

**Dipl.-Ing. Steffen Strauß**

**Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung**

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

©Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2007

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Satz und Gestaltung: Dipl.-Ing. Steffen Strauß

Hersteller: W. V. Westfalia Druck GmbH  
Druck · Buch · Verlag  
Paderborn

Printed in Germany

Theoretische und experimentelle Untersuchungen  
zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Dipl.-Ing. Steffen Strauß  
aus Ilmenau

Tag des Kolloquiums: 10.12.2007

Referent: Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek  
Koreferent: Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer

## Zusammenfassung

Aktuelle Entwicklungen zeigen, dass sich das Einsatzgebiet von Licht emittierenden Dioden (LED) stetig erweitert. Da sich diese neue Lichtquelle am Anfang ihrer Entwicklung befindet, sind die zukünftigen Einsatzgebiete kaum absehbar. Diese Arbeit dient der Analyse des Entwicklungspotenzials der weißen Hochleistungs-LEDs für die Kfz-Frontbeleuchtung.

Im ersten Teil der Arbeit findet eine ausführliche Analyse der lichttechnischen Parameter heutiger Hochleistungs-LEDs statt. Des Weiteren werden, ausgehend von den Prinzipien der Weißlichterzeugung mit Halbleiterdioden, die Entwicklungsmöglichkeiten der weißen LED abgeschätzt und mit denen konventioneller Lichtquellen wie Glüh- und Gasentladungslampe verglichen.

Im zweiten Teil wird besonderes Augenmerk auf die einzigartige schnelle Schaltzeit der LED gelegt. Es wird eine Variante eines LED-Scheinwerfers beschrieben, mit der, durch die Kombination einer gepulsten Lichtquelle mit einer dynamischen Optik, eine frei adressierbare Lichtverteilung realisiert wird. Anhand eines Funktionsmusters wird dieses Prinzip umgesetzt und die Machbarkeit eines solchen Scheinwerfers analysiert. Um den reibunglosen Einsatz einer gepulsten LED-Lichtquelle im Kfz zu garantieren, war es notwendig sowohl technische als auch physiologische Besonderheiten gepulster Leuchtdioden zu untersuchen.

Es wird gezeigt, dass die Blendung mit gepulsten Lichtquellen nicht zu einer erhöhten Beeinträchtigung des Sehvermögens führt. Weiterhin wird das Phänomen des Perlschnureffektes (bzw. flickering rearlamp oder Doppelbilderbildung) untersucht und es werden Konstruktionsrichtlinien zur Vermeidung dieses Effektes gegeben.

Anhand der Analyse eines thermodynamischen Modells einer gepulsten LED, werden mögliche Vor- und Nachteile des Pulses bezüglich der LED-Temperatur und -Lichtausbeute analysiert. Diese Analyse führt zu einer, durch die thermodynamischen Kapazitäten und Widerstände berechenbaren, Mindestfrequenz für Halbleiterdioden, unterhalb derer Dioden nur mit geringerer Leistung betrieben werden dürfen.

Durch spektral- und zeitaufgelöste Messungen der optischen Sprungantwort werden die Einflüsse der Fluorophorkonversion auf die Schaltzeiten weißer LEDs untersucht. Es zeigt sich eine Verlängerung der Schaltzeit auf ca. eine Mikrosekunde.

## **Abstract**

The latest trends display a growing range of applications for LEDs. The development of this light source is in its early stages and its domain in the future is hard to predict. This report will analyse the potential for development of high performance LEDs used for automobile head lights. The first chapter provides technical light parameters for today's high performance LEDs. Furthermore it looks at the development potentials of white LEDs, based on creation of white light with semiconductor diodes and compares them with conventional light sources such as incandescent and gas discharge lamps.

The second chapter focuses on fast circuit time as a unique feature of LEDs. It describes a variant LED head light which enables free allocation of light beams by combining a pulsed light source with a dynamic optic. In order to discuss future production this principal will be analyzed and implemented on the basis of a functional model.

In order to guarantee sufficient use of pulsed LEDs for automobiles, it was necessary to examine technical and physical characteristics of LEDs. As a result it was found that the glare of pulsed light sources doesn't cause visual curtailing. In addition, the phenomenon of "flickering rearlamp" will be investigated to conclude guidelines for a construction that prevents that disadvantage regarding LED temperature and light efficiency will be analyzed. By calculating thermo dynamical capacities and resistance, the observation resulted in a minimum frequency for semiconductor diodes. LEDs below that value should be operated only with lower power. Through spectral and transient measurements of the optical step response, the influence of phosphor conversion on circuit times of white LEDs were analyzed. The result is a delay of about one micro second.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	ii
Abstract .....	iii
Inhaltsverzeichnis .....	iv
Abbildungen .....	vi
Tabellen .....	xi
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen .....	xii
1 Einleitung .....	1
2 Lichterzeugung mit LEDs .....	3
2.1 Glühlampe .....	3
2.1.1 Lichterzeugung mit Temperaturstrahlern .....	3
2.1.2 Scheinwerfersysteme mit Halogenglühlampen .....	5
2.2 Gasentladungslampe .....	7
2.2.1 Lichterzeugung durch Gasentladung .....	7
2.2.2 Scheinwerfersysteme mit Gasentladungslampe .....	9
2.3 LED .....	11
2.3.1 Grundlagen Licht emittierender Dioden.....	11
2.3.2 Lichtausbeute.....	16
2.3.3 Leuchtdichte .....	26
2.3.4 Lichtstrom.....	26
2.3.5 Klimamanagement.....	35
2.4 Heutiger Entwicklungsstand der LED .....	39
2.5 Optische Schaltzeiten .....	41
3 Einsatz der gepulsten Lichtquelle in zukünftigen Scheinwerfern .....	47
3.1 Zukünftige Scheinwerfer .....	47
3.1.1 Konzepte mit Halogenglühlampen .....	49
3.1.2 Konzepte mit Gasentladungslampen .....	49
3.1.3 Visionen mit LED Technologie.....	51
3.2 Möglicher Einsatz gepulster LEDs in zukünftigen Scheinwerfern .....	52
3.2.1 Grundprinzip.....	52
3.2.2 Transformation Zeitliche in Örtliche.....	52
3.2.3 Offene Fragen .....	55

4	Untersuchungen zu pulsmodulierten LEDs.....	57
4.1	Phasenverschiebung durch Fluoreszenz .....	57
4.1.1	Messprinzip .....	57
4.1.2	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	58
4.2	Thermodynamik gepulster LEDs.....	60
4.2.1	Thermisches Ersatzschaltbild .....	60
4.2.2	Thermische Simulation.....	67
4.3	Physiologische Effekte und Risiken.....	74
4.3.1	Physiologie des Dimmens über Pulsweitenmodulation .....	74
4.3.2	Der Perlschnureffekt.....	76
4.3.3	Blendung durch gepulste Lichtquellen.....	95
5	Funktionsmuster .....	99
5.1	Optik.....	100
5.1.1	Dynamische Lichtstromverteilung .....	100
5.1.2	Spiegelgeometrie .....	103
5.1.3	Optisches System.....	104
5.2	Mechatronik.....	106
5.2.1	Regelkreis .....	106
5.2.2	LED-Zeile .....	106
5.2.3	LED-Treiber .....	109
5.2.4	Antrieb .....	109
5.2.5	Sensorik .....	110
5.2.6	Mikrocontroller und Software .....	110
5.3	Diskussion der Messergebnisse.....	112
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	113
7	Literatur .....	116

# Abbildungen

Abbildung 1-1 Ansprechverhalten von LED und Glühlampe .....	1
Abbildung 2-1 Schwingende Atome im Festkörper.....	4
Abbildung 2-2 Spektrale spezifische Aussstrahlung eines idealen schwarzen Körpers bei verschiedenen Glühtemperaturen. Die $V(\lambda)$ -Kurve kennzeichnet den sichtbaren spektralen Anteil.....	4
Abbildung 2-3 Lichtausbeute eines idealen schwarzen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen.....	5
Abbildung 2-4 Strahlengang bei der Erzeugung verschieden großer Wendelbilder in Paraboloidreflektoren mit Streuscheibe (links) und in Freiformreflektoren (rechts) .....	6
Abbildung 2-5 Plasma, bestehend aus Ionen und Elektronen in dem Brenner einer Gasentladungslampe.....	8
Abbildung 2-6 Prozentualer Anteil der jeweiligen Gase einer D2 bzw. D4 Lampe an der Lichtstromerzeugung während des Einschaltvorganges (nach [OSRAM]) .....	8
Abbildung 2-7 Spektrum einer D2 und einer D4 Lampe [Man06] .....	8
Abbildung 2-8 Aufnahme einer H7-Glühwendel und eines D2-Lichtbogens im gleichen Maßstab. Hohe Leuchtdichten sind mit dunklen, niedrige mit hellen Graustufen dargestellt. ....	9
Abbildung 2-9 Darstellung der geometrischen Brennpunkte eines Drei-Ellipsoid-Reflektors (links: horizontaler, rechts: vertikaler Schnitt).....	9
Abbildung 2-10: Atommodell nach Bohr.....	11
Abbildung 2-11: Emission (links) und Absorption (rechts) elektromagnetischer Strahlung ...	11
Abbildung 2-12: Valenzbindung vierwertiger Atome.....	12
Abbildung 2-13: Energiebänder im Kristall .....	12
Abbildung 2-14: Leitungs- und Valenzband .....	12
Abbildung 2-15: n-Dotierung mit Energiediagramm .....	13
Abbildung 2-16: p-Dotierung mit Energiediagramm .....	14
Abbildung 2-17: Ausgleichsvorgang (links) und pn-Übergang ohne äußere Spannung (rechts) .....	14
Abbildung 2-18: Energieverlauf im pn-Übergang ohne und mit Vorwärtsspannung [Schu06] .....	14
Abbildung 2-19: Diodenkennlinien verschiedener Diodentypen [Mer02].....	15
Abbildung 2-20 zirkuläres Bragggitter zur Steigerung der Auskoppeleffizienz [Su06] .....	18

Abbildung 2-21 Darstellungen der CIE-Farbtafel, die durchgezogene Mischgerade zeigt die möglichen Kombination zweier Spektralfarben. Das gestrichelte Dreieck grenzt die Kombinationsmöglichkeiten dreier Spektralfarben zur Herstellung einer Mischfarbe ein.	21
.....	.....
Abbildung 2-22 links: Kombinationsmöglichkeiten zur Erzeugung maximaler Lichtausbeuten aus zwei Spektrallinien. rechts: Spektrum der Zweifarbenkombination mit maximaler Lichtausbeute. Zur Veranschaulichung ist zudem die $V(\lambda)$ -Kurve dargestellt.	21
.....	.....
Abbildung 2-23 links: Kombinationsmöglichkeiten zur Erzeugung maximaler Lichtausbeuten aus drei Spektrallinien. rechts: Spektrum der Dreifarbekombination mit maximaler Lichtausbeute. Zur Veranschaulichung ist zudem die $V(\lambda)$ -Kurve dargestellt.	22
.....	.....
Abbildung 2-24 Prinzip der Weißlichterzeugung mit Lumineszenzstoffen. Rechts: Typisches Spektrum weißer LED	23
.....	.....
Abbildung 2-25 Temperaturabhängiger Lichtstrom verschiedener Hochleistungs LEDs [DB06] [K206]	24
.....	.....
Abbildung 2-26 Einstufige Abbildung im paraxialen Gebiet	27
.....	.....
Abbildung 2-27 Veranschaulichung der Konstanz der Leuchtdichte in abbildenden optischen Systemen	30
.....	.....
Abbildung 2-28 Vereinfachte Darstellung des thermischen Pfades in einer LED	31
.....	.....
Abbildung 2-29 Von $In_{0.16}Ga_{0.84}As/GaAs$ emittierte optische Intensität, deren aktive Zone ein, vier, sechs oder acht Quantumwells enthält, sowie die theoretische Intensität eines perfekt isotropischen Emitters [Schu06]	31
.....	.....
Abbildung 2-30 Roadmap der Leuchtdichteentwicklung weißer LEDs	32
.....	.....
Abbildung 2-31 Erste Voll-LED Scheinwerfer von OSRAM, Hella, und Audi	34
.....	.....
Abbildung 2-32 Roadmap des erwarteten Lichtstromes eines Diodenpackages von Philips. Die Verfünffachung des Lichtstromes von 50lm auf 250lm bei einer Verdoppelung des Stromes von 350mA auf 700mA ist nur durch eine Reihenschaltung von mehreren Diode möglich.	34
.....	.....
Abbildung 2-33 Aufbau einer Hochleistungs-LED bestehend aus LED-Chip mit als Wärmesenke ausgelegter Anode und angebondeter Kathode	35
.....	.....
Abbildung 2-34 Wichtigste Entwärmungspfade in einer Anordnung OHX-6XX - Schaltungsträger - Umgebung (nach [Mah06])	36
.....	.....
Abbildung 2-35 Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild einer Hochleistungs-LED	36
.....	.....
Abbildung 2-36 OSRAM O-Star	37
.....	.....

Abbildung 2-37 Thermisches Ersatzschaltbild eines LED-Arrays.....	37
Abbildung 2-38 Prinzipieller Einschaltvorgang einer D2-Gasentladungslampe (gestrichelt) und einer Glühlampe (gepunktet) .....	41
Abbildung 2-39 Schaltzeiten einer RCLED bei T=300k; die Unterschiede zwischen $\tau_{rise}$ und $\tau_{fall}$ basieren auf dem Ladungsträger sweep-out aus der aktiven Zone [Schu06] .....	42
Abbildung 2-40 Umwandlung im Fluorophor.....	43
Abbildung 2-41 Darstellung der Phosphoreszenz und der Fluoreszenz im Bändermodell.....	43
Abbildung 2-42 Gepulste Scheinwerfer zur Car2Car Kommunikation (ISLE) .....	44
Abbildung 2-43 Schlussleuchte eines BMW mit gedimmter Rücklichtfunktion (links) und voll angesteuerter Bremslichtfunktion (rechts).....	45
Abbildung 2-44 Ansteuerungssignal einer gedimmten Schlussleuchte .....	46
Abbildung 3-1 Adressierbarer Scheinwerfer .....	48
Abbildung 3-2 Prinzipielle Funktionsweise eines scannenden Scheinwerfers .....	49
Abbildung 3-3 Scheinwerfer mit hoch dynamischer Blende.....	50
Abbildung 3-4 Scheinwerfer auf DMD-Basis .....	50
Abbildung 3-5 Frei adressierbare Lichtquelle (Mitte) Projektion einer Fernlichtfunktion (links) Projektion einer Abblendlichtfunktion (rechts) .....	51
Abbildung 3-6 Impulse gleicher Energie.....	52
Abbildung 3-7 Nach Goldstein [Gol02] hängt die Wahrnehmung der Scheinbewegung von dem Zeitintervall ab.....	52
Abbildung 3-8 Helligkeitseindruck zweier periodisch wechselnder Reize (Frequenz liegt über der Flimmerverschmelzungsfrequenz) .....	53
Abbildung 3-9 Perlschnureffekt bei gepulstem Rücklicht .....	56
Abbildung 4-1 Messprinzip zur Ermittlung der wellenlängenaufgelösten LED-Sprungantwort .....	57
Abbildung 4-2 Oszilloskopanzeigen der LED-Vermessung (oben: Auslese-Gate, unten: LED- Ansteuerung) .....	58
Abbildung 4-3 Wellenlängenaufgelöste Sprungantwort einer weißen LED .....	58
Abbildung 4-4 Simulierte Sprungantwort (5ns, 80ns, 2000ns) und aus der Faltung zu erwartendes Messergebnis.....	59
Abbildung 4-5 Statisches thermisches ESB .....	60
Abbildung 4-6 Dynamisches thermisches ESB.....	60
Abbildung 4-7 Dynamisches thermisches ESB (anhand von Hydraulik) .....	61

Abbildung 4-8 Oberseite des Chips mit Anschlusspunkt des Bonddrahtes (links) und im Profil (rechts) .....	63
Abbildung 4-9 Maße des Chips in mm.....	63
Abbildung 4-10 Wärmesenke von oben (links) und im Profil (rechts) .....	63
Abbildung 4-11 Bemaßung der Wärmesenke in mm .....	64
Abbildung 4-12 Dynamisches thermisches ESB mit Parametern .....	64
Abbildung 4-13 Thermisches ESB mit vereinfachter Bezeichnung.....	65
Abbildung 4-14 Simulink-Modell des dynamischen thermischen ESB .....	65
Abbildung 4-15 Simulink-Modell mit Übertragungsfunktion .....	66
Abbildung 4-16 Gemessenes und nach Datenblatt angegebenes temperaturabhängiges Verhalten der LED-Strahlungsleistung .....	67
Abbildung 4-17 Sprungantwort der Temperatur (links) und der relativen Strahlungsleistung (rechts) .....	68
Abbildung 4-18 Temperaturantwort einer LED bei 50% Tastverhältnis. Einzelpuls (links)/ Rechteckfrequenzantwort (rechts) .....	69
Abbildung 4-19 Mittlere Temperatur und relative Strahlungsleistung für verschiedene Tastverhältnisse .....	70
Abbildung 4-20 Pulsantwort der Temperatur (links) und mittlere Arbeitstemperatur (rechts) bei verschiedenen Tastverhältnissen gleicher Leistung.....	70
Abbildung 4-21 Arbeitstemperatur und Strahlungsleistung für verschiedene Tastverhältnisse und 166Hz bzw. 80Hz .....	71
Abbildung 4-22 Frequenz- bzw. pulsdauerabhängige Maximaltemperatur .....	71
Abbildung 4-23 Temperaturkennlinien bei verschiedenen Frequenzen.....	72
Abbildung 4-24 Frequenz- bzw. Pulsdauerabhängigkeit der maximalen Temperatur für dc=10; 30; 50; 70%.....	73
Abbildung 4-25 Abhängigkeit der Flimmerverschmelzungsfrequenz von Umfeldleuchtdichte und Grundwellenquotient [Hen02] .....	75
Abbildung 4-26 Entstehung der Perlschnur auf der Netzhaut .....	77
Abbildung 4-27 Einflussgrößen auf den Perlschnureffekt .....	79
Abbildung 4-28 Illustration der Faltung von Lichtquelle und Bewegung.....	82
Abbildung 4-29 Veranschaulichung des Falls $b > \omega t_{ld}$ .....	82
Abbildung 4-30 Entstehungsbedingung einer homogenen Linie .....	82
Abbildung 4-31 Messaufbau und erzeugte Perlschnur.....	83

Abbildung 4-32 Abhängigkeit der kritischen Frequenz von der Winkelgeschwindigkeit der Lichtquelle .....	84
Abbildung 4-33 Erweiterter Messaufbau zur Untersuchung des Einflusses von Umfeldleuchtdichte und Blickwinkel.....	85
Abbildung 4-34 Abhängigkeit der kritischen Frequenz von Umfeldleuchtdichte und Farbe der Lichtquelle (Die Linien indizieren die Standardabweichung durch die Probanden.).....	85
Abbildung 4-35 Zeitverlauf der sakkadischen Supression [Thi04].....	89
Abbildung 4-36 Abhängigkeit der sakkadischen Supressionsschwelle von der Umfeldleuchtdichte .....	89
Abbildung 4-37 Straensituation mit zwei Fixationspunkten (Ortsschild und Baum) .....	90
Abbildung 4-38 Netzhautbilder bei Blickbewegungen bei Tag .....	91
Abbildung 4-39 Netzhautbilder bei der Blickbewegung bei Nacht .....	91
Abbildung 4-40 Netzhautbild einer kontinuierlichen und einer diskontinuierlichen Rückleuchte .....	92
Abbildung 4-41 Zeitdiskreter Lichtstrom einer kontinuierlichen und einer diskontinuierlichen Rückleuchte gleicher Helligkeit .....	92
Abbildung 4-42 Rückleuchten mit geringer horizontaler bzw. vertikaler Ausdehnung.....	93
Abbildung 4-43 Rückleuchte mit visuell auflösbaren Einzellichtquellen .....	94
Abbildung 4-44 Entstehungszentren für Streulicht im Auge bei Blendung [Lan04] .....	95
Abbildung 4-45 Die Schwankungen innerhalb der ermittelten Schwellenkontraste sind geringer als altersbedingte Schwankungen [Kli03].....	98
Abbildung 5-1 Variablen eines abbildenden Systems im paraxialen Gebiet .....	100
Abbildung 5-2 Dynamik durch Variation der Relativlage von Optik zu Lichtquelle .....	101
Abbildung 5-3 Dynamik durch variables Abknicken der optischen Achse [Goe06] .....	102
Abbildung 5-4 Dynamik durch Erzeugung eines bewegten Zwischenbildes [Die04] .....	102
Abbildung 5-5 Kombination von dynamischer Optik und dynamischer Lichtquelle .....	103
Abbildung 5-6 Polygonspiegel mit gleicher Spiegelgröße.....	103
Abbildung 5-7 Synthetisierte Abbildungsoptik .....	104
Abbildung 5-8 Anstieg des Lichtstromes und der Beleuchtungsstärke (~Abbildungsqualitat) mit zunehmendem Optikradius.....	104
Abbildung 5-9 Optisches System des Funktionsmusters .....	105
Abbildung 5-10 Mechatronische Komponenten & Energie- und Informationsfluss des Funktionsmusters.....	106
Abbildung 5-11 Prototyp eines COB LED-Arrays .....	107

Abbildung 5-12 Luxeon Flash mit Abmessungen [LF06] .....	107
Abbildung 5-13 Elektrische Parameter der Luxeon Flash [LF06] .....	107
Abbildung 5-14 Schaltplan der LED-Zeile .....	108
Abbildung 5-15 Kontaktierung der einzelnen LEDs .....	108
Abbildung 5-16 Verwendete LED-Zeile .....	108
Abbildung 5-17 Spiegelantrieb mit Unterbrechungsring und Lichtschranke.....	110
Abbildung 5-18 GUI der Ansteuersoftware LED-Headlamp .....	111
Abbildung 5-19 Mit dem Funktionsmuster projiziertes L-LAB-Logo.....	111
Abbildung 5-20 Erhöhung der Beleuchtungsstärke durch Überlagerung mehrerer LED-Arrays .....	112

## **Tabellen**

Tabelle 2-1 Eigenschaften verschiedener Halbleiterkombinationen .....	13
Tabelle 2-2 theoretische Effizienzen und Wirkungsgrade bei der Weißlichterzeugung mit LEDs.....	25
Tabelle 2-3 Lichtausbeuten verschiedener Lichtquellen .....	25
Tabelle 2-4 Leuchtdichten der klassischen Kfz-Lichtquellen im Vergleich zu einer Hochleistungs-LED (Angaben in Mcd/m <sup>2</sup> ) .....	26
Tabelle 2-5 Mindestdurchmesser der Austrittspupille eines Scheinwerfers zur Erzeugung der für Fernlicht geforderten Beleuchtungsstärken .....	29
Tabelle 2-6 Möglichkeiten der LED-Cluster Bildung mit Vor- und Nachteilen.....	33
Tabelle 4-1 relative Winkelgeschwindigkeiten beim Überholvorgang .....	87
Tabelle 4-2 Ermittelter Schwellenkontrast bei verschiedenen Pulsparametern .....	97

## **Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen**

A	Fläche [ $m^2$ ]
A	Index = Akzeptor (p-dotiert)
AFS	Adaptive Front Lighting System
a	Gegenstandsweite [m]
a'	Bildweite [m]
b	Breite der Lichtquelle [ $^\circ$ ]
C	Kapazität [F]
CCD	Charche Coupled Device
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
COB	Chip on Board
$C_{th}$	Thermische Kapazität [J/K]
Cu	Kupfer
c	Lichtgeschwindigkeit [m/s]
c	Spezifische Wärmekapazität [J/kg/K]
D	Index = Donator (n-dotiert)
$D_{65}$	Normlichtart (Daylight =schwarzer Strahler bei 6500k)
DMD	Digital Mirror Device
dc	Tastverhältnis [%]
E	Energie [Ws]
E	Unbuntpunkt x=y=z=1/3
E	Beleuchtungsstärke [lx]
ECE	Economic Commission for Europe
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESB	Ersatzschaltbild
EU	Europäische Union
e	Basis des natürlichen Logarithmus 2,71828183
e	Index = physikalische Größe
F, F'	Objektseitiger bzw. bildseitiger Brennpunkt
FPS	Frames Per Second
FVF	Flimmerverschmelzungsfrequenz [Hz]
f	Frequenz [Hz]
f, f'	Objektseitige bzw. bildseitige Brennweite [mm]
$f_v$	Flimmerverschmelzungsfrequenz [Hz]
Ga	Gallium
GaAs	Galliumarsenid
GaP	Galliumphosphid

GUI	Graphical User Interface
GW	Grundwellenquotient [%]
H	Belichtung [lx s]
HDG	Hell-Dunkel-Grenze
HH	Horizontale Linie
Hg	Quecksilber
h	Plancksches Strahlungsäquivalent $6,62607 \cdot 10^{-34}$ Js
I	Strom [A]
$I_D$	Diodenstrom [A]
$I_S$	Sättigungsstrom [A]
IDE	Integrated Drive Electronics
InGaN	Indiumgalliumnitrid
InP	Indiumphosphid
$I_S$	Sperrstrom [A]
K	Alterfaktor
Kfz	Kraftfahrzeug
$K_{O/U}$	Kontrast nach Weber [%]
k	Stephan-Bolzman-Konstante $1,380650524 \cdot 10^{-23}$ J K <sup>-1</sup>
$k_m$	Photometrisches Strahlungsäquivalent 683 lm/W
L	Leuchtdichte [cd/m <sup>2</sup> ]
LED	Licht emittierende Diode
$L_{S,\text{äqu}}$	Äquivalente Schleierleuchtdichte [cd/m <sup>2</sup> ]
M	Spezifische Ausstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]
m	Masse [kg]
Na	Natrium
NaI	Natriumjodid
n	Brechungsindex
P, P'	Objekt-, Bildpunkt
PC	Personal Computer
PDA	Personal Digital Assistant
$P_e$	Elektrische Leistung [W]
$P_s$	Strahlungsleistung [W]
$P_{SR}$	Strahlende Rekombinationsleistung [W]
$P_V$	Verlustleistung [W]
PWM	Pulsweitenmodulation
$P_{zu}$	Zugeführte Leistung [W]
Q	Wärmearbeit [Ws]
QW	Quantenwell

R	Widerstand [ $\Omega$ ]
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$R_a$	Farbwiedergabeindex
RPM	Rounds Per Minut
$R_{th}$	Thermischer Widerstand [K/W]
r	Radius [m]
r	Abstand zwischen zwei Flächen [m]
S	Sehschärfe
$S_0, S_1, \dots$	Singulett-Zustände
SAE	Society of Automotive Engineers
SCSI	Small Computer System Interface
Sc	Scandium
ScI	Scandiumjodid
T	Periodendauer [s]
$T_1, T_2, \dots$	Triplet-Zustände
Temp	Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_H$	Heatsinc- bzw. Kühlkörpertemperatur [K]
$T_j$	Sperrsichttemperatur [K]
$T_u; T_A$	Umgebungstemperatur [K]
t	Zeit [s]
$t_H$	Belichtungsdauer [s]
$t_p$	Pulsdauer [s]
U	Spannung [V]
$U_D$	Diffusionsspannung [V]
$U_T$	Temperaturspannung [V]
UV	Ultraviolett
V	Volumen [ $\text{m}^3$ ]
$V(\lambda)$	Hellempfindlichkeitsfunktion
VV	Vertikale Linie
$W_L$	Energieniveau des Leitungsbandes [Ws]
$W_V$	Energieniveau des Valenzbandes [Ws]
$\Delta W_g$	Bandlücke [Ws]
X, Y, Z	Normfarbwerte
x, y, z	Normfarbwertanteile
Xe	Xenon
$x_{D65}$	Normfarbwertanteil x von D <sub>65</sub> 0,3138
$y_{D65}$	Normfarbwertanteil y von D <sub>65</sub> 0,331
YAG:Ce <sup>3+</sup>	Yttrium-Aluminium-Granat

$y$	Gegenstandsgröße [m]
$y'$	Bildgröße [m]
$Z_{th}$	Transienter thermische Scheinwiderstand [K/W]
$z$	Differenz aus Gegenstandsweite und objektseitiger Brennweite [m]
$z'$	Differenz aus Bildweite und bildseitiger Brennweite [m]
$\beta'$	Abbildungsmaßstab [%]
$\varepsilon_1$	Winkel des auftreffenden Lichtstrahles [°]
$\varepsilon_2$	Winkel des transmittierten Lichtstrahles [°]
$\varepsilon_\gamma$	Grenzwinkel der Totalreflexion [°]
$\Phi$	Lichtstrom [lm]
$\gamma, \phi$	Raukoordinaten [°]
$\eta$	Wirkungsgrad [%]
$\eta_{\text{extraktion}}$	Extraktionskoeffizient [%]
$\eta_{\text{int}}$	Interne Quanteneffizienz [%]
$\eta_{\text{konv.}}$	Wirkungsgrad der Farbstoffkonvertierung [%]
$\eta_V$	Lichtausbeute [lm/W]
$\Lambda$	Lichtstromverteilungsfunktion
$\lambda$	Wellenlänge [m]
$\pi$	Ludolfsche Zahl
$\Theta$	Blickwinkel [°]
$\rho$	Reflektionsgrad [%]
$\rho$	Spezifische Masse [kg/m³]
$\tau$	Transmissionsgrad [%]
$\tau$	Zeitkonstante [s]
$\Omega$	Raumwinkel [sr]
$\Omega_0$	Einheitsraumwinkel = 1sr
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit [°/s]



## 1 Einleitung

Leuchtdioden erobern ständig neue Anwendungsbereiche in der Kfz-Beleuchtung. Der Einzug der Light Emitting Diodes (LEDs) in den Serienautomobilbau begann im Jahr 1980 mit der Modifizierung des VW Golf 1. Sechs Jahre später wurden sie in den ersten hochgesetzten Bremsleuchten verbaut. In den folgenden Jahren etablierten sie sich zunehmend auch in Innenraumbeleuchtung und Leseleuchten, sowie in Instrumenten und Schaltern des Armaturenbretts. Nachdem die Gesetzgebung den Weg für die LEDs im Außenbereich der Karosserie geebnet hatte, stellte VW im Jahre 2002 den VW Phaeton mit Heckleuchten in LED-Technik vor. Dies läutete den Durchbruch der LED-Technologie in Brems-, Blink- und Schlussleuchten auf breiter Front ein [May05]. Heute ist jeder größere Automobilkonzern mit Modellen auf dem Markt vertreten, in denen LEDs in diesen Leuchten verbaut sind.

Betrachtet man die Eigenschaften dieser Lichtquelle, liegt der Trend zu dieser Technologie im Kfz-Bau auf der Hand. Die kleinen Abmessungen eröffnen Designern völlig neue Gestaltungsmöglichkeiten. Außerdem sorgt die sehr hohe Lebensdauer, nach Angaben von Osram bis zu 100.000 Betriebstunden, dafür, dass theoretisch ein Autoleben lang keine Leuchte gewartet werden muss. Ebenfalls kennzeichnend für LEDs ist ihr geringer Energieverbrauch. Der Stromverbrauch einer Bremsleuchte sank beispielsweise nach Angaben von Porsche von 21 Watt auf 5 Watt [May05]. Die im Kontext dieser Arbeit wichtigste und interessanteste Eigenschaft der LED ist das schnelle Ansprechverhalten. LEDs benötigen für den Einschaltvorgang wenige Nanosekunden [Schu06], wohingegen Standardglühlampen für Bremsleuchten nach ca. 200 ms voll leuchten [Siv93]. Abbildung 1-1 verdeutlicht diesen Unterschied. Das schnelle Schaltverhalten der LED prädestiniert sie in erster Linie für den Einsatz in Bremsleuchten, resultierend in kürzeren Reaktionszeiten der Fahrer im nachfolgenden Verkehr auf einen Bremsvorgang. Wie eine Untersuchung von Sivak et. al. zeigt, verkürzt sich die Reaktionszeit um durchschnittlich 166 ms, wenn statt einer Standard-Glühlampe LED-Technik in einer Bremsleuchte verwendet wird [Siv93].

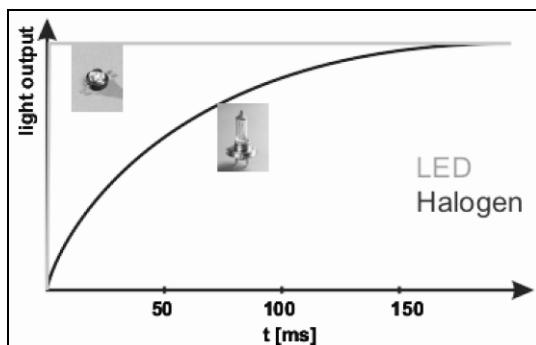


Abbildung 1-1 Ansprechverhalten von LED und Glühlampe

Nachdem es 1994 Nakamura et al. gelang blaue Hochleistungs-LED auf der Basis von Indium Gallium Nitrid (InGaN) zu entwickeln, entwickelte NICHIA 1997 weiße LEDs, die durch Konversion der blauen Strahlung mit Zer dotiertem Yttrium-Aluminium-Granat-Pulver (Y<sub>3</sub>AG<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup>) ihre Lichtfarbe erhalten. Damit fanden Signalfunktionen am Kfz ihren Zugang. Bereits 2003 wurde der Audi A8 W12 durch die Firma Hella Hueck & Co. KGaA mit einem weißem LED-Tagfahrlicht ausgestattet. Seitdem entwickeln sich die lichttechnischen Eigenschaften der weißen LED rasant weiter, sodass aus den gleichen Gründen wie bei Rückleuchten (schnelles Schalten, lange Lebensdauer, kleine Bauform, hohe Lichtausbeute) erstmalig ein Einsatz der LED für Beleuchtungsfunktionen interessant wurde. Man erhofft sich auch bei den Scheinwerferfunktionen eine Steigerung der Lichtquellenlebensdauer und eine günstigere Energiebilanz als bei herkömmlichen Leuchtmitteln. So gelang es wiederum Hella 2005 den ersten Voll-LED-Scheinwerfer mit Xenon-Performance im Abblendlicht vorzustellen.

Da heutige LEDs an den energieeffizienten Xenonsystemen gemessen werden, sind sie trotz dieser rasanten Entwicklungen noch nicht auf dem Niveau konventioneller Lichtquellen. Daraus muss zunächst geklärt werden, ob aus lichttechnischer Sicht ein Einsatz der LED im Scheinwerfer überhaupt sinnvoll ist. Anhand einer kritischen Diskussion der heutigen LED-Performance und der realistisch zu erwartenden Lichtleistungen erfolgt im ersten Teil dieser Arbeit eine gegenwärtige und zukünftige Einordnung der LED zur Erzeugung der Standardscheinwerferfunktionen.

Die für die roten LEDs zutreffenden schnellen Schaltzeiten von wenigen Nanosekunden gelten auch für blaue Hochleistungs-LEDs. Neben dem schnellen Anschalten des Scheinwerfers, ergeben sich aus der Möglichkeit der Pulsmodulierbarkeit der LED eine Reihe weiterer Möglichkeiten zukünftiger Scheinwerfer. Scheinwerferfunktionen, die erst in Zukunft Einzug in das Kfz halten werden, werden daher im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit ausführlich diskutiert.

## 2 Lichterzeugung mit LEDs

Dieses Kapitel dient dazu, weiße Hochleistungs-LEDs mit den bestehenden Standartlichtquellen zu vergleichen. Ausgehend von den prinzipiellen Vorgängen der verschiedenen Lichterzeugungsmethoden werden die bestehenden und möglichen Lichtleistungen von Glühlampe, Xenonbrenner und LED dargelegt und diskutiert

Eine Lichtquelle hat die Aufgabe eine Energieform in elektromagnetische Strahlung umzuwandeln. Es gibt prinzipiell zwei Wege, wonach dies geschehen kann. [Hen72]:

1. Durch positive oder negative Beschleunigung elektrisch geladener Teilchen.
2. Durch Anregung von Atomen oder Molekülen und anschließendem Rückkehr dieser in ihren Ausgangszustand.

Die frei werdende kinetische oder Bindungsenergie  $\Delta E$  wird darauf folgend in Form elektromagnetischer Strahlung der Frequenz  $f$  freigesetzt.

$$\Delta E = h \cdot f \quad (2-1)$$

Bisher haben sich in der Kfz-Lichttechnik zwei Formen der Lichterzeugung herauskristallisiert: die Halogenglühlampe und die Metalldampflampe. Diese beiden Formen der Lichterzeugung sollen im Folgenden kurz erklärt werden.

### 2.1 Glühlampe

#### 2.1.1 Lichterzeugung mit Temperaturstrahlern

Im Fall der Glühlampe wird einem elektrischen Leiter thermische Energie zugeführt, die durch ohmsche Widerstände aus elektrischer Energie erzeugt wird. Diese Wärme versetzt die Atome oder Moleküle des Leiters in Schwingung. Durch die resultierenden Kollisionen wird den Atomen/Molekülen Energie zugeführt, die sie in einen angeregten Zustand versetzt. Da dieser angeregte Zustand energetisch instabil ist, streben die angeregten Elemente das energetisch günstigere Energieniveau an. Dieses wird ausschließlich durch die Abgabe von Energie erreicht. Folglich emittieren diese Atome/Moleküle spontan die nun überschüssige Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung und können erneut angeregt werden.

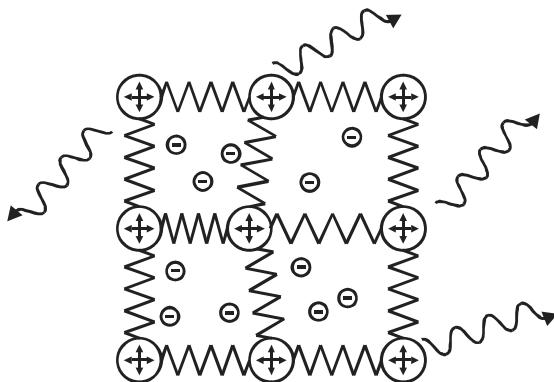


Abbildung 2-1 Schwingende Atome im Festkörper

In erster Annäherung entspricht das entstehende Emissionsspektrum dem Absorptionsspektrum eines idealen schwarzen Strahlers, der dadurch gekennzeichnet ist, dass er bei konstanter Temperatur jegliche auftreffende Strahlungsleistung absorbiert.

Dieses Spektrum kann nach Planck über folgende Gleichung bestimmt werden:

$$M_{e\lambda} \cdot dA \cdot d\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c}{\lambda^5 \cdot \left[ e^{\left( \frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T} \right)} - 1 \right]} \cdot dA \cdot d\lambda \quad (2-2)$$

Wobei  $h$  das Plancksche Strahlungsäquivalent mit  $h = 6,62607 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ ,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $k$  die Stephan-Boltzmann-Konstante mit  $k = 1,380650524 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$  ist.

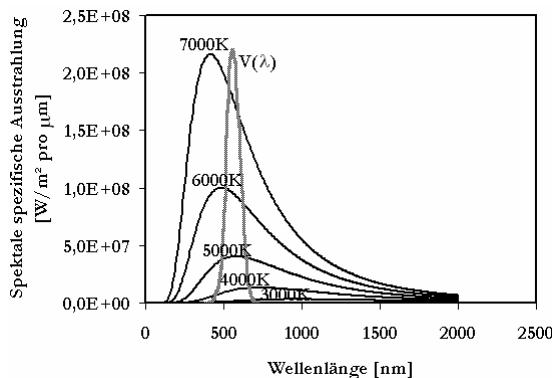


Abbildung 2-2 Spektrale spezifische Aussstrahlung eines idealen schwarzen Körpers bei verschiedenen Glühtemperaturen. Die  $V(\lambda)$ -Kurve kennzeichnet den sichtbaren spektralen Anteil.

Das Verhältnis aus  $V(\lambda)$ -bewerteter Strahlungsleistung und Gesamtstrahlungsleistung gibt die Lichtausbeute dieser Strahlungsquelle an.

$$\eta_v = \frac{k_m \cdot \int M_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int M_{e\lambda} \cdot d\lambda} \quad (2-3)$$

Mit Hilfe der Gleichungen ( 2-2 ) und ( 2-3 ) lassen sich für den schwarzen Strahler für verschiedene Temperaturen die theoretischen maximalen Lichtausbeuten berechnen. In Abbildung 2-4 wird deutlich, dass ein solcher idealer thermischer Strahler ein Maximum der Lichtausbeute bei Temperaturen um 6500 K aufweist. Hier sind Lichtausbeuten von maximal 100 lm/W erreichbar. Folglich wird versucht, die Glühtemperatur thermischer Strahler auf diese Idealtemperatur zu erhöhen.

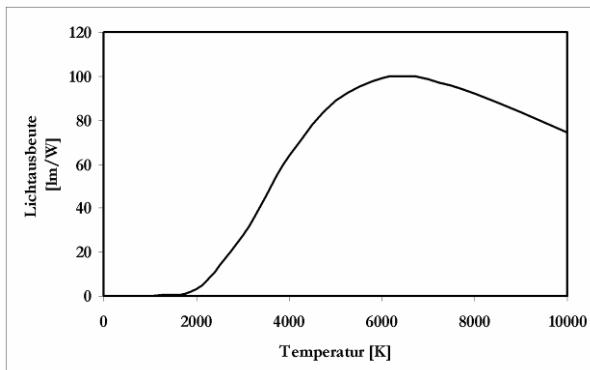


Abbildung 2-3 Lichtausbeute eines idealen schwarzen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen

Das Bestreben nach hohen Temperaturen zeigt sich auch in den Meilensteinen der Entwicklung der Glühlampe. Neben dem Einsatz von Wolfram als Glühfaden haben vor allem der Zusatz von Füllgasen, zur Verhinderung des Abdampfens, und der Halogenkreisprozess eine Temperaturerhöhung ermöglicht.

Nachdem erste Glühlampen lediglich Temperaturen von knapp 2000 K erreichten, wurden durch die beschriebenen Errungenschaften Temperaturen von bis zu 3200 K möglich. Dies bedeutet einen Anstieg der Lichtausbeute von 13 lm/W auf 35 lm/W. Dennoch wird die angestrebte Idealtemperatur von 6500 K noch weit unterschritten.

### 2.1.2 Scheinwerfersysteme mit Halogenglühlampen

Die nach [ECE20] oder [SAE] geforderten Lichtverteilungen für Scheinwerfer mit Halogenglühlampen werden traditionell über zwei Varianten erzeugt. Entweder mit einem Parabolreflektor und einer Streuscheibe oder mit einem Freiformreflektor. Durch beiden Varianten wird eine Vielzahl von reellen Glühwendelbildern in den Verkehrsraum (auf eine imaginäre Wand in 25 m) abgebildet. Mit Hilfe der ersten (historisch älteren) Variante wird zunächst ein kollimiertes („paralleles“) Strahlenbündel mit einem Parabolreflektor erzeugt. Durch das anschließende selektive Umlenken dieses Strahlenbündels über eine strukturierte Abschluss scheibe lässt sich die Lichtverteilung aus Einzelwendelbildern zusammensetzen. Diese optisch behaftete Abschluss scheibe wird auch Streu- oder Prismenscheibe genannt. Mit der Einführung der computerbasierten Strahlberechnung konnten die optischen Eigenschaften der Streuscheibe auf den Reflektor selbst verlagert werden. Der Reflektor besteht aus einer Viel-

zahl von einzelnen Reflektorscherben, die je nach Entfernung von der Lichtquelle große oder kleine Wendelbilder erzeugen.

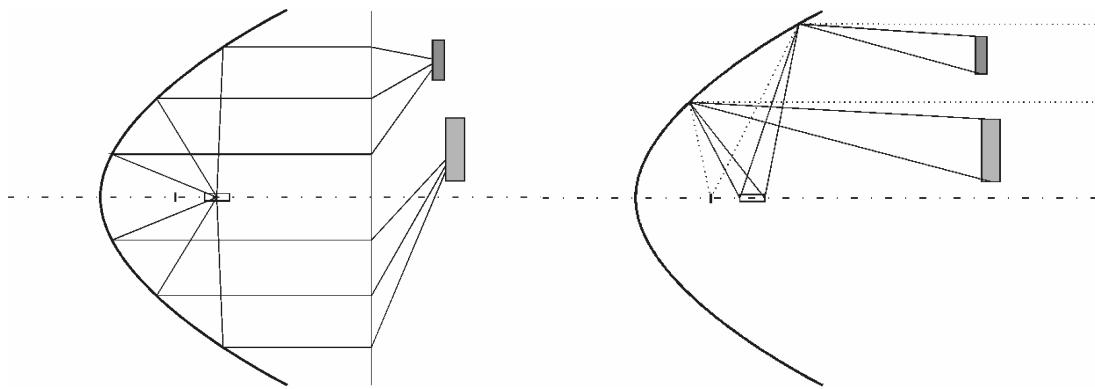


Abbildung 2-4 Strahlengang bei der Erzeugung verschiedener großer Wendelbilder in Paraboloidreflektoren mit Streuscheibe (links) und in Freiformreflektoren (rechts)

Nach dem Abbildungsgesetz ist der Abbildungsmaßstab, der das Größenverhältnis aus Bildgröße (Wendelbild) und Objektgröße (Wendel) angibt, gleich dem Verhältnis aus Objektweite  $a'$  (Entfernung Reflektor-Wendelbild) und Gegenstandsweite  $a$  (Entfernung Wendel-Reflektor).

$$\beta' = y'/y = a'/a. \quad (2-4)$$

Die so entstehenden kleinen Wendelbilder aus dem Reflektoraußerbereich werden zur Erzeugung hoher Beleuchtungsstärken in der Straßenmitte genutzt. Die großen Wendelbilder aus dem Reflektorinneren eignen sich gut um großflächige Bereiche, wie z.B. das Vorfeld, auszuleuchten. Um zwischen Abblend- und Fernlicht zu wechseln, wird entweder ein zusätzlicher Fernlichtscheinwerfer zugeschaltet oder in der Lampe bzw. im Reflektor befindet sich eine zweite Wendel. Letzteres entspricht dem Aufbau von H4-Lampen. Eine Wendel ist hierbei so durch eine Reflektorwanne abgeschattet, dass ihr Lichtstrom nur den oberen Teil des Reflektors erreicht. Dieser Lichtstromanteil erzeugt das Abblendlicht. Wird die zweite freie Wendel eingeschaltet, gelangt ein Teil ihres Lichtstromes auf die untere Reflektorschale, die die Fernlichtverteilung erzeugt. Diese Form der Lichtquelle hat einen weiteren Vorteil. Mit der durch die scharfe Kante der Reflektorwanne begrenzten Abblendlichtwendel lassen sich scharf abgegrenzte Wendelbilder erzeugen. Somit kann eine exakte Grenze zwischen beleuchtetem Bereich und ausgeblendetem Bereich (Hell-Dunkel-Grenze) erzeugt werden. Nach Kotowicz [Kot05] beträgt der Leuchtenwirkungsgrad dieser Systeme, aufgrund der ungünstigen Ausnutzung des Lampenlichtstroms und der Notwendigkeit der Streu- bzw. Abschluss scheibe, nur etwa 27 %.

## 2.2 Gasentladungslampe

### 2.2.1 Lichterzeugung durch Gasentladung

Bei der auch „Xenonlampe“ genannten Metalldampflampe handelt es sich um eine Hochdruckgasentladungslampe mit metallischen Zusätzen, die zur Erzeugung des gewünschten Spektrums notwendig sind. Im Gegensatz zu Glühlampen wird in Gasentladungslampen ein leuchtendes Plasma, ein Aggregatzustand in dem Atomrümpfe und Elektronen getrennt vorliegen, erzeugt. Diese geladenen Teilchen (Ionen und Elektronen) werden in einem elektrischen Feld beschleunigt, in dem sie analog zur thermischen Strahlung kollidieren und rekombinieren. Erzeugt wird dieses Plasma durch Stoßionisation. Zwischen einer Anode und einer Kathode werden elektrisch geladene Teilchen wie z.B. Elektronen und Ionen beschleunigt. Diese stoßen auf weitere Atome oder Ionen und lösen dort unter Abgabe ihrer kinetischen Energie Elektronen heraus. So entstehen neue Ionen und Elektronen und werden ihrerseits wieder beschleunigt. Durch diesen Lawineneffekt entstehen so viele Ladungsträger, dass der Widerstand zwischen den Elektroden gegen Null strebt. Um diesen Lawineneffekt auszulösen, wird im Fall der Kfz-Gasentladungslampe ein Hochspannungsimpuls (25 kV) auf die Lampe gegeben, wodurch ein Zündfunken von einer Elektrode zur anderen springt und das enthaltene Gas ionisiert. Dies löst die Erzeugung des Plasmas aus, Elektronen und Ionen rekombinieren und emittieren spontan Photonen: Die Lampe leuchtet.

Das Gas in einer D1 und D2 Xenonlampe im Hauptbetrieb bei 60 bar ist Quecksilberdampf. Dieses Quecksilber liegt im abgekühlten Zustand fast ausschließlich in flüssiger Form im Lampenbrenner vor, da der Dampfdruck von Quecksilber bei niedrigen Temperaturen zu gering ist. Erst durch das Aufheizen im Betriebszustand verdampft weiteres Quecksilber. Dieses Aufheizen und Verdampfen hat zufolge, dass einige Sekunden vergehen, bis die Lampe ihre volle Leistung erreicht.

Nach [ECE98] muss eine Kfz-Gasentladungslampe nach 1 s 25 % und nach 4 s 80 % des Gesamtlichtstromes erzeugen. Um dies zu erreichen, wird Xenon als Startgas mit einem Partialdruck im Kaltzustand von 10 bar zugemischt. Der Zündfunken erzeugt zu Beginn vorrangig ein Xenonplasma, das augenblicklich ca. 15 % des Gesamtlichtstromes liefert. Durch kontrollierten Überlastbetrieb werden anschließend das Quecksilber und weitere Metallsalze ( $\text{NaI}$ ,  $\text{ScI}_3$ ) möglichst schnell verdampft. Die endgültigen Dampfdrücke stellen sich ein und die Lampe erreicht ihre Betriebslichtfarbe und ihre Betriebslichtausbeute.

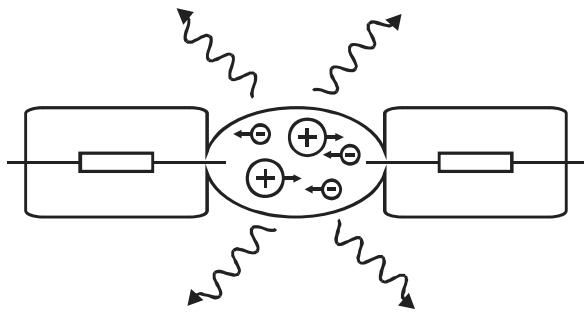


Abbildung 2-5 Plasma, bestehend aus Ionen und Elektronen in dem Brenner einer Gasentladungslampe

Durch die hohe Anregungsenergie des Quecksilbers im Vergleich zu den anderen Leuchtzusatzmetallen liefert es nach dem Einbrennen keinen bedeutsamen Beitrag für den Lampenlichtstrom. Es ist jedoch ausschlaggebend für die Lampenbrennspannung und sorgt durch seine geringe Wärmeleitfähigkeit für eine thermische Abschirmung des Lichtbogens [Kot05]. In Abbildung 2-6 (links) ist die prozentuale Beteiligung der Füllgase an der Lichtstromerzeugung über die Einschaltzeit abgetragen [OSRAM].

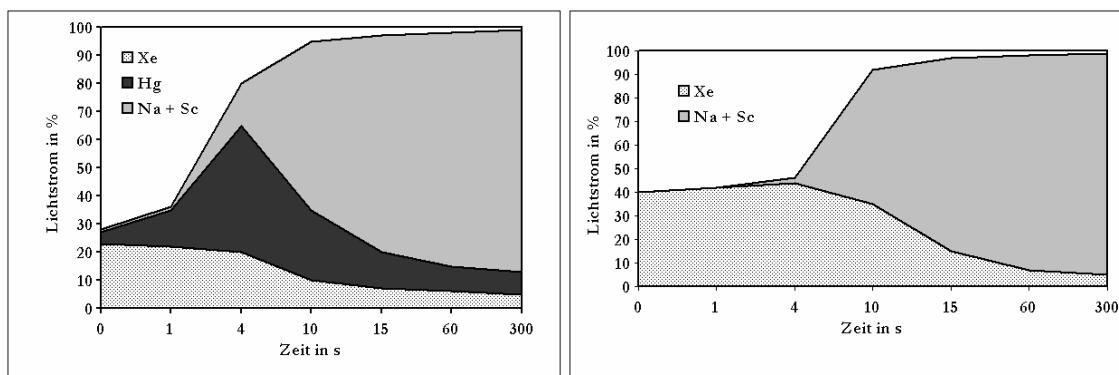


Abbildung 2-6 Prozentualer Anteil der jeweiligen Gase einer D2 bzw. D4 Lampe an der Lichtstromerzeugung während des Einschaltvorganges (nach [OSRAM])

Im Zuge des schadstofffreien Autos wird die Quecksilberdampflampe schrittweise durch quecksilberfreie D3- bzw. D4-Lampen ersetzt. In diesen Lampen wird mit ähnlichen Ergebnissen Zink anstatt Quecksilber verwendet. Aufgrund des geringen Strahlungsbeitrages unterscheiden sich die Spektren der beiden Lichtquellen nur geringfügig.

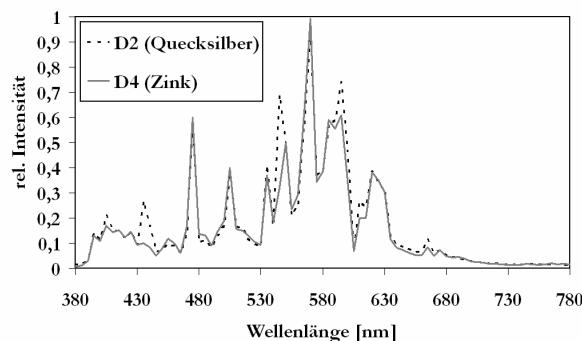


Abbildung 2-7 Spektrum einer D2 und einer D4 Lampe [Man06]

Da das Spektrum nahezu ausschließlich durch die Anregungsenergien der Leuchtzusatzmetalle bestimmt wird, ist ein gezieltes spektrales Lampendesign möglich, so dass fast ausschließlich sichtbare Strahlung emittiert wird. (Mit UV-Anteilen der Quecksilberstrahlung und Infrarotstrahlung durch erwärmte Lampenteile) Dadurch sind mit weißen Gasentladungslampen typische Lichtausbeuten von 90 bis 100 lm/Watt erreichbar.

## 2.2.2 Scheinwerfersysteme mit Gasentladungslampe

Der Lichtbogen der Gasentladungslampen wurde speziell so entwickelt, dass er in seiner Geometrie der einer Halogenglühlampe ähnelt.



Abbildung 2-8 Aufnahme einer H7-Glühwendel und eines D2-Lichtbogens im gleichen Maßstab. Hohe Leuchtdichten sind mit dunklen, niedrige mit hellen Graustufen dargestellt.

Somit ist es möglich Halogenlichtsysteme mit Gasentladungslampen zu betreiben. Da der Lichtbogen keine scharfe Abgrenzung zwischen leuchtend und nicht leuchtend besitzt, lassen sich nur unscharfe Lichtbogenbilder kombinieren. Dies führt in Reflektionssystemen zu einer unscharfen Hell-Dunkel-Grenze, was zur Folge hat, dass nahe der HDG keine hohen Beleuchtungsstärken realisiert werden können. Als Abhilfe dient hierbei eine weitere Anpassung der Lichtquelle an die Scheinwerfertechnologie. Um eine reflektortaugliche Lichtquelle zu erhalten, ist bei DxS ( $x=1,2,3$ ) Lampen auf dem äußeren Splitter- und UV-Schutzkolben eine Blende aufgedruckt. Wie bei der H4-Lampe ist es nun möglich einen Reflektor zu entwerfen, der die HDG aus Abbildungen dieser Reflektorkante zusammensetzt. Trotz dieser Anpassungen haben sich Xenon-Reflektionssysteme auf dem europäischen Markt kaum durchsetzen können. Hauptsächlich finden Xenon-Projektionssysteme Verwendung.

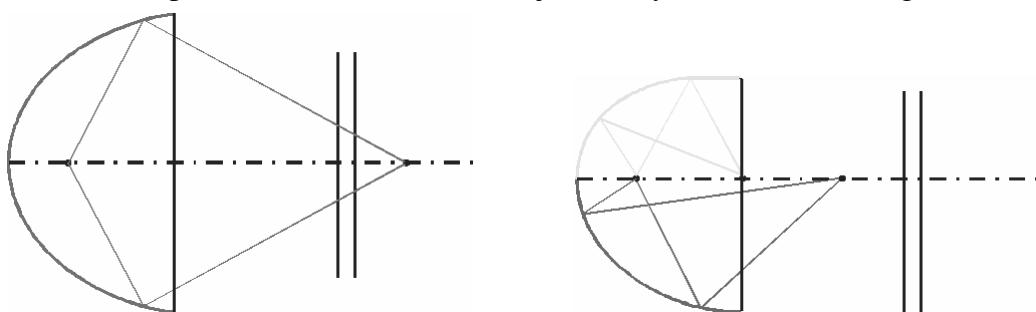


Abbildung 2-9 Darstellung der geometrischen Brennpunkte eines Drei-Ellipsoid-Reflektors (links: horizontal, rechts: vertikaler Schnitt)

Projektionssysteme funktionieren nach einem ähnlichen Prinzip wie Diaprojektoren. Sie leuchten eine Zwischenbildebene aus und bilden diese über eine Projektionsoptik in den Verkehrsraum ab. Die geforderte Beleuchtungsstärkeverteilung muss folglich schon in der Zwi-

schenbildebene als Lichtstärkeverteilung vorliegen. Im Gegensatz zu Diaprojektoren ist keine homogene Ausleuchtung des Dias gewünscht, sondern eine Hotspotverteilung. Somit sind im Zentrum höhere Lichtstärken als am Rand des Zwischenbildes notwendig. Des Weiteren muss das Zwischenbild ein Aspektverhältnis der Breite zur Höhe von 7:1 aufweisen, um eine breite Fahrbahnausleuchtung zu erreichen. Das gewünschte Zwischenbild lässt sich erzeugen, indem zwei unterschiedlich große Ellipsoide zu einem Freiformreflektor kombiniert werden, wobei der Reflektor im horizontalen Schnitt eine größere Exzentrizität als der vertikale Reflektorschnitt aufweist (siehe Abbildung 2-9). Hierbei liegt der Lichtbogen in den jeweils ersten geometrischen Brennpunkten der Ellipsen. Der zweite geometrische Brennpunkt der kleineren Ellipse liegt direkt in der Zwischenbildebene und erzeugt einen Hotspot. Der zweite geometrische Brennpunkt der größeren Ellipse liegt wesentlich weiter entfernt, wodurch die Zwischenbildebene breiter ausgeleuchtet wird.

Wie bereits beschrieben, liegt die Anschaltzeit einer Xenon-Lampe trotz speziellen Anpassungen bei einigen Sekunden. Somit ist die Erzeugung des Fernlichtes und speziell das Schalten zwischen Fern- und Abblendlicht nicht durch eine zweite Gasentladungslampe möglich. Aus diesem Grund werden häufig zusätzliche Halogenfernlichtscheinwerfer in einem Scheinwerfer verwendet, sodass die Gasentladungslampe nur den Abblendlichtanteil der Lichtverteilung erzeugt. Um trotz der langen Schaltzeiten von Xenonlampen auf Glühlampen zu verzichten, wurde von Börnchen et. al. [Bör02] ein mechanisch schaltendes Bi-Xenonsystem entwickelt. Hierbei wird mechanisch die Blende in der Zwischenbildebene variiert, so dass eine geöffnete Blende eine Fernlichtverteilung frei gibt. Hierzu muss der Reflektor eine zusätzliche Lichtfunktion, die Fernlichtfunktion, auf den variablen Teil Blende abbilden, damit diese beim Öffnen in den Verkehrsraum abgebildet werden kann. Ein Erweitern des Reflektors um eine dritte Ellipse macht dies möglich. Der erste geometrische Brennpunkt dieser Ellipse fällt wiederum mit dem Lichtbogen der Lampe zusammen. Der zweite geometrische Brennpunkt liegt hier zwischen denen der anderen zwei Ellipsen, so dass dieser Strahlengang durch die mechanische Blende geschaltet werden kann. Dieser dritte Ellipsenschnitt des Freiformreflektors ist im unteren Teil der vertikalen Schnittansicht zu erkennen.

## 2.3 LED

### 2.3.1 Grundlagen Licht emittierender Dioden

Als drittes Prinzip soll nun das der Lichterzeugung mit LED erklärt werden. Ausgehend vom Bohrschen Atommodell wird der Kristallaufbau von Halbleitern sowie deren Dotierung erklärt. Zum Verständnis dienen hierbei die zugehörigen Energiediagramme.

#### 2.3.1.1 Bohrsches Atommodell

Um den Vorgang der Lichterzeugung mit LED zu verstehen, ist das Bohrsche Atommodell hilfreich. Nach Bohr bestehen Atome aus einem positiv geladenen Atomkern und Elektronen, die sich auf festen Bahnen, auch Schalen genannt, um den Atomkern bewegen.

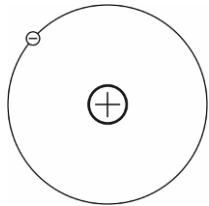


Abbildung 2-10: Atommodell nach Bohr

Nach dem ersten Bohrschen Postulat gibt es ausschließlich diskrete Zustände, die Schalen, die für Elektronen erlaubt sind. Die Elektronen auf der äußersten noch besetzten Schale heißen Valenzelektronen, da sie für die chemische Bindung (Valenz) zu den Nachbaratomen zuständig sind.

Das zweite Postulat besagt, dass der Übergang eines Elektrons zwischen zwei Schalen unter Emission, bzw. Absorption elektromagnetischer Strahlung erfolgt.

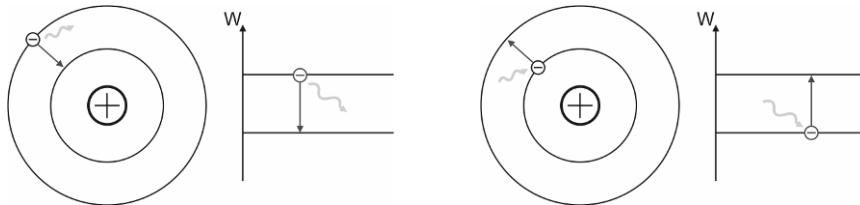


Abbildung 2-11: Emission (links) und Absorption (rechts) elektromagnetischer Strahlung

In Abbildung 2-11 ist jeweils rechts des Bohrschen Atommodells das Energiediagramm des Atoms dargestellt. Das Energiediagramm stellt die unterschiedlichen Energieniveaus der einzelnen Schalen dar. Je größer der Radius der Schale, d.h. je weiter das Elektron vom Kern entfernt ist, desto größer ist seine potentielle Energie.

Fällt bei der Emission ein Elektron auf eine energetisch niedrigere Bahn, so bedeutet dies, dass es Energie verliert. Diese Energie wird als Photon abgestrahlt. Genau umgekehrt verhält es sich bei der Absorption. Trifft ein Photon auf ein Elektron, so absorbiert dies dessen Energie und wird auf eine höhere Bahn gehoben.

### 2.3.1.2 Kristallaufbau

Kristalle sind Festkörper mit regelmäßiger Atomanordnung. Sie entstehen dadurch, dass die Valenzelektronen aller Atome untereinander Bindungen eingehen. Ein äußerst stabiles Kristallgitter wird mit vierwertigen Atomen, d.h. mit Atomen mit vier Valenzelektronen, erreicht. Durch die Bindung der benachbarten Valenzelektronen besitzt jedes Atom im Prinzip acht Valenzelektronen, was der Edelgaskonfiguration entspricht.

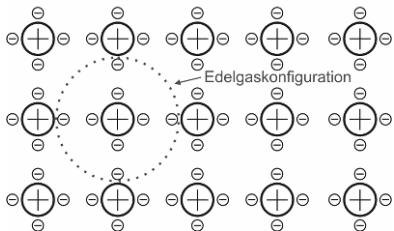


Abbildung 2-12: Valenzbindung vierwertiger Atome

Eine vergleichbar stabile Bindung ist ebenso mit 3- und 5-wertigen Atomen möglich, bei der die 3-wertigen Atome drei Valenzelektronen abgeben und die 5-wertigen fünf. Zu den so genannten III/V Halbleitern zählen z.B. Gallium-Arsenid (GaAs) und Indium-Phosphid (InP).

Werden gleiche Atome aneinander gebunden, müssten die Elektronen auch das gleiche Energieniveau besitzen. Das Pauli-Prinzip besagt jedoch, dass zwei Elektronen nie den gleichen Energiezustand haben dürfen. Dies hat zur Folge, dass sich das ursprünglich gleiche Niveau in ein Band aufspaltet. Da im Prinzip unendlich viele Atome an der Kristallbildung beteiligt sind, liegen in dem Energieband unendlich viele Niveaus extrem dicht beieinander (Abbildung 2-13).

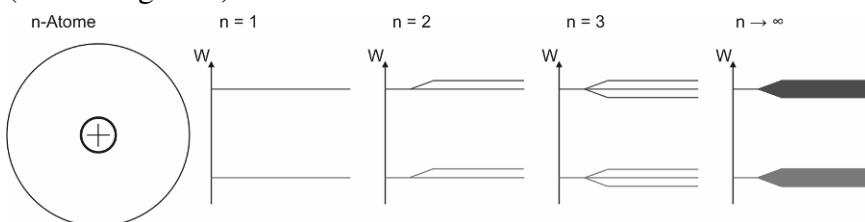


Abbildung 2-13: Energiebänder im Kristall

Um im Folgenden den Vorgang der Lichterzeugung mit Halbleitern zu verstehen, sind zwei Bänder zu beachten. Das Valenzband ist, in Analogie zu den Valenzelektronen, das äußerste noch von Elektronen besetzte Band. Das Leitungsband beschreibt das Energieniveau im Kristall, in dem sich die frei beweglichen Elektronen befinden. Beide Bänder sind durch die Bandlücke  $\Delta W_g = W_L - W_V$  getrennt.

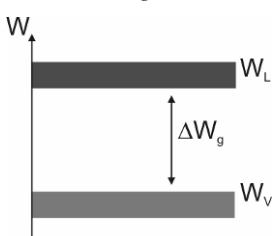


Abbildung 2-14: Leitungs- und Valenzband

### 2.3.1.3 Licht aus Halbleitern

Als Halbleiter werden Kristalle mit einer Bandlücke von  $0 < \Delta W_g < 3\text{ eV}$  bezeichnet.

Geht ein Elektron vom Leitungs- ins Valenzband über (Rekombination), so kann die frei werdende Energie  $\Delta W_g$  in Lichtenergie umgewandelt werden. Sie wird in Form eines Photons emittiert. Je größer die Anzahl der freien Elektronen im Leitungsband, desto höher ist die Rekombinationswahrscheinlichkeit und dementsprechend die Anzahl der emittierten Photonen. Die Emissionswellenlänge  $\lambda$  lässt sich über

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W_g} \quad (2-5)$$

berechnen. Mit  $h$ , dem planckschen Wirkungsquantum und  $c$ , der Lichtgeschwindigkeit, wird durch die Energie der Bandlücke die Emissionswellenlänge bestimmt. Um LEDs mit verschiedenen Emissionswellenlängen herzustellen, verwendet man Mischkristalle.

Tabelle 2-1 Eigenschaften verschiedener Halbleiterkombinationen

Material	$\Delta W_g [\text{eV}]$	$\lambda [\text{nm}]$
GaAs	1,43	870 (Infrarot)
GaP	2,26	550 (Grün)
InGaN	2,76	450 (Blau)

### 2.3.1.4 Dotierung

Wie schon beschrieben steigt die Wahrscheinlichkeit der Rekombination, je höher die Anzahl der Elektronen im Leitungsband ist. Diese lässt sich durch Dotierung der Halbleiterkristalle gezielt beeinflussen. Bei der n-Dotierung werden beispielsweise 4-wertige Atome im Kristallgitter durch 5-wertige ersetzt. Vier der Valenzelektronen gehen eine Bindung mit dem Nachbaratom ein, das fünfte Elektron wird für die kovalente Bindung nicht benötigt und ist nicht gebunden. Es ist somit eine geringere Energie notwendig, um dieses Elektron ins Leitungsband zu heben. Im Energiediagramm bedeutet dies, dass unter dem Energieniveau des Leitungsbandes ein neues Energieniveau  $W_D$  entsteht. „D“ steht hierbei für Donator, vom lateinischen donare: schenken, abgeben (eines Elektrons).

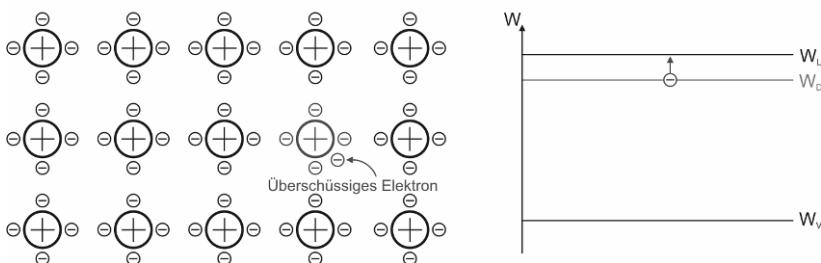


Abbildung 2-15: n-Dotierung mit Energiediagramm

Eine zweite Möglichkeit die Rekombinationswahrscheinlichkeit zu steigern, ist den Elektronen ein Überangebot an Rekombinationsmöglichkeiten zur Verfügung zu stellen. Dies wird mit der p-Dotierung erreicht, bei der ein 4-wertiges durch ein 3-wertiges Atom ersetzt wird. Im Kristallgitter fehlen Valenzelektronen, und es entstehen so genannte Löcher. Diese Löcher können von Valenzelektronen des Nachbaratoms unter geringem Energieaufwand besetzt werden. Es entsteht über dem Energieniveau des Valenzbandes ein neues Niveau  $W_A$ . „A“ steht hierbei für Akzeptor, lat. akzeptare: aufnehmen (eines Elektrons).

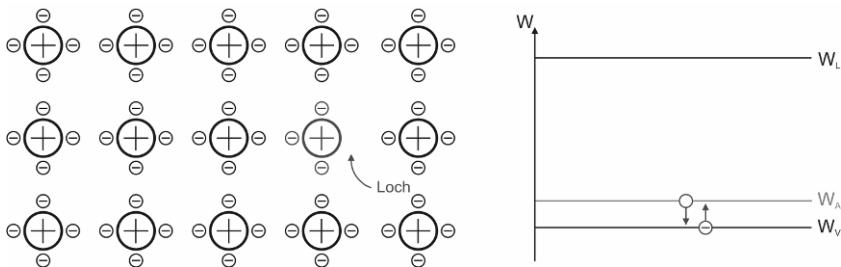


Abbildung 2-16: p-Dotierung mit Energiediagramm

Zur Lichterzeugung mit einer LED dient ein pn-Übergang. Dieser entsteht durch das Zusammenfügen von p- und n-dotierten Halbleitern. Die freien Elektronen des n-Halbleiters re kombinieren mit den Löchern des p-Halbleiters. Es entsteht ein Bereich mit ortsfesten Ladungen. Die Ladungen führen zu einem elektrischen Feld, das das weitere Eindringen von Ladungsträgern verhindert. Der pn-Übergang ist gesperrt, weshalb die Anordnung der ortsfesten Ladungen auch als Sperrschi cht oder Raumladungszone bezeichnet wird. Die entstandene Spannung wird als Diffusionsspannung  $U_D$  bezeichnet.

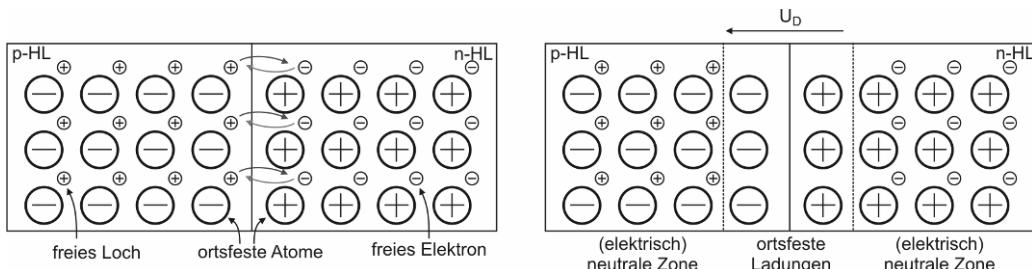


Abbildung 2-17: Ausgleichsvorgang (links) und pn-Übergang ohne äußere Spannung (rechts)

Im Energiediagramm entsteht ein Energieverlauf nach Abbildung 2-18 (a). Die Diffusions spannung  $U_D$  (im Bild  $V_D$ ) ist hier als Barriere dargestellt, die die freien Ladungsträger daran hindert, die neutrale Zone des gegenüberliegenden Halbleiters zu erreichen.

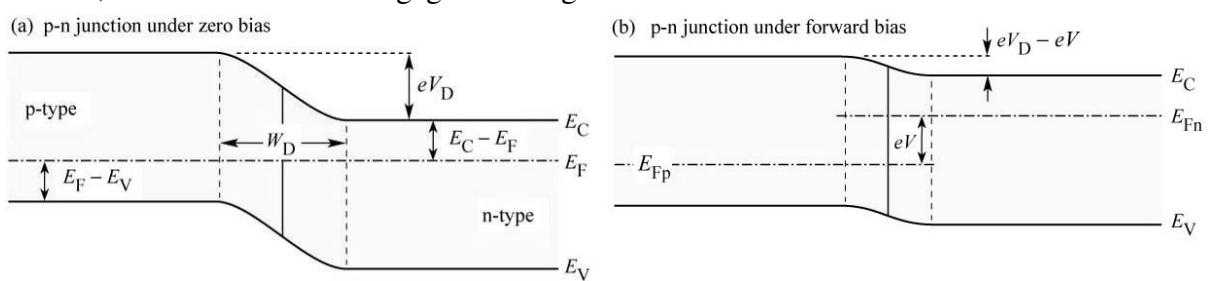
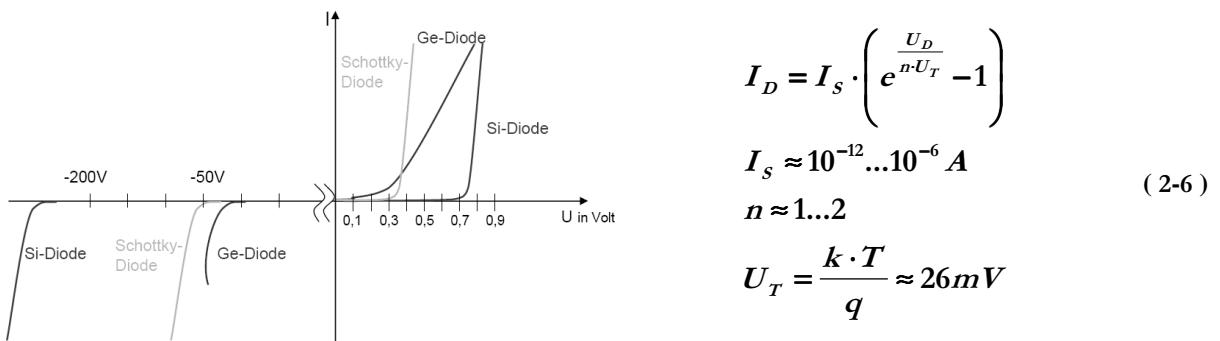


Abbildung 2-18: Energieverlauf im pn-Übergang ohne und mit Vorwärtsspannung [Schu06]

Wird an den pn-Übergang Spannung in Durchlassrichtung gelegt, wirkt diese der Diffusionsspannung entgegen. Da auf Seite des n-Halbleiters Elektronen in die Sperrsicht gedrückt werden, auf p-Seite entsprechend Löcher, wird die Sperrsichtbreite verringert. Im Energie-Diagramm wird dieser Effekt durch ein Absinken der Barriere dargestellt (Abbildung 2-18 (b)). Überschreitet die angelegte Spannung die Diffusionsspannung  $U_D$ , ist die Sperrsicht komplett abgebaut und die Rekombination der Ladungsträger ist möglich. Die LED leuchtet.

### 2.3.1.5 I-U-Kennlinie

Wird die Spannung über  $U_D$  hinaus vergrößert, steigt der Strom durch die Diode exponentiell über der Spannung an. Abbildung 2-19 zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinien verschiedener Diodentypen.



**Abbildung 2-19: Diodenkennlinien verschiedener Diodentypen [Mer02]**

Durch die Shockley-Formel ist die Kennlinie einer idealen Diode beschrieben ( 2-6 )  
Die Diodenkennlinie zeigt, dass der Betrieb mit konstantem Strom, dem Betrieb an konstanter Spannung vorzuziehen ist, da minimale Abweichungen der Spannung eine große Abweichung des Stromes zur Folge haben. Die LED könnte leicht zerstört werden. Gewöhnliche LEDs werden mit ca. 20 mA betrieben, Hochleistungs-LEDs mit bis zu 500 mA. Im gepulsten Betrieb sind kurzzeitig bis zu 2 A zulässig [DB06].

### 2.3.2 Lichtausbeute

Es gibt zwei entscheidende Beweggründe eine neue Lichtquelle im Kfz einzusetzen. Erstens die Möglichkeit mit weniger zugeführter Leistung die gleiche Lichtperformance zu liefern. Zweitens die Option bei gleicher Leistung die Ausleuchtung der Straße wesentlich zu verbessern. Der Einsatz von Gasentladungslampen brachte eine Verdopplung des zur Verfügung stehenden Lichtstromes bei gleichzeitiger Halbierung der notwendigen elektrischen Leistung. Einen ähnlichen Effekt erhofft man sich von dem Einsatz der LED. Bisher ist die Lichtausbeute einer LED vergleichbar mit Halogenglühlampen, doch die Roadmaps der Chiphersteller lassen einen starken Anstieg vermuten. In diesem Kapitel soll ausgehend von physikalischen und technischen Grenzen die mögliche Lichtausbeute für weiße Dioden kritisch erörtert werden, um eine Abschätzung der zukünftigen Bedeutung der LED im Vergleich zu Glüh- und Gasentladungslampe zu ermöglichen.

#### 2.3.2.1 Wirkungsgrad

Unter dem Wirkungsgrad einer Lichtquelle versteht man das Verhältnis aus Strahlungsleistung  $P_s$  und der zugeführten Leistung  $P_{zu}$ . Im Fall der LED wird elektrische Leistung  $P_e$  zugeführt, die sich aus dem Produkt des fließenden Stromes  $I$  und der anliegenden Spannung  $U$  berechnet.

$$\eta = \frac{P_s}{P_{zu}} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{U \cdot I} \quad (2-7)$$

Die zugeführte elektrische Leistung wird durch Rekombination der Elektron-Loch-Paare in Strahlungsleistung umgewandelt. Ein Teil dieser Rekombination führt nicht zu Strahlungsemision, sondern versetzt die Kristallstruktur in Schwingungen und bewirkt somit eine Temperaturerhöhung innerhalb der Rekombinationszone. Dieser Vorgang wird nichtstrahlende Rekombination genannt. Ein weiterer Anteil der elektrischen Leistung geht durch ohmsche Widerstände in Wärme über. Das Verhältnis aus innerhalb der Rekombinationszone erzeugter strahlender Rekombinationsleistung  $P_{SR}$  zur zugeführten elektrischen Leistung  $P_e$  wird als interne Quanteneffizienz bezeichnet.

$$\eta_{int} = \frac{P_{SR}}{P_e} \quad (2-8)$$

Diese interne Quanteneffizienz erreicht durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. Quantenwellenstrukturen und extreme Reinheit der Halbleitermaterialien nahezu das Maximum von 100 % für rote Dioden  $[(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P]$  und liegt für blaue Dioden  $[In_xGa_{1-x}N]$  bei beachtlichen 50 % [Kra03] [Lac06].

Würden alle Photonen, die durch strahlende Rekombination erzeugt werden, die LED verlassen, ergebe sich somit ein Wirkungsgrad von 50-100 %. Aufgrund der hohen Brechungsindi-

zes der Halbleiter ( $n_H = 2,5\text{-}3,5$ ) werden Photonen an der Grenzfläche LED zur Luft bereits bei sehr kleinen Winkeln durch Totalreflexion zurück in den Halbleiter reflektiert. Der Grenzwinkel  $\varepsilon_1 = \varepsilon_g$ , unter dem Strahlung gerade noch die Grenzfläche zwischen zwei Stoffen passiert, errechnet sich aus dem Brechungsgesetz mit der Annahme eines Austrittswinkels  $\varepsilon_2$  von  $90^\circ$ .

$$n_1 \cdot \sin(\varepsilon_1) = n_2 \cdot \sin(\varepsilon_2) \quad (2-9)$$

$$\varepsilon_2 = 90^\circ \quad (2-10)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_1 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2-11)$$

Für typische Halbleiterbrechzahlen ergeben sich Grenzwinkel von  $16\text{-}24^\circ$ . Alle unter dem Grenzwinkel auf die Grenzfläche treffenden Strahlen bilden einen Kegel, der als Escapecone (Austrittskegel) bezeichnet wird.

Die in der Rekombinationszone erzeugte Strahlung wird auf dem Weg zur Grenzschicht bereits teilweise absorbiert. Aufgrund der kleinen Escapecones wird ein Großteil zurück in den Halbleiter reflektiert und dort wiederum absorbiert. Das Verhältnis aus ausgekoppelter oder extrahierter Strahlungsleistung  $P_S$  zur (in der aktiven Zone) erzeugten Strahlungsleistung  $P_{SR}$  wird Extraktionseffizienz bezeichnet.

$$\eta_{extraktion} = \frac{P_S}{P_{SR}} \quad (2-12)$$

Der Extraktionseffizienz wird hauptsächlich durch die an der Grenzfläche reflektierte Strahlung bestimmt und liegt ohne zusätzliche Maßnahmen bei lediglich 2%. Darum werden viele bauliche Maßnahmen getroffen, um diese so gering wie möglich zu halten oder um diese auf weiteren Wegen zu extrahieren. Beispielhaft sollen hier die Nutzung mehrerer Escapecones [Zuk04], die Mikrostrukturierung der Grenzflächen [Rei04], die Flipchip-Technologie, das Stufen des Brechungsindexes durch Epoxid- oder Silikondome und das Aufbringen von beugenden Strukturen genannt werden. So ist es 2006 gelungen mit Hilfe eines zirkularen Bragggitters die ansonsten innerhalb der LED reflektierte Strahlung so zu beugen, dass diese extrahiert werden kann [Su06].

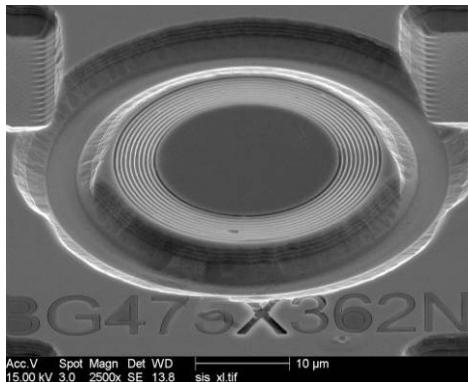


Abbildung 2-20 zirkulare Bragggitter zur Steigerung der Auskoppeleffizienz [Su06]

Eine Erhöhung der Extraktionseffizient über 50 % ist jedoch nach Schubert [Schu06] nicht ohne die Anwendung anspruchsvoller und sehr kostenaufwendiger Prozesse möglich.

Der wirtschaftlich erreichbare Wirkungsgrad einer LED, zusammengesetzt aus interner Quanteneffizienz und Extraktionseffizienz und daher auch als externe Quanteneffizienz bezeichnet, ist demnach realistisch bei ca. 50 % anzunehmen.

$$\eta = \eta_{ext} = \eta_{int} \cdot \eta_{extraction} \quad (2-13)$$

Der japanische Chip Hersteller Nichia präsentierte 2006 einen LED Chip, der eine externe Quanteneffizienz von 41,7 % erreicht [Nic06]. Dies zeigt anschaulich wie nah momentane Entwicklungen dem angestrebtem Maximum sind.

### 2.3.2.2 Lichtausbeute

Soll die von der LED erzeugte Strahlungsleistung von Menschen wahrgenommen werden, so reicht es nicht aus, lediglich den Wirkungsgrad bzw. die externe Quanteneffizienz der Lichtquelle zu betrachten. Auch die Wirkung auf das menschliche, visuelle System muss mit berücksichtigt werden. Der Mensch kann keine Strahlungsleistung im infraroten und im ultravioletten Strahlungsbereich wahrnehmen. Somit besitzen Infrarot- oder UV-LEDs zwar einen hohen Wirkungsgrad, ihr Beitrag zum Leuchten oder Beleuchten ist dennoch gleich null. Um diesen Beitrag zu quantifizieren, wurde die *Lichtausbeute* eingeführt. Bei der Lichtausbeute handelt es sich um eine relative Größe, dem Verhältnis von Lichtstrom  $\Phi$  zur aufgewendeten Leistung  $P_{zu}$  [Gal04].

$$\eta_v = \frac{\Phi}{P_{zu}} = \frac{\Phi}{P_e} \quad \left[ \frac{lm}{W} \right] \quad (2-14)$$

Der Lichtstrom  $\Phi$  ist eine lichttechnische Größe, also eine spektral bewertete Größe, die mit der spektralen Hellempfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$  für das Tagsehen ( $2^\circ$  Gesichtsfeld) gewichtet wird [Gal04]. Die allgemeingültige Formel zur Berechnung des Lichtstroms  $\Phi$  lautet:

$$\Phi = k_m \cdot \int_{360nm}^{830nm} P_{s\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad [lm] \quad k_m = 683 lm \cdot W^{-1} \quad (2-15)$$

Die Konstante  $k_m$  stellt das photometrische Strahlungsäquivalent (Tagsehen) dar. Da die Hellempfindlichkeitskurve  $V(\lambda)$  maximal einen Wert von eins annehmen kann, (bei einer Wellenlänge von 555nm) ist die maximale Lichtausbeute einer Lichtquelle immer kleiner gleich 683 lm/W.

### 2.3.2.3 Lichtausbeute weißer LEDs

Da das emittierte Licht von Halbleiterdioden zunächst nahezu monochromatisch ist, kann mit einer LED kein weißes Licht erzeugt werden. Um dennoch weißes Licht zu erhalten, gibt es nach [Zuk04] [Schu06] mehrere verschiedene Möglichkeiten. Zum einen können zwei oder drei LEDs zu so genannten Di- oder Trichromaten zusammengefasst werden. Als Resultat erhält man anschließend als Mischlicht Weiß. Zum anderen besteht die Möglichkeit, hochenergetische LED-Strahlung vollständig oder teilweise in niederenergetischere Strahlung umzuwandeln, sodass in der Mischung aus LED-Strahlung und konvertierte Strahlung, bzw. nur durch konvertierte Strahlung, Licht mit weißem Erscheinungsbild entsteht.

Weißes Licht lässt sich aus unendlich vielen verschiedenen spektralen Strahlungszusammensetzungen erzeugen. Diese Strahlung unterscheidet sich jedoch in ihren Farbwiedergabeeigenschaften, die mit dem Farbwiedergabeindex  $R_a$  beschrieben werden. Es können von Stoffen nur Frequenzen reflektiert werden und somit zum Farbeindruck beitragen, wenn diese in dem Spektrum vorhanden sind. Nach Zissis [Zis03] haben Lampen mit hoher Lichtausbeute im allgemeinen geringe Farbwiedergabeindizes. Da in der Kfz-Beleuchtung das Wiedergeben von Farben eine untergeordnete Rolle spielt, wird in den folgenden Überlegungen nach dem Spektrum einer weißen Lichtquelle mit maximaler Lichtausbeute gesucht, ohne weiter auf die Farbwiedergabeeigenschaften einzugehen.

Zur Auswahl der geeigneten Spektralkombinationen soll die Farbdarstellung in der CIE-Normfarbtafel verwendet werden. Es handelt sich bei der CIE-Normfarbtafel um die relativen Anteile  $x$  und  $y$  (Normfarbwertanteile) der Normfarbwerte  $X$  und  $Y$ . Der Normfarbwertanteil  $z$  wird nicht explizit angegeben, da dieser mittels der Formel:  $x + y + z = 1$ , durch die Abhängigkeit zu  $x$  und  $y$  berechnet werden kann. Die Größe  $x$  beschreibt dabei den relativen Rot-Anteil,  $y$  den relativen Grün-Anteil. Durch die Abszisse ( $x$ ) und die Ordinate ( $y$ ) wird eine Farbebene aufgespannt, die den einzelnen Farbarten Punkte der zweidimensionalen, ebenen Farbtafel zuordnet. Alle Farben der gleichen Farbart (Farbton und Sättigung), aber verschiedener Helligkeit, sind dem gleichen Farbtaktfpunkt zugeordnet. Die Helligkeit wird zusätzlich durch den Normfarbwert  $Y$  angegeben [Ric80]. Die Orte aller Spektralfarben (spektral reine Farben) liegen in der Normfarbtafel auf einem hufeisenförmig gekrümmten Spektralfarbenzug, dessen Enden durch die Purpurgerade (Mischfarben aus Violett und Rot) eingefasst sind. Alle Farben, die durch Mischung von mindestens zwei Komponenten herstellbar sind, liegen auf einer Mischgeraden. Die Menge der Farbarten, die durch additive Mischung von drei Farben herstellbar ist, wird determiniert durch den Farbraum dreier Farben. Die drei Ausgangsfarben bilden Eckpunkte eines Dreiecks, das in der Ebene der CIE-Normfarbtafel aufgespannt wird. Mittels dieser drei Farben sind dann alle Farben innerhalb des Dreiecks durch Mischung herstellbar. Mit den additiven Grundfarben Rot, Grün, Blau lässt sich das größte innerhalb des Spektralfarbenzugs liegende Dreieck bilden.

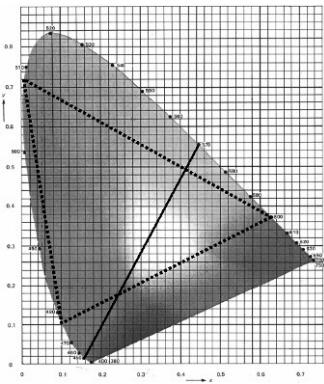


Abbildung 2-21 Darstellungen der CIE-Farbtafel, die durchgezogene Mischgerade zeigt die möglichen Kombination zweier Spektralfarben. Das gestrichelte Dreieck grenzt die Kombinationsmöglichkeiten dreier Spektralfarben zur Herstellung einer Mischfarbe ein.

Die Einheiten der CIE-Normfarbtafel sind so gewählt, dass der Weißpunkt bei  $x, y, z = 1/3$  (Unbuntpunkt  $E$ ) liegt. Für zwei Spektralfarben gibt also der gegenüberliegende Schnittpunkt der Mischgerade, der durch den Punkt  $(x, y)$  einer vorgegebenen Farbe und dem Unbundpunkt  $(x=1/3, y=1/3)$  aufgespannt wird, mit dem Normspektralzug die zweite Mischfarbe  $(x', y')$  an. Diese Farbe wird auch Komplementärfarbe genannt. Das Leistungsverhältnis der zwei Einzelwellenlängen ergibt sich aus der Vorgabe einer Zielmischfarbe, die dem Unbuntpunkt  $E$  entspricht. Das so erhaltene Spektrum kann mit Hilfe der Gleichung ( 2-14 ) in eine maximale Lichtausbeute umgerechnet werden. In Abbildung 2-22 sind die so erhaltenen Ergebnisse dargestellt. Es zeigt sich ein deutliches Maximum der Lichtausbeute im Zweifarbenfall bei einer Kombination der Wellenlängen 445 nm und 570,56 nm. Theoretisch ist demnach bei einem LED-Wirkungsgrad von 100%, weißes Licht aus zwei Wellenlängen mit einer Lichtausbeute von ca. 430 lm/W mischbar.

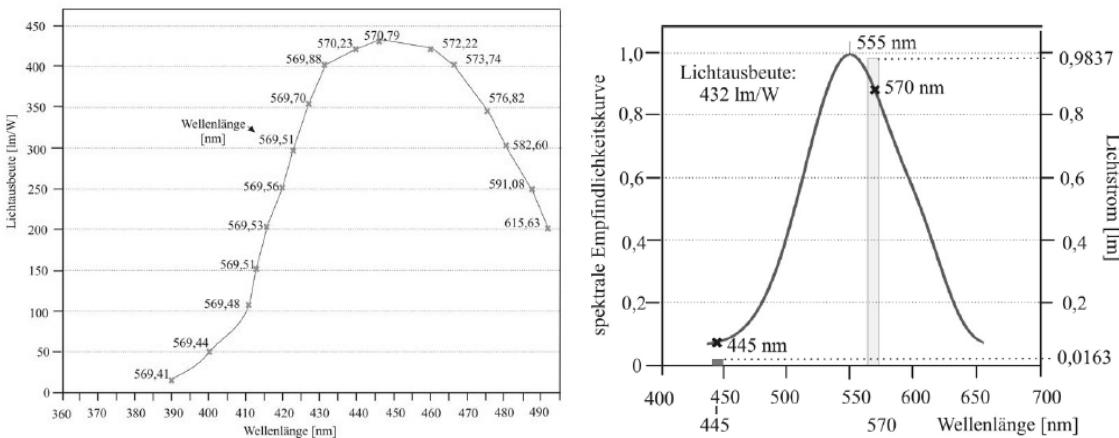


Abbildung 2-22 links: Kombinationsmöglichkeiten zur Erzeugung maximaler Lichtausbeuten aus zwei Spektrallinien. rechts: Spektrum der Zweifarbenkombination mit maximaler Lichtausbeute. Zur Veranschaulichung ist zudem die  $V(\lambda)$ -Kurve dargestellt.

Analog dem Zweifarbenfall lässt sich die gleiche Betrachtung mit einer wesentlich höheren Kombinationsmöglichkeit für drei Farben durchführen. In Abbildung 2-23 sind für eine vorgegebene Wellenlänge die jeweiligen Maxima der Lichtausbeute aus der Mischung mit zwei weiteren Farben abgetragen. Das globale Maximum dieser Einzelmaxima ergibt keine neue verbesserte Kombinationsmöglichkeit, sondern läuft auf die gleiche spektrale Zusammensetzung hinaus wie der Zweifarbenfall.

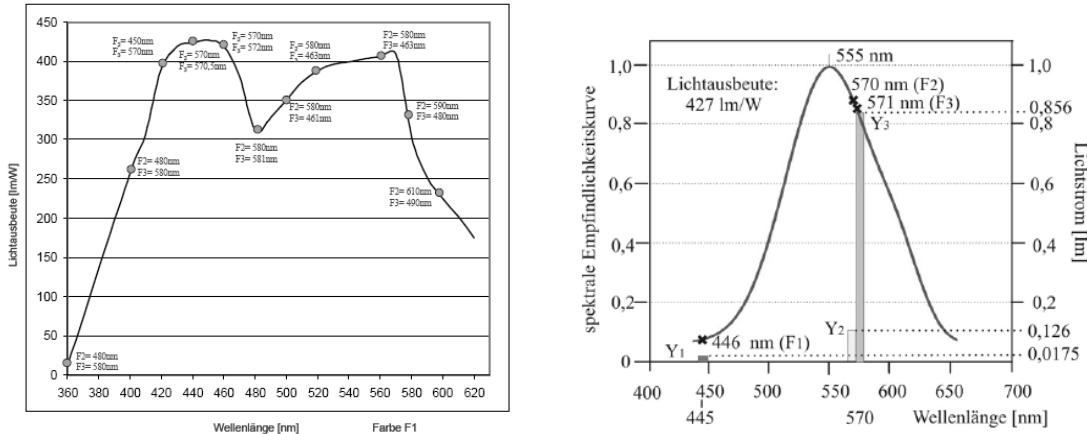


Abbildung 2-23 links: Kombinationsmöglichkeiten zur Erzeugung maximaler Lichtausbeuten aus drei Spektrallinien. rechts: Spektrum der Dreifarbkombination mit maximaler Lichtausbeute. Zur Veranschaulichung ist zudem die  $V(\lambda)$ -Kurve dargestellt.

Es zeigt sich, dass für eine Ziellichtfarbe mit den Normspektralwertanteilen  $x = y = 1/3$  eine maximale Lichtausbeute von 430 lm/W erreichbar ist. Für eine Ziellichtfarbe, die der Normlichtart D<sub>65</sub> entspricht ( $x_{D65} = 0,3138$  und  $y_{D65} = 0,3310$ ), liegt nach Schubert [Schu06] mit zwei Spektrallinien bei 445 nm und 563,5 nm die maximale Lichtausbeute bei ca. 440 lm/W. Selbst bei einer externen Quanteneffizienz von 50 % ergibt sich eine beachtliche Lichtausbeute von 215-220 lmW je nach gewünschter Lichtfarbe.

### 2.3.2.4 Fluoreszenzdiode

Wie bereits erwähnt, haben Lichtquellen mit schmalen Spektrallinien einen schlechten Farbwiedergabeindex, da von Körpern nur noch das Verhältnis von Blau zu Gelb verändert werden kann und ihre wahrgenommene Farbe nur auf der beschriebenen Mischgeraden zwischen den zwei Spektralfarben in der CIE-Normfarbtafel liegen kann. Aus diesem Grund hat sich im Bereich der Beleuchtung mit weißen LED-Lichtquellen ein Trend hin zu blauen LEDs in Kombination mit Lumineszenzfarbstoffen abgezeichnet. Das kurzwellige und damit energiereichere blaue Licht regt den Farbstoff zum Leuchten an. Dabei wird langwelliges, energiearmes gelbes Licht abgegeben. Da nicht das gesamte blaue Licht umgewandelt wird, ergibt die resultierende additive Mischung der Spektralfarben einen weißen Farbton. Der Farbton der Weißlichtdiode ist über Wahl und Dosierung des Farbstoffes einstellbar und bewegt sich

in der CIE-Normfarbtafel auf der Mischgeraden zwischen den beiden Farben. Das so erhaltene volle Spektrum zeichnet sich durch einen höheren Farbwiedergabeindex aus. Außerdem wird die Lichtfarbe nur durch die Fluorophordicke und –konzentration bestimmt, und ist somit nicht von externen Einflüssen wie Temperatur und Stromschwankungen abhängig. Im Gegensatz zu Di- oder Trichromaten, die ohne eine aktive Farbregelung unter Temperatur- und Stromschwankungen nicht ihren Farbort halten können.

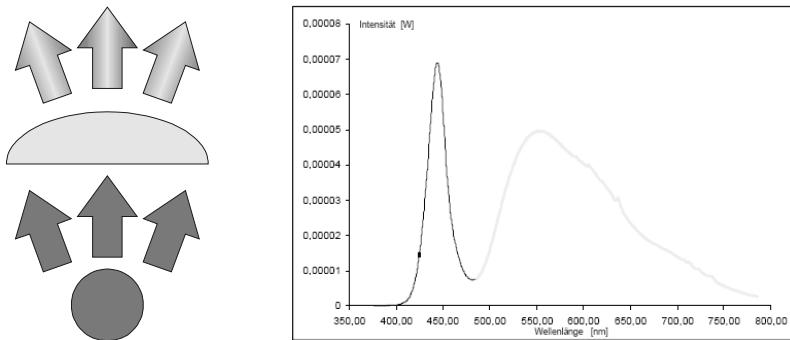


Abbildung 2-24 Prinzip der Weißlichterzeugung mit Lumineszenzstoffen. Rechts: Typisches Spektrum weißer LED

Das hier dargestellte Spektrum stammt von einer Luxeon V Portable DS40, einer weißen Hochleistungs-LED der Firma Lumileds. Mit Hilfe des vermessenen Spektrums lässt sich die theoretisch maximale Lichtausbeute einer konvertierten LED berechnen.

$$\eta_v = \frac{k_m \cdot \int_{360nm}^{830nm} P_{S\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{360nm}^{830nm} P_{S\lambda} \cdot d\lambda} \quad (2-16)$$

Die maximale Lichtausbeute eines solchen Spektrums beträgt:  $\eta_v = 308,4 \text{ lm/W}$

Diese 308,4 lm/W lassen sich jedoch nur dann erreichen, wenn eine externe Quanteneffizienz von 100 % vorliegt. Wie beschrieben, ist es jedoch realistischer eine Effizienz von 50 % für die Erzeugung der LED-Strahlung anzunehmen. Dies gilt wiederum nur für den blauen Anteil der durch die LED direkt erzeugten, Strahlung. Der durch Konversion erzeugte gelbe Strahlungsanteil wird durch Reduzierung der Lichtquantenenergie  $E_\lambda$  erzielt. Um für die Leistungsbilanz die tatsächlich aufzubringende Leistung zu erhalten, muss demnach die gelbe Leistung auf eine Leistung der LED-Strahlung vor der Konvertierung umgerechnet werden.

$$E = h \cdot f \rightarrow E_\lambda = h \cdot \frac{c}{\lambda_1} , \quad E_{\lambda_2} = h \cdot \frac{c}{\lambda_2} \quad (2-17)$$

$$\frac{E_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (2-18)$$

c: Lichtgeschwindigkeit

h: Plancksches Wirkungsquantum  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$

Für die Luxeon V Portable DS40 liegt die zentrale Wellenlänge der blau emittierenden Diode bei 444,16nm und kann als mittlere Ausgangswellenlänge  $E_{\lambda 1}$  angenommen werden. Unter Berücksichtigung der Konvertierungsverluste ist nach Gleichung ( 2-18 ) eine um den Faktor 1,26 höhere Leistungsabgabe der blauen LED nötig (Wirkungsgrad der Konvertierung:  $\eta_{konv.} = 79 \%$  ). Somit ist maximal noch ein weißer Lichtstrom von 243,8 lm pro Watt elektrischer Leistung erreichbar. Durch Absorptionsverluste innerhalb des Konversionsstoffes ist mit weiteren Wirkungsgradeinbußen zu rechnen.

### 2.3.2.5 Temperatur

Als letzter Einfluss auf die Lichtausbeute soll der Einfluss der Temperatur diskutiert werden. Nahezu jegliche der LED zugeführte Leistung, die nicht in Strahlung umgewandelt wird, fällt in Form von Wärmeleistung innerhalb des Halbleiterchips an. Dies können je nach Quanteneffizienz 50% bis 90% der zugeführten Leistung sein. Abhängig von dem thermischen Widerstand der LED zur Umgebung, der Temperatur der Umgebung und der zugeführten Leistung führt dies zu einer mehr oder weniger starken Aufheizung der Rekombinationszone (siehe Kapitel 4.2). Diese Aufheizung hat zur Folge, dass die Zahl der nicht-strahlenden Rekombinationen zunimmt und somit die Quanteneffizienz sinkt. Hochleistungs-LEDs können auf diese Weise Junctiontemperaturen von über 100°C aufweisen. In Abbildung 2-25 sind die Quanteneffizienz-Temperatur-Kennlinien von zwei Hochleistungs-LEDs abgetragen. Es ist zu erkennen, dass bei typischen Betriebsbedingungen von 100°C Junctiontemperatur der Lichtstrom und demnach die Quanteneffizienz auf 80 % des Ausgangslichtstromes (der Ausgangseffizienz) bei 20°C sinkt.

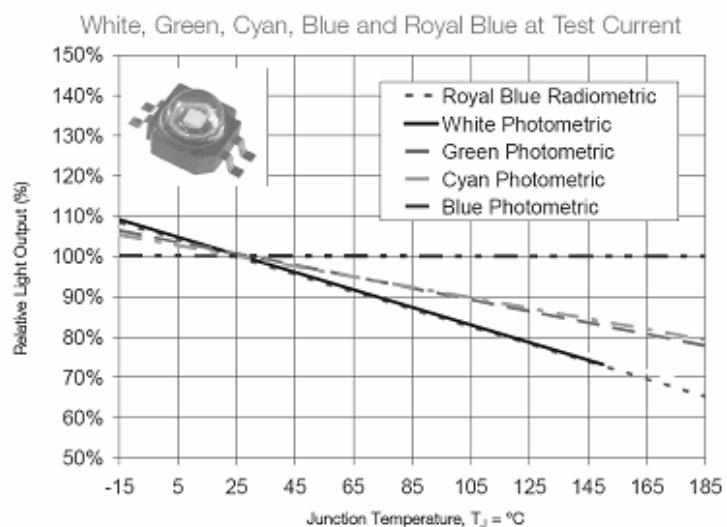
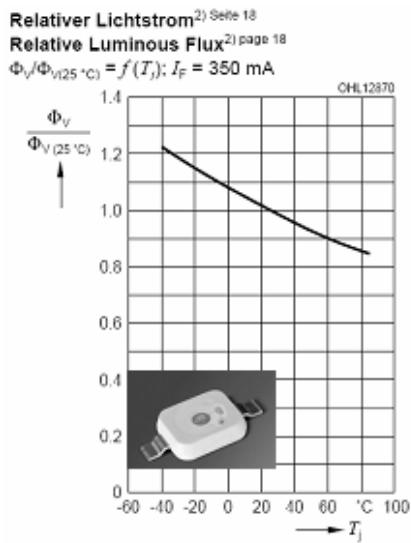


Abbildung 2-25 Temperaturabhängiger Lichtstrom verschiedener Hochleistungs LEDs [DB06] [K206]

In der folgenden Auflistung sind alle maximal zu erwartenden Effizienzen und Wirkungsgrade zusammengefasst:

Tabelle 2-2 theoretische Effizienzen und Wirkungsgrade bei der Weißlichterzeugung mit LEDs

Interne Quanteneffizienz	$\eta_{int} = \frac{P_e}{P_{Sr}} \leq 100\%$
Externe Quanteneffizienz	$\eta_{ext} \leq 50\%$
Maximale Lichtausbeute eines weißen Dichromaten und einer Lumineszenzfarbstoff konvertierten LED	$\eta_v = 430 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ bzw. $308,4 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$
Konvertierungswirkungsgrad	$\eta_{konv} \approx 80\%$
Thermische Quanteneffizienzverluste	$\eta_{therm} \approx 80\%$

Nach den vorangegangenen Überlegungen sind in Zukunft realistisch maximale Lichtausbeuten bei weißen LEDs zwischen 100 und 140 lm/W zu erwarten. Damit wird die LED die Lichtausbeute einer Leuchtstofflampe erreichen können (vgl. Tabelle 2-3). Für hochlumige kompakte Pakete ist aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit eine deutliche Steigerung gegenüber konventionellen Lichtquellen allerdings kaum zu bewerkstelligen.

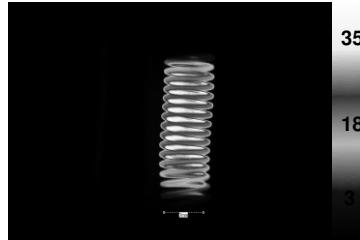
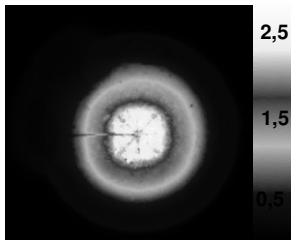
Tabelle 2-3 Lichtausbeuten verschiedener Lichtquellen

Lichtquelle	lm/W
Kerze	0,1
Glühlampe	13-15
Halogenglühlampe	28
Leuchtstofflampe	80-110
Quecksilberdampflampe	80-100
Pkw-Gasentladungslampe („Xenon“)	90
Dichromatische LED	140 (praktisch)
Lumineszenzfarbstoff konvertierte LED	40 (2006)-100 (praktisch)

### 2.3.3 Leuchtdichte

Ein weiteres wichtiges Merkmal einer Lichtquelle ist die Leuchtdichte. Die Leuchtdichte ist ein Maß dafür, wie viel Lichtstrom  $\Phi$  eines Flächenelements  $dA$  sich in einem Raumwinkel- $d\Omega$  befindet. Die Leuchtdichte wird demnach sowohl durch die Leistungsdichte einer Fläche, als auch durch die Bündelung der Strahlung bestimmt. In Tabelle 2-4 sind einige typische Leuchtdichtheverteilungen verschiedener Lichtquellen abgetragen.

Tabelle 2-4 Leuchtdichten der klassischen Kfz-Lichtquellen im Vergleich zu einer Hochleistungs-LED (Angaben in  $\text{Mcd}/\text{m}^2$ )

Gasentladungslampe D2 35 W	Halogenglühlampe H7 55 W	LED Golden Dragon 1 W
		
<b>200 <math>\text{Mcd}/\text{m}^2</math></b>	<b>20 <math>\text{Mcd}/\text{m}^2</math></b>	<b>2 <math>\text{Mcd}/\text{m}^2</math></b>

Aus der Tabelle 2-4 wird deutlich, dass die Leuchtdichte der Halogenglühlampe um den Faktor 10 geringer ist als die der Gasentladungslampe, und dass die aufgeführte LED um weitere 90% dunkler ist. Welchen Einfluss haben hohe bzw. niedrige Leuchtdichten auf das Synthesieren von optischen Systemen? Die Aufgabe von Beleuchtungssystemen ist es, den Lichtstrom einer Lichtquelle auf eine zu beleuchtende Fläche zu projizieren. In der Regel wird die Ziellichtfunktion als Beleuchtungsstärkefunktion auf einer zu beleuchtenden Fläche A vorgegeben. Neben der Homogenität und Größe der Ausleuchtung sind meist Mindestbeleuchtungsstärken gewünscht oder gefordert. Maximale Beleuchtungsstärken lassen sich durch das Abbilden der Lichtquelle auf die zu beleuchtende Fläche erzielen.

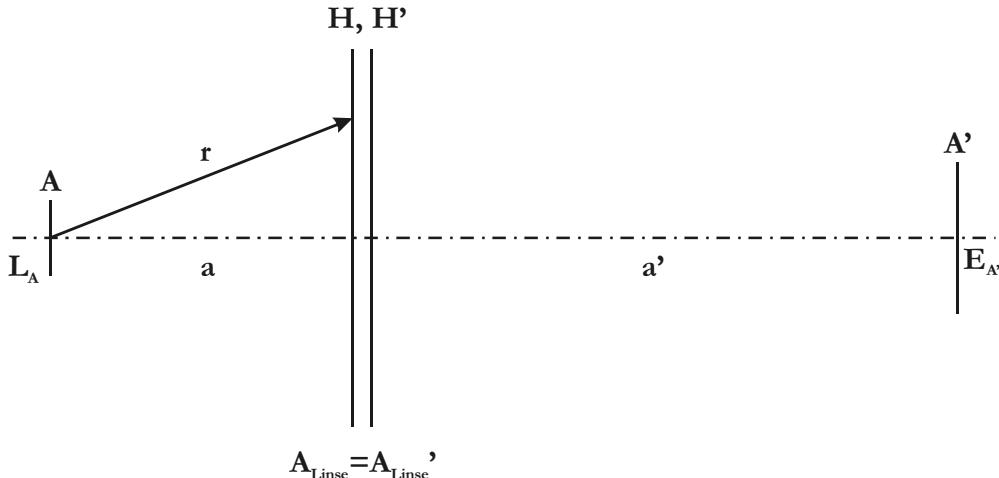


Abbildung 2-26 Einstufige Abbildung im paraxialen Gebiet

Nach dem photometrischen Grundgesetz [Gal04] ist der Lichtstrom, der von einer leuchtenden Fläche  $A_1$  auf eine Fläche  $A_2$  trifft, definiert durch:

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = \Omega_0 \cdot \int \int L \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot \frac{1}{r^2} \cdot dA_2 \cdot dA_1 \quad (2-19)$$

Dabei stellt  $L$  die Leuchtdichte der leuchtenden Fläche dar. Die Winkel  $\varepsilon_1$  bzw.  $\varepsilon_2$  sind die Winkel zwischen den Flächennormalen der Flächenelemente  $dA_1$  bzw.  $dA_2$  und der optischen Achse. Der Abstand der Flächenelemente  $dA_1$ ,  $dA_2$  wird mit  $r$  bezeichnet.

Für einen großen Abstand der Linse zur LED, im Vergleich zur Ausdehnung der LED  $a \gg d_{\text{LED}}$  und unter der Annahme der Lambertschen Abstrahlungscharakteristik der LED, können in dem konkreten Fall folgende Näherungen angenommen werden:

$$a \gg d_{\text{LED}}, L(\varepsilon_1) = \text{konst.}$$

$$L \neq f(dA_1, dA_2)$$

$$r \approx a = \text{konst.}$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0^\circ \rightarrow \cos \varepsilon_1 = \cos \varepsilon_2 = 1$$

Somit ist der Lichtstrom, der von der leuchtenden Fläche  $A_1 = A_{\text{LED}}$  auf die Linsenfläche  $A_2 = A_{\text{Linse}}$  trifft, annähernd gleich:

$$\Phi_{\text{LED-Linse}} \approx \frac{L_{\text{LED}} \cdot A_{\text{LED}} \cdot A_{\text{Linse}}}{a^2} \cdot \Omega_0 \quad (2-20)$$

Je nach Transmissionsgrad  $\tau_{Linse}$  der Linse wird ein Teil des Lichtstromes auf das bildseitig entstehende Abbild des Chips gelenkt und bewirkt dort unter der Annahme einer idealen aberrationsfreien Abbildung, folgende Beleuchtungsstärke:

$$E = \frac{\Phi_{LED \rightarrow Linse}}{A_{LED}} \cdot \tau_{Linse} \quad (2-21)$$

Aus der Definition des Abbildungsmaßstabes lässt sich das Bild der LED wie folgt substituieren:

$$\beta' = \frac{a'}{a}, \quad A_{LED}' = \beta'^2 \cdot A_{LED} \quad (2-22)$$

Einsetzen von ( 2-20 ) und ( 2-22 ) in ( 2-21 ) ergibt:

$$E = \frac{L_{LED} \cdot A_{LED} \cdot A_{Linse} \cdot a^2}{a^2 \cdot A_{LED} \cdot a'^2} \cdot \tau_{Linse} \cdot \Omega_0 \quad (2-23)$$

Somit besteht unter den angenommenen Randbedingungen und Näherungen folgender Zusammenhang zwischen der Leuchtdichte einer LED und der maximal erzielbaren Beleuchtungsstärke im Abbild der Diode:

$$E = \frac{L_{LED} \cdot A_{Linse}}{a'^2} \cdot \tau_{Linse} \cdot \Omega_0 \quad (2-24)$$

Für Reflektorsysteme kann in Analogie zu Linsensystemen die gleiche Herleitung vollzogen werden:

$$E = \frac{L_{LED} \cdot A_{Reflektor}}{a'^2} \cdot \rho_{Reflektor} \cdot \Omega_0 \quad (2-25)$$

Aus dieser Herleitung resultierend lässt sich sagen:

**Für die maximal erzielbare Beleuchtungsstärke sind einzig die Leuchtdichte der Lichtquelle, der Abstand des Scheinwerfers zur Beleuchtungsebene und die effektiv leuchtende Fläche des Scheinwerfers verantwortlich.**

Nach den Vorschriften für Fernlicht mit Gasentladungslampen muss die Beleuchtungsstärke auf einem Messschirm in 25m Entfernung im Schnittpunkt der Linien HH und VV mindestens 70lx betragen [ECE20]. Aus dieser Forderung lassen sich nach Gleichung ( 2-24 ) bzw. ( 2-25 ) für die verschiedenen Leuchtdichten der Kfz-typischen Lichtquellen die erforderlichen Mindestaustrittsflächen berechnen.

Tabelle 2-5 Mindestdurchmesser der Austrittspupille eines Scheinwerfers zur Erzeugung der für Fernlicht geforderten Beleuchtungsstärken

<b>Gasentladungslampe D2 35 W</b>	<b>Halogenglühlampe H7 55 W</b>	<b>LED Golden Dragon 1 W</b>
		
<b>200 Mcd/m<sup>2</sup></b>	<b>20 Mcd/m<sup>2</sup></b>	<b>2 Mcd/m<sup>2</sup></b>
<b>2,2 cm<sup>2</sup></b>	<b>22 cm<sup>2</sup></b>	<b>220 cm<sup>2</sup></b>

Die um den Faktor 100 geringeren Leuchtdichten der LEDs gegenüber den Gasentladungslampen führen zu Scheinwerferaustrittsflächen, die hundertmal größer sein müssen als die von Systemen mit Gasentladungslichtquellen. Da der Bauraum und die Austrittsfläche eines Scheinwerfers aufgrund der kompakten Bauweise von Kraftfahrzeugen sehr eng begrenzt ist, könnte dieser wesentlich größere Platzbedarf ein empfindliches Problem für den Einsatz der LEDs als Scheinwerferlichtquelle darstellen. Um die Größe dieses Problems abzuschätzen, soll im Folgenden das Entwicklungspotenzial der Leuchtdichte von LEDs diskutiert werden.

Wie bereits beschrieben, wird nur ein Teil der zugeführten elektrischen Leistung in Strahlungsleistung umgewandelt. Die verbleibende Verlustleistung liegt aufgrund von Resorptionsvorgängen und ohmschen Verlusten in Form von Wärmeleistung  $\dot{Q}$  innerhalb der LED vor.

$$P_e = P_s + \dot{Q} \quad (2-26)$$

Die Leuchtdichte einer LED kann mit:

$$L_{LED} = \frac{k_m \int P_{S\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{dA_{LED\ p} \cdot d\Omega_{LED}} = \frac{d^2\Phi}{dA_{LED\ p} \cdot d\Omega_2} \quad (2-27)$$

berechnet werden. Demzufolge muss zum Steigern der Leuchtdichte entweder der Gesamtlichtstrom erhöht oder die projizierte Fläche bzw. der Raumwinkel der LED verkleinert werden. Mit der Flächenverringerung nehmen proportional die Größe der Rekombinationszone

und somit auch der abgegebene Lichtstrom ab. Dieser Eingriff führt also nicht zu einer Leuchtdichtheerhöhung. Aufgrund der ungerichteten Rekombination innerhalb der LED wird auch der Lichtstrom gleichmäßig in den Halbraum vor der LED abgegeben. Eine bauliche Verkleinerung des Abstrahlwinkels ohne eine Reduktion des Lichtstromes ist nicht möglich. Durch das Gesetz der Konstanz der Leuchtdichte ist außerdem eine nachträgliche optische Veränderung des Faktors  $A_{LED} \cdot \Omega_{LED}$  nicht möglich.

In einem optischen System gilt:

$$A_p \cdot \Omega = A_p' \cdot \Omega' = \text{konst.} \quad (2-28)$$

Dieser Ausdruck wird ferner geometrischer Fluss oder étendue (frz.: Ausdehnung) genannt und stellt eine geometrische Konstante der Abbildung dar.

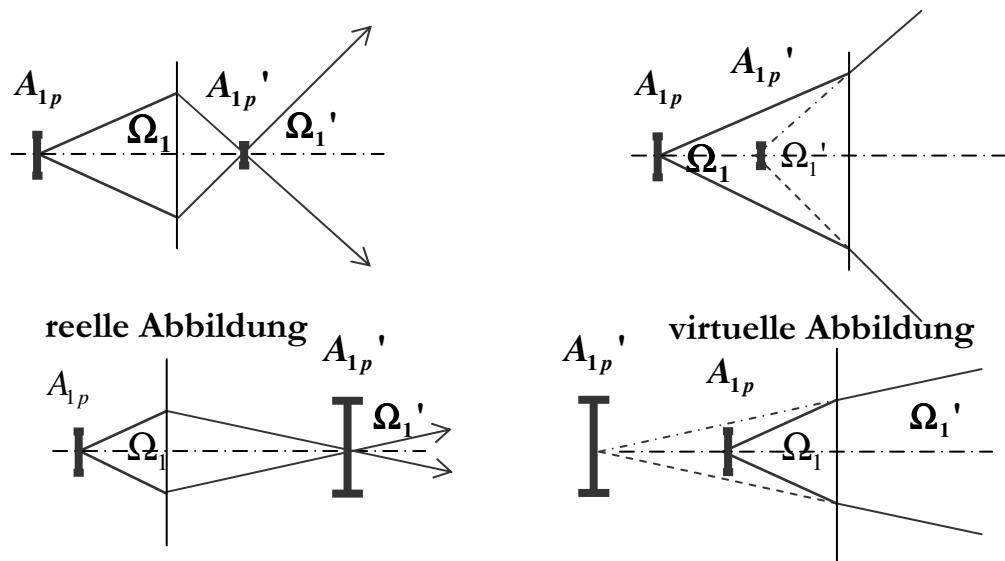
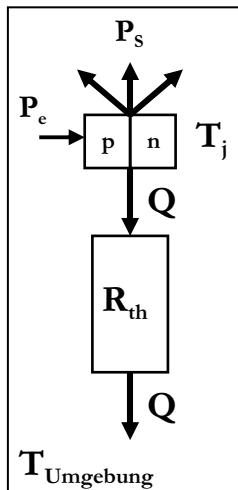


Abbildung 2-27 Veranschaulichung der Konstanz der Leuchtdichte in abbildenden optischen Systemen

Es bleiben demnach zur Steigerung der Leuchtdichte einer LED die Erhöhung der LED-Lichtausbeute und die Steigerung der in einer LED umgesetzten Leistung. Zur Messung der in Tabelle 2-4 gezeigten LED-Leuchtdichte kam eine LED mit einer Lichtausbeute von ca. 30 lm/W zum Einsatz. Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, ist eine Steigerung der Lichtausbeute auf 100 bis 140 lm/W für weiße LED ein ehrgeiziges, jedoch realistisches Ziel. Durch die Steigerung der Lichtausbeute ist folglich ein Faktor 3 bis 5 erreichbar. Für die vermessene Golden Dragon [DB06] heißt dies einen theoretischen Anstieg der Leuchtdichte auf 6 bis 12 Mcd/m<sup>2</sup>. Zur Erinnerung sei hier erwähnt, dass eine D2 Gasentladungslampe 200 Mcd/m<sup>2</sup> und eine H7-Glühlampe 20 Mcd/m<sup>2</sup> erreicht..

Es reicht also nicht aus, die Lichtausbeute zu erhöhen. Nur eine Steigerung der umgesetzten Leistung kann eine Leuchtdichtheiterhöhung bewirken. Die maximal zuzuführende Leistung

einer LED ist durch die maximale erlaubte LED-Junction-Temperatur  $T_j$  und die maximal abführbare thermische Leistung  $Q_{\max}$  aus der LED begrenzt. Heutige LEDs erlauben Junctiontemperaturen von bis zu 185 °C [Lux06] und besitzen thermische Widerstände  $R_{th}$  von ca. 10 K/W. Für Umgebungstemperatur (20 °C) ergibt sich so eine maximal zulässige Verlustleistung von 16 Watt. Für eine externe Quanteneffizienz  $\eta_{ext}$  von 50 % sind demnach theoretisch 32 Watt pro LED denkbar. Bei einer Schwellspannung von ca. 3 V müssten Ströme von nahezu 10 A durch den Halbleiter fließen.



$$Q_{\max} = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{(T_j - T_u)}{R_{th}} \quad (2-29)$$

Abbildung 2-28 Vereinfachte Darstellung des thermischen Pfades in einer LED

Nach Schubert [Schu06] kommt es bei hohen Strömen zu einem Ladungsträgerüberlauf in der aktiven Region der LED, so dass ab einem bestimmten maximalen Strom eine Erhöhung des Stromes zu keinen weiteren Rekombinationen führt und der Lichtstrom in Sättigung geht. Um dieses Problem zu vermeiden, müssen Hochleistungs-LED mit dicken doppelheterostrukturierten aktiven Zonen, vielen Quantumwells oder großen Strominjektionskontaktflächen ausgerüstet sein.

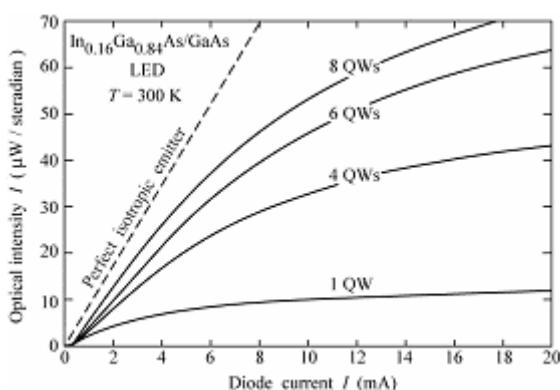


Abbildung 2-29 Von  $In_{0.16}Ga_{0.84}As/GaAs$  emittierte optische Intensität, deren aktive Zone ein, vier, sechs oder acht Quantumwells enthält, sowie die theoretische Intensität eines perfekt isotropischen Emitters [Schu06]

Eine extreme Steigerung der Strahlungsleistung durch Steigerung der elektrischen Leistung pro LED ist folglich nicht realistisch. Des Weiteren ist aus der Darstellung in Abbildung 2-25 ersichtlich, dass eine Temperaturerhöhung auf 180 °C gleichzeitig einen Abfall der externen Quanteneffizienz auf 70 % der Effizienz, die bei 20 °C erreicht wird, bewirkt.

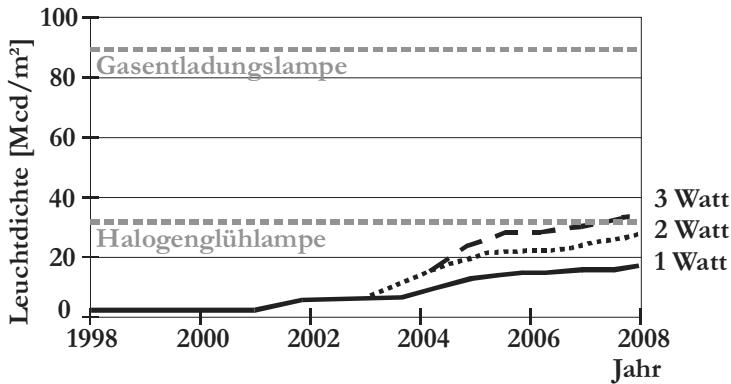


Abbildung 2-30 Roadmap der Leuchtdichteentwicklung weißer LEDs

All diese Faktoren zeigen, dass Entwicklungspotential für die Leuchtdichte der LEDs gegeben ist, aber gleichzeitig auch, dass ihr physikalische Grenzen gesetzt sind. So ist es realistisch anzunehmen, dass bald Leuchtdichten von Glühlampen erreicht werden. Die hohen Leuchtdichten einer Gasentladungslampe sind aber für LEDs auch in Zukunft nicht erreichbar.

### 2.3.4 Lichtstrom

#### 2.3.4.1 Einfluss des Lichtstromes auf das Leuchtendesign

Die Leuchtdichte einer LED ist maßgebend für die erreichbare Beleuchtungsstärke in einer definierten Entfernung. Das Integral der geforderten Beleuchtungsstärken über die Szenerie gibt die nötige Gesamtstrahlungsleistung  $\Phi_{ges}$  des Scheinwerfersystems vor. Typische Kfz-Scheinwerfer erreichen heutzutage im Fernlicht Lichtströme zwischen 1000 und 1700 lm auf der Fahrbahn. Einzelne Hochleistungs-LEDs erzeugen einen Lichtstrom von ca. 40 lm. Im Gegensatz zu den klassischen Lichtquellen der Kfz-Lichttechnik, die Lichtströme von 1000 lm (H7) bis 3400 lm (D2) erzeugen, reicht demnach der Lichtstrom einer LED nicht aus, um eine komplette Scheinwerferlichtverteilung zu erzeugen.

Für LED-Scheinwerfer besteht somit die Notwendigkeit, mehrere LED-Lichtquellen zu einem Gesamtsystem zu kombinieren. Für diese Kombination gibt es mehrere Möglichkeiten der optischen Herangehensweise. Die gewünschte Lichtverteilung kann in einer ersten Kombinationsmöglichkeit aus einer Vielzahl von LED-Optik-Kombinationen erzeugt werden. Dabei erzeugt jedes dieser Einzelmodule eine einzelne Lichtverteilung. Die Summe dieser Lichtverteilungen macht die Gesamtlichtverteilung aus. Dies hat den Vorteil, dass verschiedene Lichtverteilungen im Baukastenprinzip aus einem Katalog von einzelnen LED-Modulen kombiniert werden können. Die Justage- und Fertigungstoleranzen der Einzelmodule zueinander

stellen allerdings eine große Herausforderung dar. Da erstens eine minimale Verschiebung der LED innerhalb des optischen Systems aufgrund der großen Abbildungsmaßstäbe eine große Verschiebung der LED-Abbildung bewirkt und zweitens, eine kleine Abweichung der LED-Module untereinander die Abbildungen in großer Entfernung so stark verschiebt, dass Lücken und Inhomogenitäten in der Lichtverteilung entstehen.

Die zweite Kombinationsmöglichkeit ist, ein LED-Feld mit einer gemeinsamen Optik in die Szenerie zu projizieren. So können bei hinreichend genauer Fertigung der LED-Felder die Toleranzen der Optik durch nachträgliches Ausrichten des gesamten Scheinwerfers ausgeglichen werden. Durch diese Feldanordnung wird jedem Raumabschnitt genau eine LED zugeordnet, so dass sich durch einzelnes Ansteuern der LEDs bestimmte Zonen stärker oder schwächer ausleuchten lassen und so eine hochdynamische Lichtverteilung realisierbar wird [Goe05]. Durch die dichte Anordnung der LEDs auf einem gemeinsamen Träger befindet sich die gesamte Verlustleistung des Scheinwerfers auf einem kleinen Feld und muss von dort möglichst gut abgeführt werden. Diese Wärmeabfuhr ist die Hauptschwierigkeit der zweiten Kombinationsmöglichkeit.

Als dritte Möglichkeit der LED-Optik-Kombination stellt eine Hybridlösung aus der ersten und zweiten Anordnung einen guten Kompromiss dar. Diese dritte Variante besteht aus Modulen, zusammengesetzt aus einer thermodynamisch vertretbaren Kombination aus mehreren LED-Chips auf einer gemeinsamen Platine und einer Optik. Aus diesen LED-Modulen wird die gewünschte Lichtverteilung generiert.

Tabelle 2-6 Möglichkeiten der LED-Cluster Bildung mit Vor- und Nachteilen

		<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Modulbauweise</li> <li>+ Design</li> <li>- Toleranzen</li> <li>- Fertigungsaufwand</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Toleranzen</li> <li>+ Dynamik</li> <li>+ Thermomanagement</li> <li>+ Design</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Modulbauweise</li> <li>+ Design</li> <li>- Toleranzen</li> <li>- Thermomanagement</li> </ul>

Mittlerweile gibt es von den verschiedenen Scheinwerferentwicklern verschiedene LED-Scheinwerferprototypen. Ein von Hella KGaA vorgestellter VW-Golf Voll-LED Scheinwerferprototyp besteht aus einer Kombination der Hybridmodule mit Einzellichtquellen-Modulen. Die Firma OSRAM hat basierend auf dem Hybridprinzip ein eigenes Funktionsmuster vorgestellt. Audi strebt an, Ende 2007 der erste Anbieter von Voll-LED Serienscheinwerfern zu sein. Der im Audi R8 angebotene Scheinwerfer besteht, ähnlich dem Hella-Produkt, aus einer Kombination von Hybridmodulen und Einzellichtquellen-Modulen.



Abbildung 2-31 Erste Voll-LED Scheinwerfer von OSRAM, Hella, und Audi

### 2.3.4.2 Roadmap des Lichtstromes

Die Entwicklung des Lichtstromes verhält sich analog zur Entwicklung der Leuchtdichte. Es zeichnet sich ein Trend zu LED-Feldern ab, die anschließend als LED vermarktet werden. Diese Namensgebung impliziert den Eindruck eines signifikanten Anstieges des LED-Lichtstromes. Dieser resultiert jedoch de facto maßgeblich aus einem Zusammenschalten mehrerer Dioden. Aufgrund des Ladungsträgerüberlaufes in der aktiven Region der LED bei hohen Strömen sind dem Lichtstrom pro Einzeldiode hier ebenfalls Grenzen gesetzt.

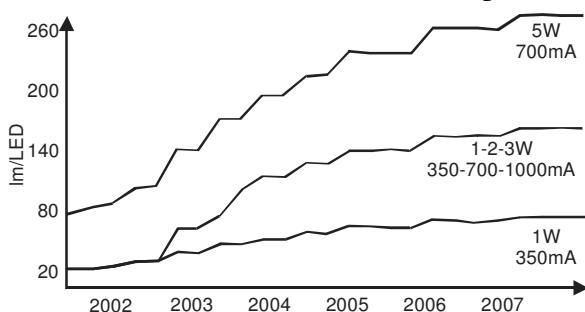


Abbildung 2-32 Roadmap des erwarteten Lichtstromes eines Diodenpackages von Philips. Die Verfünffachung des Lichtstromes von 50lm auf 250lm bei einer Verdoppelung des Stromes von 350mA auf 700mA ist nur durch eine Reihenschaltung von mehreren Dioden möglich.

### 2.3.5 Klimamanagement

Wie bereits in Kapitel 2.3.2.5 beschrieben, hängt die interne Quanteneffizienz einer LED stark von der Temperatur der Rekombinationszone ab. Die Lebensdauer einer Diode steht ebenfalls im Zusammenhang mit ihren Betriebsbedingungen. So kommt es bei zu hohen Temperaturen neben physikalischer Degradation des Halbleiters aufgrund verschiedener thermischer Ausdehnungseigenschaften zu mechanischen Spannungen innerhalb des LED-Aufbaus. Dies hat zur Folge, dass besonderer Wert auf das thermische Management von Scheinwerfern mit LEDs gelegt wird.

Die verschiedenen Umgebungen, in denen ein Kfz-Scheinwerfer ausfallfrei arbeiten muss, reichen von der tropischen Zone mit Temperaturen um die 45°C bis hin zu Polarregionen mit Temperaturen um -40 °C. Zusätzlich kann es unter extremen Lastfällen und schlechter Kühlung des Kfz-Motors im Motorraum am Scheinwerfergehäuse zu Spitzentemperaturen von bis zu 120 °C kommen.

Um die Beleuchtungseigenschaften eines Xenon-Systems zu erreichen, sind Lichtströme von ca. 1600 lm auf der Straße notwendig. Bei einem Leuchtenwirkungsgrad von 50 % sind demnach LEDs bzw. LED-Arrays mit 3200 lm pro Scheinwerfer notwendig. Die Lichteausbeuten heutiger weißer LED liegen bei max. 40-50 lm/W und werden sich nach Kapitel 2.3.2.3 auf maximal 100 lm/W steigern lassen. Somit ist zur Erzeugung der geforderten Lichtströme 80-32 W elektrische Leistung nötig. Die Verlustleistung beträgt dabei 70 W (heute) bis minimal 25 W (zukünftig). Sie heizt die LEDs und den Scheinwerfer auf, was wiederum zu Degradation und Lichtstromeinbußen führt.

Im Gegensatz zu anderen Lichtquellen muss die Verlustwärme bei LEDs komplett über Wärmeleitung abgeführt werden, da die erzeugte Strahlung keine Wärmeanteile enthält. Dies hat dazu geführt, dass bereits die Hochleistungsdiode an sich speziell an diese Wärmeabfuhraufgabe angepasst ist.

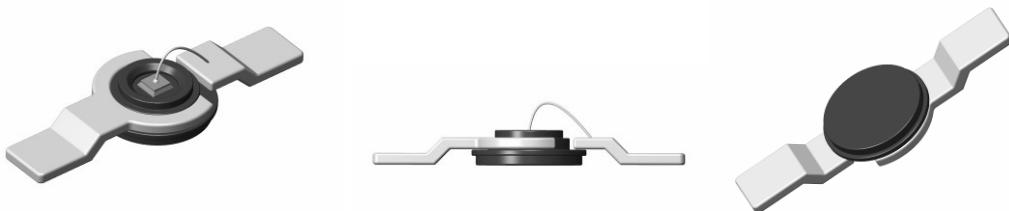


Abbildung 2-33 Aufbau einer Hochleistungs-LED bestehend aus LED-Chip mit als Wärmesinke ausgelegter Anode und angebondeter Kathode

Typischerweise bestehen Hochleistungs-LEDs aus einem auf eine Wärmesinke geklebten Chip. Diese Wärmesinke dient gleichzeitig als Anode. Die Kontaktierung der Kathode erfolgt über eine durch Bonden angesetzte Zuführung. Das andere Ende der Wärmesinke ist großflächig ausgeführt, um die Wärme bereits in der LED zu spreizen und um eine gute thermische Kontaktierung zur Umgebung oder weiteren Kühlsystemen zu gewährleisten.

Mahlkow [Mah06] hat die thermischen Pfade eines solchen Systems analysiert und hat folgende Zusammenstellung dieser Pfade erstellt: (Abbildung 2-34)

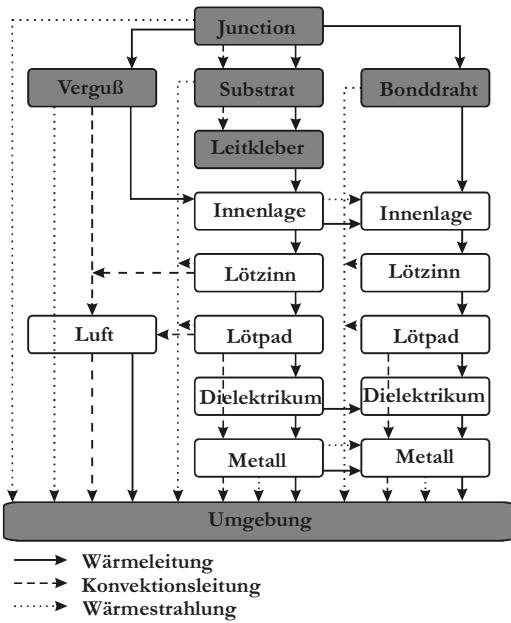


Abbildung 2-34 Wichtigste Entwärmungspfade in einer Anordnung OHX-6XX - Schaltungsträger - Umgebung (nach [Mah06])

Daran anschließend führt Mahlkow Berechnungen an, die für die Transportarten *Strahlung* und *Konvektion* einen Anteil von <1 % an der Gesamtwärmeleitung ausmachen. Auf Grund dieser Berechnungen vernachlässigt er diese Transportarten und beschränkt sich auf die Wärmeleitung.

Es stehen noch die thermischen Pfade durch die Wärmesenke und den Bonddraht zur Verfügung. Da nach Mahlkow der Bonddraht ebenfalls unter 1 % zur gesamten Wärmeleitung beiträgt, wird auch dieser vernachlässigt.

Mit Hilfe dieser Vereinfachungen bleibt schließlich nur noch ein thermischer Pfad übrig. Die Wärme wird aus dem Chip über die Wärmesenke an die Umgebung abgegeben.

Das vereinfachte thermische Ersatzschaltbild sieht also wie folgt aus:

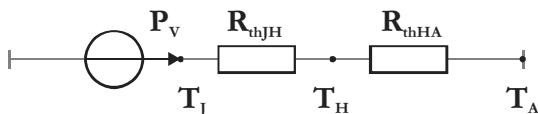


Abbildung 2-35 Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild einer Hochleistungs-LED

$P_V$  ist die Verlustleistung der LED, d.h. die in der Sperrsicht erzeugte thermische Leistung. Die Potenziale entsprechen den Temperaturen der Sperrsicht  $T_J$ , der Wärmesenke  $T_H$  und der Umgebung  $T_A$ . Die zwei thermischen Widerstände geben die Übergangswiderstände von

der Sperrsicht zur Wärmesenke  $R_{thJH}$  und von der Wärmesenke zur Umgebung  $R_{thHA}$  an. Der gesamte thermische Widerstand von der Sperrsicht zur Umgebung  $R_{thJA}$  heutiger LEDs liegt bei ca. 15 K/W. Somit liegt die Sperrsichttemperatur pro Watt Verlustleistung um 15 Kelvin höher als die Umgebungstemperatur. Die Überlegungen zur Leuchtdichte der Dioden zeigen, dass hohe Leuchtdichten nur durch hohe Leistungen erreicht werden können. Daraus folgt, dass die Umgebungstemperatur  $T_A$  gering gehalten werden muss bzw., dass hohe zulässige Sperrsichttemperaturen erreicht werden müssen.

$$T_J - T_A = R_{thJA} \cdot P_v \quad (2-30)$$

Maximal zulässige Sperrsichttemperaturen liegen bei kommerziellen LEDs heutzutage bei etwa 120-150 °C. Sollte die LED also ihre Wärme direkt an den Motorraum mit Spizentemperaturen von 120 °C abgeben, wäre kaum Temperaturgefälle vorhanden, um Verlustleistung abzuführen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit eines Kühlsystems, das eine Wärmebrücke zur 45 °C warmen Umgebung ermöglicht. Hierbei reichen die Überlegungen von einfachen großen Wärmespreizen und –senken, die mit der Fahrzeugumgebung verbunden sind, über Ventilator-Kühlkörper-Kombinationen bis hin zu Systemen, die die Enthalpie der Phasenübergänge von Stoffen als Wärmepuffer und Kreislaufantrieb nutzen.

Bei neueren LEDs findet man des Öfteren thermische Widerstände mit Werten von 3-5K/W. Bei diesen LEDs muss beachtet werden, dass es sich um LED-Arrays mit mehreren Halbleiterchips auf einem gemeinsamen Grundkörper handelt.



Abbildung 2-36 OSRAM O-Star

Somit befinden sich  $n$  einzelne LED-Chips auf einer gemeinsamen Wärmesenke. Jede dieser  $n$  LEDs produziert jeweils eine Verlustleistung  $P_v$ . Diese Verlustleistung muss jeweils einem thermischen Pfad folgen, der wiederum maßgeblich zwei Widerstände beinhaltet. Dies sind zum einen der jeweilige Widerstand vom Chip zur Wärmesenke und zum anderen der gemeinsame Widerstand von der Wärmesenke zur Umgebung.

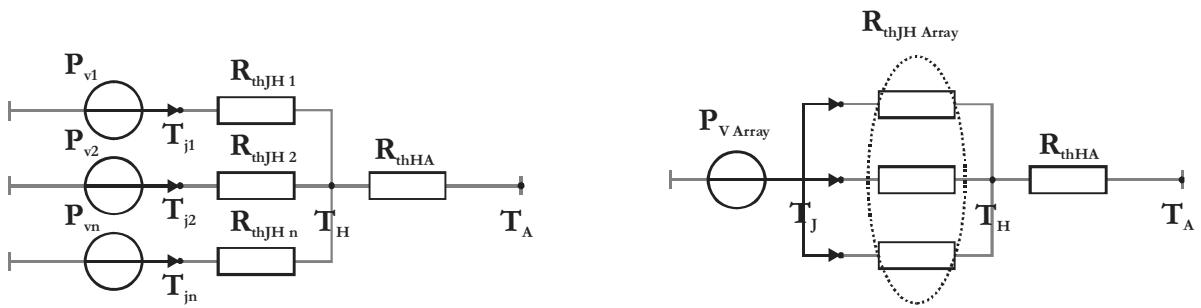


Abbildung 2-37 Thermisches Ersatzschaltbild eines LED-Arrays

Zur Vereinfachung des gesamten thermischen Ersatzschaltbildes lassen sich die einzelnen Verlustleistungen unter der Annahme, dass diese für alle LED gleich groß ist, zu einer gemeinsamen Verlustleistung  $P_{v\,Array}$  zusammenfassen. Der gesamte thermische Widerstand der Einzelchips zur gemeinsamen Wärmesenke errechnet sich analog einer elektrischen Parallelschaltung durch die Summe der Einzelreziprokwerte.

$$P_{v\,Array} = \sum_n P_{v,n} \quad (2-31)$$

$$\frac{1}{R_{thJH\,Array}} = \sum_n \frac{1}{R_{thJH,n}} \quad (2-32)$$

Unter der Annahme, dass die Einzelwiderstände gleich groß sind, ergibt sich somit ein thermischer Gesamtwiderstand des Arrays von:

$$R_{th\,Array} = \frac{R_{thJH}}{n} + R_{thHA} \quad (2-33)$$

Durch diese Parallelschaltung kann demnach der thermische Gesamtwiderstand des LED-Arrays reduziert werden. Dabei ist zu beachten, dass realistisch nur eine Aufspreizung der Leistung auf n Chips realisiert wurde. Das heißt, es wird bei gleicher Gesamtleistung aus einer Multichip-LED leichter Wärme abgeführt, als aus einer Einzelchip-LED. Neben dem Aufspreizen des thermischen Pfades wird zudem der Lichtstrom auf mehrere LED-Chips und somit auf eine größere Fläche verteilt. Dadurch ist die Leuchtdichte einer Multichip-LED um das ca.  $1/n$ -fache geringer als die Leuchtdichte einer Singlechip-LED gleicher Leistung. Die Leuchtdichte, nach Kapitel 2.3.2.2 entscheidend für die Größe der Scheinwerferaustrittsfläche, kann folglich durch diese „Verringerung“ des thermischen Widerstandes nicht gesteigert werden. Allerdings ist dadurch der Vorteil einer leichter justierbaren Multichiplampe mit höherem Lichtstrom gegeben. (Kapitel 2.3.4.1 ).

Neben der Kühlung spielen bei der thermodynamischen Auslegung des Scheinwerfers die Enttauung und die Enteisung der optisch wirksamen Flächen eine zentrale Rolle. Je nach Wetterbedingung kommt es im und am Scheinwerfer durch Ablagerung von Flüssigkeit an abkühlenden Scheinwerferteilen zu dünnen Wasserfilmen oder Eisschichten. Da Xenon- oder Halogenscheinwerfer einen hohen Anteil an infraroter Strahlung besitzen, wird diese Schicht in kurzer Zeit verdampft und führt nicht zu einer Beeinträchtigung des Strahlenganges. Lediglich in Zonen mit wenig Strahlung kann diese Schicht länger sichtbar sein und damit aus Designgründen als störend empfunden werden. Einen Einfluss auf die Lichtverteilung hat dies jedoch kaum [Nol05] [Mas07].

LEDs besitzen keine thermischen Strahlungsanteile. Somit kann auch keine Enttauung der Scheinwerfer durch einfaches Einschalten erreicht werden. Aus diesem Grund gibt es zahlreiche Bestrebungen die Abwärme der LEDs auf die Abschluss scheibe des Scheinwerfers zu lenken.

## 2.4 Heutiger Entwicklungsstand der LED

Die LED als weiße Lichtquelle eines Kfz-Frontscheinwerfers hat zum Zeitpunkt dieser Arbeit die Halogenglühlampe hinsichtlich der Lichtausbeute überholt. Es besteht durchaus die Möglichkeit mit Hilfe der Diodentechnologie in Zukunft Lichtquellen zu konstruieren, die selbst die bisher effizientesten Lichtquellen, die Gasentladungslampen, in ihrer Lichtausbeute übertreffen. Es ist jedoch fraglich, ob dies ebenfalls im Hochleistungsbereich gelingen wird. Bei hohen Leistungen und damit verbundenen hohen Verlustleistungen und Wärmeentwicklungen sinken Lebensdauer und Wirkungsgrad der LEDs extrem ab, was ein aufwendiges und kostenintensives Klimamanagement für High Power LEDs unumgänglich macht. Aus diesem Grund und aufgrund der Ladungsträgersättigung in der Rekombinationszone, können kaum Leuchtdichten erreicht werden, die vergleichbar mit Gasentladungslampenleuchtdichten sind. Einen klaren Vorteil bietet die lange Lebensdauer der Diode. Sollten 50.000 bis 100.000 Betriebsstunden erreicht werden, würde dies die Lebensdauer eines Kfz (3.000-5.000 h) weit überschreiten. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Angaben bisher nur für Low Power LEDs gelten. Aufgrund des großen thermischen Stresses, dem High Power LEDs ausgesetzt sind, bleibt eine endgültige Validierung dieser Angaben abzuwarten. Für Scheinwerfer muss bei der Betrachtung der Lebensdauer das komplette System betrachtet werden. Das bedeutet, dass auch die Ansteuerelektronik, das Kühlssystem und die optischen Komponenten den Anforderungen an einen ausfallfreien Scheinwerfer gerecht werden müssen. So ist das Glühlampensystem aufgrund seiner einfachen Gestaltung und Ansteuerung sehr robust und ausfallarm. Hier begrenzt die leicht und günstig wechselbare Lichtquelle den Lebenszyklus. In Systemen mit Gasentladungslampen ist ebenfalls die Lichtquelle der Hauptausfallgrund. Diese ist jedoch mit Lebensdauern von bis zu 3.000 Stunden vergleichbar mit der Kfz-Lebensdauer. Aufgrund der hochgesteckten Ziele in der Vergangenheit werden Gasentladungslampen unter extremen Stress betrieben. Damit ist realisierbar, dass zu Beginn sehr hohe Leuchtdichten und Lichtströme erreicht werden. Nach ca. 1.000 Stunden Betriebsdauer sinken diese allerdings auf Halogenglühlampenniveau ab. Seit kurzem wird daher an Longlife Gasentladungslampen gearbeitet. Longlife Gasentladungslampen werden unter geringerem Stress betrieben und besitzen so geringere Startlichtströme und Lichtausbeuten. Da diese Lampen weniger stark degradieren, werden über längere Zeit konstante Lichtströme erzielt, was über die Zeit zu einer höheren Lichtausbeute führt. Nach ersten Aussagen könnten somit Lampenlebensdauern von bis zu 9.000 Stunden erreicht werden. Ein weiteres Kriterium einer Scheinwerferlichtquelle sind die Kosten pro Lumen, die beim Lampenkauf aufgebracht werden müssen. Damit ist der Preis der Lichtquelle bezogen auf die Lichtleistung gemeint. Heutige Hochleistungs-LEDs kosten bei Lichtströmen von ca. 30 lm weniger als 3 Euro. Dies ergibt ca. 10 lm pro Euro, also 100 €/klm. Dieser Preis ist noch weit entfernt von dem der Gasentladungslampe (ca.

1,1 €/klm) oder der Glühlampe (0,5 €/klm). In dieser Rechnung sind jedoch nur die Anschaffungspreise und nicht die Wartungskosten enthalten.

	LED	Haloge	Xenon
Lichtausbeute	+	-	++
Leuchtdichte	+	++	+++
Klimamanagement	-	++	+
Lebensdauer	++(?)	+	++(?)
Kosten	-	+++	+
Innovationspotential	+++	-	++

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass alle Betrachtungen für die Beleuchtung mit weißem Licht gemacht werden. Für Selbstleuchter und für farbige Beleuchtung ist die LED aufgrund ihrer kleinen Bauform und nahezu monochromatischen Strahlung ideal geeignet.

Eine zusammenfassende Bewertung der heutigen Situation gibt [Huh06]:

„Erste LED Scheinwerfer werden weit entfernt von all diesen Vorteilen sein. Sie werden viel Masse haben, großes Bauvolumen und eine durchschnittliche Lichtleistung und überdies extreme Kosten verursachen. Aber sie öffnen das Tor zu neuen Möglichkeiten, die in ihren Auswirkungen noch nicht einmal abschätzbar sind.“

## 2.5 Optische Schaltzeiten

Neben ihren bisher gezeigten Vor- und Nachteilen besitzt die Leuchtdiode ein weiteres wesentliches Alleinstellungsmerkmal unter den Lichtquellen - eine sehr gute Pulsmodulierbarkeit. Da es sich bei der Diodenlichterzeugung um eine direkte „Abzweigung“ von Leistung aus dem elektrischen Stromfluss handelt, leuchten LEDs sofort nach dem Anlegen einer entsprechenden elektrischen Spannung auf, im Gegensatz zu Temperaturstrahlern, wie z.B. Glühlampen, die erst ihre Betriebstemperatur erreichen müssen um maximal und effizient Licht zu emittieren. Diese thermodynamischen Vorgänge benötigen bei Standard-Kfz-Glühlampen Zeitspannen von ca. 200 ms. Somit lassen sich Glühlampen nur mit Pulsmodulationsfrequenzen unterhalb 2,5 Hz ohne Informationsverlust modulieren.

Gasentladungslampen wiederum benötigen zum einen sehr hohe Zündspannung (25 kV), um ein leuchtendes Plasma zu erzeugen, zum anderen ist für die effiziente Lichtausbeute ein temperaturbedingter Dampfdruck nötig, der sich noch langsamer als die Glühwendeltemperatur einer Halogenglühlampe aufbaut. Um ein erhitztes Plasma erneut zu zünden, sind aufgrund des erhöhten Druckes höhere Spannungen nötig. Diese Hochspannungen machen ein gezieltes Pulsen oder schnelles Schalten von Gasentladungslampen nahezu unmöglich. Dies ist der Grund dafür, dass das Schalten zwischen mehreren Lichtverteilungen bei Xenon-Systemen nicht zwischen Lichtquellen, sondern mechanisch zwischen verschiedenen Optik- bzw. Blendenzuständen erfolgt [Bör01].

Sind der Arbeitsdruck und der Lichtbogen aufgebaut, werden Kfz-Gasentladungslampen mit einer Frequenz von ca. 400 Hz mit Wechselstrom betrieben. Dies verhindert durch ein permanentes Wechseln der Richtung der Ionenbeschleunigung, dass entlang des Lichtbogens unterschiedliche Lichtfarben aufgrund eines Ionengradienten entstehen. Der Wechselstrom sollte hierbei über eine Rechteckspannung angelegt sein, so dass während des Umpolens die Dauer ohne anliegende Spannung gegen Null geht. Ansonsten würde sich das Plasma zu stark abkühlen und entionisieren. Ein erneutes zünden der Lampe wäre in diesem Fall nur noch über einen erneuten Hochspannungspuls möglich. Gasentladungslampen können und sollten mit Wechselstrom betrieben werden, ein Pulsen der Lichtquelle ist allerdings nur bedingt möglich.

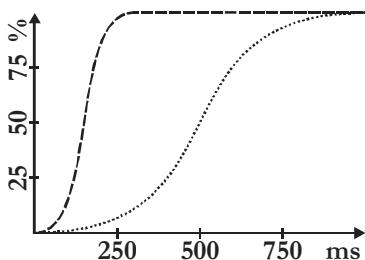


Abbildung 2-38 Prinzipieller Einschaltvorgang einer D2-Gasentladungslampe (gestrichelt) und einer Glühlampe (gepunktet)

Die Frequenz, bei der die Ausgangsleistung auf das  $\sqrt[3]{2}$  fache sinkt, wird 3 dB Grenzfrequenz genannt. Eine Glühlampe erreicht diese Dämpfung bei einer angenommenen Schaltzeit von  $\tau = 250 \text{ ms}$  nach Gleichung (2-34) bei 1,1 Hz. Für Kfz-Gasentladungslampen mit geforderten Schaltzeiten von  $\tau = 800 \text{ ms}$  [ECE98] liegt die 3 dB Grenze bei ca. 1/3 Hz.

$$f(3\text{dB}) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau} \quad (2-34)$$

Folglich kann eine Glühlampe nur einmal pro Sekunde ein- und angeschaltet werden. Eine Gasentladungslampe sollte nur in einem Zyklus von 3 Sekunden gepulst werden.

Wie jedes Bauteil hat auch die LED eine endliche Zeitkonstante beim Ein- und Ausschalten und somit Tiefpasscharakteristik. Hervorgerufen werden diese Verzögerungen hauptsächlich durch die elektrische Kapazität  $C$  der LED und den Gesamtwiderstand des Stromkreises  $R$ . In diesem Fall errechnet sich für das An- und Ausschalten die Zeitkonstante  $\tau$  der LED aus dem Produkt von  $C$  und  $R$  [Schu06].

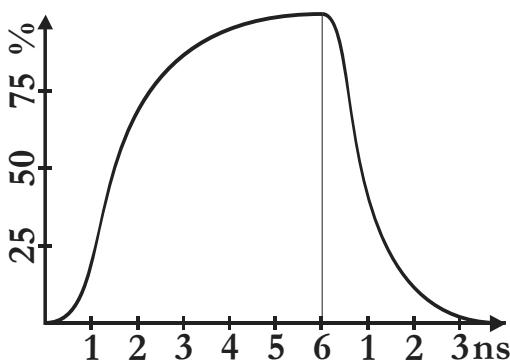


Abbildung 2-39 Schaltzeiten einer RCLED bei  $T=300\text{K}$ ; die Unterschiede zwischen  $\tau_{\text{rise}}$  und  $\tau_{\text{fall}}$  basieren auf dem Ladungsträger sweep-out aus der aktiven Zone [Schu06]

Messungen von Schubert et al. zeigen, dass LED-Zeitkonstanten in der Größenordnung 5-10 ns liegen. Dies ermöglicht 3 dB Grenzfrequenzen von 27-55 MHz.

Für weiße LEDs, die durch die Kombination blauer LED und gelber Konverter ihre Lichtfarbe erzeugen, stellt sich die Frage, welchen Einfluss die Konversion auf die Zeitkonstanten der Lichtquelle hat. Für die Erzeugung des gelben Lichts wird der Effekt der Photolumineszenz genutzt. Dieser Effekt besagt, dass optische Strahlung entsteht, wenn ein System, das durch optische Strahlung angeregt wird, in seinen Grundzustand zurückkehrt. Zwischen Anregung und Emissionen können hierbei Sekundenbruchteile bis Stunden vergehen. Dieses „Nachglühen“ würde einen extremen Tiefpass darstellen und die Zeitkonstante der optischen Strahlung einer LED um ein Vielfaches verlängern. Die Photolumineszenz wird in zwei Untereffekte unterteilt, die Phosphoreszenz und die Fluoreszenz.

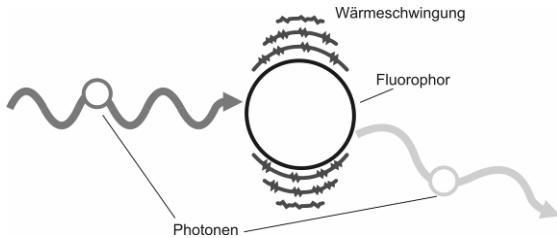


Abbildung 2-40 Umwandlung im Fluorophor

Tatsächlich werden für weiße LEDs Fluorophore und keine Phosphore eingesetzt. Bei der Fluoreszenz behalten die angeregten Elektronen der Moleküle ihre Spinquantenzahl (bzw. ihren Spin) bei. Da bei dem Übergang dieses angeregten Elektrons aus diesem angeregten Singulett-Zustand ( $S_1, S_2, \dots$ ) in den energetisch günstigen Grundzustand die Spinquantenzahl (Symmetrie) wiederum erhalten bleibt, ist die Wahrscheinlichkeit dieses Übergangsprozesses hoch. Somit fällt das Elektron bereits nach ca. 80 ns in den Grundzustand zurück. Mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit erreichen Elektronen bestimmter Moleküle unter Umkehr ihres Spins einen so genannten Triplett-Zustand. Dieser Prozess wird auch Intersystemübergang genannt. Da das Erreichen des Singulett-Grundzustandes ausschließlich durch erneute Spinumkehr erreichbar ist, ist die Wahrscheinlichkeit dieses Überganges geringer. Je nach Phosphor kann die Verweildauer eines Elektrons im angeregten Triplett-Zustand bis zu mehrere Jahre betragen.

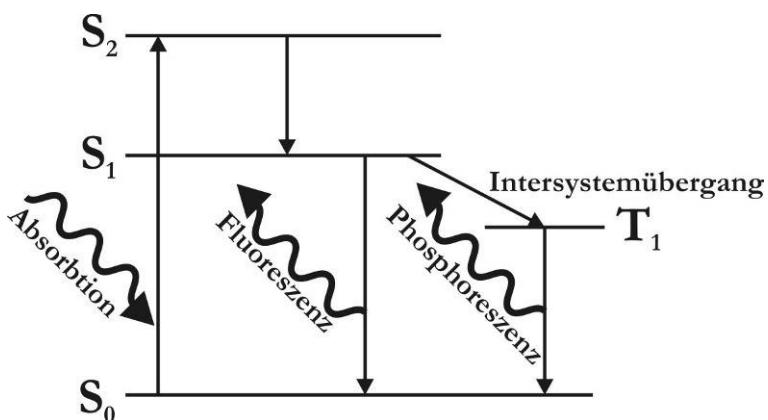


Abbildung 2-41 Darstellung der Phosphoreszenz und der Fluoreszenz im Bändermodell

Wie bereits erwähnt wird für weiße Dioden der schnelle Singulett-Singulett Übergang (Fluorophorkonversion) ausgenutzt. Dies bewirkt demnach maximal eine Phasenverschiebung des gelben Signals um ca. 80 ns. Selbst mit einer verlängerten Schaltzeit auf 80 ns ließen sich weiße Dioden nach Gleichung (2-34) noch mit einer Frequenz von 3 MHz betreiben. Der Einfluss dieser Phasenverschiebung wird in Kapitel 4.1 näher betrachtet.

Die extreme Schaltzeitverkürzung durch Leuchtdioden hat bereits zu einigen Neuerungen und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der automobilen Lichttechnik geführt.

So haben Locher et al. [Loc06] und Sivac et al. [Siv93] zeigen können, dass sich die Reaktionszeiten des nachfolgenden Verkehrs bei plötzlichen Bremsmanövern eines Vordermannes um ca. 80 ms verkürzen, wenn das Fahrzeug anstatt mit Glühlampen- mit LED-Rücklicht ausgerüstet ist. Dies entspricht bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h einem um 2 m verkürzten Anhalteweg.

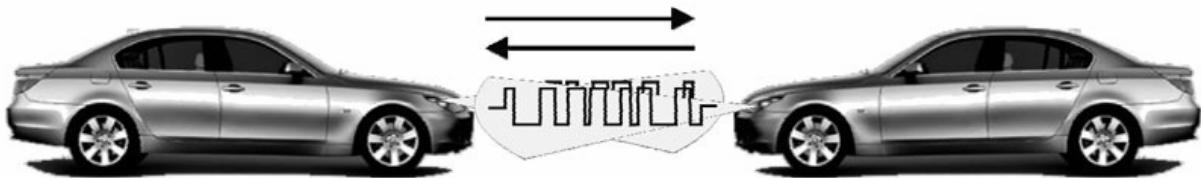


Abbildung 2-42 Gepulste Scheinwerfer zur Car2Car Kommunikation (ISLE)

In Verbindung mit einem Detektor besteht die Möglichkeit Informationen von einem Fahrzeug zum anderen zu übertragen. Hierzu wird die Information über Pulsweitenmodulation der Rück- bzw. Bremslichtfunktion an den Detektor des folgenden Fahrzeuges übertragen. Mit LED-Scheinwerfern ist eine Datenübertragung vom folgenden an das vorausfahrende Fahrzeug ebenfalls möglich. Die Arbeitsgruppe ITS (Intelligent Transport System) des 2003 gegründeten japanischen Konsortiums VLCC (Visible Light Communications Consortium) und das ISLE Konsortium (Integrated communicating Solid-state Light Engine) des 6. EU Rahmenprogramms haben bereits die Möglichkeiten dieser *Car to Car* Kommunikationsart demonstriert. Die Daimler Chrysler Forschung konnte mit einem Demonstrator zeigen, dass sich mit gepulsten Rückleuchten (Bremslichtern) Daten, wie z.B. Geschwindigkeit und Beschleunigung, über eine Distanz von bis zu 50 m (100 m) an den Folgeverkehr übertragen lassen [Moi05].

Durch die schnellen Schaltzeiten der Diode kann noch ein weiterer Effekt genutzt werden – das Dimmen über Pulsweitenmodulation. Unter der Pulsmodulation im Allgemeinen versteht man die Veränderung von Impulskenngrößen einer Impulsfolge. Pulsweitenmodulation wird im speziellen die Modulation eines Rechtecksignals in seinem Tastverhältnis genannt, d.h. es wird die prozentuale Dauer des Impulses zur gesamten Pulsdauer verändert. Die Periodendauer und die Amplitude des Signals bleiben hierbei konstant [Schi87]. Wenn über Pulsweitenmodulation gedimmt wird, ist unter einer vollen Ansteuerung das Einstellen des Tastverhältnisses auf 100 % zu verstehen. Der gedimmte Zustand wird durch das Einstellen eines Tastverhältnisses kleiner 100 % erreicht. Pulsweitenmodulation ist ein oft angewandtes Prinzip, nicht zuletzt beim Dimmen von Glühlampen. Ansteuerungen, die dieses Prinzip nutzen, werden bei vielen Kfz-Modellen sowohl für LED-Heckleuchten, als auch für Leuchten mit Glühlampen ausgelegt. Doch es existiert ein entscheidender Unterschied im Wirkprinzip der Puls-

weitenmodulation bei LEDs und Glühlampen, der sich aus den verschiedenen Schaltzeiten ergibt.

Aufgrund der langen Schaltzeit der Glühlampe kann diese dem Pulssignal nicht folgen. Es stellt sich vielmehr eine, der mittleren Leistung des Signals entsprechende, konstante Temperatur des Glühfadens und somit ein entsprechender Lichtstrom bzw. eine entsprechende Leuchtdichte ein. Die mittlere Leistung des Signals hängt vom zeitlichen Mittel des Pulses über die Periodendauer ab. Dieses zeitliche Mittel wird durch das Tastverhältnis bestimmt. So wird der Dimmefekt erreicht, während die Glühlampe kontinuierlich leuchtet. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades und der Lichtfarbe einer Glühwendel ist dieses leistungsabhängige Dimmverfahren nur bedingt anwendbar. Anders verhält es sich bei den LEDs. Im Gegensatz zur Glühlampe folgen die LEDs aufgrund ihres Schaltverhaltens der Rechteckimpulsfolge des Ansteuersignals in ihrem Lichtstrom und somit in ihrer Leuchtdichte ohne Verwaschung. Sie bilden dadurch eine diskontinuierliche Lichtquelle. Erst durch den Betrieb mit einem Pulssignal oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz wird diese Lichtquelle als kontinuierlich wahrgenommen. Dabei stellt sich ein Dimmefekt ein, da das menschliche Auge das zeitliche Mittel der Leuchtdichte nach dem Talbotschen Gesetz wahrnimmt. Nähere Ausführungen zu dem physiologischen Phänomen der Flimmerverschmelzung finden sich in Abschnitt 4.3.1. Der Dimmefekt stellt sich bei der Pulsweitenmodulation von Glühlampen auf physikalischer, beim Dimmen der LEDs auf physiologischer Ebene ein. Anhand des Beispiels für die Schlussleuchte eines Modells der Firma BMW soll das Wirkprinzip der Pulsweitenmodulation von LED-Arrays im Folgenden noch einmal verdeutlicht werden.

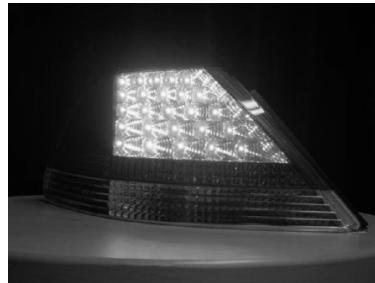
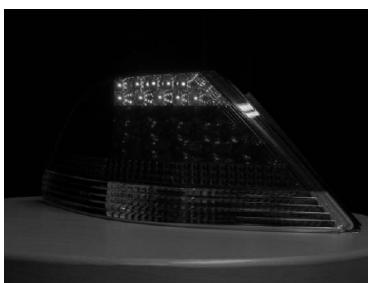


Abbildung 2-43 Schlussleuchte eines BMW mit gedimmter Rücklichtfunktion (links) und voll angesteuerte Bremslichtfunktion (rechts)

Die in Abbildung 2-43 gezeigte Schlussleuchte nutzt den oberen Teil des LED-Arrays für Schluss- und Bremslichtfunktion gemeinsam. In der linken Abbildung ist sie im Schlusslichtbetrieb, also gedimmten Zustand, zu sehen. In der rechten ist sie im Bremslichtbetrieb abgebildet, wobei alle LED voll angesteuert werden und durch Zuschaltung weiterer LED die Fläche vergrößert wird. Dem Zustand im Schlusslichtbetrieb liegt das in Abbildung 2-44 abgebildete Pulssignal zugrunde. Die Impulsfolgefrequenz beträgt etwa 80 Hz, bei einem Tastverhältnis von etwa 8 %. Die Stromamplitude liegt im Nennbereich der LED und sorgt für ein homogenes Erscheinungsbild beim Dimmen. Da die LEDs diesem Signal in ihrem Ansprechverhalten ohne weiteres folgen können, entspricht das Verhältnis des zeitlichen Mittels des

wahrgenommenen Leuchtdichtesignals zum Leuchtdichthepegel bei voller Ansteuerung dem des zeitlichen Mittels des gepulsten Ansteuersignals zur Impulsamplitude. Dieses beträgt in beiden Fällen 8%, wie die Leuchtdichtewerte  $1.300 \text{ cd/m}^2$  für Schlusslicht und  $16.000 \text{ cd/m}^2$  für Bremslicht bestätigen.

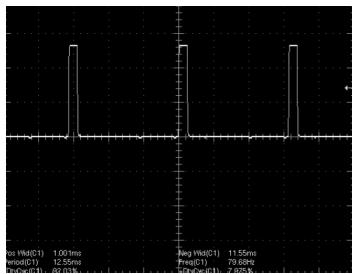


Abbildung 2-44 Ansteuerungssignal einer gedimmten Schlussleuchte

Die Pulsfrequenz übernimmt hier die Funktion, ein Signal oberhalb der Flimmerverschmelzung zu erzeugen. Der Dimmefekt stellt sich bei konstanter Stromamplitude im Nennwertbereich einzige und allein durch Verringerung des Tastverhältnisses von 100 % auf einen geringeren Wert ein. Bei einem gesetzlich vorgeschriebenen Verhältnis der Lichtstärken der Brems- und Schlussleuchte von mindestens 5:1 [ECE7] kann das Tastverhältnis des Schlussleuchtensignals maximal 20 % betragen. Wie gezeigt, liegt das Tastverhältnis in der Umsetzung jedoch unter diesem Wert.

### 3 Einsatz der gepulsten Lichtquelle in zukünftigen Scheinwerfern

Bisher wird die Möglichkeit des Pulsen hauptsächlich für Rückleuchten verwendet. Es stellt sich die Frage, ob dieses Pulsen für zukünftige Scheinwerfer neue Möglichkeiten bietet. Um der Antwort auf diese Frage näher zu kommen, werden im Folgenden aktuelle Ideen und Forschungsarbeiten zu zukünftigen Scheinwerfersystemen vorgestellt.

#### 3.1 Zukünftige Scheinwerfer

Betrachtet man die Entwicklung der Scheinwerfer, wird deutlich, dass sich die Ziele und damit auch die Motivationen für neue technische Lösungen verändert haben. Die bis heute wichtigste Funktion eines Scheinwerfers ist, den Verkehrsraum für den Fahrer möglichst so auszuleuchten, dass dieser den Fahrweg und Hindernisse rechtzeitig erkennen kann. Somit war die Aufgabe des Kfz-Lichttechnikers möglichst viel Lichtstrom auf die Straße zu projizieren. Aus dieser Zielstellung ergab sich, dass in regelmäßigen Abständen Lichtquellen mit immer größeren Lichtströmen und Leuchtdichten zum Einsatz kamen. Hatten erste Glühlampen, deren Fadentemperatur bei höchstens  $1.270\text{ }^{\circ}\text{C}$  lag, nur Leuchtdichten von  $2\text{-}3\text{ Mcd/m}^2$  und Lichtströme von  $200\text{ lm}$  (Edison-Glühlampe bei  $80\text{ W}$ ), so steigerten sich die Lichtquellen über Halogenglühlampen ( $3.200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{ Mcd/m}^2$ ,  $1.400\text{ lm}$ , H7 bei  $75\text{ W}$ ) bis hin zu heutigen Gasentladungslampen mit  $3400\text{ lm}$  Lichtstrom und Leuchtdichten von ca.  $100\text{ Mcd/m}^2$  (D2 Lampe bei  $35\text{ W}$ ).

Mit zunehmender Verkehrsdichte und heller werdenden Scheinwerfern gewann als zweite Kfz-Scheinwerferfunktion das Ausblenden des Gegenverkehrs an Bedeutung. Da Ausblenden und Ausleuchten einen klaren Zielkonflikt bilden, versucht man seitdem mit Hilfe der gegebenen technischen Möglichkeiten Kompromisse zur Lösung dieses Problems zu finden. So gab es bereits 1908 für einige Acetylyscheinwerfer eine Abblendvorrichtung, die es ermöglichte via Handhebel und Bowdenzug die Gasflamme aus dem Brennpunkt des Scheinwerfers zu bewegen. Mit den zwei Funktionen Abblend- und Fernlicht war schnell das Maximum an manuell kontrollierbaren Lichtverteilungen erreicht. Der Fahrer hat zu entscheiden, ob sich innerhalb des ausgeleuchteten Verkehrsraums blendgefährdete Objekte (i. d. R. andere Verkehrsteilnehmer) befinden und ist in diesem Fall verpflichtet, von Fern- auf Abblendlicht umzuschalten. Als Folge dessen werden nur noch Objekte unterhalb der so genannten Hell-Dunkel-Grenze (HDG) des Scheinwerfers beleuchtet, die je nach Scheinwerfer in einer Entfernung zwischen  $60\text{ m}$  und  $80\text{ m}$  liegt [Völ06]. Da in Gegenden mit Rechtsverkehr selten Verkehrsteilnehmer rechts vor dem Fahrzeug blendgefährdet sind, wurde 1957 die asymmetrische HDG eingeführt. Diese hat eine angehobene Lichtverteilung auf der rechten Seite. (Für Linksverkehr gilt das Gegenteil.) Mit den Aufgaben bei schlechten Sichtbedingungen manuell

Nebellicht (1930) zuzuschalten und die Scheinwerferneigung ladungsabhängig zu justieren (manuelle Leuchtweitenregulierung 1939), war die Grenze des von Fahrern manuell Machbaren erreicht.

Einen weiteren Entwicklungsschub erfuhren Scheinwerfer Anfang der 90er Jahre. Dies lässt sich auf den schnellen Fortschritt der Prozessortechnologien zurückführen. So ermöglichen sie zum einen das gezielte Steuern oder Regeln komplexer mechatronischer Systeme, zum anderen lassen sich Computer gestützte Simulationen, Modulationen und Optimierungen elektronischer, mechanischer und optischer Komponenten immer schneller und präziser durchführen. Diese mechatronischen Scheinwerfer werden, gestützt durch Fahrzeugsensorik, automatisch an die jeweilige Situation angepasst. Erste Anwendungen sind die dynamische und automatische Leuchtweitenregelung, das Mitführen des Fernlichtanteils in Kurvenfahrten (dynamisches Kurvenlicht) oder das seitliche Ausleuchten bei Abbiegevorgängen (statisches Kurvenlicht). Frühere Versuche hierzu mussten aufgrund fehlender Mess- und Regelungstechnik 1918 von Cadillac und 1967 von Citroen eingestellt werden.

Zu diesen so genannten AFS-Funktionen (adaptive front lighting system) kamen im Jahr 2006 weitere automatisch zugeschaltete AFS-Scheinwerferlichtverteilungen hinzu. Diese sind neben den klassischen Abblend-, Fern- und Nebellichtfunktionen zusätzlich Autobahn-, Schlechtwetter- und Stadtlicht. Um den prozentualen Anteil der Fahrten mit Fernlicht zu erhöhen hat BMW 2005 den Fernlichtassistent mit kamerabasierter, automatischer Abblendfunktion bei entgegenkommendem oder vorausfahrendem Verkehr als zusätzliche mechatronische Lichtfunktion eingeführt. Kuhl et al. haben 2006 ein Scheinwerfersystem vorgestellt, das nicht nur dynamisch horizontalen Kurven, sondern auch vertikalen Kuppen und Wannen folgt [Kuh06]. Dieses Kuppen- und Wannenlicht wird in Zukunft das dynamische Scheinwerferschwenksystem komplettieren.

Trotz all dieser neuen Lichtfunktionen wird, außer bei Fernlicht, ein großer Bereich der Szenerie abgedunkelt, um eventuelle Blendungen zu vermeiden. Deshalb schlagen viele Autoren [Kau06] [Ros05] [Wal98] [Wal05] [Wör07] eine direkt adressierbare Lichtverteilung vor. Diese dynamische Lichtverteilung schaltet gezielt nur die auszublenden Objekte dunkel und hält die Fernlichtperformance für die restliche Szenerie aufrecht. Zusätzlich wird durch Anleuchten oder Anblitzen auf gefährliche Objekte im Fahrschlauch aufmerksam gemacht.

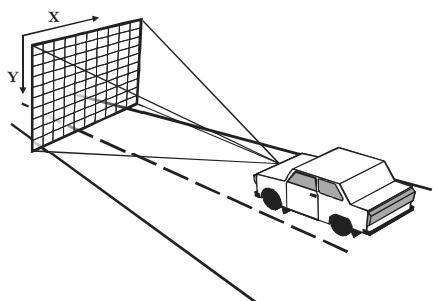


Abbildung 3-1 Adressierbarer Scheinwerfer

Neben der Umfeldsensorik, um Gefahrenobjekte, Verkehrsteilnehmer und Straßenverläufe zu identifizieren und zu klassifizieren [Ros05], ist für zukünftige Scheinwerfer demnach eine hochdynamische und hoch auflösende Beleuchtungsoptik notwendig. In den Entwicklungslaboren wird daher an verschiedenen aktiven Scheinwerferkonzepten gearbeitet. Eine umfangreiche Analyse dieser Systeme findet sich in [Kau06].

Die in den folgenden Abschnitten (3.1.1-3.1.2) beschriebenen, mit konventionellen Leuchtmitteln ausgestatteten Leuchtenkonzepte scheinen die zukunftsträchtigsten zu sein.

### 3.1.1 Konzepte mit Halogenglühlampen

Der scannende Scheinwerfer verwendet einen Raumwinkelanteil der Abstrahlung der Lampe, um über einen Freiformreflektor die statische, also unveränderliche Grundlichtverteilung, zu erzeugen. Ein zweiter Lichtstromanteil wird über ein scannendes, im Wesentlichen aus zwei senkrecht zueinander stehenden oszillierenden Spiegeln bestehenden, System in den dynamischen Beleuchtungsraum projiziert. Durch schnelles Scannen mit dem Lichtspot kann so nahezu jede beliebige Lichtverteilung „geschrieben“ werden [Kau04] [Goe05].

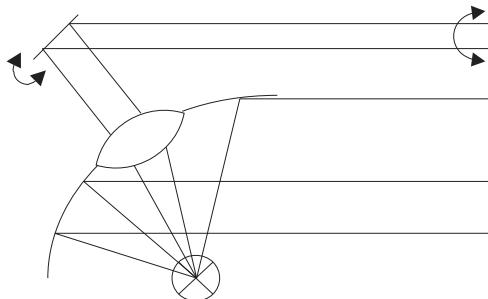


Abbildung 3-2 Prinzipielle Funktionsweise eines scannenden Scheinwerfers

### 3.1.2 Konzepte mit Gasentladungslampen

#### 3.1.2.1 Halogenmetalldampflampe

Auf dem Prinzip des Projektionmoduls [Bon21] aufbauend, wird die von einem Polyellipsoid ausgeleuchtete Blendenebene variabler gestaltet. Hierbei reichen die Überlegungen von einer Blendenwalze, dem so genannten VarioXenon-Modul [Eic98], bei dem unterschiedliche Mantelflächen einer Walze die AFS-Lichtverteilungen wiedergeben, bis hin zu einzeln verstellbaren Blendensegmenten. Dadurch entstehen Einzelschatten, die in die Szenerie fahren und andere Verkehrsteilnehmer ausblenden. Durch die Kombination dieses Systems mit einem Kur-

venlichtschwenkmodul kann mit einer minimalen Blendenzahl gearbeitet werden, da die Schatten dem Objekt bei der Vorbeifahrt nachgeführt werden.

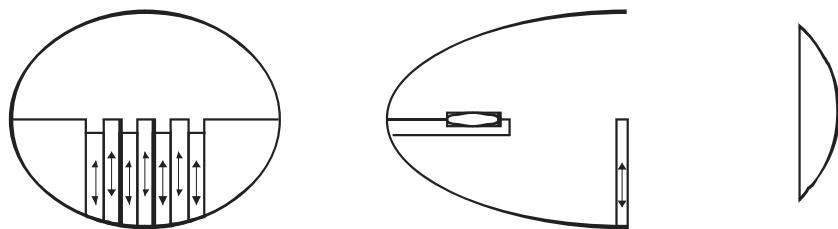


Abbildung 3-3 Scheinwerfer mit hoch dynamischer Blende

### 3.1.2.2 Kurzbogenlampe

Mit Gasentladungslampen lässt sich ein weiteres Prinzip realisieren, das noch effizienter mit Kurzbogengasentladungslampen arbeitet. Hierbei wird der Lichtstrom der Lichtquelle auf eine dynamisch variierbare Oberfläche projiziert. Diese Oberfläche besteht aus einer Vielzahl (0.5-1Mio) von Mikrospiegeln. Diese werden einzeln digital zwischen zwei Endlagen geschaltet. Das Digitalspiegelbauteil (Digital Mirror Device = DMD) wird anschließend über eine Projektionsoptik in den Verkehrsraum abgebildet. Je nach Spiegelstellung wird der Lichtstrom des Spiegels durch die Optik oder auf einen Absorber gelenkt. Die Abbildung eines Spiegels erscheint somit entweder hell oder dunkel [End99].

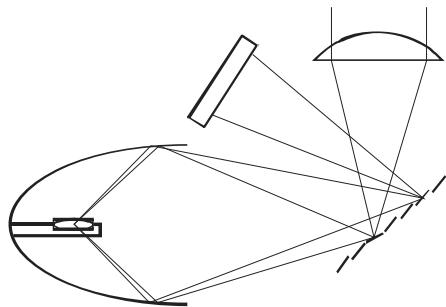


Abbildung 3-4 Scheinwerfer auf DMD-Basis

Betrachtet man die Entwicklung der Scheinwerfer, wird deutlich, dass eine neue Lichtquelle als alleinige Innovation bisher nicht den Markt erobert hat. Die Lichtquelle selbst spielt für neue Systeme zwar eine entscheidende Rolle, aber es sind diese Systeme und ihre neuen Lichtfunktionen, die die tatsächliche Innovation bringen. Soll sich eine neue Lichtquelle wie die LED durchsetzen, muss sie nicht nur eine alte Lichtquelle ablösen, sie muss zusätzlich neue Möglichkeiten bieten, ohne alte Funktionalitäten zu vernachlässigen.

### 3.1.3 Visionen mit LED Technologie

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten subtraktiven Systemen, bei denen durch bewegliche Elemente Licht einer kontinuierlich leuchtenden Lichtquelle abgeblendet wird, bieten LEDs oder LED-Arrays die Möglichkeit, Licht nur dort abzubilden, wo es beleuchtet und nicht blendet. Im Rahmen des BMBF Projektes „NanoLux – mehr Licht mit weniger Energie“ wird unter anderem von der Firma Hella KGaA Hueck & Co. und der Audi AG ein Scheinwerfer aufgebaut, der als Lichtquelle ein von OSRAM GmbH entwickeltes LED-Array besitzt. Durch die Projektion dieses Arrays in den Verkehrsraum kann jedem einzelnen LED-Chip ein Raumwinkel zugeordnet und adressiert werden.



Abbildung 3-5 Frei adressierbare Lichtquelle (Mitte) Projektion einer Fernlichtfunktion (links) Projektion einer Abblendlichtfunktion (rechts)

## 3.2 Möglicher Einsatz gepulster LEDs in zukünftigen Scheinwerfern

Im nachfolgenden Kapitel soll ausgehend von der Tatsache der schnellen Pulsmodulierbarkeit von LEDs gezeigt werden, welche Möglichkeiten sich aus einer neuen adressierbaren Lichtquelle ergeben.

### 3.2.1 Grundprinzip

Wie bereits erläutert, ist die maßgeblich leistungsbegrenzende Größe einer LED die mittlere Verlustleistung, resultierend in einer Junctiontemperatur, die eine thermische Degradation des Halbleiterchips verursacht. Im Umkehrschluss heißt dies, dass, vorausgesetzt die Verlustleistung führt nicht zu einer Überhitzung der LED, die elektrische Leistung und somit die Strahlungsleistung beliebig innerhalb eines Pulses verteilt werden kann. Zudem darf der Impuls nicht beliebig kurz und somit beliebig stark bei gleicher mittlerer Leistung sein, da dies ansonsten zu einer Zerstörung der LED durch zu hohe Stromdichten führen kann. In Abbildung 3-6 sind einige Impulse der gleichen Energie aufgezeigt.

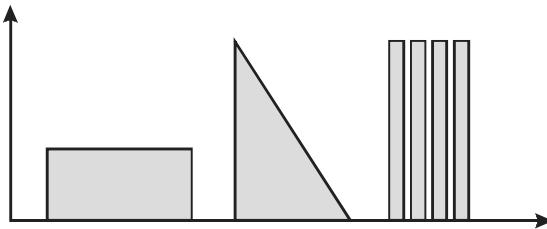


Abbildung 3-6 Impulse gleicher Energie

Demnach ist es möglich, die Strahlungsenergie einer LED auf die Zeit zu verteilen. Wenn es gelingt, die zeitlich aufgelöste Strahlungsleistung in eine örtlich aufgelöste zu transformieren, lässt sich über das zeitliche Modulieren der Pulse die Lichtverteilung variieren.

### 3.2.2 Transformation Zeitliche in Örtliche

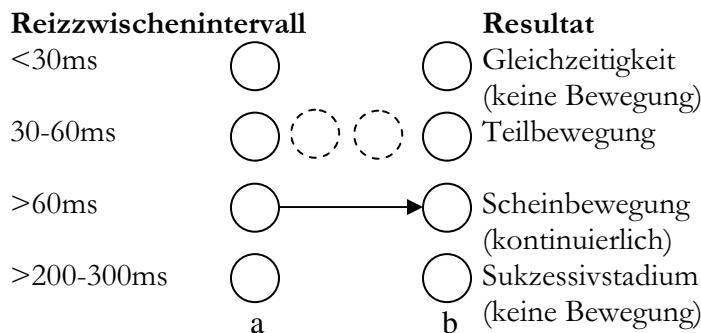


Abbildung 3-7 Nach Goldstein [Gol02] hängt die Wahrnehmung der Scheinbewegung von dem Zeitintervall ab.

Um die zeitliche Auflösung der Lichtquelle in eine örtliche umzuwandeln, kann man sich das menschliche Wahrnehmungssystem zu nutze machen, das aufgrund seiner endlichen Integrationszeit über visuelle Reize, alle Reize innerhalb eines endlichen Zeitintervalls als gleichzeitig empfindet und die Information als eine mittlere über dieses Intervall aufnimmt. Genaueres hierzu wird in dem Kapitel 4.3.1 beschrieben.

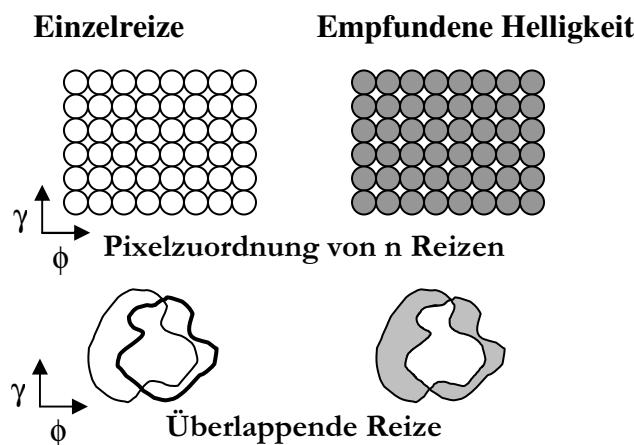
Wird also der Lichtstrom  $\Phi$  einer Lichtquelle durch ein variables optisches System abwechselnd in Richtung der Zustände a und b gelenkt (Abbildung 3-7), so werden diese Zustände ab einem Reizzwischenintervall kleiner 30 ms als zeitgleich wahrgenommen [Gol02] [Roc98]. Die dabei empfundene Helligkeit ergibt sich nach dem Talbotschen Gesetz aus der über die gesamte Periode gemittelten Leuchtdichte dieser Zustände. Bei einer ausreichend hohen Frequenz bestimmt somit das Reizintervallverhältnis der Einzelreize die empfundene Helligkeit.

Reizintervallverhältnis		Resultat
$a/b < 1$		a dunkler b
$a/b = 1$		gleiches Hellempfinden
$a/b > 1$	 a	b a heller b

Abbildung 3-8 Helligkeitseindruck zweier periodisch wechselnder Reize (Frequenz liegt über der Flimmerverschmelzungsfrequenz)

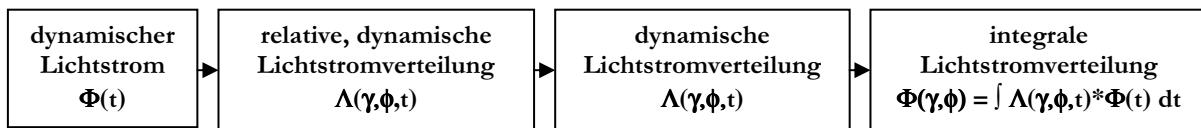
Erweitert man die Anzahl der Zustände von 2 (a und b) auf n Zustände, so werden auch diese als zeitgleich wahrgenommen, sofern das Intervall zwischen Reiz 1 und Reiz n kleiner 30 ms ist. Hier gibt das Verhältnis der Reizintervalle zur Gesamtperiode  $T_{1-n}$  die einzelnen Helligkeitseindrücke wieder.

Die einzelnen Reize können als diskrete Pixel einer jeweiligen Koordinate  $\gamma, \phi$  zugeordnet sein. In diesem Fall bestimmt die jeweilige Reizperiode die empfundene Pixelhelligkeit. Bei sich überlappenden Einzelreizen wird die Pixelhelligkeit aus der integrativen Helligkeit der Einzelreize über der Koordinate  $\gamma, \phi$  vorgegeben.



Unter der Voraussetzung, dass jeder Zustand  $n$  insgesamt  $m$  verschiedene Reizintervalle unterschiedlicher Länge einnehmen kann, ergibt sich für die somit erreichbaren Gesamtstreuze eine Kombinationsmöglichkeit der  $n$  Reize von  $m^n$ .

Da die Einzelreize durch das periodische Projizieren des Lichtstroms einer Lichtquelle entstehen, können sie entweder durch verschiedene aufeinander folgende Einzellichtquellen oder durch verschiedene periodische Projektionszustände des optischen Systems erzeugt werden. Bei der Variante der unterschiedlichen Zustände wird der Lichtstrom einer Lichtquelle auf die verschiedenen Reize über das Produkt aus Reizdauer und jeweiligen Lichtstromintensität verteilt. Somit lässt sich der Gesamtlichtstrom auf die einzelnen Pixel  $\gamma, \phi$  verteilen, indem die Intensität einer Lichtquelle über Pulsmodulation der jeweiligen relativen dynamischen Lichtstromverteilung zum Zeitpunkt  $t$  zugeordnet wird. Es ist möglich, die integrale Gesamtlichtstromverteilung einzig durch das Ansteuern der Lichtquelle zu steuern, sofern diese synchron zu den periodisch wiederkehrenden Lichtstromverteilungen geschaltet wird. Dadurch gelingt es, die zeitliche Auflösung der Lichtquelle in eine örtliche Auflösung der Lichtverteilung umzuwandeln.



### 3.2.3 Offene Fragen

Nach den vorangegangenen Überlegungen scheint es möglich, den Lichtstrom einer gepulsten LED durch die Synchronisation mit einer periodisch variablen Optik zu verteilen und damit eine adressierbare Scheinwerferlichtverteilung zu erzeugen.

Aus dem erstmaligen Einsatz gepulster Scheinwerferlichtquellen ergeben sich mehrere Fragen, die für den Einsatz im Straßenverkehr geklärt werden müssen. Diese Fragen werden in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels formuliert.

Es stellt sich die Frage, ob ein gepulster Scheinwerfer stärker blendet als ein ungepulster Scheinwerfer mit gleichen mittleren lichttechnischen Eigenschaften. Das Talbotsche Gesetz besagt, dass der Helligkeitseindruck einer gepulsten Lichtquelle dem zeitlichen Mittel der Leuchtdichte entspricht. Demnach ist zu vermuten, dass auch die Blendwirkung dieser Lichtquelle durch die mittlere Leuchtdichte beschrieben werden kann. In Kapitel 0 wird dieser Frage auf den Grund gegangen.

Innerhalb der letzten Jahre wurden verstärkt gepulste LEDs in Kfz-Rückleuchten eingesetzt. Obwohl die Pulsfrequenz dieser oberhalb der Flimmerverschmelzung liegt, und somit im Normalfall der Betrachtung einer solchen Lichtquelle eine kontinuierliche Leuchte wahrgenommen wird, tritt in bestimmten dynamischen Fällen ein physiologischer Effekt auf, der einen frequenzabhängigen Charakter hat. Er wurde in nächtlichen Verkehrssituationen und in der Dämmerung schon häufig bei Schulterblick und Blickbewegungen vorbei an Schlussleuchten, und als Flimmern beim Blick auf Schlussleuchten während Rüttelbewegungen, hervorgerufen durch unebenen Straßenbelag, beobachtet. Tagsüber ist er nur sehr selten zu beobachten. Abgesehen davon, dass Schlussleuchten meist erst ab der Dämmerung eingeschaltet sind, gibt es dafür noch andere Gründe. Es ist bemerkbar, dass die Designs, die schmale, linienförmige, vertikale Anordnungen von LEDs benutzen, besonders auffällig sind. Beispiele hierfür sind der Cadillac STS und SRX sowie der Peugeot 307cc. Der Effekt ist auch in Haushalten an Geräten wie Elektroherden oder Waschmaschinen mit eingebauten LEDs zu beobachten. Diese LEDs werden mit der normalen 50 Hz Netzspannung betrieben, wobei nur eine Halbwelle der Wechselspannung in Durchlassrichtung anliegt. Pulsweitenmodulation wird in der Kfz-Technik auch beim Dimmen von Glühlampen genutzt, wenn Schluss- und Bremslichtfunktion realisiert werden sollen. Hierbei tritt der Effekt allerdings nicht auf. Im Folgenden soll der Effekt, mit Bezug auf sein Erscheinungsbild, als Perl schnureffekt bezeichnet werden. Abbildung 3-9 zeigt, wie er beispielsweise in Verkehrssituationen mit gepulsten LED-Schlussleuchten auftreten und beobachtet werden kann.



Abbildung 3-9 Perlschnureffekt bei gepulstem Rücklicht

Um diesen Effekt bei Scheinwerfern zu vermeiden sollen folgende Fragen in Kapitel 4.3.2 beantwortet werden:

- Warum kommt es bei gepulsten LED Rückleuchten zum Perlschnureffekt, obwohl die Flimmerverschmelzungsfrequenz deutlich überschritten ist?
- Kann dieser Effekt auch bei gepulsten Scheinwerfern auftreten?
- Wenn ja, wie kann er verhindert werden?

Wie in Kapitel 2.3.2.3 beschrieben, wird bei weißen LEDs häufig die Strahlung einer blauen LED durch gelbe Konversionsstoffe in weißes Licht umgewandelt. Da für die angestrebte Anwendung hohe Pulsfrequenzen nötig sind, wird in Kapitel 4.1 untersucht:

- Welchen Einfluss hat die Leuchtstoffkonversion auf die Schaltzeiten der weißen Dioden?

Eine Annahme aus dem diskutierten Grundprinzip ist, dass im Pulsbetrieb die thermische Verlustleistung und damit verbundene Temperaturen denen im Konstantstrombetrieb entsprechen. In Kapitel 4.2 werden daher durch analytische Betrachtungen und Simulationen folgende Aspekte untersucht:

- Wie verhalten sich Junctiontemperatur und thermische Widerstände einer gepulsten Halbleiterdiode?
- Lässt sich aus gepulsten LEDs bei gleicher umgesetzter elektrischer Leistung mehr Licht generieren als aus ungepulsten?

## 4 Untersuchungen zu pulsmodulierten LEDs

### 4.1 Phasenverschiebung durch Fluoreszenz

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben entsteht durch den Einsatz von fluoreszierenden Stoffen zur Erzeugung des Gelbanteils eine Phasenverschiebung der konvertierten Photonen. Da diese Verschiebung einen entscheidenden Einfluss auf die maximale LED-Frequenz hat, soll mit folgenden Untersuchungen ein mögliches Nachleuchten der LEDs analysiert werden.

#### 4.1.1 Messprinzip

Um den Einfluss des Fluoreszenzfarbstoffs zu untersuchen, ist es zweckdienlich, die spektral aufgelöste Sprungantwort der weißen LED auf einen Stromsprung zu vermessen. Hierzu wurde ein Messaufbau nach dem Schema der Abbildung 4-1 realisiert.

Über einen Impulsgenerator I werden synchron ein zweiter Impulsgenerator II, ein Pulser und ein PC getriggert. Das Ausgangssignal des Impulsgenerators II schaltet die LED mit einer Pulsweite von  $50,5 \mu\text{s}$  und einer Frequenz von  $19,8 \text{ kHz}$ . Über eine Sammellinse gelangt das gepulste Licht der LED in einen Monochromator, der das Licht in seine spektralen Bestandteile zerlegt. Nachdem dieses ein elektronisches Gate passiert hat, wird es mit einer CCD-Zeile vermessen, wobei jedem Pixel des Detektors ein bestimmter Wellenlängenbereich zugeordnet ist. Das Gate zwischen Monochromator und Detektor wird durch den Pulser während der on-Flanke geöffnet und mit der off-Flanke geschlossen. Über ein zwischengeschaltetes Oszilloskop werden die Signale des Impulsgenerators II und des Pulsers überwacht. Über die Phasenverschiebung des Pulsers zum Impulsgenerator II kann nun ein Auslesefenster über die Sprungantwort der Diode verschoben werden. Dabei gibt die Breite der Pulsdauer des Pulsers die Integrationszeit einer Einzelmessung an. Durch längere Integrationszeiten des Detektors lässt sich die Messempfindlichkeit der Apparatur erhöhen, da der Detektor in den Messpausen durch das Gate dunkel geschaltet ist und somit nur mehrere Einzelmessungen zu einer Gesamtmessung aufintegriert werden.

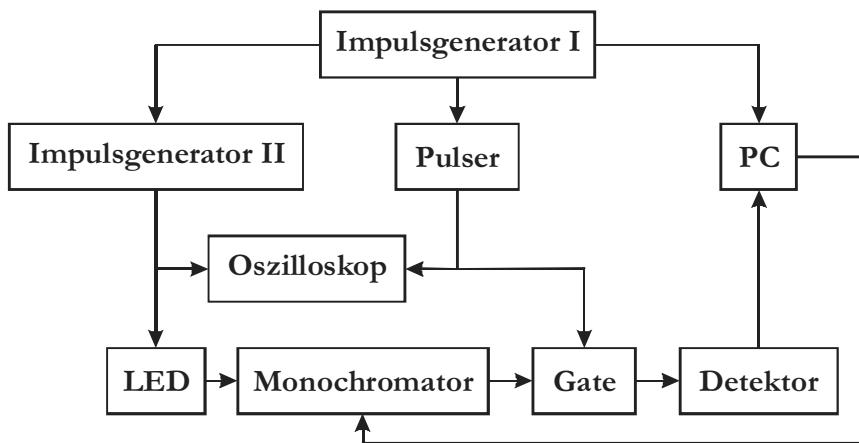
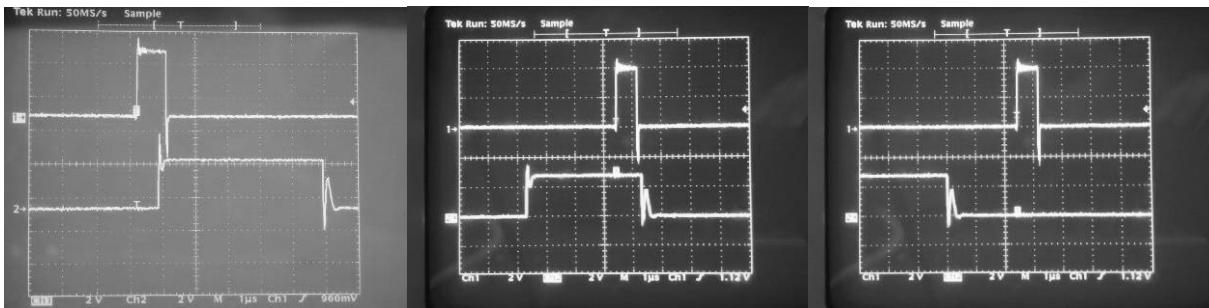


Abbildung 4-1 Messprinzip zur Ermittlung der wellenlängenaufgelösten LED-Sprungantwort

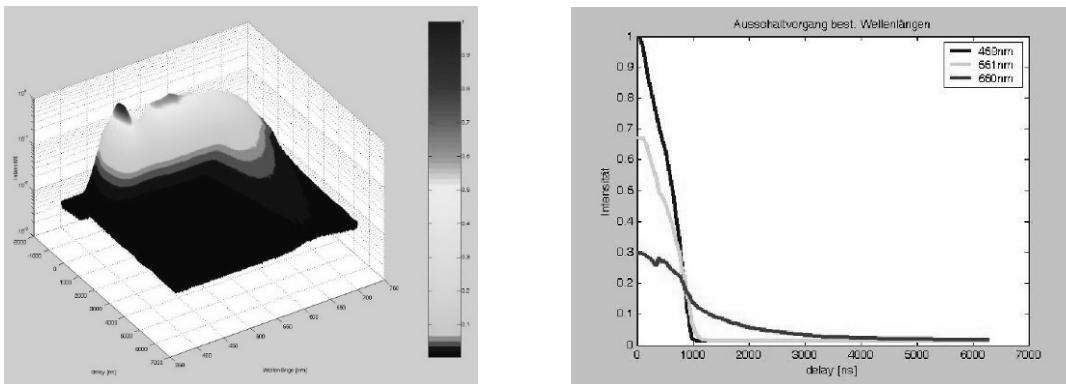
Die Oszilloskopaufnahmen (Abbildung 4-2) zeigen in der unteren Bildhälfte den Impuls des Generators II, also den Ansteuerstrom der LED. In der oberen Bildhälfte ist der Impuls dargestellt, der das Gate des Monochromators erreicht. Dieser stellt die Integrationszeit einer Einzelaufnahme dar. Es wird deutlich, dass das Auslesefenster, das über den Impuls geschoben wird, eine deutlich endliche Größe besitzt. Dies hat zur Folge, dass nicht die Sprungantwort der LED vermessen wird, sondern die Faltung dieser mit dem Auslesefenster.



**Abbildung 4-2 Oszilloskopanzeigen der LED-Vermessung (oben: Auslese-Gate, unten: LED-Ansteuerung)**

#### 4.1.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

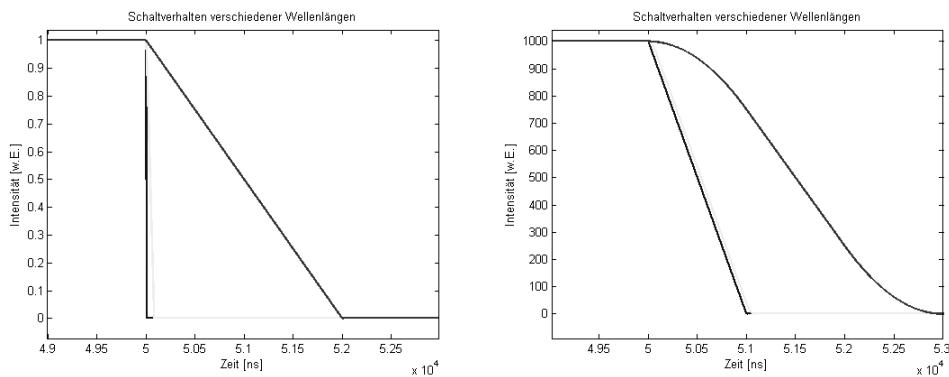
In Abbildung 4-3 sind die ermittelten Daten in einem dreidimensionalen Koordinatensystem dargestellt. Die Fläche des Koordinatensystems wird durch die einzeln vermessenen Wellenlängenbereiche und die Zeitachse aufgespannt. Auf der logarithmisch skalierten z-Achse ist die jeweils ermittelte Intensität dargestellt. Es ist das typische Spektrum einer leuchtstoffkonvertierten weißen LED mit der blauen Diodenstrahlung und der gelben Fluoreszenzstrahlung zu erkennen. Weiterhin kann ein nahezu linearer Abfall der kurzweligen (um 460nm) und der mittelwelligen (um 550nm) Intensitäten innerhalb einer Mikrosekunde beobachtet werden. (Abbildung 4-3 rechts) Die langwellige Strahlung (um 650nm) hat eine wesentlich längere Abklingkurve. Diese erreicht erst nach ca. drei Mikrosekunden das Nullniveau.



**Abbildung 4-3 Wellenlängenaufgelöste Sprungantwort einer weißen LED**

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den Ergebnissen um das Faltungsintegral aus Auslesefenster und tatsächlichem zeitlichen Verhalten der optischen Strahlung.

Um zu analysieren, welche tatsächlichen Schaltzeiten auftreten, seien drei hypothetische lineare Ausschaltvorgänge diskutiert. Aus Kapitel 2.5 sind eine kurze Schaltzeit von 5ns, die die Schaltzeiten einer Diode simuliert, und eine Abklingkurve von 80ns, die der theoretischen Aufenthaltszeit eines Elektrons auf einem angeregten Orbital entspricht, interessant. Eine Faltung dieser zwei angenommenen Abklingfunktionen mit einem  $1\mu\text{s}$  breiten Abtastfenster entspricht etwa den gemessenen Ergebnissen von 450nm und 550nm. Um jedoch das Ergebnis bei 650nm nachzubilden, muss eine wesentlich längere Abklingkurve von mindestens 2000ns angenommen werden. (Abbildung 4-4)



**Abbildung 4-4 Simulierte Sprungantwort (5ns, 80ns, 2000ns) und aus der Faltung zu erwartendes Messergebnis**

Die Ergebnisse der Messung bestätigen die von Schubert [Schu06] beschriebenen Zeitkonstanten der Dioden von wenigen Nanosekunden. Außerdem spiegeln sich die erwarteten kurzen Verweildauern des Singulett-Singulett Überganges für die Fluorophorkonversion in der Sprungantwort der Wellenlängen zwischen 500 nm und 600 nm wider. Überraschend sind die bis zu 2000 ns andauernden Sprungantworten der langwelligen Strahlung um 650 nm. Es ist anzunehmen, dass hier Elektronen des Leuchtstoffes in Triplettzustände übergehen. Unter Berücksichtigung dieser Erscheinung ergibt sich nach Gleichung ( 2-34 ) eine 3 dB Grenzfrequenz von 135 kHz. Zur Datenübertragung mit weißen LEDs sollten demnach diese 135 kHz nicht überschritten werden.

## 4.2 Thermodynamik gepulster LEDs

### 4.2.1 Thermisches Ersatzschaltbild

Um den Einfluss des Pulsbetriebes der LED auf die thermischen und lichttechnischen Vorgänge zu analysieren, wird im Folgenden, aufbauend auf dem thermischen Ersatzschaltbild und den temperaturabhängigen Kennlinien der Diode, das Pulsverhalten analysiert.

Wie bereits in Kapitel 2.3.4.1 erörtert, wird nach Mahlkow [Mah06] die thermische Verlustleistung der LED im thermodynamischen Gleichgewicht über die Übergangswiderstände von der Sperrsicht zur Wärmesenke ( $R_{thJH}$ ) und von der Wärmesenke zur Umgebung ( $R_{thHA}$ ) an die Umgebung ( $T_A$ ) übertragen. Daraus ergibt sich folgendes thermisches Ersatzschaltbild (ESB) (ESB).

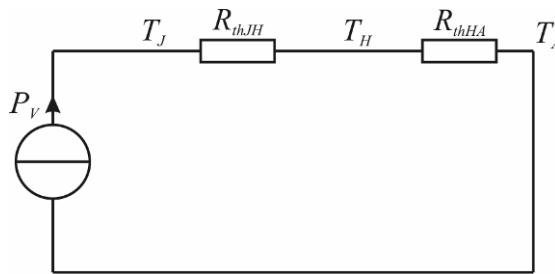


Abbildung 4-5 Statisches thermisches ESB

Zur Untersuchung des zeitlichen Verhaltens von Temperatur und Strahlungsleistung reicht dieses statische ESB nicht aus. Hierfür ist das dynamische ESB notwendig.

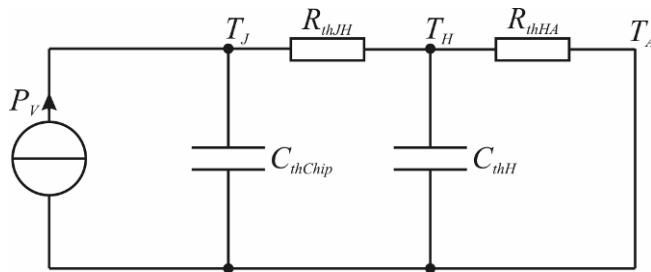


Abbildung 4-6 Dynamisches thermisches ESB

Mit Einführung der thermischen Kapazitäten können die zeitlichen Vorgänge in der LED untersucht werden. In diesem Fall sind die thermischen Kapazitäten des Chips ( $C_{thChip}$ ) und der Wärmesenke ( $C_{thH}$ ) zu berücksichtigen. Die thermische Kapazität gibt an, wie viel Wärme der jeweilige Abschnitt aufnehmen kann, bis das Material vollständig thermisch leitend ist. In der LED bedeutet dies: Wird in der Sperrsicht die Verlustleistung  $P_V$  erzeugt, wird zunächst der Chip aufgeheizt. Ist dieser „thermisch gesättigt“, muss er den kompletten Wärmestrom über seinen thermischen Widerstand in die Wärmesenke abführen. Sobald diese ebenfalls vollstän-

dig aufgeheizt ist, befindet sich die LED im thermischen Gleichgewicht und das ESB entspricht Abbildung 4-5. Das ESB zur Untersuchung der LED ist somit vollständig.

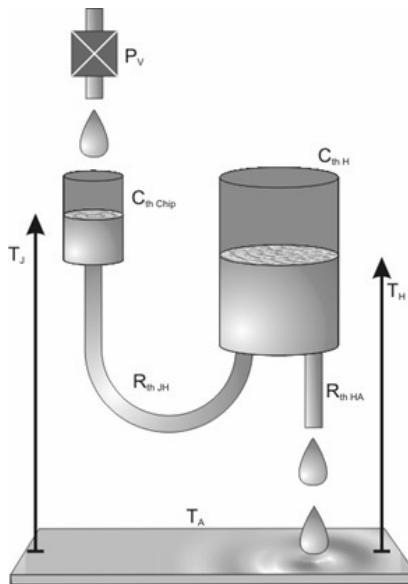


Abbildung 4-7 Dynamisches thermisches ESB (anhand von Hydraulik)

Das gleiche Ersatzschaltbild lässt sich auch hydraulisch verdeutlichen (Abbildung 4-7). Die Verlustleistung ist dann eine Flüssigkeit, die tropfenweise (gepulst) über ein Ventil in den LED-Chip geleitet wird. Die Wärmekapazitäten des Chips und der Wärmesenke werden durch Flüssigkeitsreservoirs und die Widerstände zwischen Chip und Wärmesenke, bzw. Wärmesenke und Umfeld werden durch Rohrverbindungen repräsentiert. Beim sprunghaften Einschalten des Ventils passiert folgendes: Ein Teil der Verlustleistung wird zunächst von der LED „geschluckt“ und führt zum Auffüllen (Aufheizen) des ersten Reservoirs. Die restliche Leistung entweicht durch den ersten Widerstand und füllte (heizt) die Wärmesenke. Von dort „läuft“ die Verlustleistung über den zweiten Widerstand (Rohrverbindung) in die Umgebung ab. Die Höhe der einzelnen Flüssigkeitspegel spiegelt die Temperaturen wieder.

#### 4.2.1.1 Bestimmung der Parameter

##### 4.2.1.1.1 Thermische Widerstände

Alle weiteren Untersuchungen werden im Folgenden exemplarisch anhand des Beispiels der Golden Dragon® von OSRAM Opto Semiconductors durchgeführt. Zur Bestimmung der thermischen Widerstände sind die Datenblattangaben des Herstellers [DB06] für die folgenden Untersuchungen ausreichend genau. Der angegebene Wert beträgt:

$$R_{thJA} = 15 \text{ K/W} \quad (4-1)$$

Da hier lediglich der Gesamtwiderstand von der Sperrsicht zur Umgebung angegeben ist, muss dieser noch entsprechend dem ESB aus Abbildung 4-5 aufgeteilt werden. Untersuchungen der Einzelwiderstände ergaben Werte von 2-3K/W [Mah06] für den thermischen Widerstand von der Sperrsicht zur Wärmesenke. Die Angaben sind ebenfalls ausreichend genau, da das Verhalten maßgeblich durch den Widerstand Wärmesenke-Umgebung bestimmt wird. Die Parameter der Widerstände lauten also:

$$R_{thJH} = 3 \text{ K/W} \quad (4-2)$$

$$R_{thHA} = 12 \text{ K/W} \quad (4-3)$$

##### 4.2.1.1.2 Thermische Kapazitäten

Zur vollständigen Beschreibung des ESB fehlen nun noch die thermischen Kapazitäten des Chips und der Wärmesenke. Deren Berechnung erfolgt über:

$$C_{th} = m \cdot c \quad (4-4)$$

Hier steht  $c$  für die spezifische Wärmekapazität und  $m$  für die Masse. Da sich die Masse als Multiplikation der spezifischen Masse  $\rho$  mit dem Volumen  $V$  berechnet, ergibt sich die thermische Kapazität:

$$C_{th} = \rho \cdot V \cdot c \quad (4-5)$$

Die Größen  $\rho$  und  $c$  sind spezifische Stoffeigenschaften. Das Volumen des Chips folgt aus dessen Geometrie. Abbildung 4-8 zeigt eine Mikroskopaufnahme des verwendeten LED-Chips.

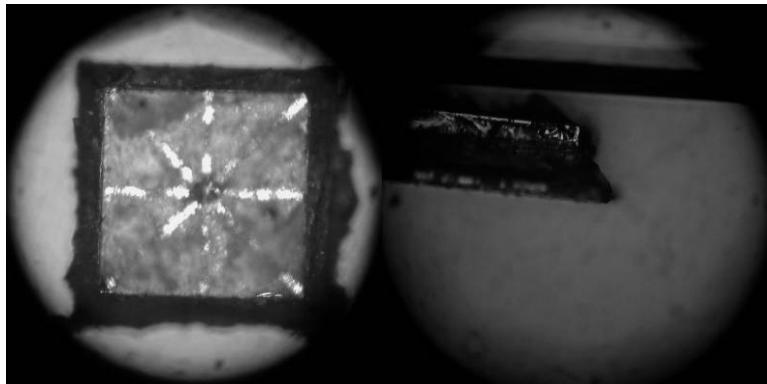


Abbildung 4-8 Oberseite des Chips mit Anschlusspunkt des Bonddrahtes (links) und im Profil (rechts)

Die Abmessungen des Chips entsprechen Abbildung 4-9.

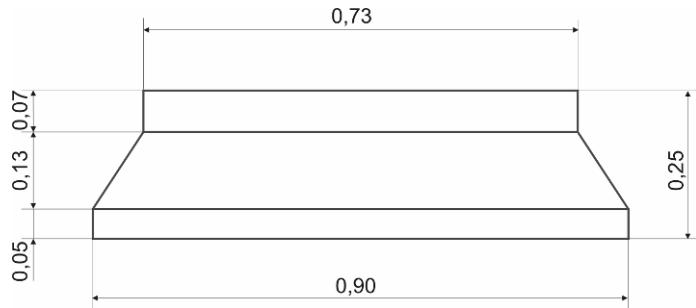


Abbildung 4-9 Maße des Chips in mm

Damit beträgt das Volumen:

$$V_{Chip} = 0,16447 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \quad (4-6)$$

Aus der Annahme, dass der Chip großteils aus Gallium (Ga) besteht, resultieren die Stoffdaten  $\rho_{Ga} = 5,907 \text{ g/cm}^3$  und  $c_{Ga} = 0,37 \text{ J/gK}$ . Die thermische Kapazität des Chips ist somit:

$$C_{thChip} = \rho_{Ga} \cdot V_{Chip} \cdot c_{Ga} = 0,0003595 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (4-7)$$

Ebenso lässt sich mit der Wärmesenke verfahren. Unter dem Mikroskop entstanden die Aufnahmen in Abbildung 4-10.

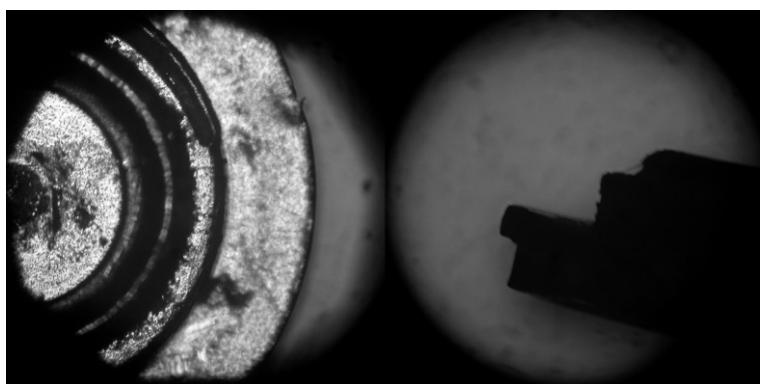


Abbildung 4-10 Wärmesenke von oben (links) und im Profil (rechts)

Im linken Bild ist die Reflektorwanne, in die der Chip eingeklebt ist, gut zu erkennen. Der große Querschnitt am unteren Ende dient der besseren thermischen Kopplung an das umgebende Medium. Für die Wärmesenke ergeben sich folgende Abmessungen:

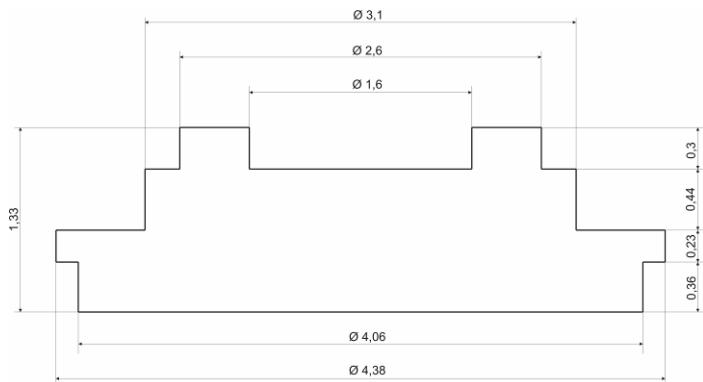


Abbildung 4-11 Bemaßung der Wärmesenke in mm

Das Volumen beträgt  $V_H = 12,4367 \cdot 10^{-9} m^3$ .

Das hier angenommene Kupfer (Cu) besitzt die Stoffdaten  $\rho_{Cu} = 8,92 g/cm^3$  und  $c_{Cu} = 0,385 J/gK$ . Daraus resultiert die thermische Kapazität

$$C_{thH} = \rho_{Cu} \cdot V_H \cdot c_{Cu} = 0,04276 \frac{J}{K} \quad (4-8)$$

Somit sind alle Parameter bestimmt und das vollständige dynamische thermische ESB kann wie folgt beschrieben werden:

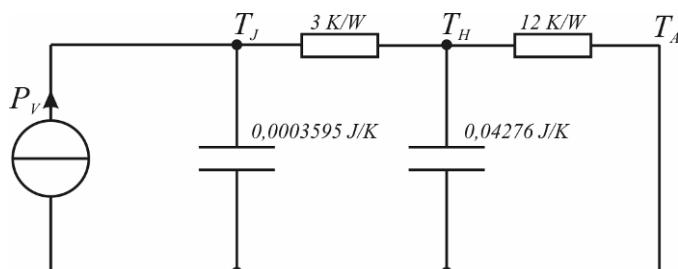


Abbildung 4-12 Dynamisches thermisches ESB mit Parametern

Mit diesem Modell ist es möglich Simulationen des Temperaturverhaltens von LEDs durchzuführen.

#### 4.2.1.2 Modelle für MATLAB/Simulink

Das in Abschnitt 4.2.1.1 beschriebene Modell wird mit seiner mathematischen Systembeschreibung in MATLAB/Simulink implementiert. Zur Vereinfachung dient folgende Bezeichnung des thermischen ESB:

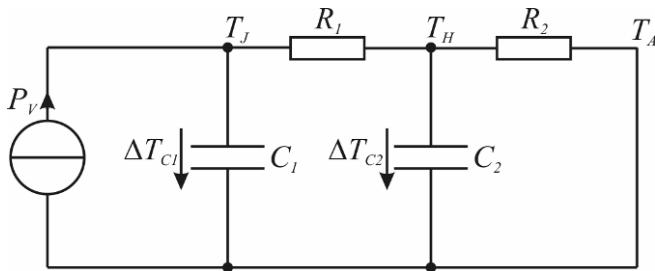


Abbildung 4-13 Thermisches ESB mit vereinfachter Bezeichnung

Mit der Wahl der Zustandsgrößen  $x_1 = \Delta T_{C1}$  und  $x_2 = \Delta T_{C2}$  ergibt sich die Zustandsgleichung:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{T}_{C1} \\ \Delta \dot{T}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_1 R_1} & \frac{1}{C_1 R_1} \\ \frac{1}{C_2 R_1} & -\frac{1}{C_2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T_{C1} \\ \Delta T_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot P_v \quad (4-9)$$

Da  $\Delta T_{C1}$  zugleich die Temperaturdifferenz zwischen Sperrsicht und Umgebung darstellt, ist durch Wahl der Ausgangsgröße  $y = x_1$  das Temperaturverhalten der LED leicht einzusehen. Mit dem Simulink-Modell aus Abbildung 4-14 ist es möglich, die Temperatur der LED bei verschiedenen Ansteuerungen zu simulieren.

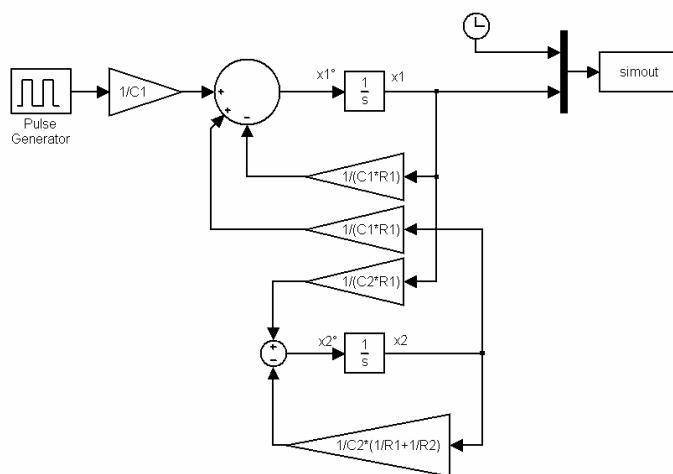


Abbildung 4-14 Simulink-Modell des dynamischen thermischen ESB

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Übertragungsfunktion der Systembeschreibung in Simulink zu nutzen. Nach Berechnung über:

$$G(s) = \underline{c}^T \underline{\Phi}(s) \underline{b} \quad (4-10)$$

mit

$$\underline{\Phi}(s) = (s \underline{I} - \underline{A})^{-1} \quad (4-11)$$

ergibt sich die Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{\frac{1}{C_1}s + \frac{1}{C_1C_2}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_1C_2} + \frac{1}{R_2C_2}\right)s + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}. \quad (4-12)$$

In Simulink folgt daraus das Modell:

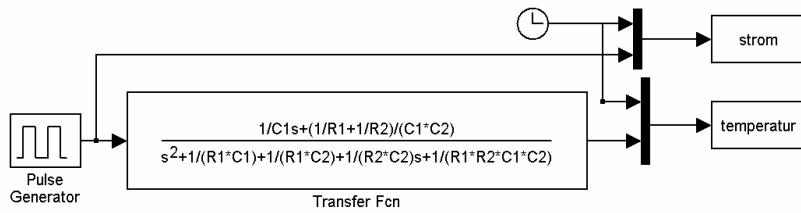


Abbildung 4-15 Simulink-Modell mit Übertragungsfunktion

Beide Modelle liefern äquivalente Ergebnisse.

#### 4.2.2 Thermische Simulation

Mit Hilfe des dynamischen thermischen Ersatzschaltbildes kann für beliebige Frequenzen und Pulsmodulationen das Temperaturverhalten der LED analysiert werden. Besonderes Interesse gilt hierbei der Sperrsichtschicht der Diode, da die Temperatur der Rekombinationszone ausschlaggebend für die thermischen Quantenverluste ist. In Abbildung 4-16 ist das Verhalten der LED-Strahlungsleistung bei unterschiedlichen Temperaturverläufen dargestellt. Der annähernd lineare Zusammenhang des Datenblattes konnte mit eigenen Messungen bestätigt werden. Hierzu wurden vier LEDs in einem Badkryostat bei verschiedenen Temperaturen in thermodynamische Gleichgewichtszustände versetzt [Sof97]. Durch Anlegen eines geringen LED-Betriebsstroms (1mA) konnte gewährleistet werden, dass die Selbstaufheizung der Diode gering gehalten wurde. Anschließend wurde die Lichtleistung vermessen und in das Verhältnis zur Leistung bei 25 °C gesetzt.

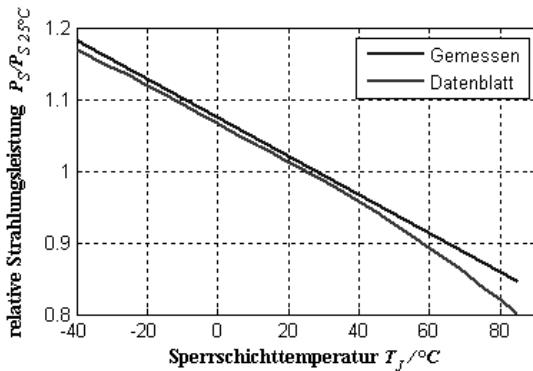


Abbildung 4-16 Gemessenes und nach Datenblatt angegebenes temperaturabhängiges Verhalten der LED-Strahlungsleistung

##### 4.2.2.1 Sprungantwort

Die Sprungantwort der Temperatur auf einen Anstieg der Verlustleistung zeigt Abbildung 4-17 (links). Auf der Ordinate ist der Betrag der thermischen Impedanz  $Z_{th}$  (der transiente Scheinwiderstand) zwischen Sperrsichtschicht und Umgebung abgetragen. Die Abszisse ist die logarithmische Zeitachse. Auf den Sprung der zugeführten Leistung folgt zunächst ein schneller Anstieg der Temperatur. In diesem Zeitbereich erfolgt die Temperaturausbreitung in den Chip selbst und in seine Umgebung. Da der Chip über eine geringe Wärmekapazität verfügt, ist der Vorgang schnell abgeschlossen. Auf dem ersten Plateau ist das erste RC-Glied geladen. An dieser Stelle entspricht der transiente Widerstand annähernd dem Widerstand zwischen Sperrsichtschicht und Wärmesenke  $R_{thJH}$ , da die thermische Kapazität  $C_{thChip}$  vollständig geladen ist. Im weiteren zeitlichen Verlauf wird die Wärmesenke aufgeheizt bis auch die Kapazität

$C_{thH}$  geladen ist. Anschließend wird die Wärme über den Gesamtwiderstand  $R_{thJH} + R_{thHA}$  abgeführt [Sof95].

Aus der Definition der Zeitkonstante für RC-Glieder  $\tau$  und aus der Tatsache, dass nach  $t = 3 \cdot \tau$  95% des Anstieges erreicht sind, ist es möglich, die beobachteten Plateaus mit folgender Formel zu berechnen.

$$\tau = R \cdot C \quad (4-13)$$

Für die hier verwendete LED ergeben sich folgende Zeitkonstanten:

$$\tau_1 = 1,08 \text{ ms}$$

$$\tau_2 = 0,5 \text{ s}$$

Durch den linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und relativer Strahlungsleistung ist eine umgekehrt proportionale Abnahme dieser zu beobachten. (Abbildung 4-17 rechts) Hierbei ist zu beachten, dass das Zwischenplateau aufgrund der linearen Zeitachse nicht zu erkennen ist.

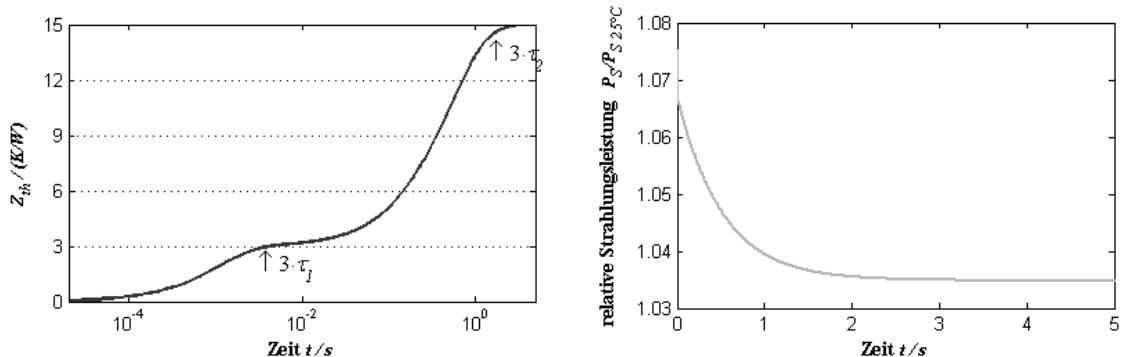


Abbildung 4-17 Sprungantwort der Temperatur (links) und der relativen Strahlungsleistung (rechts)

#### 4.2.2.2 Pulsbetrieb

Wird der Diode über periodisches Pulsen thermische Verlustleistung zugeführt, so wechseln sich Sprungantwort und Abklingen permanent ab. Da die Sprungantwort und das Abklingen annähernd als e-Funktionen betrachtet werden können, nähern sie sich asymptotisch im unendlichen ihrem Endzustand, wobei der Anstieg der Funktion kontinuierlich gegen Null strebt. Somit steigt/fällt die Temperatur anfangs stärker. Befindet sich die Temperatur während der Pulspause nahe am angestrebten Endwert, so fällt diese nur langsam ab und startet daher bei dem nächsten Puls von einem höheren Anfangsniveau (Abbildung 4-18 links). Dadurch schaukelt sich die Temperatur der Diode so lange auf, bis die Temperaturdifferenz zwischen Ausschaltzeitpunkt und angestrebtem *Nullniveau* gleich der Differenz zwischen Anschaltzeitpunkt und angestrebtem *Endniveau* ist.

In Abbildung 4-18 (rechts) wird die modellierte Diode beispielhaft durch ein Rechtecksignal mit einem Tastverhältnis  $d_c$  von 50 % und einer Amplitude von 2 W betrieben. Die Sperrschicht würde bei 2 W Konstantleistung 30 K wärmer werden als die Umgebung. Bei 0 W hätte die Sperrschicht die gleiche Temperatur wie das gesamte System. Demnach ist, bei einer mittleren Leistung von einem Watt, das *Endniveau* 30 K und das *Nullniveau* 0 K über Umgebungstemperatur. Wie in der Simulation zu erkennen ist, schaukelt sich die Temperatur so lange auf, bis sie zwischen den Werten 17,5 K und 12,5 K schwankt. Die Temperaturdifferenz ist zu diesem Zeitpunkt +17,5 K bzw. -17,5 K. So können sich Ansteigen und Abfallen ausgleichen.

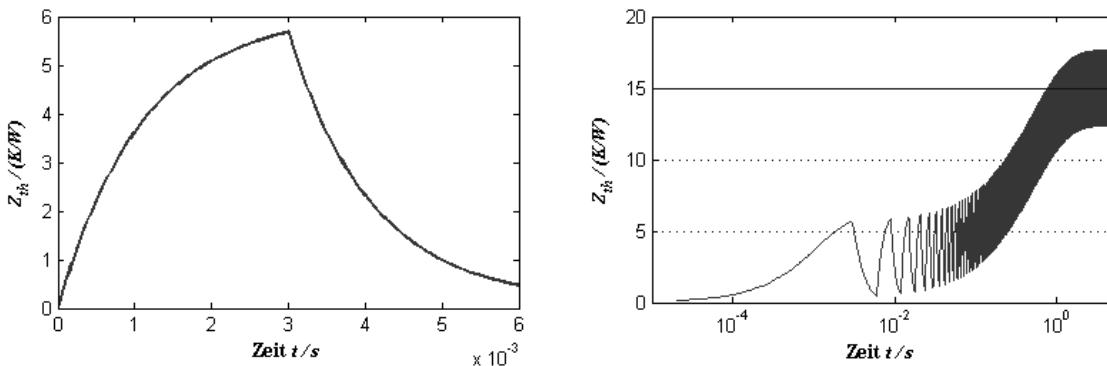


Abbildung 4-18 Temperaturantwort einer LED bei 50% Tastverhältnis. Einzelpuls (links)/ Rechteckfrequenzantwort (rechts)

Diese Betrachtungen haben ihre Gültigkeit auch für andere Frequenzen und Tastverhältnisse. Sie zeigen außerdem, dass die sich einstellende mittlere Temperatur der Diode im Pulsbetrieb gleich der Temperatur ist, die sich beim Anlegen der mittleren Leistung einstellen würde. In Abbildung 4-19 (links) sind die gemittelten Temperaturen für verschiedene Tastverhältnisse abgetragen. Diese gleiche mittlere Temperatur hat allerdings nicht zur Folge, dass der emit-

tierter Lichtstrom verschiedener Tastverhältnisse gleicher mittlerer Leistung gleich groß ist. In Abbildung 4-19 (rechts) ist deutlich zu erkennen, dass mit abnehmendem Tastverhältnis und zunehmender Amplitude der Wirkungsgrad der Diode sinkt. Da die Analysen bei einer theoretischen Umgebungstemperatur von 0 °C durchgeführt wurde, liegen die relativen Strahlungsleistungen bei Werten über 100 %.

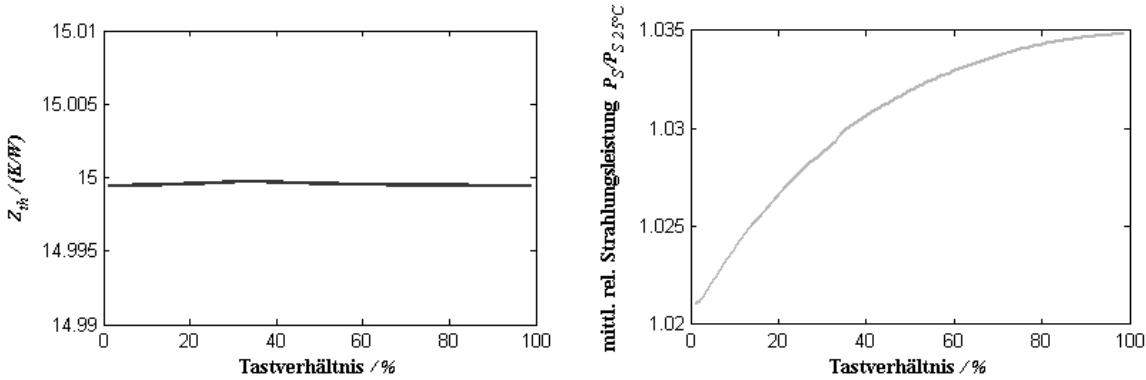


Abbildung 4-19 Mittlere Temperatur und relative Strahlungsleistung für verschiedene Tastverhältnisse

Eine Analyse der Einzelpulse zeigt die Ursache für den Rückgang der Strahlungsleistung. (Abbildung 4-20 links) Da die Diode nur während des Pulses leuchtet, ist nicht die mittlere Temperatur des gesamten Zyklus von Bedeutung, sondern nur die mittlere Temperatur der Diode während des Pulses (Abbildung 4-20 rechts). Bei großen Tastverhältnissen und kurzen Pulspausen entspricht die Pulstempératur etwa der mittleren Temperatur. Bei kleinen Tastverhältnissen ist die Temperatur während des Pulses weit über dem Mittelwert. In der Abbildung 4-20 (rechts) sind diese mittleren Pulstempératuren über dem Tastverhältnis abgetragen. Hier lässt sich erneut der indirekt proportionale Zusammenhang zwischen Temperatur (Abbildung 4-20 rechts) und Strahlungsleistung (Abbildung 4-19 rechts) erkennen.

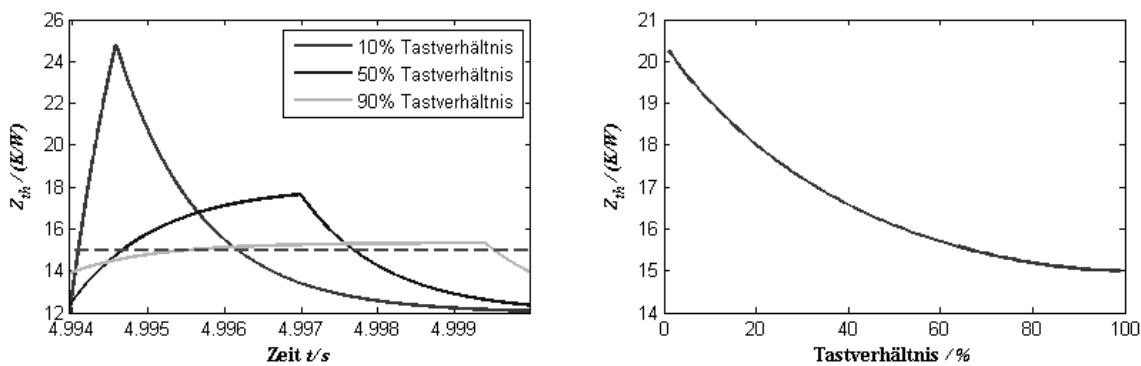


Abbildung 4-20 Pulsantwort der Temperatur (links) und mittlere Arbeitstemperatur (rechts) bei verschiedenen Tastverhältnissen gleicher Leistung

Da die Temperatur bei geringeren Frequenzen mit größeren Amplituden schwankt, ist die Pulsweitenabhängigkeit der Strahlungsleistung umso größer, je kleiner die Frequenz ist. (Abbildung 4-21)

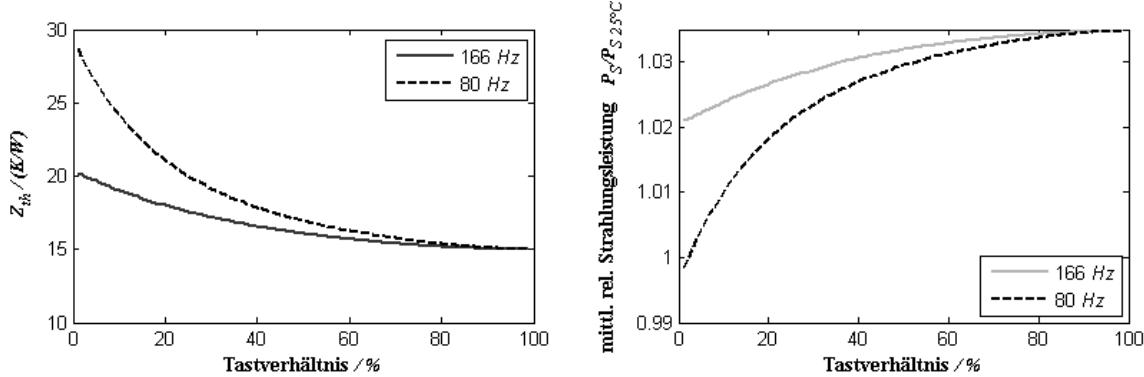


Abbildung 4-21 Arbeitstemperatur und Strahlungsleistung für verschiedene Tastverhältnisse und 166Hz bzw. 80Hz

Ein weiterer wichtiger Aspekt beim Pulsen von LEDs ist die maximale Sperrschichttemperatur. Sollte diese überschritten werden, wird die LED stark degradiert oder zerstört. Je länger der Puls dauert, desto höher wird die Temperatur der LED steigen. Es stellt sich die Frage, welche Pulsdauern welche Maximaltemperatur zufolge haben.

Zur Klärung dieser Frage wurden Simulationen mit Frequenzen von 0,1 Hz bis zu 900 Hz durchgeführt. Das Tastverhältnis  $dc$  blieb konstant bei 50 %. Der jeweils maximale thermische Scheinwiderstand  $Z_{th\ max}$  (maximale Temperaturdifferenz zwischen Sperrschicht und Umwelt pro zugeführter Leistung) wurde ermittelt und in folgenden Kennlinien abgetragen:

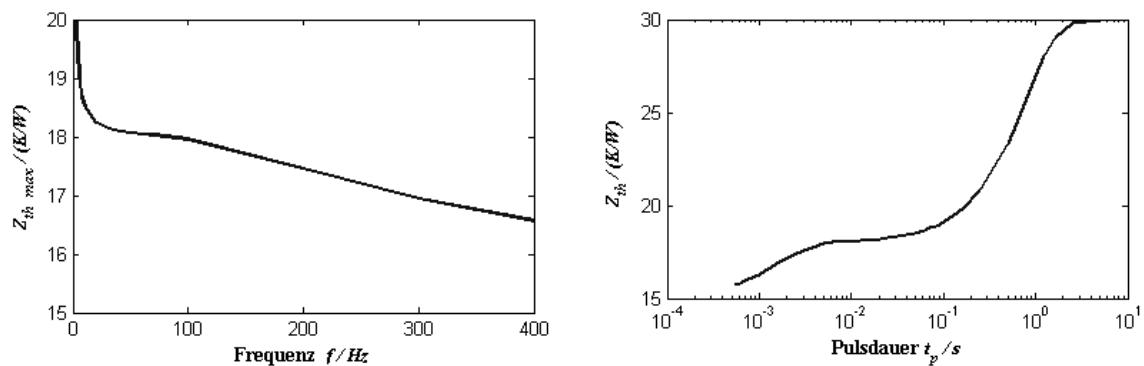


Abbildung 4-22 Frequenz- bzw. pulsdauerabhängige Maximaltemperatur

Zum allgemeinen Verständnis der Kennlinie: Für  $f \rightarrow \infty$  nähert sich die maximale Temperatur im Pulsbetrieb der Temperatur im Konstantbetrieb an, so dass die (im Pulsbetrieb größere) Verlustleistung bei hohen Frequenzen nur noch sehr geringe Zeitdauern anliegt und die Temperatur demnach nur geringfügig schwankt. Bei niedrigen Frequenzen liegt die (höhere) Ver-

lustleistung so lange an, dass die LED vollständig aufgeheizt wird. Für  $f \rightarrow 0$  wird die LED also thermisch gesättigt und es liegt der Maximalwert des thermischen Scheinwiderstandes vor. Mit kleiner werdenden Frequenzen steigt die Maximaltemperatur nicht kontinuierlich an, sondern erreicht ein Plateau im Bereich zwischen 40 Hz und 90 Hz. Dies bedeutet, dass es kaum Auswirkungen auf die maximale Sperrscheittemperatur hat, ob die LED mit 40 Hz oder 90 Hz gepulst wird. Die Ursache zeigt sich in den unterschiedlichen Temperaturkennlinien bei verschiedenen Frequenzen.

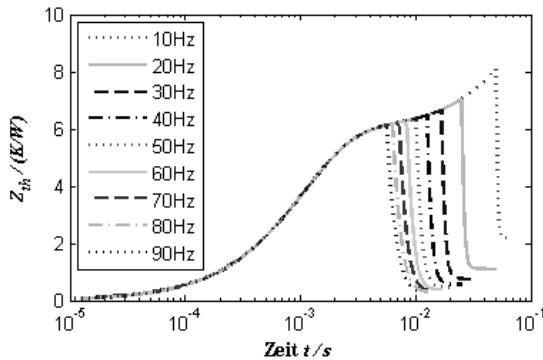


Abbildung 4-23 Temperaturkennlinien bei verschiedenen Frequenzen

Bei Frequenzen zwischen 40 Hz und 90 Hz wird die LED grundsätzlich auf dem Plateau der Sprungantwortkennlinie ausgeschaltet. Wird die LED also mit diesen Frequenzen angesteuert, ändert sich die maximale Sperrscheittemperatur nur geringfügig. Bei höheren oder niedrigeren Frequenzen wird jeweils in einem steileren Teil der Sprungantwortkennlinie geschaltet und die Temperatur reagiert dem entsprechend empfindlicher auf eine Frequenzvariation. Es ist demnach zu empfehlen, gepulste LEDs mit Frequenzen zu betreiben, deren Periodendauern oberhalb der durch den Chip gegebenen ersten Zeitkonstante liegen.

$$f_p \geq \frac{dc}{3 \cdot R_{thJH} \cdot C_{thChip}} \quad (4-14)$$

Für kleinere Tastverhältnisse  $dc$  verschiebt sich das Plateau des konstanten Scheinwiderstandes in Richtung kleinerer Frequenzen, da damit eine Verkürzung der Pulse verbunden ist. (Abbildung 4-24 links) Trägt man die maximalen Temperaturen über der Pulsdauer ab, ist erkennbar, dass sich für alle Tastverhältnisse  $dc$  ein Plateau zwischen 5 ms und 25 ms aufspannt. (Abbildung 4-24 rechts) Richtigerweise sollte daher eine maximale Pulsdauer anstatt einer minimalen Pulsfrequenz eingehalten werden.

$$t_p \leq \frac{3 \cdot R_{thJH} \cdot C_{thChip}}{dc} \quad (4-15)$$

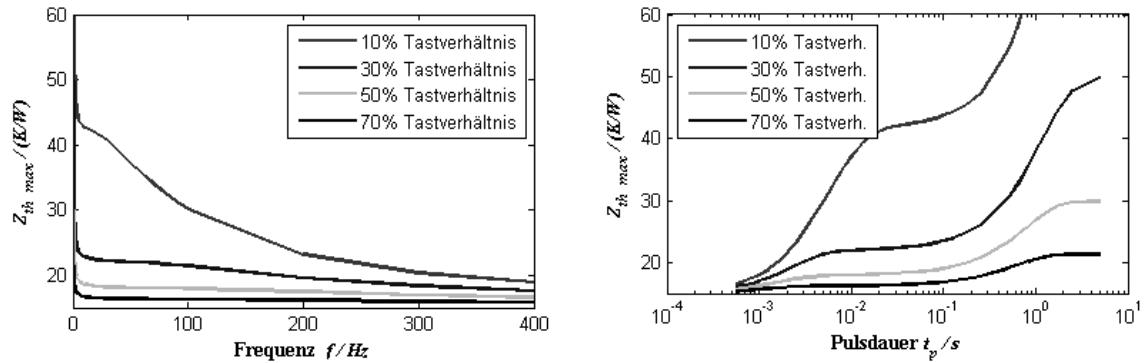


Abbildung 4-24 Frequenz- bzw. Pulsdauerabhängigkeit der maximalen Temperatur für dc=10; 30; 50; 70%

Zusammenfassend lässt sich sagen:

- Die mittlere Temperatur einer gepulsten LED entspricht der Temperatur einer ungepulsten LED bei gleicher umgesetzter Leistung. Diese Temperatur stellt sich nach einem endlichen Einschwingvorgang des thermischen Systems ein.
- Während des Pulses ist die mittlere Temperatur abhängig vom angelegten Tastverhältnis. Mit kleiner werdenden Tastverhältnissen steigen während eines Pulses die mittleren Temperaturen der LED. Die Lichtleistung nimmt ab. Dieser Effekt ist umso stärker, je geringer die Pulsfrequenz ist.
- Die maximale Temperatur, die eine gepulste Diode erreicht, hängt von der Pulsdauer ab. Die maximale Pulsdauer lässt sich aus den Materialparametern der Diode berechnen.

## 4.3 Physiologische Effekte und Risiken

In den nachfolgenden Kapiteln wird, ausgehend von physiologischen Effekten beim Einsatz von gepulsten Lichtquellen zum Be- oder Selbstleuchten, geklärt, ob sich daraus mögliche Risiken beim Einsatz dieser gepulsten Lichtquellen als Rückleuchten oder Scheinwerfer ergeben. Da gepulste LEDs heutzutage hauptsächlich in gedimmten Rückleuchten eingesetzt werden, wird zunächst der Effekt des Dimmens über Pulsweitenmodulation erklärt. Anschließend folgt eine theoretische Erklärung des Perlschnureffektes, die anhand von experimentellen Untersuchungen validiert wird. Ausgehend von den so erhaltenen Erkenntnissen, werden am Ende dieses Abschnittes Konstruktionshinweise für Leuchten und Scheinwerfer mit gepulsten Lichtquellen gegeben.

### 4.3.1 Physiologie des Dimmens über Pulsweitenmodulation

Das menschliche Auge nimmt periodische, rasch verlaufende Leuchtdichteschwankungen nur unterhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz wahr. Oberhalb dieser Frequenz geht das Flackern in eine scheinbar konstante mittlere Leuchtdichte über. Aus der Fernsehtechnik sind beispielsweise Frequenzen von 50 Hz bekannt. Hier werden 50 Halbbilder pro Sekunde im Zeilensprungverfahren dargeboten, resultierend in 25 Bildern pro Sekunde bei einer Flimmerfrequenz von 50 Hz. Kinofilme werden mit Bildraten von 24 Hz aufgenommen, allerdings wird jedes Bild zwei oder drei mal mit Hilfe eines Shutters projiziert, woraus sich eine Bildwiederholfrequenz von 48 bzw. 72 Hz ergibt. Computerbildschirme werden heute mit Bildwiederholungsraten von 85 Hz und höher betrieben. Leuchtstofflampen mit konventionellen Vorschaltgeräten flackern im 50 Hz Wechselstrombetrieb mit, für den Menschen im Normalfall nicht wahrnehmbaren Lichtwechseln, von 100 Hz. Die Flimmerverschmelzungsfrequenz  $f_V$ , also die Frequenz, bei der das Flimmern zu einer zeitkonstanten Leuchtdichte verschmilzt, ist in erster Linie von der mittleren Leuchtdichte  $L_m$  abhängig. Diese stellt sich nach dem Talbotschen Gesetz als der arithmetische zeitliche Mittelwert der periodischen Leuchtdichteschwankungen oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz ein [Hen02]. Das Talbot'sche Gesetz beschreibt die mittlere Leuchtdichte als das Integral des zeitlichen Leuchtdichteverlaufs über die Zeit  $T$  der Periodendauer bezogen auf die Periodendauer.

$$L_m = \frac{1}{T} \int_T L(t) dt \quad (4-16)$$

Ein zweiter wesentlicher Parameter ist das Verhältnis der Amplitude, der nach Fourier aus dem zeitlich periodischen Leuchtdichteverlauf bestimmten Grundwelle, zum arithmetischen Mittelwert der Leuchtdichte. Der halbe Wert dieses Verhältnisses wird als Grundwellenquotient  $GW$  bezeichnet. Dieser ist beispielsweise für eine Rechteckform der Lichtimpulse bei gleichen Hell- und Dunkelzeiten 0,637, bei Sinusform 0,500 und für eine 40 W Leuchtstoff-

lampe etwa 0,15. Abbildung 4-25 gibt den Verlauf der Flimmerverschmelzungsfrequenz in Abhängigkeit von der mittleren Leuchtdichte wieder. Der Parameter ist hierbei der Grundwellenquotient. Aus der Abbildung geht hervor, dass beispielsweise für die Leuchtstofflampe  $f_V$  kleiner als etwa 70 Hz bleibt, und somit bei 100 Hz Lichtwechsel kein Flimmern sichtbar ist. Im Kinobetrieb mit Lichtwechseln von 48 Hz ist mit einem GW von 0,5 ab etwa 30 cd/m<sup>2</sup> abwärts mit Flimmern zu rechnen, bei 72 Hz Lichtwechsel erst ab einigen hundert cd/m<sup>2</sup>. Verglichen zur 48 Hz Bildwiederholungsrate im Kino, tritt beim Fernsehen mit 50 Hz ein Flimmern wegen des Nachleuchtens des Schirms bei kleinem Grundwellenanteil auch erst bei höheren Leuchtdichten auf [Hen02]. Ein weiterer Parameter ist die Feldgröße der flimmernden Fläche. Große flimmernde Felder resultieren in einer höheren  $f_V$  als kleine Felder. Zusätzlich ist auch der Ort des flimmernden Feldes bestimmend für die Flimmerverschmelzungsfrequenz. Sie ist im seitlichen Gesichtsfeld, der Peripherie, höher als im Fixationszentrum, der Fovea [Schi01]. Es wird deutlich, dass die Flimmerverschmelzungsfrequenz je nach Bedingung und Anwendungsgebiet variiert. Jedoch sind Frequenzen um 100 Hz für die meisten Fälle als flimmerfrei zu betrachten.

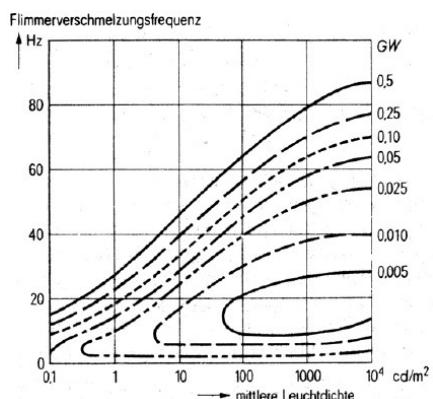


Abbildung 4-25 Abhängigkeit der Flimmerverschmelzungsfrequenz von Umfeldleuchtdichte und Grundwellenquotient [Hen02]

Im Zusammenhang mit Lichtquellen, die in ihrer Helligkeit über die Zeit in periodischer Weise fluktuiieren, kommt die Frage des Einflusses auf Menschen auf, die sensibel auf Beleuchtungssituationen reagieren. Eine solche Gruppe bilden Menschen, die unter Fotoepilepsie leiden. Licht-Fluktuationen bei einer bestimmten Frequenz mit einem hohen Modulationsgrad über eine große Fläche können bei diesen Personen Anfälle auslösen [Boy03]. Es sprechen jedoch mehrere Faktoren dafür, dass pulsweitenmodulierte LED-Rückleuchten keine Gefahr für diese Menschen darstellen. Der Modulationsgrad der Fluktuation beträgt zwar aufgrund des schnellen Ansprechverhaltens der LED etwa 100 %. Die Fläche über die sich die Helligkeit ändert ist aber in Verkehrssituationen im Verhältnis zum Gesichtsfeld gering. Die Frequenzen mit denen gepulst wird, liegen außerdem weit über den kritischen Frequenzen. Die kritischen Frequenzen liegen nach Angaben des Epilepsiezentrums Bethel in Bielefeld zwischen 10 und 20 Hz [Eb05], Boyce [Boy03] gibt sie mit 15 Hz an. Anfälle, die durch Frequenzen über 40 Hz ausgelöst werden, sind eine absolute Rarität [Eb05]. Nach Meinung der Fachärzte stellen pulsweitenmodulierte Rückleuchten keinerlei Gefahr für Menschen mit Fo-

tosensitivität dar. Viel mehr Gefahrenpotential bergen beispielsweise Fahrten durch Alleen bei Sonnenschein, wenn Licht und Schatten im Gesichtsfeld sehr schnell wechseln.

### 4.3.2 Der Perlschnureffekt

Wie in 3.2.3 eingeführt, tritt bei der Betrachtung einer pulsweitenmodulierten LED-Lichtquelle, trotz einer Pulsfrequenz oberhalb der Flimmerverschmelzung, in bestimmten dynamischen Fällen ein physiologischer Effekt mit einem frequenzabhängigen Charakter auf. Das Phänomen, sowie die Bedingungen und Ursachen für sein Auftreten bzw. Verschwinden, sollen im Folgenden theoretisch betrachtet werden.

#### 4.3.2.1 Das Phänomen des Perlschnureffekts

Der Perlschnureffekt kann theoretisch grundsätzlich dann auftreten, wenn sich eine zeitlich periodisch diskontinuierliche Lichtquelle mit hohem Modulationsgrad der Leuchtdichte-Fluktuation mit einer Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  in relativer Bewegung zur optischen Achse des Betrachters befindet. Diese relative Bewegung kann durch Augenbewegung, Bewegung der Lichtquelle oder eine Überlagerung beider entstehen. Diese Theorie beruht auf den folgenden Betrachtungen: Nimmt man eine geradlinige Bewegung mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit im Zeitintervall  $[t_0, t_1]$  an, so bewegt sich nach Formel ( 4-17 ) das Bild der Lichtquelle auf der Retina des Betrachterauges in dieser Zeit von Position  $a_0$  nach Position  $a_1$ .

$$a(t) = \omega \cdot t + a_0 \quad (4-17)$$

Wäre die Leuchtdichte der Lichtquelle während des Zeitintervalls konstant (Fall 1), beschreibe ihr Bild während der Bewegung auf der Retina des Betrachters eine Linie, da die Leuchtdichte von Position  $a_0$  bis Position  $a_1$  konstant bliebe.

$$L_{[t_0, t_1]} = L_0 = \text{const.} \rightarrow L_{[a_0, a_1]} = L_{a_0} = \text{const.} \quad (4-18)$$

Ist die Leuchtdichte der Lichtquelle aber mit einem hohen Modulationsgrad zeitlich variabel (Fall 2), so variiert bei der Bewegung die Leuchtdichte zusätzlich stark über dem Ort, also in Abhängigkeit der Position. ( 4-19 ) So beschreibt die Lichtquelle während der Bewegung auf der Retina eine unterbrochene Linie.

$$L_{[t_0, t_1]} = L(t) \rightarrow L_{[a_0, a_1]} = L(a) \quad (4-19)$$

Abbildung 4-26 illustriert die beiden beschriebenen Fälle.

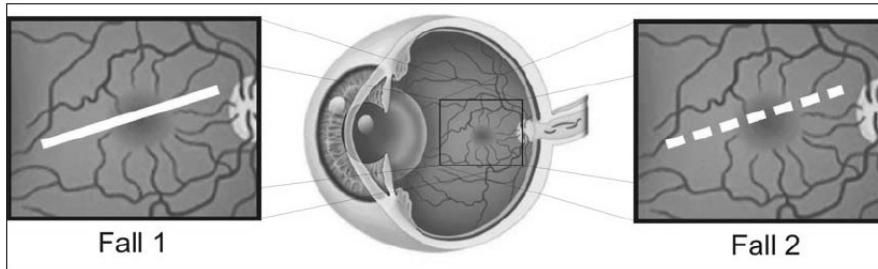


Abbildung 4-26 Entstehung der Perlschnur auf der Netzhaut

Die Superposition der zeitlich periodischen Leuchtdichteänderung entsprechend dem Ansteuersignal und der Bewegung mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  resultiert in der wiederholten, zeitlich und örtlich getrennten Abbildung der Lichtquelle auf der Retina. Das beobachtete Erscheinungsbild des Perlschnureffekts deutet jedoch darauf hin, dass die Lichtquelle zwar zeitlich getrennt abgebildet wird, mehrere dieser Abbilder aber zusammenhängend als eine Art Leuchtspur wahrgenommen werden.

Es ist bekannt, dass die Bewegung einer Wunderkerze oder eines ähnlich hellen Objekts über das Gesichtsfeld bei einem dunklen Umfeld sichtbare Leuchtspuren erzeugt. Der physiologische oder psychologische Mechanismus, der dieser Tatsache zu Grunde liegt, trägt mit großer Wahrscheinlichkeit zum Erscheinungsbild des Perlschnureffekts bei. In der Psychologie wird er als sensorisches Gedächtnis bezeichnet. Das sensorische Gedächtnis existiert nach einem Modell von Atkinson und Shiffrin [Atk68] neben dem Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis. Es speichert kurzfristig und unbewusst mit großer Kapazität sensorische Reize und gibt sie, in Abhängigkeit der auf dem Reiz liegenden Aufmerksamkeit, gefiltert und selektiert an das Kurzzeitgedächtnis mit einer geringeren Kapazität weiter. Für jeden Sinnesreiz, sei er taktiler, akustischer, visueller oder anderer Art, gibt es im sensorischen Gedächtnis einen Speicher. Der Speicher für visuelle Reize wird ikonisches Gedächtnis genannt. Die Dauer einer sensorischen Erinnerung wird für visuelle und akustische Informationen unter einer Sekunde angegeben, und wird als Persistenz bezeichnet [Win81] [And95] [Bad99]. In einem Experiment ermittelte 1740 der Wissenschaftler Segner die Dauer der visuellen Persistenz. Er befestigte ein glühendes Stück Kohle an einem rotierenden Rad. Wenn sich das Rad sehr schnell drehte, konnte er einen vollen Kreis wahrnehmen, da die am Anfang der Drehung entstandene Spur immer noch leuchtete, wenn das Kohlestück wieder am Startpunkt anlangte. Bei einer langsameren Drehung war nur das Teilstück eines Kreises zu sehen, weil die Spur des ersten Abschnitts verblasst war, bis die Kohle wieder den Ausgangspunkt erreicht hatte. Segner wählte nun eine Geschwindigkeit, mit der gerade noch ein vollständiger Kreis zustande kam und maß die Zeit für eine Umdrehung. Er schätzte sie auf ungefähr 100 ms [Bad99]. Diese Zeit entspricht auch der Integrationszeit der bei Dunkelheit aktiven Stäbchen-Fotorezeptoren [Val05]. Diese könnte ebenfalls eine Erklärung für das Entstehen der Leuchtspur liefern. Wird eine

ausreichend helle Lichtquelle bei dunklem Umfeld über das Gesichtsfeld bewegt, dann integrieren und somit mitteln die Stäbchen Hell- und Dunkelsignal der Lichtquelle und des Umfeldes über die Zeit von 100 ms ab dem Zeitpunkt, an dem die Lichtquelle sie überstreift. So entsteht eine „wandernde“ Leuchtspur mit einer konstanten Ausdehnung, die dem Weg entspricht, über den sich die Lichtquelle in 100 ms bewegt hat, da jeder Punkt des Pfades der Lichtquelle nur 100 ms ab dem Zeitpunkt, an dem die Lichtquelle ihn überstreift, zu „sehen“ ist. Würde man seine Aufmerksamkeit auf einen selbst gewählten Anfangspunkt der Leuchtspur richten, wäre selbiger nach dieser Zeit verschwunden. Möglicherweise basieren die Ergebnisse des Experiments von Segner und das darüber beschriebene Phänomen der visuellen Persistenz auf diesem Verhalten der Stäbchen, zumindest ist das Verhalten der Stäbchen ein Faktor, der zu diesem Phänomen beiträgt. Warum derartige Leuchtspuren bei Tageslicht wesentlich schwieriger zu beobachten sind, könnte aus der Integrationszeit der bei diesen Lichtverhältnissen aktiven Zapfen-Fotorezeptoren erklärt werden. Diese wird mit Zeiten von 10-20 ms angegeben [Val05]. Bewegt sich dieselbe Lichtquelle, wie sie eben beschrieben wurde, mit der gleichen Geschwindigkeit bei Tageslicht über das Gesichtsfeld, so verkürzt sich ihre Leuchtspur aufgrund der Integrationszeit von nur etwa 20 ms um das Fünffache. Jeder Punkt des Pfades der Lichtquelle ist ab dem Zeitpunkt, an dem die Lichtquelle ihn überstreift, nur 20 ms zu „sehen“. Würde man seine Aufmerksamkeit auf einen selbst gewählten Anfangspunkt der Leuchtspur richten, wäre dieser schon nach dieser Zeit verschwunden. Zudem ist der Kontrast zwischen Lichtquelle und Umfeld geringer als bei nächtlichen Verhältnissen. Bewegt sich zum Beispiel eine mit 100 Hz pulsweitenmodulierte LED-Lichtquelle bei dunklem Umfeld relativ zur optischen Achse, werden die Bilder der Lichtquelle wie beschrieben als Stimuli auf der Retina abgebildet. Das Phänomen der visuellen Persistenz bzw. das beschriebene Verhalten der Stäbchen ermöglicht es, eine Leuchtspur mit insgesamt etwa zehn Elementen als eine Art Ortsfrequenz wahrzunehmen. Diese diskontinuierliche Linie stellt für den Betrachter eine ungewohnte Situation dar, worauf er mit höherer Aufmerksamkeit reagiert. Der kritische Punkt, an dem dieser Effekt verschwindet, ist erreicht, wenn die Abstände zwischen den Bildern der Lichtquelle auf der Retina so klein sind, dass sie nicht mehr aufgelöst werden können. Die Bilder der Lichtquelle verschwimmen zu einer Linie. In diesem Fall gleicht das Erscheinungsbild wieder dem einer kontinuierlichen Lichtquelle. Offensichtlich handelt es sich bei diesem Effekt also um ein Problem des örtlichen Auflösungsvermögens. Bevor im nächsten Abschnitt auf die kritischen Grundgrößen beim Auftreten des Perlschnureffekts eingegangen wird, soll kurz geklärt werden, warum pulsweitenmodulierte Glühlampen den Perlschnureffekt nicht hervorrufen. Da hier das Wirkprinzip der Pulsweitenmodulation zum Dimmen auf physikalischer Ebene, nicht auf physiologischer Ebene funktioniert, und die Glühlampe in diesem Fall eine kontinuierliche Lichtquelle darstellt, kommt es nicht zur Superposition einer zeitlich periodischen Leuchtdichteänderung und einer Bewegung. Somit tritt keine wiederholte zeitlich und örtlich getrennte Abbildung der Lichtquelle auf der Retina ein. Diese stellt die Voraussetzung für das Eintreten des Perlschnureffekts dar.

### 4.3.2.2 Kritische Grundgrößen beim Auftreten des Perl schnureffekts

Ausgehend vom beschriebenen Entstehungsprozess des Effekts, nämlich der Überlagerung einer zeitlich periodischen Leuchtdichteänderung entsprechend dem Ansteuersignal und einer Bewegung der Lichtquelle, sollen nun Zusammenspiel, Verhältnis und Einfluss der beteiligten Grundgrößen theoretisch betrachtet werden. Die entscheidenden Größen aus dem Ansteuersignal sind die Frequenz  $f_p$  und das Tastverhältnis  $dc$  (*duty cycle*). Die Bewegung wird durch die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  gekennzeichnet. Das entscheidende Merkmal der Lichtquelle ist die gesehene Ausdehnung  $b$  in Bewegungsrichtung. Eine theoretische Untersuchung ist hier möglich, indem man den Einfluss der Veränderung einer dieser Größen betrachtet, wobei die anderen Größen als konstant angenommen werden. Zu diesem Zweck zeigt Abbildung 4-27 als Ausgangsfall die qualitative Abbildung einer Ortsfrequenz auf der Retina, wie sie theoretisch entsteht, wenn für die vier Größen die folgenden Werte angenommen werden:

$$f_p = 100 \text{ Hz}$$

$$\omega = 160^\circ/\text{s}$$

$$b = 50'$$

*dc : vernachlässigbar klein*

Diese Ortsfrequenz entsteht, weil sich die ausgeschaltete Lichtquelle während der Impulspause des Ansteuersignals so weit bewegt, dass die im kurzen Einschaltmoment entstehenden Bilder der Lichtquelle in entsprechenden Abständen auf der Retina abgebildet werden. Die Impulspause  $t_{Ip}$  entspricht hier annähernd der Periodendauer  $T_p$ . Die Ausdehnung der weißen Balken stellt im Ausgangsfall nur das Abbild der Lichtquelle dar.

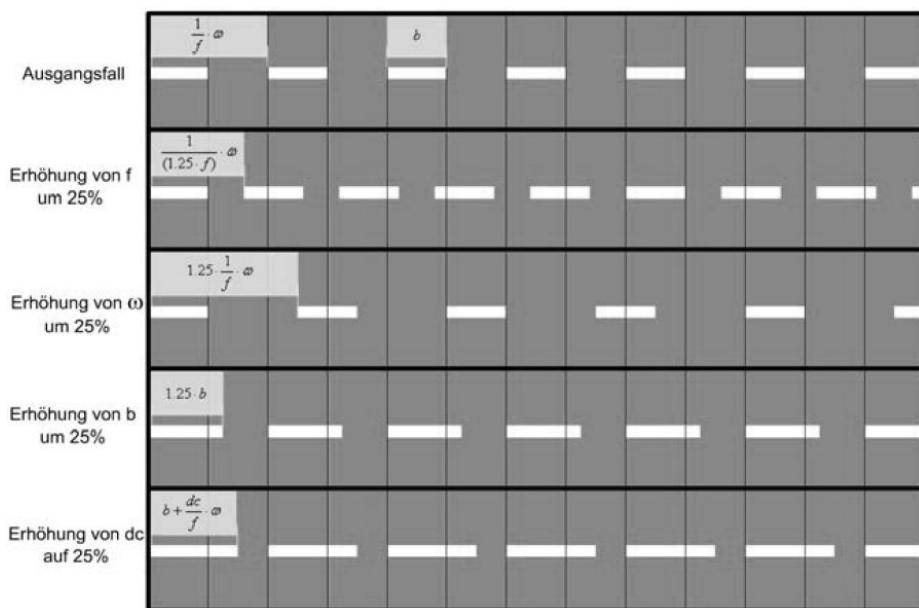


Abbildung 4-27 Einflussgrößen auf den Perl schnureffekt

Abbildung 4-27 zeigt im Weiteren, wie sich die Ortsfrequenz verändert, wenn die einzelnen Größen variiert werden. Wird die Frequenz  $f_p$  des Ansteuersignals bei Konstanthaltung der anderen Werte erhöht, so verkürzt sich dessen Periodendauer und somit dessen Impulspause. Die Lichtquelle bewegt sich weniger weit, bis sie wieder aufleuchtet. Die Abbilder der Lichtquelle (weiße Balken) rücken näher zusammen. Im Falle der Erhöhung der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  der Relativbewegung der Lichtquelle zur optischen Achse bewegt sich die Lichtquelle während der Impulspause weiter als im Ausgangsfall. Die Abbilder der Lichtquelle rücken auseinander. Wird die Breite  $b$  der Lichtquelle in Bewegungsrichtung erhöht, vergrößern sich entsprechend die Abbilder der Lichtquelle auf der Retina. Für das Tastverhältnis des Ansteuersignals wird im Ausgangsfall ein vernachlässigbar kleiner Wert angenommen. Die Lichtquelle wird nur für eine sehr kurze Zeit eingeschaltet, während der sie sich kaum bewegt. Somit repräsentiert die Breite der Abbildungen auf der Retina etwa die wahrgenommene Breite der Lichtquelle in Bewegungsrichtung. Wird das Tastverhältnis erhöht, so ändert sich dies. Die Lichtquelle wird für eine längere Impulsdauer  $t_{Id}$  eingeschaltet, während der sie sich weiterbewegt und eine Leuchtpur auf der Retina hinterlässt. Die Impulspause ist bei gleich bleibender Periodendauer entsprechend kürzer. Somit entsprechen die Abbildungen auf der Retina in ihrer Breite nicht mehr allein der Breite der Lichtquelle in Bewegungsrichtung, sondern der Summe aus dieser und dem Weg, den die Lichtquelle während der Impulsdauer zurückgelegt hat. Auch diese Veränderung ist in Abbildung 4-27 illustriert. Wie schon festgestellt wurde, ist der kritische Punkt zum Verschwinden des Perlschnureffekts erreicht, wenn der Abstand zwischen den Bildern der Lichtquelle auf der Retina so klein ist, dass er nicht mehr aufgelöst werden kann. Bei einem normalsichtigen Menschen mit einer Sehschärfe von eins tritt dies unter normalen Umständen spätestens dann ein, wenn der Sehwinkel, der diesem Abstand entspricht, höchstens eine Winkelminute beträgt. Die Sehschärfe  $S$  errechnet sich als das Reziprok dieses kleinsten Winkels  $\alpha$  in Winkelminuten, unter dem das Auge zwei Sehobjekte gerade noch getrennt wahrnehmen kann. Dieser Winkel wird auch als Auflösungsvermögen bezeichnet. Aus den obigen Betrachtungen lässt sich ableiten, dass sich der kritische Punkt über das Zusammenspiel der Größen  $f_p$ ,  $\omega$ ,  $b$  und  $dc$  unter folgenden Bedingungen einstellt:

- $f_p$  groß genug ist
- $\omega$  klein genug ist
- $b$  groß genug ist
- $dc$  groß genug ist

Die ausgeschaltete Lichtquelle darf sich während der Impulspause  $t_{Ip}$  höchstens um die Summe  $(b + 1')$  weiter bewegen haben, bevor sie wieder eingeschaltet wird. Der zurückgelegte Weg ergibt sich aus dem Produkt der Impulspause und der Winkelgeschwindigkeit. Somit tritt der Effekt nicht auf, wenn ( 4-20 ) erfüllt ist.

$$t_{IP} \cdot \omega \leq (b + 1') \quad (4-20)$$

Mit

$$t_{IP} = T_p \cdot (1 - dc) = \frac{(1 - dc)}{f_p} \quad (4-21)$$

ergibt sich ( 4-20 ) zu

$$\frac{(1 - dc)}{f_p} \cdot \omega \leq (b + 1'). \quad (4-22)$$

Aus ( 4-22 ) lässt sich für eine Sehschärfe von eins der kritische Punkt für jede der beteiligten Größen berechnen. Ein Wert von eins beschreibt allerdings eine gute Sehschärfe. Verschiedene Parameter können eine Verschlechterung dieser bewirken, wie z.B. Adaptationszustand, Alter und Sehfehler. So könnte es sein, dass ein Individuum in Abhängigkeit dieser Parameter nur noch benachbarte Elemente mit einem Abstand von zwei oder drei Bogenminuten als getrennt wahrnehmen kann. Somit ergäben sich für die kritischen Größen und ihr Zusammenwirken andere Werte für den Punkt, an dem der Effekt für dieses Individuum nicht mehr sichtbar ist. ( 4-22 ) kann unter Berücksichtigung dieses Umstandes zu ( 4-24 ) verallgemeinert werden.

$$\frac{(1 - dc)}{f_p} \cdot \omega \leq (b + a) \text{ bzw. } \frac{(1 - dc)}{f_p} \cdot \omega \leq \left( b + \frac{1'}{S} \right) \quad (4-23)$$

Die Abbildung 4-27 illustriert lediglich die Längen der belichteten Linien auf der Netzhaut des Beobachters. Für den Fall des vernachlässigbaren Tastverhältnisses ( $dc \rightarrow 0$ ) entspricht die entstandene Linie in ihrer Intensitätsverteilung annähernd einer Rechteckfunktion. Mit einem endlichen Tastverhältnis ( $dc > 0$ ) entspricht die Belichtung  $H$  der Belichtungsdauer  $t_B$ .

$$H = \int_B E \cdot dt \quad (4-24)$$

Die Belichtungsdauer  $t_B$  leitet sich wiederum aus der Faltung des durch das Einschalten aufgespannten Rechteckes mit der Breite  $\omega \cdot t_{Id}$  und der Lichtquellenbreite  $b$  ab. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 4-28 die ortsabhängige Belichtungszeit als Faltungsintegral der Einzelfunktionen dargestellt.

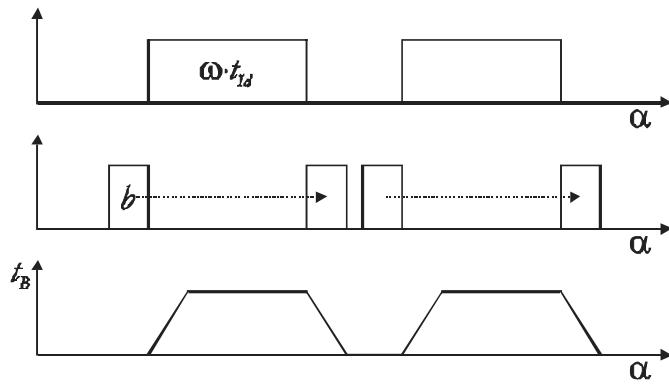


Abbildung 4-28 Illustration der Faltung von Lichtquelle und Bewegung

Die entstehende Flankenbreite ist für den gezeigten Fall  $b < \omega \cdot t_{Id}$  gleich der Lichtquellenbreite  $b$ . Bewegt sich die Lichtquelle während der Anschaltzeit um einen geringeren Winkelabschnitt als sie selbst breit ist, so entsteht eine Intensitätsflanke mit einer durch diesen Winkelabschnitt vorgegebenen Flankenbreite. Dieser Fall  $b > \omega \cdot t_{Id}$  wird in Abbildung 4-29 veranschaulicht.

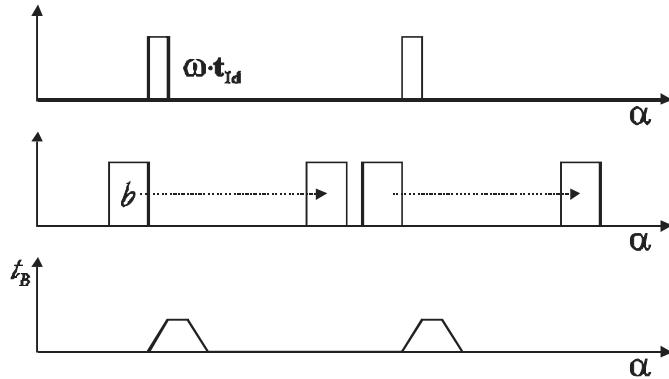


Abbildung 4-29 Veranschaulichung des Falls  $b > \omega t_{Id}$

Der Punkt, an dem die Überlagerung der trapezförmigen Faltungsfiguren zu einem homogenen Signal führt, ist, wie in Abbildung 4-30 illustriert, genau der, an dem sich die Figuren um die Breite ihrer Flanken überlagern. Die gepunktete Linie deutet die aus der Überlagerung resultierende Addition der Leuchtdichten zu einem homogenen Signal an.

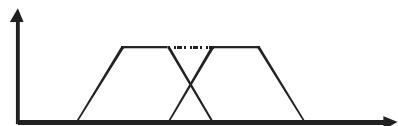


Abbildung 4-30 Entstehungsbedingung einer homogenen Linie

Für Tastverhältnisse kleiner gleich 50% ist für den Fall, dass sich die Lichtquelle während der Impulspause um höchstens ihre Breite  $b$  bewegt, die Bewegung während der Impulsdauer immer kleiner oder gleich der Breite  $b$ . Die Flankenbreite der Faltungsfigur kann hier also grundsätzlich mit dem Weg  $t_{Id} \omega$  angegeben werden. Die Überlagerung der Figuren ergibt

sich aus der Differenz zwischen  $b$  und dem Weg, den die Lichtquelle während der Impulspause zurückgelegt hat. Sollen sich die Faltungsfiguren genau um ihre Flankenbreite überlagern, so gilt Gleichung ( 4-26 ).

$$(b + a) - \omega \cdot t_{Ip} = \omega \cdot t_{Id} \quad (4-25)$$

$$(b + a) - \omega \cdot \frac{(1 - dc)}{f_p} = \omega \cdot \frac{dc}{f_p} \quad (4-26)$$

Löst man ( 4-26 ) nach  $f_p$  auf, so erhält man

$$f_p = \frac{\omega}{(b + a)}. \quad (4-27)$$

Die kritische Frequenz, an der für alle Tastverhältnisse der Perlschnureffekt gerade nicht mehr auftritt, lässt sich somit unabhängig vom Tastverhältnis über die Breite  $b$  der Lichtquelle in Bewegungsrichtung und die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  der Relativbewegung berechnen.

#### 4.3.2.3 Validierung des Perlschnureffektes

Um die bisher angestellten Überlegungen zu unterstützen, wird im Folgenden ein Probandenversuch dargestellt, der die sich herauskristallisierten Einflüsse auf den Perlschnureffekt einzeln adressieren kann und somit eine Validierung der gefundenen theoretischen Zusammenhänge ermöglicht.

Da der Mensch nicht willkürlich verschiedene schnelle Augenbewegungen vollziehen kann, wird die notwendige Relativbewegung der Lichtquelle durch einen halbdurchlässigen Spiegel realisiert, der in definierte Rotation versetzt werden kann. Die Positionierung der Lichtquelle, des Spiegels und des Probanden sowie die resultierende Perlschnur sind in Abbildung 4-31 veranschaulicht. Mithilfe dieses Aufbaus lassen sich durch gezieltes Pulsmodulieren der Lichtquelle und durch den Einsatz diverser Blenden die Einflussgrößen  $\omega$  und  $b$  auf die Grenzfrequenz des Perlschnureffektes untersuchen.

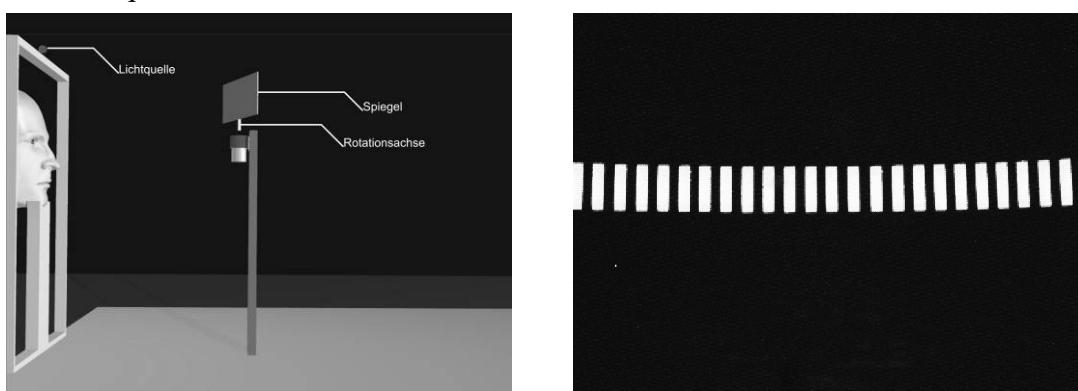
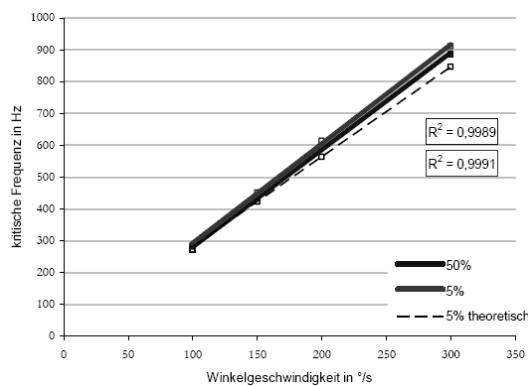


Abbildung 4-31 Messaufbau und erzeugte Perlschnur

#### 4.3.2.3.1 Einfluss der Winkelgeschwindigkeit

Unter photopischen Bedingungen wurden drei Probanden rote Lichtquellen mit einer Breite von 20,2 Bogenminuten dargeboten. Bei verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten der virtuellen Lichtquelle waren die Probanden angehalten, die Frequenz der Lichtquelle so lange zu variieren, bis eine kontinuierliche Linie zu erkennen war. Dieser Versuch wurde zweimal durchgeführt. Einmal mit einer Rechteckpulsfolge mit 50 % Tastverhältnis und einmal mit 5 % Tastverhältnis. Dadurch konnte überprüft werden, ob sich die theoretische Annahme einer vom Tastverhältnis unabhängigen Grenzfrequenz bestätigt.

Es zeigte sich, dass alle Probanden sehr genau die vorherberechneten Frequenzen einstellten. In dem Diagramm der Abbildung 4-32 sind die Resultate dieser Untersuchung abgetragen. Es ist deutlich der lineare Zusammenhang zwischen Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und kritischer Frequenz  $f_p$  zu sehen. Ebenso deutlich wird, dass für beide Tastverhältnisse die gleichen kritischen Frequenzen eingestellt werden. Die Überlegungen aus dem vorangegangenen Kapitel haben sich also bestätigt und die Gleichung ( 4-27 ) kann zur Bestimmung der kritischen Frequenz verwendet werden.



	$\omega$ in °/s	10	150	20	300
Tastverhältnis	$f_p$ Proband 1 in Hz	32	481	62	914
		5		5	
	$f_p$ Proband 2 in Hz	31	468	63	917
		1		8	
	$f_p$ Proband 3 in Hz	22	409	58	903
		2		0	
	Mittelwert	28	453	61	911
		6		4	
	$f_p$ theorettisch in Hz	29	445	59	891
50%	$f_p$ Proband 1 in Hz	28	359	61	888
		9		4	
	$f_p$ Proband 2 in Hz	29	447	59	872
		9		6	
	$f_p$ Proband 3 in Hz	23	408	57	896
		0		9	
Mittelwert	27	438	59	885	
	3		6		

Abbildung 4-32 Abhängigkeit der kritischen Frequenz von der Winkelgeschwindigkeit der Lichtquelle

Durch das Erweitern des Versuchsaufbaus um eine hinter dem Drehspiegel aufgestellte Rückprojektionswand, die mit dem Nachtsehen entsprechender skotopischer, dem Dämmerungssehen entsprechender mesopischer und dem Tagsehen entsprechender photopischer Leuchtdichte ausgeleuchtet wird, kann des Weiteren der Einfluss des Adaptationsniveaus auf erkennbaren Pulsfrequenzen erörtert werden.

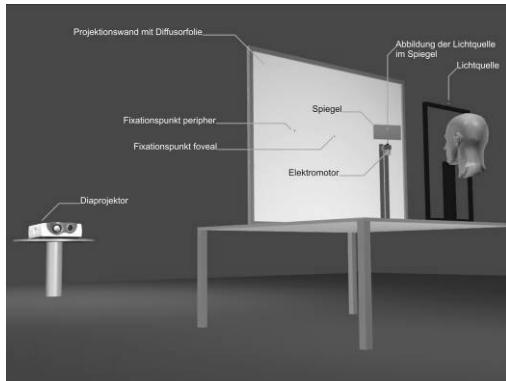


Abbildung 4-33 Erweiterter Messaufbau zur Untersuchung des Einflusses von Umfeldleuchtdichte und Blickwinkel

Um zusätzlich den Einfluss der Position der Lichtquelle im Blickfeld zu untersuchen, ist auf der Projektionswand eine Markierung angebracht, die 21,3 Grad neben dem Spiegelmittelpunkt liegt. Fixiert der Proband diese, wird die Perl schnur peripher auf dessen Netzhaut abgebildet und sollte aufgrund der geringeren peripheren Sehschärfe schlechter sichtbar sein. Mit diesem erweiterten Aufbau konnte die kritische Frequenz zum einen in Abhängigkeit von der Umfeldleuchtdichte und der Position der Lichtquelle, und zum anderen in Abhängigkeit vom Spektrum und der Position der Lichtquelle mit 20 weiteren Probanden untersucht werden. Mit steigender Adaptationsleuchtdichte steigt die menschliche Sehleistung an [Hen02]. Daraus resultiert, dass, sowohl peripher als auch foveal ein Absinken der kritischen Frequenz mit steigender Umfeldleuchtdichte zu erkennen ist (Abbildung 4-34 links). Es konnte kein Einfluss des Spektrums der Lichtquelle auf die kritische Frequenz festgestellt werden (Abbildung 4-34 rechts).

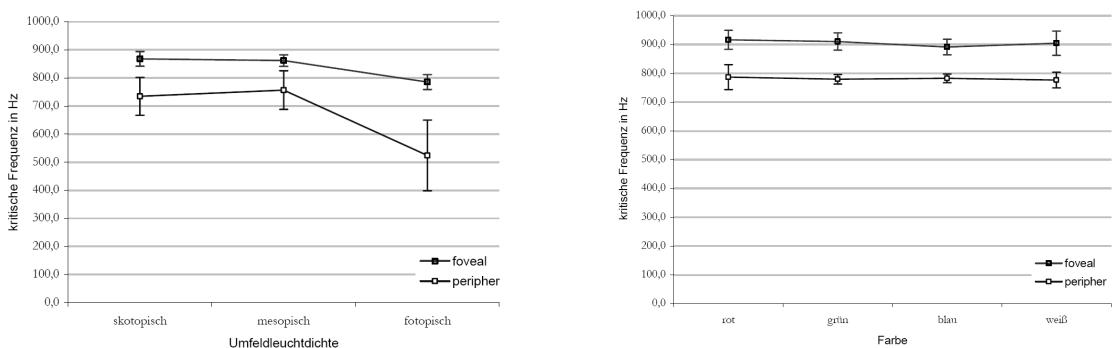


Abbildung 4-34 Abhängigkeit der kritischen Frequenz von Umfeldleuchtdichte und Farbe der Lichtquelle (Die Linien indizieren die Standardabweichung durch die Probanden.)

#### 4.3.2.3.1.1 Winkelgeschwindigkeit der Relativbewegung

Nachdem gezeigt wurde, dass bei vorgegebener Ausdehnung der Lichtquelle in Blickbewegungsrichtung die kritische Frequenz nur von der Geschwindigkeit der Relativbewegung der Lichtquelle abhängt, ist nun zu klären, welche Geschwindigkeiten für den Beobachter im Straßenverkehr auftreten.

Relevante Werte für die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  ergeben sich aus den Geschwindigkeiten von Blickbewegungen und schnellen Bewegungen der Lichtquelle selbst. In der Literatur finden sich Angaben zu Geschwindigkeiten von Blickbewegungen:

Ludvigh und Miller berichten, dass nach Adler freiwillige Augenbewegungen Geschwindigkeiten von bis zu 500-600 °/s erreichen können, und die Geschwindigkeit für normale Augenbewegungen zwischen 100 °/s und 200 °/s liegt [Lud58].

Die gleichen Werte für gewöhnliche Augenbewegungen geben Honegger und Schäfer an. Sie beschreiben ein Experiment, dass ebenfalls Ludvigh und Miller durchführten. Das Auge wurde bei der Verfolgung eines 110 °/s schnellen Objekts mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt. Es konnte festgestellt werden, dass es sich dabei mit bis zu 260 °/s bewegte [Hon64].

Für Sakkaden, die schnellen, meist unwillkürlichen Bewegungen des Auges zwischen den Fixationszeiten bzw. Fixationspunkten, werden maximale Geschwindigkeiten von 700 °/s bis 1000 °/s beschrieben [Boy03] [Ban04] [Pal99] [Die05]. Solche sakkadischen Bewegungen können auch willkürlich ausgelöst werden. Es wird häufig zusätzlich erwähnt, dass das menschliche Auge während der Sakkaden praktisch nichts wahrnimmt. Dieser Prozess wird sakkadische Suppression genannt. Geht man von diesen Voraussetzungen aus, scheiden diese Bewegungen als irrelevant aus. Nach [Thi04] handelt es sich bei der sakkadischen Suppression jedoch eher um eine Erhöhung der Sehschwelle. Lichtquellen, die oberhalb der Schwelle liegen, könnten während Sakkaden möglicherweise trotz Suppression gesehen werden, und somit den Perlschnureffekt bei sehr hohen Winkelgeschwindigkeiten hervorrufen. Diese offene Frage bleibt zu beantworten. Die Ergebnisse der genannten Studie sowie die Begriffe Sakkade und sakkadische Suppression werden im nachfolgenden Kapitel bei der Beschreibung eines eigenen Versuchs zu diesem Thema noch einmal aufgegriffen.

Blickfolgebewegungen erreichen nach Boyce [Boy03] maximal 40 °/s; Palmer [Pal99] gibt als obere Grenze für diese Augenbewegung 100 °/s an. Diem [Die05] hat in einer umfangreichen Arbeit das Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr untersucht. Er macht folgende Angaben: Die in der Literatur angegebenen Extremwerte für die Geschwindigkeiten der Augenbewegung von mehr als 200 °/s kommen relativ selten vor (4 %).

80 % der Augenbewegungen erfolgen mit einer Geschwindigkeit von unter 20 °/s für horizontale und unter 10 °/s für vertikale Bewegungen. Die Augenbewegungsgeschwindigkeiten sind bei Tag zu 60 % kleiner als 50 °/s, bei Nacht zu 90 % [Die05]. Diese Angaben geben einen Überblick über die Häufigkeit von schnellen Augenbewegungen, schließen selbige jedoch nicht aus.

Eine Relativbewegung nur durch die Bewegung der Lichtquelle wurde anhand des Beispiels eines Überholvorgangs auf der Autobahn theoretisch untersucht. Angenommen wurde der Extremfall mit Geschwindigkeiten von 80 km/h für das überholte, und 220 km/h für das überholende Fahrzeug. Im betrachteten Fall bewegt sich die Rückleuchte des überholenden Fahrzeugs in 2,5 m horizontaler Entfernung vom Fahrer des langsameren Fahrzeugs mit einer Bahngeschwindigkeit von 140 km/h oder 38,9 m/s. In dem Moment, in dem sich die Lichtquelle im 45 ° Winkel zum Betrachterauge befindet, hat sie so eine Relativgeschwindigkeit von ca. 630 °/s. Hat sie sich um 47,5 m in Fahrtrichtung weiterbewegt, beträgt ihre relative Winkelgeschwindigkeit nur noch ca. 45 °/s, da ihre Bahngeschwindigkeit konstant, aber der Abstand zum Betrachter nun wesentlich größer ist. Die Fortbewegung der Lichtquelle um 50 m in Fahrtrichtung dauert ca. 1,3 s. Tabelle 4-1 gibt einen Überblick darüber, wie sich in dieser Zeit die Winkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Entfernung und somit der Position im Gesichtsfeld ändert.

**Tabelle 4-1 relative Winkelgeschwindigkeiten beim Überholvorgang**

Entfernung der Lichtquelle vom Betrachter in Fahrtrichtung	relative Winkelgeschwindigkeit
<b>0 m</b>	<b>892 °/s</b>
<b>2,5 m</b>	<b>630 °/s</b>
<b>10 m</b>	<b>216 °/s</b>
<b>20 m</b>	<b>110 °/s</b>
<b>30 m</b>	<b>74 °/s</b>
<b>40 m</b>	<b>56 °/s</b>
<b>50 m</b>	<b>45 °/s</b>

Zusammenfassend lässt sich aus den obigen Betrachtungen ableiten, dass für die Winkelgeschwindigkeit der Relativbewegung  $\omega$  Werte von 0 bis zu 1000 °/s relevant sein können. Das Auftreten von solch hohen Winkelgeschwindigkeiten bei einer Eigenbewegung der Lichtquelle erfordert, wie gezeigt, extreme Voraussetzungen und ist im Vergleich zur Häufigkeit von solch schnellen Augenbewegungen in den seltensten Fällen anzunehmen. Theoretisch könnten sich noch wesentlich höhere Geschwindigkeiten durch die Kombination einer Blick- und Objektbewegung ergeben.

#### 4.3.2.3.2 Einfluss der sakkadischen Supression

Nachdem nachgewiesen wurde, dass der Perlschnureffekt über ein einfaches lineares Verhältnis (vgl. ( 4-27 )) der Größen  $fp$ ,  $\omega$  und  $b$  unter Berücksichtigung des Auflösungsvermögens  $\alpha$  erklärt werden kann, ist es von Interesse, welche maximalen Winkelgeschwindigkeiten für das Phänomen Perlschnureffekt wirklich relevant sind. Somit könnte auf eine maximale Pulsfrequenz, über die der Effekt für eine Lichtquelle der Breite  $b$  sicher vermieden werden kann, geschlossen werden. In 4.3.2.3.1.1 wurde der Bereich der potentiell relevanten Winkelgeschwindigkeiten abgesteckt. Es blieben die Fragen offen, ob bei sakkadischen Blickbewegungen helle Lichtquellen gesehen werden können, und ob somit der Perlschnureffekt bei sakkadischen Winkelgeschwindigkeiten auftritt. Sakkaden sind sehr schnelle, abrupte Augenbewegungen. Sie finden bis zu fünfmal pro Sekunde statt. Sie sind Teil des Abtastvorgangs, über den das Auge die Umgebung wahrnimmt. Da nur in der Fovea das scharfe und farbige Sehen optimal ausgeprägt ist, reicht es nicht aus, einen Punkt eines Sehobjektes zu fixieren, um das Objekt im Ganzen klar wahrzunehmen. Vielmehr werden viele Punkte des Sehobjektes schnell nacheinander abgetastet, und die scharfen Einzelbilder im Gehirn zu einem Gesamtbild verrechnet. Dies geschieht durch das Wechselspiel von Sakkaden und Fixationsperioden. Die Aufnahme von visuellen Informationen über die statische Umgebung geschieht während der Fixation. Sakkaden sind ballistische Bewegungen. Haben sie einmal begonnen, ist ihr Weg vorbestimmt. Die „Planung“ und Ausführung einer Sakkade benötigen zwischen 150 und 200 ms. Die ballistische Bewegung des Auges ist sehr schnell, benötigt typischer Weise etwa 30 ms und erreicht, je nach Amplitude, Geschwindigkeiten bis zu 1000 °/s [Pal99]. Während Sakkaden findet die sakkadische Supression statt. Ihre Funktion besteht darin, dass während der Augenbewegung keine bewusste Wahrnehmung eines verschmierten Bildes geschieht. Die Abbildung der Umgebung bewegt sich schnell über die Retina, was unweigerlich starke Bewegungsunschärfen hervorruft. Diese werden jedoch im Normalfall nicht wahrgenommen. In einem Experiment von Thilo et al. [Thi04] wurde die sakkadische Suppression untersucht. Über transkranielle Magnetstimulation des Kortex bzw. elektrische Stimulation der Retina wurden Phosphene, kleine illusionäre visuelle Wahrnehmungen, bei den Probanden erzeugt. Die Probanden wurden gebeten, freiwillige Sakkaden zwischen zwei Fixationspunkten im Abstand von 24 ° durchzuführen, bzw. nach Fixation eines Punktes auf den später erscheinenden zweiten Punkt zu schauen. Für verschiedene Zeiten vor, während und nach der Sakkade wurde der Schwellwert der Stimulation für Cortex und Retina gemessen, bei dem das Phosphen gerade noch wahrnehmbar war. Es zeigte sich, dass die über den Cortex erzeugten Phosphene auch während der Sakkaden ohne eine Änderung der Stimulationsstärke wahrnehmbar waren. Für die retinale Stimulation wurde jedoch, wie in Abbildung 5-20 zu sehen, eine merkliche Erhöhung der Schwelle bereits 50ms vor Beginn der Sakkade bis zu einigen 100 ms nach der Sakkade festgestellt [Thi04].

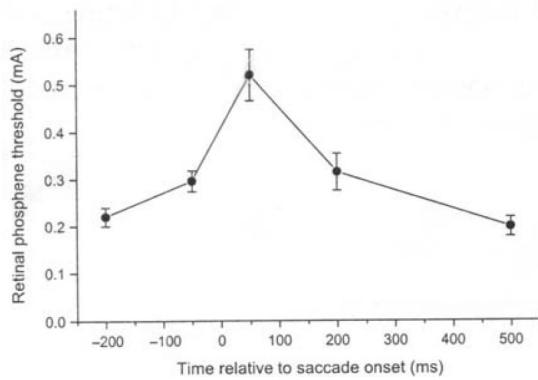


Abbildung 4-35 Zeitverlauf der sakkadischen Supression [Thi04]

Dies bedeutet, dass die sakkadische Supression an einer Stelle zwischen Retina und visuellem Cortex stattfindet, und auf einer Schwellenerhöhung, jedoch keinem absoluten Unvermögen der visuellen Wahrnehmung beruht.

In einem eigenen Experiment sollte evaluiert werden, ob eine Lichtquelle die Suppressionsschwelle während einer Sakkade überschreiten kann, und wenn, ob diese Schwelle eine absolute oder relative Größe ist. Hierzu wurden Probanden über einen stillstehenden halbdurchlässigen Spiegel gepulste Lichtquellen dargeboten, die mit einer Frequenz knapp über der Flimverschmelzungsfrequenz betrieben wurden. Dadurch wurde gewährleistet, dass bereits bei kleinen Relativbewegungen der Perlschnureffekt sichtbar wird. Auf der Projektionswand waren zwei Markierungen, je eine rechts und links von der virtuellen Lichtquelle angebracht und der Proband musste willkürliche Sakkaden zwischen diesen beiden Fixationspunkten durchführen. Durch eine regelbare Stromquelle wurde die Leuchtdichte der gepulsten Diodenlichtquelle so lange auf- bzw. abgedimmt bis der Proband den Perlschnureffekt gerade wahrnehmen bzw. gerade nicht mehr wahrnehmen konnte. Da diese willkürlichen Blickbewegungen nur von gut geschulten Probanden durchgeführt werden können und da es um eine prinzipielle Klärung der Frage nach einer absoluten oder relativen Schwelle, und nicht um eine qualitative Bestimmung dieser ging, wurde dieser Versuch nur mit zwei Probanden durchgeführt.

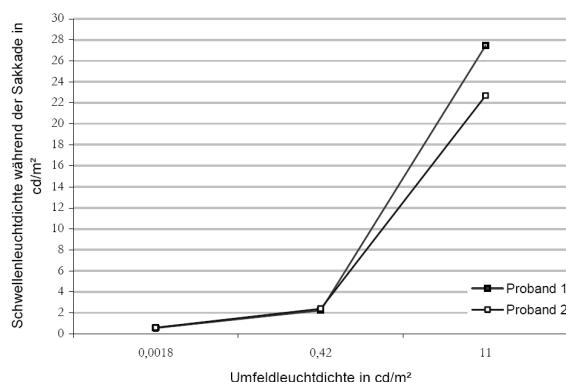


Abbildung 4-36 Abhängigkeit der sakkadischen Supressionsschwelle von der Umfeldleuchtdichte

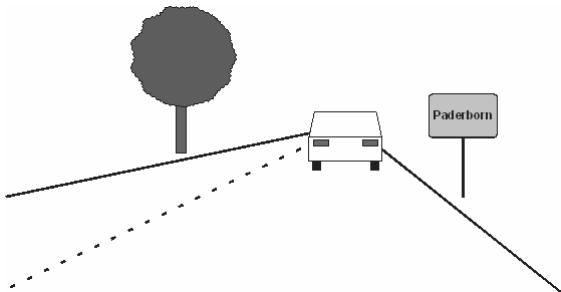
Die Messergebnisse zeigen, dass beide Probanden ähnliche Schwellwerte für die gerade nicht mehr wahrnehmbaren Leuchtdichten aufwiesen. Diese Schwellen-Leuchtdichte hängt von der Adaptationsleuchtdichte, also der Umfeldleuchtdichte ab und liegt um ein Vielfaches über dieser, besonders wenn berücksichtigt wird, dass die zeitdiskrete Leuchtdichte aufgrund des Tastverhältnisses von 50 % dem doppelten der angegebenen Leuchtdichte entspricht. Die sakkadische Supression macht es demnach unmöglich Objekte, die dunkler als eine von der Umfeldleuchtdichte abhängigen Schwelle sind, während einer Sakkade zu sehen. Durch diese Erkenntnis lassen sich einige Phänomene in Verbindung mit gepulsten Lichtquellen erklären.

#### **4.3.2.4 Phänomene des Perlschnureffektes**

Mit Hilfe der sakkadischen Supression lassen sich zwei Phänomene im Zusammenhang mit dem Perlschnureffekt erklären. Zum einen zeigen Beobachtungen, dass der Effekt tagsüber seltener auftritt als nachts, zum anderen scheinen die Leuchten der vorausfahrenden Fahrzeuge kurzzeitig an Stellen zu erscheinen, an denen nie ein Fahrzeug gewesen ist. Daher werden diese Erscheinungen auch Doppel- oder Geisterbilder genannt.

Zur Klärung dieser Phänomene soll folgendes Fallbeispiel dienen:

Ein Kfz-Fahrer folgt einem vorausfahrenden Fahrzeug auf einer Landstraße. Vor ihm bietet sich die in Abbildung 4-37 dargestellte Szenerie.



**Abbildung 4-37 Straßenszene mit zwei Fixationspunkten (Ortsschild und Baum)**

Zum Zeitpunkt a fixiert der Fahrer das vor ihm auftauchende Ortsschild. Aus irgendeinem Grund erregt der Baum auf der linken Seite sein Interesse, so dass er seinen Blick von dem Schild abwendet und eine schnelle Blickbewegung (Sakkade) vollführt. Nachdem er diese beendet hat, fixiert er nun zum Zeitpunkt b den Baum. Da dieser Vorgang bei Tag vonstatten geht, herrschen typische Umfeldleuchtdichten von ca. 5000 cd/m<sup>2</sup> vor (bedeckter Himmel). Die Leuchtdichte der Rückleuchte beträgt hierbei aber lediglich ca. 1300 cd/m<sup>2</sup> (Golf Plus). Aus der vorangegangenen Untersuchung lässt sich schließen, dass die Schwelle der sakkadischen Supression über der Umfeldleuchtdichte liegt, und die Person während der Blickbewegung weder das Umfeld noch die dunklere Rückleuchte wahrnimmt. Damit erklärt sich, warum der Perlschnureffekt bei Tag nicht durch Blickbewegungen hervorgerufen werden kann.

Bei Augenbewegung, unabhängigen Relativbewegungen, wie z.B. Vorbeifahrt oder Beobachtung durch einen bewegten Spiegel, kommt es nicht zur sakkadischen Supression und die Perlschnüre werden sichtbar.

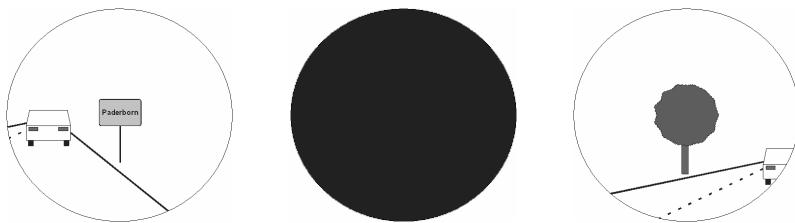


Abbildung 4-38 Netzhautbilder bei Blickbewegungen bei Tag

Nachts liegen die typischen Umfeldleuchtdichten auch mit Straßen- oder Scheinwerferbeleuchtung bei Größenordnungen von  $10 \text{ cd/m}^2$  bis maximal  $100 \text{ cd/m}^2$ . Die Rückleuchte ist hier also um das Zehn- bis Hundertfache heller als die Umgebung. Da es sich bei der Suppressionsschwelle um eine relative Schwelle handelt, ist diese unter diesen Umständen niedriger als die Leuchtdichte der Rückleuchte. Dies bewirkt folgendes: Während der Sakkade nimmt der Fahrer trotz Supression die Perlschnur wahr. Aufgrund des ikonischen Gedächtnisses mixt er dieses Bild bei der Fixation des zweiten Objektes (Baum). Nach kurzer Zeit verschwindet die Perlschnur und die gewohnte Szenerie ist zu erkennen. Dieser Vorgang ist in Abbildung 4-39 illustriert. Es ist deutlich zu sehen, dass links neben der Fahrbahn Lichtquellen erscheinen, obwohl das Fahrzeug selbst nie die Fahrbahn verlassen hat. Der gleiche Effekt tritt auf, wenn der Fahrer seinen Blick vom Heck des Vorausfahrenden auf den Tacho lenkt. Hierbei scheint kurz ein zweites Paar Rückleuchten über dem Fahrzeug zu schweben.

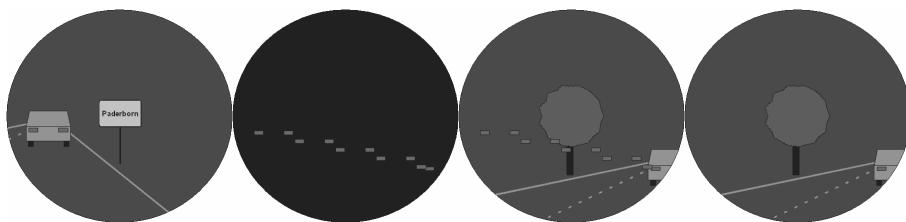


Abbildung 4-39 Netzhautbilder bei der Blickbewegung bei Nacht

Bisher konnte gezeigt werden, warum die Perlschnur entsteht, warum sie nachts häufiger vor kommt als am Tag, und warum es dadurch zu Geisterbilderscheinungen kommen kann. Es stellt sich allerdings noch die Frage, warum bei kontinuierlichen Lichtquellen keine „Geisterlinien“ auftreten. Auch un gepulste Rückleuchten müssten nachts zwar keine Perlschnur, aber eine Linie hinterlassen.



Abbildung 4-40 Netzhautbild einer kontinuierlichen und einer diskontinuierlichen Rückleuchte

Tatsächlich lassen sich nachts solche Linien beobachten. Diese Linien sind jedoch bei einer gleich hellen Rückleuchte wesentlich dunkler als die Perlen der Perlschnur. Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, werden Rückleuchten, die über Pulsweitenmodulation gedimmt werden, mit voller Stromamplitude betrieben und nur das Tastverhältnis bestimmt aufgrund des Talbot'schen Gesetzes den Helligkeitseindruck. Da normalerweise Helligkeitsunterschiede von eins zu zehn zwischen Rück- und Bremslicht erreicht werden, werden gepulste Rückleuchten während der An-Phase mit einer bis zu 10fach größeren Intensität betrieben. Die Intensität wird förmlich in den Perlen der Perlschnur zusammengezogen.



Abbildung 4-41 Zeitdiskreter Lichtstrom einer kontinuierlichen und einer diskontinuierlichen Rückleuchte gleicher Helligkeit

Diese wesentlich helleren Lichtpunkte liegen demnach weiter über der Suppressionsschwelle und werden als deutlich heller empfunden. Eine weitere Erklärung, warum Lichtlinien weniger zu Irritationen führen, könnte darin begründet sein, dass der Beobachter bei Blickbewegungen und bei bewegten Objekten solche Linien erfahrungsgemäß erwartet. Erst eine unterbrochene, quasi „blinkende“ Linie signalisiert eine diskontinuierliche Lichtquelle oder gar mehrere Quellen, auf die der Beobachter mit gesteigerter Aufmerksamkeit reagiert.

#### 4.3.2.5 Konstruktionshinweise für gepulste Lichtquellen

Da besonders nachts auch während einer Sakkade gepulste Lichtquellen wahrgenommen werden, sind für die Auslegung der Lichtquelle Blickgeschwindigkeiten von 700 °/s bis 1000 °/s zu berücksichtigen. Nach der in Kapitel 4.3.2 hergeleiteten Gleichung zur Bestimmung der kritischen Pulsfrequenz würde eine Lichtquelle mit einem Durchmesser von 20 cm in einem Abstand von 50 m bei einer 1000 °/s schnellen Sakkade noch bei über 4000 Hz eine Perl schnur verursachen.

$$f_p = \frac{\omega}{(b+a)}$$

Untersuchungen von Diem [Die05] haben gezeigt, dass ca. 90 % aller Blickbewegungen eines Fahrers innerhalb 50 °/s liegen, und dass etwa 98 % der Blickbewegungen bei einer Geschwindigkeit unter 200 °/s liegen. Somit kann für die Beispiellichtquelle und einer Blickgeschwindigkeit von 50 °/s schon bei 220Hz die Wahrscheinlichkeit des Erscheinen einer Perl schnur gering gehalten werden.

Bei der Konstruktion von gepulsten Lichtquellen ist neben der Pulsfrequenz auch die Breite  $b$  der Lichtquelle in Blickrichtung so zu gestalten, dass der Perl schnureffekt unterdrückt wird. In Abbildung 4-42 sind Rückleuchten dargestellt, die entweder in vertikaler oder in horizontaler Richtung geringe Ausdehnung haben. Bei dieser erstmalig durch LEDs ermöglichten Bauform müssen besonders hohe Frequenzen für die Pulsweitenmodulation bei adaptiven Leuchtenfunktionen verwendet werden.



Abbildung 4-42 Rückleuchten mit geringer horizontaler bzw. vertikaler Ausdehnung

Für den Fall, dass der Beobachter nah an die Leuchte herankommt, kann er je nach Konstruktion die einzelnen LEDs auflösen. Dadurch verringert sich die Breite der Lichtquelle. Da somit auf einem Areal mehrere Perl schnüre auftreten können, bewirken Rüttelbewegungen durch Fahrbahnunebenheiten eine Art „Flimmern“ der Rückleuchte.



Abbildung 4-43 Rückleuchte mit visuell auflösbaren Einzellichtquellen

Zum Perlschnureffekt lässt sich zusammenfassend sagen, dass dieser nur durch eine Erhöhung auf sehr hohe Frequenzen vermieden werden kann. Werden die Dioden zu größeren Arealen zusammengefasst, können unter Einhaltung der Konstruktionsrichtlinien bereits Frequenzen um 220Hz ausreichen, um den Perlschnureffekt unwahrscheinlich werden zu lassen.

### 4.3.3 Blendung durch gepulste Lichtquellen

Anhand des Beispiels der pulsmodulierten Rückleuchte konnten die Risiken beim Betrachten einer solchen leuchtenden Lichtquelle aufgezeigt werden. Um jedoch den in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Ansatz zum dynamischen Beleuchten zu realisieren, müssen wesentlich hellere gepulste Lichtquellen eingesetzt werden. Zwar ist das Ziel dieser aktiven Beleuchtung, jegliche blendgefährdeten Verkehrsteilnehmer zu detektieren und auszublenden, doch ist häufig ein schwächeres Beleuchten von z.B. Fußgängern am Straßenrand zur Orientierung des Fahrzeugführers hilfreich. Werden Personen mit über Pulsweitenmodulation gedimmten Lichtquellen beleuchtet, stellt sich die Frage, ob dies einen Einfluss auf die Blendung dieser Personen hat.

Eine weit verbreitete Theorie der Blendung ist die Theorie der Schleierleuchtdichte: Befindet sich im Blickfeld des menschlichen Auges eine unabgeschirmte Lichtquelle, so wird das Licht auf der Hornhaut (1), in der Linse (2) und im Glaskörper (3) gestreut und auf der Netzhaut (4) reflektiert. Im Inneren des Auges entsteht so ein Streulicht, das sich wie ein Schleier auf die Netzhaut legt. Diese virtuelle Helligkeit wird auch mit Hilfe einer äquivalenten Raumhelligkeit durch die äquivalente Schleierleuchtdichte beschrieben (Abbildung 4-44) [Lan04] [Bae90].

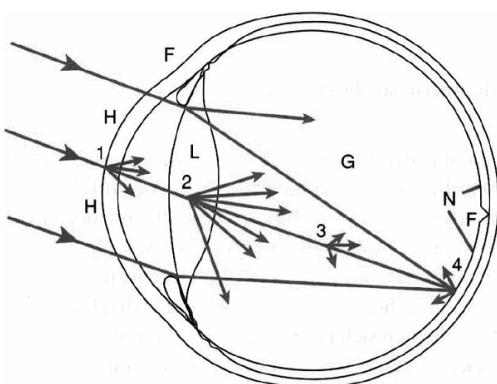


Abbildung 4-44 Entstehungszentren für Streulicht im Auge bei Blendung [Lan04]

Nach der Kontrastdefinition von Weber ist der wahrgenommene Kontrast  $K_{O/U}$ , eines gegenüber dem Umfeld helleren Objektes, gleich:

$$K_{O/U} = \frac{L_O - L_U}{L_O} \quad (4-28)$$

Aufgrund der, durch Streulicht entstehenden, Schleierleuchtdichte, werden sowohl das Objekt als auch das Umfeld virtuell aufgehellt. Es wird somit die äquivalente Schleierleuchtdichte  $L_{S,\text{äqu}}$  aufaddiert. Nach ( 4-29 ) verringert sich dadurch der Kontrast des Objektes zum Umfeld.

$$K_{O/U} = \frac{(L_O + L_{S,\text{äqu}}) - (L_U + L_{S,\text{äqu}})}{(L_O + L_{S,\text{äqu}})} \rightarrow K_{O/U} = \frac{L_O - L_U}{L_O + L_{S,\text{äqu}}} \quad (4-29)$$

Dieser Vorgang heißt physiologische Blendung. Die physiologische Blendung ist eine messbare Beeinträchtigung der Sehfunktion. Unterhalb eines bestimmten Wertes ist keine messbare Beeinträchtigung der Sehfunktion feststellbar. Häufig werden allerdings auch dann noch Blendlichtquellen als störend empfunden. Diese Erscheinung wird psychologische Blendung oder Unbehaglichkeitsblendung genannt. Ihre Bewertung beruht auf den subjektiven Urteilen einer größeren Anzahl von Beobachtern. Diese Blendung hat zwar keinen Einfluss auf die Sehleistung, kann aber Auswirkungen auf Wohlbefinden, Arbeitsleistung und Konzentrationsfähigkeit haben.

Da die entstehende Schleierleuchtdichte, durch die die Kontrastverflachung hervorgerufen wird, im Fall der pulsmodulierten Lichtquelle im Maximum um den Faktor des reziproken Tastverhältnisses höher ist, könnte man vermuten, dass eine größere Blendwirkung entsteht. Nach dem Talbot'schen Gesetz sollte die Schleierleuchtdichte aus der mittleren Beleuchtungsstärke am Auge des Geblendeten erreichbar sein.

Nach Baehr [Bae90] kann die äquivalente Schleierleuchtdichte  $L_{S,\text{äqu}}$  aus der Blendbeleuchtungsstärke am Auge  $E_{Bl}$ , dem Winkel unter dem die Lichtquelle zur Blickrichtung erscheint  $\Theta$  und der altersbedingten Glaskörper- und Linsentrübung (Alterfaktor  $K$ ) errechnet werden.

$$L_{S,\text{äqu}} = K \frac{E_{Bl}}{\Theta^2}$$

$$E_{Bl} = \frac{1}{T} \int_E(t) \cdot dt$$

Alter	K
20	6,3
30	9,2
40	12,1
50	15
60	17,8

Es ist also zu erwarten, dass gepulste Lichtquellen, bei gleicher mittlerer Beleuchtungsstärke, oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz die gleiche Kontrastverflachung bewirken wie un gepulste Lichtquellen. Eine Apparatur, die die durch Blendung verursachte Kontrastverflachung messbar macht, ist das Mesoptometer [Mes]. Dieses für die Messung der Nachtfahrtauglichkeit von Kfz-Fahrern entwickelte Messinstrument ermöglicht die Messung der von Probanden unter mesopischen Bedingungen wahrnehmbaren Kontraste unter dem Einfluss einer Blendlichtquelle. Der gerade noch wahrnehmbare Kontrast ist hierbei ein Maß für die Blendung, da der Schwellenkontrast durch die äquivalente Schleierleuchtdichte der Blendlichtquelle steigt. Mit Hilfe eines modifizierten Mesoptometers, das zusätzlich das Variieren der Pulsparameter der Blendlichtquelle ermöglicht, lassen sich die Einflüsse der Pulsfrequenz

und der Pulsamplitude bzw. des Tastverhältnisses auf die physiologische Blendwirkung überprüfen.

Eine Untersuchung an 20 Probanden soll die Hypothese der frequenz- und amplitudenunabhängigen Blendung überprüfen. Die getesteten Personen waren acht Frauen und zwölf Männer im Alter zwischen 23 bis 46 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 27,9 Jahren. In Tabelle 4-2 sind die resultierenden Schwellen der gerade noch wahrnehmbaren Kontraste der Personen unter den jeweiligen Blendsituationen von konstantem Licht bis hin zu mit nur 50Hz gepulstem Licht aufgeführt. Der Schwellenkontrast wird hier aus dem Verhältnis der Leuchtdichte des gerade noch erkannten Objektes  $L_{O,S}$  zu dem Umfeld mit mesopischer Leuchtdichte  $L_M$  ( $0,1\text{cd}/\text{m}^2$ ) bestimmt.

$$K_s = \frac{L_{O,S}}{L_M} \quad (4-30)$$

**Tabelle 4-2 Ermittelter Schwellenkontrast bei verschiedenen Pulsparametern**

Frequenz [Hz]	-	100	100	100	500	50
Pulsweite $t_{Id}$ [ms]	-	<b>8,62</b>	<b>1,88</b>	<b>1,05</b>	<b>0,38</b>	<b>3,75</b>
dc [%]	<b>100,00</b>	<b>86,20</b>	<b>18,80</b>	<b>10,50</b>	<b>18,90</b>	<b>18,75</b>
$E_{mittel}$ [lx]	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>
$E_{max}$ [lx]	<b>0,50</b>	<b>0,58</b>	<b>2,66</b>	<b>4,76</b>	<b>2,65</b>	<b>2,67</b>
<hr/>						
Mittlerer Schwellenkontrast	<b>0,44</b>	<b>0,42</b>	<b>0,42</b>	<b>0,43</b>	<b>0,43</b>	<b>0,41</b>
Standardabweichung	<b>0,14</b>	<b>0,17</b>	<b>0,19</b>	<b>0,16</b>	<b>0,15</b>	<b>0,17</b>

Es zeigt sich, dass das Gesetz von Talbot auch auf die Blendung mit gepulsten Lichtquellen anwendbar ist. Zur Veranschaulichung sind in dem Diagramm, das die Ergebnisse und die Streubreite einer Standardabweichung enthält, zusätzlich die Lagen der Mittelwerte einer Untersuchung von Kliebisch, Stahl und Völker [Kli03] aufgeführt, in deren Studie unter anderem der Einfluss des Alters auf die Blendempfindlichkeit untersucht wurde.

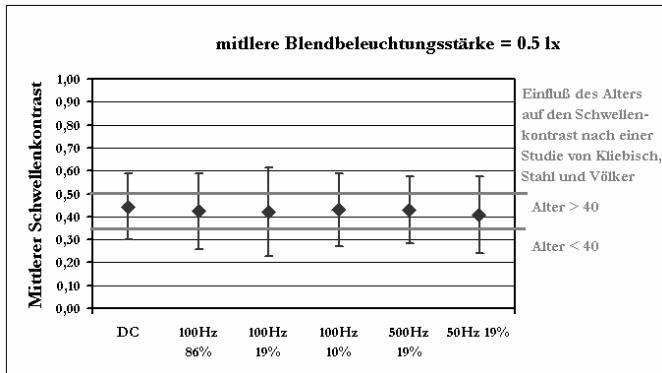


Abbildung 4-45 Die Schwankungen innerhalb der ermittelten Schwellenkontraste sind geringer als altersbedingte Schwankungen [Kli03]

Fasst man die Ergebnisse zusammen, lässt sich schlussfolgern, dass die Frequenz als solche keinen signifikanten Einfluss auf die objektive Blendung hat. Die zu beobachtenden kleinen Schwankungen des mittleren Schwellenkontrastes bei verschiedenen Frequenzen sind wesentlich geringer als der Unterschied, der von Kliebisch et al. vermessenen Altersgruppen. Somit kann angenommen werden, dass für den Blendeindruck gepulster Lichtquellen oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz die nach Talbot berechnete mittlere Leuchtdichtheit, bzw. Beleuchtungsstärke am Auge und die Position der Lichtquelle zum Beobachter ausschlaggebend ist.

## 5 Funktionsmuster

Aus den vorangegangenen Kapiteln lässt sich ableiten, dass ein Scheinwerfer auf der Basis von gepulsten LEDs unter bestimmten Rahmenbedingungen kein physiologisches Risiko darstellt. So ist die Blendwirkung oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF) gleich der eines ungepulsten Scheinwerfers gleicher mittlerer lichttechnischer Werte. Um eine Irritation anderer Verkehrsteilnehmer durch den Perl schnureffekt zu vermeiden, muss die Frequenz der Lichtquelle auf ein Vielfaches der FVF erhöht werden. (Kapitel 4.3.2.5)

Auch die thermodynamischen Eigenschaften von Dioden begrenzen die einsetzbaren Frequenzen. Die unter Kapitel 4.2 untersuchten LEDs dürfen z.B. bei Frequenzen unter 40Hz nicht mehr mit der maximalen Leistung betrieben werden.

Die Obergrenze der Frequenzen ist durch die LED selbst (~75-55MHz; Kapitel 4.2) und durch die Fluorophorkonversion (~135kHz; Kapitel 4.1) festgelegt. Außerdem führt die Tatsache, dass die geplante Lichtquelle in einem Kfz betrieben werden soll zu besonderen Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). EMV wird definiert als die Fähigkeit eines elektromagnetischen Systems, regelgerecht in seinem bestimmungsgemäßen elektromagnetischen Umfeld zu funktionieren, ohne störend auf andere Systeme in diesem Umfeld einzuwirken. Ziel ist es, das elektronische System gegen Emissionen anderer Systeme abzuschirmen, Störeinflüsse auf die Operationen anderer Systeme zu vermeiden, und die Beeinträchtigung der eigenen Funktion zu unterbinden [Ryb04]. Demnach muss das System gegen einstrahlende elektromagnetische Strahlung geschützt werden und es muss erreicht werden, dass die Frequenzen, entstehend durch das Pulsen der Lichtquelle, nicht das System als solches oder dessen Umwelt stören.

Alle erworbenen Erkenntnisse werden in dem nachfolgenden Kapitel angewendet, um ein Funktionsmuster zu entwerfen, das die Möglichkeiten einer gepulsten Lichtquelle zeigt. Nach der Auswahl eines geeigneten dynamischen Optikprinzips werden dessen Komponenten theoretisch ausgelegt, um im Anschluss ein funktionsfähiges Muster zu fertigen.

## 5.1 Optik

### 5.1.1 Dynamische Lichtstromverteilung

In diesem Abschnitt werden verschiedene optische Systeme vorgestellt, die eine dynamisch periodische Lichtverteilung erzeugen.

Da sich maximale Beleuchtungsstärken und Kontraste lediglich durch das Abbilden der Lichtquelle (LED) in die Bildebene erreichen lassen, beschränken sich die nachfolgenden Überlegungen einzig auf dynamische periodische Abbildungssysteme. Weiterhin werden ausschließlich Systeme analysiert, die bild- und objektseitig das gleiche Medium umgibt. Die Brechzahlen  $n$  und  $n'$  sind somit gleich.

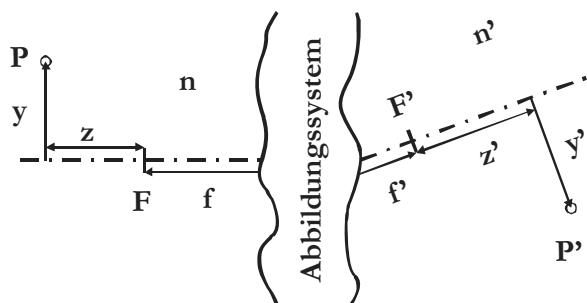


Abbildung 5-1 Variablen eines abbildenden Systems im paraxialen Gebiet

Um aus gegebener Lage und Größe eines Gegenstandes auf dessen Bildlage und Bildgröße zu schließen, können bei bekannten optischen Systemdaten die Abbildungsgleichungen herangezogen werden [Schr02].

Für  $n' = n$  gilt:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} = \sqrt{-\frac{z'}{z}} \quad (5-1)$$

Enthält die Optik spiegelnde Bestandteile, kann die optische Achse, die die Krümmungsmittelpunkte der Einzelflächen verbindet, einen Knick wie in Abbildung 5-1 erfahren. Um den Lichtstrom einer Lichtquelle im Punkt P dynamisch in der Bildebene zu verteilen, muss auf die Optik derart eingegriffen werden, dass periodisch das Bild der Lichtquelle im Punkt P' die Bildebene durchläuft. Lediglich den Abbildungsmaßstab zu variieren, ist hierbei wenig zweckdienlich. Es sei denn, das Ziel sind geringere Auflösungen und Kontraste der dynamischen Optik in einigen Zonen der Beleuchtung. Auch ist in der Regel der Abstand  $a'$  der Bildebene zur Hauptebene vorgegeben und soll somit auch nicht variiert werden.

Zweckmäßige Möglichkeiten für eine dynamisch scannende Optik ergeben sich durch das Variieren der Relativlage des Punktes P(x,y) oder durch das Knicken der optischen Achse. Im Folgenden werden verschiedene Varianten für das optische System vorgestellt, um im Anschluss ein geeignetes System auszuwählen und zu entwerfen.

### **Variante 1:**

Mit Hilfe eines abbildenden Systems wird die Lichtquelle auf die zu beleuchtende Szenerie abgebildet. Mechanisch wird derart eingegriffen, dass sich die Relativlage der Lichtquelle zur optischen Achse bewegt. Aufgrund des großen Abbildungsmaßstabs bewirken bereits kleine Winkelbewegungen große Auslenkungen im Bildraum. Es genügen demnach bereits Oszillationen der Lichtquelle oder der Optik mit kleinen Amplituden, um einen scannenden Effekt großer Abtastung zu erzeugen. Nachteilig an dieser Variante ist die mechanische Umsetzung der Oszillation. Sowohl die Optik als auch die LED mit Wärmesenke wird in einem späteren Aufbau eine nachteilig große Masse aufweisen, sodass große Lagerkräfte auftreten. In einer Umgebung, wie der des Fahrzeuges, in der zudem externe Einflüsse von Stößen mit Beschleunigungen von bis zu 11g auftreten können, ist es zusätzlich zu gewährleisten, dass diese die Oszillation nicht beeinflussen.

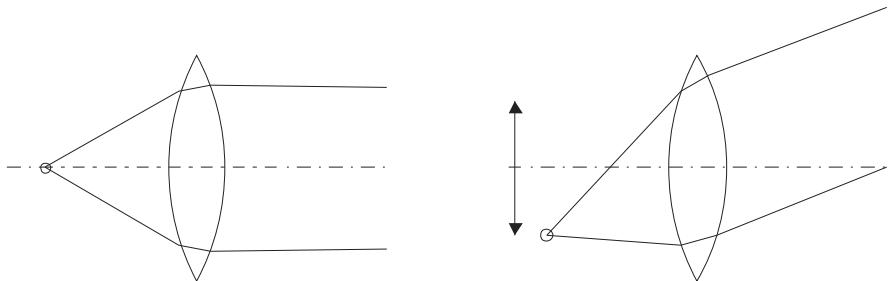


Abbildung 5-2 Dynamik durch Variation der Relativlage von Optik zu Lichtquelle

### **Variante 2:**

Die Umlenkung der Abbildung wird durch ein variables Knicken der optischen Achse erreicht. Hierzu sitzt zwischen Optik und Szenerie ein Umlenkspiegel, der oszilliert oder rotiert. Ein Kfz-Scheinwerfer nach diesem Prinzip wird in einer Offenlegungsschrift von Götz et al. beschrieben [Goe06]. Der Wechsel zur Rotation ermöglicht eine robustere und unanfälliger Bauweise der mechanischen Komponenten. Wie in Kapitel 2.3.3 erörtert, ist es durch die geringen Leuchtdichten der Dioden notwendig, Optiken mit großen Öffnungsblenden zu realisieren. Dies führt zu großen Austrittspupillen, also zu Optiken mit großen Durchmessern. In der Prinzipskizze wird deutlich, dass der Umlenkspiegel mindestens die Größe der Optik haben muss, um den gesamten Lichtstrom zu erfassen und um somit eine Vignettierung zu vermeiden. Damit ergibt sich eine große Spiegelfläche, die rotiert werden muss. Aufgrund des Luftwiderstandes der Spiegelmasse und der bereits beschriebenen Betriebsbedingungen, ist diese Lösung nur bedingt praktikabel.

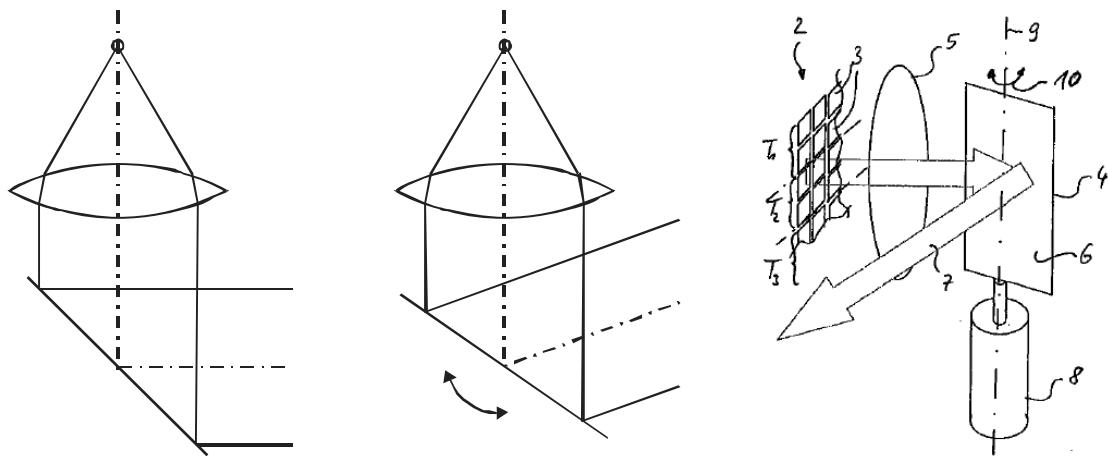


Abbildung 5-3 Dynamik durch variables Abknicken der optischen Achse [Goe06]

### Variante 3:

Mit Hilfe einer ersten Abbildungsoptik wird ein Zwischenbild erzeugt. Eine zweite Projektionsoptik bildet das Zwischenbild in der zu beleuchtenden Szenerie ab. Eine ähnliche Bauform wird in einer Offenlegungsschrift von OSRAM Opto Semiconductors GmbH vorgeschlagen [Die04], um einen LED-Projektor zu realisieren. Durch eine geknickte Bauform und einen variablen Umlenkspiegel lässt sich die optische Achse der ersten Optik zu der der zweiten Optik verdrehen. Dadurch wird erreicht, dass sich das Zwischenbild in Analogie zu Variante 1 bewegt. Mit diesem Aufbau wird die mechanische Komponente, sowohl in der Größe als auch in der Masse der Baugruppe, auf ein Minimum reduziert.

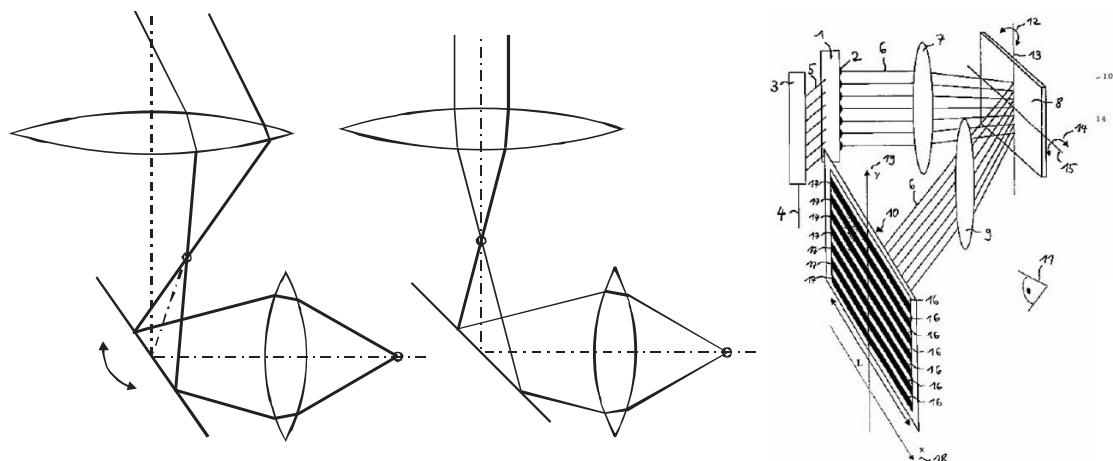


Abbildung 5-4 Dynamik durch Erzeugung eines bewegten Zwischenbildes [Die04]

Trotz der zusätzlichen optischen Komponenten führten die leichte Bauweise und der kontinuierliche rotatorische Antrieb dazu, dass diese Variante für den Aufbau des Funktionsmusters weiterverfolgt wird.

### 5.1.2 Spiegelgeometrie

Da der Lichtstrom einer LED auch in Zukunft nicht ausreichen wird, um einen Voll-LED-Scheinwerfer zu realisieren, soll für das Funktionsmuster ein LED-Array verwendet werden. Mit einer zeilenförmigen Anordnung der Dioden können die Spiegelbewegungen und damit die Rotationsachsen auf eine Achse reduziert werden. Durch die Spiegelbewegung wird die Auflösung in einer Achse der Beleuchtung realisiert. Die notwendige senkrechte Auflösung ermöglicht die adressierbare LED-Zeile. (Abbildung 5-5)

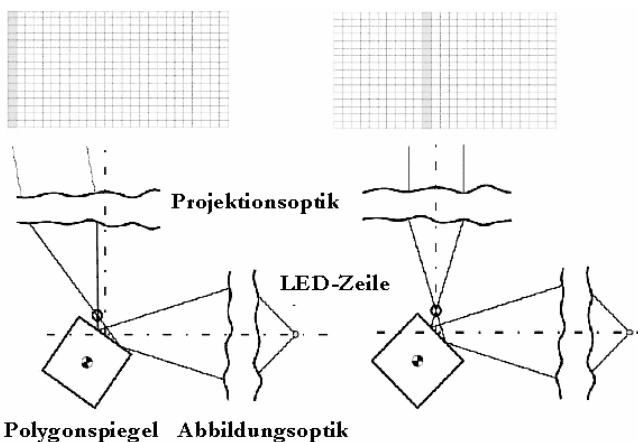


Abbildung 5-5 Kombination von dynamischer Optik und dynamischer Lichtquelle

Die Zahl der Spiegelflächen ist im Wesentlichen ein Kompromiss aus zwei Faktoren. Bei konstanter Drehzahl vervielfacht sich die Bildwiederholrate der Projektion mit zunehmender Spiegelanzahl. Damit sind eine längere Laufzeit und eine geringere Lagerbelastung des Spiegelantriebes möglich. Bei gleicher Spiegelflächengröße nimmt auch der Durchmesser des Polygonspiegels mit der Spiegelanzahl zu. (Abbildung 5-6) Dies vergrößert wiederum das Bauvolumen und die Masse des Spiegels.

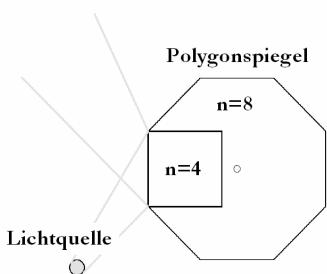


Abbildung 5-6 Polygonspiegel mit gleicher Spiegelgröße

Für das Funktionsmuster kommt ein Spiegel mit vier Spiegelflächen zum Einsatz.

### 5.1.3 Optisches System

Die benötigte Optik unterteilt sich in die Abbildungsoptik, die ein von dem Polygonspiegel umgelenktes Zwischenbild erzeugt und in die Projektionsoptik, die das aufgespannte Zwischenbild in die Szenerie abbildet.

#### 5.1.3.1 Abbildungsoptik

Durch die Optimierung einer als Vorbildsystem dienender Kondensoroptik der Köhlerschen Beleuchtung ist das in Abbildung 5-7 dargestellte zweilinsige System entstanden. Mit einer dritten Linse, die nah an der Lichtquelle positioniert ist und damit quasi als Feldlinse dient, kann der Öffnungswinkel zusätzlich erhöht werden. Somit wird mehr Lichtstrom eingefangen und ein besserer Leuchtenwirkungsgrad erzielt.

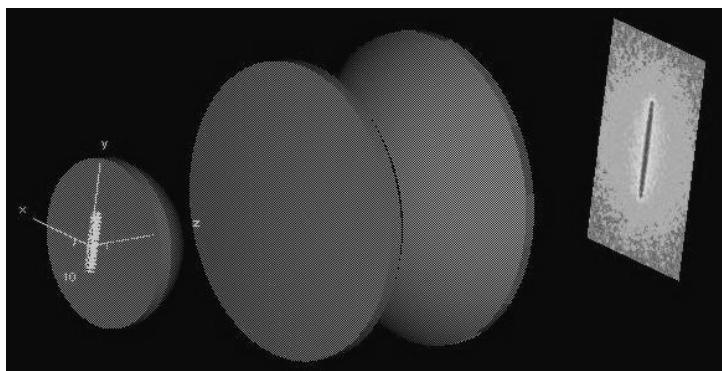


Abbildung 5-7 Synthetisierte Abbildungsoptik

Die Analyse der Abbildungsoptik zeigt, dass mit zunehmendem Optikradius zwar der Lichtstrom ansteigt, die Beleuchtungsstärke hingegen in Sättigung geht. Die Ursache hierfür sind die größer werdenden Abbildungsfehler für achsferne Strahlen. Diese Fehler könnten durch asphärische Linsenflächen minimiert werden. Mit diesem Abbildungssystem ist demnach für das Funktionsmuster ein Optikdurchmesser von 40mm ausreichend.

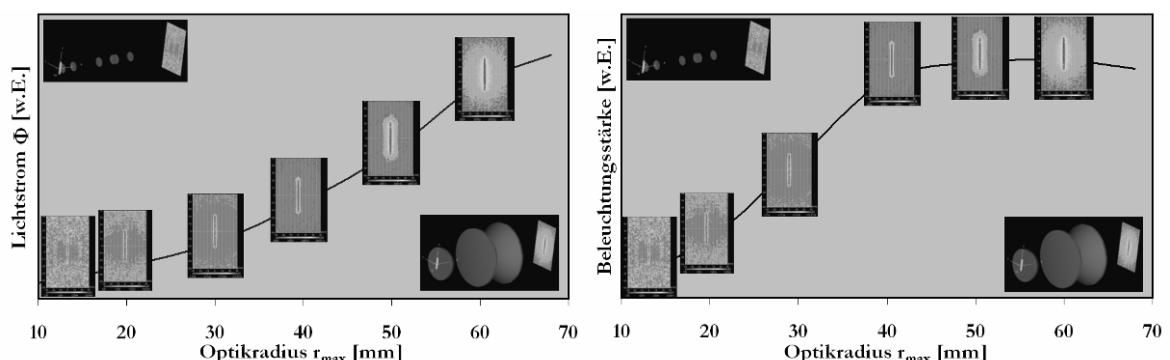


Abbildung 5-8 Anstieg des Lichtstromes und der Beleuchtungsstärke (~Abbildungsqualität) mit zunehmendem Optikradius

### 5.1.3.2 Projektionsoptik

Da der Polygonspiegel seine projizierte Fläche in Richtung Abbildungsoptik mit dem Drehwinkel verringert, bewirkt dieser bei großen Ablenkwinkeln eine Vignettierung des Zwischenbildes. Demnach sollte der Scannbereich minimiert werden. Um dennoch eine breite Ausleuchtung zu erreichen, muss das Zwischenbild optisch aufgeweitet werden. Dies wird durch anamorphotische Optiken erreicht. Für das Funktionsmuster dient als Vorbildsystem ein Anamorphot nach dem Prinzip Projektionsoptik + Zylinderlinse [Haf02]. Anschließend an die Optimierung der Projektionsoptik und der Zylinderlinsenoptik ergibt sich das in Abbildung 5-9 dargestellte System. Hier ist es ebenfalls dienlich eine Feldlinse einzufügen, um die durch den Spiegel abgelenkten und unter steilen Winkel in die Optik fallenden Strahlen einzufangen. Aufgrund der einachsigen Ablenkung genügt eine Zylinderfeldlinse.



Abbildung 5-9 Optisches System des Funktionsmusters

Durch den Spiegel, die Abbildungsoptik und die Projektionsoptik sind die optischen Flächen des Funktionsmusters vollständig beschrieben. Der komplette optische Aufbau ist in Abbildung 5-9 dargestellt.

## 5.2 Mechatronik

### 5.2.1 Regelkreis

Die optischen Komponenten müssen in einen Regelkreis eingebunden werden. Dieser besteht aus zwei Hauptkomponenten, die zur Wahrung der Funktionalität synchron betrieben werden. Diese sind die pulsmodulierte LED-Zeile und der konstant drehende Polygonspiegel. Um die jeweilige Spiegelstellung zu überprüfen und um die LED-Zeile dieser Stellung anzupassen, soll eine Lichtschranke den Umlauf des Spiegels überwachen. In Abbildung 5-10 (links) sind vereinfacht die für die Regelung wichtigen Komponenten dargestellt. Der Energie- und der Informationsfluss sollen mit Abbildung 5-10 (rechts) verdeutlicht werden.

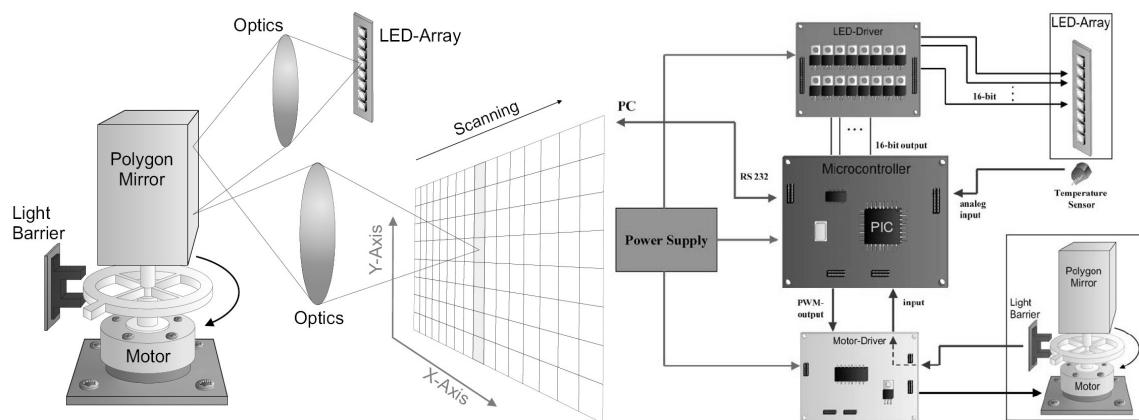


Abbildung 5-10 Mechatronische Komponenten & Energie- und Informationsfluss des Funktionsmusters

### 5.2.2 LED-Zeile

Als Lichtquelle für das Funktionsmuster dient eine adressierbare Zeile aus 16 einzelnen Hochleistungs-LEDs. Die größte Einschränkung beim Aufbau der Zeile entsteht durch das Gehäuse der LED. Das Gehäuse ist bei den meisten verfügbaren LEDs um ein Vielfaches größer als der Chip selbst. Da nur der Chip die lichtemittierende Fläche darstellt, entstehen große Lücken zwischen den einzelnen Leuchtflächen. Diese Lücken würden sich in der Projektion als sichtbare Abstände zwischen den Zeilen bemerkbar machen. Zusätzlich wird durch große Gehäuse die LED-Zeile sehr lang. Folglich hat eine große LED-Zeile den Nachteil, dass die Optik mit der die LED abgebildet wird, entsprechend groß sein muss. Sehr gute Eigenschaften sind hingegen bei einer LED-Zeile zu erwarten, bei der sich alle benötigten Chips im gleichen Gehäuse befinden. Auf diese Weise können sehr viele Chips mit geringen Abständen zueinander angeordnet werden. Solche LED-Zeilen befinden sich bereits im ausgereiften For-

schungsstadium, standen allerdings für den Bau des Prototyps nicht zur Verfügung. Sie sollten jedoch in späteren Aufbauten Anwendung finden.

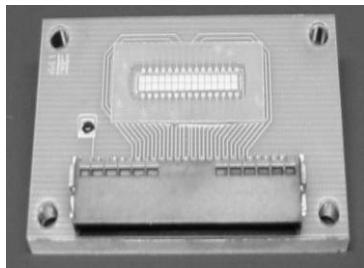


Abbildung 5-11 Prototyp eines COB LED-Arrays

Die LED-Zeile für das Funktionsmuster ist aus diskreten LEDs aufgebaut. Dafür kommen LEDs mit sehr kleiner Bauform zum Einsatz. Die kleinsten, zur Zeit des Aufbaus verfügbaren Leistungs-LEDs waren die Luxeon Flash der Firma Lumileds [LF06]. Diese LEDs sind speziell für den Einsatz als Blitzlicht in Handheld Computern, wie zum Beispiel Mobiltelefone und PDA mit integrierter Digitalkamera, entwickelt. Die folgende Abbildung zeigt eine Luxeon Flash LED mit ihren Abmessungen.

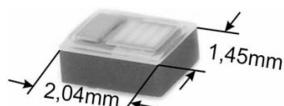


Abbildung 5-12 Luxeon Flash mit Abmessungen [LF06]

Die Luxeon Flash LEDs sind für die kurzzeitige Belastung mit hohen Strömen ausgelegt. Dabei wird ein hoher Lichtstrom freigesetzt. Laut Datenblatt darf eine Luxeon Flash kurzzeitig mit 1000mA betrieben werden. Der erzeugte Lichtstrom beträgt über 50lm. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Werte aus dem Datenblatt zusammengefasst.

Parameter	Wert	
max. DC Vorwärtsstrom	350 mA	
gepulster Spitzenstrom	1000 mA	
max. LED Junction Temperatur	135 °C	
Arbeitstemperatur	-40 °C bis +85 °C	
<b>Lichtstrom</b> bei Strom = 1000 mA, Junction Temperatur = 25 °C		
minimal	maximal	
36 lm	53 lm	
<b>Forwärtsspannung</b> bei Strom = 1000 mA, Junction Temperatur = 25 °C		
minimal	typisch	maximal
3,2 V	3,8 V	4,8 V
<b>Farbtemperatur</b>		
minimal	typisch	maximal
5000K	7000K	10000K

Graph showing Luminous Flux (lm) versus Forward Current (mA) for the Luxeon Flash LED. The flux increases linearly from approximately 10 lm at 200 mA to about 60 lm at 1000 mA.

Forward Current (mA)	Luminous Flux (lm)
200	10
400	20
600	30
800	40
1000	50

Abbildung 5-13 Elektrische Parameter der Luxeon Flash [LF06]

Die LED-Zeile ist mit 16 einzeln schaltbaren Luxeon Flash LED aufgebaut. Jede LED hat zwei Anschlüsse: eine Anode (Pluspol) und eine Kathode (Minuspole). Um nicht 32 Leitungen herauszuführen, ist es zweckmäßig, einen der beiden Pole für alle LEDs zu verbinden, so dass nur noch 17 Leitungen benötigt werden. Die LED-Zeile ist mit einer gemeinsamen Anode für alle LEDs ausgestattet. Abbildung 5-14 zeigt die Verschaltung der LEDs.

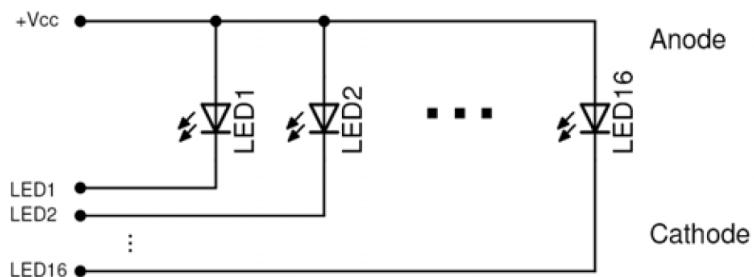


Abbildung 5-14 Schaltplan der LED-Zeile

Die LEDs sind in einer Reihe zu einer Messingplatte ausgerichtet und jeweils mit ihrer Anode an die Messingplatte gelötet. Auf diese Weise sind gleichzeitig die gemeinsame Kontaktierung der Anode, die mechanische Stabilität und die thermische Kopplung der LEDs realisiert. Aufgrund der guten Wärmeleitung durch die Messingplatte ist ein Anlöten der Kathoden der LEDs nicht möglich. Daher wurde die Kontaktierung der Kathoden mit Hilfe von Drähten über eine Klemmtechnik hergestellt. Die folgende Abbildung zeigt das Prinzip der Kontaktierung.

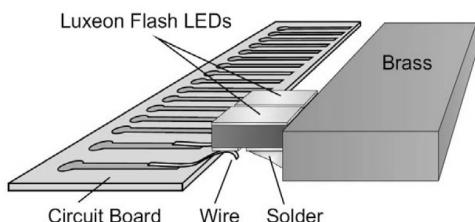


Abbildung 5-15 Kontaktierung der einzelnen LEDs

Abbildung 5-16 zeigt die fertig aufgebaute LED-Zeile. Rechts der LEDs befindet sich die, durch eine Aluminiumklemmvorrichtung fixierte, Messingplatte. Links der LEDs ist die Leiterplatte mit den Drähten für die Kontaktierung der Kathoden zu erkennen.



Abbildung 5-16 Verwendete LED-Zeile

### 5.2.3 LED-Treiber

Für die Erzeugung der adressierbaren Lichtverteilung ist es notwendig, alle LEDs der Zeile einzeln über die Software des Mikrocontrollers schalten zu können. Für das pulsartige Schalten der hohen Ströme für die LEDs sind Leistungsstufen notwendig. Der LED-Treiber besteht aus 16 Leistungsstufen, die mit dem Mikrocontroller angesteuert werden können. Die Schaltung der einzelnen Leistungsstufen wurde einfach gehalten, um den Gesamtaufwand möglichst praktikabel zu gestalten. Daher wird lediglich ein Leistungstransistor pro Kanal verwendet. Die Transistoren werden digital angesteuert und arbeiten somit als Schalter.

### 5.2.4 Antrieb

Für den Antrieb, der für die Rotationsbewegung des Spiegels benötigt wird, können unterschiedliche Typen von Motoren eingesetzt werden. Da hohe Winkelgeschwindigkeiten erreicht werden sollen, werden an den Antrieb für den Spiegel besondere Anforderungen gestellt. Die Winkelgeschwindigkeit sollte darüber hinaus möglichst stabil bleiben. Besonders an die mechanische Verarbeitung werden daher hohe Ansprüche gestellt. Für eine gute Laufruhe bei hoher Drehzahl muss die Achse hochwertig gelagert sein. Mit dem Versuchsaufbau sollen aufgrund des Perlschnureffektes hohe Bildwiederholfrequenzen von ca. 400Hz erreicht werden können. Die Drehzahl des Motors für eine Bildwiederholrate von 400Hz beträgt bei einem vierseitigen Polygonspiegel 6000 Umdrehungen pro Minute. Die gestellten Anforderungen werden z.B. von Motoren erfüllt, die ursprünglich für Festplatten konstruiert wurden. Hohe Drehzahlen bei konstanter Geschwindigkeit und eine präzise mechanische Verarbeitung für eine lange Lebensdauer sind wichtige Voraussetzungen von Festplattenmotoren. Gängige IDE-Festplatten laufen mit Drehzahlen von  $5400\text{min}^{-1}$  bzw.  $7200\text{min}^{-1}$ . Moderne SCSI-Festplatten weisen Drehzahlen bis zu  $15000\text{min}^{-1}$  auf. Für den Versuchsaufbau wurde ein Motor für IDE-Festplatten als Antrieb für den Polygonspiegel verwendet.

### 5.2.5 Sensorik

Für die Synchronisation der LED-Ansteuerung auf die Rotationsbewegung des Polygonspiegels werden Informationen über die Position und Geschwindigkeit des Antriebs benötigt. Diese Information wird in Form eines Null-Grad-Durchgangssignals des Motors geliefert. Für diese Aufgabe wird als optischer, berührungslos arbeitender Sensor eine Infrarotlichtschranke verwendet. Am Motor ist ein Ring befestigt, der zwei Zähne als Unterbrecher besitzt. Pro Motorumlauf wird die Lichtschranke zweimal unterbrochen. Abbildung 5-17 zeigt den Antrieb zusammen mit der Lichtschranke und der Befestigungsvorrichtung für den Spiegel.

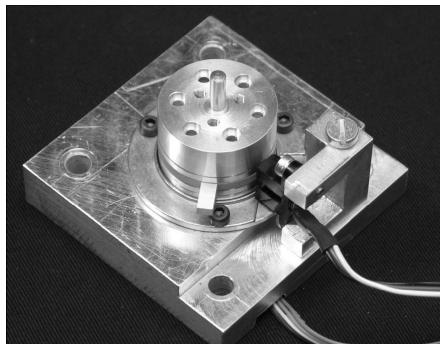


Abbildung 5-17 Spiegelantrieb mit Unterbrechungsring und Lichtschranke

### 5.2.6 Mikrocontroller und Software

Der mechatronische Regelkreis, bestehend aus dem Spiegelmotor, der Lichtschranke und der LED-Zeile, wird wie in Abbildung 5-18 gezeigt durch einen Mikrocontroller geschlossen. Für das Funktionsmuster kam ein 8-Bit Mikrocontroller PIC 18F458 der Firma Microchip aufgrund seiner guten Verfügbarkeit zum Einsatz. Über einen weiteren Anschluss (RS232) ist der Mikrokontroller mit einer eigens entwickelten PC-Software verbunden und somit ansteuerbar. Durch eine grafische Benutzeroberfläche (graphical user interface, GUI) (Abbildung 5-18) wird es dem Benutzer ermöglicht, einzelne Pixel innerhalb der Bildebene aus- bzw. einzuschalten. Des Weiteren besteht die Möglichkeit aus Demonstrationszwecken die Drehzahl des Spiegelmotors (Motorspeed), und aus Justagegründen die Phasenverschiebung zwischen LED-Ansteuerung und Spiegelnulldurchlauf, zu variieren. Diese Phasenverschiebung bewirkt eine Rechts- bzw. Linksauslenkung des Zwischenbildes, somit lässt sich die optimale Position des Zwischenbildes mit minimaler Vignettierung des Strahlenganges einstellen.

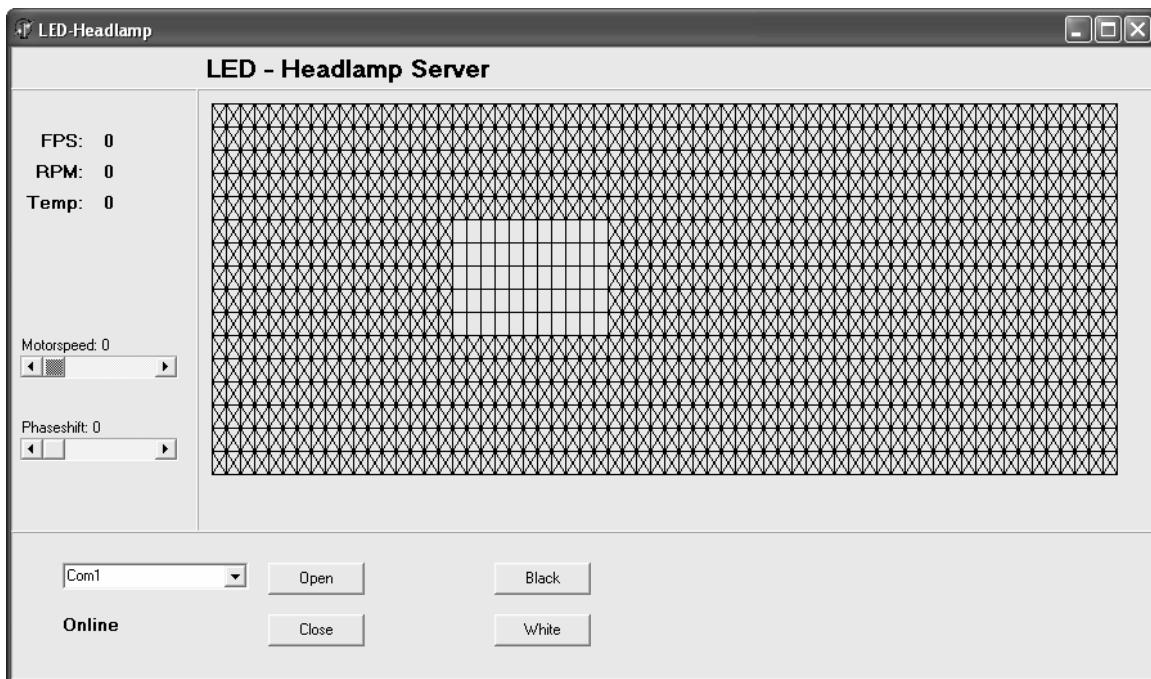


Abbildung 5-18 GUI der Ansteuersoftware LED-Headlamp

Durch die Größe der Abbildung der LED und durch den objektseitigen horizontalen Bildwinkel der Projektionsoptik ist eine horizontale Auflösung von 64 Pixel pro Zeile mit diesem Funktionsmuster möglich. Die vertikale Auflösung ist aufgrund der LED-Anzahl auf 16 Pixel pro Spalte begrenzt. Über die Ansteuersoftware sind daher beliebige Bilder einer 64 x 16 Auflösung möglich. In Abbildung 5-19 ist exemplarisch die Fotografie des projizierten L-LAB-Logos abgebildet.

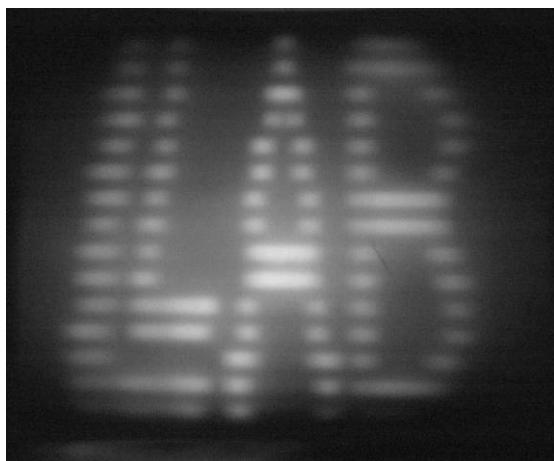


Abbildung 5-19 Mit dem Funktionsmuster projiziertes L-LAB-Logo

### 5.3 Diskussion der Messergebnisse

Die simulierten Abbildungseigenschaften der synthetisierten Optiken geben sehr gut die reale Messung am Funktionsmuster wieder. Es konnte gezeigt werden, dass einzig durch das pulsmodulierte Ansteuern der einzelnen LEDs beliebige Lichtverteilungen projiziert werden können. Die erreichten Beleuchtungsstärken des Funktionsmusters entsprechen nicht denen eines nach ECE oder SAE geforderten Scheinwerfers, da mit dem Funktionsmuster lediglich die Funktion der modulierten Zeile gezeigt werden sollte und hypothetische zukünftige LEDs als Berechnungsgrundlage galten. Um die notwendigen Beleuchtungsstärken zu erreichen, sind mit diesem Aufbau LEDs mit wesentlich höheren Leuchtdichten nötig. Ob eine dramatische Steigerung der Leuchtdichte der LED zu erwarten ist, sei an dieser Stelle noch einmal in Frage gestellt. Eine weitere Möglichkeit die Beleuchtungsstärke zu steigern, besteht darin, mehrere LED-Abbildungen verschiedener Arrays nacheinander auf die gleiche Stelle zu projizieren. Es kann z.B. die verwendete LED-Zeile um eine weitere parallele Zeile erweitert werden, so dass ein  $2 \times 16$  Array entsteht. Wird diese zweite Zeile mit einer entsprechenden Phasenverschiebung angesteuert, liegen die Abbilder der beiden Zeilen übereinander und die Beleuchtungsstärke wird verdoppelt. (Abbildung 5-20, links) Des Weiteren kann über eine zweite gespiegelte Abbildungsoptik eine zweite LED-Zeile auf die Zwischenbildebene abgebildet werden. Dadurch verdoppeln sich die Leuchtdichten im Zwischenbild, wodurch eine Verdopplung der Beleuchtungsstärken bewirkt wird. (Abbildung 5-20, rechts)

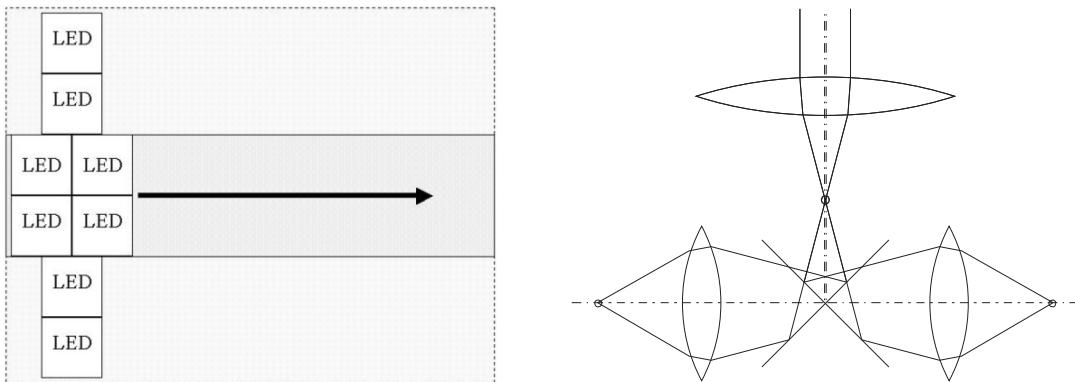


Abbildung 5-20 Erhöhung der Beleuchtungsstärke durch Überlagerung mehrerer LED-Arrays

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Durch den Einsatz monochromatischer LEDs in Rückleuchten und andere Signalfunktionen konnte gezeigt werden, dass durch diese Lichtquelle, bei gleichzeitiger Verlängerung der Wartungsintervalle und einer Vielzahl neuer Designmöglichkeiten, sowohl Bauraum als auch Energie eingespart werden kann. Seitdem es gelang weiße Hochleistungs-LEDs zu produzieren, besteht seitens der Leuchtenindustrie der Wunsch, diese Vorteile auch für Beleuchtungszwecke auszunutzen. Die Anforderungen für Beleuchtungslichtquellen (Scheinwerfer) unterscheiden sich jedoch wesentlich in einigen Punkten von selbst leuchtenden Systemen (Rückleuchten, Displays). Daher sind für Beleuchtungszwecke wesentlich höhere Leuchtdichten der Lichtquelle nötig.

Durch die geringen Leuchtdichten heutiger LEDs ergeben sich größere optische Systeme. Dies führt zu einer Bauraumvergrößerung und nicht zu einer Verkleinerung im Vergleich zu Systemen mit herkömmlichen Lichtquellen wie Halogen- oder Xenonlampen. In dieser Arbeit wurden analytisch alle physikalischen Möglichkeiten und Grenzen der Weißlichterzeugung mittels LEDs verknüpft. Es zeigt sich, dass die Produktion von LEDs mit Leuchtdichten ähnlich der von Gasentladungslampen ein ehrgeiziges Ziel darstellt. Diese Hochleistungs-LEDs werden auch zukünftig, aufgrund der nicht unerheblichen Verlustleistungen, bei hohen Junctiontemperaturen betrieben werden. In Verbindung mit dem Effekt der thermischen Degradation von LEDs sind die gewünschten langen Lebensdauern für Kfz-Lichtquellen daher fraglich.

Der Aspekt der Energieeinsparung ist eng verbunden mit der Lichtausbeute der Lichtquelle. Leuchten mit LEDs für z.B. Brems-, Rück- oder Blinklicht sind energieeffizienter als vergleichbare konventionelle Leuchten, da im Gegensatz zu Glühlampen zur Erzeugung des farbigen Lichtes keine Filter verwendet werden. Für die Straßenbeleuchtung ist jedoch weißes, ungefiltertes Licht notwendig. Die Lichtausbeute der weißen LED liegt nur knapp über der Lichtausbeute der ungefilterten Glühlampe und noch weit unter der der Gasentladungslampe. Es ist jedoch noch eine Steigerung der LED-Lichtausbeute im Laufe der nächsten Jahre zu erwarten. Eine deutliche Steigerung gegenüber Gasentladungslampen ist aber unwahrscheinlich.

Erste LED-Scheinwerfer benötigen daher mehr Bauraum, haben einen höheren Energieumsatz und werden nur schwer gleiche Beleuchtungsstärken wie Xenonsysteme erreichen. Diese Defizite könnten in Zukunft gelöst werden. Es würde dadurch allerdings lediglich eine Lichtquelle (Xenon) durch eine andere (LED) ersetzt. Aufgrund ihrer kleinen Bauweise bietet sich die LED als Lichtquelle für selbst leuchtende Designelemente des Scheinwerfers an. Daher werden in Zukunft zahlreiche LED-Tagfahrlichter zu beobachten sein. Dies führt zu der Überlegung, dass ein Hybridsystem aus zwei Lichtquellentypen alle Vorteile verknüpft. Werden

diese Lichtquellen an der für sie jeweils prädestinierten Stelle eingesetzt, minimieren sich zudem die Nachteile. Ein Scheinwerfer, der zur Beleuchtung bei Nacht mit Xenonscheinwerfer arbeitet und am Tag bzw. bei Dämmerung auf LED umschaltet, sobald nur das Erkennen des Fahrzeuges durch andere Verkehrsteilnehmer notwendig wird, vereint alle Vorteile. Die Gasentladungslampe liefert hohe Leuchtdichten bei geringem Energieverbrauch und die Diode ermöglicht fahrzeugspezifische Designs. Durch das automatische Schalten zwischen LED und Xenon, würde die Xenonbrenndauer stark reduziert, wodurch die Lebensdauer der Xenonlampe ein Autoleben überschreiten würde. Der Scheinwerfer wäre wartungsfrei.

Die LED besitzt ein entscheidendes Alleinstellungsmerkmal. Sie kann innerhalb kürzester Zeit geschaltet werden. Diese kurzen Schaltzeiten haben zu der Frage geführt, ob dadurch eine neue Scheinwerferfunktion, der aktive Scheinwerfer, realisiert werden kann. Mit Hilfe einer adressierbaren Lichtverteilung soll es in Zukunft möglich werden, Hindernisse zu markieren oder blendgefährdete Verkehrsteilnehmer auszublenden. In dieser Arbeit wurde ein System vorgestellt, das diese schnelle Lichtquelle synchron mit einer periodisch variablen Optik kombiniert. Dadurch kann unter pulsmodulierter Ansteuerung der Lichtquelle die gewünschte adressierbare Lichtverteilung realisiert werden. Um eine gepulste Lichtquelle in einem Scheinwerfer zu verwenden, mussten zunächst einige wichtige physiologische Fragen beantwortet werden.

Im Bezug auf die Blendung durch gepulste Scheinwerfer, lässt sich sagen, dass kein signifikanter Unterschied des Schwellenkontrastes, also der objektiven Blendung, bei der Blendung durch gepulste oder konstante Lichtquellen mit gleicher mittlerer Leuchtdichte festzustellen ist. Somit können für gepulste Lichtquellen, die oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz betrieben werden, die gleichen lichttechnischen Grenzwerte, die bereits für ungepulste Lichtquellen Anwendung finden, zur Blendungsreduzierung verwendet werden.

Trotz der Verwendung von Pulsfrequenzen oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz sind bei schnellen Relativbewegungen der Lichtquelle zur Blickrichtung kurzzeitig unterbrochene Leuchtpuren wahrnehmbar. Aufgrund seines Erscheinungsbildes wurde dieser Effekt in dieser Arbeit Perlschnureffekt genannt. Es konnte gezeigt werden, dass diese Perlschnur, bei einer Bewegung der Lichtquelle und starrem Auge, nur dann nicht sichtbar ist, wenn die Pulsfrequenz mindestens dem Quotient aus Lichtquellenbreite und der Lichtquellenwinkelgeschwindigkeit entspricht. Für das bewegte Auge ist die Perlschnur auch dann unsichtbar, wenn die Leuchtdichte der Lichtquelle unterhalb der Schwelle der sakkadischen Suppression liegt. Aus diesem Grund zeigen Rückleuchten diesen Effekt lediglich nachts. Aufgrund der hohen Blickgeschwindigkeiten während einer Sakkade ist der Perlschnureffekt nachts nur durch eine extreme Frequenzerhöhung zu vermeiden. Um seine Auftrittswahrscheinlichkeit dennoch weitestgehend zu reduzieren, wurden in dieser Arbeit Konstruktionsrichtlinien gegeben, die den Perlschnureffekt unterbinden.

Neben den physiologischen Risiken waren auch einige technische Fragestellungen zu beantworten. Es zeigt sich, dass aufgrund der Fluorophorkonversion bei weißen LEDs, je nach Wellenlänge, Schaltzeitverlängerungen von bis zu einer Mikrosekunde auftreten. Diese weißen LEDs sind daher nicht zur hochfrequenten Datenübertragung geeignet. Für die angestrebte Anwendung in einem Scheinwerfer spielt dieser Effekt allerdings keine Rolle.

Des Weiteren konnten anhand einer thermodynamischen Simulation keine Verbesserung der thermischen Leitfähigkeit der LED im gepulsten Betrieb nachgewiesen werden. Es stellte sich heraus, dass durch die thermische Kapazität des LED-Chips und durch den thermischen Widerstand zwischen Chip und Heatsink eine Zeitkonstante gegeben ist, mit der die minimale Pulsfrequenz einer LED bestimmt werden kann, bei der diese noch mit voller mittlerer Leistung betrieben werden darf, ohne den p-n-Übergang zu überhitzen.

Mit Hilfe der gewonnen Erkenntnisse konnte ein Funktionsmuster gefertigt werden, das nach dem Prinzip der Kombination einer gepulster LED-Zeile mit einer dynamisch periodisch scannenden Projektionsoptik arbeitet. Für dieses Muster war es notwendig, die optischen, mechanischen und elektronischen Komponenten auszulegen und zu einer Gesamtarchitektur zusammenzufügen. Es konnte die Machbarkeit einer variablen Lichtverteilung durch alleiniges Ansteuern der Pulsparameter der Lichtquelle belegt werden.

Da sich das Muster aufgrund der aufwendigen Optik und Mechanik durch eine große Masse auszeichnet und heutige LEDs nicht ausreichen um akzeptable Beleuchtungsstärken mit diesem Prinzip zu erzielen, sollte vorerst auf ein solches System als Hauptscheinwerfer verzichtet werden. Eine kleinere Variante ist als Nebenscheinwerfer für Markierungslichtfunktion jedoch durchaus denkbar.

## 7 Literatur

- [And95] Anderson, J. R.: *Lerning and Memory: An Integrated Approach*. New York, Willey; 1995
- [Atk68] Atkinson, R. C.; Shiffrin, R. M.: *Human memory: A proposed system and its control processes*. In [Spe68]
- [Bad99] Baddeley, A.: *Essentials of Human Memory*. Hove; Psychology Press; 1999
- [Bae90] Baer, R.: *Beleuchtungstechnik – Grundlagen*. Verlag Technik; Berlin; 1990
- [Ban04] Banks, P. M.: *Dynamic visual acuity: a review*. The South African Optometrist; 2004
- [Bon21] Bone, E. P.: *Head Lamp*. U.S. Patent No. 1,389,291. Patented August 30; 1921
- [Boy03] Boyce, P. R.: *Human Factors in Lighting*. Taylor & Francis; 2003
- [Bör02] Börnchen, T.: *Zur Entwicklung dynamischer Komponenten für variables Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht*. Dissertation; Universität Paderborn; 2002
- [DB06] Datenblatt: *Golden Dragon® ZW W5SG*. OSRAM; 2006
- [Die04] Diekmann, K.; Oberschmied, R.: *Projektions-Anzeigevorrichtung mit einer LED-Zeile*. Offenlegungsschrift DE 10323188 A1, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg, Offenlegungstag 25.11.2004
- [Die05] Diem, C.: *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt; 2005
- [Ebn05] Ebner, A.: Epilepsiezentrum Bethel, Bielefeld; persönliche Mitteilung
- [ECE20] UNECE Vehicle Regulation 20: *Headlamps emitting an asymmetrical passing beam or both and equipped with halogen filament lamps. (H4)*
- [ECE98] UNECE Vehicle Regulation 98: *Motor vehicle headlamps equipped with gas-discharge light sources*

- [ECE7] UNECE Vehicle Regulation 7: *Uniform provisions concerning the approval of front and rear position (side) lamps, stop-lamps and end-outline marker lamps for motor vehicles (except motor cycles) and their trailers*
- [Eic98] Eichhorn, K.; Kalze, F.; Giepen, B.; Topp, E.; Lachmayer, R.: *Scheinwerfer für Fahrzeuge*. Europäische Patentanmeldung EP 0900972 A1, Hella KG Hueck & Co., Lippstadt, Veröffentlichungstag 10.03.1999
- [End99] Enders, M.: *Beleuchtungseinrichtung für Fahrzeuge und Betriebsverfahren für eine derartige Beleuchtungseinrichtung*. Internationale Anmeldung WO 99/11968, Patent-Treuhand-Gesellschaft für elektrische Glühlampen mbH, München, Internationales Veröffentlichungsdatum 11.03.1999
- [Gal04] Gall, D.: *Grundlagen der Lichttechnik*. Richard Pflaum Verlag; Ilmenau; 2004
- [Goe05] Götz, M.; Eichhorn, K.: *Optical Technologies for Future Headlamps*. In [ISAL05]
- [Goe06] Götz, M.; Wüller, M.: *Scheinwerfer für Fahrzeuge*. Offenlegungsschrift DE 102004060474 A1, Hella KGaA Hueck & Co., Lippstadt, Offenlegungstag 06.07.2006
- [Gol02] Goldstein, E. B.: *Wahrnehmungpsychologie*. Spektrum Akad. Vlg.; 2002
- [Haf02] Haferkorn, H.: *Optik. Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*. Wiley-VCH; 2002
- [Hen72] Henderson, S. T.; Marsden, A. D.: *Lamps and Lighting*. Edward Arnold; 1972
- [Hen02] Hentschel, H. J.: *Licht und Beleuchtung: Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik*. Heidelberg, Hüthig; 2002
- [Hon64] Honegger, H.; Schäfer, W. D.: *Registrierung von Augenbewegungen als Beitrag zur Untersuchung der Sehschärfe für bewegte Objekte*. Albrecht von Graefes Archiv für Ophthalmologie; 1964
- [Huh06] Huhn, W.: *LED Scheinwerfer?* VDI-Berichte Nr. 1944; 2006
- [ISAL05] *6<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting ISAL 2005*. Proceedings of the Conference. Volume 11; Utz, Herbert; 2005
- [K206] Datenblatt: *power light source LUXEON® K2 Emitter*. Technical Datasheet DS51, Philips Lumileds Lighting Company; 2006

- [Kau06] Kauschke, R.: *Systematik zur lichttechnischen Dimensionierung von aktiven Scheinwerfern*. Dissertation; Universität Paderborn; 2006
- [Kau04] Kauschke, R.; Götz, M.; Härmens, E.; Karsten, D.: *Scheinwerfer für Fahrzeuge*. Offenlegungsschrift DE 102004032095 A1, Hella KGaA Hueck & Co., Lippstadt, Offenlegungstag 16.02.2006
- [Kli03] Kliebisch, D.; Stahl, F.; Völker, S.: *Abhängigkeit der physiologischen Blendung von der spektralen Verteilung der Lichtquelle (Lichtfarbe)*. Interne Studie des L-LAB; Paderborn; 2003
- [Kot05] Kotowicz, A.: *Leuchtdichteveerteilungen an Hochdruckentladungslampen für Kfz-Scheinwerfer und optische Parameter von Brennermaterialien*. Dissertation; TU-Berlin; 2005
- [Kra03] Krames, M.: *Lumileds. Progress and Future Direction of LED Technology*. SSL Workshop; Arlington, VA; 2003
- [Kuh06] Kuhl, P.: *Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf*. Dissertation; Universität Paderborn; 2006
- [Lan04] Lange, H.: *Handbuch für Beleuchtung*. Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm; 2004
- [LF06] Datenblatt: *power light source LUXEON® Flash*. Technical Datasheet DS49, Philips Lumileds Lighting Company; 2006
- [Licht06] *Licht*. Juni 2006; 58. Jahrgang; Pflaum; 2006
- [Loc06] Locher, J.; Wechsung, I.: *Reaktionszeitverkürzung durch LED-Bremslichter*. Interne Studie des L-LAB, Paderborn; 2006
- [Lud58] Ludvigh, E.; Miller, J. W.: *Study of Visual Acuity during the Ocular Pursuit of Moving Test Objects*. Journal of the Optical Society of America; 1958
- [Lux06] Technical Datasheet DS51: *power light source LUXEON® K2 Emitter*. Philips Lumileds Lighting Company; 2006
- [Mah06] Mahlkow, A.: *Thermisches Management für SMD-Hochleistungs-Leuchtdioden*. In [Licht06]

- [Man06] Manz, K.; Klinger, K.: *Optische Technologien im Automobil*. Vorlesungsskript des lichttechnischen Institutes, Universität Karlsruhe; 2006
- [Mas07] Maschkio, T.: *CFD-Simulation der Be- und Enttauungsprozesse in Kfz-Scheinwerfern*. Dissertation; Universität Paderborn; 2007
- [May05] Mayer, H. W.: *Leuchtdioden revolutionieren die Kfz-Beleuchtung*. In VDI Nachrichten; März 2005
- [Mer02] Mertens, K.: *Elektronische Bauelemente*. Vorlesungsskript, Fachhochschule Münster; 2002
- [Mes] Datenblatt: *MESOPTOMETER Zur Messung der Blendempfindlichkeit, des Dämmerungssehens, der Nachtmynopie*. OCULUS Optikgeräte GmbH 633 Duttenhofen über Wetzlar
- [Moi05] Moisel, J.: *Multifunctional use of semiconductor lighting*. L-LAB Summerschool; 2005
- [Nic06] Nichia: *White emitting LED chips hit 138lm/W*. Japanese Journal of Applied Physics 45 L1084-L1086; 2006
- [Nol05] Nolte, S.: *Eine Methode zur Simulation der Temperatur- und Strömungsverteilung in lichttechnischen Geräten*. Dissertation; Universität Paderborn; 2005
- [Pal99] Palmer, S. E.: *Vision Science – Photons to Phenomenology*. Cambridge, MIT Press; 1999
- [Rei04] Reiners, T.: *The Challenges of LEDs in Automotive Lighting*. L-LAB Summerschool; 2005
- [Ric80] Richter, M.: *Einführung in die Farbmehrkomponenten*. Gryter; 1980
- [Roc98] Rock, I.: *Wahrnehmung – Vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen*. Spektrum Akad. Vlg.; 1998
- [Ros05] Roslak, J.: *Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums*. Dissertation; Universität Paderborn; 2005

- [Ryb04] Rybak, T.; Steffka, M.: *Automotive Electromagnetic Compatibility (EMC)*. Boston u.a.; Kluwer; 2004
- [SAE] US Federal Standard FMVSS 108: *Lamps, reflective devices and associated equipment.*
- [Schi01] Schierz, C.: *Sehen und Bildschirm*. Skript für das Edu-Swiss-Kursmodul M-MCI.d 2001 Mensch-Computer Interaktion; 2001
- [Schr02] Schröder, G.; Treiber, H.: *Technische Optik*. Vogel; 2002
- [Schu06] Schubert, F. E.: *Light-Emitting Diodes*. Cambridge University Press; 2006
- [Siv93] Sivak, M. et al.: *Reaktion Time to Neon, LED and fast Incandescent Lamps*. Report No. UMTRI-93-37, The University of Michigan Transportation Research Institute; 1993
- [Sof95] Sofia, J. W.: *Analysis of Thermal Transient Data with Synthesized Dynamic Models for Semiconductor Devices*. IEEE Transaction CPMT, Vol. 18; 1995
- [Sof97] Sofia, J. W.: *Electrical temperature measurement using semiconductors*. Electronic Cooling, Volume 3, no.1, January 1997
- [Spe68] Spence, J. T.; Spence, K. W.: *The psychology of learning and motivation*. New York, Academic Press; 1968
- [Su06] Sue, M. Y.; Mirin, R. P.: *Enhanced light extraction from circular Bragg grating coupled microcavities*. In Applied Physics Letters, Bd. 89(2006), Artikel: 033105 (DOI:10.1063/1.2222345), 17.07.;2006
- [Thi04] Thilo, K. V. et al.: *The site of saccadic suppression*. Nature Neuroscience; 2004
- [Val05] Valberg, A.: *Light Vision Color*. Chichester; Wiley; 2005
- [Völ06] Völker, S.: *Hell- und Kontrastempfindung - Ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeugscheinwerfern*. Habilitationsschrift; Universität Paderborn; 2006
- [Wal05] Kauschke, R.; Roslak, J.; Wallaschek, W.: *Viel Licht und keine Blendung – aktive lichttechnische Systeme zur Erhöhung der Verkehrssicherheit*. Forschungsforum Paderborn, Januar 2005, S. 62-66, Universität Paderborn; 2005

[Wal98] Wallaschek, J.: *Innovation – Does your headlamp know where you are going?* Hella KG Hueck & Co., Research & Development Review; 1998

[Win81] Wingfield, A.; Byrnes, D. L.: *The Psychology of Human Memory*. San Diego, Harcourt Brace Jovanovich; 1981

[Wör07] Wördenweber, B.; Wallaschek, J.; Boyce, P.: *Automotive Light and Human Vision*. Springer; 2007

[Zis03] Zisis, T.: *Present state of research in Light Sources science and technology*. L-LAB Summerschool; 2003

[Zuk04] Zukauskas, A.: *R&D Trends in LED Lighting*; L-LAB Summerschool; 2005



## **Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik**

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenzuführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein. Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Auf dem Weg zu den technischen Systemen von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in vielen Studiengängen der Universität. Hier ist das übergeordnete Ziel, den Studierenden die Kompetenzen zu vermitteln, auf die es in der Wirtschaft morgen ankommt. Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut sieben Professoren mit insgesamt 200 Mitarbeitern und Mitarbeitern. Etwa ein Viertel der Forschungsprojekte der Universität Paderborn entfallen auf das Heinz Nixdorf Institut und pro Jahr promovieren hier etwa 30 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

## **Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology**

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment. Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: En route to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrow’s economy. Today seven Professors and 200 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. The Heinz Nixdorf Institute accounts for approximately a quarter of the research projects of the University of Paderborn and per year approximately 30 young researchers receive a doctorate.

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |       |   |        |   |
|-------|---|--------|---|
| Bd. 1 | Fahrwinkel, U.: Methoden zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 1, 1995 – ISBN 3-931466-00-0 | Bd. 9  | Humpert, A.: Methodische Anforderungsverarbeitung auf Basis eines objektorientierten Anforderungsmodells. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 9, 1995 – ISBN 3-931466-08-6  |
| Bd. 2 | Hornbostel, D.: Methode zur Modellierung der Informationsverarbeitung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 2, 1995 – ISBN 3-931466-01-9                                     | Bd. 10 | Ameur, F.: Space-Bounded Learning Algorithms. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 10, 1995 – ISBN 3-931466-09-4   |
| Bd. 3 | Stemann, V.: Contention Resolution in Hashing Based Shared Memory Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 3, 1995 – ISBN 3-931466-02-7   | Bd. 11 | Paul, M.: Szenariobasiertes Konzipieren neuer Produkte des Maschinenbaus auf Grundlage möglicher zukünftiger Technologieentwicklungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 11, 1996 – ISBN 3-931466-10-8                      |
| Bd. 4 | Ketterer, N.: Beschreibung von Datenaustausch eines verteilten Fertigungssteuerungssystems. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 4, 1995 – ISBN 3-931466-03-5                               | Bd. 12 | Holl, F.: Ordnungsmäßigkeit von Informations- und Kommunikationssystemen. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 12, 1996 – ISBN 3-931466-11-6   |
| Bd. 5 | Hartmann, T.: Spezifikation und Klassifikation von Methoden zur Definition hierarchischer Abläufe. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 5, 1995 – ISBN 3-931466-04-3                        | Bd. 13 | Gausemeier, J. (Hrsg.): First European Workshop on Global Engineering Networking - organized by GLENnet e.V., HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 13, 1996 – ISBN 3-931466-12-4  |
| Bd. 6 | Wachsmann, A.: Eine Bibliothek von Basisdiensten für Parallelrechner: Routing, Synchronisation, gemeinsamer Speicher. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 6, 1995 – ISBN 3-931466-05-1                    | Bd. 14 | Petri, K.: Vergleichende Untersuchung von Berechnungsmodellen zur Simulation der Dynamik von Fahrleitung-Stromabnehmer-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 14, 1996 – ISBN 3-931466-13-2                            |
| Bd. 7 | Gausemeier, J. (Hrsg.): Die Szenario-Technik – Werkzeug für den Umgang mit einer multiplen Zukunft. 1. Paderborner Szenario-Workshop, 14. November 1995, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 7, 1995 – ISBN 3-931466-06-X  | Bd. 15 | Leschka, S.: Fallbasiertes Störungsmanagement in flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 15, 1996 – ISBN 3-931466-14-0  |
| Bd. 8 | Czumaj, A.: Parallel Algorithmic Techniques: PRAM Algorithms and PRAM Simulations. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 8, 1995 – ISBN 3-931466-07-8   | Bd. 16 | Schneider, U.: Ein formales Modell und eine Klassifikation für die Fertigungssteuerung - Ein Beitrag zur Systematisierung der Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 16, 1996 – ISBN 3-931466-15-9 |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |        |   |        |   |
|--------|---|--------|---|
| Bd. 17 | FELSER, W.: Eine Methode zur Erstellung von Fertigungssteuerungsverfahren aus Bausteinen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 17, 1996 – ISBN 3-931466-16-7              | Bd. 25 | EBBESMEYER, P.: Dynamische Texturwände - Ein Verfahren zur echtzeitorientierten Bildgenerierung für Virtuelle Umgebungen technischer Objekte. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 25, 1997 – ISBN 3-931466-24-8       |
| Bd. 18 | GAUSEMEIER, J.; ALEXANDER FINK, A.: Neue Wege zur Produktentwicklung – Erfolgspotentiale der Zukunft. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 18, 1996 – ISBN 3-931466-17-5  | Bd. 26 | FRANK, G.: Ein digitales Hardwaresystem zur echtzeitfähigen Simulation biologienaher neuronaler Netze. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 26, 1997 – ISBN 3-931466-25-6  |
| Bd. 19 | DANGELMAIER, W.; GAUSEMEIER, J.: Fortgeschrittene Informationstechnologie in der Produktentwicklung und Fertigung. 2. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 19, 1996 – ISBN 3-931466-18-3                         | Bd. 27 | DITTRICH, W.: Communication and I/O Efficient Parallel Data Structures. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 27, 1997 – ISBN 3-931466-26-4   |
| Bd. 20 | HÜLLERMEIER, E.: Reasoning about Systems based on Incomplete and Uncertain Models. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 20, 1997 – ISBN 3-931466-19-1                     | Bd. 28 | BÄUMKER, A.: Communication Efficient Parallel Searching. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 28 1997 – ISBN 3-931466-27-2   |
| Bd. 21 | GAUSEMEIER, J.: International Symposium on Global Engineering Network - Antwerp, Belgium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 21, 1997 – ISBN 3-931466-20-5  | Bd. 29 | PINTASKE, C.: System- und Schaltungstechnik neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 29, 1997 – ISBN 3-931466-28-0  |
| Bd. 22 | BURGER, A.: Methode zum Nachweis der Wirtschaftlichkeit von Investitionen in die Rechnerintegrierte Produktion. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 22, 1997 – ISBN 3-931466-21-3 | Bd. 30 | HENKEL, S.: Ein System von Software-Entwurfsmustern für die Propagation von Ereignissen in Werkzeugen zur kooperativen Fabrikmodellierung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 30, 1997 – ISBN 3-931466-29-9 |
| Bd. 23 | GAUSEMEIER, J.: Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik - Paderborner Workshop TransMechatronik. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 23, 1997 – ISBN 3-931466-22-1   | Bd. 31 | DANGELMAIER, W.: Vision Logistik – Logistik wandelbarer Produktionsnetze. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 31, 1997 – ISBN 3-931466-30-2  |
| Bd. 24 | GERDES, K.-H.: Architekturkonzeption für Fertigungsleitsysteme der flexiblen automatischen Fertigung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 24, 1997 – ISBN 3-931466-23-X           | Bd. 32 | BREXEL, D.: Methodische Strukturmodellierung komplexer und variantenreicher Produkte des integrativen Maschinenbaus. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 32, 1997 – ISBN 3-931466-31-0                                |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |        |   |        |   |
|--------|---|--------|---|
| Bd. 33 | HAHN, A.: Integrationsumgebung für verteilte objektorientierte Ingenieursysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 33, 1997 – ISBN 3-931466-32-9  | Bd. 41 | DANGELMAIER, W.: KOMNET – Kommunikationsplattform für KMU-Netzwerke. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 41, 1998 – ISBN 3-931466-40-X   |
| Bd. 34 | SABIN, A.: Semantisches Modell zum Aufbau von Hilfsorientierungsdiensten in einem globalen Engineering Netzwerk. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 34, 1997 – ISBN 3-931466-33-7  | Bd. 42 | KALLMEYER, F.: Eine Methode zur Modellierung prinzipieller Lösungen mechatronischer Systeme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 42, 1998 – ISBN 3-931466-41-8  |
| Bd. 35 | STROTHMANN, W.-B.: Bounded Degree Spanning Trees. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 35, 1997 – ISBN 3-931466-34-5   | Bd. 43 | TRAPP, R.: Stereoskopische Korrespondenzbestimmung mit impliziter Detektion von Okklusionen. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 43, 1998 – ISBN 3-931466-42-6  |
| Bd. 36 | MÜLLER, W.; RAMMIG, F.-J.: Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 36, 1998 – ISBN 3-931466-35-3  | Bd. 44 | GAUSEMEIER, J.; FINK, A; SCHLAKE, O.: Grenzen überwinden - Zukünfte gestalten. 2. Paderborner Konferenz für Szenario-Management, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 44, 1998 – ISBN 3-931466-43-4   |
| Bd. 37 | SCHNEIDER, W.: Anwenderorientierte Integration von CAE-Systemen. Ein Verfahren zur Realisierung eines durchgehenden Informationsflusses entlang des Produktentwicklungsprozesses. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 37, 1998 – ISBN 3-931466-36-1 | Bd. 45 | wird noch vergeben!   |
| Bd. 38 | DEMEL, W.; SCHMITZ, G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Aachener Workshop TransMechatronik, 26. Juni 1998, Technologiezentrum am Europaplatz Aachen, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 38, 1998 – ISBN 3-931466-37-X  | Bd. 46 | VÖCKING, B.: Static and Dynamic Data Management in Networks. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 46, 1998 – ISBN 3-931466-45-0  |
| Bd. 39 | GROBBEL, R.; LANGEMANN, T.: Leitfaden PPS-Systeme: Auswahl und Einführung in der Möbelindustrie. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 39, 1998 – ISBN 3-931466-38-8   | Bd. 47 | SCHEKELMANN, A.: Materialflußsteuerung auf der Basis des Wissens mehrerer Experten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 47, 1999 – ISBN 3-931466-46-9  |
| Bd. 40 | REHBEIN, P.: Tribologische Untersuchung von hochfrequent schwingenden Gleitkontakten für den Einsatz in Reibkraftschlüssigen Antrieben. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 40, 1998 – ISBN 3-931466-39-6   | Bd. 48 | GECK-MÜGGE, K.: Herleitung und Spezifikation generischer Bausteine zur einheitlichen Modellierung von Fertigungsinformationen für die Fertigungssteuerung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 48, 1999 – ISBN 3-931466-47-7 |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |        |  |        |   |
|--------|--|--------|---|
| Bd. 49 | WALLASCHEK, J.; LÜCKEL, J.; LITTMANN, W.: Heinz Nixdorf Symposium on Mechatronics and Advanced Motion Control. 3. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 49, 1999 – ISBN 3-931466-48-5  | Bd. 57 | KRESS, S.: Architektur eines workflow-basierten Planungsinstruments für die technische Auftragsbearbeitung unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes der Telearbeit. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 57, 1999 – ISBN 3-931466-56-6 |
| Bd. 50 | FINK, A.: Szenariogestützte Führung industrieller Produktionsunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 50, 1999 – ISBN 3-931466-49-3  | Bd. 58 | THIELEMANN, F.: Integrierte Methodik zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen mittels Workflowmanagement. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 58, 1999 – ISBN 3-931466-57-4   |
| Bd. 51 | HOLTKAMP, R.: Ein objektorientiertes Rahmenwerk zur Erstellung individueller, verteilter Fertigungslenkungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 51, 1999 – ISBN 3-931466-50-7 | Bd. 59 | KROME, J.: Modelle zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Statoren für piezoelektrische Ultraschall-Wanderwellen-Motoren. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 59, 1999 – ISBN 3-931466-58-2   |
| Bd. 52 | KUHN, A.: Referenzmodelle für Produktionsprozesse zur Untersuchung und Gestaltung von PPS-Aufgaben. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 52, 1999 – ISBN 3-931466-51-5                 | Bd. 60 | DEMEL, W.; SCHMITZ , G. (Hrsg.): Entwicklung und Transfer von Entwicklungssystemen der Mechatronik. Krefelder Workshop TransMechatronik, 24. August 1999 Fachhochschule Niederrhein, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 60, 1999 – ISBN 3-931466-59-0   |
| Bd. 53 | SIEBE, A.: Systematik der Umsetzung von IT-orientierten Veränderungsprojekten in dynamischen Umfeldern. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 53, 1999 – ISBN 3-931466-52-3                      | Bd. 61 | LANGEMANN, T.: Modellierung als Kernfunktion einer systemorientierten Analyse und Bewertung der diskreten Produktion. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 61, 1999 – ISBN 3-931466-60-4  |
| Bd. 54 | KLAHOLD, R. F.: Dimensionierung komplexer Produktionsnetzwerke. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 54, 1999 – ISBN 3-931466-53-1   | Bd. 62 | KÜMMEL, M.: Integration von Methoden und Werkzeugen zur Entwicklung von mechatronischen Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 62, 1999 – ISBN 3-931466-61-2   |
| Bd. 55 | SCHÜRHOLZ, A.: Synthese eines Modells zur simulationsgestützten Potentialanalyse der Distribution. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 55, 1999 – ISBN 3-931466-54-X                  | Bd. 63 | LUKOVSKYI, T.: New Results on Geometric Spanners and Their Applications. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 63, 1999 – ISBN 3-931466-62-0  |
| Bd. 56 | GEHNEN, G.: Integriertes Netzwerk zur Fertigungssteuerung und –automatisierung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 56, 1999 – ISBN 3-931466-55-8  |        |   |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |  |
|---|--|
| <p>Bd. 64 LÖFFLER, A.; MONDADA, F.; RÜCKERT, U. (Hrsg.): Experiments with the Mini-Robot Khepera, Proceedings of the 1st International Khepera Workshop. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 64, 1999 – ISBN 3-931466-63-9</p> <p>Bd. 65 SCHÄFERMEIER, U.; BISCHOFF, C.: KMUnet - Ein Konzept zur ablauforganisatorischen Gestaltung der Lieferanteneinbindung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 65, 2000 – ISBN 3-931466-64-7</p> <p>Bd. 66 HOLTHÖFER, N.: Regeln in einer Mengenplanung unter Ausbringungsgrenzen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 66, 2000 – ISBN 3-931466-69-8</p> <p>Bd. 67 SCHLAKE, O.: Verfahren zur kooperativen Szenario-Erstellung in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 67, 2000 – ISBN 3-931466-66-3</p> <p>Bd. 68 LEWANDOWSKI, A.: Methode zur Gestaltung von Leistungserstellungsprozessen in Industrieunternehmen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 68, 2000 – ISBN 3-931466-67-1</p> <p>Bd. 69 SCHMIDTMANN, A.: Eine SpezifikationsSprache für die Fertigungslenkung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 69, 2000 – ISBN 3-931466-68-X</p> <p>Bd. 70 GROBBEL, R.: Eine Referenzarchitektur für Kooperationsbörsen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 70, 2000 – ISBN 3-931466-69-8</p> <p>Bd. 71 WESSEL, R.: Modelocked Waveguide Lasers in Lithium Niobate. Dissertation, Fachbereich für Physik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 71, 2000 – ISBN 3-931466-70-1</p> | <p>Bd. 72 LÖFFLER, A.: Energetische Modellierung neuronaler Signalverarbeitung. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 72, 2000 – ISBN 3-931433-71-X</p> <p>Bd. 73 LUDWIG, L. A.: Computational Intelligence in der Produktionswirtschaft. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 73, 2000 – ISBN 3-931466-72-8</p> <p>Bd. 74 WENSKI, R.: Eine objektorientierte Systemkomponente zur Workflow-Modellierung und -Ausführung unter besonderer Berücksichtigung der Telekooperation. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 74, 2000 – ISBN 3-931466-73-6</p> <p>Bd. 75 GRASMANN, M.: Produktkonfiguration auf Basis von Engineering Data Management-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 75, 2000 – ISBN 3-931466-74-4</p> <p>Bd. 76 DITZE, C.: Towards Operating System Synthesis. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 76, 2000 – ISBN 3-931466-75-2</p> <p>Bd. 77 KÖRNER, T.: Analog VLSI Implementation of a Local Cluster Neural Network. Dissertation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 77, 2000 – ISBN 3-931466-76-0</p> <p>Bd. 78 SCHEIDEKER, C.: Probabilistic Methods for Coordination Problems. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 78, 2000 – ISBN 3-931466-77-9</p> <p>Bd. 79 GAUSEMEIER, J.; LINDEMANN, U.; REINHART, G.; WIENDAHL, H.-P.: Kooperatives Produktengineering - Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 79, 2000 – ISBN 3-931466-78-7</p> |
|---|--|

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |        |  |        |   |
|--------|--|--------|---|
| Bd. 80 | GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.: Entwicklungs-umgebungen Mechatronik - Methoden und Werkzeuge zur Entwicklung mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 80, 2000 – ISBN 3-931466-79-5   | Bd. 87 | QUINTANILLA, J.: Ein Verifikationsansatz für eine netzbasierte Modellierungsme- thode für Fertigungssteuerungssysteme. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI-Verlags- schriftenreihe, Paderborn, Band 87, 2000 – ISBN 3-931466-86-8                    |
| Bd. 81 | RIEPING, I.: Communication in Parallel Systems-Models, Algorithms and Imple- ments. Dissertation, Fachbereich für Informatik, Universität Paderborn, HNI- Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 81, 2000 – ISBN 3-931466-80-9   | Bd. 88 | PREIS, R.: Analyses and Design of Efficient Graph Partitioning Methods. Dissertation, Fachbereich für Maschinen- technik, Universität Paderborn, HNI- Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 88, 2001 – ISBN 3-931466-87-6  |
| Bd. 82 | GAUSEMEIER, J; LÜCKEL, J.: Auf dem Weg zu den Produkten für die Märkte von morgen. 4. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 82, 2000 – ISBN 3- 931466-81-7   | Bd. 89 | wird noch vergeben!   |
| Bd. 83 | DEL CASTILLO, G.: The ASM Workbench - A Tool Environment for Computer-Aided Analysis and Validation of Abstract State Machine Models. Dissertation, Fach- bereich für Informatik, Universität Pader- born, HNI-Verlagsschriftenreihe, Pader- born, Band 83, 2000 – ISBN 3-931466- 82-5   | Bd. 90 | WESTERMANN, M.: Caching in Networks: Non-Uniform Algorithms and Memory Capacity Constraints. Dissertation, Fach- bereich für Informatik, Universität Pader- born, HNI-Verlagsschriftenreihe, Pader- born, Band 90, 2001 – ISBN 3-931466- 89-2   |
| Bd. 84 | SCHÄFERMEIER, U.: Eine Methode zur systemorientierten organisatorischen Gestaltung der Zweckaufgabenverrich- tung in kooperativen Verbünden; Klassifi- kation, Aufgabenzuordnung. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissen- schaften, Universität Paderborn, HNI- Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 84, 2000 – ISBN 3-931466-83-3  | Bd. 91 | LEMKE, J.: Nutzenorientierte Planung des Einsatzes von CAD- / CAE-Systemen. Dissertation, Fachbereich für Maschinen- technik, Universität Paderborn, HNI- Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 91, 2001 – ISBN 3-935433-00-X  |
| Bd. 85 | KRÜGER, J.: Ganzheitliche Beherrschung von Abläufen in und zwischen soziotechni- schen Systemen: Ein Beitrag zur Modellbildung und zum paradigmatischen Verständnis von Industrieunternehmen zur Integration von Mensch und Maschine; Prozess und Struktur. Dissertation, Fachbereich für Wirtschafts- wissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 85, 2000 – ISBN 3-931466-84-1 | Bd. 92 | VON BOHUSZEWICZ, O.: Eine Methode zur Visualisierung von Geschäftsprozessen in einer virtuellen Umgebung. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 92, 2001 – ISBN 3-935433-01-8                             |
| Bd. 86 | BARTSCHER, T.: Methoden des Inte- grierten Workflowmanagements (IWFM). Dissertation, Fachbereich für Maschinen- technik, Universität Paderborn, HNI- Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 86, 2000 – ISBN 3-931466-85-X  | Bd. 93 | BÖRNCHEN, T.: Zur Entwicklung dyna- mischer Komponenten für variables Kraftfahrzeug-Scheinwerferlicht. Disser- tation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlags- schriftenreihe, Paderborn, Band 93, 2001 – ISBN 3-935433-02-6                            |
|        |  | Bd. 94 | WINDELER, I.: Auswahl von Restrukturie- rungsprojekten in Forschungs- und Ent- wicklungsorganisationen der Automobil- industrie. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Pader- born, HNI-Verlagsschriftenreihe, Pader- born, Band 94, 2001 – ISBN 3-935433- 03-4 |
|        |  | Bd. 95 | WOLFF, C.: Parallele Simulation großer pulscodierter neuronaler Netze. Disser- tation, Fachbereich für Elektrotechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 95, 2001 – ISBN 3-935433-04-2  |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |         |   |         |   |
|---------|---|---------|---|
| Bd. 96  | HENKE, A.: Modellierung, Simulation und Optimierung piezoelektrischer Stellsysteme. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 96, 2001 – ISBN 3-935433-05-0   | Bd. 103 | WAGENBLÄBT, D.: Eine Analysemethode zur Beurteilung der Funktionssicherheit von gemischt analog-digitalen Schaltungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 103, 2002 – ISBN 3-935433-12-3 |
| Bd. 97  | RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U. (Hrsg.): Autonomous Minirobots for Research and Edutainment AMIRE2001. 5. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 97, 2001 – ISBN 3-935433-06-9   | Bd. 104 | PORRMANN, M.: Leistungsbewertung eingebetteter Neurocomputersysteme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 104, 2002 – ISBN 3-935433-13-1   |
| Bd. 98  | LI, P.: Datenkonversion für den Datenaustausch in verteilten Fertigungslenkungssystemen. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 98, 2001 – ISBN 9-935433-07-7                           | Bd. 105 | SEIFERT, L.: Methodik zum Aufbau von Informationsmodellen für Electronic Business in der Produktentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 105, 2002 – ISBN 3-935433-14-X  |
| Bd. 99  | BRANDT, C.: Eine modellbasierte Methode zum strukturierten Entwurf virtueller Umgebungen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 99, 2001 – ISBN 9-935433-08-5                                   | Bd. 106 | SOETEBEER, M.: Methode zur Modellierung, Kontrolle und Steuerung von Produktstrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 106, 2002 – ISBN 3-935433-15-8   |
| Bd. 100 | WLEKLINSKI, C.: Methode zur Effektivitäts- und Effizienzbewertung der Entwicklung maschinenbaulicher Anlagen. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 100, 2001 – ISBN-3-935433-09-3              | Bd. 107 | GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 107, 2002 – ISBN 3-935433-16-6  |
| Bd. 101 | HEMSEL, T.: Untersuchung und Weiterentwicklung linearer piezoelektrischer Schwingungsantriebe. Dissertation, Fachbereich für Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 101, 2001 – ISBN 3-935433-10-7                             | Bd. 108 | FLATH, M.: Methode zur Konzipierung mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 108, 2002 – ISBN 3-935433-17-4   |
| Bd. 102 | MAUERMANN, H.: Leitfaden zur Erhöhung der Logistikqualität durch Analyse und Neugestaltung der Versorgungsketten. Dissertation, Fachbereich für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 102, 2001 – ISBN 3-935433-11-5 | Bd. 109 | AVENARIUS, J.: Methoden zur Suche und Informationsbereitstellung von Lösungselementen für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 109, 2002 – ISBN 3-935433-18-2                  |
|         |   | Bd. 110 | HELMKE, S.: Eine simulationsgegestützte Methode für Budgetentscheidungen im Kundenbindungsmanagement. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 110, 2002 – ISBN 3-935433-19-0                                  |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |         |   |         |  |
|---------|---|---------|--|
| Bd. 111 | CZUBAYKO, R.: Rechnerinterne Repräsentation von informationsverarbeitenden Lösungselementen für die verteilte kooperative Produktentwicklung in der Mechatronik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 111, 2002 – ISBN 3-935433-20-4              | Bd. 119 | SOHLER, C.: Property Testing and Geometry. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 119, 2003 – ISBN 3-935433-28-X  |
| Bd. 112 | GOLDSCHMIDT, S.: Anwendung mengenorientierter numerischer Methoden zur Analyse nichtlinearer dynamischer Systeme am Beispiel der Spurführungsdy namik von Schienenfahrzeugen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 112, 2002 – ISBN 3-935433-21-2 | Bd. 120 | KESPOHL, H.: Dynamisches Matching – Ein agentenbasiertes Verfahren zur Unterstützung des Kooperativen Produktengineering durch Wissens- und Technologietransfer. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 120, 2003 – ISBN 3-935433-29-8 |
| Bd. 113 | LEHMANN, T.: Towards Device Driver Synthesis. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 113, 2002 – ISBN 3-935433-22-0  | Bd. 121 | MOLT, T.: Eine domänenübergreifende Softwarespezifikationstechnik für automatisierte Fertigungsanlagen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 121, 2003 – ISBN 3-935433-30-1  |
| Bd. 114 | HÄRTEL, W.: Issueorientierte Frühaufklärung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 114, 2002 – ISBN 3-935433-23-9  | Bd. 122 | GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 1. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 122, 2003 – ISBN 3-935433-31-X   |
| Bd. 115 | ZIEGLER, M.: Zur Berechenbarkeit reeller geometrischer Probleme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 115, 2002 – ISBN 3-935433-24-7   | Bd. 123 | GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 123, 2003 – ISBN 3-935433-32-8   |
| Bd. 116 | SCHMIDT, M.: Neuronale Assoziativspeicher im Information Retrieval. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 116, 2003 – ISBN 3-935433-25-5  | Bd. 124 | LITTMANN, W.: Piezoelektrische resonant betriebene Ultraschall-Leistungswandler mit nichtlinearen mechanischen Randbedingungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 124, 2003 – ISBN 3-935433-33-6                                  |
| Bd. 117 | EL-KEBBE, D. A.: Towards the MaSHReC Manufacturing System under Real-Time Constraints. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 117, 2003 – ISBN 3-935433-26-3   | Bd. 125 | WICKORD, W.: Zur Anwendung probabilistischer Methoden in den frühen Phasen des Systementwurfs. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 125, 2003 – ISBN 3-935433-34-4   |
| Bd. 118 | PUSCH, R.: Personalplanung und -entwicklung in einem integrierten Vorgehensmodell zur Einführung von PDM-Systemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 118, 2003 – ISBN 3-935433-27-1  | Bd. 126 | HEITTMANN, A.: Ressourceneffiziente Architekturen neuronaler Assoziativspeicher. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 126, 2003 – ISBN 3-935433-35-2  |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |         |   |         |  |
|---------|---|---------|--|
| Bd. 127 | WITKOWSKI, U.: Einbettung selbst-organisierender Karten in autonome Miniroboter. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 127, 2003 – ISBN 3-935433-36-0                                       | Bd. 135 | BRINKMANN, A.: Verteilte Algorithmen zur Datenplazierung und zum Routing in gegnerischen Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 135, 2003 – ISBN 3-935433-44-1  |
| Bd. 128 | BOBDA, C.: Synthesis of Dataflow Graphs for Reconfigurable Systems using Temporal Partitioning and Temporal Placement. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 128, 2003 – ISBN 3-935433-37-9 | Bd. 136 | FRÜND, E.: Aktive Kompensation von periodischen Schwingungen an rotierenden Walzen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 136, 2003 – ISBN 3-935433-45-X  |
| Bd. 129 | HELLER, F.: Wissensbasiertes Online-Störungsmanagement flexibler, hoch automatisierter Montagesysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 129, 2003 – ISBN 3-935433-38-7                                 | Bd. 137 | KEIL-SLAWIK, R. (Hrsg.): Digitale Medien in der Hochschule: Infrastrukturen im Wandel. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 137, 2004 – ISBN 3-935433-46-8   |
| Bd. 130 | KÜHN, A.: Systematik des Ideenmanagements im Produktentstehungsprozess. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlags-schriftenreihe, Paderborn, Band 130, 2003 – ISBN 3-935433-39-5  | Bd. 138 | STORCK, H.: Optimierung der Kontaktvorgänge bei Wanderwellenmotoren. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlags-schriftenreihe, Paderborn, Band 138, 2004 – ISBN 3-935433-47-6  |
| Bd. 131 | KEIL-SLAWIK, R.; BRENNECKE, A.; HOHENHAUS, M.: ISIS -Installationshandbuch für lernförderliche Infrastrukturen. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 131, 2003 – ISBN 3-935433-40-9   | Bd. 139 | KALTE, H.: Einbettung dynamisch rekonfigurierbarer Hardwarearchitekturen in eine Universalprozessorumgebung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 139, 2004 – ISBN 3-935433-48-4                                |
| Bd. 132 | OULD HAMADY, M.: Ein Ansatz zur Gestaltung des operativen Fertigungsmanagements innerhalb der Lieferkette. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 132, 2003 – ISBN 3-935433-41-7                             | Bd. 140 | ISKE, B.: Modellierung und effiziente Nutzung aktiver Infrarotsensorik in autonomen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 140, 2004 – ISBN 3-935433-49-2   |
| Bd. 133 | HOLTZ, C.: Theoretical Analysis of Unsupervised On-line Learning through Soft Competition. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 133, 2003 – ISBN 3-935433-42-5                             | Bd. 141 | BÄTZEL, D.: Methode zur Ermittlung und Bewertung von Strategiealternativen im Kontext Fertigungstechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 141, 2004 – ISBN 3-935433-50-6   |
| Bd. 134 | UEBEL, M.: Ein Modell zur Steuerung der Kundenbearbeitung im Rahmen des Vertriebsmanagements. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlags-schriftenreihe, Paderborn, Band 134, 2003 – ISBN 3-935433-43-3   | Bd. 142 | BÖKE, C.: Automatic Configuration of Real-Time Operating Systems and Real-Time Communication Systems for Distributed Embedded Applications. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 142, 2004 – ISBN 3-935433-51-4 |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |         |   |         |   |
|---------|---|---------|---|
| Bd. 143 | KÖCKERLING, M.: Methodische Entwicklung und Optimierung der Wirkstruktur mechatronischer Produkte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 143, 2004 – ISBN 3-935433-52-2  | Bd. 151 | GRIENITZ, V.: Methodik zur Erstellung von Technologieszenarien für die strategische Technologieplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 151, 2004 – ISBN 3-935433-60-3   |
| Bd. 144 | HENZLER, S.: Methodik zur Konzeption der Struktur und der Regelung leistungsverzweigter Getriebe mit Toroidvariator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 144, 2004 – ISBN 3-935433-53-0  | Bd. 152 | FRANKE, H.: Eine Methode zur unternehmensübergreifenden Transportdisposition durch synchron und asynchron kommunizierende Agenten. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 152, 2004 – ISBN 3-935433-61-1 |
| Bd. 145 | GAUSEMEIER, J.; LÜCKEL, J.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 145, 2004 – ISBN 3-935433-54-9  | Bd. 153 | SALZWEDEL, K. A.: Data Distribution Algorithms for Storage Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 153, 2004 – ISBN 3-935433-62-X   |
| Bd. 146 | LESSING, H.: Prozess zur multivariaten Prognose von Produktionsprogrammen für eine effiziente Kapazitätsplanung bei typisierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 146, 2004 – ISBN 3-935433-55-7                                | Bd. 154 | RÄCKE, H.: Data Management and Routing in General Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 154, 2004 – ISBN 3-935433-63-8  |
| Bd. 147 | HAMOUDIA, H.: Planerische Ablaufgestaltung bei prozessorientierten Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 147, 2004 – ISBN 3-935433-56-5   | Bd. 155 | FRANK, U.; GIESE, H.; KLEIN, F.; OBERSCHELP, O.; SCHMIDT, A.; SCHULZ, B.; VÖCKING, H.; WITTING, K.; GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus – Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 155, 2004 – ISBN 3-935433-64-6           |
| Bd. 148 | BUSCH, A.: Kollaborative Änderungsplanung in Unternehmensnetzwerken der Serienfertigung – ein verhandlungsbasierter Ansatz zur interorganisationalen Koordination bei Störungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 148, 2004 – ISBN 3-935433-57-3 | Bd. 156 | MÖHRINGER, S.: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Habilitation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 156, 2004 – ISBN 3-935433-65-4   |
| Bd. 149 | GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 149, 2004 – ISBN 3-935433-58-1  | Bd. 157 | FAHRENTHOLZ, M.: Konzeption eines Betriebskonzepts für ein bedarfsgesteuertes schienengebundenes Shuttle-System. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 157, 2004 – ISBN 3-935433-66-2                   |
| Bd. 150 | MEYER, B.: Value-Adding Logistics for a World Assembly Line. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 150, 2004 – ISBN 3-935433-59-X   |         |   |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |  |
|---|--|
| Bd. 158 GAJEWSKI, T.: Referenzmodell zur Beschreibung der Geschäftsprozesse von After-Sales-Dienstleistungen unter besonderer Berücksichtigung des Mobile Business. Dissertation Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 158, 2004 – ISBN 3-935433-67-0 | Bd. 165 MATYSCZOK, C.: Dynamische Kantenextraktion - Ein Verfahren zur Generierung von Tracking-Informationen für Augmented Reality-Anwendungen auf Basis von 3D-Referenzmodellen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 165, 2005 – ISBN 3-935433-74-3 |
| Bd. 159 RÜTHER, M.: Ein Beitrag zur klassifizierenden Modularisierung von Verfahren für die Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 159, 2004 – ISBN 3-935433-68-9  | Bd. 166 JANIA, T.: Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 166, 2005 – ISBN 3-935433-75-1                       |
| Bd. 160 MUECK, B.: Eine Methode zur benutzerstimulierten detaillierungsvarianten Berechnung von diskreten Simulationen von Materialflüssen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 160, 2004 – ISBN 3-935433-69-7                        | Bd. 167 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 167, 2005 – ISBN 3-935433-76-X   |
| Bd. 161 LANGEN, D.: Abschätzung des Ressourcenbedarfs von hochintegrierten mikroelektronischen Systemen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 161, 2005 – ISBN 3-935433-70-0   | Bd. 168 VOLBERT, K.: Geometric Spanners for Topology Control in Wireless Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 168, 2005 – ISBN 3-935433-77-8  |
| Bd. 162 ORLIK, L.: Wissensbasierte Entscheidungshilfe für die strategische Produktplanung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 162, 2005 – ISBN 3-935433-71-9  | Bd. 169 ROSLAK, J.: Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsräumes. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 167, 2005 – ISBN 3-935433-78-6   |
| Bd. 163 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 3. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 163, 2005 – ISBN 3-935433-72-7   | Bd. 170 EMMRICH, A.: Ein Beitrag zur systematischen Entwicklung produktorientierter Dienstleistungen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 170, 2005 – ISBN 3-935433-79-4   |
| Bd. 164 FISCHER, M.: Design, Analysis, and Evaluation of a Data Structure for Distributed Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 164, 2005 – ISBN 3-935433-73-5                                    | Bd. 171 NOWACZYK, O.: Explorationen: Ein Ansatz zur Entwicklung hochgradig interaktiver Lernbausteine. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 171, 2005 – ISBN 3-935433-80-8  |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |         |   |         |  |
|---------|---|---------|--|
| Bd. 172 | MAHMOUD, K.: Theoretical and experimental investigations on a new adaptive duo servo drum brake with high and constant brake shoe factor. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 172, 2005 – ISBN 3-935433-81-6                                 | Bd. 180 | WALLASCHEK, J.; HEMSEL, T.; MRACEK, M.: Proceedings of the 2nd International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 180, 2005 – ISBN 3-935433-89-1  |
| Bd. 173 | KLIEWER, G.: Optimierung in der Flugplanung: Netzwerkentwurf und Flottenzuweisung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 173, 2005 – ISBN 3-935433-82-4  | Bd. 181 | MEYER AUF DER HEIDE, F.; MONIEN, B. (Hrsg.): New Trends in Parallel & Distributed Computing. 6. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 17. und 18. Januar 2006, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 181, 2006 – ISBN 3-939350-00-1                                    |
| Bd. 174 | BALÁZOVÁ, M.: Methode zur Leistungsbewertung und Leistungssteigerung der Mechatronikentwicklung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 174, 2005 – ISBN 3-935433-83-2  | Bd. 182 | HEIDENREICH, J.: Adaptierbare Änderungsplanung der Mengen und Kapazitäten in Produktionsnetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 182, 2006 – ISBN 3-939350-01-X |
| Bd. 175 | FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 175, 2005 – ISBN 3-935433-84-0  | Bd. 183 | PAPE, U.: Umsetzung eines SCM-Konzeptes zum Liefermanagement in Liefernetzwerken der Serienfertigung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 183, 2006 – ISBN 3-939350-02-8                   |
| Bd. 176 | BERGER, T.: Methode zur Entwicklung und Bewertung innovativer Technologiestrategien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 176, 2005 – ISBN 3-935433-85-9  | Bd. 184 | BINGER, V.: Konzeption eines wissensbasierten Instruments für die strategische Vorausschau im Kontext der Szenario-technik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 184, 2006 – ISBN 3-939350-03-6          |
| Bd. 177 | BERSSENBRÜGGE, J.: Virtual Nightdrive - Ein Verfahren zur Darstellung der komplexen Lichtverteilungen moderner Scheinwerfersysteme im Rahmen einer virtuellen Nachtfahrt. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 177, 2005 – ISBN 3-935433-86-7 | Bd. 185 | KRIESEL, C.: Szenarioorientierte Unternehmensstrukturoptimierung – Strategische Standort- und Produktionsplanung. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 185, 2006 – ISBN 3-939350-04-4       |
| Bd. 178 | GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 1. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 3. und 4. November 2005, Schloß Neuherdenberg, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 178, 2005 – ISBN 3-935433-87-5  | Bd. 186 | KLEIN, J.: Efficient collision detection for point and polygon based models. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 186, 2006 – ISBN 3-939350-05-2                            |
| Bd. 179 | FU, B.: Piezoelectric actuator design via multiobjective optimization methods. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 179, 2005 – ISBN 3-935433-88-3  | Bd. 187 | WORTMANN, R.: Methodische Entwicklung von Echtzeit 3D-Anwendungen für Schulung und Präsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 187, 2006 – ISBN 3-939350-06-0                                     |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- Bd. 188 GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 188, 2006 – ISBN 3-939350-07-9
- Bd. 189 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 4. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 189, 2006 – ISBN 3-939350-08-7
- Bd. 190 DAMEROW, V.: Average and Smoothed Complexity of Geometric Structures. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 190, 2006 – ISBN 3-939350-09-5
- Bd. 191 GIESE, H.; NIGGEMANN, O. (Hrsg.): Postworkshop Proceedings of the 3rd Workshop on Object-oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER 3), HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 191, 2006 – ISBN 3-939350-10-9
- Bd. 192 RADKOWSKI, R.: Anwendung evolutionärer Algorithmen zur Unterstützung des Entwurfs selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 192, 2006 – ISBN 3-939350-11-7
- Bd. 193 SHEN, Q.: A Method for Composing Virtual Prototypes of Mechatronic Systems in Virtual Environments. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 193, 2006 – ISBN 3-939350-12-5
- Bd. 194 REDENIUS, A.: Verfahren zur Planung von Entwicklungsprozessen für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 194, 2006 – ISBN 3-939350-13-3
- Bd. 195 KUHL, P.: Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 195, 2006 – ISBN 3-939350-14-1
- Bd. 196 MICHELS, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 196, 2006 – ISBN 3-939350-15-X
- Bd. 197 RIPS, S.: Adaptive Steuerung der Lastverteilung datenparalleler Anwendungen in Grid-Umgebungen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 197, 2006 – ISBN 3-939350-16-8
- Bd. 198 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 2. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 9. und 10. November 2006, Schloß Neuhausenberg, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 198, 2006 – ISBN 3-939350-17-6

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |         |   |         |  |
|---------|---|---------|--|
| Bd. 199 | FRANKE, W.: Wiederverwendungsorientierte Herleitung von Inter-Fachkomponentenkonzepten für Lagerverwaltungssoftwaresysteme. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 199, 2006 – ISBN 978-3-939350-18-7                                      | Bd. 206 | ECKES, R.: Augmented Reality – basiertes Verfahren zur Unterstützung des Anlaufprozesses von automatisierten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 206, 2007 – ISBN 978-3-939350-25-5   |
| Bd. 200 | SCHEIDELER, P.: Ein Beitrag zur erfahrungsbasierten Selbstoptimierung einer Menge technisch homogener fahrerloser Fahrzeuge. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 200, 2006 – ISBN 978-3-939350-19-4                                     | Bd. 207 | STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 207, 2007 – ISBN 978-3-939350-26-2  |
| Bd. 201 | KÖSTERS, C.: Ein ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem unter besonderer Berücksichtigung einer diskreten Produktion. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 201, 2006 – ISBN 978-3-939350-20-0 | Bd. 208 | LAROQUE, C.: Ein mehrbenutzerfähiges Werkzeug zur Modellierung und richtungsoffenen Simulation von wahlweise objekt- und funktionsorientiert gegliederten Fertigungssystemen. Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 208, 2007 – ISBN 978-3-939350-27-9 |
| Bd. 202 | HALFMEIER, S.: Modellierung und Regelung von Halbtoroidvariationen in leistungsverzweigten Getriebestrukturen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 202, 2006 – ISBN 978-3-939350-21-7  | Bd. 209 | GAUSEMEIER, J.; GRAFE, M. (Hrsg.): 6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 209, 2007 – ISBN 978-3-939350-28-6   |
| Bd. 203 | RÜHRUP, S.: Position-based Routing Strategies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 203, 2006 – ISBN 978-3-939350-22-4   | Bd. 210 | GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W.; TRÄCHTLER, A.; WALLASCHEK, J. (Hrsg.): 5. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 210, 2007 – ISBN 978-3-939350-29-3   |
| Bd. 204 | SCHMIDT, A.: Wirkmuster zur Selbstoptimierung – Konstrukte für den Entwurf selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 204, 2006 – ISBN 978-3-939350-23-1   | Bd. 211 | KAUSCHKE, R.: Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 211, 2007 – ISBN 978-3-939350-30-9  |
| Bd. 205 | IHMOR, S.: Modeling and Automated Synthesis of Reconfigurable Interfaces. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 205, 2006 – ISBN 978-3-939350-24-8  | Bd. 212 | DU, J.: Zellen-basierte Dienst-Entdeckung für Roboternetzwerke. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 212, 2007 – ISBN 978-3-939350-31-6   |
|         |   | Bd. 213 | DANNE, K.: Real-Time Multitasking in Embedded Systems Based on Reconfigurable Hardware. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 213, 2007 – ISBN 978-3-939350-32-3   |

## Bände der HNI-Verlagsschriftenreihe

- |   |  |
|---|--|
| Bd. 214 EICKHOFF, R.: Fehlertolerante neuronale Netze zur Approximation von Funktionen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 214, 2007 – ISBN 978-3-939350-33-0  | Bd. 221 PEITZ, T.: Methodik zur Produktoptimierung mechanisch elektronischer Baugruppen durch die Technologie MID (Molded Interconnect Devices). Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 221, 2007 – ISBN 978-3-939350-40-8   |
| Bd. 215 KÖSTER, M.: Analyse und Entwurf von Methoden zur Ressourcenverwaltung partiell rekonfigurierbarer Architekturen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 215, 2007 – ISBN 978-3-939350-34-7                           | Bd. 222 MEYER AUF DER HEIDE, F. (Hrsg.): The European Integrated Project “Dynamically Evolving, Large Scale Information Systems (DELIS)”, Proceedings of the Final Workshop, Barcelona, February 27-28, 2008, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 222, 2008 – ISBN 978-3-939350-41-5 |
| Bd. 216 RÜCKERT, U.; SITTE, J.; WITKOWSKI, U.: Proceedings of the 4th International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment – AMIRE2007. Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 216, 2007 – ISBN 978-3-939350-35-4 | Bd. 223 GAUSEMEIER, J.; RAMMIG, F.; SCHÄFER, W. (Hrsg.): Self-optimizing Mechatronic Systems: Design the Future. 7. Internationales Heinz Nixdorf Symposium, 20. und 21. Februar 2008, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 223, 2008 – ISBN 978-3-939350-42-2   |
| Bd. 217 PHAM VAN, T.: Proactive Ad Hoc Devices for Relaying Real-Time Video Packets. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 217, 2007 – ISBN 978-3-939350-36-1   | Bd. 224 RATH, M.: Methode zur Entwicklung hybrider Technologie- und Innovationsstrategien – am Beispiel des Automobils. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 224, 2008 – ISBN 978-3-939350-43-9  |
| Bd. 218 VIENENKÖTTER, A.: Methodik zur Entwicklung von Innovations- und Technologie-Roadmaps. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 218, 2007 – ISBN 978-3-939350-37-8   | Bd. 225 GRÜNEWALD, M.: Protokollverarbeitung mit integrierten Multiprozessoren in drahtlosen Ad-hoc-Netzwerken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 225, 2008 – ISBN 978-3-939350-44-6   |
| Bd. 219 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 3. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, 29. und 30. November 2007, Miele & Cie. KG Gütersloh, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 219, 2007 – ISBN 978-3-939350-38-5   | Bd. 226 STRAUSS, S.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 226, 2008 – ISBN 978-3-939350-45-3  |
| Bd. 220 FRÜND, J.: Eine Architektonkonzeption für eine skalierbare mobile Augmented Reality Anwendung für die Produkt-präsentation. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, Band 220, 2007 – ISBN 978-3-939350-39-2   |  |