

ENTWICKLUNG UND HERSTELLUNG NATURÄHNLICH VERZWEIGTER KÜHLKÖRPER FÜR LED-SYSTEME

Zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR-INGENIEURS
von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
des Karlsruher Instituts für Technologie
genehmigte
DISSERTATION
von

Dipl.-Ing. Christian Herbold

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Februar 2016

Hauptreferent: Prof. Dr. Cornelius Neumann

Korreferentin: Prof.ir. M.A. Ena Voûte



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Deutschland Lizenz (CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit.....	4
2	Grundlagen LED-System	7
2.1	Thermisches Management im LED-System	7
2.1.1	Systemkomponenten.....	8
2.1.2	Temperaturabhängigkeit der LED	11
2.2	Messungen am LED-System	17
2.2.1	Bestimmung der LED-Chiptemperatur	17
2.2.2	Bestimmung optischer Größen	21
2.3	Thermische Simulationen	23
2.4	Wärmetransportmechanismen	25
2.4.1	Wärmeleitung.....	25
2.4.2	Konvektion	29
2.4.3	Wärmestrahlung	32
3	Lösungen aus der Natur	35
3.1	Funktion und Ästhetik im LED-System	35
3.2	Problemstellung.....	37
3.3	Bioinspiration.....	41
3.3.1	Wärmeabfuhr nach dem Vorbild der Natur	44
3.4	Lösungen für das LED-System	47

3.4.1	Probleme der Wärmeabfuhr	47
3.4.2	Natürliche Lösungen	50
3.4.3	Näherungsmodell im Vergleich	66
4	Entwurf eines LED-Systems	73
4.1	Entwicklungsvorgaben	74
4.2	Geometrieauslegung	75
4.2.1	Ähnlichkeit und Symmetrie	76
4.2.2	Art der Verzweigung	77
4.2.3	Breite der Äste und Anzahl der Verzweigungen	79
4.2.4	Anzahl der Äste	86
4.2.5	Position der Verzweigungen	88
4.2.6	Form der Verzweigung	92
4.2.7	Kerndurchmesser	96
4.2.8	Höhe	98
4.2.9	Verzweigte Kühlkörpergeometrie	100
4.2.10	Nicht Verzweigte Kühlkörpergeometrie	101
4.3	Funktionsintegration	103
4.3.1	Formgebung	104
4.3.2	Optisches System	107
4.3.3	Kabeldurchführung und LED-Aufnahme	117
4.3.4	Wandstärken und Trennebene	118
4.4	Erwartete Thermische Leistungsfähigkeit	120
4.5	Großer Bauraum	127

5	Fertigung.....	131
5.1	Fertigungsverfahren	131
5.1.1	Druckgießen	132
5.1.2	Feingießen.....	134
5.1.3	Spritzgießen.....	135
5.2	Pulverspritzgießen.....	137
5.3	Werkstoffe.....	139
5.4	Spritzgießwerkzeug.....	144
5.5	Abmusterung	147
5.5.1	Zylinder.....	148
5.5.2	Leuchten-Kühlkörper.....	152
5.5.3	Entbindern und Sintern	155
5.5.4	Nachbearbeitung	158
6	Charakterisierung und Bewertung	161
6.1	Geometrie.....	161
6.1.1	Zylinderförmige Kühlkörper	162
6.1.2	Leuchten-Kühlkörper.....	165
6.2	Thermische Leistungsfähigkeit.....	168
6.2.1	Zylinderförmige Kühlkörper	170
6.2.2	Leuchten-Kühlkörper.....	173
6.3	Optische Leistungsfähigkeit.....	175
6.4	Erscheinungsbild und Herstellungsverfahren	182
6.5	Kosten.....	186

6.6	Zusammenfassende Bewertung	192
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	197
I	Anhang	203
	Anhang A: Zeichnungen	203
	Anhang B: Strukturfunktionen	206
	Anhang C: Lichtstärkeverteilungskurven.....	210
II	Veröffentlichungen.....	213
III	Betreute Arbeiten.....	217
IV	Danksagung.....	219
V	Literaturverzeichnis	221

Kapitel 1

EINLEITUNG

Im Jahr 1927 veröffentlichte Oleg Losev die erste wissenschaftliche Arbeit zum Thema Lumineszenzdioden [1]. Er untersuchte darin das 20 Jahre zuvor von Henry J. Round beschriebene Phänomen der Elektrolumineszenz [2] und sah bereits vielfältige Anwendungsmöglichkeiten dieser neuen Technologie, zum Beispiel zum Einsatz in der Telekommunikation. Nick Holonyak erfand 1962 die heute bekannte Leuchtdiode (kurz LED für *Light Emitting Diode*) [3], deren Lichtausbeute seitdem von weniger als $0,1 \text{ lmW}^{-1}$ auf mehr als 100 lmW^{-1} gesteigert werden konnte. Zusammen mit der Entwicklung unterschiedlicher Halbleitermaterialien und Leuchtstoffe werden dadurch die Einsatzbereiche der LED, die Losev sah, heute vor allem durch Anwendungen in der Beleuchtungstechnik ergänzt. Dabei profitiert die LED im Vergleich zu herkömmlichen Technologien, wie Glüh- oder Leuchtstofflampen, vor allem von ihrer hohen Effizienz und langen Lebensdauer und ist deshalb inzwischen unverzichtbar für die Entwicklung ressourcenschonender Beleuchtungslösungen [4].

1.1 MOTIVATION

Die Effizienz und die Lebensdauer der LED werden entscheidend von den Betriebsbedingungen beeinflusst, bei denen die LED eingesetzt wird. Unabhängig vom verwendeten Halbleitersystem trägt eine geringe Betriebstemperatur zu einer hohen Effizienz und einer langen Lebensdauer bei. Im Gegensatz zu einer geringen Betriebstemperatur stehen jedoch die Anforderungen moderner Beleuchtungssysteme gleichzeitig eine hohe Leistung und eine geringe Baugröße aufzuweisen. Die Entwicklung von leistungsfähigen LED-Systemen ist deshalb immer verbunden mit der Frage nach einer hohen Wärmeabfuhr auf kleinem Raum. Ergänzt wird diese technische Fragestellung zum einen durch die Frage nach der Herstellbarkeit, zum anderen durch die Notwendigkeit eines ästhetischen Erscheinungsbilds des LED-Systems. Nur so kann es letztendlich erfolgreich in der Allgemeinbeleuchtung eingesetzt werden (vergleiche [5]).

Die Verbindung von hoher technischer Leistungsfähigkeit und hohem ästhetischem Wert legt den Blick in die Natur nahe. Dort finden sich Lösungen, die im Laufe der Evolution während vielen Millionen Jahren angepasst wurden und spezifische Aufgaben effizient erfüllen. Gleichzeitig zeigen diese Lösungen immer auch die Schönheit, die die Natur in allen ihren Ausformungen mit sich bringt. Lassen sich Vorbilder aus der Natur für die Wärmeabfuhr in LED-Systemen nutzen, könnten vorteilhafte Lösungen für die Verbindung von Technik und Ästhetik entstehen. Finden sich solche Lösungen, muss die

Überführung in ein reales LED-System mit allen notwendigen Komponenten gelingen, um die Vorteile gewinnbringend nutzen zu können. Die Berücksichtigung der Herstellungstechnologie ist deshalb ein entscheidender Aspekt bei der Entwicklung der Systeme. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Herstellbarkeit natürlich inspirierter Geometrien dar, die in geeigneten Materialien und Stückzahlen zu fertigen sein müssen. Neben der technischen Funktion muss das Bauteil auch die Anforderungen an das Erscheinungsbild erfüllen und stellt deshalb hohe Ansprüche an die Fertigungsqualität. Diese könnte mit Hilfe eines speziellen Fertigungsverfahrens, des Pulverspritzgießens, erreicht werden. Neben einer großen Freiheit in der Formgebung, bietet diese Technologie die Möglichkeit der Fertigung von endkonturnahen Bauteilen mit hoher Oberflächengüte in einer Vielzahl von Materialien wie Metallen und Keramiken. Die mechanischen und stofflichen Eigenschaften der Bauteile sind dabei vergleichbar mit denen konventioneller Metall- und Keramikteile [6]. Das Pulverspritzgießen wird bisher vorwiegend für die Fertigung von kleinen, hochpräzisen Bauteilen in großen Stückzahlen eingesetzt. Der Einsatz dieses Verfahrens bei der Fertigung von Kühlkörpern für LED-Systeme böte grundsätzlich neue Möglichkeiten für Technik und Design und würde dadurch die Herstellung ästhetischer Bauteile mit natürlicher Formgebung ermöglichen.

Gelingt die Nutzung natürlicher Vorbilder für die Wärmeabfuhr von LEDs, deren Umsetzung in ein vollständiges LED-System und letztendlich dessen Herstellung, ist zu erwarten, dass im Gegensatz zu

herkömmlichen Lösungen die Effizienz und vor allem die Lebensdauer der LED erhöht werden können und gleichzeitig ein ästhetisch hochwertiges Erscheinungsbild entsteht. Für die Allgemeinbeleuchtung ergäbe sich damit ein außergewöhnliches Produkt, das alle erforderlichen Eigenschaften in sich vereint und in besonderem Maß umsetzt.

1.2 ZIEL UND AUFBAU DER ARBEIT

Die vorliegende Arbeit soll den kompletten Entwicklungsprozess eines von der Natur inspirierten LED-Systems darstellen, das sich gleichermaßen auf dem Gebiet der Technik wie auf dem Gebiet des Designs bewegt. Dabei soll sie zunächst die grundlegende Problemstellung analysieren und allgemeine Methoden zu deren Lösung bereitstellen. Anhand der Auslegung eines beispielhaften LED-Systems für die Allgemeinbeleuchtung sollen die allgemeinen Methoden für die spezielle Aufgabenstellung verwendet und unter Berücksichtigung der Möglichkeiten des Pulverspritzgießens als Fertigungsverfahren zu einem in großen Stückzahlen herstellbaren LED-System ausentwickelt werden. Die seriennahe Fertigung von Musterteilen soll die Eignung des Herstellungsverfahrens untersuchen und Bauteile zur messtechnischen Überprüfung der Leistungsfähigkeit liefern. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit und des Erscheinungsbilds des gefertigten LED-Systems werden um die Kostenbetrachtung ergänzt, um die Eignung des Pulverspritzgießens für die Herstellung von LED-Systemen zu bewerten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zum einen dem technischen Entwickler die Potenziale natürlich verzweigter Strukturen für die Wärmeabfuhr in LED-Systemen aufzuzeigen, ihn bei der Entwicklungsarbeit zu unterstützen und ihm Hinweise auf einzelne Aspekte des Designs zu geben. Zum anderen soll die vorliegende Arbeit Produktdesignern die technischen Details zur Wärmeabfuhr mit verzweigten Strukturen liefern und ihnen helfen technische Fragestellungen von Anfang an im Produktdesign zu berücksichtigen. So ist es Anspruch der vorliegenden Arbeit, als Schnittstelle zwischen beiden Disziplinen zu dienen und Basis für die Entwicklung unterschiedlichster LED-Systeme zu sein.

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit orientiert sich an der Reihenfolge der Entwicklungsschritte von der Problemstellung bis hin zum seriennah gefertigten LED-System. In Kapitel 2 wird dazu zunächst der grundlegende Aufbau eines LED-Systems im Hinblick auf das thermische Management erläutert sowie Grundlagen zu thermischen Simulationen, Wärmetransportmechanismen und Messungen thermischer und optischer Größen beschrieben, wie sie bei der Systemauslegung und -bewertung zum Einsatz kommen.

Die Problemanalyse und die Lösungen aus der Natur sind Inhalte von Kapitel 3. Zur Beschreibung der Lösungen wird dabei ein Näherungsmodell vorgestellt, das die Leistungsfähigkeit verzweigter Strukturen zur Wärmeabfuhr bewertet. Der Vergleich dieses Näherungsmodells mit genaueren thermischen Simulationen schließt das Kapitel ab und bildet die Grundlage für den Entwurf von verzweigten Kühlkörpern in Kapitel 4. Dabei wird die Vorgehensweise für die

Auslegung einer im Pulverspritzguss herstellbaren, verzweigten Struktur dargestellt, indem die Vorgaben und Einschränkungen aus dem Fertigungsverfahren Berücksichtigung finden (Kapitel 4.2). Neben zylinderförmigen Musterteilen, die den direkten Vergleich zwischen verzweigter und nicht verzweigter Geometrie ermöglichen, wird ein vollständiges LED-System entwickelt. Das beinhaltet sowohl die Auslegung des optischen Systems als auch die Integration weiterer Funktionen in das Bauteil (Kapitel 4.3). Am Ende des Kapitels stehen die Geometrie-Daten für die Herstellung der Bauteile zur Verfügung. Das Herstellungsverfahren wird in Kapitel 5 zunächst in Verbindung mit den verwendeten Materialien beschrieben, bevor Details zur eigentlichen Fertigung und der Nachbearbeitung der einzelnen Bauteile dargestellt werden.

Kapitel 6 beinhaltet die Charakterisierung der hergestellten Bauteile sowohl in Bezug auf die thermische und optische Leistungsfähigkeit als auch auf das erreichte Erscheinungsbild. Daneben werden die Kosten für die Herstellung betrachtet, um das Herstellungsverfahren, genau wie die verzweigten Strukturen, abschließend für die Anwendung für LED-Systeme zu bewerten.

Die Arbeit schließt mit Kapitel 7, in dem die Kernaussagen zusammengefasst und in einem Ausblick Fragestellungen für zukünftige Arbeiten formuliert werden

Kapitel 2

GRUNDLAGEN LED-SYSTEM

Je nach Anwendung unterscheiden sich LED-Systeme in der Ausführung ihrer einzelnen Bauteile. Jedoch werden in jedem LED-System Komponenten mit den gleichen grundlegenden Funktionen verbaut. Dieses Kapitel stellt diese Komponenten vor allem in Bezug auf das thermische Management dar und beschreibt die Temperaturabhängigkeit von LEDs. Weiterhin werden thermische und optische Messungen an LED-Systemen, sowie thermische Simulationen erläutert, die zur Entwicklung von LED-Systemen eingesetzt werden. Im Hinblick auf diese Entwicklung werden im letzten Abschnitt die Wärmetransportmechanismen beschrieben, auf welche in den darauffolgenden Kapiteln bei der Auslegung des thermischen Managements, zurückgegriffen wird.

2.1 THERMISCHES MANAGEMENT IM LED-SYSTEM

Je höher ihre Temperatur, umso stärker sind die negativen Auswirkungen auf die LED. Die zwingende Voraussetzung für den zuverlässigen und effizienten Betrieb einer LED ist deshalb der Betrieb mit möglichst geringer Temperatur bei Einhaltung der vorgegebenen

maximalen LED-Temperatur. Insbesondere bei leistungsstarken Systemen, in denen eine hohe Verlustleistung anfällt, muss daher ein Großteil der Systemkomponenten mit dem Ziel der Verringerung der LED-Temperatur ausgelegt werden. Diese Komponenten bilden das thermische Management im LED-System, ohne welches ein dauerhafter Betrieb nicht möglich ist.

2.1.1 SYSTEMKOMPONENTEN

Allgemein lassen sich LED-Systeme in wenige Hauptbestandteile zerlegen, die in der Regel unabhängig vom Einsatzzweck sind, sei es beispielsweise ein LED-System in der industriellen Prozesstechnik, der automobilen Lichttechnik oder der Allgemeinbeleuchtung¹. Der wesentliche Unterschied liegt oftmals lediglich in der Ausführung der einzelnen Bauteile und deren Details.

Kernbestandteil eines jeden LED-Systems ist die Lichtquelle als solche, die meist als gehäuster LED-Chip in das System integriert ist. Durch das Gehäuse wird die mechanische, elektrische und thermische Kontaktierung des LED-Chips vereinfacht und die Möglichkeit geschaffen, die LED mit automatisierten Prozessen der Aufbau- und Verbindungstechnik zu verarbeiten. Durch die Entwicklung hin zu

¹ mit Allgemeinbeleuchtung werden im Folgenden Anwendungen für allgemeine Beleuchtungsaufgaben im Innenraum bezeichnet, beispielsweise die Wohnraumbeleuchtung mit verschiedenen Beleuchtungsaufgaben am Ess-, Couch- oder Schreibtisch.

immer kleineren und dichter gepackten Systemen besteht die Notwendigkeit das Gehäuse so klein wie möglich auszuführen. Bei aktuellen LEDs besteht es deshalb oftmals nur aus einer Trägerplatte auf die der LED-Chip aufgebracht ist, sowie einer Kunststofflinse, die die Lichtauskopplung verbessert und zusätzlich den Chip vor mechanischen Einflüssen schützt. Diese Primäroptik als Teil des LED-Gehäuses ist gleichzeitig Teil der optischen Komponente des LED-Systems. Zusammen mit der Sekundäroptik sorgt sie dafür, dass die für die jeweilige Anwendung gewünschte Lichtverteilung erzeugt wird. Als Sekundäroptik kommen häufig TIR (*Total Internal Reflection*)-Optiken oder Reflektoren zum Einsatz.

Zum Betrieb der LED muss notwendigerweise eine elektrische Kontaktierung des LED-Chips erfolgen. Je nach verwendeter Halbleitertechnologie wird der LED-Chip mittels Bond-Drähten oder, beispielsweise in Flip-Chip-Technik, direkt kontaktiert. Die elektrischen Kontakte werden in der Regel auf Löt pads an die Außenseite des LED-Gehäuses geführt. Dort wird die elektrische Verbindung zum Schaltungsträger hergestellt, auf dem oftmals die weiteren elektrischen Komponenten des LED-Systems integriert oder zumindest Kontaktierungsmöglichkeiten zu diesen Komponenten vorgesehen sind.

Neben der gewünschten Emission von Licht entsteht in der LED durch die anfallende Verlustleistung Wärme, die vom LED-Chip abgeführt werden muss, um die thermische Zerstörung der LED zu verhindern. Dazu werden im Gehäuse der LED thermisch gut leitende Materialien verwendet, die einen geeigneten thermischen Pfad vom

LED-Chip zur Gehäuseaußenseite herstellen. Die Anbindung dieses Pfads an das System erfolgt bei der Montage der gehäusten LED auf den Schaltungsträger. Dieser muss daher neben der elektrischen und mechanischen Kontaktierung auch die thermische Anbindung der LED ermöglichen und für die Ableitung der Wärme an den Kühlkörper entsprechend ausgerüstet sein. Der Kühlkörper wiederum dient zur Abfuhr der Wärme vom Schaltungsträger an die Umgebung. Dazu stellt er die thermische Verbindung zwischen der lokalen Wärmequelle und seinen Oberflächen her, an denen der Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet. Eingesetzt werden dafür Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit wie beispielsweise Aluminium, sowie große Oberflächen zum Wärmeaustausch, um die notwendige Wärmeabfuhr zu gewährleisten.

Die elektrische Versorgung der LED erfolgt im Allgemeinen durch ein entsprechend der Anwendung ausgelegtes Betriebsgerät. Dieses kann neben der Stromversorgung auch der Umsetzung von Steuerungssignalen dienen und ist entweder als externe Komponente ausgeführt oder im eigentlichen LED-System integriert. In letzterem Fall muss die dadurch zusätzlich ins System eingebrachte Verlustleistung bei der thermischen Auslegung berücksichtigt werden.

Neben den Komponenten selbst tragen die Schnittstellen dazwischen zur thermischen Leistungsfähigkeit des Systems bei. Sie beeinflussen den thermischen Kontaktwiderstand an den Materialübergängen und somit an mehreren Stellen den Widerstand des thermischen Pfads vom LED-Chip zu den Oberflächen des Kühlkörpers. Bereits bei der Auswahl der Materialien für die Komponenten des Systems

müssen deshalb die Möglichkeiten der Materialanbindung berücksichtigt werden. Nur dann kann der thermische Gesamtwiderstand des Systems geringgehalten werden.

2.1.2 TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER LED

Die Temperatur beeinflusst nahezu alle Parameter der LED. Für die Effizienz und Lebensdauer eines LED-Systems ist ihr Einfluss auf den Lichtstrom entscheidend. Dabei wird zwischen reversiblen und irreversiblen Rückgang des Lichtstroms unterschieden.

REVERSIBLER LICHTSTROMRÜCKGANG

Beim reversiblen Rückgang reduziert sich der Lichtstrom mit dem Anstieg der LED-Temperatur und steigt mit deren Abfall wieder auf den Ausgangswert an. Dieses Verhalten folgt aus der Temperaturabhängigkeit verschiedener Rekombinationsraten im Halbleiter. Für die Beschreibung der Abhängigkeit wurde in [7] mittels Experimenten ein exponentieller Zusammenhang bestimmt, der sich berechnet zu

$$\Phi(T) = \Phi(T_u) e^{-\frac{T-T_u}{T_1}} \quad (2.1)$$

Dabei beschreibt T_1 eine materialabhängige charakteristische Temperatur, die für typische LED-Halbleitermaterialien zwischen 95 K für rote LEDs aus AlGaInP/GaAs, 295 K für grüne InGaIn/GaN-LEDs

und 1.600 K für blaue InGaN/GaN-LEDs liegt, wie in Abbildung 2.1 dargestellt. [8] ergänzt diese Abhängigkeit für weitere Materialien. Im Vergleich zu roten und grünen LEDs zeigen blaue LEDs mit $T_1 = 1.600$ K die geringste Temperaturabhängigkeit des Lichtstroms. Dieser Vorteil ist oftmals auch bei weißen LEDs nutzbar, da sie größtenteils auf phosphorkonvertierten blauen LEDs beruhen.

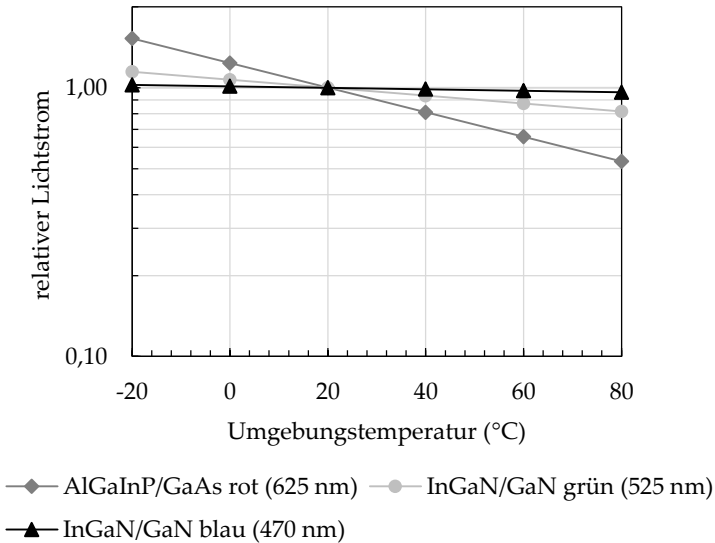


Abbildung 2.1: Relativer Lichtstrom in Abhängigkeit der LED-Temperatur für unterschiedliche Halbleitermaterialien (nach [7])

IRREVERSIBLER LICHTSTROMRÜCKGANG

Der irreversible Rückgang des Lichtstroms einer LED zeigt sich während deren Lebensdauer von vielen tausend Stunden als unumkehrbarer Prozess. Im Betrieb nimmt dabei trotz konstanter Betriebsparameter und Umgebungsbedingungen der Lichtstrom ab. Ursache dafür sind Veränderungen im Halbleiter, die veränderte Rekombinationsraten hervorrufen und zusätzlich durch Veränderungen an den eingesetzten Phosphorsystemen ergänzt werden können.

Der emittierte Lichtstrom der LED wird durch die strahlende Rekombination von Elektronen und Löchern im Halbleitermaterial, bei der die Energie der Ladungsträger in Photonen umgewandelt wird, verursacht. Neben diesem erwünschten Prozess finden unerwünschte Rekombinationsprozesse wie die Oberflächen-, Auger- und Shockley-Read-Hall-Rekombination statt, bei denen Phononen entstehen, die die Erwärmung des Halbleiters bewirken [7]. Mit zunehmender Lebensdauer steigt vor allem der Anteil der Shockley-Read-Hall-Rekombination, weshalb der Anteil der strahlenden Rekombination zurückgeht. Die Shockley-Read-Hall-Rekombination wird durch Fremdatome und Fehlstellen im Halbleiter verursacht, durch die zusätzliche Zustände innerhalb der Bandlücke entstehen. Über diese Zustände kann ein Ladungsträger vom Leitungs- ins Valenzband relaxieren und trägt damit nicht zur Strahlungserzeugung bei. Die Fremdatome und Fehlstellen werden einerseits bei der Herstellung des Halbleitermaterials eingebracht, diffundieren andererseits so

lange in den Halbleiter, bis die Defektdichte einen stabilen Zustand erreicht hat. Dieser kann über die Boltzmann-Konstante k_B bestimmt werden und hängt neben der Aktivierungsenergie E_a von der Gittertemperatur T ab. Die temperaturabhängige Defektdichte N_T berechnet sich für den stabilen Zustand gemäß [7] zu

$$N_T = N e^{-\frac{E_a}{k_B T}} \quad (2.2)$$

Mit fortschreitendem Diffusionsprozess erhöht sich so der Anteil der Shockley-Read-Hall-Rekombination und verringert den der strahlenden Rekombination. Dies hat den irreversiblen Rückgang des Lichtstroms mit zunehmender Lebensdauer zur Folge.

Zusätzlich zu diesem Rückgang des Lichtstroms kann es im Betrieb der LED zur Degradation des Phosphors oder anderer optischer Materialien der LED kommen [9]. Auch diese Degradation zeigt eine Temperaturabhängigkeit und führt beispielsweise zur Verringerung des Wirkungsgrads des Phosphors [10]. Eine Beschreibung ist aufgrund der Vielzahl an Materialsystemen jedoch nicht allgemein möglich, weshalb jeweils die konkreten Herstellerangaben Berücksichtigung finden müssen. Abbildung 2.2 zeigt beispielhaft die Lebensdauerprojektion des LED-Herstellers Cree für verschiedene LED-Temperaturen. Dabei ist der Rückgang des Lichtstroms über der Zeit aufgetragen. Wie in der Darstellung wird als Ende der Lebensdauer häufig der Zeitpunkt definiert, zu dem der Lichtstrom auf 70 % des Anfangslichtstroms zurückgegangen ist. So führt beispielsweise eine

um 10 K erhöhte LED-Temperatur von 95 °C auf 105 °C zu einer Verringerung der Lebensdauer um 8.000 h auf 37.500 h, was die starke Temperaturabhängigkeit der Lebensdauer verdeutlicht.

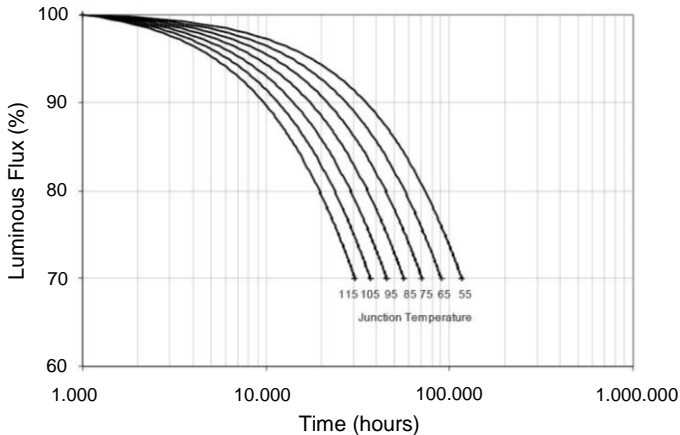


Abbildung 2.2: Projektion der Lebensdauer einer Cree XR-E white (700 mA) für unterschiedliche LED-Temperaturen [11]

ELEKTRISCHE PARAMETER

Neben dem Lichtstrom zeigen annähernd alle Betriebsparameter der LED eine Abhängigkeit von der Temperatur. So sind auch die zum Betrieb wichtigen elektrischen Größen Vorwärtsstromstärke und Vorwärtsspannung temperaturabhängig. Vergleichbar einem idealen

pn-Übergang kann die Vorwärtsstromstärke I_V der LED mittels der Shockley-Gleichung beschrieben werden [11].

$$I_V = I_S \left(e^{\frac{eU_V}{k_B T}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Darin bezeichnet I_S den Sättigungsstrom, U_V die Vorwärtsspannung und e die Elementarladung. Dementsprechend verschiebt sich die Spannungs-Strom-Kennlinie einer LED bei ansteigender Temperatur hin zu kleineren Vorwärtsspannungen.

Die exponentielle Abhängigkeit von Vorwärtsstromstärke und Vorwärtsspannung führt dazu, dass der Betrieb der LED im überwiegenden Teil der Anwendungen bei konstanter Vorwärtsstromstärke erfolgt. Während im Betrieb mit konstanter Vorwärtsspannung eine geringe Temperaturänderung eine exponentielle Änderung der Vorwärtsstromstärke bedingt, zeigt sich im Betrieb mit konstanter Vorwärtsstromstärke eine lineare Abhängigkeit der Vorwärtsspannung von der Temperatur. Dies ergibt sich durch Umstellen von Gleichung (2.3) mit

$$U_V = \ln \left(1 + \frac{I_V}{I_S} \right) \frac{k_B T}{e} \quad (2.4)$$

Die Auswirkungen der Temperatur auf den Lichtstrom sind dementsprechend im Betrieb mit konstanter Vorwärtsstromstärke deutlich geringer.

Die Abhängigkeit zwischen Temperatur und Vorwärtsspannung kann zur Temperaturmessung verwendet werden [12]. Die Messung der thermischen Transienten macht diesen Zusammenhang zu

Nutze, um eine genaue Aussage über die thermischen Eigenschaften der LED zu ermöglichen. Dieses Verfahren wird in Kapitel 2.2.1 näher beschrieben.

2.2 MESSUNGEN AM LED-SYSTEM

Zur Charakterisierung der Komponenten eines LED-Systems kommen verschiedene Messverfahren zur Anwendung. Nachfolgend werden die thermische Transientenmessung zur Bestimmung der Chiptemperatur im LED-System sowie die optische Goniophotometrie zur Bestimmung des Lichtstroms und der Lichtstärkeverteilung eines LED-Systems beschrieben.

2.2.1 BESTIMMUNG DER LED-CHIPTEMPERATUR

Die thermische Transientenmessung bedient sich der Temperaturabhängigkeit der Vorwärtsspannung, um die Temperatur des LED-Chips zu bestimmen [13]. Dabei wird aus der Messung der Vorwärtsspannung der LED im Betrieb mit konstanter Stromstärke auf die Änderung der Chiptemperatur geschlossen. Diese Änderung findet zwischen zwei thermischen Zuständen statt, so dass eine absolute Kalibrierung auf die LED nicht notwendig ist. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass kein Sensorelement in das LED-System eingebracht

werden muss. Das System muss deshalb für die Messung nicht verändert werden, wie es beispielsweise bei der Montage von Kontaktfühlern der Fall ist.

Auch wenn keine absolute Kalibrierung notwendig ist, muss das System auf die Temperaturabhängigkeit der Vorwärtsspannung der verwendeten LED kalibriert werden. Dazu wird die LED mit der konstanten Stromstärke betrieben, bei der auch die eigentliche Messung erfolgt. Schrittweise wird dann die Umgebungstemperatur verändert und nach der thermischen Stabilisierung jeweils die Vorwärtsspannung gemessen. Da Umgebungstemperatur und Chiptemperatur linear zusammenhängen, wird mit der Änderung der Umgebungstemperatur die Chiptemperatur ebenso verändert. Die Änderung der Umgebungstemperatur erfolgt im Messsystem in einem Thermostat dessen Kühlfläche mittels eines Peltierelements auf einer konstanten einstellbaren Temperatur gehalten wird. Die Entwärmung der LED erfolgt vollständig über den Thermostat, weshalb dessen Temperatur als Umgebungstemperatur angesehen werden kann.

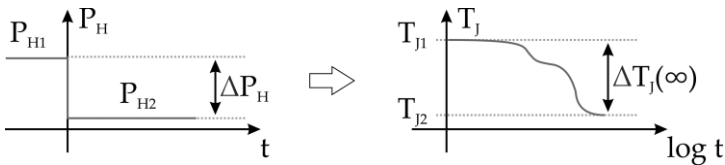


Abbildung 2.3: Umschalten der Heizleistung P_H und Auswirkung auf die Temperatur der LED T_J (nach [13])

Für die LED wird mit Gleichung (2.4) eine lineare Abhängigkeit der Vorwärtsspannung zur LED-Temperatur erwartet. Die Steigung dieser Geraden lässt sich aus den aufgezeichneten Messdaten ermitteln und wird als Sensitivität (Einheit VK^{-1}) bezeichnet. Sie ist aufgrund der unterschiedlichen Materialparameter für jedes Bauteil separat zu bestimmen.

Zur Vorbereitung der eigentlichen Messung wird die LED zunächst so lange mit einer konstanten Heizstromstärke I_1 betrieben, bis sie sich im thermischen Gleichgewicht T_{j1} befindet. Die dabei entstehende thermische Verlustleistung wird mit P_{H1} bezeichnet. Die Messung der Vorwärtsspannung startet mit der Änderung der Stromstärke von I_1 auf I_2 , die jetzt die thermische Verlustleistung P_{H2} ins System einbringt und dieses dem neuen thermischen Gleichgewicht T_{j2} zustreben lässt. Der dabei mit einer Auflösung von einer Mikrosekunde aufgezeichnete zeitliche Verlauf der Änderung der Chip-temperatur stellt die thermische Transiente dar. Abbildung 2.3 zeigt diese schematisch als Folge des dargestellten Leistungssprungs. Mittels der Sensitivität der LED lässt sich über die gemessene Spannungsdifferenz die Temperaturänderung im System bestimmen. Die Messung erfolgt, wie dargestellt, nach einem Sprung von einer höheren auf eine niedrigere Leistung, was bedeutet, dass die Abkühlkurve des LED-Systems gemessen wird. Dies hat den Vorteil, dass zur Messung das geringere Leistungsniveau verwendet werden kann, das eine höhere Stabilität durch die Spannungsänderung aufweist. [8] vergleicht die Messfehler bei Messungen der Abkühl- und Aufheizkurve und stellt für eine gegebene Beispiel-LED einen Fehler durch

die Verschiebung des Leistungsniveaus fest, der 1,92 % bei der Messung der Aufheizkurve und lediglich 0,01 % bei der Messung der Abkühlkurve beträgt. Hinzu kommt außerdem der Vorteil, dass die Kalibrierung bei niedrigeren Stromstärken geringere Fehler aufweist, da diese eine geringere Temperaturdifferenz in der LED verursachen. Ein nicht vollständig eingestelltes thermisches Gleichgewicht bei der Kalibrierung erzeugt deshalb einen geringeren Fehler in der Chip-temperatur und in deren Zuordnung zur abfallenden Vorwärtsspannung.

Der thermische Gesamtwiderstand des Systems R_{ths} berechnet sich letztendlich aus dem Temperaturunterschied zwischen den beiden Zuständen T_{J1} und T_{J2} und der Differenz der entsprechenden Heizleistungen zu

$$R_{ths} = \frac{T_{J1} - T_{J2}}{P_{H1} - P_{H2}} \quad (2.5)$$

Dabei gilt es zu beachten, dass die jeweilige Heizleistung der Verlustleistung in der LED entspricht. Sie bestimmt sich aus der Differenz von elektrischer Eingangsleistung und optischer Ausgangsleistung beziehungsweise dem Produkt aus elektrischer Eingangsleistung und der Differenz des optischen Wirkungsgrads der LED zu eins.

Neben dem thermischen Gesamtwiderstand lassen sich mit Hilfe der gemessenen thermischen Transiente sowohl die thermischen Widerstände als auch Wärmekapazitäten einzelner Komponenten im System berechnen [14]. Das Ergebnis lässt sich als sogenannte Strukturfunktion darstellen, in der die Wärmekapazität logarithmisch über

dem thermischen Widerstand aufgetragen wird. Unterschiedliche Bauteile im System führen dabei zu unterschiedlichen Steigungen in der Strukturfunktion, wodurch sich die einzelnen thermischen Widerstände bestimmen lassen. Der Bereich mit unendlicher Steigung in der Strukturfunktion entspricht dem Wärmeübergang in die Umgebung, die näherungsweise eine unendliche Wärmekapazität aufweist. Der Wert des Widerstands an diesem Punkt stellt den thermischen Gesamtwiderstand des Systems dar.

Zur thermischen Transientenmessung kommt das kommerzielle System *T3Ster – Thermal Transient Tester* der Mentor Graphics Corporation zum Einsatz [15]. Es weist eine Auflösung der Temperaturmessung von $\pm 0,01$ °C bei einer zeitlichen Auflösung von 1 μ s auf [16].

2.2.2 BESTIMMUNG OPTISCHER GRÖßEN

Die optische Charakterisierung eines LED-Systems ist einerseits entscheidend für die Beurteilung von dessen Leistungsfähigkeit in Form von Lichtstrom und Lichtstärkeverteilung. Andererseits ist sie auch für die Bestimmung des thermischen Widerstands notwendig, für die die ins System eingebrachte Verlustleistung bekannt sein muss. Durch die optische Messung wird die Strahlungsleistung der LED bestimmt, mit welcher in Verbindung mit der Messung der elektrischen Eingangsleistung die in Wärme umgesetzte Verlustleistung bestimmt werden kann. Sind für die thermische Charakterisierung eines LED-Systems keine Bezugswerte bekannt, wird daher eine optische Messung benötigt.

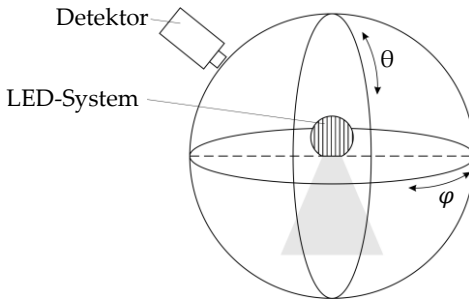


Abbildung 2.4: Virtuelle Kugelfläche bei der Messung mit einem Goniophotometer

Die orts aufgelöste Messung der Lichtstärke erfolgt mittels eines Goniophotometers. Daraus können die Abstrahlcharakteristik und der Lichtstrom der vermessenen Leuchte bestimmt werden. Dazu nimmt der Detektor, ein Photometer, Spektrometer oder eine CCD-Kamera, das Messsignal an verschiedenen Winkelpositionen auf einer virtuellen Kugeloberfläche um die zentral positionierte Lichtquelle herum auf. In der Ebene wird der Detektor um den Winkel θ zwischen 0° und 180° bewegt wie Abbildung 2.4 zeigt. Die Ebene selbst wird über den Winkel φ von 0° bis 360° gedreht. Je nach Winkelauflösung steht mit dem Messergebnis eine entsprechende Anzahl an Ebenen zur Verfügung. Die vier Hauptebenen werden durch die Angabe des entsprechenden Winkels φ mit C0-, C90, C180 und C270 bezeichnet und stellen die Abstrahlcharakteristik der Leuchte dar. Der gesamte Lichtstrom Φ ergibt sich mit den einzelnen Messwerten der Lichtstärke I aus der Integration über den Raumwinkel ω gemäß [17] zu

$$\Phi = \int I(\gamma, \varphi) d\omega \quad (2.6)$$

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten optischen Messungen wird ein Nahfeldgoniophotometer RIGO801 der TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH verwendet [18], das für Messobjekte mit einer Größe von bis zu 30 cm eingesetzt werden kann.

2.3 THERMISCHE SIMULATIONEN

Ein unverzichtbares Werkzeug bei der Entwicklung von technischen Systemen ist die rechnergestützte Simulation von physikalischen Vorgängen. Damit lassen sich Aussagen zum Verhalten von Modellsystemen machen, bevor sie selbst als reale Systeme aufgebaut werden. Die Entwicklungsphase wird dadurch vereinfacht, weil die Entwicklung von realen Prototypen, deren Eigenschaften durch Messungen bestimmt werden, auf virtuelle Prototypen, deren Eigenschaften durch Simulationen bestimmt werden, verlagert wird. Die Entwicklung kann deshalb schneller und kostengünstiger durchgeführt werden, da Anpassungen einfacher erfolgen und deren Auswirkungen auf das System schneller beurteilt werden können. Abhängig von der Entwicklungsaufgabe kommen rechnergestützte Simulationen in vielen technischen Gebieten zum Einsatz, wie beispielsweise zur Lösung mechanischer, optischer aber auch thermischer Fragestellungen, wie sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

Klassische Methoden verwenden zur Beschreibung von Wärmetransportmechanismen Differenzialgleichungen auf Grundlage physikalischer Prinzipien, deren exakte Lösung oft nur für einfache Geometrien und Randbedingungen möglich ist. Für die Berechnung komplexer Systeme wird deshalb auf numerische Methoden ausgewichen. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) basiert dabei auf der Zerlegung des komplexen Systemmodells in kleine Volumenelemente (im dreidimensionalen Fall) für die eine einfache mathematische Beschreibung möglich ist. In jedem Volumenelement wird das physikalische Verhalten durch eine Ansatzfunktion beschrieben, welche zusammen mit der Geometrie und den Randbedingungen des Elements zu einem Gleichungssystem führt. Dessen Lösung, bei nichtlinearen Problemen meist durch iterative Verfahren ermittelt, ergibt die Werte an den Knotenpunkten, das heißt an den Schnittpunkten des Netzes, das die Volumenelemente beschreibt. Letztendlich werden daraus die problemspezifischen Größen abgeleitet, wie beispielsweise aus den berechneten Temperaturen an den Knoten die Wärmestromdichte und der Temperaturgradient [19].

Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt dabei sowohl von der Diskretisierung des Modells als auch von der Methode zur Lösung der Differenzialgleichungen ab. Die Auflösung des Netzes zur Zerlegung muss hoch genug gewählt werden, damit die Geometrie des Systemmodells ausreichend genau abgebildet werden kann. Je feiner das Netz, desto genauer die Lösung. Ergibt eine Verfeinerung des Netzes keine signifikante Änderung der Ergebnisse, kann davon ausgegangen werden, dass die Auflösung ausreichend hoch ist. Dann lassen

sich zuverlässige Aussagen zum Verhalten des Systems, speziell auch zur Wärmeabfuhr, treffen.

Für thermische Simulationen im Rahmen dieser Arbeit wird die Software *Flow Simulation* der Dassault Systemes Corporation in der Version 2013/2014 eingesetzt.

2.4 WÄRMETRANSPORTMECHANISMEN

Die Wärmeabfuhr im LED-System erfolgt mittels der drei physikalisch gegebenen Wärmetransportmechanismen Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Sie stellen die Grundlage für die Entwicklung des thermischen Managements dar und beeinflussen die Geometrie und Materialien des LED-Systems.

2.4.1 WÄRMELEITUNG

Der Wärmetransport im Festkörper erfolgt durch Elektronen und Gitterschwingungen. Makroskopisch betrachtet, können diese Vorgänge vereinfacht beschrieben werden, in dem analog zur elektrischen Leitfähigkeit die thermische Leitfähigkeit λ mit $[\lambda] = \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ definiert wird. Sie stellt im Fourier-Gesetz den Zusammenhang zwischen einem Temperaturgradienten in einem Festkörper und der daraus folgenden Wärmestromdichte \vec{q} her [20].

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \tag{2.7}$$

Analog zum elektrischen Strom lässt sich daraus der Wärmestrom \dot{Q} mit $[\dot{Q}] = \text{W}$ von einem Bereich höherer Temperatur zu einem Bereich niedrigerer Temperatur definieren.

$$\dot{Q} = \int \vec{q} d\vec{A} \quad (2.8)$$

Werden zwei Flächen mit jeweils konstanter Temperatur angenommen, kann aus der Temperaturdifferenz und \dot{Q} der zum elektrischen Widerstand analoge thermische Widerstand R_{th} mit $[R_{th}] = \text{KW}^{-1}$ zwischen diesen beiden Flächen berechnet werden.

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad (2.9)$$

Da der thermische Widerstand der Wärmeleitung $R_{th\lambda}$ zwischen den beiden Flächen sowohl von der Geometrie als auch dem Material abhängt, kann er aus der Leiterlänge L , der Querschnittsfläche A_Q sowie der Wärmeleitfähigkeit λ bestimmt werden.

$$R_{th\lambda} = \frac{L}{\lambda A_Q} \quad (2.10)$$

Ein geringer thermischer Widerstand für die Wärmeleitung wird deshalb mit einer geringen Leiterlänge und einem großen Leiterquerschnitt erreicht, was die geometrischen Anforderungen an den Kühlkörper bestimmt. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit trägt ebenso zu einem geringen thermischen Widerstand bei. Sie wird durch das Kühlkörpermaterial bestimmt und muss bei der Materialauswahl entsprechend berücksichtigt werden. In Abbildung 2.5 ist die Wärmeleitfähigkeit typischer Materialien, die in LED-Systemen vorkom-

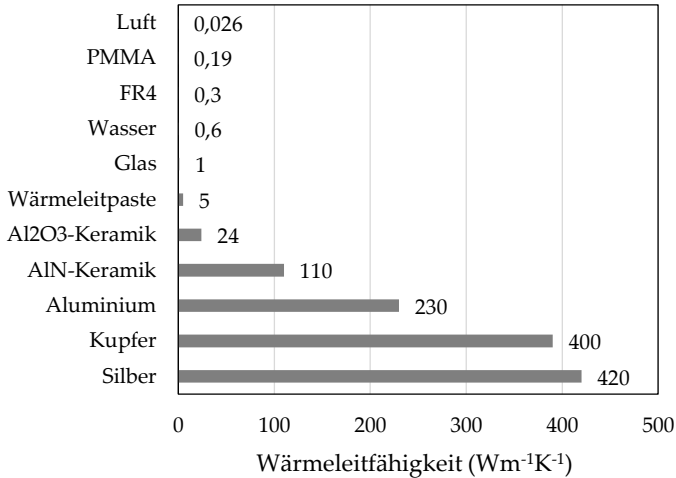


Abbildung 2.5: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien bei einer Temperatur von 30 °C

men, dargestellt. Daraus wird die hohe Leistungsfähigkeit von Metallen zur Wärmeleitung mit Leitfähigkeiten von einigen $100 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ersichtlich, da hierbei freie Elektronen sehr stark zum Wärmetransport beitragen. Aber auch Aluminiumnitrid-Keramiken können leistungsfähige Alternativen sein, denn sie bieten zwar eine geringere Wärmeleitfähigkeit im Bereich von $100 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, bringen jedoch den Vorteil der elektrischen Isolation mit sich. Je nach Systemaufbau kann deshalb durch den Verzicht auf die bei metallischen Kühlkörpern notwendigen thermisch schlecht leitenden elektrischen Isolations-

schichten [21] der thermische Gesamtwidestand gegebenenfalls verringert werden. Mit Füllstoffen wie Keramik (elektrisch isolierend) oder Graphit (elektrisch leitend) versehene und dadurch mit einer Leitfähigkeit zwischen $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und $25 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ thermisch angepasste Kunststoffe können dagegen für Systeme im geringen bis mittleren Leistungsbereich ausreichend sein. Charakteristisch ist hierbei die Anisotropie der thermischen Leitfähigkeit, die aus der Orientierung der Füllstoffe im Kunststoff folgt und beim Entwurf berücksichtigt werden muss. Herkömmliche Kunststoffe, wie beispielsweise PMMA, bieten eine für Entwärmungsaufgaben im LED-System mit hoher Leistung zu geringe thermische Leitfähigkeit, weshalb im thermischen Pfad nach Möglichkeit auf sie verzichtet wird.

Der thermische Pfad in einem LED-System besteht im Allgemeinen aus mehreren Komponenten mit unterschiedlichen Geometrien, Materialien und damit thermischen Widerständen. Die Berechnung des thermischen Gesamtwidestands eines Systems erfolgt abhängig von dessen Aufbau. Analog zu den Gesetzen der elektrischen Widerstände können die thermischen Widerstände als in Reihe oder parallel geschaltet angesehen werden. Die Reihenschaltung ergibt sich dann, wenn der Wärmestrom die einzelnen Komponenten nacheinander durchdringt. In diesem Fall berechnet sich der thermische Gesamtwidestand R_{thG} aus der Summe der Einzelwidestände.

$$R_{thG} = R_{th1} + R_{th2} + \dots + R_{thN} = \sum_{i=1}^N R_{thi} \quad (2.11)$$

Durchdringt der Wärmestrom die Komponenten dagegen parallel, wird der Gesamtwiderstand aus der Summe der inversen Einzelwiderstände berechnet.

$$R_{thG} = \left(\frac{1}{R_{th1}} + \frac{1}{R_{th2}} + \dots + \frac{1}{R_{thN}} \right)^{-1} = \left(\sum_{i=1}^N R_{thi} \right)^{-1} \quad (2.12)$$

2.4.2 KONVEKTION

Die thermische Konvektion beschreibt die Wärmeübertragung von einer Festkörperoberfläche auf ein Fluid, die dadurch erfolgt, dass thermische Energie vom Festkörper auf die Teilchen im Fluid übergeht. Diese Übertragung wird beschrieben durch

$$\dot{Q} = \alpha A_o (T_F - T_o) \quad (2.13)$$

wobei α den Wärmeübergangskoeffizienten, A_o die Festkörperoberfläche mit der Temperatur T_o und T_F die Fluidtemperatur beschreibt. Der Wärmeübergangskoeffizient mit der Einheit $[\alpha] = \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ beschreibt dabei die Effizienz des Wärmeübergangs und ist hauptsächlich abhängig von den Stoffparametern und der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids.

Der thermische Widerstand des Wärmeübergangs durch Konvektion wird als Wärmeübergangswiderstand $R_{th\alpha}$ gemäß Gleichung (2.9) bestimmt zu

$$R_{th\alpha} = \frac{1}{\alpha A_o} \quad (2.14)$$

Maßgeblich für einen geringen Wärmeübergangswiderstand sind deshalb eine große Oberfläche und ein hoher Wärmeübergangskoeffizient.

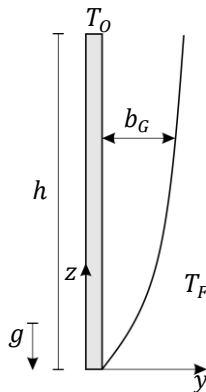


Abbildung 2.6: Strömungsgrenzschicht bei natürlicher Konvektion an einer senkrechten Platte

Je nachdem wie die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids entsteht, wird zwischen zwei Fällen von Konvektion unterschieden. Bewegt sich das Fluid aufgrund der Gravitation und des Dichteunterschieds, der durch die unterschiedlichen Temperaturen der Fluidteilchen entsteht, wird die Konvektion als natürliche Konvektion bezeichnet. Im Gegensatz dazu steht die erzwungene Konvektion, bei der die Strömung durch eine äußere Kraft, wie beispielsweise einen Lüfter oder

eine Pumpe, verursacht wird. Aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten ist der Wärmeübergangskoeffizient bei erzwungener Konvektion im Vergleich zur natürlichen Konvektion bei Gasen um den Faktor 3 bis 5, bei Flüssigkeiten um den Faktor 5 bis 15 größer [20]. Für die Allgemeinbeleuchtung wird dennoch im Allgemeinen auf die erzwungene Konvektion verzichtet, um die Fehleranfälligkeit zu minimieren und Störgeräusche zu vermeiden².

Zur Berechnung der Strömungsverhältnisse, die sich bei natürlicher Konvektion durch die Dichteunterschiede an einer senkrecht stehenden Platte ergeben, wird das Modell der Grenzschicht verwendet. Das Fluid der Temperatur T_F wird durch die Temperatur der Plattenoberfläche T_O erwärmt, so dass dessen Dichte abnimmt und eine Auftriebsströmung entsteht. Die Grenzschicht ist dabei so definiert, dass die Strömung außerhalb der Grenzschicht nicht von der Platte beeinflusst wird. Abbildung 2.6 zeigt ihren Verlauf an einer Platte der Höhe h . Die Breite der Grenzschicht b_G berechnet sich für Luft nach [22] aus

$$\frac{z}{b_G} = 0,36 \left(\frac{g \beta (T_O - T_F) z^3}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ für } \frac{g \beta (T_O - T_F) z^3}{\nu^2} > 10^{12} \quad (2.15)$$

Stehen sich zwei senkrechte Platten gegenüber und formen einen Strömungskanal, wird die Auftriebsströmung dann beeinflusst,

² Mehrere durch integrierte Lüfter aktiv gekühlte MR16-Retrofit-Systeme im Produktportfolio der Philips GmbH wurden nach einiger Zeit durch passive Systeme ersetzt. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit ist lediglich noch ein aktiv gekühltes System verfügbar, welches im Datenblatt mit dem Hinweis „Beim Einsatz mehrerer 10 W Lampen nebeneinander können leichte Summgeräusche hörbar sein“ versehen ist [23].

wenn der Abstand zwischen den Platten so gering ist, dass sich die Grenzschichten beider Platten überlagern. Deshalb reduziert sich der Wärmeübergang für geringe Plattenabstände. Dies muss insbesondere bei der Auslegung von Kühlkörpern mit senkrechten Oberflächen zur Wärmeabfuhr berücksichtigt werden.

2.4.3 WÄRMESTRAHLUNG

Mit der Wärmestrahlung erfolgt die Wärmeübertragung durch elektromagnetische Wellen, die jeder Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt, emittiert. Die spektrale Verteilung der emittierten Strahlung wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben. Für die Entwärmung von LED-Systemen ist die Form des Spektrums jedoch nicht relevant, so dass zur Beschreibung der Wärmestrahlung die Berücksichtigung des Energieaustauschs ausreicht. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschreibt die von einem Körper mit der Oberfläche A_H emittierte Energie als

$$\dot{Q} = \sigma \varepsilon A_H T^4 \quad (2.16)$$

Hierin finden sich die Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, der Emissionsgrad ε sowie die Temperatur T des Körpers in Kelvin. Der Emissionsgrad ist dabei die charakteristische Größe der Wärmestrahlung. Für einen idealen Schwarzen Strahler nimmt er einen Wert von 1 an. Für richtungsunabhängige, nicht Schwarze Strahler, die als Graue Strahler bezeichnet werden,

stellt er den mit der Schwarzkörperenergieverteilung über alle Wellenlängen gemittelten Emissionsgrad dar. Der Emissionsgrad ist abhängig von Material und Oberflächenbeschaffenheit und nimmt typischerweise Werte zwischen 0,02 und 0,98 an. Dabei weisen polierte Metalle sehr kleine Werte auf, während Kunststoffe und Lacke große Emissionsgrade besitzen.

Gleichzeitig mit der Emission von Wärmestrahlung absorbiert ein Körper diese jedoch auch. Den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption stellt das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz her, das mit

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \quad (2.17)$$

aussagt, dass beide Vorgänge einander entsprechen [24].

Mit Gleichung (2.16) ergibt sich die Bilanz der Wärmestrahlung eines Körpers der Temperatur T_O , der mit seiner Umgebung der Temperatur T_A über seine Oberfläche A_H Energie austauscht zu

$$\dot{Q} = \sigma \varepsilon A_H (T_O^4 - T_A^4) \quad (2.18)$$

Der thermische Widerstand der Strahlung wird mittels des Wärmeübergangskoeffizienten α_ε ausgedrückt durch

$$R_{th\varepsilon} = \frac{1}{\alpha_\varepsilon A_H} \quad (2.19)$$

Aus den Gleichungen (2.18) und (2.19) berechnet sich der Wärmeübergangskoeffizient zu

$$\alpha_\varepsilon = \sigma\varepsilon T_0^3(1 + x + x^2 + x^3) \quad (2.20)$$
$$\text{mit } x = \frac{T_A}{T_0}$$

Dabei ist die starke Temperaturabhängigkeit von α_ε zu beachten, die wiederum den thermischen Widerstand beeinflusst.

Der Beitrag der Wärmestrahlung ist in LED-Systemen für die Allgemeinbeleuchtung aufgrund der geringen Oberflächentemperaturen meist wesentlich kleiner als der der Konvektion. Deshalb wird er in den thermischen Berechnungen in der vorliegenden Arbeit gegenüber der Konvektion oftmals zunächst vernachlässigt und erst bei detaillierter thermischer Betrachtung einbezogen.

Nachdem die technischen Grundlagen zur Auslegung eines LED-Systems erläutert sind, wird nachfolgend zunächst auf das Produktdesign von LED-Systemen eingegangen bevor die Natur als Vorbild zur Verbindung von Technik und Design herangezogen wird. Die Basis dafür bilden die Wärmetransportmechanismen. Auf ihre formelmäßige Beschreibung für die betrachteten Geometrien folgen detaillierte thermische Simulationen zur Auslegung des LED-Systems.

Kapitel 3

LÖSUNGEN AUS DER NATUR

Die Orientierung an natürlichen Vorbildern verspricht gleichermaßen Vorteile für die technische Funktion wie auch für die ästhetischen Gesichtspunkte eines LED-Systems. Im folgenden Kapitel werden deshalb zunächst Funktion und Ästhetik betrachtet, bevor die konkrete Problemstellung analysiert wird. Den Weg zur Lösung bereiten die Bioinspiration und die daraus hervorgehende Wärmeabfuhr nach dem Vorbild der Natur. Die Beschreibung dieser für verzweigte Geometrien liefert eine Möglichkeit, die natürlichen Strukturen gewinnbringend für LED-Systeme einzusetzen. Das dazu eingeführte Berechnungsmodell wird im letzten Teil des Kapitels für unterschiedliche Konfigurationen mit den Ergebnissen thermischer Simulationen verglichen. Es bildet die Grundlage für die Entwicklung eines beispielhaften LED-Systems im anschließenden Kapitel.

3.1 FUNKTION UND ÄSTHETIK IM LED-SYSTEM

„Produktdesign beschäftigt sich mit der Entwicklung und Produktion von unterschiedlichsten Gegenständen mit den Mitteln und Prozessen der Massenproduktion.“ [25]. Das Produktdesign verknüpft

somit die Entwicklung eines Produktes eng mit den produktionstechnischen Möglichkeiten bei seiner Herstellung. Das Produktdesign von LED-Systemen muss gleichermaßen zweierlei Funktionen erfüllen. Zum einen muss ihm eine ästhetische Form entspringen, die das äußere Erscheinungsbild definiert, zum anderen muss es ebenso den Anforderungen der LED-Technologie Rechnung tragen und die technischen Eigenschaften der Leuchte berücksichtigen. Idealerweise verbinden sich beide Anforderungen *Ästhetik* und *Funktion* in jeder einzelnen Komponente des Systems zu einer überzeugenden Synthese. Dennoch weisen die unterschiedlichen Komponenten unterschiedliche Gewichtungen beider Anforderungen auf. In der Allgemeinbeleuchtung trägt das Leuchtengehäuse meist vorwiegend zur Ästhetik bei, während sich der Kühlkörper und das Betriebsgerät der LED hauptsächlich aus funktionalen Gründen im Produkt befinden. Eine ausgewogene Gewichtung zwischen beiden Anforderungen haben oftmals Komponenten wie die Zuleitung oder die verbaute Optik der LED. In Bezug auf die Optik rückt eine Besonderheit des Produktdesigns von Leuchten in den Vordergrund. Eine Leuchte hat in der Regel zwei Erscheinungsbilder, die Tag- und die Nachterscheinung. Während bei der Tagerscheinung davon ausgegangen wird, dass die Umgebungsbeleuchtung ausreichend ist, um die Leuchte im ausgeschalteten Zustand detailliert wahrnehmen zu können, ergibt sich die Nachterscheinung bei dunkler Umgebung vornehmlich aus dem Licht der eingeschalteten Leuchte selbst. Die Tagerscheinung gibt das äußere Erscheinungsbild und damit in vielen Fällen die vollständige Ästhetik wieder. Die primäre technische Funktion des Aussendens

von Licht rückt dabei in den Hintergrund. Die Nachterscheinung reduziert dagegen die Ästhetik auf den Lichtschein und stellt die primäre technische Funktion der Leuchte in den Vordergrund.

Im Produktdesign von Leuchten wird das Verhältnis zwischen ästhetischer und technischer Funktion stark vom Anwendungsgebiet der Leuchte bestimmt. Sind durch die Anwendung strenge technische Merkmale zu erfüllen, ist der Gestaltungsspielraum für die ästhetische Funktion begrenzt. Die normativen Kriterien und technischen Vorgaben für Straßenbeleuchtung verhindern beispielsweise eine beliebige Formgebung von Leuchten für diesen Einsatzzweck. Die konkreten technischen Anforderungen an Innenleuchten sind meist geringer, können jedoch beispielsweise für Bürobeleuchtung durchaus zu Einschränkungen führen, die der ästhetischen Funktion gegenüberstehen. Dagegen sind die Vorgaben für Wohnraumbeleuchtung vorwiegend durch die Nutzerakzeptanz gegeben. Die ästhetische Funktion kann in diesem Anwendungsfall die technische Funktion annähernd vollständig eliminieren. Dieses Extrem führt zur reinen Dekorationsbeleuchtung, die ausschließlich aus ästhetischen Gründen Licht aussendet, nicht um den Raum zu erhellen.

3.2 PROBLEMSTELLUNG

Ein hochwertiges LED-System für die Allgemeinbeleuchtung muss notwendigerweise mehrere Eigenschaften aufweisen: Es muss effi-

zient, zuverlässig und leistungsstark genug sein, um für typische Beleuchtungssituationen im Wohnraum eingesetzt werden zu können. Gleichzeitig muss es eine ästhetische Anmutung aufweisen. Die Produktgestalt muss deshalb den Produktnutzwert und die technischen Produkteigenschaften in geeigneter Art und Weise mit zweckfreien Werten wie der Qualität der Erscheinung verbinden.

Die Zuverlässigkeit, die Leistungsfähigkeit und die Effizienz eines LED-Systems hängen von dessen einzelnen Komponenten ab. Fällt eine Komponente aus, ist das gesamte System betroffen. Ebenso tragen die Leistungsfähigkeit und die Effizienz einer jeden Komponente zur Leistungsfähigkeit und Effizienz des Gesamtsystems bei. So setzt das elektrische Betriebsgerät eingangsseitig die Netzspannung nicht verlustfrei auf das von der LED benötigte Niveau um. Weiterhin liefert die damit betriebene LED einen entscheidenden Beitrag zur Leistungsfähigkeit und Effizienz des Systems, da ihre Belastbarkeit und Lichtausbeute von der verwendeten Halbleitertechnologie abhängen. Durch die thermodynamischen Vorgänge im Halbleitermaterial werden sie außerdem von der Betriebstemperatur beeinflusst (Kapitel 2.1.2). Des Weiteren beeinflusst die Auskoppelleffizienz der Lichtquelle, das heißt der Anteil vom gesamten im Halbleiter erzeugten Licht, der emittiert wird, die Leistungsfähigkeit und Effizienz. Die Effizienz der Optik wiederum beschreibt den Anteil des emittierten Lichts, der in der gewünschten Zielfläche eintrifft.

Beim Entwurf eines zuverlässigen, leistungsfähigen und effizienten LED-Systems müssen alle diese Komponenten berücksichtigt und entsprechend ausgelegt werden. Aus ästhetischer Sicht sind jedoch

vor allem die thermischen und elektrischen Komponenten des LED-Systems von Bedeutung, da sie meist einen großen Teil des Systems einnehmen und deshalb die gestalterische Erscheinung stark beeinflussen. Während das Betriebsgerät in vielen Fällen mittels einer elektrischen Verbindung von der eigentlichen Leuchte und ihrer Erscheinung entkoppelt werden kann, indem es beispielsweise in einem Baldachin oder im Steckernetzteil platziert wird, müssen die Komponenten des thermischen Managements in direktem Kontakt zur LED stehen. Eine gestalterische Entkopplung von Leuchte und Komponenten zur Entwärmung ist nur durch aufwändige Systeme, wie beispielsweise die Flüssigkeitskühlung oder Heatpipes, möglich und für LED-Systeme der Allgemeinbeleuchtung in der Regel nicht umsetzbar. Das thermische Management ist deshalb das wesentliche Bindeglied zwischen der technischen Funktion der Leuchte und ihrer ästhetischen Erscheinung.

Ein auf Effizienz, Zuverlässigkeit und Leistungsstärke ausgelegtes LED-System weist aufgrund der physikalischen Gegebenheiten zur Wärmeabfuhr, zwingend einen ausreichend dimensionierten und damit im Verhältnis zur Lichtquelle großen Kühlkörper auf. Ein ästhetisch hochwertiges LED-System wird diesen notwendigen Kühlkörper im Allgemeinen nicht beinhalten, sondern ihn beispielsweise verkleinert, verformt oder in einem Leuchtengehäuse verborgen aufweisen. Die technischen Eigenschaften der Leuchte werden dadurch in allen Fällen beeinflusst. Ein LED-System stellt deshalb immer einen Kompromiss zwischen leistungsfähiger Technik und ästhetischem Erscheinungsbild dar. Die Qualität dieses Kompromisses

trägt dabei entscheidend zum erfolgreichen Entwurf eines LED-Systems bei. Es stellt sich deshalb die Frage, wie es gelingt, ein leistungsfähiges thermisches Management mit einer ästhetisch hochwertigen Erscheinung zu vereinen, um so ein herausragendes LED-System zu entwerfen.

Der Kühlkörper weist einerseits Eigenschaften auf, die sich jeweils nur auf die technische beziehungsweise die ästhetische Anforderung auswirken, wie beispielsweise die Anbindung an die anderen System-Komponenten, hauptsächlich an die LED selbst, oder die farbliche Gestaltung. Andererseits wird der Kühlkörper beschrieben durch seine Form und sein Material. Beides bestimmt sowohl seine technische Leistungsfähigkeit als auch seine ästhetische Qualität und hat damit gleichzeitig Einfluss auf beide Anforderungen. Die Problemstellung lässt sich deshalb als Frage nach den Eigenschaften formulieren, die ein Kühlkörper aufweisen muss, um den technischen und ästhetischen Anforderungen an ein LED-System in der Allgemeinbeleuchtung gleichermaßen gerecht zu werden. Ergänzt wird diese Fragestellung durch die notwendige Herstellbarkeit der Lösung. Denn nur dann kann der Kühlkörper im hochwertigen LED-System eingesetzt werden.

3.3 BIOINSPIRATION

Das Finden von Lösungen basiert immer auf einer Vielzahl von Einflüssen, die es ermöglichen Bekanntes neu zu verknüpfen und weiterzuentwickeln und so angepasste und verbesserte Eigenschaften zu erreichen. Im Hinblick auf die Notwendigkeit der gleichzeitigen Erfüllung der beiden Anforderungen *technische Leistungsfähigkeit* und *hochwertige Ästhetik*, ist der Blick auf das Bekannte offensichtlich der Blick in die Natur. Denn die Natur bietet beides.

Die Natur übertrifft mit der Leistungsfähigkeit ihrer Organismen und Ökosysteme auf vielen Gebieten alle bisher verfügbaren technischen Lösungen. Sparsamkeit und Effizienz sind die Ziele des evolutionären Anpassungsprozesses, der beständig zu optimierten Lösungen mit geringem Energie- und Materialaufwand führt. Gegenüber ineffizienteren Alternativen ist diese Ressourceneffizienz ein überlebenswichtiger Vorteil bei einem begrenzten Angebot an beispielsweise Nährstoffen, Raum oder Licht. Die Natur mit ihren spezifischen Anforderungen für eine spezielle Funktion eines bestimmten Lebewesens und die Nutzenfunktion der Technik unterscheiden sich jedoch beachtlich. Deshalb können aus der Natur innovative Ansätze und allgemeine Prinzipien abgeleitet werden, um Wege zur Lösung technischer Probleme zu erschließen. Jedoch können die Naturprinzipien zur technologischen Umsetzung dabei nicht kopiert, sondern müssen abstrahiert werden [26]. Das Nutzen dieser Impulse aus der Biologie kann in der Technik vielfach zu erfolgreichen Lösungen führen. Es gilt hierbei die beste technische Lösung zu finden, indem man



Abbildung 3.1: Organische Form: Vase Savoy, Alvar Aalto, 1939

sich von der Natur inspirieren lässt. Hierfür finden sich unzählige Beispiele von der Strukturoptimierung von Bauteilen [27], über die Verbesserung von Sonarsystemen [28], bis hin zu Gebäudefassaden [29] und Klettbänder [30].

Ebenso wie die Natur zu technischen Problemlösungen inspirieren kann, kann sie jedoch auch Vorbild für hochwertige Produkterscheinungen sein. Denn natürliche Strukturen folgen oftmals einer besonderen Schönheit. Ob diese daraus entsteht, dass der Mensch unentwegt von natürlichen Dingen umgeben ist und ihm deren Gestalt deshalb schön erscheint, oder ob es sich hierbei um eine intrinsische Schönheit handelt, ist offen. Nichtsdestotrotz ist der Erfolg von natürlich beeinflusstem Design mit vielen Produkt-Beispielen belegbar. Die Vielfalt der Natur spiegelt sich dabei in der Vielfalt der Art und Weise wieder, wie die Natur das Produktdesign inspiriert. So finden

sich neben geometrisch regelmäßigen Strukturen und fluiden, organischen Formen auch von der Natur abgeleitete Herstellungsprozesse oder Materialien, die als Vorbild für die Gestalt von Produkten dienen. Dabei ist dieses Vorbild keinesfalls eine vorübergehende Modeerscheinung, sondern besteht bereits seit vielen Jahrzehnten. Alvar Aaltos Vase Savoy aus dem Jahr 1939 (Abbildung 3.1) stellt beispielsweise eine Ikone der natürlichen Formen dar und markiert den Anfang einer Hochphase des organischen Designs. Denn die an der Natur orientierte Gestaltung scheint besonders in Krisenzeiten aktuell zu werden, da sie einen harmonischen Ausgleich zu einer beunruhigend erscheinenden Umwelt bieten kann [31]. Vor allem in der aktuellen Situation, in der die Umweltverschmutzung und Klimaerwärmung von vielen Teilen der Gesellschaft als besorgniserregend wahrgenommen werden, wird ein weiterer Aspekt deutlich. So sprechen an der Natur orientierte Formen auch das ökologische Bewusstsein an, bringen eine energiebewusste Lebensweise zum Ausdruck und bedienen sich dem allgemein gesteigerten Interesse an nachhaltigen, ressourcenschonenden Produkten, besonders wenn die technischen Eigenschaften diese gestalterische Aussage unterstützen. Nicht zuletzt kann dabei die besondere emotionale Wirkung natürlich inspirierter Formen zum Tragen kommen. Diese verleiht dem Produkt eine Faszination, die von dessen bekanntem natürlichem Ursprung ausgeht und deshalb beim Betrachter unmittelbar einsetzt. Ebenso vermittelt das nach der Natur entworfene Produkt das *Bionische Versprechen* [32] und damit eine besondere Qualität der Lösung, die sich in der Evolution über Millionen von Jahren durchgesetzt hat.

LED-Systeme, die mit hoher Effizienz und Langlebigkeit auf Nachhaltigkeit ausgelegt sind, stellen mit der Notwendigkeit einer qualitativ hochwertigen technischen Lösung und eines hohen ästhetischen Werts eine ideale Anwendung dar, um Vorbilder aus der Natur gewinnbringend in Produktentwicklungen umzusetzen. Richtig eingesetzt profitieren sie von allen Vorteilen, die die Bioinspiration mit sich bringt und bieten potenziell nicht zu übertreffende Lösungen.

3.3.1 WÄRMEABFUHR NACH DEM VORBILD DER NATUR

Die Verwendung natürlicher Vorbilder verspricht erfolgreiche technische Systeme bei verschiedensten Fragestellungen. Speziell auch für die Wärmeabfuhr wurden in der Vergangenheit durch den Blick in die Natur Lösungen gefunden, die eine hohe Leistungsfähigkeit bieten. Hierbei standen bisher vor allem Systeme für die Flüssigkeitskühlung im Vordergrund, die durch die Anpassung der Geometrie und Anordnung der Kühlkanäle verbessert wurden. So zeigt beispielsweise [33] die Minimierung der Pumpleistung in baumartigen Leitungsnetzen unter verschiedenen Randbedingungen, wie Volumen-, Flächen- oder Längenbeschränkungen. Unter Berücksichtigung der kürzesten Leitungslänge werden in [34] baumartige Netze entwickelt, die in verschiedenen Konfigurationen Verbindungen zwischen unterschiedlichen geometrischen Anordnungen von Start- und Endpunkten herstellen. Dabei wird auf die geometrische Konstruktion mittels regelmäßiger Sechsecke zurückgegriffen, die die Erstellung einer günstigen Anordnung der Leitungen zur Verbindung

einer Fläche mit einem Punkt erlauben. Zur Unterstützung der Theorie werden empirische Beobachtungen angeführt. Eine umfassende Analyse der grundlegenden Vorgehensweise erfolgt ergänzend in [35]. Baumartige Netzwerke aus Mikrokanälen werden in [36] analysiert. Hierbei wird der Einfluss der Kanalbreite und des Winkels zwischen den Kanälen auf den Druckverlust und die Gleichmäßigkeit der Strömung mittels numerischer Simulationen untersucht. Alle Studien kommen zu dem Schluss, dass durch die baumartige Anordnung der Kühlkanäle Vorteile entstehen, die die Effizienz der Leitungsnetze steigern. Eine praktische Umsetzung einer solchen Anordnung findet sich beispielsweise für die Kühlung von Hochleistungselektronik in [37], [38] oder auch beim sogenannten *Direct Liquid Jet-Impingement Cooling*, wobei mittels Wasser eine Leistung von 420 Wcm^{-2} abgeführt werden kann [39]. Die Baumstruktur trägt hierbei zur hohen Gleichmäßigkeit bei geringem Druckverlust bei und ermöglicht so die effiziente Wärmeabfuhr hoher Leistungen durch Flüssigkeiten.

In seltenen Anwendungen kommen baumartige Strukturen auch für die Entwärmung mit Luft zum Einsatz, wobei sie hauptsächlich der erzwungenen Konvektion bei Prozessorkühlkörpern dienen. Hierbei wird die Durchströmung der Struktur aktiv mittels Lüfter unterstützt, um die Wärmeabfuhr zu erhöhen. Im Vergleich zu passiven Lösungen ergeben sich gänzlich andere Geometrien, die sehr enge Strömungskanäle aufweisen und daher ungeeignet für den Einsatz bei freier Konvektion sind [40] [41]. Speziell für die Anwendung mit

großflächigen LED-Modulen wurden bereits radiale Kühlkörper unter freier Konvektion untersucht. In [42] wurde eine kreisförmige Basisplatte mit Rippen bestückt, um die Wärmeabfuhr zu gewährleisten. Mit zunehmendem Abstand vom Mittelpunkt wurde dabei die Anzahl an Rippen erhöht. Dadurch entsteht ein ähnlicher Effekt wie durch die Verzweigung, obwohl die Rippen nicht unmittelbar miteinander verbunden sind. Es wurde simulativ wie auch experimentell gezeigt, dass diese Anordnung die Leistungsfähigkeit steigert. Aufgrund der notwendigen Basisplatte über den kompletten Durchmesser des Kühlkörpers wird hierbei jedoch die natürliche Konvektion eingeschränkt. Die vorgeschlagene Struktur ist deshalb nur dann gewinnbringend einsetzbar, wenn die LED oder das LED-Modul keinen wesentlich geringeren Durchmesser als den Durchmesser des Kühlkörpers aufweisen. Darüber hinaus bringt die verwendete Anordnung keinerlei ästhetischen Vorteil, da der baumartige Charakter, der technisch existiert, durch die unverbundenen Rippen nicht offensichtlich wird. Im Gegensatz dazu steht bei designorientierten Leuchten fast ausschließlich die Ästhetik im Vordergrund. Beispielsweise in Tom Dixons Leuchte *Fin* [43] wird die Baumstruktur als Designmerkmal genutzt, auch wenn sie dem Betrachter nur zurückhaltend dargestellt wird. Sie begünstigt aufgrund ihrer Ausformung mit sehr engen Strömungskanälen jedoch nicht die freie Konvektion. Mit der im Jahr 2013 erstmals von Artemide präsentierten Leuchte *Florensis* wird die verzweigte Struktur aufgegriffen. Wenn auch in erster Linie designorientiert, berücksichtigt ihre baumähnliche Form wichtige technische Aspekte zur Wärmeabfuhr und setzt diese in einem spa-

nend nachbearbeiteten, stranggepressten Kühlkörper aus Aluminium [44] um. Auch Tobias Graus LED-Leuchte *Falling* bezieht sich mit der Tropfenform auf eine Form aus der Natur [45]. Mit hohem ästhetischem Wert schöpft sie aufgrund einer geringen Oberfläche jedoch nicht das vollständige Potenzial zur Wärmeabfuhr aus, das im eingenommenen Bauraum liegt (vergleiche Kapitel 4.4).

3.4 LÖSUNGEN FÜR DAS LED-SYSTEM

Vorhandene Produkte zeigen zwar das Potenzial natürlicher Vorbilder aber keine für das LED-System in der Allgemeinbeleuchtung optimal entwickelte Lösung. Im folgenden Abschnitt werden deshalb anfangs die technischen Probleme im LED-System erfasst, bevor auf die aus der Natur gewonnenen Lösungsansätze eingegangen wird. Die explizite Berücksichtigung der Ästhetik bleibt zunächst außen vor, denn mit der Verfolgung natürlicher Prinzipien ist zu erwarten, dass sie den gefundenen Lösungen in gewissem Maß immanent sind.

3.4.1 PROBLEME DER WÄRMEABFUHR

Die Wärmeabfuhr im LED-System bedient sich den bekannten Wärmetransportmechanismen Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Die beim Betrieb der LED entstehende Verlustleistungswärme wird in das System eingekoppelt. Der direkte Wärmepfad von

Tabelle 3.1: Für die Wärmeabfuhr relevante Eigenschaften einer Hochleistungs-LED (Osram Oslon Square GW CSSRM1.PC) [46]

	von	typ	bis
Größe thermisches Pad (mm ²)	2,70		
Lichtstrom (lm)	395	353	312
Leistung elektrisch (W)	2,70	2,85	3,20
Effizienz ($P_{\text{optisch}}/P_{\text{elektrisch}}$)	0,49	0,41	0,32
Verlustleistung (W)	1,39	1,68	2,17
Verlustleistungsdichte (W cm ²)	51,48	62,22	80,37

der LED an die Umgebung ist vernachlässigbar, da der thermische Widerstand dieses Pfads mehr als eine Größenordnung größer ist als der durch den Kühlkörper [21]. Die Wärmeabfuhr erfolgt deshalb hauptsächlich von der Lichtquelle ausgehend über den Kühlkörper an die Umgebung. Je höher die Verlustleistung in der LED, desto größer der Wärmestrom, der durch die Komponenten des Systems abgeführt werden muss. Aufgrund der geringen Baugröße von Hochleistungs-LEDs ist die Einkopplung der Verlustleistung in den Kühlkörper auf eine kleine Fläche beschränkt. In Tabelle 3.1 sind die für die Wärmeabfuhr relevanten Größen beispielhaft für eine zum Zeitpunkt dieser Arbeit aktuelle Hochleistungs-LED aufgeführt. Die maximale Verlustleistung berechnet sich dabei aus der gegebenen maximalen elektrischen Eingangsleistung und des emittierten Lichtstroms unter

Berücksichtigung des Emissionsspektrums. Die angegebene Flächenleistungsdichte von bis zu 80 Wcm^{-2} entspricht einem Vielfachen der einer herkömmlichen elektrischen Herdplatte mit 10 Wcm^{-2} bis 20 Wcm^{-2} . Die Wärmespreizung erfolgt größtenteils im Kühlkörper auf dem Wärmepfad zwischen Leistungseinkopplung und der Abfuhr an seinen Oberflächen.

Beim Entwurf des Kühlkörpers müssen die Abhängigkeiten zwischen seinen Eigenschaften und den drei Wärmetransportmechanismen berücksichtigt werden. Diese Abhängigkeiten folgen aus den Gleichungen zum Wärmetransport und werden im Folgenden für den eingeschwungenen, stationären Fall betrachtet.

Um die Wärmeleitung im Kühlkörper zu begünstigen, muss ein Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit λ gewählt werden. Außerdem tragen geringe Materialdicken L , das heißt kurze Wärmepfade, und große Querschnittsflächen A_Q zu einem hohen Wärmetransport durch Leitung bei (Gleichung (2.10)). Die Konvektion ist hauptsächlich von der Oberfläche des Kühlkörpers A_O und dem Wärmeübergangskoeffizienten α zwischen der Oberfläche und dem Fluid der Umgebung abhängig (Gleichung (2.14)). In die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten gehen die Strömungsverhältnisse und damit die Geometrie des Strömungskanals ein. Die Wärmeabfuhr durch Wärmestrahlung wird durch die einhüllende Oberfläche sowie die Oberflächenbeschaffenheit bestimmt (Gleichung (2.19)).

Die Auslegung einer Kühlkörpergeometrie muss sich deshalb hauptsächlich mit den Flächen des Kühlkörpers beschäftigen. Während die

Querschnittsfläche die Wärmeleitung von der Quelle an die Kühlkörperoberflächen beeinflusst, bestimmen die Außenflächen maßgeblich die Konvektion. Die einhüllende Oberfläche hat wiederum eine direkte Auswirkung auf die Wärmeabfuhr durch Strahlung. Ergänzend dazu muss die Wärmeleitfähigkeit des Materials und die Länge des thermischen Pfades berücksichtigt werden. Die Größe und Anordnung der Flächen ist deshalb entscheidend für die Leistungsfähigkeit eines Kühlkörpers, denn sie beeinflussen die Wärmeabfuhr durch alle Mechanismen.

3.4.2 NATÜRLICHE LÖSUNGEN

Die Natur bietet vielerlei Vorbilder für besondere Formen und damit für die Anordnung von Oberflächen. Die Gründe für das Entstehen dieser Architekturen sind vielfältig und zweckmäßig zur Erfüllung bestimmter Funktionen. So dient beispielsweise die einflügelige Form der Frucht des Ahorns der Autorotation beim Herabfallen und damit einer weiten Verteilung der Früchte. Die sechseckige Form von Bienenwaben ermöglicht mit geringstem Materialaufwand das größtmögliche Volumen bei gleichzeitig sehr hoher Stabilität zu erzeugen. Legt man das Augenmerk auf Transportmechanismen in der Natur, so finden sich beispielsweise Adersysteme zum Transport von Blut oder Blattnerven und Wurzelsysteme wie in Abbildung 3.2 zum Austausch und dem Transport von Nährstoffen sowie der mechanischen Verstärkung der Pflanzenstruktur. Auch wenn die Formen sich selbst innerhalb derselben Pflanzenart, durch Umwelteinflüsse gelenkt, un-

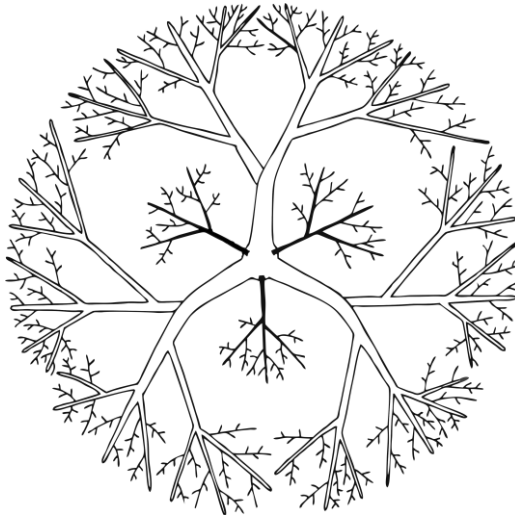


Abbildung 3.2: Wurzelarchitektur des Ameisenbaums (*Cecropia obtusa*) nach [45]

terscheiden, sind die grundlegenden Muster die gleichen. Die Gemeinsamkeit dieser transportorientierten Formen ist offensichtlich die verzweigte Struktur. Mit ihr bildet die Natur Systeme, die als Vorbild für den effizienten Wärmetransport dienen könnten. Denn der Austausch von Nährstoffen lässt sich in gewisser Weise mit dem Wärmeaustausch bei der Konvektion vergleichen, während der Transport von Nährstoffen analog zur Wärmeleitung betrachtet werden kann. Die verzweigte Geometrie erscheint deshalb geeignet und wird hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zur Wärmeabfuhr genauer untersucht.

Ein grundlegendes Modell aus der Botanik stellt das Pflanzen-Architekturmodell von Schoute dar. Es basiert auf der zweifachen Verzweigung, das heißt, dass mit jeder Verzweigung am Ast zwei neue Äste entstehen. Abbildung 3.3 verdeutlicht diesen Vorgang im Wachstumsschema einer Pflanze. Diese Architektur findet sich beispielsweise bei Doumpalmen wieder.

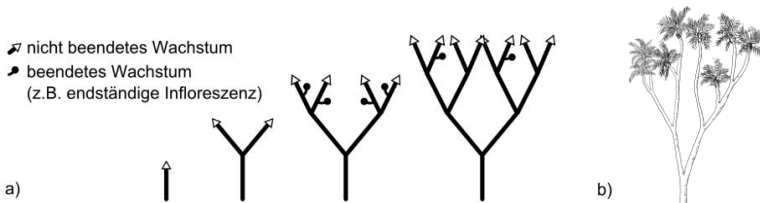


Abbildung 3.3: Pflanzenarchitektur nach dem Modell von Schoute
a) Verzweigungsschema (nach [45]) b) Skizze Doumpalme (*Hyphaene thebaica*)

Aus thermischer Sicht bietet die Verzweigung den Vorteil von großen Flächen zur Wärmeabfuhr durch Konvektion, denn mit jeder Verzweigung erfolgt ein Oberflächenzuwachs. Des Weiteren werden die Flächen durch die Verzweigung gleichmäßig verteilt und es entstehen gleichmäßige thermische Pfade von der Wurzel bis an die äußeren Flächen. Zur mathematischen Beschreibung des damit verbundenen thermischen Widerstands wird im Folgenden ein vereinfachtes Modell aufgestellt. Es berücksichtigt die Wärmeleitung im verzweigten Ast sowie die Konvektion an dessen Oberfläche und lässt

dadurch eine Aussage über die Leistungsfähigkeit der verzweigten Architektur zur Wärmeabfuhr zu.

NICHT VERZWEIGTER AST

Für den Energieeinsatz für den Festkörper allgemein gilt mit der Wärmekapazität c_p und der pro Masseinheit zu- oder abgeführten Energie \dot{e}

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \rho \dot{e} \quad (3.1)$$

mit

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.2)$$

Wird zunächst der stationäre Fall in einem nicht verzweigten Ast der Länge L betrachtet und dabei der Energieverlust im Ast durch Wärmeleitung gemäß dem Fourier-Gesetz sowie die durch Konvektion abgeführte Energie berücksichtigt, vereinfacht sich Gleichung (3.1) gemäß [20] zu

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{\alpha U}{A_Q} = 0 \quad (3.3)$$

Neben der Querschnittsfläche des Asts A_Q fließt in Gleichung (3.3) auch dessen Umfang U als Summe aus zweifacher Höhe und zweifacher Breite ein. Mit den Randbedingungen eines Asts mit der endli-

chen Länge L , dessen Wärmeableitung am Ende durch den thermischen Widerstand R_{thE} erfolgt, lässt sich der thermische Widerstand des Asts berechnen zu

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_0} = \frac{1 \sinh(nL) + m R_{thE} \cosh(nL)}{m \cosh(nL) + m R_{thE} \sinh(nL)} \quad (3.4)$$

mit

$$n = \sqrt{\frac{\alpha U}{\lambda A_Q}} ; m = \sqrt{\alpha U \lambda A_Q} \quad (3.5)$$

Gleichung (3.4) beschreibt somit den Zusammenhang zwischen dem thermischen Widerstand des nicht verzweigten Asts, seiner Geometrie und dem thermischen Widerstand am Astende R_{thE} .

VERZWEIGTER AST

Wird ein Ast gemäß dem Modell von Schoute verzweigt, so entstehen mit jeder Verzweigung zwei neue Teiläste. Die maximale Anzahl der Verzweigungsstufen im betrachteten Ast soll mit i_{max} bezeichnet werden, die Anzahl der neuen Teiläste je Verzweigung mit v (Modell von Schoute: $v = 2$). R_{thi} stellt den thermischen Widerstand eines jeden Teilasts, das heißt der Teil eines Asts, der sich zwischen zwei Verzweigungen befindet, dar. Dabei nummeriert $i = 0 \dots i_{max}$ die in der Berechnung zu berücksichtigenden Teiläste auf dem Wärmepfad bei der Wurzel beginnend. Die Voraussetzung zur Berechnung von R_{thi} ist, dass der Widerstand bekannt ist, der dem Teilast nachfolgt. Denn dieser thermische Endwiderstand R_{thEi} beeinflusst den thermi-

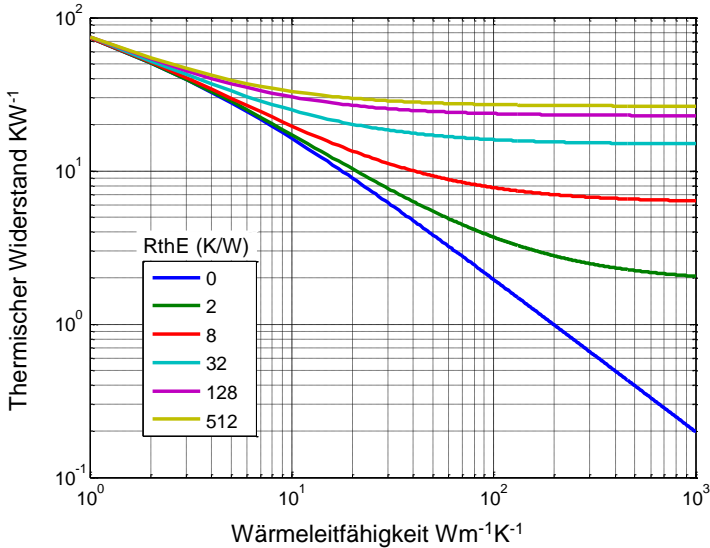


Abbildung 3.4: Thermischer Widerstand eines Teilasts in Abhängigkeit vom Widerstand an dessen Ende; typische Astgeometrie mit Länge 40 mm, Höhe 40 mm, Breite 5 mm und Wärmeübergangskoeffizient 10 Wm⁻²K⁻¹ an den Oberflächen

schen Widerstand des Teilasts gemäß Gleichung (3.4). Abbildung 3.4 zeigt diese Abhängigkeit für einen beispielhaften Teilast mit den angegebenen Eigenschaften. Hierbei wird der thermische Widerstand des Teilasts in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Astmaterials und dem thermischen Endwiderstand dargestellt. Der thermische Widerstand des Asts fällt kontinuierlich mit steigender Wärmeleitfähigkeit ab. Der Grenzfall, dass kein thermischer Endwiderstand

besteht, das heißt $R_{thE} = 0$, wird dabei durch die blaue Kurve dargestellt. Dieser Abfall wird durch einen vorhandenen Endwiderstand reduziert, der die Aufspaltung der Kurven bedingt. Je höher die Wärmeleitfähigkeit des Astmaterials ist, umso größer wird dabei der Einfluss des Endwiderstands. Denn mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit nimmt der thermische Widerstand im Teilast selbst ab und der zum Astende transportierte Wärmestrom zu. Abbildung 3.4 zeigt außerdem, dass der thermische Widerstand des Teilasts für $R_{thE} > 0$ gegen einen endlichen Wert strebt. Dieser hängt sowohl von R_{thE} als auch von der Astgeometrie ab. Für den Grenzfall, dass die Astgeometrie keinen Beitrag zur Wärmeabfuhr leistet, strebt R_{th} gegen R_{thE} für $\lambda \rightarrow \infty$. Der praxisrelevante Grenzwert gegen den der thermische Widerstand für einen großen thermischen Endwiderstand strebt, ergibt sich aus dem Fall, dass R_{thE} gegen unendlich strebt. Aus Gleichung (3.4) folgt damit

$$R_{th} = \frac{1}{m \tanh(nL)} \quad (3.6)$$

Zur Berechnung des thermischen Widerstands eines Teilasts wird demnach immer der thermische Widerstand des nachfolgenden Teilasts benötigt. Dieser entspricht gerade dem thermischen Widerstand der nachfolgenden Teiläste R_{thi+1} , so dass der thermische Widerstand des gesamten Asts aus der rekursiven Berechnung der thermischen Widerstände der Teiläste folgt. Abbildung 3.5 stellt die thermischen Widerstände in einem Ast mit $i_{max} = 2$ dar. Bei der Berechnung des thermischen Widerstands des letzten Teilasts ($i = i_{max} = 2$) ist es

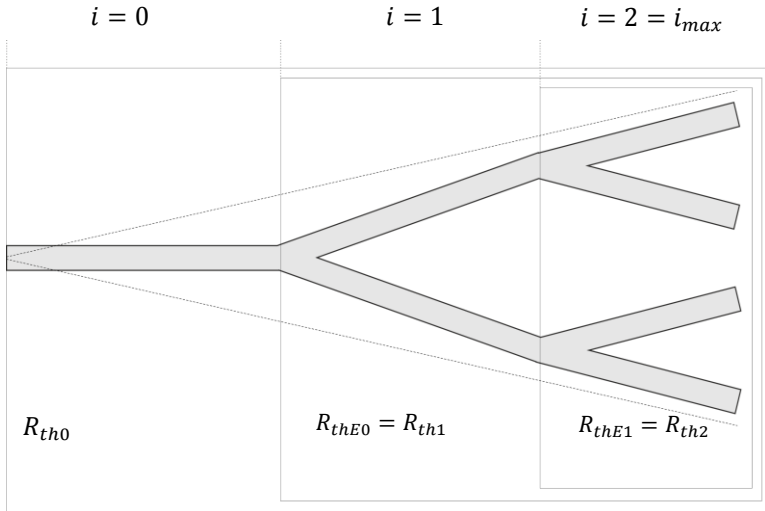


Abbildung 3.5: Rekursive Berechnung des thermischen Widerstands eines mehrfach verzweigten Asts mit $v = 2$ und $i_{max} = 2$

notwendig den thermischen Widerstand am Ende dieses Teilasts zu kennen. In der Praxis kann dieser Widerstand als sehr groß angenommen werden, da er lediglich die Wärmeabfuhr durch die Endfläche des Teilasts beschreibt [20]. Für den thermischen Widerstand des letzten Teilasts folgt deshalb die Berechnung aus Gleichung (3.6). Unter Berücksichtigung der Anzahl an neuen Teilästen pro Verzweigung v kann der thermische Widerstand des gesamten Asts R_{th} in Abhängigkeit von i berechnet werden:

$$R_{thi} = \begin{cases} \frac{1}{v n_i \tanh(m_i L_i)} & \text{falls } i = i_{max} \\ \frac{1 \sinh(m_i L_i) + n_i R_{thi+1} \cosh(m_i L_i)}{n_i \cosh(m_i L_i) + n_i R_{thi+1} \sinh(m_i L_i)} & \text{falls } i = 0 \\ \frac{1}{v n_i \cosh(m_i L_i) + n_i R_{thi+1} \sinh(m_i L_i)} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.7)$$

mit

$$m_i = \sqrt{\frac{\alpha_i U_i}{\lambda_i A_{Qi}}}; \quad n_i = \sqrt{\alpha_i U_i \lambda_i A_{Qi}} \quad (3.8)$$

Der thermische Widerstand ist neben der Wärmeleitfähigkeit des Astmaterials von den geometrischen Eigenschaften der Teiläste abhängig. Dabei gehen die Abmessungen der Teiläste durch U und A_Q direkt in Gleichung (3.7) ein, während mit dem Wärmeübergangskoeffizienten α_i der konvektive Wärmeübergang von den Kühlkörperoberflächen an die umströmende Luft einbezogen wird. Dieser hängt wiederum von der Geometrie des Kühlkörpers selbst ab und muss deshalb im Detail betrachtet werden. Dazu werden mehrere Äste zu einem vollständigen Kühlkörper kombiniert.

Ausgehend von einem kreisförmigen Querschnitt des Kühlkörpers, werden die Äste dabei gleichmäßig verteilt. In Abbildung 3.6 ist ein beispielhafter Kühlkörper in der Aufsicht und perspektivischen Ansicht dargestellt. Die Konstruktion erfolgt mit Hilfe von Kreissektoren mit Mittelpunktswinkel γ . Dabei lässt sich γ_{max} aus der Anzahl der Äste im Kühlkörper a , der maximalen Anzahl an Verzweigungsstufen in den Ästen i_{max} sowie der Anzahl der neuen Teiläste je Verzweigung v bestimmen zu

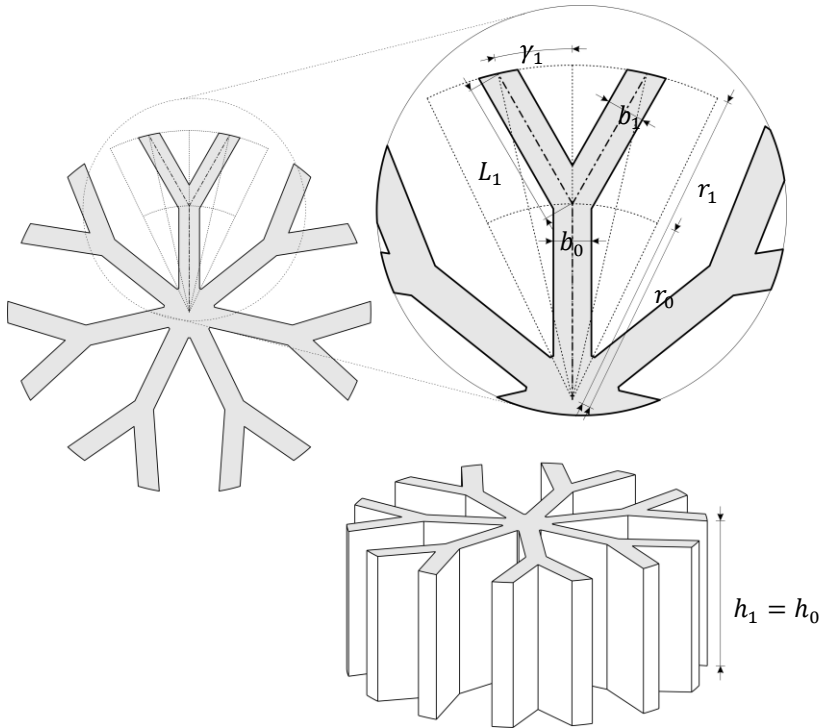


Abbildung 3.6: Beispielhafter, verzweigter Kühlkörper in der Aufsicht und perspektivischen Ansicht mit Parametern zur Beschreibung der Geometrie (Konfiguration: $a = 7$, $i_{max} = 1$, $v = 2$)

$$\gamma_{max} = \frac{360^\circ}{a \cdot v^{i_{max}+1}} \quad (3.9)$$

Die Radien an denen der Ast verzweigt wird, werden mit r_i bezeichnet, wobei i dem zu verzweigenden Teillast entspricht. Die Breite der Teilläste werden dementsprechend mit b_i beschrieben. In der dritten Dimension wird der Kühlkörper extrudiert.

Die geometrischen Eigenschaften gehen auch in die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten ein. Beschrieben wird der Wärmeübergangskoeffizient durch

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_F}{L_S} \quad (3.10)$$

worin Nu die Nußelt-Zahl, λ_F die Wärmeleitfähigkeit des Fluids und L_S eine charakteristische Systemabmessung, welche die für die Strömung maßgebliche Geometrieigenschaft beschreibt, darstellen. Die Bestimmung von α erfolgt immer für einen konkreten Wärmeübergang und wird in der Regel empirisch durchgeführt. Über die dimensionslose Nußelt-Zahl lassen sich dann dadurch vergleichbare Strömungssituationen beschreiben. Im Hinblick auf die verzweigte Astgeometrie werden zwei Bereiche mit unterschiedlichen Strömungssituationen betrachtet. In Abbildung 3.7 sind diese Bereiche in unterschiedlichen Grautönen dargestellt. Die v-förmigen dunkelgrau eingefärbten Bereiche beschreiben die Stellen innerhalb der Verzweigung, während die hellgrau eingefärbten Bereiche die Zwischenräume außerhalb darstellen.

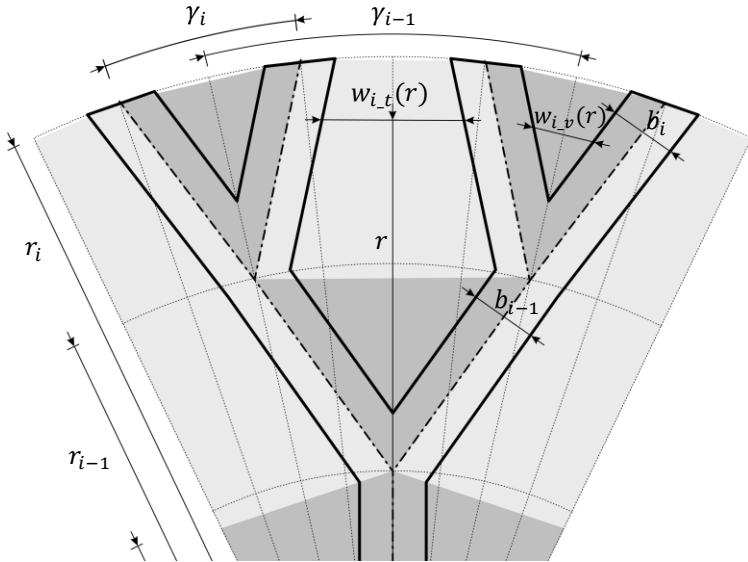


Abbildung 3.7: Abmessungen und Winkel an der verzweigten Geometrie

V-FÖRMIGE BEREICHE

Dem Wärmeübergang in den v-förmigen Bereichen liegen die Strömungsverhältnisse in einem Dreieck-Kanal zu Grunde, dessen benetzter Umfang aus der Summe der Längen der beiden begrenzenden Teiläste L_i besteht. Die charakteristische Systemabmessung L_{Si} berechnet sich allgemein aus dem Quotient der vierfachen Querschnittsfläche und des benetzten Umfangs [24]. Für diesen Bereich

berechnet sie sich unter Berücksichtigung der vorhandenen Winkelabhängigkeiten

$$\gamma_i = v^{|i-i_{max}-1|} \cdot \gamma_{max} \quad (3.11)$$

$$\delta_{vi} = \arctan\left(\frac{r_i \sin(0,5\gamma_i)}{r_i \cos(0,5\gamma_i) - r_{i-1}}\right) \quad (3.12)$$

deshalb zu

$$L_{Svi} = 2r_i \sin(0,5\gamma_i) \cos(\delta_{vi}) - b \cos^2(\delta_{vi}) \quad (3.13)$$

Die Nußelt-Zahlen für Dreieck-Kanäle wurden in verschiedenen Konfigurationen bestimmt und sind beispielsweise in [47], [48] und [49] zu finden. Sie sind abhängig vom Winkel an der Spitze des Dreiecks. Durch die Polynominterpolation der empirisch bestimmten Werte werden die für den relevanten Bereich geltenden Nußelt-Zahlen berechnet mit

$$\text{Nu}_{vi} = -0,0002 \delta_{vi}^2 + 0,024 \delta_{vi} + 1,71 \quad (3.14)$$

Damit lässt sich mit (3.10) der Wärmeübergangskoeffizient für die v-förmigen Bereiche α_{vi} bestimmen.

TRAPEZFÖRMIGE BEREICHE

Für die in Abbildung 3.7 hellgrau eingefärbten trapezförmigen Bereiche wird näherungsweise von einem zweiseitig beheizten Strömungskanal ausgegangen. Denn der Winkel, in dem die beiden Teil-

äste zueinander stehen, liegt für verzweigte Geometrien mit geringem thermischen Widerstand in der Regel im Bereich von 3° bis 18° . [50] stellt den Zusammenhang zwischen dem Produkt aus Gr^* und Pr und der Nußelt-Zahl her. Für eine genaue Abbildung dieses Zusammenhangs im relevanten Übergangsbereich zwischen $1 < Gr^*P < 30$ wird eine zusätzliche Funktion definiert, so dass in Verbindung mit [50] für die Nußelt-Zahlen im trapezförmigen Bereich gilt

$$Nu_{ti} = \frac{1}{3} Gr_{ti}^* \cdot Pr \quad \text{für} \quad Gr_{ti}^* Pr < 1$$

$$Nu_{ti} = 0,37 \ln(Gr_{ti}^* \cdot Pr) + 0,35 \quad \text{für} \quad 1 \leq Gr_{ti}^* Pr < 30 \quad (3.15)$$

$$Nu_{ti} = 0,69(Gr_{ti}^* \cdot Pr)^{0,25} \quad \text{für} \quad Gr_{ti}^* Pr \geq 30$$

wobei Pr der Prandtl-Zahl als Stoffkennzahl entspricht und sich Gr_{ti}^* aus der Grashof-Zahl Gr_{ti} für den jeweiligen Teilast berechnet mit

$$Gr_{ti}^* = \frac{Gr_{ti} \cdot L_{Sti}}{h_i} \quad (3.16)$$

Die Grashof-Zahl beschreibt das Verhältnis der Auftriebskräfte zur Kraft durch Viskosität eines Fluids. Mit dem isobaren Ausdehnungskoeffizienten β und der kinematischen Viskosität ν berechnet sie sich zu

$$Gr_{ti} = \frac{g \cdot \beta \cdot |T_W - T_A| \cdot L_{Sti}^3}{\nu^2} \quad (3.17)$$

Die charakteristische Systemabmessung L_{Sti} entspricht für den betrachteten Fall der beheizten parallelen Platten dem halben Plattenabstand und berechnet sich für den trapezförmigen Bereich in Abhängigkeit von der Anzahl der Verzweigungen i_{max} als Anpassungsfaktor für die unterschiedlichen Winkelbereiche aus dem mittleren Abstand zu

$$L_{Sti} = \left(r_{i-1} \sin(0,5\gamma_{i-1}) - \frac{r_i + r_{i-1} - 2r_{i-1} \cos(0,5\gamma_{i-1})}{2 \tan(\delta_{ti})} - \frac{b}{2 \sin(\delta_{ti})} \right) i_{max}^{-0,1} \quad (3.18)$$

Der darin enthaltene Winkel des Trapezbereichs δ_{ti} folgt aus

$$\delta_{ti} = \arctan \left(\frac{r_i \cos(0,5\gamma_i) - r_{i-1} \cos(0,5\gamma_{i-1})}{r_{i-1} \sin(0,5\gamma_{i-1}) - r_i \sin(0,5\gamma_i)} \right) \quad (3.19)$$

Aus Gleichung (3.15) und (3.10) lässt sich so der Wärmeübergangskoeffizient für die trapezförmigen Bereiche α_{ti} berechnen und mit α_{vi} ein mittlerer Wärmeübergangskoeffizient α_i für die Oberflächen des Kühlkörpers bestimmen. Die zur Berechnung des thermischen Widerstands notwendigen Längen der Teiläste im Kühlkörper lassen sich über die geometrischen Beziehungen aus den Radien der Verzweigungen bestimmen und berechnen sich mit (3.11) und (3.12) zu

$$L_i = \frac{2r_i \sin(0,5\gamma_i)}{2 \sin(\delta_{vi})} - \frac{b}{4 \tan(\delta_{vi})} \quad (3.20)$$

Für das näherungsweise Berechnungsmodell des verzweigten Asts stehen somit alle notwendigen Beziehungen zur Verfügung. Zusammen-

mengefasst hängt der thermische Widerstand des verzweigten Kühlkörpers nach Gleichung (3.7) damit von den folgenden Eigenschaften der Kühlkörper-Geometrie ab:

- Anzahl an Ästen a
- Anzahl an Verzweigungen pro Ast i_{max}
- Anzahl an neuen Teilästen pro Verzweigung v
- Radius der Verzweigung r_i
- Breite des Teilasts b_i
- Höhe des Teilasts h_i

Alle anderen Parameter sind durch die geometrischen Abhängigkeiten untereinander gegeben. Beschränkungen im Wertebereich ergeben sich in der Verbindung einzelner Parameter. Ihre Berücksichtigung ermöglicht die Berechnung geometrisch valider Lösungen. So hängt die geometrisch maximal mögliche Anzahl an Ästen zum Beispiel sowohl von der Anzahl an Verzweigungen pro Ast, als auch von der Anzahl an neuen Teilästen pro Verzweigung und der Breite der Teiläste ab. Die geometrischen Randbedingungen des Kühlkörpers liefern zudem die Grenzen beispielsweise für den maximal zulässigen Radius, die maximale Höhe der Teiläste oder ihre minimal zulässige Breite.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des näherungsweisen Berechnungsmodells mit Ergebnissen von thermischen Simulationen überprüft, um die Aussagen des Modells zu bewerten.

3.4.3 NÄHERUNGSMODELL IM VERGLEICH

Zum Vergleich der Ergebnisse der näherungsweise Berechnung des thermischen Widerstands mit den Ergebnissen der Simulation, wird zunächst ein parametrisierbares CAD-Modell eines verzweigten Kühlkörpers aufgebaut, welches als Grundlage für die thermischen Simulationen dient. Die Ergebnisse der Simulationen werden dann den Ergebnissen der näherungsweise Berechnung gegenübergestellt und die Abweichungen berechnet. Beispielhaft werden nachfolgend die Ergebnisse für zwei sehr unterschiedliche verzweigte Geometrien dargestellt.

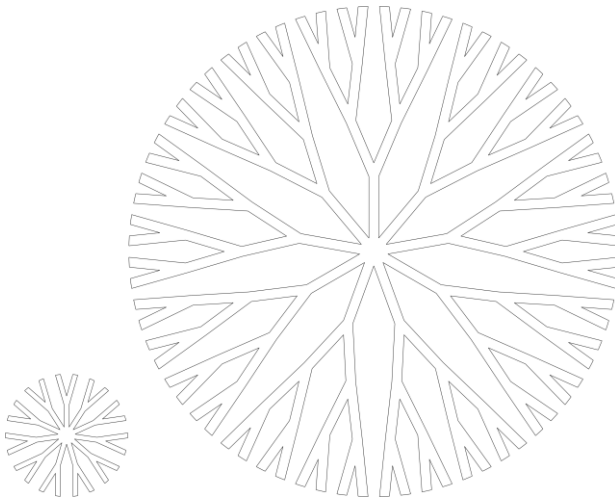


Abbildung 3.8: Querschnitt zweier Beispielgeometrien in gleichem Maßstab mit Durchmesser 50 mm (links) und 200 mm (rechts)

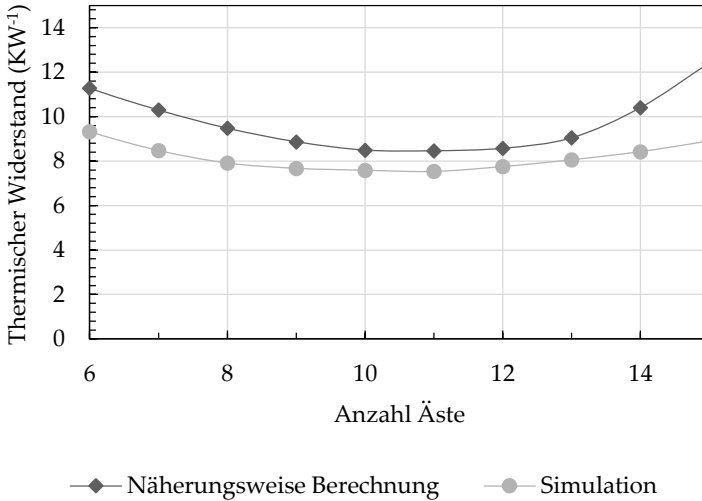


Abbildung 3.9: Thermischer Widerstand bei unterschiedlicher Anzahl an Ästen (50 mm Durchmesser, $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Im ersten Fall handelt es sich um eine einfach verzweigte Geometrie mit einem Radius von 25 mm. Die Verzweigung befindet sich im Abstand von 12,5 mm zum Mittelpunkt. Die Anzahl der Äste ist variabel. Die Äste sind immer gleichmäßig über den Umfang verteilt und ihre Breite beträgt in allen Astabschnitten 2 mm. Abbildung 3.8 zeigt den Querschnitt der Variante mit elf Ästen. In die dritte Dimension ist die Geometrie um 50 mm extrudiert. Die Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Materials wird mit $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ angenommen. Als umgebendes Fluid wird von Luft bei 25°C ausgegangen. Der Verlustleistungseintrag erfolgt im Volumen des Kerns mit 7 W. Die Ergebnisse der Simulationen werden als thermischer Widerstand in Abbildung 3.9 durch Kreise dargestellt. Die eingezeichneten Rauten stellen je-

weils die Ergebnisse der näherungsweise Berechnung unter Berücksichtigung simulativ bestimmter Oberflächentemperaturen dar. Er-sichtlich ist zum einen zwar die absolute Abweichung der nähe-rungsweise Berechnung hin zu höheren Widerständen, zum ande-ren jedoch eine entsprechende Übereinstimmung des relativen Kurvenverlaufs. Das Minimum kommt dadurch zu Stande, dass sich mit steigender Anzahl an Ästen zwar die Oberflächen zur konvek-tiven Wärmeaustausch vergrößern, gleichzeitig jedoch die Konvek-tion durch die Verengung der Strömungskanäle zwischen den Ästen ein-geschränkt wird. Übersteigt diese Behinderung der Konvektion den Zugewinn, der durch die zusätzlichen Oberflächen entsteht, steigt der thermische Widerstand trotz zunehmender Anzahl an Ästen an. Der näherungsweise berechnete thermische Widerstand liegt mit ein-em Faktor von mindestens 1,098 über dem simulativ bestimmten Widerstand.

Ein weiterer Vergleich der näherungsweise Berechnung mit Ergeb-nissen thermischer Simulationen erfolgt durch Veränderung der Wärmeleitfähigkeit des Materials der Äste. Bei der Verringerung um eine Größenordnung auf $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ wird der für die gängigen me-tallischen Kühlkörpermateriale geltende Bereich der Wärmeleitfä-higkeit abgedeckt. Der durch diese Verringerung erhöhte thermische Widerstand wird sowohl in der näherungsweise Berechnung als auch in den Ergebnissen der Simulation abgebildet. Abbildung 3.10 stellt den Verlauf des thermischen Widerstands bei einer un-ter-schiedlichen Anzahl an Ästen dar. Die Abweichung zwischen beiden Kurven liegt in diesem Fall bei einem Faktor von mindestens 1,071.

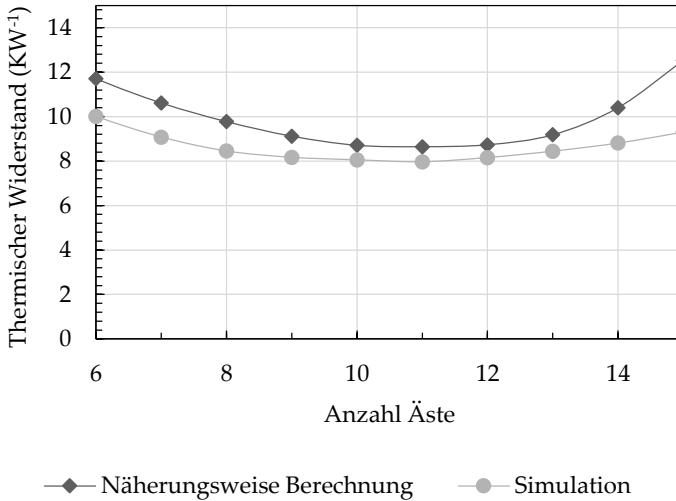


Abbildung 3.10: Thermischer Widerstand bei unterschiedlicher Anzahl an Ästen (50 mm Durchmesser, $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Der dritte hier dargestellte Vergleich zeigt die Ergebnisse der näherungsweisen Berechnung für eine wesentlich größere Geometrie mit mehreren Verzweigungen. Mit einem Durchmesser von 200 mm, einer Höhe von 100 mm, einer Astbreite von 4 mm und drei Verzweigungen pro Ast unterscheidet sich die Geometrie deutlich von der Geometrie des ersten Vergleichs, wie Abbildung 3.8 rechts veranschaulicht. Mit einer Wärmeleitfähigkeit von $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ werden bei einer Umgebungstemperatur von 25°C und einem Leistungseintrag von 150 W im Kern die in Abbildung 3.11 dargestellten thermischen Widerstände ermittelt. Der Vergleich zwischen der näherungsweisen Berechnung und den Ergebnissen der thermischen Simulationen zeigt eine Abweichung von mindestens 1,528 bei 14 Ästen, wobei auch in diesem Fall die näherungsweise Berechnung einen höheren

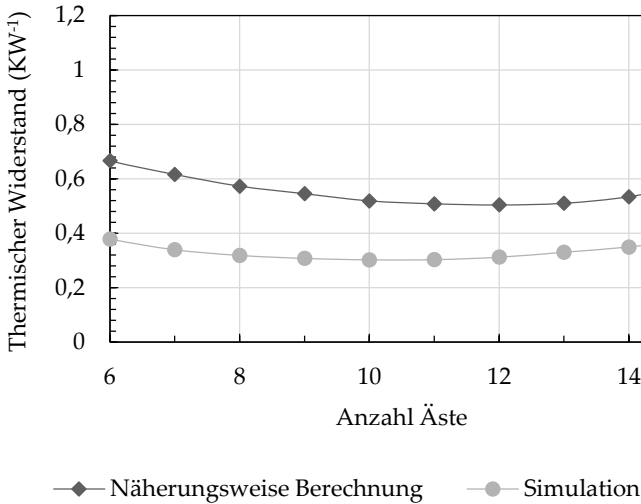


Abbildung 3.11: Thermischer Widerstand bei unterschiedlicher Anzahl an Ästen (200 mm Durchmesser, $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

thermischen Widerstand voraussagt als die Simulation. Die Bestimmung der Anzahl an Ästen mit dem geringsten thermischen Widerstand für die gegebene Konfiguration führt mittels Simulation zu zehn Ästen, während die näherungsweise Berechnung das Minimum bei zwölf Ästen bestimmt. Die Abweichung im thermischen Widerstand dieser beiden Konfigurationen beträgt gemäß der Simulation einen Faktor von 1,032.

Die Ergebnisse aller drei Vergleiche zeigen eine Übereinstimmung im Kurvenverlauf zwischen näherungsweise Berechnung und Simulation. Aufgrund der mit geringerer oder höherer Anzahl an Ästen steigenden Abweichung von den geometrischen Idealbedingungen ist erwartungsgemäß die Näherung in diesen Fällen ungenauer und der

Unterschied zwischen beiden Ergebnissen nimmt zu. Dies zeigt beispielsweise die relative Abweichung zum jeweiligen Minimum um mehr als einen Faktor von 1,10 außerhalb des Bereichs von acht bis dreizehn Ästen im Vergleich der ersten Geometrie. Dennoch lässt die näherungsweise Berechnung eine direkte Aussage über die Anzahl an Ästen zu, die benötigt werden, um einen geringen thermischen Widerstand für die gegebene Konfiguration zu erreichen. Im Vergleich der Geometrien liefert die näherungsweise Berechnung erwartungsgemäß größere Abweichungen zur Simulation, wenn die Anzahl an Verzweigungen höher ist und damit mehr Gebiete berechnet werden müssen, die jeweils einen Beitrag zur gesamten Abweichung leisten. Können in den ersten beiden Vergleichen mittels der näherungsweise Berechnung die Minima des thermischen Widerstands für die gegebenen Konfigurationen genau bestimmt werden, sagt die Berechnung im dritten Vergleich das Minimum bei zwölf Ästen voraus, während die Simulation es bei zehn Ästen sieht. In diesem Fall entspricht die Differenz dieser zwei Äste einem Faktor 1,032 beziehungsweise $0,01 \text{ KW}^{-1}$ im thermischen Widerstand gemäß der Simulation.

Die Vergleiche zeigen die Möglichkeit über die näherungsweise Berechnung eine Aussage zur Auslegung der Geometrie zu erhalten, um den thermischen Widerstand zu verringern. Die näherungsweise Berechnung liefert die Vorgaben für die Auslegung, auch wenn sie aufgrund der Abweichungen in den Absolutwerten keine exakten Aussagen zur letztendlichen Leistungsfähigkeit der Geometrie treffen kann. Sie bietet jedoch die Grundlage für die Entwicklung von

LED-Systemen basierend auf verzweigten Strukturen. Im nachfolgenden Kapitel wird der Entwurf eines solchen LED-Systems für die Allgemeinbeleuchtung beschrieben.

Kapitel 4

ENTWURF EINES LED-SYSTEMS

Mit der näherungsweise Berechnung des thermischen Widerstands von verzweigten Strukturen steht ein Werkzeug zur Verfügung, welches die Bestimmung der geometrischen Basis eines verzweigten Kühlkörpers erlaubt. Beim detaillierten Entwurf wird diese Basis weiter verfeinert. Ziel dabei ist es einerseits den thermischen Widerstand weiter zu verringern, andererseits aber auch ein ästhetisches Erscheinungsbild zu erhalten und eine fertigungsgerechte Geometrie zu erzeugen. Dieses Kapitel beschreibt die Vorgehensweise am Beispiel eines LED-Systems für die Allgemeinbeleuchtung. Nach Festlegung der Entwicklungsvorgaben wird die Geometrie schrittweise im Detail angepasst. Die Bewertung der Auswirkungen auf den thermischen Widerstand erfolgt jeweils durch thermische Simulationen.

Die Entwicklung findet in zwei aufeinander aufbauenden Schritten statt. Zunächst wird ein zylinderförmiger Kühlkörper entworfen, der als extrudierte Geometrie geringere Anforderungen an die Fertigungstechnik stellt als die LED-Leuchte, die im zweiten Schritt umgesetzt wird. Dabei steht die Funktionsintegration im Vordergrund, die es erlaubt leuchtenspezifische Komponenten direkt im Bauteil zu integrieren. Bei der Herstellung der LED-Leuchte wird auf die Erfah-

rungen aus der Fertigung der zylinderförmigen Kühlkörper zurückgegriffen, um eine hohe Fertigungsqualität zu erreichen und ein seriennahes Bauteil zu produzieren.

4.1 ENTWICKLUNGSVORGABEN

Ziel ist die Entwicklung eines LED-Systems, das als Anwendungsbeispiel den Einsatz verzweigter Strukturen in der LED-Beleuchtung demonstriert. Dabei soll eine Lichtquelle für die Allgemeinbeleuchtung entwickelt werden, die aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit, Größe und des ästhetischen Erscheinungsbilds universell für verschiedene Beleuchtungsaufgaben im Wohnraum eingesetzt werden kann. Der Lichtstrom orientiert sich deshalb zunächst an dem einer herkömmlichen Allgebrauchsglühlampe von 60 W mit 505 lm [51]. Für die Auslegung der Optik des LED-Systems wird in Kapitel 4.3.2 diese Vorgabe für den Lichtstrom durch eine präzisere, anwendungsbezogene Beleuchtungsstärkeverteilung und Gleichmäßigkeit ersetzt. Der eingenommene Bauraum des Systems soll geringer ausfallen als der einer Allgebrauchsglühlampe und wird auf einen Zylinder des Durchmessers 50 mm und der Höhe 50 mm festgelegt. Im Gegensatz zur Glühlampe soll das LED-System eine vollständige Leuchte darstellen, die als Pendelleuchte eingesetzt werden kann. Dies erfordert neben einem angemessenen Erscheinungsbild auch die Integration von optischem System und Komponenten, wie beispielsweise LED-Aufnahme und Kabeldurchführung mit Zugentlastung. Zum Zeitpunkt der Arbeit sind kommerziell einige LED-Typen verfügbar, die

ermöglichen einen ausreichend hohen Lichtstrom aus einer einzelnen LED bereitzustellen und deshalb platzsparend in das System integriert werden können. Ausgehend von der dabei erreichbaren optischen Effizienz in Verbindung mit einem optischen System muss für den geforderten Lichtstrom mit einer elektrischen LED-Leistung von ungefähr 10 W gerechnet werden. Berücksichtigt man als maximal zulässige LED-Temperatur 150 °C bei einer Umgebungstemperatur von höchstens 40 °C und einer thermischen Verlustleistung von 6,5 W, darf der thermische Widerstand des Gesamtsystems $16,9 \text{ KW}^{-1}$ keinesfalls überschreiten. Angestrebt wird eine möglichst geringe LED-Temperatur durch einen thermischen Widerstand, der unter diesem Maximalwert liegt. Aus dem im Kapitel 5 beschriebenen Fertigungsverfahren des Pulverspritzgießens, das für die Herstellung der entworfenen Kühlkörper zum Einsatz kommt, folgen neben den Vorgaben für das eingesetzte Material auch Einschränkungen für die Geometrie. So muss bei der Auslegung die Fertigung in Kupfer mit einer Wärmeleitfähigkeit bis $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ berücksichtigt werden [52] und die Wandstärken der Geometrie sind auf den Bereich zwischen 1 mm und 6 mm begrenzt. Die Zielstellung ist dementsprechend die Entwicklung einer leistungsstarken, herstellbaren LED-Leuchte mit kleinem Bauraum und hohem ästhetischem Wert.

4.2 GEOMETRIEAUSLEGUNG

Die Entwicklung der Kühlkörper-Geometrie erfolgt unter Berücksichtigung mehrerer Teilaspekte. Neben der Anzahl an Ästen muss

beispielsweise auch die Breite der Äste, die Anzahl an Verzweigungen und deren Form betrachtet werden. Nur so kann der Kühlkörper den gestellten Anforderungen gerecht werden. Die einzelnen Parameter der Geometrie werden nachfolgend in einzelne Abschnitte unterteilt. Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung können bei der Auslegung der Geometrie die Parameter jedoch nicht ausschließlich der Reihe nach betrachtet werden, sondern es müssen immer wieder Schleifen in der Entwicklung erfolgen, um die Auswirkungen von Änderungen der Geometrie vollständig bewerten zu können. In Ergänzung zur Wärmeleitfähigkeit von Kupfer mit $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ werden in den relevanten Fällen auch Wärmeleitfähigkeiten von $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und $4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ betrachtet, um den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit aufzuzeigen. Diese entsprechen der Größenordnung von thermisch weniger leitfähigen Metallen wie beispielsweise Edelstahl beziehungsweise der von thermisch angepassten Kunststoffen und lassen deshalb eine Aussage zum Einfluss von Änderungen am verwendeten Werkstoff zu.

4.2.1 ÄHNLICHKEIT UND SYMMETRIE

Grundlegender Vorteil der verzweigten Struktur für die Wärmeabfuhr in radialen Systemen ist die Ähnlichkeit der Geometrie bei unterschiedlichem Radius. Dadurch können in jedem Teilast gleiche Strömungsbedingungen hergestellt werden, sofern die Wandbedingungen identisch sind (Gleichung (2.15)). Bieten diese Bedingungen in einem Teilast die bestmögliche Wärmeabfuhr, herrscht diese

auch in allen anderen Teilästen, sofern sie sich ähnlich sind. Ein wichtiger Faktor beim Entwurf einer verzweigten Geometrie ist deshalb die Ähnlichkeit. Diese wird durch symmetrische, in gleichen Winkeln angeordnete Äste (Gleichung (3.9)), einer identischen Anzahl an neuen Teilästen pro Verzweigung sowie Teiläste mit identischer Höhe und Breite innerhalb jeder Verzweigungsstufe erreicht (vergleiche Abbildung 3.6). Dabei muss gleichzeitig berücksichtigt werden, dass überall identische Wandbedingungen angenommen werden können.

4.2.2 ART DER VERZWEIGUNG

Bei Berücksichtigung des Pflanzenarchitekturmodells nach Shoute (Abbildung 3.3) entstehen, wie bei vielen natürlichen Vorbildern zu beobachten, aus einem Teilast mit jeder Verzweigung zwei neue Teiläste ($v = 2$). Dies hat eine gleichmäßigere Verteilung des Materials im eingenommenen Bauraum und damit gleichmäßigere Breiten der Strömungskanäle zur Folge, als es mit einer höheren Anzahl an neuen Teilästen pro Verzweigung möglich wäre. Denn ausgehend von einem Kreissektor als Querschnittsfläche des Bauraums (vergleiche Abbildung 3.6), der durch den vollständigen Ast ausgefüllt werden soll, bietet die zweifache Verzweigung die Voraussetzung diese Fläche mit hoher Gleichmäßigkeit abzudecken. Denn die Breite des Kreissektors steigt lediglich linear mit dem Radius an, während die Anzahl an Teilästen mit jeder Verzweigung auf v^i steigt. $v > 2$ hat zur Folge, dass mit zunehmendem i eine hohe Anzahl an Teilästen

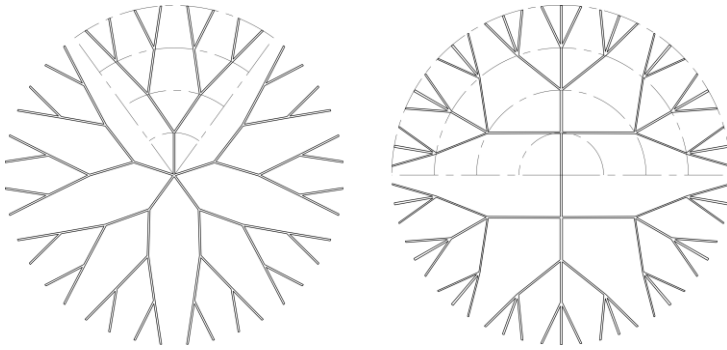


Abbildung 4.1: Geometrien mit dem geringsten thermischen Widerstand für unterschiedliche Anzahl an Teilästen pro Verzweigung: Links $v = 2$; rechts $v = 3$

entsteht, die große Unterschiede zwischen den Breiten der Strömungskanäle verursachen. Abbildung 4.1 verdeutlicht dies für $v = 2$ und $v = 3$. Eine vollständige Nutzung des Bauraums und eine gleichmäßige Verteilung der Oberflächen tragen positiv zur Wärmeabfuhr bei. Der Vergleich der beiden in Abbildung 4.1 dargestellten Geometrien mit 50 mm Durchmesser bestätigt diese Annahme. Für $v = 3$ ist der geringste erreichbare thermische Widerstand um Faktor 1,084 höher als der für $v = 2$. Die Anzahl der zum Erreichen dieses thermischen Widerstands notwendigen Äste liegt für $v = 2$ bei fünf, während sie für $v = 3$ aufgrund der höheren Anzahl an neuen Teilästen pro Verzweigung lediglich zwei beträgt. Dies entspricht der Mindestanzahl an Ästen, um eine vollständige Kühlkörper-Geometrie zu erhalten und verdeutlicht die zu hohe Anzahl an Teilästen bei $v = 3$.

Daneben vermittelt die zweifache Verzweigung ein natürliches Erscheinungsbild des Kühlkörpers. Bereits mit $v = 3$ entsteht dagegen eine Form, mit der der Betrachter kaum noch direkt die Architektur der Natur assoziiert. Für die Auslegung der Geometrie wird deshalb eine zweifache Verzweigung zugrunde gelegt.

4.2.3 BREITE DER ÄSTE UND ANZAHL DER VERZWEIGUNGEN

In der Natur reduziert sich die Breite der Äste nach jeder Verzweigung. Die Breite der Äste beeinflusst ihren Querschnitt und damit einerseits die Wärmeleitung im Material, andererseits die Konvektion an den Oberflächen durch die Breite der entstehenden Strömungskanäle zwischen den Ästen. Äste mit großer Breite tragen zu einer guten Wärmeleitung bei, reduzieren aber die Breite der Strömungskanäle und umgekehrt. Deshalb muss die Breite der Äste gerade ausreichend für die Wärmeleitung gewählt werden, damit die Konvektion möglichst wenig behindert wird. Zudem dürfen für ein reales System die Vorgaben der Fertigung für minimale Wandstärken nicht unberücksichtigt bleiben.

Im Hinblick auf die Wärmeleitung muss die Querschnittsfläche des Asts betrachtet werden, die den thermischen Widerstand der Wärmeleitung gemäß Gleichung (2.10) direkt beeinflusst. Eine konstante Breite für alle Teiläste würde den Querschnitt in einem Ast mit jeder Verzweigung erhöhen, obwohl der Abstand zum Leistungseintrag steigt. Ausgehend von einer konstanten Querschnittsfläche für einen konstanten thermischen Widerstand der Wärmeleitung berechnet

sich bei v neuen Teilästen pro Verzweigung die Breite b_i der neuen Teiläste dagegen aus der Breite des vorhergehenden Teilasts b_{i-1} durch

$$b_i = \frac{b_{i-1}}{v} \quad (4.1)$$

Neben einer konstanten Querschnittsfläche über den kompletten Ast für vergleichbare Wandbedingungen, begünstigt dies gegenüber einer konstanten Breite eine größere Ähnlichkeit der Strömungskanäle nach jeder Verzweigung, da die zunehmende Anzahl an Teilästen durch die abnehmende Breite dieser kompensiert wird. Daneben wird ein natürliches Erscheinungsbild der Verzweigung und ein verringertes Materialvolumen erreicht sowie die Fertigung in einem Gießverfahren vereinfacht, da ein kontinuierlicher Materialfluss bis in die äußeren Teiläste gewährleistet werden kann.

Der Einfluss der Astbreite sowohl auf die Wärmeleitung als auch auf die Konvektion zeigt sich bei der Betrachtung des thermischen Widerstands. In Abbildung 4.2 ist er für die Beispielgeometrie mit $i_{max} = 1$ und $i_{max} = 2$ bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten des verwendeten Astmaterials als relativer thermischer Widerstand zum Minimum für $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ aufgetragen. Mit zunehmender Astbreite fällt der thermische Widerstand durch den zunehmenden Querschnitt für die Wärmeleitung zunächst ab, um nach Erreichen seines Minimums durch die Abnahme der Breite der Strömungskanäle wieder anzusteigen. Je geringer die Wärmeleitfähigkeit, desto größer muss die Astbreite sein, um einen minimalen thermischen Widerstand zu erreichen. Bei einer Wärmeleitfähigkeit von $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

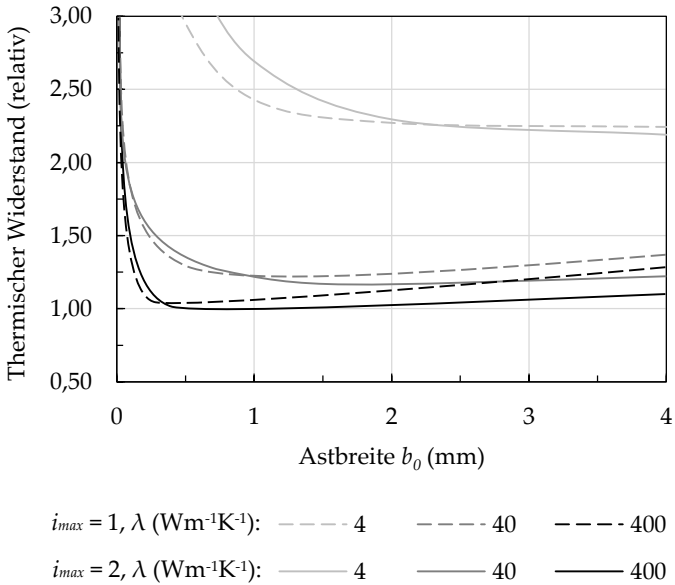


Abbildung 4.2: Abhängigkeit des thermischen Widerstands von der Astbreite bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten des Astmaterials λ für $i_{max} = 1$ und $i_{max} = 2$ (50 mm-Beispielgeometrie)

ist der geringste thermische Widerstand für die Geometrie mit einer Verzweigung bei einer Astbreite b_0 von 0,51 mm zu erwarten. Bei Erhöhung der Anzahl an Verzweigungen pro Ast auf 2 verringert sich der thermische Widerstand. Die notwendige Astbreite b_0 steigt dabei an, da sich durch die Erhöhung der Anzahl an Verzweigungen pro Ast die Breite der jeweils äußeren Teiläste b_{max} verringert mit

$$b_{max} = \frac{b_0}{2^{i_{max}}} \quad (4.2)$$

Dementsprechend muss b_0 ansteigen, um eine ausreichende Wärmeleitung in den äußeren Teilästen zu gewährleisten. Der geringste thermische Widerstand für die Geometrie mit zwei Verzweigungen ist bei einer Wärmeleitfähigkeit von $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ deshalb bei einer Astbreite b_0 von $0,98 \text{ mm}$ zu erwarten, wie Abbildung 4.2 verdeutlicht.

Eine weitere Erhöhung der Anzahl an Verzweigungen auf $i_{max} = 3$ zeigt für die betrachtete Wärmeleitfähigkeit von $4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bereits einen Anstieg im minimal erreichbaren thermischen Widerstand um Faktor $1,031$. Für eine Wärmeleitfähigkeit von $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ wird der thermische Widerstand noch um den Faktor $0,993$ reduziert, während er für $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ um Faktor $0,966$ fällt. Bei $i_{max} = 4$ wird auch für eine Wärmeleitfähigkeit von $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ kein Rückgang des thermischen Widerstands mehr erreicht. Der thermische Widerstand steigt im Vergleich zu $i_{max} = 3$ um Faktor $1,008$ beziehungsweise $1,002$. Abbildung 4.3 stellt den minimal erreichbaren thermischen Widerstand in Abhängigkeit der Anzahl an Verzweigungen für die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten dar. Bei einer Wärmeleitfähigkeit von $4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ist der geringste thermische Widerstand mit zwei Verzweigungen zu erreichen, während er für eine Wärmeleitfähigkeit von $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ mit drei Verzweigungen erreicht wird. In allen drei Fällen liegt der durch die Verzweigung maximal erreichbare Vorteil im thermischen Widerstand

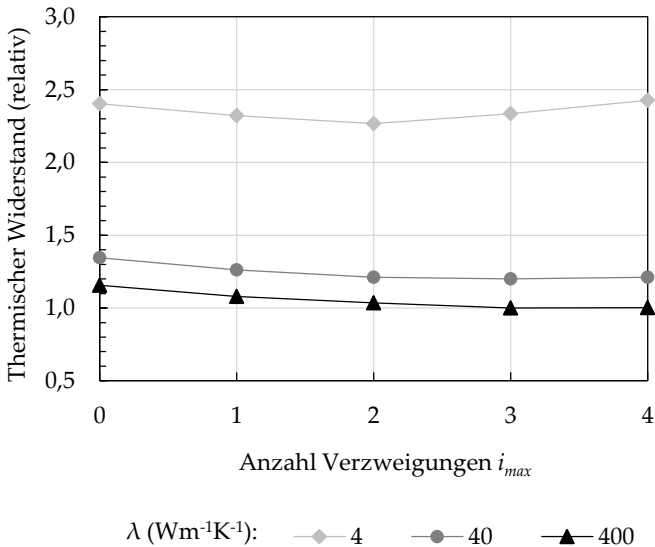


Abbildung 4.3: Minimal erreichbarer thermischer Widerstand in Abhängigkeit der Anzahl an Verzweigungen für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten (50 mm-Beispielgeometrie); normiert auf das Minimum für 400 Wm⁻¹K⁻¹ bei $i_{max} = 3$.

gegenüber der herkömmlichen Geometrie ohne Verzweigungen im Bereich von Faktor 0,865 bei 400 Wm⁻¹K⁻¹ bis 0,943 bei 4 Wm⁻¹K⁻¹.

Aus den Geometrievorgaben des Herstellungsverfahrens geht eine minimal zulässige Wandstärke von 1 mm im Fertigteil hervor. Abbildung 4.4 stellt den thermischen Widerstand in Abhängigkeit von der Breite der äußeren Teiläste b_{max} bei unterschiedlicher Anzahl an Verzweigungen für eine Wärmeleitfähigkeit von 400 Wm⁻¹K⁻¹ dar. Der

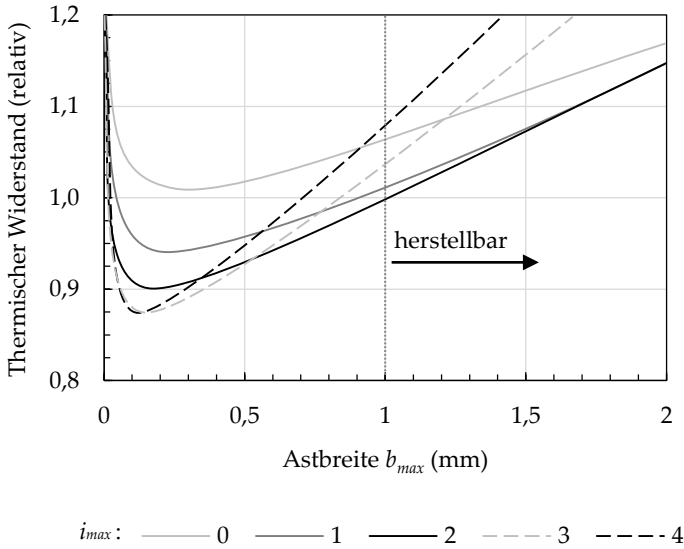


Abbildung 4.4: Abhängigkeit des thermischen Widerstands von der Breite der äußeren Teiläste bei $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und unterschiedlicher Anzahl an Verzweigungen; normiert auf das Minimum für $b_{max} = 1$.

minimale thermische Widerstand einer herstellbaren Geometrie wird für $b_{max} = 1$ mm mit $i_{max} = 2$ erreicht. Deshalb wird die Geometrie mit zwei Verzweigungen und den geringsten herstellbaren Wandstärken ausgelegt. Sowohl für eine Wärmeleitfähigkeit von $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ als auch von $4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bietet diese Geometrie die höchste Leistungsfähigkeit unter den gegebenen Randbedingungen. Erst bei geringeren Astbreiten sind hierbei Unterschiede zu erwarten, wie Abbildung 4.5 für $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ zeigt.

Im Vergleich zur Beispielgeometrie mit 50 mm Durchmesser (Abbildung 3.8) wird der thermische Widerstand durch die Anpassung der Breite der Äste, ihrer Anzahl sowie der Anzahl an Verzweigungen pro Ast um den Faktor 0,848 verringert, wenn die Vorgaben aus dem Herstellungsverfahren berücksichtigt werden. Ohne diese Einschränkungen würde ein nochmals um Faktor 0,871 geringerer thermischer Widerstand erreicht werden.

Die Anzahl an Verzweigungen und die Breite der Äste beeinflussen das Erscheinungsbild der Geometrie sehr stark. Eine Verzweigung pro Ast lässt zwar den Rückschluss auf den natürlichen Ursprung der Struktur zu, deutlich hervor tritt er aber erst mit zwei oder mehr Verzweigungen, da hier die natürliche Architektur erkennbar wird. Die maximale Anzahl an Verzweigungen muss sich nicht nur aus thermischer, sondern auch aus ästhetischer Sicht am zur Verfügung stehenden Bauraum orientieren. Viele Verzweigungen auf kleinem Bauraum führen zu vielen kurzen Teilästen ohne klare Trennung und damit zu einem optischen Verschmelzen dieser. Dieses Verschmelzen wird durch die minimal zulässige Breite der Äste gegebenenfalls noch verstärkt. Diese tragen jedoch auch dazu bei, dass die Geometrie nicht zu filigran erscheint. Sie verleihen ihr auch in den äußeren Teilästen eine stabile Erscheinung und ein ausgeglichenes optisches Gewicht. Die thermischen Eigenschaften und die herstellungstechnischen Vorgaben stehen somit nicht den Anforderungen an die Ästhetik gegenüber, sondern fördern ein ästhetisches Erscheinungsbild.

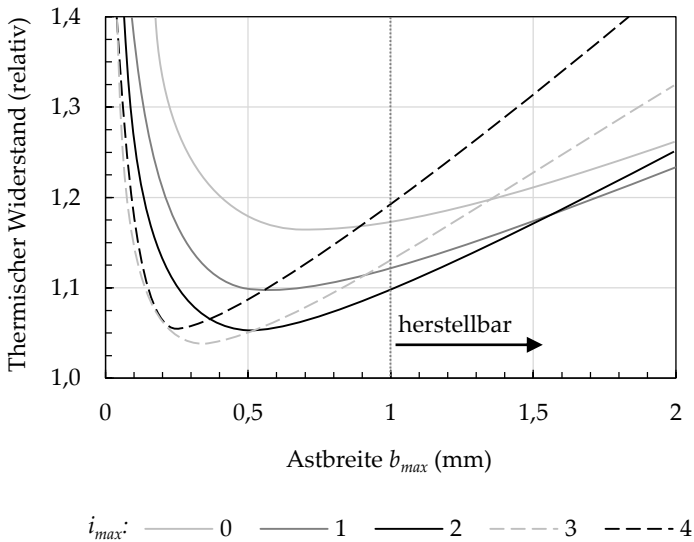


Abbildung 4.5: Abhängigkeit des thermischen Widerstands von der Breite der äußeren Teiläste bei $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und unterschiedlicher Anzahl an Verzweigungen (normiert gemäß Abbildung 4.4)

4.2.4 ANZAHL DER ÄSTE

Die Gesamtzahl der Äste a im Kühlkörper bestimmt direkt dessen Oberfläche. Zusammen mit der Breite der Äste beeinflusst sie außerdem die Breite der Strömungskanäle zwischen den Oberflächen und damit die Konvektion. Je größer die Temperatur der Oberflächen, das heißt je besser die Wärmeleitung in den Ästen, desto geringer können die Strömungskanäle sein, ohne die Grenzschichten zu beeinflussen

(Gleichung (2.15)). Schmalere Strömungskanäle bedeuten mehr Äste und damit größere Oberflächen. Die Wärmeleitung wird wiederum begünstigt durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Materials und breite Äste. Die Anzahl der Äste, die zum geringsten thermischen Widerstand führt, geht deshalb aus dem günstigsten Verhältnis zwischen Oberfläche und Kanalbreite hervor und ist dabei abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Materials. Dadurch, dass die Anzahl der Verzweigungen pro Ast bestimmt wie viele Teiläste im Ast entstehen, beeinflusst sie auch die Anzahl der Äste im Kühlkörper. Abbildung 4.6 stellt die Anzahl an Ästen dar, die, in Abhängigkeit der Anzahl an Verzweigungen pro Ast, zum Erreichen des geringsten thermischen Widerstands für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten notwendig ist. Erwartungsgemäß fällt sie zunächst mit steigender Anzahl an Verzweigungen. Je höher die Wärmeleitfähigkeit, umso größer ist die Anzahl an Ästen, für den Fall, dass die Geometrie keine Verzweigung aufweist. Die Breite der einzelnen Äste kann mit höherer Wärmeleitfähigkeit geringer ausfallen, weshalb mehr Äste eingesetzt werden können. Dieser Unterschied reduziert sich mit höherer Anzahl an Verzweigungen, da größere Oberflächen für die Konvektion den Bedarf an breiteren Ästen für die Wärmeleitung bei geringerer Wärmeleitfähigkeit ausgleichen. Ab fünf Verzweigungen entstehen so viele Teiläste, dass die Geometrie mit zwei Ästen den geringsten Widerstand aufweist. Um eine vollständige Kühlkörper-Geometrie beizubehalten, ist eine weitere Reduzierung der Anzahl an Ästen nicht möglich.

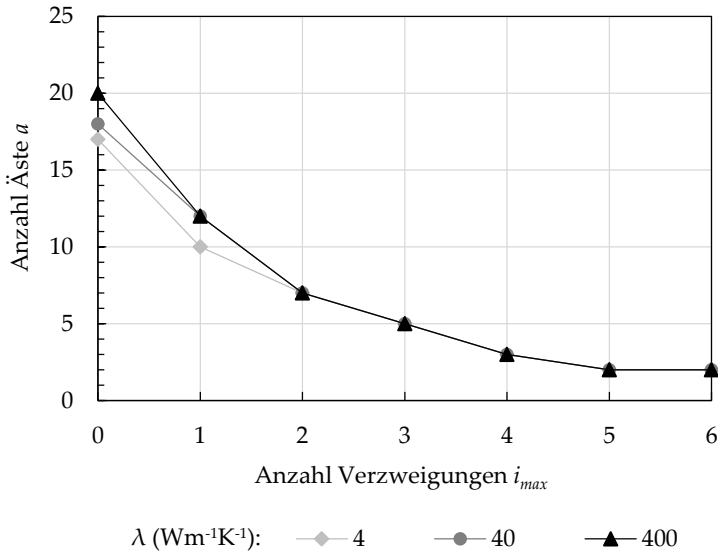


Abbildung 4.6: Anzahl der Äste zum Erreichen des jeweils geringsten thermischen Widerstands in Abhängigkeit von der Anzahl an Verzweigungen pro Ast für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des Astmaterials (ohne Berücksichtigung von Mindestwandstärken)

4.2.5 POSITION DER VERZWEIGUNGEN

Die Position der Verzweigung wird durch den Radius r_i beschrieben. Sie beeinflusst die Länge der Teiläste und damit wiederum die Breite der Strömungskanäle in jedem Astabschnitt. Im Vergleich zur Anzahl

der Äste und deren Breite ist ihr Einfluss auf den thermischen Widerstand unabhängig von der Wärmeleitfähigkeit gering, sofern die Radien der Verzweigungen ähnliche Längen der Teiläste bedingen und keine Extremwerte annehmen. Ausgehend von der Beispielgeometrie mit geringstem thermischen Widerstand für $i_{max} = 1$ und $r_1 = 25$ mm, das heißt $a = 12$ und $b_0 = 0,51$ mm, wird zunächst die Abhängigkeit des thermischen Widerstands von der Position der Verzweigung, beschrieben durch r_0 , untersucht. Hierbei zeigt sich gemäß Abbildung 4.7, unabhängig von den betrachteten Wärmeleitfähigkeiten, der minimale thermische Widerstand für $r_0 = 12,42$ mm. Er erhöht sich für die Wärmeleitfähigkeit von $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ über den Variationsbereich um den Faktor 1,076 für $r_0 = 2$ mm beziehungsweise um den Faktor 1,039 für $r_0 = 22$ mm. Die Position der Verzweigung bei $r_0 = 0,50 r_1$ führt zu identischen Radien für die beiden Teiläste und damit zu vergleichbaren Strömungsbedingungen in jedem Teilast.

Betrachtet man eine Geometrie mit mehr als einer Verzweigung, verschieben sich die Radien gegenüber den Positionen von identischen Längen in jedem Astabschnitt, wie Abbildung 4.8 am Beispiel für $i_{max} = 2$, $r_2 = 25$ mm, $a = 8$ und $b_0 = 1$ mm bei einer Wärmeleitfähigkeit von $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ zeigt. Dabei fällt stets der letzte Astabschnitt kürzer aus. Diese Verkürzung geht zu Gunsten der Breite des Strömungskanals in den trapezförmigen Bereichen, die den Vorteil durch längere v-förmige Strömungskanäle im letzten Astabschnitt aufwiegt. Das Minimum des thermischen Widerstands ergibt sich für $r_0 = 10,51$ mm und $r_1 = 19,38$ mm. Die Geometrie mit gleichmäßig

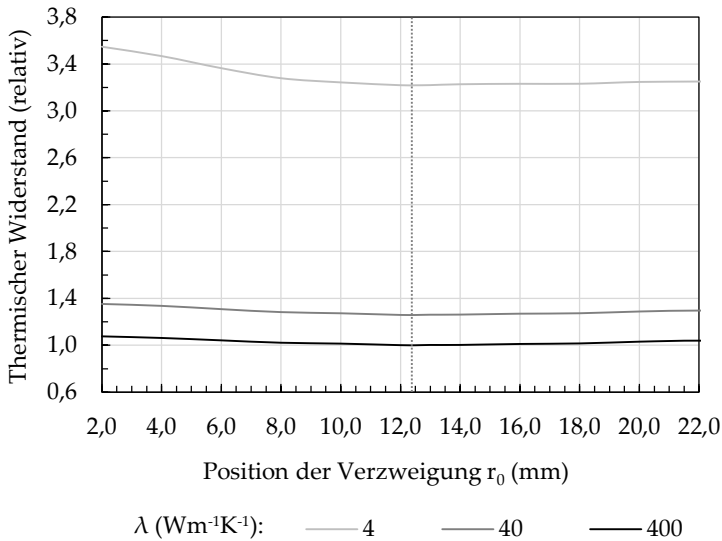


Abbildung 4.7: Abhängigkeit des thermischen Widerstands von der Position der Verzweigung bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten für $i_{max} = 1$ (normiert auf Minimum bei 400 Wm⁻¹K⁻¹)

verteilten Radien ($r_0 = 8,33$ mm und $r_1 = 16,67$ mm) weist in dieser Konfiguration einen um Faktor 1,012 höheren thermischen Widerstand auf.

Der Einfluss der Position der Verzweigung auf das Erscheinungsbild ist größer als der auf den thermischen Widerstand. Besonders die Verkürzung der äußeren Teiläste führt zu einer ausgewogenen Form, bei der die einzelnen Teiläste optisch angemessen gewichtet werden,

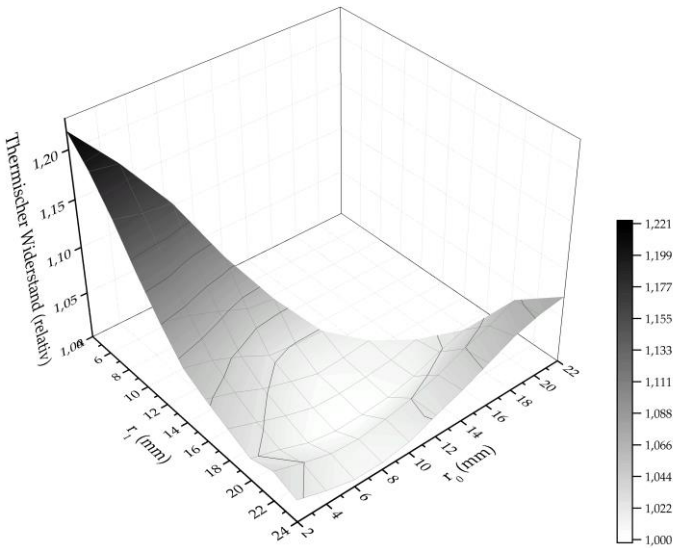


Abbildung 4.8: Abhängigkeit des thermischen Widerstands von der Position der Verzweigungen für $i_{max} = 2$ bei $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (normiert auf das Minimum)

wie der Vergleich mit den gleichmäßig verteilten Radien in Abbildung 4.9 zeigt. Während die Bereiche der Radien für Teilast 0 und 1 dabei im Verhältnis von $0,54 : 0,46$ stehen, erinnert das Teilungsverhältnis der Radien für Teilast 1 und 2 von $0,61 : 0,39$ an das Teilungsverhältnis des Goldenen Schnitts mit $0,62 : 0,38$ und erzeugt so ein harmonisches Aussehen. Dieses zeigt sich vergleichbar auch für die Wärmeleitfähigkeiten von $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und $4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Auch bei der

Position der Verzweigung geht so die Verbesserung der technischen Leistungsfähigkeit einher mit der der ästhetischen Erscheinung.

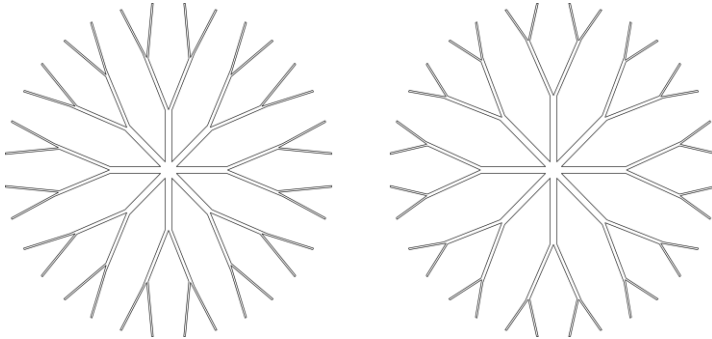


Abbildung 4.9: Querschnitt der verzweigten Geometrie mit gleichmäßig verteilten (links) und thermisch angepassten Radien der Verzweigungen (rechts)

4.2.6 FORM DER VERZWEIGUNG

Bei den bisher betrachteten Geometrien wurde die Verzweigung der Äste v-förmig ausgeführt, was zur Folge hat, dass spitz zulaufende Strömungskanäle entstehen. Die Natur als Vorbild liefert eine effizientere Form der Verzweigung. Dabei erfolgt die Verzweigung mit einer Ausrundung und stellt so einen kontinuierlichen Übergang vom bisherigen Teilast in den neuen Teilast dar. Die Ausrundung entsteht in Anlehnung an [27] durch B-Splines mit zwei Punkten in denen jeweils die Tangentialität zum angrenzenden Teilast hergestellt wird.

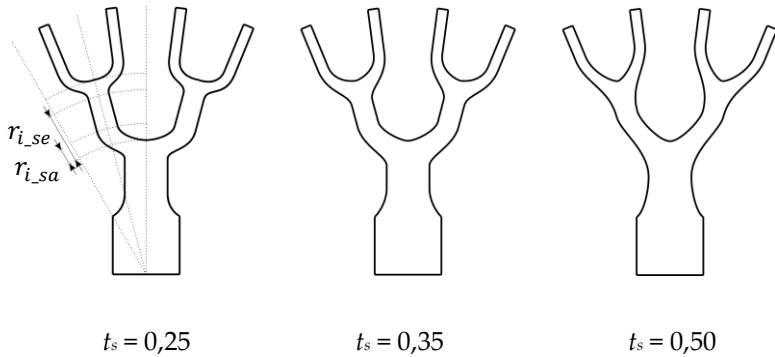


Abbildung 4.10: Kontur eines Asts bei unterschiedlicher Wahl des Faktors t_s

Zur Beschreibung der Form beziehungsweise der Größe der Ausrundung wird die Stelle in der Verzweigung betrachtet an der der Spline der Ausrundung an der Kontur des Teilasts ansetzt. Der Faktor t_s bezeichnet den Anteil am Teilast, der jeweils an dessen Anfang und Ende durch den Spline eingenommen wird. t_s kann deshalb Werte zwischen 0 und 0,5 annehmen. Abbildung 4.10 verdeutlicht dies an einer Beispielgeometrie für den Anfang und das Ende eines Teilasts. Die benötigten Längen $r_{i_{sa}}$ für den Anfang beziehungsweise $r_{i_{se}}$ für das Ende berechnen sich mit

$$\begin{aligned}
 r_{i_{sa}} &= t_s(r_i - r_{i-1}) \\
 r_{i_{se}} &= (1 - t_s)(r_i - r_{i-1})
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

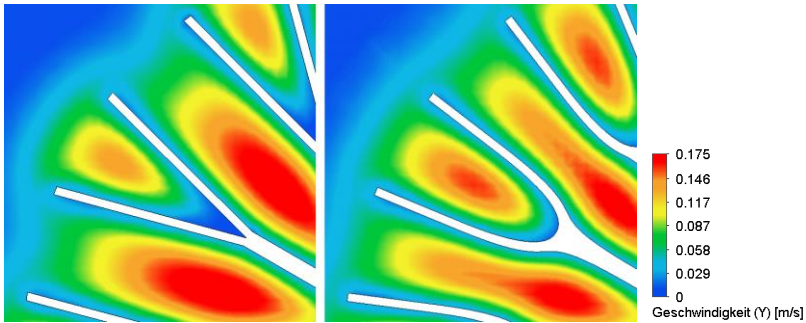


Abbildung 4.11: Strömungsgeschwindigkeiten in vertikaler Richtung in der horizontalen Mittenebene für nicht ausgerundete und ausgerundete Geometrie

Je größer t_s gewählt wird, desto geringer ist der gerade Abschnitt in der Kontur des Teilasts. Für den Wert von 0,5 entsteht ein kontinuierlicher Übergang zwischen dem Spline des Anfangs und dem des Endes des Teilasts wie in Abbildung 4.10 rechts dargestellt. Der kontinuierliche Verlauf der Kontur führt zu einer gleichmäßigen Ausbildung der Strömungskanäle ohne die Ausformung von ausgeprägten Kanten als potenzielle Totbereiche. So entfallen die engen Bereiche der Strömungskanäle in den Spitzen, die, wie die Strömungsanalyse in Abbildung 4.11 zeigt, als Totbereiche nur in geringem Maß zur Wärmeabfuhr beitragen. Ebenso wird die Gleichmäßigkeit der Breite der Strömungskanäle erhöht, indem eine Verlagerung des Luftraums von den ursprünglich trapezförmigen Bereichen in die v-förmigen Bereiche erfolgt. Dies hat zur Folge, dass die Strömungskanäle über einen größeren Bereich eine Breite aufweisen, die die Konvektion begünstigt.

Die Veränderung des thermischen Widerstands gegenüber der nicht ausgerundeten Geometrie in Abhängigkeit von t_s zeigt, dass der thermische Widerstand der zweifach verzweigten Geometrie für $t_s > 0,355$ geringere Werte als der der nicht ausgerundeten Vergleichsgeometrie. Der thermische Widerstand reduziert sich durch die Ausrundung mit $t_s = 0,50$ für die Geometrie mit 50 mm Durchmesser um den Faktor 0,989. Durch die gleichmäßigere Verteilung der Oberflächen reduziert sich dabei zudem die Anzahl an Ästen, die zum Erreichen des minimalen thermischen Widerstands benötigt wird. Außerdem verschieben sich durch die Ausrundung die Radien der Verzweigungen wieder gegen gleichmäßige Längen der Teiläste,

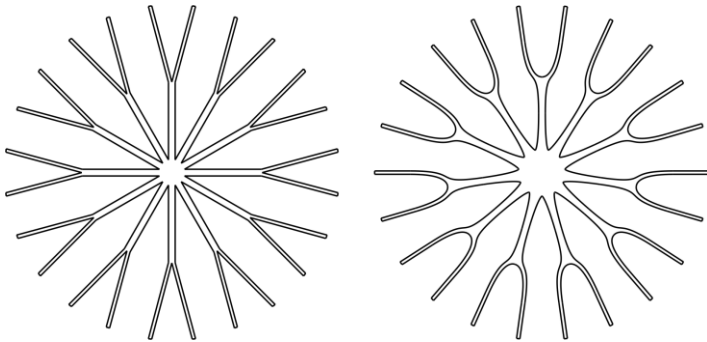


Abbildung 4.12: Nicht ausgerundete und ausgerundete Geometrie im Vergleich: Neben einem geringeren thermischen Widerstand bei weniger Ästen zeigt die Ausrundung deutlich den Bezug zum natürlichen Ursprung.

da jetzt parallele Bereiche vorherrschen und breitere Teiläste angenommen werden. Das Materialvolumen nimmt durch die Ausrundungen um den Faktor 1,094 zu.

Mit dem geringen technischen Vorteil geht eine große Steigerung des ästhetischen Werts einher. In Abbildung 4.12 werden die Beispielgeometrien in nicht ausgerundeter und ausgerundeter Form gegenübergestellt. Im Hinblick auf das Design des Kühlkörpers trägt die Ausrundung zu einem ausgeglichenen Erscheinungsbild bei, das den natürlichen Ursprung offensichtlich darstellt. Während die nicht ausgerundete Verzweigung diesen Ursprung abstrahiert und stark technisiert, erreicht die Ausrundung einen stärkeren Bezug zur natürlichen Formensprache. Erst dadurch bekommt die verzweigte Struktur eine organische Anmutung, die der Geometrie eine harmonische Form verleiht.

4.2.7 KERNDURCHMESSER

Der Kern des Kühlkörpers dient der Einkopplung der thermischen Verlustleistung durch die Aufnahme des Schaltungsträgers. Sein Durchmesser muss deshalb ausreichend groß sein, um den Schaltungsträger aufnehmen zu können, sollte jedoch so gering wie möglich ausfallen, um die Äste nicht zu stark zu verkürzen und dadurch ihre Oberfläche zu reduzieren.

Durch die Baugrößen der Komponenten und die Vorgaben der Aufbau- und Verbindungstechnik muss ein runder Schaltungsträger für

eine einzelne Hochleistungs-LED wie beispielsweise die Cree XM-L2, der durch Kabel kontaktiert wird, einen minimalen Durchmesser von 11 mm aufweisen. Dabei werden bereits Elemente für die Montage auf den Kühlkörper berücksichtigt, so dass der Schaltungsträger in dieser Größe vollständig ausgeführt ist. Um Toleranzen bei der Montage zu berücksichtigen, wird ein Kerndurchmesser von 12,5 mm an-

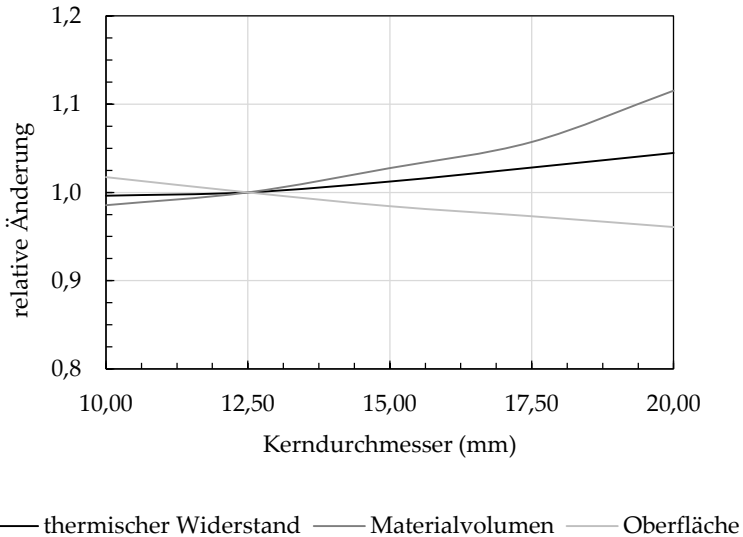


Abbildung 4.13: Abhängigkeit des thermischen Widerstands, des Materialvolumens und der Kühlkörper-Oberfläche vom Kerndurchmesser

gestrebt. Die Abhängigkeit zwischen Kerndurchmesser und thermischem Widerstand des Kühlkörpers ist neben dem Materialvolumen und der Oberfläche des Kühlkörpers in Abbildung 4.13 für einen Bereich von 10 mm bis 20 mm dargestellt. Mit steigendem Kerndurchmesser nehmen die Kühlkörper-Oberfläche ab und der thermische Widerstand dementsprechend zu. Ausgehend von einem Kerndurchmesser von 12,5 mm steigt der thermische Widerstand bei einer Vergrößerung des Durchmessers auf 15 mm (120 %) um einen Faktor von 1,012 und fällt bei einer Verkleinerung des Durchmessers auf 10 mm (80 %) um einen Faktor von 0,996. Die Auswirkungen des Kerndurchmessers auf den thermischen Widerstand sind dementsprechend vor allem bei einer weiteren Verkleinerung nur gering. Der angestrebte Kerndurchmesser von 12,5 mm wird deshalb in der Geometrie umgesetzt.

4.2.8 HÖHE

Die maximale Höhe des Kühlkörpers von 50 mm ist durch die Entwicklungsvorgaben bestimmt. Ob der Kühlkörper in dieser Höhe ausgeführt sein muss, um den geringsten thermischen Widerstand aufzuweisen, wird durch die Variation der Höhe bei einseitiger Leistungseinkopplung über die Kernfläche untersucht. Abbildung 4.14 stellt den thermischen Widerstand in Abhängigkeit von der Höhe des Kühlkörpers für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des Kühlkörpermaterials dar. Die Normierung erfolgt dabei auf den thermischen Widerstand bei einer Höhe von 50 mm. Während für eine Wär

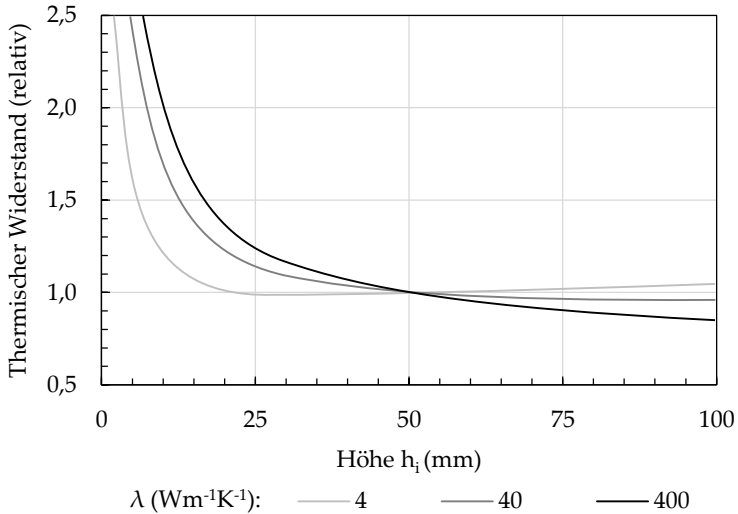


Abbildung 4.14: Abhängigkeit des thermischen Widerstands von der Höhe des Kühlkörpers für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Kühlkörpermateri als

meleitfähigkeit von $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ eine Höhe über 50 mm zu einer weiteren Reduzierung des thermischen Widerstands führt, ist für eine Wärmeleitfähigkeit von $4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ von einer Erhöhung des thermischen Widerstands auszugehen. Der geringste thermische Widerstand ist bei einer Höhe von 31,3 mm zu erwarten. Zusätzliches Material verbessert aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit die Wärmeabfuhr nicht, sondern verschlechtert sie durch die

Einschränkung der Konvektion. Für Material mit einer Wärmeleitfähigkeit von $400 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ wird die maximal zulässige Höhe von 50 mm gewählt, um den geringsten thermischen Widerstand zu erreichen.

4.2.9 VERZWEIGTE KÜHLKÖRPERGEOMETRIE

Nachdem alle relevanten Parameter berücksichtigt wurden, ist die Geometrie des verzweigten, zylinderförmigen Kühlkörpers vollständig definiert. Seine Herstellbarkeit ist durch die Berücksichtigung der Vorgaben aus der Herstellungstechnik gewährleistet. Abbildung 4.15 zeigt den Querschnitt des Kühlkörpers. In Abbildung A.1 sind weitere Ansichten mit Bemaßung zu finden. Die Anpassungen der Geometrie bezüglich Anzahl der Äste, Breite der Teiläste, Anzahl der Verzweigungen und Form der Verzweigung verringern den thermischen Widerstand im Vergleich zur verzweigten Ausgangsgeometrie gemäß Abbildung 3.8 (links) um Faktor 0,825. Die detaillierte Bewertung der Leistungsfähigkeit erfolgt im letzten Abschnitt dieses Kapitels, nachdem zunächst eine nicht verzweigte Geometrie zum Vergleich konstruiert wird und die Funktionsintegration zur Erstellung des Leuchten-Kühlkörpers erfolgt.

4.2.10 NICHT VERZWEIGTE KÜHLKÖRPERGEOMETRIE

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der verzweigten Geometrie wird eine vergleichbare, nicht verzweigte Geometrie konstruiert. Sie dient dazu die Reduzierung des thermischen Widerstands alleine durch die Verzweigungen darzustellen. Aus diesem Grund wird die nicht verzweigte Geometrie so ausgelegt, dass nicht nur ihr Bauraum dem der verzweigten Geometrie entspricht, sondern sie auch im Materialvolumen, ihrer Oberfläche und dem Kerndurchmesser damit übereinstimmt. Durch die Fertigung im gleichen Herstellungsverfahren mit dem gleichen Material entsteht ein Kühlkörper, der den direkten Unterschied zwischen verzweigter und nicht verzweigter Geometrie erlaubt. Abbildung 4.16 zeigt den Querschnitt der nicht verzweigten Geometrie (Bemaßung und weitere Ansichten im Anhang in Abbildung A.2). Diese ist unter den gegebenen Randbedingungen so ausgelegt, dass ihr thermischer Widerstand den geringstmöglichen Wert aufweist. Ihre Eigenschaften werden in Tabelle 4.1 denen der verzweigten Geometrie gegenübergestellt. Dabei ist lediglich mit geringen, konstruktionsbedingten Abweichungen im Materialvolumen zu rechnen, das in der nicht verzweigten Variante geringfügig größer ausfällt, jedoch keinen Einfluss auf den Vergleich der Leistungsfähigkeit erwarten lässt.

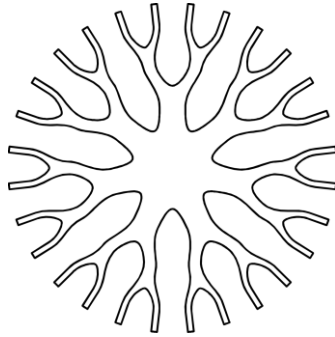


Abbildung 4.15: Querschnitt der verzweigten Kühlkörpergeometrie als Ausgangsmodell für die Herstellung

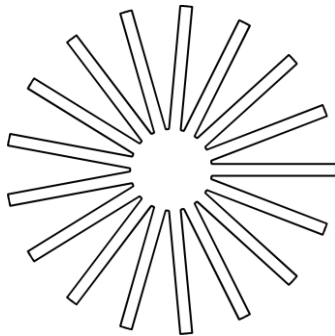


Abbildung 4.16: Querschnitt der nicht verzweigten Kühlkörpergeometrie, die dem Vergleich mit der verzweigten Kühlkörpergeometrie dient.

Tabelle 4.1: Eigenschaften von verzweigtem und nicht verzweigtem Kühlkörper

	verzweigte Geometrie	nicht verzweigte Geometrie	Verhältnis
Durchmesser (mm)	50,0	50,0	1,00
Höhe (mm)	50,0	50,0	1,00
Kerndurchmesser (mm)	12,5	12,5	1,00
Materialvolumen (cm ³)	34,59	35,35	1,02
Oberfläche (cm ²)	363,21	361,24	1,00

4.3 FUNKTIONSITEGRATION

Die entworfene zylinderförmige Geometrie zeigt die technische Leistungsfähigkeit der verzweigten Struktur. Sie dient als Basis für die Integration weiterer Funktionen, um eine vollständige Leuchte aufzubauen. Dazu werden neben der Optik auch die Aufnahme für den Schaltungsträger sowie die Kabeldurchführung mit Zugentlastung in

den Leuchten-Kühlkörper integriert. Durch den der ästhetischen Form des Kühlkörpers geschuldeten Verzicht auf ein Gehäuse wird damit ein Großteil der Komponenten eines LED-Systems in einem Bauteil zusammengefasst. Lediglich die LED auf ihrem Schaltungsträger sowie die Kabelverbindung müssen noch im Leuchten-Kühlkörper verbaut werden, um die Leuchte fertigzustellen.

Zunächst wird die Kontur der verzweigten Geometrie angepasst sowie die Optik ausgelegt und dort integriert. Danach erfolgen die Konstruktion der Schaltungsträgeraufnahme sowie der Kabeldurchführung. Im Hinblick auf die Vorgaben aus dem Fertigungsverfahren sind abschließende Detailanpassungen notwendig, um die Herstellung zu ermöglichen.

4.3.1 FORMGEBUNG

Sowohl für die technische Bewertung als auch für die Herstellung ist die bisherige zylindrische Form der Kühlkörper vorteilhaft, weil sie eine einfache Extrusion darstellt. Als eigenständige Leuchte ist sie jedoch ungeeignet, da sie nicht das notwendige, ästhetisch hochwertige Erscheinungsbild besitzt. Durch die Ausformung der Kontur kann dieses Erscheinungsbild erreicht werden. Daneben wird, abhängig von der Art der Ausformung, die verzweigte Struktur deutlicher wahrnehmbar und rückt dadurch in den Vordergrund des Produktdesigns.

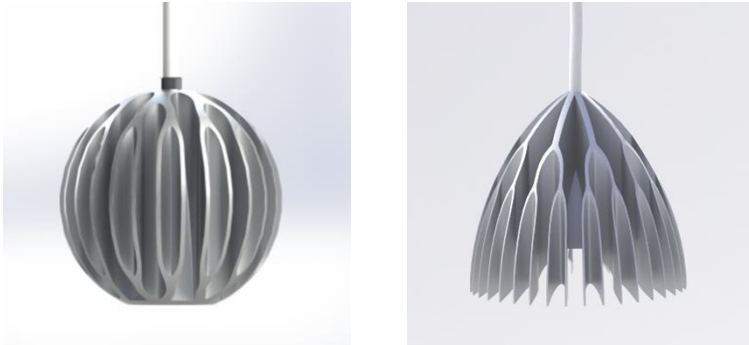


Abbildung 4.17: Ausformungen der verzweigten Geometrie: Links kugelähnliche Form [53], rechts kegelähnliche Form³ [54] jeweils mit Lichtaustrittsöffnung nach unten

Die Formgebung der Leuchte beeinflusst die Position von LED und Optik ebenso wie sie von dieser selbst beeinflusst wird. Dass die notwendige Optik einen entsprechenden Bauraum über der LED einnimmt, muss bei der Ausformung berücksichtigt werden. Eine flächenbündige Integration der Optik ist nur dann möglich, wenn die LED in einer geeigneten Vertiefung im Kühlkörper positioniert wird. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden mehrere Ausformungen entwickelt und zur gestalterischen Bewertung gegenübergestellt [53]. In allen Ausführungen ist die Formgebung so gewählt, dass die Herstellung in einer zweiteiligen Form erfolgen kann, das heißt, dass eine einfache Trennebene besteht und sich keine Hinterschnitte ergeben. Abbildung 4.17 zeigt die beiden am besten bewerteten Varianten

³ in der dargestellten frühen Studie sind die Breiten der Äste noch nicht gemäß Vorgaben des Herstellungsverfahrens berücksichtigt

in kugel- und kegelähnlicher Form. Im Vergleich zum bisherigen zylinderförmigen Kühlkörper wird die Betonung der verzweigten Struktur deutlich. Durch die Ausformung werden die Äste so angeschnitten, dass die Verzweigungen auch in der seitlichen Ansicht in Erscheinung treten. Des Weiteren unterstützt die Ausformung jeweils den natürlichen Charakter, der bereits durch die Verzweigungen entsteht. Während die Kegelform an eine geöffnete Blüte erinnert, lässt sich mit der Kugelform eine geschlossene Knospe assoziieren. Die kegelähnliche Form gibt dabei eine klare Richtung vor und vermittelt dem Betrachter unmittelbar wo der Lichtaustritt erfolgt. Die kugelähnliche Form stellt sich demgegenüber in sich geschlossen und ausgewogen dar und lässt keine offensichtliche Richtung erkennen, sondern gibt dem Betrachter im ersten Moment das Rätsel auf was in ihr steckt. Wird die Größe der Geometrie mit einem Durchmesser von jeweils 50 mm berücksichtigt, besitzt die kegelähnliche Form den Charakter einer herkömmlichen MR51 Reflektorlampe, was die Wahrnehmung als eigenständige Leuchte erschwert. Aus diesem Grund wird die Entwicklung der Leuchte in der kugelähnlichen Form weitergeführt, wobei diese prinzipiell auf jede andere Ausformung übertragen werden kann.

Die Auswirkung der Ausformung auf den thermischen Widerstand wird ermittelt nachdem alle weiteren Komponenten in die Geometrie integriert sind und der Leuchten-Kühlkörper seine endgültige Form aufweist.

4.3.2 OPTISCHES SYSTEM

Für die Entwicklung eines effizienten LED-Systems ist neben einer geeigneten Wärmeabfuhr vor allem die Auslegung der optischen Elemente von großer Bedeutung. Sie sorgen dafür, dass das von der LED emittierte Licht so gelenkt wird, dass beispielsweise eine gewünschte Beleuchtungsstärkeverteilung auf einer Zielfläche entsteht.

Design der Optik

Die Optik hat die technische Funktion, das von der Lichtquelle einfallende Licht zu formen. Daneben trägt sie oftmals aber auch entscheidend zur Ästhetik des LED-Systems bei, denn aufgrund der Tatsache, dass durch sie der Lichtaustritt erfolgt, steht sie meist im Mittelpunkt des Produktdesigns. Dennoch erlauben Variationsmöglichkeiten in der Art der Umsetzung der technischen Funktion eine Anpassung des äußeren Erscheinungsbilds. So kann mit einer TIR-Optik aus transparentem Kunststoff eine geschlossene Tagerscheinung der Leuchte erreicht werden. Eine glasklare Optik vermittelt den Eindruck eines massiven Glaskörpers, der den Betrachter erahnen lässt, was sich im Innern der Leuchte befindet (Abbildung 4.18, links). Ist die Lichtaustrittsfläche der Optik dagegen diffus, erscheint sie robust mit einer fast unsichtbar im Inneren der Leuchte verborgenen Lichtquelle (Abbildung 4.18, Mitte). Der Einsatz einer Spiegelreflektor-Optik zur Formung des Lichts ermöglicht zwar die Umsetzung einer vergleichbaren Funktion, betont jedoch den technischen und mechanischen Aufbau sowie die Tiefe des Produkts, indem sie den Blick ins Innere auf die eigentliche Lichtquelle



Abbildung 4.18: Optiken für LED-Systeme: klare TIR-Optik (links), diffuse TIR-Optik (Mitte), Reflektor-Optik (rechts)

zulässt (Abbildung 4.18, rechts). Eine Spiegelreflektor-Optik ergänzt daher die Erscheinung der sichtbaren Technik zur Entwärmung und fügt sich so in geeigneter Weise in das Produktdesign der Leuchte ein.

Lichttechnische Anforderungen

Da die entwickelte Leuchte im Wohnumfeld mit Beleuchtungsaufgaben wie beispielsweise Lesen und Schreiben, Anwendung finden soll, wird eine darauf ausgelegte Beleuchtungsstärkeverteilung als Zielverteilung gewählt. Während für die Wohnraumbeleuchtung keine allgemeinen Vorgaben bestehen, sind die Anforderungen an eine Arbeitsplatzbeleuchtung hinsichtlich Sicherheit und Gesundheitsschutz konkret formuliert [55] und sollen als Anhaltspunkte für die Auslegung der Optik dienen. Die Einteilung der Arbeitsumgebung erfolgt

dabei in verschiedene Bereiche, denen unterschiedliche Mindestwerte für die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke \bar{E}_h auf einer Bewertungsfläche im Abstand von 0,75 m zum Boden und die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärken g_1 zugewiesen werden. g_1 berechnet sich mit der minimalen horizontalen Beleuchtungsstärke $E_{min\ h}$ für den horizontalen Fall zu

$$g_1 = \frac{E_{min\ h}}{\bar{E}_h} \quad (4.4)$$

Abhängig von der Art und Anordnung der Arbeitsplätze sowie der gewünschten Raum- und Lichtwirkung sind der Umgebungsbereich und der Arbeitsbereich sowie eine besonders beleuchtete Teilfläche innerhalb des Arbeitsbereichs definiert, die dann erforderlich ist, wenn die Konzentration auf diese Teilfläche durch eine erhöhte Beleuchtungsstärke unterstützt oder die Beleuchtung an unterschiedliche Sehaufgaben angepasst werden soll [55]. Tabelle 4.2 stellt die Mindestwerte für die drei Bereiche dar. Im Hinblick auf die Anwendung der Leuchte im Wohnumfeld werden als Entwicklungsvorgaben die Anforderungen für den Arbeitsbereich definiert. Diese entsprechen nach [56] den Vorgaben für Büros mit Tätigkeiten wie Schreiben, Lesen und Datenverarbeitung, CAD-Arbeitsplätzen sowie Konferenz- und Besprechungsräumen. Als Entwicklungsziel wird die teilflächenbezogene Beleuchtung auf einer Fläche von mindestens 600 mm x 600 mm mit einer mittleren horizontalen Beleuchtungsstärke von 500 lx bei einer Gleichmäßigkeit von 0,6 festgelegt.

Tabelle 4.2: Mindestwerte für Beleuchtungsanlagen in Büroräumen gemäß [39]

	\bar{E}_h [lx]	g_1
Umgebungsbereich	300	0,5
Arbeitsbereich	500	0,6
Teilfläche	750	0,7

Optikentwurf

Im Hinblick auf die gegebenen Anforderungen muss für die Leuchte eine Optik entworfen werden, die das von der LED emittierte Licht entsprechend ausrichtet. Prinzipiell wird dabei unterschieden zwischen Primär- und Sekundäroptiken, wobei erstere das Licht sammeln, während letztere zum Formen des Lichts dienen [57]. Primäroptiken werden in der Regel vom LED-Hersteller vorgegeben und sind fest mit der LED verbunden. Am häufigsten wird hierbei eine lambertsche Abstrahlcharakteristik umgesetzt. Auch die für die Leuchte eingesetzte Cree XM-L2, emittiert nahezu lambertsch [58]. Um diese Verteilung in eine den Zielvorgaben entsprechende Verteilung zu überführen, wird eine Sekundäroptik entworfen. Herkömmliche LED-Optiken werden größtenteils als TIR-Optiken aus transparentem Kunststoff wie beispielsweise PMMA oder als beschichtete Kunststoff-Reflektoren hergestellt und als eigenständiges Bauteil in das LED-System integriert. Im Gegensatz dazu wird die durch das Herstellungsverfahren des Pulverspritzgießens gegebene Designfreiheit beim Entwurf des LED-Systems auch für die Einbindung optisch

wirksamer Flächen genutzt. So kann ein Reflektor im Kühlkörper integriert werden und sowohl die Herstellung als auch die Montage eines zusätzlichen optischen Bauteils entfallen.

Die Auslegung des Reflektors erfolgt mittels optischem Maßschneiden und optischer Simulation. Mit dem *TailorTool* steht am Lichttechnischen Institut des KIT eine leistungsfähige Software zur Berechnung von optischen Flächen zur Verfügung. Dabei wird ausgehend von einer idealen Punktlichtquelle durch einen auf geometrischer Optik basierenden Algorithmus eine kontinuierliche Freiformfläche berechnet, mit der das von der Quelle emittierte Licht in eine gewünschte Zielverteilung transformiert wird [59]. Die Berechnungen sind auf rotationssymmetrische Systeme beschränkt, liefern jedoch das bestmögliche Ergebnis, um das von der Quelle erfasste Licht exakt in die Zielverteilung zu transformieren. Mit Hilfe der CAL (*Computer Aided Lighting*) Software *LightTools*® werden die berechneten Reflektorflächen überprüft, in dem ein Simulationsmodell des Systems erstellt und die Simulationsergebnisse analysiert werden.

Die Grundlage für die Berechnungen bilden neben den gegebenen Anforderungen an die Beleuchtungsstärke auf der Zielfläche auch die geometrischen Vorgaben aus der Anwendung der Leuchte. So wird angenommen, dass die Leuchte im Abstand von 950 mm zur Tischplatte, auf der die Teilfläche von 600 mm x 600 mm ausreichend beleuchtet werden soll, befestigt wird. Der Bauraum für den Reflektor ist durch die Geometrie des Kühlkörpers begrenzt. Je geringer der

Radius des Reflektors, desto geringer ist die Einschränkung der direkten vertikalen Konvektionsströmung an den verzweigten Ästen. Die optische Funktion steht deshalb im Widerspruch zur thermischen Funktion. Dennoch bietet die verzweigte Geometrie einen entscheidenden Vorteil für die Integration des Reflektors. In der Nähe der Mittelachse besitzt der verzweigte Kühlkörper weniger Oberfläche als im äußeren Bereich. Gelingt es den Radius des Reflektors auf den Radius des ersten Astabschnitts zu beschränken, verringert sich die Oberfläche der Äste abhängig von der Reflektorlänge um lediglich Faktor 0,988 bis 0,952⁴. Diese Beschränkung folgt ebenso aus ästhetischer Sicht, wobei hier idealerweise der Radius des Reflektors mit dem der ersten Verzweigung zusammenfällt. So entfällt der erste Teilast vollständig und es bleibt kein Ansatz zurück, während gleichzeitig der zweite und dritte Teilast in ihrer Form vollständig erhalten bleiben. Folgt die Wandstärke des Reflektors außerdem der Astbreite des zweiten Astabschnitts ergibt sich letztendlich eine harmonische Verbindung zwischen Reflektor und Verzweigung, die den Reflektor vollständig in den Kühlkörper integriert (Abbildung 4.19).

Prinzipiell wird das von der LED emittierte Licht nur teilweise vom Reflektor erfasst. Ein direkter Anteil des Lichts verlässt den Reflektor ohne Reflexion. Dieser Anteil kann nicht durch den Reflektor geformt werden. Der Reflektor wird deshalb so ausgelegt, dass der direkte

⁴ Hierbei wurde die zusätzliche Oberfläche berücksichtigt, die der Reflektor an der Außenseite in den Bereich der Äste einbringt. Da diese Oberfläche thermisch genau wie die Äste angebunden ist und im Kanal der Konvektionsströmung liegt, trägt diese Oberfläche ebenfalls zur Wärmeabfuhr bei.

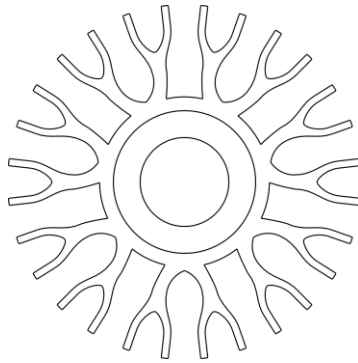


Abbildung 4.19: Ansicht der Lichtaustrittseite: Integration des Reflektors in die Kühlkörper-Geometrie, so dass lediglich der erste Teillast entfällt

Anteil des Lichts die Zielfläche vollständig ausleuchtet und der zusätzliche reflektierte Anteil die Homogenität dieser Ausleuchtung erhöht. In Verbindung mit dem maximal zulässigen Radius des Reflektors folgt daraus die notwendige Bautiefe von 16,1 mm.

Das Konzept zur Funktionsweise des Reflektors folgt aus den gegebenen Randbedingungen und ist in Abbildung 4.20 schematisch im Schnittbild dargestellt. Die Reflektorflächen sind dabei so ausgerichtet, dass sie das Licht auf die gegenüberliegende Seite der optischen Achse werfen. Strahlen mit kleinen Winkeln werden an den Rand der Zielfläche geworfen, während solche mit großen Winkeln die Zielfläche nahe der optischen Achse treffen. Nur durch die Reflexion auf die gegenüberliegende Seite der optischen Achse weist der Reflektor im äußeren Bereich sehr kleine Winkel zur optischen Achse auf und passt in den gegebenen Bauraum.

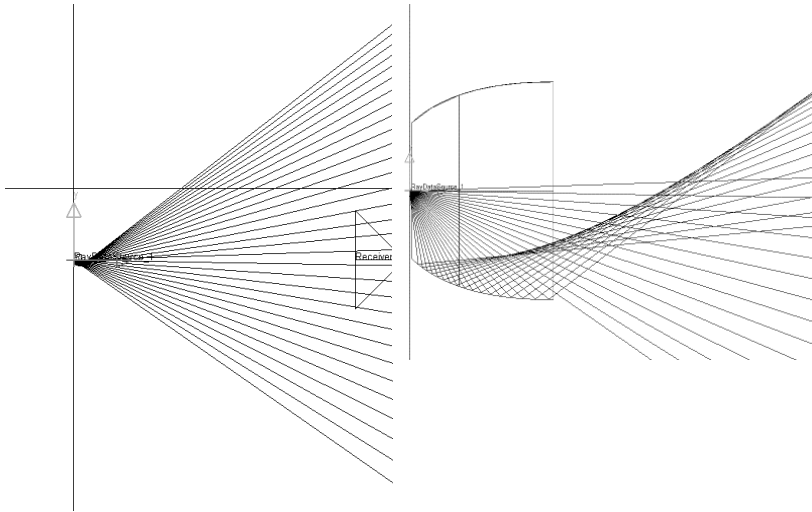


Abbildung 4.20: Funktionsweise des entworfenen Reflektors unter Berücksichtigung des gegebenen Bauraums

Das Maßschneiden der Reflektorflächen erfolgt in mehreren Schritten. Die Ausgangsgeometrie wird für eine lambertsch abstrahlende Punktlichtquelle so berechnet, dass auf einem Detektor, der mit einem Radius von 425 mm dem Umkreis der zu beleuchtenden Teilfläche entspricht, im Abstand von 950 mm eine konstante Beleuchtungsstärke erreicht wird. In der anschließenden optischen Simulation wird die Beleuchtungsstärke auf der Teilfläche analysiert, die sich ergibt, wenn anstatt der Punktlichtquelle die Strahldaten der verwendeten LED als Lichtquelle eingesetzt werden. Die Simulation berücksichtigt im Gegensatz zum Maßschneiden sowohl das direkt emittierte und nicht durch den Reflektor reflektierte Licht als auch die räumliche Ausdehnung der Lichtquelle. Außerdem werden die Eigenschaften der Reflektoroberfläche einbezogen. Diese wird mittels

Gauß-Streuung abgebildet, die eine winkelabhängige Lichtstärke gemäß

$$I(\theta) = I_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (4.5)$$

erzeugt. Hierbei wird mit I_0 die Lichtstärke in die nicht gestreute Ausfallsrichtung und mit σ die Standardabweichung der Gaußverteilung bezeichnet. Aufgrund fehlender Erfahrungswerte für im Metallpulverspritzguss hergestellte Reflektorflächen wird mit einem durchschnittlichen Wert von 3° für die Standardabweichung gerechnet [60]. Außerdem wird die Reflexion mit 70 % angenommen, was im unteren zu erwartenden Bereich liegt.

Aufgrund der zuverlässigeren Aussage dient das Simulationsergebnis, sofern es nicht der gewünschten Zielverteilung entspricht, als Kriterium zur Anpassung der Zielverteilung des Maßschneiderns.

Nach Durchführung mehrerer Iterationen wird eine Beleuchtungsstärkeverteilung erreicht, die den gegebenen Anforderungen entspricht. Abbildung 4.21 zeigt diese auf einer Fläche von 1.000 mm x 1.000 mm. Mit einem Lichtstrom der LED von mindestens 573 lm werden die Vorgaben erfüllt. Auf der eingezeichneten Bewertungsfläche wird eine mittlere Beleuchtungsstärke von 500 lx erreicht. Die Gleichmäßigkeit g_1 beträgt 0,81. Diese wird in erster Linie dadurch erreicht, dass durch den Reflektor wenig Licht ins Zentrum der Fläche gelenkt wird, wo ein starker direkter Licht-Anteil vorherrscht. Dies ist auch nach dem Maßschneidern noch durch einen geringen Abfall der Querschnittskurven der Beleuchtungsstärke um

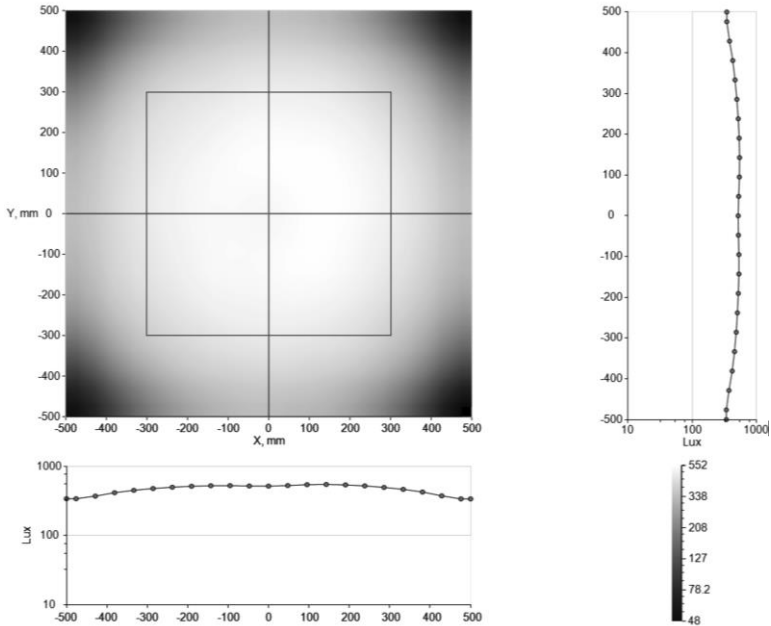


Abbildung 4.21: Beleuchtungsstärkeverteilung der entworfenen Reflektoroptik im Abstand von 950 mm bei Einsatz einer LED mit 573 lm

das Zentrum zu erkennen. Die zugehörige Lichtstärkeverteilungskurve in Abbildung C.5 (Anhang) verdeutlicht dies. Die Effizienz des gesamten optischen Systems beträgt mit den Annahmen der Simulation 0,79.

Die berechneten Reflektorflächen werden in die Geometrie des Kühlkörpers integriert und im Folgenden durch weitere Komponenten zur vollständigen Leuchte ergänzt.

4.3.3 KABELDURCHFÜHRUNG UND LED-AUFNAHME

Für den Einsatz als Hängeleuchte muss der Leuchten-Kühlkörper eine zentrale Kabeldurchführung aufweisen, um aufrecht ausgerichtet zu sein. Neben der mechanischen Aufhängung stellt das verbaute Kabel auch die elektrische Verbindung zwischen Betriebsgerät und LED her. Dieses muss daher bis an den Schaltungsträger geführt werden. Aufgrund der zentralen Positionierung von LED und Optik im Leuchten-Kühlkörper, wird die Kabeldurchführung zweiteilig konstruiert. Somit wird es möglich die Verkabelung mittig in den Kühlkörper, jedoch außermittig an den Schaltungsträger zu führen. Dies verhindert den Wegfall von Material zentral unter der LED und damit an der Stelle des größten Wärmeeintrags in den Kühlkörper. Ausgehend von einer horizontalen Trennung ist diese Ausführung im Spritzgusswerkzeug umsetzbar.

Bei der Anbindung des Schaltungsträgers an den Kühlkörper soll ein möglichst hoher Anpressdruck erreicht werden, um einen geringen thermischen Kontaktwiderstand zu erreichen. Für die Aufnahme des Schaltungsträgers sind deshalb gewindeformende Schrauben vorgesehen, die für Metalle bis zu einer Härte von 140 HB eingesetzt werden können [61] und damit auch für Kupfer geeignet sind. Dadurch entfallen Nacharbeiten für das Schneiden und Säubern der Gewinde vor der LED-Montage. Die notwendigen Sacklöcher sind im Kühlkörper mit einem maximalen Durchmesser von 1,56 mm, einer Formschräge von 1° sowie einer Tiefe von 3,20 mm vorgesehen.

Mit diesen Details der Konstruktion beinhaltet die Geometrie des Leuchten-Kühlkörpers alle notwendigen Komponenten. Die abschließende Anpassung an die Vorgaben der Fertigungstechnik gewährleistet letztendlich ihre Herstellbarkeit.

4.3.4 WANDSTÄRKEN UND TRENNEBENE

Neben der bereits beim Entwurf der verzweigten Geometrie berücksichtigten, mindestens einzuhaltenden Wandstärke, setzt der Pulverspritzguss auch eine maximale Wandstärke voraus. Diese darf nicht überschritten werden, um das spritzgegossene Bauteil zuverlässig fertigen zu können. Durch die verwendeten Werkstoffe folgt die Vorgabe, dass kein Volumenelement des Bauteils so groß sein darf, dass eine Kugel mit Radius 3 mm darin Platz findet. Die Äste sind aufgrund ihrer Breite diesbezüglich unkritisch. Der Kern dagegen muss entsprechend angepasst werden. Dabei wird zum einen die Bohrung der Kabeldurchführung so tief ausgeführt, dass die Materialstärke darunter ausreichend gering ist. Zum anderen wird der Kern mit einer Stufe versehen, um ein zu großes Materialvolumen oberhalb des integrierten Reflektors zu verhindern. Abbildung 4.22 zeigt die resultierende Geometrie im Schnittbild. Die dunkelgrau eingefärbte Fläche entspricht einer Kreisfläche mit 3 mm Radius. Sie zeigt die Stelle mit der größten Wandstärke, die so angepasst wurde, dass sie den zulässigen Wert nicht übersteigt. Die hellgrau eingefärbte Fläche beschreibt das Volumen der Kabeldurchführung. Dieses Volumen wird im Spritzgießprozess zunächst mit Material gefüllt, da zum Erreichen

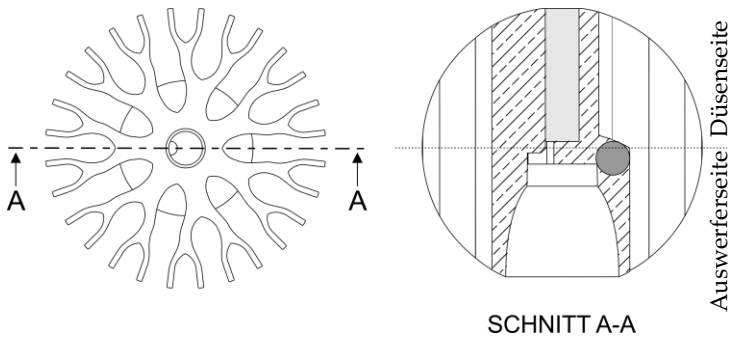


Abbildung 4.22: Drauf- und Schnittansicht des Kühlkörpers. Die dunkelgrau eingefärbte Kreisfläche entspricht der maximal zulässigen Wandstärke. Die hellgrau eingefärbte Fläche zeigt das Materialvolumen, das gegossen, aber vor dem Sintern entfernt wird.

einer bestmöglichen Materialverteilung mittig angespritzt wird. Das Material in der ausgefüllten Kabeldurchführung wird zusammen mit dem Anguss entfernt. Die Anspritzung im Zentrum der Montagefläche stellt keine Alternative dar, da dies zu einer unregelmäßigen Oberfläche im thermisch wichtigen Bereich der Anbindung des Schaltungsträgers führen würde. Die Außenseite des Kerns ist unter Berücksichtigung der Werkzeugtrennung ausgeformt. Diese erfolgt aufgrund der Kugelform mittig wie in Abbildung 4.22 rechts dargestellt. Der Kern verläuft bis zur Mitte zylinderförmig, um die Entformung zu ermöglichen. Des Weiteren werden an allen Kanten Radien von 0,1 mm vorgesehen, um die Herstellbarkeit des Werkzeugs zu berücksichtigen. Abbildung A.3 im Anhang zeigt die bemaßte Geometrie in verschiedenen Ansichten.

Sie berücksichtigt so alle Vorgaben des Herstellungsverfahrens. Ihre Leistungsfähigkeit wird anhand thermischer Simulationen untersucht, bevor die Fertigung der Bauteile erfolgt.

4.4 ERWARTETE THERMISCHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Die Ergebnisse thermischer Simulationen lassen eine Aussage zur erwarteten Leistungsfähigkeit der entworfenen Kühlkörper zu. Bei den zylinderförmigen Kühlkörpern steht dabei der Vergleich zwischen verzweigter und nicht verzweigter Geometrie im Vordergrund. Die Leistungsfähigkeit des Leuchten-Kühlkörpers soll außerdem bezüglich ihrer Abhängigkeit von Lage und Material untersucht werden.

Die zylinderförmigen Kühlkörper lassen aufgrund der unterschiedlichen Anordnung ihrer Oberflächen einen unterschiedlichen thermischen Widerstand erwarten, auch wenn sie ansonsten nahezu identisch sind. Zum Vergleich werden beide Kühlkörper in der Simulation aus Kupfer aufgebaut und unter Berücksichtigung von Wärmeleitung und Konvektion simuliert. Der Verlustleistungseintrag beträgt 6,5 W bei einer Umgebungstemperatur von 25,0 °C. Der thermische Widerstand der verzweigten Geometrie beläuft sich auf 6,29 KW⁻¹, während die nicht verzweigte Geometrie einen Widerstand von 6,74 KW⁻¹ erwarten lässt. Dies entspricht einem um den Faktor 1,071 höheren thermischen Widerstand für die nicht verzweigte Ausführung, trotz vergleichbaren Materialvolumens und

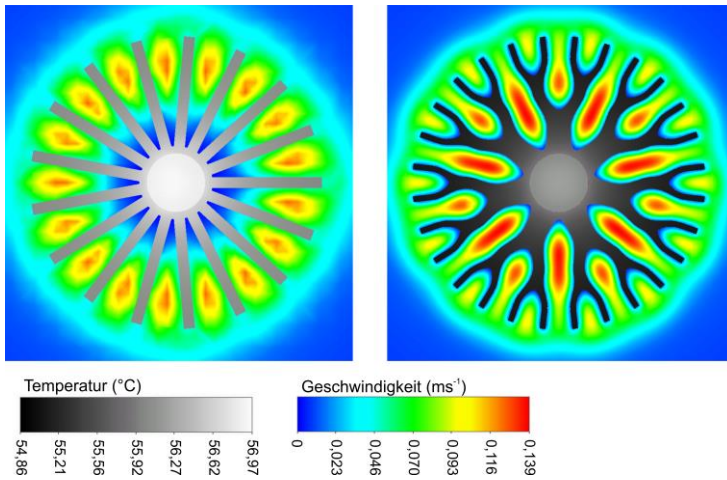


Abbildung 4.23: Nicht verzweigte und verzweigte Geometrie im Vergleich: Ergebnisse der thermischen Simulation der lackierten Bauteile

Oberflächen. Wird neben der Wärmeleitung und der Konvektion auch die Wärmestrahlung berücksichtigt, ergeben sich erwartungsgemäß geringere thermische Widerstände. Die Simulation mit einem Emissionskoeffizienten von 0,92 für matten Lack lässt einen thermischen Widerstand von $4,78 \text{ KW}^{-1}$ für die verzweigte Geometrie und von $4,90 \text{ KW}^{-1}$ für die nicht verzweigte Geometrie erwarten. Durch den zusätzlichen und für beide Geometrien vergleichbar großen Strahlungsanteil wird der Unterschied zwischen beiden Geometrien dadurch reduziert auf den Faktor 1,025. Die erwartete Temperaturverteilung an der Kühlkörperoberfläche sowie die Strömungsge-

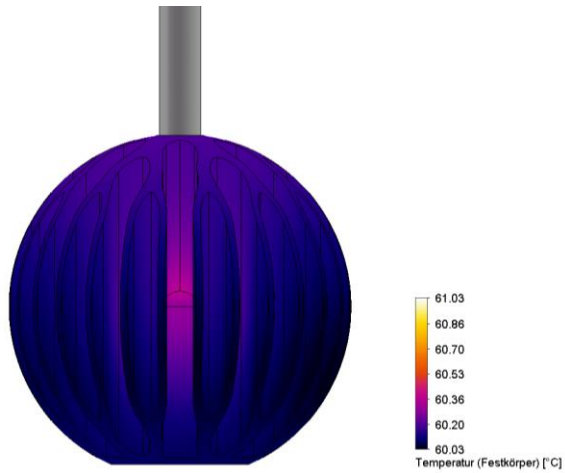


Abbildung 4.24: Temperaturverteilung an den Oberflächen des Leuchten-Kühlkörpers aus Kupfer

schwindigkeiten in der Mittelebene werden in Abbildung 4.23 dargestellt. Die angegebenen absoluten Temperaturen entsprechen den Simulationsergebnissen unter Berücksichtigung von Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion. Neben den höheren Temperaturen der nicht verzweigten Geometrie sind auch die dort vorhandenen Bereiche mit geringer Strömungsgeschwindigkeit zu erkennen.

Der Leuchten-Kühlkörper basiert auf der verzweigten Variante des zylinderförmigen Kühlkörpers. Durch den Rotationsschnitt sowie die Integration zusätzlicher Komponenten in die Geometrie weist er jedoch ein geringeres Materialvolumen und damit eine geringere Oberfläche als der zylinderförmige Kühlkörper auf. Die Ergebnisse

der Simulation mit identischen Randbedingungen zeigen deshalb einen thermischen Widerstand, der um Faktor 1,473 größer ist als der der zylinderförmigen Kühlkörper. Abbildung 4.24 stellt dazu die Temperaturverteilung der äußeren Kühlkörperoberfläche dar. Die Temperaturen liegen dort zwischen $60,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $60,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, wobei die Maximaltemperatur an der Oberfläche des Kerns zu erwarten ist. Deutlich werden auch die Bereiche mit den geringsten Oberflächentemperaturen, die sich aufgrund der Anströmung an der unteren Hälfte der Kugel befinden.

Verglichen wird der verzweigte Leuchten-Kühlkörper zunächst mit zwei weiteren Modellen kugelförmiger Leuchten-Kühlkörper. Zum einen liefert die Grundform der nicht verzweigten zylinderförmigen Kühlkörper eine Geometrie, die in Materialvolumen und Oberfläche mit dem verzweigten Leuchten-Kühlkörper übereinstimmt. Zum anderen wird als Referenzgeometrie eine geschlossene, massive Kugel mit identischem Durchmesser verwendet. Sie stellt den Bezug zu herkömmlichen Leuchten mit geschlossenem Gehäuse dar (vergleiche beispielsweise [45]), wobei das Gehäuse durch die massive Ausführung im Modell ideal an die LED angebunden ist. Das Materialvolumen der Kugel liegt um den Faktor 2,345 höher, ihre Oberfläche um den Faktor 0,401 niedriger im Vergleich zum verzweigten Leuchten-Kühlkörper. Die drei Varianten werden in Abbildung 4.25 dargestellt. Gegenüber dem verzweigten Leuchten-Kühlkörper zeigt die Simulation höhere thermische Widerstände, die sich unter Berück-



Abbildung 4.25: Leuchten-Kühlkörper zum Vergleich: verzweigte, nicht verzweigte und geschlossene Variante

sichtung von Wärmeleitung und Konvektion für die nicht verzweigte Ausführung um den Faktor 1,085 beziehungsweise für die geschlossene Ausführung um den Faktor 2,323 unterscheiden.

Als Pendelleuchte ausgelegt, ist davon auszugehen, dass die Einbaulage des Leuchten-Kühlkörpers in der Anwendung unverändert senkrecht bleibt. Dennoch soll der Einfluss der Ausrichtung des Kühlkörpers untersucht werden, da die vertikale Rippenstruktur erwarten lässt, dass sich diese in nicht vernachlässigbarer Weise auf die Leistungsfähigkeit des Kühlkörpers auswirkt. Abbildung 4.26 stellt die relative Änderung des thermischen Widerstands dar, die sich durch die Variation der Ausrichtung zwischen 0° (vertikal nach unten abstrahlend) und 90° (horizontal abstrahlend) ergibt. Deutlich

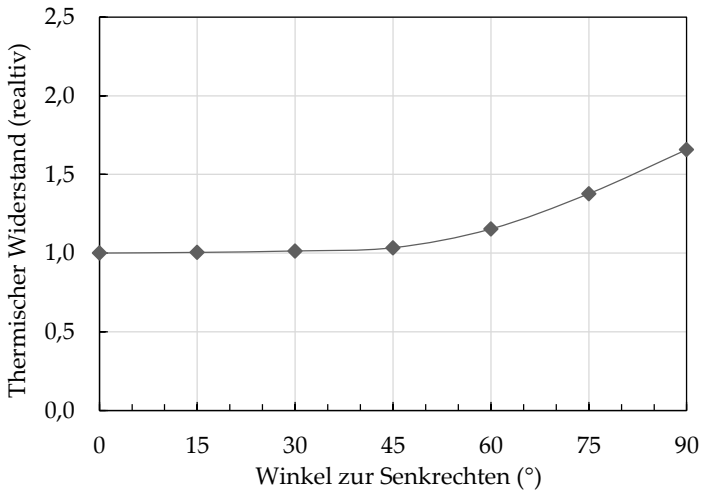


Abbildung 4.26: Abhängigkeit des thermischen Widerstands von der Ausrichtung des Leuchten-Kühlkörpers

wird die starke Lageabhängigkeit des Kühlkörpers mit einer Erhöhung des thermischen Widerstands gegenüber der vertikalen Abstrahlung um den Faktor 1,658 im Maximum bei horizontaler Abstrahlung.

Neben der Herstellung des Leuchten-Kühlkörpers aus Kupfer, ermöglicht das gewählte Herstellungsverfahren die Verarbeitung einer Vielzahl an unterschiedlichen Werkstoffen mit einer großen Bandbreite der Wärmeleitfähigkeit. Auch wenn Kupfer die höchste Wärmeleitfähigkeit bietet, können alternative Materialien für die jeweilige Anwendung beispielsweise aus Kosten- oder Designgründen

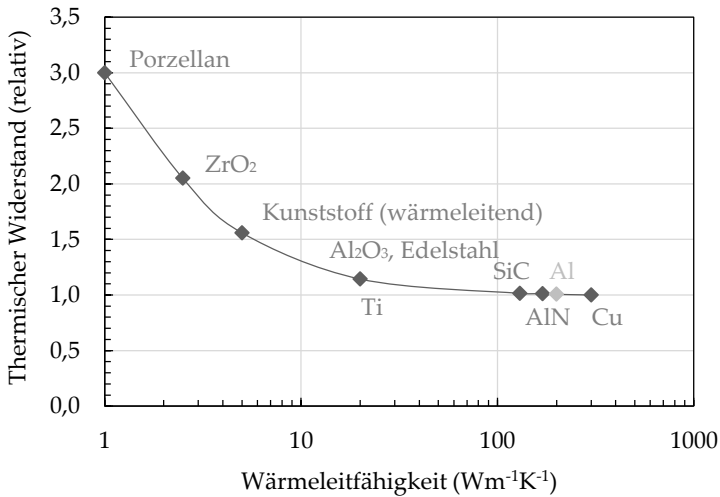


Abbildung 4.27: Abhängigkeit des thermischen Widerstands des Leuchten-Kühlkörpers von der Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Materials (normiert auf den Wert des Kupfer-Kühlkörpers)

besser geeignet sein, vor allem wenn eine geringere LED-Leistung im System ausreicht. Abbildung 4.27 stellt die zu erwartende Erhöhung des thermischen Widerstands des Leuchten-Kühlkörpers für verschiedene Werkstoffe dar, die im Pulverspritzguss beziehungsweise Spritzguss verarbeitet werden können. Eine Ausnahme bildet dabei Aluminium, das bisher nicht spritzgegossen werden kann, jedoch als Standardmaterial für Kühlkörperanwendungen zur Einordnung mit aufgeführt ist. Hierbei wird deutlich, dass für leistungsstarke Anwendungen neben Kupfer auch Materialien wie Aluminiumnitrid

oder Siliciumcarbid eingesetzt werden können, ohne starke Einbußen in der Leistungsfähigkeit des Kühlkörpers zu erhalten. Für Materialien wie Aluminiumoxid, Edelstahl und Titan muss dagegen von einer Erhöhung des thermischen Widerstands im Bereich von 1,15 ausgegangen werden. Wärmeleitfähiger Kunststoff und Zirkonoxid eignen sich in der gegebenen Geometrie noch für Systeme mit reduzierter Leistung. Die Verwendung von Porzellan stellt allenfalls eine außergewöhnliche Alternative für das Erscheinungsbild des LED-Systems dar, da der thermische Widerstand des Kühlkörpers mit diesem Material das Dreifache dessen für Kupfer beträgt.

Nachdem die erwartete Leistungsfähigkeit der entworfenen Geometrien mittels thermischer Simulationen ermittelt wurde, werden die Bauteile gefertigt. Dadurch wird das Herstellungsverfahren für die Fertigung dieser Geometrien bewertet und es entstehen Bauteile, an denen die Aussagen der Simulationen messtechnisch überprüft werden können. Bevor darauf in Kapitel 5 und Kapitel 6 eingegangen wird, bildet die Beschreibung eines weiteren Leuchten-Kühlkörpers und dessen Leistungsfähigkeit als Ergänzung mit größerem Bauraum den Abschluss dieses Kapitels.

4.5 GROßER BAURAUM

Das Potenzial die Wärmeabfuhr durch eine verzweigte Geometrie gegenüber einer nicht verzweigten zu steigern, ist umso größer je größer der Bauraum ist, der für die Verzweigungen zur Verfügung steht.

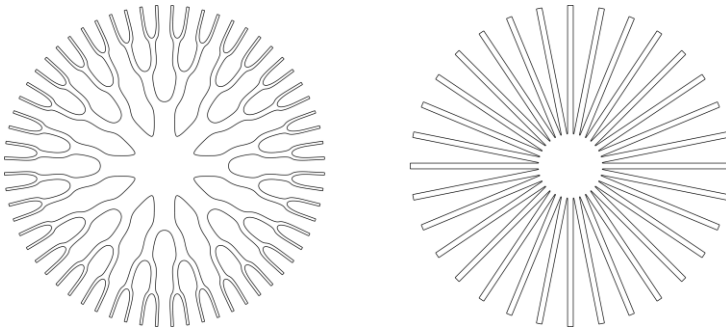


Abbildung 4.28: Querschnitt von verzweigter und nicht verzweigter Geometrie mit 200 mm Durchmesser

Dies soll am Beispiel einer Geometrie mit mehr als 70-fachem Bau-
raum gegenüber den bisherigen Kühlkörpern gezeigt werden. Im
Rahmen dieser Arbeit wurden mehrere verzweigte Geometrien für
unterschiedliche Anwendungsbereiche und Herstellungsverfahren
entwickelt. Für den Einsatz bei der Beleuchtung von vorwiegend ge-
werblich genutzten Räumen sind die Anforderungen an ein LED-Sys-
tem mit 102 W elektrischer Leistung, einem Durchmesser von
200 mm sowie einer Bauhöhe von 240 mm gegeben. Die Verlustlei-
stung wird durch ein LED-Modul mit 32 LEDs auf einer kreisförmigen
Fläche von 50 mm Durchmesser eingebracht und beträgt maximal
69,44 W (Tabelle 3.1). Die angestrebte Herstellung im Druckguss aus
einer korrosionsarmen Aluminium-Legierung (AlSi9Mn) bedingt
eine Mindestwandstärke von 1,6 mm. Die Wärmeleitfähigkeit der Le-
gierung liegt zwischen $140 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und $170 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Die Auslegung

Tabelle 4.3: Eigenschaften von verzweigtem und nicht verzweigtem Kühlkörper mit 200 mm Durchmesser

	verzweigt	nicht verzweigt	verzweigt / nicht verzweigt
Durchmesser (mm)	200,0	200,0	1,000
Höhe (mm)	240,0	240,0	1,000
Materialvolumen (cm ³)	2484,4	2483,2	1,000
Oberfläche (cm ²)	12.594	12.806	0,983
Thermischer Widerstand (KW ⁻¹)	0,386	0,478	0,807

des Leuchten-Kühlkörpers erfolgt gemäß dem beschriebenen Vorgehen unter Berücksichtigung der geometrischen und thermischen Vorgaben. Abbildung 4.28 zeigt links den Querschnitt der resultierenden Geometrie, die bei $i_{max} = 3$ acht Äste aufweist.

Der Vergleich mit der in Abbildung 4.28 rechts dargestellten nicht verzweigten Referenzgeometrie mit nahezu identischem Materialvolumen und vergleichbarer Oberfläche zeigt einen Vorteil für die verzweigte Geometrie wie in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Der thermische Widerstand der verzweigten Geometrie ist um Faktor 0,807 geringer. Dieser, im Vergleich zum Kühlkörper mit 50 mm, größere Vorteil zeigt das Potenzial der verzweigten Geometrie unter Berücksichtigung der Herstellungsvorgaben für einen größeren Bauraum.

Hier können verzweigte Strukturen noch besser genutzt werden, um den thermischen Widerstand zu verringern, weil sie die effiziente Ausnutzung des kompletten Bauraums ermöglichen.

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich weiterhin mit den für den Pulverspritzguss entwickelten Geometrien für die Anwendung in der Allgemeinbeleuchtung. Dabei steht die Herstellung der Bauteile im Vordergrund.

Kapitel 5

FERTIGUNG

Die Frage der Fertigung stellt sich bereits am Anfang der Produktentwicklung. Denn Fertigungsverfahren und verwendete Materialien liefern entscheidende Vorgaben für das Produktdesign. Das folgende Kapitel bündelt alle Informationen zur Herstellung, auch wenn sie im Entwicklungsprozess an verschiedenen Stellen Berücksichtigung finden. Am Ende stehen fertige Bauteile, die im anschließenden Kapitel charakterisiert und auch im Hinblick auf das Fertigungsverfahren bewertet werden.

5.1 FERTIGUNGSVERFAHREN

Der Einsatz einer verzweigten Kühlkörpergeometrie in einer LED-Leuchte stellt verschiedenste Anforderungen an das Fertigungsverfahren. Zum einen muss die Geometrie als solche in großen Stückzahlen herstellbar sein, das heißt vor allem auch die notwendigen Aspektverhältnisse von bis zu 50:1 gefertigt werden können. Zum anderen ist der zu verarbeitende Werkstoff ein wichtiges Kriterium, da er neben der Geometrie entscheidend die Leistungsfähigkeit beeinflusst. In gleichem Maß muss das Fertigungsverfahren gewährleisten, dass reproduzierbar hochwertige Oberflächen entstehen, die den

Einsatz der verzweigten Kühlkörper als Sichtteile ermöglichen und die Ästhetik der Geometrie unterstützen.

Für die Herstellung von Kühlkörpern für LED-Systeme stehen prinzipiell verschiedene Verfahren für verschiedene Werkstoffe zur Verfügung. Aufgrund von geringer Dichte, hoher Wärmeleitfähigkeit und niedrigem Preis ist für die Herstellung von Kühlkörpern im Allgemeinen Aluminium das vorherrschende Material [62]. Bewährte Verfahren sind neben der spanenden Bearbeitung vor allem Druckumformverfahren, wie Schmieden oder Strangpressen und Gießverfahren, wie Fein- oder Druckguss. Die Auswahl des wirtschaftlichsten Herstellungsverfahrens ist immer abhängig von einer Vielzahl an Faktoren, unter denen in der Regel die Teilegeometrie und die Stückzahl den stärksten Einfluss haben. Für geringe bis hohe Stückzahlen wird bei einfacher Teilegeometrie das Schmieden oder Strangpressen, bei höherer Komplexität das Druckgießen eingesetzt, während für mittlere bis komplexe Teile, bei niedrigen bis mittleren Stückzahlen, der Feinguss oftmals die wirtschaftlichste Alternative darstellt. Für mittlere bis hohe Stückzahlen kommt bei mittlerer bis hoher Komplexität im Bauteil ein weiteres Verfahren in Betracht. Das Spritzgießen wird umso attraktiver, je höher die Stückzahl und je komplexer die Bauteilgeometrie ist [63].

5.1.1 DRUCKGIEßEN

Das Standardverfahren für die Herstellung von Kühlkörpern aus Aluminium ist neben dem Strangpressen für einfache Geometrien

das Druckgießen für komplexere Bauteile. Dabei werden Urformen aus einer flüssigen Metallschmelze unter hohem Druck in einer metallischen Dauerform hergestellt. Diese Form ist als zweiteiliges Druckguss-Werkzeug ausgeführt und wird vor dem Gießen erhitzt. Beim Kaltkammer-Druckgießen wird die Gießkammer mit Schmelze gefüllt und im Anschluss durch den dort gelagerten Gießkolben in das Druckguss-Werkzeug gedrückt. Nach dem Erstarren wird die Form geöffnet und das Bauteil ausgeworfen. Beim Druckgießen werden hauptsächlich Werkstoffe mit niedrigem Schmelzpunkt wie Aluminium-, Magnesium- und Zinklegierungen verarbeitet. Abhängig von der Geometrie des Bauteils sind Teile mit Wandstärken von 1 mm und mehr herstellbar [64].

Die Herstellbarkeit des Leuchten-Kühlkörpers im Druckguss ist aufgrund der Geometrie und der erforderlichen Oberflächenqualität jedoch nicht gewährleistet, selbst wenn Geometrieadjustierungen erfolgen. Diese betreffen hauptsächlich Formschrägen, die mit mindestens $1,5^\circ$ vorgesehen werden müssen und neben an der Trennebene verbreiterten Rippen dort eine umlaufende Kante verursachen. Riefen in Abformrichtung und gegebenenfalls Ausbrüche im Gussteil sind dennoch zu erwarten, weil das Bauteil beim Abkühlen im Bereich der Verzweigungen auf die Gussform schrumpft. Ebenso entstehen Gussnähte an der Formtrennung. Das Entfernen von Riefen und Nähten vor allem in den Bereichen zwischen den Rippen ist selbst mit aufwändiger Nacharbeit kaum möglich. Der Leuchten-Kühlkörper büßt deshalb an der Qualität seiner Erscheinung ein, sowohl durch die Formschrägen als auch durch die geringere Oberflächenqualität.

5.1.2 FEINGIEßEN

Beim Feingießen nach dem Wachsauerschmelzverfahren werden Bauteile mittels einer ungeteilten keramischen Gießform hergestellt, die aus einem Modell aus Wachs oder Thermoplast entsteht. Dieses verlorene Modell ist meist wiederum im Spritzguss mit Werkzeugen aus Aluminium oder Stahl gefertigt [65]. Für sehr kleine Stückzahlen können auch additiv gefertigte Modelle aus dem 3D-Druck eingesetzt werden. Zur Herstellung der Form werden mehrere Modelle zu Gießtrauben verbunden und mehrfach abwechselnd in eine keramische Masse getaucht und mit Sand bestreut bis eine stabile Form entstanden ist. Nach dem Trocknen der Form erfolgt das Ausschmelzen der Modelle, bevor die Form gebrannt wird und die Bauteile durch Füllen der Form mit Schmelze abgegossen werden. Nach dem Erstarren der Schmelze wird das Bauteil durch Zerstören der Form entformt und vom Gießkanal entfernt. Im Feinguss können verschiedene Stähle und Legierungen unter anderem auf Basis von Kupfer und Aluminium verarbeitet werden. Die Geometrie des Leuchten-Kühlkörpers lässt sich ohne Änderungen feingießen. Im Vergleich zum Pulverspritzguss ist jedoch eine geringere Oberflächenqualität zu erwarten, die auch durch zusätzliche Nacharbeiten gegebenenfalls nicht ausreichend gesteigert werden kann.

5.1.3 SPRITZGIEßEN

Das Spritzgießen ist ein Urformverfahren in dem hauptsächlich Thermoplaste verarbeitet werden. Dabei wird der Werkstoff in der Spritzeinheit plastifiziert und danach über eine Düse unter Druck in das Spritzgießwerkzeug, das als zweiteilige Dauerform dient, eingespritzt. Die Schließereinheit hält währenddessen beide Teile des Werkzeugs zusammen, wobei die bewegliche Auswerferseite auf die fest montierte Düsenseite des Spritzgießwerkzeugs gedrückt wird. Nachdem der eingespritzte Werkstoff in den festen Zustand übergegangen ist, wird die Form durch Bewegen der Auswerferseite geöffnet und das spritzgegossene Teil ausgeworfen.

Vor allem durch die große Designfreiheit und die hohe Oberflächengüte, die das Spritzgießen für den Teileentwurf bietet, ergeben sich Vorteile gegenüber anderen Herstellungsverfahren. So lassen sich Bauteile endkonturnah fertigen und beispielsweise auch Hinterschnitte, Gewinde, Verzahnungen oder Freiformflächen mit hoher Oberflächenqualität herstellen [6]. Der Materialüberschuss kann, wie bei anderen Gießverfahren, sehr gering gehalten werden, da für jedes Teil nur unwesentlich mehr als das Material zur Füllung der Form benötigt wird⁵.

⁵ Bei der spanenden Herstellung des verzweigten LED-Kühlkörpers aus einem Zylinder mit 50 mm Durchmesser und 50 mm Höhe würde 72,7 cm³ Zerspanungsabfall entstehen, was 74 % des eingesetzten Materials entspricht.

Verarbeitet werden im Spritzguss überwiegend Kunststoffe, die durch das Einbringen von Füllstoffen mit höherer Wärmeleitfähigkeit jedoch für die Anwendung in thermisch relevanten Bauteilen ausgerüstet werden können [66]. Aufgrund der erreichbaren Wärmeleitfähigkeiten dieser Verbundmaterialien erlauben sie auch die Anwendung in LED-Systemen, sofern der Leistungseintrag entsprechend gering ist. Für höhere Leistungen steht mit dem Pulverspritzgießen (kurz PIM für *Powder Injection Moulding*) ein erweitertes Verfahren zur Verfügung, in welchem sich unterschiedliche Metalle (MIM für *Metal Injection Moulding*) und Keramiken (CIM für *Ceramic Injection Moulding*) verarbeiten lassen. Diese besitzen nach dem Herstellungsprozess vergleichbare mechanische und stoffliche Eigenschaften wie bei konventionellen Fertigungsverfahren, lassen sich konventionell jedoch deutlich schwieriger verarbeiten. Das Spritzgießen und speziell das Pulverspritzgießen sind deshalb attraktiv vor allem für die Herstellung von LED-Kühlkörpern als Sichtteile und mit integrierten Funktionen und dadurch erhöhte Bauteilkomplexität. So können beispielsweise auch mehrere Funktionen in einem Fertigungsschritt in einem einzigen Bauteil umgesetzt werden. Trotz anspruchsvoller Geometrie kann so oftmals auf ein mehrteiliges Bauteil verzichtet werden und Schwachstellen im thermischen Management durch Materialübergänge und Kontaktstellen können vermieden werden.

Speziell für das Pulverspritzgießen stellt der Leuchten-Kühlkörper aufgrund seiner Geometrie, das heißt in erster Linie seines großen Volumens und seiner großen Oberfläche, eine Herausforderung dar.

Gelingt die Herstellung dennoch, können die Vorteile der Designfreiheit, der Werkstoffauswahl und der Oberflächenqualität bei der Fertigung von LED-Systemen mit ästhetischen Kühlkörpern in großen Stückzahlen genutzt werden. Im Folgenden wird deshalb dieses Verfahren detailliert beschrieben und dessen Möglichkeiten für die Herstellung der entworfenen Kühlkörper untersucht.

5.2 PULVERSPRITZGIEßEN

Das Pulverspritzgießen ist als Fertigungsverfahren sehr eng mit dem herkömmlichen Spritzgießen in der Kunststoffverarbeitung verwandt. Im Unterschied zum Kunststoffspritzgießen sind beim Pulverspritzgießen jedoch weitere Prozessschritte notwendig, um das Fertigteil zu erhalten. Ausgangsmaterial des Pulverspritzgießens ist der Feedstock. Dieses Granulat ist ein homogenes Gemisch aus einem feinkörnigen Pulver und einem geeigneten Bindermaterial bestehend aus Hauptbinder und Backbone auf Polymerbasis. Nach dem eigentlichen Spritzgießen muss das Bindermaterial rückstandsfrei entfernt werden, um Verunreinigungen im Bauteil zu vermeiden. Davor wird das sogenannte Grünteil aus dem Werkzeug entnommen. Es besitzt bereits die Form des Fertigteils, nicht jedoch dessen Größe. Zum Entbindern kommen abhängig vom verwendeten Bindermaterial Lösemittel, thermische oder katalytische Verfahren zum Einsatz. Ein Lösemittel löst den Hauptbinder von außen nach innen auf. Das dabei entstehende Braunteil ist porös und mechanisch instabil, da es lediglich durch den unlöslichen Backbone zusammengehalten wird. Wird

das Bauteil thermisch entbindert, wird der Hauptbinder durch Erhitzung zersetzt, verflüssigt oder verdampft. Der Backbone ist dabei so gewählt, dass er in dem für die Entbinderung des Hauptbinders relevanten Temperaturbereich stabil bleibt, und die Formhaltigkeit des Bauteils gewährleistet. Salpetersäure als Katalysator spaltet die Molekülketten des Hauptbinders bei der katalytischen Entbinderung auf. Durch den Austausch der Gasatmosphäre können die direkt in den gasförmigen Zustand übergehenden Moleküle sehr schnell entfernt werden. Als Trägergas kommt dabei in der Regel Stickstoff zum Einsatz.

Die mechanische Stabilität erhält das Teil im letzten Fertigungsschritt, bei dem unter Temperatureinwirkung zunächst der Backbone zersetzt, und das Bauteil anschließend zu einer polykristallinen Festkörperstruktur gesintert wird. Beim Sintern wird das Bauteil auf eine Temperatur erhitzt, die bei ungefähr 80 % der Schmelztemperatur des Pulvermaterials liegt. Zur Vermeidung von unerwünschter Oxidation erfolgt die Erhitzung im Vakuumofen oder unter Schutzgasatmosphäre. Die Oberflächenspannung der sphärischen Pulverpartikel führt dabei zu deren Zusammenwachsen durch Diffusion und Kriechvorgänge. Mit Erhöhung der Temperatur bilden sich zunächst an den Kontaktflächen der Pulverpartikel sogenannte Sinterbrücken, die sich bei weiter ansteigender Temperatur und damit Diffusionstätigkeit zu Korngrenzen ausbilden. Durch die verstärkte Diffusion werden dadurch noch vorhandene Poren geschlossen und es entsteht eine geschlossene Gefügestruktur. Beim Erreichen der maximalen Werkstoffdichte kommt es, durch die hohe Energie der Korngrenzen,

zu abruptem Kornwachstum. Während des Sinterprozesses ist deshalb die genaue Einhaltung des Temperaturverlaufs notwendig, um ein Bauteil hoher Dichte und gleichzeitig feinem Gefüge zu erhalten. Die Dichte, des im Vergleich zum Grün- und Braunteil um 10 % bis 25 % geschrumpften Fertigteils, beträgt typischerweise mehr als 96 % der des Basismaterials [67] [68].

Während das Spritzgießen der entworfenen Geometrie in Kunststoffen keinerlei Probleme erwarten lässt, ist für das Pulverspritzgießen vor allem die Bauteilgröße herausfordernd. Die meisten im Pulverspritzguss hergestellten Bauteile aus Metall weisen ein Gewicht zwischen 2 g und 20 g auf [69]. Die entworfenen zylinderförmigen Kühlkörper liegen mit einem Gewicht von über 300 g mehr als einen Faktor 10 darüber. Inwieweit sie dennoch im Pulverspritzguss hergestellt werden können und ob die Vorteile des Verfahrens auch in LED-Kühlkörperanwendungen nutzbar sind, soll durch verschiedene Spritzguss-Versuche ermittelt werden. Dabei interessieren neben der prinzipiellen Machbarkeit auch die Kosten gegenüber herkömmlichen Herstellungsverfahren.

5.3 WERKSTOFFE

Im LED-System kommen verschiedenste Werkstoffe zum Einsatz. Für optische Komponenten wie Linsen und Reflektoren werden meist Kunststoffe wie Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Polycarbonat (PC) verwendet, welche die Anforderungen an die optischen

Materialeigenschaften wie Brechung und Reflexion erfüllen können. Für Materialien auf dem thermischen Pfad zwischen Wärmequelle und Umgebung ergeben sich die Anforderungen aus den Wärmetransportmechanismen, das heißt, dass hauptsächlich die Wärmeleitung begünstigt sein muss.

Das Material des Kühlkörpers trägt entscheidend zu dessen technischer Funktion bei. Die Wärmeleitfähigkeit muss hoch genug sein, um den Wärmetransport von der LED zu den Kühlkörperoberflächen zu gewährleisten. Für die Verarbeitung im Spritzguss werden deshalb modifizierte Kunststoffe eingesetzt, die gegenüber herkömmlichen Kunststoffen eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Dabei werden keramische oder mineralische Füllstoffe oder Graphit in Kunststoffe wie beispielsweise Polyamid (PA), Polypropylen (PP) oder Polyetheretherketon (PEEK) eingebracht. Bei der Verwendung von keramischen oder mineralischen Füllstoffen sind die Verbundmaterialien elektrisch isolierend, während sie durch die Beimischung von Graphit elektrisch leitend werden. Je höher der Füllgrad eingestellt wird, desto höher ist die Wärmeleitfähigkeit des Verbundmaterials einerseits. Andererseits wird durch einen hohen Füllgrad die Verarbeitbarkeit im Spritzguss negativ beeinflusst, weshalb er nicht beliebig erhöht werden kann. Durch die Ausrichtung der Füllstoffe während des Spritzgießens entsteht eine Richtungsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit [70]. Diese liegt je nach Richtung für keramisch und mineralisch gefüllte Kunststoffe im Bereich von $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bis $8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und für graphitgefüllte Kunststoffe im Bereich von $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bis $25 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [66]. Je nach Anwendung des LED-Systems

und der damit verbundenen Leistung, kann die Wärmeleitfähigkeit ausreichend für dessen Entwärmung sein. Für das entworfene LED-System muss aufgrund des hohen Leistungseintrags jedoch auf Materialien mit höheren Wärmeleitfähigkeiten in allen Raumrichtungen zurückgegriffen werden.

Im Pulverspritzguss können nahezu alle sinterfähigen Pulvermaterialien verarbeitet werden. Vorwiegend werden Teile aus Stählen und Oxidkeramiken gefertigt, aber auch Hart- und Edelmetalle sind geeignete Werkstoffe. In Kapitel 4.4 wurde bereits die Leistungsfähigkeit des entworfenen Leuchten-Kühlkörpers beim Einsatz unterschiedlicher, im Pulverspritzguss verarbeitbarer, Werkstoffe betrachtet (Abbildung 4.27). Die Eigenschaften des fertigen Bauteils werden dabei im Wesentlichen durch die Eigenschaften des Pulvers bestimmt. Ebenso bestimmen diese das Fließverhalten und die Füllereigenschaften des Feedstocks und damit letztendlich die Maßhaltigkeit des Bauteils. Um eine niedrige Viskosität des Feedstocks und damit eine hohe Werkzeugfüllung zu erreichen, sind sphärische Pulverpartikel anzustreben. Wird das nicht erreicht, besteht die Gefahr, dass sich die Partikel während des Spritzgießens anisotrop ausrichten und dadurch zum Verzug des Bauteils beim späteren Sintern führen. Ein hoher Pulveranteil im Feedstock trägt zu einer geringen Schwindung und einer hohen Dichte im Fertigteil bei. Mit kleinen Pulverpartikeln steigt zwar die Oberflächengüte, jedoch nimmt auch die Wahrscheinlichkeit von Agglomerationen zu. Diese werden durch organische Additive und durch Pulver mit unterschiedlich großen Partikeln verringert, die außerdem höhere Feststoffanteile ermöglichen.

Der im Feedstock vorhandene Binder bettet das Pulver ein und macht die Masse spritzgießfähig. Im Wesentlichen besteht der Binder aus einem Polymer als Hauptbinder, das durch die Erhitzung in der Spritzeinheit aufgeschmolzen wird und dann eine niedrige Viskosität aufweist. Durch ihre Molekularstruktur eignen sich dafür vor allem kurzkettige Thermoplaste, da sie die homogene Ausrichtung der Pulverpartikel begünstigen. Nach dem Aufschmelzen kann der Binder mit hohem Druck eingespritzt werden und gewährleistet den Transport der Pulverpartikel in die Kavität. Diese füllt er zunächst vollständig aus bevor er plastifiziert. Im erkalteten Zustand bietet er eine hohe Festigkeit, um die Stabilität des spritzgegossenen Grünteils zu gewährleisten. Zu der Festigkeit des Grünteils trägt zusätzlich der Backbone im Binder bei. Diese Komponente erhält die, wenn auch verringerte, Festigkeit des Bauteils auch nach Entfernen des Hauptbinders im nächsten Prozessschritt.

Das Verhältnis zwischen Pulver und Binder im Feedstock ist ausschlaggebend für die Reproduzierbarkeit der Prozessparameter und damit letztendlich für die Qualität des Bauteils. Ein zu niedriger Anteil an Pulver erhöht die Wahrscheinlichkeit von Entmischungen und damit Verzug und Rissbildungen im Bauteil. Ein zu hoher Pulveranteil verhindert dagegen die vollständige Benetzung der Pulveroberfläche mit Binder. Die dadurch erhöhte Viskosität führt zu Problemen bei der Füllung der Werkzeugform und deshalb zur Gefahr von Porenbildung und nicht maßhaltigen Bauteilen. Verfügbare Feedstockmaterialien verfügen abhängig von Pulvermorphologie und Binder in der Regel über einen Pulveranteil zwischen 45 und 65 Vol-% [69].

Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Kühlkörper kommt aufgrund der thermischen Leistungsfähigkeit und der Verarbeitbarkeit im Metallpulver-Spritzguss vorwiegend ein Kupfer-Feedstock mit wasserlöslichem Kunststoffbinder zum Einsatz. Hergestellt von der PolyMIM GmbH, Bad Sobernheim, weist polyMIM® Cu999 E 110E in gesintertem Zustand neben Kupfer die in Tabelle 5.1 gegebenen Bestandteile auf. Im gesinterten Teil mit einer Dichte von $8,58 \text{ gcm}^{-3}$ beträgt die Wärmeleitfähigkeit gemäß Herstellerangaben mehr als $350 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Im Mittel muss ein Aufmaßfaktor von 1,157 berücksichtigt werden.

Tabelle 5.1: Typische Materialzusammensetzung in Gewichtsprozent im gesinterten Zustand [21] [20]

	Cu	O	Fe
poly-MIM® Cu999	bal.	0,05	0,1

	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	Fe
Catamold® 316L K	≤ 0,03	16 – 18	10 – 14	≤ 2	2 – 3	≤ 1	bal.

Neben diesem Kupfer-Feedstock wird für Vergleichsteile außerdem ein Edelstahl-Feedstock eingesetzt, der katalytisch zu entbindern ist. Catamold® 316L K der BASF SE, Ludwigshafen, weist nach dem Sintern eine typische Zusammensetzung gemäß Tabelle 5.1 auf. Die

Dichte beträgt dann $7,9 \text{ gcm}^{-3}$. Der Aufmaßfaktor wird im Mittel mit 1,167 angegeben. Eine Herstellerangabe zur Wärmeleitfähigkeit ist nicht verfügbar. Aufgrund der Materialzusammensetzung ist von einer Wärmeleitfähigkeit im Bereich von $14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bis $17 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ auszugehen.

5.4 SPRITZGIEßWERKZEUG

Zur Sicherung der Funktion des Spritzgießwerkzeugs wird dessen komplexe Konstruktion und Herstellung in Zusammenarbeit mit einem erfahrenen Partner für PIM-Werkzeugbau durchgeführt. Der prinzipielle Aufbau entspricht einem 2-Platten-Werkzeug, welches aus einem Stammwerkzeug besteht, das mit Formeinsätzen für die unterschiedlichen herzustellenden Geometrien ausgestattet wird. Zur Entformung des Teils wird jeweils ein Kontur auswerfer eingearbeitet. Für die zylinderförmigen Bauteile besteht durch den Kontur auswerfer die Möglichkeit die Teileherstellung über eine Prägefunktion der Maschine zu unterstützen. Die Kavitäten werden aus einem hochverschleißfesten Werkzeugstahl 1.2379 (60HRC+1) gefertigt und können mit einem Kühlmedium umspült werden. In der Trennebene ist das Werkzeug mit einer Silikondichtschnur ausgestattet, um es evakuieren zu können.

Zunächst werden das Stammwerkzeug sowie die Formeinsätze für den verzweigten und den nicht verzweigten zylindrischen Kühlkörper hergestellt. Die Erfahrungen, die bei der Abmusterung der ersten

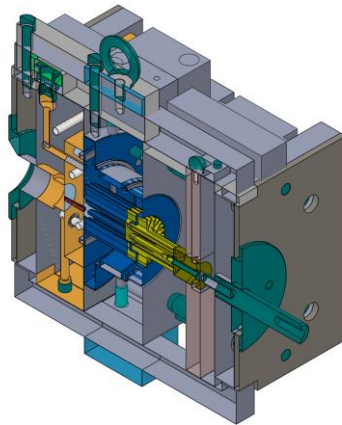


Abbildung 5.1: Schnittbild des Spritzgießwerkzeugs mit Formein-
satz für den verzweigten zylinderförmigen Kühlkörper

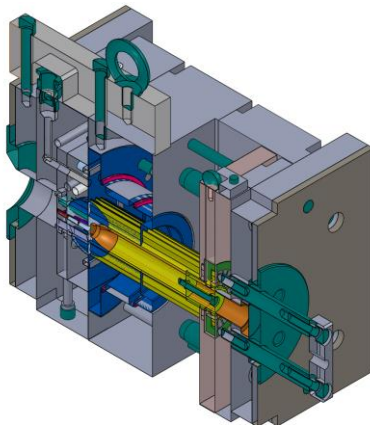


Abbildung 5.2: Schnittbild des Spritzgießwerkzeugs mit Formein-
satz für den kugelförmigen Leuchten-Kühlkörper

zylinderförmigen Bauteile gesammelt werden, fließen dann in die Konstruktion des aufwändigeren Formeinsatzes für den Leuchten-Kühlkörper ein. Abbildung 5.1 zeigt das Stammwerkzeug mit Formeinsatz für den verzweigten zylindrischen Kühlkörper im Querschnitt. Die Düsenseite befindet sich in der Darstellung auf der linken Seite. Dort wird die Kavität mit einer planen Platte abgeschlossen, während auf der rechten Seite der Konturauswerfer für die Prägefunktion (gelb eingefärbt) zur Verfügung steht.

Der Formeinsatz für den Leuchten-Kühlkörper besteht aus zwei Hälften deren Trennung in der Mitte der Kugel liegt. Eingespritzt wird auf der Seite der Kabeldurchführung, die deshalb an dieser Stelle im Grünteil nachgearbeitet werden muss. Die Auswerferseite beinhaltet einen zweistufigen Auswerfer, der einen Konturauswerfer und einen Auswerfer als Reflektorkern umfasst. So wird eine punktuelle Belastung des Bauteils beim Auswerfen verhindert. In Abbildung 5.2 wird der Formeinsatz im Stammwerkzeug im Schnittbild dargestellt. Auch in dieser Darstellung befindet sich die Düsenseite links. Auf der rechten Seite ist der zweistufige Auswerfer mit gelbgefärbter Kontur und orangegefärbtem Kern zu erkennen. Abbildung 5.3 zeigt die Düsenseite und die Auswerferseite mit Konturauswerfer im fertigen Werkzeug. Dabei wird die geringe Materialstärke im Bereich der äußeren Teiläste deutlich. Hier ist mit einer Schwachstelle zu rechnen, die es fraglich macht, ob der Auswerfer den Kräften während des Spritzgießprozesses standhält. Die Abmusterungen erster Teile sollen Aufschluss darüber geben.

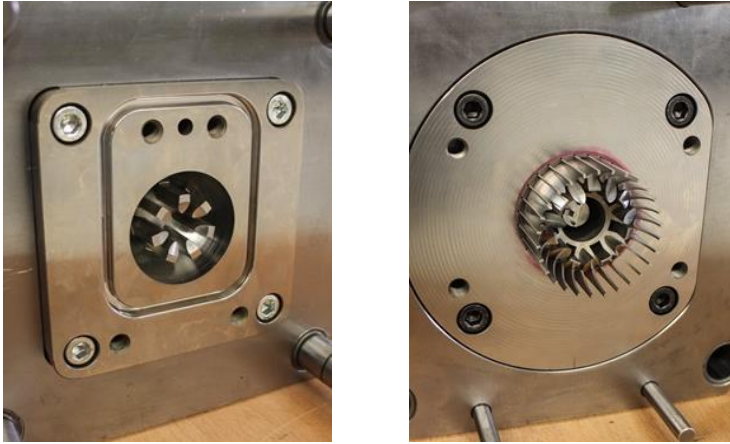


Abbildung 5.3: Düsenseite (links) und Auswerferseite (rechts) des Spritzgießwerkzeugs mit Formeinsatz für den kugelförmigen Leuchten-Kühlkörper

5.5 ABMUSTERUNG

Zur Abmusterung kommen zunächst die beiden zylindrischen Kühlkörper in der verzweigten und nicht verzweigten Ausführung. Erst wenn sich zeigt, dass das Verfahren prinzipiell für die Herstellung solcher Geometrien geeignet ist, wird auch die Leuchte im Werkzeug umgesetzt und abgemustert. Alle Versuche finden auf Spritzgießmaschinen aus dem zum Zeitpunkt der Arbeit aktuellen Produktportfolio

lio der Arburg GmbH in deren Technikum statt. Die Weiterverarbeitung der Grünteile bis zu den Fertigteilen erfolgt bei unterschiedlichen Spezialisten für Entbinder- und Sinterverfahren.

5.5.1 ZYLINDER

Die Abmusterung der zylinderförmigen verzweigten und nicht verzweigten Kühlkörper erfolgt in Kupfer mit dem Feedstock polyMIM Cu999 E 110E [71]. Die Parameter des Spritzgussprozesses werden innerhalb der vom Hersteller des Feedstocks gegebenen Grenzen gewählt und bei Bedarf während der Abmusterung angepasst. Ausgegangen wird von einer Werkzeugtemperatur von 60°C, einer Einspritzgeschwindigkeit von 20 cm³s⁻¹ und einem Einspritzdruck von 900 bar. Die Zylindertemperatur beträgt zwischen 170°C in Zone 1 und 183°C an der Düse.

Bereits die ersten Abmusterungsversuche der zylinderförmigen Kühlkörper verdeutlichen die Schwierigkeiten beim Metallpulverspritzguss von Bauteilen dieser Größe. Dabei zeigt sich, dass aufgrund der Werkzeug-Auslegung mit Prägekern das Füllen weniger herausfordernd ist, während sich das Auswerfen als problematisch darstellt. Der Prägekern unterstützt das Füllen durch Zurückfahren während des Einspritzvorgangs, so dass sich die Kavität mit dem eingespritzten Material vergrößert. Somit wird die Kavität zunächst im Bereich der Düse gefüllt und mit dem Zurückfahren des Prägekerns durch nachströmendes Material kontinuierlich aufgefüllt. So entsteht

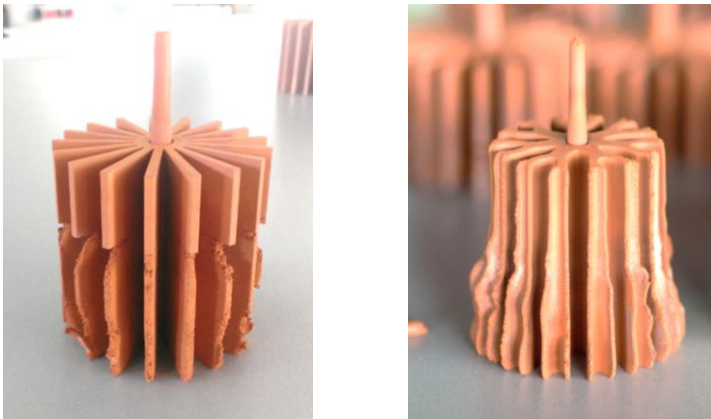


Abbildung 5.4: Fehlerhaft gefüllte Grünteile – links: nach zu schnellem Zurückfahren des Prägekerns; rechts: ohne Einsatz des Prägekerns

eine vollständige Füllung der Kavität. Versuche mit unterschiedlicher Einstellung der Bewegungs-Parameter des Prägekerns verdeutlichen dies. Abbildung 5.4 links zeigt beispielhaft ein Bauteil, das durch zu schnelles Zurückfahren des Prägekerns nicht vollständig gefüllt wurde. Hierbei erstarrt das Material an der Fläche des Prägekerns und wird durch dessen Bewegung aufgerissen. Dadurch entsteht die deutlich sichtbare Bindenaht, die auch für den anschließenden Sinterprozess einen erheblichen Nachteil darstellt.

Das Einspritzen in die gesamte Kavität, das heißt der Verzicht auf die Prägefunktion, hat zur Folge, dass die Rippen nicht bis in die äußeren Bereiche mit Material gefüllt werden. Abbildung 5.4 zeigt rechts ein

solches Teil, wobei außerdem ersichtlich ist, dass hierbei die Werkzeugtemperatur zu gering war oder zu langsam eingespritzt wurde. Dadurch erstarrt das Material im oberen Bereich des Bauteils während noch eingespritzt wird und es kommt zu einer stärkeren Füllung im unteren Bereich des Bauteils. Der Prägekern ist deshalb bei dieser Teilegeometrie unerlässlich, um die Kavität vollständig füllen zu können.

Im Gegensatz zum Füllen bereitet das Auswerfen der zylindrischen Bauteile wesentlich größere Schwierigkeiten. Teile in voller Höhe lassen sich zunächst nicht entformen, ohne dass sie dabei zerstört werden. Ursachen hierfür sind hauptsächlich die große Oberfläche der Geometrie und die damit verbundenen Reibungskräfte. Zwar ist durch den Prägekern des Werkzeugs eine gleichmäßige Verteilung der Kraft beim Auswerfen auf die gesamte Kontur des Bauteils gewährleistet, jedoch verhindert der Prägekern selbst geringe Formschrägen im Werkzeug vorzusehen, die das Entformen erleichtern. Die Materialbeschaffenheit und Spuren auf den Oberflächen der Rippen bis zur halben Bauteilhöhe lassen darauf schließen, dass beim Auswerfen Material vom Prägekern in die Form gepresst und komprimiert wird. Es entsteht ein metallischer Glanz durch die Reduktion des Bindermaterials in diesen Bereichen. Mit einer Auswerferkraft von maximal 30 kN lassen sich Grünteile mit lediglich 20 mm Höhe zerstörungsfrei entformen. Werden die Teile höher gefüllt, ist es nicht möglich sie mittels Auswerfer in einem Zug aus der Form zu drücken. Mehrere Stöße des Auswerfers auf das Teil lockern dieses



Abbildung 5.5: Fehlerhafte Grünteile – links: unvollständig gefülltes Teil; rechts: beim Entformen zerstörtes Teil

zwar und entformen es letztendlich, führen dabei jedoch zum Bruch mehrerer Rippen.

Mit einer Spritzgießmaschine, die eine Auswerfer-Kraft von bis zu 70 kN zur Verfügung stellt, ist es möglich auch höher gefüllte Teile zu entformen. Diese zerbrechen jedoch beim Auswerfen durch den hohen Reibungswiderstand an den Oberflächen. Das in Abbildung 5.5 links dargestellte Grünteil ist nicht vollständig gefüllt und kann deshalb entformt werden. Im Gegensatz dazu ist das Grünteil in Abbildung 5.5 rechts annähernd vollständig gefüllt, zerbricht jedoch durch die hohe Belastung bei der Entformung. Die Erhöhung der Werkzeugtemperatur auf 70 °C führt zu einem weicheren Bauteil, da der Schmelzpunkt des Bindermaterials überschritten ist. Dadurch ist

zum Entformen weniger Kraft notwendig, die Stabilität des Grünteils ist jedoch soweit reduziert, dass es sich dennoch nicht zerstörungsfrei auswerfen lässt. Eine Verdopplung der Restkühlzeit auf 240 s reduziert die entstehenden Bruchstellen, verhindert sie jedoch nicht vollständig. Die erhöhte Werkzeugtemperatur führt zudem zu Problemen beim Verfahren des Prägekerns, der sich durch geschmolzenes Bindermaterial und Kupferpartikel zwischen Kern und Formnest festsetzt.

Letztendlich können durch den Einsatz eines teflonbasierten Trennmittels die Reibungskräfte verringert werden. In Verbindung mit einer Erhöhung der Rückkühlzeit auf 300 s in denen das Bauteil schrumpft, können auch bei einer Werkzeugtemperatur von 60 °C vollständig gefüllte Teile entformt werden. Das Schrumpfen erklärt weshalb sich die nicht verzweigten Bauteile generell besser entformen lassen als die verzweigten Bauteile. Letztere schrumpfen im Bereich der Verzweigungen auf die Form, so dass eine größere Kraft zur Entformung benötigt wird.

5.5.2 LEUCHTEN-KÜHLKÖRPER

Die Abmusterung des kugelförmigen Leuchten-Kühlkörpers erfolgt zunächst mit dem in den bisherigen Versuchen eingesetzten Kupfer-Feedstock auf einer Arburg Allrounder 570 S Spritzgießmaschine. Im Anschluss daran werden auf derselben Maschine Versuche mit einem Edelstahl-Feedstock gefahren, um zusätzliche Vergleichsteile herzustellen.

Aufgrund des geringeren Volumens und der geringeren Oberfläche im Vergleich zu den zylinderförmigen Teilen ergeben sich beim Spritzgießen der Leuchten-Kühlkörper weitaus weniger Schwierigkeiten. Die Spritzgießparameter werden dabei entsprechend der Versuche mit den zylindrischen Bauteilen gewählt. Auch kommt wieder ein Trennmittel zum Einsatz, welches das Entformen erleichtert. Die Füllung der Kavität wird problemlos erreicht und alle Verzweigungen bis außen vollständig gefüllt. Beim Auswerfen zeigt sich, dass das Grünteil im Auswerfer festsetzt und nur durch Zurückfahren des Auswerfers gelöst werden kann. Dabei wird es auf den Reflektor geschoben und muss mit erhöhtem Kraftaufwand manuell aus dem Werkzeug entnommen werden. An den Seitenflächen der Äste, im Bereich des Reflektors, entstehen Materialabschürfungen durch Kollision des bereits geschrumpften Teils mit dem Werkzeugern beim Zurückfahren. Abbildung 5.7 (links) verdeutlicht dies am Grünteil. Als problematisch stellen sich außerdem die schmalen Teiläste nach der zweiten Verzweigung dar. Aufgrund der geringen Wandstärke von 1,15 mm ist in diesem Bereich auch der Auswerfer entsprechend dünnwandig. Bereits durch die Herstellung weniger Grünteile wird der Auswerfer so stark belastet, dass, bedingt durch den Einspritzdruck und die Kraftwirkung beim Entformen, Teile des Auswerfers im Bereich der schmalen Äste herausbrechen. Dies wird dadurch begünstigt, dass der Auswerfer konstruktionsbedingt einige Zehntel Millimeter Raum hat, um vom eingespritzten Material nach außen weggedrückt zu werden. Dies genügt um den Auswerfer in Teilen zu beschädigen, und zeigt sich auch an den unbeschädigten Ästen in Form einer Stufe an der Trennung des Bauteils. Aufgrund des nach

außen gedrückten Auswerfers ist die Kugelhälfte auf der Auswerferseite etwas größer als auf der Düsenseite. Das Grünteil in Abbildung 5.7 (links) ist mit an einem Teilast ausgebrochenem Auswerfer gefertigt. Die ausgebrochenen Teile des Auswerfers können zur Herstellung vollständiger Musterteile nach jedem Zyklus manuell in das Werkzeug eingesetzt werden. So entsteht im Grünteil lediglich eine kaum sichtbare Fehlstelle an der Bruchstelle. Für eine Serienfertigung ist dieses Vorgehen aufgrund des manuellen Eingriffs jedoch nicht umsetzbar.

In Ergänzung zu den Grünteilen aus Kupfer-Feedstock werden auch Teile aus Edelstahl-Feedstock (Catamold® 316L K) abgemustert. Hierbei wird die Werkzeugtemperatur auf 130 °C erhöht und mit einer Einspritzgeschwindigkeit von $10 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ bei einem Druck von 900 bar eingespritzt. Die Zylindertemperatur liegt zwischen 160 °C in Zone 1 und 190 °C an der Düse. Im Vergleich zum Kupfer-Feedstock lässt sich das Grünteil in Edelstahl etwas leichter entformen. Bedingt durch die lange Restkühlzeit liegt die Zykluszeit der zylinderförmigen Kühlkörper bei 320 s. Diese kann bei der Herstellung der Leuchten-Kühlkörper durch die einfachere Entformung deutlich reduziert werden und beträgt lediglich 55 s. Ansonsten ergeben sich keinerlei Unterschiede beim Spritzgießen.

Vor den weiteren Prozessschritten wird bei allen Geometrien der Anguss mechanisch von den Bauteilen entfernt. Dazu erfolgt eine Bohrung an der Stelle des Angusses. Bei den zylinderförmigen Kühlkörpern wird dadurch die Reduzierung der Wandstärken im Kern erreicht, um das Sintern durchführen zu können (unterbrochene Linie

in Abbildung A.1 und Abbildung A.2). Bei den Leuchten-Kühlkörpern entsteht durch die Bohrung die vorgesehene Kabeldurchführung.

5.5.3 ENTBINDERN UND SINTERN

Das Entbindern und Sintern der Musterteile erfolgt gemäß den Vorgaben der Feedstock-Hersteller. Aufgrund der unterschiedlichen Materialsysteme werden die Bauteile aus Kupfer anders behandelt als die aus Edelstahl. In beiden Fällen wird jedoch noch am Grünteil der Anguss entfernt und an dessen Stelle die Bohrung für die Kabeldurchführung gemäß der vorgegebenen Geometrie gesetzt. Das Grünteil weist eine ausreichende Stabilität auf, um mechanisch bearbeitet zu werden.

Musterteile aus Kupfer

Der eingesetzte Kupfer-Feedstock enthält das wasserlösliche Polyethylenglycol (C_2H_4O) als Binder, das im Bad mit demineralisiertem Wasser bei einer Temperatur von 60 °C gelöst wird. Aufgrund der Wandstärken werden die Bauteile 24 h im Wasserbad belassen, um danach bei 100 °C bis zum Erreichen eines konstanten Gewichts getrocknet zu werden. Das thermische Entbindern des Restbinderanteils und das Sintern erfolgt unter 100 % Wasserstoffatmosphäre auf einer keramischen Sinterunterlage aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) mit einer Reinheit von mindestens 99,5 Gew.-%. Das Temperaturprofil entspricht den Herstellervorgaben und sieht nach einer Haltezeit von



Abbildung 5.6: Zylinderförmige Kühlkörper als Grünteile sowie entbindert und gesinterte Fertigteile

2 h bei 500 °C die Erhöhung der Temperatur um $1,5 \text{ K min}^{-1}$ auf 1000 °C vor, die 3 h gehalten wird. Danach erfolgt die Abkühlung mit 15 K min^{-1} . Abbildung 5.6 zeigt die so entbinderten und gesinterten Musterteile aus Kupfer im Vergleich zu den Grünteilen. Dabei ist der gegebene Schrumpf deutlich erkennbar.

Musterteile aus Edelstahl

Die Edelstahlteile müssen katalytisch entbindert werden. Dabei wird der Polyacetal-Binder durch die katalytische Wirkung von Salpetersäure (HNO_3) in Stickstoff (N_2) als Trägergas aufgespalten und geht in den gasförmigen Zustand über. Dies erfolgt bei einer Temperatur



Abbildung 5.7: Musterteile aus Edelstahl - links: Grünteil aus Werkzeug mit ausgebrochenem Auswerfer an einem Teillast; rechts: Gesintertes Fertigteil

von 110 °C. Durch den Austausch der Gasatmosphäre wird der Binder entfernt, was eine kürzere Entbinderungszeit als beim wasserbasierten Entbindern zur Folge hat. Für den Leuchten-Kühlkörper beträgt sie 8 h. Das thermische Entfernen der Restbinderanteile und das Sintern der Edelstahl-Braunteile erfolgt unter 100% Wasserstoffatmosphäre ebenfalls auf einer Sinterunterlage aus Aluminiumoxid. Das Temperaturprofil sieht gemäß Herstellerangaben zunächst eine Haltezeit von einer Stunde bei 600 °C vor. Danach wird die Temperatur mit 5 K min⁻¹ auf 1.380 °C erhöht und für weitere drei Stunden gehalten [72]. Nach der Abkühlung im Ofen können die Fertigteile entnommen werden. Abbildung 5.7 zeigt ein Grünteil aus Edelstahl

neben einem gesinterten Bauteil zum Vergleich. Auch hier ist der Schrumpf in der Größe des Grünteils deutlich sichtbar.

5.5.4 NACHBEARBEITUNG

Die Nachbearbeitung der Bauteile betrifft lediglich die optische Erscheinung der Oberflächen, die bei Bedarf variiert werden kann. So können die sinterglatten Oberflächen durch Strahlen mit verschiedenen Materialien angeraut werden, um eine matte Erscheinung hervorzurufen. Auch die galvanische Anwendung, die Gasabscheidung oder die Beschichtung mit Lack ist eine Möglichkeit zur Oberflächenbehandlung. Für die Kupfer-Bauteile ist eine Beschichtung zum Korrosionsschutz notwendig, wenn das metallisch-rote Erscheinungsbild erhalten werden soll. Versuchsweise wurden sinterglatte sowie sandgestrahlte Kupfer-Bauteile mit einem klaren Zapon-Lack beschichtet. Außerdem wurden sinterglatte Bauteile in einem CVD-Prozess mit einer 300 nm bis 400 nm dicken Schicht auf Basis von SiO_2 beschichtet (WICOATEC®-Verfahren [73]). Abbildung 5.8 zeigt neben einem unbehandelten Bauteil links, in der Mitte ein mit HGH SM 2552 GT (Korngröße 30 μm) gestrahltes Bauteil sowie rechts ein Bauteil mit SiO_2 -Beschichtung. Zu erkennen sind die durch das gleichmäßige Aufrauen der Oberfläche veränderten Reflexionseigenschaften, die die Schattenbildung zwischen den Rippen verstärken und das gestrahlte Teil sichtbar dunkler erscheinen lassen. Ähnlich verhält sich das SiO_2 beschichtete Bauteil, welches jedoch einen geringeren Glanzgrad aufweist. Aufgrund geringfügiger Schichtdickenunterschiede



Abbildung 5.8: Oberflächenbehandlung der Sinterteile aus Kupfer von links nach rechts: unbehandelt, sandgestrahlt mit Korngröße 30 μm , CVD-beschichtet mit 300 nm bis 400 nm SiO_2s

ist die Farbgebung dabei nicht einheitlich und variiert zwischen Rot-, Orange- und Gelbtönen. Der Klarlack bietet dagegen einen farbneutralen Schutz gegen Korrosion, der die Erscheinung des Kupfers nicht beeinträchtigt. Die fertiggestellten Bauteile werden im nächsten Schritt messtechnisch untersucht. Das folgende Kapitel beschreibt die Vorgehensweise bei den Messungen und stellt die Ergebnisse dar.

Kapitel 6

CHARAKTERISIERUNG UND BEWERTUNG

Die im Spritzguss hergestellten Kühlkörper werden zur Beurteilung ihrer Leistungsfähigkeit mittels Messungen der thermischen Transienten charakterisiert. Als Maß zum Vergleich wird der thermische Widerstand herangezogen. Daneben werden in diesem Kapitel auch die Geometrie und das Erscheinungsbild der gefertigten Bauteile untersucht, die optische Leistung des aufgebauten Systems vermessen, sowie die Kosten für die Herstellung im Vergleich zu anderen Verfahren betrachtet. Eine abschließende Bewertung fasst die Ergebnisse im Hinblick auf die Zielsetzung zusammen.

6.1 GEOMETRIE

Das Herstellungsverfahren verspricht eine hohe Maßhaltigkeit der gefertigten Bauteile. Mit der geometrischen Charakterisierung erfolgt die Bestimmung der Istwerte und der anschließende Vergleich mit den geforderten Sollwerten.

6.1.1 ZYLINDERFÖRMIGE KÜHLKÖRPER

Aufgrund der problematischen Herstellung fallen die zylinderförmigen, spritzgegossenen Kühlkörper in ihren Abmessungen nicht wie ursprünglich definiert aus. Abweichungen sind bei beiden Varianten festzustellen, wobei der verzweigte Kühlkörper aufgrund der schwierigeren Herstellung weiter von den vorgegebenen Abmessungen abweicht. In Tabelle 6.1 werden die Sollwerte den Istwerten für Höhe, Durchmesser, Bauraum, Oberfläche und Materialvolumen absolut und relativ gegenübergestellt. Dabei ist ersichtlich, dass beide Varianten kleiner ausfallen als vorgegeben. Mit einem Bauraum von $95,80 \text{ cm}^3$ ist der verzweigte Kühlkörper zudem $3,03 \text{ cm}^3$ kleiner als der nicht verzweigte. Im Materialvolumen unterscheiden sich beide um $1,88 \text{ cm}^3$ wobei die verzweigte Variante ein um Faktor 0,95 geringeres Materialvolumen aufweist als vorgegeben, während bei der nicht verzweigten Variante lediglich ein Faktor 0,98 dazwischen liegt. Auch die Oberfläche ist in der verzweigten Variante geringer als in der nicht verzweigten. Sie unterscheidet sich um $7,12 \text{ cm}^2$ und damit um Faktor 0,98, was einen entsprechenden Einfluss auf die Wärmeabfuhr erwarten lässt.

Während Materialvolumen und Oberfläche eine direkte Auswirkung auf den thermischen Widerstand des Kühlkörpers haben, trägt die Rauheit der Montagefläche zum thermischen Widerstand des Gesamtsystems bei und nicht zu dem des Kühlkörpers selbst. Da der Kühlkörper jedoch nur im System seinen Zweck erfüllt, wird das Profil der Montagefläche im Tastschnittverfahren bestimmt, um eine

Tabelle 6.1: Geometrische Eigenschaften der spritzgegossenen, zylinderförmigen Kühlkörper

	verzweigt			nicht verzweigt			nicht verzweigt / verzweigt
	SOLL	IST	IST / SOLL	SOLL	IST	IST / SOLL	
Höhe (cm)	5,00	4,88	0,98	5,00	4,95	0,99	1,01
Durchmesser (cm)	5,00	5,00	1,00	5,00	5,04	1,01	1,01
Bauraum (cm ³)	98,17	95,80	0,98	98,17	98,83	1,01	1,03
Volumen* (cm ³)	34,59	32,86	0,95	35,35	34,72	0,98	1,06
Oberfläche* (cm ²)	363,21	355,94	0,98	361,24	362,32	1,00	1,02
Masse (g)	≥ 305,1	291,3	0,95	≥ 312,6	305,0	0,98	1,05

*) anhand des CAD-Modells berechnete Werte

Aussage treffen zu können, wie gut die thermische Anbindung der Wärmequelle an den Kühlkörper erfolgen kann. Tabelle 6.2 fasst die Rauheiten als Mittelwerte aus jeweils sieben Messungen auf im Winkel von $25,7^\circ$ zueinanderstehenden Fahrwegen über der Montagefläche zusammen. Hierbei werden sowohl die mittlere Rauheit R_a , die gemittelte Rautiefe R_z , die größte Einzelrautiefe R_{max} sowie die Profiltiefe P_t des ungefilterten Oberflächenprofils ausgewertet. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Fertigteilen ist erwartungsgemäß nicht zu erkennen. Im Gegensatz dazu sind die Rauheit und die Profiltiefe des Grünteils deutlich geringer. Dies wird auch im Profil deutlich, das beispielhaft für eine Messung am Fertigteil und am Grünteil in Abbildung 6.1 dargestellt ist. Hier ist die Ausbildung einer Einfallstelle in der Mitte des Kerns zu beobachten, die durch den Sinterprozess noch verstärkt wird.

Tabelle 6.2: Ermittelte Rauheiten der Spritzgussteile

	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)	P_t (μm)
Fertigteil nicht verzweigt	2,64	19,92	25,18	172,60
Fertigteil verzweigt	3,03	23,29	28,40	137,01
Grünteil verzweigt	0,95	7,57	10,14	23,29

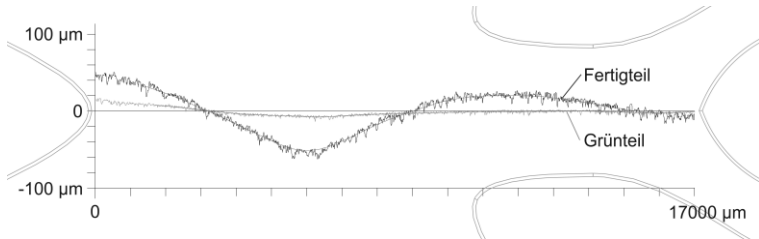


Abbildung 6.1: Profillinie der Kühlkörper-Oberfläche des Grünteils und des Fertigteils. Die hinterlegte Kontur stellt die Position des Profils auf dem Fertigteil dar.

6.1.2 LEUCHTEN-KÜHLKÖRPER

Im Gegensatz zu den zylinderförmigen Kühlkörpern ist aufgrund der geringeren Probleme während der Herstellung der Leuchten-Kühlkörper mit Bauteilen zu rechnen, die eine größere Maßhaltigkeit und höhere Oberflächenqualität aufweisen. Abbildung 6.2 (links) zeigt beispielhaft die Details der Kabeldurchführung und der LED-Aufnahme im Bauteil aus Edelstahl. Die Geometrie des Werkzeugs wurde auf den bereits für die zylinderförmigen Kühlkörper verwendeten Kupfer-Feedstock ausgelegt. Die Fertigung der Kühlkörper aus Edelstahl erfolgte mit demselben Werkzeug. Aufgrund des unterschiedlichen Materialsystems und Verhältnisses zwischen Pulver und Binder im Feedstock, ergibt sich ein abweichender Schrumpf

Tabelle 6.3: Geometrische Eigenschaften der spritzgegossenen Leuchten-Kühlkörper

	Kupfer			Edelstahl	Edelstahl/Kupfer
	SOLL	IST	IST / SOLL	IST	IST
Höhe (cm)	4,76	4,73	0,99	4,66	0,99
Durchmesser (cm)	5,00	5,00	1,00	4,93	0,99
Oberfläche* (cm ²)	230,57	230,54	1,00	228,23	0,99
Masse (g)	≥ 218,8	226,4	1,03	194,3	0,86

*) anhand des CAD-Modells berechnete Werte

und daraus resultierend eine abweichende Bauteilgröße. Tabelle 6.3 stellt die geometrischen Eigenschaften der Kühlkörper in der Übersicht dar. Dabei werden die Soll- und Istwerte für die Ausführung in Kupfer gegenübergestellt sowie die Geometrie von Kupfer- und Edelstahl-Kühlkörper verglichen. Zwischen Soll- und Istwerten der Kupfer-Kühlkörper ist keine Abweichung festzustellen. Die Edelstahl-Kühlkörper sind im Vergleich zur Ausführung in Kupfer lediglich um den Faktor 0,99 kleiner.

Das Fertigteil weist jedoch in zwei Punkten eine Abweichung zur vorgegebenen Geometrie auf. Einerseits kommt es konstruktionsbedingt im Werkzeug zur Bildung einer Stufe an der Trennung der beiden Kugelhälften. Diese ist mit weniger als 0,5 mm gering, jedoch deutlich sichtbar (Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8). Des Weiteren

entsteht beim Sintern ohne spezielle Sinterunterlage eine Verformung im Reflektor, wenn der Kühlkörper auf dem Reflektor liegend gesintert wird. Abbildung 6.2 (Mitte) zeigt das am stärksten deformierte Bauteil. Die Deformation kann entweder durch eine angepasste Sinterunterlage oder durch das Sintern der Bauteile mit nach oben gerichtetem Reflektor vermieden werden. Dann ist jedoch eine Abflachung der Kugel im Bereich der Kabeldurchführung notwendig, um eine Auflagefläche zu erzeugen. Ebenso kann eine Sinterunterlage in Ringform verwendet werden, die die Kugel beim Sintern stabil hält, jedoch einen Abdruck im Bauteil hinterlässt Abbildung 6.2 (rechts). Zur Herstellung von Musterteilen eignen sich die genannten Vorgehensweisen beim Sintern, für einwandfreie Serienteile ist jedoch der Einsatz einer speziellen Sinterunterlage notwendig.



Abbildung 6.2: Details der Fertigteile: LED-Aufnahme mit Kabeldurchführung (links); Deformierter Reflektor (Mitte); Abdruck der ringförmigen Sinterauflage (rechts)

6.2 THERMISCHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Die Leistungsfähigkeit der spritzgegossenen Kühlkörper wird anhand des aus der Messung der thermischen Transienten bestimmten thermischen Widerstands bewertet. Deshalb muss dieser als Absolutwert bestimmt werden. Da es zur Bestimmung der Absolutwerte des thermischen Widerstands zwingend erforderlich ist, den in das System eingebrachten Wärmestrom genau zu kennen, ist die Verwendung von LEDs als Wärmequelle nicht ohne zusätzlichen Aufwand möglich. Die in die LED eingespeiste Leistung wird teilweise in Licht umgesetzt, teilweise in Verlustleistungswärme. Um das Verhältnis zu kennen, muss deshalb immer auch eine Messung des Lichtstroms erfolgen. Nur so kann ermittelt werden wie groß der von der LED ins System eingebrachte Wärmestrom ist. Aus diesem Grund werden die Messungen zum größten Teil mit Hochleistungs-Dioden⁶ durchgeführt, die keine Strahlung emittieren, sondern die gesamte eingebrachte elektrische Leistung in Verlustleistungswärme umsetzen. So ist der genaue Wärmestrom bekannt. Erst wenn die Geometrie der Verlustleistungsquelle und der Anbindung durch den Schaltungsträger Berücksichtigung finden sollen, finden die Messungen der thermischen Transienten mittels LEDs statt, deren Wärmestrom durch die lichttechnische Charakterisierung bekannt ist. Um Einflüsse der Umgebung so gering wie möglich zu halten, werden alle Transienten-Messungen in einer nach JEDEC standardisierten „Still-Air-

⁶ Typ Diode Incorporated SBR10U200P im POWERDI5 Gehäuse mit einer maximal zulässigen Junction Temperatur von 175 °C [75]

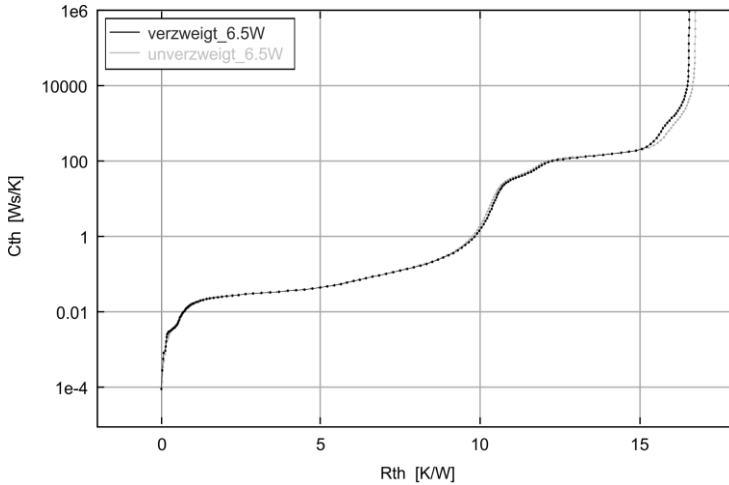


Abbildung 6.3: Integrale Strukturfunktionen von verzweigter und nicht verzweigter Geometrie

Chamber“ durchgeführt [74]. Die Umgebungstemperatur ist auf $25\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ geregelt.

Messungen werden an den verschiedenen gefertigten Bauteilgeometrien mit den unterschiedlichen Materialien durchgeführt. Dazu werden die Kühlkörper mit einer Verlustleistung von 6,5 W beaufschlagt und während 240 min thermisch stabilisiert. Die Messung der Abkühlkurve erfolgt während weiteren 240 min. Die Vergleichbarkeit der Kühlkörper wird erhöht, indem alle Kühlkörper auch in lackierter Form untersucht werden und somit unabhängig von Material und Oberfläche den gleichen Emissionskoeffizienten aufweisen. Zum

Einsatz kommt hierbei aufgrund der lichttechnischen Eigenschaften ein Kunstharz-Lack in weiß matt (RAL 9010).

Die Bestimmung des thermischen Widerstands erfolgt durch mehrere Transienten-Messungen nachdem das entsprechende Halbleiterbauteil kalibriert wurde. Vor jeder Messung wird eine Komponente des Systems verändert, so dass durch den Vergleich der Ergebnisse festgestellt werden kann, wo sich welche Komponenten des Systems auf dem thermischen Pfad befinden. In der Regel wird bei den durchgeführten Messungen die thermische Anbindung des Schaltungsträgers an den Kühlkörper verändert. So kann die Stelle, an der der thermische Widerstand des Kühlkörpers beginnt, identifiziert werden.

6.2.1 ZYLINDERFÖRMIGE KÜHLKÖRPER

Bei der Bewertung der zylinderförmigen Kühlkörper wird zum einen der erreichte absolute thermische Widerstand der verzweigten Geometrie betrachtet, zum anderen erfolgt der Vergleich mit der nicht verzweigten Geometrie. Abbildung 6.3 stellt die integralen Strukturfunktionen aus zwei Messungen der zylinderförmigen Geometrien als Wärmekapazität über dem thermischen Widerstand dar. In Ergänzung dazu sind in Abbildung B.1 (Anhang) die differentiellen Strukturfunktionen zu finden. Die Auswertung der Strukturfunktio-

nen von jeweils fünf Messungen ergibt für die unbehandelte, verzweigte Geometrie einen thermischen Widerstand⁷ von $5,77 \pm 0,03 \text{ KW}^{-1}$. Er liegt damit, auch bedingt durch den Strahlungsanteil, um einen Faktor von 0,917 unter dem aus der Simulation mit dieser Verlustleistung erwarteten thermischen Widerstand. Für die unbehandelte, nicht verzweigte Geometrie wird ein thermischer Widerstand von $6,09 \pm 0,03 \text{ KW}^{-1}$ gemessen. Das entspricht im Vergleich zur Messung der verzweigten Geometrie einem um den Faktor 1,055 höheren thermischen Widerstand⁸. Verglichen mit den Simulationsergebnissen ist der gemessene thermische Widerstand der nicht verzweigten Geometrie um den Faktor 0,904 kleiner. Der relative Unterschied zwischen verzweigter und nicht verzweigter Variante unterscheidet sich zwischen Simulation und Messung jedoch nur um 1,015.

Auch die Messungen der lackierten Bauteile spiegeln die durch die Simulationen erwarteten Ergebnisse wider. So wird für die verzweigte Geometrie ein thermischer Widerstand von $4,71 \pm 0,02 \text{ KW}^{-1}$ gemessen, während die nicht verzweigte Geometrie einen Widerstand von $4,83 \pm 0,01 \text{ KW}^{-1}$ aufweist. Dies entspricht dem erwarteten Faktor von 1,025 zwischen verzweigtem und nicht verzweigtem Bauteil. Bei Verringerung des Leistungseintrags erhöht sich der thermische Widerstand. In Abbildung 6.4 sind die Ergebnisse von Messun-

⁷ folgende Angaben alle mit erweiterter Unsicherheit gemäß GUM für $k = 2,65$ (Überdeckungsfaktor 95,45 %) [76]

⁸ [77] ermittelt für die nicht lackierten Bauteile einen Unterschied von 1,049 bei 5,9 W.

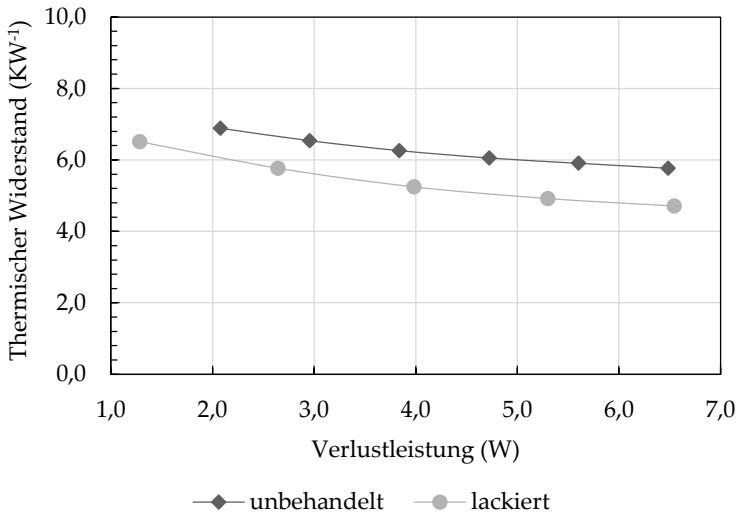


Abbildung 6.4: Thermischer Widerstand der verzweigten Geometrie (unbehandelt und lackiert) bei unterschiedlichen Verlustleistungen

gen der unbehandelten und lackierten Geometrie für unterschiedliche Verlustleistungen dargestellt (beispielhafte Strukturfunktionen in Abbildung B.2). Bei einem Leistungseintrag von 2,0 W ist für das lackierte Bauteil von einem thermischen Widerstand von 6,1 KW⁻¹ auszugehen, während für das unbehandelte Bauteil einen Widerstand von 6,9 KW⁻¹ erwarten lässt.

6.2.2 LEUCHTEN-KÜHLKÖRPER

Der thermische Widerstand der Leuchten-Kühlkörper wird für beide Material-Ausführungen bestimmt. Dabei werden wiederum unbehandelte Bauteile als auch mit Lack beschichtete Bauteile vermessen, um eine bessere Vergleichbarkeit erlauben. In Tabelle 6.4 werden die thermischen Widerstände für die unterschiedlichen Konfigurationen aufgelistet. Der geringste thermische Widerstand wird erwartungsgemäß mit dem lackierten Bauteil aus Kupfer erreicht. Mit $6,52 \pm 0,03 \text{ KW}^{-1}$ ist dieser im Vergleich zur unbehandelten Variante um Faktor 0,815 kleiner.

Die lackierte Ausführung in Edelstahl unterscheidet sich um den Faktor 1,115 vom lackierten Kupfer-Bauteil. In unbehandeltem Zustand beträgt der Unterschied zwischen Kupfer und Edelstahl lediglich Faktor 1,009. Die Oberflächentemperatur im oberen Bereich des lackierten Reflektorkerns aus Kupfer beträgt $66,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Im Vergleich zu den Aussagen der Simulationen sind die gemessenen thermischen Widerstände geringer und damit auch die Oberflächentemperatur höher. So unterscheidet sich die Messung des lackierten Kühlkörpers aus Kupfer von der Simulation um den Faktor 0,929. Der Unterschied zwischen der Ausführung aus Kupfer und der aus Edelstahl beträgt in der Simulation Faktor 1,136, während er in der Messung bei Faktor 1,115 liegt.

Während relative Unterschiede zwischen thermischen Widerständen in der Simulation und der Messung vergleichbar wiedergegeben

Tabelle 6.4: Thermischer Widerstand der Leuchten-Kühlkörper bei einem Leistungseintrag von 6,5 W

Material	Oberfläche	Thermischer Widerstand (KW ⁻¹)
Kupfer (CU999)	unbehandelt	7,99 ± 0,04
Kupfer (CU999)	lackiert	6,52 ± 0,03
Edelstahl (316L)	unbehandelt	8,07 ± 0,03
Edelstahl (316L)	lackiert	7,27 ± 0,04

werden (Abbildung 6.4), zeigen sich Unterschiede in den absoluten Werten der Simulations- und Messergebnisse. Zu diesen Unterschieden tragen in erster Linie Ungenauigkeiten in der Modellbildung bei. Diese betreffen beispielsweise die Material-, Umgebungs- und Oberflächeneigenschaften, welche für das gesamte Modell als konstant angenommen werden. Ebenso wird der Leistungseintrag vereinfachend als homogene Fläche modelliert wodurch der detaillierte Aufbau des Schaltungsträgers und der genaue Eintrag der Verlustleitung im Messobjekt unberücksichtigt bleiben. Die absolute Abweichung, die dadurch entsteht, führt in den durchgeführten Simulationen zu einem höheren thermischen Widerstand als in den vergleichbaren Messungen. Für die Auslegung der Kühlkörpergeometrie ist die Abweichung in positive Richtung handhabbar, da sie eine zusätzliche Reserve im thermischen Widerstand mit sich bringt.

Ergänzend zur Bestimmung des thermischen Widerstands der Leuchten-Kühlkörper wird eine vollständige Leuchte aufgebaut, um sowohl den thermischen Gesamtwiderstand als auch die optische Leistungsfähigkeit zu erfassen. Dazu wird ein lackierter Kühlkörper aus Kupfer mit einer Cree XM-L2 T6 bestückt, die auf einem Schaltungsträger aus Kupfer aufgelötet ist. Der Schaltungsträger weist im Bereich des thermischen Pads der LED kein Dielektrikum auf, so dass eine direkte Verbindung zwischen LED und dem Metall des Schaltungsträgers besteht [78]. Schaltungsträger und Kühlkörper sind miteinander verschraubt. Zur Verbesserung der thermischen Anbindung dieser beiden Bauteile kommt eine dünn aufgetragene, silikonbasierte, kupfergefüllte Wärmeleitpaste⁹ zur Anwendung. Der thermische Gesamtwiderstand dieses Systems beträgt bei einem Leistungseintrag von 10,1 W in die LED $13,51 \pm 0,03 \text{ KW}^{-1}$, wobei ein Anteil von 14,9 % auf die LED, von 36,6 % auf den Schaltungsträger und dessen Anbindung sowie von 48,5 % auf den Kühlkörper entfallen. Die Strukturfunktionen des Systems sind im Anhang in Abbildung B.4 dargestellt.

6.3 OPTISCHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT

Durch die gemessenen thermischen Widerstände lässt sich der Einfluss auf Lichtstrom und Effizienz beim Einsatz der Kühlkörper in

⁹ Coollaboratory Liquid Copper der Collaboratory Thermo Engineering, Magdeburg

einem LED-System bestimmen. Da Absolutwerte hierbei vom kompletten Systemaufbau, das heißt von allen eingesetzten Komponenten wie LED, Schaltungsträger und Optik, abhängen, werden die zylindrischen wie auch die kugelförmigen Kühlkörper zunächst relativ miteinander verglichen. Danach erfolgt die messtechnische Bestimmung von Lichtstrom, Effizienz und Lichtstärkeverteilung des aufgebauten LED-Systems.

Die lackierten, zylinderförmigen Kühlkörper unterscheiden sich zwischen verzweigter und nicht verzweigter Geometrie um den Faktor 1,025. Unter Annahme einer Verlustleistung von 6,5 W ergibt sich aus den thermischen Widerständen ein Temperaturabfall über dem verzweigten Kühlkörper von 30,62 K, über dem nicht verzweigten Kühlkörper von 31,40 K. Dies entspricht einer Differenz von 0,78 K, die für ein ansonsten identisches System auch für die LED-Temperatur gilt. Am Beispiel der LED Cree XM-L2 T6 folgt bei Annahme einer LED-Temperatur von 90,00 °C beziehungsweise 90,78 °C ein Unterschied im Lichtstrom von lediglich 1,9 lm und in der Effizienz von 0,1 lmW⁻¹ ¹⁰. Die unbehandelten, zylinderförmigen Kühlkörper weisen eine Temperaturdifferenz von 2,08 K auf. Unter Berücksichtigung der absoluten Temperaturen folgt daraus eine Differenz im Lichtstrom von 5,1 lm und in der Effizienz von 0,5 lmW⁻¹. Das entspricht einer Erhöhung des Lichtstroms und der Effizienz durch die verzweigte Geometrie um den Faktor 1,005 beziehungsweise 1,004.

¹⁰ Angaben basierend auf Daten des Herstellers im Cree PCT - Product Characterization Tool

Um eine Abschätzung zum Einfluss auf die Lebensdauer der LED treffen zu können, werden die Herstellerdaten aus Abbildung 2.2 für eine vergleichbare LED ausgewertet und durch eine geometrische Regressionskurve verbunden (Abbildung 6.5). Die Temperaturdifferenz zwischen verzweigter und nicht verzweigter Geometrie lässt eine Differenz der Lebensdauer von 800 h für das lackierte Bauteil sowie 1650 h für das unbehandelte Bauteil erwarten. Durch die verzweigte Geometrie wird die Lebensdauer damit um den Faktor 1,016 beziehungsweise 1,040 erhöht.

Die kugelförmigen verzweigten Leuchten-Kühlkörper wurden in Kupfer und Edelstahl gefertigt. Die gemessene Differenz des thermischen Widerstands von $1,23 \text{ KW}^{-1}$ lässt bei einem Leistungseintrag von 6,5 W eine Temperaturdifferenz von 7,99 K erwarten. Diese bedingt einen Unterschied im Lichtstrom von 19,4 lm und in der Effizienz von $1,5 \text{ lmW}^{-1}$. Das entspricht in der Kupfer-Ausführung einem um Faktor 1,019 höheren Lichtstrom und einer um Faktor 1,015 höheren Effizienz als mit dem Bauteil aus Edelstahl. Die Lebensdauerprognose erhöht sich dabei um 5.240 h beziehungsweise den Faktor 1,169.

Die geschlossene Kugel als Referenz für ein herkömmliches LED-System mit Gehäuse weist im Vergleich zum verzweigten Leuchten-Kühlkörper einen um $9,34 \text{ KW}^{-1}$ höheren thermischen Widerstand auf, der bei einem Leistungseintrag von 6,5 W zu einer Temperaturdifferenz von 60,72 K führt. Lichtstrom und Effizienz unterschieden sich dadurch um 146 lm beziehungsweise 12 lmW^{-1} . Der verzweigte Kühlkörper hat damit einen um Faktor 1,163 höheren Lichtstrom und

um Faktor 1,130 höhere Effizienz als die geschlossene Kugel. Im Hinblick auf die Lebensdauer wird ein Unterschied von 23.100 h prognostiziert. Das entspricht einer um den Faktor 2,255 höheren Lebensdauer der LED beim Einsatz der verzweigten Geometrie anstatt der geschlossenen Kugel.

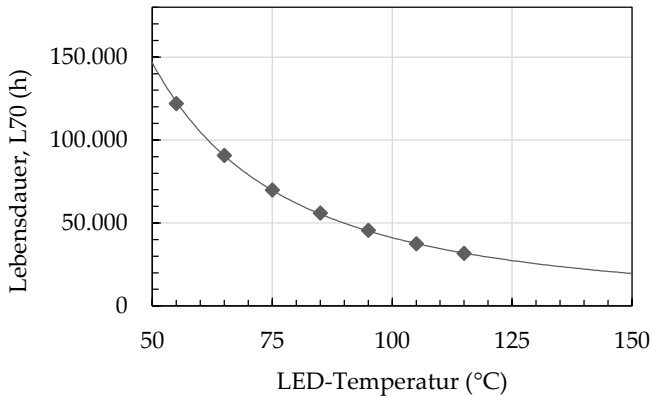


Abbildung 6.5: Cree XR-E: Abhängigkeit der Lebensdauer (Rückgang des Lichtstroms auf 70 % des Anfangslichtstroms) von der LED-Temperatur

Die lichtmesstechnische Charakterisierung des Gesamtsystems erlaubt in erster Linie die Beurteilung der hergestellten Reflektoroptik. Sie beeinflusst den Lichtstrom und damit die Effizienz des Systems genauso wie die Lichtstärkeverteilung. Mit der Vermessung des Systems im Nahfeldgoniophotometer werden alle notwendigen Daten aufgezeichnet. Die gewonnenen Strahlendaten erlauben außerdem die weitere Auswertung in der CAL-Software und damit den direkten

Vergleich mit den erwarteten Werten aus der Simulation. Abbildung C.6 im Anhang zeigt die gemessene Lichtstärkeverteilungskurve des aufgebauten Systems im Vergleich zu Abbildung C.5 als Ergebnis der bei der Entwicklung durchgeführten Simulation mit den Strahldaten des LED-Herstellers. Die Ähnlichkeit der Form der Kurven ist deutlich erkennbar, wenngleich die reale Verteilung etwas weniger breit ausfällt, als durch die Simulation vorhergesagt. In der resultierenden Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Referenzfläche im Abstand von 950 mm ist dieser Unterschied ebenso erkennbar (Abbildung 6.6 im Vergleich zu Abbildung 4.21). Die Randbereiche werden dabei etwas weniger stark ausgeleuchtet. Dennoch werden die Zielvorgaben auf der Bewertungsfläche von 600 mm x 600 mm mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von 726 lx und einer Gleichmäßigkeit g_1 von 0,84 übertroffen. Der Leuchten-Lichtstrom beträgt bei der maximalen Eingangsleistung 614 lm und kann unter Erfüllung der Zielvorgaben für die Beleuchtungsstärkeverteilung auf 428 lm reduziert werden. Die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke beträgt dann noch 500 lx. Durch die Messung des Lichtstroms der LED ohne Leuchte im Betriebspunkt, der sich in der Leuchte einstellt, wird der Verlust an Lichtstrom durch die Reflektoroptik mit Faktor 0,72 bestimmt. Deshalb ist ein LED-Lichtstrom von mindestens 588 lm notwendig, um die Zielvorgaben zu erfüllen. Mit den elektrischen Parametern berechnet sich eine Leuchten-Effizienz von 61 lmW^{-1} bei maximaler Eingangsleistung von 10,1 W beziehungsweise 86 lmW^{-1} bei der zur Erfüllung der Vorgaben mindestens notwendigen Eingangsleistung von 5,0 W.

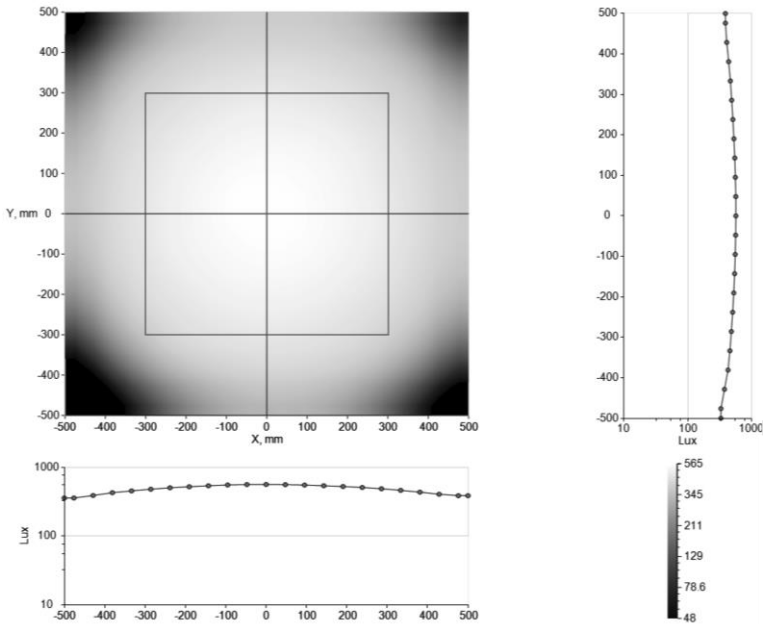


Abbildung 6.6: Beleuchtungsstärkeverteilung des gefertigten LED-Systems im Abstand von 950 mm bei einem Leuchten-Lichtstrom von 428 lm

Auch wenn die optischen Zielvorgaben erreicht werden konnten, lassen sich Abweichungen in der Lichtstärkeverteilung erkennen. Die Ursache liegt vermutlich in einer Deformation des Reflektors während des Sinterprozesses, die durch das Fehlen einer geeigneten Unterlage für die Musterteile entsteht. Auch wird die Positionierung der LED im Reflektor nicht genau mit den Annahmen im Simulationsmodell übereinstimmen. Die Effizienz der Reflektoroptik ist um Faktor

0,91 geringer als erwartet. Diese relativ geringe Effizienz der Reflektorflächen folgt aus dem Herstellungsprozess als solches. Eine zusätzliche Politur der Flächen im Spritzgusswerkzeug könnte die Rauheit der Oberflächen weiter Verringern und den Reflexionsgrad dadurch erhöhen. Durch das Herauslösen des Bindermaterials und das anschließende Sintern kann der Reflexionsgrad jedoch nicht beliebig gesteigert werden, weil die Oberfläche während des Herstellungsprozesses immer eine poröse Struktur durchläuft.

Die optische Leistungsfähigkeit der Leuchte wird stark beeinflusst von den Eigenschaften der verbauten Lichtquelle. Im Beispielsystem wird eine Cree XM-L2 T6 eingesetzt, die im mittleren Bereich der verfügbaren Lichtstrom-Binnings für hohe ähnlichste Farbtemperaturen zwischen 5.000 K und 8.500 K liegt [58]. Mit 6.600 K liefert sie ein tagelichtweißes Licht, das durch den hohen Blauanteil als kühl empfunden wird und beispielsweise als Lesebeleuchtung am Tag eingesetzt werden kann. Verlangt die Anwendung dagegen ein warmweißes Licht, wird beispielsweise eine Cree XM-L2 T4 mit einer ähnlichsten Farbtemperatur zwischen 2.600 K und 3.300 K als Lichtquelle verwendet. Mit dieser LED wird ein maximaler Leuchten-Lichtstrom von 524 lm erreicht¹¹. Die Leuchten-Effizienz reduziert sich dabei auf 53 lmW⁻¹. Die maximal erreichbare Leuchten-Effizienz bei Erfüllung der Zielvorgaben der Beleuchtungsstärkeverteilung beträgt mit dieser warmweißen LED 64 lmW⁻¹. Im Gegensatz dazu kann die maximale Leistung der verwendeten LED Cree XM-L2 mit dem

¹¹ Berechnungen für die XM-L2 T4 und XM-L2 U3 basierend auf Herstellerangaben im Cree PCT - Product Characterization Tool

leistungsstärksten Binning U3 erreicht werden. Damit liefert die Leuchte einen Lichtstrom von 702 lm bei einer Leuchten-Effizienz von 71 lmW^{-1} . Bei Erfüllung der Zielvorgaben beträgt die Leuchten-Effizienz mit dieser tageslichtweißen LED maximal 90 lmW^{-1} .

6.4 ERSCHEINUNGSBILD UND HERSTELLUNGSVERFAHREN

Die gegebenen Einschränkungen bezüglich der Wandstärken schränken die Auslegung der Geometrie zwar ein, machen den Metallpulverspritzguss aufgrund der erreichten Bauteilqualität jedoch nicht ungeeignet für die Fertigung von Kühlkörpern als Sichtteile. Bewertet man die gefertigten Bauteile nach ihrem Erscheinungsbild, so lässt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den zylinderförmigen Kühlkörpern und dem Leuchten-Kühlkörper feststellen. Die Schwierigkeiten beim Füllen und Entformen der zylinderförmigen Bauteile führen zu ungleichmäßigen Oberflächen, Rissen, beschädigten Kanten und einer mangelhaften Maßhaltigkeit (Abbildung 6.7). Auch wenn ihre technische Leistung dadurch nur sehr gering beeinflusst wird, eignen sich die Musterteile in der hergestellten Geometrie deshalb nicht für den Einsatz als Sichtteile. Prinzipiell sind die Teile im Metallpulverspritzguss herstellbar, jedoch ist bereits die Fertigung von vollständigen Teilen mit hohem Aufwand verbunden. Werden Teile gefordert, die ein einwandfreies optisches Erscheinungsbild aufweisen, wird es für die gegebene Geometrie in Verbindung mit



Abbildung 6.7: Zylinderförmige Kühlkörper als Fertigteile

dem verwendeten Material kaum möglich sein mit vertretbarem Aufwand Teile im Metallpulverspritzguss herzustellen.

Durch das reduzierte Materialvolumen und die geringere Oberfläche lässt sich der Leuchten-Kühlkörper wesentlich besser füllen und entformen als die zylinderförmigen Kühlkörper. Dabei kann auf Formschrägen verzichtet werden, die das Design negativ beeinflussen würden. Es werden homogene Oberflächen, klar definierte Kanten sowie, abgesehen von den nachfolgend aufgeführten Fehlerstellen, eine sehr gute Maßhaltigkeit erreicht, sowohl mit dem eingesetzten Kupfer-Feedstock als auch mit dem verwendeten Edelstahl-Feedstock. Insbesondere zeigen die Musterteile bereits die hohe erreich-

bare Oberflächengüte ohne sichtbare Unregelmäßigkeiten wie Lunker oder Riefen und eine nur sehr geringe Gratbildung (Abbildung 6.8).

Dennoch weisen die Mustereile Fehler auf, die das Erscheinungsbild negativ beeinflussen. Die Stufe an der Trennung der Werkzeughälften unterbricht die Form und verhindert eine optisch in sich geschlossene Kugel. Durch die Überarbeitung der Werkzeugkonstruktion lässt sich die Stufe an der Trennebene des Bauteils potenziell vermeiden. Wird der Auswerfer im äußeren Bereich an seinen schmalen Teilästen ringsum durch ein passgenaues Gegenstück abgestützt, wird der Raum für das Zurückweichen des Auswerfers im Moment des Einspritzens annähernd eliminiert. Durch die Abstützung würde



Abbildung 6.8: Leuchten-Kühlkörper als Fertigteile in Kupfer und Edelstahl

auch das Brechen des Auswerfers verhindert. Blicke trotz dieser Modifikation im Werkzeug eine erkennbare Stufe im Fertigteil, könnte des Weiteren die Kavität der Kugelhälfte auf der Düsenseite nachträglich vergrößert werden, um das Zurückweichen des Auswerfers zu kompensieren und einen stufenlosen Übergang zur Kugelhälfte auf der Auswerferseite zu ermöglichen.

Neben der Stufe zeigen die Musterteile außerdem fehlerhafte Stellen durch das Sintern. Aufgrund der Kugelform besteht keine ebene Fläche auf der die Teile während des Sinterprozesses aufliegen können. Die Musterteile werden daher entweder auf der schmalen Kante des Reflektors liegend gesintert, als Grünteile im Bereich der Kabeldurchführung abgeflacht oder auf einer ringförmigen Sinterunterlage aufgelegt. Das Sintern auf der Reflektorkante führt zu einer Deformation der Reflektorform und damit zu einem negativen Einfluss auf das Erscheinungsbild. Die ringförmige Sinterunterlage beeinflusst die Kugelform in ähnlichem Maß, da sie einen Abdruck in der Kugelkontur hinterlässt. Das Abflachen des Grünteils verändert die Kugelkontur weniger stark (siehe Edelstahlteil in Abbildung 6.8 rechts). Dennoch sind alle drei Vorgehensweisen beim Sintern nur für die Abmusterung geeignet. In der Serienfertigung wird eine spezielle Sinterauflage benötigt werden, die das Bauteil so haltet, dass keine Auswirkungen auf die äußere Erscheinung entstehen.

Das Erscheinungsbild der Musterteile verdeutlicht die Möglichkeit im Metallpulverspritzguss auch Bauteile in der Größe der Leuchtenkühlkörper als Sichtteile herzustellen. Ebenso ist ersichtlich, dass es

mit zunehmender Bauteilgröße schwieriger wird, optisch einwandfreie Teile zu produzieren. Für die Herstellung von Bauteilen mit Materialvolumen und Oberfläche vergleichbar der zylinderförmigen Kühlkörper muss mit erhöhtem Aufwand gerechnet werden, um als Sichtteile geeignete Fertigteile zu erhalten. Aufgrund der an den Leuchtenkühlkörpern gezeigten hohen Qualität des Erscheinungsbildes, kann dies je nach Anwendung jedoch gerechtfertigt sein.

6.5 KOSTEN

Die Eigenschaften des Pulverspritzgusses lassen erkennen, dass sich dieses Verfahren wirtschaftlich nur für große Stückzahlen und sehr komplexe Bauteile einsetzen lässt. Im Vergleich zu nicht werkzeuggebundenen Verfahren fallen für die Konstruktion und die Herstellung des Spritzgießwerkzeugs Investitionskosten an, die auf die Bauteilkosten umgelegt werden müssen. Ebenso können zusätzliche Hilfsmittel für die Fertigung wie beispielsweise Sinterauflagen benötigt werden oder es müssen erforderliche Nacharbeiten an den Bauteilen erfolgen.

Um eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit des Pulverspritzgießens für die untersuchte Anwendung treffen zu können, sollen die Bauteilkosten des Leuchten-Kühlkörpers genauer betrachtet werden und der Vergleich mit alternativen Herstellungsverfahren erfolgen. Hierbei werden Richtpreise berücksichtigt, welche die Kosten in guter Näherung widerspiegeln.

Auf Seite der Investitionskosten fallen für das Pulverspritzgießen hauptsächlich die Kosten für das Werkzeug (Kapitel 5.4) an. Dabei wird die Werkzeug-Konstruktion sowie die Anfertigung von Stammwerkzeug und Formeinsatz für den Leuchten-Kühlkörper berücksichtigt. Kalkuliert man die Fertigungskosten inklusive Kosten für Feedstock, Abschreibungen auf Maschinen, Kosten für Ausschuss, Qualitätssicherung sowie allgemeine Verwaltungskosten, ergeben sich stückzahlabhängige Fertigungskosten, die für ein Kupferbauteil in einer Losgröße von 1.000 Stück als Referenzwert dienen. Der Feedstock hat hierbei das größte Gewicht und trägt mit circa 25 % zu den Fertigungskosten bei. Der verwendete Edelstahl-316L-Feedstock reduziert die Fertigungskosten um Faktor 0,6. Aufgrund der Investitionskosten in gleicher Höhe beträgt der Unterschied in den Stückkosten bei 1000 Stück noch Faktor 0,82, erhöht sich jedoch für höhere Stückzahlen, wie Abbildung 6.9 zeigt. Darin werden die auf den Referenzwert normierten Kosten stückzahlabhängig für verschiedene Herstellungsverfahren dargestellt. Auch wenn herkömmliche Herstellungsverfahren für Bauteile wie die Leuchten-Kühlkörper aufgrund der jeweiligen Besonderheiten sowohl bei der Materialauswahl als auch bei der Teilegeometrie nicht vollständig vergleichbar sind, geben sie die Möglichkeit der kostenmäßigen Einordnung des Metallpulverspritzgießens. Unter der Annahme der Herstellbarkeit im Druckgießen entstehen für die Konstruktion und die Herstellung des Druckgießwerkzeugs Kosten in ähnlicher Höhe wie für das Spritzguss-Werkzeug. Aufgrund wesentlich geringerer Fertigungskosten liegen die Stückkosten berechnet auf Basis von 1.000 Stück für die Fertigung aus AlSi9Cu3(Fe) bei Faktor 0,50 im Vergleich zu den

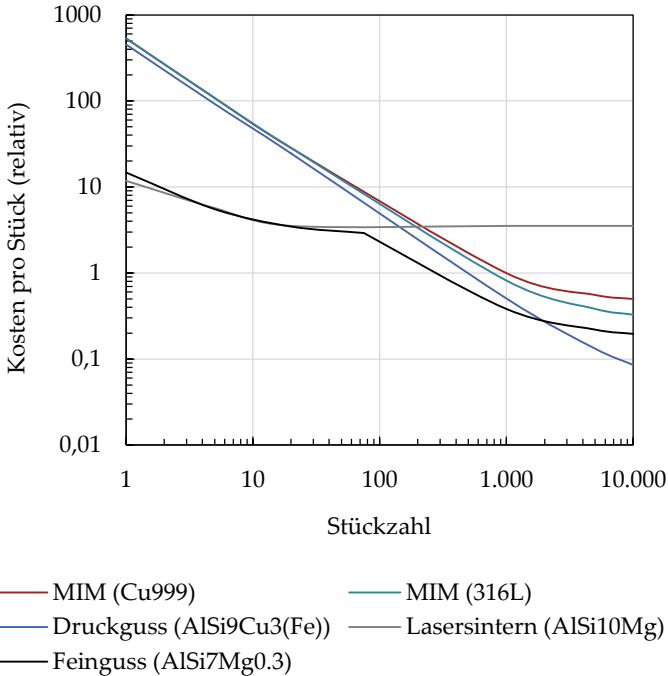


Abbildung 6.9: Abhängigkeit der Stückkosten des Leuchten-Kühlkörpers von der Stückzahl für verschiedene Herstellungsverfahren (normiert auf die Stückkosten für das spritzgegossene Kupfer-Bauteil bei 1.000 Stück)

spritzgegossenen Bauteilen aus Kupfer. Bei größeren Stückzahlen erhöht sich der Unterschied und erreicht bei 10.000 Stück einen Faktor von 0,17. Unter der Voraussetzung der Herstellbarkeit im Druckguss ist jedoch in jedem Fall mit hohen Ausschussraten und aufwändigen

Nacharbeiten zu rechnen, um ein geeignetes Erscheinungsbild zu erreichen. Aufgrund der notwendigen Anspritzung des Teils auf der LED-Montageplatte müssen des Weiteren Nacharbeiten in Form von Fräsen oder Drehen an dieser Fläche vorgesehen werden. Die Kosten für die Nacharbeiten sind ohne die Herstellung von Musterteilen nicht vorhersehbar, könnten den Stückpreis bei 10.000 Stück jedoch mehr als verdoppeln.

Durch die geringen Anforderungen an das Werkzeug für die Verarbeitung von Wachs im Feinguss, ergibt sich gegenüber dem Spritzguss-Werkzeug für den Metallpulverspritzguss ein Kostenvorteil. Die Investitionskosten für die Konstruktion und die Herstellung des Werkzeugs liegen bei ungefähr 0,40 der Investitionskosten für den Pulverspritzguss. Die Fertigungskosten bei der Verwendung von AlSi7Mg0,3 liegen zwischen denen des Pulverspritzgießens und denen des Druckgießens. Aufgrund der geringeren Investitionskosten sind bis zu einer Stückzahl von 2.000 die Kosten pro Leuchten-Kühlkörper im Feinguss geringer als die im Druckguss. Gegenüber dem Pulverspritzguss liegen sie bei 1.000 Stück bei Faktor 0,38 und damit am geringsten im Vergleich der betrachteten Herstellungsverfahren.

Ergänzend zur Herstellung im Spritzguss, bietet sich auch die Möglichkeit der additiven Fertigung der Wachsmodele für den Feinguss im 3D-Druck. Bei geringen Stückzahlen kann deshalb auf die Herstellung eines Spritzguss-Werkzeugs verzichtet werden und so die Stückkosten deutlich reduziert werden. Bei mehr als 75 Bauteilen ist jedoch die Herstellung eines Spritzguss-Werkzeugs für die gegebene Geometrie wirtschaftlich sinnvoll. Hinzu kommt in beiden Fällen

eine notwendige Bearbeitung der Montagefläche für die LED beispielsweise durch Planschleifen, Drehen oder Fräsen, um eine ausreichend niedrige Rauheit für die thermische Anbindung zu erreichen. Die Oberflächenqualität wird jedoch selbst durch zusätzliche Nacharbeiten nicht die der spritzgegossenen Bauteile erreichen. Abbildung 6.10 zeigt einen auf Basis eines additiv hergestellten Wachsmodells im Feinguss gefertigten Leuchten-Kühlkörper aus Bronze (Kupfer-Silizium CuSi1). Die Oberflächen weisen schwach erkennbar die Struktur des Wachsmodells auf. Die Fehlstellen auf der Seite der Kabeldurchführung können voraussichtlich durch Anpassungen beim Gießprozess vermieden werden.

Eine weitere Ergänzung für kleine Stückzahlen bis zu Einzelstücken stellt die werkzeuglose additive Fertigung mittels selektivem Lasersintern dar. Die Geometrie des Leuchten-Kühlkörpers ist damit ohne Änderungen in verschiedenen Aluminiumlegierungen (hier AlSi10Mg) oder auch Edelstahl herstellbar. Während die Stückkosten



Abbildung 6.10: Leuchten-Kühlkörper hergestellt im Feinguss aus gedrucktem 3d-Wachsmodell (Wieland Werke AG)

bei 1000 Stück um Faktor 3,53 höher ausfallen als im Pulverspritzguss, betragen sie bei 20 Stück lediglich Faktor 0,12 der Stückkosten im Pulverspritzguss. Sie reduzieren sich entsprechend Abbildung 6.9 so lange bis der Bauraum der Fertigungsanlage vollständig ausgenutzt wird. Bedingt durch die eingeschränkte Oberflächenqualität ist jedoch auch bei diesem Verfahren eine nachträgliche Oberflächenbehandlung notwendig. Die grundsätzliche Eignung der additiven Herstellung für die Fertigung von verzweigten Kühlkörpern zeigt [77] durch die messtechnische Charakterisierung eines solchen Bauteils.

Im Vergleich der Kosten der betrachteten Fertigungsverfahren und Stückzahlen liegt der Pulverspritzguss in allen relevanten Fällen am oberen Ende. Zu berücksichtigen sind dabei jedoch einerseits die Materialien, die im Pulverspritzguss verarbeitet werden können, andererseits die gezeigte hohe Oberflächengüte, die kaum Nacharbeit erfordert. Beide Eigenschaften kommen der Ausführung der Bauteile als ästhetisch hochwertige Sichtteile zu Gute. Vergleichbare Ergebnisse sind mit anderen Fertigungsverfahren gegebenenfalls gar nicht erreichbar beziehungsweise nur unter hohen Ausschussraten und durch aufwändige Nacharbeiten möglich. Abhängig von der Anwendung und deren Anforderungen an Materialien und Oberflächengüte, können sich die Kosten für den Pulverspritzguss dadurch relativieren und das Verfahren kann eine wirtschaftliche Lösung darstellen.

6.6 ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG

Die gefertigten Bauteile geben Aufschluss über unterschiedliche Aspekte bei der Entwicklung von LED-Systemen nach dem Vorbild der Natur. Sie zeigen, dass mit Hilfe der natürlich inspirierten Verzweigungen der thermische Widerstand eines Kühlkörpers im Vergleich zu herkömmlichen Rippen verringert werden kann. Je größer der Kühlkörper, desto größer ist der potenzielle Vorteil durch die Verzweigungen. Dennoch hat das aufgebaute System mit lediglich 50 mm Durchmesser gezeigt, dass bereits bei dieser Größe eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit durch die verzweigte Struktur erreicht werden kann, selbst wenn die geometrischen Einschränkungen durch das Herstellungsverfahren berücksichtigt werden. Diese Erhöhung ist sowohl in den Ergebnissen der thermischen Simulationen als auch in den durchgeführten Messungen der thermischen Transienten ersichtlich. Die Simulationen zeigen dabei einen geringfügig größeren Unterschied zwischen verzweigter und nicht verzweigter Geometrie als durch die Messungen an den geometrisch nicht einwandfrei aufgebauten zylinderförmigen Kühlkörpern festgestellt werden konnte. Mit Faktor 1,055 kann dieser Unterschied dennoch zu einer spürbaren Verlängerung der Lebensdauer und gleichzeitig zu einer, wenn auch geringen, Steigerung von Lichtstrom und Effizienz der LED beitragen.

Der simulative Vergleich des kugelförmigen, verzweigten Leuchten-Kühlkörpers mit einer geschlossenen Kugel, die als Referenz für ein herkömmliches Leuchten-Gehäuse betrachtet werden kann, zeigt den

technischen Vorteil der Verzweigung mit einem um Faktor 0,426 geringeren thermischen Widerstand. Die Auswirkungen auf Lichtstrom, Effizienz und Lebensdauer sind dementsprechend groß. Der ästhetische Unterschied beider Geometrien muss je nach Anwendungszweck bewertet werden, lässt aber keinen offensichtlichen Nachteil für die natürlichen Formen der verzweigten Geometrie erwarten.

Der prinzipielle Aufbau der Geometrie aus vertikalen Rippen bedingt eine hohe Wärmeabfuhr durch den Kühlkörper bei dessen senkrechter Ausrichtung. Damit geht jedoch eine starke Abhängigkeit von der Anbaulage einher, die den thermischen Widerstand bei horizontaler Ausrichtung um mehr als 50 % erhöht. Die Geometrie ist deshalb in erster Linie für Anwendungen geeignet, in denen die Anbaulage fest definiert und nicht veränderbar ist.

Die Herstellung im Pulverspritzguss macht deutlich, dass dieses Fertigungsverfahren den gegebenen Anforderungen für die entwickelten LED-Kühlkörper genügt. Die zylinderförmigen Kühlkörper lassen sich aufgrund ihrer großen Oberfläche und dem Verzicht auf Formschrägen zwar nur schwierig herstellen, zeigen jedoch die prinzipielle Machbarkeit. Die hergestellten Leuchten-Kühlkörper demonstrieren dagegen sowohl eine hohe Maßhaltigkeit als auch eine hohe Oberflächengüte, die die Kühlkörper als Sichtteile auszeichnen und nur wenig Nacharbeit erfordern, um das ästhetische Erscheinungsbild zu vervollständigen. Die große Materialvielfalt ist eine Besonderheit im Pulverspritzguss und erlaubt neben der Herstellung von metallischen Bauteilen beispielsweise auch die Verarbeitung von



Abbildung 6.11: LED-Leuchte aus Edelstahl neben Ausführungen aus Kupfer im Hintergrund und weißem Kunststoff im Vordergrund (Foto: Tanja Meißner, KIT)

Keramiken. Abhängig von der für die Anwendung benötigten Leistung und dem erwünschten Erscheinungsbild, können die Materialien variiert werden. Die aufgebauten Musterteile zeigen dies beispielhaft für Kupfer und Edelstahl. Abbildung 6.11 stellt diese Musterteile ohne weitere Nachbearbeitung in der Anwendung als Leuchten dar.

Auch bei hohen Stückzahlen sind die Kosten der Herstellung mittels Pulverspritzguss durch Material und die zusätzlichen Prozessschritte im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsverfahren höher. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Herstellbarkeit der entwickelten Bauteile in anderen Verfahren auch mit Geometrieänderungen

nicht gewährleistet ist. Zudem ist eine geringe Oberflächenqualität zu erwarten, die gegebenenfalls selbst durch aufwändige Nacharbeit nicht ausreichend gesteigert werden kann. Deshalb kann die Herstellung der Leuchten-Kühlkörper im Pulverspritzguss dennoch eine wirtschaftliche Lösung sein.

Das aufgebaute LED-System demonstriert die Anwendung des Kühlkörpers in einer vollständigen Leuchte. Der thermische Gesamtwiderstand des Systems erfüllt mit $13,51 \pm 0,03 \text{ KW}^{-1}$ die Vorgabe eines maximalen thermischen Widerstands von $16,90 \text{ KW}^{-1}$. Auch die neben der Wärmeabfuhr integrierten Funktionen können erfolgreich im Fertigteil umgesetzt werden. Die Reflektorflächen erzeugen die erwartete Lichtverteilung in guter Näherung und übertreffen die Zielvorgaben für den Lichtstrom und die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke. Der Leuchten-Kühlkörper kann so mit nur wenigen weiteren Bauteilen wie LED, Schaltungsträger und Aufhängung zu einer vollständigen Leuchte komplettiert werden. Mit der verbauten LED erreicht das System mit Kupfer-Kühlkörper einen Lichtstrom von maximal 614 lm, wobei die Reflektoroptik mit einer Effizienz von 0,72 eingeht. Die vorgegebene Beleuchtungsstärke und Gleichmäßigkeit auf der Bewertungsfläche werden dabei übertroffen. Unter Berücksichtigung der Baugröße und des äußeren Erscheinungsbilds zeigt das System damit die gewünschte Verbindung von hoher Leistungsfähigkeit und hohem ästhetischem Wert.

Kapitel 7

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die effiziente Verbindung von technischer Leistungsfähigkeit und ästhetischer Erscheinung birgt das Potenzial für die Entwicklung hochwertiger Leuchten zur Anwendung in der Allgemeinbeleuchtung. Der Blick in die Natur bietet inspirierende Formen, die einerseits einen hohen ästhetischen Wert aufweisen, durch ihre evolutionäre Anpassung andererseits auch technische Vorteile mit sich bringen können. Im Rahmen dieser Arbeit gelang es verzweigte Architekturen nach dem Vorbild der Natur erfolgreich für die Wärmeabfuhr in LED-Systemen einzusetzen. Dabei wurden, ausgehend von der allgemeinen Beschreibung der Wärmeabfuhr durch ein Näherungsmodell, beispielhafte Kühlkörper entwickelt, hergestellt und messtechnisch charakterisiert. Die Bewertung ihrer Eigenschaften erlaubte letztendlich die Beurteilung der Leistungsfähigkeit zur Wärmeabfuhr, der Ästhetik des Erscheinungsbildes sowie der Möglichkeiten des Herstellungsverfahrens.

Durch die mathematische Beschreibung der Wärmetransportmechanismen wurde, basierend auf bekannten Verhältnissen in Strömungskanälen, das Näherungsmodell für die Wärmeabfuhr durch einen verzweigten Kühlkörper aufgestellt. Das Modell lässt Aussagen zur Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Konfigurationen von Kühlkörpern zu und zeigt das prinzipielle Verhalten verzweigter Geometrien

zur Wärmeabfuhr. Mit der Erhöhung der Anzahl an Ästen nimmt sowohl die Oberfläche als auch das Materialvolumen der Geometrie zu. Ein größeres Materialvolumen begünstigt die Wärmeleitung, während gleichzeitig größere Flächen zum Wärmeaustausch mit der Umgebung zur Verfügung stehen, weshalb sich der thermische Widerstand der Geometrie zunächst verringert. Mit jeder Erhöhung der Anzahl an Ästen verringert sich jedoch auch die Breite der Strömungskanäle zwischen den Oberflächen, was die Konvektion einschränkt. Deshalb besteht für jede Konfiguration eine optimale Anzahl an Ästen, die den geringsten thermischen Widerstand erzeugt. Das mathematische Modell gibt diese Anzahl in guter Näherung an, was durch den Vergleich mit thermischen Simulationen bestätigt wurde.

Mit der Auslegung eines LED-Systems für die Wohnraumbeleuchtung wurden die gewonnenen Erkenntnisse für eine konkrete Anwendung umgesetzt und alle weiteren relevanten Parameter einer verzweigten Kühlkörper-Geometrie untersucht. Hierbei fanden bereits Vorgaben aus dem Fertigungsverfahren Berücksichtigung, um die anschließende Herstellung der entworfenen Bauteile sicherzustellen. Die Entwicklung erfolgte in zwei Stufen, wobei zunächst ein zylinderförmiger, verzweigter Kühlkörper ausgelegt wurde, der sowohl dem Vergleich mit einem nicht verzweigten Kühlkörper als auch der Beurteilung des Fertigungsverfahrens für diese Anwendung dient. In der zweiten Stufe wurde auf die dabei gesammelten Erfahrungen zurückgegriffen und ein Kühlkörper mit integrierten Funktionen als LED-Leuchte entwickelt.

Die Herstellung der Kühlkörper erfolgte im Metallpulverspritzguss, der die technischen und ästhetischen Anforderungen der gegebenen Anwendung erfüllt. Neben einer großen Designfreiheit ermöglicht er die Herstellung von Bauteilen mit hoher Oberflächenqualität in großen Stückzahlen aus Werkstoffen, die sich gut für die Wärmeabfuhr eignen. Der Metallpulverspritzguss ist für die notwendige Bauteilgröße jedoch schwierig einzusetzen. Es wurde gezeigt, dass sich dennoch erfolgreich Kühlkörper aus Kupfer und Edelstahl fertigen lassen, die sowohl technisch leistungsfähig sind als auch ein hochwertiges Erscheinungsbild aufweisen. Durch die Integration von zusätzlichen Komponenten wie Optik, LED-Aufnahme und Kabeldurchführung konnte eine fast vollständige Leuchte aus einem Spritzgusswerkzeug gefertigt werden.

Die messtechnische Charakterisierung gab Aufschluss über die Leistungsfähigkeit der hergestellten Bauteile. Der thermische Widerstand des nicht verzweigten, zylinderförmigen Kühlkörpers ist gegenüber dem verzweigten Kühlkörper, der herstellungsbedingt etwas kleiner ausfällt, um Faktor 1,055 größer. Dies führt hauptsächlich zu einem Vorteil in der Lebensdauer des LED-Systems mit verzweigtem Kühlkörper. Der hergestellte Leuchten-Kühlkörper bezieht die Möglichkeit der Funktionsintegration ein und demonstriert vor allem die erfolgreiche Umsetzung der Freiform-Reflektorflächen. Die Lichtstärkeverteilung entspricht den Erwartungen aus der optischen Simulation und das System übertrifft mit einem Lichtstrom von 614 lm die Zielvorgaben für die Anwendung.

Mit der Betrachtung der Kosten für die Herstellung der Bauteile im Metallpulverspritzguss verglichen mit herkömmlichen Fertigungsverfahren wurde abschließend Bezug genommen auf eine mögliche Serienfertigung der entworfenen Leuchten-Kühlkörper. Es zeigte sich, dass sich die Herstellung im Metallpulverspritzguss vergleichsweise kostenintensiv darstellt, jedoch aufgrund der hohen Oberflächenqualitäten und dadurch geringer Nacharbeit sowie der großen Vielfalt an Werkstoffen auch wirtschaftlich eine Alternative sein kann. Letztendlich werden die Wahl der Zielgruppe und die entsprechende Positionierung des Produkts am Markt darüber entscheiden wie die Herstellung erfolgen wird. Dass mit dem Metallpulverspritzguss eine hochwertige Ausführung des Bauteils erreicht werden kann, wurde gezeigt.

Die Herstellung von Kühlkörpern im Metallpulverspritzguss wird in Zukunft voraussichtlich durch weitere Werkstoffe auch für andere Anwendungen an Bedeutung gewinnen. Feedstock-Materialien auf Basis von Aluminiumlegierungen sind in der Entwicklung und könnten den Einsatzbereich dieses Fertigungsverfahrens noch erweitern. Mit neuen Materialien wird sich erneut die Frage nach der Qualität der gefertigten Bauteile sowie der damit verbundenen Kosten stellen, um die Anwendung für LED-Systeme zu bewerten.

Die Etablierung von additiven Verfahren zur Herstellung von metallischen Bauteilen in größeren Stückzahlen wird dazu beitragen, dass die Designfreiheit auch für Kühlkörperanwendungen annähernd unbeschränkt sein wird. Dies könnte einerseits die Integration funktio-

neller Komponenten in den Kühlkörper flexibler machen, so dass beispielsweise individuelle Lichtverteilungen durch angepasste Reflektorflächen ermöglicht werden können. Andererseits lassen sich natürliche Formen dadurch noch besser produktionstechnisch umsetzen. Während die betrachteten verzweigten Strukturen eine Alternative zu herkömmlichen Rippen-Kühlkörpern darstellen, könnten beispielsweise korallen- und schwammähnliche Geometrien Pin-Fin-Kühlkörper ersetzen. Potenziell würde sich dabei auch die Abhängigkeit des thermischen Widerstands von der Ausrichtung des Kühlkörpers verringern, was in erster Linie für Anwendungen mit variabler Leuchtausrichtung vorteilhaft erscheint.

Besonders die Weiterentwicklung der LED-Lichtquellen wird neue Herausforderungen an die Leistungsfähigkeit der Kühlkörper stellen. Trends hin zu einfacheren Kühlsystemen durch großflächige Lichtquellen werden durch kleine Lichtquellen mit sehr hoher Leistung ergänzt werden. Bereits angekündigt sind beispielsweise eine 7 mm x 7 mm große LED¹² mit einer Eingangsleistung von 32 W sowie eine LED¹³ mit zwei Chips auf 1,5 mm x 2,6 mm und einer Eingangsleistung von 35 W. Die darin umgesetzten Flächenleistungsdichten erfordern große Kühlkörper aus thermisch gut leitenden Materialien mit einer angepassten thermischen Anbindung an die Lichtquelle. Verzweigte Geometrien stellen eine leistungsfähige Basis

¹² Cree XLamp XHP70

¹³ Osram Ostar Projection Power LE CG P1A

für diese Entwicklungen dar und könnten dazu beitragen, dass diese LEDs zuverlässig eingesetzt werden können.

Als Henry J. Round die Elektrolumineszenz zum ersten Mal beobachtete, ahnte er nicht, welche vielfältigen Möglichkeiten sie zukünftig bieten würde. Eine davon wurde in dieser Arbeit untersucht - von der Inspiration aus der Natur bis zum vollständigen, seriennahen Produkt. Die Zukunft wird zeigen, welche Möglichkeiten daraus wiederum entstehen.

I ANHANG

Anhang A: ZEICHNUNGEN

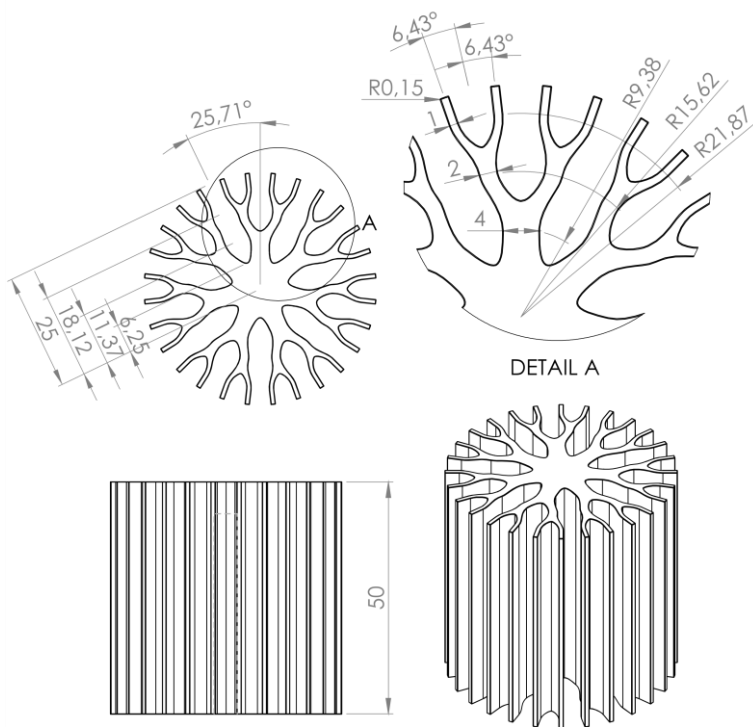


Abbildung A.1: Bemaßte Zeichnung verzweigter, zylinderförmiger Kühlkörper

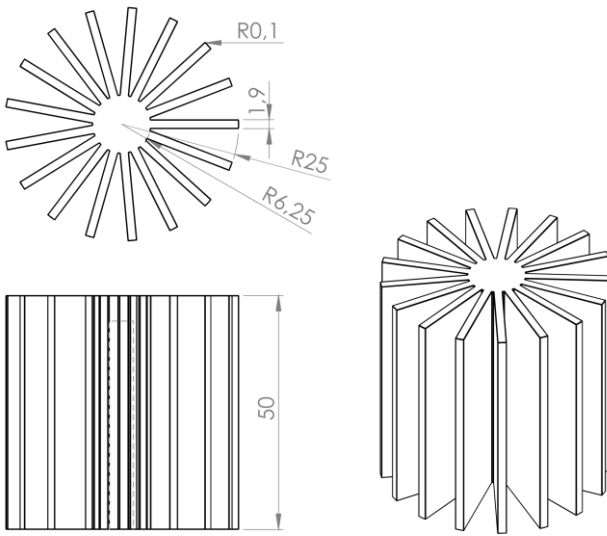


Abbildung A.2: Bemaßte Zeichnung nicht verzweigter zylinderförmiger Kühlkörper

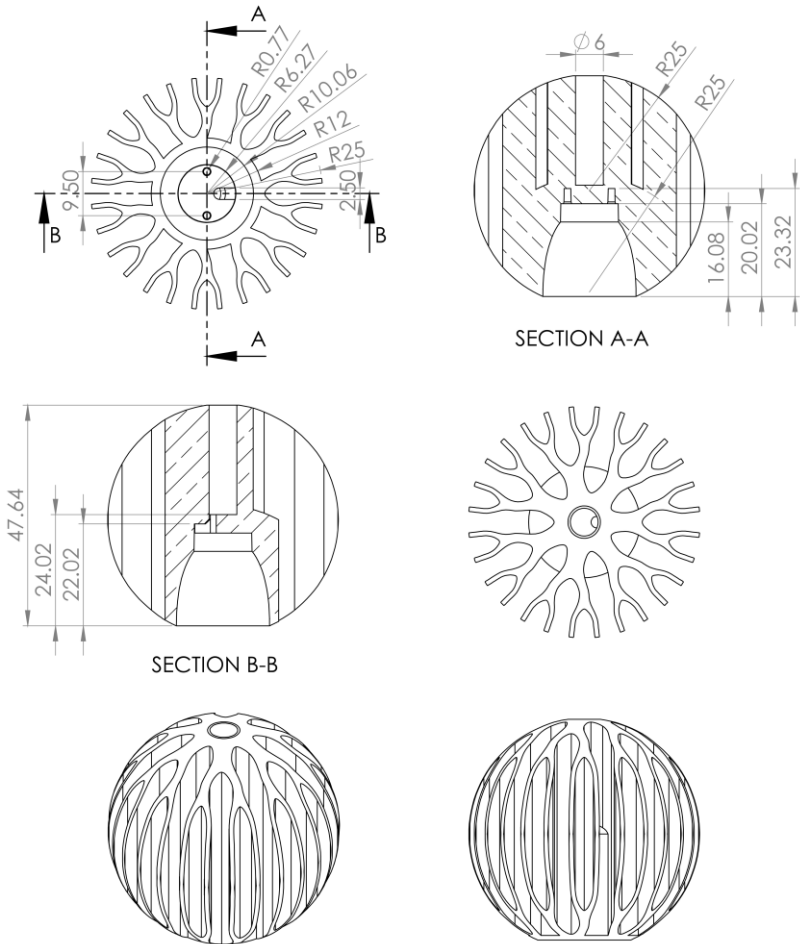


Abbildung A.3: Bemaßte Zeichnung verzweigter Leuchten-Kühlkörper

Anhang B: STRUKTURFUNKTIONEN

Ergänzend zu den in den betreffenden Kapiteln dargestellten Strukturfunktionen der vermessenen Systeme werden nachfolgend weitere Strukturfunktionen aus den Messungen der thermischen Transienten aufgeführt.

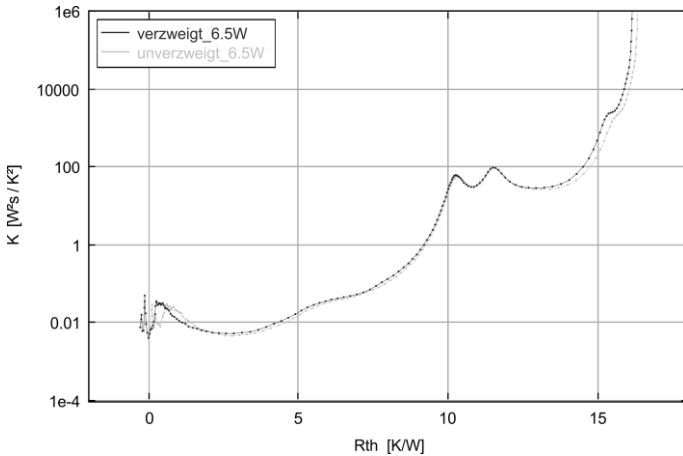


Abbildung B.1: Differenzielle Strukturfunktionen von verzweigtem und nicht verzweigtem zylinderförmigen Kühlkörper bei einem Leistungseintrag von 6,5 W

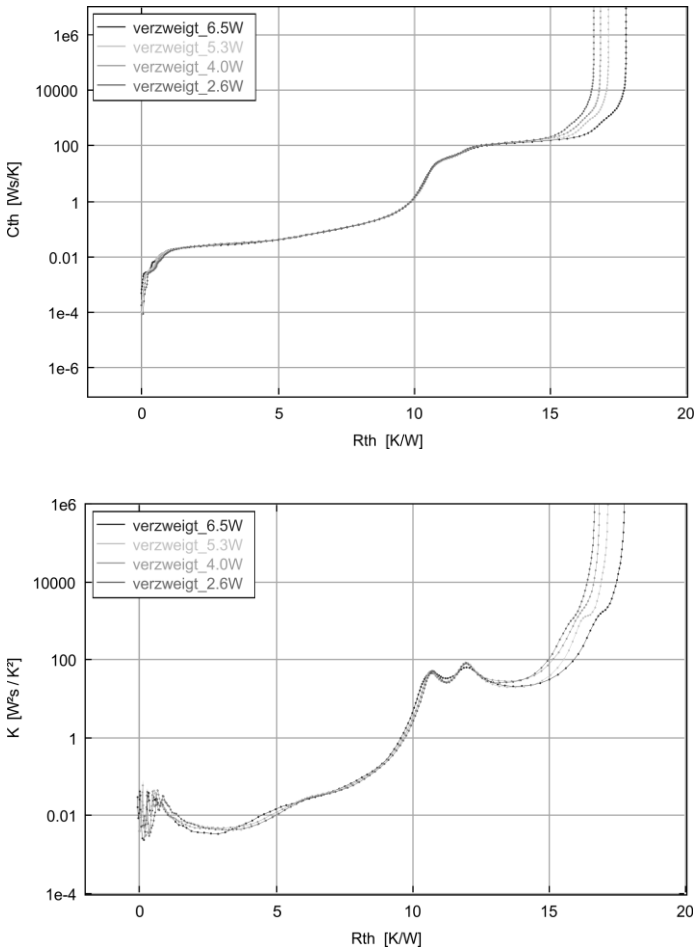


Abbildung B.2: Integrale und Differenzielle Strukturfunktionen des verzweigten zylinderförmigen Kühlkörpers bei Variation des Leistungseintrags

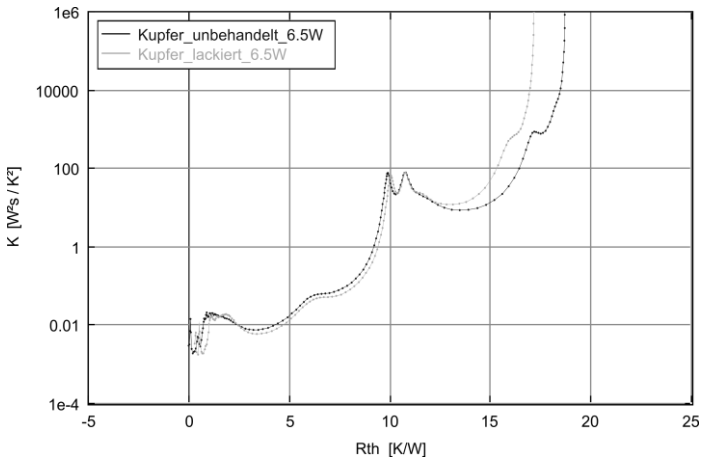


Abbildung B.3: Differenzielle Strukturfunktionen des Leuchten-Kühlkörpers aus Kupfer in unbehandelter und lackierter Ausführung bei einem Leistungseintrag von 6,5 W

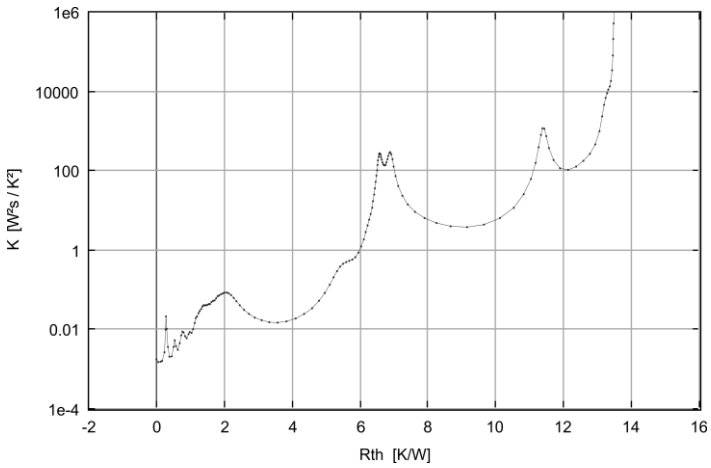
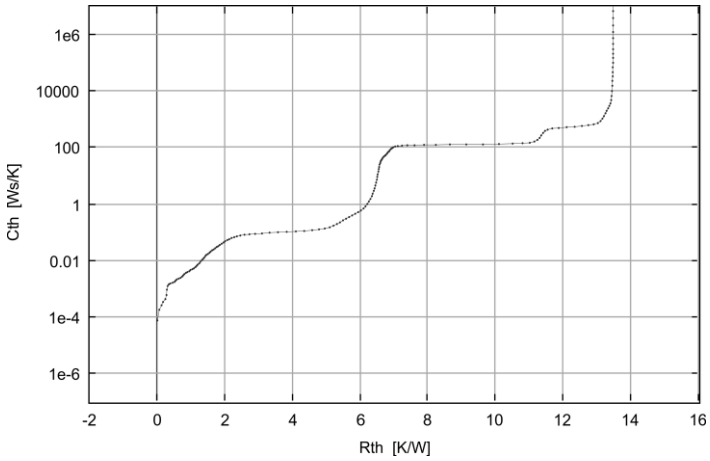


Abbildung B.4: Integrale und Differenzielle Strukturfunktionen des vollständigen LED-Systems

Anhang C: LICHTSTÄRKEVERTEILUNGSKURVEN

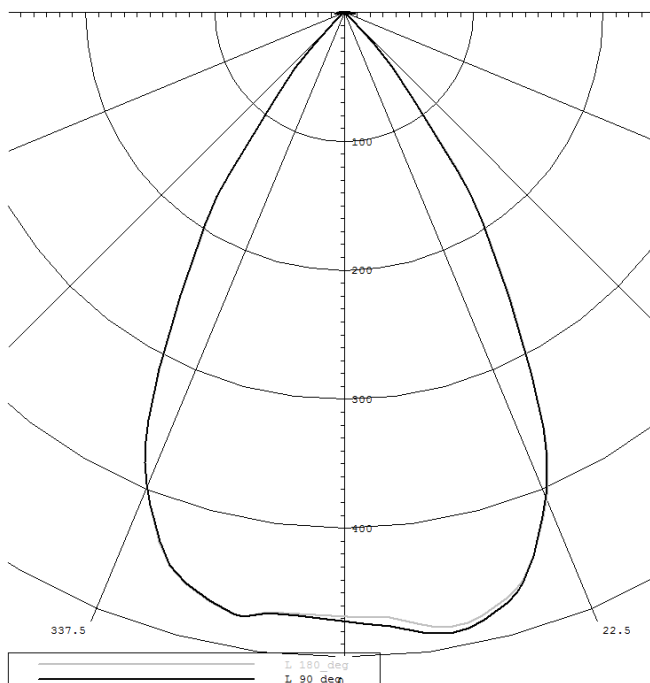


Abbildung C.5: Lichtstärkeverteilungskurve des Simulationsmodells mit Rayfile der LED und Reflektoroptik bei einem LED-Lichtstrom von 573 lm

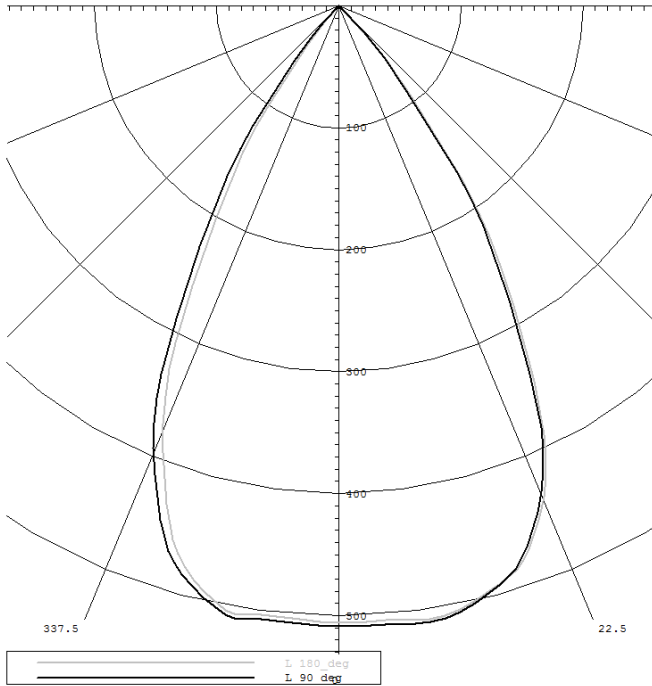


Abbildung C.6: Lichtstärkeverteilungskurve des gefertigten LED-Systems bei einem Leuchten-Lichtstrom von 428 lm

II VERÖFFENTLICHUNGEN

- C. Herbold, C. Neumann, „Bionic cooling systems for LEDs“, EST – International Conference & Exhibition on Energy, Science & Technology, Karlsruhe, 2015.
- M. Schneider, B. Leyrer, C. Herbold, F. Herrmann, „Blue and White Light Emitting High Power Density LED Modules“, 65th Electronic Components and Technology Conference 2015, San Diego, California, 2015.
- C. Herbold, F. Herrmann, C. Neumann, „Effiziente Innenleuchten: Von der Wissenschaft in die Produktion“, LICHT 2014, Tagungsband der 21. Gemeinschaftstagung, Den Haag, 2014.
- M. Schneider, B. Leyrer, C. Herbold, S. Maikowske, „High Power Density LED Modules with Silver Sintering Die Attach on Aluminum Nitride Substrates“, 64th Electronic Components and Technology Conference 2014, IEEE Catalog Number CFP14ECT-USB, Orlando, Florida, 2014.
- A. Tarbeyevsckaya, C. Herbold, A. Hornberg, C. Neumann, C. Schierz, „Optimal Thermal Management of LED Lighting Systems Regarding Efficiency and Costs“, Proceedings of the CIE Centenary Conference “Towards a New Century of Light“, CIE x038:2013, Paris, 2013.

- C. Herbold, C. Neumann, „Natural Design for Heat Sinks“, LED professional Review (LpR) 39, 2013.
- C. Herbold, F. Herrmann, C. Neumann, S. Wendel: eingetragene Designs DPMA Designnummer 402013002939-0001 bis -0023, Inhaber: Karlsruher Institut für Technologie, 2013.
- C. Herbold, C. Neumann, „Efficient LED Systems Inspired by Nature“, Proceedings of the Lux Europa, 12th European Lighting Conference, Krakau, 2013.
- A. Tarbeyevskaia, C. Herbold, M. Scholdt, A. Hornberg, C. Neumann, „Estimation of thermal contact conductance in metal-plastic interface of LED lighting systems“, Proceedings of the Lux Europa, 12th European Lighting Conference, Krakau, 2013.
- A. Tarbeyevskaia, C. Herbold, A. Hornberg, C. Neumann, C. Schierz, „Systematischer Ansatz für effizientes Thermomanagement in LED-Beleuchtungssystemen“, Lux junior 2013, Tagungsband, Dörfel/Ilm, 2013.
- C. Herbold, S. Heiden, „Intuitiv und Intelligent - Ein 'Lichtschalter' mit vielen Möglichkeiten“, LICHT 7-8, 2013.
- M. Schneider, B. Leyrer, C. Herbold, S. Maikowska, „Very High Power Density LED Modules on Aluminum Substrates with Embedded Water Cooling“, 63rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Proceedings, Las Vegas, 2013.

- M. Schneider, B. Leyrer, C. Herbold, S. Maikowske, „Packaging of High Power UV LED Modules on Ceramic and Aluminum Substrates“, 45th International Symposium on Microelectronics (IMAPS), San Diego, 2012.
- C. Herbold, C. Neumann, „Vorbild Natur: Bionische Strukturen zur Entwärmung von LEDs“, LICHT 2012, Tagungsband der 20. Gemeinschaftstagung, Berlin, 2012.
- M. Schneider, B. Leyrer, C. Herbold, S. Maikowske, J. J. Brandner, „Index Matched Fluidic Packaging of High Power UV LED Clusters on Aluminum Substrates for Improved Optical Output Power“, IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Proceedings, San Diego, 2012.
- M. Schneider, B. Leyrer, C. Herbold, S. Maikowske, „Aufbau und Verbindungstechnik für Hochleistungs-UV-LED-Module“, PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen 4, 2012.
- C. Herbold, M. Schneider, M. Scholdt, C. Neumann, „Entwurf und Aufbau eines UV-LED Moduls mit hoher Leistungsdichte“, Lux junior 2011, Tagungsband, Dörnfeld/Ilm, 2011.
- M. Schneider, B. Leyrer, C. Herbold, K. Trampert, J. J. Brandner, „Thermal improvements for high power UV LED clusters“, IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Proceedings, Lake Buena Vista, 2011.

- R. Bertram, T. Frost, C. Herbold, S. Strauss, „Illumination module and illumination device“, Patentanmeldung, Internationale Veröffentlichungsnummer WO2010/136333A1, 2010.
- M. Schneider, C. Herbold, K. Messerschmidt, K. Trampert, J. J. Brandner, „High power UV-LED-clusters on ceramic substrates“, IEEE 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC) Proceedings, Las Vegas, 2010.
- M. Scholdt, C. Herbold, M. Schneider, C. Neumann, „UV-LED Module Design with Maximum Power Density“, Solid-State and Organic Lighting, OSA Technical Digest (CD), paper SOWC4, Optical Society of America, 2010.

III BETREUTE ARBEITEN

- M. Hetzel, „Applikationsspezifische Funktionen in standardisierten Lichtsteuerungen“, Bachelorarbeit, 2015.
- D. Theobald, „Thermische Charakterisierung von Kühlkörpern für LED-Systeme“, Bachelorarbeit, 2013.
- D. große Austing, „Entwicklung eines multifunktionalen Fahrradscheinwerfers“, Diplomarbeit, 2012.

IV DANKSAGUNG

Mein Dank geht an alle, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ganz besonders möchte ich Herrn Professor Cornelius Neumann danken, der diese Arbeit am Lichttechnischen Institut ermöglichte und mit seinem Wissen und seinen Ideen immer hilfreich unterstützte. Ein besonderer Dank geht auch an Frau Professor Ena Voûte für ihr Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Danken möchte ich außerdem allen beteiligten Kollegen innerhalb des KIT und den externen Partnern für die angenehme Zusammenarbeit während des Projekts. In besonderem Maß geht der Dank an die Arburg GmbH + Co. KG, speziell an Hartmut Walcher, an die Wieland-Werke AG mit Michael Keppeler sowie an Arnold Singer. Auch die Mitarbeiter der Nyta UG haben mit ihren Kenntnissen des Leuchtenmarkts zu wertvollen Diskussionen angeregt. Vielen Dank dafür. Dr. Klaus Trampert, Tino Weiß und Leo Sayanca sei gedankt für ihre Unterstützung bei der Charakterisierung der Systeme im Messlabor des Lichttechnischen Instituts. Für ihre fleißige Arbeit beim Korrigieren und die konstruktiven Anregungen möchte ich Angewieser Rieger, Johannes Marmon und Johannes Müller danken. Ein herzliches Dankeschön auch an alle Kolleginnen und Kollegen am Lichttechnischen Institut, darunter Dr. Franziska Herrmann und Dr. Simon Wendel für die vielen Diskussionen am Lichttechnischen Institut rund um dieses und andere Projekte. Mein Dank gilt auch der

DANKSAGUNG

Hochschulgemeinschaft für Lichttechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) e.V. für die Unterstützung beim Druck dieser Arbeit. Abschließend möchte ich einen großen Dank an meine Familie aussprechen, die mir jederzeit Rückhalt bietet und immer aufmerksam Interesse an meiner Arbeit zeigt.

V LITERATURVERZEICHNIS

- [1] N. Zheludev, „The life and times of the LED - a 100-year history,“ *Nature Photonics Vol. 1, Issue 4*, 2007.
- [2] H. J. Round, „A note on carborundum,“ *Electrical World, Vol. 49*, 1907.
- [3] US National Inventors Hall of Fame, „Nick Holonyak, Jr.,“ 2008.
- [4] T. Baumgartner, F. Wunderlich, A. Jaunich, T. Sato, G. Bundy, N. Gießmann, J. Kowalski, S. Burghardt und J. Hanebrink, „Lighting the way: Perspectives on the global lighting market,“ McKinsey & Company Inc., 2012.
- [5] K. Evstratyeva, „Designer enlightens on collaboration between manufacturers and lighting design community,“ *Strategies in Light Europe*, 2013.
- [6] Arburg GmbH + Co KG, „Pulver-Spritzgießen: Wirtschaftliche Lösungen für Metall- oder Keramikteile,“ Lossburg, 2013.
- [7] E. F. Schubert, *Light -Emitting Diodes*, Cambridge University Press, 2006.

- [8] M. Scholdt, Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2013.
- [9] G. Kräuter, „Zuverlässigkeit in der LED-Technologie: Alterungsphänomene bei LEDs und LED-Produkten,“ *Osram GmbH*, 2012.
- [10] M. Meneghini, L.-R. Trevisanello, F. Zuania, N. Trivellina, G. Meneghesso und E. Zanoni, „Extensive Analysis of the Degradation of Phosphor-Converted LEDs,“ *Proceedings SPIE 7422*, 2009.
- [11] C. Kittel, Einführung in die Festkörperphysik, Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2006.
- [12] Y. Xi und E. F. Schubert, „Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward volatage method,“ *Applied Physics Letters*, Nr. Vol. 85, 2004.
- [13] C. J. M. Lasance und A. Poppe, Thermal Management for LED Applications, Solid State Lighting Technology and Applications Series 2, New York: Springer Sciences+Business Media, 2014.
- [14] G. Fakras, S. Haque, F. Wall, P. Martin, A. Poppe, Q. van Voorst Vader und G. Bognar, „Electric and thermal transient effects in high power optical devices,“ *Thermal Measurement and Management Symposium*, pp. 168-176, 2004.

- [15] Mentor Graphics Corporation Mechanical Analysis, „Theoretical background of the T3Ster measurements,“ Wilsonville, 2012.
- [16] Mentor Graphics Corporation Mechanical Analysis , „T3Ster Thermal Transient Tester Technical Information 1029020-w,“ Wilsonville, 2011.
- [17] H.-J. Hentschel, Licht und Beleuchtung, Bd. 4. Auflage, 1994.
- [18] TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, „Nahfeld Goniophotometer RIGO801“.
- [19] S. M. Elkuri, Thermische Untersuchungen an leistungselektronischen Systemen, Ilmenau, 2005.
- [20] M. Wutz, Wärmeabfuhr in der Elektronik, Braunschweig: Vieweg, 1991.
- [21] A. Tarbeyevsckaya, C. Herbold, M. Scholdt, A. Hornberg und C. Neumann, „Estimation of thermal contact conductance in metal-plastic interface of LED lighting systems,“ in *Proceedings of the Lux Europa, 12th European Lighting Conference, Kraków, Poland*, 2013.
- [22] H. Gröber, S. Erk und U. Grigull, Die Grundgesetze der Wärmeübertragung, Berlin: Springer, 1988.

- [23] Philips GmbH, Unternehmensbereich Lighting, LED-Lampenportfolio - Der optimale Glühlampen-, Halogen- und Leuchtstofflampenersatz, 4. Quartal 2013, Stand Dezember 2013, Hamburg, 2013.
- [24] W. Wagner, Wärmeübertragung, Würzburg: Vogel, 1998.
- [25] R. Morris, Produktdesign: das Wichtigste in Kürze, München: Dt. Verl.-Anst., 2010.
- [26] A. v. Gleich, Bionik : ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur?, Stuttgart: Teubner, 2001.
- [27] C. Mattheck, Design in der Natur: der Baum als Lehrmeister, Freiburg i. Br.: Rombach, 2006.
- [28] F. Barth, Frontiers in sensing : from biology to engineering, Wien: Springer, 2012.
- [29] S. Gosztony, P. Gruber, F. Judex, M. Bychta und S. Richter, BioSkin – Forschungspotenziale für bionisch inspirierte energieeffiziente Fassadentechnologien, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2013.
- [30] W. Nachtigall, Bionik als Wissenschaft : Erkennen - Abstrahieren - Umsetzen, Berlin: Springer, 2010.

- [31] A. Sachs, B. Bergdoll, D. Gamboni und P. Ursprung, *Nature Design*, Zürich: Museum für Gestaltung Zürich, Lars Müller Publishers, 2007.
- [32] A. von Gleich, C. Pade, U. Petschow und E. Pissarskoi, *Bionik - Aktuelle Trends und zukünftige Potenziale*, Berlin/Bremen, 2007.
- [33] L. Gosselin, „Optimization of tree-shaped fluid networks with size limitations,“ *International Journal of Thermal Sciences*, 2006.
- [34] S. Lorente, W. Wechsatoł und A. Bejan, „Tree-shaped flow structures designed by minimizing path lengths,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002.
- [35] S. L. Adrian Bejan, *Design with Constructal Theory*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [36] H. Ghaedamini, M. Salimpour und M. A.S., „The effect of svelteness on the bifurcation angles role in pressure drop and flow uniformity of tree-shaped microchannels,“ *Applied Thermal Engineering*, 2010.
- [37] E. Dede, „Design Optimization of a Mult-Device Single-Phase Branching Microchannel Cold Plate,“ *Electronics Cooling*, 2015.

- [38] T. v. Oevelen, Optimal Heat Sink Design for Liquid Cooling of Electronics, Arenberg Doctoral School, Faculty of Engineering Science, 2014.
- [39] T. Brunswiler, H. Rothuizen, M. Fabbri, U. Kloter, B. Michael, R. Bezama und G. Natarajan, „Direct Liquid Jet-Impingement Cooling With Micron-Sized Nozzle Array and Distributed Return Architecture,“ *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems*, 2006.
- [40] Spire Corporation, „Spire CPU Coolers Engineer no SC559S7-095-9L3W2 A/0,“ Maarheeze, 2014.
- [41] Evercool Thermal Co., Ltd., „NI01L-9525EP technical specification,“ Taipei, 2015.
- [42] S.-H. Yu, K.-S. Lee und S.-J. Yook, „Optimum design of a radial heat sink under natural convection,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011.
- [43] Design Research Limited, „Tom Dixon Fin Table Light Copper - Dimensions & Specification,“ London, 2013.
- [44] Artemide S.p.A., „Product Data Sheet Florensis Floor grey 1942010A,“ Milano, 2013.
- [45] Tobias Grau GmbH, „Falling Up alu pol/pol DC02-0 Technische Daten,“ Rellingen, 2015.

- [46] OSRAM Opto Semiconductors GmbH, „OSLON Square Datasheet Version 1.2 GW CSSRM1.PC,“ Regensburg, 2015.
- [47] B. R. Baliga und R. R. Azrak, „Laminar Fully Developed Flow and Heat Transfer in Triangular Plate-Fin Ducts,“ *Journal of Heat Transfer* 108, 1986.
- [48] L.-Z. Zhang, „Laminar flow and heat transfer in plate-fin triangular ducts in thermally developing entry region,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, 2007.
- [49] L. C. Burmeister, Convective Heat Transfer - Second Edition, New York: Wiley, 1993.
- [50] VDI e.V., VDI-Wärmeatlas, Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [51] Radium Lampenwerk GmbH, „Produktdatenblatt Standardlampe, stoßfest/ T-Zeichen A 60W/230/S-T/F/E27,“ Wipperfürth, 2015.
- [52] H.-J. Bargel, Werkstoffkunde, Berlin: Springer, 2008.
- [53] Karlsruher Institut für Technologie (KIT), „Eingetragenes Design Nummer 402013002939-0001 bis 402013002939-0023,“ DPMA, 2013.

- [54] C. Herbold und C. Neumann, „Vorbild Natur: Bionische Strukturen zur Entwärmung von LEDs, Vortrag zur 20. Gemeinschaftstagung LICHT2012,“ Berlin, 2012.
- [55] Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG), Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG), VBG-Fachinformation BGI 856, Version 2.0/2008-10: Beleuchtung im Büro, Hamburg: VBG, 2008.
- [56] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung EN 12464-1:2011,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.
- [57] Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Jahresbericht 2007 - Tailored Light - Licht nach Maß, Jena, 2007.
- [58] CREE, Inc., Cree XLamp XM-L2 LEDs Product Family Data Sheet CLD-DS61 Rev 2C, Durham, NC, 2014.
- [59] A. Domhardt, Analytisches Design von Freiformoptiken, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2013.
- [60] F. Fournier, Freeform Reflector Design with Extended Sources, Orlando, USA: University of Central Florida, 2010.

- [61] EJOT GmbH & Co. KG, Industrial Fasteners Division, „EJOT ALtracs Plus - The Selftapping Fastener fo Light Alloys 364-E/2/01.10/PDF01.13,“ 2014.
- [62] L. Noelle, „Kühlkonzepte für die Industrieelektronik,“ Fischer Elektronik GmbH & Co. KG, Lüdenscheid, 2014.
- [63] Fraunhofer - IFAM, MIM-Expertenkreis, „Metal Injection Moulding (MIM) - Pulverspritzguss,“ Bremen, 2013.
- [64] Verband Deutscher Druckgießereien (VDD), Druckguss aus NE-Metallen - Technische Richtlinien, Düsseldorf, 2008.
- [65] E. Brunhuber, Guss aus Kupferlegierungen (Casting copper base alloys), Berlin: Schiele & Schön, 1986.
- [66] Ensinger Compounds HP Polymer GmbH, „Compounds - TECACOMP TC Wärmeleitfähige Kunststoffe,“ Lenzing, 2014.
- [67] T. Hartwig, G. Veltl, F. Petzoldt, H. Kunze, R. Scholl und B. Kieback, „Powders for Metal Injection Molding,“ *Journal of the European Ceramic Society* 18, 1998.
- [68] C. Ji, N. Loh, K. Khor und S. Tor, „Sintering study of 316L stainless steel metal injection molding parts using Taguchi method: final density,“ *Materials Science and Engineering: A, Volume 311, Issues 1-2*, 2001.

- [69] C. Burkhardt, Metallpulverspritzguss - Fertigung komplexer Bauteile in höchster Präzision, München: Süddeutscher Verlag onpact GmbH, 2013.
- [70] C. Heinle, Simulationsgestützte Entwicklung von Bauteilen aus wärmeleitenden Kunststoffen, Erlangen, 2012.
- [71] GmbH, PolyMIM, „polyMIM(R) Cu999, Datenblatt Version 08/09.2011,“ Bad Sobernheim, 2012.
- [72] BASF SE, „Catamold 316L K, Processing Instructions VH/CA 051 e,“ Ludwigshafen, 2013.
- [73] Wieland Thermal Solutions, Wieland-Werke AG, „WICOATEC,“ Ulm, 2012.
- [74] JEDEC Solid State Technology Association, „JESD51-2 Integrated Circuits Thermal Test Method Environmental Conditions - Natural Convection (Still Air),“ Arlington, 2008.
- [75] Diodes Incorporated, „SBR10U200P 10A SBR Datasheet DS31234 Rev. 8-2,“ Plano, 2012.
- [76] DKD-Fachausschuss Messunsicherheit, „Praxisgerechte Ermittlung der Messunsicherheit - Grundlagen und Vorgehensweisen für einfache Modelle ohne Korrelation,“ 2012.
- [77] D. Theobald, „Thermische Charakterisierung von Kühlkörpern für LED-Systeme,“ Karlsruhe, 2013.

- [78] Sinkpad LLC., „Thermally Efficient PCB Technology for the LED Application,“ Placentia, 2012.