

Vollkeramische Leuchtstoffkomposite für weißemittierende Leuchtdioden

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Bayreuth
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Irene Pricha, M. Sc.

aus

München

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Claudia Wickleder
Tag der mündlichen Prüfung:	4. Dezember 2014

Lehrstuhl für Funktionsmaterialien
Universität Bayreuth
2015

Bayreuther Beiträge zu Materialien und Prozessen

Band 5

Irene Pricha

**Vollkeramische Leuchtstoffkomposite für
weißemittierende Leuchtdioden**

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Bayreuth, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3409-7

ISSN 1866-5047

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort der Herausgeber

Leuchtstoffkonverter wandeln blaues oder ultraviolettes Anregungslicht per Lumineszenz je nach Leuchtstoff in rotes oder gelbes Licht um, so dass zusammen mit dem Anteil des Anregungslichts beim Betrachter der Farbeindruck weiß entsteht. Beim Stand der Technik werden die typischerweise keramischen Leuchtstoffe mittels eines Harzes verklebt und auf eine blaue Leuchtdiode aufgebracht, so dass eine weiße Leuchtdiode entsteht. Harzbasierte Lösungen sind allerdings noch nicht langzeitstabil, da sich das Harz mit der Zeit verändert, insbesondere verliert es bei erhöhten Betriebstemperaturen allmählich seine Lichtdurchlässigkeit. Zudem sind Harze keine guten Wärmeleiter.

Hier setzt die vorliegende Arbeit an. Es wird versucht den rot- und den gelbleuchtenden Leuchtstoff als Komposit darzustellen, ohne dass ein Harz verwendet werden muss. Dies ist aus zwei Gründen besonders schwierig. Erstens reagieren die Leuchtstoffe sehr empfindlich auf Verunreinigungen oder Interdiffusionen, wie sie beim gemeinsamen Sintern entstehen und zweitens handelt es sich beim Gelbleuchtstoff $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ (kurz YAG:Ce) um einen oxidischen und beim Rotleuchtstoff $CaAlSiN_3:Eu$ um einen nitridischen Werkstoff, was ein gemeinsames Sintern an sich schon sehr kompliziert macht. Nicht nur unterschiedliche Sintertemperaturen und Sinteratmosphären, sondern auch Wechselwirkungen beim Sintern und stark unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten erschweren die Darstellung eines vollkeramischen Leuchtstoffkomposits.

Letztendlich konnte das Problem durch das Einfügen einer Diffusionssperrschicht, die die Wechselwirkungen zwischen dem oxidischen Leuchtstoff YAG:Ce und dem nitridischen Rotleuchtstoff $CaAlSiN_3:Eu$ wenigstens teilweise verhindern kann, gelöst werden.

Bayreuth im Dezember 2014

Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung und Lösungskonzept	4
2.1	Problemstellung	4
2.2	Lösungskonzept und Zielstellung	5
3	Grundlagen	9
3.1	Stand der Technik für weißemittierende Leuchtdioden	9
3.2	Optische Eigenschaften von Festkörpern	11
3.3	Einführung in die Lumineszenz	12
3.4	Lumineszenz von Leuchtstoffen	14
3.4.1	Physikalische Grundlagen	15
3.4.2	Beispiele für Lumineszenzzentren - Lanthanide Ce^{3+} , Eu^{3+} und Eu^{2+}	19
3.4.3	Einfluss des Wirtsgitters auf die Emissionswellenlänge	20
3.5	Leuchtstoffsysteme für weißemittierende Dioden	20
3.5.1	Gelbleuchtstoff $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$	22
3.5.2	Rotleuchtstoff $CaAlSiN_3:Eu^{2+}$	24
3.6	Kenngößen für Leuchtstoffe und Lichttechnik	26
3.6.1	Leuchtstoffe	26
3.6.2	Lichttechnik	28
3.6.3	Quantifizierung von Farbigkeit und Farbwahrnehmung	28
3.7	Keramische Technologien und Sintermechanismen	31
3.7.1	Pulveraufbereitung und Formgebung	32
3.7.2	Sinterprozesse	32
3.7.3	Diffusionsprozesse	34
3.7.4	Mehrphasige Systeme	36
3.7.5	Eigenschaften von Keramiken	37
4	Experimentelles Vorgehen	39
4.1	Charakterisierung der Ausgangspulver	39
4.2	Formgebung für die keramische Prozessierung	40
4.2.1	Tablettenproben durch Pulverpressen	40

4.2.2	Leuchtstoffschichten	41
4.2.2.1	Schlickerherstellung und Foliengießen	41
4.2.2.2	Stapeln, Lamination und Vereinzeln	41
4.2.3	Vielschichtkeramiken für Konverter	42
4.2.3.1	Beschichtung mittels Siebdruck	42
4.2.3.2	Beschichtung mittels Dünnschichten	44
4.3	Thermische Prozesse	44
4.3.1	Entbinderung	45
4.3.2	Sinterung	45
4.4	Charakterisierungsmethoden	46
4.4.1	Thermische Charakterisierungsmethoden	46
4.4.2	Makroskopische Charakterisierungsmethoden	47
4.4.3	Optische Charakterisierungsmethoden	49
4.4.3.1	Auflichtmessungen	49
4.4.3.2	Transmissionsmessungen	52
5	Sintern der Einzelleuchtstoffe	54
5.1	Yttrium-Aluminium-Granat	54
5.1.1	YAG:Ce-Pulver	54
5.1.2	Sinterverhalten von YAG:Ce	55
5.1.3	Keramische Plättchenproben aus YAG:Ce	57
5.1.3.1	Phasenzusammensetzung	57
5.1.3.2	Keramisches Gefüge	57
5.1.3.3	Lumineszenzeigenschaften	59
5.2	Calcium-Aluminium-Silicium-Nitrid	62
5.2.1	CaAlSiN ₃ :Eu-Pulver	62
5.2.2	Sinterverhalten von CaAlSiN ₃ :Eu	63
5.2.2.1	Phasenzusammensetzung	65
5.2.2.2	Keramisches Gefüge	65
5.2.2.3	Lumineszenzeigenschaften	67
5.2.3	Keramische Plättchenproben und Schichten aus CaAlSiN ₃ :Eu	69
5.2.3.1	Sinterverhalten von keramischen CaAlSiN ₃ :Eu-Plättchen	69
5.2.3.2	Keramisches Gefüge	70
5.2.3.3	Lumineszenzeigenschaften	71
5.3	Diskussion des Sinterverhaltens der Einzelleuchtstoffe	73
6	Sintern und Reaktivität in Leuchtstoffkompositen	77
6.1	Leuchtstoffmischungen	77

6.1.1	Sinterverhalten von Leuchtstoffmischungen	78
6.1.2	Phasenzusammensetzung und keramisches Gefüge	78
6.1.3	Beschreibung des Reaktionsverhaltens	81
6.1.4	Lumineszenzeigenschaften	81
6.2	Leuchtstoffdoppelschichten	83
6.2.1	Co-Sinterung von Schichtkompositen	84
6.2.2	Leuchtstoffdoppelschichten auf YAG:Ce-Keramiks substraten	85
6.2.2.1	Phasenzusammensetzung und keramisches Gefüge	87
6.2.2.2	Lumineszenzeigenschaften	90
6.2.3	Energiebarriere E_W und experimentelle Transportkonstante D_{exp} für die Flüssigphasenbildung	92
6.3	Diskussion des Sinter- und Reaktionsverhaltens von Kompositen	94
7	Prozessentwicklung für Vielschichtkeramiken als Konverter	97
7.1	Materialien zur Grenzflächenpassivierung in Schichtkompositen	97
7.1.1	Anforderungen an die Passivierungsschicht	97
7.1.2	Aufbau mehrlagiger Leuchtstoffkomposite	98
7.1.3	Materialauswahl für dreilagige Schichtkomposite	99
7.1.4	Chemische Verträglichkeit der ausgewählten Passivierungsmaterialien mit YAG:Ce und CaAlSiN ₃ :Eu (0,1 %)	100
7.1.4.1	Experimentelle Vorgehensweise	100
7.1.4.2	Mischungen mit Al ₂ O ₃ oder Y ₂ O ₃	102
7.1.4.3	Mischungen mit Ca-Si-Al-N:Eu, AlN oder Si ₃ N ₄	106
7.1.5	Materialauswahl für Passivierung	112
7.2	Ca-Si-Al-N-(Sialon)-basierte Passivierungsschichten	113
7.2.1	Absorptions- und Emissionseigenschaften für Sialone	113
7.2.2	Lumineszenz von Leuchtstoffkompositen mit Sialonen	113
7.2.3	Herstellung und Charakterisierung von Vielschichtkeramiken mit Ca-Si-Al-N:Eu-Passivierung	121
7.2.3.1	YAG-Keramik mit einer Ca-Si-Al-N:Eu-Beschichtung	121
7.2.3.2	Vielschichtkeramiken mit einer Passivierungsschicht aus Ca-Si-Al-N:Eu	123
7.2.3.3	Bewertung von Vielschichtkeramiken mit Ca-Si-Al-N:Eu-Passivierung	129
7.3	Siliciumnitrid-basierte Passivierungsschichten	131
7.3.1	Absorptionseigenschaften von Siliciumnitrid	131
7.3.2	Technologien zur Herstellung von Siliciumnitridkeramiken	132
7.3.2.1	Flüssigphasensinterung	132

7.3.2.2	Dünnschichttechnologie	133
7.3.3	Herstellung und Charakterisierung von Vielschichtkeramiken mit Siliciumnitrid-Passivierung	134
7.3.3.1	YAG-Keramik mit einer Siliciumnitrid-Beschichtung	134
7.3.3.2	Vielschichtkeramiken mit einer Passivierungsschicht aus Siliciumnitrid durch Co-Sinterung	139
7.3.3.3	Vielschichtkeramiken mit einer Passivierungsschicht aus Siliciumnitrid durch Dünnschichten	141
7.3.4	Bewertung der Prozessierung siliciumnitridbasierter Passivierungsschichten	144
8	Bewertung der Technologien und Prototypenauswahl	147
8.1	Reaktionszone	147
8.2	Einflussgrößen auf die Wechselwirkungszone (Ausblick)	150
8.2.1	Einfluss von Haltezeit und Sintertemperatur	150
8.2.2	Einfluss der Beschichtungsdicke für $\text{CaAlSiN}_3\text{:Eu}$	151
8.3	Lumineszenzeigenschaften	153
8.3.1	Prototypenauswahl	156
8.4	Technologiebewertung	159
9	Ausblick	160
10	Zusammenfassung	162
11	Summary and Outlook	165
11.1	Summary	165
11.2	Outlook	167
	Literaturverzeichnis	169
	Danksagung	181
	Lebenslauf	183
	Publikationen	185

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
A	Abstand zum nächstliegenden Atom im Molekül bzw. Wirtsgitter	m
A_0	Abstand zum nächstliegenden Atom im Molekül bzw. Wirtsgitter im Grundzustand	m
A'	Abstand zum nächstliegenden Atom im Molekül bzw. Wirtsgitter im elektronisch angeregten Zustand	m
a, b	Plättchendimensionen	m
C	Konzentration	mol/m ³
c	Lichtgeschwindigkeit	2,9979·10 ⁸ m/s
c_x, c_y	Farbkoordinaten	1
Ca_{\min}	Position im Elementprofil bis zu welcher Calcium in einer Y-Al-O-reichen Umgebung nachweisbar ist	m
D	Diffusionskoeffizient	m ² /s
D_0	Frequenzfaktor (Diffusionskoeffizient)	m ² /s
D_{\exp}	experimentelle Transportkonstante (Flüssigphasenbildung)	m ² /s
D_{50}	mittlere Partikelgröße, für welche 50% der Partikel unterhalb der angegebenen Größe liegen	m
D_{90}	Partikelgröße, für welche 90% der Partikel unterhalb der angegebenen Größe liegen	m
d	Schichtdicke	m
dL	Abnahme der Tablettenhöhe bei Sinterung	m

dr	Abnahme des Tablettenradius bei Sinterung	m
ΔE_i	Farbabweichung von 14 standardisierten Farben	1
E_A	Aktivierungsenergie	J/mol
E	Energie	J
E_{AN}	Anregungsenergie	J
$E_{\text{Ausgangszustand}}$	Energieniveau des Ausgangszustandes eines elektronischen Übergangs	J
E_{EM}	freiwerdende Energie im Emissionsprozess	J
$E_{\text{Endzustand}}$	Energieniveau des Endzustandes eines elektronischen Übergangs	J
E_g	Energie der Bandlücke	J
E_{Photon}	Photonenenergie	J
E_{pot}	potentielle Energie	J
E_W	Energiebarriere für den Materialtransport (Flüssigphasenbildung)	J
F	Anzahl der Freiheitsgrade	1
f	Normierungsfaktor für Tristimuluswerte	1
G	Ausdehnung der Grenzfläche	m
H	Dicke der Probe	m
h	Planck'sches Wirkungsquantum	$6,6261 \cdot 10^{-34}$ J·s
\hbar	reduziertes Planck'sches Wirkungsquantum ($=h/2\pi$)	$1,0546 \cdot 10^{-34}$ J·s= $6,5821 \cdot 10^{-16}$ eV·s
I	Intensität der Lumineszenzbande	w.E.
I_{Abs}	Intensität der absorbierten Strahlung	w.E.
I_{aus}	Intensität des transmittierten Lichts	w.E.
I_E	Lichtintensität in Abhängigkeit von der Anregungsenergie E	w.E.
I_{Em}	Intensität der emittierten Strahlung	w.E.
I_{ein}	Intensität des einfallenden Lichts	w.E.
$I_{\text{Konversion}}$	Intensität des konvertierten Lichts in Transmissionsmessungen	w.E.
I_{korr}	korrigierte Lichtintensität	1

$I_{\text{korr,norm}}$	korrigierte und normierte Lichtintensität	1
I_{LED}	Intensität des Lichts der Anregungsquelle in Transmissionsmessungen	w.E.
I_{max}	Intensitätsmaximum der Emissionsbande	w.E.
I_{Probe}	gemessene Lichtintensität der Probe	w.E.
I_{Referenz}	gemessene Lichtintensität der Referenz	w.E.
I_{Refl}	Intensität der reflektierten Strahlung	w.E.
$I_{\text{Transmission}}$	Intensität des transmittierten Lichts der Anregungsquelle in Transmissionsmessungen	w.E.
I_{λ}	Lichtintensität in Abhängigkeit von der Anregungswellenlänge	w.E.
J	Gesamtdrehimpuls	1
K	Anzahl der Komponenten	1
k	Kraftkonstante	N/m
KA	Konversionsanteil	%
KE	experimentelle Konversionseffizienz	%
KE_{relativ}	relative, experimentelle Konversionseffizienz	%
L	Summenbetrag des Bahndrehimpulses	1
L_0	Ausgangswert der Tablettenhöhe vor Sinterung	mm
m	Masse	kg
m_x, n_x	Schwingungsquantenzahl	1
n-dotiert	negativ-dotiert (Elektronenüberschuss vorhanden)	
i_0, i_1	Brechungsindizes	1
$n_{\text{Photonen,Emission}}$	Anzahl der emittierten Photonen	1
$n_{\text{Photonen,Absorption}}$	Anzahl der absorbierten Photonen	1
P	Anzahl der Phasen	1
p-dotiert	positiv-dotiert (Elektronenlöcher vorhanden)	
p	Partikeldurchmesser	m
Q	intrinsische Quantenausbeute/ Quanteneffizienz	%

R	Gaskonstante	8,3145 J/(mol·K)
R_i	Farbwiedergabeindex bezogen auf 14 Standardfarbtafeln	1
R_a	allgemeiner Farbwiedergabeindex bezogen auf 8 Standardfarbtafeln	1
r	Tablettenradius	m
r_0	Ausgangswert des Tablettenradius vor Sinterung	m
S	Summenbetrag des Spindrehimpulses ($2S+1$ entspricht der Multiplizität)	1
$S(\lambda)$	spektrale Verteilungskurve	
s	Schichtdicke	m
t	Zeit	s
T	Temperatur	K
T_0	Temperatur für welche $W = W_0$	K
T_v	Verdichtungstemperatur	K
TA	Transmissionsanteil	%
V	Volumen der Probe	m ³
$V(A)$	Potential in Abhängigkeit des Abstandes A	J
W	Wechselwirkungszone	m
W_0	Standardabweichung der Wechselwirkungszone	m
x	Ortskoordinate	m
Δx	mittlere Eindringtiefe (Diffusion)	m
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda),$ $\bar{z}(\lambda)$	Spektralwertkurven	
X, Y, Z	Tristimuluswerte	1
Y_{\min}	Position im Elementprofil bis zu welcher Yttrium in einer Ca-Si-Al-reichen Umgebung nachweisbar ist	m
*	angeregter Zustand	

Summenformeln chemischer Zusammensetzungen

Formelzeichen	Beschreibung
Al^{3+}	trivalentes Aluminium-Ion
AlN	Aluminium(III)-nitrid
$Al_6O_3N_6$, Al_5O_6N	Aluminiumoxynitrid
Al_2O_3	Aluminium(III)-oxid
C	Kohlenstoff
Ca^{2+}	divalentes Calcium-Ion
$CaAlSiN_3$	Calcium-Aluminium-Siliciumnitrid
$CaAlSiN_3:Eu$	Europium-dotiertes Calcium-Aluminium-Siliciumnitrid (rot-emittierender Leuchtstoff)
Ca_3N_2	Calcium(II)-nitrid
CaO	Calcium(II)-oxid
Ca-Si-Al-N	Calcium-Aluminium-Siliciumnitrid in α -Sialonstruktur
Ca-Si-Al-N:Eu	Europium-dotiertes Calcium-Aluminium-Siliciumnitrid in α -Sialonstruktur (orange-emittierender Leuchtstoff)
Ce^{3+} / Ce^{4+}	trivalente/ tetravalente Cer-Ionen
CeO_2	Cer(IV)-oxid
Eu^{2+} / Eu^{3+}	divalente/ trivalente Europium-Ionen
H_2	Wasserstoff
InGaN	Indium-Gallium-Nitrid (III-V-Halbleiter)
$LaAl(Si_{6-z}Al_z)N_{10-z}O_z:Ce$	Cer-dotiertes Lanthan-Aluminium-Siliciumoxynitrid
$La_{0,9}Sr_{0,1}FeO_3$	Strontium-Lanthan-Eisenoxid
$Lu_3Al_5O_{12}:Ce$	Cer-dotierter Luthetium-Aluminium-Granat (YAG)
$M_2Si_5N_8:Eu$ (M = Ca, Sr, Ba)	Europium-dotiertes Erdalkali-Siliciumnitrid
N^{3-}	Nitrid-Ion
N_2	Stickstoffmolekül
NH_3	Ammoniak
O^{2-}	Oxid-Ion
O	Sauerstoff
Si^{4+}	tetravalentes Silicium
α -Sialon	$M_xSi_{12-(m+n)}Al_{m+n}O_nN_{16-n}$ mit M= Ca, Y, Li oder Nd, $x < 2$, z.B. $Ca_{0,68}(Si_{9,96}Al_{2,04})(O_{0,68}N_{15,32})$
β -Sialon	$Si_{6-z}Al_zO_zN_{8-z}$ mit $z=0-4,2$
$Si_3Al_7O_3N_9$	Silicium-Aluminium-oxynitrid
$Si_{2,4}Al_{8,6}O_{0,6}N_{11,4}$	
Si_3N_4	Silicium(IV)-nitrid

SiO ₂	Siliciumdioxid
(Sr,Ba,Ca)SiO ₄ :Eu, Ca ₂ Al(AlSiO ₇)	Europium-dotiertes Erdalkali-Silikat
SrSi ₂ O ₂ N ₂ :Eu,	Europium-dotiertes Strontium-Siliciumoxynitrid
Sr ₃ Si ₁₃ Al ₃ O ₂ N ₂₁ :Eu	Europium-dotiertes Strontium-Aluminium-Siliciumoxynitrid
Ba ₃ Si ₆ O ₁₂ N ₂ :Eu	Europium-dotiertes Barium-Siliciumoxynitrid
Y ³⁺	Yttrium-Ion
Y ₂ O ₃	Yttrium(III)-oxid
YO _{1.335}	Yttrium-oxid
YAlO ₃	Yttrium(III)-Aluminium-oxid (Perowskit)
Y ₄ Al ₂ O ₃	Yttrium(III)-Aluminium-oxid (monoklin)
Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Yttrium-Aluminium-Granat (YAG)
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce	Cer-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) (gelb-emittierender Leuchtstoff)
Y ₂ (Si ₃ O ₃ N ₄)	Yttrium-Siliciumoxynitrid

Abkürzungen

Atom-%

bcc

CCT

CRI

CIE

CVD

EDX

Gew.-%

ICCD

LED

LI-CVD

PE-CVD

PMT

Beschreibung

Prozentangabe bezogen auf Atomzahl

engl. body centered cubic, kubisch raumzentriertes
Kristallgitterengl. correlated colour temperature, korrelierte
Farbtemperatur

engl. colour rendering index, Farbwiedergabeindex

frz. Commission Internationale de l'éclairage, Internationale
Beleuchtungskommissionengl. chemical vapour deposition, chemische
Gasphasenabscheidungengl. energy dispersive x-ray diffraction, energiedispersive
Röntgenbeugung

Prozentangabe bezogen auf das Gewicht (Masse)

engl. International Centre for Diffraction Data,
Internationales Zentrum für Beugungsdaten

engl. light emitting diode, Leuchtdiode

engl. laser-induced chemical vapor deposition, laserinduzierte
chemische Gasphasenabscheidungengl. plasma-enhanced chemical vapour deposition,
plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung

engl. photomultiplier tube, Photoelektronenvervielfacher

Mol-%	Prozentangabe bezogen auf die Molzahl
REM	Rasterelektronenmikroskopie
sccm	Standardkubikzentimeter pro Minute
SPS	engl. spark plasma sintering
U/min	Umdrehungen pro Minute in 1/s
(W*U*V), (u,v), (u',v')	Modifikationen des c_x , c_y -Farbraumes
XRD	engl. x-ray diffraction, Röntgendiffraktometrie
Vol.-%	Prozentangabe bezogen auf das Volumen
w.E.	wilkürliche Einheiten

Griechische Symbole	Beschreibung	Einheit
α	thermischer Ausdehnungskoeffizient	10^{-6} 1/K
Δ	Differenz zwischen Ausgangs- und Endwert	
$\delta E_1, \delta E_1$	Energiedifferenz, welche in Lumineszenzprozessen strahlungslos in Form von Gitterschwingungen (Phononen) abgegeben wird	J
ϵ	dekadischer Extinktionskoeffizient/ spektraler Absorptionskoeffizient	m^2/mol
λ	Wellenlänge von elektromagnetischer Strahlung	m
λ_{dom}	Emissionsschwerpunkt	m
λ_{em}	Emissionswellenlänge	m
λ_{ex}	Anregungswellenlänge	m
λ_{max}	Wellenlänge des Emissionsmaximums	m
λ_{Photon}	Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung für ein Photon	m
ν_{Photon}	Frequenz der elektromagnetischen Strahlung für ein Photon	$\frac{1}{s}$
τ	Lebensdauer, Abklingdauer	s
ρ	Dichte des Werkstoffes	g/cm^3 oder % des theoretischen Wertes
ρ'	Feststoffdichte des Pulvers	g/cm^3
ρ_0	Gründichte	g/cm^3 oder %
ρ_{geo}	geometrisch ermittelte Dichte	g/cm^3
$\rho_{relativ}$	relative Dichte	%
ω	Kreisfrequenz ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu$)	1/s
π	Kreiszahl	3,14159...
π - π^* -Übergänge	elektronische Übergänge in delokalisierten Molekülorbitalen von organischen Verbindungen	