem Raum ($T_{\text{prüf}} = 20^\circ\text{C}$, Raumtemperatur) aufgebaut, die Umluft ruht. Für die Abfuhr der Wärme ist nur die freie Konvektion und die Strahlung verantwortlich.
- Der Scheinwerfer wird in einem Klimaschrank mit bewegter Umluft aufgebaut ($T_{\text{prüf}}$ und $w_{\text{prüf}}$ verschieden). Die Wärmeabfuhr geschieht also durch erzwungene Konvektion und Strahlung. Im folgenden werden folgende Werte betrachtet:

Tabelle 4.1: Umgebungsbedingungen

$T_{\text{prüf}}$ °C	$w_{\text{prüf}}$ m/s	$T_{\text{prüf}}$ °C	$w_{\text{prüf}}$ m/s	$T_{\text{prüf}}$ °C	$w_{\text{prüf}}$ m/s
20	1	50	1	80	1
20	1,5	50	1,5	80	1,5
20	2	50	2	80	2

Die Feuchtigkeit wird hier vernachlässigt, da sie in dem von den Spezifikationen eingeschränkten Bereich nur einen geringen Einfluss auf die Wärmeabfuhr hat.

4.1.2 Theoretische Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten

Der Wärmeübergangskoeffizient α des Newtonschen Abkühlungsgesetzes ist definiert durch

$$\alpha = \frac{\dot{q}}{T_M - T_K}. \quad (4.1)$$

Dabei beschreibt \dot{q} die Wärmestromdichte, die pro Flächeneinheit das System durch Konvektion verlässt. Die Temperaturdifferenz $T_M - T_K$ wird im allgemeinen mit ΔT bezeichnet und gibt die Temperaturdifferenz in der Grenzschicht an. T_M ist diejenige Temperatur, die das wärmeabführende Medium, in diesem Fall die Luft um den Scheinwerfer, in unendlicher Entfernung der Kontaktfläche besitzt. T_K ist die Temperatur die an der Kontaktfläche zwischen Festkörper und umgebenden Medium herrscht. Für die praktische Anwendung wird üblicherweise jedoch die Temperatur T_M außerhalb der Grenzschicht gewählt, da es sich

hierbei um eine Temperatur in einem endlichen und damit messbaren Abstand zur Oberfläche handelt [10].

Der gesuchte Wärmeübergangskoeffizient α ist ein Maß für den Wärmeübergang. Die Bestimmung des α -Werts stellt ein Problem dar, da er von vielen Variablen abhängt, wie zum Beispiel der Geometrie, der Oberflächenbeschaffenheit und dem umgebenden Medium. Eine Verallgemeinerung der ermittelten Werte auf beliebige Systeme ist daher immer sehr fehlerträchtig. Trotzdem soll hier der Versuch unternommen werden, die unterschiedlichen Bedingungen durch einheitliche Wärmeübergangszahlen zu beschreiben. Das Ziel ist es, die Simulation des Scheinwerfer so einfach wie möglich zu halten und gleichzeitig eine hohe Genauigkeit in den kritischen Bereichen zu erzielen.

Zur Bestimmung der Wärmeübergangszahl wird die *Nusselt-Zahl* herangezogen. Sie ist eine dimensionslose Kenngröße.

Mit Hilfe der *Nusselt-Zahl* Nu , der Wärmeleitfähigkeit Λ des fluiden Mediums und einer für das zu beschreibende Modell charakteristischen Länge l ergibt sich für den Wärmeübergangskoeffizienten

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \Lambda}{l}. \quad (4.2)$$

Die Theorie, die der Wärmeabfuhr aus dem Scheinwerfer zugrunde liegt, wird als „Wärmeübergang bei freier und bei Überlagerung von freier und erzwungener Umströmung von Körpern“ in der Literatur [1] beschrieben. Wie schon oben erläutert, gilt der hier beschriebene Ansatz nur für einfachste, analytisch beschreibbare Geometrien. Die Außenflächen des Musterscheinwerfers kommen mit ihren vertikal und horizontal angeordneten Flächen den beschriebenen Geometrien sehr nah, daher ist dieser Ansatz durchaus gerechtfertigt.

Gemäß der Literatur [1] gilt, dass die Wärmeübertragung in Auftriebsströmungen aufgrund von Temperatur und / oder Konzentrationsunterschieden durch Gleichungen von der Form

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (4.3)$$

mit der *Nusselt-Zahl*

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\Lambda}, \quad (4.4)$$

der *Grashof-Zahl*

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot l^3}{\nu^2} \quad (4.5)$$

und der *Prandtl-Zahl*

$$Pr = \frac{\nu \rho c_p}{\Lambda} \quad (4.6)$$

beschrieben werden kann. Dabei ist l eine charakteristische Abmessung des Strömungsraums, Λ die Wärmeleitfähigkeit des Fluids, β der thermische Ausdehnungskoeffizient des Fluids bei der Temperatur der Kontaktfläche und ν die kinematische Viskosität des Fluids. Die *Grashof-Zahl* bringt den Einfluss der Erdanziehung in die Gleichung ein und beschreibt damit die Größe der Auftriebsströmung.

Die Stoffwerte Λ , ν und Pr sind mit ihren Werten für die mittlere Temperatur

$$T_m = \frac{1}{2} \cdot (T_0 + T_\infty) \quad (4.7)$$

einzusetzen. In der Regel tritt in den Gleichungen zur Berechnung der *Nusselt-Zahl* das Produkt

$$Ra = |Gr| \cdot Pr \quad (4.8)$$

auf. Dieses Produkt wird als *Rayleigh-Zahl* bezeichnet. Die Betragbildung wird hier durchgeführt, damit die *Grashof-Zahl* unabhängig von der Temperaturdifferenz positiv ist.

Berechnung bei freier Umströmung (freie Konvektion)

Verschiedene Untersuchungen ergaben auf der Grundlage von Messergebnissen zahlreicher Autoren eine Beziehung, die sowohl den laminaren als auch den turbulenten Strömungsbereich von $Ra = 10^{-1}$ bis $Ra = 10^{12}$ abdeckt [1]. Danach ergibt sich die *Nusselt-Zahl* zu

$$Nu = \left\{ 0,825 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f_1(Pr)]^{\frac{1}{6}} \right\}^2 \quad (4.9)$$

Die Funktion $f_1(Pr)$ berücksichtigt den Einfluss der *Prandtl-Zahl* im gesamten Bereich von $0,001 < Pr < \infty$ und ergibt sich zu

$$f_1(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{-\left(\frac{16}{9} \right)}. \quad (4.10)$$

Zur konkreten Berechnung werden weitere Bedingungen vorgegeben. Als Berechnungsmodell dient der Muster-Scheinwerfer, dessen Abschluss Scheibe eine Höhe von 0,12 m hat. Diese Höhe ist gleichzusetzen mit der charakteristischen Länge l . Eine Temperatur von 50 °C (siehe Kapitel 5, Tabelle 5.1) an der Abschluss Scheibe und eine Umgebungstemperatur von 20 °C werden angenommen.

Die Stoffwerte von Luft sind von der mittleren Temperatur, berechnet nach Gleichung (4.7) abhängig. Diese beträgt hier 35 °C. Die zu dieser Temperatur gehörenden Werte können aus der Tabelle 4.2 durch Mittelung abgelesen werden.

Tabelle 4.2: Stoffwerte von Luft bei 1 bar Druck [1]

T °C	β 1/K	Λ W/m·K	ν m ² /s	Pr
0	$3,67 \cdot 10^{-3}$	$24,18 \cdot 10^{-3}$	$135,20 \cdot 10^{-7}$	0,72
10	$3,54 \cdot 10^{-3}$	$24,94 \cdot 10^{-3}$	$144,20 \cdot 10^{-7}$	0,72
20	$3,42 \cdot 10^{-3}$	$25,69 \cdot 10^{-3}$	$153,50 \cdot 10^{-7}$	0,71
30	$3,31 \cdot 10^{-3}$	$26,43 \cdot 10^{-3}$	$163,00 \cdot 10^{-7}$	0,71
40	$3,20 \cdot 10^{-3}$	$27,16 \cdot 10^{-3}$	$172,60 \cdot 10^{-7}$	0,71
60	$3,01 \cdot 10^{-3}$	$28,60 \cdot 10^{-3}$	$192,70 \cdot 10^{-7}$	0,71
80	$2,84 \cdot 10^{-3}$	$30,01 \cdot 10^{-3}$	$213,50 \cdot 10^{-7}$	0,71
100	$2,68 \cdot 10^{-3}$	$31,39 \cdot 10^{-3}$	$235,10 \cdot 10^{-7}$	0,71
120	$2,55 \cdot 10^{-3}$	$32,75 \cdot 10^{-3}$	$257,50 \cdot 10^{-7}$	0,71
140	$2,42 \cdot 10^{-3}$	$34,08 \cdot 10^{-3}$	$280,70 \cdot 10^{-7}$	0,71

Aus diesen Werten errechnet sich die *Grashof-Zahl* zu

$$Gr = 3,96 \cdot 10^6$$

und die *Rayleigh-Zahl* zu

$$Ra = |Gr| \cdot Pr = 2,82 \cdot 10^6.$$

Für den Einfluss der *Prandtl-Zahl* ergibt sich aus Gleichung (4.10)

$$f_1(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,49}{0,71} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{-\left(\frac{16}{9} \right)} = 0,35.$$

Dann gilt nach Gleichung (4.9)

$$Nu = \left\{ 0,825 + 0,387 \cdot \left[2,82 \cdot 10^6 \cdot 0,35 \right]^{\frac{1}{6}} \right\}^2 = 21,93.$$

Hieraus lässt sich mit Gleichung (4.2) der Wärmeübergangskoeffizient α bestimmen zu

$$\alpha = 5,88 \frac{W}{m^2 K}.$$

Dieser Wärmeübergangskoeffizient α kann nun für alle vertikal angeordneten Außenflächen des Musterscheinwerfers angenommen werden, mit der Einschränkung, dass die betrachteten Flächen auf dem gleichen Temperaturniveau liegen müssen.

Berechnung bei Überlagerung von freier und erzwungener Umströmung

Die Wirkung der Auftriebskraft auf eine gleichgerichtete erzwungene Konvektion besteht in der Steigerung der Geschwindigkeit und ihres Gradienten in der Grenzschicht. Damit wird auch der Wärmeübergang im Allgemeinen erhöht [1]. Im Allgemeinen ist festzustellen, dass hohe Geschwindigkeiten eine turbulente Strömung erzeugen, die einen besseren Wärmeübergang aufweisen.

Andererseits wurde von *Hall* und *Price* [1] beobachtet, dass in überwiegend vom Auftrieb bestimmter Konvektion die Überlagerung einer erzwungenen Strömung zunächst den Umschlag in die Turbulenz verzögerte, weil die Ablösung der Grenzschicht eingeschränkt wird. Erst bei höheren Werten der *Rayleigh-Zahl* trat die den Wärmeübergang steigernde Wirkung der Überlagerung auf. Dieses Verhalten wurde noch nicht ausreichend untersucht, weshalb das nachfolgend genannte Verfahren nur grobe Näherungen bieten kann. Allerdings ist die Strömungsgeschwindigkeit der Luft bei der erzwungenen Konvektion mindestens doppelt so groß wie die sich einstellende Geschwindigkeit bei freier Konvektion. Somit ist von einer Dominanz der erzwungenen Konvektion zu sprechen.

Aus den bisher zu diesem Problem vorliegenden experimentellen Ergebnissen wurde der Ansatz

$$Nu^3 = Nu_{erzw.}^3 + Nu_{frei}^3 \quad (4.11)$$

entwickelt [1].

Zur Berechnung wird auf das oben erwähnte Beispiel für die freie Konvektion zurückgegriffen; bei dem sich die *Nusselt-Zahl* für freie Konvektion zu $Nu_{frei} = 21,93$ ergab.

Es wird jetzt noch zusätzlich eine horizontale Umströmung des Muster-Scheinwerfers mit einer Luftgeschwindigkeit von 1,5 m/s angenommen.

Zur Bestimmung des Einflusses der erzwungenen Konvektion muss zunächst die *Reynolds-Zahl* bestimmt werden. Es gilt für dieses Beispiel

$$Re = \frac{w_\infty \cdot l}{\nu} = 1,1 \cdot 10^4. \quad (4.12)$$

Die *Nusselt-Zahl* Nu_{erzw} wird für diesen, im Übergangsgebiet zwischen laminarer und turbulenter erzwungener Strömung liegenden Fall, aus Diagrammen ermittelt, die in [1] zu finden sind. Es ergibt sich hier ein ungefährer Wert von $Nu_{erzw} = 83$.

Mit dem Ansatz nach Gleichung (4.11) ergibt sich

$$Nu = \sqrt[3]{83^3 + 21,93^3} = 83,50.$$

Hieraus lässt sich nun wiederum mit Gleichung (4.2) der Wärmeübergangskoeffizient α für den Fall der Überlagerung von freier und erzwungener Umströmung des Muster-Scheinwerfers zu

$$\alpha = 22,37 \frac{W}{m^2 K}$$

bestimmen.

Wie bereits erwähnt, gilt auch hier der errechnete α -Wert für die Abschluss Scheibe und die vertikal angeordneten Gehäuseflächen des Muster-Scheinwerfers.

Die Berechnung zeigt, dass der Einfluss der freien Konvektion an der Wärmeabfuhr bei ausreichender Strömungsgeschwindigkeit fast verschwindet. Der Anteil der freien Konvektion an der gesamten Wärmeabfuhr beträgt in diesem Fall weniger als 2 %.

Auf diese Weise wurden die Wärmeübergangskoeffizienten für alle oben angegebenen Bedingungen gemäß Tabelle 4.1 bestimmt. Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 4.3: Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit verschiedener Umgebungs-temperaturen bei freier Konvektion.

T_K °C	T_U °C	α W/(m ² K)
30	20	4,10
40	20	4,92
50	20	5,46
60	20	5,87
70	20	6,21
80	20	6,49
90	20	6,72
100	20	6,94
140	20	7,58
60	50	3,94
70	50	4,72
80	50	5,24
90	50	5,64
100	50	5,96
140	50	6,82
90	80	3,80
100	80	4,50
110	80	5,10
120	80	5,40
140	80	6,00

Tabelle 4.4: Werte für eine Umgebungstemperatur von 20 °C und unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten

T_K °C	T_U °C	w_{Luft} m/s	α W/(m ² K)
30	20	1,00	15,50
40	20	1,00	15,60
50	20	1,00	15,40
60	20	1,00	14,80
70	20	1,00	14,80
80	20	1,00	14,60
90	20	1,00	14,60
100	20	1,00	14,20
140	20	1,00	14,30
30	20	1,50	18,10
40	20	1,50	18,40
50	20	1,50	18,70
60	20	1,50	19,00
70	20	1,50	19,30
80	20	1,50	18,40
90	20	1,50	18,70
100	20	1,50	18,90
140	20	1,50	18,00
30	20	2,00	21,80
40	20	2,00	22,10
50	20	2,00	22,20
60	20	2,00	21,90
70	20	2,00	21,90
80	20	2,00	21,80
90	20	2,00	21,60
100	20	2,00	21,70
140	20	2,00	21,10

Tabelle 4.5: Werte für eine Umgebungstemperatur von 50 °C und unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten

T_K °C	T_U °C	w_{Luft} m/s	α W/(m ² K)
60	50	1,00	14,20
70	50	1,00	13,80
80	50	1,00	13,80
90	50	1,00	14,00
100	50	1,00	14,20
140	50	1,00	14,00
60	50	1,50	18,40
70	50	1,50	17,80
80	50	1,50	17,80
90	50	1,50	17,80
100	50	1,50	17,80
140	50	1,50	17,70
60	50	2,00	21,90
70	50	2,00	22,00
80	50	2,00	21,60
90	50	2,00	21,40
100	50	2,00	21,40
140	50	2,00	20,90

Tabelle 4.6: Werte für eine Umgebungstemperatur von 80 °C und unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten

T_K °C	T_U °C	w_{Luft} m/s	α W/(m ² K)
90	80	1,00	14,00
100	80	1,00	13,70
110	80	1,00	13,70
120	80	1,00	13,60
140	80	1,00	14,00
90	80	1,50	17,30
100	80	1,50	17,20
110	80	1,50	17,20
120	80	1,50	17,40
140	80	1,50	17,60
90	80	2,00	20,80
100	80	2,00	21,10
110	80	2,00	20,80
120	80	2,00	21,10
140	80	2,00	20,50

Die Werte für die theoretisch bestimmten Wärmeübergangskoeffizienten (Tabellen 4.3 bis 4.6) sind in den folgenden Diagrammen, entsprechend der dazugehörigen Oberflächen und

Umgebungstemperatur, angegeben. Dabei fällt auf, dass der Wärmeübergangskoeffizient bei freier Konvektion stark temperaturabhängig ist. Bei erzwungener Konvektion ist keine Temperaturabhängigkeit mehr festzustellen. Hier ist der Wärmeübergangskoeffizient allein von der Größe der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

Die Schwankungen in den Graphen für erzwungene Konvektion kommen durch Rundungs- und Ablesefehler zustande, da die logarithmischen Tabellen, die der Berechnung zugrunde lagen, nur ungenau abgelesen werden konnten. Für eine Umgebungstemperatur von 20 °C, 50 °C und 80 °C sind die sich an einer senkrechten Wand einstellenden Wärmeübergangskoeffizienten für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten aufgetragen.

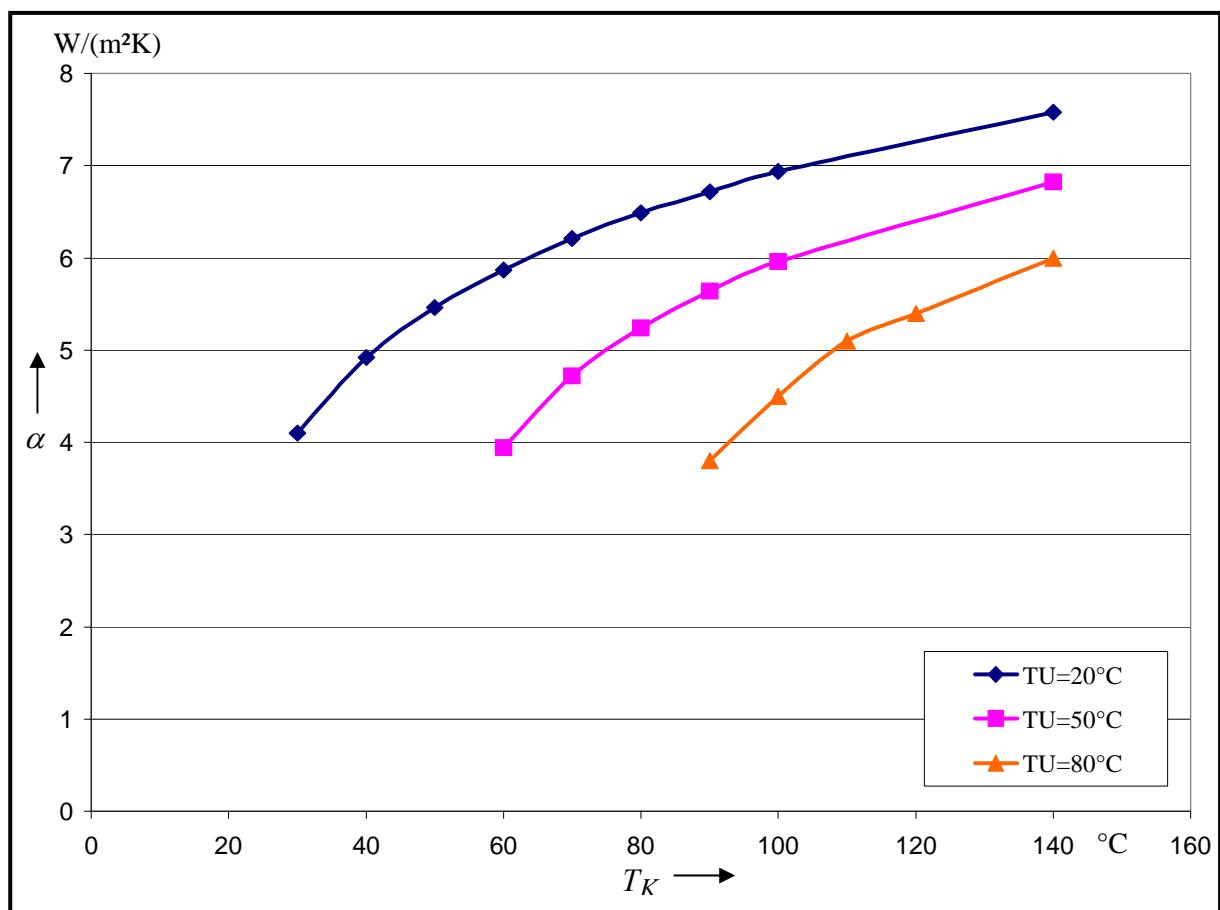


Bild 4.1: Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur bei freier Konvektion.

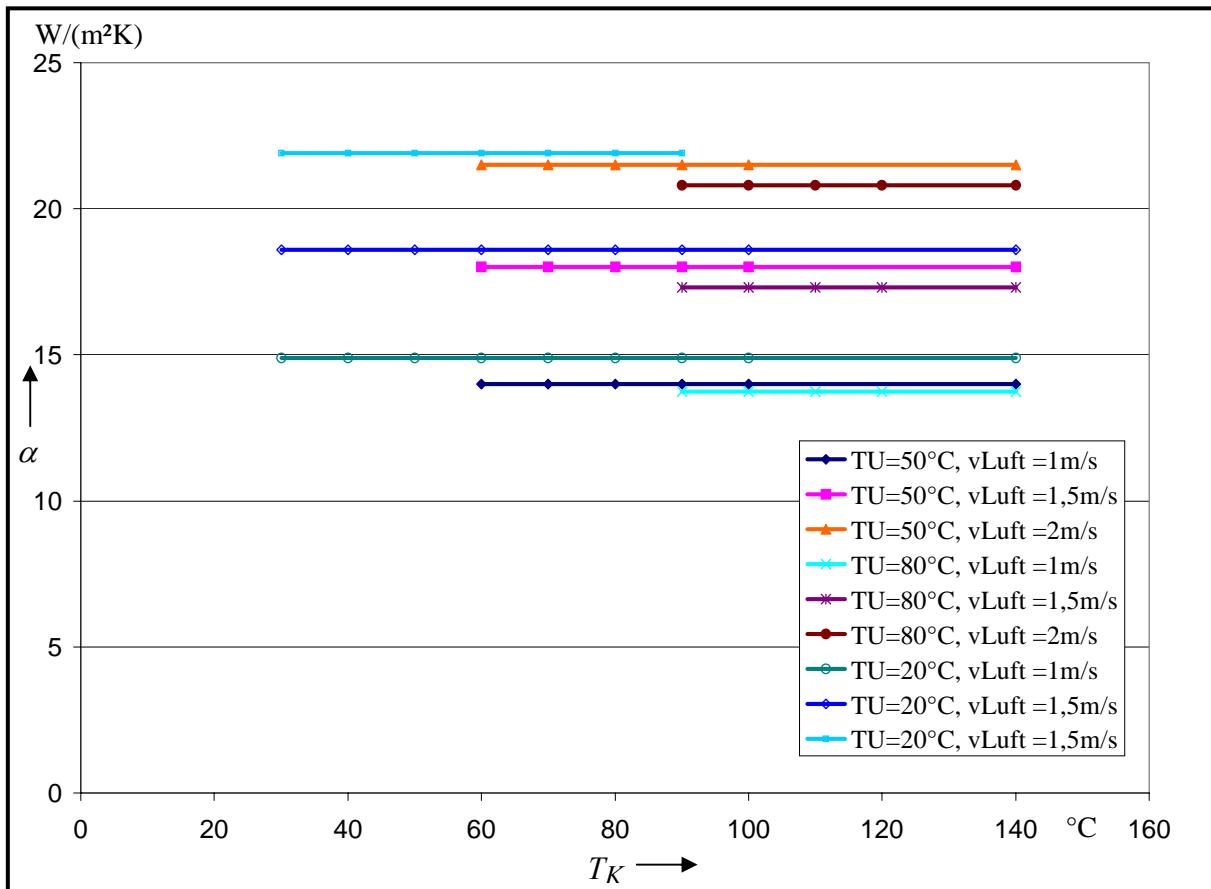


Bild 4.2: Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur bei erzwungener Konvektion.

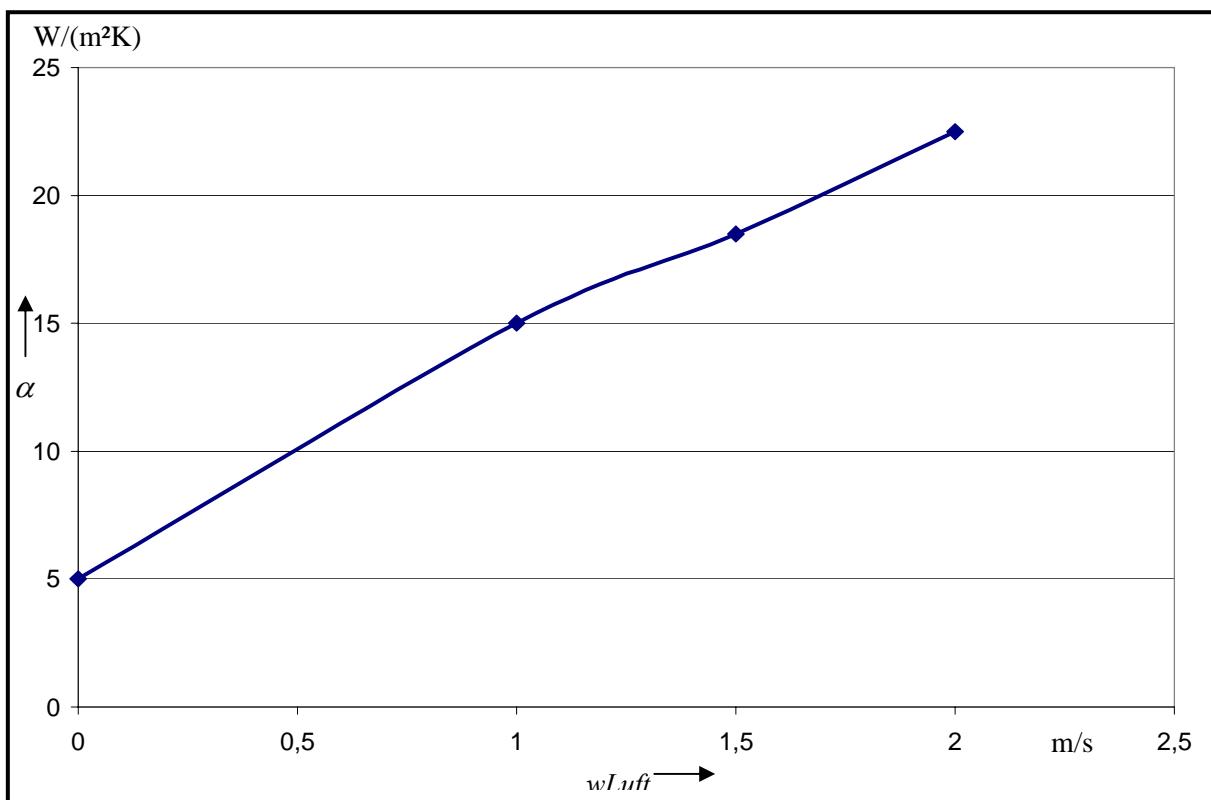


Bild 4.3: Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit bei erzwungener Konvektion.

Aus den Berechnungen ergeben sich die in der folgenden Tabelle abgebildeten Wärmeübergangskoeffizienten. Diese sind zur Vereinfachung der Berechnung bereits geglättet.

Tabelle 4.7: Gemittelte Wärmeübergangskoeffizienten bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen.

T_K °C	α freie Konvektion $T_U = 20^\circ\text{C}$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	α $w_{Luft}=1 \text{ m/s}$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	α $w_{Luft}=1,5 \text{ m/s}$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	α $w_{Luft}=2 \text{ m/s}$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
		$w_{Luft}=1 \text{ m/s}$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$w_{Luft}=1,5 \text{ m/s}$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	$w_{Luft}=2 \text{ m/s}$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
30	4,10	14	18	21
40	4,92	14	18	21
50	5,46	14	18	21
60	5,87	14	18	21
70	6,21	14	18	21
80	6,49	14	18	21
90	6,72	14	18	21
100	6,94	14	18	21
110	7,14	14	18	21
120	7,28	14	18	21
130	7,41	14	18	21
140	7,58	14	18	21

4.1.3 Alternative Bestimmung mittels CFD

Neben der theoretischen Herleitung der Werte bietet das CFD-Programm die Möglichkeit, die Wärmeübergangszahl auch simulativ zu bestimmen. Dazu ist allerdings eine Erweiterung des Modells um den Aussenraum notwendig; es müssen also weitere Fluidzellen um das eigentliche Modell erzeugt werden. Für aufwendigere Geometrien der betrachteten lichttechnischen Systeme bedeutet dies einen sehr hohen Modellierungsaufwand, der es nicht erlaubt, jedes System mit dieser Methode zu simulieren. Allerdings kann diese Simulation zur Überprüfung der theoretisch ermittelten Werte herangezogen werden. Da diese Werte nur für einfache Geometrien bestimmt werden können, wurde hier zur Vereinfachung ein sogenannter Musterscheinwerfer herangezogen, der diese einfache Geometrie aufweist. Bild 4.4 zeigt den Aufbau des Musterscheinwerfers.

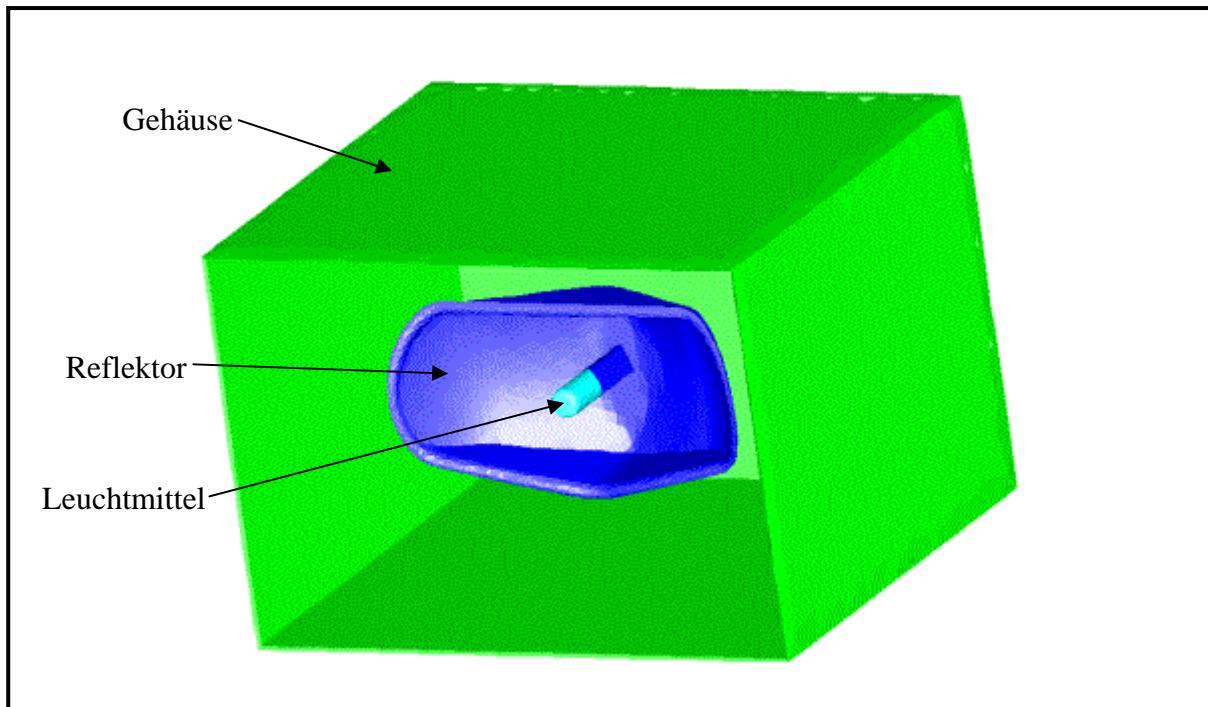


Bild 4.4: Modell des Musterscheinwerfers

Dieses Modell besteht aus einem Kunststoffgehäuse und einem Blechreflektor, der einem Nebelscheinwerfer entnommen wurde. Als Leuchtmittel wird eine H1-Lampe eingesetzt. Dieser Musterscheinwerfer wurde auch real aufgebaut, damit die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen verglichen werden können. Bild 4.5 zeigt den realen Scheinwerfer.

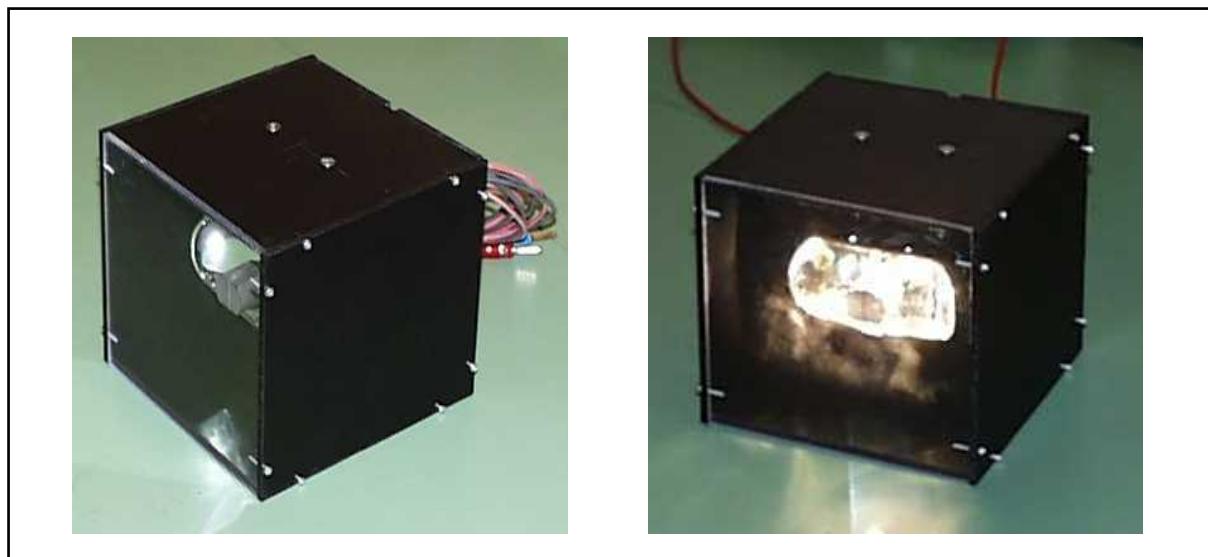


Bild 4.5: Realer Musterscheinwerfer

Werden an den Systemgrenzen nun die entsprechenden Randbedingungen vorgegeben, berechnet das CFD-Programm die Wärmeübergänge am Gehäuse selbstständig. Diese Werte lassen sich nach Abschluss der Simulation darstellen. Dazu ist folgende Berechnung zu Grunde zu legen: Das Newtonsche Abkühlungsgesetz (3.12) wird nach dem Wärme-

übergangskoeffizienten umgestellt. Der Wärmestrom durch die Wand ist ein Ergebnis der Simulation, ebenso die Wandtemperatur. Als Temperatur in unendlicher Entfernung von der Wand wird die an der äußeren Systemgrenze eingestellte Temperatur, in diesem Fall 20 °C, gewählt. Aus dieser Berechnung ergibt sich die in Bild 4.6 dargestellte Verteilung der Wärmeübergangskoeffizienten für freie Konvektion an der Aussenseite des Musterscheinwerfers.

Ein Vergleich der simulierten Werte mit den theoretisch bestimmten Werten aus Bild 4.1 zeigt eine gute Übereinstimmung des Wertebereiches, der von dem Wärmeübergangskoeffizienten abgebildet wird. In beiden Fällen nimmt der Koeffizient Werte zwischen 0 und 7 W/(m²K) an. Die theoretische Herleitung kann also zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten trotz der vereinfachten Geometrie herangezogen werden.

Bild 4.6 zeigt jedoch auch, dass der Koeffizient über die betrachteten Flächen nicht homogen verhält, sondern zum Teil erhebliche Unterschiede aufweist. Besonders fällt dies auf der oberen Fläche auf, an der sowohl die Temperatur als auch die Strömungsverhältnisse je nach Region stark schwanken. Für die Simulation bedeutet dies, dass dieses Phänomen bei einer Verlagerung der äußeren Systemgrenze auf das Gehäuse - was zur Minimierung und Vereinfachung des Modells durch diese Untersuchung angestrebt wird - mit berücksichtigt werden muss. Besonders für die thermisch stark belasteten Regionen im oberen Bereich eines Scheinwerfers muss die Wärmeübergangszahl an die Temperatur- und Strömungsverhältnisse angepasst werden.

Die Annahme einer homogenen Verteilung des Wärmeübergangskoeffizienten führt also zu Abweichungen bei der Berechnung der Temperatur. Dieses tritt besonders bei Modellen auf, bei denen die Abkühlung ausschließlich durch freie Konvektion stattfindet. Bei einer genaueren Betrachtung von Bild 4.6 werden die den Wärmeübergangskoeffizienten bestimmenden Größen deutlich.

Zum einen wird der Koeffizient durch die Temperatur bestimmt, die in einem bestimmten Bereich herrscht; je höher die Temperatur ist, desto größer ist auch der Koeffizient. Dieses ist gut an der KAS und an der oberen Gehäusefläche zu sehen (vgl. Bild 6.17). Auch die theoretische Herleitung zeigt diesen Effekt bei der freien Konvektion.

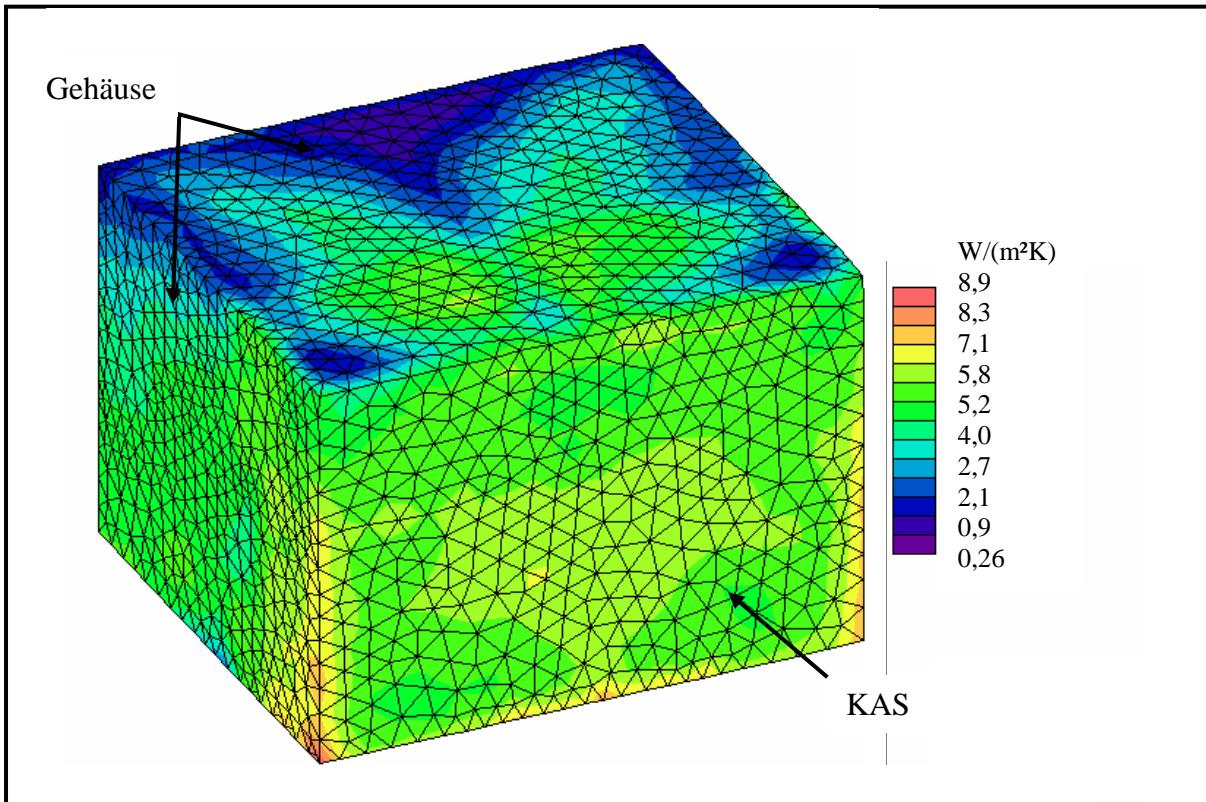


Bild 4.6: Verteilung der Wärmeübergangskoeffizienten.

Zum Anderen ist die sich einstellende Strömungsverteilung maßgebend für die Höhe des Wärmeübergangskoeffizienten. Dieses wird in den Eckbereichen der oberen Gehäusefläche deutlich: Hier stellt sich ein niedriger Wert ein, während sich an den Seitenflächen, die auf einem ähnlichen Temperaturniveau liegen, in diesem Bereich ein höherer Wert einstellt. Der strömungstechnische Effekt, der hier entsteht, ist eine Art Strömungsabriss, der besonders an den Kanten Auftritt. Die Luft strömt laminar an den Seitenflächen entlang nach oben und reißt an den Kanten ab; sie trägt somit nicht mehr zur Wärmeabfuhr in diesen Bereichen bei.

Aufgrund dieser Abhängigkeiten wäre es sinnvoll, diese simulative Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten auch für die komplexe Geometrie eines realen lichttechnischen Systems durchzuführen. Allerdings ist dieses bei den momentan zur Verfügung stehenden Programmen sehr aufwendig, da auch der das Gerät umgebende Luftraum mit modelliert werden müsste. Eine solche Modellierung kann nur zu geringen Teilen automatisch durchgeführt werden und die Geometrie müsste sehr stark vereinfacht werden.

Die Realität zeigt allerdings, dass die thermisch kritischen Testbedingungen bei den Prüfungen mit bewegter Umluft stattfinden. Hier ist die Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von den Temperatur nicht mehr so stark ausgeprägt, und auch die Anströmung der Außenflächen zeigt sich homogener. Hier kann also mit den berechneten Werten gearbeitet werden.

4.2 Randbedingungen für Leuchtmittel

Weiterhin ist die genaue Beschreibung der inneren Randbedingung wichtig, bei den hier betrachteten Systemen also das Leuchtmittel. An dieser Modellgrenze strömt die Energie in den Scheinwerfer. Daher muss hier eine Randbedingung angesetzt werden, die es ermöglicht, die Wärmeströme und die Art des Wärmetransportes zu beeinflussen. Eine genauere wärmetechnische Betrachtung der Leuchtmittel ist also unumgänglich und soll im folgenden Kapitel durchgeführt werden.

Bei allen im Fahrzeugbau eingesetzten Leuchtmitteln wird elektrische Energie in Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich umgewandelt. Dazu werden die verschiedensten Funktionsweisen und Bauformen eingesetzt.

Die gebräuchlichsten Leuchtmittel lassen sich in drei verschiedene Kategorien einordnen. Zum einen existieren die *Glühlampen*, die Licht mit Hilfe der Temperaturstrahlung eines hochohmigen Drahtes erzeugen; derartige Lampen nehmen momentan den größten Teil der in KFZ-Scheinwerfern eingesetzten Leuchtmittel ein. Eine andere im Scheinwerfer eingesetzte Leuchtmittelart bilden die *Gasentladungslampen*, die das Licht mit Hilfe eines zwischen einer Kathode und einer Anode gebildeten Lichtbogens erzeugen. Die dritte Gruppe der verwendeten Leuchtmittel bilden die *Dioden*, die sogenannten LEDs (*Light Emitting Diode*). Hierbei wird durch Rekombination eines p-n dotierten Halbleiters, in den Ladungsträger injiziert wurden, Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich emittiert.

In dieser Arbeit soll das Hauptaugenmerk auf die Leuchtmittel gelegt werden, die das Licht mit Hilfe der Temperaturstrahlung erzeugen, und unter diesen sollen besonders die Halogenlampen betrachtet werden. Diese Gruppe von Leuchtmitteln belastet das lichttechnische System thermisch am stärksten und ist daher für die Wärmesimulation besonders interessant. Die im folgenden beschriebene Methode zur Entwicklung eines Randbedingungsmodells kann aber auch auf jedes andere Leuchtmittel angewandt werden.

4.2.1 Halogenleuchtmittel

Halogenleuchtmittel bestehen aus wärmetechnischer Sicht aus vier Hauptbestandteilen: Der *Wendel*, dem *Füllgas*, dem *Glaskolben* und der *Fassung*.

Dabei dient die Wendel als Temperaturstrahler, in der die elektrische Energie in Wärme umgewandelt wird. Die Baugröße und damit die Geometrie der Wendel bestimmen maßgeblich die Strahlungscharakteristik der Lichtquelle. Der Wendeldraht ist an der Wendel zweifach gewickelt, dadurch erhöht sich seine Länge und die leuchtende Fläche, und er wird mechanisch stabiler. Als Material wird in diesem Bereich hauptsächlich Wolfram verwendet.

Das Füllgas, das durch seine Zusammensetzung dieser Leuchtmittelgattung den Namen verleiht, dient dazu, den Verschleiß der Wendel einzuschränken. Durch die Halogenbestandteile im Füllgas wird ein Kreisprozess in Gang gesetzt, der die aus der Wendel herausgelösten Wolframatome wieder an die Wendel zurückführt. Die genaue Zusammensetzung des Gases unterscheidet sich von Hersteller zu Hersteller, daher kann bei der Modellierung dieses Bereiches nur mit Annahmen und Mittelwerten gearbeitet werden. Weiter steht das Gas im Glaskolben unter einem hohen Druck, was die Beschreibung der Wärmetransportmechanismen in diesem Bereich erschwert. Eine exakte Beschreibung von Konvektionsströmungen in einer Umgebung mit hohem Druck kann von dem Simulationsprogramm nur unzureichend berücksichtigt werden.

Der Glaskolben, der das Füllgas umgibt, besteht aus Quarzglas mit einer mittleren Dicke von 1 mm. Aus geometrischer Sicht handelt es sich bei dem Glaskolben um einen Hohlzylinder, der an beiden Enden zusammengedrückt wird. Die Wendel liegt in der Mitte des Zylinders. Einige der im Kraftfahrzeug eingesetzten Halogenleuchtmittel besitzen auf der Vorderseite des Glaskolbens eine sogenannte Kuppe. Dies ist ein Bereich, der mit einem schwarzen Speziallack abgedunkelt wird, um besondere lichttechnische Eigenschaften zu erreichen. Die besonderen thermischen Eigenschaften dieser Kuppe werden hier jedoch nicht näher untersucht, da sie nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtverhalten haben (siehe Tabelle 4.9).



Bild 4.7: Halogen - Glühlampe H7

Wie schon erwähnt, wird dieser Leuchtmitteltyp von unterschiedlichen Herstellern in den verschiedensten Bauformen produziert. Zur Erläuterung der Modellierungsmethode wird hier jedoch nur ein Typ herangezogen, die in Bild 4.7 dargestellte H7-Lampe. Bei der genauen thermischen Untersuchung des Leuchtmittel fiel auf, dass es innerhalb einer Messreihe mit verschiedenen Leuchtmitteln dieses Typs zu Schwankungen bei den gemessenen Temperaturen kam. Es ist also davon auszugehen, dass sich jedes Leuchtmittel unterschiedlich verhält, auch wenn es aus der gleichen Produktionsserie stammt. Dadurch kann es zu Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und Messwerten kommen, wenn die Messungen mit unterschiedlichen Leuchtmitteln durchgeführt werden. Es ist daher sinnvoll alle Messungen mit der gleichen Lichtquelle durchzuführen und diese als Prüflampe für alle Messungen festzulegen. Allerdings kommt es durch den beschriebenen Kreisprozess zu Alterungerscheinungen, die auch die mit einer Prüflampe erzeugten Messergebnisse beeinflussen. Für diese Arbeit wurde trotzdem eine Prüflampe gewählt, um möglichst einheitliche Messergebnisse zu erzielen.

Ein weiteres Problem bei der thermischen Modellierung des Leuchtmittels stellt die Tatsache dar, dass die genauen Zusammensetzungen der verwendeten Materialien unter das Firmengeheimnis der Hersteller fallen und daher nur ungenaue Stoffwerte als Grundlage für die Simulation vorliegen. Die folgende Tabelle zeigt die gegebenen Stoffwerte für die H7-Lampe [36].

Tabelle 4.8: Thermische Stoffwerte der H7-Lampe [36]

Name	Material	ρ kg/m ³	λ W/(m·K)	c J/(kg·K)	ν kg/(m·s)
Wendel	Wolfram	$19,20 \cdot 10^3$	bei 293 K: 177,00 bei 3200 K: 90,70	bei 293 K: 134,00	
Füllgas	Krypton	bei 298 K, 1 bar: 3,74	bei 298 K: $9,33 \cdot 10^{-3}$ bei 800 K: $2,03 \cdot 10^{-2}$	248,00	bei 298 K: $2,51 \cdot 10^{-5}$ bei 800 K: $5,46 \cdot 10^{-5}$
Glas	Quarzglas	$2,22 \cdot 10^3$	bei 298 K: 1,36 bei 730 K: 0,10	bei 273 K bis 1273 K: 109,00	

4.2.2 Prinzip der Wärmeübertragung von Leuchtmitteln

In der Einleitung zu diesem Kapitel wurde bereits erwähnt, dass Halogen-Leuchtmittel das Licht über Temperaturstrahlung erzeugen. Dabei wird die Wendel auf eine Temperatur von ca. 3000 K erhitzt. Die bei einer bestimmten Wellenlänge abgestrahlten Leistung wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben, das in Bild 4.8 dargestellt ist [36].

$$dP_\lambda = \frac{2\pi h c_0^2}{\lambda^5} \cdot \frac{A}{\frac{hc_0}{e^{k\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (4.13)$$

dP_λ ist die Leistung, die in einem Wellenlängenbereich λ bis $\lambda+d\lambda$ abgestrahlt wird, h die Planck-Konstante (Wirkungsquantum) und c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

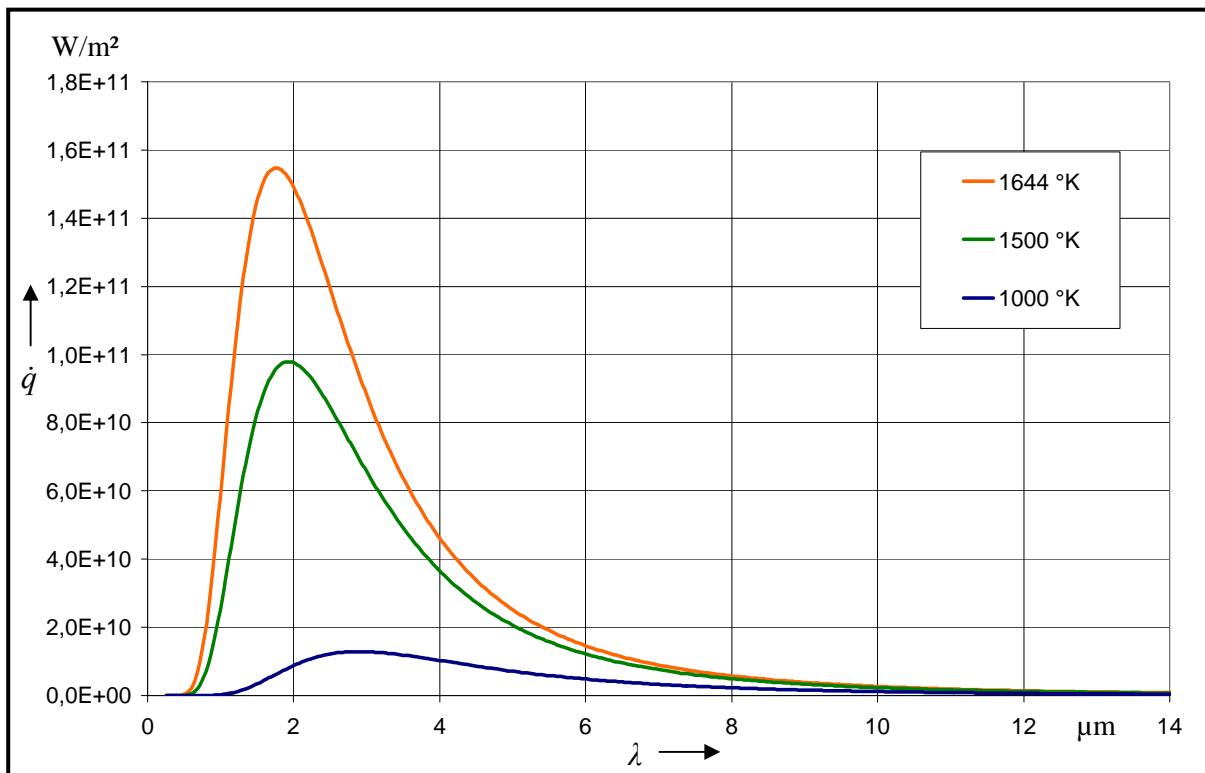


Bild 4.8: Spektrale Energieverteilung bei unterschiedlichen Wendeltemperaturen [36]

Es ist zu erkennen, dass nur ein geringer Teil der emittierten Strahlungsenergie im sichtbaren Bereich liegt, der größte Teil ist Strahlung im Infrarotbereich. Dieses Phänomen muss bei der Simulation besonders berücksichtigt werden.

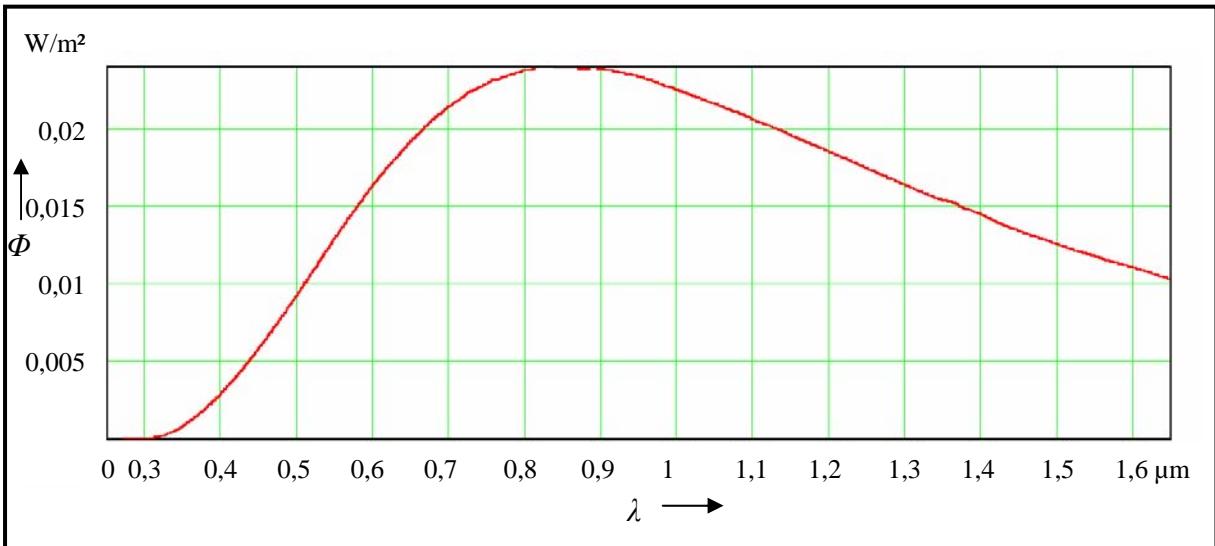


Bild 4.9: Spektrale Beleuchtungsstärkeverteilung einer H7-Lampe mit 55W bei 13,2V [36]

Die Beleuchtungsstärkeverteilung zeigt einen zur Strahlungsleistung äquivalenten Verlauf, da die Beleuchtungsstärke der auf eine Fläche bezogene Strahlungsfluss ist. Der Strahlungsfluss gibt die von einem Körper abgestrahlte oder aufgenommene Leistung an. Es ergibt sich also zwischen der Beleuchtungsstärke E und dem Lichtstrom Φ folgender Zusammenhang

$$E = \frac{\Phi}{A}, \quad (4.14)$$

mit der Strahlungsenergie E , der bestrahlten Fläche A .

Die H7-Lampe zeigt also deutlich das Verhalten eines Temperaturstrahlers.

Die folgende Tabelle gibt die für Halogen-Leuchtmittel typischen relativen Strahlungsanteile (bezogen auf die elektrische Leistung) in bestimmten Wellenlängenbereichen an [36]. Die in der Tabelle beschriebenen Werte gelten für eine H9-Lampe. Diese gehört zu der Familie der H7-Lampen. Die H9-Lampe besitzt jedoch eine höhere Nennleistung als die H7-Lampe.

Tabelle 4.9: Relative Strahlungsanteile (Beispiel: OSRAM 12V 65W H9) [36]

	Wellenlängenbereich			
	300...5000 nm	300...380 nm	380...780 nm	780...5000 nm
Gesamtstrahlung	82,4 %	0,2 %	16,8 %	65,5 %
Wendelstrahlung	79,7 %	0,2 %	16,8 %	62,8 %
Kolbenstrahlung	2,7 %	0,0 %	0,0 %	2,7 %
Kuppenstrahlung	0,1 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %

Die Tabelle zeigt, dass nur 16,8 % der elektrischen Leistung, die an das Leuchtmittel gegeben werden, in Strahlung im sichtbaren Bereich (380...780 nm) umgewandelt wird. Der Rest setzt sich zusammen aus Wärmestrahlung (65,5 %) und Wärmeverluste durch Konvektion und

Wärmeleitung (17,7 %). Wie bereits oben erwähnt, ist das thermische Verhalten der Kuppe zu vernachlässigen. Wird nun noch das Absorptionsverhalten des Glaskolbens, des als nächstes von der Strahlung getroffenen Bauteils, betrachtet, so wird erkenntlich, dass der größte Teil der Strahlungsenergie durch den Glaskolben transmittiert und somit die das Leuchtmittel umgebenden Bauteile belastet. Das Bild 4.10 zeigt das Transmissionsverhalten von einem Glastypen, der zur Herstellung der H7-Lampe benutzt wird.

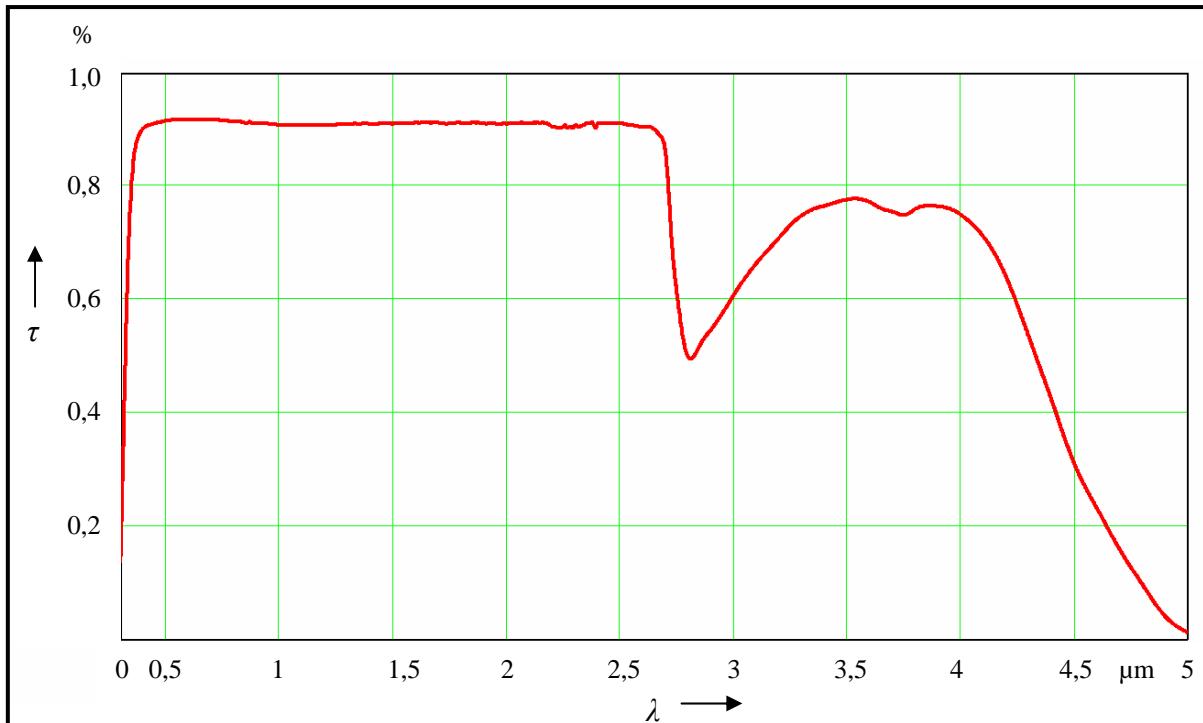


Bild 4.10: Wellenlängenabhängige Transmissionseigenschaften von Glas Schott 8253 [36]

Dieses zeigt wie wichtig die exakte Modellierung der Wärmeübertragung durch Strahlung ist. Hier tritt allerdings auch das Problem auf, dass die meisten CFD-Programme nicht für eine exakte Strahlungssimulation ausgelegt sind. Es ist also notwendig eine Methode bzw. ein Modell zu entwickeln mit der das Phänomen der Strahlung hinreichend genau abgebildet werden kann. Im folgenden wird eine zielführende Modellierungsmethode erläutert.

4.2.3 Glühlampenmodell

Das Simulationsmodell des Leuchtmittels muss die Realität hinreichend gut abbilden und gleichzeitig den Rechenaufwand gering halten. Der Rechenaufwand wird hauptsächlich von zwei Parametern bestimmt, zum einen von der Anzahl der zur Modellierung verwendeten Finite-Volumen Zellen, und zum zweiten von der Komplexität der verwendeten Subroutinen, die dafür sorgen sollen, die fehlenden Beschreibungen der realen Physik in das Simulationsprogramm einzubringen.

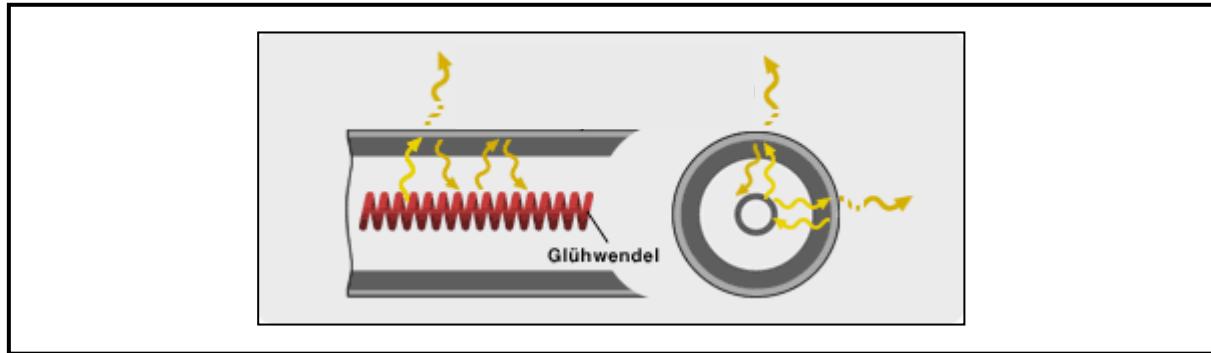


Bild 4.11: Querschnitt durch ein Halogenleuchtmittel

Bild 4.12 zeigt die filigrane Struktur der Wendel. Die genaue Nachbildung benötigt eine große Anzahl an Zellen. Trotzdem bietet diese Methode die größte Realitätsnähe.

Daher ist die naheliegenste Modellierungsstrategie, das Leuchtmittel bis in das kleinste Detail, also bis in die einzelne Windung der Wendel, nachzustellen.

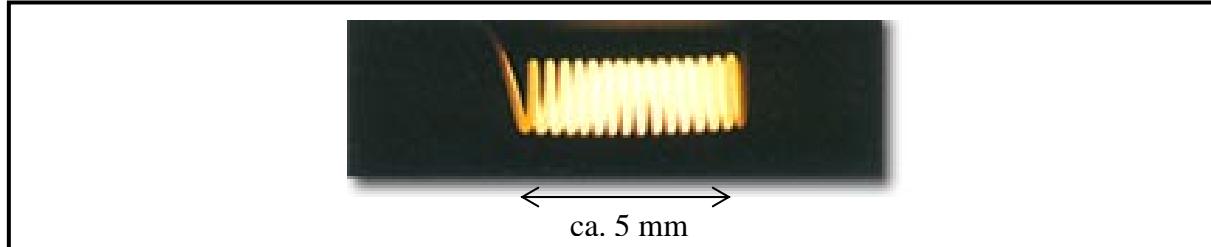


Bild 4.12: Detaildarstellung einer Wendel in Betrieb [36]

Diese Methode wird im folgenden erläutert. Es sei jedoch schon im Vorfeld erwähnt, dass hier ein enormer Modellbildungsaufwand betrieben werden muss, und allein für das Leuchtmittel sehr große Modelle entstehen, die einen Einbau in ein Gesamtscheinwerfersystem sehr aufwendig machen. Trotzdem hat sich gezeigt, dass eine wendelgenaue Modellbildung und Simulation unumgänglich ist, um die Wärmetransportvorgänge, die in einem Leuchtmittel vorstatten gehen, identifizieren und separieren zu können. Nur so kann anschließend das Modell vereinfacht werden.

Wegen der extremen Modellgröße wird ein wendelgenaues Model des Leuchtmittels in einem einfachen Umgebungsraum aufgebaut und simuliert. Bereits hier wird eine Modellgröße von 500.000 Zellen erreicht. Ausschnitte aus diesem Modell sind in Bild 4.13 zu sehen.

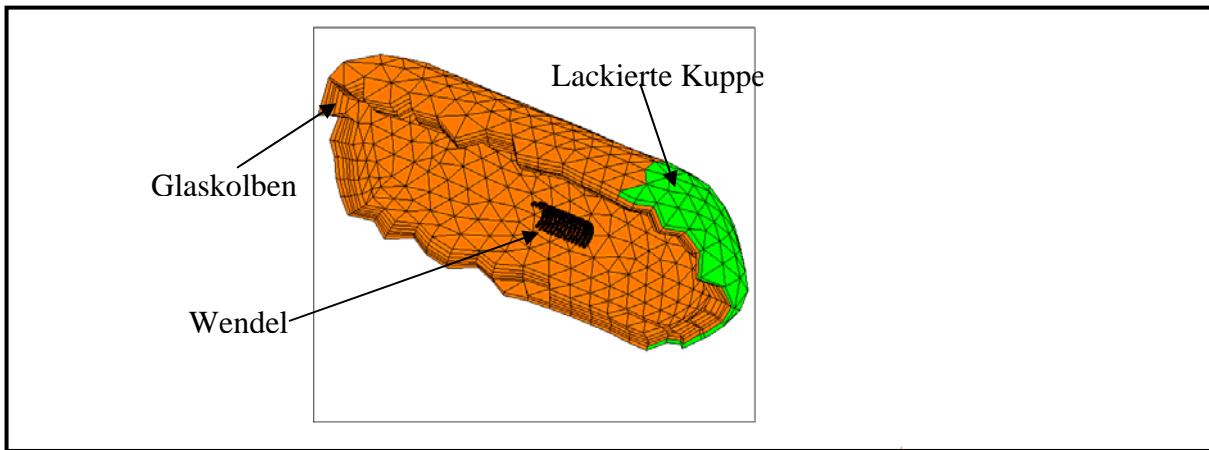


Bild 4.13: Wendelgenaues Finite-Volumen-Modell des Leuchtmittels

Das dargestellte Modell zeigt Glaskolben, Kuppe und Wendel. Die elektrischen Anschlussdrähte der Wendel werden nicht modelliert. Somit kann die Wärmeleitung von der Wendel zur Fassung nicht abgebildet werden. Tabelle 4.8 liefert die nötigen Stoffgrößen für die Simulation.

Als eine wichtige Größe hat sich die im Glaskolben absorbierte Strahlung gezeigt. Es reicht nicht aus den Glaskolben als ideal strahlungsdurchlässig anzunehmen, was er nach Bild 4.10 bis zu einer Wellenlänge von 2750 nm annähernd ist, da noch ca. 1/3 der von der Wendel ausgestrahlten Leistung in einem Wellenlängenbereich größer 2750 nm abgegeben wird. Dieses hat einen großen Anteil an der Entstehung der Glaskolbentemperatur, die massgeblich die konvektive Wärmeabgabe des Leuchtmittels in den Scheinwerfer bestimmt. Trotz seiner geringen Dicke von maximal 1,2 mm wird im Material soviel Strahlung absorbiert, dass sich dieses bei der Simulation bemerkbar macht. Daher muss hier zusätzlich mit einem Modell gearbeitet werden, das die dickenabhängige Strahlungsabsorption berücksichtigt. Das physikalische Gesetz, auf dem dieses Modell aufbaut, ist das Lambert-Beersche Absorptionsgesetz (Gl. 5.6).

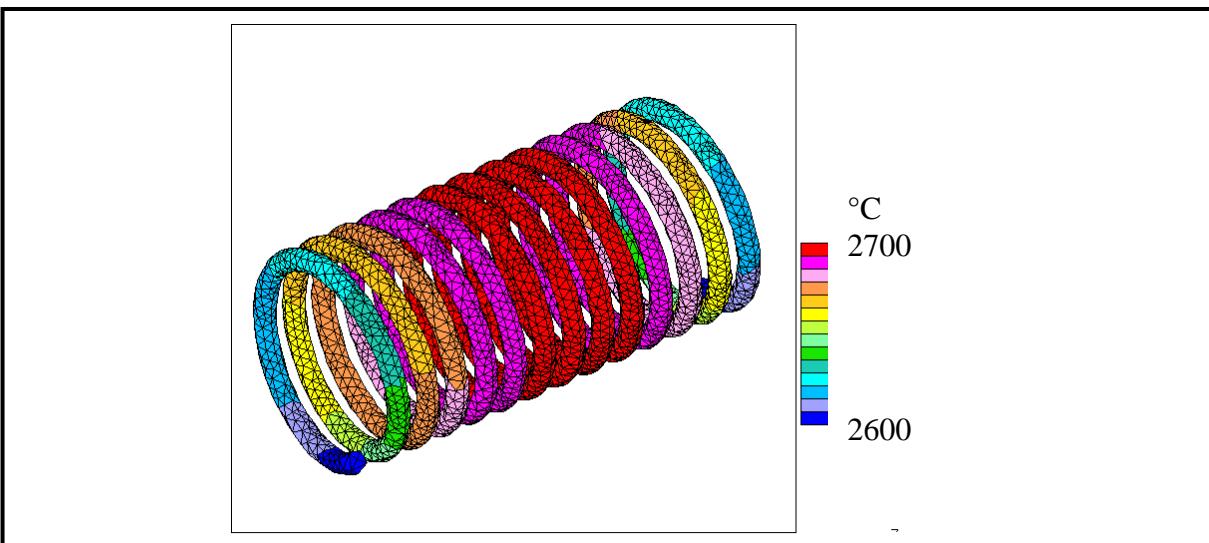


Bild 4.14: Simulierte Temperaturverteilung an der Wendel

Wie schon häufiger erwähnt, sind die meisten Strahlungsmodelle, die in den CFD-Programmen Verwendung finden, nicht dafür ausgelegt, die Physik von Systemen wider zu spiegeln, deren hauptsächlicher Wärmetransport über die Strahlung stattfindet. Neben den fehlenden Richtungsinformationen bei der Reflektion an spiegelnden Oberflächen (siehe Kapitel 5) fehlt für die Simulation des Leuchtmittels vor allem die Möglichkeit, Simulationsparameter und Stoffwerte in Abhängigkeit der Wellenlänge anzugeben. Hier kann nur ein Wert angegeben werden, der für das gesamte Spektrum gilt. Dieser Wert wird durch eine Parametervariation und anschließenden Vergleich mit den Messergebnissen ermittelt. Was einen nicht unerheblichen Aufwand an Simulationen bedeutet. Die Tatsache, dass das zur Verfügung stehende Simulationsprogramm mit dem *View Factor Scaling* Strahlungsmodell (vfs) arbeitet, beschränkt hier die Ergebnisgenauigkeit nicht wesentlich, da die Strahlung an der Wendeloberfläche auch in der Realität gleichmäßig in alle Raumrichtungen abgestrahlt wird. Eine gerichtete Reflektion findet im Leuchtmittel nicht statt.

Im Inneren der Wendel ist eine Randbedingung definiert, mit der eine Wärmestromdichte, die in das System einfließt, vorgegeben wird. Diese ergibt sich als Quotient aus der elektrischen Nennleistung des Leuchtmittels P_{el} und der Fläche A_{RI} auf der die Randbedingung aufgeprägt wird. Es ergibt sich also

$$\dot{q} = \frac{P_{el}}{A_{RI}}. \quad (4.15)$$

Bild 4.14 zeigt die simulierte Wendeltemperatur; die Temperatur in der Mitte der Wendel ist höher als in den Randbereichen. Dieses ist auch in Bild 4.12 zu erkennen, für das eine Wendel in Betrieb fotografiert wurde. Die Randbereiche weisen eine dunklere Farbe auf, die rötlicher erscheint, was ein Hinweis darauf ist, dass hier eine geringere Temperatur vorherrscht. Das Gleiche ist auch aus Bild 4.8 abzuleiten, in dem zu sehen ist, dass bei niedrigeren Wendeltemperaturen eine Verschiebung des Leistungsspektrums in den Infrarotbereich erfolgt. Qualitativ passen die simulierten Temperaturverteilungen gut mit den realen Verteilungen überein. Ein Vergleich der quantitativen Temperaturverteilung ist nicht möglich, da hier die notwendigen Messungen fehlen. Diese können nicht einfach mit dem zur Verfügung stehenden Thermografiesystem durchgeführt werden; es gibt jedoch eine andere Methode mit welcher der fehlende quantitative Vergleich durchgeführt werden kann. Dazu wird die maximal auftretende simulierte Temperatur mit derjenigen, die der Hersteller in den Datenblättern [36] als Farbtemperatur der Wendel angibt, verglichen; auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

So gilt nach [36] zwischen der Farbtemperatur und der Wendeltemperatur der Zusammenhang

$$T_W = 1,12625 \cdot T_F^{0,9825}, \quad (4.16)$$

dieser Zusammenhang gilt für H1-, H3- und H7-Leuchtmittel. Für die hier betrachtete H7-Lampe ergibt sich für eine angegebene Farbtemperatur von $T_F = 3263$ K ($U_P = 13,2$ V / $P_P = 55$ W) eine errechnete Wendeltemperatur von $T_W = 3190$ K. Die maximale simulierte Temperatur an der Wendel liegt bei $T_{W_s} = 2976$ K. Damit ergibt sich eine Abweichung von 214 K, oder relativ ausgedrückt 7 %. Ein Teil dieser Abweichung ist darauf zurückzuführen, dass die numerische Simulation nicht vollständig konvergierte, so dass die Leistungsbilanz nicht korrekt war. Eine Verlängerung der Simulationszeit hätte unverhältnismäßig viel Zeit in Anspruch genommen, da sich es sich bei der Minimierung der Abweichung um einen asymptotischen Vorgang handelt. Da es sich hier um ein großes Modell handelt, hat bereits das Erreichen dieses Wertes eine lange Zeitspanne in Anspruch genommen.

Bild 4.15 zeigt das Simulationsergebnis der Temperaturverteilung auf dem Glaskolben im Vergleich zu den Ergebnissen einer Thermografie. Das gesamte Simulationsmodell bestand aus der detaillierten Geometrie des Leuchtmittels mit Wendel und einem luftgefüllten Raum, der das Leuchtmittel umgibt. Im Umgebungsraum kann die Luft frei strömen, so dass sich eine Konvektionsströmung an der Außenseite des Glaskolbens ausbilden kann. Zusätzlich wurde hier auch die Wärmeabfuhr durch Strahlung nachgebildet. Die Wärmeübergangskoeffizienten am Glaskolben werden somit von der Simulation intern berechnet. Die Thermografie wurde auf die Messung der maximalen Glaskolbentemperatur eingestellt (siehe Kapitel 6). Die Temperatur, die an der Lackkappe herrscht, kann aus Bild 4.15 nicht abgelesen werden. Wie zu erkennen ist, stimmen die simulierten 377 °C und gemessenen 380 °C am Glaskolben gut überein. Auch der Vergleich der Temperaturen an anderen Orten des Glaskolbens zeigt eine gute Übereinstimmung.

Tabelle 4.10: Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturen am Glaskolben (H7, 55W)

Position am Glaskolben	Simulierte Temperatur °C	Gemessene Temperatur °C
Über Wendel	377	380
Seitlich vor Quetschung	225	220
Seitlich Wendel	335	320

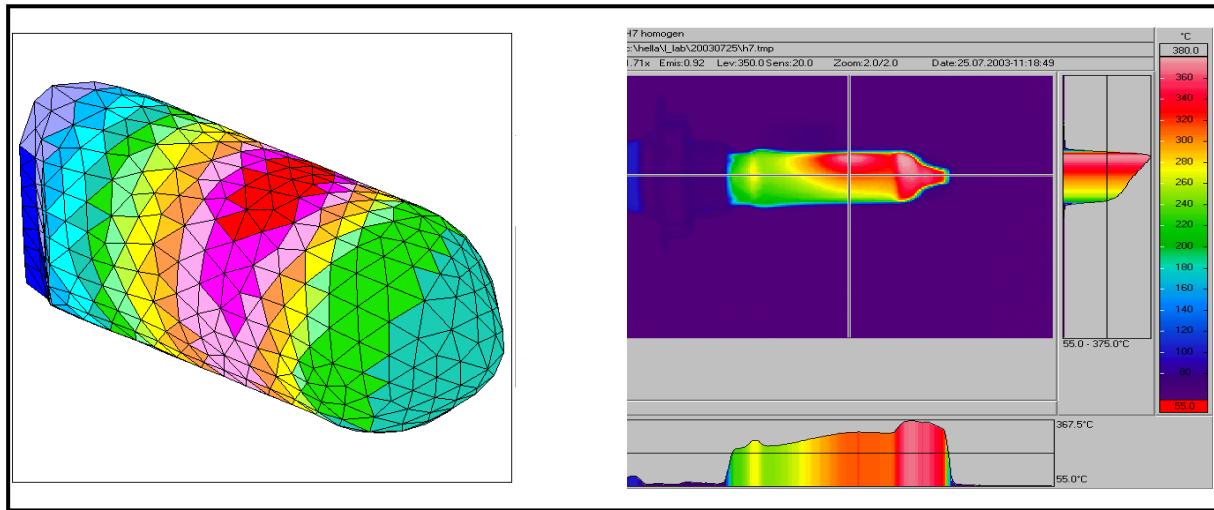


Bild 4.15: Simulierte und thermografierte Temperaturverteilung am Glaskolben

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Simulation mit dem detaillierten Leuchtmittelmodell und dem Parameter für den Wärmestrom die Realität gut widerspiegelt und daher für die weitere Arbeit herangezogen werden kann. Allerdings ist die Anzahl der benötigten Finite-Volumen-Zellen für die Simulation eines lichttechnischen Gerätes zu groß. Im folgenden wird eine Modellierungsmethode erarbeitet, die weniger Zellen benötigt, aber dennoch ähnliche thermische Eigenschaften aufweist.

Zur Vereinfachung des Leuchtmittelmodells ist es notwendig, den Wärmestrom durch den Glaskolben zu identifizieren und in seine Bestandteile bezüglich Strahlung und Konvektion aufzuteilen, damit diese in ein zellenminimiertes Modell übernommen werden können. Die Auswertung der Simulationsergebnisse des detaillierten Modells, die diese Aufteilung der Wärmeströme als Ergebnis ausgeben können, ergibt die in der folgenden Tabelle angegebenen Werte.

Tabelle 4.11: Anteil der Wärmeströme am Glaskolben am Gesamtwärmestrom

Wärmestrom	Anteil %
$\dot{Q}_{Strahlung}$	90,91
$\dot{Q}_{Konvektion}$	9,09

Von dem konvektiven Wärmestrom, der den Glaskolben verlässt, beruhen 0,4 W auf der Wärmeübertragung durch die Konvektion des Füllgases, und 4,6 W werden durch Wärmestrahlung von der Wendel an den Glaskolben übertragen und hier absorbiert.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse soll diese Verteilung hier noch mit Hilfe der physikalischen Gleichungen bestimmt werden.

Bild 4.9 zeigt die von der Lampe ausgesandte Strahlungsenergie in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Messbar ist hier aus technischen Gründen nur der Bereich bis 1600 nm. Der Graph lässt sich allerdings mit Hilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes (4.13) beliebig erweitern. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei dem Leuchtmittel um einen realen und nicht um einen schwarzen Strahler handelt. Der wellenlängenabhängige Emissionskoeffizient für die Wolframwendel muss hier also in die Betrachtung einfließen. Bild 4.10 gibt den wellenlängenabhängigen Transmissionsgrad des Quarzglases an. Wie zu sehen ist, ist die Transmission in dem Wellenlängenbereich von 3000 - 5000 nm stark verringert. Hieraus lässt sich nun die Grenzwellenlänge ableiten bis zu der der Glaskolben als transmittierend angenommen werden kann und ab welcher die emittierte Strahlung im Glaskolben in Wärme umgewandelt wird. Damit ergibt sich das Verhältnis aus transmittierter und im Glaskolben absorbiert Leistung. Das Verhältnis der Flächen unter dem vorderen Teil der Kurve und unter dem hinteren Teil bestimmt die Aufteilung in die Wärmestrahlungsstromdichte und dem konvektiven Anteil der Wärmestromdichte am Glaskolben. Es ergibt sich

die Wärmestrahlungsstromdichte zu

$$\dot{q}_S = \int_0^{3000} E(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda \quad (4.17)$$

und der Anteil der Konvektion zu

$$\dot{q}_K = \int_{3000}^{\infty} E(\lambda) (1 - \tau(\lambda)) d\lambda. \quad (4.18)$$

Dabei ist $\tau(\lambda)$ der Transmissionsgrad als Funktion der Wellenlänge.

Hierbei wird allerdings die Wärme vernachlässigt, die durch Konvektion von der Wendel zum Glaskolben transportiert wird. Als erste Näherung reicht diese Berechnung jedoch aus und ist besonders geeignet, schnell das thermische Modell neuer Leuchtmittel zu finden.

Die Vereinfachung des Glühlampenmodells besteht nun das Modell auf die Modellierung des Glaskolbens zu beschränken. Dadurch wird die aufwendige Nachbildung der Wendel umgangen und es kommt zu einer erheblichen Verkleinerung der Modellgröße und damit zur Einsparung von Rechenzeit.

Das Modell besteht dann nur noch aus dem Glaskolben, auf dessen Innenseite die, die Konvektion bedingende, Wärmestromdichte vorgegeben wird, und einer Randbedingung für die Wärmestrahlung, welche die Quelle der benötigten Strahlungswärmestromdichte darstellt. Außerhalb der Strahlungsrandbedingung wirken auf das restliche Simulationsmodell somit die gleichen Belastungen wie bei dem bis zur Wendel modellierten Leuchtmittel. Die folgende Skizze erläutert die Vereinfachung. Im linken Bild ist die wendelgenaue Modellierung zu sehen, während das rechte Bild das vereinfachte Modell darstellt.

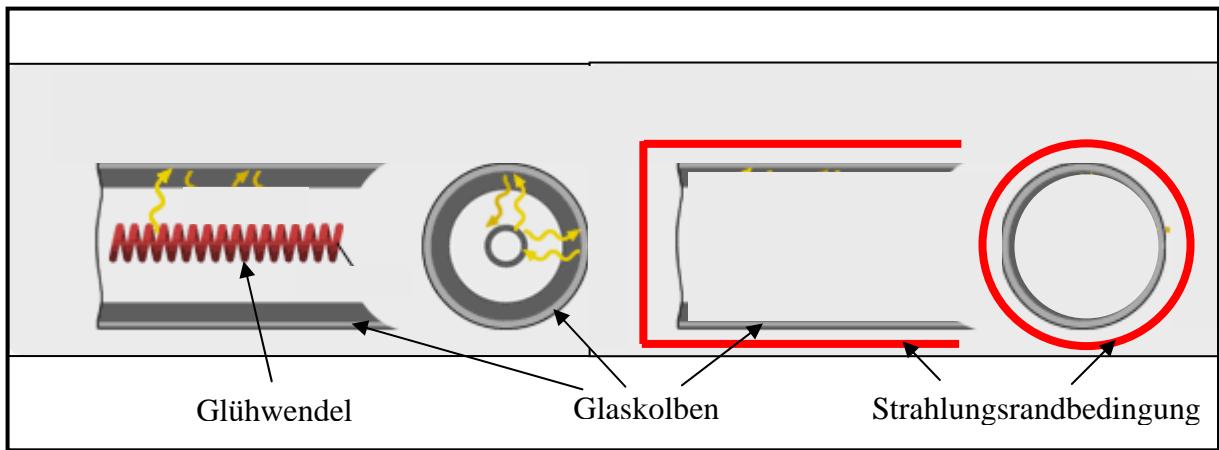


Bild 4.16: Prinzip des vereinfachten Glühlampenmodells

Aufgrund einiger Besonderheiten, die das hier verwendete Simulationstool aufweist, sieht das Modell in einem Schnitt durch die finiten Volumina im Bereich des Glaskolbens wie folgt aus: An die innere Berandung, auf welcher der konvektive Wärmestrom vorgegeben wird, schließen sich mindestens zwei Zellschichten an, die den Glaskolben abbilden. Darauf aufbauend sind zwei Schichten mit Elementen zu modellieren, die Luft mit konvektiven Eigenschaften, jedoch ohne Strahlungseigenschaften darstellen. Diese zwei Schichten werden nach aussen durch die Strahlungs-Randbedingung begrenzt. An dieser wird der Wärmestrom, der durch Strahlung verursacht wird, in das Modell eingebracht. Damit ist die äußere Grenze des Leuchtmittelmodells erreicht, und es schließen sich die Zellen des Scheinwerfervolumens an, die Luft mit konvektiven und Strahlungseigenschaften abbilden; Bild 4.17 zeigt den Aufbau des vereinfachten Leuchtmittels.

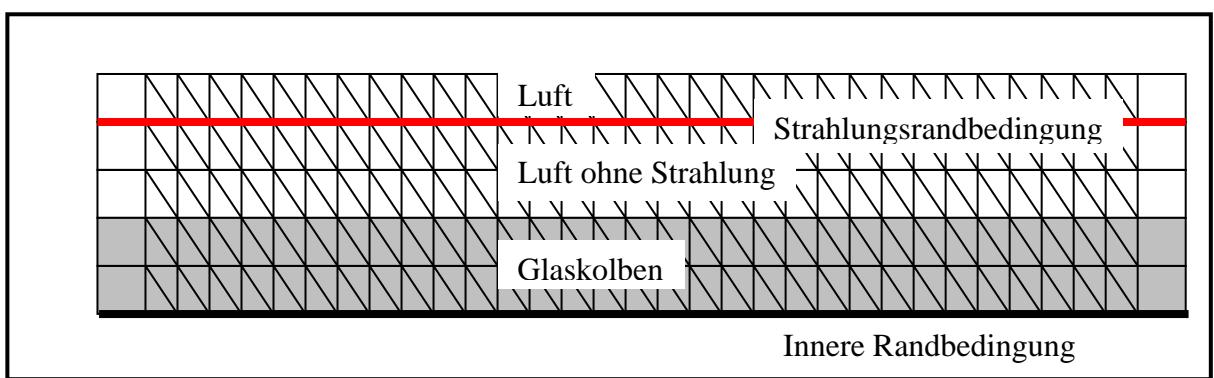


Bild 4.17: Modell des vereinfachten Leuchtmittels

Das folgende Bild zeigt das Ergebnis der Temperaturverteilung am Glaskolben für das vereinfachte Modell.

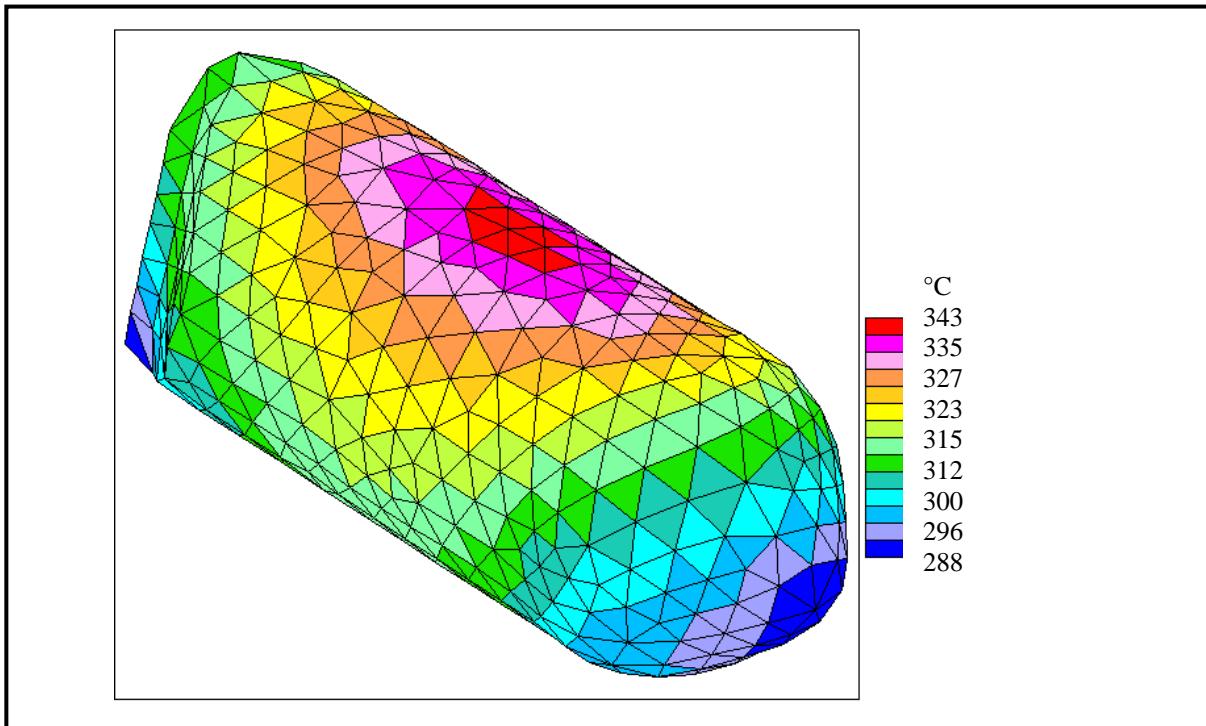


Bild 4.18: Simulierte Temperaturverteilung des vereinfachten Leuchtmittelmodells

Beim Vergleich mit Bild 4.15 ist ein Unterschied in der Verteilung und der Höhe der Temperatur auf der Oberfläche zu erkennen. Beides hat jedoch keine messbaren Auswirkungen auf die Temperaturverteilungen in einem Scheinwerfer, so lange diese Messungen in Bereichen durchgeführt werden, die nicht in unmittelbarer Nähe des Leuchtmittels liegen. Die Wärmeströme werden von diesem vereinfachten Modell korrekt wiedergegeben, nur die Verteilung dieser Ströme am Glaskolben ist unterschiedlich.

Hiermit liegt ein einfaches Glühlampenmodell vor, welches den gestellten Forderungen an die korrekte Wiedergabe der Wärmeströme am Glaskolben entspricht. Es ist weiterhin relativ einfach aufzubauen. Ein Nachteil ist jedoch, dass die exakte Modellierung für jedes Leuchtmittel einmal durchgeführt werden muss, um die Wärmeströme korrekt auswerten zu können.

5 Simulation der gerichtet reflektierten Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung ergibt sich im Scheinwerfer durch eine Überlagerung aus diffus und gerichtet reflektierter Strahlung. Dabei entsteht die diffuse Strahlung aufgrund der Temperatur der Oberflächen; ihre Energie berechnet sich gemäß dem Gesetz von Stefan und Boltzmann (3.13). Da in lichttechnischen Systemen, in denen fast ausschließlich gut reflektierende Oberflächen und annähernd punktförmige Strahlungsquellen zum Einsatz kommen, der Strahlungsenergiestrom an den Oberflächen gemäß den Gesetzen der geometrischen Optik reflektiert wird, muss ein Simulationsprogramm auch dieses Phänomen berücksichtigen.

Die gerichtete Reflektion der Strahlung ist entscheidend für den Transport der Energie im Bereich der Reflektoren und der Abschluss Scheibe. In anderen Regionen ist der Transport durch diffuse Strahlung entscheidend. Ein Programm, das nur diffuse oder nur gerichtete Strahlung berechnen kann, ist also nicht ausreichend.

Das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte CFD-Programm *STAR-CD* kann zunächst nur die diffus reflektierte Wärmestrahlung berechnen kann. Hier ist also eine Erweiterung um den gerichteten Anteil notwendig. Der in dieser Arbeit betrachtete Ansatz führt über die sogenannten *Computer Aided Lighting* (CAL)-Programme, die zur Simulation von Beleuchtungsstärkeverteilungen und zur Berechnung von lichttechnischen Oberflächen in der Industrie eingesetzt werden. Diese Software bildet die Gesetze der geometrischen Optik nach. Durch eine Kopplung der CAL- und CFD-Programme ist eine Berechnung des Einflusses des gerichtet reflektierten Wärmestromes möglich. Dieses wird im folgenden Kapitel erläutert.

5.1. Lichttechnische Simulationswerkzeuge

Die *Computer Aided Lighting*-Programme unterstützen den Entwickler lichttechnischer Geräte bei der optimalen Auslegung der Produkte. Ihre Leistung reicht von der Berechnung einer Beleuchtungsstärkeverteilung, ausgehend von gegebenen optischen Oberflächen, auf einer beliebigen Fläche (Messwand, Kunststoffabschluss Scheibe) bis hin zur eigenständigen Generierung und Optimierung von Reflektorflächen unter Vorgabe einer optimalen Lichtverteilung oder eines vorgegebenen Bauraums.

Die CAL-Programme basieren auf dem sogenannten *Ray Tracing Verfahren*. Bei dieser Methode wird gemäß den Gesetzen der geometrischen Optik der Verlauf eines Lichtstrahles in dem betrachteten System berechnet. Der Strahl wird in einem Modell des Leuchtmittels erzeugt, welches die Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle enthält. Gemäß dieser Charakteristik verlässt eine bestimmte Anzahl an Strahlen die Quelle in einen festen Raumwinkel. Trifft ein Strahl nach der Aussendung auf ein Medium, wird er je nach der vorher festgelegten Randbedingung an diesem absorbiert, reflektiert oder transmittiert. Diese

drei Effekte können einzeln oder gekoppelt auftreten; sie müssen der Gleichung (3.15) genügen.

Die Auswertung der Simulation geschieht mit Hilfe sogenannter Detektorflächen; das sind kleine Flächen gleicher Größe, auf denen jeder auftreffende Strahl gezählt wird. Dadurch ergibt sich eine Häufigkeitsverteilung auftreffender Strahlen auf der Detektorfläche, die dann mit Hilfe der physikalischen Eigenschaften des Leuchtmittels beispielsweise in eine Beleuchtungsstärkeverteilung umgerechnet werden kann.

Die Programme bieten weiterhin die Möglichkeit, die energetischen Eigenschaften der Medien zu berücksichtigen, wie zum Beispiel die Absorption, Reflektion und Transmission; diese können auch in Abhängigkeit von der Wellenlänge definiert werden. Es ergibt sich also nicht nur die Möglichkeit der Simulation im sichtbaren, sondern auch im infraroten Bereich, der hier von besonderen Interesse ist.

5.2 Zusammenhang zwischen Lichtstrom und Wärmestrom

Das CAL-Programm liefert eine Häufigkeitsverteilung der auf eine beliebige Oberfläche auftreffenden Strahlen unter Berücksichtigung der Energieverluste, die durch Interaktion der Strahlen mit den Oberflächen des Systems entstehen. Unter Einbeziehung der technischen Randbedingungen des Leuchtmittels, wie zum Beispiel dem ausgesandten Lichtstrom, lässt sich auf den Detektorflächen eine Beleuchtungsstärkeverteilung bestimmen.

Werden statt der Eigenschaften des Leuchtmittels im sichtbaren Wellenlängenbereich die Bedingungen für die hier interessierende Infrarotstrahlung eingesetzt, so ergibt sich auf der Detektorfläche eine Wärmeenergieverteilung. Diese entspricht der Energie, die durch die am Reflektor gerichtet reflektierte Wärmestrahlung die betrachtete Oberfläche erwärmt. Typischerweise ist dies die Oberfläche der Abschluss Scheibe, es können aber auch andere Flächen betrachtet werden.

Die wärmetechnischen Parameter, die für diese Simulation notwendig sind, müssen in einem langwierigen Verfahren für jedes Leuchtmittel neu bestimmt werden. Herstellerangaben dieser Parameter sind nur teilweise verfügbar [36]. Gleichermaßen gilt für die lichttechnischen Oberflächeneigenschaften. Da die optischen Oberflächen vom Herstellungsprozess abhängig sind, liegen auch hier keine verbindlichen Parameter vor. Daher werden diese Parameter mit Hilfe von anderen Simulationsverfahren (CAL, FEM) ermittelt und anschließend in die CFD-Simulation übernommen. In Kapitel 4.2 wurde erläutert, wie sich die Wärmestrahlungsleistung eines Leuchtmittels bestimmen lässt. Wird diese Erkenntnis nun mit dem Wissen um die Reflektionseigenschaften der Reflektorflächen erweitert, so lässt sich die Größe des Wärmestromes, der auf die Abschluss Scheibe trifft, bestimmen (CAL). Mit Hilfe eines FEM-Programmes lässt sich aus diesem Wärmestrom die Temperaturverteilung auf der Abschluss Scheibe berechnen, die dann mit Temperaturmessungen verglichen werden kann.

Anschließend können die theoretisch bestimmten Parameter an die Realität angepasst werden. Somit stehen diese Parameter für nachfolgende Simulationen anderer Geräte zur Verfügung.

Als mathematischer Zusammenhang zwischen dem auf eine Fläche, z.B. die Abschluss scheibe, auftreffenden Lichtstrom und dem Wärmestrom ergibt sich

$$\dot{Q}_{RS} = \frac{\Phi_k}{\Phi_0} \cdot \dot{Q}_{IR} \quad (5.1)$$

mit dem auftreffenden Wärmestrom der gerichtet reflektierten Strahlung \dot{Q}_{RS} , dem vom Leuchtmittel ausgesandten Lichtstrom Φ_0 , dem an der bestrahlten Fläche auftreffenden und absorbierten Lichtstrom Φ_k und der Strahlungsleistung des Leuchtmittels im IR-Bereich \dot{Q}_{IR} .

$$b = \frac{\Phi_k}{\Phi_0} \quad (5.2)$$

Der Quotient stellt ein Maß für die Verluste der Wärmestrahlung im System dar. Die durch Strahlung aufgebrachte Wärmeenergie ist direkt proportional zu der aus der Häufigkeitsverteilung bestimmten Beleuchtungsstärkeverteilung. Die Genauigkeit des Ergebnisses hängt zum Einen von der Anzahl der im Ray-Tracing berücksichtigten Strahlen (da es sich um eine statistische Verteilung handelt) und zum anderen von der Genauigkeit des Korrekturfaktors b ab. Die Häufigkeitsverteilung wird umso genauer, je mehr Ereignisse, in diesem Fall also Strahlen, berücksichtigt werden.

Die Strahlungsleistung \dot{Q}_{IR} im infraroten Bereich lässt sich bei Kenntnis der Farbtemperatur des Leuchtmittels durch Integration der wellenlängenabhängigen Leistungsverteilung bestimmen (Kapitel 4.2). Dieses gilt auch für den von dem Leuchtmittel ausgesandten Lichtstrom Φ_0 , der von den Leuchtmittelherstellern gemessen und in Datenblättern angegeben wird.

Der absorbierte Lichtstrom Φ_k ist dagegen eine Größe, die sich nur mittels eines iterativen Verfahrens aus Temperaturmessung und Simulation bestimmen lässt, da sie von zahlreichen, unter anderem fertigungsabhängigen Materialparametern abhängt.

Die beschriebene Vorgehensweise lässt sich auf einfache Weise automatisieren, so dass in einem programmierten Skript nur der Proportionalitätsfaktor eingegeben werden muss. Es ergibt sich eine Textdatei, in der in tabellarischer Form ein ortsabhängiger Wärmestrom angegeben ist.

5.3 Einbringen des Wärmestromes in das CFD-Programm

In Kapitel 5.2 ist beschrieben, wie sich der Wärmestrom, der über eine gerichtete Strahlung in die Scheibe eingebracht wird, bestimmen lässt. Dazu wurde bisher nur ein CAL-Programm und eine Umrechnungsvorschrift benötigt. Um die Temperaturverteilung im gesamten System simulieren zu können, muss dieser Wärmestrom in das CFD-Programm eingekoppelt werden, indem er als zusätzliche Energiequelle in der Abschluss scheibe vorgegeben wird.

Dieses wird über eine Erhöhung der inneren Energie in den finiten Volumen, die die Abschluss scheibe beschreiben, erzielt. Mit dieser Methode ist es möglich, die Energie der Wärmestrahlung und die Energie der Konvektion zu addieren. Die Temperatur an der KAS wird so aus der auf die Scheibe fallenden Gesamtenergie (Strahlung und Konvektion) berechnet.

Das folgende Bild stellt dieses für ein Volumenelement der Abschluss scheibe dar.

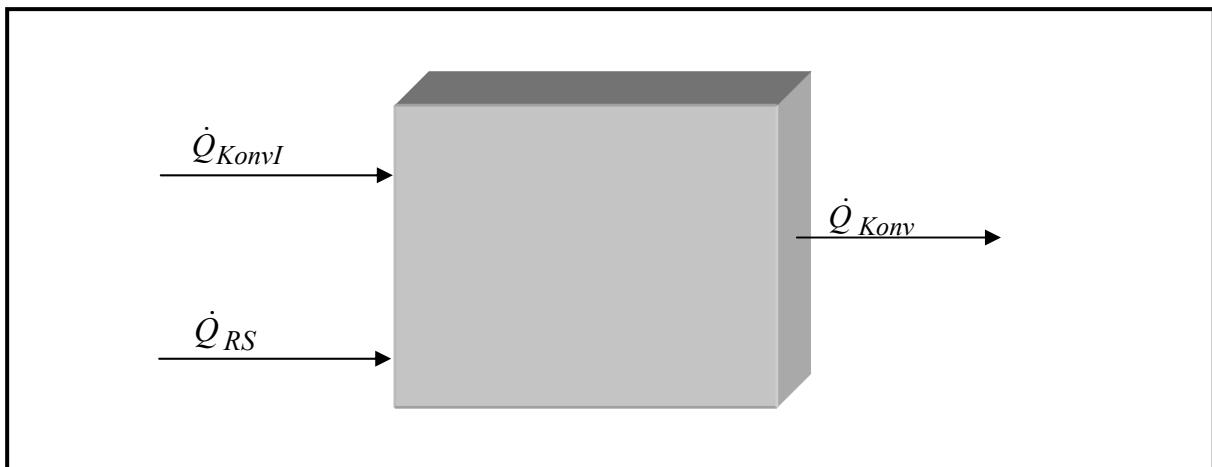


Bild 5.1: Wärmestrome durch ein Volumenelement der Abschluss scheibe

Für die zeitliche Änderung der inneren Energie ΔU_{FV} des Volumenelementes gilt der Zusammenhang

$$\frac{\Delta U_{FV}}{dt} = \dot{Q}_{RS} + \dot{Q}_{KonvI} - \dot{Q}_{Konv}, \quad (5.3)$$

mit dem Wärmestrom der Wärmestrahlung \dot{Q}_{RS} , dem konvektiven Wärmestrom \dot{Q}_{KonvI} , der an der Innenseite angreift und dem konvektiven Wärmestrom \dot{Q}_{Konv} .

Die Temperaturänderung ΔT im Schwerpunkt eines Volumenelementes ergibt sich aus der Definition der inneren Energie zu

$$\Delta T = \frac{\Delta U_{FV}}{c_p \cdot m} \quad (5.4)$$

mit der spezifische Wärmekapazität c_p und der Masse m .

Die Temperatur des Volumenelementes ist abhängig von der eingetragenen Wärmeenergie der Strahlung und Konvektion

$$T = f(Q_{RS}, Q_{Konv}). \quad (5.5)$$

Der Wärmetransport durch Leitung kann hier aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeiten der Materialien und der kleinen Kontaktflächen zwischen Gehäuse und Abschluss Scheibe vernachlässigt werden.

5.3.1 Methode der Enthalpieerhöhung

Die spezifischen Absorptionseigenschaften von Polycarbonat, dem für Kunststoffabschluss Scheiben am häufigsten eingesetzten Material, wandeln die einfallende Strahlung über die gesamte Materialstärke in Wärme um. Ein Modell, das alle Strahlung bereits auf der Innenfläche der Scheibe in Wärme umwandelt, ist daher nicht ausreichend, um eine genaue Temperatur an dieser Stelle zu berechnen.

Das Lambert-Beersche Absorptionsgesetz [11] besagt, dass die Intensität einfallender Strahlung exponentiell mit der Materialdicke abnimmt. Das Gesetz lautet

$$I = I_0 e^{-\varepsilon x} \quad (5.6)$$

mit der Intensität I am Ort x , der Intensität I_0 der einfallenden Strahlung, dem Absorptionskoeffizienten ε und der Materialdicke x .

Den Intensitätsverlust bewirkt die Umwandlung der Strahlungsenergie in Wärme. Dieses wird in der Simulation wie folgt berücksichtigt:

Die verwendeten Simulationsmodelle weisen zwei Zellschichten über die Dicke der KAS auf. Jeder Zellschicht kann ein Wert für die einfallende Strahlungsenergie zugewiesen werden. Die Subroutine wandelt die einfallende Strahlungsenergie gemäß dem Lambert-Beerschen Absorptionsgesetz um. Zu der Enthalpie der näher an dem Leuchtmittel gelegenen Zellschicht wird 70 % der an dieser Stelle absorbierten Strahlung der einfallenden Strahlungsenergie

addiert, und auf die äußere Schicht 30% der Energie. Diese Werte ergeben sich bei Anwendung von Gl. 5.6 unter Berücksichtigung der Stoffwerte für klares Polycarbonat.

Bild 5.2 zeigt ein Diagramm der spektralen Verteilung der wellenlängenabhängigen Transmissionseigenschaften von Polycarbonat und der abgestrahlten Energie einer Halogenlampe. Es ist zu erkennen, dass das Leuchtmittel das Maximum der ausgesandten Energie bei der gleichen Wellenlänge besitzt, bei der das Polycarbonat beginnt, die Strahlung zu absorbieren.

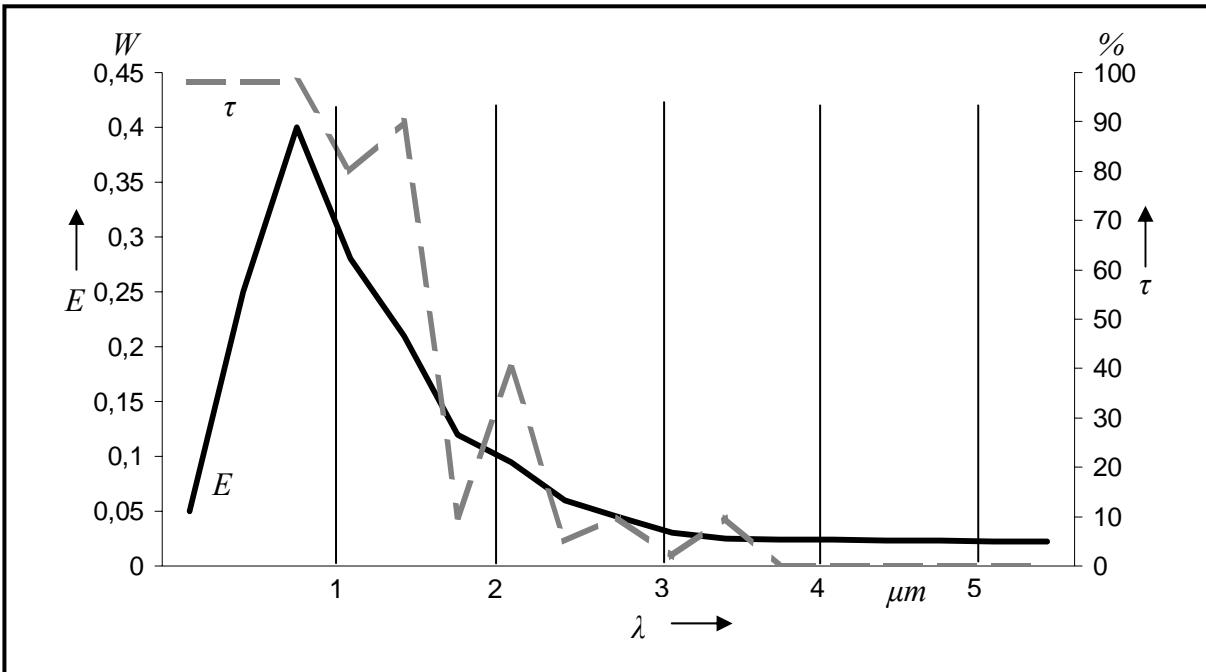


Bild 5.2: Spektrale Verteilung der vom Leuchtmittel ausgesandten Energie E (durchgehend) und des Transmissionsgrades τ von Polycarbonat (gestrichelt) [37].

Betrachtung der Energiebilanz

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, werden die Wärmeströme in den jeweiligen Zellen addiert. Allerdings tritt dabei ein Fehler auf, der korrigiert werden muss.

Durch die oben beschriebene Methode wird die Gesamtenergiemenge im System erhöht, da Teile der durch Strahlung transportierten Energie, die durch die getrennte Berechnung der diffusen und gerichteten Strahlungsanteile entstehen, doppelt gezählt werden. Dadurch treten im Vergleich zur Realität zu hohe Temperaturen auf. Dieses liegt an der im Simulationsprogramm intern berechneten diffusen Wärmestrahlung. Diese transportiert die gesamte vom Leuchtmittel ausgesandte Strahlungsenergie (Kapitel 4.2). Für die Berechnung der Temperatur an den direkt vom Leuchtmittel bestrahlten Bauteilen ist das korrekt. Nur in den Bereichen, die hauptsächlich von dem Strahlungswärmetransport über die Reflektoren erwärmt werden, tritt das Phänomen auf und führt zu den beschriebenen Abweichungen. Ohne Korrektur wird zu der Energie aus der diffusen Strahlung die Energie addiert, die durch

gerichtet reflektierte Strahlung auf die KAS fällt. Dieser Fehler kann durch eine *Radiation Boundary*, wie sie bereits im vereinfachten Leuchtmittelmodell zur Anwendung kommt korrigiert werden.

Die Bilanz der Energieströme zwischen den verschiedenen Elementen im Kfz-Scheinwerfer ist in Bild 5.3 dargestellt.

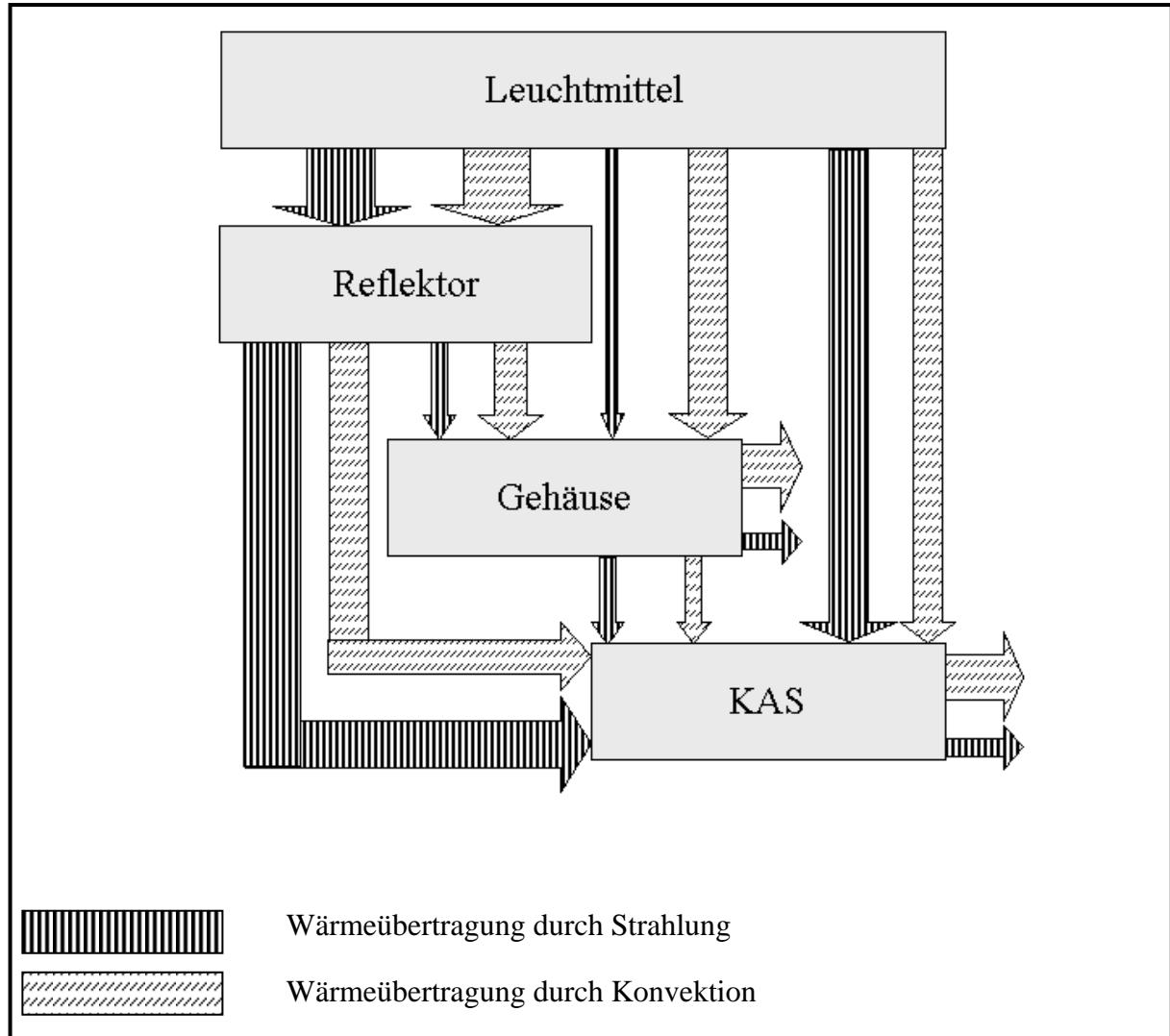


Bild 5.3: Energieströme im Scheinwerfer

Von Interesse ist hier nur der Wärmeaustausch durch Konvektion und Strahlung, da nur an diesem korrigierende Eingriffe im CFD-Programm vorgenommen werden müssen.

Diese Eingriffe werden bei Betrachtung des Bildes 5.4 deutlich. Hier ist dargestellt, wie das Einbringen (CAL) der Energie in die Abschluss scheibe die Energieströme im System beeinflusst. Ein zusätzlicher Strahlungstransport vom Leuchtmittel zur Scheibe muss also unterbunden werden, während die restlichen Transportmechanismen davon unbeeinflusst bleiben.

Die Umsetzung dieser Methode in einem CFD-Modell ist in Bild 5.5 dargestellt. Darin ist der Energieeintrag in die Abschluss scheibe zu erkennen, der durch gerichtet reflektierte Strahlung hervorgerufen wird. Zusätzlich ist die Radiation Boundary, welche die Scheibe strahlungs technisch von dem restlichen System entkoppelt, im Bild zu sehen.

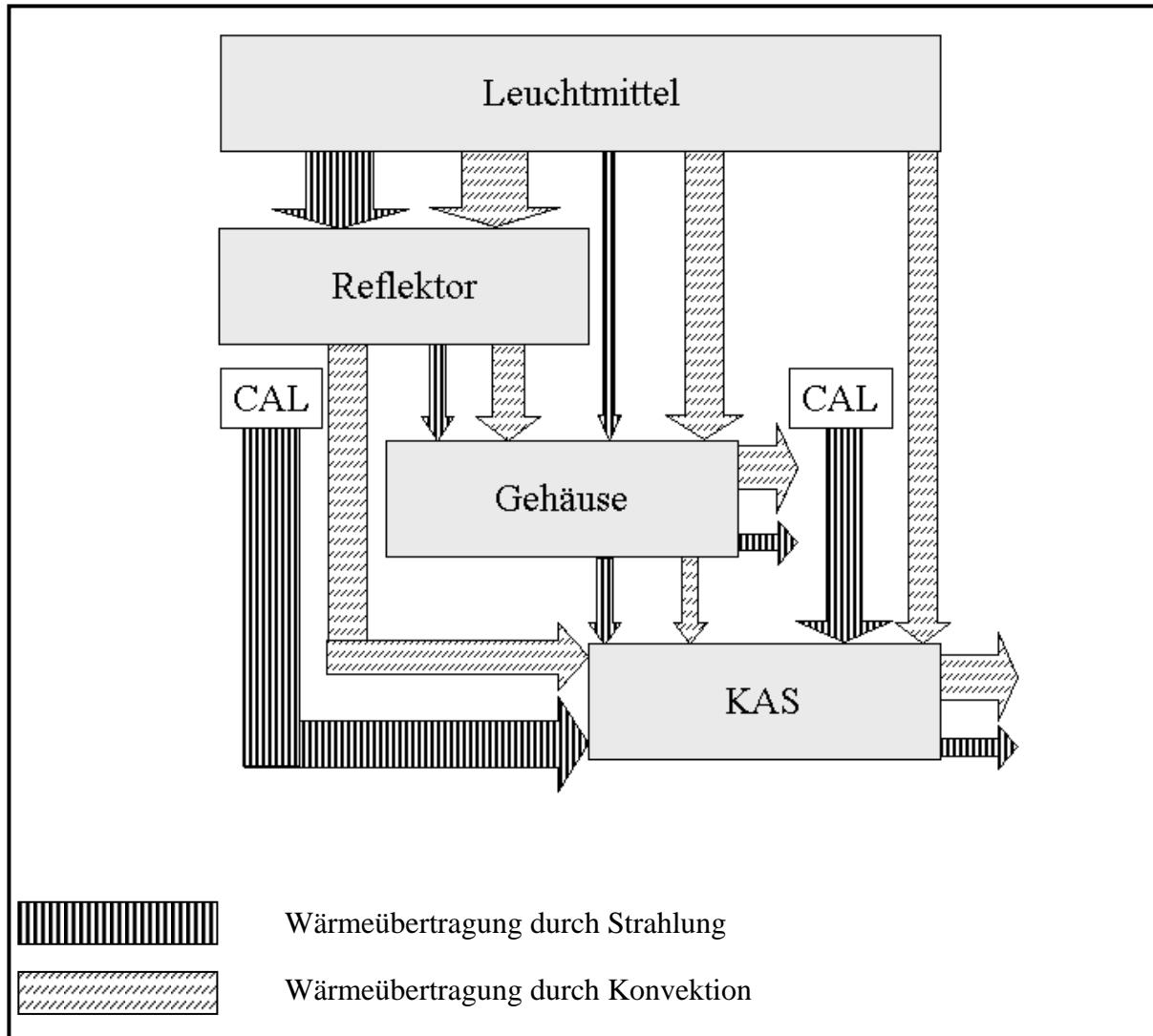


Bild 5.4: Korrigierte Energieströme im Scheinwerfer

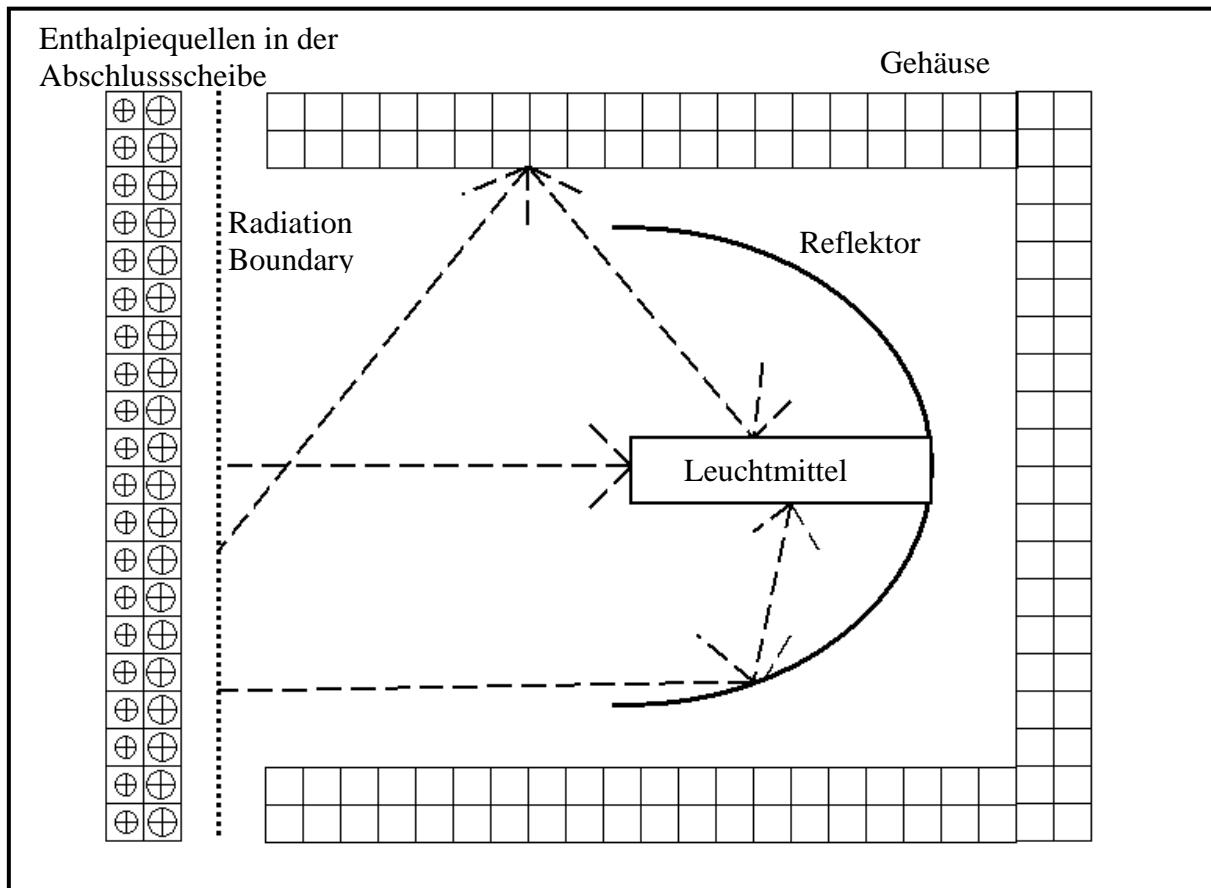


Bild 5.5: Schema des CFD-Modells

5.3.2 Anpassung der unterschiedlichen Modelle

Die Verteilung der Strahlung auf der Abschluss scheibe ist wesentlich von der Geometrie der Reflektoren abhängig und damit von System zu System unterschiedlich. Diese Verteilung kann mit Hilfe der bereits erwähnten CAL-Programme anhand der Geometriedaten der Reflektoren und der Abschluss scheibe simuliert werden.

Die Verknüpfung der CAL-Ergebnisse und des CFD-Modells erfordert eine ortsgenaue Abbildung der Ergebnisse der lichttechnischen Simulation auf das Finite-Volumen-Netz der CFD-Simulation, ein sogenanntes „Mapping“. Das Problem hierbei liegt in den unterschiedlichen Netzen und Koordinatensystemen, die in den beiden Simulationsmethoden zur Anwendung kommen. Die Mathematik liefert für diese Problemstellung unterschiedliche Lösungen, die besonders im Bereich der Bildverarbeitung Anwendung finden [34]. Für das hier behandelte Problem wurde das Mappingverfahren angepasst. Die Vorgehensweise wird im folgenden beschrieben.

Das CAL-Programm arbeitet mit einem eigenen lichttechnischen Koordinatensystem, dessen Ursprung jeweils im Mittelpunkt der Leuchtmittelwendel liegt, während sich das CFD-Modell auf ein fahrzeugfestes Koordinatensystem, gem. DIN 70000 [41], mit dem Ursprung in der

Mitte der Vorderachse bezieht. Dieser Transformation liegen die folgenden Regeln für die einzelnen Koordinaten zu Grunde:

$$\begin{aligned} x_{FZ} &= -(z_{LT} + z_{LT, \text{Offset}}) \\ y_{FZ} &= -(x_{LT} + x_{LT, \text{Offset}}) \\ z_{FZ} &= +(y_{LT} + y_{LT, \text{Offset}}) \end{aligned} \quad (5.7)$$

wobei der Index *FZ* für das fahrzeugtechnische und *LT* für das lichttechnische Koordinatensystem steht. Der *Offset* wird aus den CAD-Daten ermittelt.

Auch die der Simulation zu Grunde liegenden Simulationsgitter unterscheiden sich. Während bei der lichttechnischen Simulation ein rechteckiges, zweidimensionales Netz Anwendung findet, baut das CFD-Modell auf einem dreidimensionalen Tetraedergitter auf. An den Schnittstellen der beiden Netze müssen die für ein rechteckiges Netz gewonnenen Simulationsergebnisse auf ein dreieckiges Netz umgerechnet werden. Voraussetzung für einen möglichst kleinen Fehler bei diesem Vorgehen ist eine in etwa identische Größe der einzelnen Netzelemente, da sonst starke Gradienten in den Ergebnissen der zu übertragenden Simulation geglättet werden und damit wichtige Informationen verloren gehen. Bemerkbar macht sich dieses in den unterschiedlichen Gesamtenergien, die sich zwischen den beiden Modellen ergeben. Die Energie im ersten System ist bei den hier betrachteten Modellen typischerweise höher, da bei der lichttechnischen Simulation mit einer feineren Netzstruktur gearbeitet wird.

Der hier implementierte Mappingalgorithmus betrachtet die Schwerpunkte der Randflächen auf der Innenseite der Abschluss Scheibe des CFD-Modells. Für diese Punkte werden die jeweiligen Nachbarn aus den Flächenschwerpunkten der CAL-Ergebnisse ermittelt, die näher am Schwerpunkt der betrachteten CFD-Fläche sind als an dem der benachbarten Fläche. Denn nur diese tragen zum Energieeintrag in eben diese Fläche bei. Zusätzlich wird der Abstand zwischen den beiden Schwerpunkten bestimmt, der für eine Abstandsgewichtung benötigt wird. Dieses Verfahren erhöht die Genauigkeit der Berechnung, da die CAL-Flächen, deren Überschneidung mit der CFD-Fläche am größten ist, auch den größten Anteil am Wärmestromeintrag in diese Fläche haben. Das Bild 5.6 zeigt das Schema des Mappings. Dabei stellen die Punkte die Schwerpunkte der CAL-Detektorflächen und die Rechtecke die Schwerpunkte des CFD-Gitters dar.

Mathematisch ergibt sich diese Gewichtung wie folgt.

Zunächst werden jeder CFD-Randfläche, die sich an der Innenseite der Abschluss Scheibe befindet, Detektorflächen des CAL-Programmes zugewiesen. Dabei ist der Abstand der Mittelpunkte der unterschiedlichen Flächen zueinander entscheidend, da die Detektorfläche mit dem geringsten Abstand zur CFD-Randfläche den größten Energieeintrag liefert.

Die Abstände der Schwerpunkte der CAL- und der CFD-Flächen werden im Folgenden mit d_i bezeichnet. Aus diesen Abständen wird mittels

$$d = \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i} \right]^{-1} \quad (5.8)$$

eine Gesamtgröße (Abstandskehrwert) d bestimmt. Über diese lässt sich dann unter Kenntnis der Wärmestromdichten \dot{q}_i der N Detektorflächen die gemittelte Wärmestromdichte der CFD-Randbedingung zu

$$\dot{q}_{Boundary} = \sum_{i=1}^N \frac{d}{d_i} \dot{q}_i \quad (5.9)$$

bestimmen.

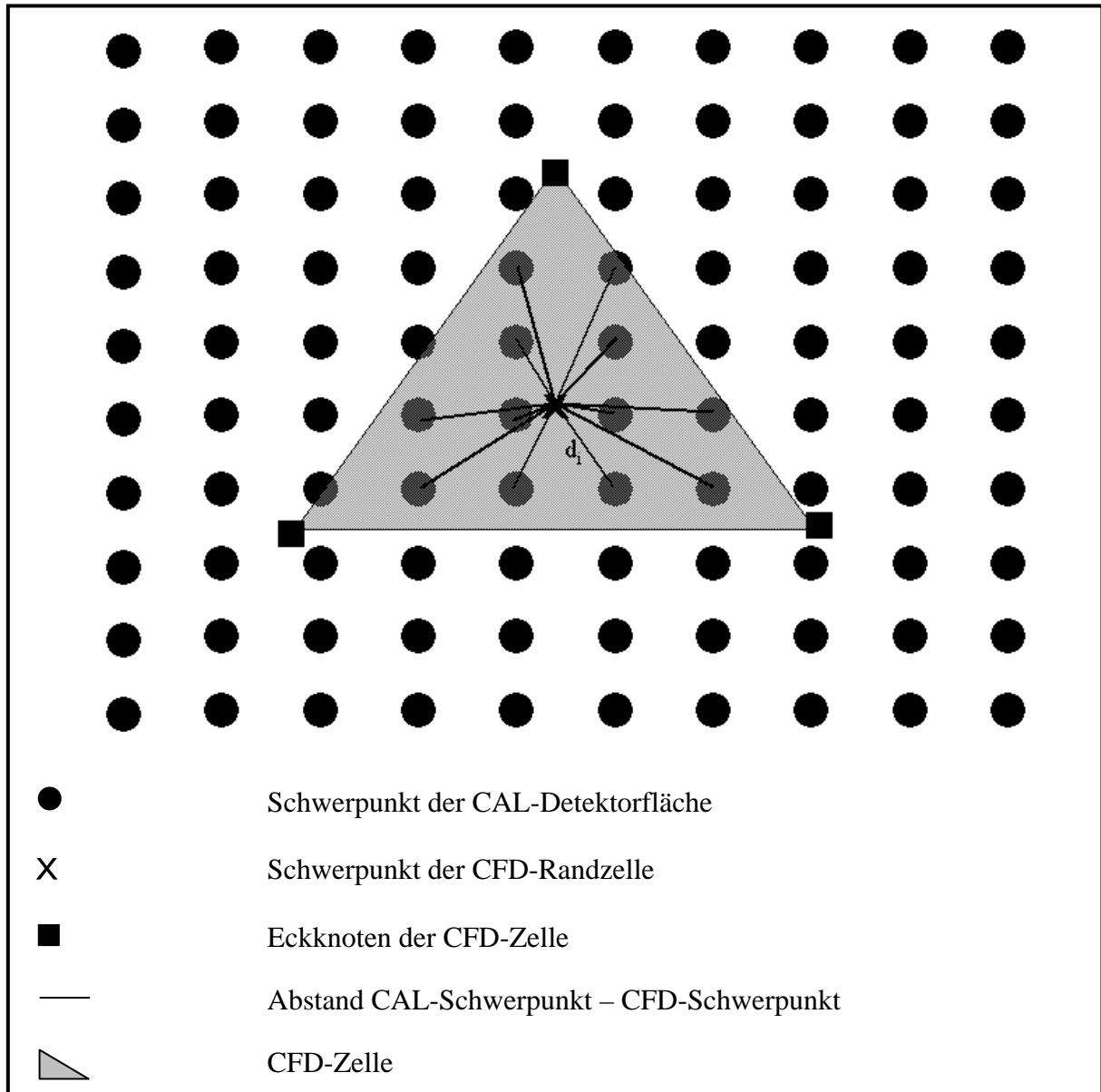


Bild 5.6: Schema des Mappings

5.4 Praktische Umsetzung

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte, die zur Einbindung der gerichtet reflektierten Strahlung in das CFD-Programm notwendig sind, werden in diesem Abschnitt zusammengefasst und erläutert. Hierzu dient wiederum der bekannte Musterscheinwerfer (siehe Kapitel 4).

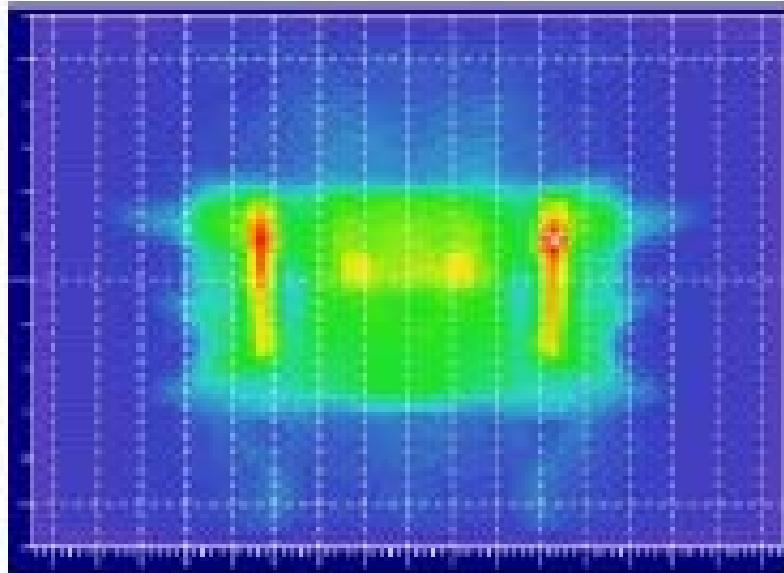


Bild 5.7: Durch *Ray Tracing* (CAL) erzeugte Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Abschluss scheibe

Das Bild 5.7 zeigt die mit Hilfe des CAL-Programms simulierte Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Abschluss scheibe des Musterscheinwerfers. Zu erkennen sind die Bereiche, in denen das meiste Licht aus dem System austritt. Diese Stellen sind mit einer roten Farbe unterlegt. Die uneinheitliche Verteilung ist in der Geometrie des Reflektors begründet, der für eine bestimmte Lichtverteilung optimiert wurde. Die blauen Farben markieren Bereiche, in denen nur geringe oder keine Strahlung austritt. Aufgrund der feinen Diskretisierung der im CAL-Programm verwendeten Elemente sind die Gradienten in der Beleuchtungsstärke scharf ausgebildet.

Das Bild 5.8 zeigt die Wärmeströme, die nach dem Umsetzen der Beleuchtungsstärke in das Abschluss scheibenmodell des CFD-Programms eingebracht werden. Dabei wird das beschriebene Mappingverfahren angewandt, um die unterschiedlichen Gitter zu verknüpfen. Aufgrund der größeren Struktur im CFD-Modell werden die starken Gradienten aus der CAL-Simulation etwas verzerrt. Die Verteilung der Beleuchtungsstärke ist in der Verteilung der Wärmeströme aber noch gut wiederzufinden.

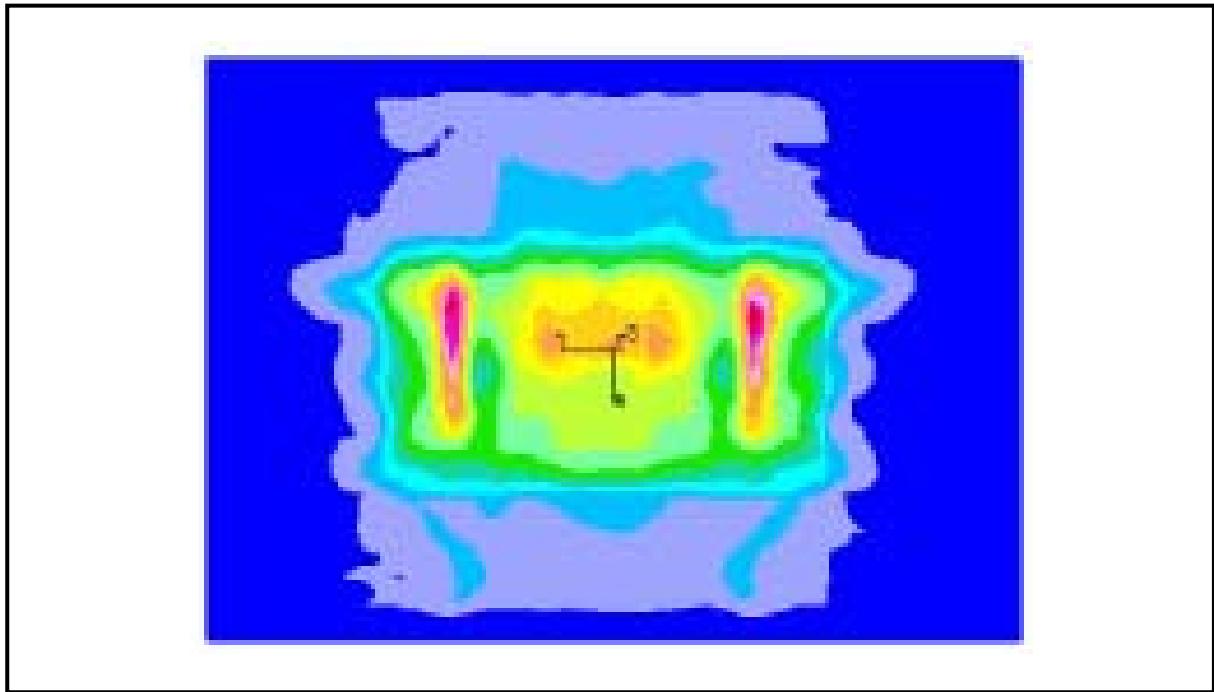


Bild 5.8: Durch Enthalpiequellen mit *Ray Tracing* erzeugte Wärmestromverteilung auf der Abschluss scheibe

Die dargestellten Wärmeströme werden nun mit Hilfe der beschriebenen Methode der Enthalpieerhöhung in das CFD-Modell eingebracht. Die vom CFD-Programm intern simulierte diffuse Strahlung wird im Bereich der Abschluss scheibe unterdrückt, damit die Energiebilanz erfüllt wird.

Die sich daraus ergebenden simulierten Temperaturen sind in Bild 5.9 dargestellt. Hier ist eine Sicht von schräg oben gewählt, damit die durch Strahlung und Konvektion bestimmten, thermisch stark belasteten Bereiche zu erkennen sind.

An der Scheibe sind die Hot Spots in den Bereichen zu erkennen, in denen in Bild 5.7 auch die Maxima in der Beleuchtungsstärkeverteilung auftreten. Die Gradienten der Temperaturen sind gegenüber den Beleuchtungsstärkegradienten kleiner, da sich hier die Wärmeleitung in dem Kunststoffmaterial bemerkbar macht. Der Genauigkeitsgewinn der Temperatursimulation, den diese Methode bringt, ist bei einem Vergleich des Bildes 5.9 mit dem Bild 5.10 zu erkennen. Bild 5.10 zeigt eine unter gleichen Randbedingungen erstellte Temperatursimulation, die nur mit dem diffusen Strahlungsmodell arbeitet. Es ist zu erkennen, dass sich die Temperaturverteilungen auf der Abschluss scheibe stark unterscheiden bzw. keine Ähnlichkeiten aufweisen.

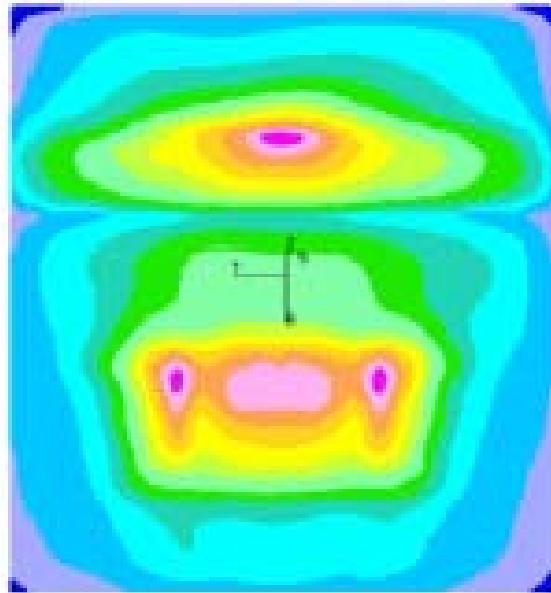


Bild 5.9: Temperatursimulation des Musterscheinwerfes mit *Ray Tracing*

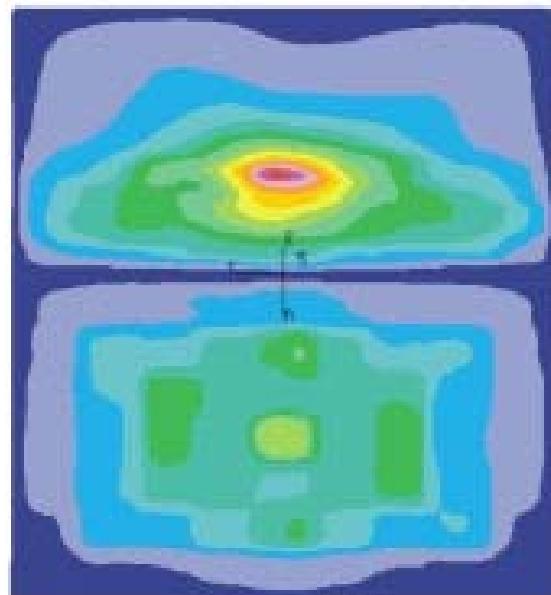


Bild 5.10: Temperatursimulation des Musterscheinwerfes mit diffusem Strahlungsmodell

Der Bereich, in dem die gerichtet reflektierte Strahlung keinen direkten Einfluss hat, weist qualitativ und quantitativ die gleiche Verteilung auf. Hier, im Hot Spot auf der Oberseite des Scheinwerfers, ist die konvektive Wärmeübertragung die vorherrschende Größe. Somit ist gezeigt, dass die Anwendung einer Strahlungswand, mit deren Hilfe das Modell strahlungstechnisch in zwei Bereiche getrennt wird, sinnvoll ist und in der Simulation zu richtigen Ergebnissen führt. Die diffuse Strahlungssimulation ist dagegen für eine auch nur annähernd korrekte Temperatursimulation unzureichend.

Die sich in der Realität einstellenden Temperaturen sind in Bild 5.11 dargestellt. Das Bild zeigt die Thermographie der Scheinwerferoberfläche aus dem gleichen Blickwinkel, der auch bei den vorangegangenen Bildern benutzt wurde. Die Simulation mit der gerichtet reflektierten Strahlung (Bild 5.9) zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung in der Temperaturverteilung. Besonders die Strahlungs Hot Spots auf der Scheibe und der konvektive Hot Spot auf der Scheinwerferoberseite stimmen gut überein. Einige Abweichungen sind jedoch auch zu erkennen. Diese entstehen hauptsächlich durch den Unterschied zwischen dem Aufbau des realen Scheinwerfers und dem des Simulationsmodells (Befestigungen, Lampenfassung). Diese Teile liegen jedoch nicht in einem für die Temperaturverteilung an der Abschlusscheibe entscheidenden Bereich.

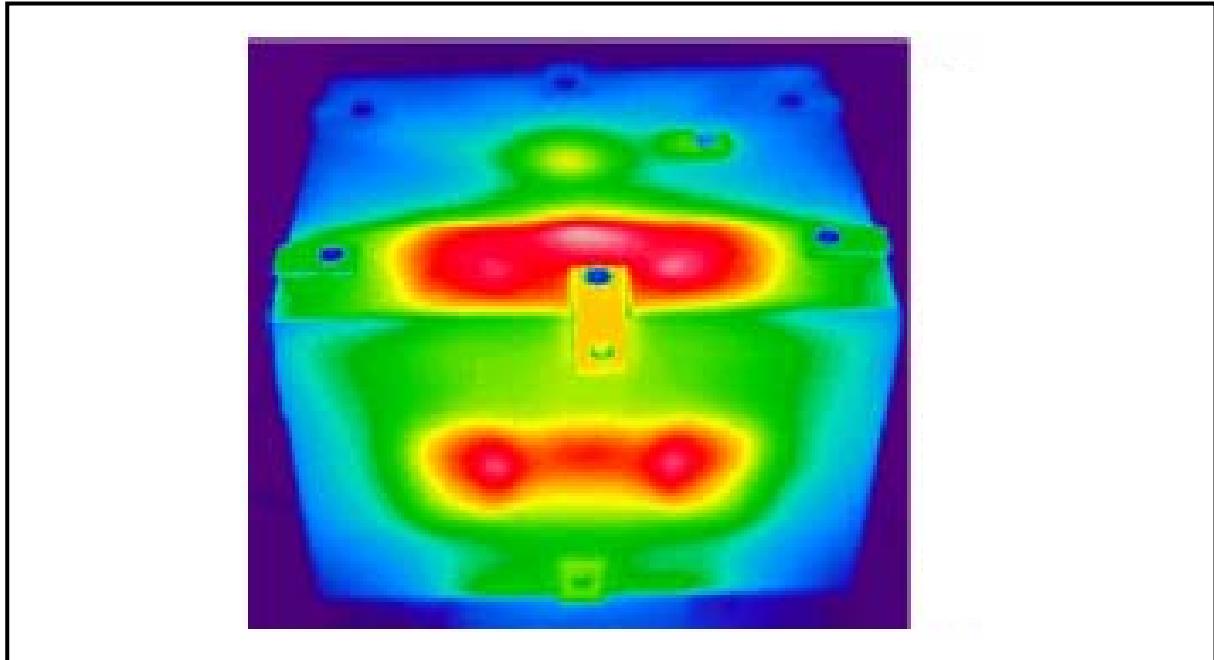


Bild 5.11: Thermographie des Musterscheinwerfers

Der Vergleich der qualitativen Temperaturverteilung zeigt, dass die Erweiterung des CFD-Programms um einen Programmteil für die Berücksichtigung der gerichtet reflektierten Strahlung notwendig ist, um an der Scheibe eine realitätsnahe Temperaturverteilung zu erreichen. Quantitative Vergleiche sind in Kapitel 6 zu finden.

5.5 Alternative Methoden zur Berechnung der gerichtet reflektierten Strahlung

Neben der hier erläuterten Methode zur Berücksichtigung der gerichtet reflektierten Strahlung durch Kopplung der CFD-Software mit einem CAL-Programm gibt es noch weitere Möglichkeiten, die Strahlung zu berücksichtigen. Andere CFD-Programme benutzen als Strahlungsmodell die sogenannte *Discrete Ordinate Methode* (DOM), wieder andere lassen die Kopplung zwischen CFD und einem eigenständigen *Ray Tracing*-Programm zur

Berechnung der Strahlung zu (z.B. *RadTherm*), welches dann mit dem gleichen Finite-Volumen-Modell wie die CFD-Simulation arbeitet. Eine weitere Möglichkeit, gerichtet reflektierte Strahlung mit einem CFD-Programm zu simulieren, ist die Nachbildung der Strahlengänge durch das sogenannte *Particle Tracking*.

Alle diese Methoden haben den Vorteil, dass sie die Strahlung mit dem gleichen Finite-Volumen-Modell simulieren wie es auch die CFD-Simulation benutzt. Dadurch entfällt das fehleranfällige *mappen* der Daten von einem Simulationsmodell in ein zweites. Aber gerade dieses ist auch der größte Nachteil dieser alternativen Methoden. Sie führen die Strahlungsberechnung anhand eines diskretisierten Finite-Volumen-Modells durch, so dass alle Oberflächen durch ebene Flächen approximiert werden. Je nach Krümmung der Fläche und dem Diskretisierungsgrad des Finite-Volumen-Gitters in diesem Bereich kommt es zu erheblichen Abweichungen zwischen der realen Oberfläche und der diskretisierten. Besonders im Bereich der nach optischen Gesichtspunkten ausgelegten Reflektoren kann diese Verzerrung zu einer starken Abweichung der reflektierten Strahlen führen, da sich sowohl der Einfall- als auch der Ausfallwinkel der Strahlen ändert. Dieses ist in Bild 5.12 grafisch dargestellt.

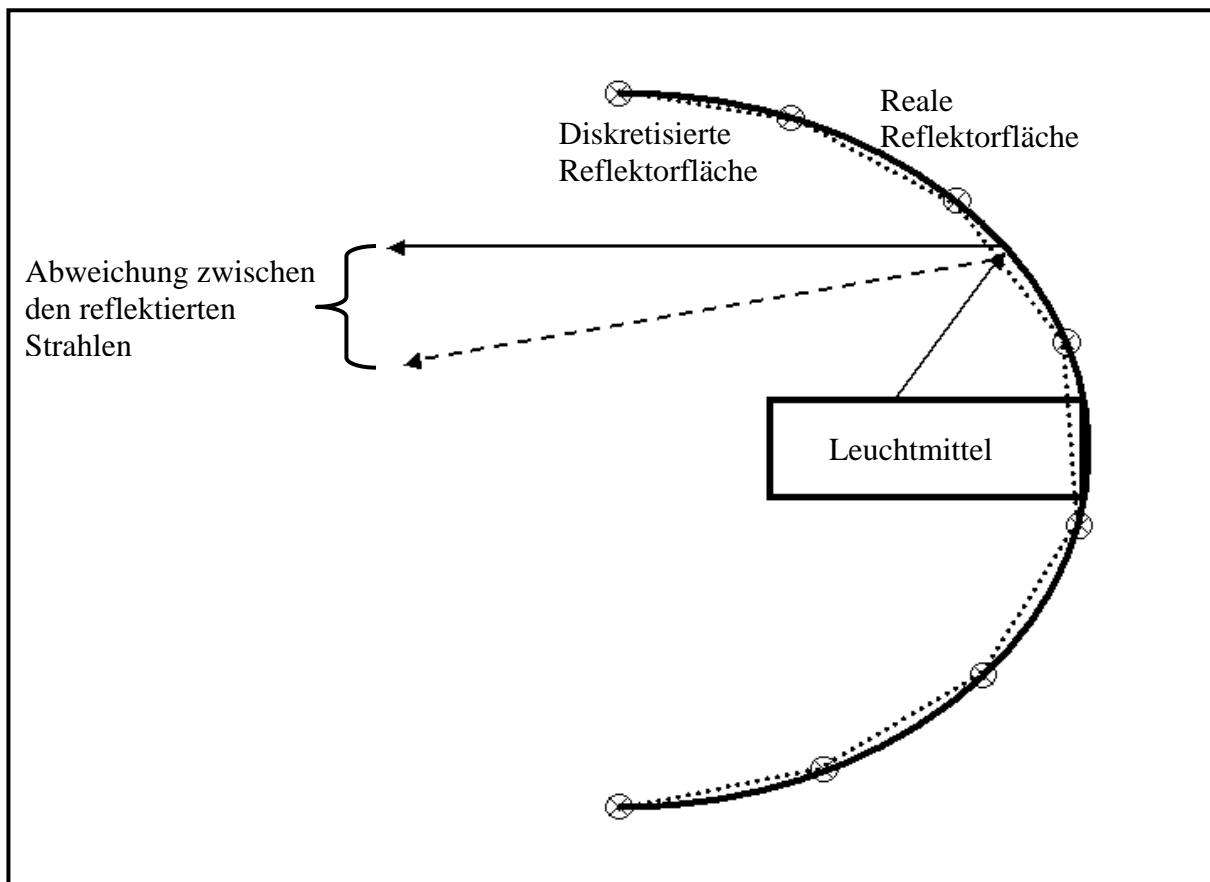


Bild 5.12: Abweichung des Strahlengangs bei Reflektion an realer und diskretisierter Reflektorfläche

Die Abweichung ist besonders auf der Abschluss Scheibe sichtbar, da diese direkt von der am Reflektor reflektierten Strahlung getroffen wird. Eine hinreichend genaue Bestimmung der

durch Strahlung auftretenden Hot Spots in diesem Bereich ist mit dieser Methode also nicht möglich, es sei denn, es wird ein sehr fein diskretisiertes Modell benutzt. Dieses hat jedoch erhebliche Auswirkungen auf die Rechenzeit.

Ein weiterer Nachteil dieser Methoden ist das Nichtvorhandensein von Leuchtmittel-datenbanken, wie es die CAL-Programme bieten, denn auch die Abstrahlcharakteristik ist entscheidend für die Strahlungsverteilung im Modell. Diese muss bei den hier erläuterten Methoden durch den Benutzer erst programmiert werden, was einen zusätzlichen Aufwand bedeutet.

Bild 5.13 zeigt die simulierte Strahlungsverteilung auf der Abschluss scheibe des Musterscheinwerfers, wie sie sich bei der Simulation mit dem CAL-Tool Helios und unter Benutzung der Particle-Tracking-Methode in *STAR-CD* ergibt. Beide Bilder zeigen eine ähnliche Strahlungscharakteristik; dieses macht sich besonders an der Lage der beiden Maxima (rot) in den Seitenbereichen bemerkbar. Das rechte Bild weist jedoch deutliche Verzerrungen auf, die durch das oben erläuterte Phänomen der Diskretisierung zustande kommen.

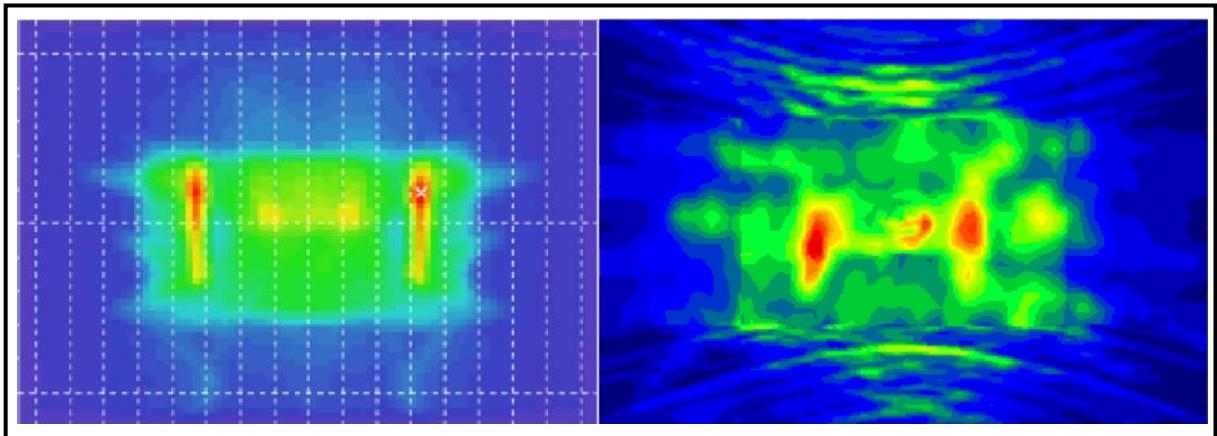


Bild 5.13: Strahlungsverteilung auf der Abschluss scheibe

Das linke Bild, bei dem die Strahlungsberechnung auf der CAD-Geometrie beruht, zeichnet sich dagegen durch scharfe Grenzen aus, wie sie auch in der Praxis auftreten.

Für eine realitätsnahe Temperatursimulation eines Systems, bei dem der Wärmetransport zu einem großen Teil durch die gerichtet reflektierte Strahlung stattfindet, sind die alternativen Methoden also wenig geeignet.

5.6 Parameter zur Strahlungssimulation

In den Bereichen des Scheinwerfers, die nicht direkt von der an den Reflektorflächen gerichtet reflektierten Strahlung getroffen werden, wird weiterhin mit dem vorhanden vfs-Modell für die Strahlung gearbeitet. Dies bedeutet, dass für die verschiedenen Bauteile die Parameter für Emission, Reflektion und Transmission angegeben werden müssen. Diese Parameter sind für die verwendeten Materialien sehr stark von der Wellenlänge abhängig. In

dem verwendeten CFD-Programm ist es allerdings nur möglich eine einzige feste Größe für diese Parameter einzustellen. Bild 5.2 zeigt zum Beispiel, wie stark der Transmissionskoeffizient von Polycarbonat von der Wellenlänge abhängt. Der Wert schwankt zwischen 90 % Durchlässigkeit im sichtbaren Bereich bis hin zu annähernd vollständiger Absorption im IR-Bereich. Dieses Verhalten muss bei der Eingabe der Parameter in die Simulation berücksichtigt werden. Bei Untersuchungen mit unterschiedlichen Einstellungen dieser Werte zeigt sich, dass für die Parameter mit der folgenden Vorgehensweise die besten Ergebnisse erzielt wurden.

Der Emissionsfaktor wird bei der Wellenlänge bestimmt, bei der die ausgestrahlte Energie des betrachteten Bauteils ihr Maximum besitzt. Die Energieverteilung wird gemäß dem Planckschen Strahlungsgesetz für die mittlere Temperatur des betrachteten Bereiches bestimmt.

Die Transmission und Reflektion wird für den Wellenlängenbereich angenommen, in der die auf das betrachtete Bauteil einfallende Energie ihr Maximum besitzt. Ausschlaggebend dafür ist also die Temperatur der Strahlungsquelle.

6 Validierung der Simulationsergebnisse

In den bisherigen Kapiteln wurde die notwendigen Erweiterungen der Software erläutert und die physikalische Richtigkeit gezeigt. In diesem Kapitel wird gezeigt, dass das Zusammenspiel der Methoden und des Simulationsprogramms funktioniert und zu realitätsnahen Ergebnissen führt.

6.1 Messtechnik

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der messtechnischen Erfassung der physikalischen Größen, die das Klima im Scheinwerfer maßgeblich bestimmen. Also die Temperaturen und die Strömungsgeschwindigkeiten.

Im folgenden wird ein Hauptaugenmerk auf die Besonderheiten gelegt, die bei der Bestimmung dieser Größen in lichttechnischen Geräten zu beachten sind.

6.1.1 Messgrößen

Die Temperatur wird in dieser Arbeit am häufigsten zur Validierungen der Simulationsergebnisse verwendet. Dies beruht darauf, dass sie mit den heutigen Messmethoden am einfachsten und am genauesten bestimmt werden kann. Zur Temperaturmessung werden Thermoelemente und ein Thermografiesystem eingesetzt.

Die Strömung im Scheinwerfer ist die zweite messbare Größe, die zum Vergleich zwischen der Realität und den Simulationsergebnissen herangezogen werden kann. Diese Messung ist allerdings um ein Vielfaches aufwendiger und schwieriger als die Temperaturmessung. Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten im Scheinwerfer müssen spezielle, berührungslos messende Verfahren eingesetzt werden. Dies ist mit den geringen Strömungsgeschwindigkeiten zu begründen, die sich im Scheinwerfer aufgrund der freien Konvektion einstellen. Eine Messung mit berührend messenden Sensoren führt zu einer starken Verfälschung der Messergebnisse, da diese Sensoren das Strömungsfeld allein durch ihre Anwesenheit im System stark beeinflussen.

6.1.2 Temperaturmessung

Messung mittels Thermoelementen

Die Temperaturmessung mittels Thermoelementen ist eine berührende Messmethode, mit der nur lokale Temperaturen gemessen werden können; im Gegensatz zur Thermografie können hiermit keine thermischen Verteilungen bestimmt werden.

Bei der Auswahl des geeigneten Temperaturmessmittels fiel die Wahl auf Thermoelemente des *Typs K Klasse 1*. Der Vorteil dieser Elemente liegt in der Geometrie. Aufgrund des

geringen Leiterquerschnitts von nur $0,75 \text{ mm}^2$ besitzen sie eine kleine Messspitze, deren Beeinflussung durch Strahlung gering ist. Dieser Geometrievorteil wirkt sich auch positiv auf die Energieabfuhr aus dem System heraus aus. Dieses kann bei der falschen Wahl der Elemente zu einer Messung zu niedriger Temperaturen führen.

Darüber hinaus spricht für die Verwendung von Thermoelementen der große Temperatur- bzw. Anwendungsbereich sowie die geringen Ansprechzeiten und die hohe Kompatibilität mit unterschiedlichster Datenerfassungs-Hardware. Aus einer Vielzahl möglicher Metallkombinationen wurden bestimmte ausgewählt (Tabelle 6.1) und festgeschrieben.

Tabelle 6.1: Merkmale unterschiedlicher Thermoelement-Typen [28]

Element (Typ)	Maximaltemperatur	Definiert bis
Fe-CuNi (J)	750 °C	1200 °C
Cu-CuNi (T)	350 °C	400 °C
NiCr-Ni (K)	1200 °C	1370 °C
NiCr-CuNi (E)	900 °C	1000 °C
NiCr-NiSi (N)	1200 °C	1300 °C
Pt10Rh-Pt (S)	1600 °C	1540 °C
Pt13Rh-Pt (R)	1600 °C	1760 °C
Pt30Rh-Pt6Rh(B)	1700 °C	1820 °C

Unter der Maximaltemperatur in Tabelle 6.1 ist der Wert zu verstehen, bis zu dem die Grenzabweichung festgelegt ist. Die Spalte „definiert bis“ bezieht sich auf die Temperatur, bis zu der die Thermospannungen definiert sind.

Obwohl *Typ K*-Thermoelemente im Temperaturbereich zwischen 250 °C und 600 °C eine geringere Stabilität als andere unedle Thermopaare aufweisen, werden sie wegen des breiten Anwendungsbereiches und des günstigen Preises häufig verwendet. Speziell im Bereich 300 °C bis 500 °C kann es allerdings zu Hysteresefehlern von mehreren Grad kommen. Das gewählte Thermopaar ist das in der industriellen Messtechnik gebräuchlichste und besteht aus Nickel-Chrom (positiver Schenkel) und Nickel-Aluminium (negativer Schenkel).

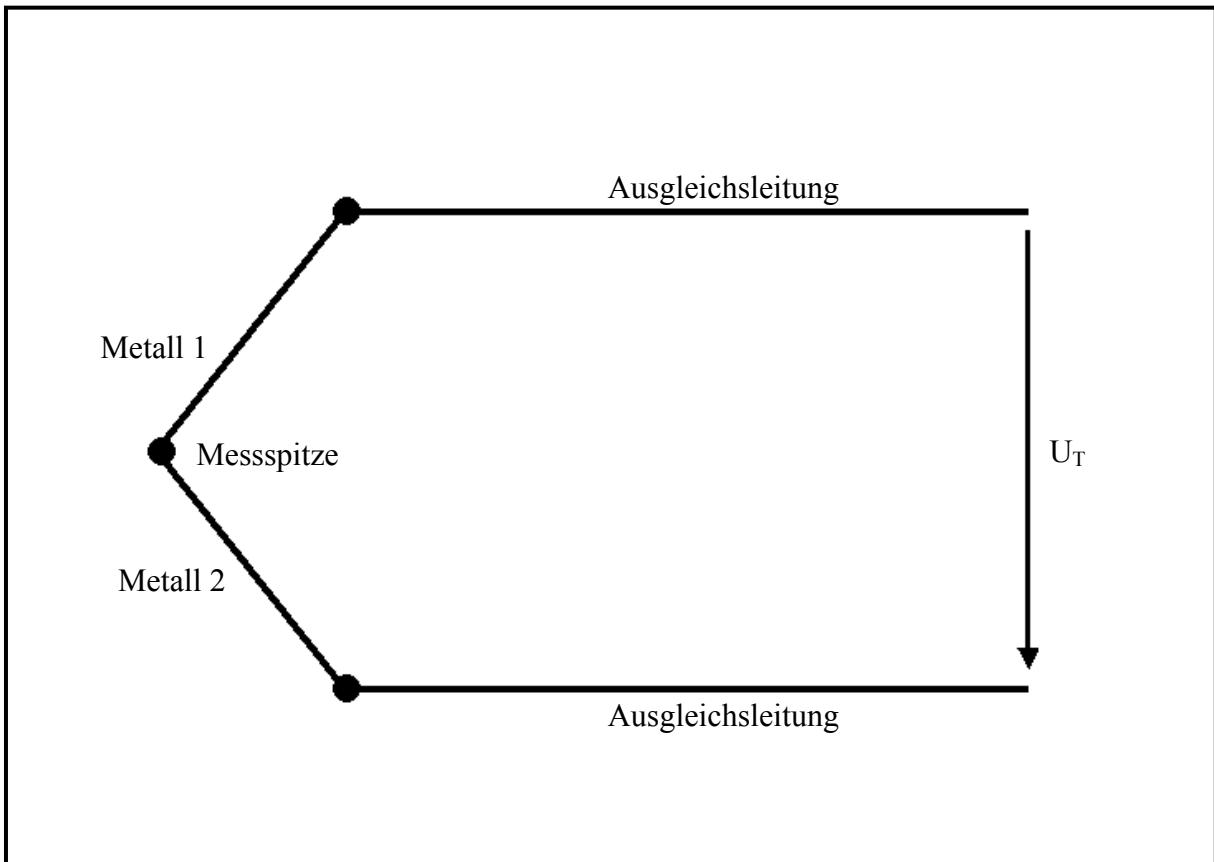


Bild 6.1: Aufbau eines Thermoelementes

Die abkürzende Bezeichnung ist NiCr-Ni-Thermoelement. Der Temperaturbereich liegt im Dauerbetrieb zwischen 0 °C und 1200 °C, im Kurzzeitbetrieb zwischen -180 °C und 1370 °C. Die Grenzabweichung im Bereich -40 °C und 375 °C liegt bei $\pm 1,5$ K.

Bei der Auswahl des Messortes und der Art der mechanischen Kopplung der Thermoelemente mit dem zu messenden System ist zu beachten, dass trotz ihrer geringen Baugröße auch die Thermoelemente die Wärmetransportmechanismen beeinflussen und damit die Messergebnisse verfälschen können. So ist zu beachten, dass die Elemente Wärme durch Leitung abführen können, was die Temperatur an der Messspitze verringert. Ein weiterer Effekt, der zu berücksichtigen ist, ist die unterschiedliche Absorption von Wärmestrahlung an der Messspitze und am zu messenden Material. Es ist daher nicht sinnvoll, die Temperatur der Luft in einem Bereich zu messen, in dem viel Wärme durch Strahlung transportiert wird. Die Messspitze absorbiert in diesem Fall sehr viel Strahlung und wandelt diese in einen Temperaturwert um, der die Messung der Lufttemperatur verfälscht darstellt. Dieses gilt auch für die Messung an strahlungsdurchlässigen Materialien, wie der Abschluss Scheibe. Aber nicht nur die Messspitze hat einen Einfluss auf die Messung, sondern auch die mechanische Kopplung, die das Element mit dem System verbindet, beeinflusst die Temperaturmessung, da sie typischerweise durch eine Klebung im Bereich der Messspitze hergestellt wird. Ein weiteres Problem zeigt die Temperaturmessung in freien Konvektionsströmungen, bei denen sich keine stabilen Strömungen ausbilden. Die

Temperatur an einem Messfühler, der in einem solchen Bereich angebracht ist, kann sehr stark schwanken. Zusammenfassend sind die folgenden Punkte bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen in lichttechnischen Geräten zu berücksichtigen, damit die auftretenden Messfehler gering bleiben:

- Thermoelemente führen Wärme durch Leitung ab.
- Thermoelemente sollten nicht in Bereichen angebracht werden, die direkt vom Leuchtmittel bestrahlt werden.
- Thermoelemente sollten nicht zur Messung von Lufttemperaturen in Bereichen mit schwachen Strömungen eingesetzt werden.

Thermografie

Bei der Thermografie handelt es sich um eine berührungslose Messmethode zur Bestimmung von Oberflächentemperaturen. Der Vorteil liegt darin, dass nicht in das Messobjekt eingegriffen wird.

Das Verfahren der Infrarotstrahlungs-Temperaturmessung beruht auf dem physikalischen Phänomen, dass Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes elektromagnetische Strahlung aussenden. Wird deren Intensität bestimmt, kann daraus die Temperatur des aussendenden Körpers berührungslos ermittelt werden. Es wird folglich nicht die Temperatur, sondern die Energie der vom Messobjekt ausgesandten Strahlung direkt gemessen. Wie in Kapitel 3 im Abschnitt Wärmestrahlung bereits beschrieben wurde, hängt die Temperatur mit der emittierten Strahlung gemäß Gleichung 3.16 zusammen.

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde das System „Thermo Tracer TH 100“ des Herstellers EBS verwendet. Der auflösbare Spektralbereich liegt zwischen $8 \mu\text{m}$ und $13 \mu\text{m}$. Dies bedeutet, dass bei den Materialien, die zum Bau von Kfz-Scheinwerfern typischerweise verwendet werden, nur die Temperaturen der äußeren Flächen bestimmt werden können, da der Absorptionsgrad der erwähnten Materialien in diesem Wellenlängenbereich bei ca. 100 % liegt. Ein Thermografieren z.B. durch die Abschluss Scheibe hindurch ist daher nicht möglich, aber auch nicht erforderlich, da die Messfehler durch die optischen Eigenschaften der inneren Bauteile zu groß sind. Der vom Messsystem erfassbare Temperaturbereich erstreckt sich von -50°C bis 2000°C . Wie beschrieben, ist die genaue Kenntnis des Emissionskoeffizienten ε die Grundvoraussetzung für eine genaue Messung. Neben der spektralen Abhängigkeit, wie sie in Kapitel 4 beschrieben ist, ist auch die Richtungsabhängigkeit des Koeffizienten zu berücksichtigen. Diese wird über die materialspezifische Kennlinie (Kapitel 4) und dem Einfluss des Abstrahlwinkels, nach Abbildung 6.2, bestimmt [1].

Bild 6.2 zeigt, dass der Emissionskoeffizient ε ab einem Betrachtungswinkel γ größer als 60° stark abfällt. Dieses hat Einfluss auf die Bestimmung der Temperaturverteilung an stark

gekrümmten Flächen, wie zum Beispiel am Glaskolben eines Leuchtmittels. In den Randbereichen werden so verfälschte Temperaturen abgelesen. Dieses ist beim Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Messung zu berücksichtigen; Bild 6.3 zeigt dieses Phänomen besonders in den Randbereichen des Leuchtmittels.

Die Bestimmung des einzustellenden Emissionskoeffizienten läuft nach den gleichen Regeln ab, wie sie bereits in Kapitel 4 erläutert wurden.

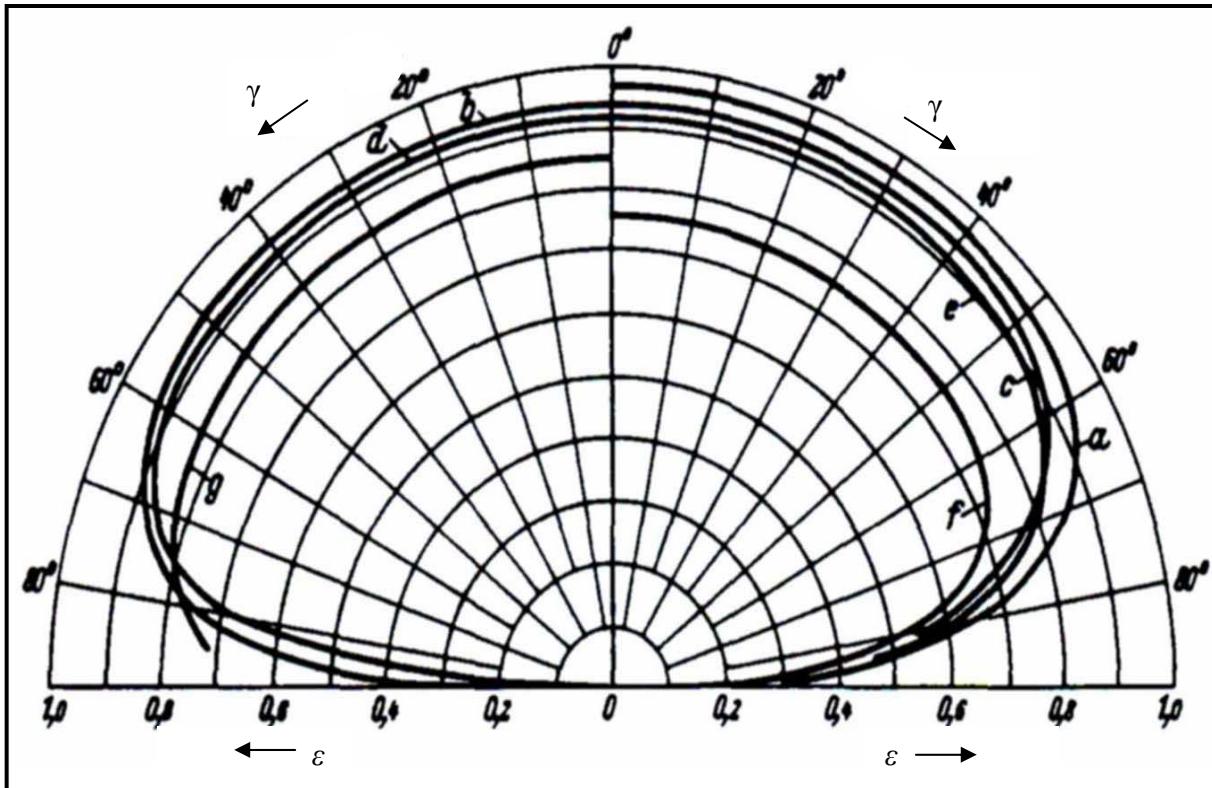


Bild 6.2: Winkelabhängigkeit des Emissionskoeffizienten

Die Kurven a bis g beschreiben den Verlauf des Emissionskoeffizienten bei unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften.

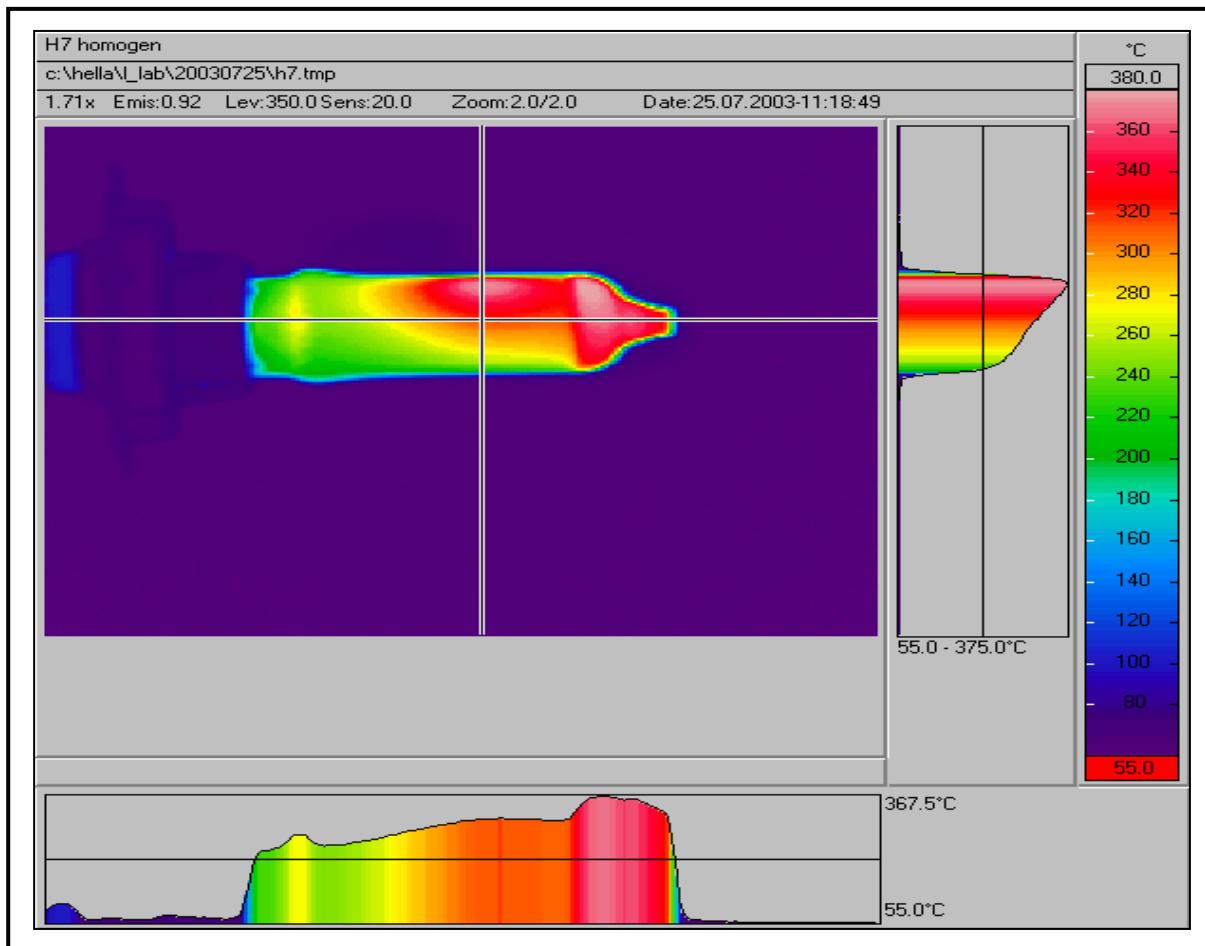


Bild 6.3: Thermografie eines H7-Leuchtmittels

6.1.3 Strömungsmessung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Strömungstechnik an der Universität Essen sogenannte *Particle Image Velocimetry* (PIV)-Messungen durchgeführt, die die Strömungsverhältnisse im Scheinwerfer zeigen. Bei der Durchführung dieser Messungen fiel auf, dass sich dieses optische Messverfahren nicht ohne weiteres auf die Messung von Strömungen in lichttechnischen Geräten anwenden lässt, da zum einen die geringen Strömungsgeschwindigkeiten zu Fehlern führen, und zum anderen die stark reflektierenden Reflektorflächen einen Einfluss auf die Genauigkeit der Messungen haben.

Wie die Grundlagen in Kapitel 3 bereits gezeigt haben, werden bei der CFD-Simulation die Gleichungen für Wärme- und Stofftransport gemeinsam gelöst. Daher würde die Bestimmung einer Zustandsgröße, zum Beispiel der Temperatur, ausreichen, da alle anderen Größen von dieser abhängig sind. Trotzdem wurde im Rahmen dieser Arbeit die Messung von Luftströmungen durchgeführt. Damit soll der Stand der Technik in diesem Bereich ermittelt werden, da auch eine Strömungssimulation getrennt von der Temperatursimulation möglich ist. Die Technik bietet zur Messung von Strömungen ähnlich viele Verfahren an wie zur Bestimmung von Temperaturen. Allerdings können nur wenige dieser Messmethoden sinnvoll zur Bestimmung der Strömungsverhältnisse im Scheinwerfer eingesetzt werden. Berührend

messende Strömungssonden, wie zum Beispiel ein Hitzdraht-Anemometer, beeinflussen die schwachen Konvektionsströmungen so stark, dass große Abweichungen zwischen der Realität und den Messwerten auftreten. Auch Messverfahren, welche die translatorische Luftbewegung in eine rotatorische Sensorbewegung umwandeln und so den Volumenstrom bzw. die Strömungsgeschwindigkeit bestimmen, sind aufgrund der Reibungsverluste nicht sinnvoll einzusetzen. So kommen hier nur berührungslos messende Verfahren in Frage, die das System während der Messung nicht beeinflussen. Hier sind besonders die *Laser-Doppler-Anemometrie* (LDA) und die *Particle Image Velocimetry* von Bedeutung. Beiden Verfahren liegt eine optische Methode zur Erkennung von Teilchenbewegungen in Strömungen zu Grunde. Die LDA-Methode lieferte zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Messungen nur eindimensionale Informationen des Strömungsfeldes, die lediglich den Betrag der Strömungsgeschwindigkeit in eine bestimmte, im Vorfeld der Messung festgelegte Richtung, beinhalten. Es könnten also lediglich Strömungsgeschwindigkeiten an beliebigen Orten im Scheinwerfer angegeben werden. Da allerdings auch die Richtung der Strömung von Interesse ist, wurden die Messungen mit der PIV-Methode durchgeführt.

Particle Image Velocimetry

Diese Methode beruht auf der optischen Verfolgung von Partikeln, die sich in einer Strömung bewegen. Dabei werden die Bewegungen dieser Partikel von einem Bildverarbeitungsprogramm in Geschwindigkeiten und Richtungsangaben umgerechnet. Ein gepulster Laser, dessen Strahl optisch zu einer Ebene aufgeweitet wird, leuchtet einen Bereich des strömenden Mediums aus. Die Messebene sollte hier möglichst in der Richtung der Hauptströmung liegen. Das von den Partikeln, den sogenannten *Tracern*, reflektierte Licht wird im Abstand von zwei Laserimpulsen mit einer an das System gekoppelten CCD-Kamera aufgenommen (Bild 6.4). Der Vergleich dieser Bilder ergibt aus der Verschiebung des Partikels die Richtung und unter zu Hilfenahme der Zeit zwischen den beiden Laserimpulsen die Geschwindigkeit des Partikels [32].

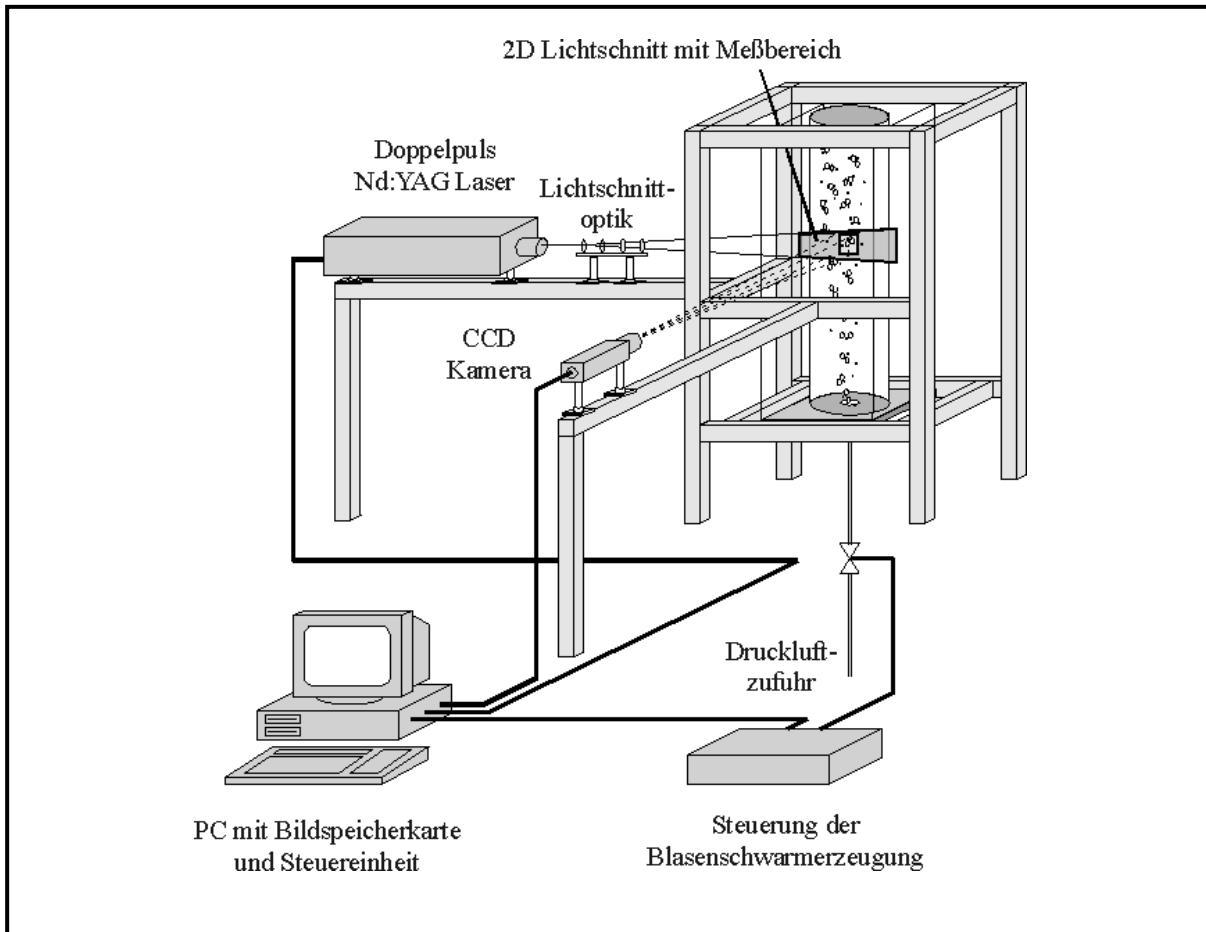


Bild 6.4: Aufbau eines PIV-Systems [32]

An die in der Strömung gelösten Partikel werden besondere Anforderungen gestellt, da sie das Verhalten der Strömung ideal abbilden sollen. Sie dürfen daher keine nennenswerten Trägheitskräfte aufweisen, was kleine Abmessungen von 1 bis 10 Mikrometer erfordert. Eine zu geringe Größe führt jedoch dazu, dass die Partikel auf den Aufnahmen nicht mehr zu erkennen sind, da die CCD-Kamera nur eine endlich Auflösung besitzt. Auch die Dichte des verwendeten Tracermaterials sollte möglichst gering sein, um dem Einfluss der Schwerkraft zu umgehen. Weiter müssen die Partikel das Laserlicht möglichst gut reflektieren. Bei der Auswertung der Bilder kommt ein Korrelationsverfahren zum Einsatz, das die Richtung und die Geschwindigkeit der Partikel mit Hilfe stochastischer Methoden bestimmt. Daher ist es wichtig, eine große Anzahl an Partikeln in die Strömung zu bringen, damit der auftretende Fehler gering wird.

Für die Messung im Scheinwerfer wurde ein fein zerstäubtes Öl als Tracer verwendet. Die Ölpartikel verdampfen allerdings, wenn sie in die Nähe des Leuchtmittels kommen, oder sie blieben bei Kontakt mit den Oberflächen an diesen haften. Die so verloren gegangenen Partikel mussten durch eine ständige Zufuhr neuer Tracer auf einem gleichbleibenden Pegel gehalten werden. Ein weiteres Problem sind die stark reflektierenden Flächen und die Strahlung des Leuchtmittels, die das Messergebnis anfänglich stark beeinflussten. Diese Probleme wurden durch eine umfangreiche Filtertechnik umgangen.

Der Messbereich im Scheinwerfer ist eine Ebene quer zur optischen Achse, die das Leuchtmittel in der Höhe der Wendel schneidet. Durch diese Auswahl soll der Bereich im Scheinwerfer gemessen werden, der die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten aufweist, da hier die Konvektionsströmung am höchsten ist und die Schwerkraft den geringsten Fehler verursacht. Als Messobjekt wurde der Musterscheinwerfer ausgewählt, da er eine gute Zugänglichkeit zur Messebene erlaubt.

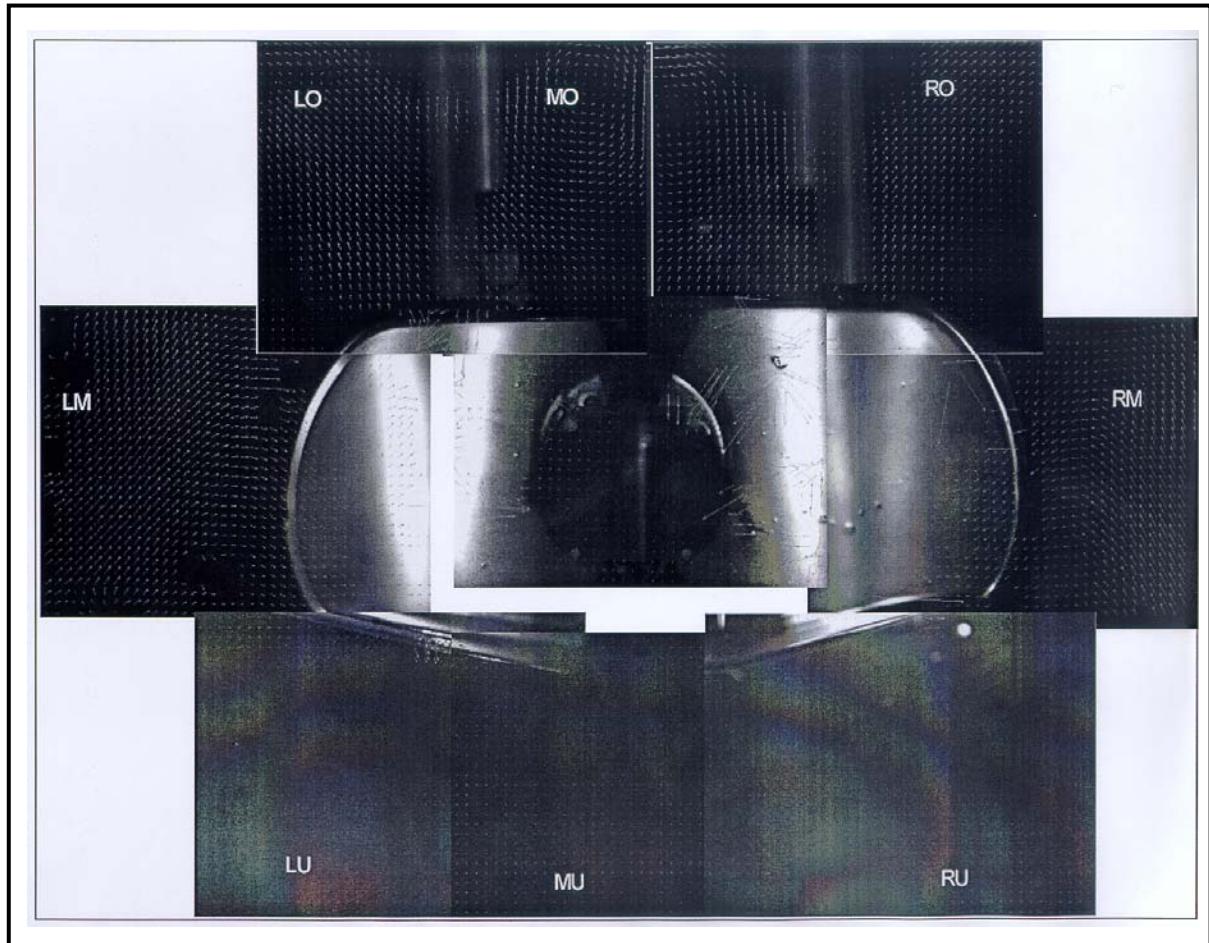


Bild 6.5: Die acht Messbereiche der PIV-Messung am Musterscheinwerfer

Das Bild 6.5 zeigt die Einteilung der Messbereiche, die jeweils einzeln vermessen wurden, da eine Messung im gesamten Bereich aufgrund der Größe nicht möglich war und die qualitativen Ergebnisse der PIV-Messung am Musterscheinwerfer. Die Blickrichtung ist von vorne in den Scheinwerfer. In der Mitte ist der Reflektor zu erkennen. Zur besseren Darstellung der Ergebnisse wird im folgenden nur ein Messbereich ausgewertet. Dieser liegt oberhalb des Reflektors, da hier die Strömungsgeschwindigkeiten am höchsten sind und die Störeinflüsse des stark reflektierenden Reflektors am geringsten sind. Eine Auswertung der Ergebnisse im Bereich direkt vor dem Reflektor ist mit dieser Methode nicht möglich, da es aufgrund der Reflexionen des Laserlichtes am Reflektor zu Störungen der Messtechnik kommt.

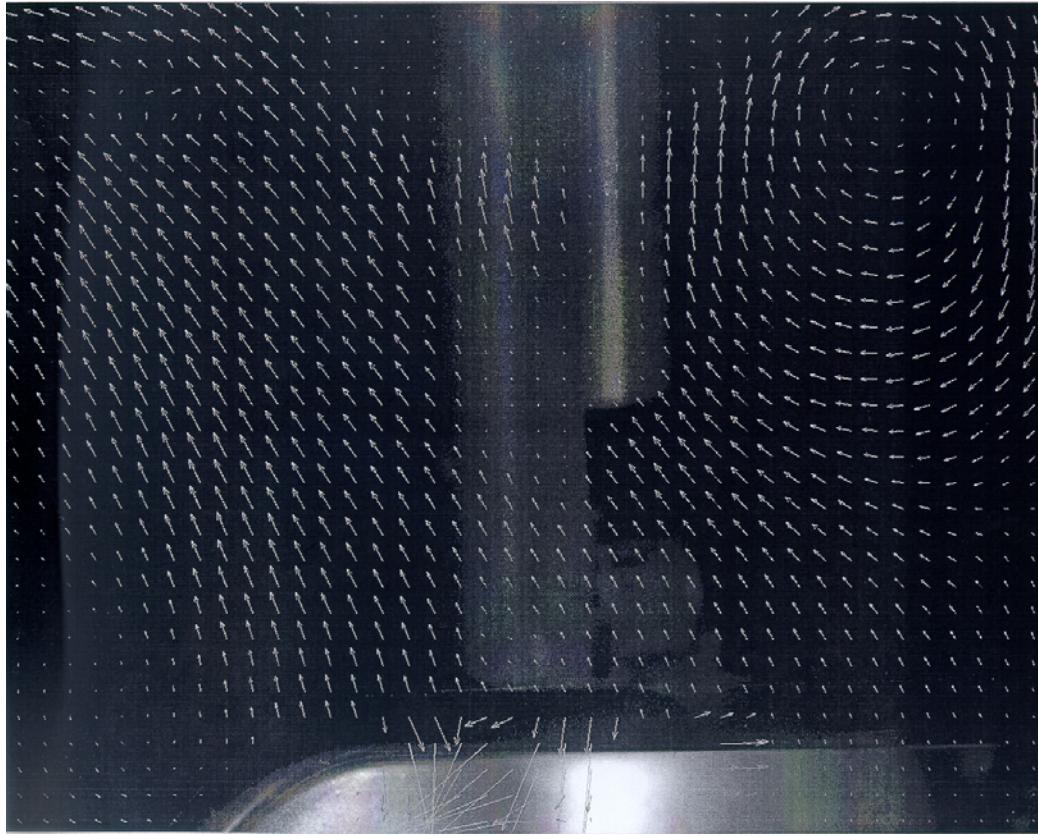


Bild 6.6: PIV-Messung im Bereich LO (siehe Bild 6.5)

Im Bild 6.6 ist das durch ein Vektorfeld dargestellte Strömungsfeld, wie es sich mit der PIV-Methode darstellen lässt, zu erkennen. Die Länge der Vektoren gibt dabei die Strömungsgeschwindigkeiten an. Am unteren Bildrand sind einige Vektoren zu erkennen die, sowohl in Richtung als auch Länge, von den anderen Vektoren in diesem Bereich abweichen. Dies sind die oben beschriebenen Messfehler, die durch die starke Reflektion des Laserlichtes am Reflektor, der in diesem Bereich auf dem Bild auch zu erkennen ist, auftreten können. Vor der Auswertung solcher Messergebnisse muss eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt werden, damit keine falschen Ergebnisse zur Auswertung herangezogen werden.

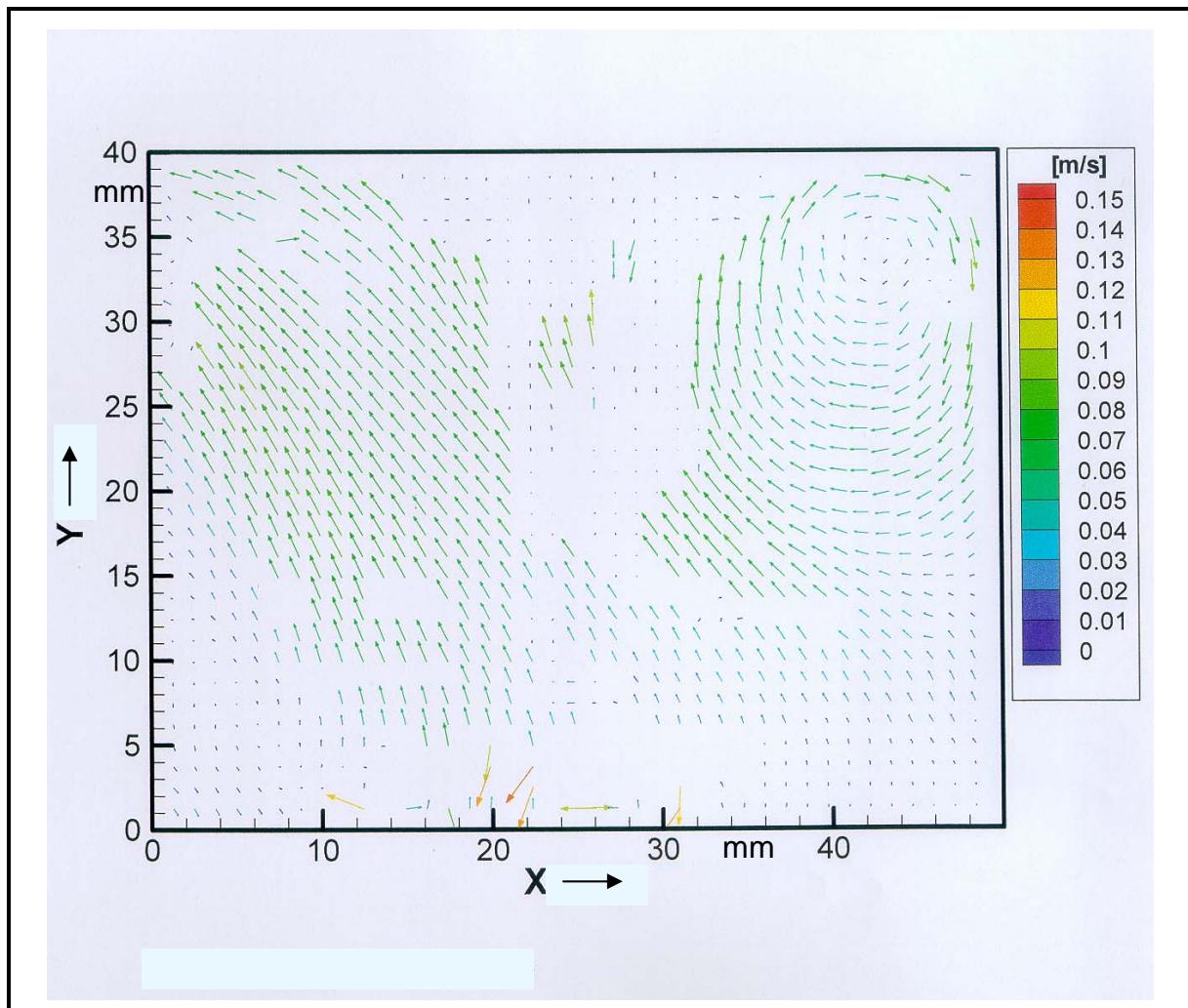


Bild 6.7: Mit PIV gemessene Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich LO

Die sich aus der Auswertung der gepulst aufgenommenen Bilder ergebenden Strömungsgeschwindigkeiten sind in Bild 6.7 zu sehen.

Werden diese Messergebnisse mit den Ergebnissen der Simulation verglichen, ergeben sich zunächst quantitativ gute Übereinstimmungen des Strömungsfeldes, wie Bild 6.8 zeigt. Sowohl die gemessene als auch die simulierte Geschwindigkeit liegt in einem Bereich um 0,09 m/s.

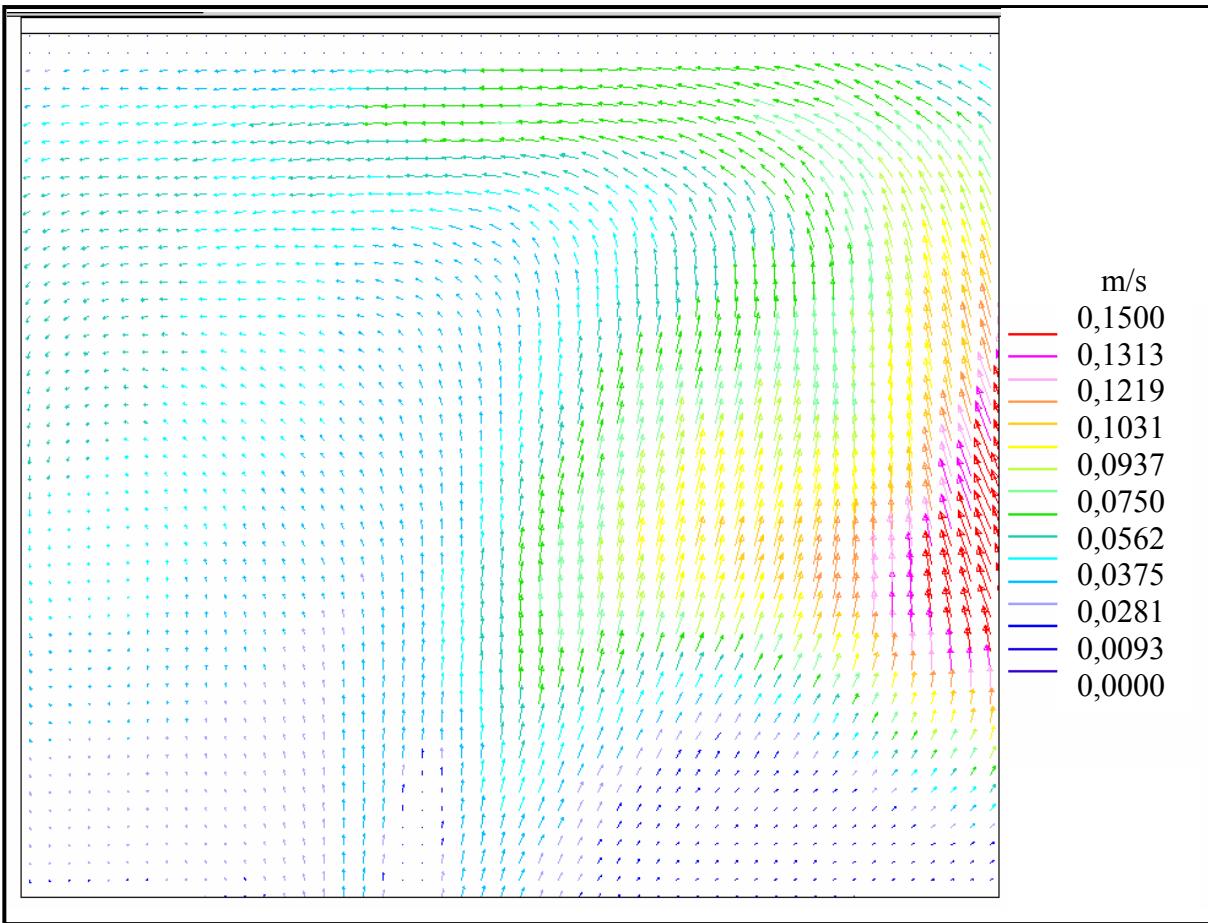


Bild 6.8: Simulierte Strömungsverteilung im Bereich LO

Der Vergleich der Strömungsverläufe zeigt jedoch Abweichungen. Während die Messung einen stark ausgebildeten Wirbel zeigt, ist dieser in der Simulation nicht zu finden. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen ist die Tatsache, dass die Simulation ein stationäres Ergebnis eines transienten Vorganges liefert. Bei freien Konvektionsströmungen handelt es sich wegen der geringen Strömungsgeschwindigkeiten um sehr instabile Strömungen, deren Verlauf sich sehr schnell ändern kann. Dazu reichen schon geringe Störungen durch die Umwelt aus. Daher ist es bei dieser Messung nicht möglich, die gleichen qualitativen Ergebnisse für die Strömungsverläufe bei Messung und Simulation zu erzielen. Dieses müsste jedoch in einer größeren Messreihe nachgestellt werden, bei der die Randbedingungen exakt erfasst und bei der Simulation nachgebildet werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Ergebnisse quantitativ übereinstimmen, die Strömungsverläufe jedoch voneinander abweichen. Die Messung ist also in der hier angewendeten Form nur bedingt zur Messung von Strömungen mit geringen Geschwindigkeiten geeignet. Da sich die Technik für diese Methode in der Entwicklung befindet, kann davon ausgegangen werden, dass in den nächsten Jahren ein System zur Verfügung steht, dass auch für die Messung in lichttechnischen Systemen geeignet ist. Die hier erreichten Ergebnisse hätten in dieser Form auch mit der LDA-Methode gewonnen werden können.

6.2 Erweiterung einer Klimakammer

Die zunehmende Komplexität lichttechnischer Geräte, besonders der Scheinwerfer, durch den vermehrten Einsatz von Elektronikkomponenten stellt auch an die Prüftechnik immer neue Aufgaben. War es bisher ausreichend, das gesamte Gerät einer einheitlichen klimatischen Belastung auszusetzen, so wird dieses in Zukunft nicht mehr möglich sein, da zwischen dem Klima im Motorraum und dem Außenklima Unterschieden werden muss. Daher ist es notwendig auch die Prüfeinrichtungen so auszulegen, dass sie realitätsnahe klimatische Bedingungen vorgeben können.

Realitätsnahe Bedingungen bedeutet hier, dass die Einrichtung die unterschiedlichen Belastungen, die auf die Abschlusssscheibe und auf das Gehäuse wirken, überprüfbar erzeugen kann. Bei der Betrachtung der Einbaulage eines Scheinwerfers wird deutlich, dass das Gehäuse komplett in den Motorraum integriert ist, während die Abschlusssscheibe dem momentanen Wetter- und Fahrbedingungen ausgesetzt ist.

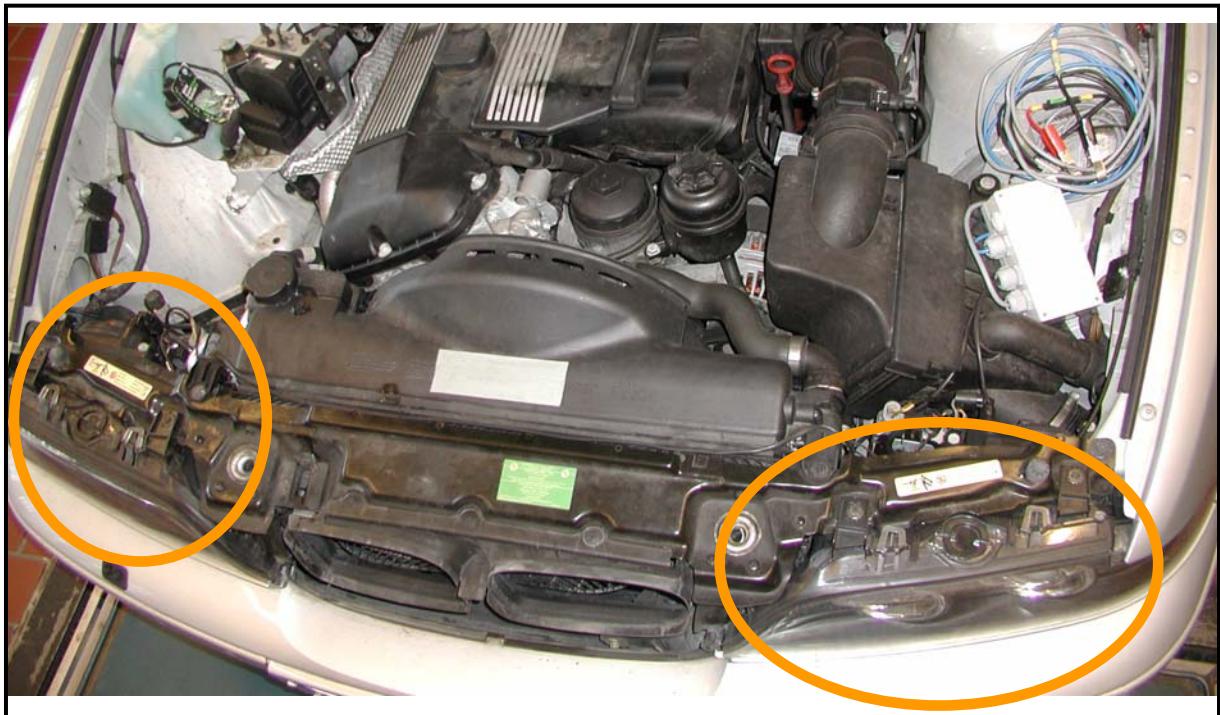


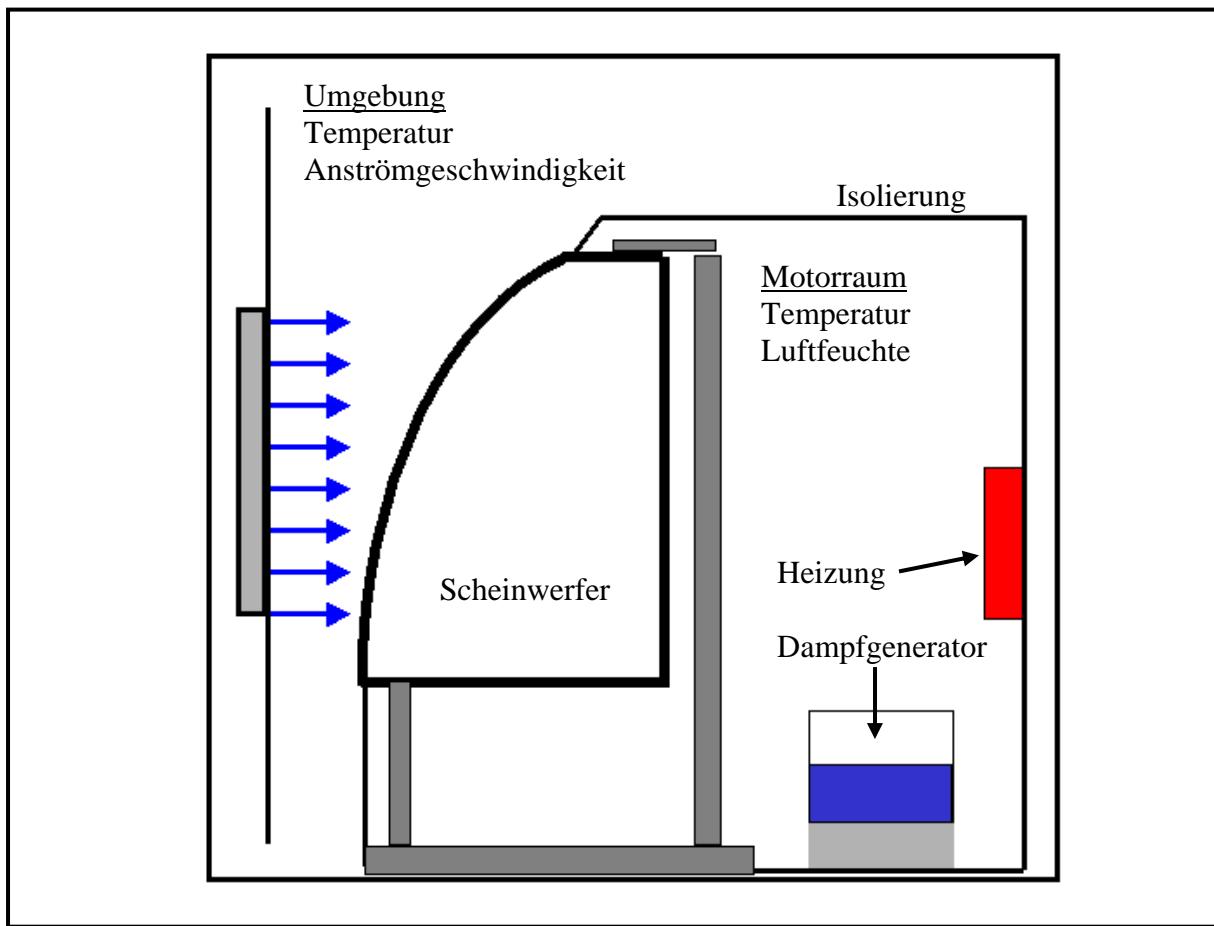
Bild 6.9: Einbausituation eines Scheinwerfer im Fahrzeug

Fahrversuche mit unterschiedlichen Fahrzeugen haben ergeben, dass eine solche Prüfanlage die in Tabelle 6.2 angegebenen Randbedingungen erzeugen muss.

Tabelle 6.2: Vorgaben für die Prüfanlage

Physikalische Größen	Minimum	Maximum
Temperatur Motorraum	Umgebungstemperatur	80 °C
Luftfeuchtigkeit Motorraum	Umgebungsfeuchte	90 %
Temperatur Umgebung	-30 °C	50 °C
Luftströmung Umgebung	0 m/s	30 m/s

Abhilfe schafft hier ein Zweikammer-Klimaschrank, bei dem in der einen Kammer das Motorraumklima (Temperatur, Feuchtigkeit) nachgestellt werden kann, und in der zweiten Kammer die herrschende Umgebungstemperatur und Luftströmung einzustellen ist. Solche Klimaschränke sind am Markt erhältlich und befinden sich heutzutage zum Beispiel bei den Herstellern von Dämmstoffen oder Wärmedämmverglasungen im industriellen Einsatz. Da eine Beschaffung einer solchen Anlage im Rahmen dieser Arbeit nicht in Frage kam, musste ein vereinfachter, kostengünstiger Aufbau unter Einbeziehung der vorhandenen Ressourcen entwickelt werden. Da in dem Bereich der Scheinwerferprüfung unterschiedlichste Ein-kammer-Klimaschränke zur Verfügung stehen, wurden diese in den Entwurf mit einbezogen; Bild 6.10 zeigt das Prinzip der Prüfanlage [38].

**Bild 6.10:** Prinzip der erweiterten Prüfanlage

Die Idee ist, in einen vorhandenen Klimaschrank eine zweite isolierte Kammer anzubringen, in der ein Scheinwerfer so platziert ist, dass sich die Abschluss scheibe vor der vorhanden Ausströmöffnung befindet und von einem Luftstrom mit konstanter und messbarer Geschwindigkeit und Temperatur beaufschlagt wird. Der hintere Teil des Scheinwerfers befindet sich in einer isolierten Kammer, in der die Temperatur und die Feuchtigkeit des Motorraums eingestellt und gemessen werden können. Bild 6.11 zeigt den ausgewählten vorhandenen Klimaschrank und Bild 6.12 die technische Umsetzung der erweiterten Prüfanlage.



Bild 6.11: Innenansicht des Klimaschrankes

Die Prüfanlage ist im Inneren mit Styropor zur Isolierung verkleidet. Ein Vorteil von Styropor ist die einfache Bearbeitung, da die Kontur des Scheinwerfers zwecks Abdichtung möglichst genau herausgearbeitet werden muss. Die seitliche Öffnung dient der Luftführung, da es im Bereich der Abschluss scheibe zu einer möglichst homogenen Verteilung der Strömung und damit zu einer gleichmäßigen Wärmeabfuhr kommen soll. Die Verwendung von Profileisten beim Aufbau des Rahmens soll die spätere Anbringung von Messsystemen erleichtern.

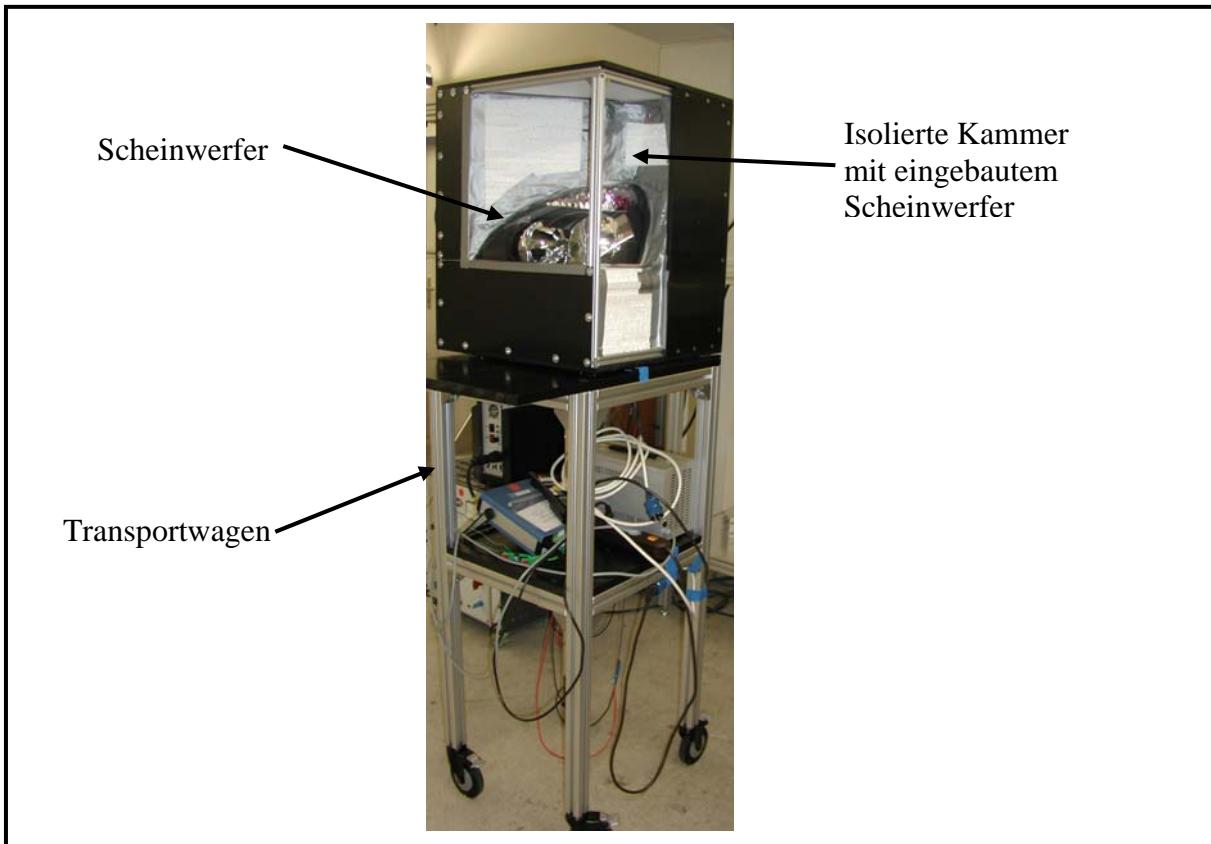


Bild 6.12: Technische Umsetzung der inneren Kammer

Der hintere Bereich, der die Eigenschaften des Motorraumes bezüglich Temperatur und Feuchte aufweisen soll, wird mit Hilfe einer zusätzlichen Heizung erwärmt. Die Anforderung ist dabei, eine Temperatur von 80 °C zu erreichen und möglichst konstant zu halten. Die gewünschte Feuchte wird mit Hilfe eines Dampftopfes erzeugt. Beides ist in Bild 6.13 zu sehen. Während der ersten Probeläufe zeigte sich, dass zur gleichmäßigen Verteilung des Klimas noch ein Lüfter notwendig ist.

Die Regelung der Größen erfolgt zunächst manuell unter Zuhilfenahme von Temperatur- und Feuchtesensoren, die sich in verschiedenen Bereichen des Aufbaus und des Scheinwerfers befinden. Ein Umbau auf eine Temperatur- und Feuchteregelung ist jederzeit möglich.

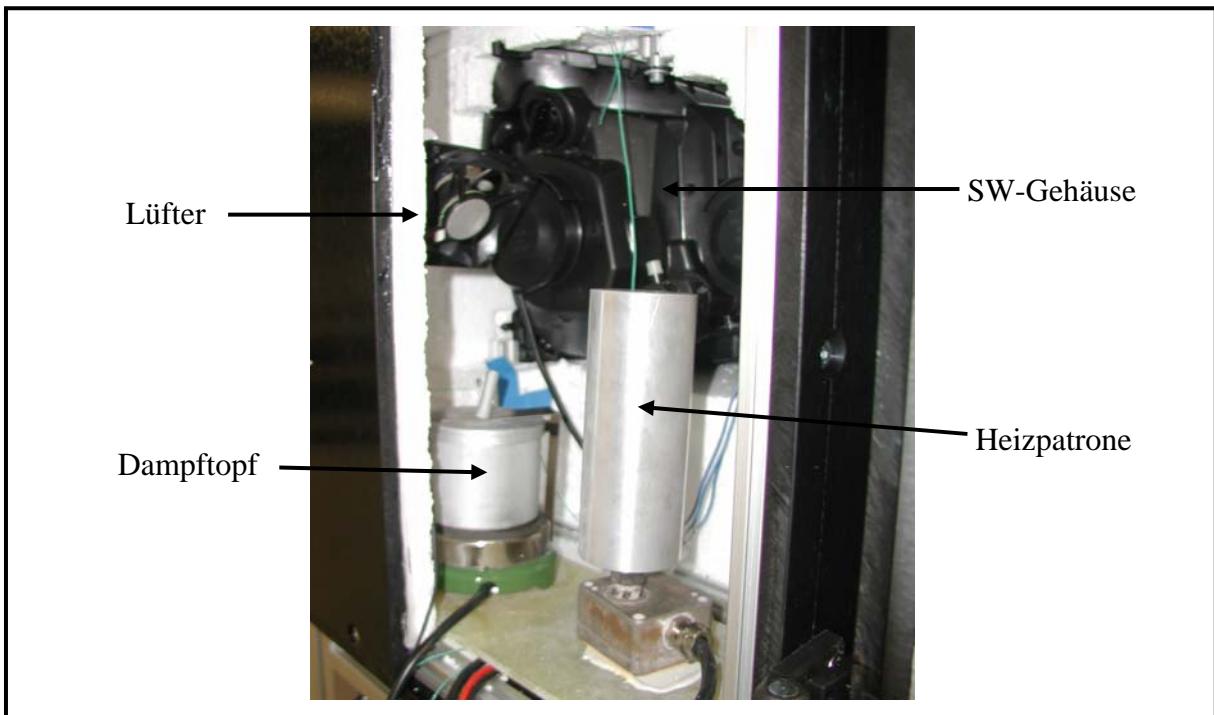


Bild 6.13: Hinterer Bereich der Kammer (Motorraum)

Probebetrieb

Der Probebetrieb des Messstandes zeigte, dass die an ihn gestellten Anforderungen bezüglich der Temperatur (80°C) erreicht werden. Allerdings zeigten sich Probleme bei der Feuchtigkeit. Diese ließ sich aus verschiedensten Gründen nicht auf einem konstanten Niveau halten. Eine Fehleranalyse ergab folgende Probleme [39]:

- Das verwendete Styropor nimmt sehr viel Feuchtigkeit auf und lagert diese im Material ein.
- Der Dampfgenerator weist eine starke Hysteresewirkung auf, da die Heizplatte sich beim Überschreiten einer bestimmten Temperatur ab- und erst nach Erreichen einer um 15°C niedrigeren Temperatur wieder einschaltet.
- Die Styroporplatten sind nicht hinreichend dicht miteinander verbunden, so daß trockene Luft von Außen in die isolierte Kammer strömen kann.

Zur Abstellung dieser Probleme wurden folgende Maßnahmen unternommen:

- Die Innenseite der Kammer wurde mit Aluminiumfolie ausgekleidet.
- Der Dampftopf wurde durch eine Feuchtigkeitszuführung aus einem Thermostatbecken ersetzt.
- Die Klimakammer wurde bezüglich der Feuchte vorkonditioniert.

Diese Maßnahmen verbesserten die Stabilität der Feuchte in der Kammer.

Die geforderte Strömungsgeschwindigkeit der Luft an der Abschluss scheibe konnte von dem benutzten äußeren Klimaschrank nicht aufgebracht werden. Die maximale Geschwindigkeit, die an dieser Stelle gemessen wurde, betrug 1,8 m/s.

Die Strömungsgeschwindigkeit an der Scheibe hat, wie in Kapitel 4 erläutert, einen Einfluss auf die Größe der Wärmeabfuhr in diesem Bereich. Das bedeutet, dass eine höhere Strömungsgeschwindigkeit mehr Wärme an der Scheibe abtransportiert als eine niedrige Geschwindigkeit.

Zur Nachbildung der realen Bedingungen soll jedoch der Energieinhalt ähnlich sein. Um die energetische Ähnlichkeit zu erreichen, wird ein gleicher Wärmestrom gefordert.

$$\dot{q}_{\text{Schrank}} = \dot{q}_{\text{Realität}} \quad (6.1)$$

Der Wärmestrom wird durch das Newtonsche Abkühlungsgesetz (3.12) beschrieben. Eine höhere Wärmeabfuhr kann jedoch auch durch eine größere Temperaturdifferenz zwischen der Scheibe und der strömenden Luft geschaffen werden, da der Wärmeübergangskoeffizient im Schrank konstant bleibt. Unter zu Hilfenahme der Gleichungen (4.1) und (4.4) lässt sich für die einzustellende Temperatur $T_{I,8}$ folgende Beziehung angeben

$$\frac{T_{I,8} - T_{\text{Wand}}}{T_{\text{Realität}} - T_{\text{Wand}}} = \frac{Nu_{\text{Realität}}}{Nu_{I,8}} \quad (6.2)$$

Dabei ist $Nu_{\text{Realität}}$ die Nusselt-Zahl, die sich aus Gleichung (4.9) für die geforderte Strömungsgeschwindigkeit ergibt, $Nu_{I,8}$ die Nusselt-Zahl, die sich bei der im Schrank herrschenden Strömungsgeschwindigkeit von 1,8 m/s einstellt, und $T_{\text{Realität}}$ die Temperatur, die als Außentemperatur bei dem Test vorgegeben werden soll. Unter der Annahme, dass die Temperatur T_{Wand} die mittlere Temperatur der Abschluss scheibe darstellt, lässt sich aus der Gleichung $T_{I,8}$ berechnen und am Schrank einstellen.

Damit erfüllt die Prüfanlage die an sie gestellten Anforderungen und kann wiederholbare und realitätsnahe Randbedingungen erzeugen, die in die Simulation übernommen werden können. Damit ist auch ein Abgleich der Simulationsergebnisse mit reproduzierbaren Messergebnissen unter fahrzeugspezifischen Einbaubedingungen des lichttechnischen Gerätes möglich.

6.3 Verifizierung und Validierung der Methode

In diesem Kapitel werden die erarbeiteten Parameter und Methoden in die Simulation eingesetzt und die Ergebnisse mit den Messungen verglichen. Dieses wird als erstes an dem Musterscheinwerfer mit seiner einfachen Geometrie durchgeführt, bevor zu einem komplexen, realen Scheinwerfersystem übergegangen wird.

6.3.1 Musterscheinwerfer

Der Vergleich der Simulations- und Messergebnisse für den in Kapitel 4 erläuterten Musterscheinwerfer werden hier gezeigt. Dazu werden ausschließlich die Temperaturverteilungen herangezogen. Die Ergebnisse der Strömungsmessung und deren Problematik sind in Kapitel 6.1 erläutert.

Zunächst sollen die äußeren und inneren Randbedingungen verifiziert werden. Dazu werden diese in das Simulationsmodell des Musterscheinwerfers eingebracht und die Temperaturen in den Bereichen ermittelt, die nicht direkt von der am Reflektor reflektierten Strahlung getroffen werden. Dieses sind hauptsächlich die Bereiche am Gehäuse.

Bild 6.14 zeigt die Lage der Thermoelemente des bestückten Musterscheinwerfers und die numerische Zuordnung der Messpunkte. Für diesen ersten Fall werden die Temperaturen an den Messpunkten (Mp) 10 bis 18 mit den Simulationsergebnissen verglichen.

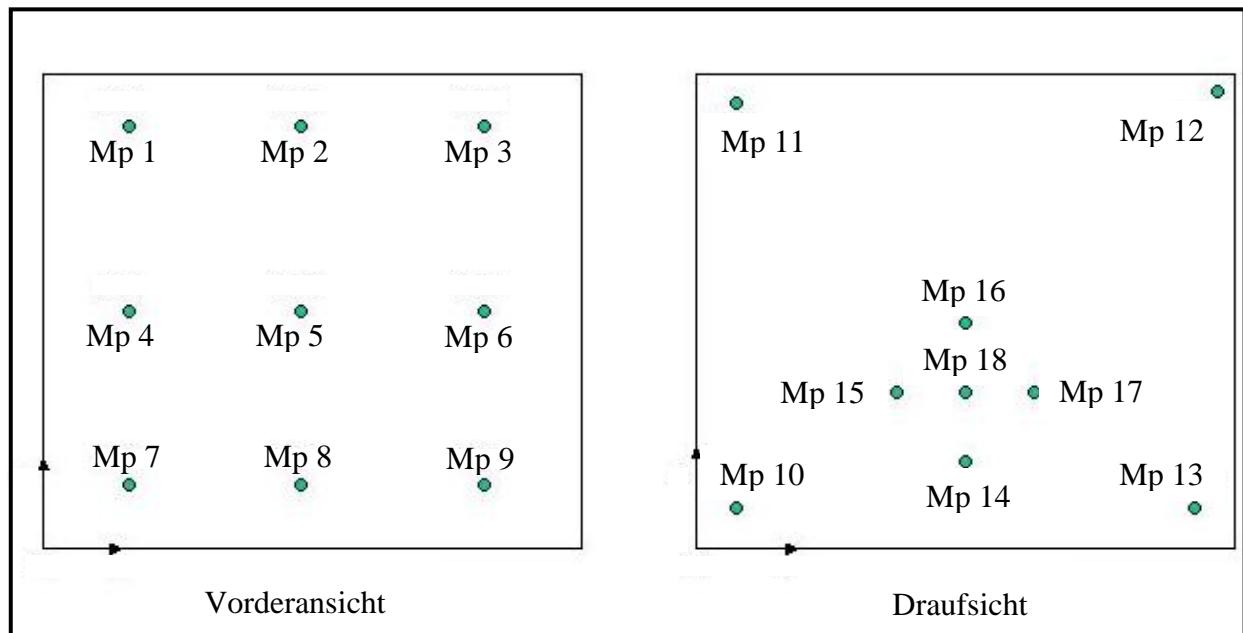


Bild 6.14: Thermoelemente am Musterscheinwerfer

Die Simulationsmethode soll, wie bereits beschrieben, die Temperaturbelastung im Scheinwerfer bei unterschiedlichen Testbedingungen (siehe Kapitel 4) widerspiegeln. Daher wird der Musterscheinwerfer eben diesen Bedingungen unterzogen.

Die folgenden Tabellen 6.3 bis 6.5 zeigen die Ergebnisse der Temperaturmessung und der Simulation bei unterschiedlichen Randbedingungen (vgl. Tabelle 4.1). Das Leuchtmittel wurde bei seiner Nennleistung von 55 Watt betrieben.

Tabelle 6.3: Umgebungstemperatur 20°C, ruhende Umluft

Messpunkt	T aus Messung °C	T aus Simulation °C
10	60	51
11	38	38
12	37	36
13	60	51
14	94	100
15	74	78
16	65	74
17	75	83
18	74	86

Tabelle 6.4: Umgebungstemperatur 50 °C, mit 1,5 m/s bewegte Umluft

Messpunkt	T aus Messung °C	T aus Simulation °C
10	64	69
11	58	61
12	57	58
13	73	68
14	91	107
15	75	94
16	71	83
17	79	86
18	76	93

Tabelle 6.5: Umgebungstemperatur 20°C, mit 1,5 m/s bewegte Umluft

Messpunkt	T aus Messung °C	T aus Simulation °C
10	41	44
11	26	34
12	26	34
13	46	44
14	62	67
15	45	61
16	44	60
17	50	61
18	47	62

Eine verbesserte Übersicht bietet das folgende Diagramm, das die Abweichungen zwischen den Messungen und den Simulationsergebnissen für jeden Messpunkt zeigt.

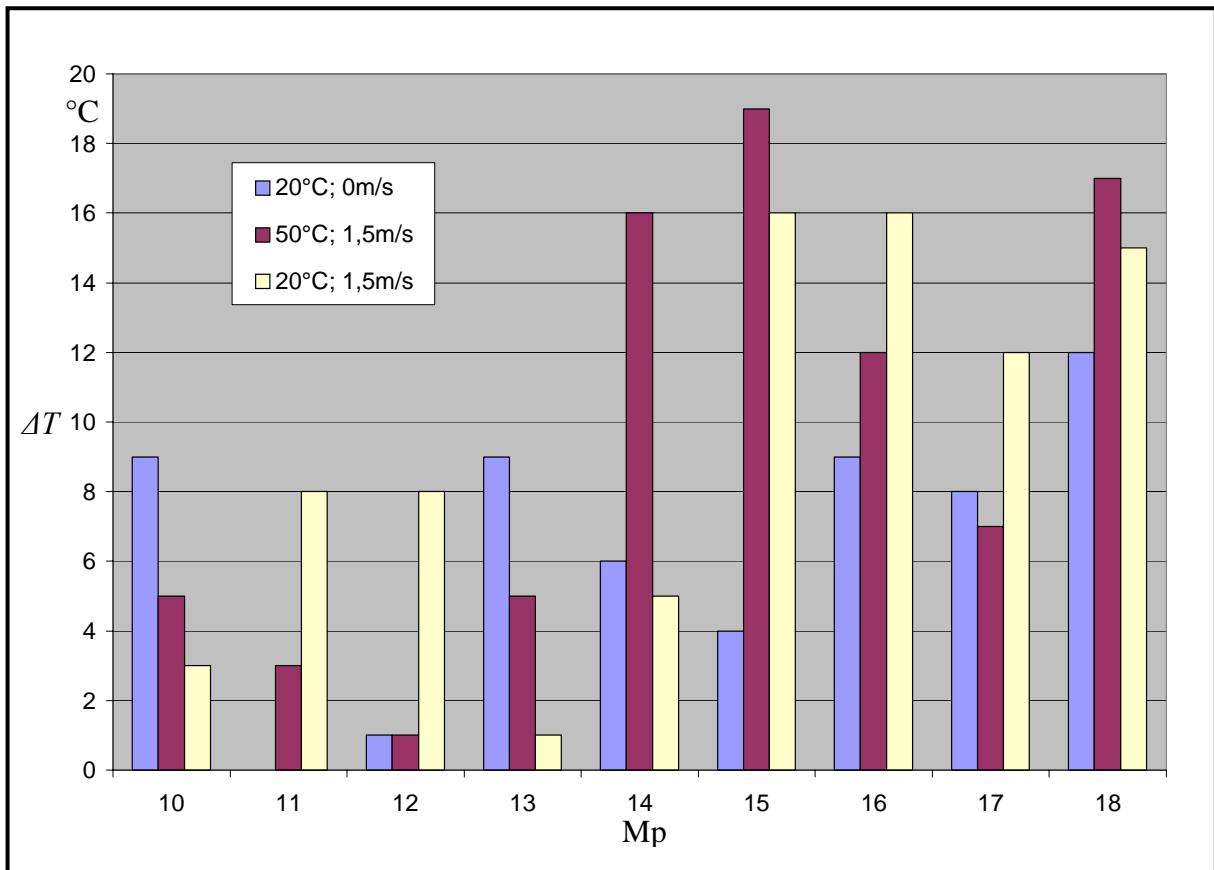


Bild 6.15: Temperaturdifferenzen ΔT zwischen Messung und Simulation

Die Temperaturdifferenzen für 20 °C und ruhende Umluft sind sehr gering. Anders stellen sich die Abweichungen bei bewegter Umluft dar. Hier zeigten unterschiedliche Messungen, bei denen der Aufstellort des Musterscheinwerfers im Klimaschrank verändert wurde, Abweichungen in den sich einstellenden Temperaturen. Dies weist auf eine inhomogene Strömungsverteilung in dem benutzten Klimaschrank hin. Da es in den Vorschriften für die nachzustellenden Prüfungen keine Hinweise auf die Bauform, sondern nur auf ihre Leistungsfähigkeit der Klimaschränke gibt, stellt die Simulation hier ein worst-case Ergebnis dar. Die simulierten Werte für die Temperaturen liegen oberhalb der gemessenen und somit ergibt sich ein Sicherheitsbereich.

Im zweiten Teil dieses Abschnittes soll nun auch die Simulation der gerichtet reflektierten Strahlung mit in die Validierung einbezogen werden. Dazu wird die Simulation des Musterscheinwerfers durchgeführt und die Ergebnisse mit einer Thermografiemessung verglichen. Bild 6.16 stellt das Simulationsergebnis der Temperaturverteilung an der Abschlusssscheibe dar. Als Vergleich dazu dient die in Bild 6.17 dargestellte Thermografie.

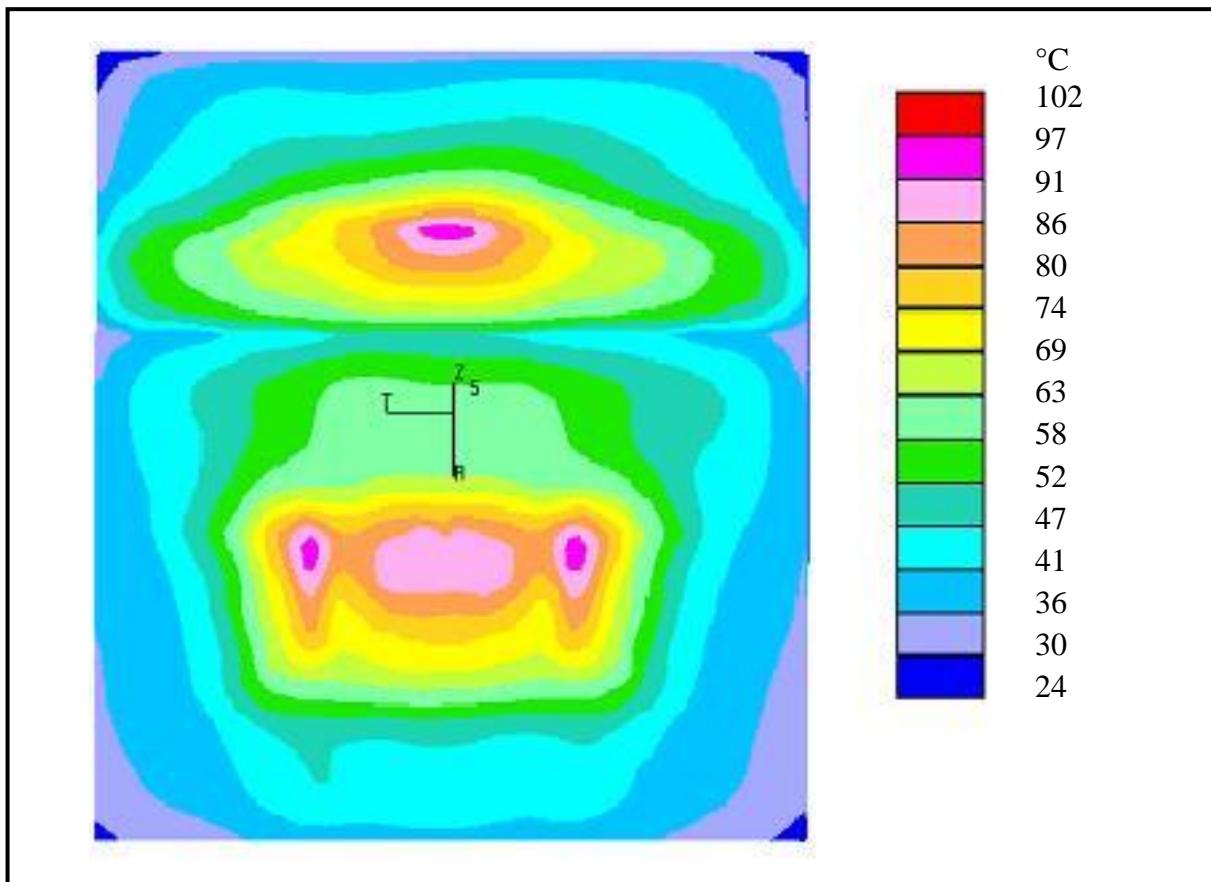


Bild 6.16: Simulierte Temperaturverteilung mit erweiterten Strahlungsmodell

Ein Vergleich der beiden Bilder zeigt, dass die Temperaturverteilungen an der Abschluss Scheibe qualitativ recht gut übereinstimmen. Sowohl in der Simulation als auch in der Thermografie ist ein dreigeteilter Hot Spot in der Mitte der Scheibe zu erkennen, auch die beiden heißesten Regionen in den Seitenbereichen sind in beiden Bildern wiederzufinden. Die Temperaturgradienten zeichnen sich bei der Simulation schärfer ab als bei der Thermografie; dies liegt zunächst an der unterschiedlichen Anzahl an Farben, die zur Wiedergabe benutzt werden, aber auch an der konzentrierteren Vorgabe der Wärmequellen in der Scheibe, die durch das Mapping erzeugt wird. Abhilfe kann hier nur eine Verfeinerung des Finite-Volumen-Modells liefern, um so eine feinere Verteilung der Quellen zu erzielen. Die hiermit verbundene Verlängerung der Simulationszeit wäre für eine industrielle Anwendung der Simulation aber nicht akzeptabel.

Ein quantitativer Vergleich der Hot Spot Temperaturen zeigt eine maximale Abweichung von 5 °C. Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperaturverteilung in einem Scheinwerfer mit einfacher Geometrie hinreichend genau mit der erarbeiteten Methode simuliert werden kann.

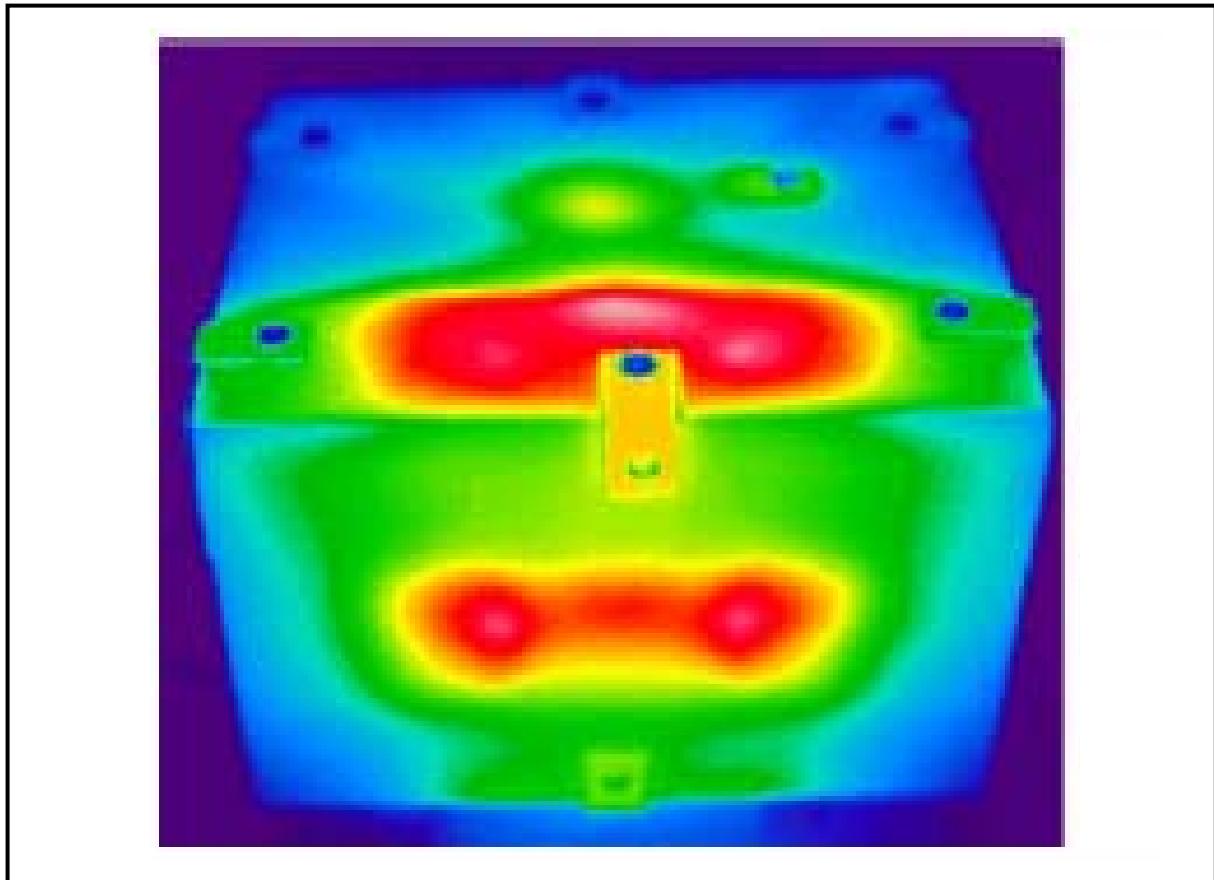


Bild 6.17: Thermografie des Musterscheinwerfers

6.3.2 Realer Scheinwerfer

Nachdem die Simulation des Musterscheinwerfers befriedigende Ergebnisse zeigt, soll die Methode nun auf ein reales Scheinwerfersystem angewandt werden. Das Bild 6.18 zeigt den dafür ausgewählten Hauptscheinwerfer des *Renault Clio* und Bild 6.19 stellt das Ergebnis der stationären Simulation die Temperaturverteilung auf dem Reflektor bei eingeschaltetem Fern- und Abblendlicht dar. Der Clio-Scheinwerfer ist ein typisches Doppelreflektorsystem, bei dem die Abblend- und Fernlichtfunktion durch zwei getrennte Reflektoren erzeugt wird. Auf der linken Seite befindet sich der Fernlichtbereich, in dem ein H1-Leuchtmittel zum Einsatz kommt. Im Abblendlichtbereich (rechts) wird dagegen ein H7-Leuchtmittel verwendet. Dadurch kann die Anwendbarkeit des Leuchtmittelmodells auf unterschiedliche Bauformen gezeigt werden. Um die Simulationsergebnisse validieren zu können, wurden zuvor Messungen an einem Scheinwerfer unter den gleichen Randbedingungen durchgeführt, die bereits am Musterscheinwerfer angewendet wurden. Die mit der Messung verglichenen Referenzpunkte (Mp) sind in Bild 6.19 durch Pfeile gekennzeichnet. Hier wurden bewusst nur Messpunkte auf dem Reflektor gewählt, da die Richtigkeit der Modelle für außenliegende Bauteile eines lichttechnischen Systems bereits mit der Messung des Musterscheinwerfers abgehandelt wurde.

Die Bilder 6.20, 6.21 und 6.22 stellen zunächst die Messergebnisse für drei unterschiedliche Betriebszustände bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C und ruhender Umluft dar. Damit soll zunächst jedes Leuchtmittelmodell für sich validiert werden.



Bild 6.18: Hauptscheinwerfer Renault Clio

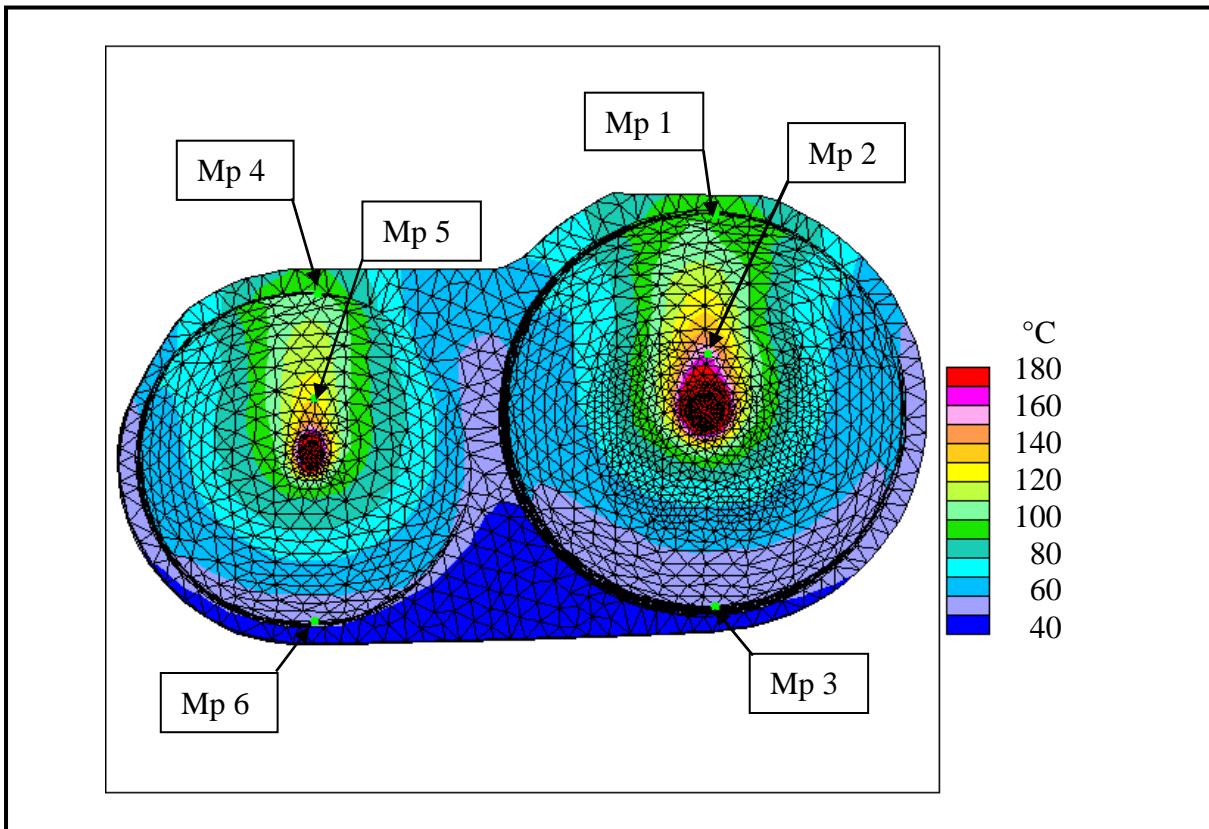


Bild 6.19: Temperaturverteilung auf dem Reflektor und Markierung der Messpunkte (Mp)

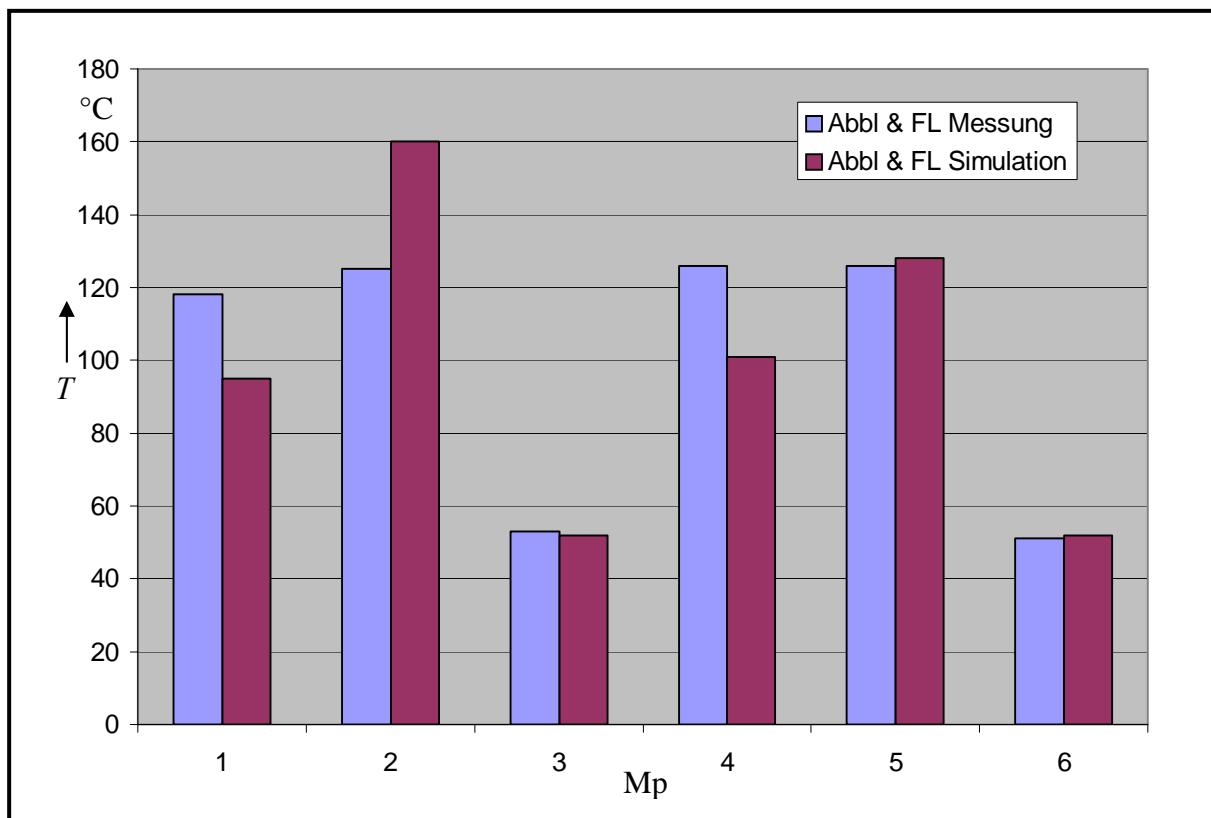


Bild 6.20: Mess- und Simulationsergebnisse bei eingeschaltetem Abblend- und Fernlicht

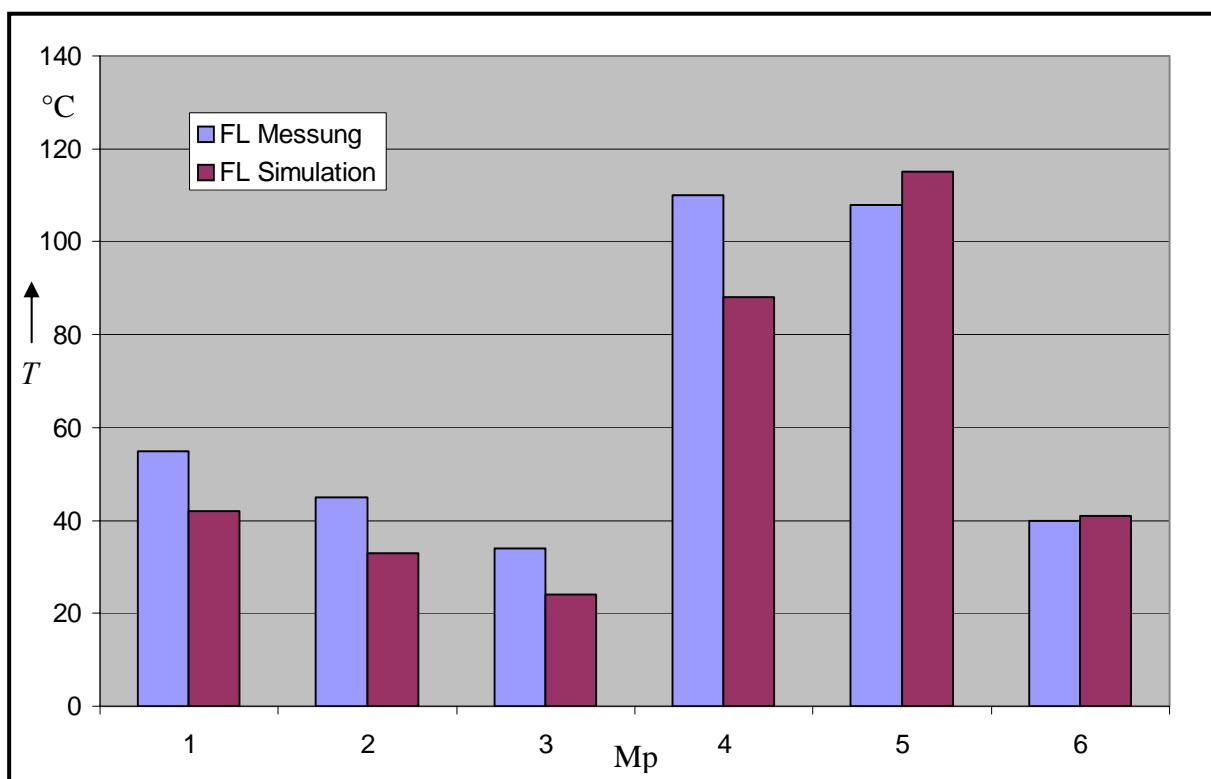


Bild 6.21: Mess- und Simulationsergebnisse bei eingeschaltetem Fernlicht

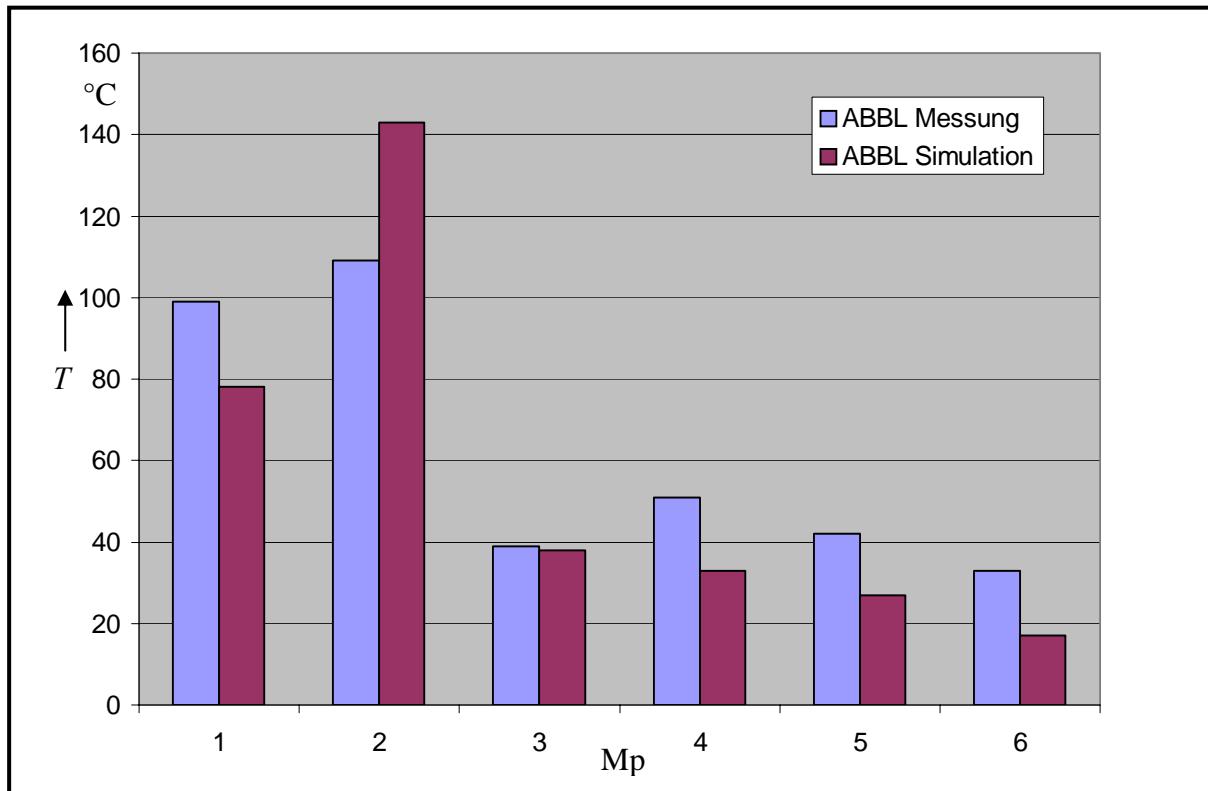


Bild 6.22: Mess- und Simulationsergebnisse bei eingeschaltetem Abblendlicht

Die Diagramme in den Bildern 6.20 bis 6.22 stellen die Ergebnisse der Temperaturmessung denen der Simulation bei unterschiedlichen Betriebszuständen gegenüber; im ersten Fall den Betrieb beider Glühlampen, d.h. von Fernlicht- und Abblendlichtfunktion, im zweiten Diagramm nur die Fernlichtfunktion und im Bild 6.22 nur die Abblendlichtfunktion.

Eine Übersicht zu den Abweichungen zwischen Simulations- und Messergebnissen gibt das Diagramm 6.23. Hier ist zu erkennen, dass die vereinfachte Annahme für die vom Leuchtmittel ausgesandte Strahlung durch die *Radiation Boundary* zu sehr guten Ergebnissen führt. Dieses zeigen die geringen Abweichungen in den unteren Messpunkten Mp 3 und Mp 6. Hier liegt die maximale Abweichung zwischen Mess- und Simulationsergebnis beim Betrieb des entsprechenden Leuchtmittels bei 1 °C. Die Abweichung steigt, wenn das entsprechende Leuchtmittel in diesem Bereich nicht in Betrieb ist. Dieses Phänomen wird später erläutert.

Die Messpunkte 1, 2, 4 und 5 werden dagegen sowohl von der Strahlung als auch von der Konvektion beeinflusst. Da das vereinfachte Leuchtmittelmodell für die strahlungsbelasteten Bereiche gute Ergebnisse liefert, sind die Abweichungen hier auf ein nicht exaktes Konvektionsmodell zurückzuführen, das eine Temperatursimulation in den leuchtmittelnahen Bereichen sehr ungenau erscheinen lässt. Hier schlägt sich der bereits in Kapitel 4 festgestellte Nachteil des vereinfachten Leuchtmittelmodells nieder, dass die Temperaturverteilung auf dem Glaskolben viel homogener ist als in der Realität. Dadurch entsteht eine Konvektionsströmung, die den Reflektor stärker belastet und so höhere Temperaturen, besonders im Bereich des Reflektordurchführung, erzeugt.

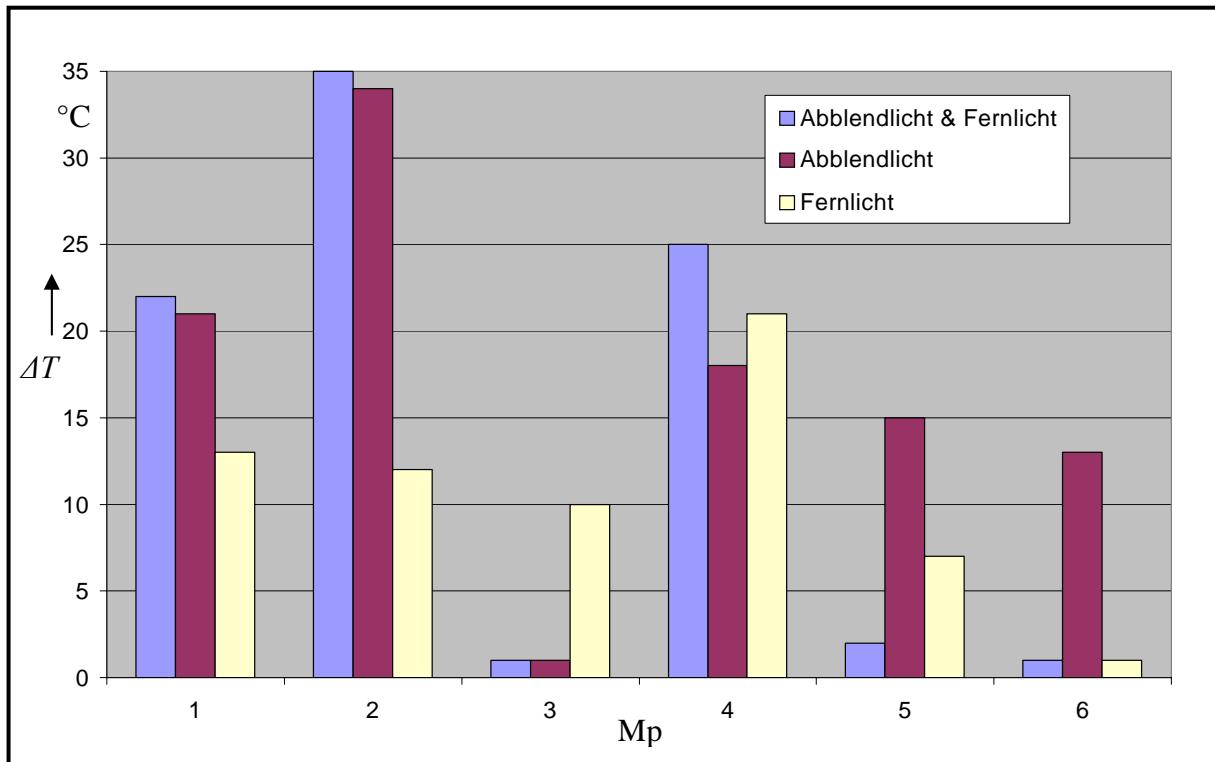


Bild 6.23: Abweichung ΔT zwischen Simulation und Messung bei den verschiedenen Betriebszuständen

Die hier in den Reflektor eingebrachte Energie fehlt dadurch im oberen Bereich (Mp 1, Mp 4), und so stellen sich hier niedrigere Temperaturen ein als in der Realität. Eine exaktere Simulation der leuchtmittelnahen Bereiche erfordert ein detaillierteres Modell des Leuchtmittels. Mit Kenntnis der zu erwartenden Abweichungen lassen jedoch auch diese Ergebnisse verwerten, da auch in diesem Fall ein detaillierteres Leuchtmittelmodell eine Verlängerung der Simulationszeit nach sich zieht.

In den folgenden Bildern 6.24 und 6.25 sind die Ergebnisse der Temperaturmessung am Reflektor bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und bewegter Umluft dargestellt. Bild 6.26 fasst diese Ergebnisse in der Darstellung der Abweichungen zwischen Simulations- und Messergebnissen zusammen. Wie bereits am Musterscheinwerfer gesehen, ist auch hier zu erkennen, dass die Parameter, die den Wärmeübergang bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten bestimmen, auch sehr gut das Temperaturverhalten in einem komplexen Scheinwerfersystem widerspiegeln. Auch bei diesem Vergleich sind wieder deutlich die Abweichungen im leuchtmittelnahen Bereich zu erkennen.

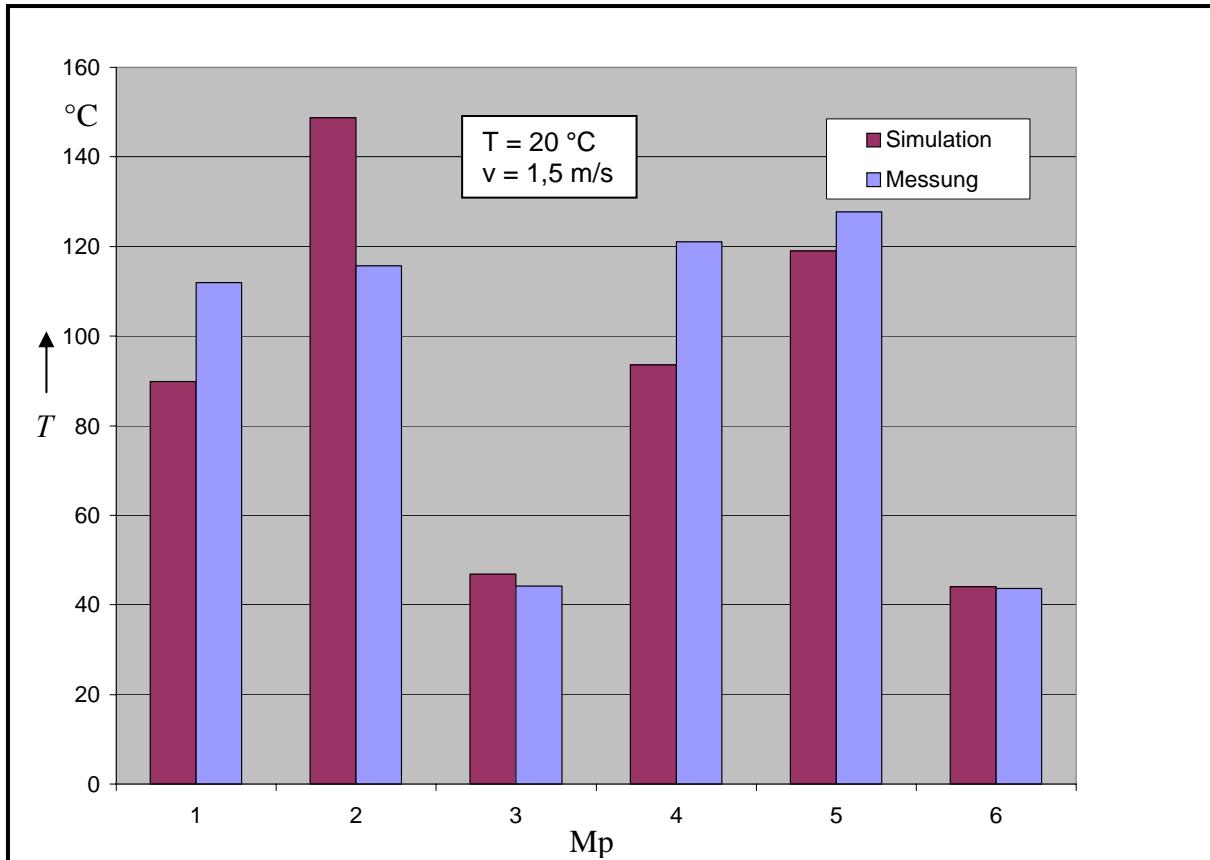


Bild 6.24: Mess- und Simulationsergebnisse bei eingeschalteten Fern- und Abblendlicht

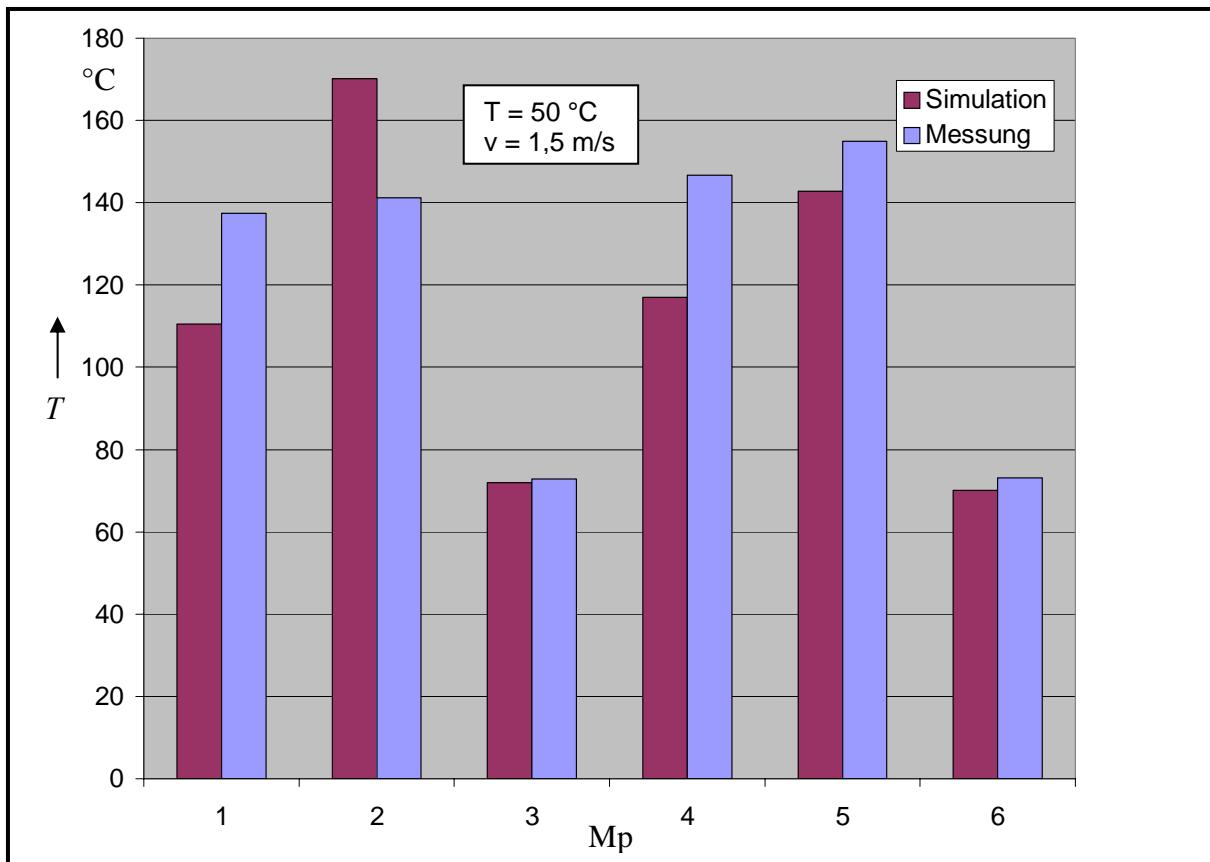


Bild 6.25: Mess- und Simulationsergebnisse bei eingeschalteten Fern- und Abblendlicht

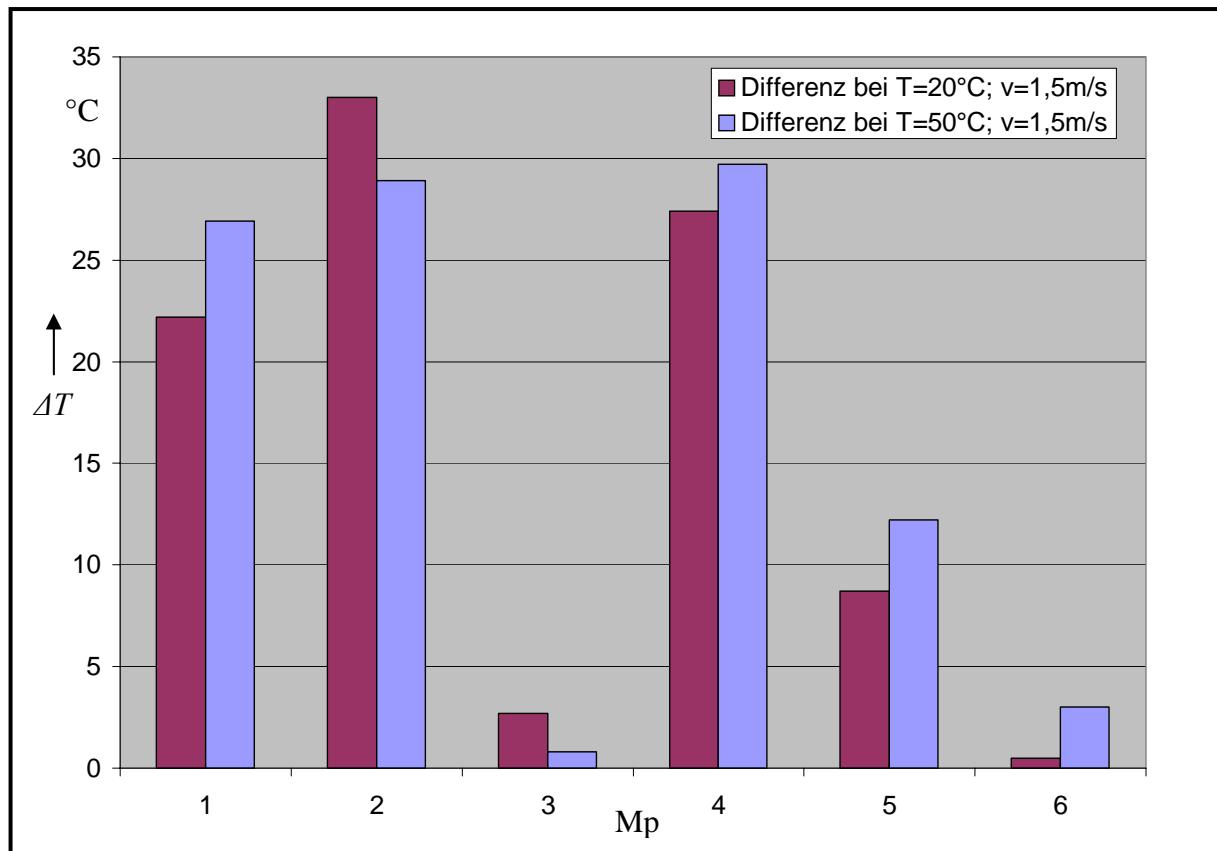


Bild 6.26: Abweichung ΔT zwischen simulierten und gemessenen Temperaturen

Wie bereits bei der Simulation des Musterscheinwerfers soll auch am Serienscheinwerfer das zusätzliche Strahlungsmodell für die gerichtet reflektierte Strahlung validiert werden. Bild 6.27 zeigt die Temperaturverteilung an der Abschluss Scheibe, wie sie sich bei Benutzung der vfs-Methode ergibt. Die wärmsten Bereiche liegen in den Regionen, in denen die Konvektionsströmung aus den Reflektoren auf die Scheibe trifft. Dieses ist in einem Vergleich mit Bild 6.28, in dem die Temperaturverteilung in einem Schnitt durch den Abblendlichtbereich dargestellt, gut zu erkennen. Der Einfluss der Strahlung bleibt hier nahezu unberücksichtigt.

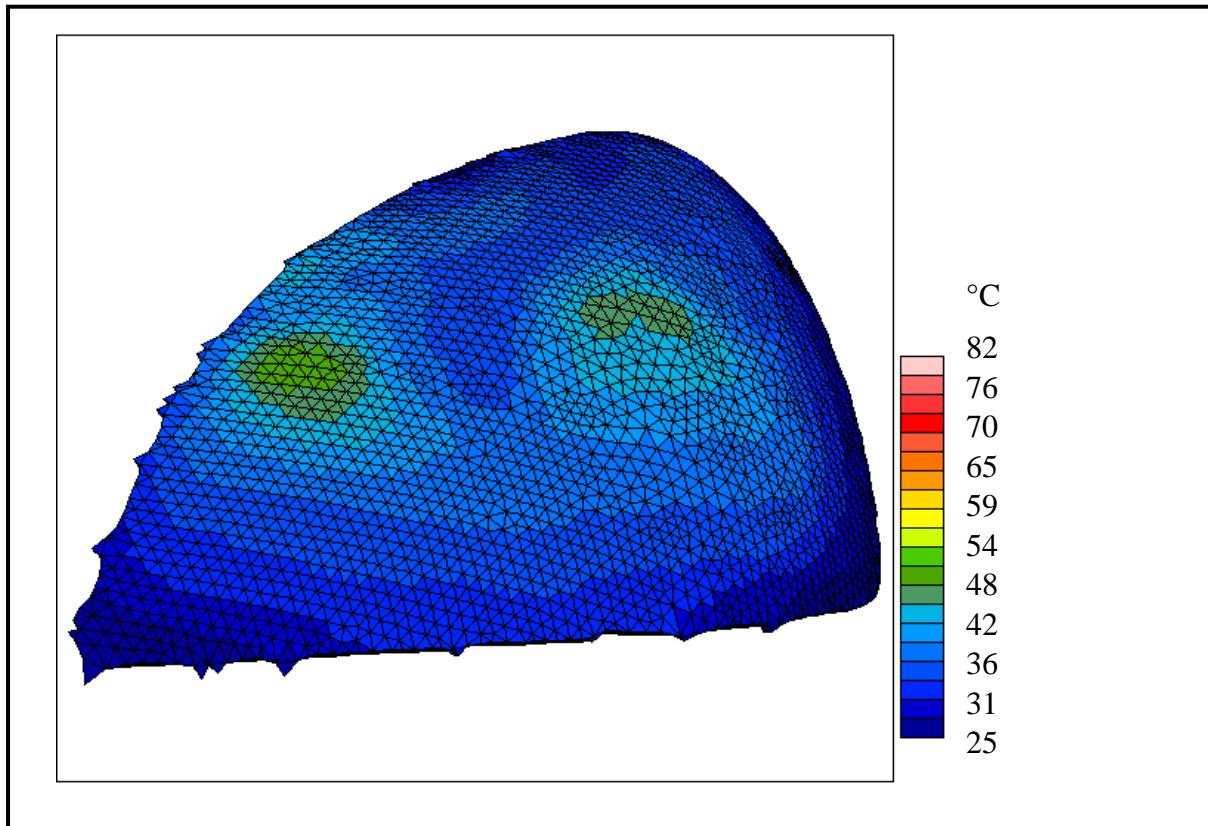


Bild 6.27: Temperaturverteilung auf der Kunststoffabschluss Scheibe (vfs-Methode)

Das Ergebnis der Temperaturverteilung auf der Abschluss Scheibe bei Anwendung der in Kapitel 5 beschriebenen Methode ist in Bild 6.29 zu sehen. Zum Vergleich dazu ist in Bild 6.30 die reale Temperaturverteilung, aufgenommen mit der Thermografiekamera, dargestellt. Sowohl qualitativ als auch quantitativ stellen sich bei der Simulation sehr realitätsnahe Ergebnisse ein. Die maximale Abweichung der höchsten Temperaturen auf der Abschluss Scheibe beträgt 6 °C.

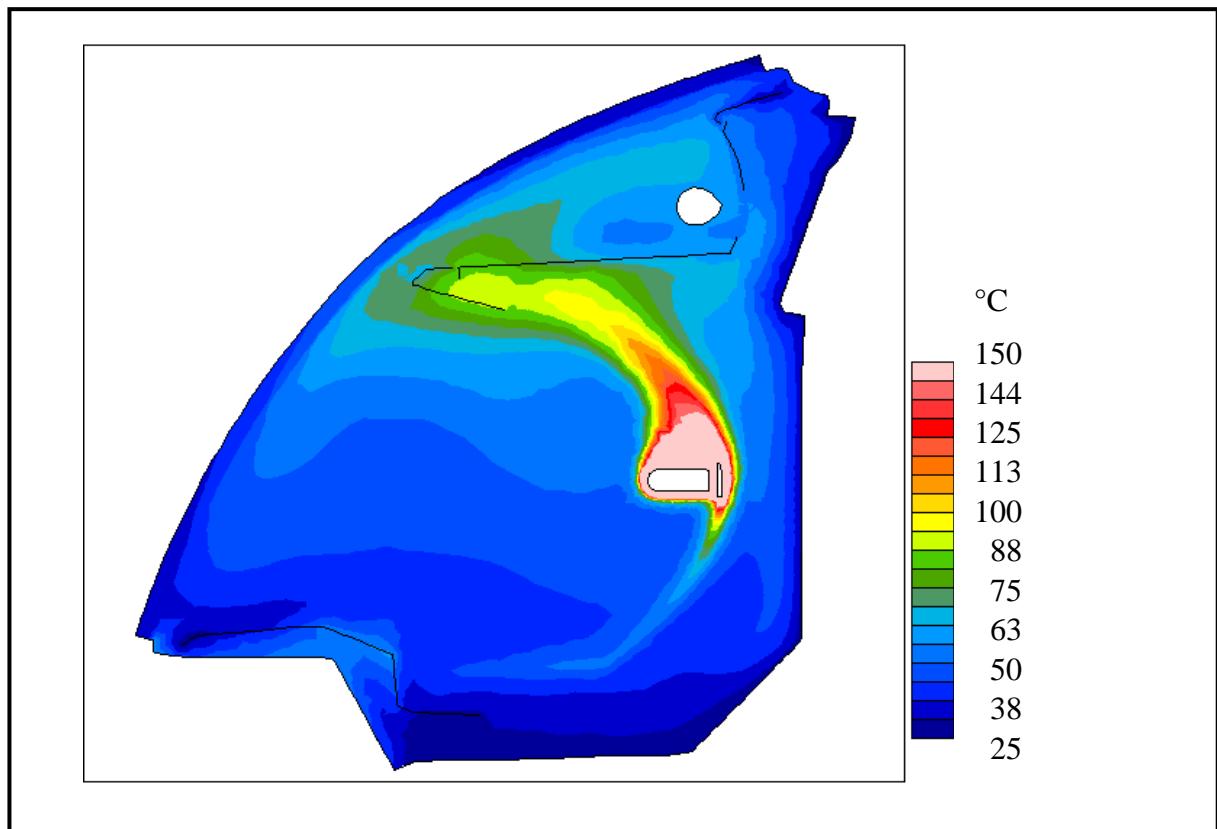


Bild 6.28: Querschnitt durch den Abblendlichtbereich

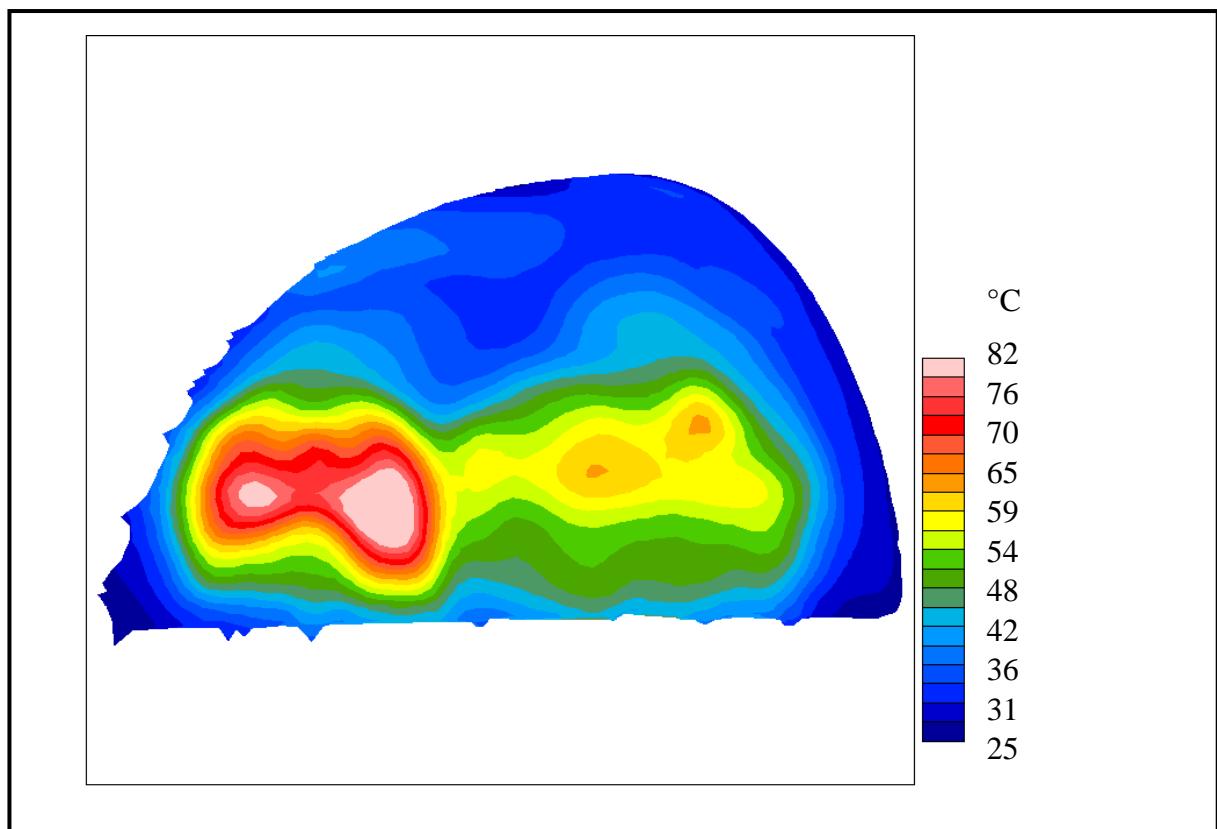


Bild 6.29: Temperaturverteilung auf der Kunststoffabschlusscheibe unter Einbeziehung von CAL

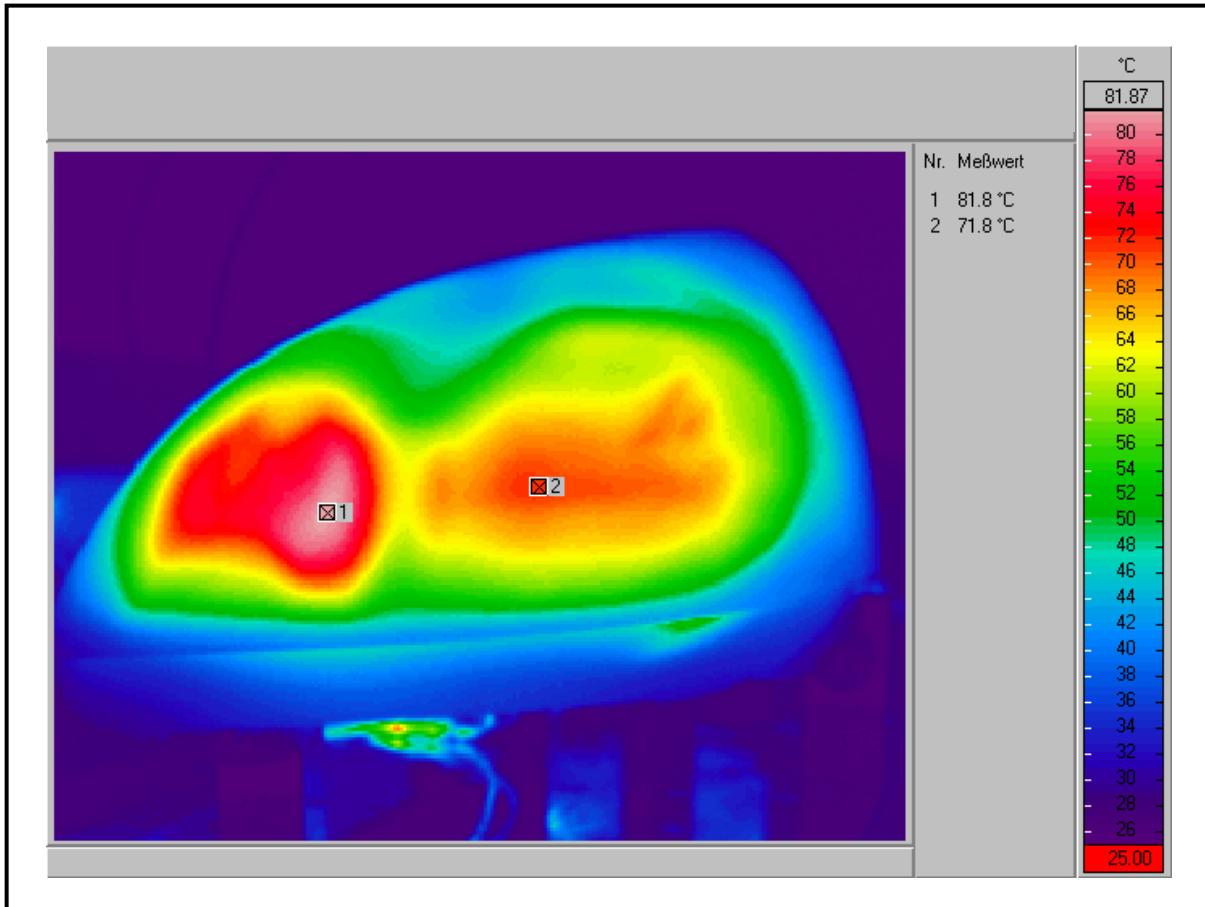


Bild 6.30: Thermografie der KAS bei eingeschalteter Fernlicht und Abblendlichtfunktion

Damit ist das erarbeitete Strahlungsmodell auch für komplexe Scheinwerfersysteme einsetzbar. Es bildet sowohl die Lage als auch die Temperaturen der Hot Spots sehr gut ab.

6.3.3 Grenzen der erarbeiteten Simulationsmethode

Die vorangestellten Abschnitte zeigen, dass sich in bestimmten Bereichen Unterschiede zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen einstellen. Dieser Abschnitt soll daher die Grenzen der erarbeiteten Methode aufzeigen und damit Hinweise auf Möglichkeiten zur Ausweitung dieser Grenzen geben.

Es ist zu erkennen, dass insbesondere in Bereichen nahe am Leuchtmitteln erhebliche Abweichungen auftreten. Die folgenden Bilder 6.31 und 6.32 zeigen die Unterschiede, die in diesem Bereich zwischen dem Simulationsmodell und der Realität herrschen. Besonders der Bereich der Reflektordurchführung kann nur unzureichend im Modell wiedergegeben werden. Da in diesem Bereich auch der Wärmetransport durch Leitung in der Simulation gänzlich vernachlässigt wird, kommt es hier zu Abweichungen.

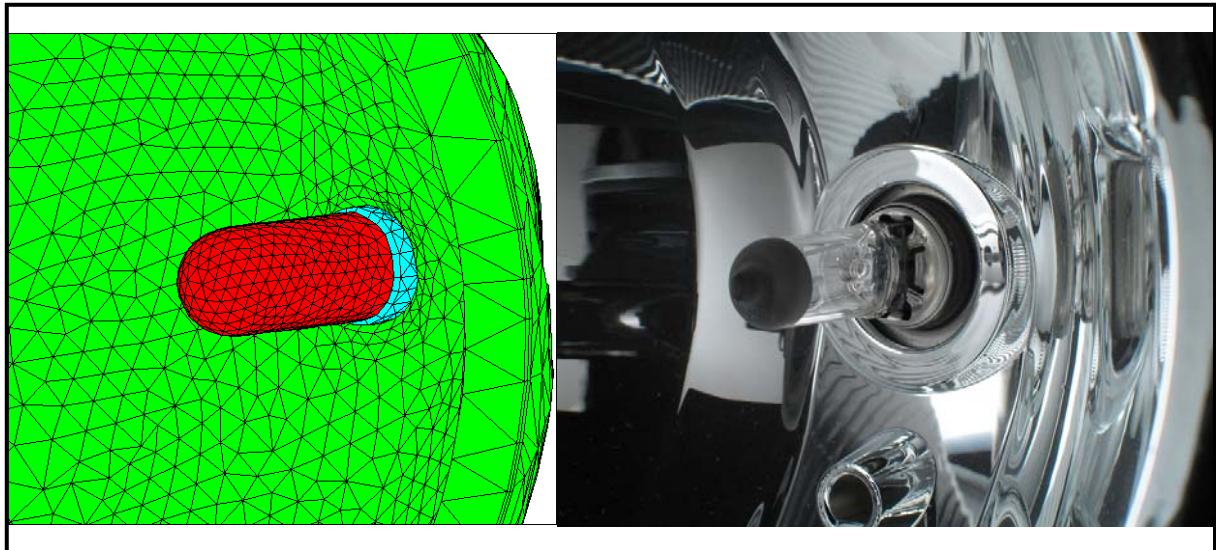


Bild 6.31: Geometrie des Leuchtmittels: Simulationsmodell und Realität

Weiterhin fehlt in diesem Modell die Quetschungszone und Teile des Metalls des Leuchtmittels. Dieses verändert das konvektive Verhalten und das Abstrahlverhalten des Glaskolbens. Darüber hinaus wird das Abstrahlverhalten des Leuchtmittels nur unzureichend über das vfs-Strahlungsmodell der CFD-Software abgebildet. Das Modell der gerichtet reflektierten Strahlung, in das die reale Abstrahlcharakteristik eingeht, wirkt in diesem Modell nur an der Abschluss Scheibe. Zur Verdeutlichung der dadurch entstehenden Unterschiede in der auf die Reflektorflächen einfallenden Strahlung ist in den Bildern 6.32 und 6.33 die einfallende Strahlungsleistung angegeben. Dazu ist in Bild 6.32 das Ergebnis der vfs-Methode und in Bild 6.33 das Ergebnis des CAL-Programmes qualitativ dargestellt. Bereits diese Darstellung zeigt, dass die vfs-Methode die Strahlungsverteilung an den Reflektoren aufgrund der fehlenden Abstrahlcharakteristik falsch wiedergibt. So ist bei der vfs-Methode die einfallende Strahlung am großen Reflektor größer als am kleinen, während sich diese bei dem Ergebnis des CAL-Programmes genau andersherum einstellt.

Abhilfe könnte hier eine Erweiterung des CAL-Programmes auch auf die inneren Bauteile eines Scheinwerfer liefern.

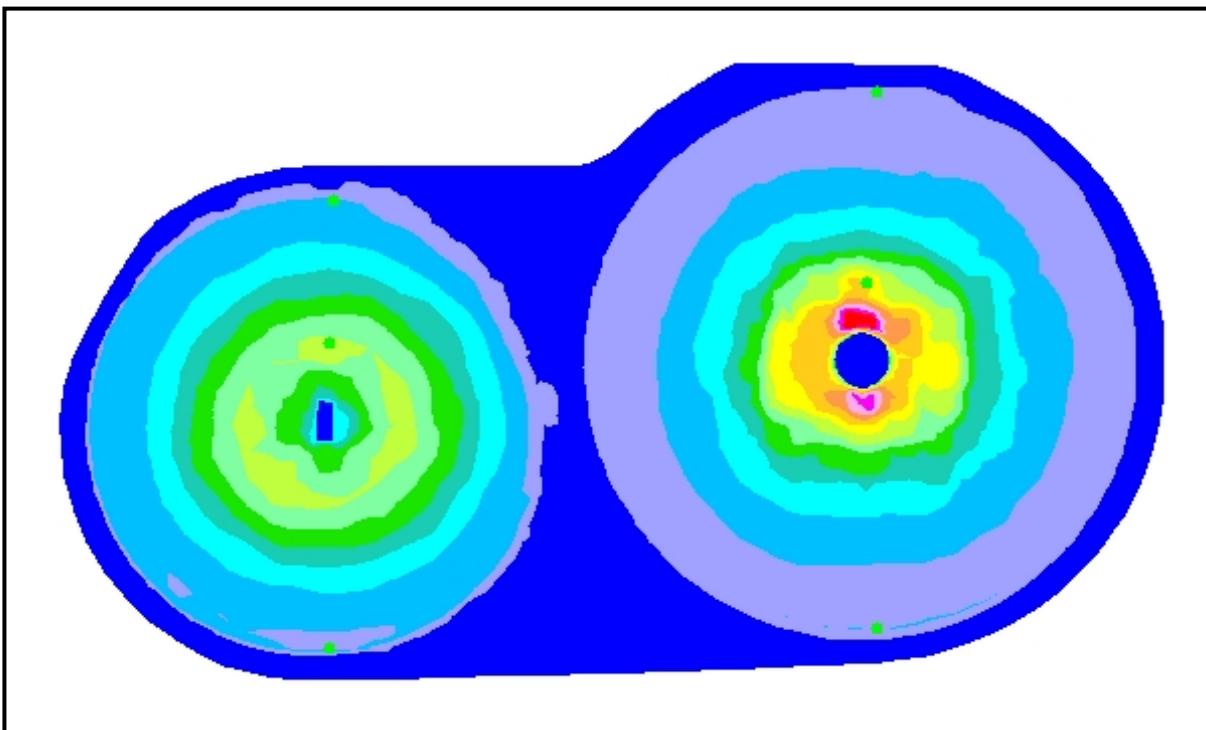


Bild 6.32: Einfallende Strahlungsenergie auf dem Reflektor mit vfs-Methode

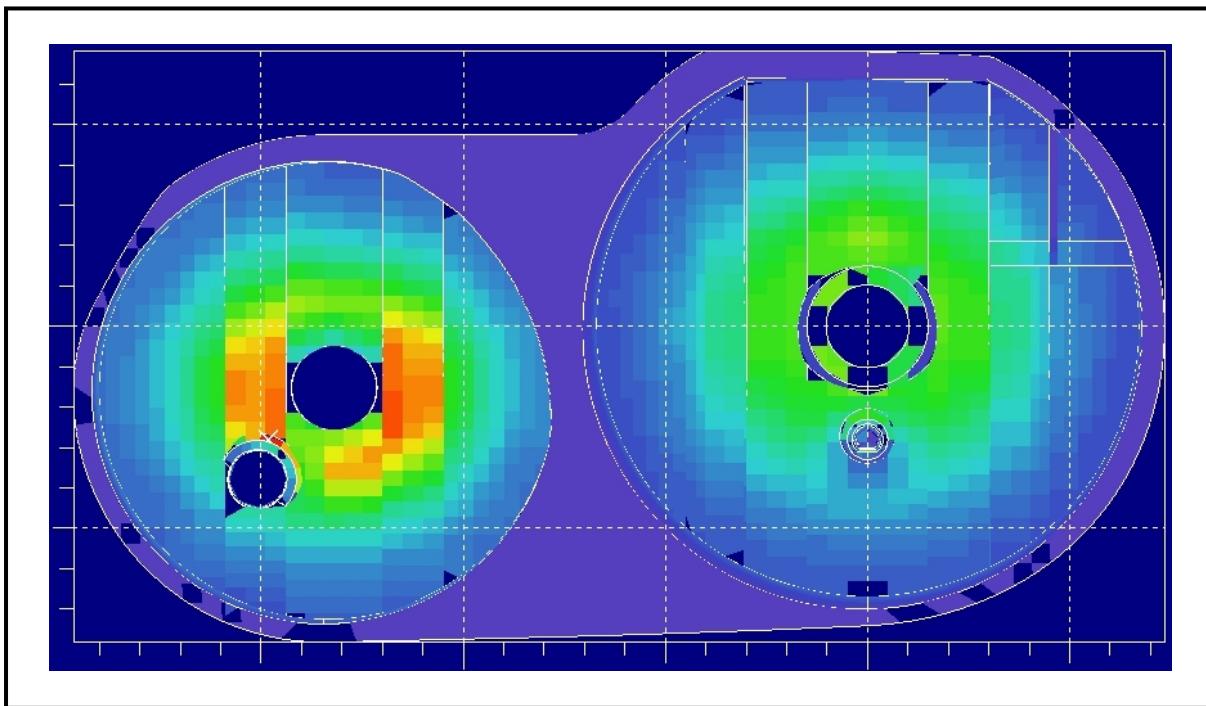


Bild 6.33: Beleuchtungsstärkeverteilung auf dem Reflektor mit CAL-Programm

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Lichttechnische Geräte gehören zu den wichtigsten Sicherheitskomponenten eines Automobils, deren Fehlbedienung oder Ausfall die Fahrzeuginsassen oder andere Verkehrsteilnehmer gefährden kann. Daher muss eine einwandfreie Funktion des Gerätes zu jeder Zeit gewährleistet sein. Die allgemein herrschende Kostensituation zwingt die Hersteller solcher Geräte zu einer fortlaufenden Optimierung der Entwicklung und Herstellung ihrer Produkte. Die immer kürzeren Entwicklungszeiten verlangen Methoden, mit denen Risiken und Fehler bereits in einem frühen Entwicklungsstadium erkannt und behoben werden können. Zur Reduzierung der Herstellungskosten ist es notwendig mit dem jeweils kosten-günstigsten Material, welches den geforderten Ansprüchen genügt, zu arbeiten. Materialwechsel sind jedoch während der Produktionsphase nicht immer möglich, so dass zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung die Machbarkeit geklärt werden muss. Diese Leistungen können heutzutage die unterschiedlichsten Simulationsprogramme liefern, die auf Basis der CAD-Daten und geeigneter Randbedingungen die Belastung der Geräte und Komponenten oder deren Werkstoffe zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung berechnen können.

Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, die Temperatur- und Strömungsverteilung in lichttechnischen Geräten realitätsnah zu simulieren und mögliche Probleme in einem frühen Stadium der Entwicklung aufzudecken. Dazu wird hier eine Methode entwickelt, mit deren Hilfe die in einem solchen System auftretenden Wärmetransportmechanismen nachgestellt werden können. Die Basis dafür bildet ein kommerzielles *Computational Fluid Dynamic*-Programm.

Der überwiegende Teil der eingesetzten lichttechnischen Geräte erzeugt das Licht mit Hilfe von Temperaturstrahlern. Diese Leuchtmittel haben den Mangel, dass sie nur einen geringen Teil der eingeleiteten elektrischen Leistung in sichtbare Strahlung umwandeln. Der Rest verlässt die Glühlampe als Wärme, wobei der größte Teil dieser Wärme als Wärmestrahlung transportiert wird.

Eine realitätsnahe Simulation der Temperaturverteilung in diesen Geräten ist nur möglich, wenn das Simulationsmodell und die Randbedingungen die Realität möglichst genau abbilden. Die Schwierigkeit, die hierbei auftritt, ist die beschränkte Größe des Simulationsmodells, da diese direkten Einfluss auf die Dauer der Simulation hat. Es ist also notwendig, das Modell auf das Nötigste zu reduzieren. Ein wichtiger Punkt dabei ist die Beschreibung der Ränder des Simulationsmodells. Hier sind zwei Systemgrenzen zu unterscheiden: Einmal die äußere, an der das System mit der Umgebung gekoppelt wird und an der die von außen auf das System wirkenden Gegebenheiten berücksichtigt werden. Diese wurde in der Arbeit mit Hilfe der Wärmeübergangskoeffizienten für die unterschiedlichen Gegebenheiten realisiert.

Die zweite oder innere Systemgrenze stellt das Leuchtmittel dar. Hier wird die eingeleitete elektrische Energie in Wärme umgewandelt und mit den entsprechenden Wärmetransportmechanismen im System verteilt. Es ergibt sich ein weiteres Problem, da das Modell des Leuchtmittels so gestaltet werden muss, dass der Umfang des gesamten Modells möglichst gering bleibt. Dazu wurden die von dem Leuchtmittel ausgesandten Wärmeströme ermittelt und zu einem minimierten Modell für die Randbedingung zusammengefasst.

Die Strahlung spielt im gesamten betrachteten System die zentrale Rolle. Das lichttechnische Gerät ist auf die optimale Verteilung dieser Strahlung ausgelegt. Neben der sichtbaren Strahlung wird auch die Wärmestrahlung auf dem gleichen Wege transportiert. Dieses kann zu einer Erwärmung von Bauteilen führen, die sich im Strahlengang des Systems befinden. Die meisten CFD-Programme weisen jedoch gerade bei den implementierten Modellen zur Simulation des Wärmetransports durch Strahlung große Unterschiede zur Realität auf, wobei besonders die Modelle für die gerichtet reflektierte Strahlung unzureichend sind. Dieses macht eine Erweiterung der Strahlungsberechnung notwendig. Dazu wurden die Ergebnisse eines *Computer Aided Lighting*-Programms so in das Simulationsmodell eingebunden, dass das Strahlungsmodell in den Bereichen, die besonders stark von der Strahlung belastet werden, die realen Vorgänge besser abbildet.

Zur Validierung der erstellten Simulationsmethode ist der Einsatz einer geeigneten Messtechnik unumgänglich. Zur Messung der Temperaturverteilung im System wurden die weitverbreiteten Methoden der berührenden Temperaturmessung mit Thermoelementen und die berührungslose Messung unter Benutzung eines Thermografiesystems verwendet. Schwieriger gestaltet sich der Einsatz von geeigneten Systemen zur Visualisierung der Strömungsverteilung im lichttechnischen System. Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten ist die Verwendung von berührend messenden Systemen nicht sinnvoll. Auch die bekannten berührungslos messenden Systeme stoßen hier an ihre Grenzen. Trotzdem ist es im Rahmen dieser Arbeit gelungen, erste Informationen über das Verhalten der Strömung zu gewinnen.

Der abschließende Vergleich der Messergebnisse mit den Simulationsergebnisse zeigt, dass sich die Realität gut wiedergeben lässt, und die Temperaturen und Strömungen in den kritischen Bereichen recht gut übereinstimmen. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass das Simulationsmodell für bestimmte Fragestellungen verbessert werden muss.

Ausblick

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich weiterführende Methoden entwickeln. Diese sind beispielsweise:

- Die Beschreibung der klimatischen Vorgänge in einem lichttechnischen System kann weiter ausgebaut werden und zur Simulation der Be- und Enttauvungsvorgänge an der Abschluss Scheibe eingesetzt werden.
- Durch eine Verbesserung des mathematischen Modells im Bereich der Leuchtmittel, evtl. durch Einsatz eines wendelgenauen Leuchtmittelmodells, kann die Temperaturverteilung auch im leuchtmittelnahen Bereich exakter beschrieben werden.
- Die Methode des Eintrags der Strahlungsenergie in die Abschluss Scheibe kann auf beliebige Bauteile im Inneren des Systems erweitert werden. So kann eine kritische Wärmeverbelastung dieser Bereiche durch gerichtet reflektierte Strahlung frühzeitig erkannt werden.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass die erarbeitete Methode die erwarteten Ergebnisse zur Simulation der Temperatur- und Strömungsverteilung in lichttechnischen Geräten liefert.

7 Literaturverzeichnis

- [1] **N.N.:** *VDI-Wärmeatlas Berechnungsblätter für den Wärmeübergang.*
5. Aufl.. VDI-Verlag, Düsseldorf 1988.
- [2] **BAEHR, H.-D.; STEPHAN, K.:** *Wärme- und Stoffübertragung.* 3. Auf..
Springer, Berlin 1998.
- [3] **N.N.:** *Star-CD Methodology.* Handbuch zum CFD-Tool Star-CD Version 3.10,
Computational Dynamics Ltd. London, 1999.
- [4] **N.N.:** *Sonderforschungsbericht 224 „Motorische Verbrennung“.* FH Aachen, 2001.
- [5] **Poppner, M.:** *Integration der gerichtet reflektierten Strahlung in der thermischen Simulation bei der CFD-Software STAR-CD.* Diplomarbeit, Universität Hannover 2002.
- [6] **Cerbe, G.; Hoffmann H.-J.:** *Einführung in die Wärmelehre.* 9. Aufl.. Carl Hanser, München, 1990.
- [7] **NOLTE, S.:** *Analyse des Temperatur- und Strömungsverhaltens eines AGIS-Faltwellenradiators mittels Finite-Elemente- Modellbildung und Simulation.* Studienarbeit, Universität Paderborn 1999.
- [8] **Maschkio, T.:** *Betauungssimulation eines Kfz-Scheinwerfers.* Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2001.
- [9] **Beitz, W.; Grote, K.-H. (Herausg.):** *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau.*
19. Aufl.. Springer, Berlin 1997.
- [10] **Merker, G.P.; Baumgarten C.:** *Fluid- und Wärmetransport, Strömungslehre.*
1. Aufl.. Teubner, Wiesbaden 2000.
- [11] **Hell, F.:** *Grundlagen der Wärmeübertragung.* VDI-Verlag, Düsseldorf 1973.

- [12] **Mühlbauer, A.**: *Wärmeübertragung*. Skript zur Vorlesung Technische Wärmelehre. Universität Hannover.
- [13] **Fletcher, C. A. J.**: *Computational Techniques for Fluid Dynamics. Volume 1*. 2. Aufl.. Springer, Berlin 2003.
- [14] **Krasenbrink, C.**: *Erarbeiten von Simulationsparametern für die thermische Simulation von Kfz-Scheinwerfersystemen mit der CFD-Software STAR-CD*. Diplomarbeit. FH Münster 2003.
- [15] **Tipler, P. A.**: *Physik*. 3. Aufl.. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1995.
- [16] **Wiße, D.**: *Simulation des transienten Abkühlvorgangs von Kfz-Scheinwerfern mittels der CFD-Software STAR-CD*. Diplomarbeit. FH Münster, 2003.
- [17] **Orear, J.**: *Physik*. Carl Hanser, München 1991.
- [18] **Gebald, C.**: *FEM für Historiker*. Infoplaner 1. 2003. CAD-FEM GmbH 2003.
- [19] **Jones, K.**: *Let's Start the Beginning: What's CFD?* www.adapco-online.com, 2003.
- [20] **Chenevier, C.**: *Thermal Simulation in Lighting Systems – 5 Days / 5 Degrees*. PAL Symposium 2001.
- [21] **Shiozawa, T; et al.**: *Analysis of Natural Convection Inside an Automotive Headlamp by Using CFD – Temperature Prediction of the Parts by SHT Method*. Society of Automotive Engineers, Paper 2001-01-0860, 2001.
- [22] **Poorman, T.; et al.**: *Automotive Lighting Thermal Performance Prediction Methods*. Society of Automotive Engineers, Paper 2001-01-0858, 2001.
- [23] **Moore, W. I.; Hilburger F. K.**: *Development of a CFD Model for Simulating Headlamp Humidity Clearing*. Society of Automotive Engineers, Paper 2001-01-0861, 2001.

- [24] **Büttner, H. J.; Wödenweber, B.**: *Benchmarking Evaluates and Improves System Performing- limiting Condensation in Headlamps*. R&D Review, Hella Lighting Technology, 1995.
- [25] **Hoines, L.; et al.**: *Effect of Exterior Airflow on Automotive Lamp Venting*. Society of Automotive Engineers, Paper 1999-01-0696, 1999.
- [26] **Bielecki, J.; et al.**: *The Effect of Environmental Conditions on Moisture Clearing Time in Automotive Lamps*. Society of Automotive Engineers, Paper 2003-01-0646, 2003.
- [27] **Renz, U.**: *Wärme- und Stoffübertragung*. Vorlesungsskript. RWTH Aachen, 2002
- [28] **N.N.**: *Montage- und Betriebsanleitung für Thermoelemente*. Druckschrift der Fa. Fischer-Rosemount.
- [29] **N.N.**: *User Manual Fluke Hydra Logger Series II*. Druckschrift der Fa. Fluke.
- [30] **Schuster N.; Kolobrodov V.**: *Infrarotthermographie*, Wiley-Voch, Berlin 2000.
- [31] **Glückert, U.**: *Erfassung und Messung von Wärmestrahlung*. Franzis, München 1992.
- [32] **N.N.**: *Laser Speckle Anemometrie (Particle Image Velocemetry PIV)*. www-isl.mach.uni-karlsruhe.de, 2004.
- [33] **Guenin, B. M.**: *Don't Underestimate Radiation in Electronics Cooling*. Electronics cooling, Volume 7, No. 1, 2001.
- [34] **Krause, T.**: *Texture-Mapping*. Vorlesungsskript. Universität Hannover, 1998.
- [35] **N.N.**: *Helios*. Hella KgaA Hueck und Co., Lippstadt 2002.

- [36] **N.N.**: *Leuchtmitteldatenblätter*. Druckschrift der Fa. OSRAM.
- [37] **N.N.**: *Kunststoffdatenblätter PC*. Druckschrift der Fa. Bayer.
- [38] **Mißelwitz, B.**: *Praktikumsbericht 09.2003*. Hella KgaA. Lippstadt, 2003.
- [39] **Klahold, J.**: *Praktikumsbericht 02.2004*. Hella KgaA. Lippstadt, 2004.
- [40] **Rösler, E.**: *Temperaturmessung: Reproduzierbare Aussage oder nur Interpolation zwischen Fixpunkten*. MSR Magazin 3/1999, Kassel 1999.
- [41] **N.N.**: *Deutsche Norm, Straßenfahrzeuge, Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe. DIN 70000*. Normenausschuß Kraftfahrzeuge im Deutschen Institut für Normung e.V., 1994.
- [42] **N.N.**: *Firmenpräsentation*. Hella KgaA Hueck & Co., Lippstadt 2004.

9 Formelzeichen und Konstanten

<u>Symbol</u>	<u>Erläuterung</u>	<u>Einheit</u>
a	Absorptionsgrad	-
A	Fläche	m^2
b	Korrekturfaktor	-
c	spezifische Wärmekapazität	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
C	absolute Wärmekapazität	J/K
d	Abstand	m
\vec{e}	Einheitsvektor	-
E	Beleuchtungsstärke	lux
Gr	<i>Grashof-Zahl</i>	-
h	spezifische Enthalpie	J/kg
H	Enthalpie	J
\tilde{k}	Wärmedurchgangskoeffizient	$(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$
l	charakteristische Länge	m
m	Masse	kg
\dot{m}	Masestrom	kg/s
Nu	<i>Nusselt-Zahl</i>	-
p	Druck	N/m^2
P	Leistung	W
Pr	<i>Prandtl-Zahl</i>	-
\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m^2
\dot{Q}	Wärmestrom	W
Q	Wärmeenergie	$\text{J} = \text{W}\cdot\text{s}$
r	Reflexionsgrad	-
R	Wärmewiderstand	W/m
Ra	<i>Rayleigh-Zahl</i>	-
Re	<i>Reynolds-Zahl</i>	-
s	Weg	m
t	Zeit	s
T	absolute Temperatur	K

<u>Symbol</u>	<u>Erläuterung</u>	<u>Einheit</u>
T_K	Temperatur der Kontaktfläche zur umgebenden Luft	°C
T_U	Temperatur der umgebenden Luft	°C
u	spezifische innere Energie	J/kg
U	innere Energie	J
w	Geschwindigkeit	m/s
x, y, z	Ortskoordinate	m
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m²·K)
β	Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K
ε	Emissionsgrad	-
λ	Wellenlänge	m
Λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
Φ	Strahlungsfluss	lm
ν	kinematische Viskosität	m²/s
ρ	Dichte	kg/m³
τ	Transmissionsgrad	-

Konstanten

<u>Symbol</u>	<u>Erläuterung</u>	<u>Wert</u>
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$3,00 \cdot 10^8$ m/s
g	Erdbeschleunigung	9,81 m/s²
h	Planck-Konstante (Wirkungsquantum)	$6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s
k	Boltzmann-Konstante	$1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²·K⁴)