

# Masterarbeit

zum Thema

**Analyse des Verhaltens verschiedener Arten von LEDs in einem kommerziellen LED-basierten Sonnensimulator bezüglich der Temperaturabhängigkeit des Spektrums sowie der Ein- und Ausschaltvorgänge**

**Autor:** Manuel Meusel

**Studiengang:** Masterstudium  
Mechatronik/Maschinenbau/Physiktechnik

**Mentor:** Prof. Dr. rer. nat. Georg Hillrichs  
Hochschule Merseburg  
Geusaer Straße 88, 06217 Merseburg

**Betreuer:** Prof. Dr. Jens Schneider  
Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP  
Otto-Eißfeldt-Straße 12, 06120 Halle (Saale)

**Datum:** 22. Mai 2017



# Aufgabenstellung

## Thema

Analyse des Verhaltens verschiedener Arten von LEDs in einem kommerziellen LED-basierten Sonnensimulator bezüglich der Temperaturabhängigkeit des Spektrums sowie der Ein- und Ausschaltvorgänge

## Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit ist es, den Einfluss verschiedener Temperaturen auf die spektrale Intensität von LEDs in einem kommerziellen LED-Sonnensimulator zu untersuchen, um die spektrale Kontrolle des Sonnensimulators zu verbessern. Dabei soll der Einfluss der Betriebstemperatur der LEDs, aber auch der Einfluss der Umgebungs- bzw. Kühlertemperatur berücksichtigt werden. Zum Einsatz kommen das im Sonnensimulator integrierte Spektrometer sowie ein weiteres Messinstrument als Referenz. Weiterhin soll der Ein- und Ausschaltvorgang der LEDs zeitaufgelöst untersucht werden. Dabei soll nach Möglichkeit zwischen der Zeitkonstante der LEDs und der Zeitkonstante des Systems unterschieden werden.

## Schwerpunkte

- Analyse der Genauigkeit des verwendeten Messinstruments u. A. durch Verwendung eines Referenz-Messgerätes
- Untersuchung verschiedener Einflüsse auf die Temperatur der LEDs
- Entwicklung eines Modells zur Beschreibung von Spektren verschiedener LED-Arten
- Beschreibung der temperaturabhängigen Änderung des Spektrums für verschiedene LED-Arten mit Hilfe des entwickelten Modells
- Ermitteln eines geeigneten Messverfahrens und Untersuchung des Intensitätsverlaufs beim Ein- bzw. Ausschaltvorgang der LEDs
- Beschreibung des Ein- bzw. Ausschaltvorgangs für verschiedene LED-Arten



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Sonnensimulator . . . . .	7
2.2	Sonnensimulator Sinus 220 . . . . .	7
2.3	Spektrum der Sonne . . . . .	8
2.4	Spektrum einer LED . . . . .	9
2.5	Beschreibung des Spektrums einer Art von LEDs als Normalverteilung . . . . .	12
2.6	Phänomenologisches Modell des Spektrums einer Art von LEDs . . . . .	13
2.7	Vergleich der Fitfunktionen . . . . .	14
2.8	Charakterisierung der Ein- und Ausschaltvorgänge . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Verhalten des Spektrums der LEDs im Betrieb des Sonnensimulators</b>	<b>19</b>
3.1	Methoden und Messaufbau . . . . .	19
3.1.1	Temperaturabhängigkeit des Spektrums . . . . .	19
3.1.2	Stromabhängigkeit des Spektrums und der Temperatur . . . . .	20
3.1.3	Zeitabhängigkeit der Temperatur . . . . .	20
3.1.4	Messaufbau . . . . .	20
3.1.5	Messdurchführung . . . . .	22
3.2	Zeitabhängigkeit des Spektrums . . . . .	25
3.3	Abhängigkeit des Spektrums von der Intensität . . . . .	29
3.4	Abhängigkeit des Spektrums von der Temperatur . . . . .	32
3.5	Verlauf einer Quasitemperatur während eines Lichtblitzes . . . . .	36
3.6	Abhängigkeit des Spektrums vom Strom und von der Umgebungstemperatur über die Zeit . . . . .	39
3.7	Überblick über alle untersuchten Kanäle . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Verhalten der Intensität der LEDs im Ein- und Ausschaltvorgang</b>	<b>49</b>
4.1	Wahl eines geeigneten Messsystems . . . . .	49
4.2	Untersuchung verschiedener Spektren . . . . .	52
4.3	Vergleich mit einer Solarzelle . . . . .	54
4.3.1	Vergleich der Anstiegszeiten . . . . .	54
4.3.2	Vergleich der Abfallzeiten . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>62</b>

# 1 Einleitung

Im Jahr 2014 zeichnete das Nobel-Komitee in Stockholm Isamu Akasaki, Hiroshi Amano und Shuji Nakamura für ihre Erfindung einer blauen Licht-emittierenden-Diode (LED) aus [1]. Diese Erfindung ermöglicht es, auch für Messverfahren in der Photovoltaik neue Ansätze zu finden. Mit Hilfe sogenannter Sonnensimulatoren kann eine I-U-Kennlinie einer Solarzelle unter simuliertem Sonnenlicht gemessen werden. Diese Sonnensimulatoren basieren meist auf Xenon- oder Halogenlampen [2]. Durch die Anwendung von LEDs zur Simulation des Sonnenlichts ergeben sich neue Möglichkeiten und Einsatzgebiete für Sonnensimulatoren in der Photovoltaik. Auch wenn konventionelle Sonnensimulatoren das Sonnenspektrum schon recht gut abbilden können, ist es durch den Einsatz von LEDs möglich, eine noch höhere Genauigkeit und Stabilität des Spektrums zu gewährleisten [3]. Außerdem ist die Flexibilität von LED-basierten Sonnensimulatoren deutlich höher. Zum einen gibt es eine spektrale Flexibilität, durch die auch verschiedene Spektren mit einem Gerät erzeugt werden können. Zum anderen ist auch die zeitliche Flexibilität deutlich größer, da neben sehr kurzen Blitzen von wenigen Millisekunden auch eine Beleuchtung von mehreren Sekunden bis hin zum Dauerlicht möglich ist.

Um ein stabiles Spektrum gewährleisten zu können, muss der Strom durch die LEDs im Sonnensimulator geregelt werden. Die meisten LEDs verlieren mit zunehmender Temperatur an Wirkungsgrad [4], wodurch die Intensität des abgestrahlten Lichts schwächer wird. Weiterhin verschiebt sich das schmalbandige Spektrum der LEDs mit zunehmender Temperatur unter anderem durch die Temperaturabhängigkeit der Bandlücke des Halbleiters [5]. Um die Regelung eines Sonnensimulators richtig auslegen zu können, ist das Wissen um die Veränderung des Spektrums während des Betriebs eines Sonnensimulators sehr nützlich.

Zweck dieser Arbeit ist es, am Beispiel eines kommerziellen LED-basierten Sonnensimulators das Spektrum verschiedener Arten von LEDs zu untersuchen. Das Spektrum einer Art von LEDs ändert sich durch verschiedene Parameter, maßgeblich jedoch durch die Temperatur des Halbleitermaterials. Um die Möglichkeiten und Grenzen eines LED-basierten Sonnensimulators besser einschätzen zu können, soll diese Änderung des Spektrums für die verschiedenen Arten von LEDs im Sonnensimulator untersucht werden. Durch dieses Wissen kann die Regelung des Spektrums und damit die Kontrolle darüber verbessert werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der die Möglichkeiten und Grenzen eines LED-basierten Sonnensimulators aufzeigt, ist die Geschwindigkeit der Ein- und Ausschaltvorgänge des Sonnensimulators. Durch genaue Kenntnis der Ein- und Ausschaltvorgänge können Messungen zur Charakterisierung von Solarzellen verbessert und vereinfacht werden.

# 2 Theoretische Grundlagen

## 2.1 Sonnensimulator

Ein Sonnensimulator dient der Simulation des Sonnenlichtes. Speziell in der Photovoltaik soll das Sonnenlicht im Spektralbereich von 300 nm bis 1200 nm simuliert werden, da in diesem Bereich die Solarzellen aktiv sind. Für langwelligeres Licht ist die Bandlücke des pn-Übergangs des Siliziums, aus dem die Solarzellen bestehen, zu groß. Langwelligeres Licht kann in einer Solarzelle nicht in elektrische Energie umgewandelt werden, sondern hat lediglich einen Beitrag zur Temperaturänderung der Solarzelle. Da die Solarzellen stets unter konstanter Temperatur gemessen werden, ist dieser Temperaturbeitrag nicht relevant. Kurzwelligeres Licht kommt durch dessen Absorption in der Atmosphäre der Erde nicht bei einem Solarmodul auf der Erde an.

Durch die Simulation des Sonnenlichtes im für Solarzellen relevanten Bereich kann der Betrieb der Solarzelle unter Einstrahlung von Sonnenlicht simuliert werden. In der Fertigung von Solarzellen kann nun jede Solarzelle elektrisch vermessen werden. Dabei wird für jede Solarzelle eine U-I-Kennlinie aufgezeichnet, während sie mit dem simulierten Sonnenlicht bestrahlt wird. Aus dieser Kennlinie lassen sich nun Kenndaten wie Leistung im MaximumPowerPoint (MPP), Wirkungsgrad, Füllfaktor, Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung bestimmen. So können die Solarzellen in Qualitätsklassen einsortiert werden und Fehler während der Produktion schnell erkannt werden.

## 2.2 Sonnensimulator Sinus 220

LED basierte Sonnensimulatoren verwenden verschiedene Arten von LEDs, um das Spektrum der Sonne nachzubilden. Eine Art von LEDs ist in erster Linie durch ihr Halbleitermaterial bestimmt. Damit ist das Spektrum, das diese Art von LEDs aussendet, für jede LED dieser Art gleich. Aus diesem Grund werden in einem LED-Sonnensimulator alle LEDs einer Art zusammengefasst zu einem Kanal. Auf Grund von Unterschieden in der Fertigung kann es dennoch zu kleinen Unterschieden zwischen den einzelnen LEDs kommen.

In dieser Arbeit wird der LED-Sonnensimulator „Sinus 220“ der Firma „Wavelabs“ verwendet. Der Sinus 220 ist ein Sonnensimulator für Solarzellen. Dieser nutzt zur Lichterzeugung 21 verschiedene Arten von LEDs. Diese in 21 Kanäle zusammengefassten LEDs können kanalweise angesteuert werden. So ist es möglich, verschiedenste Spektren durch Variation der Zusammenstellung der Kanäle zu erzeugen. Dabei kann jeder Kanal mit einer beliebigen

gen Intensität betrieben werden. Damit das Licht des Sonnensimulators stabil bleibt, wird mit Hilfe eines Intensitätsmessers stets die Intensität des abgestrahlten Lichtes gemessen. So kann diese Intensität geregelt werden. Außerdem wird über ein Spektrometer das Spektrum des emittierten Lichtes gemessen. Um ein möglichst genaues Sonnenspektrum zu erzeugen, wird aufgrund der Daten, die das Spektrometer liefert, die Zusammensetzung der Leistungen der einzelnen Kanäle stetig angepasst. Somit soll gewährleistet werden, dass das Spektrum sich über die Betriebsdauer des Sonnensimulators nicht bzw. möglichst wenig ändert.

## 2.3 Spektrum der Sonne

Die Sonne kann als planckscher Strahler aufgefasst werden. Das Spektrum eines solchen planckschen Strahlers ist in erster Linie abhängig von der Temperatur des strahlenden Körpers. Die Sonne emittiert somit im ultravioletten (UV) Bereich, sowie im sichtbaren (VIS) Bereich und im infraroten (IR) Bereich Strahlung. Die Sonne emittiert also in einer sehr großen Bandbreite Strahlung. Im Bereich der optischen Strahlung ist die Bestrahlungsstärke der Sonne in Abbildung 2.1 dargestellt. Dabei bedeutet AM0 (Air Mass 0; schwarze Kurve) dass diese Bestrahlungsstärke auftritt, bevor die Strahlung die Erdatmosphäre passiert. Das Spektrum AM1.5 ist die Bestrahlungsstärke der Sonne auf die Erde, wenn diese in einem Winkel von  $41,8^\circ$  über dem Horizont steht. Durch die Absorption in der Erdatmosphäre wird die Strahlung abgeschwächt. In Abbildung 2.1 wird bei AM1.5 auch noch zwischen einem senkrechten Einfall der Strahlung auf die zu messende Fläche (blaue Kurve) und dem Einfall auf eine Fläche, die  $37^\circ$  gegen den Äquator geneigt ist (rote Kurve), unterschieden.

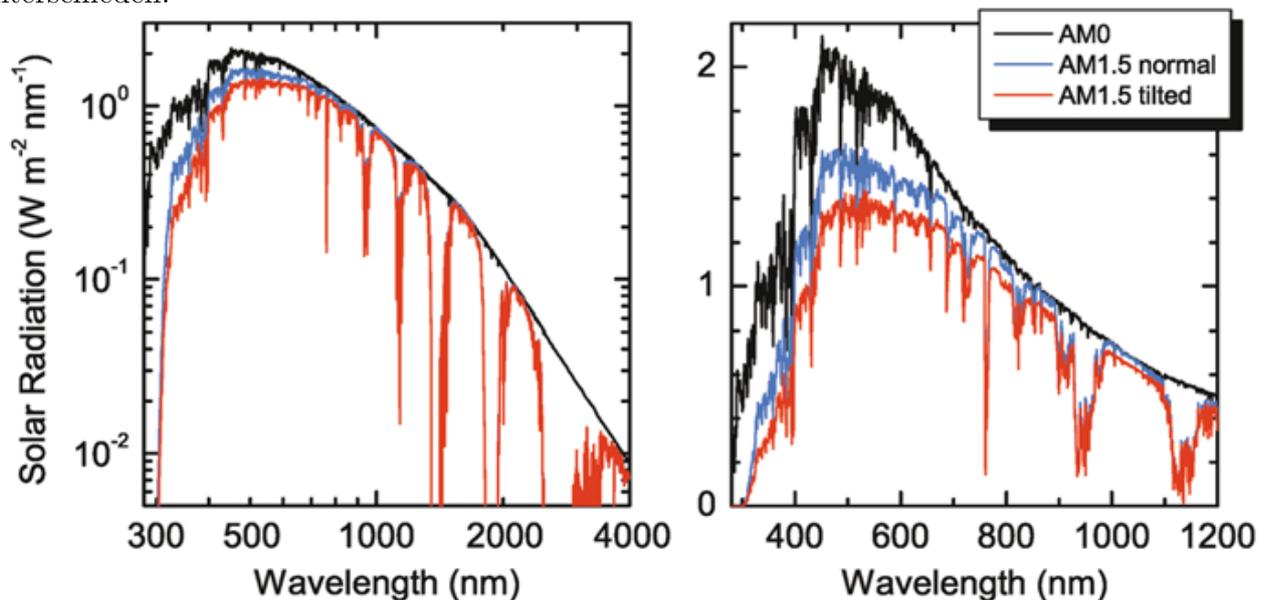


Abbildung 2.1: Spektrum des Sonnenlichts [6, S.638]

## 2.4 Spektrum einer LED

Um mit Hilfe von LEDs das Sonnenlicht nachzubilden zu können, sind viele verschiedene Arten von LEDs notwendig. Das liegt daran, dass das Spektrum einer LED sehr schmalbandig ist im Vergleich zu dem breitbandigen Spektrum des Sonnenlichts. Dieser Unterschied liegt an den verschiedenen Arten der Erzeugung von Strahlung bei der Sonne und bei den LEDs.

Die Strahlung von LEDs wird nicht durch die Schwarzkörperstrahlung erzeugt, sondern durch strahlende Rekombination von Elektron-Loch-Paaren in einem Halbleiter. Diese Rekombination wird auch als Band-Band Rekombination bezeichnet. Dabei „fällt“ ein Elektron vom höher energetischen Leitungsband zurück in das Valenzband. Bei einem direkten Halbleiter ist diese Rekombination meist strahlend. „Strahlend“ bedeutet, dass bei dieser Rekombination ein Photon ausgesendet wird.

Die spektrale Verteilung der emittierten Strahlung einer solchen Band-Band Rekombination lässt sich über die Verteilung der Zustandsdichten und der Fermi Verteilung, welche über die Boltzmannverteilung angenähert werden kann, beschreiben [6, S. 309 f]:

$$I(E) \propto \sqrt{E - E_g} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (2.1)$$

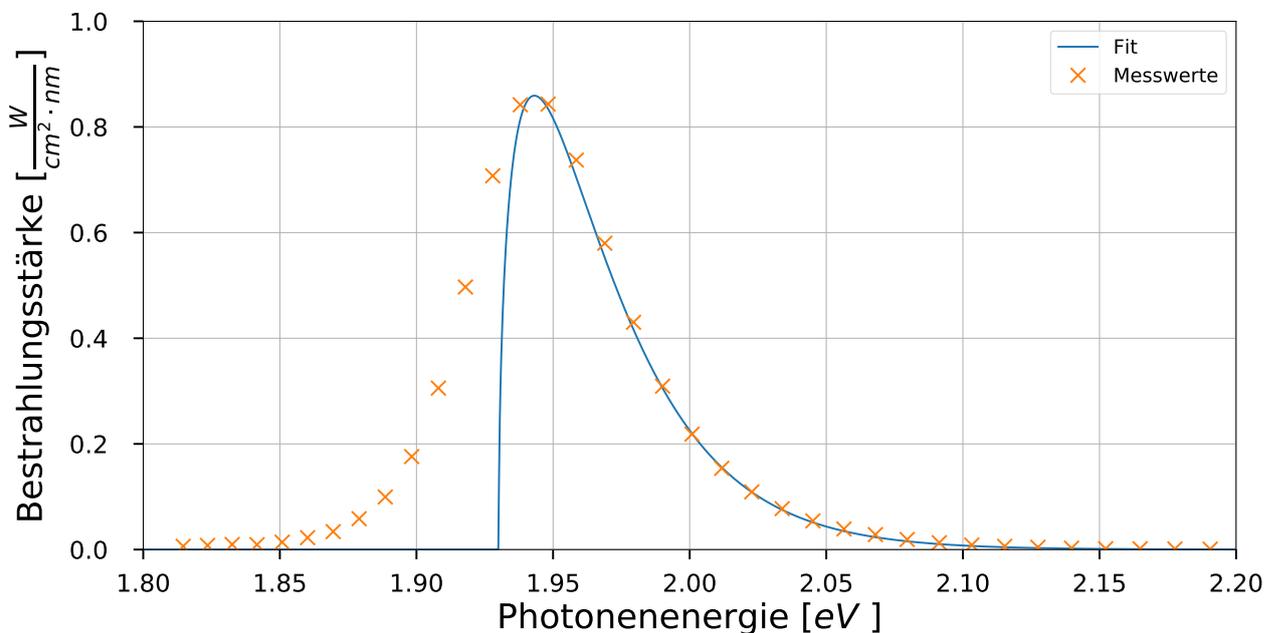


Abbildung 2.2: Vergleich eines LED-Spektrums (Kanal 9):  
Fit nach Abhängigkeit aus Gleichung 2.1 verglichen mit Messwerten  
Fitparameter:  $E_g = 1,93$  eV;  $kT = 26,12$  meV;  $I_{max} = 0,859$  W cm<sup>-2</sup> nm<sup>-1</sup>

Fittet man diese Abhängigkeit (Gleichung 2.1) an reale Messwerte an, so erkennt man, dass diese Gleichung nur die höherenergetische Hälfte des LED-Spektrums abbildet. Der Vergleich zwischen den Messwerten und dem Fit ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Nach dieser Theorie können keine Photonen auftreten, welche eine Energie besitzen, die kleiner ist als die Energie der Bandlücke des Halbleitermaterials. Messwerte zeigen aber, dass auch Photonen mit einer geringeren Energie als der Energie der Bandlücke von einer LED emittiert werden. Diese können zum Beispiel durch Verunreinigungen im Halbleiter entstehen, welche Energieniveaus innerhalb der Bandlücke, zwischen dem Valenz- und Leitungsband, ermöglichen.

Einen Ansatz, die niederenergetischen Photonen zu betrachten, bietet eine Publikation von B. Ullrich [7]. Diese beschäftigt sich zwar nicht mit der Elektrolumineszenz, wie sie bei LEDs auftritt, sondern mit der Photolumineszenz von einem typischen LED-Halbleitermaterial, GaAs, dennoch sind die physikalischen Effekte beider Lumineszenztypen recht ähnlich und unterscheiden sich nur in der Anregungsart, nicht aber in der Art der Emission.

Um auf die Lumineszenz von GaAs zu schließen, wird die Roosbroeck-Schockley-Relation angewendet, welche den Zusammenhang zwischen der Absorption und der Emission eines Halbleiters beschreibt. Unter der Berücksichtigung der Selbstabsorption des Halbleitermaterials ergibt sich für die Roosbroeck-Schockley-Relation folgende Abhängigkeit:

$$I(E) \propto E^2 [1 - \exp(-\alpha(E) \cdot d)] \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT_c}\right) \quad (2.2)$$

Dabei ist  $E$  die Energie des emittierten Photons,  $d$  die aktive Probendicke, welche mit der Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger im Halbleitermaterial zusammenhängt.  $k$  ist die Boltzmannkonstante und  $kT_c$  die Ladungsträgerenergie, welche immer größer ist als die thermische Energie  $kT$ , die durch die Temperatur des Halbleitermaterials bestimmt ist.  $\alpha(E)$  ist der energieabhängige Absorptionskoeffizient des Materials.

Auch der Absorptionskoeffizient eines Halbleitermaterials lässt sich über die Verteilung der Zustandsdichten in den Energiebändern beschreiben:

$$\alpha(E) = A \cdot \sqrt{E - E_g} \quad (2.3)$$

Hier werden nur Photonen mit einer Energie größer als die Bandlücke absorbiert. Um auch die niederenergetischen Photonen beschreiben zu können, wird die Urbach-Regel angewendet,

die auch eine Absorption niederenergetischer Photonen zulässt:

$$\alpha(E) = A \cdot \sqrt{\frac{kT}{2\sigma}} \cdot \exp\left[\frac{\sigma}{kT}(E - E_{cr})\right] \quad (2.4)$$

So wird die Absorption über zwei verschiedene Gleichungen beschrieben. Der Übergang von Gleichung 2.3 zu 2.4 findet bei  $E_{cr} = E_g + kT/2\sigma$  statt.  $E_g$  ist dabei die Energie der Bandlücke. Der Parameter  $\sigma$  ist ein phänomenologischer dimensionsloser Parameter, der die Steilheit der Urbachkante angibt.  $A$  ist ein Parameter, der mit dem Sättigungswert der Absorption zusammenhängt. Normiert man diese Gleichung numerisch, dass der Maximalwert 1 ergibt, lässt sich die Peakintensität  $I_{max}$  als Proportionalitätsfaktor und Parameter hinzufügen.

Um diese Funktion an Messwerte fitten zu können, müssen die Abhängigkeiten der vorliegenden Parameter untereinander eliminiert werden. In der vorliegenden Funktion wird stets der Parameter  $A$  mit dem Parameter  $d$  multipliziert. Für die Fitfunktion wird der Fitparameter  $Ad = A \cdot d$  eingeführt. Weiterhin hängt  $kT$  und  $\sigma$  zusammen, so dass ein Fitparameter  $\frac{kT}{\sigma}$  entsteht. Nun kann das Spektrum einer LED mit den Fitparametern  $I_{max}$ ,  $kT_c$ ,  $Ad$ ,  $E_g$  und  $\frac{kT}{\sigma}$  gefittet werden.

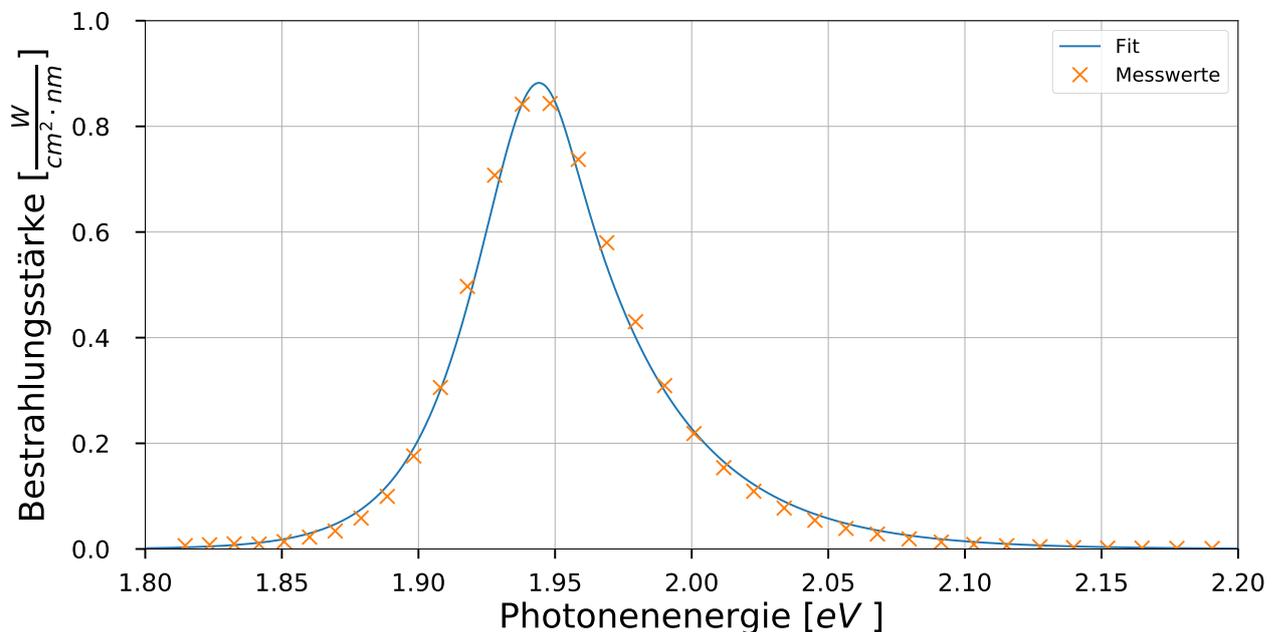


Abbildung 2.3: Vergleich eines LED-Spektrums (Kanal 9):

Fit nach Abhängigkeit aus Gleichung 2.3 bis 2.4 verglichen mit Messwerten

Fitparameter:  $I_{max} = 0,882 \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ ;  $kT_c = 35,1 \text{ meV}$ ;

$Ad = 148,9 \sqrt{\text{eV}}^{-1}$ ;  $E_g = 1,96 \text{ eV}$ ;  $\frac{kT}{\sigma} = 12,99 \text{ meV}$

Abbildung 2.3 zeigt, dass diese Funktion für diesen LED-Typ gut geeignet ist, um das Spektrum des emittierten Lichts darzustellen.

Diese Theorie ist nur für einen direkten Halbleiter wie GaAs zutreffend. Es ist jedoch nicht bekannt, welche Halbleitermaterialien in den LEDs des Sonnensimulators verbaut wurden. Um dennoch viele verschiedene Arten von LEDs, wie sie in einem Sonnensimulator vorkommen, miteinander vergleichen zu können, eignet sich eine andere Betrachtungsweise besser.

## 2.5 Beschreibung des Spektrums einer Art von LEDs als Normalverteilung

Das Spektrum einer LED erinnert an die Dichtefunktion einer Normalverteilung. Ist die Dichtefunktion einer Normalverteilung gegeben, lassen sich daraus verschiedene Parameter der Verteilung berechnen [8]. Mögliche Parameter, welche die Form der Verteilung beschreiben, sind der Erwartungswert, die Standardabweichung, die Schiefe und die Wölbung der Verteilung. Weiterhin lässt sich die Fläche unter der Kurve ermitteln. Die Fläche unter der Dichtefunktion entspricht der Gesamtbestrahlungsstärke der LED. Sie berechnet sich durch das Integral über das Spektrum. Die spektrale Bestrahlungsstärke sei  $E(\lambda)$ . Dann gilt:

$$E_{Ges} = \int_{-\infty}^{\infty} E(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

Der Erwartungswert gibt an, bei welcher Wellenlänge die gewichtete Mitte ist. Diese Wellenlänge ist nicht gleich der Peakwellenlänge, da die Dichtefunktion meist nicht symmetrisch sondern schief ist. Der Erwartungswert wird auch als erstes zentrales Moment bezeichnet. Der Erwartungswert  $\mu$  berechnet sich nach:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda \cdot E(\lambda) d\lambda \quad (2.6)$$

Die Standardabweichung ist ein Maß für die spektrale Bandbreite des LED-Spektrums. Die Standardabweichung  $\sigma$  ist die Wurzel der Varianz  $\sigma = \sqrt{Var(\lambda)}$ . Die Varianz, auch „zweites zentrales Moment“, berechnet sich nach:

$$Var(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} (\lambda - \mu)^2 \cdot E(\lambda) d\lambda \quad (2.7)$$

Die Schiefe  $S$  beschreibt den Unterschied der niederenergetischen Hälfte des Spektrums

und der höherenergetischen Hälfte. Sie wird als drittes zentrales Moment bezeichnet. Die Schiefe wird nach der Standardabweichung normiert. Ist die Schiefe positiv, spricht man von einer rechtsschiefen Verteilung. Bei einer negativen Schiefe von einer linksschiefen Verteilung.

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\lambda - \mu}{\sigma} \right)^3 \cdot E(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

Die Wölbung  $K$  ist ein Maß für die Form des Spektrums. Bei einer großen Wölbung ist die Spitze des Spektrums schmal, die Intensität nimmt aber mit zunehmender Entfernung vom Peak nur langsam ab. Eine kleine Wölbung zeigt eine große Abnahme der Intensität bei zunehmender Entfernung vom Peak, bei einer breiteren Spitze des Spektrums. Die Wölbung wird auch als Kurtose oder auch viertes zentrales Moment bezeichnet. Die Wölbung einer Normalverteilung ist 3.

$$K = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\lambda - \mu}{\sigma} \right)^4 \cdot E(\lambda) d\lambda \quad (2.9)$$

Genau wie beim Versuch der physikalischen Beschreibung eines LED-Spektrums entstehen auch bei dieser Methode, fünf Parameter, welche ein Spektrum beschreiben. Diese Parameter beschreiben die Form des Spektrums. Sie geben keinerlei Aufschluss über physikalische Zusammenhänge im Halbleitermaterial. Die Genauigkeit dieser Parameter ist stark von der Auflösung des Spektrometers abhängig.

## 2.6 Phänomenologisches Modell des Spektrums einer Art von LEDs

Da es bisher kein physikalisches Modell zur Beschreibung des Spektrums von LEDs gibt [9], kann nur auf ein phänomenologisches Modell zurückgegriffen werden. Frank Reifegerste and Jens Lienig haben in ihrem Paper [10] verschiedene Fitfunktionen verglichen, bezüglich der Eignung das Spektrum einer speziellen LED zu fitten. Dabei stellten sie fest, dass die sogenannte „logistic power peak“ Funktion die geringsten Quadratfehler beim Fit erzeugt. Die Funktion ist in Gleichung 2.10 dargestellt.

$$f(\lambda) = \frac{A}{S} \left( 1 + e^{\frac{\lambda - C + W \cdot \ln(S)}{W}} \right)^{\frac{-S-1}{S}} \cdot e^{\frac{\lambda - C + W \cdot \ln(S)}{W}} \cdot (S + 1)^{\frac{S+1}{S}} \quad (2.10)$$

Diese Funktion hat den Parameter  $A$ , welches die Amplitude des Peaks darstellt. Die Amplitude des LED-Spektrums beschreibt die maximale Bestrahlungsstärke des Peaks. Die Einheit der Amplitude ist  $[A] = 1 \text{ mW cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ . Der Parameter  $W$  gibt die Breite („width“) des Peaks an und beschreibt die Breite des Peaks. Die Einheit der Breite ist  $[W] = 1 \text{ nm}$ . Der Parameter  $C$  beschreibt die Position des Maximalwerts („center“) des Peaks, also die Peakwellenlänge. Die Einheit der Peakwellenlänge ist  $[C] = 1 \text{ nm}$ . Der Parameter  $S$  gibt die Schiefe des Peaks an. Die Schiefe kann Werte zwischen 0 und  $\infty$  annehmen. Hat die Schiefe den Wert 1 ist das Spektrum dieser LED symmetrisch. Ist die Schiefe kleiner als 1, ist das Spektrum linksschief. Das bedeutet, dass das gewichtete Mittel bei kleineren Wellenlängen liegt als die Peakwellenlänge des LED-Spektrums (Parameter  $C$ ). Damit sind bei dieser Funktion nur vier Parameter nötig, um das Spektrum einer LED zu beschreiben. Im Vergleich zur Beschreibung des Spektrums einer Art von LEDs als Normalverteilung bietet die Beschreibung über einen Fit genauere Werte, da die Interpolation zwischen den einzelnen Messwerten des Spektrometers nicht durch Linearisierung, sondern durch eine für ein LED-Spektrum gut geeignete Funktion erfolgt.

## 2.7 Vergleich der Fitfunktionen

Um herauszufinden, welche der beiden Fitfunktionen sich besser eignet, die verschiedenen Spektren von den LEDs zu beschreiben, wurde für ein Spektrum eines jeden Kanals der Fit berechnet. Es wurde auf der einen Seite der Fit mit Hilfe der physikalischen Fitfunktion nach B. Ullrich, auf der anderen Seite auch der Fit mit der phänomenologischen Funktion durchgeführt. Anschließend wird zu jedem Messpunkt des Spektrometers der quadratische Fehler gebildet und aufsummiert. Die dabei entstehenden Fehlerquadratsummen  $SSR$  („Sum of Squared Residuals“) werden nun miteinander verglichen. Dabei wird jeweils der größere Fehler in das Verhältnis zum kleineren Fehler gesetzt. Die Darstellung erfolgt im Säulendiagramm in Abbildung 2.4. Welche Fitfunktion nun den kleineren Fehler erzeugt, wird farblich hervorgehoben.

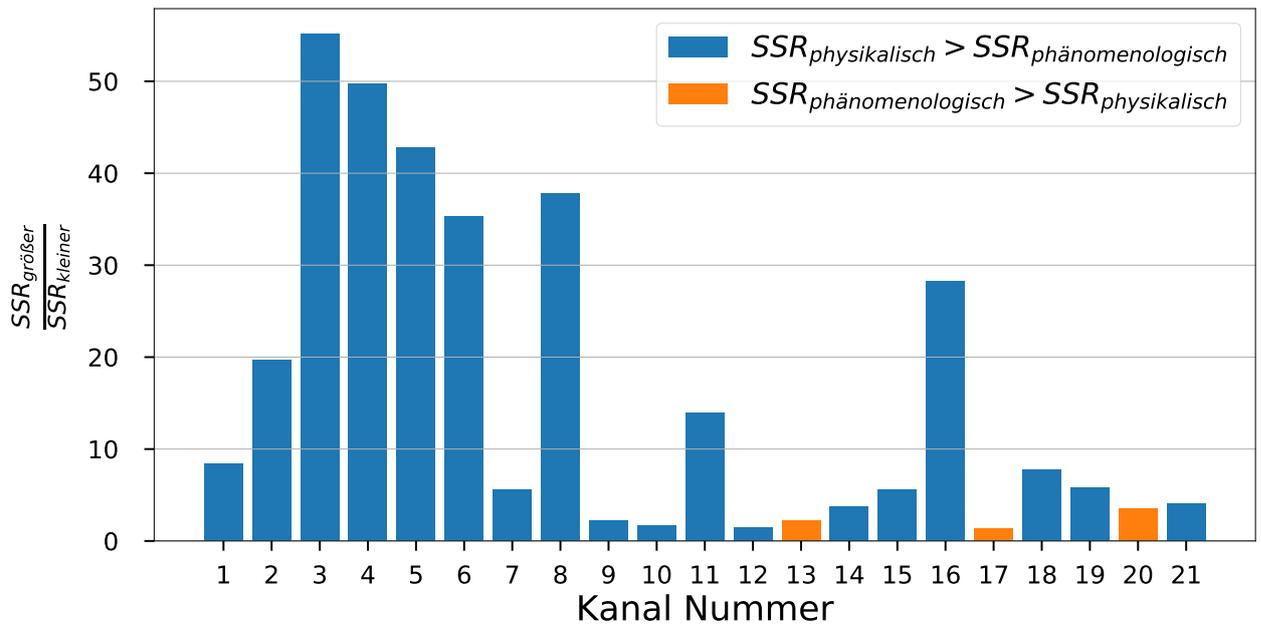


Abbildung 2.4: Vergleich der Quadratfehler der physikalischen und der phänomenologischen Fitfunktion

Es ist erkennbar, dass bis auf die Kanäle 13, 17 und 20 die phänomenologische Fitfunktion bessere Ergebnisse erzielt. Dies kann verschiedene Ursachen haben. Die wichtigste Ursache ist, dass die physikalische Fitfunktion für Photolumineszenz und nicht für Elektrolumineszenz erstellt wurde. Weiterhin ist die Fitfunktion speziell für den Halbleiter Galliumarsenid (GaAs) erstellt. Es ist aber nicht bekannt, welcher Kanal im Sonnensimulator welches Halbleitermaterial in den LEDs verbaut hat. Aus Angaben der Literatur [6] lässt sich für GaAs ein Bereich für die Bandlücke von  $1,45 \text{ eV} \leq E_g \leq 2,0 \text{ eV}$  angeben. In diesem Energiebereich liegen nach den Ergebnissen des Fits die Kanäle 9 bis 17. Unter diesen Kanälen liegen auch die beiden Kanäle 13 und 17, bei denen die physikalische Fitfunktion bessere Ergebnisse liefert. Bei diesen Kanälen könnte es sich um GaAs als Halbleitermaterial handeln. Die Kanäle 19 bis 20 reichen in den Grenzbereich des Spektrometers, bei dem das Spektrometer stark verrauschte Werte liefert. Dadurch ist der Vergleich der Fitfunktionen für diese drei Kanäle nicht sehr aussagekräftig.

Die phänomenologische Fitfunktion ist auch aus dem Grund besser, da sie die beste phänomenologische Fitfunktion ist, welche bekannt ist, unter dem Gesichtspunkt eine möglichst kleine Quadratfehlersumme zu erreichen.

Eine weitere Ursache für die größeren Fehler der physikalischen Fitfunktion ist auch die Tatsache, dass die Grenzen, in denen die Parameter variieren dürfen, bei der physikalischen Fitfunktion eingeschränkt sind. Diese Einschränkung ist nötig, damit keine physikalisch un-

sinnigen Werte erreicht werden. Bei der phänomenologischen Fitfunktion werden die Grenzen offen gelassen. Die Grenzen der Parameter der physikalischen Fitfunktion sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Parameter	untere Grenze	obere Grenze
$E_g$	1,085 eV	4,11 eV
$I_{max}$	0,1 W cm <sup>-2</sup> nm <sup>-1</sup>	5 W cm <sup>-2</sup> nm <sup>-1</sup>
$d \cdot A$	2,5 $\sqrt{\text{eV}}^{-1}$	250 $\sqrt{\text{eV}}^{-1}$
$\frac{kT}{\sigma}$	5 meV	50 meV
$kT_c$	25 meV	38,8 meV

Tabelle 2.1: Grenzwerte der einzelnen Parameter der physikalischen Fitfunktion

Die Bandlücke  $E_g$  ist durch die Grenzen des Spektrometers festgelegt. Die Grenzen der Intensität  $I_{max}$  werden so gewählt, dass die Peakwerte der einzelnen Kanäle stets in den Grenzen liegen. Dieser Parameter ist also praktisch ohne Grenzen. Die Intensität ist in erster Linie abhängig vom Strom der LEDs. Dieser ist bei allen Messungen stets auf 100% gesetzt. Der Parameter  $d \cdot A$  ist im Paper, auf dem die Theorie beruht, als fest mit  $25 \sqrt{\text{eV}}^{-1}$  angegeben. Da nicht ausschließlich GaAs-LEDs gefittet werden sollen, wurde für diesem Parameter ein Bereich von  $\pm 1$  Größenordnung gegeben. Der Parameter  $\frac{kT}{\sigma}$  ist von der Temperatur des Halbleitermaterials sowie von der Steilheit der Urbachkante abhängig. Diese Steilheit ist nur phänomenologisch. Deshalb kann für diesem Parameter keine physikalisch begründete Grenze angegeben werden. Durch Testen der Fitfunktion wurden so Grenzen gefunden, die den zu erwartenden Größenbereich eingrenzen, ohne den Parameter zu beschränken. Der Parameter  $kT_c$  wird durch die Temperatur  $T_c$  bestimmt, welche stets größer als  $T$  ist.  $T_c$  ist für Temperaturen ( $T$ ) größer als 290 K nicht größer als 1.2 mal so groß wie die Temperatur  $T$  [7]. Unter der Annahme, dass das Halbleitermaterial keine Temperaturen größer als 100 °C erreicht, ergeben sich die in Tabelle 2.1 angegebenen Grenzen.

Da die phänomenologische Fitfunktion eine kleinere Quadratfehlersumme verursacht und die physikalische Fitfunktion erhebliche Schwächen hinsichtlich der physikalischen Anwendbarkeit aufweist, wird im weiteren Verlauf mit der phänomenologischen Fitfunktion gearbeitet. Für Kanäle, bei denen die Fitfunktion versagt, kann dann auf die Beschreibung auf Grundlage einer Normalverteilung zurückgegriffen werden. Diese Beschreibung folgt erst an zweiter Stelle, da sie eine nicht zu verachtende Schwachstelle aufweist. Die Berechnungsvorschrift für die Parameter eines LED-Spektrums verlangen eine Integration über das gesamte

Spektrum. Wenn in einem Spektrum allerdings mehrere Kanäle aktiv sind, welches dem Messaufwand erheblich verringert, dann ist eine solche Integration nicht möglich oder stark fehlerbehaftet, insbesondere dann nicht, wenn sich die Spektren mehrerer Kanäle überlappen.

## 2.8 Charakterisierung der Ein- und Ausschaltvorgänge

Bei der Charakterisierung der Ein- und Ausschaltvorgänge des Sonnensimulators kommt es vor allem darauf an, dass die Anstiegs- bzw. Abfallzeiten des Lichts möglichst kurz sind. Durch eine sehr kurze Abfallzeit des Lichtes ist es möglich, Rekombinationseffekte in einer Solarzelle zu beobachten. Dies ist allerdings nur möglich, wenn das Licht schneller ein- bzw. ausgeschaltet werden kann, als die Rekombination von Ladungsträgern in einer Solarzelle stattfindet. Zur Charakterisierung der Ein- und Ausschaltvorgänge werden die Größen der Anstiegs- und Abfallzeiten verwendet. Die Anstiegs- und Abfallzeiten beschreiben die Zeiten, die ein Signal benötigt, um von einem Ausgangspegel (Startniveau) auf einen Endpegel (Endniveau) zu gelangen [11]. Der Unterschied zwischen dem Startniveau und dem Endniveau wird als Niveauunterschied bezeichnet. Die Anstiegs- bzw. Abfallzeit ist die Zeit zwischen 10% und 90% des Niveauunterschieds. Wichtig ist dabei, dass die Niveaus vorher klar definiert sind.

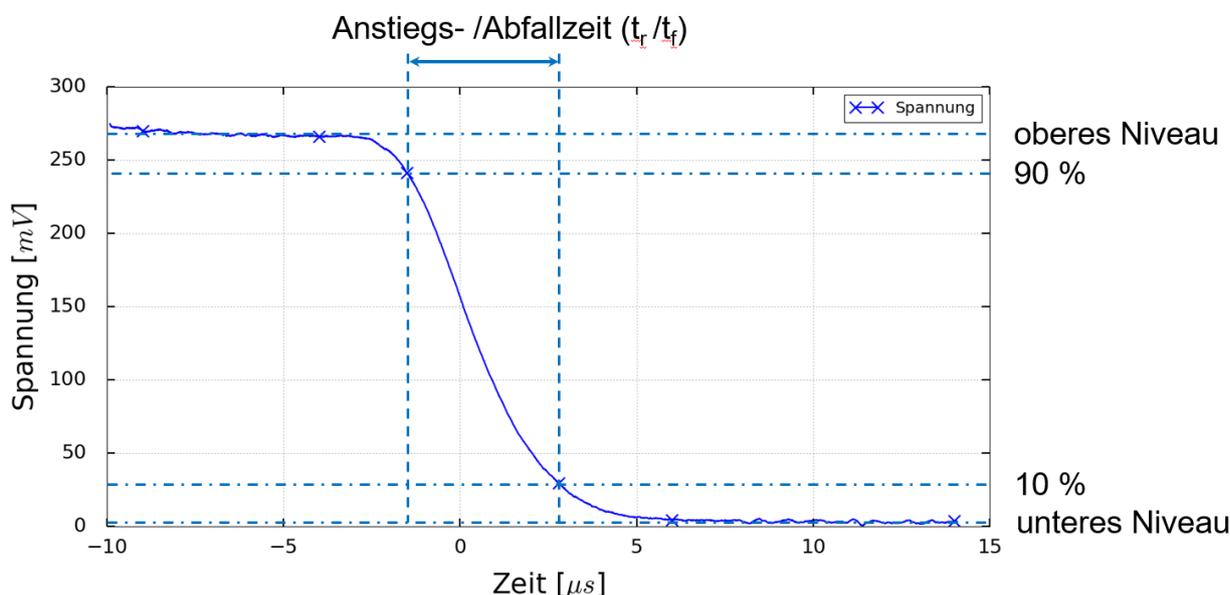


Abbildung 2.5: Charakterisierung der Abfallzeit an einem Beispiel

In Abbildung 2.5 werden durch die mit einem „X“ markierten Messwerte die Berechnungsgrenzen für die Niveaus gekennzeichnet. Um das Niveau zu berechnen, wird der Mittelwert aller Messwerte zwischen den beiden markierten Messwerten gebildet. Dieser Mittelwert beschreibt nun im Beispiel die Spannung des oberen bzw. unteren Niveaus. Von diesen beiden errechneten Niveaus wird nun der 10%-Wert und der 90%-Wert errechnet. Nun werden die Zeitpunkte gesucht, an denen diese beiden Schwellen unterschritten bzw. überschritten werden. Diese Zeitpunkte sind ebenfalls durch ein „X“ gekennzeichnet. Die Differenz dieser beiden Zeitpunkte heißt bei einer fallenden Flanke Abfallzeit. Von einer fallenden Flanke spricht man, wenn eine Messgröße von einem höheren Niveau auf ein niederes Niveau abfällt, wie es beim Ausschalten der Lichtquelle vorkommt. Bei einer steigenden Flanke heißt diese Zeit Anstiegszeit. Mit Hilfe dieser Charakterisierungsmethode ist es möglich, gleichartige Flanken zu vergleichen. Je kürzer die Anstiegszeit ist, desto steiler ist die Flanke.

# 3 Verhalten des Spektrums der LEDs im Betrieb des Sonnensimulators

## 3.1 Methoden und Messaufbau

### 3.1.1 Temperaturabhängigkeit des Spektrums

Das Spektrum einer LED ist in erster Linie von der Temperatur des emittierenden Halbleitermaterials und dem Strom, mit dem die LED betrieben wird, abhängig. Demnach wäre es die beste Methode, das Spektrum in Abhängigkeit von der Temperatur des Halbleitermaterials und dem Strom, mit dem der Sonnensimulator betrieben wird, zu untersuchen. Allerdings ist es im Sonnensimulator nicht möglich, die Temperatur des Halbleitermaterials zu bestimmen. Eine Möglichkeit, die Temperatur des Halbleitermaterials zu bestimmen, ist die Variation der Kühlertemperatur. Unter der Annahme, dass durch den Kühler des Sonnensimulators, mit dem die LEDs so gekühlt werden, auch die LEDs die Temperatur des Kühlmittels annehmen, lässt sich in kleinen Grenzen die Temperatur der LEDs variieren. Die untere Grenze der Kühlertemperatur ist durch den Taupunkt gegeben. Wird der Taupunkt unterschritten, bildet sich Kondenswasser, welches zu einer Schädigung des Gerätes führen könnte. Wenn die Raumtemperatur  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  ist, dann wäre bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60% die Taupunkttemperatur bei  $15,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Diese Taupunkttemperatur steigt mit steigender Luftfeuchtigkeit und steigender Raumtemperatur. Im klimatisierten Labor sollten solche Bedingungen aber nicht vorkommen. Demnach sollte die Temperatur nicht kälter als  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  eingestellt werden. Eine kältere Temperatur zu untersuchen hätte auch keine praktische Relevanz, da die LEDs im Betrieb wärmer werden und nicht kälter. Dadurch werden im Betrieb des Sonnensimulators nie Temperaturen unter  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht. Das Kühlsystem des Sinus-220 besitzt nicht nur die Möglichkeit zu kühlen, sondern kann die Kühlflüssigkeit auch erwärmen. Somit können auch Temperaturen erzeugt werden, die über der Raumtemperatur liegen. Die Lebensdauer von LEDs sinkt allerdings sehr stark, wenn die Betriebstemperatur zu hoch wird. Aus diesem Grund wird die Temperatur des Kühlkreislaufes nicht weiter als auf  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  geheizt.

In der Praxis ist die Halbleitertemperatur aber vermutlich deutlich höher, da die Halbleiter durch den Stromfluss direkt erwärmt werden. So kommt es zu einem Temperaturgefälle zwischen dem Halbleiter und der Kühlflüssigkeit. Die Temperatur des Halbleitermaterials lässt sich nur schwer abschätzen, liegt aber vermutlich mehr als 20 K über der Temperatur

der Kühlflüssigkeit.

Für die weitere Betrachtung wird angenommen, dass die Parameter, mit denen das Spektrum beschrieben wird, linear von der Temperatur abhängig sind. Die Temperatur ist im Betrieb nicht linear abhängig von der Zeit, in der die LEDs Licht emittieren.

### **3.1.2 Stromabhängigkeit des Spektrums und der Temperatur**

Im Betrieb des Sonnensimulators wird die versucht, die Intensität des Lichtes über eine Regelung konstant zu halten. Dies wird durch die Variation des Stromes erreicht. Aus diesem Grund ist die Abhängigkeit des Spektrums vom Strom, mit dem die LEDs betrieben werden, von Interesse. Fließt ein größerer Strom, nimmt auch die Temperaturänderung der LEDs zu und damit verändert sich das Spektrum der LEDs über die Zeit stromabhängig. Außerdem ist die Intensität der LEDs linear vom Strom durch die LED abhängig.

Der Sonnensimulator ermöglicht es, das Spektrum mit einem Intensitätsfaktor zu multiplizieren. Dieser verändert den Strom aller aktiven Kanäle um diesen Faktor. Da im Sonnensimulator die Intensität eingestellt wird und nicht direkt der Strom, wird im Folgenden stets von der eingestellten Intensität gesprochen. Nach Herstellerangaben entspricht dies der Einstellung des Stromes. Dabei bedeutet eine Intensität von 100% nicht, dass alle Kanäle vom gleichen Strom durchflossen werden, da die Spezifikationen der einzelnen LED-Arten unterschiedlich sind.

### **3.1.3 Zeitabhängigkeit der Temperatur**

Die Temperatur der LEDs ändert sich über die Zeit. Fließt im Betrieb Strom durch die LEDs, erwärmt dieser Strom die LEDs. Diese Erwärmung über die Zeit zeigt sich dann in der Veränderung des Spektrums über die Zeit. Von Interesse ist dabei die Zeit von  $t < 100$  ms. In dieser Zeitspanne werden die meisten Messungen mit dem Sonnensimulator durchgeführt. Wird die Regelung deaktiviert, wird der Einfluss der Temperatur auf das Spektrum, insbesondere auf die Amplitude der einzelnen Kanäle, nicht durch Änderung des Stromes kompensiert. Der Strom wird konstant gehalten.

### **3.1.4 Messaufbau**

Als LED-basierter Sonnensimulator kommt in dieser Arbeit der „Sinus 220“ der Firma „Wavelabs“ zum Einsatz. Dieser besteht aus einer sogenannten „Light-Engine“, in der die LEDs verbaut sind. Die Light-Engine ist ca. 2 m über dem Boden befestigt und strahlt das Licht nach unten ab. Unter der Light-Engine befindet sich der „Chuck“. Dieser dient als tem-

peraturgeregelt Auflagefläche für die Solarzellen. Die Auflagefläche ist kühl- und heizbar. Außerdem befinden sich am Chuck Kontaktierungsmöglichkeiten für Solarzellen. Die Oberfläche des Chucks ist so positioniert, dass sie sich genau in der Ebene befindet, in der die Optik der Light-Engine das Licht jedes LED-Kanals homogen auf die gesamte beleuchtete Fläche verteilt. Das entspricht einem Abstand zur Light-Engine von ca. 1 m. Unterhalb des Chucks befindet sich die „IV-Engine“, die der Messung der IV-Kennlinien dient. Außerdem befindet sich dort ein Computer, der über ein seitlich angebrachtes Display die Steuerung des Sonnensimulators ermöglicht.

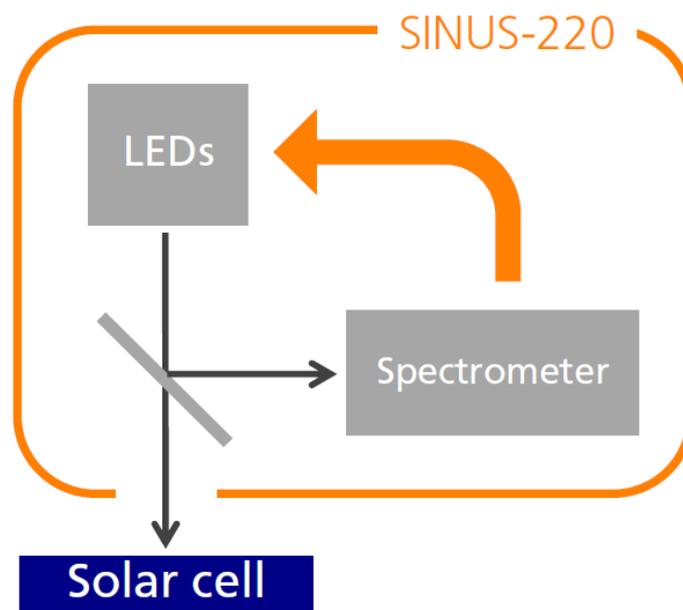


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau der Light-Engine mit integriertem Spektrometer

Die Light-Engine wird durch einen Wasserkühler gekühlt, der auch die Möglichkeit besitzt, den Kühlkreislauf zu erwärmen. Somit soll gewährleistet werden, dass die Temperatur der LEDs im Betrieb möglichst konstant bleibt, da das Spektrum der LEDs temperaturabhängig ist. In der Light-Engine ist außerdem ein Spektrometer und ein Intensitätsmesser verbaut (Abbildung 3.1). Mit Hilfe des Intensitätsmessers kann die Intensität des Spektrums geregelt werden. Wird der Sonnensimulator angewiesen ein AM1.5-Spektrum zu erzeugen, ermittelt der Sonnensimulator selbst, welche Kanäle mit welcher Intensität betrieben werden müssen, um das Spektrum bestmöglich zu erreichen. Mit Hilfe des Spektrometers wird diese Zusammensetzung während eines Lichtblitzes regelmäßig angepasst, um die Wellenlängendrift der LEDs zu kompensieren.

### 3.1.5 Messdurchführung

Die Software des Sinus 220 ermöglicht es, Rezepte zu erstellen, die bis zu 7 Rezeptschritte beinhalten können. Dabei kann jedem Rezeptschritt ein Spektrum und eine Dauer zugeordnet werden. Weiterhin kann bestimmt werden, welche Messwerte in diesem Rezeptschritt aufgenommen werden sollen. Mit dem Sinus 220 können neben einer IV-Kennlinie auch Elektrolumineszenzaufnahmen oder IR-Aufnahmen getätigt werden. Das Spektrum kann durch die manuelle Zusammenstellung der Kanäle und ihrer Intensitäten erfolgen, oder über ein gefittetes Spektrum. Bei einem gefitteten Spektrum wird dem Sonnensimulator ein Zielspektrum vorgegeben, z.B. AM1.5. Der Sonnensimulator legt nun selbst die Zusammenstellung der einzelnen Kanäle fest, um das Zielspektrum bestmöglich zu erreichen. Es besteht die Möglichkeit, ein Rezept nach einer definierten Pausenzeit zu wiederholen.

Bei jedem Rezeptdurchlauf wird eine Datei angelegt, welche die Messdaten des Rezeptes beinhaltet. Dabei werden die Daten von jedem Rezeptschritt gespeichert. Die Daten des Spektrometers werden auch gespeichert. Wobei alle 3,3 nm ein Wert für die Bestrahlungsstärke aufgenommen wird. Es nimmt mit zunehmender Dauer des Rezeptschrittes auch die Integrationsdauer zu. Da die Spektrometerdaten nur integriert vorliegen, ist es für die Auswertung dieser Daten wichtig, dass die Rezeptschritte möglichst kurz und stets gleichlang ist. Je kürzer die Rezeptschritte und damit auch die Integrationszeit ist, desto genauer lässt sich das Spektrum einem Zeitpunkt zuordnen. Da nicht sichergestellt werden kann, dass auch je über die gesamte Rezeptschrittdauer integriert wird, müssen die Rezeptschritte stets gleichlang sein. Die kürzeste einstellbare Rezeptschrittdauer beträgt 5 ms. Da die Integrationszeit nun, wie die Rezeptschrittdauer, 5 ms beträgt, ist der Zeitpunkt, wann im Mittel dieses integrierte Spektrum emittiert wird, genau in der Mitte des Rezeptschrittes. Aus diesem Grund wird vom Zeitpunkt, an dem die Aufnahme des Spektrums abgeschlossen war, die halbe Rezeptschrittdauer abgezogen. Das Spektrum vom ersten Rezeptschritt wird vom Sonnensimulator nicht korrekt aufgezeichnet. Aus diesem Grund können pro Rezept nur 6 Spektren ausgewertet werden. Um dennoch etwa 100 ms abbilden zu können, wurden 3 verschiedene Rezepte verwendet. Das erste Rezept besteht aus 7 Schritten, die je 5 ms lange Rezeptschritte haben. Das zweite Rezept besteht aus 7 Rezeptschritten mit je 5 ms langen Rezeptschritten außer dem ersten Rezeptschritt. Dieser Rezeptschritt hat eine Dauer, die der Gesamtdauer des ersten Rezeptes entspricht. Das sind  $7 \cdot 5 \text{ ms} = 35 \text{ ms}$ . Der erste Rezeptschritt des dritten Rezeptes hat eine Dauer von  $35 \text{ ms} + 6 \cdot 5 \text{ ms} = 65 \text{ ms}$ . Damit hat das dritte und letzte Rezept eine Dauer von 95 ms.

Um die Genauigkeit der Messung bestimmen zu können, wurde jede Messung 10 mal wiederholt. Zwischen den Wiederholungen wurde jeweils eine Pause von 30 Sekunden gelas-

sen, damit die Temperatur der LEDs wieder die Temperatur der Kühlflüssigkeit annehmen kann. Die verwendeten Spektren wurden jeweils so gewählt, dass sich die Spektren der einzelnen Kanäle nicht überlappen. Um den Messaufwand zu begrenzen, wurde sich auf drei verschiedene Spektren begrenzt. Das erste Spektrum beinhaltet die Kanäle 1, 4, 9, 16 und 20 (Abbildung 3.2). Das zweite Spektrum die Kanäle 7 und 17 (Abbildung 3.3). Das dritte Spektrum beinhaltet die Kanäle 8 und 19 (Abbildung 3.4). So werden 9 von 20 Kanälen betrachtet.

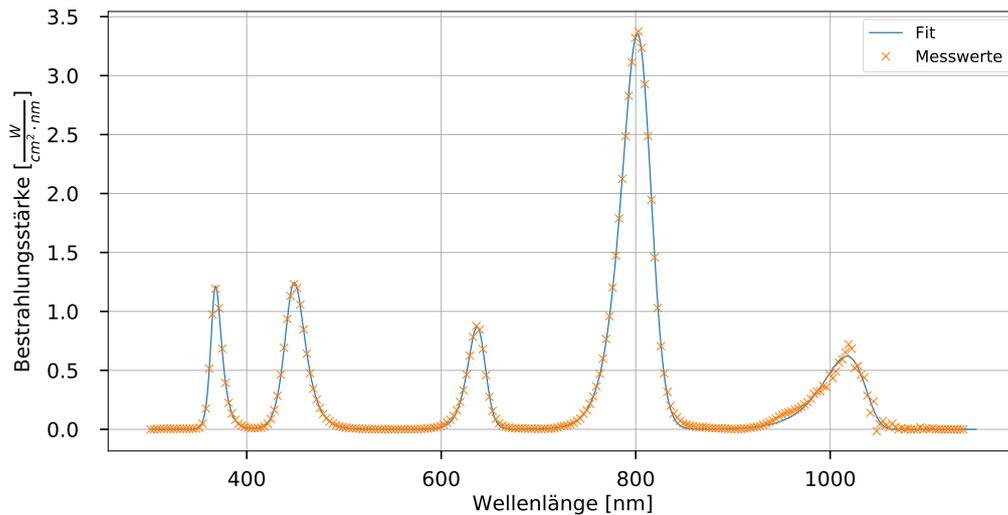


Abbildung 3.2: Messwerte des ersten Spektrums (Kanäle 1, 4, 9, 16, 20) mit Fit nach Gleichung 2.10

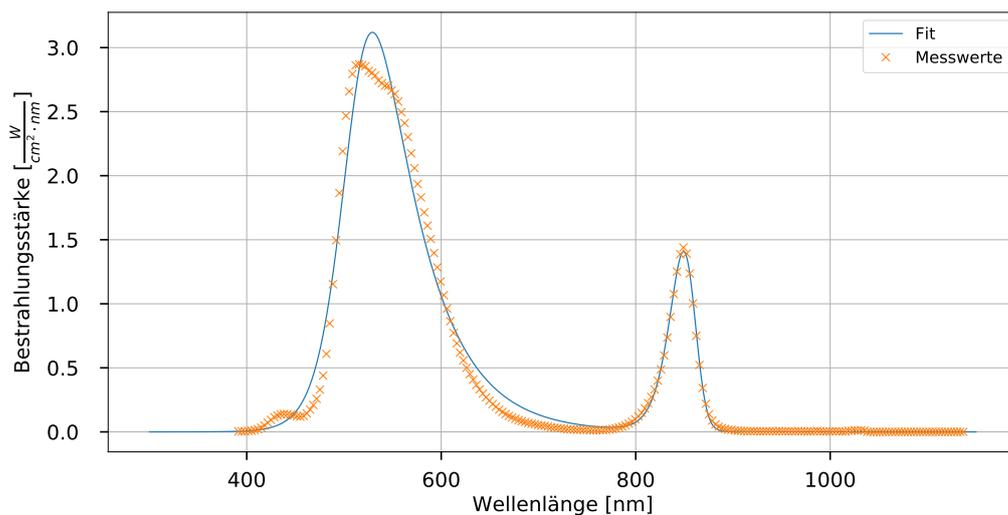


Abbildung 3.3: Messwerte des zweiten Spektrums (Kanäle 7, 17) mit Fit nach Gleichung 2.10

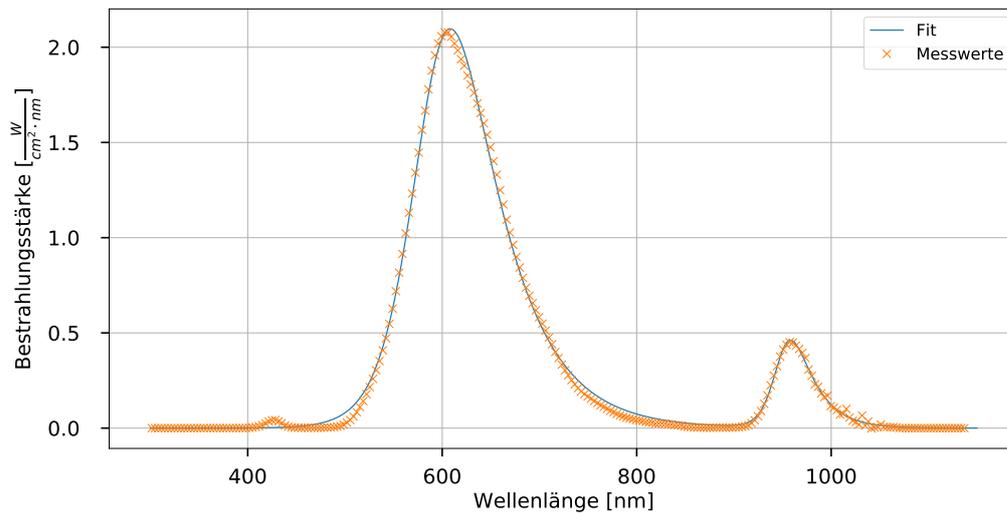


Abbildung 3.4: Messwerte des dritten Spektrums (Kanäle 8, 19) mit Fit nach Gleichung 2.10

Das erste Spektrum, das in Abbildung 3.2 abgebildet ist, zeigt 5 Kanäle, die sich sehr gut mit der Funktion aus 2.10 fitten lassen. Auffällig ist beim Kanal 20, der seinen Peak bei ca. 1000 nm hat, das stärkere Rauschen als bei den anderen Kanälen. Dies liegt daran, dass das Spektrometer in diesem Wellenlängenbereich eine schlechte Sensitivität aufweist.

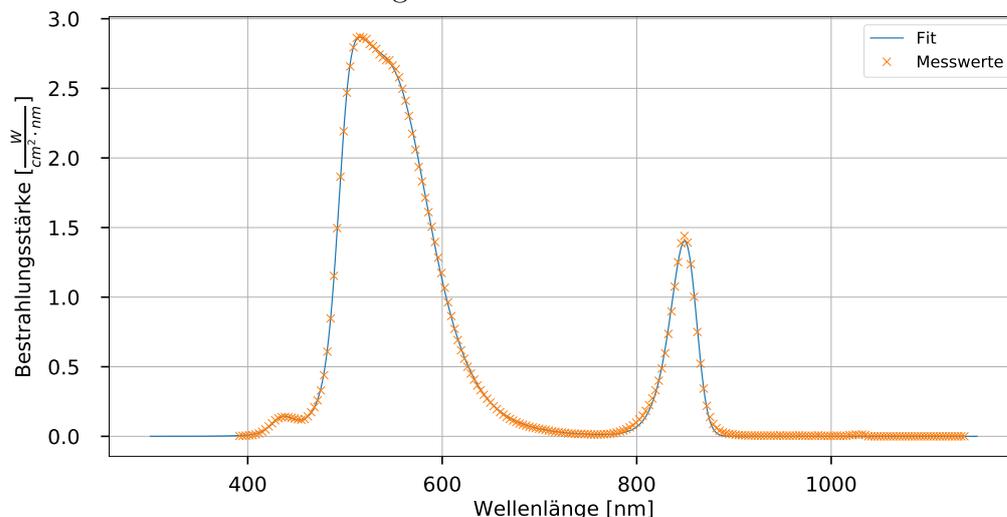


Abbildung 3.5: Messwerte des zweiten Spektrums (Kanäle 7, 17) mit Fit nach Gleichung 2.10  
Kanal 7 wurde mit der Summe aus 3 Fitfunktionen gefittet

Das zweite Spektrum zeigt in Abbildung 3.3 zwei aktive Kanäle, wobei der Kanal, der im niedrigeren Wellenlängenbereich emittiert, der Kanal 7, vermutlich ein Kanal ist, der LEDs verwendet, die mit einem phosphoreszierenden Material beschichtet sind. Dies ist daran zu

erkennen, dass vor dem eigentlichen Peak bei kürzerer Wellenlänge ein Peak mit sehr kleiner Amplitude zu finden ist. Dieser kleinere Peak stammt von der eigentlichen LED. Dieses Licht kürzerer Wellenlänge dient der Anregung des phosphoreszierenden Materials. Das phosphoreszierende Material könnte auch aus verschiedenen Materialien zusammengesetzt sein. Der Fit mit nur einer Funktion ist aufgrund der nicht LED-typischen Form eher schlecht. Dennoch gibt die Fitfunktion Auskunft über das Gesamtverhalten dieses Kanals. Der selbe Effekt ist auch im dritten Spektrum, welches in Abbildung 3.4 dargestellt ist, beim Kanal 8 zu erkennen. Der Kanal 8 ist in dieser Abbildung der Kanal mit Emission bei kürzerer Wellenlänge.

Es ist möglich, einen Kanal auch als Summe mehrerer Gleichungen zu fitten. Verwendet man drei Gleichungen für den Fit des Kanals 7, erhält man den Fit aus Abbildung 3.5. Die Zuordnung der einzelnen Gleichungen erfolgte dabei über die Startwerte, mit denen der Fitalgorithmus gestartet wurde. Der Nachteil dieser Methode ist, dass nun ein Kanal statt mit üblichen 4 Parametern nun mit 12 Parametern beschrieben wird. Somit ist die Beschreibung eines solchen Kanals sehr umständlich.

Im Vergleich zu Kanal 7 beschreibt der einfache Fit den Kanal 8 deutlich besser. Der Nachteil des Fits mit nur einer Fitfunktion ist aber, dass das Verhalten des Peaks der Anregung kaum einen Einfluss auf die Fitfunktion hat. Welche Art und Weise des Fits eines solchen Spektrums schließlich angewendet wird, hängt von dem Ziel ab, dass mit dem Fit erreicht werden soll.

## 3.2 Zeitabhängigkeit des Spektrums

Da sich im Betrieb die Temperatur der LEDs ändert, ändert sich auch das Spektrum über die Zeit, in der das Licht an ist. Beobachtet man das Spektrum eines Kanals, stellt man fest, dass sich das Spektrum stark ändert. Diese Änderung ist für dem Kanal 16 in Abbildung 3.6 dargestellt. Mit zunehmender Zeit steigt die Temperatur. Damit sinkt die Intensität und der Peak verschiebt sich zu größeren Wellenlängen. Dabei wurde die Erwärmung durch die Betriebsdauer des Fittes erreicht. Um die Änderung des Spektrums über die Zeit und damit auch mit der Temperatur zu verdeutlichen, wurden Zeiten bis  $t = 330$  ms aufgezeichnet.

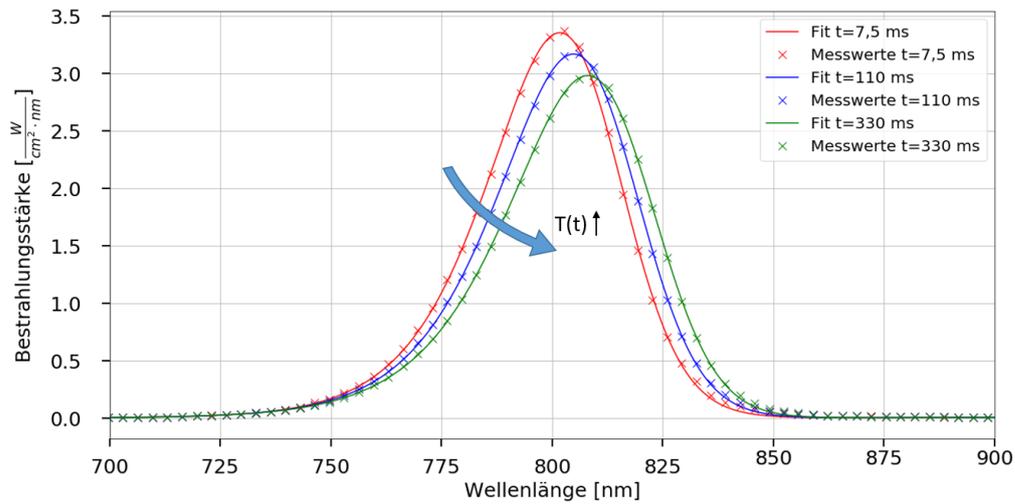


Abbildung 3.6: Messwerte mit Fit nach Gleichung 2.10 vom Kanal 16  
 Die drei Spektren wurden zu drei unterschiedlichen Zeiten im Lichtblitz aufgenommen.

Um einen besseren Überblick zu bekommen, wie sich das Spektrum zeitabhängig ändert, bietet es sich an, die einzelnen Fitparameter des Kanals zeitaufgelöst zu betrachten. Diese Darstellung befindet sich am Beispiel der Amplitude (Peakbestrahlungsstärke) in Abbildung 3.7. Hier wurden nur die ersten 100 ms betrachtet. Dargestellt sind alle Messwerte aus den 10 Wiederholungen der drei Rezepte in einem Diagramm.

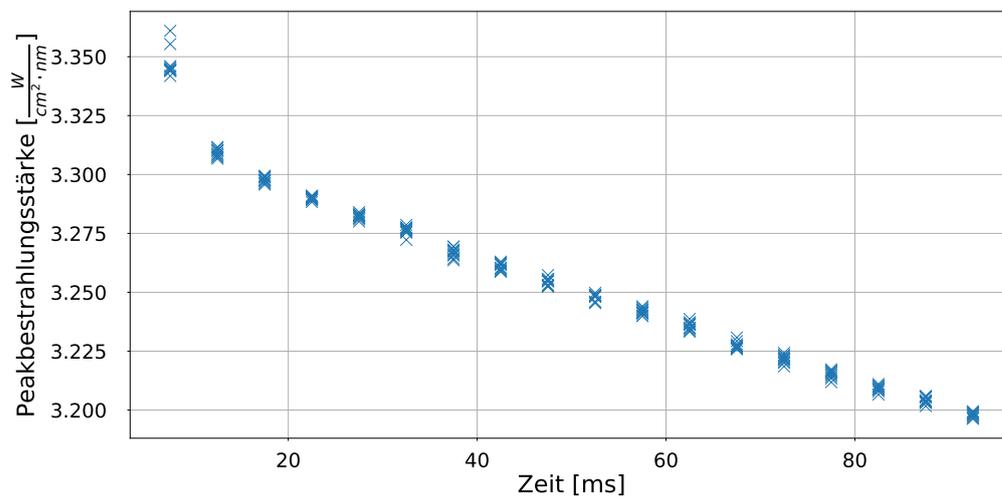


Abbildung 3.7: Peakbestrahlungsstärke über die Zeit vom Kanal 16

Die Peakbestrahlungsstärke ändert sich besonders stark in den ersten 10 ms. Dieser starke Anstieg zeigt sich auch in der größeren Varianz der Messwerte zu dieser Zeit. Die starke Änderung in dieser Zeitspanne lässt auf einen besonders starken Temperaturanstieg in dieser Zeit schließen. Dies ist auch erklärbar, da zu Beginn, wenn die LEDs noch die Temperatur der Kühlflüssigkeit haben, zuerst sich das Halbleitermaterial erwärmt, ohne dass es schon zu einem Temperaturfluss zur Kühlflüssigkeit kommt. Erst, wenn das Halbleitermaterial eine gewisse höhere Temperatur erreicht hat, wird der Temperaturanstieg auch von der Wärmeleitung hin zum Kühlkreislauf dominiert. Um den Übergang zwischen diesen beiden Erwärmungsarten besser untersuchen zu können, wäre eine schnellere Aufnahme der Spektren notwendig. Dies ist mit dem vorliegenden System nicht möglich.

Die Änderung der Peakbestrahlungsstärke ist nach 20 ms fast linear. Unter der Annahme, dass die Peakbestrahlungsstärke linear von der Temperatur abhängt ist, verläuft auch die Temperatur des Halbleitermaterials dieses Kanals linear. Dieser lineare Temperaturanstieg kann allerdings nicht für alle  $t > 20$  ms gelten, denn das würde bei Dauerlicht unendliche Temperaturen zu Folge haben. Ist der Kühler stark genug, um die Temperaturerzeugung der LEDs zu kompensieren, müsste sich irgendwann ein Gleichgewicht bei konstanter Temperatur einstellen. Bei welcher Bestrahlungsdauer dies aber erreicht wird, ist nicht bekannt.

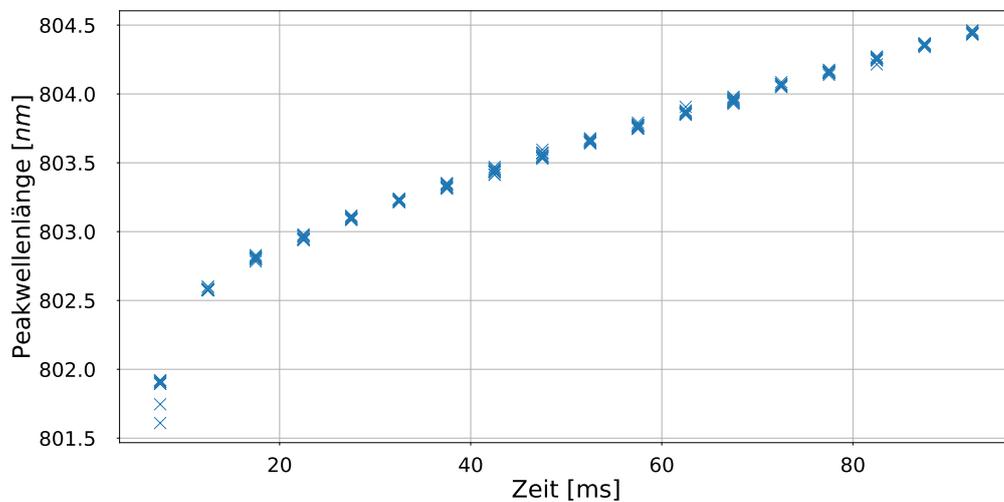


Abbildung 3.8: Peakwellenlänge über die Zeit vom Kanal 16

Während die Peakbestrahlungsstärke über die Zeit sinkt (Abbildung 3.7), steigt die Peakwellenlänge (Abbildung 3.8) und die Breite (Abbildung 3.9) und die Schiefe sinkt (Abbildung 3.10). Es ist zu beobachten, dass die Abhängigkeit über die Zeit bei der Peakbestrahlungsstärke und der Peakwellenlänge sehr deutlich sind. Die Breite steigt nur wenig über die Zeit. Aus diesem Grund sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Wiederholungen im Ver-

gleich zum Anstieg auch größer. Bei Betrachtung der Schiefe lässt sich die Änderung der Schiefe kaum noch vom Rauschen der Messwerte unterscheiden.

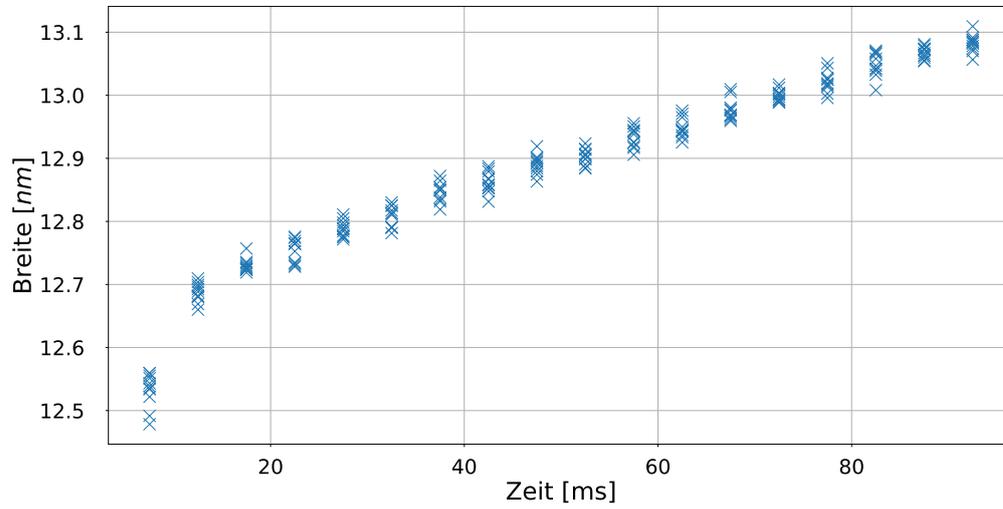


Abbildung 3.9: Breite des Peaks über die Zeit vom Kanal 16

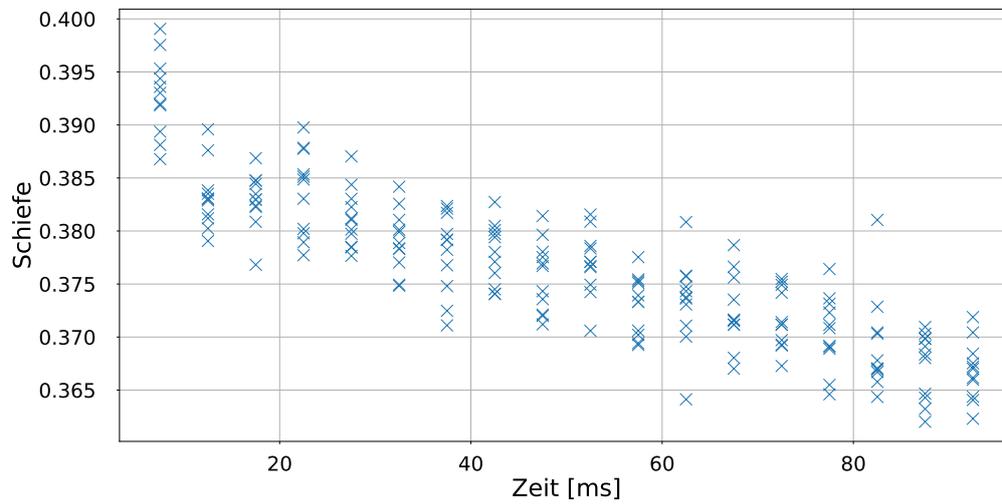


Abbildung 3.10: Schiefe des Peaks über die Zeit vom Kanal 16

### 3.3 Abhängigkeit des Spektrums von der Intensität

Die einzige Möglichkeit, das Spektrum des Sonnensimulators zu beeinflussen, ist die Änderung des Stromes, mit der die einzelnen Kanäle betrieben werden und die Kombination der einzelnen Kanäle. Der Strom hat einen direkten und weitestgehend linearen Einfluss auf die Intensität des Spektrums. Außerdem beeinflusst der Strom durch die LEDs auch, wie stark sich diese erwärmen. Da die elektrische Leistung ( $P = U \cdot I$ ) die Temperaturentwicklung maßgeblich beeinflusst und die Spannung über einer LED relativ konstant bleibt, lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Temperaturentwicklung und dem Strom durch eine LED vermuten. Die Peakwellenlänge ist nicht abhängig vom Strom durch die LED, aber abhängig von der Erwärmung dieser. In Abbildung 3.11 wurde die Peakwellenlänge in Abhängigkeit von der Zeit bei vier verschiedenen Intensitäten dargestellt. Mit zunehmender Intensität ändert sich auch die Peakwellenlänge über die Zeit stärker. Es ist auch erkennbar, dass alle vier Kurven aus dem selben Ursprung stammen, auch wenn dieser nicht gemessen werden kann. Die Messwerte der letzten aufgezeichneten Zeit ( $t = 92,5 \text{ ms}$ ) sind charakteristisch für die Zunahme der Peakwellenlänge in Abhängigkeit der Intensität. Deshalb stellt Abbildung 3.12 diesen Zusammenhang der Peakwellenlänge von der Intensität dar. Weiterhin wurde eine Gerade in diese Abhängigkeit gefittet, um zu überprüfen, ob ein linearer Zusammenhang besteht.

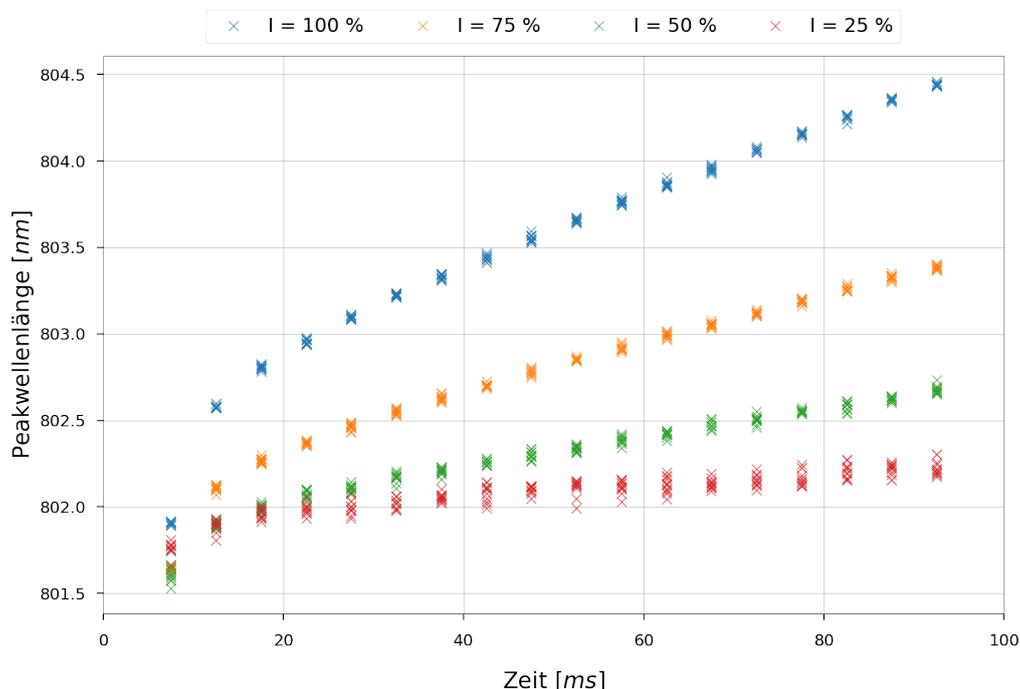


Abbildung 3.11: Peakwellenlänge über die Zeit vom Kanal 16 bei 4 verschiedenen Intensitäten

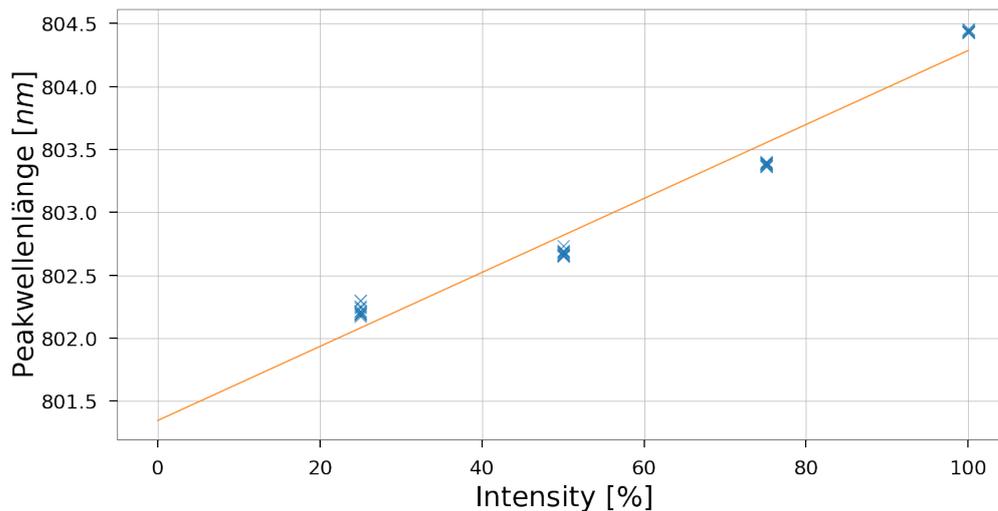


Abbildung 3.12: Peakwellenlänge bei  $t = 92,5$  ms in Abhängigkeit von der Intensität für Kanal 16  
 Fitgerade:  $C(I) = 0,0294 \text{ nm } \%^{-1} \cdot I + 801,35 \text{ nm}$

Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  für diesen Fit aus Abbildung 3.12 beträgt  $R^2 = 0,966$ . Das bedeutet, dass die Messwerte zu einem sehr großen Anteil durch diese lineare Funktion beschrieben werden können. Klar ist aber auch, dass die lineare Funktion nur eine Näherung ist. Es ist anzunehmen, dass die Kurve bei kleineren Intensitäten abflacht. Um diese These zu stützen, sind Messungen bei mehr als vier verschiedenen Intensitäten nötig. Aufgrund des kleineren Signals bei kleineren Intensitäten nimmt aber auch das Rauschen der Parameter zu. So kann die Intensität nicht beliebig klein eingestellt werden.

Durch den Fit mit einer linearen Funktion ist es möglich, auch Parameterwerte für andere Intensitäten abzuschätzen. Von besonderem Interesse ist dabei die Intensität 0%. Bei dieser Intensität emittieren die LEDs keine Strahlung. Dadurch kann das Spektrum bei dieser Intensität nie gemessen werden. Außerdem findet bei dieser Intensität keine Erwärmung des Halbleitermaterials statt, da auch kein Strom durch die LED fließt. So bleiben bei dieser Intensität über der gesamten Strahlungsdauer die Parameter des theoretischen Spektrums konstant. Die so ermittelten Parameterwerte sind also gleich den Parameter Werten für  $t = 0$  ms und werden für einen Parameter  $P$  als  $P_0$  bezeichnet. Es gilt für einen Parameter  $P$ :

$$P(I = 0) = P(t = 0) = P_0 \quad (3.1)$$

Dieser Wert wurde nur für den Zeitpunkt  $t = 92,5 \text{ ms}$  im Zeitverlauf des Lichtblitzes ermittelt. Um einen Wert zu bekommen, der für mehrere Zeiten gilt, wird der Mittelwert  $\overline{P_0}$  der  $P_0$  aller gemessenen Zeitpunkte bestimmt. Dies ist möglich, da der Zusammenhang aus Gleichung 3.1 zu allen Zeiten im Lichtblitz gültig ist. Für die Peakwellenlänge von Kanal 16 gilt:  $\overline{C_0} = 801,457(76) \text{ nm}$ .

Kanal:	1	4	7	8	9	16	17	19	20
Parameter:									
A	0.999	0.996	0.996	0.996	0.991	0.999	0.999	0.991	0.979
S	0.456	0.605	0.816	0.964	0.314	0.899	0.143	0.072	0.119
C	0.998	0.402	0.898	0.998	0.994	0.883	0.983	0.641	0.097
W	0.876	0.992	0.854	0.959	0.996	0.991	0.697	0.044	0.74

Tabelle 3.1: Mittel des Bestimmtheitsmaßes der Fits verschiedener Parameter in Abhängigkeit von der Intensität für alle untersuchten Kanäle

A: Amplitude / Peakbestrahlungsstärke

S: Schiefe

C: Peakwellenlänge

W: Breite

Der Anstieg dieser Fitfunktion  $P_{mI}$  dagegen ist abhängig vom Zeitpunkt im Lichtblitz, da wie in Abbildung 3.11 erkennbar die Messwerte der einzelnen Reihen auseinanderdriften. Aus diesem Grund ist der Anstieg  $P_{mI} = P_{mI}(t)$  eine Funktion der Zeit.

Diese Betrachtung ist auch für alle anderen Parameter möglich. Allerdings ist bei anderen Parametern die Linearität des Parameters von der Intensität nicht immer gegeben. Wird das Bestimmtheitsmaß als Richtlinie verwendet, wie linear der Zusammenhang ist, dann erkennt man, dass die Amplitude sehr linear von der eingestellten Intensität abhängt. Das ist nicht weiter verwunderlich, da die Amplitude direkt von der eingestellten Intensität beeinflusst wird und nicht nur über die Temperatur. Die Schiefe dagegen erreicht nur für Kanal 8 einen guten Wert von mehr als 0.9. Für die Peakwellenlänge und die Breite sind die Ergebnisse sehr unterschiedlich. Zusammenfassend sind alle Ergebnisse für das Bestimmtheitsmaß in Tabelle 3.1 dargestellt. Dafür wurde in Tabelle 3.1 der Mittelwert der Bestimmtheitsmaße für die Fits aller Zeitpunkte eines Lichtblitzes verwendet.

Für die Werte, die für diesen linearen Fit ein Bestimmtheitsmaß von mehr als 0,85 haben,

wurde in einer weiteren Tabelle (Tabelle 3.2) die Ordinatenabschnitte dargestellt. Diese Werte entsprechen den Parameterwerten zum Zeitpunkt  $t = 0$  ms. Eine Ausnahme bildet dabei die Intensität, da diese für diese Berechnung stets  $3,28 \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$  sein sollte. Die Tabelle zeigt aber auch, dass der Fit nicht für jeden Kanal einen Ordinatenabschnitt bei  $0 \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$  hat. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Amplitude nicht für jeden LED-Typ linear Abhängig vom Strom durch die LED ist.

Kanal:	1	4	7	8	9	16	17	19	20
Parameter:									
A	-0.016	0.12	0.33	0.21	0.093	0.158	0.069	0.026	0.07
S				2.21		0.263			
C	367.63		529.13	610.58	634.09	801.46	846.53		
W	2.919	5.557	16.5	22.45	6.159	11.82			

Tabelle 3.2: Ordinatenabschnitte für alle Kanäle und Parameter deren Bestimmtheitsmaß größer als 0,85 ist.

A: Amplitude / Peakbestrahlungsstärke [ $\text{W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ ]

S: Schiefe

C: Peakwellenlänge [nm]

W: Breite [nm]

### 3.4 Abhängigkeit des Spektrums von der Temperatur

Analog zur Abhängigkeit des Spektrums von der Intensität kann auch die Abhängigkeit des Spektrums von der Temperatur untersucht werden. Wird die Temperatur des Kühlkreislaufes geändert, ändert sich damit die Bezugstemperatur der LEDs. Es ist zu erwarten, dass der Temperaturverlauf der LEDs sich auch um die Änderung der Kühlertemperatur ändert. Bei einem linearen Zusammenhang zwischen der Temperatur und einem Fitparameter ändert sich demnach auch der Fitparameter linear mit der Kühlertemperatur unabhängig vom Zeitpunkt im Lichtblitz.

Zur Untersuchung der Abhängigkeiten von der Temperatur wurde die Kühlertemperatur zusätzlich zur Standardbetriebstemperatur von  $18^\circ\text{C}$  auch auf  $16^\circ\text{C}$  und  $24^\circ\text{C}$  geändert.

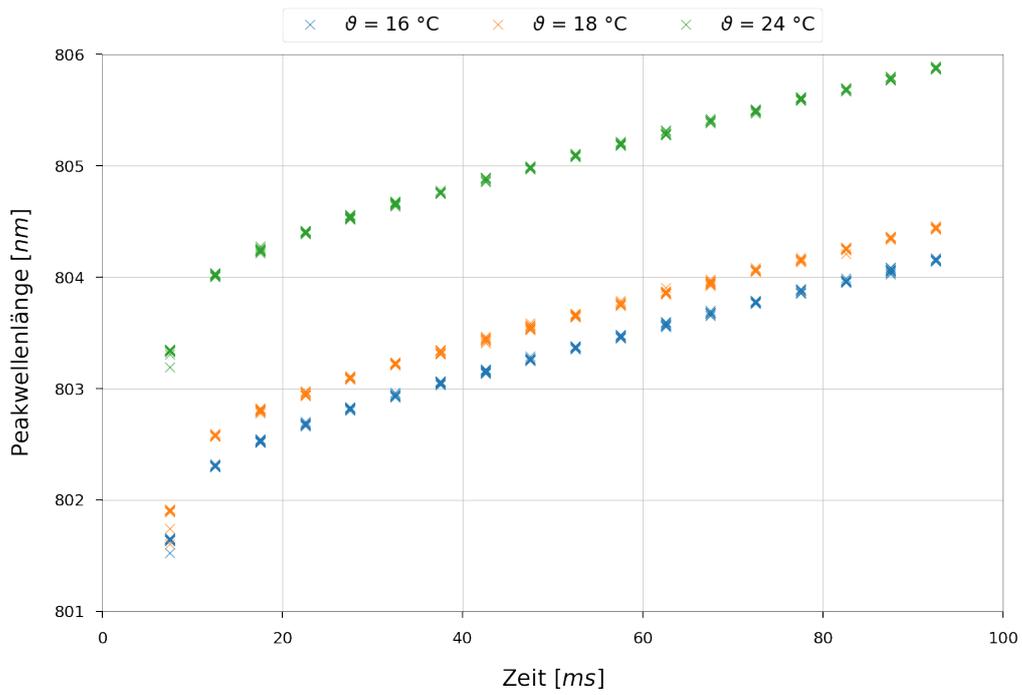


Abbildung 3.13: Peakwellenlänge über die Zeit vom Kanal 16 bei 3 verschiedenen Temperaturen

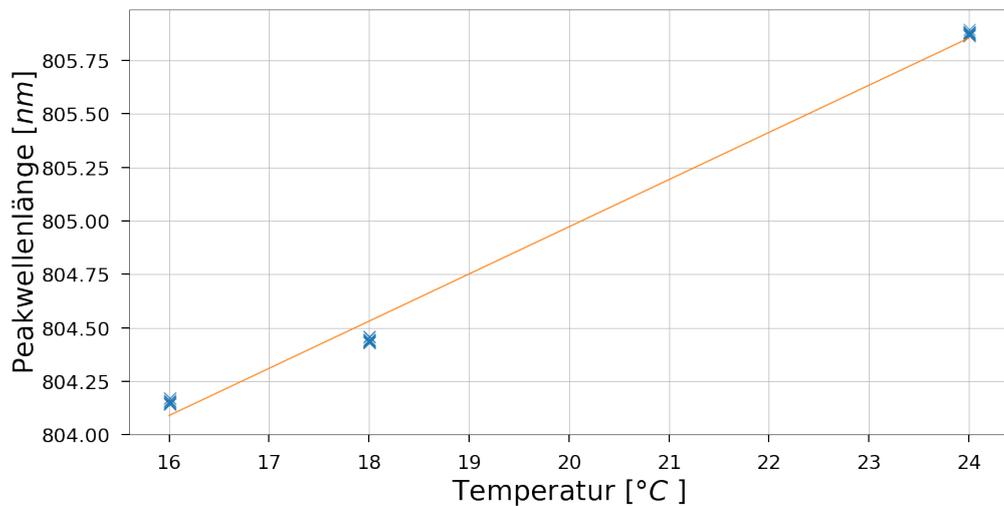


Abbildung 3.14: Peakwellenlänge bei  $t = 92,5$  ms in Abhängigkeit von der Temperatur für Kanal 16  
 Fitgerade:  $C(I) = 0,221 \text{ nm K}^{-1} \cdot I + 800,56 \text{ nm}$

Abbildung 3.13 zeigt, dass die Erwartungen erfüllt werden und die Kurven für die Peakwellenlänge der drei Temperaturen parallel zueinander liegen. Es lässt sich auch ein linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Peakwellenlänge einer bestimmten Zeit

vermuten, der aber erst durch eine Darstellung der Peakwellenlänge über der Temperatur zum Zeitpunkt  $t = 92,5$  ms überprüft werden kann. Diese Darstellung befindet sich in Abbildung 3.14.

Das Bestimmtheitsmaß für diesen linearen Fit beträgt  $R^2 = 0,992$ . Die lineare Abhängigkeit ist auch in der Abbildung gut zu erkennen. Allerdings besteht auch hier wieder die Möglichkeit, dass die Linearität nur eine Näherung ist, die für diesen recht kleinen Temperaturbereich zutrifft. Die Messwerte würden auch ein Abflachen der Kurve hin zu kleineren Temperaturen vermuten lassen. Um allerdings ein Maß zu erhalten, zu welchem Grad die Temperatur ein Einfluss auf die Parameter hat, reicht diese lineare Näherung aus.

Da die Temperatur des Halbleitermaterials die eigentliche spektrumbeeinflussende Größe ist, ist hierbei der Anstieg dieses linearen Fits von besonderem Interesse. Damit dieser Anstieg nicht nur für eine bestimmte Zeit im Lichtblitz gültig ist, kann hier auch wieder ein Mittelwert von allen gemessenen Zeiten gebildet werden. So wird aus dem Anstieg eines Parameters über der Zeit  $P_{mT}$  ein gemittelter Anstieg  $\overline{P_{mT}}$ . Für die Peakwellenlänge  $C$  beträgt dieser Wert für den Kanal 16:  $\overline{C_{mT}} = 0,2206(8) \text{ nm K}^{-1}$

Auch für die Abhängigkeit von der Temperatur gilt, dass die lineare Abhängigkeit eines Parameters von der Temperatur nicht immer gegeben ist. Tabelle 3.3 zeigt, dass die Peakwellenlänge (Parameter  $C$ ) für alle Kanäle außer Kanal 20 sehr gute Bestimmtheitsmaße für den linearen Fit liefert. Kanal 20 ist insofern eine Ausnahme, als dass dieser Kanal sehr im Grenzbereich des Spektrometers Licht emittiert. Deshalb liefert dieser Kanal ein sehr veräusertes Signal im Spektrum und damit auch in den Fitparametern. Auffällig ist auch, dass die Amplitude relativ niedrige Bestimmtheitsmaße aufweist. Für den betrachteten Kanal 16 besteht bei Betrachtung der Amplitude der größte Unterschied zwischen  $16^\circ\text{C}$  und  $18^\circ\text{C}$ . Der Unterschied zwischen  $18^\circ\text{C}$  und  $24^\circ\text{C}$  fällt weit kleiner aus. Parallel liegen die Kurven jedoch trotzdem. Eine mögliche Erklärung dafür wäre die Temperatur des Spektrometers. Das Spektrometer ist im vorliegenden Versuchsaufbau nicht mit an den Kühlkreislauf angeschlossen. Die Spektrometertemperatur wird aber vom System mit gemessen und liegt bei den Messungen für eine Kühlertemperatur von  $16^\circ\text{C}$  und  $14^\circ\text{C}$  etwa bei  $27^\circ\text{C}$  und bei der Messung von  $18^\circ\text{C}$  bei einer Temperatur von  $25^\circ\text{C}$ . Eine höhere Spektrometertemperatur liefert auch ein höheres Dunkelrauschen des Spektrometers. Dieses Dunkelrauschen, das für  $25^\circ\text{C}$  bekannt ist und aus dem Spektrum herausgerechnet wird, hat bei höheren Spektrometertemperaturen einen direkten Einfluss auf die Amplituden der LED-Spektren. Aus diesem Grund liegt die Amplitude für die Messreihe bei  $18^\circ\text{C}$  versetzt zu den anderen beiden Messreihen. Während einer Messreihe erhitzt sich das Spektrometer nur unwesentlich. Da das Spektrometer aber nicht gekühlt ist, entscheidet die vorherige Nutzung des Sonnensimulators maßgeblich über die Temperatur des Spektrometers.

Kanal:	1	4	7	8	9	16	17	19	20
Parameter:									
A	0.821	0.774	0.969	0.746	0.998	0.565	0.64	0.853	0.383
S	0.948	0.807	0.755	0.934	0.892	0.794	0.04	0.044	0.02
C	0.998	0.975	0.971	0.935	0.997	0.991	0.995	0.951	0.594
W	0.968	0.927	0.938	0.812	0.991	0.866	0.327	0.067	0.064

Tabelle 3.3: Mittel des Bestimmtheitsmaßes der Fits verschiedener Parameter von der Temperatur für alle untersuchten Kanäle

Um einen Überblick darüber zu erhalten, wie stark die einzelnen Parameter je Kanal abhängig von der Temperatur sind, ist in Tabelle 3.4 der Anstieg der Temperaturabhängigkeit der einzelnen Funktionen dargestellt. Dabei wurden nur die Werte berücksichtigt, deren Bestimmtheitsmaß einen Wert von mehr als 0.85 annimmt. Kanal 16 bildet dabei eine Ausnahme, da diese Werte im weiteren Verlauf noch für das Simulationsmodell benötigt werden. Bei Vergleich verschiedener Kanäle ist festzustellen, dass die Parameter sehr unterschiedlich auf eine Temperaturänderung reagieren. Am Beispiel der Peakwellenlänge ist zu sehen, dass Kanal 1 sehr temperaturstabil ist, während Kanal ca. 4 mal so stark auf die Temperatur reagiert.

Kanal:	1	4	7	8	9	16	17	19	20
Parameter:									
A			-0.0024		-0.00587	-0.11			
S	-0.005			0.00347	-0.00218	-0.002			
C	0.057	0.0619	0.0317	-0.0327	0.146	0.2205	0.211	0.342	
W	0.0072	0.0171	0.0127		0.034	0.037			

Tabelle 3.4: Ordinatenabschnitte für alle Kanäle und Parameter deren Bestimmtheitsmaß größer als 0,85 ist.

A: Amplitude / Peakbestrahlungsstärke [ $\text{W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ]

S: Schiefe [ $\text{K}^{-1}$ ]

C: Peakwellenlänge [ $\text{nm K}^{-1}$ ]

W: Breite [ $\text{nm K}^{-1}$ ]

## 3.5 Verlauf einer Quasitemperatur während eines Lichtblitzes

Alle Parameter eines LED-Spektrums hängen vom Strom durch die LED und der Temperatur der LED ab. Da es aber bei einem kommerziellen Sonnensimulator nicht möglich ist, die Temperatur der LEDs im Betrieb zu messen, kann eine Quasitemperatur verwendet werden, welche sich aus anderen Messungen berechnen lässt. Diese Temperatur verhält sich ähnlich wie die eigentliche Temperatur, kann aber nicht durch Messungen verifiziert werden. Zur Berechnung der Quasitemperatur werden einige Annahmen getroffen: Es ändert sich die Peakwellenlänge  $C(T_q)$  einer LED linear zur Quasitemperatur ( $C(T_q) = m \cdot T_q + n$ ).

Der Anstieg  $m$  dieser Änderung heißt  $m_{C(T_q)}$ , entspricht dem Anstieg  $\overline{C_{mT}}$  des Kapitels „Abhängigkeit des Spektrums von der Temperatur“ und trägt die Einheit  $1 \text{ nm K}^{-1}$ . Die Tabellen 3.1 und 3.3 zeigen, dass die Peakwellenlänge der geeignetste Parameter ist, um ein lineares Verhalten anzunehmen.

Weiterhin wird angenommen, dass die Temperatur des Halbleitermaterials beim Einschalten der Temperatur der Kühlflüssigkeit entspricht. Diese hat die Temperatur  $T_0$ . Die Berechnung der Peakwellenlänge  $\overline{C_0}$  bei der Temperatur des Kühlmittels wurde bereits im Abschnitt „Abhängigkeit des Spektrums von der Intensität“ beschrieben. Diese Wellenlänge wird nun als Parameter einer linearen Funktion als  $n_{C(T_q)}$  bezeichnet. Daraus ergibt sich nun folgender Zusammenhang:

$$C(T_q) = m_{C(T_q)} \cdot (T_q - T_0) + n_{C(T_q)} \quad (3.2)$$

Diese Formel lässt sich nun nach T umstellen.

$$T_q = \frac{C(T_q) - n_{C(T_q)}}{m_{C(T_q)}} + T_0 \quad (3.3)$$

Da die Quasitemperatur abhängig von der Zeit ist und auch die Peakwellenlänge abhängig von der Zeit ermittelt wird, lässt sich so die Zeitabhängigkeit der Quasitemperatur ausdrücken:

$$T_q(t) = \frac{C(T_q, t) - n_{C(T_q)}}{m_{C(T_q)}} + T_0 \quad (3.4)$$

Nun ist es möglich, dem Zeitverlauf der Quasitemperatur noch eine Temperatur zur Zeit  $t = 0$  ms zuzuordnen. Diese Temperatur entspricht der Kühlertemperatur. Da das Spektrum des ersten Rezeptschrittes nicht korrekt aufgezeichnet wird, ist nicht klar, ob das Licht tatsächlich bei  $t = 0$  ms eingeschaltet wird oder erst später. Die Ursache für dieses Problem ist nicht klar. Der Zeitpunkt  $t = 0$  ms, an dem also die Kühlertemperatur eingezeichnet wird, ist nicht zwingend der Zeitpunkt, an dem auch die LEDs beginnen, Licht zu emittieren. Die Abweichung des Zeitpunktes beträgt aber nicht mehr als eine Rezeptschrittdauer, also 5 ms.

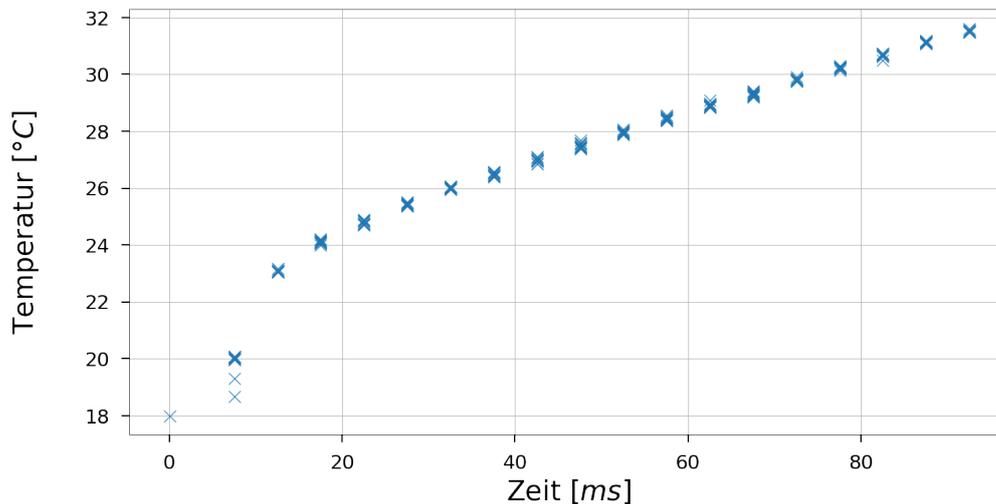


Abbildung 3.15: Berechneter Verlauf der Quasitemperatur von Kanal 16

Abbildung 3.15 zeigt den Verlauf der Quasitemperatur für Kanal 16. Es ist erkennbar, dass der eingetragene Nullpunkt der Kühlertemperatur nicht zum Verlauf der restlichen Kurve passt. Dies kann daran liegen, dass das Licht erst später eingeschaltet wird, kann aber auch daraus resultieren, dass die lineare Näherung, die hier zu Grunde liegt, nicht ausreichend genau ist. Für diesen Kanal werden Temperaturen bis zu  $32^\circ\text{C}$  in den ersten 100 ms erreicht. Dies entspricht den Erwartungen für die Temperaturentwicklung des Halbleitermaterials.

Um den Temperaturverlauf über eine Funktion beschreiben zu können, wird nur der zweite Teil ab  $t = 20$  ms betrachtet. Dieser Teil wird wieder durch eine lineare Funktion beschrieben. Dadurch kann die Abhängigkeit des Verlaufes der Quasitemperatur von der Intensität und der Kühlertemperatur untersucht werden. In Abbildung 3.16 wird dieser Fit für die vier verschiedenen Intensitäten dargestellt und in Abbildung 3.17 für die drei gemessenen verschiedenen Temperaturen.

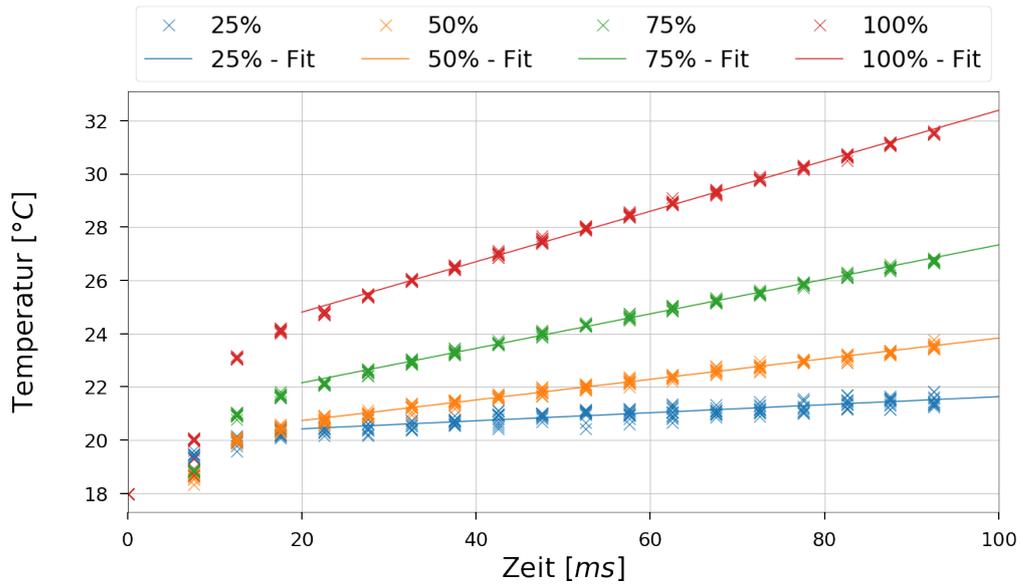


Abbildung 3.16: Berechneter Verlauf der Quasitemperatur von Kanal 16 für vier verschiedene Intensitäten

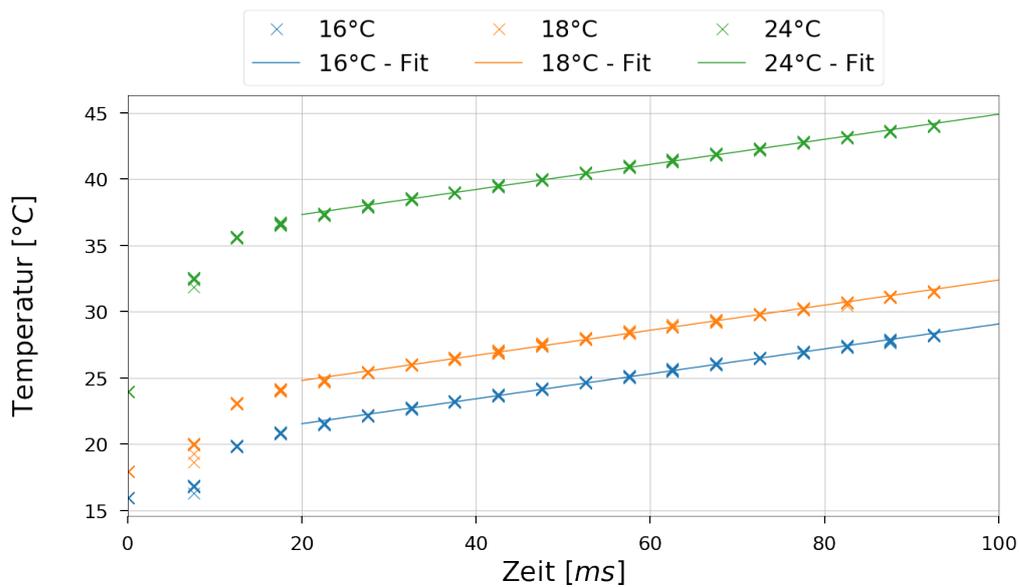


Abbildung 3.17: Berechneter Verlauf der Quasitemperatur von Kanal 16 für drei verschiedene Temperaturen

Der Anstieg der Temperatur steigt mit steigender Intensität. Der Ordinatenabschnitt dagegen steigt mit steigender Kühlertemperatur. Mit steigender Intensität ändert sich der Ordinatenabschnitt kaum. Der Anstieg der Temperatur bleibt bei steigender Kühlertemperatur konstant.

Auffällig ist, dass der Abstand der Fitgeraden größer ist als der Abstand der Kühlertemperaturen. Dies zeigt, dass es sich bei der Quasitemperatur um keine korrekte Temperatur handeln kann, da sonst die gleichen Temperaturabstände zwischen den Kurven auftreten müssten. Dies könnte auch ein Indiz für die Fehler, die durch die mehrfachen Linearisierungen entstehen könnten, sein. Mit Hilfe der Quasitemperatur ist es aber nun möglich, das Spektrum eines Kanals zu simulieren.

### 3.6 Abhängigkeit des Spektrums vom Strom und von der Umgebungstemperatur über die Zeit

Durch Kombination der gesammelten Erkenntnisse ist es nun möglich, das Verhalten eines Kanals zu simulieren. Ziel dabei ist eine Funktion, die einen Kanal beschreibt, indem sie die Bestrahlungsstärke ( $E$ ) abhängig von der Wellenlänge ( $\lambda$ ), des betriebenen Stromes ( $I$ ), der Umgebungstemperatur ( $T_{amb}$ ), sowie der Zeit ( $t$ ) ermittelt:

$$E = E(\lambda, I, T_{amb}, t) \quad (3.5)$$

Das Spektrum einer LED wird am besten durch die logisticPowerPeak-Funktion (Gleichung 2.10) beschrieben. Diese Funktion enthält die vier Parameter A, S, C und W. Diese Parameter sind ausschließlich von der Quasitemperatur abhängig. Der Parameter A, der die Amplitude darstellt ist zusätzlich von der eingestellten Intensität abhängig. Die Abhängigkeit der anderen Parameter von der Intensität kann nicht überprüft werden, da die Abhängigkeit von der Quasitemperatur die Intensitätsabhängigkeit wesentlich übersteigt. Für die Amplitude A gilt also:

$$A(I, T_q) = \frac{I}{100} \cdot (m_{A(T_q)} \cdot T_q + n_{A(T_q)}) \quad (3.6)$$

Dabei gibt  $m_{A(T_q)}$  an, wie stark sich die Peakbestrahlungsstärke (A) mit der Temperatur ändert.  $n_{A(T_q)}$  ist der Wert der Peakbestrahlungsstärke, bei dem die Intensität 100 % beträgt und die Temperatur noch der Kühler Temperatur entspricht. Diesen Wert erhält man, indem den Ordinatenabschnitt des linearen Fits der Peakbestrahlungsstärke über der Intensität addiert mit dem Anstieg desselben Fits, welcher mit 100 % multipliziert wird. So erhält man für den Kanal 16 einen Wert von  $3,28 \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$  gemittelt über alle Zeiten.

Der Strom  $I$  wird in der Einheit % angegeben. Damit ist der Anteil vom maximal möglichen Strom durch die LED gemeint. Diese Größe lässt sich direkt am Sonnensimulator einstellen. Aus diesem Grund muss dieser Wert durch 100 geteilt werden, um einen Faktor für die

Peakbestrahlungsstärke  $A$  zu erhalten. Für alle anderen Parameter  $P$  entfällt dieser Faktor. So gilt:

$$P(T_q) = m_{P(T_q)} \cdot T_q + n_{P(T_q)} \quad (3.7)$$

Hier ist  $m_{P(T_q)}$  stets der Anstieg des Parameters über der Temperatur und  $n_{P(T_q)}$  der Wert dieses Parameters zum Zeitpunkt  $t = 0$  bei der Temperatur des Kühlmittels  $T_0$ . Beide Werte werden als Mittelwert über alle gemessenen Zeiten bestimmt.

Bei dieser Funktion (3.7) ist die Quasitemperatur allerdings nur für Zeiten von  $t > 20$  ms definiert und abhängig von der Zeit ( $t$ ), der Umgebungstemperatur ( $T_{amb}$ ) und dem Strom, der durch die LED fließt ( $I$ ). Die lineare Funktion entspricht dem Fit aus Abbildung 3.16 und 3.17:

$$T_q = m_{T_q(I)} \cdot t + n_{T_q(T_{amb})} \quad (3.8)$$

Dabei ist der Anstieg der Quasitemperatur  $m_{T_q}$  abhängig von der Intensität. Auch diese Abhängigkeit wird linearisiert durch folgende Formel:

$$m_{T_q(I)} = m_{T_q(I)} \cdot I + n_{T_q(I)} \quad (3.9)$$

Der Ordinatenabschnitt der Quasitemperatur über der Zeit  $n_{T_q}$  ist linear abhängig von der Temperatur des Kühlmittels. Das Kühlmittel entspricht der Bezugstemperatur der LEDs, also der Temperatur, die die LEDs zu Beginn der Messung haben. Diese Bezugstemperatur kann durch Umgebungseinflüsse sich ändern, deshalb wird sie als Umgebungstemperatur  $T_{amb}$  bezeichnet.

$$n_{T_q(T_{amb})} = m_{T_q(T_{amb})} \cdot T_{amb} + n_{T_q(T_{amb})} \quad (3.10)$$

Werden die Werte für Kanal 16 eingesetzt erhält man:

$$m_{T_q} = m_{T_q(I)} = 0,0113 \text{ K ms}^{-1} \%^{-1} \cdot I + 0,4396 \text{ K ms}^{-1} \quad (3.11)$$

$$n_{T_q} = n_{T_q(T_{amb})} = 1,998 \text{ K } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot T_{amb} - 12,63 \text{ K} \quad (3.12)$$

Damit ergibt sich für die Quasitemperatur aus Gleichung 3.8

$$T_q(t, I, T_{amb}) = (0,0113 \text{ K ms}^{-1} \%^{-1} \cdot I + 0,4396 \text{ K ms}^{-1}) \cdot t + 1,998 \text{ K } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot T_{amb} - 12,63 \text{ K} \quad (3.13)$$

Auffällig dabei ist, dass für die gemessenen Quasitemperaturverläufe es keinen direkten Zusammenhang zur Temperatur der Kühlflüssigkeit gibt. Es wäre zu erwarten gewesen, dass bei einer Änderung der Kühltemperatur auch die selbe Änderung der Quasitemperatur die Folge ist. Der Wert von  $m_{T_q(T_{amb})}$  müsste dann  $1 \text{ K ms}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  annehmen. Der ermittelte Wert ist aber  $1,998 \text{ K ms}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Um den Kanal 16 vollständig simulieren zu können, werden noch die fehlenden Größen aus Gleichung 3.7 benötigt. Dabei wird für jeden Parameter ein Anstieg  $m_{P(T_q)}$  über die Zeit und ein Schnittpunkt mit der Ordinate  $n_{P(T_q)}$  benötigt. Diese sind zusammengefasst in Tabelle 3.5 dargestellt.

	Peakbestrahlungsstärke	Schiefe	Peakwellenlänge	Breite
$m_{P(T_q)}$	$-0,01098 \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$-0,00245 \text{ K}^{-1}$	$0,221 \text{ nm K}^{-1}$	$0,0366 \text{ nm K}^{-1}$
$n_{P(T_q)}$	$3,28 \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$	0,263	801,46 nm	11,82 nm

Tabelle 3.5: Zusammenfassung der Parameterwerte aus Gleichung 3.7, die den Zusammenhang zwischen dem Parameterwert und der Quasitemperatur angeben; Kanal 16

Nun können die Gleichungen zusammengefasst werden. In die Gleichung 2.10, die das Spektrum beschreibt, werden für die Parameter die Parametergleichungen 3.6 und 3.7 eingesetzt. Dabei werden die Werte aus Tabelle 3.5 verwendet. Diese Gleichungen sind wiederum vom Zeitverlauf der Quasitemperatur abhängig. Diese Abhängigkeit ist in Gleichung 3.8 dargestellt. Insgesamt gibt es 12 Parameter, die das Verhalten des Kanals vollständig beschreiben.

Um zu testen, ob die Simulation den Erwartungen entspricht, wird ein beliebiges Messspektrum mit dem simulierten Spektrum verglichen. Die Intensität des gewählten Spektrums entspricht 75 %, die Kühlertemperatur  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  und die Zeit 62,5 ms.

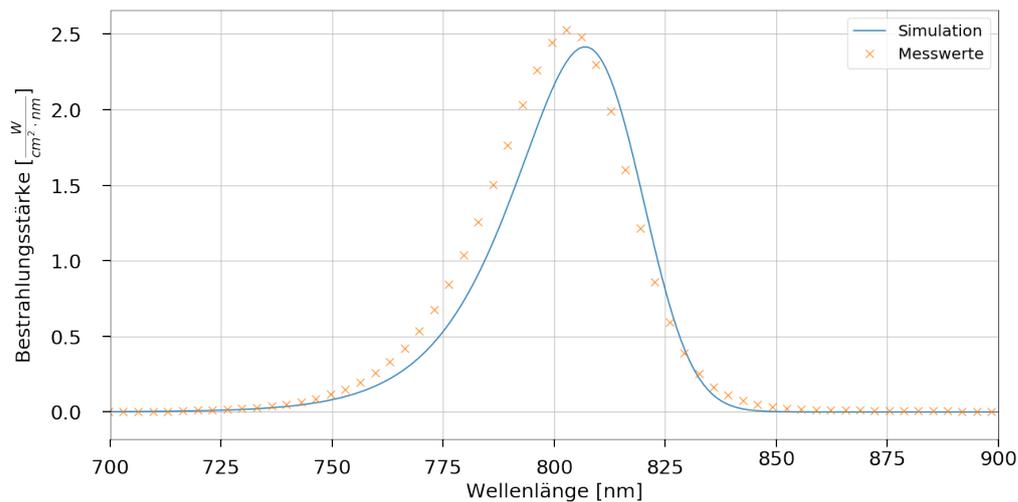


Abbildung 3.18: Vergleich der Simulation mit den Messwerten (Kanal 16)

Im Vergleich des Simulationsergebnisses mit dem Messwerten, dass in Abbildung 3.18 dargestellt ist, fällt auf, dass die Simulation nur bedingt ein gutes Ergebnis liefert. So ist die Peakbestrahlungsstärke der Simulation zu klein und die Peakwellenlänge zu groß. Diese Fehler können durch die vielen Linearisierungen auftreten. So wird bei der Berechnung die Quasitemperatur über der Zeit linearisiert, der Anstieg und der Ordinatenabschnitt dieser Linearisierung sind linearisiert, aber auch die Abhängigkeiten der Parameter von der Quasitemperatur sind linearisiert. Damit werden insgesamt 7 Linearisierungen vorgenommen. Jede dieser Linearisierungen erzeugt einen Fehler, wodurch das Endergebnis der Simulation durch Aufsummierung der Fehler auch fehlerbehaftet ist. Der Einfluss der Fehler ist immer dort am größten, wo die Linearität durch wenige Messpunkte erreicht wird. Dies ist insbesondere bei der Temperaturabhängigkeit der Fall. Ein weiteres Problem der Temperaturabhängigkeit ist die Tatsache, dass von einem kleinen gemessenen Temperaturbereich durch Linearisierung auf einen deutlich größeren Temperaturbereich geschlossen wird.

Das Grundverhalten bildet das Simulationsmodell aber ab, so dass sich das Spektrum wie erwartet ändert, sollte die Zeit, die Umgebungstemperatur oder die Intensität verändert werden. Wie gut die Simulation schließlich zu den Messwerten passt, hängt auch vom verwendeten Kanal ab, und wie gut die einzelnen Parameter den Annahmen des linearen Verhaltens folgen. Ein Anhaltspunkt, welcher Kanal durch ein solches Simulationsmodell abgebildet werden könnte zeigen die Tabellen 3.1 und 3.3.

### 3.7 Überblick über alle untersuchten Kanäle

Um einen Überblick zu erhalten, wie sich die einzelnen Kanäle verhalten, wurden für jeden Kanal die Fitparameter verglichen. Zuerst wird dabei auf die Werte eingegangen, die die einzelnen Parameter zu Beginn des Lichtblitzes annehmen. Das erste messbare Spektrum wird zum Zeitpunkt  $t = 7,5 \text{ ms}$  erzeugt. Die Parameterwerte dieses Spektrums sind für alle ausgewerteten Kanäle in Abbildung 3.19 dargestellt. Es wurde jeweils der Mittelwert aus 10 Messungen gebildet. Die Messungen dazu wurden bei einer Kühlertemperatur von  $18^\circ\text{C}$  und einer Leistung von 100 % durchgeführt. Für jeden Kanal wurde vorerst nur eine Fitfunktion verwendet. Das hat zu Folge, dass der Fit für Kanal 7 und 8 nur sehr schlecht mit dem eigentlichen LED-Spektrum übereinstimmt.

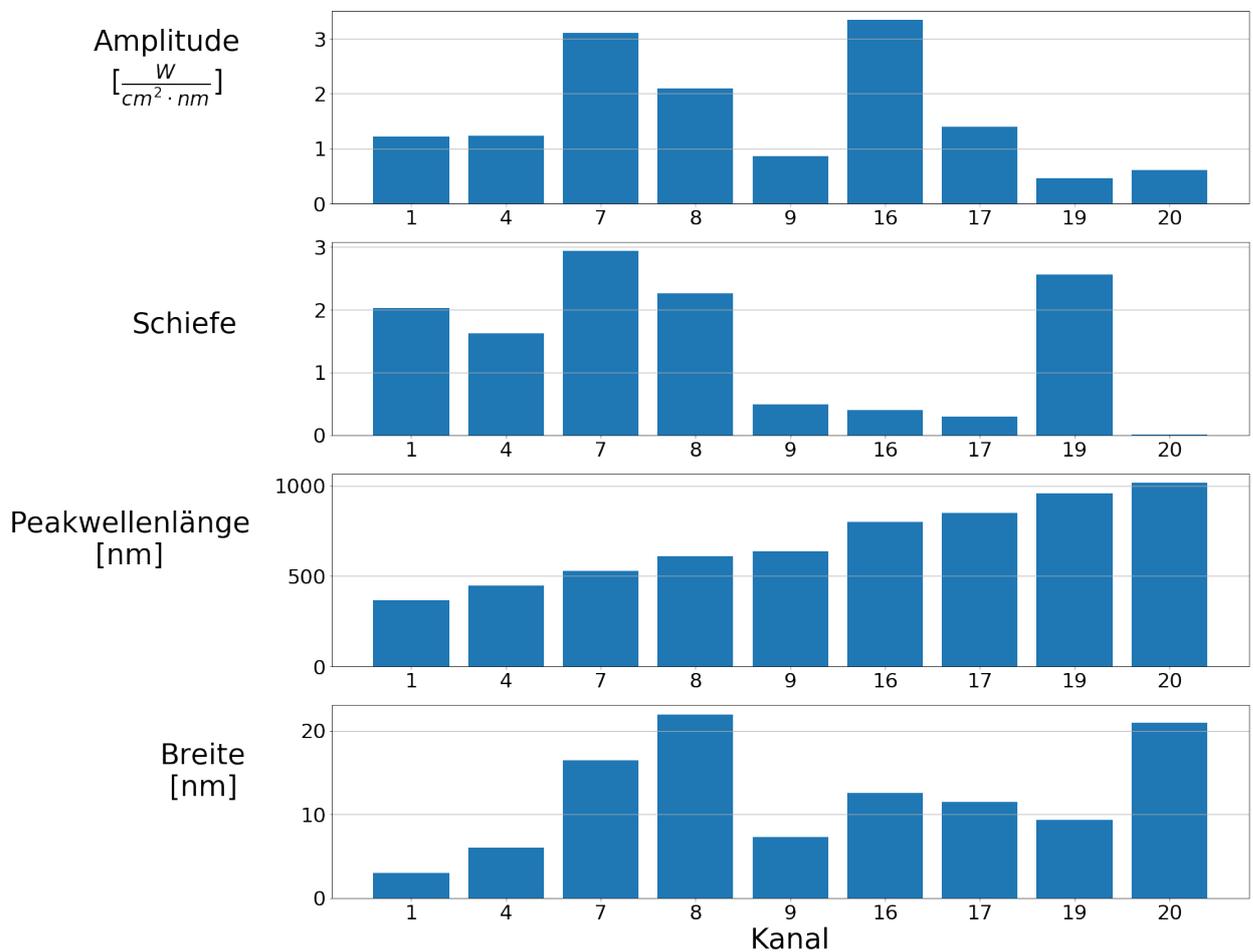


Abbildung 3.19: Alle Parameterwerte der untersuchten Kanäle zum Zeitpunkt  $t = 7,5 \text{ ms}$

Die Amplitude bei 100% kann für verschiedene Kanäle sehr unterschiedliche Werte annehmen. Kanal 16 liefert dabei den höchsten Wert der untersuchten Kanäle und Kanal 19 den niedrigsten. Bei Betrachtung der Schiefe stellt man fest, dass es Kanäle gibt, die linksschief sind und eine Schiefe von  $S < 1$  aufweisen und Kanäle, die rechtsschief sind. Diese haben eine Schiefe von  $S > 1$ . Eine Besonderheit ist dabei der Kanal 20. Dieser ist zu linksschief, um von der Fitfunktion abgebildet werden zu können. Die Schiefe der Fitfunktion beeinflusst den Unterschied der linken und rechten Flanke des LED-Spektrums. Wird die Schiefe sehr groß, ist es möglich, dass auch die rechte Flanke sehr flach wird. Die Steilheit der rechten Flanke hat keinen Grenzwert. Die Steilheit der linken Flanke dagegen strebt gegen einen Grenzwert, wenn sich die Schiefe immer weiter der 0 annähert. Der Fit des Kanals 20 liefert Werte die gegen 0 streben. Dieser Kanal ist also zu linksschief, um ihn mit der Fitfunktion ausreichen beschreiben zu können. Um die Schiefe dieses Kanals trotzdem untersuchen zu können, kann die Schiefe aus Gleichung 2.8 verwendet werden. Diese Schiefe ist aber nicht mit der Schiefe der Fitfunktion vergleichbar.

Mit zunehmender Nummer des Kanals nimmt auch die Peakwellenlänge zu. Es ist erkennbar, dass die gewählten Kanäle gleichmäßig über das gesamte vom Sinus-220 abgebildete Spektrum verteilt sind.

Anhand der Breite des Fits lassen sich die beiden Kanäle erkennen, die durch ein phosphoreszierendes Material emittieren. Diese Kanäle (7 und 8) zeigen eine besonders große Breite. In diesem Zusammenhang fällt auch Kanal 20 auf. Dieser könnte auch ein phosphoreszierendes Material verwenden. Allerdings ist kein Peak der Anregungswellenlänge zu erkennen. Dieser Peak könnte aber auch im Rauschen des Spektrometers untergehen.

Um nun weiterhin das Verhalten der Kanäle während eines Lichtblitzes zu untersuchen, wurde nun der Mittelwert über 10 Messungen der ersten Zeit bei  $t = 7,5$  ms ins Verhältnis zur letzten aufgezeichneten Zeit bei  $t = 92,5$  ms gesetzt. Die Werte wurden immer prozentual vom Ausgangswert angegeben.

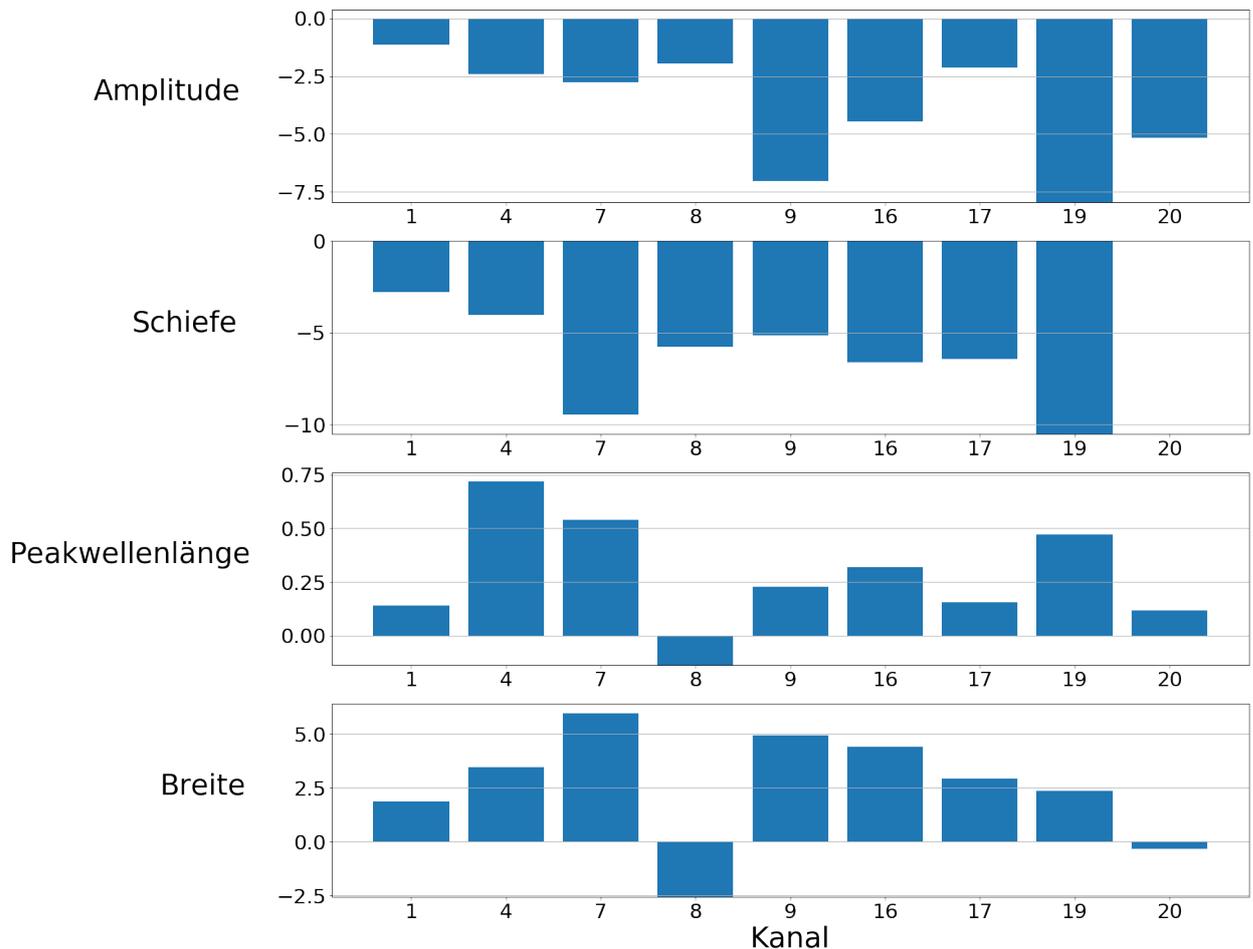


Abbildung 3.20: Relative Änderung aller Parameterwerte der untersuchten Kanäle in %

Abbildung 3.20 zeigt, dass sich verschiedene Kanäle sehr unterschiedlich verhalten können. Mit steigender Kanalnummer steigt auch die Peakwellenlänge des Kanals. Es gibt keine Abhängigkeit eines Parameters von der Position dieser LED im Spektrum. Bei allen Kanälen verringert sich die Peakbestrahlungsstärke im Betrieb. Dabei ist der Kanal 1 der stabilste Kanal und Kanal 19 der Kanal, dessen Peakbestrahlungsstärke sich am stärksten über die Zeit ändert. Bei der Schiefe bietet sich ein sehr ähnliches Bild. Alle Kanäle werden linksschiefer. Da die linke und rechte Flanke im LED-Spektrum von unterschiedlichen physikalischen Effekten verursacht werden, ist anzunehmen, dass diese Effekte unterschiedlich temperaturempfindlich sind. Zu Kanal 20 kann keine Aussage getroffen werden. Die Ursache dafür liegt an einer Grenze der Fitfunktion. Diese Schiefe ändert sich für Kanal 20 von  $-0.607$  auf  $-0.672$ . Damit wird auch dieser Kanal linksschiefer. Die Peakwellenlänge steigt für die meisten Kanäle. Kanal 8 ist hierbei eine Ausnahme. Dies liegt daran, dass dieser Kanal mit einem phosphoreszierendem Material beschichtet ist, dass sich eventuell anders verhält, als

es von einer LED zu erwarten wäre. Außerdem ist der Fit für diesen Kanal eher schlecht. Auch bei der Peakwellenlänge ist Kanal 1 einer der stabilsten und wird lediglich von Kanal 20 in seiner Stabilität übertroffen. Die Breite steigt auch für fast alle Kanäle. Dies ist auch zu erwarten, da bei steigender Temperatur auch die Zustandsdichten im Halbleiter breiter verteilt sind. Aus diesem Grund kann dann eine größere Bandbreite an Photonen emittiert werden. Außerdem besteht ein Kanal aus mehr als einer LED. Sind die LEDs eines Kanals nicht genau baugleich, können die einzelnen LEDs eines Kanals unterschiedlich in ihrer Peakwellenlänge driften. Dadurch würde auch die Breite des Spektrums des Kanals zunehmen. Kanal 8 ist auch hier wieder eine Ausnahme. Der Grund dafür könnte sein, dass die einzelnen Komponenten im phosphoreszierenden Material sich unterschiedlich verhalten, so dass die Breite des Gesamtfits über diesen Kanal eher abnimmt.

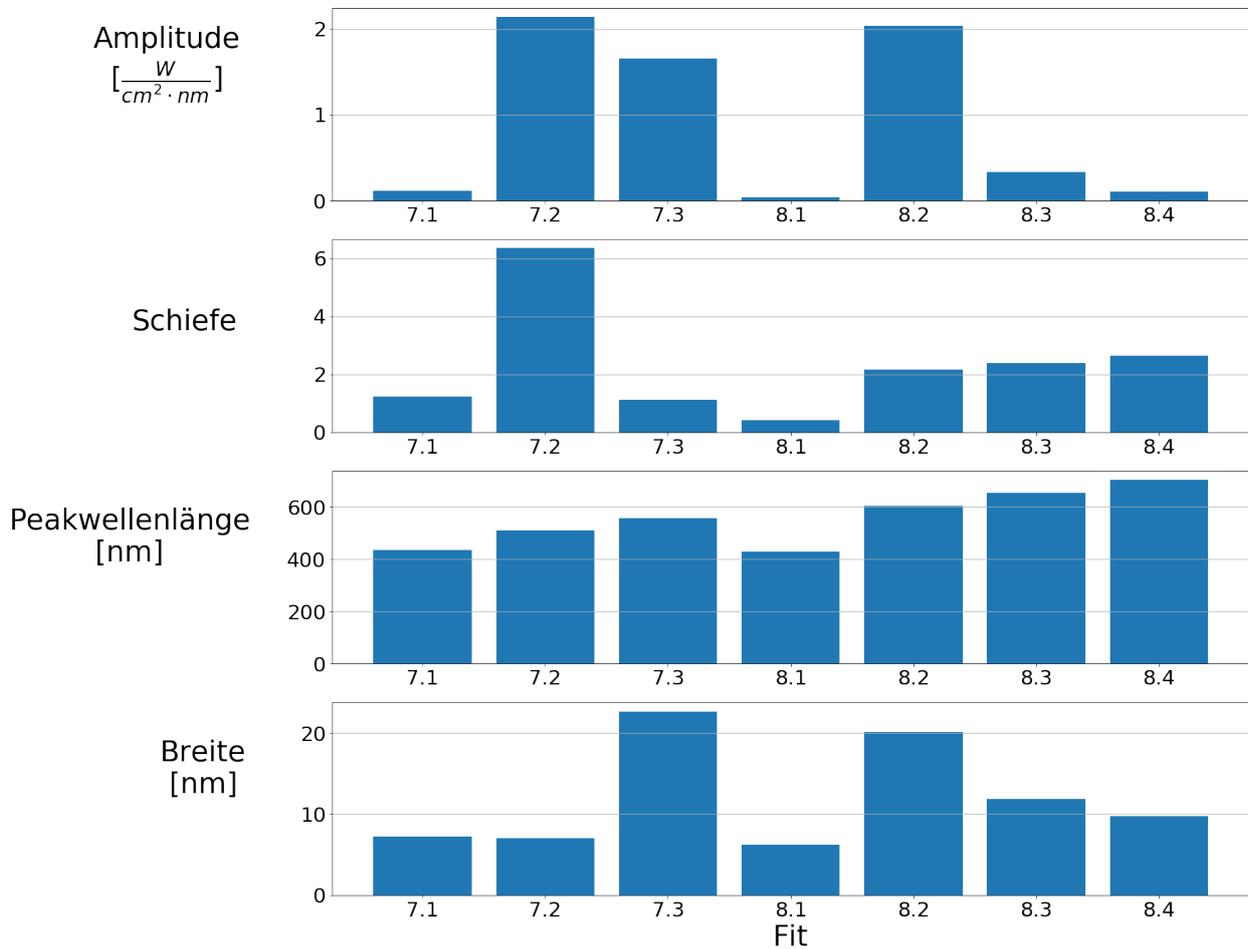


Abbildung 3.21: Alle Parameterwerte zum Zeitpunkt  $t = 7,5$  ms für die Kanäle 7 und 8 mit zusammengesetzten Fitfunktionen entsprechend Abbildung 3.5

Um das Verhalten der beiden Kanäle mit phosphoreszierenden Material genauer betrachten zu können, wurden diese Übersichten auch für die beiden Kanäle 7 und 8 erstellt. Der Kanal 7 wurde aus 3 verschiedenen Fitfunktionen zusammengesetzt (Abbildung 3.5). Dabei ist der Fit 7.1 der Fit des Peaks der eigentlichen LED. Dieser liegt bei den kürzesten Wellenlängen. Der Fit 7.2 und 7.3 beschreiben das Spektrum des phosphoreszierenden Materials. Gleiches gilt für den Kanal 8, welcher mit 4 verschiedenen Fitfunktionen gefittet wurde. Die Startwerte diese Kanäle sind in Abbildung 3.21 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Anregungspeaks (7.1 und 8.1) eine deutlich kleinere Amplitude haben als die Fits des phosphoreszierenden Materials. Je kleiner die Amplitude eines solchen zusammengesetzten Fits ist, desto bedeutungsloser ist er auch für die Genauigkeit des Gesamtfits. So wäre vermutlich auch ein gutes Fitergebnis ohne die Fitfunktion 8.4 herausgekommen. Alle Fits sind bis auf den Fit 8.1 rechtsschief. Die Peakwellenlängen der Fits überschneiden sich. Das hat den Grund, dass auch die emittierten Spektren beider Kanäle sich überschneiden. Die Breite ist für jeden Fit dieser beiden Kanäle sehr unterschiedlich.

Auch bei dieser genaueren Betrachtung der Kanäle 7 und 8 wurde wieder das Verhalten über die Zeit dargestellt. Diese Darstellung befindet sich unter Abbildung 3.22. Es ist auffällig, dass der Fit von 7.1 sich am stärksten über die Zeit verändert. Dieser verschiebt sich auch am stärksten zu größeren Wellenlängen. Der Fit 7.3 dagegen verschiebt sich zu kleineren Wellenlängen. Dieses Verhalten stellt damit eine Ausnahme im Vergleich zu den anderen untersuchten Fits dar. Auch die Amplitude dieses Fits bleibt nahezu konstant. Der Fit 8.1 stellt den Peak der eigentlichen LED von Kanal 8 dar. Auch diese Amplitude ändert sich sehr stark mit der Zeit, ähnlich wie bei Kanal 7. Die Schiefe der einzelnen Fits von Kanal 8 wird größer, bis auf den Fit 8.1. Damit sind diese Fits die einzigen, die dieses Verhalten aufweisen. Die Peakwellenlänge ändert sich für alle Fits des Kanals 8 kaum, obwohl der Gesamtfit von diesem Kanal (Abbildung 3.20) eine sinkende Peakwellenlänge anzeigt. In der Summe der einzelnen Fits steigt die Wellenlänge sogar. Die Breite ändert sich für den Fit 8.1 wie alle anderen Kanäle auch und nimmt zu. Die Fits 8.2 bis 8.4 zeigen sogar eine abnehmende Breite. Diese abnehmende Breite wurde auch schon für den Gesamtfit des Kanals 8 beobachtet.

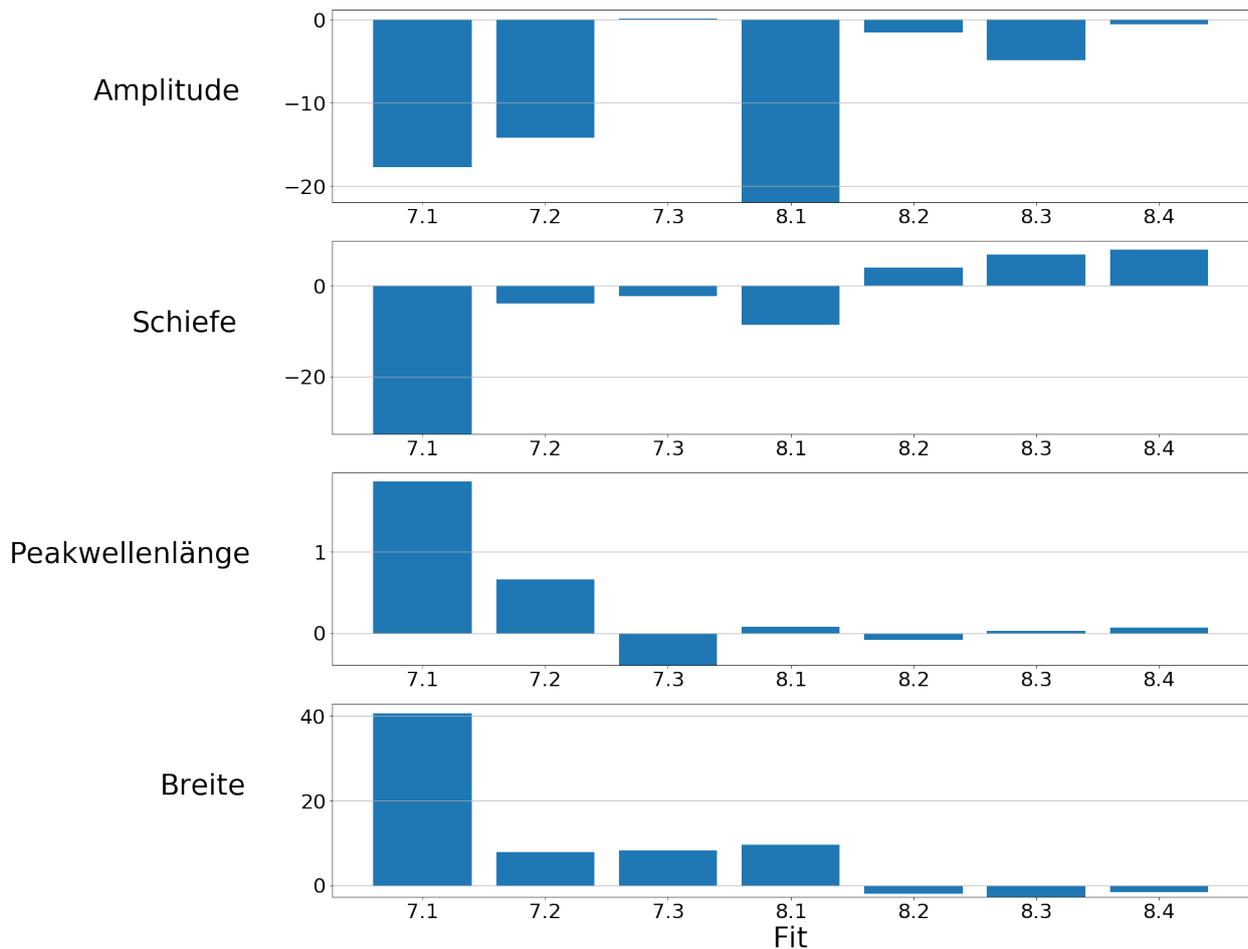


Abbildung 3.22: Relative Änderung aller Parameterwerte in % für die Kanäle 7 und 8 mit zusammengesetzten Fitfunktionen entsprechend Abbildung 3.5

Zusammenfassend kann ein Unterschied zwischen den LEDs, die Licht über einen PN-Übergang durch Elektrolumineszenz emittieren und phosphoreszierenden Materialien, die ihr Licht über Photolumineszenz emittieren, erkannt werden. Die Elektrolumineszenz der LEDs ist dadurch geprägt, dass mit steigender Temperatur des lichtemittierenden Materials die Amplitude sinkt, die Schiefe sinkt, was bedeutet, dass die Verteilung linksschiefer wird, die Peakwellenlänge zunimmt und die Breite steigt. Die Photolumineszenz dagegen kann auch durch eine steigende Schiefe, eine sinkende Peakwellenlänge oder eine sinkende Breite gekennzeichnet sein. Dabei ist unklar, ob das Photolumineszenzspektrum der beiden Kanäle 7 und 8 von jeweils einem Stoff stammt, oder ob diese LEDs eine Mischung verschiedener phosphoreszierender Stoffe verwendet. Weiterhin unterscheiden sich die beiden LED-Gruppen in erster Linie durch ihre Breite.

# 4 Verhalten der Intensität der LEDs im Ein- und Ausschaltvorgang

## 4.1 Wahl eines geeigneten Messsystems

Bei der Untersuchung des Verhaltens der Intensität der LEDs im Ein- und Ausschaltvorgang kommt es vor allem darauf an, ein Messsystem zu finden, welches schnell genug misst, um die Flanken des Lichtes darzustellen. Ein Messsystem besteht aus zwei wesentlichen Komponenten. Zum einen ein Sensor, der das Signal des Lichtes in ein elektrisches Signal umwandelt und zum anderen eine Möglichkeit, zeitaufgelöst dieses elektrische Signal quantifiziert zu erfassen. Zur Erfassung des elektrischen Signals bietet sich ein digitales Speicheroszilloskop an. In dieser Arbeit wurde ein „HAMEG HMO 2022“ verwendet. Um das Licht in ein elektrisches Signal umzuwandeln, wurde eine PIN-Photodiode vom Typ „OSRAM SFH203“ verwendet. Eine PIN-Photodiode besteht im Gegensatz zu einer normalen Diode, welche eine p-leitende und eine n-leitende Schicht hat, auch aus einer intrinsischen Schicht, welche sich zwischen der p- und der n-Schicht befindet. Intrinsisch bedeutet, dass diese Schicht nicht, oder nur sehr gering dotiert ist. Das hat zu Folge, dass beim Anlegen einer äußeren elektrischen Spannung die entstehende Raumladungszone größer ist als bei einer normalen Diode. Durch den größeren Abstand von p- und n-Schicht ist auch die Sperrschichtkapazität dieses Diodentyps kleiner. Diese kleinere Sperrschichtkapazität wirkt sich wiederum positiv auf die Reaktionsgeschwindigkeit der Diode aus.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine solche Photodiode zu betreiben. Die einfachste Methode ist, die Diode über einen Widerstand zu betreiben. Diese Betriebsart nennt man „Betrieb als Photoelement“ (Abbildung 4.1). Der Nachteil dieser Betriebsart ist, dass diese die langsamste Betriebsart einer Photodiode ist und die lineare Abhängigkeit des Lichtes von der Spannung über den Widerstand bei zu großem Widerstand oder zu starkem Licht nicht gegeben ist. Eine bessere Methode ist da der Betrieb im Kurzschluss der Diode. Der Kurzschlussstrom der Diode ist linear von der Intensität des einfallenden Lichtes abhängig. Allerdings kann ein Oszilloskop keinen Strom messen. Um den Kurzschlussstrom in eine Spannung umzuwandeln, würde ein Transimpedanzverstärker benötigt werden. Die Methode mit der schnellsten Reaktionszeit ist der Betrieb unter Gegenspannung. Wird die Diode unter einer Gegenspannung betrieben, ändert sich der Strom durch die Diode linear zur einfallenden Lichtintensität. Auch wenn ein Widerstand in den Stromkreis eingebracht wird bleibt der Strom konstant, solange die Durchbruchspannung der Diode nicht erreicht ist.

Welche Variante für diesen Versuch die beste ist, entscheidet sich nach Abwägung von Aufwand und Nutzen. Die einfachste Möglichkeit, der Betrieb über einen Widerstand, würde Probleme bereiten, wenn die Spannung über den Widerstand nicht linear mit der steigenden Intensität des einfallenden Lichtes steigen würde. Um diesen Fall abschätzen zu können, kann die Durchlassspannung der Diode herangezogen werden. Die Durchlassspannung der verwendeten Diode beträgt 1,3 V. Überschreitet die Spannung am Widerstand und damit auch die Spannung an der Diode die Hälfte dieses Werts, besteht die Gefahr, dass der lineare Bereich verlassen wird. Bei allen Messungen in dieser Betriebsart muss sichergestellt sein, dass die Grenze von 650 mV nicht überschritten wird. Des Weiteren muss untersucht werden, ob das Messsystem in dieser Bauart schnell genug auf die Lichtflanke des Sinus-220 reagiert.

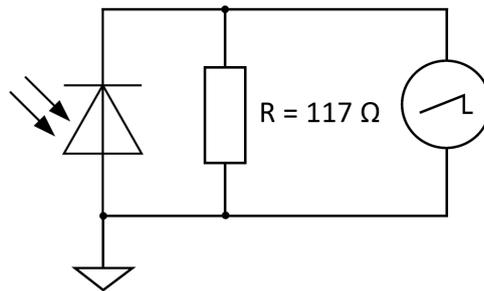


Abbildung 4.1: Messschaltung der Photodiode im Betrieb als Photoelement mit Oszilloskop als Messgerät

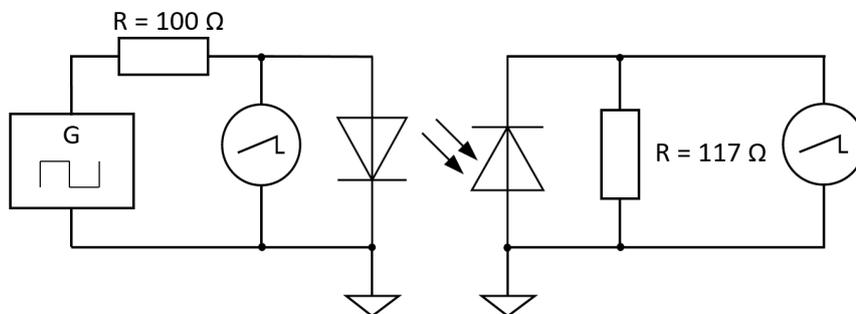


Abbildung 4.2: Messschaltung mit Ankopplung einer LED, welche über einen Funktionsgenerator ein Rechtecksignal erhält.

Dafür wurde die Photodiode direkt an eine LED gekoppelt, welche über einen Funktionsgenerator angesteuert wurde. Die zugehörige Messschaltung ist unter 4.2 abgebildet. Als Funktionsgenerator fand ein „Arduino Uno“ Anwendung, auf dem ein Rechtecksignal programmiert wurde. Die Anstiegszeiten der Spannung an der LED wurden mit den Anstiegszeiten der Spannung am Widerstand ( $117,8\ \Omega$ ) über der Photodiode und den gemess-

senen Anstiegszeiten vom Sinus-220 verglichen. Jede Flanke wurde 10 mal aufgenommen und jeweils die Anstiegs- bzw. Abfallzeiten bestimmt. In Abbildung 4.3 wurden die daraus resultierenden Mittelwerte dargestellt. Die Fehlerbalken haben die Größe der zweifachen Standardabweichung aus den 10 Wiederholungen.

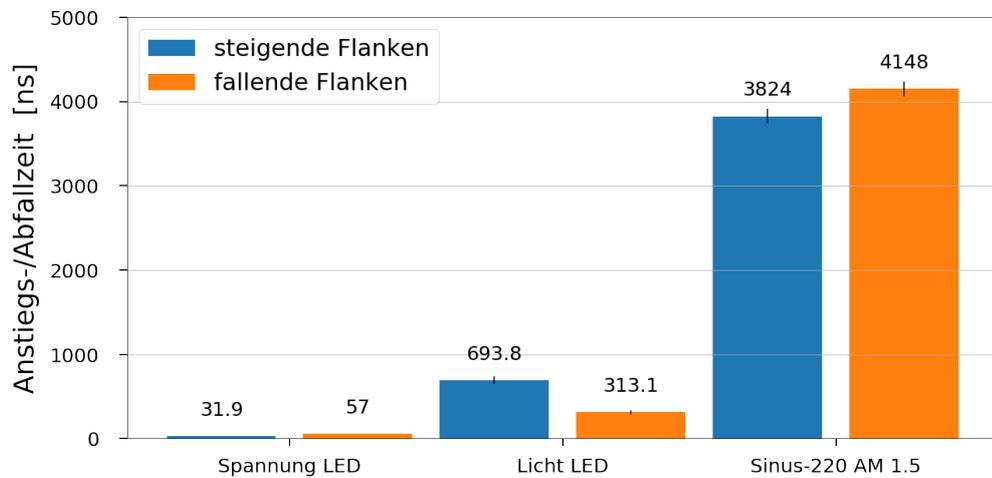


Abbildung 4.3: Geschwindigkeit der Photodiode im Vergleich zur Geschwindigkeit des Sinus-220

Abbildung 4.3 zeigt, dass die Spannung an der LED deutlich schneller ist, als das Licht der LED, dass von der Photodiode detektiert wird. Es kann hier nicht geschlussfolgert werden, ob die LED oder die Photodiode das begrenzende Element ist. Es wurde aber gezeigt, dass die Photodiode deutlich geringere Anstiegs- und Abfallzeiten hat als das Licht des Sinus-220.

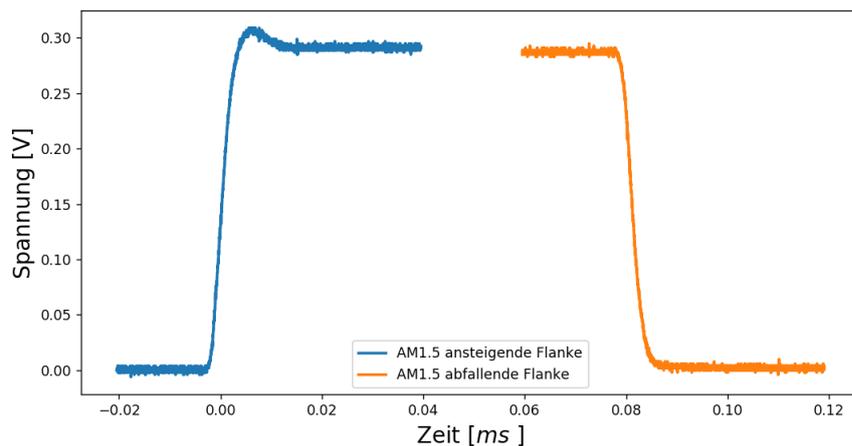


Abbildung 4.4: Ansteigende und abfallende Flanke eines AM1.5-Spektrum

Die bei der Messung des AM1.5-Spektrums des Sinus-220 erreichten Spannungen waren kleiner als 350 V (siehe Abbildung 4.4). Damit sind beide Bedingungen erfüllt, die einen Messaufbau ermöglichen, der lediglich aus einer Photodiode und einem Messwiderstand besteht. Dabei misst das Oszilloskop die Spannung, die über dem Messwiderstand abfällt.

## 4.2 Untersuchung verschiedener Spektren

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die die Flankensteilheit der LEDs im Sinus-220 begrenzen könnten. Die erste Möglichkeit ist, dass die Spannung an den LEDs des Sonnensimulators sich schneller ändert, als die LEDs das Licht emittieren. Dies hätte zur Folge, dass je nach LED Typ verschiedene Anstiegs- oder Abfallzeiten auftreten könnten. Besonders bei den Kanälen 7 und 8, welche Licht durch ein phosphoreszierendes Material erzeugen, würden längere Abfallzeiten auftreten, da das phosphoreszierende Material träger ist als ein pn-Übergang. Die zweite Möglichkeit ist, dass die Elektronik zur Ansteuerung der LEDs so langsam ist, dass sie die Flankensteilheit begrenzt. Dann würden alle Kanäle, unabhängig von der Bauart der LEDs, die gleichen oder zumindest ähnliche Anstiegs- und Abfallzeiten aufweisen.

Um diese Möglichkeiten zu untersuchen, wurden die Anstiegs- und Abfallzeiten vom Kanal 8, vom Kanal 16 und vom AM1.5-Spektrum verglichen. Dabei ist Kanal 8 ein Vertreter mit einem phosphoreszierendem Material und liegt im Vergleich zum Kanal 7 im sensitiveren Bereich der Photodiode. Kanal 16 ist ein schmalbandiger Kanal und der Kanal mit der größten zu erwartenden Wirkung auf die Photodiode aufgrund seiner Wellenlänge und Intensität. Meist wird der Sonnensimulator allerdings nicht mit einzelnen Kanälen betrieben, sondern mit dem Sonnenspektrum AM1.5. Aus diesem Grund wird auch dieses Spektrum untersucht. Bei diesem Spektrum sind alle 21 Kanäle des Sinus-220 aktiv. Es muss dabei darauf geachtet werden, dass die Regelung des Spektrums ausgeschaltet ist, da sonst keine ansteigenden Flanken gemessen werden können, da der Anstieg durch die Regelung verändert wird. Mit Hilfe der Messschaltung ist bei einem geregelten Spektrum der Einschwingvorgang sehr deutlich zu sehen (Abbildung 4.5).

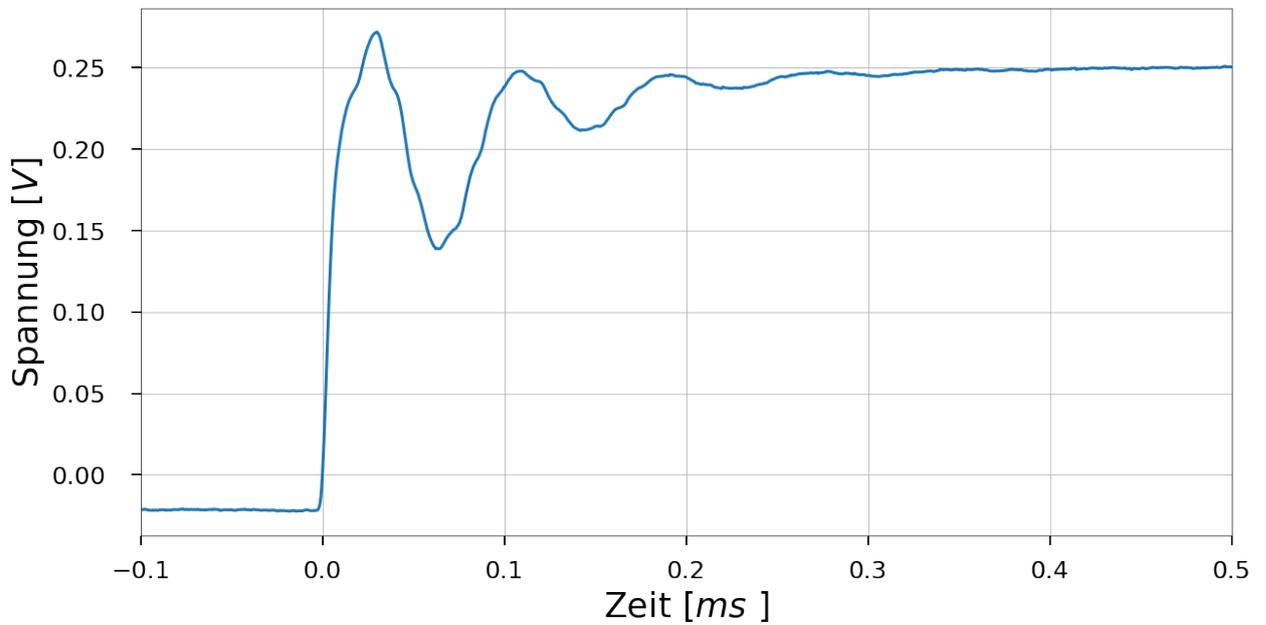


Abbildung 4.5: Einschwingvorgang eines geregelten AM 1.5-Spektrums

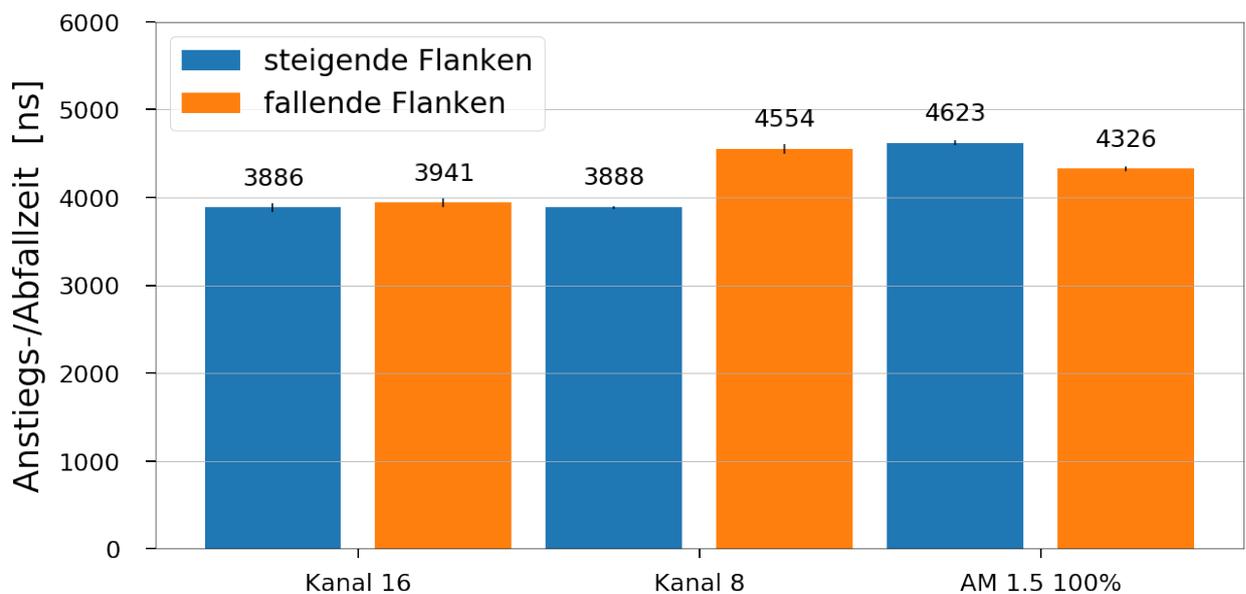


Abbildung 4.6: Vergleich der Anstiegszeiten verschiedener Spektren;  
Das Spektrum AM 1.5 ist ungeregelt

Vergleicht man nun die Anstiegs- und Abfallzeiten verschiedener Spektren, so stellt man fest, dass unabhängig vom Spektrum die Anstiegs- und Abfallzeiten in der gleichen Größenordnung liegen. Beim schmalbandigen Kanal 16 sind die steigende und fallende Flanken-

ke gleich schnell. Einen Unterschied erkennt man bei Kanal 8. Dass bei diesem Kanal die Abfallzeit signifikant größer ist als die Anstiegszeit liegt daran, dass das phosphoreszierende Material langsamer abklingt, als das Licht der LED. Verwunderlich ist dagegen, dass die Abfallzeit des AM1.5-Spektrums kleiner ist als die Anstiegszeit, da das AM1.5-Spektrum aus beiden Typen von LEDs zusammengesetzt ist. Vermutlich wird die Anstiegs- und Abfallzeit nicht durch die LEDs beschränkt, sondern durch die Elektronik, mit der die LEDs angesteuert werden. Aus diesem Grund ist der Unterschied zwischen den verschiedenen Spektren nicht sehr groß.

## 4.3 Vergleich mit einer Solarzelle

Um die zeitaufgelöste Reaktion einer Solarzelle auf das Licht beobachten zu können, muss das Licht sich schneller ändern, als die Solarzelle reagiert. Die einfachste Größe einer Solarzelle, die untersucht werden kann ist die Leerlaufspannung, da diese direkt mit einem Oszilloskop gemessen werden kann.

### 4.3.1 Vergleich der Anstiegszeiten

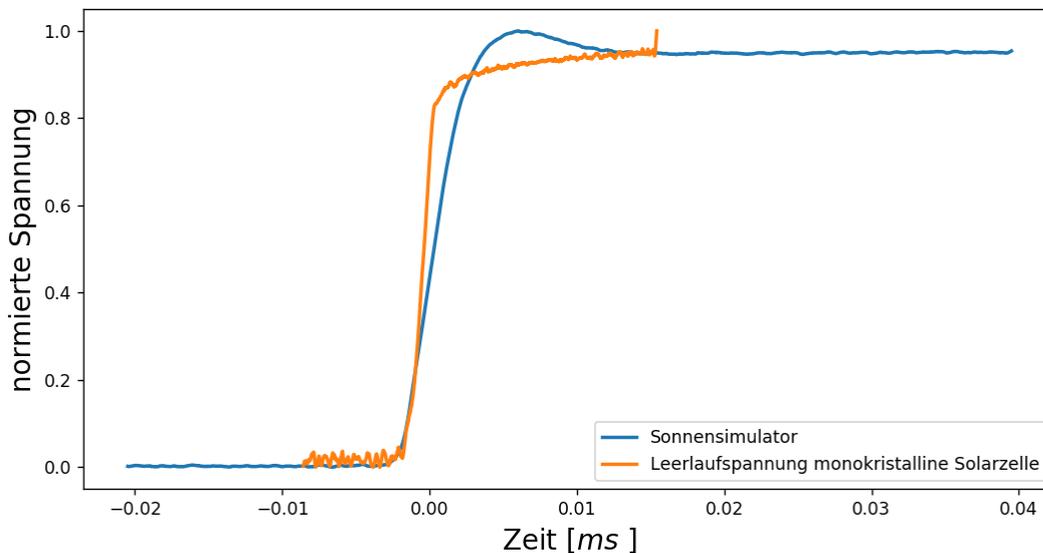


Abbildung 4.7: Vergleich ansteigender Flanken des Lichtes des Sonnensimulators und der Leerlaufspannung einer monokristallinen Siliziumsolarzelle

Zuerst soll die Anstiegszeit verglichen werden. Dazu wird die neben der Messung des Anstiegs aus Abbildung 4.4 auch die Leerlaufspannung einer monokristallinen Siliziumsolarzelle

dargestellt (Abbildung 4.7). Dabei wurden beide Spannungen so normiert, dass der Minimalwert auf 0 und der Maximalwert 1 liegt. Außerdem wurden beide Signale durch ein Savitzky-Golay-Filter geglättet. Dabei wurde eine Fensterbreite von 101 Messwerten verwendet. Es wurde weiterhin ein Polynom dritten Grades verwendet. Beide Verläufe wurden getrennt aufgezeichnet. Eine exakte zeitliche Synchronizität ist damit nicht gewährleistet.

Es ist zu erkennen, dass das Licht des Sonnensimulators leicht überschwingt. Obwohl das Spektrum nicht geregelt ist, ist hier dieser Effekt zu sehen. Dies belegt, dass gerade kurz nach dem Einschalten es zu einer starken Erwärmung des Halbleitermaterials der LEDs kommt, welches einen starken Abfall der Intensität nach sich zieht. Die Spannung der Zelle scheint schneller anzusteigen als das Licht. Dies ist durchaus möglich, wenn die Leerlaufspannung schon bei halber Bestrahlungsstärke fast das Maximum erreicht.

### 4.3.2 Vergleich der Abfallzeiten

Betrachtet man die Abfallkurve einer Solarzelle im Leerlauf, ist ein deutlich langsamer Abfall der Spannung zu erwarten. Dieser Abfall ist ein Maß für die Ladungsträgerlebensdauer innerhalb einer Solarzelle und ein Hinweis auf mögliche Defekte. Diese Messung wurde analog zum Vergleich der Anstiegszeiten durchgeführt.

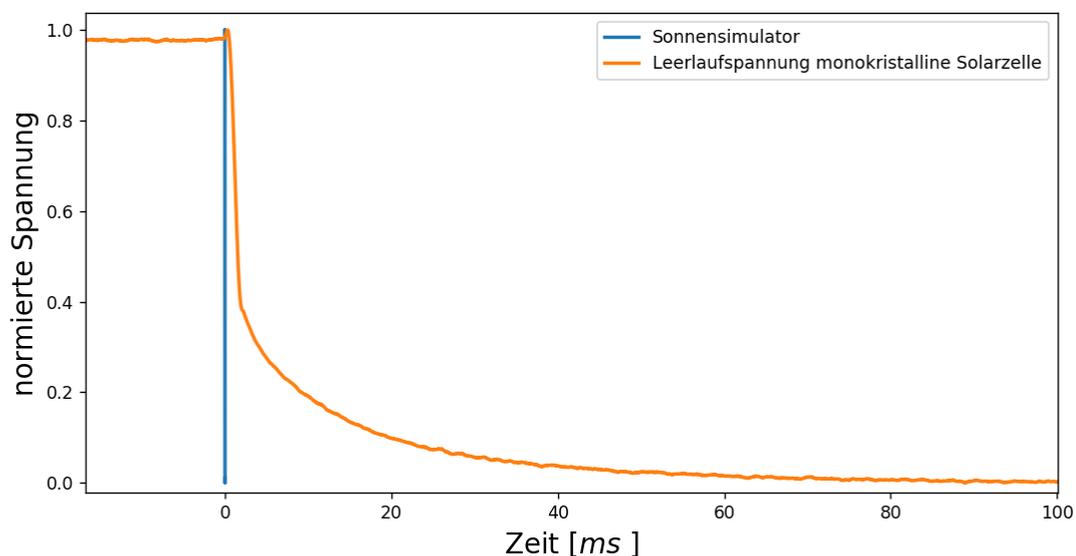


Abbildung 4.8: Vergleich abfallender Flanken des Lichtes des Sonnensimulators und der Leerlaufspannung einer monochristallinen Siliziumsolarzelle im Überblick

Die Aufzeichnung der abfallenden Flanke des Lichtes des Sonnensimulators ist so kurz, dass sie in dieser Darstellung (4.8) nur als senkrechter Strich zu sehen ist. Auch hier ist wieder keine zeitliche Synchronizität gegeben. Der Abfall der Leerlaufspannung ist um Größenordnungen langsamer als der Abfall des Lichtes des Sonnensimulators. Es ist ein zu erwartender exponentieller Abfall zu erkennen.

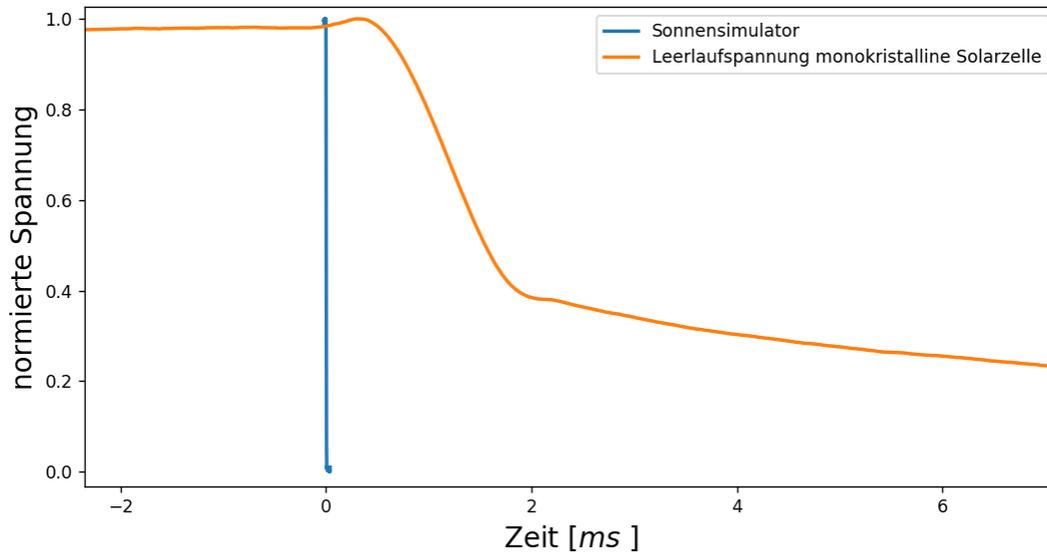


Abbildung 4.9: Vergleich abfallender Flanken des Lichtes des Sonnensimulators und der Leerlaufspannung einer monokristallinen Siliziumsolarzelle im Detail

In der Detaildarstellung aus Abbildung 4.9 ist erkennbar, dass die Leerlaufspannung vor dem Abfall erst einmal ansteigt. Auf den Anstieg folgt zuerst ein linearer Abfall der Leerlaufspannung, bevor der exponentielle Abfall einsetzt. Dieser lineare Anteil des Abfalls könnte ein Hinweis auf einen eventuellen Defekt der Zelle oder des Halbleitermaterials sein.

Das Licht des Sinus-220 fällt schnell genug ab, um verschiedene Zerfallsprozesse der Ladungsträger in einer Solarzelle zu sehen. Es lohnt sich in weiterführenden Arbeiten durchzuführen um zu Charakterisieren, welche Zerfallsprozesse mit Hilfe eines LED-Flashers gemessen werden können. Dabei können auch andere Kenngrößen als die Leerlaufspannung interessant sein.

# 5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit war es zu untersuchen, wie sich ein LED-basierter Sonnensimulator in zwei verschiedenen Szenarien verhält. Zum einen sollte das Verhalten des Spektrums während eines Lichtblitzes untersucht werden, zum anderen das Verhalten des Lichtes im Ein- und Ausschaltmoment.

Es gibt zwei verschiedene Arten von LEDs, die in einem Sonnensimulator verbaut werden. LEDs, die das Licht, das der pn-Übergang emittiert, direkt aussenden. Das Spektrum dieser LEDs lässt sich nur begrenzt physikalisch durch eine Funktion beschreiben. Aus diesem Grund bietet sich eine phänomenologische Betrachtungsweise des LED-Spektrums an. Die dabei zum Einsatz kommende Funktion hat als Parameter die Amplitude, die Peakwellenlänge, die Breite und die Schiefe. Andere LEDs nutzen das Licht des pn-Übergangs, um ein phosphoreszierendes Material anzuregen, welches in einer größeren Wellenlänge und Bandbreite Licht emittiert. Diese LEDs lassen sich nur schwer durch eine Funktion beschreiben. Eine Zusammensetzung aus mehreren Funktionen, die der Beschreibung der einfachen LEDs dienen, ist dabei aber möglich.

Während eines Lichtblitzes verändert sich das Spektrum jeder Art von LEDs aufgrund der sich ändernden Betriebstemperatur des lichtemittierenden Halbleitermaterials der LEDs. Diese Änderung des Spektrums hat auch einen Einfluss auf die Parameter der Funktion, die das Spektrum der LED beschreibt. Für alle Arten von LEDs gilt, dass mit zunehmender Temperatur die Amplitude des LED-Spektrums abnimmt. Die Peakwellenlänge nimmt mit steigender Temperatur zu. Dabei können aber einzelne LEDs auch eine Ausnahme darstellen. Für die meisten LEDs gilt auch, dass die Breite mit steigender Temperatur zunimmt. Jede Art der LEDs reagiert dabei unterschiedlich empfindlich auf Temperaturänderungen. Die Änderung der Temperatur kann im Betrieb nicht direkt gemessen werden. Es kann nur die Änderung der Parameter über die Zeit gemessen werden. Die Temperaturabhängigkeit kann aber durch eine Variation der Kühlertemperatur erreicht werden. Unter der zusätzlichen Berücksichtigung der Abhängigkeit der Parameter von der Intensität, mit der die LEDs betrieben werden, kann ein Simulationsmodell erstellt werden, das ein LED-Spektrum in Abhängigkeit von der Kühlertemperatur, der Zeit, die die LED im Betrieb ist und der Intensität, mit der die LED betrieben wird, simuliert. Dieses Simulationsmodell wurde in dieser Arbeit exemplarisch für eine Art von LEDs erstellt. Die Erstellung eines solchen Simulationsmodells ist prinzipiell auch für jede andere Art von LEDs möglich, für die die Zeitabhängigkeit, die Intensitätsabhängigkeit und die Temperaturabhängigkeit bekannt ist. Die Simulation ist dabei nur für Zeiten  $30 \text{ ms} < t < 100 \text{ ms}$  möglich, da für kürzere Zei-

ten keine ausreichende Linearität des Zeitverlaufes gegeben ist und bei längeren Zeiten ein Temperaturgleichgewicht zu erwarten ist. Auch andere angenommene Linearitäten, wie die lineare Abhängigkeit eines Parameters von der Temperatur, ist nicht für alle untersuchten LEDs gegeben. Aus diesem Grund ist dieses Simulationsmodell nicht auf alle Arten von LEDs anwendbar. Durch Optimierung des Simulationsmodells und genauere Kenntnis des Verhaltens der LED ist vermutlich ein besseres und allgemeiner anwendbares Simulationsmodell möglich.

Bei der Untersuchung des Verhaltens des Lichtes im Ein- und Ausschaltmoment ist vor allem die Wahl eines geeigneten Messaufbaus von Bedeutung. Dabei wurde ein einfacher Messaufbau verwendet und der Nachweis erbracht, dass dieser Messaufbau schnell genug ist, die Änderung des Lichtes des verwendeten Sonnensimulators im Ein- und Ausschaltvorgang zu messen. Es wurde festgestellt, dass die Geschwindigkeit, mit der sich die Intensität des Lichtes im Schaltmoment ändert, in erster Linie vom Gerät, also der elektrischen Steuerung der LEDs, begrenzt wird. Trotzdem hat die Art der LEDs noch einen kleinen Einfluss auf die Antiegs- und Abfallzeiten des Lichtes. Im Vergleich mit der Reaktion einer Solarzelle auf eine abfallende Flanke des Lichtes, konnte gezeigt werden, dass die Abfallzeit des Lichtes schnell genug ist, um Rekombinationsprozesse innerhalb der Solarzelle beobachten zu können. Damit ist es möglich, in weiterführenden Arbeiten verschiedene Rekombinationsprozesse und deren Eigenschaften zu untersuchen. Dabei können auch Rückschlüsse auf die Qualität von Solarzellen gezogen werden. Durch die zeitliche Präzision des Versuchsaufbaus eignet sich dieser auch, um die Qualität der Steuerung des Lichtes im Sonnensimulator beurteilen zu können.

Somit wurde in dieser Arbeit gezeigt, wo neue Möglichkeiten, aber auch Herausforderungen eines LED-basierten Sonnensimulators vorhanden sind. Zu den neuen Möglichkeiten zählen die gute zeitliche und spektrale Kontrolle des Lichtes, mit der neue Messverfahren in einem Sonnensimulator etabliert werden können. Aufgrund der vielen verschiedenen LEDs und deren unterschiedlichem Verhalten ist die spektrale Stabilität über einen längeren Zeitraum eine Herausforderung, die bewältigt werden muss.

# 6 Abbildungsverzeichnis

2.1	Spektrum des Sonnenlichts [6, S.638] . . . . .	8
2.2	Vergleich eines LED-Spektrums (Kanal 9): Fit nach Abhängigkeit aus Gleichung 2.1 verglichen mit Messwerten Fitparameter: $E_g = 1,93 \text{ eV}$ ; $kT = 26,12 \text{ meV}$ ; $I_{max} = 0,859 \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ . . . . .	9
2.3	Vergleich eines LED-Spektrums (Kanal 9): Fit nach Abhängigkeit aus Gleichung 2.3 bis 2.4 verglichen mit Messwerten Fitparameter: $I_{max} = 0,882 \text{ W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ ; $kT_c = 35,1 \text{ meV}$ ; $Ad = 148,9 \sqrt{\text{eV}^{-1}}$ ; $E_g = 1,96 \text{ eV}$ ; $\frac{kT}{\sigma} = 12,99 \text{ meV}$ . . . . .	11
2.4	Vergleich der Quadratfehler der physikalischen und der phänomenologischen Fitfunktion . . . . .	15
2.5	Charakterisierung der Abfallzeit an einem Beispiel . . . . .	17
3.1	Schematischer Aufbau der Light-Engine mit integriertem Spektrometer . . .	21
3.2	Messwerte des ersten Spektrums (Kanäle 1, 4, 9, 16, 20) mit Fit nach Gleichung 2.10 . . . . .	23
3.3	Messwerte des zweiten Spektrums (Kanäle 7, 17) mit Fit nach Gleichung 2.10	23
3.4	Messwerte des dritten Spektrums (Kanäle 8, 19) mit Fit nach Gleichung 2.10	24
3.5	Messwerte des zweiten Spektrums (Kanäle 7, 17) mit Fit nach Gleichung 2.10 Kanal 7 wurde mit der Summe aus 3 Fitfunktionen gefittet . . . . .	24
3.6	Messwerte mit Fit nach Gleichung 2.10 vom Kanal 16 Die drei Spektren wurden zu drei unterschiedlichen Zeiten im Lichtblitz aufgenommen. . . . .	26
3.7	Peakbestrahlungsstärke über die Zeit vom Kanal 16 . . . . .	26
3.8	Peakwellenlänge über die Zeit vom Kanal 16 . . . . .	27
3.9	Breite des Peaks über die Zeit vom Kanal 16 . . . . .	28
3.10	Schiefe des Peaks über die Zeit vom Kanal 16 . . . . .	28
3.11	Peakwellenlänge über die Zeit vom Kanal 16 bei 4 verschiedenen Intensitäten	29
3.12	Peakwellenlänge bei $t = 92,5 \text{ ms}$ in Abhängigkeit von der Intensität für Kanal 16 Fitgerade: $C(I) = 0,0294 \text{ nm \%}^{-1} \cdot I + 801,35 \text{ nm}$ . . . . .	30
3.13	Peakwellenlänge über die Zeit vom Kanal 16 bei 3 verschiedenen Temperaturen	33
3.14	Peakwellenlänge bei $t = 92,5 \text{ ms}$ in Abhängigkeit von der Temperatur für Kanal 16 Fitgerade: $C(I) = 0,221 \text{ nm K}^{-1} \cdot I + 800,56 \text{ nm}$ . . . . .	33
3.15	Berechneter Verlauf der Quasitemperatur von Kanal 16 . . . . .	37
3.16	Berechneter Verlauf der Quasitemperatur von Kanal 16 für vier verschiedene Intensitäten . . . . .	38

3.17 Berechneter Verlauf der Quasitemperatur von Kanal 16 für drei verschiedene Temperaturen . . . . .	38
3.18 Vergleich der Simulation mit den Messwerten (Kanal 16) . . . . .	42
3.19 Alle Parameterwerte der untersuchten Kanäle zum Zeitpunkt $t = 7,5$ ms . . .	43
3.20 Relative Änderung aller Parameterwerte der untersuchten Kanäle in % . . .	45
3.21 Alle Parameterwerte zum Zeitpunkt $t = 7,5$ ms für die Kanäle 7 und 8 mit zusammengesetzten Fitfunktionen entsprechend Abbildung 3.5 . . . . .	46
3.22 Relative Änderung aller Parameterwerte in % für die Kanäle 7 und 8 mit zusammengesetzten Fitfunktionen entsprechend Abbildung 3.5 . . . . .	48
4.1 Messschaltung der Photodiode im Betrieb als Photoelement mit Oszilloskop als Messgerät . . . . .	50
4.2 Messschaltung mit Ankopplung einer LED, welche über einen Funktionsgenerator ein Rechtecksignal erhält. . . . .	50
4.3 Geschwindigkeit der Photodiode im Vergleich zur Geschwindigkeit des Sinus-220	51
4.4 Ansteigende und abfallende Flanke eines AM1.5-Spektrum . . . . .	51
4.5 Einschwingvorgang eines geregelten AM 1.5-Spektrums . . . . .	53
4.6 Vergleich der Anstiegszeiten verschiedener Spektren; Das Spektrum AM 1.5 ist unregelt . . . . .	53
4.7 Vergleich ansteigender Flanken des Lichtes des Sonnensimulators und der Leerlaufspannung einer monochristallinen Siliziumsolarzelle . . . . .	54
4.8 Vergleich abfallender Flanken des Lichtes des Sonnensimulators und der Leerlaufspannung einer monochristallinen Siliziumsolarzelle im Überblick . . . . .	55
4.9 Vergleich abfallender Flanken des Lichtes des Sonnensimulators und der Leerlaufspannung einer monochristallinen Siliziumsolarzelle im Detail . . . . .	56

# Literaturverzeichnis

- [1] Sara Gustavsson. The nobel prize in physics 2014, 2014.
- [2] S. Kohraku and K. Kurokawa. New methods for solar cells measurement by led solar simulator. In 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of, volume 2, pages 1977–1980 Vol.2, May 2003.
- [3] Foteini Plyta. Optical design of a fully LED-based solar simulator. PhD thesis, Loughborough University, 2015.
- [4] T Mukai, S Nagahama, N Iwasa, M Senoh, and T Yamada. Nitride light-emitting diodes. Journal of Physics: Condensed Matter, 13(32):7089, 2001.
- [5] Y.P. Varshni. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. Physica, 34(1):149 – 154, 1967.
- [6] Marius Grundmann. The Physics of Semiconductors. Springer, 2010.
- [7] B Ullrich, S R Munshi, and G J Brown. Photoluminescence analysis of p-doped gaas using the roosbroeck–shockley relation. Semiconductor Science and Technology, 22(10):1174, 2007.
- [8] Lutz Dümbgen. Einführung in die Statistik. Springer Nature, 2016.
- [9] András Poppe. Multi-domain compact modeling of leds: an overview of models and experimental data. Microelectronics Journal, 46(12):1138–1151, 2015.
- [10] Frank REIFEGERSTE and Jens LIENIG. Modelling of the temperature and current dependence of led spectra. Journal of Light & Visual Environment, 32(3):288–294, 2008.
- [11] Reinhard Lerch. Elektrische Messtechnik. Springer Nature, 2016.

# 7 Tabellenverzeichnis

2.1	Grenzwerte der einzelnen Parameter der physikalischen Fitfunktion . . . . .	16
3.1	Mittel des Bestimmtheitsmaßes der Fits verschiedener Parameter in Abhängigkeit von der Intensität für alle untersuchten Kanäle A: Amplitude / Peakbestrahlungsstärke S: Schiefe C: Peakwellenlänge W: Breite . . . . .	31
3.2	Ordinatenabschnitte für alle Kanäle und Parameter deren Bestimmtheitsmaß größer als 0,85 ist. A: Amplitude / Peakbestrahlungsstärke [ $\text{W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ ] S: Schiefe C: Peakwellenlänge [nm] W: Breite [nm] . . . . .	32
3.3	Mittel des Bestimmtheitsmaßes der Fits verschiedener Parameter von der Temperatur für alle untersuchten Kanäle . . . . .	35
3.4	Ordinatenabschnitte für alle Kanäle und Parameter deren Bestimmtheitsmaß größer als 0,85 ist. A: Amplitude / Peakbestrahlungsstärke [ $\text{W cm}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ] S: Schiefe [ $\text{K}^{-1}$ ] C: Peakwellenlänge [ $\text{nm K}^{-1}$ ] W: Breite [ $\text{nm K}^{-1}$ ] . . . . .	35
3.5	Zusammenfassung der Parameterwerte aus Gleichung 3.7, die den Zusammenhang zwischen dem Parameterwert und der Quasitemperatur angeben; Kanal 16 . . . . .	41

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe von mir verfasst wurde. Ich habe keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel zur Erstellung dieser Arbeit genutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Manuel Meusel

Halle (Saale), 22. Mai 2017