

**METHODENENTWICKLUNG  
ZUR LEBENSDAUERPROGNOSE VON  
LED-BETRIEBSGERÄTEN ANHAND VON  
KURZZEITMESSUNGEN**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS**

an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

des Karlsruher Instituts für Technologie

genehmigte

**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Martin Albert Perner

geb. in Schwetzingen

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Juli 2016

Hauptreferent: Prof. Dr. Cornelius Neumann

Korreferent: Prof. Dr. Wilhelm Stork



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -  
Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz (CC BY-ND 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.de>

---

## I DANKSAGUNG

Mein Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, welches durch die Förderung im Rahmen des Verbundprojektes „UNILED - Erfassung und Beseitigung von Innovationshemmnissen beim Solid State Lighting“ FKZ 13N10753 diese Arbeit ermöglichte.

Mein Dank gilt darüber hinaus Herrn Prof. Dr. Cornelius Neumann, der mir die Möglichkeit gegeben hat diese Arbeit am Lichttechnischen Institut (LTI) des Karlsruher Institut für Technologie durchzuführen. Die großen Freiheiten, verbunden mit der stetigen Unterstützungsbereitschaft haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Meinem Zweitgutachter Herrn Prof. Dr. Wilhelm Stork danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Ebenso möchte ich der gesamten Arbeitsgruppe der allgemeinen Lichttechnik für die angenehme Arbeitsatmosphäre und das freundschaftliche Miteinander herzlich danken. Manfred Scholdt und Franziska Herrmann danke ich für die gute Zusammenarbeit im UNILED-Projekt und meinen Kollegen Ingo Rotscholl, Melanie Helmer, Patric Jahn, Tino Fettke und Christian Herbold für alles, was gemeinsam bewältigt wurde.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich herzlich bei meinen Mithelfern Bao Ngoc An, Gernot Perner, Giullian Franke sowie Christoph Bühler, welche durch ihre tatkräftige Unterstützung entscheidende Beiträge

---

## DANKSAGUNG

---

zum Gelingen der umfangreichen Aufbauten, Programme und Elektronikprojekte geleistet haben.

Dem Institutsleiter des Lichttechnischen Instituts Prof. Uli Lemmer danke ich für die Übertragung des Amtes des Baubeauftragten. Das entgegengebrachte Vertrauen sowie der stetige Rückhalt haben diese Aufgabe außerordentlich interessant und lehrreich gestaltet und viele gute Kontakte entstehen lassen.

Auch meinen unmittelbaren Bürokollegen Katja Dopf und Patric Schwab sei herzlich gedankt für die vielen fachlichen aber auch witzigen und humorvollen Konversationen zwischendurch.

Meinem geschätzten Kollegen Dr. Klaus Trampert sei an dieser Stelle besonders gedankt, für die langjährige Begleitung am LTI, die stetige gewinnbringende Diskussionsfreude, die vielen Handreichungen sowie die teils richtungsweisenden Impulse.

Allen anderen Mitstreitern am LTI sei ebenfalls gedankt für die unvergessliche Zeit. Allen voran André Gall, Matthias Hecht, Fabian Denk, Mario Planeck, Felix Geislhöringer und allen anderen Kollegen, die an dieser Stelle nicht namentlich genannt sind.

Ein ganz besonderer Dank gilt auch meinen Eltern und meiner Familie für den Rückhalt und die ausgleichende Zeit neben meiner Arbeit.

---

## II INHALTSVERZEICHNIS

<b>I</b>	<b>Danksagung</b> .....	<b>I</b>
<b>II</b>	<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>1</b>	<b>Motivation</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1	Ansteuerung von LEDs.....	3
2.2	EVGs für LEDs an Netzspannung.....	6
2.3	Lebensdauer elektronischer Bauelemente.....	16
2.4	Einflüsse auf die Lebensdauer elektronischer Bauteile.....	23
2.5	Temperaturmessung .....	27
<b>3</b>	<b>Methoden</b> .....	<b>35</b>
3.1	Berücksichtigung der Leuchteneinflüsse auf die LED-Systemtemperatur.....	38
3.2	Temperaturmessung mittels Kontaktfühler.....	41
3.3	Thermografie .....	45
3.4	Elektrische Analyse von EVGs.....	47
3.5	Thermische Entkopplung von EVG und LED .....	51
3.6	Variation der thermischen Betriebsbedingungen des EVGs.....	55
<b>4</b>	<b>Durchführung</b> .....	<b>59</b>

4.1	Ermittlung des üblichen thermischen Leuchteneinflusses auf LED-Systeme.....	59
4.2	Marktstudie und Analyse handelsüblicher EVGs für LED-Systeme .....	62
4.3	Aufbau eines Langzeitmesstandes zur Generierung von Validierungsdaten.....	68
4.4	Ermittlung des EVG-Betriebspunktes im System.....	74
4.5	Nachbildung der thermischen Betriebsbedingungen .....	78
4.6	Charakterisierung der Übertragungsstrecke .....	85
4.7	Bewertung der Wärmeleitung, der Wärmestrahlung und der Konvektion.....	91
4.8	Statische Nachbildung der realen Betriebsbedingungen .....	95
4.9	Dynamische Nachbildung der Betriebsbedingungen .....	96
4.10	Einfluss der Temperatur auf den Betriebspunkt des EVGs.....	98
<b>5</b>	<b>Analyse.....</b>	<b>101</b>
5.1	Bestimmung der mittleren Lebensdauer anhand der Temperaturverteilung .....	101
5.2	Systemverhalten bei sich ändernder EVG- Temperatur.....	112
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>123</b>
<b>III</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>131</b>
<b>IV</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>135</b>

INHALT

---

**V   Betreute Arbeiten ..... 139**

**VI  Veröffentlichungen ..... 141**



---

## Kapitel 1

# MOTIVATION

Für die Akzeptanz von LED-Systemen gibt es vier entscheidende Faktoren: Die Lichtqualität, die Energieeffizienz, die Anschaffungskosten und die Lebensdauer. Die Lichtqualität hat sich in den vergangenen Jahren stark verbessert, indem beispielweise die verwendeten Phosphore weiterentwickelt wurden oder mittels zusätzlicher roter LEDs das als unangenehm empfundene kaltweiße Licht näher Richtung warmweiß geschoben wird. Die Argumente Anschaffungskosten und Lebensdauer sind jedoch eng miteinander verknüpft. Ist die Lebensdauer eines Systems hoch, so werden deutlich höhere Anschaffungskosten akzeptiert als bei Systemen, welche gegenüber einer herkömmlichen Lichtquelle keinen Vorteil bieten.

Die Lebensdauer von Produkten zu bestimmen, welche einem ständigen technologischen Weiterentwicklungsprozess unterworfen sind, ist jedoch eine besondere Herausforderung. So sind beispielsweise herkömmliche Langzeittests an dieser Stelle nicht einzusetzen, da die Produkte bis zum Vorliegen der Testergebnisse entweder nicht mehr zu erwerben sind oder durch ein Nachfolgeprodukt abgelöst wurden. Auch Lebensdauerangaben der Hersteller sind mit Vorsicht zu genießen, da beispielweise die Stiftung Warentest im Jahre 2009 bei einer Stichprobe herausgefunden hat, dass LED-Systeme, welche mit

einer Lebensdauer von über 50.000 h beworben wurden, bereits nach weniger als 1.000 h ausgefallen sind [1].

Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit, eine Messmethode zu entwickeln, welche es ermöglicht, innerhalb kurzer Zeit eine herstellerunabhängige, valide Lebensdauerprognose abzugeben, die der Nutzer eines LED-Systems nach dessen Erwerb in der Realität erwarten kann.

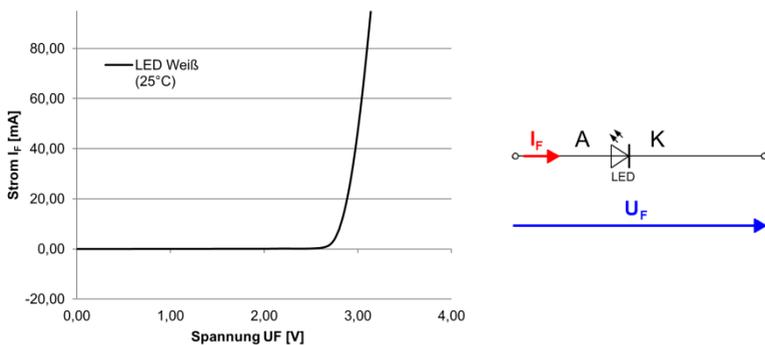
---

## Kapitel 2

# GRUNDLAGEN

### 2.1 ANSTEUERUNG VON LEDs

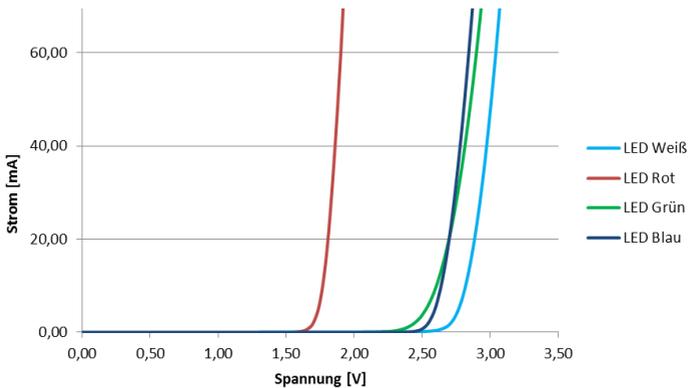
Prinzipiell weisen Leuchtdioden (LEDs) eine wie in **Abbildung 2.1** dargestellte exponentielle Strom-Spannungscharakteristik auf. Das elektrische Verhalten einer LED ähnelt somit stark dem elektrischen Verhalten einer normalen Diode mit zwei entscheidenden Unterschieden: Zum einen weisen LEDs eine deutlich höhere Vorwärtsspannung  $U_F$  auf und zum anderen eine wesentlich kleinere Durchbruchspannung in Sperrrichtung.



**Abbildung 2.1:** Kennlinie und Schaltsymbol einer LED

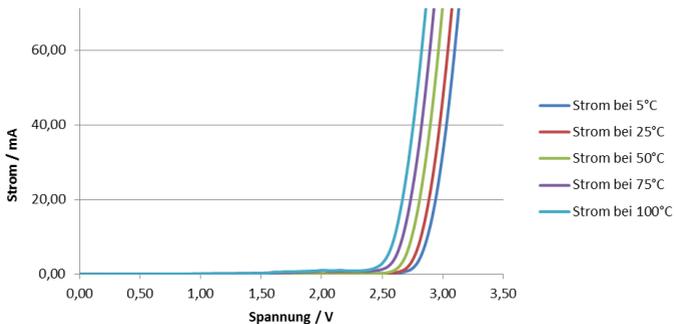
Während bei einer normalen Diode eine möglichst geringe Vorwärtsspannung zur Vermeidung von Verlusten in der Diode höchst wünschenswert ist, wird eine Lichterzeugung am pn-Übergang erst durch die höhere Vorwärtsspannung der Diode möglich.

Durch eine in Durchlassrichtung angelegte Spannung können Elektronen aus dem Leitungsband der n-dotierten Seite mit Defektelektronen der p-dotierten Seite am pn-Übergang rekombinieren. Die Energie, welche bei dieser Rekombination frei wird, wird in Form von Photonen emittiert. [2] Da die Energie der emittierten Photonen und dementsprechend die Wellenlänge des Lichtes direkt vom Bandabstand zwischen Leitungs- und Valenzband abhängig ist, wird ersichtlich, dass verschiedenfarbige LEDs, welche auf Halbleitermaterialien mit unterschiedlichen Bandlücken basieren, wie in **Abbildung 2.2** dargestellt, unterschiedliche Vorwärtsspannungen aufweisen.



**Abbildung 2.2:** Kennlinien verschiedenfarbiger LEDs

Eine weitere entscheidende Eigenschaft von LEDs, welche bei der Ansteuerung und Treiberauslegung Berücksichtigung finden muss, ist die Temperaturabhängigkeit der Vorwärtsspannung. Mit steigender Chiptemperatur sinkt die Vorwärtsspannung der LED. **Abbildung 2.3** zeigt die Kennlinien einer LED bei verschiedenen Temperaturen.



**Abbildung 2.3:** Temperaturabhängigkeit von LEDs

Bedingt durch die exponentielle Strom-Spannungs-Charakteristik von LEDs und der starken Temperaturabhängigkeit ist der Betrieb einer LED an einer Spannungsquelle nicht sinnvoll. Temperaturbedingte Änderungen der Vorwärtsspannung der LED würden beim Betrieb an einer Spannungsquelle zu extremen Abweichungen des Vorwärtstroms durch die LED führen. Da der Lichtstrom einer LED in erster Näherung proportional zum Stromfluss durch die LED ist, hätte dies den Effekt, dass der Lichtstrom der LED eine erhebliche Temperaturabhängigkeit aufweisen würde. Außerdem steigen mit zunehmendem Strom durch die LED die thermischen Verluste. Da sich die LED mit

zunehmenden Verlusten weiter erwärmt und dies wiederum zu einer fallenden Vorwärtsspannung und einem steigenden Strom führt, kann die LED bei einem Betrieb an einer Spannungsquelle ohne strombegrenzende Maßnahmen leicht zerstört werden.

Daher ist der Betrieb einer LED an einer Spannungsquelle nicht sinnvoll und es sollte für einen sicheren Betrieb stets eine Stromquelle zum Einsatz kommen.

Für die Auswahl der Stromquelle in Hinblick auf die maximale zur Verfügung stehende Spannung müssen ebenfalls fertigungsbedingte Bauteilstreuungen bei der Auslegung berücksichtigt werden. Auch wenn in Datenblättern von LEDs eine typische Vorwärtsspannung angegeben wird, sind die Einflüsse auf diese durch die Chiptemperatur und die Bauteilstreuung stets zu berücksichtigen. Besonders stark macht sich dies bei der Serienschaltung mehrerer LEDs bemerkbar, weswegen bei einer Serienschaltung immer eine ausreichende Spannungsreserve der Stromquelle vorhanden sein muss.

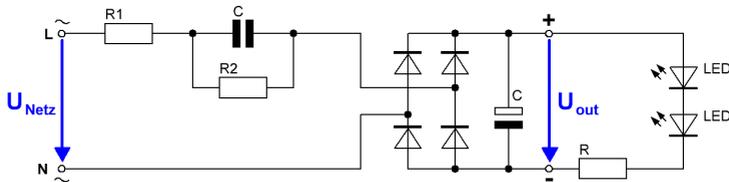
## **2.2 EVGS FÜR LEDs AN NETZSPANNUNG**

Für den Betrieb von LEDs an Netzspannung steht eine nahezu unendlich große Palette von elektronischen Schaltungen mit einer Vielzahl von Abwandlungen zur Verfügung. Daher soll an dieser Stelle auf die drei maßgeblichen Schaltungstopologien eingegangen werden, welche im Rahmen der durchgeführten Analysen in handelsüblichen LED-Retrofits vorgefunden wurden. Die Einteilung

erfolgt auf Grundlage der maßgeblichen Schaltungstopologie und umfasst jeweils alle EVGs einschließlich etwaiger Abwandlungen oder Zusatzfunktionalitäten.

### Kondensatornetzteil

Das Kondensatornetzteil ist eine extrem kostengünstige technische Lösung, LEDs an Netzspannung zu betreiben. Dieses Netzteil basiert auf der Ausnutzung des kapazitiven Blindwiderstandes eines zur LED in Serie geschalteten Kondensators. Weitere erforderliche Komponenten sind ein Brückengleichrichter sowie ein niederohmiger Widerstand  $R_1$  zur Einschaltstrombegrenzung. Den prinzipiellen Aufbau zeigt **Abbildung 2.4**.



**Abbildung 2.4:** Prinzipschaltplan eines Kondensatornetzteils

Der Widerstand  $R_2$  erfüllt während des Betriebes keine Funktion und führt lediglich zu Verlusten und sollte daher möglichst hochohmig ausgeführt werden. Jedoch erfüllt dieser Widerstand die wichtige Funktion des Entladens des Kondensators, sobald das EVG vom Netz getrennt wird. Dadurch wird ein elektrischer Schlag beim Berühren des netzseitigen Anschlusses des LED-Systems durch die Restspan-

nung auf dem Kondensator verhindert. Ein solches Berühren des netzseitigen Anschlusses kann beispielsweise am Stecker des LED-Systems oder bei einem LED-Retrofit am Sockel geschehen.

Der kapazitive Blindwiderstand  $X_C$  des Kondensators lässt sich in Abhängigkeit des erforderlichen Stroms durch die LED  $I_{LED}$  und der Netzspannung  $U_{Netz}$  nach

$$X_C = \frac{U_{Netz}}{I_{LED}} \quad (2.1)$$

berechnen. Mit  $X_C$  sowie der Netzfrequenz  $f$  kann gemäß

$$C = \frac{1}{2 * \pi * f * X_c} \quad (2.2)$$

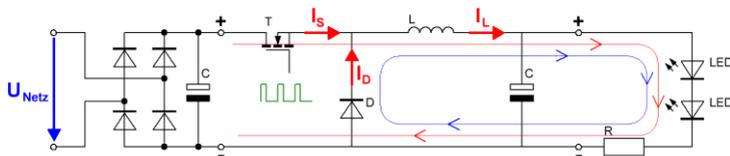
die Kapazität  $C$  des Kondensators ermittelt werden. Durch die Abhängigkeit von der Netzfrequenz sind derartige EVGs, welche beispielsweise für den europäischen Markt bestimmt sind (50 Hz / 230 V), nicht für Märkte mit anderen Netzfrequenzen, selbst bei gleicher Netzspannung, wie beispielsweise auf Antigua und Barbuda (60 Hz / 230 V) geeignet.

Den Vorteilen des einfachen Aufbaus, des geringen Gewichts und Bauvolumens sowie der geringen Kosten stehen jedoch entscheidende Nachteile gegenüber: Derartige Netzteile weisen bedingt durch die Ausnutzung des kapazitiven Blindwiderstandes des Kondensators eine große Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung und

somit einen niedrigen Leistungsfaktor und daraus resultierend eine schlechte Netzverträglichkeit auf. Außerdem neigen LED-Systeme mit Kondensatornetzteilen zu einem Flackern, da die LED im Endeffekt mit einem pulsierenden Strom betrieben wird. Auch muss ein erhöhter Aufwand für den Berührschutz berücksichtigt werden, da bei Betrieb mit Netzspannung alle Punkte der Schaltung lebensgefährliche Spannungen gegen Erde führen.

### Buck Converter (Tiefsetzsteller)

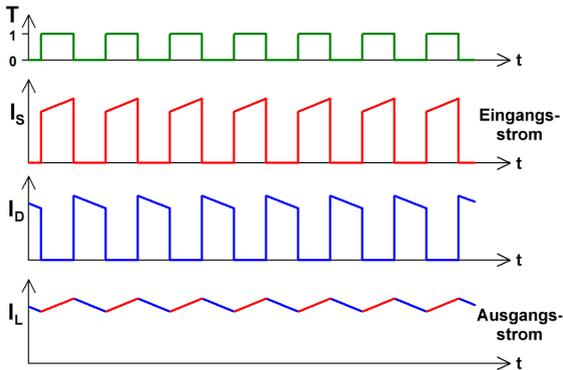
Tiefsetzsteller werden verwendet, um mit hohem Wirkungsgrad eine größere Gleichspannung in eine kleinere Gleichspannung zu übersetzen. Daher muss die Netz-Wechselspannung zuerst durch einen Brückengleichrichter in eine Gleichspannung umgewandelt und die daraus resultierende Zwischenkreisspannung durch einen Kondensator gepuffert werden. Dies entspricht dem linken Teil der in **Abbildung 2.5** dargestellten Grundschtaltung eines Tiefsetzstellers an Wechselspannung.



**Abbildung 2.5:** Grundschtaltung eines Tiefsetzstellers an Wechselspannung

Diese Gleichspannung wird anschließend durch einen elektronischen Schalter, z.B. einen MOSFET oder Transistor, mit variablem Tastverhältnis  $T$  über eine Spule auf den Verbraucher geschaltet. Während der Einschaltphase des Schalters ( $T=1$ ) steigt der Strom  $I_S$  durch den Transistor und die Spule  $I_L$  nach dem Induktionsgesetz linear an. In der anschließenden Sperrphase ( $T=0$ ) übernimmt die Diode  $D$  den durch die Selbstinduktion der Induktivität weiter getriebenen Strom, welcher in dieser Phase linear abfällt. Der Ausgangsstrom des Tiefsetzstellers entspricht demnach dem Strom durch die Spule  $I_L$  und damit der Summe der beiden Teilströme  $I_S$  und  $I_D$ .

Zur Veranschaulichung sind das Tastverhältnis  $T$  sowie die Ströme  $I_S$ ,  $I_D$  und  $I_L$  in **Abbildung 2.6** dargestellt. Die Farben der Ströme entsprechen den in **Abbildung 2.5** farbig eingezeichneten Strompfaden.



**Abbildung 2.6:** Taktung und Ströme eines Tiefsetzstellers

Die Ausgangsspannung  $U_a$  des Tiefsetzstellers lässt sich durch das Tastverhältnis ( $t_{ein} / T$ ) einstellen.

$$U_a = \frac{t_{ein}}{T} * U_e \quad (2.3)$$

Dies setzt jedoch einen nicht lückenden Betrieb, also einen Betrieb in dem der Strom durch die Spule zu keinem Zeitpunkt null ist, voraus. [3]

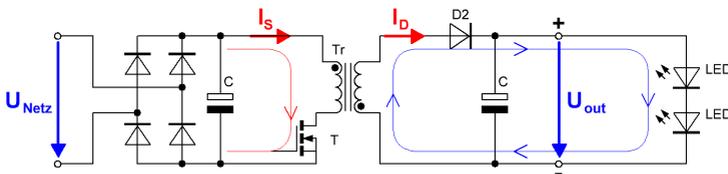
Da LEDs jedoch nicht mit einer Konstantspannung, sondern einem Konstantstrom betrieben werden sollen, wird ein zusätzlicher Shuntwiderstand  $R$  zur Erfassung des Stroms im Ausgangskreis eingesetzt. Die Spannung über diesem Messwiderstand ist proportional zu dem durch ihn hindurchfließenden Strom und dient als Regelgröße für den Tiefsetzsteller. Durch den ausgangsseitigen Kondensator wird die Ausgangsspannung geglättet.

Ein Vorteil des Tiefsetzstellers gegenüber dem Kondensatornetzteil ist dessen guter Wirkungsgrad bei zugleich deutlich höherem Leistungsfaktor. Das Netz wird dementsprechend weniger stark belastet. Ebenso haben netzseitige Spannungsschwankungen durch die aktive Regelung des Tiefsetzstellers in weiten Bereichen keinen bzw. lediglich einen geringen Einfluss auf den Strom der LED und somit den Lichtstrom des Systems. Die Problematik der fehlenden galvanischen Trennung zwischen Versorgungsnetz und LED weist der Tiefsetzsteller jedoch ebenso wie das Kondensatornetzteil auf. Daher ist auch hier

besonderer Wert auf einen ausreichenden Berührungsschutz aller unter Spannung stehenden Bauteile einschließlich der LED zu legen.

### Flyback Converter (Sperrwandler)

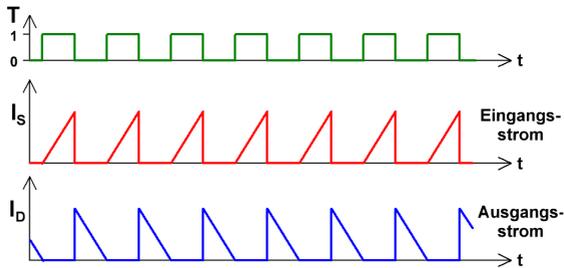
Der Sperrwandler ist einer der gebräuchlichsten aller Wandlerarten und kommt vor allem im Bereich kleiner bis mittlerer Leistungen zum Einsatz. Der Sperrwandler schaltet durch einen Halbleiterschalter, z.B. einen MOSFET, eine Gleichspannung auf eine primärseitige Spule, welche magnetisch mit einer zweiten, sekundärseitigen Spule gekoppelt ist. Dieser Aufbau aus zwei Spulen ähnelt einem Transformator, unterscheidet sich jedoch dadurch von einem herkömmlichen Transformator, dass die gesamte übertragene Energie jeweils im Magnetfeld zwischengespeichert wird. Auch für den Sperrwandler ist, wie in **Abbildung 2.7** gut ersichtlich, eine vorherige Gleichrichtung der Netzspannung erforderlich, um diesen an einer Netzwechselfspannung betreiben zu können.



**Abbildung 2.7:** Grundschtung eines Flyback Converters

Wird der Schalter, welcher durch eine entsprechende Steuerlogik getaktet wird, geschlossen, so fließt der in **Abbildung 2.8** mit Is bezeichnete Strom durch den Schalter und die primärseitige Spule. Im

Luftspalt der Spule baut sich durch diesen Stromfluss eine magnetische Spannung auf, welche während der Sperrphase des Schalters einen Strom  $I_D$  in der gekoppelten sekundärseitigen Spule induziert.



**Abbildung 2.8:** Taktung und Ströme eines Sperrwandlers

Dieser Strom fließt über die Diode  $D_2$  zum Ausgang des Sperrwandlers und versorgt somit die angeschlossenen Verbraucher.

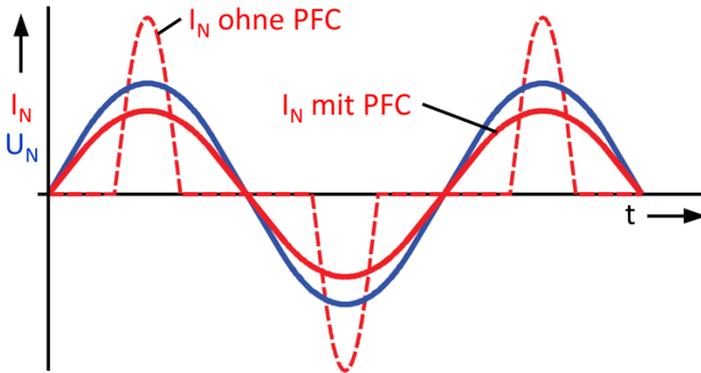
Ebenso wie der Tiefsetzsteller ist der Sperrwandler ein Schaltnetzteil, welches LEDs mit hoher Effizienz versorgen kann. Ein entscheidender Vorteil gegenüber dem Tiefsetzsteller ist die galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärseite. Da keine leitende Verbindung zwischen Eingangs- und Ausgangsseite besteht, kann sekundärseitig an keinem Punkt Netzspannung anliegen. Wird die Ausgangsspannung zusätzlich auf einen maximalen Wert von 60 V DC begrenzt, so werden ebenso die Anforderungen an einen SELV-Stromkreis (Safety Extra Low Voltage) eingehalten und somit ein hohes Schutzniveau bezüglich Gesundheit und Sicherheit von Menschen gewährleistet. Dadurch reduziert sich der Aufwand für etwaige erforderliche

Berührungsschutzmaßnahmen an den LEDs bzw. dem LED-System erheblich [4].

Ein weiterer entscheidender Vorteil von Flyback-EVGs ist die Möglichkeit einer einfachen Implementierung einer Leistungsfaktor-Korrekturschaltung (PFC Power Faktor Corrector). Die einschlägige DIN Norm EN 61000-3-2 fordert für Geräte der Klasse C, welche sich auf Beleuchtungseinrichtungen bezieht, die Einhaltung von Grenzwerten für Oberschwingungsströme [5].

Die Vermeidung von Oberschwingungsströmen sowie von Blindleistungen steht im besonderen Interesse der Netzversorger. Oberschwingungen können andere Anlagen, Rundsteuerempfänger sowie Funknetze stören, wohingegen Blindleistungen zu Verlusten und größeren Dimensionierungen der Versorgungsnetze führen.

Die Oberschwingungsströme entstehen bei einer nicht sinusförmigen Stromentnahme, wie sie beispielsweise bei der Verwendung eines Gleichrichters mit Pufferkondensator im Eingangskreis des EVGs auftreten. Die Stromaufnahme mit und ohne PFC sind einander in **Abbildung 2.9** gegenübergestellt.



**Abbildung 2.9:** Strom- und Spannungsverlauf mit und ohne PFC

Man erkennt hier gut, dass mit einem implementierten PFC eine nahezu sinusförmige Netzstromentnahme realisiert werden kann. Mit aktiven PFCs können so Leistungsfaktoren von nahezu 1,0 erreicht werden. EVGs mit aktiven PFCs weisen daher grundsätzlich einen hohen Leistungsfaktor und somit eine hohe Netzverträglichkeit auf [6]. Der hohe Leistungsfaktor führt in der Praxis jedoch häufig zu dem Missverständnis, dass ein besserer Leistungsfaktor mit einem besseren Wirkungsgrad des EVGs einhergeht. Durch den zusätzlichen Schaltungs- und Steuerungsaufwand ist dem jedoch nicht so und der Vorteil der PFCs kommt maßgeblich in der Erhöhung des Wirkungsgrades des Verteilungssystems zum Tragen, da weniger Strom durch die widerstandsbehafteten Stromleitungen fließt.

## 2.3 LEBENSDAUER ELEKTRONISCHER BAUELEMENTE

Das Lebensdauerende eines elektronischen Bauelementes ist dann erreicht, wenn ein oder mehrere wichtige elektrische Kennwerte die Toleranzgrenzen überschreiten. Der Ausfall eines einzelnen elektronischen Bauteils führt in der Regel zum Ausfall des gesamten Systems, sofern keine Redundanzen vorgesehen sind. Redundanzen finden jedoch aufgrund des zusätzlichen Schaltungsaufwandes und der damit verbundenen Kosten üblicherweise nur in sicherheitsrelevanten Bereichen Anwendung.

Bevor jedoch weiter auf die Lebensdauer eingegangen wird, sollen an dieser Stelle zunächst einige Abgrenzungen zwischen Bauelement, Baugruppe und System geschaffen werden.

Unter einem Bauelement versteht man gemäß DIN 40150 in Abhängigkeit von der Betrachtung, die kleinste, nicht weiter zerleg- bzw. teilbare Einheit der untersten Betrachtungsebene [7]. Ausgehend von der Betrachtung eines LED-Retrofits fallen hierunter demnach Bauelemente wie beispielsweise Widerstände, Kondensatoren, Induktivitäten, Halbleiter usw. Da Bauelemente wie Induktivitäten oder Transformatoren in Bezug auf den Einsatz in einem elektronischen Vorschaltgerät nicht weiter zerlegbar sind, ohne deren wesentlichen Eigenschaften aufzuheben, werden diese im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls als einzelne Bauelemente betrachtet.

Auch wenn ein EVG an sich eine selbstständig verwendbare Einheit darstellt, wird dieses aufgrund der Betrachtung von LED-Retrofits als nicht selbstständig verwendbar in Bezug auf den eigentlichen Einsatzzweck (Lichterzeugung) eingestuft. Demnach stellt die Gesamtheit mehrere Bauelemente, welche zusammen die Aufgabe der Stromversorgung einer oder mehrere LEDs in Form eines EVGs übernimmt, eine Baugruppe dar.

Das gesamte System besteht aus der Baugruppe zur Stromversorgung, dem EVG, der Lichtquelle in Form von einer oder mehreren LEDs, einem Kühlkörper zur Entwärmung, einer Vorrichtung zur Kontaktierung des Systems mit der Netzspannung - z.B. ein E27 Sockel - optisch wirksamen Flächen und weiteren Gehäuseteilen.

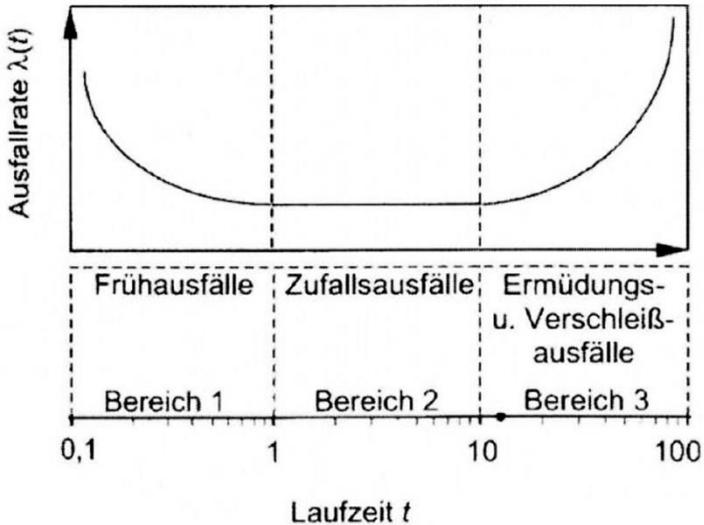
Anhand dieser Ausführung wird ersichtlich, dass alle Komponenten, welche unter dem Systembegriff zusammengefasst sind, für dessen Funktionsfähigkeit erforderlich sind. Sobald eine einzige Komponente nicht mehr ihrer eigentlichen Funktionalität gerecht wird, führt dies demnach zum Ausfall des gesamten Systems. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass kein System zuverlässiger ist als dessen schwächstes Glied. Dies gilt insbesondere für die in dieser Arbeit untersuchten EVGs und die Bauelemente aus denen diese aufgebaut sind.

Somit stellt sich die Frage nach der Zuverlässigkeit  $R$  (Reliability) der Bauelemente. Eine der am häufigsten verwendeten Verteilungen ist die negative Exponentialverteilung, nach der sich die Zuverlässigkeit bzw. die Überlebenswahrscheinlichkeit zur Zeit  $t$  nach

$$R = e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.4)$$

berechnet, wobei  $\lambda$  die Fehlerrate ist, welche besagt, wie viele Bauteile pro Zeit ausfallen. Dies setzt jedoch voraus, dass die Fehlerrate zeitunabhängig ist. Allerdings ist die Fehlerrate nur im Bereich der Zufallsausfälle konstant.

Daher muss berücksichtigt werden, dass die Fehlerrate von elektronischen Bauelementen während ihrer Lebensdauer starken Änderungen unterliegt, da sie auf verschiedenen Ausfallursachen beruht. **Abbildung 2.10** zeigt die sogenannte Badewannenkurve, welche die Ausfallrate in Abhängigkeit der Zeit angibt. Der gesamte Lebenszyklus gliedert sich demnach in die drei Bereiche Frühausfälle, Zufallsausfälle und Ermüdungs- bzw. Verschleißausfälle.



**Abbildung 2.10:** Badewannenkurve zur Veranschaulichung der Ausfallrate eines technischen Systems während dessen Lebenszykluses [8]

Im ersten Bereich, dem der Frühausfälle, nimmt die Ausfallrate über der Zeit ab. Dies liegt darin begründet, dass Produktionsfehler oder Bauteilmängel sowie bereits vorgeschädigte Komponenten gleich zu Beginn der Lebensdauer zu einem Ausfall oder Defekt führen können. Bauteile oder Systeme, welche nicht von derartigen Mängeln betroffen sind, erfüllen ihren Einsatzzweck in der Regel problemlos, da Frühausfälle in der Regel nichts mit Alterungsausfällen zu tun haben. Frühausfälle in den ersten Betriebsstunden führen jedoch in besonderem Maße zur Unzufriedenheit des Endverbrauchers und sind daher sowohl für den Hersteller als auch für den Kunden ein besonderes

Ärgernis. Eine hohe Frühausfallrate verursacht daher für den Hersteller hohe Kosten und kann sogar das Image bzw. das in den Hersteller gesetzte Vertrauen erheblich beschädigen. Frühausfälle lassen sich jedoch durch den Hersteller durch sogenannte Burn-In-Tests leicht auffinden [9]. Bei diesen Tests werden die Bauteile oder die Systeme für eine begrenzte, kurze Zeit in Betrieb genommen und anschließend deren Funktionalität bzw. Einhaltung der maximal zulässigen Abweichungen überprüft. Geräte, die den Burn-In-Test bestanden haben, fallen danach für gewöhnlich nicht nach kurzer Betriebszeit aus. Allerdings ist dieser Test mit zusätzlichem Aufwand und bei LED-Systemen ebenfalls mit Energiekosten verbunden, weswegen diese Tests häufig nicht oder zumindest nur für kurze Testzeiten zum Einsatz kommen. Sehr kurze Testzeiten entsprechen dagegen nicht mehr einem Burn-In-Test, sondern eher einem einfachen Funktionstest, welcher verhindern soll, dass bereits defekte Systeme in den Verkauf kommen.

Der zweite Bereich, der Bereich der Zufallsausfälle, zeichnet sich durch seine konstante und zugleich niedrige Ausfallrate aus. Die Bezeichnung Zufallsausfälle resultiert aus dem Zusammenhang, dass die Ausfälle in dieser Phase des Lebenszykluses nicht vorhersehbar oder planbar sind. Sie entstehen durch viele statistisch überlagerte und voneinander unabhängige Faktoren. Dieser Bereich charakterisiert die normale Nutzungsdauer und dessen Ausfallrate darf aufgrund des fehlenden Zusammenhangs zu etwaigen Verschleißausfällen nicht extrapoliert und für die Angabe der Gesamtlebensdauer herangezogen werden.

Im dritten Bereich, dem Bereich der Ermüdungs- und Verschleißausfälle, ist die Ausfallrate wieder stark ansteigend. Dies liegt darin begründet, dass hier nicht mehr die Zufallsausfälle die dominierende Ausfallursache sind, sondern Ausfälle, welche am Ende der Lebensdauer hauptsächlich auf Alterung oder Verschleiß zurückzuführen sind [10].

Da ein elektronisches Vorschaltgerät in der Regel aus mehr als einem Bauteil besteht, müssen die Ausfallraten aller Bauteile berücksichtigt werden, um eine Aussage über die Gesamtausfallrate erstellen zu können. Finden in einem EVG  $n$  Bauelemente mit einer jeweiligen Ausfallrate  $\lambda$  Verwendung, bei denen der Ausfall eines Bauelementes zum Ausfall des EVGs führt, so ist die Gesamtausfallrate  $\lambda_{ges}$  des EVGs gemäß

$$\lambda_{ges} = \sum_{v=1}^n \lambda_v \quad (2.5)$$

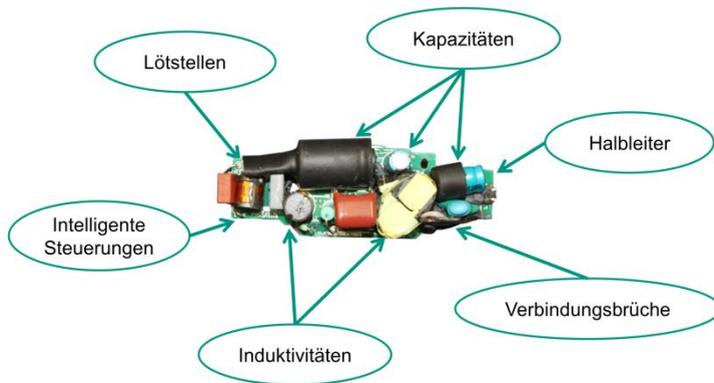
gleich der Summe der Ausfallraten der einzelnen Bauelemente. Somit lässt sich in einem ersten Schritt bei Kenntnis der Ausfallraten der verwendeten einzelnen Bauelemente die Lebensdauer abschätzen.

Die Ausfallraten werden üblicherweise durch die Bauteilhersteller angegeben. Sind derartige Herstellerangaben nicht verfügbar, so ist ein probates Mittel, auf Erfahrungs- oder Tabellenwerte zurückzugreifen. Hierfür stehen bewährte Daten wie das MIL-HDBK-217F [11] sowie beispielsweise die Hausnorm SN 29500 von Siemens zur Verfügung. Allerdings lassen diese Werte höchstens eine „Worst-Case-

Abschätzung“ zu, da diese Standardwerte großteils auf über 25 Jahre alten Werten basieren und generell zu einer eher zu pessimistischen Lebensdauerabschätzung führen [8].

Zu beachten ist, dass die Angaben der jeweiligen Ausfallraten üblicherweise auf vom Hersteller angegebenen Messbedingungen beruhen.

Ein weiterer wesentlicher Punkt ist, dass nicht nur Bauelemente ihr Lebensdauerende erreichen können und somit einen Ausfall des Systems verursachen, sondern darüber hinaus die Aufbau- und Verbindungstechnik Schwachstellen wie Leitungsbrüche oder fehlerhafte Lötstellen aufweisen kann [12]. **Abbildung 2.11** zeigt exemplarisch mögliche Schwachstellen eines elektronischen Vorschaltgerätes.



**Abbildung 2.11:** Potentielle Schwachstellen von EVGs

Hier ist gut zu erkennen, dass eine gewissenhafte Analyse und Aufstellung sämtlicher möglicher Ausfallursachen allen weiteren Betrachtungen vorangestellt werden sollte. Denn auch nicht offensichtliche Ausfallursachen wie beispielsweise eine durch eine intelligente Steuerung herbeigeführte Stromanhebung zur Kompensation der Lichtstromdegeneration der LEDs kann durch die dadurch stärkere Belastung der Bauteile einen plötzlichen vorzeitigen Ausfall verursachen.

## **2.4 EINFLÜSSE AUF DIE LEBENSDAUER ELEKTRONISCHER BAUTEILE**

Die in Kapitel 2.3 genannten Lebensdauerangaben der Hersteller oder die alternativ hierzu verwendeten Tabellenwerte beziehen sich immer auf klar definierte Betriebsbedingungen. Da die Bauelemente im Gesamtsystem nicht immer unter den angegebenen Nennbedingungen betrieben werden, führt dies zu Fehlerraten, welche von den angegebenen Fehlerraten stark abweichen können. Daher müssen die Einflüsse auf die Lebensdauer der elektronischen Bauteile entsprechend berücksichtigt werden. Die Einflussfaktoren mit zum Teil erheblichen Einflüssen auf die Lebensdauer sind:

- Die Betriebstemperatur
- Die Betriebsspannung und der Betriebsstrom
- Die Luftfeuchtigkeit

- Verschmutzung und Staubbelastung
- Schwingungs- und Schockeinflüsse sowie mechanische Belastung

Bezogen auf ein LED-System als Ganzes müssen außerdem die folgenden von außen einwirkenden Einflüsse berücksichtigt werden:

- Die Netzqualität
- Schaltzyklen
- Elektrostatische Entladung
- Erschütterungen / Vibrationen

Die Netzqualität bezieht sich auf Einflüsse, welche durch das Versorgungsnetz hervorgerufen werden. Das Versorgungsnetz kann durch Über- oder Unterspannung zu einer erhöhten Belastung und Netztransienten ebenso wie durch elektrostatische Entladungen (ESD) zu direkten Schäden an der Elektronik führen. Schädigungen durch Netztransienten oder elektrostatische Entladungen müssen jedoch nicht unmittelbar zu einem Ausfall des Systems führen, sondern können ebenso die Lebensdauer lediglich entscheidend reduzieren [13]. Dies ist insbesondere bei während der Herstellung oder der Installation verursachten ESD-Schäden ein großes Problem, da ESD-Schäden häufig nur zu einer Vorschädigung führen und ein späterer Frühausfall nicht mehr ohne aufwändige Bauteilanalysen auf die Schädigung während des Einbaus zurückzuführen ist.

Auch wenn die LED an sich völlig unempfindlich gegenüber Schaltzyklen ist, so können Schaltzyklen auf zweierlei Ebenen die Lebensdauer des Systems reduzieren.

Zum einen führen lange Schaltzyklen zu mechanischen Belastungen. Unter langen Schaltzyklen wird ein Betrieb des LED-Systems bis in seinen thermisch stabilen Betriebspunkt verstanden. Bei dieser Art von Schaltzyklen entsteht somit die maximale mechanische Belastung, bedingt durch die Temperaturänderung eines Schaltzyklus. Ein LED-System besteht aus einer Vielzahl verschiedener Materialien, welche unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten aufweisen. Heizt sich das System auf und kühlt anschließend wieder ab, so entstehen an den Kontaktstellen der Materialien thermisch verursachte Spannungen, welche zu Materialermüdung, Rissen oder Problemen bei der thermischen Kontaktierung führen können.

Zum anderen können sowohl kurze wie auch lange Schaltzyklen zu einer erhöhten Bauteilbelastung führen. Ein Beispiel hierfür ist beispielsweise der Kondensator im Eingangskreis des EVGs. Ist das EVG vom Netz getrennt, so ist dieser Kondensator entladen. Da sich entladene Kondensatoren im Einschaltmoment wie ein Kurzschluss verhalten, fließt in diesem Moment ein hoher Einschaltstrom, welcher lediglich durch den inneren Verlustwiderstand des Kondensators (ESR) sowie die weiteren Bauteile im Stromkreis beschränkt wird. Die weiteren Bauteile im Eingangskreis sind häufig nur ein Brückengleichrichter und im Idealfall ein Filternetzwerk sowie ein NTC zur Einschaltstrombegrenzung. Fehlt eben diese Einschaltstrombegrenzung, so können diese Stromspitzen zu Schäden am Brückengleich-

richter und zu Schäden am Kondensator selbst führen. Als Anmerkung soll noch erwähnt werden, dass ebenso das netzseitige Schaltelement wie beispielsweise der Lichtschalter oder ein Relaiskontakt dementsprechend einer erhöhten Belastung und dadurch reduzierten Lebensdauer ausgesetzt ist.

Erschütterungen und Vibrationen sind Einflüsse, welche bei einem Einsatz in der Allgemeinbeleuchtung nur in geringem Maße vorkommen. Ist jedoch damit zu rechnen, dass das LED-System diesen Einflüssen besonders ausgesetzt ist, lassen sich derartige Schwachstellen beispielsweise mit standardisierten Tests nach MIL-STD-810 leicht auffinden und nachweisen [14].

Die zu Beginn dieses Kapitels aufgeführten Lebensdauereinflüsse auf Bauteilebene müssen ebenfalls für eine valide Lebensdauerprognose berücksichtigt werden. Dies erfolgt beispielsweise nach MIL-HDBK-217F durch zusätzliche Gewichtungsfaktoren [11]. Am Beispiel eines Elektrolytkondensators muss dessen Ausfallrate  $\lambda_b$  unter Nennbedingungen nach

$$\lambda_{ges} = \lambda_b * \pi_T * \pi_C * \pi_V * \pi_{SR} * \pi_Q * \pi_E \quad (2.6)$$

mit den Faktoren aus **Tabelle 2.1** multipliziert werden, um die tatsächliche Ausfallrate  $\lambda_{ges}$  unter den tatsächlichen Einsatzbedingungen zu erhalten.

**Tabelle 2.1:** Gewichtungsfaktoren am Beispiel eines Kondensators [11]

$\pi_T$	Temperature Factor
$\pi_C$	Capacitance Factor
$\pi_V$	Voltage Stress Factor
$\pi_{SR}$	Series Resistance Factor
$\pi_Q$	Quality Factor
$\pi_E$	Environmental Factor

## 2.5 TEMPERATURMESSUNG

Zur Bestimmung von Temperaturen in LED-Systemen und deren Vorschaltgeräten bieten sich verschiedene Temperaturmessverfahren an. Besonders relevant sind an dieser Stelle die Messung der Temperatur mittels Kontaktfühler und die Messung der Temperatur durch Pyrometrie, auch Infrarot-Messung genannt. Der bedeutendste Unterschied zwischen diesen beiden Messverfahren ist, dass für die Kontaktmessung, wie aus dem Namen bereits hervorgeht, für die Messung der Messwertaufnehmer bzw. Sensor mit dem Messobjekt in Berührung gebracht werden muss, wohingegen es sich bei der Pyrometrie um ein berührungsloses Messverfahren handelt.

### **Kontaktfühler**

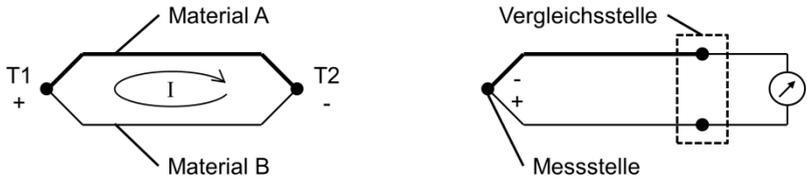
Zur eigentlichen Umwandlung der Temperatur in ein elektrisch auswertbares Signal werden bei Kontaktfühlern bzw. Berührungs-

thermometern zwei grundlegende Messprinzipien verwendet: Zum einen das Widerstandsthermometer und zum anderen das Thermoelement.

Für das Funktionsprinzip der Widerstandsthermometer sind die verschiedenen Leitungsmechanismen des elektrischen Stroms von Bedeutung. Neben den Metall-Widerstandsthermometern, welche auf der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Metallen beruhen, nutzen Halbleiter-Widerstandsthermometer den thermisch induzierten Übertritt von Elektronen und Löchern zwischen Leitungs- und Valenzband eines Halbleiters [15]. Auch wenn Metall-Widerstandsthermometer in Form von Platin-Messwiderständen (PT100 / PT1000) in der industriellen Messtechnik die mit Abstand am häufigsten eingesetzten elektrischen Temperatursensoren sind, werden in dieser Arbeit Halbleiter-Widerstandsthermometer mit negativem Temperaturkoeffizienten (NTC) eingesetzt. Diese weisen gegenüber Metall-Widerstandsthermometern entscheidende Vorteile auf. So haben diese eine deutlich größere Empfindlichkeit und einen größeren Widerstandsbereich. Allerdings besitzen sie gegenüber Platin-Messwiderständen nur einen eingeschränkten Temperaturmessbereich, welcher jedoch für die Messung von Temperaturen in der Elektronik in der Regel ausreichend ist, weshalb die Vorteile der NTC-Sensoren gegenüber denen der PT-Sensoren an dieser Stelle überwiegen.

Eine weitere Möglichkeit zur Temperaturmessung bieten sogenannte Thermoelemente. Diese nutzen den Seebeck-Effekt aus, welcher besagt, dass es in einer Schleife aus zwei unterschiedlichen Metallen A

und B, welche an beiden Seiten miteinander verbunden sind und deren Verbindungsstellen auf unterschiedlichen Temperaturniveaus liegen, zu einem Stromfluss kommt.



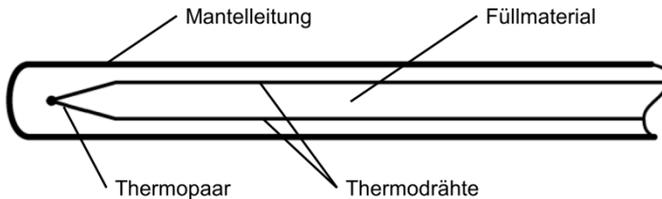
**Abbildung 2.12:** Darstellung zum Seebeck-Effekt (links) sowie Messprinzip eines Thermoelements (rechts)

Wird dieser Stromkreis auf einer Seite unterbrochen, so ist an dieser Stelle, wie rechts in **Abbildung 2.12** dargestellt, eine Spannung zu messen, welche direkt von der Temperatur der Kontaktstelle der beiden Materialien A und B abhängig ist.

Mittels Thermoelementen kann daher funktionsbedingt jedoch immer nur die Temperatur in Bezug zur Temperatur der Vergleichsstelle gemessen werden. Daher wird für die Auswertung und die Angabe einer absoluten Temperatur die Temperatur der Vergleichsstelle benötigt. Diese wird in der Regel mittels eines PT- oder NTC-Sensors bestimmt [16]. Daher ist darauf zu achten, dass das Messgerät während der Temperaturmessung keinen Temperaturschwankungen und insbesondere keinen erheblichen Temperaturgradienten, wie sie beispielsweise durch direkte Sonneneinstrahlung verursacht werden

können, ausgesetzt ist, da dies zu erheblichen Messfehlern führen kann.

Thermoelemente weisen eine deutlich geringere Genauigkeit und Langzeitstabilität im Vergleich zu PT- oder NTC-Sensoren auf, sind dafür jedoch sehr robust, kostengünstig und bieten einen großen Temperaturmessbereich. Auch die Ausführung von Thermoelementen als Thermo-Mantelelement bietet bei der Messung von Temperaturen in der Elektronik viele Vorteile. Bei einem Thermo-Mantelelement, wie es in **Abbildung 2.13** dargestellt ist, werden die beiden unterschiedlichen elektrischen Leiter A und B in Form von Thermodrähten in ein dünnes, meist flexibles, metallisches Rohr eingebracht. Die Isolierung zwischen Mantel und dem eigentlichen Thermoelement erfolgt durch gepresstes Magnesiumoxid, welches eine sehr gute Wärmeübertragung zwischen Mantel und Thermoelement ermöglicht.



**Abbildung 2.13:** Aufbau eines Thermo-Mantelelementes

## Pyrometrie

Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes sendet eine thermisch angeregte elektromagnetische Strahlung aus.

Man spricht bei dieser Strahlung von Temperatur- oder Wärmestrahlung. Bei nichttransparenten Körpern, wie beispielsweise elektronischen Bauteilen, wird die Strahlung von der Oberflächentemperatur des Körpers bestimmt. Wird die von einem Körper ausgehende Strahlung gemessen, so lässt sich daraus die Oberflächentemperatur des Körpers bestimmen.

Allerdings ist die von einem Körper emittierte Strahlung zusätzlich abhängig von dessen Emissionsgrad. Der Emissionsgrad ist ein Maß für die Fähigkeit eines Materials, Strahlung zu emittieren. Dabei entspricht ein maximaler Emissionsgrad von  $e = 1$  einem schwarzen Strahler, was jedoch in der Realität nie auftritt. Daher hat der Emissionsgrad eines zu messenden Objektes einen erheblichen Einfluss auf das Messsignal und muss entsprechend berücksichtigt werden.

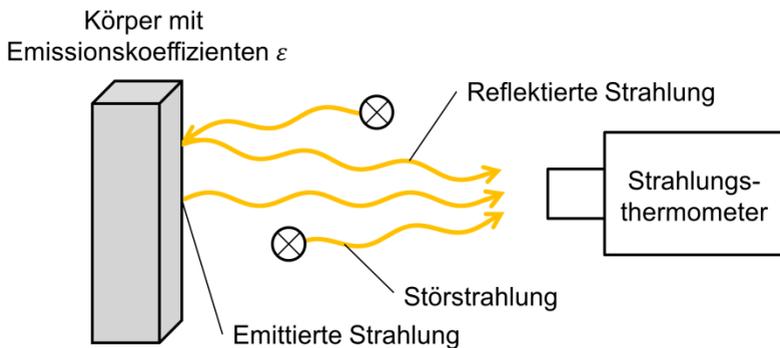
Das Messsignal, welches von einem Strahlungsthermometer empfangen wird, setzt sich aus der emittierten Strahlung des Messobjektes, der Reflektion von Umgebungsstrahlung am Messobjekt und der transmittierten Strahlung durch das Messobjekt hindurch zusammen. Die Summe aller Strahlungsanteile ist immer gleich eins.

$$\varepsilon + \rho + T = 1 \quad (2.7)$$

Da die Transmission bei elektronischen Bauteilen wegen der fehlenden Transparenz in der Regel keine Rolle spielt, reduziert sich diese Formel auf

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (2.8)$$

In der Praxis kommt zu diesen Signalanteilen jedoch häufig ein weiterer Signalanteil durch Störstrahlung hinzu. Die Zusammensetzung des durch ein Strahlungsthermometer aufgenommenen Signals veranschaulicht **Abbildung 2.14**.



**Abbildung 2.14:** Zusammensetzung des Messsignals eines Strahlungsthermometers

Wird das Strahlungsthermometer durch ein Kamerasystem ersetzt, ist damit die Messung bzw. bildliche Darstellung von örtlichen Verteilungen der Oberflächentemperatur eines größeren Messfeldes möglich. Derartige Messsysteme gibt es mit Detektoren auf Basis von Bolometern oder Photometern, welche sich durch deren Spektralbereich unterscheiden. Bolometrische Kamerasysteme arbeiten in einem Spektralbereich von  $8 \mu\text{m}$  bis  $14 \mu\text{m}$ , wohingegen photometrische

Kameras einen über optische Filter einstellbaren Messbereich haben. Dieser wird in der Regel an den Bereich eines hohen Transmissionsgrades von Luft, den sogenannten atmosphärischen Fenstern, angepasst und liegt entsprechend zwischen 3  $\mu\text{m}$  und 5  $\mu\text{m}$  bzw. zwischen 8  $\mu\text{m}$  und 12  $\mu\text{m}$  [17].

Die Thermografie hat gegenüber der Kontaktmessung im Bereich der Elektronik folgende Vorteile:

- Berührungslose und damit zugleich nahezu rückwirkungs- freie Erfassung der Temperaturwerte
- Messung von Objekten mit sehr kleiner Wärmekapazität
- Messung an spannungsführenden Bauteilen
- Sichere Erkennung von „Hotspots“ und Temperaturgradienten durch bildliche Darstellung

Den Vorteilen stehen jedoch einige Nachteile gegenüber, ohne Anspruch auf Vollständigkeit:

- Sichtverbindung zwischen Messobjekt und Kamerasystem erforderlich
- Schwierige Bestimmung der jeweiligen Emissionskoeffizienten
- Messfehler durch Störstrahlung
- Messfehler durch Transmissionsgrad der Übertragungstrecke
- Abbildungsfehler der Optik
- Drift, Kennlinien- und Kalibrationsfehler des Kamerasystems.

Anhand dieser Auflistungen wird ersichtlich, dass für jeden Anwendungsfall das optimale Messverfahren unter Abwägung der jeweiligen Vor- und Nachteile ausgewählt werden muss.

---

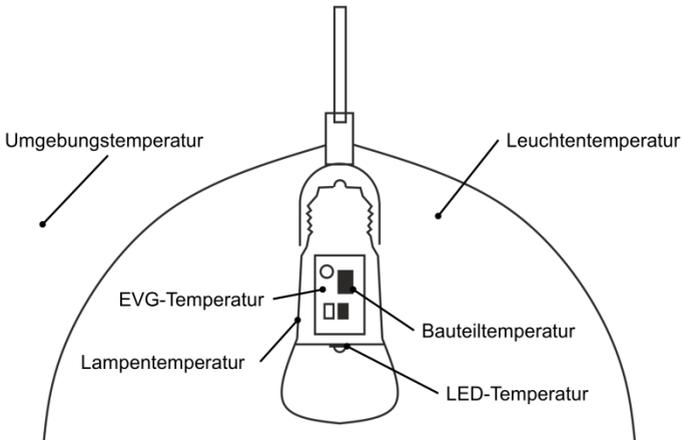
## Kapitel 3

# METHODEN

In diesem Kapitel werden die eingesetzten Methoden zur Generierung valider Lebensdauerdaten vorgestellt. Zu diesem Zweck wird anfangs gezeigt, wie wichtig die Berücksichtigung der Leuchteneinflüsse für Lebensdauerangaben unter realen Einsatzbedingungen ist und wie diese abgeschätzt werden können. Außerdem wird auf die Temperaturmessverfahren, deren Einsatzmöglichkeiten sowie deren Grenzen eingegangen und die unerlässliche elektrische Analyse der EVGs thematisiert. Des Weiteren wird aufgezeigt, wie die elektrische und thermische Wechselwirkung zwischen LED und EVG analysiert werden kann, ohne die Messergebnisse maßgeblich zu beeinflussen. Dadurch wird außerdem die Möglichkeit geschaffen, thermische Messungen am EVG durchzuführen, welche ohne diese Analyse nur mit erheblichen Messfehlern durchzuführen wären.

Bevor jedoch auf die genannten Themenfelder eingegangen wird, sollen die in den nachfolgenden Kapiteln einheitlich verwendeten Begrifflichkeiten definiert werden. Von besonderer Bedeutung sind die verschiedenen Temperaturen, welche klar voneinander abgegrenzt werden müssen. Zur Veranschaulichung und Definition der wichtigsten Temperaturen werden, wie in **Abbildung 3.1** dargestellt, die unterschiedlichen Temperaturen am Beispiel eines LED-Retrofits in

einer Leuchte gezeigt. Generell wird, sofern nicht anders angegeben, von konstanten Temperaturen ausgegangen, welche sich im eingeschwungenen Zustand nach einer hinreichend langen Einschwingzeit einstellen.



**Abbildung 3.1:** Schematische Darstellung der verschiedenen Temperaturbezeichnungen in einer Leuchte und einem LED-Retrofit

- **Umgebungstemperatur:** Die Temperatur der Umgebung, in welcher die Leuchte betrieben wird. Diese Temperatur wird, sofern nicht anders angegeben, als konstante Temperatur gemäß Laborbedingungen mit  $25\text{ °C} \pm 1\text{K}$  angenommen und die Leuchte hat ihrerseits keinen Einfluss auf die Umgebungstemperatur.

- **Leuchtentemperatur:** Die Temperatur, welche sich in der Leuchte unter Verwendung der jeweiligen Lampe und unter der entsprechenden Umgebungstemperatur einstellt.
- **Lampentemperatur:** Die Lampentemperatur ist die Oberflächentemperatur der maßgeblich zur Entwärmung der Lampe beitragenden Bauteile. Diese Bauteile, wie beispielsweise der Kühlkörper eines LED-Systems, stellen den thermischen Kontakt zwischen LED-System und der Umgebung, in der dieses betrieben wird, her.
- **LED-Temperatur:** Die LED-Temperatur ist die Temperatur der LED an der Kontaktstelle, an welcher die LED thermisch mit dem LED-System verbunden ist.
- **EVG-Temperatur:** Die EVG-Temperatur ist die Umgebungstemperatur des EVGs, welche sich in dem entsprechenden Szenario einstellt. Unter der EVG-Nenn-Betriebstemperatur wird die Temperatur verstanden, welche sich unter den üblichen Betriebsbedingungen bei der Verwendung in einer Leuchte und ohne jegliche Modifikationen einstellt.
- **Bauteiltemperatur:** Die Bauteiltemperatur ist die Oberflächentemperatur eines einzelnen, näher spezifizierten Bauteils.

### **3.1 BERÜCKSICHTIGUNG DER LEUCHTENEINFLÜSSE AUF DIE LED- SYSTEMTEMPERATUR**

Typische Lebensdauerangaben für LED-Retrofits basieren auf standardisierten Testbedingungen und berücksichtigen im Normalfall nicht den typischen Einsatzzweck der Lichtquelle. So gibt beispielsweise die Firma Philips für ihre MASTER LEDbulb MV eine Lebensdauer von 25.000 h unter dem Verweis auf einen Einsatz in einer offenen Leuchte an [18]. Dies bedeutet, dass die angegebene Lebensdauer dieses LED-Retrofits nur unter freibrennenden Bedingungen erreicht wird.

Für den Verbraucher ist diese Art der Lebensdauerangabe jedoch verwirrend bzw. irreführend, da dieser die angegebene Lebensdauer auch unter den typischen Einsatzbedingungen wie beispielsweise dem Betrieb in einer geschlossenen Leuchte als Ersatz für eine herkömmliche Glühlampe erwartet. Da gerade die Lebensdauer neben dem Energieeinsparpotential das zweitstärkste Verkaufsargument ist und insbesondere die hohen Anschaffungskosten rechtfertigt, können Lebensdauern, welche im realen Einsatz erheblich von den Herstellerangaben abweichen, den Verbraucher stark verunsichern und zu Vorbehalten gegenüber der LED-Technologie führen.

Aus diesem Grund ist es höchst relevant, den Einfluss der Leuchte auf das LED-System bei einer Lebensdaueranalyse zu berücksichtigen. Eine Leuchte kann auf zwei Arten einen Einfluss auf das eingesetzte

LED-System haben. Zum einen kann - sofern die Leuchte über zusätzliche elektronische Steuerungskomponenten verfügt - ein elektrischer Einfluss und zum anderen ein thermischer Einfluss erfolgen.

Auf den elektrischen Einfluss der Leuchte soll in dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden, da es sich hierbei um einen Sonderfall handelt, welcher nicht dem Einsatzzweck von LED-Retrofits entspricht. Diese Sonderfälle können beispielsweise der Einsatz eines leuchtenseitigen Dimmers, einer tageslichtabhängigen Regelung oder einer Farbtemperatursteuerung sein. Diese und weitere Funktionalitäten werden in der Regel jedoch ausschließlich mit LED-Systemen realisiert, welche auf den Einsatz der hier untersuchten LED-Retrofits verzichten.

Somit beschränkt sich die Berücksichtigung der Leuchteneinflüsse auf den thermischen Einfluss. Hatte eine Leuchte unter Verwendung einer Glühlampe als Lichtquelle keinen oder höchstens einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Lebensdauer der Lichtquelle, so ändert sich dies durch die starke Temperaturabhängigkeit der LED und der zum Einsatz kommenden Elektronikkomponenten des Vorschaltgerätes dramatisch.

Der thermische Einfluss resultiert im Wesentlichen aus der Erwärmung der Leuchte durch die in die Leuchte eingebrachte Verlustleistung des LED-Systems. Diese thermischen Verluste setzen sich zusammen aus den Verlusten des EVGs und der LED, welche bedingt

durch den thermischen Widerstand, den jede Leuchte darstellt, zu einer Erwärmung des Leuchteninneren führt. Des Weiteren hat die Leuchte einen Einfluss auf die Entwärmung des LED-Systems an sich, da die Leuchte sowohl die Konvektion als auch Strahlungswärme der Lampe beeinflussen kann.

Diese Einflüsse differenziert und auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmt zu berücksichtigen ist jedoch fern von einer praxistauglichen Lösung. Betrachtet man jedoch das gemeinsame Resultat der Einflüsse, so mündet dieses in den drei genannten Fällen in einer Erhöhung der Temperatur der zur Entwärmung genutzten Fläche des LED-Systems. Zielführend ist somit eine globale Berücksichtigung der Temperaturerhöhung des LED-Systems bei der Verwendung innerhalb einer Leuchte. Da die Erwärmung der Leuchte maßgeblich von der eingebrachten thermischen Leistung abhängig ist, ist dabei die Leistung der Lampe zwingend zu berücksichtigen.

Eine praxistaugliche Lösung stellt somit eine Abschätzung dar, welche entsprechend der Leistung des LED-Systems eine konstante Temperaturerhöhung angibt, die alle thermischen Einflüsse gemeinsam abbildet. Diese Temperaturerhöhung kann in den weiteren Lebensdaueranalysen als konstanter Offset mit einbezogen werden und führt somit zu deutlich realitätsnäheren Prognoseergebnissen.

### 3.2 TEMPERATURMESSUNG MITTELS KONTAKTFÜHLER

Die möglichst präzise Bestimmung von Bauteiltemperaturen ist ein wesentlicher Schlüssel für eine erfolgreiche Lebensdauerprognose. Wie bereits in Kapitel 2.5 ausgeführt, lassen sich Oberflächentemperaturen von zu messenden Bauteilen mittels Kontaktfühlern präzise bestimmen. Die Grundlagen dieser Messmethode wurden an dieser Stelle ebenfalls bereits aufgezeigt.

Allerdings müssen für den Einsatz von Kontaktfühlern einige wesentliche Punkte beachtet werden, um weder das Messergebnis zu verfälschen, noch die Bauteiltemperatur zu beeinflussen. Daher ist es wichtig, sowohl die Vorzüge als auch die Nachteile dieser Messmethode zu kennen, um diese optimal einzusetzen.

Einer der wesentlichsten Vorteile dieser Messmethode liegt darin, dass eine Oberflächentemperatur präzise bestimmt werden kann, ohne den Emissionskoeffizienten der Oberfläche zu kennen. Hierfür muss der Messfühler in geeigneter Weise thermisch mit dem zu messenden Objekt kontaktiert werden. Da die Temperaturmessung somit maßgeblich von der Wärmeleitung und nicht von der Wärmestrahlung und dementsprechend nicht vom Emissionskoeffizienten abhängt, können somit auch an Stellen mit geringem Emissionskoeffizienten präzise Messungen durchgeführt werden. Dies ist insbesondere an hoch reflektiven Flächen wie beispielsweise Lötstellen entscheidend,

da Temperaturmessungen mittels Thermografie an diesen Stellen nur mit erhöhten Messfehlern durchgeführt werden können.

Entscheidend für valide Messergebnisse mittels Kontaktfühlern ist somit die Kontaktierung zwischen Messobjekt und Messfühler. Für die Messungen, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, kommen im Wesentlichen drei Kontaktierungsmethoden zum Einsatz: Die Kontaktierung durch Anpressen, durch Kleben und durch Löten.

Bei der Kontaktierung des Messfühlers durch Anpressen wird der Messfühler durch ein Material mit möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit auf die zu messende Oberfläche gedrückt. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Anpressfläche durch das isolierende Material die rückseitige Fühlerfläche ideal abdeckt. Eine zu kleine Überdeckung der Fühlerfläche kann bedingt durch Wärmestrahlung und Konvektion am Fühler zu niedrigen Messergebnissen führen, wohingegen eine zu große Anpressfläche gerade bei der Messung von Oberflächentemperaturen von Kühlkörpern zu hohe Messergebnisse liefern kann. Dies liegt darin begründet, dass eine großflächige Kontaktierung bzw. Anpressung eine Isolierung darstellt und somit zu einer lokalen Temperaturüberhöhung führen kann. Bei der Temperaturmessung mittels Anpressung kommen daher an dieser Stelle ausschließlich präzise und zugleich robuste NTC-Sensoren zum Einsatz, welche mittels eines Hartpapierstabes (Pertinax) mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  sowie einer Styroporkugel mit  $0,04 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  am Ende des Stabes den Temperatursensor auf das zu messende Objekt drücken. Sowohl der Durchmesser des Hartpapierstabes, als auch der

Durchmesser der Styroporkugel liegen in der Größenordnung des Temperatursensors.

Eine weitere Möglichkeit, die thermische Kontaktierung herzustellen, ist das Aufkleben der Temperatursensoren. Sensoren mit werkseitig angebrachter Klebefläche sind häufig nicht für die Erfassung von Temperaturen kleiner Bauteile geeignet. Auch ist die werkseitig aufgebrauchte Klebefläche nicht für mehrere Messungen zu verwenden. Daher werden je nach Anwendungsfall NTC-Sensoren oder Thermo-Mantelelemente mittels eines UV-aushärtenden Klebstoffs auf die zu messenden Objekte aufgeklebt. Der Einsatz von UV-aushärtendem Klebstoff hat den entscheidenden Vorteil, dass die Sensoren auch nach dem Klebstoffauftrag noch präzise justiert werden können und erst durch UV-Einwirkung eine sekundenschnelle Aushärtung erfolgt. Der ausgehärtete UV-Klebstoff kann nach erfolgter Temperaturmessung von den Temperatursensoren mechanisch entfernt werden, weshalb diese somit mehrfach verwendet werden können.

Das direkte Einbringen der Temperatursensoren in eine Lötstelle bietet den entscheidenden Vorteil der idealen thermischen Kontaktierung. Außerdem ist der Fühler zeitgleich weitestgehend fixiert, was eine zuverlässige und reproduzierbare Temperaturmessung ermöglicht. Diese Methode eignet sich besonders zur Erfassung der Temperaturen von Halbleitern, welche über Löt pads entwärmt werden, sowie für die Messung der Kerntemperatur von Elektrolytkondensatoren. Für die Messung der Kerntemperatur der Kondensatoren wird der Messfühler in einen kleinen Tropfen Löt zinn direkt am Anodenbeinchen eingebracht. Für die Kontaktierung mittels Einlöten eignen sich

Miniatur-Thermo-Mantelelemente mit einem Durchmesser von 0,5 mm bzw. 0,2 mm ideal. Zu beachten ist jedoch, dass hierbei neben der guten thermischen Kontaktierung ebenfalls eine elektrische Kontaktierung zwischen dem Bauteil und dem Mantel des Mantelthermoelements entsteht. Es müssen daher unbedingt geeignete Maßnahmen ergriffen werden, welche Kurzschlüsse oder gefährliche Berührungsspannungen verhindern. Dies wird mithilfe einer zusätzlichen Ummantelung durch einen PTFE-Schlauch sowie einen galvanisch getrennten Messumformer realisiert.

Obwohl der Einsatz von Kontaktfühlern wesentliche Vorteile aufweist, bringt dieser ebenfalls entscheidende Nachteile mit sich. So muss beispielsweise für jede zu messende Temperatur ein einzelner Kontaktfühler angebracht werden. Relevante Temperaturgradienten über einem Bauteil werden von einem einzigen Fühler nicht erfasst und somit bei der Auswertung häufig nicht erkannt. Außerdem stellt die sichere thermische Kontaktierung bei jeder Messstelle eine eigene Herausforderung dar und es muss jeweils besondere Rücksicht darauf genommen werden, dass weder der Messfühler, noch die Kontaktierung nicht zu verfälschten Temperaturmessergebnissen führen. Auch steigt mit zunehmender Anzahl an Messfühlern die Notwendigkeit von Modifikationen am Gehäuse, um diese herauszuführen und auch die elektrische Sicherheit bei der Anbringung muss individuell berücksichtigt werden.

Anhand der aufgeführten Vor- und Nachteile muss somit individuell abgewogen werden, inwieweit der Einsatz von Kontaktfühlern sinnvoll und an welcher Stelle er unerlässlich ist. Wichtige Messgrößen

sind beispielsweise Messpunkte mit geringem Emissionskoeffizienten und die Bestimmung von Referenztemperaturen, welche für Thermografiemessungen herangezogen werden können.

### 3.3 THERMOGRAFIE

Mithilfe der Thermografie lässt sich, wie in Kapitel 2.5 bereits erläutert, eine nahezu rückwirkungsfreie bildliche Darstellung der örtlichen Verteilungen der Oberflächentemperatur erstellen. Allerdings ist hierfür eine ausreichend genaue Kenntnis der Emissionsgrade der zu messenden Objekte von Nöten. Daher ist die exakte Bestimmung der Emissionskoeffizienten ein entscheidendes Kriterium für valide Messergebnisse, welche mittels Thermografie gewonnen werden.

Da der Emissionsgrad in der Regel nicht exakt bekannt ist, ist es in der Praxis eine gängige Methode, einen elektrisch isolierenden Lack mit bekanntem Emissionsgrad homogen über die gesamte zu messende Fläche aufzutragen. Allerdings bringt diese Methode einen entscheidenden Nachteil mit sich: Durch den Lackauftrag und die beabsichtigte Vereinheitlichung des Emissionskoeffizienten wird auch die Wärmeabfuhr der Bauteile über die Strahlungswärme erheblich beeinflusst. Bauteile mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten wie beispielsweise blanke, metallische Oberflächen, bei denen die Entwärmung über Strahlung nur eine untergeordnete Rolle spielt, weisen aufgrund einer erhöhten Entwärmung durch den veränderten Emissionskoeffizienten eine deutlich niedrigere Temperatur auf.

Für Temperaturmessungen, welche die im üblichen Betrieb entstehenden Temperaturen abbilden sollen, darf der Emissionskoeffizient daher nicht verändert werden und es muss entsprechend der Emissionsgrad der Messobjektoberflächen bestimmt werden. Dies lässt sich auf verschiedene Arten durchführen:

- Zuhilfenahme einer Emissionsgradtabelle
- Ermittlung des Emissionsgrades durch Vergleichsmessung mit bekanntem Emissionskoeffizienten
- Ermittlung des Emissionsgrades durch Vergleichsmessungen mit einem Kontaktthermometer

Bei der Übernahme von Literaturwerten ist aufgrund der vielen Einflussfaktoren wie Materialzusammensetzung, Oberflächenbeschaffenheit, Bearbeitungszustand, Wellenlängen- und Temperaturabhängigkeit mit großen Abweichungen und Unsicherheiten zu rechnen.

Alternativ kann bei unbekanntem Emissionskoeffizienten ein Messaufkleber, dessen Emissionskoeffizient bereits bekannt ist, auf die zu messenden Bauteile aufgebracht werden. Allerdings hat auch diese Vorgehensweise Nachteile. So ist die Umsetzung insbesondere bei kleinen Bauteilen schwierig und es wird eine große Anzahl von Aufklebern benötigt. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass Temperaturverläufe oder Hotspots möglicherweise nicht erkannt werden.

Ein weiteres anwenderorientiertes Verfahren besteht in der präzisen Bestimmung der Emissionskoeffizienten im System. Dafür muss die

Platine mit allen Bauteilen mittels einer Heizeinrichtung homogen in etwa auf die später zu messende Temperatur gebracht werden. Der Hintergrund in der Reflexionsebene muss dabei eine konstante Temperatur aufweisen, welche mit der Hintergrundtemperatur bei den späteren Messungen übereinstimmt. Daher sollte in der Reflexionsebene eine thermisch stabilisierte oder überwachte diffuse Fläche liegen. Mittels eines zusätzlich an der Baugruppe angebrachten Kontaktthermometers wird die reale Temperatur der Baugruppe bestimmt. Ausgehend von der Annahme, dass die Baugruppe auf eine homogene Temperatur gebracht wurde, lässt sich der Emissionskoeffizient für jeden Bildpunkt derart korrigieren, dass die jeweils korrekten Temperaturmesswerte ermittelt werden können.

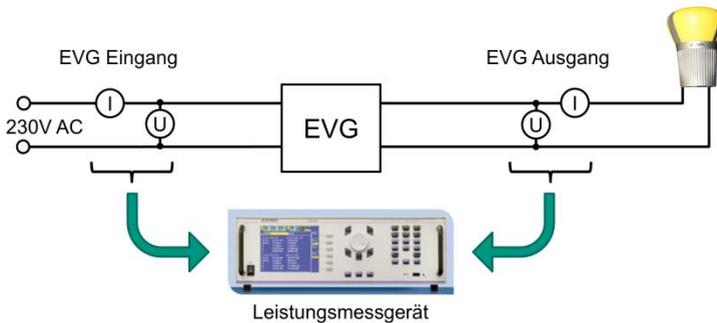
Somit lassen sich Emissionswertkorrekturen für die gesamte zu messende Fläche vornehmen und es können daher beliebig viele Bauteiltemperaturen ohne weiteren Mehraufwand ermittelt werden. Entscheidend bei der pixelweisen Emissionswertkorrektur ist jedoch, dass es keine Veränderungen der Pixelzuordnungen, also Bildverschiebungen geben darf. Daher ist auf einen ausreichend stabilen und erschütterungsfreien Aufbau zu achten.

### **3.4 ELEKTRISCHE ANALYSE VON EVGS**

Soll die EVG-Lebensdauer von LED-Systemen bestimmt werden, so sind die elektrischen Betriebsdaten für eine Analyse unerlässlich. Da die EVGs jedoch fest in die LED-Systeme integriert sind und im

Normalfall weder Informationen zur eingesetzten Topologie noch Schaltpläne der EVGs vorliegen, soll die Analyse ohne weitere Kenntnis über Schaltungsdetails auskommen.

Hierzu wird das EVG als Blackbox angenommen und die Analyse auf die elektrischen Schnittstellen beschränkt. Diese finden sich zum einen zwischen dem Netzeingang und dem EVG und zum anderen zwischen dem EVG und der LED. An diesen Schnittstellen lassen sich EVG- und topologieunabhängig, ohne Modifikationen an der Schaltung vornehmen zu müssen, sowohl die jeweiligen Ströme als auch die zugehörigen Spannungen bestimmen. Der hierzu notwendige Messaufbau ist in **Abbildung 3.2** dargestellt.



**Abbildung 3.2:** Elektrische Analyse von EVGs

Bei dieser Messung ist darauf zu achten, dass es sich ausgangsseitig oftmals nicht um reine Gleichstromgrößen handelt. Auch wenn LEDs im Optimalfall mit reinen Gleichströmen betrieben werden, ist bedingt durch die EVGs mit pulsierenden Gleichströmen oder einer überlager-

ten Schwingung zu rechnen. Auch auf der Netzseite der EVGs ist mit erheblichen Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung sowie Oberschwingungen und Verzerrungen zu rechnen. Aus diesem Grunde müssen Eingangs- und Ausgangsseite des EVGs mit einem Leistungsmessgerät, welches sowohl Strom und Spannung als auch deren Phasenlage bestimmt, gemessen werden. Bei der Wahl des Leistungsmessgerätes ist darauf zu achten, dass die Bandbreite ausreichend groß für die Erfassung der durch die Schaltnetzteile verursachten Oberschwingungen ist. Somit lassen sich die vom EVG primärseitig aufgenommene Wirkleistung sowie die sekundärseitig abgegebene Wirkleistung an die LED gemäß der folgenden Formel bestimmen:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T u(t)i(t)dt \quad (3.1)$$

Die elektrischen Verluste innerhalb des EVGs, welche für dessen Erwärmung verantwortlich sind, sind somit

$$P_{Verlust} = P_{Eingang} - P_{Ausgang} \quad (3.2)$$

Mithilfe der Scheinleistung  $S$

$$S = U_{trms} * I_{trms} \quad (3.3)$$

welche aus den Echt-Effektivwerten  $U_{trms}$  und  $I_{trms}$

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T u(t)^2 dt} \quad (3.4)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T i(t)^2 dt} \quad (3.5)$$

bestimmt werden, lässt sich der Leistungsfaktor

$$\lambda = \frac{|P|}{S} \quad (3.6)$$

ermitteln, welcher ein entscheidendes Gütemaß für die zu untersuchenden EVGs darstellt.

Anhand des Leistungsfaktors können erste Rückschlüsse auf die verwendete EVG-Topologie gezogen werden. EVGs mit sehr niedrigen Leistungsfaktoren lassen auf den Einsatz von günstigen Kondensatornetzteilen schließen, wohingegen hohe Leistungsfaktoren den Rückschluss auf ein höherwertiges EVG mit Flybacktopologie zulassen.

Da der Leistungsfaktor unter anderem von der Eingangsfilterung abhängig ist, ändert sich dieser über die Lebensdauer der LED-Systeme. Altert beispielsweise der Kondensator im Eingangskreis eines EVGs, so lässt sich diese Alterung deutlich an der Veränderung des eingangsseitigen Leistungsfaktors ablesen. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn LED-Systeme ohne jegliche Modifikation kontinuierlich untersucht oder über einen längeren Zeitraum mittels Wiederho-

lungsmessungen beobachtet werden sollen. Eine stetige Änderung des eingangsseitigen Leistungsfaktors kann somit ebenfalls für die Früherkennung von Ausfällen herangezogen werden.

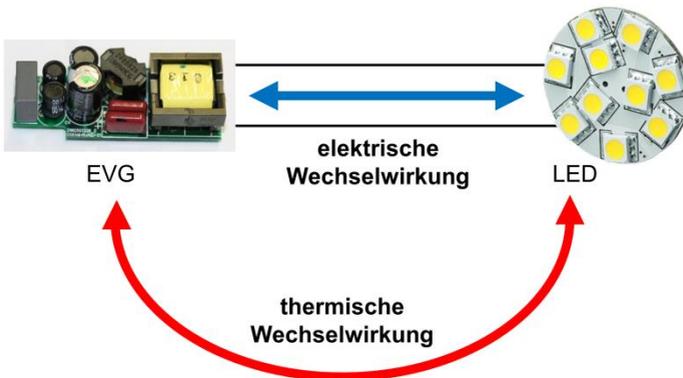
### **3.5 THERMISCHE ENTKOPPLUNG VON EVG UND LED**

Ein LED-System, welches aus EVG und LED besteht, weist immer eine elektrische Wechselwirkung zwischen EVG und LED auf. Ändert sich beispielsweise die LED-Vorwärtsspannung durch Erwärmung, so hat dies einen Einfluss auf das EVG, da bei gleichem Vorwärtsstrom durch die LED die Vorwärtsspannung der LED mit steigender Temperatur sinkt [2]. Somit sinkt ebenfalls die abgegebene elektrische Leistung des EVGs, was sich direkt auf den Betriebspunkt und den Wirkungsgrad des EVGs auswirken kann.

Ebenso wirken sich Änderungen in der elektrischen Versorgung der LED unmittelbar auf die LED aus. Dies betrifft sowohl gewollte Änderungen wie beispielsweise eine Dimmung als auch ungewollte wie beispielsweise der Drift einer Konstantstromquelle. Der Einfluss in der elektrischen Versorgung der LED kann unterschieden werden in einen direkten Einfluss und einen indirekten Einfluss. Direkt beeinflusst werden der Lichtstrom der LED sowie die entstehenden thermischen Verluste. Indirekte Auswirkungen gibt es auf die Effizienz, die Vorwärtsspannung und den Farbort der LED. Die indirekte Beeinflussung resultiert aus der Änderung der Chiptempera-

tur, welche sich aufgrund der thermischen Verluste aus dem direkten Einfluss ergibt.

In einem LED-Retrofit sind das EVG und die LED jedoch nicht nur elektrisch, sondern - bedingt durch die kompakte Bauform und die gemeinsame Entwärmung über einen einzigen Kühlkörper - ebenfalls thermisch miteinander gekoppelt. Die elektrischen Verluste des EVGs und die daraus resultierende Erwärmung des Systems führen somit unmittelbar zu einer weiteren Erhöhung der LED-Chiptemperatur. Andererseits sorgt die thermische Verlustleistung der LED ebenfalls zu einer Erhöhung der Systemtemperatur, was wiederum einen erheblichen Einfluss auf die Betriebstemperatur des EVGs hat. Die gegenseitigen Wechselwirkungen sind in **Abbildung 3.3** exemplarisch dargestellt.



**Abbildung 3.3:** Wechselwirkungen zwischen EVG und LED

Somit liegen in einem LED-Retrofit bauartbedingt zwei entscheidende gegenseitige Beeinflussungen vor, die elektrische und die thermische. Die Differenzierung zwischen den Beeinflussungen und insbesondere die Richtung des jeweiligen Einflusses sind durch die kompakte Bauform nicht ohne erhebliche Modifikation des Systems zu bestimmen. Eine Modifikation, wie beispielsweise eine Auftrennung der thermischen Kopplung zwischen EVG und LED, führt jedoch zwangsweise zu einer Änderung der im üblichen Einbauzustand vorherrschenden Temperaturniveaus. Gleiches gilt für eine elektrische Auftrennung.

Werden die beiden möglichen Entkopplungsmethoden, die elektrische und die thermische, gegeneinander abgewogen, so lässt sich feststellen, dass eine thermische Entkopplung der beiden Teilsysteme den größten Nutzen für eine Analyse bietet. Durch diese Methode ist es zudem möglich, die thermischen Betriebsbedingungen der Teilsysteme zu variieren, worauf in Kapitel 4.9 ausführlich eingegangen wird.

Betrachtet man ein LED-Retrofit als Zusammensetzung der beiden Teilsysteme LED mit Kühlkörper und EVG, so führt, wie bereits erläutert, bedingt durch Entwärmung über den gemeinsamen Kühlkörper eine thermische Trennung zu einer Änderung der Temperaturen der Teilsysteme. Um die Größenordnung der Auswirkungen auf die jeweiligen Temperaturen einschätzen zu können, müssen die jeweiligen thermischen Verluste der Teilsysteme einander gegenübergestellt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit charakterisierten EVGs haben einen Wirkungsgrad zwischen ca. 70 und 90 %. Daraus wird ersichtlich, dass die LED den größten Beitrag zur

Erwärmung des Gesamtsystems hat. Eine Trennung der beiden Teilsysteme wird sich demnach am stärksten auf die Betriebstemperatur des EVGs auswirken. Die Auswirkung auf die LED-Temperatur ist dagegen gering, da das EVG nur zwischen ca. 10 und 30 % zur Erwärmung des Gesamtsystems beiträgt und somit die Systemtemperatur nur unwesentlich beeinflusst.

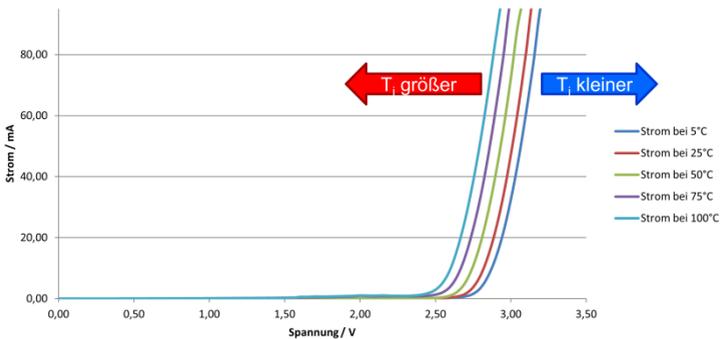
Aus diesen Überlegungen folgt, dass eine Möglichkeit geschaffen werden muss, die thermischen Betriebsbedingungen des EVGs im System nachzubilden, um Messungen am EVG unter annähernd realen Betriebsbedingungen durchführen zu können. Andernfalls würden Messungen am EVG nach einer thermischen Trennung zu völlig verfälschten Ergebnissen führen, da die Betriebstemperatur, wie in Kapitel 2.4 erläutert, einen maßgeblichen Einfluss auf die Lebensdauer besitzt.

Werden hingegen die thermischen Betriebsbedingungen, unter welchen das EVG im System betrieben wird, nachgebildet, so ist es möglich, unter konstanten und näherungsweise realen Betriebsbedingungen sowohl thermische als auch elektrische Messungen durchzuführen, welche ohne Trennung aufgrund der kompakten Bauweise nicht durchführbar wären. Durch die Methode der thermischen Trennung und Nachbildung der thermischen Betriebsbedingungen lassen sich sowohl die Temperaturmessung mittels Kontaktfühlern, die Thermografie, als auch die elektrische Analyse des EVGs gleichzeitig unter annähernd realen Betriebsbedingungen einsetzen. Außerdem führen somit die notwendigen Modifikationen, welche zur Durchfüh-

zung der Messungen notwendig sind, zu minimalen Einflüssen auf die Messergebnisse.

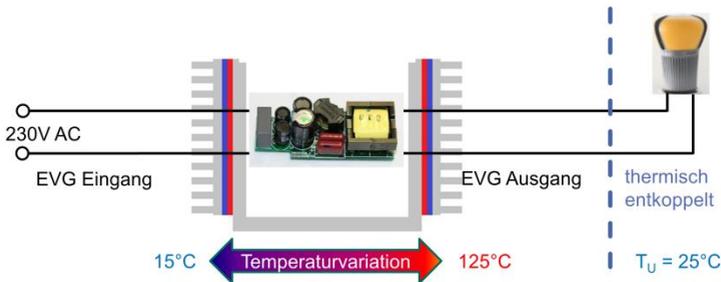
### 3.6 VARIATION DER THERMISCHEN BETRIEBSBEDINGUNGEN DES EVGS

Durch die thermische Entkopplung von LED und EVG ist es möglich, die thermische Auswirkung auf das EVG isoliert zu betrachten. Somit können die thermischen Betriebsbedingungen des EVGs variiert werden, ohne dass dabei eine Rückwirkung durch die LED erfolgt. Dies ist insbesondere deshalb von entscheidender Bedeutung, da die Kennlinie einer LED stark temperaturabhängig ist. **Abbildung 3.4** zeigt die Strom-Spannungskennlinie einer weißen LED bei verschiedenen Junction-Temperaturen  $T_j$ .



**Abbildung 3.4:** Temperatureinfluss auf LEDs

Gut zu erkennen ist, dass die Vorwärtsspannung von LEDs mit steigender Temperatur stark abnimmt. Daher ließe eine Betrachtung des Temperatureinflusses auf das Gesamtsystem keine Aussage darüber zu, ob die Änderung des Betriebspunktes des EVGs seine Ursache in der sich ändernden Strom-Spannungs-Charakteristik der LED oder im EVG hat. Mit dem Aufbau gemäß **Abbildung 3.5** lässt sich dieser Einfluss isoliert auf das EVG betrachten. Dabei wird die Temperatur der LED einschließlich Kühlkörper konstant gehalten, wohingegen die Temperatur des EVGs mithilfe der Thermobox variiert werden kann.



**Abbildung 3.5:** Aufbau zur Variation der thermischen Betriebsbedingungen des EVGs

Durch die Variation der EVG-Temperatur bei konstanter LED-Temperatur können relevante Kenngrößen in Abhängigkeit von der EVG-Temperatur ermittelt werden. Die wichtigsten Kenngrößen sind:

- Die Gesamtleistung des Systems aus EVG und LED
- Der EVG-Wirkungsgrad

- Die Aufteilung der elektrischen Verluste
- Die thermische Bilanz zwischen EVG und LED
- Die Temperaturen der einzelnen Bauteile

Mithilfe dieser Analyse lassen sich daher auch die Temperatursensitivitäten der Kenngrößen ermitteln und unter- bzw. überproportional starke Temperatureinflüsse sicher erkennen.



---

## Kapitel 4

# DURCHFÜHRUNG

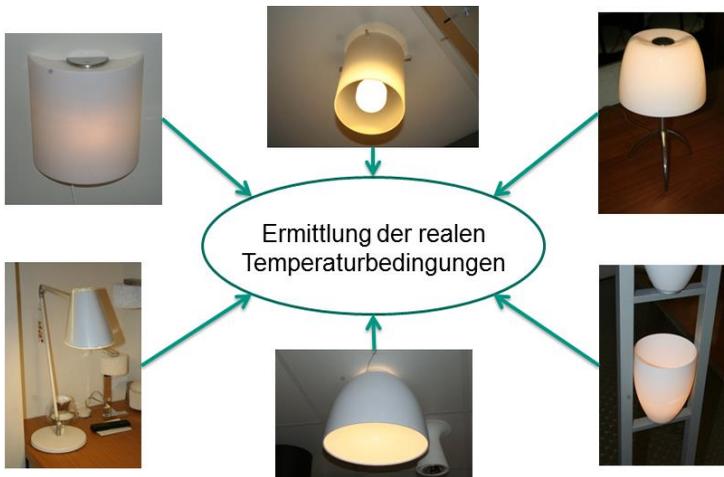
### 4.1 ERMITTLUNG DES ÜBLICHEN THERMISCHEN LEUCHTENEINFLUSSES AUF LED-SYSTEME

Um den Einfluss der Leuchte auf die Betriebstemperatur des LED-Systems praxistauglich abbilden zu können und somit in die Lebensdauerprognose mit einzubeziehen, ist ein durchschnittlicher Zusammenhang zwischen Leuchte, LED-System und Temperatur herzuleiten.

Der Temperatureinfluss der Leuchte hängt von vielen Faktoren wie beispielsweise der Leuchten- und LED-Systemgeometrie, den verwendeten Materialien und der Leistung des LED-Systems ab. Da die verwendeten Materialien und die Geometrien höchst unterschiedlich sind und während einer Lebensdauerprognose der tatsächliche Anwendungsfall nicht bekannt ist, sollen diese Faktoren durch eine Durchschnittsbildung über verschiedenartige und retrofittaugliche Leuchten, welche einen allgemeinen Anwendungsfall abdecken, abgebildet werden. Allen Anwendungsfällen gemeinsam ist jedoch die direkte Abhängigkeit des Leuchteneinflusses auf die Temperatur des

LED-Systems von der eingesetzten Leistung. Daraus ergibt sich, dass der durchschnittliche Temperatureinfluss einer Leuchte in Abhängigkeit der Leistung des zu untersuchenden LED-Systems angegeben werden kann.

Um diesen Zusammenhang zu ermitteln, werden verschiedenartige Leuchten, wie sie auszugsweise in **Abbildung 4.1** gezeigt sind, jeweils mit verschiedenen Leistungen vermessen.

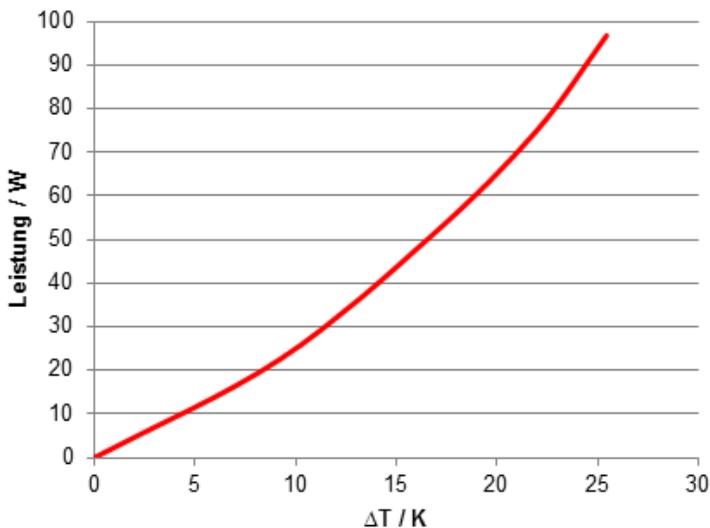


**Abbildung 4.1:** Leuchten für den Einsatz von LED-Retrofits

Gemessen wird hierbei zunächst die Umgebungstemperatur, in der die Leuchte betrieben wird. Diese Messung erfolgt in kurzer Distanz zu der Leuchte, sodass Umwelteinflüsse wie die Raumtemperatur oder der Montageort nicht in die Ermittlung des Leuchteneinflusses

eingehen. Anschließend wird die Wirkleistung der eingesetzten Lampe mittels eines LMG95 der Firma ZES Zimmer bestimmt und die Temperatur in der Leuchte nach hinreichend langer Einschwingzeit gemessen. Die Messung der Temperatur in der Leuchte erfolgt mit einem ALMEMO®-Messgerät in Verbindung mit einem NTC-Temperaturfühler im Luftraum zwischen Lampe und Leuchte.

Somit kann die jeweilige Temperaturänderung innerhalb der Leuchte in Abhängigkeit von verschiedenen Lampenleistungen ermittelt und, wie in **Abbildung 4.2** gezeigt, über der Leistung aufgetragen werden.



**Abbildung 4.2:** Leuchtentemperaturänderung über Lampenleistung

Aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen lässt sich somit ein durchschnittlicher Zusammenhang zwischen installierter Lampenleistung und Temperaturerhöhung innerhalb der Leuchte ableiten. Für LED-Systeme mit kleiner bis mittlerer Leistung zwischen 5 und 30 W, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, lässt sich somit von einer Temperaturerhöhung von ca. 1 K/W ausgehen. Bei Leistungen zwischen 30 und 100 W muss von einem Leuchteneinfluss zwischen 0,7 und 0,5 K/W ausgegangen werden.

Berücksichtigt man den Sachverhalt, dass gemäß der Regel von Arrhenius eine Erhöhung der Bauteiltemperatur um 10 K die zu erwartende Lebensdauer halbiert, so lässt sich feststellen, dass bei einem LED-System mit 10 W Leistung die prognostizierte Lebensdauer ohne Berücksichtigung des Leuchteneinflusses um ca. 50 % zu lange angegeben werden würde [19]. Aus diesem Grund lässt sich durch die Abschätzung des Leuchteneinflusses und dessen Berücksichtigung bei der Lebensdauerprognose das Ergebnis deutlich verbessern.

## **4.2 MARKTSTUDIE UND ANALYSE**

### **HANDELSÜBLICHER EVGS FÜR LED-SYSTEME**

Die verwendete EVG-Topologie ist einem unabhängigen Prüflabor im Normalfall bei einem stichprobenartig ausgewählten System nicht bekannt. Ebenso liegen üblicherweise keine Schaltungsunterlagen über das zu untersuchende System vor. Daher soll anhand einer überschau-

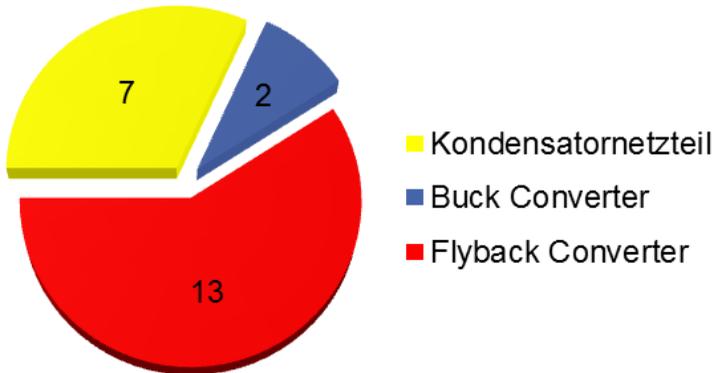
baren Marktstudie ein Überblick über ein möglichst breites Spektrum an verschiedenen Bau- und Verarbeitungsweisen von zufällig ausgewählten LED-Retrofits geschaffen werden. Hierfür werden zu Projektbeginn 22 LED-Retrofits, welche ein Preissegment von 12 bis 50 € abdecken, analysiert.

Bei der Eingangsanalyse werden die LED-Retrofits eingehend auf die folgenden Punkte untersucht:

- Die verwendete Schaltungstopologie des EVGs
- Die Leistungsklasse
- Die thermische Anbindung
- Die Verarbeitungsqualität
- Den Bauteilaufwand und die Bauteilauswahl
- Mögliche Schwachstellen

Hierbei hat sich gezeigt, dass zum Untersuchungszeitpunkt in typischen LED-Retrofits im Wesentlichen drei verschiedene Schaltungstopologien für das EVG Verwendung finden. In erster Linie werden Flyback Converter eingesetzt, gefolgt von Kondensatornetzteilen und zu guter Letzt den Buck Convertern. Die Verteilung ist in **Abbildung 4.3** dargestellt. Ein entscheidender Unterschied zwischen dem Flyback Converter einerseits und dem Kondensatornetzteil sowie dem Buck Converter andererseits ist, dass bei den letztgenannten Schaltungstopologien keine galvanische Trennung zwischen der Netzseite und der LED vorliegt. Aus diesem Grunde muss bei

Messungen und bei der Analyse hinsichtlich der Verarbeitungsqualität besonderes Augenmerk auf die nötige Schutzisolierung gelegt werden.

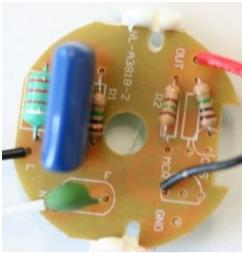


**Abbildung 4.3:** EVG-Topologien der untersuchten LED-Retrofits

Teilt man die analysierten Vorschaltgeräte gemäß der verwendeten Schaltungstopologie in drei Gruppen ein, so lassen sich anhand dieser Kategorisierung grundsätzliche Eigenschaften feststellen.

Den Kondensatornetzteilen gemeinsam ist, dass sie ausschließlich für LED-Retrofits mit geringer Leistung im Bereich von 1,2 bis 3,3 W eingesetzt werden. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass bei höheren Leistungen die Kosten für den zur Strombegrenzung eingesetzten Kondensator und gleichzeitig das benötigte Bauvolumen derart ansteigen würden, dass der Übergang auf eine andere Technologie wirtschaftlicher wäre. Durch den in **Abbildung 4.4** gut zu erkennenden, geringen Bauteilaufwand für Kondensatornetzteile

handelt es sich generell um ein sehr kostengünstiges Vorschaltgerät, welches dementsprechend in preisgünstigen LED-Retrofits eingesetzt wird. Dies schlägt sich jedoch durchgängig in einer unterdurchschnittlichen Verarbeitungsqualität nieder. Nichtbestückte Entladewiderstände für den Kondensator sowie handgelötete Platinen mit überwiegend bedrahteten Bauteilen bilden den Regelfall ab. Durch den oftmals vorgesehenen aber nicht bestückten Entladewiderstand des Kondensators besteht die Möglichkeit, beim Austausch der Lampe oder bei der Verwendung in einer Leuchte mit 230 V-Stecker nach dem Ziehen des Steckers an ebendiesem einen elektrischen Schlag zu bekommen. Weitere entscheidende Nachteile dieser EVG-Technologie sind die fehlende Stromregelung, welche jedoch für die Lebensdauer der LEDs von entscheidender Bedeutung ist, sowie der hohe Flicker. Der Flicker entsteht durch die Ausnutzung des kapazitiven Blindwiderstandes als strombegrenzendes Element des Vorwärtsstroms der LED, welcher erst nach Erreichen der Mindestspannung der LED fließt. Er führt dazu, dass die LED somit an einer 50 Hz-Netzspannung 100 mal pro Sekunde an und wieder ausgeht. Wird das EVG für eine Lebensdaueranalyse als Blackbox betrachtet, ist das Kondensatornetzteil nicht nur durch den Flicker auf der Sekundärseite, sondern auch durch einen geringen Leistungsfaktor im Bereich von 0,3 bis 0,5 an der Primärseite gut zu erkennen.



**Abbildung 4.4:** Kondensatornetzteil



**Abbildung 4.5:** Buck Converter



**Abbildung 4.6:** Flyback Converter

Deutlich besser als das Kondensatornetzteil ist der Buck Converter, welcher in den Leistungsbereichen von 3 bis 5,5 W vorgefunden wird. In **Abbildung 4.5** ist gut zu erkennen, dass für diesen Converter ein mittlerer Bauteilaufwand nötig ist und auch die Verarbeitungsqualität im Mittelfeld rangiert. Das Preissegment, welches von diesem EVG-Typ abgedeckt wird, reicht von 15 bis 20 €. Bedeutend besser im Hinblick auf die Lichtqualität sowie die Lebensdauer der LED ist die Stromregelung, welche mit dem Buck Converter realisiert wird. Durch den Konstantstrom durch die LED wird diese optimal betrieben und es entsteht keinerlei Flicker-Effekt. Ein entscheidender Nachteil des Buck Converters ist jedoch die analog zum Kondensatornetzteil fehlende galvanische Trennung zwischen Netzseite und LED. Daher besteht insbesondere bei Beschädigungen an der Lampe ein erhöhtes Gefahrenpotential.

Die größte Gruppe der vorgefundenen Schaltungstopologien stellen die Flyback Converter dar. Diese lassen sich jedoch ausschließlich in hochpreisigen LED-Systemen im Preissegment zwischen 20 und 50 €

vorfinden. Die Vorschaltgeräte mit dieser Schaltungstopologie sind im Normalfall maschinell auf SMD-Basis gefertigt und nur große, nicht als SMD-Version verfügbare Bauteile werden in bedrahteter Ausführung bestückt. Bedingt durch die in **Abbildung 4.6** ersichtliche große Bauteilanzahl weisen diese Vorschaltgeräte im Vergleich zu den anderen EVGs eine deutlich größere Temperaturabhängigkeit auf. Aus diesem Grunde ist die Sensitivität des Temperatureinflusses auf das EVG im Betriebspunkt besonders zu beachten. Ein wesentlicher Vorteil des Flyback Converters ist die Konstantstromregelung des LED-Stroms mit netzseitiger Leistungsfaktorkorrektur. Des Weiteren verfügen diese Vorschaltgeräte in der Regel über umfangreiche Schutzmechanismen wie Überlast-, Übertemperatur- und Kurzschlusschutz. Auch eine intelligente Regelung wie beispielsweise eine Korrektur der LED-Lichtstromdegradation durch Anhebung des Ausgangsstroms ist durch den ohnehin nötigen Controller einfach zu realisieren. Nachteilig sind jedoch der hohe Bauteilaufwand, das daraus resultierende erhöhte Bauvolumen und Gewicht sowie insbesondere die hierdurch verursachten hohen Herstellungskosten. Ein wesentlicher Vorteil des Flyback Converters ist die vollständige galvanische Trennung zwischen Netz- und LED-Seite, sodass das Risiko eines elektrischen Schlages deutlich minimiert wird.

### **4.3 AUFBAU EINES LANGZEITMESSSTANDES ZUR GENERIERUNG VON VALIDIERUNGSDATEN**

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Erstellung einer validen Lebensdauerprognose von EVGs für LED-Retrofits anhand von Kurzzeitmessungen. Da die entwickelte Methode und insbesondere deren Prognoseergebnisse validiert werden müssen, sind belastbare, reale Lebensdauerdaten zur Überprüfung unerlässlich. Aus diesem Grunde wird ein Langzeitmessstand zur Ermittlung realer Lebensdauerdaten aufgebaut.

Diesem Alterungstest zur Bestimmung der Lebensdauer von LED-Systemen werden zehn verschiedenartige LED-Systeme mit einer jeweiligen Stichprobengröße von 20 Mustern unterzogen. Die Auswahl der zehn LED-Systeme erfolgt unter dem Gesichtspunkt, eine breite Marktpalette von LED-Retrofits in der Allgemeinbeleuchtung abzubilden, sowohl mit Blick auf finanzielle als auch auf technische Gesichtspunkte. Da LED-Retrofits im Consumerbereich eine dominierende Marktstellung vorhergesagt wird, liegt auf diesen Systemen der Untersuchungsschwerpunkt [20]. Untersucht werden acht LED-Retrofit-Systeme mit der Lichtfarbe Weiß in einem Preissegment zwischen 10 und 50 €. Bei der Auswahl der zu untersuchenden Systeme wird außerdem darauf geachtet, die typischen EVG-Topologien handelsüblicher LED-Retrofits abzubilden. Um außerdem der Zukunftsvision des Zhaga Konsortiums, einen einheitlichen LED-Standard zu generieren und diesen in den Markt einzuführen, gerecht zu werden, wurden neben den acht LED-Retrofits zwei Light-Engine-

Systeme untersucht. Diese bestehen jeweils aus einem Light-Engine-Modul, einem Kühlkörper und einem separaten EVG.

Die konstruktiven Anforderungen an den Langzeitmesstand ergeben sich zum einen aus den Vorgaben der IES LM-80-08 [21] und zum anderen aus den örtlichen Gegebenheiten.

Demnach sind die folgenden Umgebungs- und Betriebsbedingungen zu berücksichtigen:

- Versorgungsspannung und Spannungsform
- Temperatur und Feuchte
- Luftströmungen
- Ausrichtung und Abstand der LED-Systeme
- Brandschutz und elektrische Sicherheit
- Mechanische Schwingungen

Der letztgenannte Punkt wird durch konstruktive Maßnahmen derart gelöst, dass durch die Wahl des Aufstellungsorts und die freistehende Regalkonstruktion die einzige Verbindung zum Gebäude über GummifüÙe besteht. Schwingungen und Vibrationen der Umluftkühlung oder des Steuerracks können entsprechend nicht auf die Regalkonstruktion und somit die LED-Systeme übertragen werden.

Eine besondere Herausforderung stellt die elektrische Versorgung der LED-Systeme dar. Spannungsspitzen oder Schwankungen der Netzspannung können einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer der LED-Systeme haben. Um diesen ungewollten und nicht reprodu-

zierbaren Einfluss auszuschließen, müssen die LED-Systeme an konstanten 230 V AC betrieben werden. Hierfür kommt eine Lösung mit unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) zum Einsatz. Die eingesetzten Online-USVs richten die bauseitige Netzspannung gleich und speisen damit einen batteriegestützten Gleichspannungszwischenkreis. Die Spannung dieses Zwischenkreises wird anschließend von einem microcontrollergesteuerten Wechselrichter in eine konstante Ausgangsspannung von 230 V AC mit 50 Hz gewandelt. An dieser konstanten Ausgangsspannung von insgesamt drei USVs werden die LED-Systeme unter reproduzierbaren Versorgungsbedingungen betrieben.

Vor- und Nachteil zugleich an dieser Lösung ist jedoch, dass die batteriegestützten USVs auch Netzunterbrechungen überbrücken können. So haben zwar kurzzeitige Unterbrechungen der Netzspannung keinerlei Auswirkungen auf den Messstand, jedoch muss dies im Hinblick auf die elektrische Sicherheit besonders beachtet werden. Bauseitige Notabschaltungen sind durch die USVs und die Batteriepufferung wirkungslos, weshalb gesonderte Sicherheitsabschaltungen vorgesehen werden müssen. Um eine sichere Freischaltung des Messstandes im Gefahrenfall zu gewährleisten, ist eine Not-Aus-Abschaltung auf der Primär- und der Sekundärseite der USVs installiert. Diese trennt bei Betätigung eines Not-Aus-Schalters sämtliche Mess- und Lampenstromkreise sicher von den Spannungsversorgungen ab. Zusätzlich sind alle Lampenstromkreise über Fehlerstromschutzschalter für den Fehlerfall gegen unzulässig hohe

Berührungsströme gesichert. Diese Maßnahmen sollen etwaige gefährliche Stromunfälle verhindern.

Bedingt durch die extreme Temperaturabhängigkeit der Lebensdauer der LED-Systeme ist die Umgebungstemperatur neben der elektrischen Versorgung die Einflussgröße mit der stärksten Beeinflussung der Lebensdauer. Daher muss die Umgebungstemperatur, unter der die LED-Systeme getestet werden, reproduzierbar und möglichst konstant gehalten werden. Außerdem ist darauf zu achten, dass weder die freie Konvektion der LED-Systeme behindert, noch eine erzwungene Konvektion durch die Raumtemperierung hervorgerufen wird. Außerdem ist der Messstand so zu gestalten, dass die verschiedenen Messplätze mit einheitlichen, möglichst geringen Luftströmungen beaufschlagt werden. Die Luftmenge, welche die LED-Systeme überströmt, beeinflusst die Wärmekonvektion an der Oberfläche des LED-Systems erheblich, was bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten zu einem positionsabhängigen Einfluss auf die Lebensdauer führen würde. Daher wird der Messstand mit einer wasserbasierten Umluftkühlung ausgestattet, welche über eine Zwischendecke und Schlitzausströmungen an den vier Raumseiten eine laminare, walzenartige Durchströmung des Raumes gewährleistet. Der Einsatz einer wasserbasierten Umluftkühlung ist von entscheidender Bedeutung, da wasserbasierte Kühlgeräte im Gegensatz zu direktverdampfenden Kühlgeräten die Leistung linear im Bereich von 0 – 100 % regeln können. Dadurch ist es möglich, die Temperatur in jedem Belastungsfall auf 25 °C und einer Regelabwei-

chung von  $\pm 1$  K zu halten. Bedingt durch den eingeschränkten Leistungsregelbereich und die daraus resultierende Taktung von direktverdampfenden Kühlgeräten wäre die geforderte Temperatur in weiten Leistungsbereichen der Klimaanlage nur mit unzulässig hohen Temperaturabweichungen möglich.

In der IES LM-80-08 sind Lichtstrommessungen alle 1000 h vorgesehen [21]. Hierfür müssen die Lampen aus dem Messstand entnommen und der Lichtstrom, die Temperatur und die elektrischen Eingangsdaten der jeweiligen LED-Systeme im Labor gemessen werden. Dabei soll weder das Entnehmen der Systeme einen mechanischen Einfluss auf die Lebensdauer haben, noch sollen die Wiederholungsmessungen durch etwaige Ungenauigkeiten beim Anbringen des Temperaturmessfühlers oder der Positionierung innerhalb der U-Kugel bei der Lichtstrommessung beeinflusst werden. Deshalb werden die LED-Systeme wie in **Abbildung 4.7** ersichtlich auf einheitlichen Trägerplatten mit einer Größe von 25x30 cm jeweils mit einem dauerhaft angebrachten NTC-Temperaturmessfühler montiert.



**Abbildung 4.7:** Standardisierter Messplatz im Langzeitmessstand

Die Fühlerleitung des Temperatursensors und die Spannungsversorgung werden über zwei separate Steckverbinder herausgeführt. Der Steckverbinder der Spannungsversorgung verfügt über zwei zusätzliche Pins, um eine separate Messung der tatsächlich am Sockel anliegenden Spannung zu ermöglichen. Dieses Messsignal ist für eine präzise Leistungsmessung sowie für den eingesetzten Netzspannungskonstanter während der Messung in der U-Kugel erforderlich. Über die beiden Steckverbinder werden die LED-Systeme sowohl während der Messung in der U-Kugel als auch während des Betriebes im Langzeitmessstand kontaktiert. Somit können mechanische Einflüsse auf die LED-Systeme während der Entnahme aus dem Messstand und während der Messungen in der U-Kugel auf ein Minimum reduziert werden. Die Anordnung der LED-Systeme im Messstand sowie die Montage auf den Trägerplatten ist in **Abbildung 4.8** gut ersichtlich.



**Abbildung 4.8:** Langzeitmessstand

Der Betrieb der LED-Systeme erfolgt im Messstand mit einer Stichprobengröße von 20 Mustern je LED-System, welche jeweils in zwei Teilgruppen aufgeteilt sind. Jeweils zehn Muster eines LED-Systems werden im Dauerbetrieb getestet, während die übrigen zehn Muster getaktet betrieben werden, um neben der effektiven Lebensdauer ebenfalls die Schaltfestigkeit und etwaige Probleme durch thermische Zyklen zu erkennen. Die Zeitdauer der Ein- und Auszyklen wird idealerweise nicht pauschal angesetzt, sondern für jedes System individuell festgesetzt. Hierfür wird in einem Vorversuch für jedes LED-System die Zeitkonstante ermittelt, in der sich das System auf 90 % aufwärmt bzw. um 90 % abkühlt, um in der zur Verfügung stehenden Zeit die maximale Anzahl an Schaltzyklen zu testen.

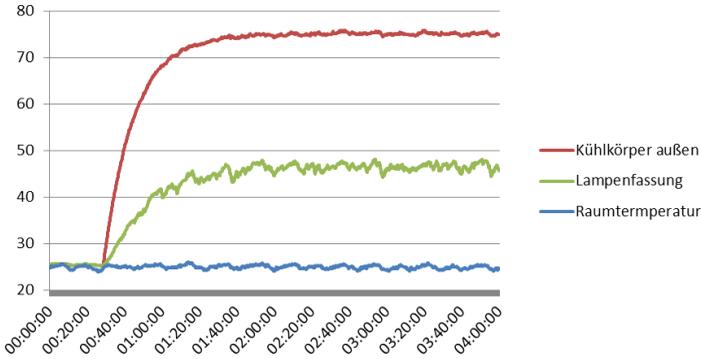
#### **4.4 ERMITTLUNG DES EVG-BETRIEBSPUNKTES IM SYSTEM**

Ausgangsbasis für die gesamte Untersuchung und die Erstellung einer Lebensdauerprognose ist die Eingangscharakterisierung der Systeme

und die daraus resultierende Ermittlung des Betriebspunktes des EVGs im System bei Nennbedingungen. Diese Eingangscharakterisierung ist für die spätere Nachbildung der realen Betriebsbedingungen der Aufhängepunkt und dient außerdem zur Rückführbarkeit der Messergebnisse auf die tatsächlichen Nenn-Betriebsbedingungen.

Hierfür werden die Systeme in einem ersten Schritt freibrennend unter definierten, konstanten Laborbedingungen bei  $25\text{ °C} \pm 1\text{ K}$  betrieben. Zur Spannungsversorgung der LED-Systeme kommt ein 230 V-Netzspannungskonstanter zum Einsatz. Dabei werden die äußerlich zugänglichen elektrischen Eingangsparameter sowie die Oberflächentemperatur der Systeme an einem individuell festgelegten Messpunkt aufgenommen. Aufgenommen werden die zeitlich veränderlichen Messgrößen sowie die sich im stationären, eingeschwungenen Betrieb einstellenden Messpunkte.

Der Einschwingvorgang eines Systems ist exemplarisch in **Abbildung 4.9** dargestellt.



**Abbildung 4.9:** Thermischer Einschwingvorgang einer Philips Master LED-Bulb

Anschließend wird das LED-System zerlegt und an repräsentativen Bauteilen des EVGs werden Kontaktfühler platziert. Entscheidend ist, dass diese Referenzfühler mit geringstmöglichen Modifikationen am System angebracht werden. Hierfür sind aufgrund der geringen Baugröße sowie der verhältnismäßig geringen thermischen Leitfähigkeit Thermo-Mantelelemente ideal geeignet. Diese lassen bei Verwendung einer galvanisch getrennten Messstellenankopplung mit eigener Vergleichsstelle auch die Temperaturmessung unter Spannung stehender Bauteile zu. Dabei ist jedoch unbedingt darauf zu achten, dass das Mantelelement abseits des Messpunktes mit einer ausreichend spannungsfesten Isolierung wie beispielsweise einer PTFE-Ummantelung gegen Kurzschlüsse gesichert ist. Darüberhinaus hilft eine PTFE-Ummantelung durch ihre relativ geringe thermische Leitfähigkeit, die Auswirkungen auf die Messstelle gering zu halten.

Eine exemplarische Anbringung der Referenzfühler ist wie in **Abbildung 4.10** besonders an temperaturempfindlichen Bauteilen und an Bauteilen mit entsprechender Eigenerwärmung zu empfehlen. Insbesondere an Elektrolytkondensatoren, welche eine häufige Ausfallursache von EVGs darstellen, ist die Anbringung eines Messfühlers an einem Anodenbeinchen neben der Oberflächenmessung ein idealer Messpunkt.



**Abbildung 4.10:** Anbringung der Referenzfühler an den Bauteilen

Die Temperatur am Anodenbeinchen lässt im Gegensatz zur Oberflächentemperatur deutlich validere Rückschlüsse auf die für die Lebensdauer relevante Kerntemperatur des Elektrolytkondensators zu. Somit wird die Eigenerwärmung des Kondensators durch Stromrippel und den ESR an dieser Messstelle zuverlässig mit berücksichtigt.

Anschließend wird das LED-System mit am EVG angebrachten Messfühlern wieder zusammengefügt und somit idealerweise in den

Ursprungszustand versetzt. Ob sich die Anbringung der Messfühler auf den Betriebspunkt des Systems auswirkt, zeigt ein Vergleich des Einschwingvorgangs sowie der sich statisch einstellenden Oberflächentemperatur des LED-Systems und der elektrischen Eingangsparameter mit den Messungen der ersten Charakterisierung.

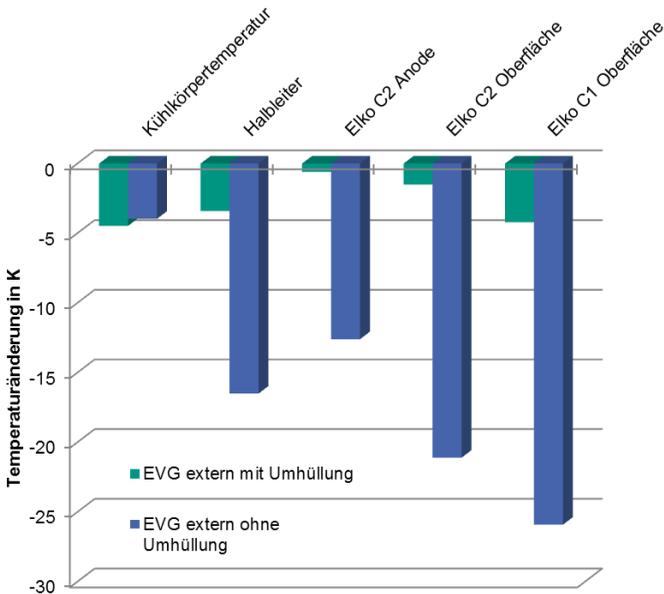
Liegen diese Messergebnisse hinreichend nahe beieinander, können die Temperaturen im Inneren des LED-Systems und somit die Referenztemperaturen des EVGs bestimmt werden und bilden die Basis für weitere Lebensdaueruntersuchungen am EVG.

Anhand der ermittelten Betriebsdaten im eingeschwungenen Betriebszustand des unmodifizierten Systems lassen sich somit die weiteren Analyseschritte überprüfen. Weichen die Betriebsdaten bei den nachfolgenden Analyseschritten von den initialen Messdaten ab, so wirken sich die vorgenommenen Änderungen derart stark auf das System aus, dass diese ebenfalls zu fehlerhaften Lebensdauerprognosen führen können. Daher sind diese Basisdaten für die Validierung der weiteren Schritte unerlässlich.

## **4.5 NACHBILDUNG DER THERMISCHEN BETRIEBSBEDINGUNGEN**

Die thermische Charakterisierung des EVGs ist ein wesentlicher Schlüssel zu einer validen Lebensdauerprognose. Um die Temperaturen der Einzelbauteile zu ermitteln, sind jedoch umfangreiche Modifikationen am LED-System erforderlich, da die Elektronik fest im

System verbaut und die Temperaturen der Einzelbauteile im eingebauten Zustand unzugänglich sind. Das übliche Vorgehen an dieser Stelle ist, die Elektronik aus dem LED-System zu entnehmen und anschließend thermisch zu charakterisieren. Dadurch ändern sich jedoch die Betriebstemperatur und der Arbeitspunkt des EVGs erheblich. Zum einen wird das EVG unter einer anderen Temperatur betrieben und zum anderen kann der daraus resultierende Einfluss auf den Arbeitspunkt zu anderen Verlusten und einer Änderung der Gesamtleistung des Systems führen.



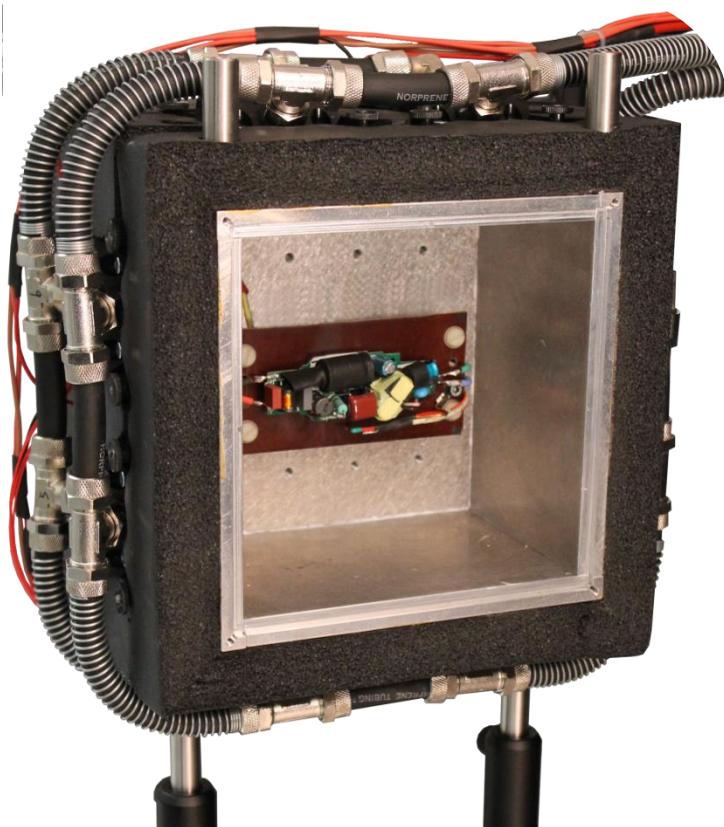
**Abbildung 4.11:** Einfluss auf die Bauteiltemperaturen bei Änderung der EVG-Betriebsbedingungen

Zur Verdeutlichung der Auswirkung auf die Temperaturen der Bauteile bei Modifikationen am Gesamtsystem werden in **Abbildung 4.11** drei Messungen zueinander in Beziehung gesetzt. Hierfür werden in einer ersten Initialmessung mittels Kontaktfühlern charakteristische Temperaturen des unmodifizierten Systems ermittelt. Anschließend wird das EVG aus dem System entnommen und die sich einstellenden Änderungen der Bauteiltemperaturen, grün dargestellt, werden ermittelt. In einem zweiten Schritt wird zusätzlich die Papierummantelung des EVGs entfernt und ebenfalls die Änderung der Temperaturen gegenüber der Initialmessung, in blau, aufgetragen. Es lässt sich deutlich erkennen, dass ein externer Betrieb des EVGs ohne Berücksichtigung der Umwelteinflüsse zu erheblichen Änderungen der Einzeltemperaturen führt.

Je nach EVG-Topologie können sich die Gesamtverluste innerhalb des EVGs in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur reduzieren oder erhöhen. Die Temperatur des EVGs hat jedoch nicht nur Einfluss auf die Gesamtverluste, sondern auch auf die Verteilung der Verluste innerhalb des EVGs. Aus diesem Grund und wegen des fehlenden Wissens über diese Verschiebung ist ein Ansatz, welcher das Problem nahezu vollständig ausräumt, die Nachbildung der thermischen Betriebsbedingungen. Eine theoretische Korrektur der Bauteiltemperatur ist somit überflüssig und es wird die Möglichkeit geschaffen, die Temperaturen unter annähernd realen Betriebsbedingungen zu ermitteln.

Zu diesem Zweck wird eine Thermobox entwickelt, welche die Nachbildung der thermischen Betriebsbedingungen des EVGs

ermöglicht. Um die baulichen Eigenschaften der zu untersuchenden LED-Systeme so weit wie möglich zu berücksichtigen, wird die Thermobox hinsichtlich Volumen und Oberfläche der Innenseite an die LED-Systeme angepasst. Abbildung 4.12 zeigt die Thermobox mit einem auf einer Isolierplatte eingesetzten EVG einer Philips Master LEDbulb MV.

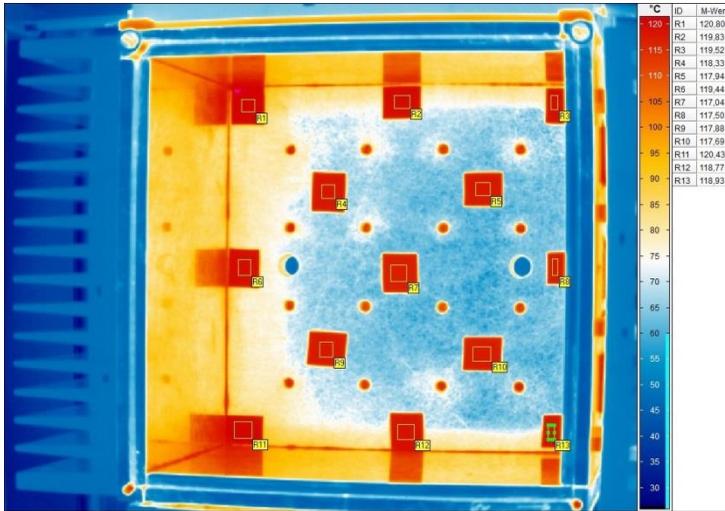


**Abbildung 4.12:** Thermobox mit eingesetztem EVG

Die für diese Testmethode entwickelte Thermobox verfügt über acht wassergekühlte Peltierelemente, welche eine innere Kammertemperatur von  $-10\text{ °C}$  bis  $+150\text{ °C}$  ermöglichen. Durch die Verwendung eines hochpräzisen Temperaturcontrollers für Peltierelemente der Firma Newport lässt sich eine Temperaturstabilität von  $\pm 0,01\text{ K}$  erreichen [22].

Im Gegensatz zu konventionellen Klimakammern ist das Testvolumen hinsichtlich der Baugröße an übliche EVGs für LED-Retrofits einschließlich der EVGS für Light-Engines angepasst und die Temperatur im Inneren der Thermobox wird rein über eine gleichmäßige Oberflächentemperatur der Innenwände erreicht. Daher ist der in konventionellen Klimakammern übliche Lüfter über den gesamten Leistungsbereich nicht erforderlich und es erfolgt entsprechend keine erzwungene Konvektion, welche die Temperaturniveaus der Einzelbauteile negativ beeinflussen würde.

Die Gleichmäßigkeit der Oberflächentemperatur im Inneren der Box wird mittels Thermografie vor einer Beschichtung der Box-Innenwände validiert. Hierzu werden Aufkleber zur Temperaturmessung mit einheitlichem Emissionskoeffizienten auf der Rückwand der Thermobox platziert und so die Temperaturverteilung an der Rückwand ermittelt. Das Ergebnis dieser Messung zeigt **Abbildung 4.13**. Die Messung der Gleichmäßigkeit der Rückwandtemperatur ist daher von besonderer Bedeutung, da die Rückwand im Gegensatz zu den Seitenwänden nicht gesondert über Thermoelemente temperiert wird, sondern durch Wärmeleitung über die Seitenwände eingebunden ist.



**Abbildung 4.13:** Gleichmäßigkeit der Rückwandtemperatur der Thermobox

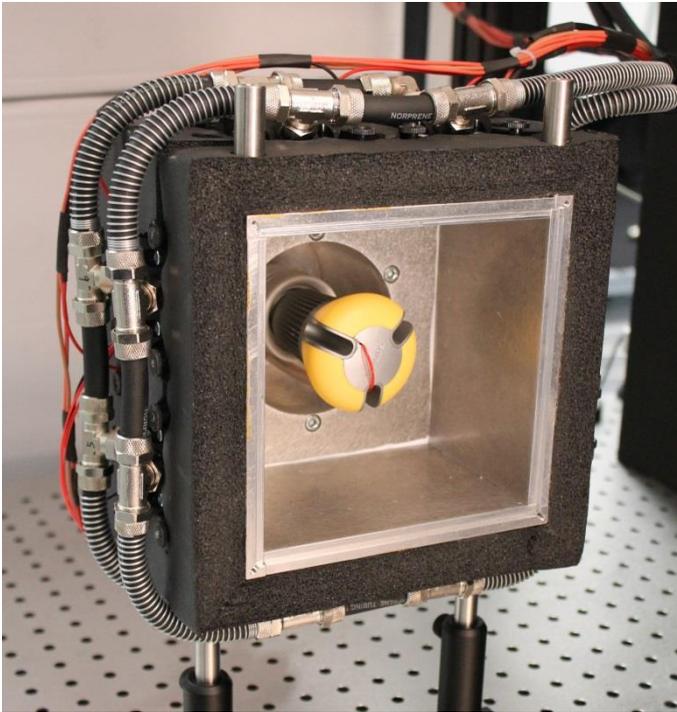
Anhand der Messstellen ist gut ersichtlich, dass bei einer eingestellten Boxtemperatur von 120 °C und ohne Deckel an der Vorderseite an der unbeheizten Rückwand der Thermobox eine maximale Abweichung der Oberflächentemperatur in der Mitte der Box von 3,7 K entsteht. Die maximale Abweichung verringert sich jedoch, sobald die Box durch einen Deckel verschlossen und somit die Konvektion und Wärmestrahlung an die Umgebung unterbunden wird.

Um den Emissionskoeffizienten im Inneren der Box an die üblichen Einsatzbedingungen von EVGs anzupassen, wird das Innere der Box mit Ruß beschichtet. Ruß hat einen Emissionskoeffizienten von 0,95 bis 0,96 und liegt somit ideal in der Nähe des Emissionskoeffizienten von

Elektro-, Isolier- und Schutzlacken mit 0,94 und dem Emissionskoeffizienten von Kunststoffen wie PVC mit 0,93 bis 0,94 [23]. Außerdem bietet Ruß den Vorteil, dass sich dieser leicht und homogen auf die Oberflächen auftragen lässt und ebenso leicht wieder entfernt werden kann. Somit lässt sich die Thermobox bei Bedarf auch leicht an andere Emissionskoeffizienten anpassen.

Durch eine Öffnung im Deckel der Thermobox, welche mit einem infrarottransmittierenden Fenster gegen Konvektion zum Raum hin luftdicht verschlossen ist, lassen sich somit Thermografiemessungen unter Nachbildung der thermischen Betriebsbedingungen durchführen.

Des Weiteren ermöglicht die Box durch ihre auf LED-Retrofits angepasste Baugröße und die Austauschbarkeit der Rückwand, wie in **Abbildung 4.14** gezeigt, den Einbau kompletter LED-Retrofits. Somit kann auch der Temperatureinfluss auf das Gesamtsystem analysiert werden.



**Abbildung 4.14:** Analyse des Temperatureinflusses auf das Gesamtsystem

#### 4.6 CHARAKTERISIERUNG DER ÜBERTRAGUNGSTRECKE

Vorteil der Thermografiemessung ist, dass mit einer einzigen, nahezu rückwirkungsfreien und zugleich orts aufgelösten Messung die Temperaturen aller Bauteile eines EVGs bestimmt werden können. Allerdings ist die Genauigkeit der Messwerte neben der Kenntnis der

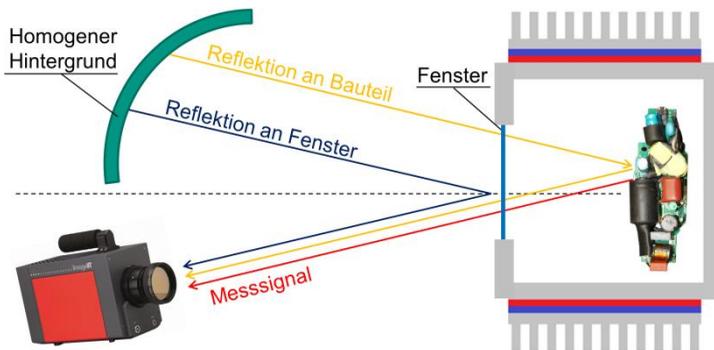
Emissionskoeffizienten entscheidend von der Güte der Charakterisierung der Übertragungsstrecke abhängig.

Die Übertragungsstrecke zwischen den Bauteilen und der Thermografiekamera besteht bei dem hier eingesetzten Aufbau aus dem Luftraum zwischen den Bauteilen und dem optischen Fenster, dem optischen Fenster an sich und dem Luftraum zwischen optischem Fenster und der Thermografiekamera. Die Übertragungsstrecke vom Objektiv bis zum eigentlichen Sensor wird nicht näher betrachtet, da diese durch die Herstellerkalibrierung bereits berücksichtigt wird.

Die von den Bauteilen abgestrahlte Energie und die charakteristische Wellenlänge sind in erster Näherung ausschließlich von der Temperatur abhängig. Diese Strahlungsenergie wird im Idealfall direkt durch die Thermografiekamera gemessen und als orts aufgelöstes Temperaturprofil ausgegeben. In der Realität tritt dieses Verhalten jedoch nicht auf, sondern die Transmission des Mediums zwischen den Bauteilen und der Kamera ist nicht 100 % und an in den Strahlengang eingebrachten Bauteilen treten zusätzliche Reflektionen und Transmissionsverluste auf.

Zusätzlich überlagern sich dem eigentlichen Messsignal, wie in **Abbildung 4.15** dargestellt, unerwünschte Signalanteile, welche durch Reflektion der Hintergrundstrahlung an den Bauteilen und am optischen Fenster entstehen. Das optische Fenster ist jedoch zur Vermeidung von Konvektion unerlässlich und kann daher trotz der dadurch entstehenden Probleme nicht aus dem Strahlengang entfernt werden, auch wenn dies für die Thermografiemessungen die bessere

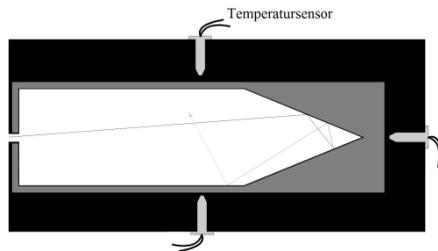
Lösung wäre. Auch wird hier direkt ersichtlich, dass für eine Korrektur des Einflusses der Hintergrundstrahlung die Temperatur der Hintergrundstrahlung sowohl bekannt als auch homogen sein muss. Bei dem eingesetzten Messaufbau wird dies durch einen schweren doppellagigen Vorhang realisiert, dessen Temperatur zwischen beiden Lagen mittels eines NTC-Temperaturfühlers parallel zu den durchgeführten Messungen erfasst wird. Der gesamte Aufbau befindet sich in einem auf  $25\text{ °C} \pm 1\text{ K}$  klimatisierten Labor.



**Abbildung 4.15:** Zusammensetzung des IR-Messsignals

Sind die Einflüsse der Übertragungsstrecke bekannt, so lassen sich die Messergebnisse um diese Einflüsse korrigieren. Die Hersteller von Thermografiekameras bieten daher häufig die Möglichkeit, über die Auswertungssoftware die Messergebnisse unmittelbar um den Einfluss der Übertragungsstrecke zu korrigieren. Jedoch ist auch für die Nutzung dieser Korrekturmöglichkeit die Kenntnis des Einflusses unabdingbar.

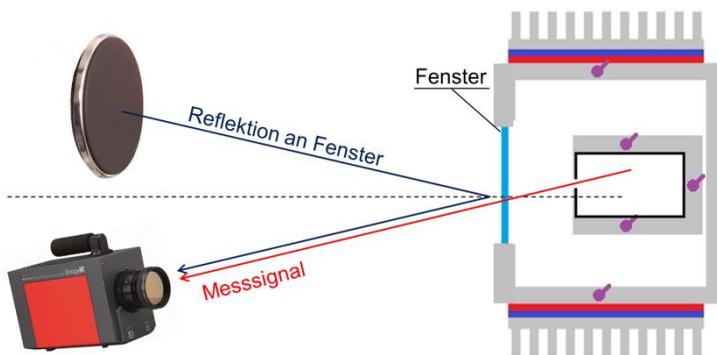
Aus diesem Grunde ist die Charakterisierung der Übertragungstrecke ein weiterer entscheidender Schritt hin zu validen Temperaturmesswerten. Die Charakterisierung erfolgt unter Zuhilfenahme eines Hohlraumstrahlers wie er in **Abbildung 4.16** schematisch dargestellt ist. Die Innenwand des Hohlraumstrahlers ist mit einer stark absorbierenden Schicht aus Ruß überzogen. Der Strahler wird in die Thermobox gestellt und durch diese auf eine homogene Temperatur gebracht. Die Temperatur wird an den eingezeichneten Messfühlern an drei Seiten aufgenommen und somit die homogene Temperierung des Strahlers überwacht.



**Abbildung 4.16:** Hohlraumstrahler

Durch die im Verhältnis zur restlichen Fläche des Strahlers sehr kleine Öffnung an der Vorderseite kann diese Störung als vernachlässigbar klein angesehen werden. Trifft ein Strahl durch diese Öffnung auf die Innenwand des Strahlers, so kommt es zu einer Vielfachreflexion und letztendlich zur Absorption des Strahls. Es ist somit praktisch ausgeschlossen, dass dieser Strahl oder ein Teil dieses Strahls den Hohlraum wieder verlässt. Damit besitzt die Öffnung des Hohlraum-

strahlers einen Reflexionsgrad von null und demnach einen Emissionsgrad von eins. Die an dieser Stelle emittierte Strahlung ist demnach ausschließlich von der Temperatur des Hohlraumstrahlers abhängig. Somit entfällt gemäß dem in **Abbildung 4.17** schematisch dargestellten Aufbau der Teil der Reflektion der Hintergrundstrahlung an der Bauteiloberfläche.

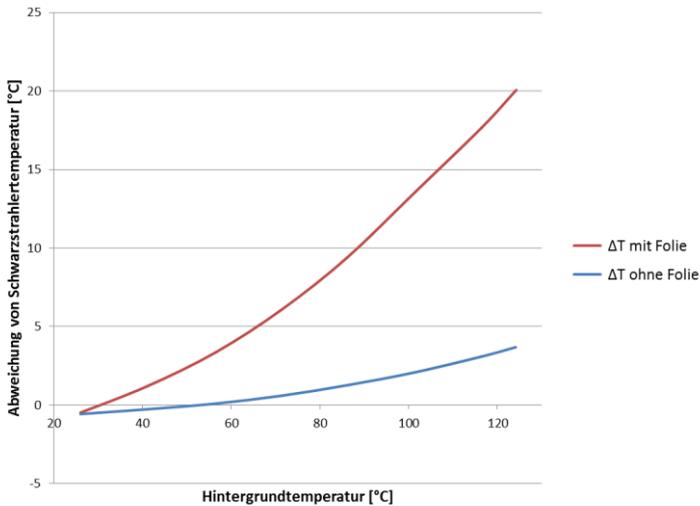


**Abbildung 4.17:** Charakterisierung der Übertragungsstrecke

Die von der Thermografiekamera detektierte Strahlung setzt sich somit aus der Temperaturstrahlung des schwarzen Strahlers, dem eigentlichen Messsignal, und der Reflektion der Hintergrundstrahlung am optischen Fenster zusammen. Beachtet werden muss, dass das optische Fenster einen bestimmten Transmissionsgrad besitzt, welcher ebenfalls berücksichtigt werden muss.

Der Reflektionsgrad des optischen Fensters lässt sich bestimmen, indem die Temperatur des schwarzen Strahlers konstant gehalten und

die Hintergrundtemperatur variiert wird. Die Variation der Hintergrundtemperatur erfolgt, wie in **Abbildung 4.17** dargestellt, durch das Einbringen einer homogen temperierbaren Heizfläche, welche in der Praxis durch eine Heizplatte mit externer PID-Temperaturregelung realisiert wurde. Das Ergebnis der Variation der Hintergrundtemperatur bei konstanter Hohlraumstrahlertemperatur zeigt **Abbildung 4.18**. Das optische Fenster ist in dem charakterisierten Versuchsaufbau durch eine über einen Rahmen gespannte dünne PE-Folie realisiert.



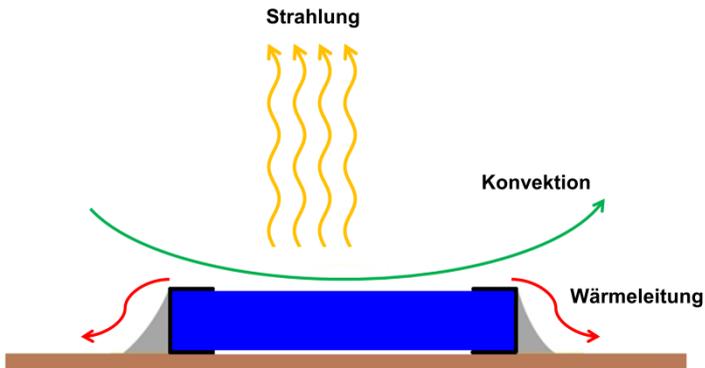
**Abbildung 4.18:** Reflektion der Hintergrundtemperatur am optischen Fenster

Gut zu erkennen ist, dass die Hintergrundtemperatur auch bei fehlender Folie einen Einfluss auf das Messsignal hat. Dies lässt sich

darauf zurückführen, dass durch Streuung und Unvollkommenheit des schwarzen Strahlers dennoch ungewünschte Signalanteile des Hintergrunds von der Kamera detektiert werden.

#### 4.7 BEWERTUNG DER WÄRMELEITUNG, DER WÄRMESTRAHLUNG UND DER KONVEKTION

Elektronische Bauteile erwärmen sich bedingt durch die in ihnen auftretenden Verluste über die Umgebungstemperatur hinaus. Dabei stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen den in den Bauteilen auftretenden elektrischen Verlusten und der über die Entwärmung abgeführten Wärmeleistung ein.



**Abbildung 4.19:** Mechanismen der Wärmeübertragung

Die wesentlichen Mechanismen zur Entwärmung von elektronischen Bauteilen sind die Wärmeleitung, die Konvektion sowie die Wärmestrahlung. **Abbildung 4.19** veranschaulicht die verschiedenen Kühlungsmechanismen.

Für den einfachsten Fall der Wärmeleitung, einer ausgedehnten wärmeleitfähigen Schicht der Dicke  $D$  mit konstanter Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und konstantem Temperaturgradienten lässt sich der Wärmestrom  $\dot{Q}_L$  wie folgt berechnen:

$$\dot{Q}_L = \lambda * A * \frac{T_B - T_U}{d} \quad (4.1)$$

Dabei entspricht die Temperatur  $T_B$  der Bauteiltemperatur und  $T_U$  der Umgebungstemperatur. Die wärmeleitfähige Schicht ist in der Elektronik üblicherweise Lötzinn, welches in erster Linie für die elektrische Kontaktierung zum Einsatz kommt, aber ebenso eine thermische Kontaktierung herstellt. Lötzinn weist eine Wärmeleitfähigkeit von  $66 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  auf, welche im Vergleich zur Wärmeleitfähigkeit von Kupfer mit  $390 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  jedoch eher gering ausfällt [24]. Da der Wärmestrom sowohl von der Kontaktierungsfläche  $A$  als auch von der Dicke der wärmeleitfähigen Schicht abhängt, muss daher für eine gute thermische Kontaktierung jeweils eine möglichst großflächige sowie zugleich dünne Lötzinnschicht vorhanden sein.

Die Entwärmung der Bauteile über Wärmeleitung spielt insbesondere bei SMD-Bauteilen und LEDs eine entscheidende Rolle. Bei bedrahteten Bauteilen wie Kondensatoren, Spulen, Widerständen usw. spielt

bedingt durch die verhältnismäßig dünnen und teilweise langen Anschlussbeinchen die Wärmeleitung durch diese lediglich eine untergeordnete Rolle.

Diese Bauteile führen die in ihnen entstehende Verlustwärme maßgeblich über Konvektion und Wärmestrahlung ab. Die Größe des Wärmestroms der Konvektion ist abhängig von der Fläche  $A$  und dem schwierig zu bestimmenden konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $h$ . Außerdem ist der konvektive Wärmestrom direkt abhängig von der Differenz der Bauteiltemperatur  $T_B$  und der Umgebungstemperatur  $T_U$ . Sind diese Parameter bekannt, lässt sich der konvektive Wärmestrom gemäß

$$\dot{Q}_K = h * A * (T_B - T_U) \quad (4.2)$$

berechnen.

Während dieser Wärmestrom linear von der Temperaturdifferenz abhängig ist, geht in den Wärmestrom, welcher über die Wärmestrahlung abgegeben wird, die Temperatur gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz mit der vierten Potenz ein. Demnach lässt sich der Wärmestrom, welcher über die Wärmestrahlung  $\dot{Q}_S$  von einem Körper an die Umgebung abgegeben wird, wie folgt berechnen:

$$\dot{Q}_S = \sigma * \varepsilon * A * (T_B^4 - T_U^4) \quad (4.3)$$

Dabei entspricht  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  der Stefan-Boltzmann-Konstante und  $\varepsilon$  dem Emissionskoeffizienten der strahlenden Fläche. Gerade der Emissionskoeffizient kann von Bauteil zu Bauteil und auch innerhalb eines Bauteils stark unterschiedlich sein und hat mit Werten zwischen  $\varepsilon = 0,4$  (blanker Elkoheber) und  $\varepsilon = 0,85$  (Schrumpfschlauchisolierung eines Elkos) einen entscheidenden Einfluss auf den Anteil der durch die Strahlung abgegebenen Wärmemenge [25].

Anhand der Gleichungen (4.1) bis (4.3) lässt sich gut erkennen, dass die Wärmeabfuhr der Bauteile zwar entscheidend von den jeweiligen Temperaturdifferenzen abhängig ist, jedoch ebenso Faktoren wie der Emissionskoeffizient und Wärmeübergangskoeffizient erheblichen Einfluss auf die Wärmeabfuhr haben. Die Wärmeleitung ist hingegen am unkritischsten, solange die Nachbildung der realen Betriebsbedingungen für eine realitätsnahe Temperatur der EVG-Platine sorgt.

Um etwaige Einflüsse auf die Bauteiltemperaturen bei der Nachbildung der realen Betriebsbedingungen zu vermeiden, muss daher zusätzliche Konvektion und Strahlung der Bauteile gegen kalte Flächen vermieden werden. Dies lässt sich gut durch ein möglichst geringes, temperiertes Testvolumen mit angepasstem Emissionskoeffizienten sowie mit möglichst kleinflächiger optischer Öffnung für Thermografiemessungen erreichen.

## **4.8 STATISCHE NACHBILDUNG DER REALEN BETRIEBSBEDINGUNGEN**

Die statische Nachbildung der realen Bedingungen unter denen das EVG im System betrieben wird, soll mittels der Thermobox umgesetzt werden und dabei den Einsatz optischer Messmethoden ermöglichen.

Diese annähernd realen Bedingungen, welche die Thermobox nachbilden soll, müssen jedoch zuerst eingestellt werden. Hierfür wird bereits während der Eingangscharakterisierung an einer möglichst repräsentativen Stelle in unmittelbarer Nähe der Elektronik mittels Kontaktfühler die EVG-Temperatur bestimmt. Dieser Referenzsensor wird nun als Regelgröße und der Messwert aus der Initialmessung als Sollgröße herangezogen. Ist das EVG in die Thermobox eingesetzt, wird die Temperatur der Box durch die Steuersoftware so lange erhöht, bis sich am Referenzfühler die gleiche Temperatur einstellt, wie sie zuvor am EVG im unmodifizierten System vorgelegen hat. Durch dieses Vorgehen wird der Systembetriebspunkt derart nachgebildet, dass keine Kenntnis über den schwer zu ermittelnden thermischen Pfad des EVGs zur Kühlkörperoberfläche vorliegen muss.

Anschließend werden nach der thermischen Stabilisierung die Temperaturen von zusätzlichen Vergleichsfühlern wie beispielsweise am Elektrolytkondensator oder am Halbleiterschalter mit den Initialwerten verglichen. Gleiches gilt für die elektrischen Kenndaten der Primärseite des EVGs. Anhand dieser Vergleiche lässt sich die Nachbildung der thermischen Betriebsbedingungen des EVGs im

Nennbetriebspunkt validieren. Abweichungen der elektrischen Betriebsparameter oder der zusätzlich erfassten Temperaturen lassen auf Fehler bei der Nachbildung schließen.

Somit ist die Möglichkeit geschaffen, optische Temperaturmessmethoden auf das EVG anzuwenden und gleichzeitig elektrische Messungen an der Schnittstelle zwischen EVG und LED durchzuführen, während sich das EVG nahezu im gleichen Betriebspunkt befindet wie in einem unmodifizierten System.

#### **4.9 DYNAMISCHE NACHBILDUNG DER BETRIEBSBEDINGUNGEN**

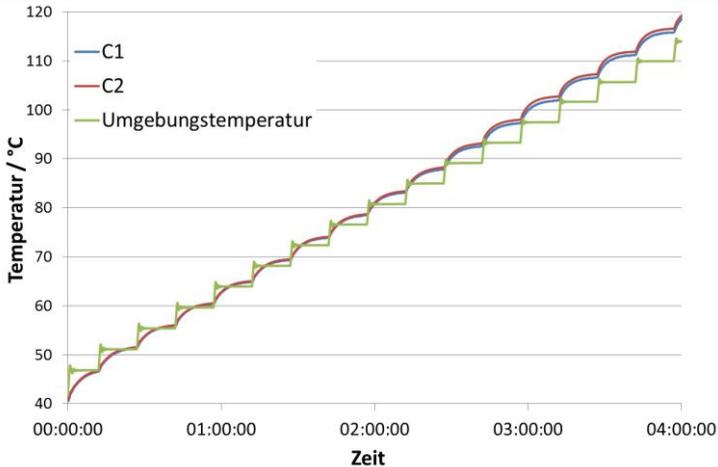
Die statische Nachbildung der Betriebsbedingungen liefert eine Aussage über den Nennbetriebspunkt wie er unter den üblichen Einsatzbedingungen des Systems zu erwarten ist. Allerdings wirken auf die zu untersuchenden Systeme äußerliche Umwelteinflüsse ein, welche diesen Betriebspunkt verschieben können. Dies können zum einen ebenfalls statische Einflüsse wie beispielsweise eine Temperaturerhöhung durch den Leuchteneinfluss sein, die durch einen Offset in der statischen Nachbildung berücksichtigt werden können. Zum anderen können diese Einflüsse jedoch ebenso dynamischer Natur sein, wie beispielsweise der Einfluss durch die Raumtemperatur, welche sich in Abhängigkeit der Tageszeit oder der Raumnutzung kontinuierlich ändert. Daher bedarf es einer Möglichkeit, diese Einflüsse ebenso charakterisieren zu können, um diese bei der

Lebensdaueranalyse zu berücksichtigen und direkte Temperaturabhängigkeiten bestimmen zu können.

Dies ist durch eine Erweiterung der Nachbildung der realen Betriebsbedingungen nach Kapitel 4.8 auf eine dynamische Nachbildung der Betriebsbedingungen möglich. Hierfür stellt die Thermobox in Verbindung mit dem digital steuerbaren Temperaturcontroller und einer hierfür entwickelten scriptingfähigen Steuersoftware auf Basis des Programms LabVIEW der Firma National Instruments die geeigneten Möglichkeiten zur Verfügung.

Ausgehend von dem statisch nachgebildeten Nennbetriebspunkt des EVGs wird die Temperatur in einem einstellbaren Bereich um die Nenntemperatur herum variiert. Eine kontinuierliche Variation hat sich dabei als nicht sinnvoll herausgestellt, da das System auf die Variation der Betriebstemperatur extrem träge reagiert. Dies liegt darin begründet, dass sich jeweils zuerst ein thermisch stabiler Betriebspunkt einstellen muss, um die Temperatureuswirkung bewerten zu können. Andernfalls führt dies zu Messwerten, welche nicht den Messwerten entsprechen, wie sie sich nach einer hinreichend langen Einschwingzeit einstellen würden.

Daher wird die Temperatur schrittweise variiert und jeweils vor der Messwertaufnahme eine Zeitverzögerung eingesetzt, welche eine thermische Stabilisierung des Systems zulässt. Exemplarisch ist in **Abbildung 4.20** die zeitkontinuierlich aufgenommene Bauteiltemperatur zweier Kondensatoren C1 und C2 bei einer schrittweisen Variation der Betriebstemperatur dargestellt.



**Abbildung 4.20:** Ermittlung der Temperaturabhängigkeit

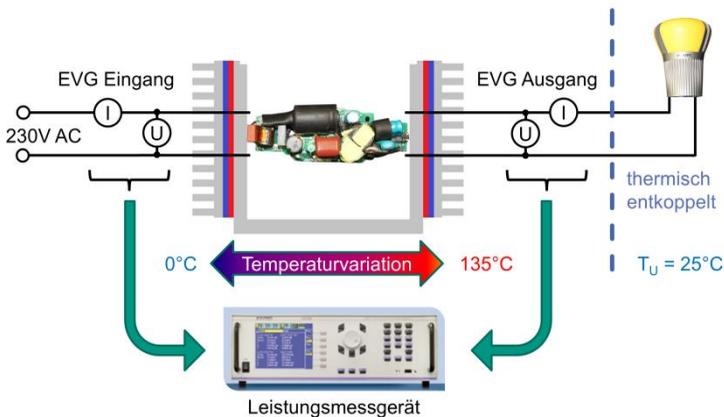
Hier ist gut zu erkennen, dass sich ein thermisch stabiler Zustand erst mit einer gewissen Verzögerung von mehreren Minuten einstellt. Dementsprechend führen derartige Messungen bei großen Temperaturbereichen und kleinen Schrittweiten zu extremen Messzeiten.

#### 4.10 EINFLUSS DER TEMPERATUR AUF DEN BETRIEBSPUNKT DES EVGs

Der statische elektrische Betriebspunkt des EVGs lässt sich bereits durch die statische Nachbildung der realen Betriebsbedingungen bestimmen. Durch die vorgestellten Methoden sind die elektrischen Kenngrößen sowohl primärseitig als auch sekundärseitig des EVGs

zugänglich und Auswirkungen durch das Einfügen der Messgeräte werden, wie in den vorherigen Kapiteln ausgeführt, weitgehend vermieden. Somit lassen sich ein- und ausgangsseitig der Strom und die Spannung zeitsynchron erfassen und daraus alle weiteren Kenngrößen wie Wirk-, Schein-, und Blindleistung, die Phasenwinkel usw. ableiten. Außerdem lässt sich somit auch der Wirkungsgrad des EVGs bestimmen.

Soll nun die Leistung des EVGs als Funktion der Temperatur bestimmt werden, so lassen sich die hierfür notwendigen Messdaten mittels der dynamischen Nachbildung der Betriebstemperatur mit dem in **Abbildung 4.21** skizzierten Aufbau ermitteln.



**Abbildung 4.21:** Aufbau zur Ermittlung des Temperatureinflusses auf den Betriebspunkt des EVGs

Durch schrittweises Durchfahren eines Temperaturprofils werden dabei diskrete elektrische Messwerte nach dem erforderlichen Einschwingvorgang bei den jeweiligen Temperaturen aufgenommen. Empfehlenswert ist es hierbei, mit größeren Temperaturschrittweiten zu beginnen und eine Stabilisierungsdauer, welche sich aus der Eingangskarakterisierung ergibt, zu wählen. Somit lässt sich ein guter Überblick verschaffen, ob eine näher zu untersuchende Temperaturabhängigkeit vorliegt.

Liegt eine entsprechende Abhängigkeit vor, so kann in besonders sensiblen Bereichen wie beispielsweise denen, in welchen sich eine starke oder sprunghafte Änderung der Kenndaten zeigt, mit kleineren Schrittweiten eine detaillierte Nachmessung durchführen. Dies stellt einen Kompromiss zwischen Messdauer und Auflösung dar, da es bedingt durch die thermischen Stabilisierungen in den jeweiligen Temperaturpunkten zu langen Gesamtmesszeiten kommt.

Typische Kenndaten dieser Messdurchführung sind Schrittweiten von 5 K und Stabilisierungszeiten von 15 bis 30 Minuten je Schritt. Empfehlenswert ist außerdem eine Analyse über den im Einsatz des Systems zu erwartenden Temperaturbereich hinaus, um etwaige starke Temperatursensitivitäten über den prognostizierten Einsatzbereich hinaus oder etwaige Temperaturprobleme oder Abschaltungen erkennen zu können.

---

## Kapitel 5

# ANALYSE

### 5.1 BESTIMMUNG DER MITTLEREN LEBENSDAUER ANHAND DER TEMPERATURVERTEILUNG

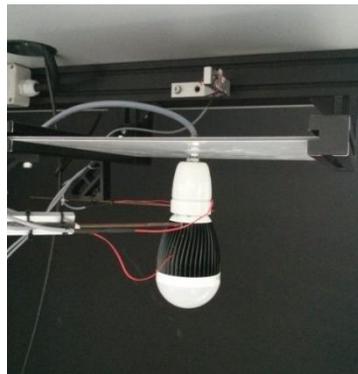
Basierend auf den in Kapitel 3 vorgestellten Methoden und gemäß der in Kapitel 4 ausgeführten Durchführung wird die Analyse exemplarisch an dem in **Abbildung 5.1** dargestellten LED-Retrofit mit Flyback Converter aufgezeigt. Eingehende Details zu den einzelnen Schritten finden sich in den jeweils vorausgegangenen Kapiteln. An dieser Stelle soll ein Gesamtverständnis für das Vorgehen zur Erstellung einer validen Lebensdauerprognose an einem konkreten Beispiel geschaffen werden.

Zunächst erfolgt die Eingangscharakterisierung, bei der die äußerlich zugänglichen elektrischen sowie thermischen Betriebsdaten des unmodifizierten Systems erfasst werden und somit der Initialbetriebspunkt ermittelt wird. Hierzu wird das System unter Laborbedingungen freibrennend bei einer Temperatur von 25 °C betrieben und der Einschwingvorgang aufgenommen. **Abbildung 5.2** zeigt den Messaufbau zur Eingangscharakterisierung mit Messfühlern am

Kühlkörper des LED-Systems und am E27-Sockel sowie Temperatursensoren zur Protokollierung der Raumtemperatur in unmittelbarer Nähe des Systems und über der Messanordnung. Der E27-Keramicksocket ist auf eine standardisierte Messplatte, welche den Anforderungen des Langzeitmessstandes entspricht, montiert. Somit kann der Aufbau für sämtliche Lampen des Langzeitmessstandes verwendet werden. Die eingangsseitigen elektrischen Nenndaten werden über ein LMG 500 der Firma ZES-Zimmer und die Temperaturwerte über ein ALMEMO Messsystem der Firma Ahlborn erfasst. Alle Messsysteme sind werkskalibriert.



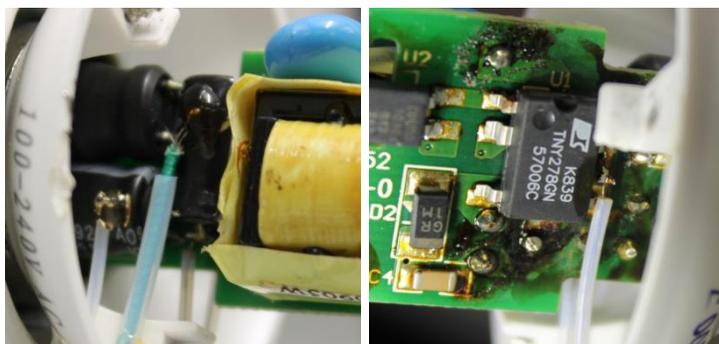
**Abbildung 5.1:** Exemplarisch untersuchtes LED-System



**Abbildung 5.2:** Eingangsschaarakterisierungsstand

Nach der Eingangsschaarakterisierung wird das System vorsichtig zerlegt, um eine Bewertung der Verarbeitungsqualität und der Bestimmung der EVG-Topologie vorzunehmen. Anschließend werden Kontaktfühler als Referenztemperatursensoren an ausgewählten Stellen der Elektronik angebracht. Dabei muss ein Sensor für die

spätere Nachbildung der realen Betriebsbedingungen an einem möglichst repräsentativen Punkt angebracht werden. Außerdem werden weitere Sensoren an besonders temperaturempfindlichen Bauteilen befestigt. Mittels dieser Sensoren kann die spätere Nachbildung der Betriebsbedingungen zusätzlich validiert werden. Eine exemplarische Anbringung der Kontaktfühler mittels UV-aushärtendem Klebstoff zeigt **Abbildung 5.3**. Zur Messung von Temperaturen an Elektronikbauteilen eignen sich, wie in Kapitel 3.2 erläutert, Thermo-Mantelelemente ideal. Diese können beispielsweise, wie in **Abbildung 5.4** gezeigt, direkt in die Lötstelle eines Schaltreglers eingebracht werden.



**Abbildung 5.3:** Klebefestigung von Kontaktfühlern  
**Abbildung 5.4:** Thermo-Mantelelement eingelötet

Bei der Montage muss jedoch darauf geachtet werden, dass das System wieder vollständig zusammengesetzt werden muss, um die Temperaturen unter Nennbetriebsbedingungen ermitteln zu können. Dies muss bei der Auswahl der Messstellen und der Leitungsführung berücksich-

tigt werden. Minimale Modifikationen zur Herausführung der Fühlerleitungen sind daher unumgänglich.

Anschließend wird das System abermals im Eingangskarakterisierungsstand in Betrieb genommen und somit werden nach der thermischen Stabilisierung die Temperaturen unter Nennbedingungen mittels der zusätzlich im Inneren des LED-Systems angebrachten Sensoren ermittelt. Dabei dienen die unveränderten Temperatursensoren aus der ersten Messung gleichzeitig zur Referenzierung des Betriebspunktes. Außerdem werden hierfür die primärseitigen elektrischen Kenndaten herangezogen. Somit lässt sich feststellen, ob die Anbringung der zusätzlichen Temperatursensoren zu ungewünschten Einflüssen geführt hat.

Somit sind die für die Nachbildung der thermischen Betriebsbedingungen relevanten Kenngrößen, die Temperatur im Inneren des LED-Systems bzw. die EVG-Referenztemperatur sowie die elektrischen Nenndaten bekannt.

In einem nächsten Schritt wird das LED-System zerlegt und anschließend das EVG aus dem LED-System entfernt. Der Rest des LED-Systems bleibt dabei möglichst unverändert. Das EVG wird, wie in **Abbildung 5.5** gezeigt, in die Thermobox eingesetzt und neben der primärseitigen Leistungsmessung ebenfalls sekundärseitig zwischen EVG-Ausgang und LED ein Leistungsmessgerät eingeschleift.



**Abbildung 5.5:** EVG in rußbeschichteter Thermobox

Vor weiteren Analyseschritten in der Thermobox sind an dieser Stelle die Emissionskoeffizienten der Bauteile, welche thermografisch analysiert werden sollen, zu bestimmen. Hierfür wird die Thermobox mit eingesetztem, nicht in Betrieb befindlichem EVG auf eine konstante und homogene Temperatur nahe der üblichen EVG-Betriebstemperatur gebracht. Ideal ist dabei eine Temperatur, welche um einige Kelvin über der EVG-Temperatur liegt, da die Bauteiltemperaturen im Betrieb ebenfalls über der Umgebungstemperatur des EVGs liegen. Um eine homogene Elektroniktemperatur zu erhalten, ist die Akklimatisierungszeit ausreichend lange zu wählen und liegt entsprechend im dreistelligen Minutenbereich. Während der

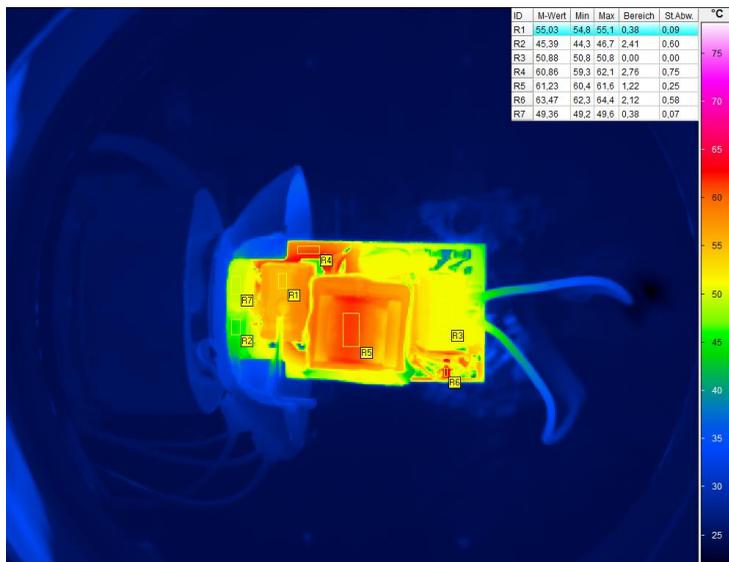
Bestimmung muss die auf Raumtemperatur befindliche Hintergrundtemperatur ebenfalls konstant und homogen sein. Dies kann beispielsweise durch einen mehrlagigen dicken Stoff mit einem Temperatursensor nahe der Vorhangoberfläche in der Reflektionsebene realisiert werden. Wird der Emissionskoeffizient auf diese Art bestimmt, muss bei der späteren Messung der Hintergrund ebenfalls die gleiche Temperatur aufweisen oder die Temperaturänderung in der Auswertungssoftware entsprechend berücksichtigt werden.

Sind die Emissionskoeffizienten der Bauteile bestimmt, wird mit der eigentlichen thermischen Charakterisierung unter der Nachbildung der realen Betriebsbedingungen begonnen. Das LED-System wird in Betrieb genommen und die im zweiten Schritt der Eingangscharakterisierung bestimmte EVG-Temperatur als Führungsgröße bzw. Sollgröße für die Regelung der Thermobox vorgegeben. Als Regelgröße dient der Messwert des Temperaturfühlers der EVG-Temperatur und als Stellgröße die Ansteuerung des Peltiercontrollers bzw. dessen Ausgangsstroms. Somit stellt sich am EVG nahezu der gleiche Betriebspunkt wie zuvor im Gesamtsystem ein.

Die Aufnahme der Temperaturmesswerte darf jedoch nicht unmittelbar nach der thermischen Stabilisierung des EVGs erfolgen, sondern es muss auch der thermische Einschwingvorgang der LED mit Kühlkörper berücksichtigt werden. Befinden sich sowohl das EVG als auch das LED-System im eingeschwungenen Zustand, können die statischen Nenntemperaturwerte, wie in **Abbildung 5.6** gezeigt, mittels Thermografie sowie durch die angebrachten Kontaktfühler bestimmt und die zugehörigen elektrischen Größen aufgenommen werden.

## BESTIMMUNG DER MITTLEREN LEBENSDAUER ANHAND DER TEMPERATURVERTEILUNG

---



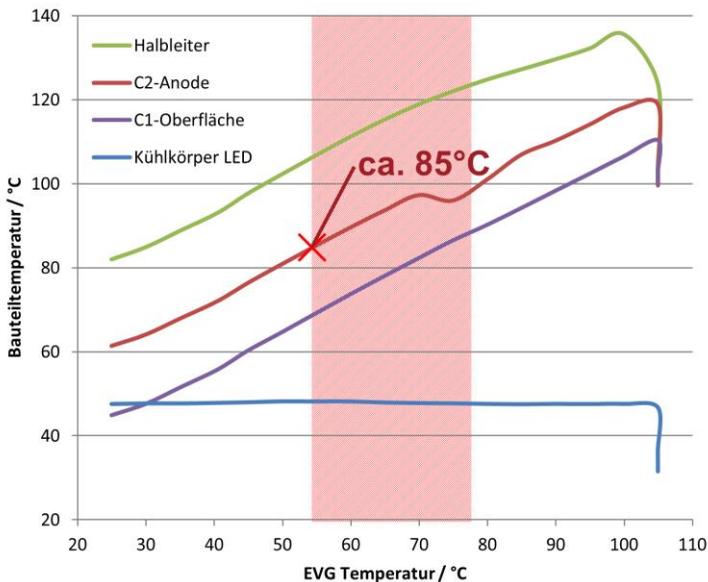
**Abbildung 5.6:** Thermografische Ermittlung der Bauteiltemperaturen

Somit lässt sich bereits eine erste Aussage über die Bauteiltemperaturen und die elektrischen Kennwerte im Nennbetriebspunkt erstellen.

Anschließend wird eine Variation der EVG-Temperatur durchgeführt, um den Einfluss der Betriebstemperatur auf die Bauteiltemperaturen zu ermitteln. Für eine Aussage über den üblichen Einsatz des LED-Systems ist eine Variation der Temperatur um den Betriebspunkt herum, wie in **Abbildung 5.7** rot schraffiert dargestellt, ausreichend. Allerdings können mit größeren Temperaturspannen leichter kritische Betriebspunkte erkannt werden. Beispielsweise ist an dem exempla-

risch analysierten System gut die thermische Abschaltung des Schaltreglers bei zu hohen Betriebstemperaturen zu erkennen.

**Abbildung 5.7** zeigt exemplarisch die Temperaturmesswerte zweier Elektrolytkondensatoren des EVGs, die Temperatur des Schaltreglers sowie die Temperatur des LED-Kühlkörpers über der Betriebstemperatur des EVGs.



**Abbildung 5.7:** Einfluss der EVG-Temperatur auf die Betriebstemperatur ausgewählter Bauteile

Durch die Nachbildung der thermischen Betriebsbedingungen entfallen etwaige theoretische Korrekturfaktoren, welche auf die

Temperaturwerte der Bauteile angewendet werden müssten, und es können somit die gemessenen Werte direkt für die Abschätzung der Lebensdauer herangezogen werden. Im Idealfall, bei einem Betrieb des LED-Systems bei 25 °C entsprechen die Bauteiltemperaturen genau dem Beginn des rot schraffierten Bereichs bei einer EVG-Temperatur von 55 °C. Der rot schraffierte Nennbetriebsbereich ergibt sich aus der Berücksichtigung der Leuchteneinflüsse sowie der Umgebungseinflüsse wie beispielsweise der Montage in besonders warmen Bereichen eines Raumes.

Für eine Lebensdauerprognose werden diese Angaben mit den temperaturabhängigen Lebensdauerangaben der Bauteilhersteller in Korrelation gebracht oder – falls entsprechende Lebensdauerangaben nicht vorliegen – mit Literaturwerten belegt. Somit kann ein Ranking der Ausfallwahrscheinlichkeiten der eingesetzten Bauteile erstellt werden. Da eine Kette jeweils nur so stark ist wie ihr schwächstes Glied, limitieren die Bauteile mit der kürzesten Lebensdauer entsprechend die Lebensdauer des Gesamtsystems.

Wird vom Idealfall ausgegangen (Betrieb des LED-Systems bei 25 °C) weist der Kondensator C2 des exemplarisch untersuchten Systems eine Temperatur von 85 °C auf. Der Hersteller gibt für diesen Kondensatortyp eine Lebensdauer von 1000 h bei einer Betriebstemperatur von 105 °C an [26]. Ebenfalls gibt der Hersteller in einer technischen Notiz die zu erwartende Lebensdauer  $L$  bei einer von der Maximaltemperatur  $T_{max}$  abweichenden Betriebstemperatur  $T_a$  an [27].

$$L = L_0 * 2^{\frac{T_{max}-T_a}{10}} \quad (5.1)$$

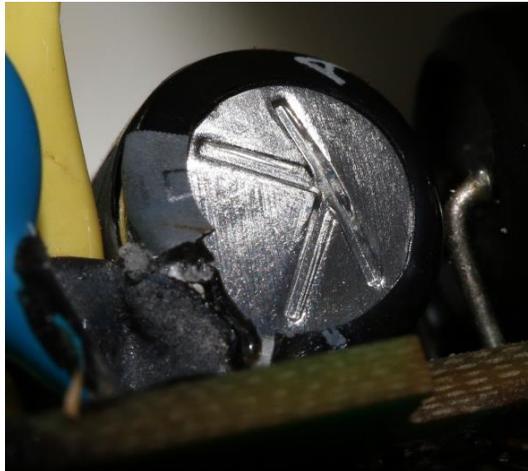
Demnach verlängert sich die Lebensdauer des eingesetzten Kondensators um den Faktor vier und es resultiert hieraus eine Gesamtlebensdauer unter den vorliegenden Betriebsbedingungen von 4000 h.

Diese prognostizierte Lebensdauer wurde durch die Messungen im Langzeitmessstand bestätigt. Im Langzeitmessstand wurden 20 Exemplare dieses Systems unter konstanten Betriebsbedingungen von 25 °C betrieben. Hierbei sind alle zehn kontinuierlich betriebenen Systeme nach einer Betriebszeit zwischen 4000 h und 7000 h ausgefallen. Auch die zehn diskontinuierlich betriebenen Systeme, welche mit einem Duty Cycle von 50 % betrieben wurden, wiesen nach Abzug der Ausschaltzeiten diese Lebensdauer auf. **Abbildung 5.8** zeigt links die bereits gelichtete Testreihe im Langzeitmessstand nach ca. 8000 Betriebsstunden.



**Abbildung 5.8:** Langzeitmessstand im Betrieb mit bereits defekten LED-Systemen in der linken Reihe

Bei allen Ausfällen dieses Systems zeichnete sich hierfür der durch die Analyse prognostizierte Defekt des Elektrolytkondensators verantwortlich. **Abbildung 5.9** zeigt den sogar äußerlich gut erkennbaren Schaden am Aluminiumbecher des Kondensators eines defekten Systems aus dem Langzeitmesstand.



**Abbildung 5.9:** Defekter Elektrolytkondensator als Ausfallursache des exemplarisch analysierten EVGs

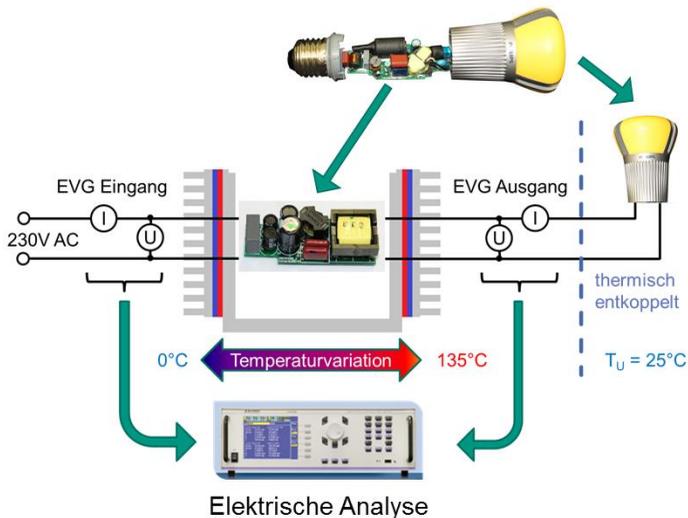
## 5.2 SYSTEMVERHALTEN BEI SICH ÄNDERNDER EVG-TEMPERATUR

Zusätzlich zur Lebensdauerprognose unter statischen Betriebsbedingungen, sei es freibrennend bei Nenntemperatur oder unter Berücksichtigung eines realen Betriebspunktes beim Einsatz in einer Leuchte, ermöglicht die Methode der Nachbildung der realen Betriebsbedingungen des EVGs zusätzlich eine Analyse des Systemverhaltens bei sich ändernden EVG-Temperaturen.

Das Verhalten des EVGs in Abhängigkeit von der EVG-Temperatur kann einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer des Gesamtsystems haben. Wie stark dieser Einfluss ist, kann als Temperatursensitivität bezeichnet werden. Die LED selbst weist entsprechend der LED-Kennlinie ebenfalls eine Temperaturabhängigkeit auf, was in der nachfolgenden Betrachtung jedoch nicht näher berücksichtigt werden soll, da diese umfassend in der parallel angefertigten Arbeit „Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System“ behandelt wird [28]. Durch die Methode der thermischen Trennung zwischen LED und EVG kann der Einfluss isoliert auf den Temperatureinfluss des EVGs betrachtet werden.

Dennoch wird der indirekte Einfluss auf die LED mitbetrachtet. Dieser erfolgt nicht direkt über die Temperatur des Systems, sondern über den Stromfluss, welcher durch das EVG bestimmt wird, sowie die daraus resultierenden Verluste in der LED. Die Betrachtung dieses

Einflusses erfolgt durch Analyse der Wirkleistung, welche das EVG an die LED abgibt. Außerdem wird die Eingangsleistung des Gesamtsystems gemessen und aus diesen beiden Größen werden die entsprechende Verlustleistung im EVG und dessen Wirkungsgrad ermittelt. Den prinzipiellen Aufbau zeigt **Abbildung 5.10**.



**Abbildung 5.10:** Messaufbau des Verhaltens des EVGs in Abhängigkeit der Systemtemperatur

Exemplarisch soll an dieser Stelle das Verhalten zweier verschiedenartiger EVG-Topologien beleuchtet werden. Hierzu werden ein Kondensatornetzteil und ein Flyback Converter analysiert und im Anschluss die grundlegenden Unterschiede in der Auswirkung des

temperaturbedingten Systemverhaltens auf die Lebensdauer aufgezeigt.

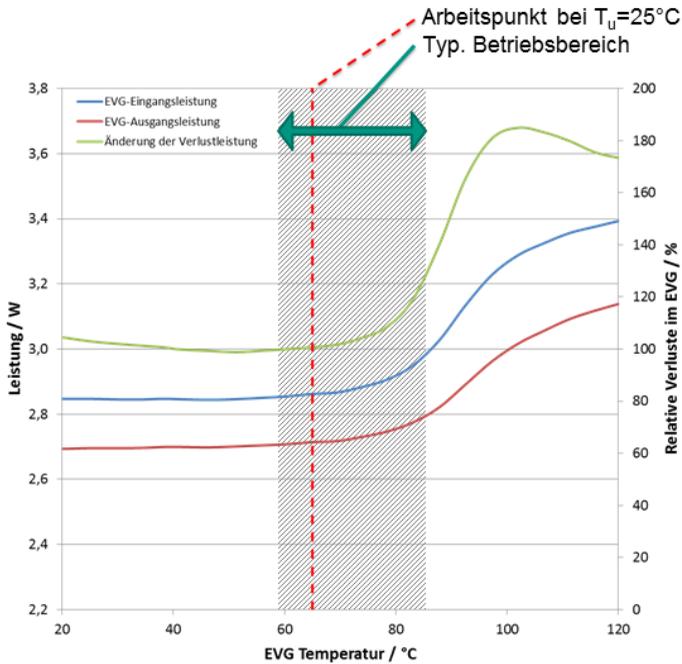
**Abbildung 5.11** zeigt ein in seine Bestandteile zerlegtes LED-Retrofit mit Kondensatornetzteil geringer Leistungsklasse. Das gezeigte Retrofit hat eine angegebene Nennleistung von drei Watt. Das EVG weist einen Wirkungsgrad von ca. 90 % auf, dem jedoch ein sehr geringer Leistungsfaktor von ca. 0,3 gegenübersteht. Dementsprechend schlecht ist die Netzverträglichkeit dieser EVG-Topologie. Für LED-Systeme mit Leistungen ab 25 W ist diese EVG-Topologie wegen des verpflichtenden Einsatzes einer Leistungskorrektur (Power Factor Correction, PFC) ohnehin nicht mehr zulässig.



**Abbildung 5.11:** LED-Retrofit mit Kondensatornetzteil

Die Betrachtung der Temperatureinwirkung auf das Systemverhalten bei sich ändernden Temperaturen ist im Wesentlichen im Temperaturbereich rund um den Nennbetriebspunkt sinnvoll. Aus diesem Grund erfährt das LED-Retrofit zu Beginn eine vollständige Analyse gemäß den vorherigen Kapiteln, welche mit der Bestimmung der Bauteiltemperaturen unter annähernd realen Betriebsbedingungen und der daraus abgeleiteten Lebensdauerprognose endet. Bereits berücksichtigt bei dieser Lebensdauerprognose ist der typische Einfluss der Leuchte auf die Lebensdauer, bedingt durch die steigende Umgebungstemperatur der Lampe.

Nicht berücksichtigt ist jedoch, wie sich zusätzliche Einflüsse wie beispielsweise die Umgebungstemperatur, in der wiederum die Leuchte einschließlich des LED-Systems betrieben wird, auf die Lebensdauer auswirken. Der Einfluss wäre im Idealfall proportional zur Änderung der Umgebungstemperatur. Allerdings kann dieser Einfluss ebenso unter- wie überproportional zur Temperaturänderung sein. Daher wird die Betriebstemperatur des EVGs, wie in **Abbildung 5.12** gezeigt, um den Betriebspunkt variiert, um diesen Einfluss präzise zu ermitteln.



**Abbildung 5.12:** Variation der EVG-Betriebstemperatur um den Nennbetriebspunkt eines Kondensatornetzteils

In **Abbildung 5.12** sind die EVG-Eingangsleistung (blau) sowie die EVG-Ausgangsleistung (rot) über der Temperatur aufgetragen. Bei einer Umgebungstemperatur von  $25^\circ\text{C}$  stellt sich für den Fall eines unmodifizierten Gesamtsystems ein Nennbetriebspunkt des EVGs von ca.  $66^\circ\text{C}$  ein, welcher in der Grafik als rot gestrichelte Linie dargestellt wird. Die Messung deckt einen weiten Temperaturbereich von  $20^\circ\text{C}$  bis  $120^\circ\text{C}$  ab, für den realen Einsatz ist jedoch ausschließlich der grau hinterlegte Bereich relevant, da dieser den typischen Raumtem-

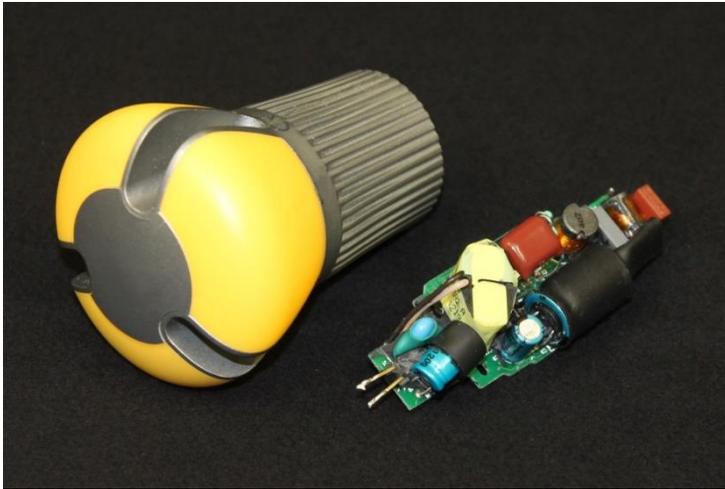
peratureinfluss auf Beleuchtungssysteme beim Einsatz in der Allgemeinbeleuchtung abdeckt.

Gut zu erkennen ist, dass sowohl die EVG-Eingangsleistung als auch die EVG-Ausgangsleistung bei steigender Temperatur verhältnismäßig stark ansteigen. Durch den Anstieg der EVG-Ausgangsleistung erhöhen sich entsprechend ebenfalls die thermischen Verluste in der LED, weshalb diese sich zusätzlich erwärmt, was die Lebensdauer stark negativ beeinträchtigt.

Betrachtet man die Eingangs- und die Ausgangsleistung des EVGs näher, so lässt sich erkennen, dass die Eingangsleistung bei steigender Temperatur stärker ansteigt als die Ausgangsleistung. Die Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsleistung entspricht den Verlusten innerhalb des EVGs, welche für die Erwärmung der elektronischen Bauteile verantwortlich sind. Zur besseren Veranschaulichung der Temperatúrauswirkung auf den Betriebspunkt des EVGs sind die Verluste innerhalb des EVGs nicht absolut, sondern deren Änderung in Prozent, normiert auf den Nennbetriebspunkt, in **Abbildung 5.12** über der Temperatur aufgetragen (grün). Anhand dieser Darstellung lässt sich gut erkennen, dass ein stark überproportionaler Temperatureinfluss auf das EVG vorliegt. Steigt die Umgebungstemperatur beispielsweise um 20 K, so steigen die Verluste auf ca. 130 % an. Bei weiterer Steigerung der Temperatur um 15 K erreichen die Verluste innerhalb des EVGs im Vergleich zum Nennbetriebspunkt sogar bis zu 180 % der Nennverluste.

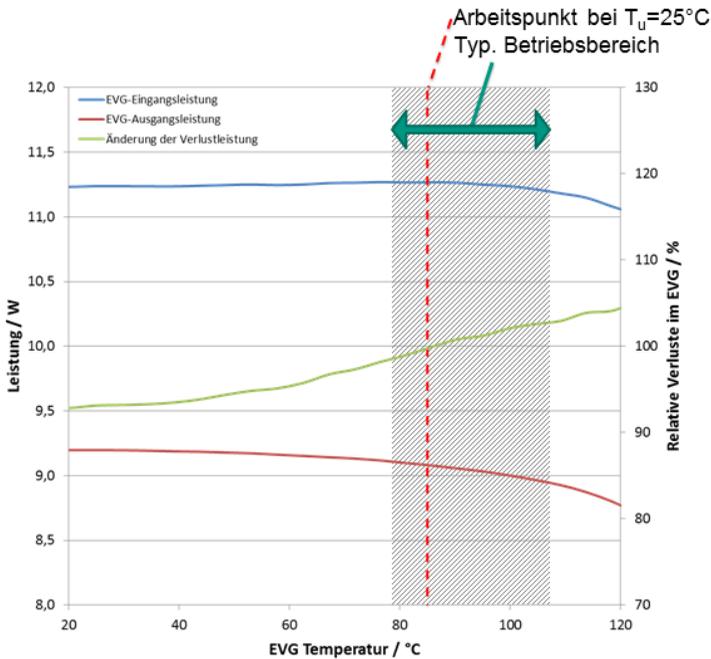
Besonders zu beachten ist, dass auch die Gesamtleistung des Systems mit steigender Leistung ansteigt. Dies hat zur Folge, dass bei steigender Umgebungstemperatur auch die Gesamtverluste des LED-Systems ansteigen, was wiederum zu einer zusätzlichen Erwärmung und steigender Temperatur des Systems führt. Bedingt durch das Systemverhalten des EVGs, bei dem mit steigender Temperatur die Gesamtleistung ebenfalls ansteigt, handelt es sich um einen selbstbeschleunigenden Effekt. Die Betriebsbedingung, unter der die Lampe betrieben wird, hat somit einen stark überproportionalen Einfluss auf die Lebensdauer des LED-Systems und muss daher dezidiert betrachtet werden.

Deutlich häufiger zum Einsatz kommen LED-Retrofits mit einem Flyback Converter als EVG. Diese werden bei LED-Retrofits in Leistungsbereichen ab ca. 3 W eingesetzt. Der Wirkungsgrad dieser EVG-Topologie kann mit 65 bis 90 % auch unter dem Wirkungsgrad des Kondensatornetzteils liegen, jedoch weist der Flyback Converter mit gemessenen Leistungsfaktoren zwischen 70 und 95 eine deutlich höhere Netzverträglichkeit auf. Auch bietet dieser die Möglichkeit über die ohnehin für diese Topologie nötige Steuerlogik intelligente Funktionen wie beispielsweise eine in Abhängigkeit der Gesamtbetriebsstunden nachführende Lichtstromregelung zu realisieren. Der für den Flyback Converter deutlich höhere Schaltungsaufwand sowie das hierfür nötige Bauvolumen sind in **Abbildung 5.13** deutlich zu erkennen. Dafür bietet der Flyback Converter zusätzliche Schutzfunktionen wie beispielsweise Kurzschlussfestigkeit und Galvanische Trennung zwischen Netz- und Ausgangsseite.



**Abbildung 5.13:** LED-Retrofit mit Flyback Converter

Wird der Temperatureinfluss auf diese EVG-Topologie analysiert und außerdem der Temperatureinfluss auf den Betriebspunkt rund um den Nennbetriebspunkt des EVGs betrachtet, so zeigt sich im Gegensatz zum Kondensatornetzteil ein konträres Verhalten. In **Abbildung 5.14** sind die Eingangsleistung (blau) sowie die Ausgangsleistung (rot) des EVGs über der Betriebstemperatur aufgetragen. Der Nennbetriebspunkt des EVGs liegt mit ca. 85 °C deutlich höher als der des Kondensatornetzteils. Dies ist jedoch auch der mit 11,25 W deutlich höheren Gesamtleistung geschuldet. Dennoch stellt die höhere Temperatur für die Bauteile in Bezug auf die Lebensdauer eine höhere Belastung dar.



**Abbildung 5.14:** Variation der EVG-Betriebstemperatur um den Nennbetriebspunkt eines Flyback Converters

Der wesentliche Unterschied zum Kondensatornetzteil ist, dass die Gesamtleistung des Systems mit steigender Temperatur sinkt. Somit sinken die Gesamtverluste sowie die thermische Eigenerwärmung, was sich theoretisch positiv auf die Gesamtlebensdauer des Systems auswirkt. Allerdings verschiebt sich die thermische Bilanz von der LED zum EVG. Dadurch sinkt die durch die LED verursachte Wärmelast, wohingegen die Verluste im EVG ansteigen und dennoch zu einer zusätzlichen Bauteilbelastung führen. Dies ist eindeutig an

dem näherungsweise linearen Anstieg der relativen Verluste im EVG zu erkennen. Durch den Anstieg der Verlustleistung im EVG kommt es daher dennoch zu einer zusätzlichen Bauteilerwärmung, was sich negativ auf die Lebensdauer der Einzelbauteile auswirkt. Daran ist gut erkennbar, dass eine alleinige Messung der Eingangsleistung des Systems nicht zu aussagekräftigen Messergebnissen führt. Eine ausschließlich von außen durchgeführte Messung würde zu der fehlerhaften Schlussfolgerung führen, dass durch das Absinken der Eingangsleistung auch die Eigenerwärmung reduziert wird. Dies ist zwar betrachtet auf das gesamte LED-System richtig, aber dennoch kommt es durch die Verschiebung der thermischen Bilanz zu einer zusätzlichen Erwärmung des EVGs. Daher ist eine isolierte Betrachtung des EVGs unerlässlich.

Durch die Analyse des Systemverhaltens bei sich ändernder Systemtemperatur und der gleichzeitigen Nutzung der Möglichkeit der Thermografiemessung werden die Temperaturen der Einzelbauteile auch bei der Temperaturvariation exakt bestimmt. Dadurch werden ohne nähere Kenntnis über die Schaltung sowie des Systemverhaltens die realen Auswirkungen sicher mit in die Lebensdaueranalyse eingebunden. Auch Hotspots oder überproportional belastete Bauteile bei steigender oder sinkender Temperatur werden somit sicher erkannt und die Sensitivität des LED-Systems kann somit isoliert auf das EVG ermittelt werden.



---

## Kapitel 6

# ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bisher ist nur die statistische Abschätzung der Lebensdauer für konstante und genau definierte Betriebsbedingungen möglich. Ein entscheidendes Einflusskriterium ist jedoch die Temperatur. Der Temperatureinfluss auf die Lebensdauer von Elektrolytkondensatoren bewirkt beispielsweise bei einer Temperaturerhöhung von 10 K eine Halbierung der Lebensdauer und ist somit essentiell.

Im Allgemeinen können die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer eines EVGs anhand der Lebensdauerangaben der Einzelbauteile, welche alle namhaften Bauteilhersteller zur Verfügung stellen, bestimmt werden. Hierfür gibt es etablierte Verfahren wie beispielsweise MIL, Telcordia, Siemens etc., welche auch Standarddatenbanken für Bauteil-Ausfallraten bereitstellen. Auf diese Standarddatenbanken kann zurückgegriffen werden, wenn für einzelne Bauteile keine Herstellerangaben zur Lebensdauer verfügbar sind. Die Verfahren weisen entsprechende Gewichtungsfaktoren für unterschiedliche lebensdauerbeeinflussende Umweltfaktoren auf. Bei diesen Berechnungen finden jedoch weder die Umgebungsbedingungen, in welchen das EVG betrieben wird, noch die thermische und elektrische Wechselwirkung zwischen LED und EVG ausreichend Berücksichtigung. Außerdem ist es bei LED-Systemen besonders wichtig, den

Temperatureinfluss auf den Betriebspunkt des LED-Systems zu kennen. So können schon kleine Änderungen der Betriebstemperatur dazu führen, dass sich der Nennbetriebspunkt verschiebt und daraus ein überproportionaler Einfluss auf die zu erwartende Lebensdauer resultiert. Im Gegensatz dazu ist es auch möglich, dass Regelalgorithmen oder eine geeignete Bauteilauswahl einen Anstieg der Umgebungstemperatur unter Reduzierung des Lichtstroms weitestgehend kompensieren, sodass es auch bei einem Temperaturanstieg zu keiner signifikanten Lebensdauerverkürzung kommt.

Die für Elektronikkomponenten wie Elektrolytkondensatoren häufig angewendete Arrheniusregel, welche besagt, dass ein Temperaturanstieg von 10 K die zu erwartende Lebensdauer halbiert, ist demnach nicht ohne Weiteres auf ein gesamtes LED System anzuwenden. Aus diesem Grund musste ein Verfahren entwickelt werden, welches es ermöglicht, sämtliche Bauteiltemperaturen sowie deren elektrischen Parameter unter annähernd realen Betriebsbedingungen zu ermitteln.

Die Fokussierung auf die thermischen und elektrischen Bauteilparameter resultiert aus der zu Beginn des Projektes durchgeführten Analyse der Einflussfaktoren auf die Lebensdauer der Betriebsgeräte für LED-Systeme und der Bewertung nach deren Wichtigkeit.

Des Weiteren wurden thermische Untersuchungen zur Ermittlung der realen Umgebungsbedingungen an verschiedenen Leuchten mit E27-Sockel durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass sich die Umgebungstemperatur in der Leuchte für Leuchten mit einer Leistungsklasse zwischen 1 und 10 W im Mittel pro installiertem Watt um ca. 1 K

erhöht. LED-Retrofits bewegen sich ebenfalls in der genannten Leistungsklasse. Im Gegensatz zu üblichen Laborwerten, welche bei einer Umgebungstemperatur bzw. Raumtemperatur von 25 °C ermittelt werden, kann die Aussagegenauigkeit der Lebensdauerprognose für den realen Betrieb des LED-Systems unter Berücksichtigung der Umgebungstemperaturerhöhung somit deutlich verbessert werden.

Neben den Umgebungseinflüssen, der Umgebungstemperatur und der thermischen und elektrischen Wechselwirkung zwischen LED und EVG spielt auch die EVG-Topologie eine entscheidende Rolle. Um eine Übersicht über die zum Einsatz kommenden EVGs in LED-Retrofits zu erhalten, wurden in einem ersten Schritt 22 EVGs marktüblicher LED-Systeme unter anderem auf deren Schaltungstopologie, Verarbeitungsqualität und mögliche Schwachstellen hin untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die am häufigsten zum Einsatz kommende Schaltungstopologie der Flyback Converter ist (13 von 22 EVGs). Am zweithäufigsten werden, besonders bei leistungsschwachen LED-Systemen, sogenannte Kondensatornetzteile eingesetzt, welche den kapazitiven Blindwiderstand eines in Serie zur LED geschalteten Kondensators ausnutzen (sieben von 22). Die kleinste Gruppe stellen Betriebsgeräte mit einem Buck Converter dar (zwei von 22). Diese Verteilung hat sich bei einer weiteren Untersuchung im letzten Drittel des Projektes bestätigt.

Da für eine valide Lebensdauerprognose die Bestimmung der elektrischen und thermischen Betriebsparameter der Einzelbauteile unerlässlich sind, ist es unumgänglich, Modifikationen am System wie

beispielsweise das Entfernen des Gehäuses oder das Ausbauen des Betriebsgerätes aus dem Retrofit vorzunehmen. Um Beeinflussungen auf das Messergebnis, welche durch diese Modifikationen hervorgerufen werden können, auszuschließen, muss in einem ersten Schritt der Betriebspunkt des unmodifizierten Systems bestimmt und anschließend mit dem sich einstellenden Betriebspunkt nach der Modifikation verglichen werden. Hierbei zeigte sich, dass es bei der Vorbereitung der Betriebsgeräte auf thermische und elektrische Messungen zu erheblichen Abweichungen des Betriebspunktes und der Bauteiltemperatur kommt. Diese Abweichungen variieren von Bauteil zu Bauteil stark und sind somit nicht durch einen gemeinsamen Offset zu korrigieren.

Aus diesem Grund wurde eine Thermobox entwickelt, welche die thermischen Umgebungsbedingungen eines Betriebsgerätes für LED-Systeme möglichst realitätsnah nachbilden kann und gleichzeitig elektrische und thermografische Messungen zulässt. Besonderer Wert wurde bei der Entwicklung der Thermobox auf die Temperaturstabilität sowie die Möglichkeit zur Messung dynamischer Temperaturverläufe gelegt. Dies wurde durch eine Kombination einer Peltier- und Wasserkühlung in Verbindung mit einem hochpräzisen Temperaturregler erreicht. Somit ist es zum einen möglich, den Betriebspunkt des EVGs exakt nachzubilden und die Bauteiltemperaturen unter annähernd realen Betriebsbedingungen zu ermitteln, und zum anderen, den Temperatureinfluss auf das Betriebsgerät zu bestimmen. Dadurch lässt sich eine valide Aussage darüber treffen, in welchem Maße sich Temperaturvariationen auf die Lebensdauer des Systems

auswirken und inwieweit sich der Nennbetriebspunkt nahe an einer kritischen Grenze befindet.

Um die Messgenauigkeit der Temperaturmessungen weiter zu erhöhen, wurde eine umfassende Charakterisierung der Thermobox mit Faktoren wie dem Emissionsgrad der Oberflächen sowie der Transmission und Reflexion des optischen Fensters durchgeführt und ein homogener, temperaturprotokollierter Hintergrund in der Reflexionsebene geschaffen. Somit können die maßgeblichen Fehlereinflüsse wie eine Überlagerung von Störstrahlung durch Reflexionen am optischen Fenster und Reflektionen an Bauteilen und Einflüsse der Übertragungstrecke ermittelt und korrigiert werden.

Eine Lebensdauerprognose mithilfe der entwickelten Methode lässt sich somit innerhalb weniger Tage durchführen. In einem ersten Schritt muss das LED-System lichttechnisch, elektrisch und thermisch initial vermessen und somit der Nennbetriebspunkt unter einer Umgebungstemperatur von 25 °C bestimmt werden. In einem nächsten Schritt muss das LED-System in die Bestandteile Betriebsgerät und LED-Lichtquelle mit Kühlvorrichtung zerlegt werden. Das Betriebsgerät wird an spezifischen Punkten mit Kontaktfühlern zur Temperaturmessung versehen und das System wieder zusammengesetzt. Anschließend erfolgt erneut eine komplette Vermessung, bei welcher zusätzlich die Temperaturwerte der Bauteilkontaktfühler gemessen werden. Sollte sich bei dieser zweiten Messung ein anderer Betriebspunkt des Systems einstellen, so ist ein nicht vernachlässigbarer Fehler bei der Bestückung mit den Kontaktfühlern entstanden und Schritt zwei muss wiederholt werden. In Schritt drei wird das System

wieder in die beiden Bestandteile zerlegt, das Betriebsgerät in die Thermobox eingebaut und eine Initialisierung der Thermobox durchgeführt. Diese Initialisierung ist für eine spätere Korrektur der Bauteiltemperaturmesswerte unerlässlich, um Messfehler der Thermografie zu korrigieren. Im nächsten Schritt wird die Temperatur der Thermobox auf die aus Schritt eins bekannten Werte des Nennbetriebspunktes eingestellt. Die Bauteiltemperaturwerte der Kontaktfühler sollten nun mit den Werten aus der Messung von Schritt zwei übereinstimmen und es können mittels Thermografie die Temperaturen aller Bauteile gemessen werden. Gleichzeitig können an relevanten Bauteilen elektrische Parameter ermittelt werden. Die hieraus gewonnenen Daten können für eine präzise Lebensdauerprognose bei Nennbetriebsbedingungen von 25 °C herangezogen werden. Im nächsten Schritt wird die Thermoboxtemperatur um die zu erwartende Umgebungstemperaturerhöhung, welche sich durch den Betrieb des LED-Systems in einer Leuchte einstellt, erhöht. Die so ermittelten elektrischen und thermischen Bauteilparameter dienen zur Lebensdauerprognose unter realen Betriebsbedingungen, welche für den Anwender deutlich relevanter sind als Lebensdauerangaben unter Laborbedingungen. In diesen Angaben sind etwaige überproportionale Temperatureinflüsse auf die Lebensdauer bereits enthalten. In einem letzten Schritt kann durch eine Temperaturvariation von mehreren 10 K um den Betriebspunkt herum die Abhängigkeit der Bauteiltemperaturen und damit die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Betriebstemperatur ermittelt werden [3].

Parallel wurde mit dem Projektstart ein Langzeitmessstand mit einer Kapazität von 200 Messplätzen geschaffen, in welchem zehn verschiedene LED-Systeme mit jeweils 20 Prüfmustern unter kontrollierten Bedingungen gealtert wurden. Besonderes Augenmerk wurde auf die Klimatisierung des Messstandes auf  $25\text{ °C} \pm 1\text{ K}$  und eine möglichst homogene Luftströmung gelegt, da diese die Lebensdauer und somit die Ergebnisse maßgeblich beeinträchtigen würden. Die Prüfmuster aus diesem Langzeitmessstand werden unter anderem zur Validierung der Aussagen der Lebensdauerprognosen aus den Kurzzeitmessungen herangezogen.

Ein Vergleich der Messdaten aus dem Langzeitmessstand mit den Lebensdauerprognosen, welche mittels der vorgestellten Methode gewonnen wurden, hat diese Methode als sehr valide bestätigt.

Für eine vollständige Lebensdauerprognose, welche ebenso die Lebensdauer der eingesetzten LEDs sowie deren Lichtstromdegradation berücksichtigt, versteht sich diese Arbeit als eine Teillösung. Die Ergebnisse der Lebensdauerprognose, welche mittels der vorgestellten Methode für das EVG erstellt werden, müssen immer mit den Lebensdauerprognosen der LEDs verknüpft und somit gemeinsam angegeben werden. Nur so ist eine sinnvolle und verlässliche Lebensdauerangabe eines LED-Systems zu erstellen, welche dem realen Anwendungsfall gerecht wird.

Die Ergebnisse dieser Arbeit und insbesondere die Zusammenfassung wurden im Rahmen des Abschlussberichts des Forschungsprojektes UNILED – Erfassung und Beseitigung von Innovationshemmnissen

beim Solid State Lighting – im verbundübergreifenden Abschlussbericht der Allgemeinheit zugänglich gemacht [29].

---

### III LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Stiftung Warentest, "Licht und Schatten." tech. rep., 2009.
- [2] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, 2. ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2006.
- [3] U. Tietze and C. Schenk, *Halbleiter-Schaltungstechnik*, 15. überar. Springe-Verlag, 2016.
- [4] DIN VDE 0100-410:2007-06, "Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 4-41: Schutzmaßnahmen - Schutz gegen elektrischen Schlag." 2007.
- [5] DIN EN 61000-3-2:2015-03, "Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-2: Grenzwerte - Grenzwerte für Oberschwingungsströme." 2015.
- [6] S. Maniktala, *Switching Power Supply Design & Optimization*. McGraw-Hill, 2004.
- [7] DIN 40150:1979-10, "Begriffe zur Ordnung von Funktions- und Baueinheiten." 1979.
- [8] W. Glatthorn, "Zuverlässigkeitsrechnung technischer Produkte." 2011.

- [9] "LED Luminaire Lifetime: Recommendations for Testing and Reporting." Next Generation Lighting Industry Alliance with the U. S. Department of Energy, 2011.
- [10] J. Lienig and H. Brümmer, *Elektronische Gerätetechnik: Grundlagen für das Entwickeln elektronischer Baugruppen und Geräte*. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [11] Department of Defense, *MIL-HDBK-217F, Reliability Prediction of Electronic Equipment*. 1991.
- [12] T.I. Bajenescu and M. I. Bazu, *Reliability of Electronic Components*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999.
- [13] H. Lemme, "LED-Detektive auf Fehlersuche," *Optoelektronik, Tech. + Trends*, 2010.
- [14] Department of Defense, *MIL-STD-810, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*. 2008.
- [15] A. Möschwitzer and K. Lunze, *Halbleiterelektronik*, 7. bearbei. Heidelberg: Hüthig Verlag, 1987.
- [16] P. Koschke, W. Hütt, and C. Rinn, *Almemo - Handbuch*, 9. Auflage. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik, 2011.
- [17] InfraTec, *Einführung in Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie*. 2010.
- [18] PHILIPS, "MASTER LEDbulb MV Dimmable." Order code: 934489xx, 2012.

- [19] E. R. Hnatek, *Practical reliability of electronic equipment and products*. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [20] "Lighting the way: Perspectives on the global lighting market." tech. rep., McKinsey, 2011.
- [21] IES, "LM-80-08: Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources." 2008.
- [22] "Temperature Controller Model 3700." Newport, 2009.
- [23] BARTEC Messtechnik und Sensorik, "Emissionsfaktor-Tabelle." 2001.
- [24] M. Wutz, *Wärmeabfuhr in der Elektronik*. Vieweg Verlag, 1991.
- [25] S. G. Parler, "Thermal Modeling of Aluminum Electrolytic Capacitors." IEEE Industry Applications Conference, 1999.
- [26] Rubycon, "MINIATURE ALUMINUM ELECTROLYTIC CAPACITORS YXA." Rubycon Corporation, 2012.
- [27] RUBYCON CORPORATION, "Life of Aluminum Electrolytic Capacitor." TECHNICAL NOTE, 2012.
- [28] M. Scholdt, *Temperaturbasierte Methoden zur Bestimmung der Lebensdauer und Stabilisierung von LEDs im System*. KIT Scientific Publishing, 2013.
- [29] Schlussbericht zum Verbundprojekt, "Erfassung und Beseitigung von Innovationshemmnissen beim Solid State

Lighting (UNILED).“ FKZ: 13N10750; FKZ: 13N10751; FKZ:  
13N10752; FKZ: 13N10753, 2014.

---

## IV ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abbildung 2.1:</b>	Kennlinie und Schaltsymbol einer LED .....	3
<b>Abbildung 2.2:</b>	Kennlinien verschiedenfarbiger LEDs .....	4
<b>Abbildung 2.3:</b>	Temperaturabhängigkeit von LEDs .....	5
<b>Abbildung 2.4:</b>	Prinzipschaltplan eines Kondensatornetzteils.....	7
<b>Abbildung 2.5:</b>	Grundschtaltung eines Tiefsetzstellers an Wechselspannung.....	9
<b>Abbildung 2.6:</b>	Taktung und Ströme eines Tiefsetzstellers.....	10
<b>Abbildung 2.7:</b>	Grundschtaltung eines Flyback Converters .....	12
<b>Abbildung 2.8:</b>	Taktung und Ströme eines Sperrwandlers.....	13
<b>Abbildung 2.9:</b>	Strom- und Spannungsverlauf mit und ohne PFC .....	15
<b>Abbildung 2.10:</b>	Badewannenkurve zur Veranschaulichung der Ausfallrate eines technischen Systems während dessen Lebenszykluses [8] .....	19
<b>Abbildung 2.11:</b>	Potentielle Schwachstellen von EVGs.....	22
<b>Abbildung 2.12:</b>	Darstellung zum Seebeck-Effekt (links) sowie Messprinzip eines Thermoelements (rechts).....	29
<b>Abbildung 2.13:</b>	Aufbau eines Thermo-Mantelementes .....	30
<b>Abbildung 2.14:</b>	Zusammensetzung des Messsignals eines Strahlungsthermometers .....	32
<b>Abbildung 3.1:</b>	Schematische Darstellung der verschiedenen Temperaturbezeichnungen in einer Leuchte und einem LED-Retrofit .....	36
<b>Abbildung 3.2:</b>	Elektrische Analyse von EVGs.....	48

## Abbildungsverzeichnis

---

<b>Abbildung 3.3:</b>	Wechselwirkungen zwischen EVG und LED....	52
<b>Abbildung 3.4:</b>	Temperatureinfluss auf LEDs.....	55
<b>Abbildung 3.5:</b>	Aufbau zur Variation der thermischen Betriebsbedingungen des EVGs .....	56
<b>Abbildung 4.1:</b>	Leuchten für den Einsatz von LED-Retrofits....	60
<b>Abbildung 4.2:</b>	Leuchtentemperaturänderung über Lampenleistung .....	61
<b>Abbildung 4.3:</b>	EVG-Topologien der untersuchten LED-Retrofits .....	64
<b>Abbildung 4.4:</b>	Kondensatornetzteil.....	66
<b>Abbildung 4.5:</b>	Buck Converter .....	66
<b>Abbildung 4.6:</b>	Flyback Converter .....	66
<b>Abbildung 4.7:</b>	Standardisierter Messplatz im Langzeitmessstand.....	73
<b>Abbildung 4.8:</b>	Langzeitmessstand.....	74
<b>Abbildung 4.9:</b>	Thermischer Einschwingvorgang einer Philips Master LED-Bulb.....	76
<b>Abbildung 4.10:</b>	Anbringung der Referenzfühler an den Bauteilen.....	77
<b>Abbildung 4.11:</b>	Einfluss auf die Bauteiltemperaturen bei Änderung der EVG-Betriebsbedingungen .....	79
<b>Abbildung 4.12:</b>	Thermobox mit eingesetztem EVG .....	81
<b>Abbildung 4.13:</b>	Gleichmäßigkeit der Rückwandtemperatur der Thermobox .....	83
<b>Abbildung 4.14:</b>	Analyse des Temperatureinflusses auf das Gesamtsystem.....	85
<b>Abbildung 4.15:</b>	Zusammensetzung des IR-Messsignals .....	87
<b>Abbildung 4.16:</b>	Hohlraumstrahler.....	88
<b>Abbildung 4.17:</b>	Charakterisierung der Übertragungsstrecke .....	89

## Abbildungsverzeichnis

---

<b>Abbildung 4.18:</b>	Reflektion der Hintergrundtemperatur am optischen Fenster .....	90
<b>Abbildung 4.19:</b>	Mechanismen der Wärmeübertragung.....	91
<b>Abbildung 4.20:</b>	Ermittlung der Temperaturabhängigkeit.....	98
<b>Abbildung 4.21:</b>	Aufbau zur Ermittlung des Temperatureinflusses auf den Betriebspunkt des EVGs.....	99
<b>Abbildung 5.1:</b>	Exemplarisch untersuchtes LED-System.....	102
<b>Abbildung 5.2:</b>	Eingangskarakterisierungsstand .....	102
<b>Abbildung 5.3:</b>	Klebefestigung von Kontaktfühlern.....	103
<b>Abbildung 5.4:</b>	Thermo-Mantelelement eingelötet .....	103
<b>Abbildung 5.5:</b>	EVG in rußbeschichteter Thermobox.....	105
<b>Abbildung 5.6:</b>	Thermografische Ermittlung der Bauteiltemperaturen .....	107
<b>Abbildung 5.7:</b>	Einfluss der EVG-Temperatur auf die Betriebstemperatur ausgewählter Bauteile .....	108
<b>Abbildung 5.8:</b>	Langzeitmesstand im Betrieb mit bereits defekten LED-Systemen in der linken Reihe ...	110
<b>Abbildung 5.9:</b>	Defekter Elektrolytkondensator als Ausfallursache des exemplarisch analysierten EVGs .....	111
<b>Abbildung 5.10:</b>	Messaufbau des Verhaltens des EVGs in Abhängigkeit der Systemtemperatur.....	113
<b>Abbildung 5.11:</b>	LED-Retrofit mit Kondensatornetzteil.....	114
<b>Abbildung 5.12:</b>	Variation der EVG-Betriebstemperatur um den Nennbetriebspunkt eines Kondensatornetzteils .....	116
<b>Abbildung 5.13:</b>	LED-Retrofit mit Flyback Converter .....	119

**Abbildung 5.14:** Variation der EVG-Betriebstemperatur um den Nennbetriebspunkt eines Flyback Converters ..... 120

---

## V BETREUTE ARBEITEN

- Christoph Bühler „*Aufbau eines Langzeitmessstandes für LED-Systeme*“ Studienarbeit, Karlsruhe 2011
- Hendrik Peschl „*Lebensdauerbewertung von LED-Betriebsgeräten durch Analyse von Auslegungsreserven der Einzelbauteile*“ Studienarbeit, Karlsruhe 2011
- Michael Meinzer „*Entwicklung einer elektronischen Schwenkeinheit für Scheinwerfermodule*“ Bachelorarbeit, Karlsruhe 2015



---

## VI VERÖFFENTLICHUNGEN

- I. Rotscholl, K. Trampert, K. Krüger, M. Perner, Franz Schmidt, C. Neumann *“Determination of tailored filter sets to create rayfiles including spatial and angular resolved spectral information”* Opt. Express **23**, 29543-29554 (2015)
- M. Perner, K. Trampert, C. Neumann *„Einfluss der thermischen Wechselwirkung auf das elektrische Verhalten von EVG-betriebenen LED-Retrofits“* LICHT 2012, 20. Gemeinschaftstagung, Berlin (2012)
- M. Scholdt, C. Beyer, M. Perner, C. Neumann *„Aufbau einer Langzeitmessung von LED Systemen“* Lux junior 2011, Tagungsband, Dörfeld/Ilm (2011)