



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2016 121 692.5**

(22) Anmeldetag: **11.11.2016**

(43) Offenlegungstag: **15.02.2018**

(51) Int Cl.: **C09K 11/08 (2006.01)**  
**H01L 33/50 (2010.01)**

(66) Innere Priorität:  
**10 2016 114 993.4 12.08.2016**

(71) Anmelder:  
**OSRAM GmbH, 80807 München, DE**

(74) Vertreter:  
**Epping Hermann Fischer**  
**Patentanwalts-gesellschaft mbH, 80639 München,**  
**DE**

(72) Erfinder:  
**Seibald, Markus, Dr., 86916 Kaufering, DE;**  
**Baumann, Dominik, Dr., 80339 München, DE;**  
**Fiedler, Tim, 86899 Landsberg, DE; Lange, Stefan,**  
**Dr., 86157 Augsburg, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	9 028 716	B2
US	9 157 025	B2
US	2002 / 0 190 240	A1
WO	2012/ 073 177	A1

**NOWITZKI, B.; HOPPE, R.: Neues über Oxide vom Typ A [(TO)<sub>n</sub>] [1]: NaLi<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub>, NaLi<sub>3</sub>GeO<sub>4</sub> und NaLi<sub>3</sub>TiO<sub>4</sub> [2]. In: Revue de chimie minérale. 1986, Bd. 23, S. 217-230. ISSN 0035-1032.**

**WERTHMANN, R.; HOPPE, R.: Über Oxide des neuen Formeltyps A[T<sub>4</sub>O<sub>4</sub>]: Zur Kenntnis von KLi<sub>3</sub>GeO<sub>4</sub>, KLi<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub> und KLi<sub>3</sub>TiO<sub>4</sub>. In: Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. 1984, Bd. 509, H. 2, S. 7-22. ISSN 1521-3749 (E) ; 0044-2313 (P). DOI: 10.1002/zaac.19845090202. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/zaac.19845090202/pdf> [abgerufen am 08.02.2017].**

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

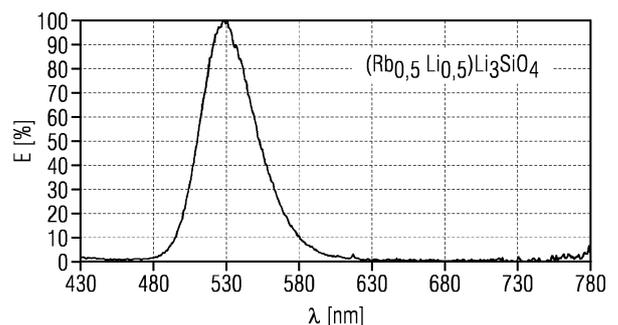
**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Leuchtstoff und Verfahren zur Herstellung eines Leuchtstoffs**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Leuchtstoff angegeben.

Der Leuchtstoff weist die allgemeine Summenformel auf:

$(MA)_a(MB)_b(MC)_c(MD)_d(TA)_e(TB)_f(TC)_g(TD)_h(TE)_i(TF)_j$   
 $(XA)_k(XB)_l(XC)_m(XD)_n$ . Dabei ist MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, MB ist aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt, MC ist aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt, MD ist aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, TA ist aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, TB ist aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt, TC ist aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt, TD ist aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, TE ist aus einer Gruppe von pentavalenten Elementen ausgewählt, TF ist aus einer Gruppe von hexavalenten Elementen ausgewählt, XA ist aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt, die Halogene umfasst, XB aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt ist, die O, S und Kombinationen daraus umfasst, XC = N und XD = C. Weiter gilt:  $a + b + c + d = t$ ;  $e + f + g + h + i + j = u$ ;  $k + l + m + n = v$ ;  $a + 2b + 3c + 4d + e + 2f + 3g + 4h + 5i + 6j - k - 2l - 3m - 4n = w$ ;  $0,8 \leq t \leq 1$ ;  $3,5 \leq u \leq 4$ ;  $3,5 \leq v \leq 4$ ;  $(-0,2) \leq w \leq 0,2$  und  $0 \leq m < 0,875$  v und/oder  $v \geq 1 > 0,125$  v.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft einen Leuchtstoff und ein Verfahren zur Herstellung eines Leuchtstoffs.

**[0002]** Leuchtstoffe, die effizient mit ultravioletter, blauer oder grüner Primärstrahlung angeregt werden können und eine effiziente Emission im blauen, grünen, gelben, roten oder tiefroten Spektralbereich aufweisen, sind von größtem Interesse für die Herstellung von weißen und farbigen lichtemittierenden Dioden (LEDs). Solche sogenannte Konversions-LEDs werden für viele Anwendungen, beispielsweise zur Allgemeinbeleuchtung, Display-Hinterleuchtung, Beschilderung, in Automobilen und in zahlreichen weiteren Verbraucherprodukten, eingesetzt. Um eine Effizienzsteigerung, eine höhere Robustheit, eine bessere Farbqualität, Farbraumabdeckung und/oder Farbtreue der Konversions-LEDs zu erzielen, um zum einen die Anwendungen zu verbessern und zum anderen das Anwendungsspektrum der Konversions-LEDs zu erweitern, ist die Nachfrage nach neuen Leuchtstoffen groß.

**[0003]** Bekannte Leuchtstoffe, die eine Emission im grünen bis roten Spektralbereich mit einer relativ geringen Halbwertsbreite (FWHM) aufweisen, sind beispielsweise  $\text{EAS:Eu}$  oder  $\text{EAGa}_2\text{S}_4:\text{Eu}$  (EA = Erdalkalimetalle). Diese Leuchtstoffe sind aber wenig robust und zeigen eine temperaturabhängige Abnahme der Intensität der emittierten Strahlung (thermisches Quenchen, "thermal quenching").

**[0004]** Nitridosilikate und Nitridoalumosilikate der Formel  $\text{M}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}$ ,  $\text{MAISiN}_3:\text{Eu}$  oder  $\text{MM}'\text{Si}_2\text{Al}_2\text{N}_6:\text{Eu}$  mit M, M' = Mg, Ca, Sr oder M, M' = Mg, Ca, Sr, Ba emittieren im orangen bis roten Spektralbereich und sind sehr effizient und stabil. Nachteilig an diesen Leuchtstoffen ist die relativ große Halbwertsbreite der Emissionsbande, deren teure Ausgangsstoffe und ein aufwendiges Herstellungsverfahren. Teilweise sind diese Leuchtstoffe auch nicht beständig gegenüber Feuchtigkeit.

**[0005]** Granate der Formel  $\text{A}_3\text{B}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  (A = Metall der Seltenen Erden, B = Al, Ga) und deren Derivate emittieren im grünen und gelben Spektralbereich und weisen eine hohe Beständigkeit und eine hohe Konversionseffizienz auf. Nachteilig an diesen Leuchtstoffen ist die relativ große Halbwertsbreite der Emissionsbande und eine limitierte Einstellbarkeit der Emissionswellenlänge. So kann beispielsweise eine Emission im roten Spektralbereich nicht erreicht werden.

**[0006]** Orthosilikate und Oxonitridoorthosilikate der Formel  $\text{M}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}$ ,  $\text{M}_{2-x-a}\text{RE}_x\text{Eu}_a\text{SiO}_{4-x}\text{N}_x$  oder  $\text{M}_{2-x-a}\text{RE}_x\text{Eu}_a\text{Si}_{1-y}\text{O}_{4-x-2y}\text{N}_x$  (M = Sr, Ba, Ca, Mg; RE = Metall der Seltenen Erden) emittieren Strahlung im grünen bis orangen Spektralbereich. Die Hauptnachteile dieser Leuchtstoffe sind eine relativ große Halbwertsbreite der Emissionsbande und eine limitierte Einstellbarkeit der Emissionswellenlänge, beispielsweise kann eine Emission im roten Spektralbereich nicht erreicht werden. Zudem zeigen die Leuchtstoffe ein thermisches Quenchverhalten und sind wenig robust.

**[0007]** Oxonitridosilikate und SiAlONe der Formel  $\text{MSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}$ ,  $\text{Si}_{6-z}\text{Al}_z\text{O}_z\text{N}_{8-z}:\text{RE}$  oder  $\text{Si}_{6-x}\text{Al}_x\text{O}_y\text{N}_{8-y}:\text{RE}_z$  (RE = Metall der Seltenen Erden) emittieren Strahlung im blauen bis gelben Spektralbereich. Die Hauptnachteile dieser Leuchtstoffe sind eine relativ große Halbwertsbreite der Emissionsbande und eine limitierte Einstellbarkeit der Emissionswellenlänge. Zudem sind die Leuchtstoffe teilweise nicht sehr effizient und stabil und unter anderem durch teure Edukte teuer in der Herstellung.

**[0008]** Nitridoaluminat der Formel  $\text{MLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$  (M = Ca, Sr) emittieren im tiefroten Spektralbereich und weisen eine hohe Strahlungsstabilität und eine hohe Konversionseffizienz auf. Nachteilig ist eine limitierte Einstellbarkeit der Emissionswellenlänge, beispielsweise kann eine schmalbandige Emission im grünen und gelben Spektralbereich nicht erreicht werden. Zudem sind diese Leuchtstoffe teuer in der Herstellung und zudem teilweise nicht beständig gegen Feuchtigkeitseinflüsse.

**[0009]** Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, Leuchtstoffe anzugeben, die effizient mittels ultravioletter, blauer oder grüner Primärstrahlung angeregt werden können, und eine effiziente Emission im blauen, grünen, gelben, roten und/oder tiefroten Spektralbereich aufweisen. Eine weitere Aufgabe besteht darin, ein Verfahren zur Herstellung von Leuchtstoffen anzugeben, das kostengünstig und einfach durchgeführt werden kann.

**[0010]** Die Aufgaben werden durch einen Leuchtstoff und ein Verfahren zur Herstellung eines Leuchtstoffs gemäß den unabhängigen Ansprüchen gelöst. Vorteilhafte Ausführungen sowie Weiterbildungen der vorliegenden Erfindung sind in den jeweils abhängigen Ansprüchen angegeben.

**[0011]** Es wird ein Leuchtstoff angegeben. Der Leuchtstoff weist die allgemeine Summenformel auf:  
 $(MA)_a(MB)_b(MC)_c(MD)_d(TA)_e(TB)_f(TC)_g(TD)_h(TE)_i(TF)_j(XA)_k(XB)_l(XC)_m(XD)_n$ .

**[0012]** Dabei ist MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, MB ist aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt, MC ist aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt, MD ist aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, TA ist aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, TB ist aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt, TC ist aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt, TD ist aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, TE ist aus einer Gruppe von pentavalenten Elementen ausgewählt, TF ist aus einer Gruppe von hexavalenten Elementen ausgewählt, XA ist aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt, die Halogene umfasst, XB ist aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt, die O, S und Kombinationen daraus umfasst, XC = N und XD = C. Weiter gilt:

- $a + b + c + d = t$ ;
- $e + f + g + h + i + j = u$
- $k + l + m + n = v$
- $a + 2b + 3c + 4d + e + 2f + 3g + 4h + 5i + 6j - k - 2l - 3m - 4n = w$
- $0.8 \leq t \leq 1$
- $3.5 \leq u \leq 4$
- $3.5 \leq v \leq 4$
- $(-0.2) \leq w \leq 0.2$ .

**[0013]** Hier und im Folgenden werden Leuchtstoffe anhand von Summenformeln beschrieben. Es ist bei den angegebenen Summenformeln möglich, dass der Leuchtstoff weitere Elemente etwa in Form von Verunreinigungen aufweist, wobei diese Verunreinigungen zusammengenommen bevorzugt höchstens einen Gewichtsanteil an dem Leuchtstoff von höchstens 1 Promille oder 100 ppm (parts per million) oder 10 ppm aufweisen sollten.

**[0014]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform gilt für den Leuchtstoff mit der allgemeinen Summenformel  $(MA)_a(MB)_b(MC)_c(MD)_d(TA)_e(TB)_f(TC)_g(TD)_h(TE)_i(TF)_j(XA)_k(XB)_l(XC)_m(XD)_n$ :  $0 \leq m < 0,875$  v und/oder  $v \geq l > 0,125$  v.

**[0015]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff die allgemeine Summenformel  $(MA)_a(MB)_b(MC)_c(MD)_d(TA)_e(TB)_f(TC)_g(TD)_h(TE)_i(TF)_j(XA)_k(XB)_l(XC)_m(XD)_n$  auf. Dabei gilt:

- MA ist aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, K, Rb, Cs, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst,
- MB ist aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt, die Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Mn, Eu, Yb, Ni, Fe, Co und Kombinationen daraus umfasst,
- MC ist aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt, die Y, Fe, Cr, Sc, In, Metalle der Seltenen Erden und Kombinationen daraus umfasst. Metalle der Seltenen Erden bezeichnen dabei insbesondere La, Ce, Sm, Eu und/oder Yb. Bevorzugt ist MC aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt, die Y, Fe, Cr, Sc, In, La, Ce, Sm, Eu, Yb und Kombinationen daraus umfasst,
- MD ist aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, die Zr, Hf, Mn, Ce und Kombinationen daraus umfasst,
- TA ist aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst,
- TB ist aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt, die Mg, Zn, Mn, Eu, Yb, Ni und Kombinationen daraus umfasst,
- TC ist aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt, die B, Al, Ga, In, Y, Fe, Cr, Sc, Metalle der Seltenen Erden und Kombinationen daraus umfasst. Metalle der Seltenen Erden bezeichnen dabei insbesondere Ce, Eu und/oder Yb. Bevorzugt ist TC aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt, die B, Al, Ga, In, Y, Fe, Cr, Sc, Ce, Eu, Yb und Kombinationen daraus umfasst,
- TD ist aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, die Si, Ge, Sn, Mn, Ti, Zr, Hf, Ce und Kombinationen daraus umfasst,
- TE ist aus einer Gruppe von pentavalenten Elementen ausgewählt, die P, Ta, Nb, V und Kombinationen daraus umfasst,
- TF ist aus einer Gruppe von hexavalenten Elementen ausgewählt, die W, Mo und Kombinationen daraus umfasst,
- XA ist aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt, die F, Cl, Br und Kombinationen daraus umfasst,
- XB ist aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt, die O, S und Kombinationen daraus umfasst,
- XC = N

- XD = C
- a + b + c + d = t
- e + f + g + h + i + j = u
- k + l + m + n = v
- a + 2b + 3c + 4d + e + 2f + 3g + 4h + 5i + 6j - k - 2l - 3m - 4n = w
- 0.8 ≤ t ≤ 1
- 3.5 ≤ u ≤ 4
- 3.5 ≤ v ≤ 4
- (-0.2) ≤ w ≤ 0.2. Bevorzugt gilt: 0 ≤ m < 0,875 v und/oder v ≥ l > 0,125 v.

**[0016]** 0 ≤ m < 0,875 v und/oder v ≥ l > 0,125 v bedeutet, dass der Mol-Anteil an XC, also Stickstoff, in dem Leuchtstoff unter 87,5 Mol% in Bezug auf die Gesamtstoffmenge v an XA, XB, XC und XD beträgt und/oder der Mol-Anteil an XB, also Sauerstoff und/oder Schwefel, in dem Leuchtstoff über 12,5 Mol% in Bezug auf die Gesamtstoffmenge v an XA, XB, XC und XD beträgt.

**[0017]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform handelt es sich bei MA, MB, MC, MD, TA, TB, TC, TD, TE und TF um die entsprechenden monovalenten, divalenten, trivalenten, tetravalenten, pentavalenten oder hexavalenten Kationen. Mit anderen Worten weisen MA und TA die Oxidationsstufe +1, MB und TB die Oxidationsstufe +2, MC und TC die Oxidationsstufe +3, MD und TD die Oxidationsstufe +4, TE die Oxidationsstufe +5 und TF die Oxidationsstufe +6 auf. Bei XA, XB, XC und XD handelt es sich insbesondere um die Anionen der entsprechenden Elemente. Dabei weist XA bevorzugt die Oxidationsstufe -1, XB die Oxidationsstufe -2, XC, also N, die Oxidationsstufe -3 und XD, also C, die Oxidationsstufe -4 auf.

**[0018]** In der WO 2013/175336 A1 wird eine neue Familie von rot-emittierenden Leuchtstoffen beschrieben, die eine Emission mit kleinen Halbwertsbreiten aufweisen. Die dort offenbarten Leuchtstoffe weisen einen Anteil von mindestens 87,5 % Stickstoff und höchstens 12,5 % Sauerstoff in Bezug auf die Gesamtmenge an anionischen Elementen des Leuchtstoffs auf. Ein höherer Sauerstoffgehalt in den Leuchtstoffen führt gemäß der WO 2013/175336 A1 zu instabilen Verbindungen.

**[0019]** Unter der Halbwertsbreite wird hier und im Folgenden die spektrale Breite auf halber Höhe des Maximums des Emissionspeaks, kurz FWHM oder Full-width at half maximum, verstanden. Als Emissionspeak wird der Peak mit der maximalen Intensität verstanden.

**[0020]** Überraschenderweise haben die Erfinder der vorliegenden Erfindung festgestellt, dass ein höherer Sauerstoff- und/oder Schwefelanteil, also ein Sauerstoff- und/oder Schwefelanteil in dem Leuchtstoff über 12,5 Mol% in Bezug auf die Gesamtstoffmenge an anionischen Elementen, beziehungsweise ein geringerer Stickstoffanteil, also ein Stickstoffanteil in dem Leuchtstoff unter 87,5 Mol% in Bezug auf die Gesamtstoffmenge an anionischen Elementen, zu sehr stabilen und effizienten Leuchtstoffen mit hoher Quanteneffizienz führt. Die Leuchtstoffe weisen ein hohes Absorptionsvermögen im UV-Bereich bis grünen Bereich, insbesondere zwischen 300 nm und 500 nm oder zwischen 300 nm und 460 nm, bevorzugt zwischen 300 nm und 430 nm oder 300 nm und 450 nm, auf und lassen sich damit effizient mit einer Primärstrahlung in diesem Wellenlängenbereich anregen. Die Primärstrahlung kann von den Leuchtstoffen ganz (Vollkonversion) oder teilweise (Teilkonversion) in eine längerwellige Strahlung, auch als Sekundärstrahlung bezeichnenbar umgewandelt werden.

**[0021]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform ist bevorzugt, dass gilt: 0 ≤ m < 0,75 v oder v ≥ l > 0,25 v, 0 ≤ m < 0,625 v oder v ≥ l > 0,375 v. Besonders bevorzugt ist: 0 ≤ m < 0,5 v oder v ≥ l > 0,5 v, 0 ≤ m < 0,375 v oder v ≥ l > 0,625 v, 0 ≤ m < 0,25 v oder v ≥ l > 0,7 v, 0 ≤ m < 0,125 v oder v ≥ l > 0,875 v oder m = 0 oder l = v.

**[0022]** Die Erfinder haben herausgefunden, dass sich überraschenderweise mit zunehmendem Sauerstoff- und/oder Schwefelgehalt beziehungsweise mit abnehmendem Stickstoffgehalt die Peakwellenlänge der Leuchtstoffe hin zu kürzeren Wellenlängen verschiebt und zudem sehr stabile Leuchtstoffe resultieren. Dadurch ist es mit Vorteil möglich, die gewünschte Peakwellenlänge des Leuchtstoffs durch eine Variation des Sauerstoffgehalts entsprechend einzustellen. Auch lässt sich die Peakwellenlänge und/oder die Halbwertsbreite des Leuchtstoffs durch Kombinationen oder Substitutionen der Metalle oder Elemente MA, MB, MC, MD, TA, TB, TC, TD, TE, TF, XA, XC, XD und/oder XB variieren. Es wurde also eine Möglichkeit gefunden, Leuchtstoffe bereitzustellen, die in ihren Eigenschaften, insbesondere der Peakwellenlänge und der Halbwertsbreite, gezielt für eine entsprechende Anwendung angepasst werden können und dabei überraschenderweise auch noch sehr stabil sind. Insbesondere können die Leuchtstoffe sehr schmale Halbwertsbreiten, beispielsweise unter 50 nm, unter 30 nm oder unter 20 nm, aufweisen, was die Leuchtstoffe für viele Anwendungen, zum Beispiel für Hinterleuchtungsanwendungen, interessant macht.

**[0023]** Als "Peakwellenlänge" wird vorliegend die Wellenlänge im Emissionsspektrum bezeichnet, bei der die maximale Intensität im Emissionsspektrum liegt.

**[0024]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform gilt für den Leuchtstoff mit der Summenformel  $(MA)_a(MB)_b(MC)_c(MD)_d(TA)_e(TB)_f(TC)_g(TD)_h(TE)_i(TF)_j(XA)_k(XB)_l(XC)_m(XD)_n$ :

$$a + b + c + d = 1;$$

$$e + f + g + h + i + j = 4;$$

$$k + l + m + n = 4;$$

$a + 2b + 3c + 4d + e + 2f + 3g + 4h + 5i + 6j - k - 2l - 3m - 4n = 0$  und  $m < 3,5$  oder  $l > 0,5$ . Dabei handelt es sich also um einen elektroneutralen Leuchtstoff.

**[0025]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform gilt  $n = 0$ ,  $k = 0$ ,  $v = 4$  und  $m < 3,5$  und  $l > 0,5$ . Der Leuchtstoff weist dann also folgende Summenformel auf:

$(MA)_a(MB)_b(MC)_c(MD)_d(TA)_e(TB)_f(TC)_g(TD)_h(TE)_i(TF)_j(XB)_l(XC)_m$ . MA, MB, MC, MD, TA, TB, TC, TD, TE, TF, XC und XB sind dabei wie vorstehend definiert. Gemäß dieser Ausführungsform weist der Leuchtstoff nur Stickstoff und Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel oder Stickstoff, Schwefel und Sauerstoff, bevorzugt nur Stickstoff und Sauerstoff, als Anionen auf. Dabei ist aber nicht ausgeschlossen, dass weitere, auch anionische Elemente in Form von Verunreinigungen vorhanden sind. Bevorzugt gilt  $m < 3,0$  und  $l > 1,0$ ;  $m < 2,5$  und  $l > 1,5$ ;  $m < 2,0$  und  $l < 2,0$ ;  $m < 1,5$  und  $l > 2,5$ ;  $m < 1,5$  und  $l > 2,5$ ;  $m < 1,0$  und  $l > 3,0$ ;  $m < 0,5$  und  $l > 3,5$  oder  $m = 0$  und  $l = 4$ .

**[0026]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff die allgemeine Summenformel  $(MA)_a(MB)_b(TA)_e(TD)_h(XB)_l(XC)_m$  auf. Dabei gilt bevorzugt:

- MA ist aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, K, Rb, Cs, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst. Besonders bevorzugt ist MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, K, Rb und Kombinationen daraus umfasst,
- MB ist aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt, die Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Mn, Eu, Yb, Ni, Fe, Co und Kombinationen daraus umfasst. Besonders bevorzugt ist MB aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt, die Mn, Eu, Yb und Kombinationen daraus umfasst. Ganz besonders bevorzugt ist MB = Eu oder eine Kombination aus Eu und Mn und/oder Yb,
- TA ist aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst. Besonders bevorzugt ist TA ist aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na und Kombinationen daraus umfasst. Ganz besonders bevorzugt ist TA = Li,
- TD ist aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, die Si, Ge, Sn, Mn, Ti, Zr, Hf, Ce und Kombinationen daraus umfasst. Besonders bevorzugt ist TD aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, die Si, Ge, Sn, Mn, Ti, und Kombinationen daraus umfasst. Ganz besonders bevorzugt ist TD = Si,
- XB ist aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt, die O, S und Kombinationen daraus umfasst. Besonders bevorzugt ist XB = O,
- XC = N. Weiter gilt:
  - $a + b = t$ ,
  - $e + h = u$ ,
  - $l + m = v$ ,
  - $a + 2b + e + 4h - 2l - 3m = w$
  - $0,8 \leq t \leq 1$
  - $3,5 \leq u \leq 4$
  - $3,5 \leq v \leq 4$
  - $(-0,2) \leq w \leq 0,2$
  - $0 \leq m < 0,875 v$  und/oder  $v \geq l > 0,125 v$ .

**[0027]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff die allgemeine Summenformel

$(MA)_a(MB)_b(TA)_e(TD)_h(XB)_l(XC)_m$  auf. Dabei gilt:

- MA ist aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, K, Rb, Cs, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst. Bevorzugt ist MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, K, Rb und Kombinationen daraus umfasst,
- MB ist aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt, die Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Mn, Eu, Yb, Ni, Fe, Co und Kombinationen daraus umfasst. Bevorzugt ist aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt,

die Mn, Eu, Yb und Kombinationen daraus umfasst. Besonders bevorzugt ist MB = Eu oder eine Kombination von Eu mit Mn und/oder Yb,

– TA ist aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst. Bevorzugt ist TA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na und Kombinationen daraus umfasst. Besonders bevorzugt ist TA = Li,

– TD ist aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, die Si, Ge, Sn, Mn, Ti, Zr, Hf, Ce und Kombinationen daraus umfasst. Bevorzugt ist TD aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, die Si, Ge, Sn, Mn, Ti, und Kombinationen daraus umfasst. Besonders bevorzugt ist TD = Si,

– XB ist aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt, die O, S und Kombinationen daraus umfasst. Bevorzugt ist XB = O.

– XC = N. Weiter gilt:

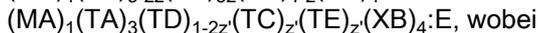
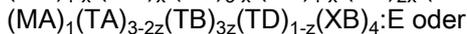
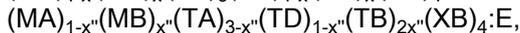
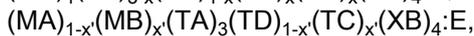
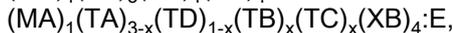
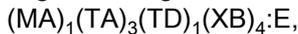
$$a + b = 1;$$

$$e + h = 4;$$

$$l + m = 4;$$

$$-a + 2b + e + 4h - 2l - 3m = 0 \text{ und } m < 3,5 \text{ oder } l > 0,5.$$

**[0028]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform handelt es sich bei dem Leuchtstoff um ein Oxid, das heißt es liegt nur Sauerstoff als anionisches Element in dem Leuchtstoff vor. Der Leuchtstoff weist dann eine der folgenden allgemeinen Summenformeln auf:



$XB = O,$

$0 \leq x \leq 1,$  beispielsweise  $x = 0, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$  oder 1, bevorzugt  $0 < x < 1,$

beispielsweise  $x = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$  oder 0,9,

$0 \leq x' \leq 1,$  beispielsweise  $x' = 0, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$  oder 1, bevorzugt  $0 < x' < 1,$

beispielsweise  $x' = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$  oder 0,9,

$0 \leq x'' \leq 1,$  beispielsweise  $x'' = 0, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$  oder 1, bevorzugt  $0 < x'' < 1,$

beispielsweise  $x'' = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$  oder 0,9,

$0 \leq z \leq 1,$  bevorzugt  $z = 0, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$  oder 1, bevorzugt  $0 < z < 1,$  beispielsweise  $z = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$  oder 0,9,

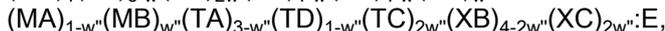
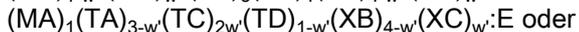
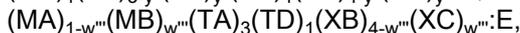
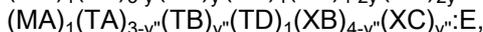
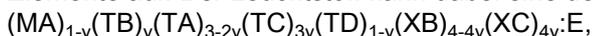
$0 \leq z' \leq 0,5,$  bevorzugt  $0 < z' < 0,5,$  beispielsweise  $z' = 0, 0,1; 0,2; 0,3$  oder 0,4,

und E aus einer Gruppe ausgewählt ist, die Eu, Ce, Yb, Mn und Kombinationen daraus umfasst.

**[0029]** Hier und im Folgenden kann E auch als Aktivator bezeichnet werden. Der Aktivator und insbesondere dessen Umgebung in dem Wirtsgitter sind für die Lumineszenz, insbesondere die Peakwellenlänge der Emission des Leuchtstoffs, verantwortlich.

**[0030]** Die Metalle beziehungsweise Elemente MA, MB, TA, TB, TC, TD, TE und/oder XB bilden bei den Leuchtstoffen das Wirtsgitter, E kann dabei Gitterplätze der kationischen Elemente MA, MB, TA, TB, TC, TD und/oder TE teilweise ersetzen, oder Zwischengitterplätze einnehmen. Insbesondere besetzt E dabei die Gitterplätze von MA. Zum Ladungsausgleich kann sich der Anteil der weiteren Elemente, beispielsweise der von TA und/oder TD, ändern.

**[0031]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform ist der Leuchtstoff ein Oxid oder Oxonitrid, bevorzugt ein Oxonitrid und weist daher in seiner Summenformel nur Sauerstoff oder Sauerstoff und Stickstoff als anionische Elemente auf. Der Leuchtstoff kann dabei eine der folgenden allgemeinen Summenformeln aufweisen:



wobei

$XB = O$ ,

$0 \leq y \leq 1$ , beispielsweise  $y = 0, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$  oder 1, bevorzugt  $0 < y < 0,875$ ,

beispielsweise  $y = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$  oder 0,8, ganz besonders bevorzugt  $0 \leq y \leq 0,4$ ,

$0 \leq y' \leq 2$ , beispielsweise  $y' = 0, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9$  oder 2,0, bevorzugt  $0 < y' \leq 1,75$ , besonders bevorzugt  $0 \leq y' \leq 0,9$ ,

$0 \leq y'' \leq 3$ , beispielsweise  $y'' = 0, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 2,9$  oder 3,0, bevorzugt  $0 < y'' < 3$ , besonders bevorzugt  $0 < y'' \leq 1,9$ ,

$0 \leq w''' \leq 1$ , beispielsweise  $w''' = 0, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$  oder 1, bevorzugt  $0 < w''' < 1$ ,

$0 \leq w' \leq 1$ , beispielsweise  $w' = 0, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$  oder 1, bevorzugt  $0 < w' < 1$ ,

$0 \leq w'' \leq 1$ , beispielsweise  $w'' = 0, 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$  oder 1, bevorzugt  $0 < w'' < 1$  und E aus einer Gruppe ausgewählt ist, die Eu, Ce, Yb, Mn und Kombinationen daraus umfasst.

**[0032]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform ist E ist aus einer Gruppe ausgewählt, die Eu, Ce, Yb, Mn und Kombinationen daraus umfasst. Insbesondere handelt es sich bei E um  $Eu^{2+}$ ,  $Ce^{3+}$ ,  $Yb^{3+}$ ,  $Yb^{2+}$  und/oder  $Mn^{4+}$ .

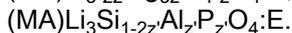
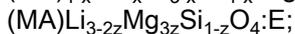
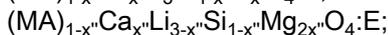
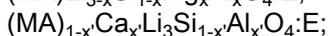
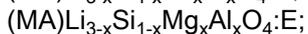
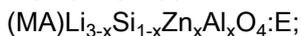
**[0033]** Die Metalle beziehungsweise Elemente MA, MB, TA, TB, TC, TD, XC und/oder XB bilden bei den Leuchtstoffen das Wirtsgitter, E kann dabei Gitterplätze von MA, MB, TA, TB, TC und/oder TD, bevorzugt von MA, teilweise ersetzen, oder Zwischengitterplätze einnehmen.

**[0034]** Durch Verwendung der Aktivatoren Eu, Ce, Yb und/oder Mn, insbesondere Eu oder Eu in Kombination mit Ce, Yb und/oder Mn, kann besonders gut der Farbort des Leuchtstoffs im CIE-Farbraum, dessen Peakwellenlänge  $\lambda_{peak}$  beziehungsweise Dominanzwellenlänge  $\lambda_{dom}$ , und die Halbwertsbreite eingestellt werden.

**[0035]** Die Dominanzwellenlänge ist eine Möglichkeit, nichtspektrale (polychromatische) Lichtmischungen durch spektrales (monochromatisches) Licht, welches eine ähnliche Farbtonwahrnehmung erzeugt, zu beschreiben. Im CIE-Farbraum kann die Linie, die einen Punkt für eine bestimmte Farbe und den Punkt CIE-x = 0.333, CIE-y = 0.333 verbindet, so extrapoliert werden, dass sie den Umriss des Raums in zwei Punkten trifft. Der Schnittpunkt, der näher an der besagten Farbe liegt, repräsentiert die Dominanzwellenlänge der Farbe als Wellenlänge der reinen spektralen Farbe an diesem Schnittpunkt. Die Dominanzwellenlänge ist also die Wellenlänge, die von dem menschlichen Auge wahrgenommen wird.

**[0036]** Der Aktivator E kann gemäß einer weiteren Ausführungsform in Mol%-Mengen zwischen 0,1 Mol% bis 20 Mol%, 1 Mol% bis 10 Mol%, 0,5 Mol% bis 5 Mol%, 2 Mol% bis 5 Mol%, vorhanden sein. Hier und im Folgenden werden Mol%-Angaben für den Aktivator E, insbesondere Eu, als Mol%-Angaben bezogen auf die Molanteile von MA und/oder TA im jeweiligen Leuchtstoff verstanden.

**[0037]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff eine der folgenden allgemeinen Summenformeln auf:



**[0038]** Ausgehend von dem Leuchtstoff der Summenformel  $(MA)Li_3SiO_4 \cdot E$  kann gemäß zumindest einer Ausführungsform LiSi zumindest teilweise durch ZnAl oder MgAl ersetzt sein und man erhält einen Leuchtstoff der Formel  $(MA)Li_{3-x}Si_{1-x}Zn_xAl_xO_4 \cdot E$  oder  $(MA)Li_{3-x}Si_{1-x}Mg_xAl_xO_4 \cdot E$ .

**[0039]** Ausgehend von dem Leuchtstoff der Summenformel  $(MA)Li_3SiO_4 \cdot E$  kann gemäß zumindest einer Ausführungsform (MA)Si zumindest teilweise durch CaAl ersetzt sein und man erhält einen Leuchtstoff der Formel  $(MA)_{1-x'}Ca_xLi_3Si_{1-x'}Al_xO_4 \cdot E$ .

**[0040]** Ausgehend von dem Leuchtstoff der Summenformel  $(MA)Li_3SiO_4 \cdot E$  kann gemäß zumindest einer Ausführungsform (MA)LiSi zumindest teilweise durch  $CaMg_2$  ersetzt sein und man erhält einen Leuchtstoff der Formel  $(MA)_{1-x''}Ca_xLi_{3-x''}Si_{1-x''}Mg_{2x''}O_4 \cdot E$ .

**[0041]** Ausgehend von dem Leuchtstoff der Summenformel  $(MA)Li_3SiO_4:E$  kann gemäß zumindest einer Ausführungsform  $Li_2Si$  zumindest teilweise durch  $Mg_3$  ersetzt sein und man erhält einen Leuchtstoff der Formel  $(MA)Li_{3-2z}Mg_{3z}Si_{1-z}O_4:E$ .

**[0042]** Ausgehend von dem Leuchtstoff der Summenformel  $(MA)Li_3SiO_4:E$  kann gemäß zumindest einer Ausführungsform  $Si_2$  zumindest teilweise durch  $AlP$  ersetzt sein und man erhält einen Leuchtstoff der Formel  $(MA)Li_3Si_{1-2z}Al_zP_zO_4:E$ .

**[0043]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff eine der folgenden allgemeinen Summenformeln auf:

$(MA)_{1-y}Ca_yLi_{3-2y}Al_{3y}Si_{1-y}O_{4-4y}N_{4y}:E$ ,  
 $(MA)Li_{3-y}Al_ySiO_{4-2y}N_{2y}:E$ ,  
 $(MA)Li_{3-y}Mg_ySiO_{4-y}N_y:E$ ,  
 $(MA)_{1-w}Ca_wLi_3SiO_{4-w}N_w:E$ ,  
 $(MA)Li_{3-w}Al_{2w}Si_{1-w}O_{4-w}N_w:E$ ,  
 $(MA)_{1-w}Ca_wLi_{3-w}Si_{1-w}Al_{2w}O_{4-2w}N_{2w}:E$ .

**[0044]** Ausgehend von dem Leuchtstoff der Summenformel  $(MA)Li_3SiO_4:E$  kann gemäß zumindest einer Ausführungsform  $(MA)Li_3SiO_4$  zumindest teilweise durch  $CaLiAl_3N_4$  ersetzt sein und man erhält einen Leuchtstoff der Formel  $(MA)_{1-y}Ca_yLi_{3-2y}Al_{3y}Si_{1-y}O_{4-4y}N_{4y}:E$ .

**[0045]** Ausgehend von dem Leuchtstoff der Summenformel  $(MA)Li_3SiO_4:E$  kann gemäß zumindest einer Ausführungsform  $LiO_2$  zumindest teilweise durch  $AlN_2$  ersetzt sein und man erhält einen Leuchtstoff der Formel  $(MA)Li_{3-y}Al_ySiO_{4-2y}N_{2y}:E$ .

**[0046]** Ausgehend von dem Leuchtstoff der Summenformel  $(MA)Li_3SiO_4:E$  kann gemäß zumindest einer Ausführungsform  $LiO$  zumindest teilweise durch  $MgN$  ersetzt sein und man erhält einen Leuchtstoff der Formel  $(MA)Li_{3-y}Mg_ySiO_{4-y}N_y:E$ .

**[0047]** Ausgehend von dem Leuchtstoff der Summenformel  $(MA)Li_3SiO_4:E$  kann gemäß zumindest einer Ausführungsform  $(MA)O$  zumindest teilweise durch  $CaN$  ersetzt sein und man erhält einen Leuchtstoff der Formel  $(MA)_{1-w}Ca_wLi_3SiO_{4-w}N_w:E$ .

**[0048]** Ausgehend von dem Leuchtstoff der Summenformel  $(MA)Li_3SiO_4:E$  kann gemäß zumindest einer Ausführungsform  $LiSiO$  zumindest teilweise durch  $Al_2N$  ersetzt sein und man erhält einen Leuchtstoff der Formel  $(MA)Li_{3-w}Al_{2w}Si_{1-w}O_{4-w}N_w:E$ .

**[0049]** Ausgehend von dem Leuchtstoff der Summenformel  $(MA)Li_3SiO_4:E$  kann gemäß zumindest einer Ausführungsform  $(MA)Li_3SiO_2$  zumindest teilweise durch  $CaAl_2N_2$  ersetzt sein und man erhält einen Leuchtstoff der Formel  $(MA)_{1-w}Ca_wLi_{3-w}Si_{1-w}Al_{2w}O_{4-2w}N_{2w}:E$ .

**[0050]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform ist MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, K, Rb und Kombinationen daraus umfasst. Beispielsweise kann MA wie folgt gewählt sein: MA = Na,K, (Na,K), (Rb,Li). (Na,K), (Rb,Li) bedeutet dabei, dass eine Kombination aus Na und K beziehungsweise eine Kombination aus Rb und Li vorliegt. Diese Wahl an MA ergibt besonders effiziente Leuchtstoffe, die vielseitig anwendbar sind.

**[0051]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff eine der folgenden allgemeinen Summenformeln auf:

$NaLi_{3-x}Si_{1-x}Zn_xAl_xO_4:E$ ,  
 $NaLi_{3-x}Si_{1-x}Mg_xAl_xO_4:E$ ,  
 $Na_{1-x}Ca_xLi_3Si_{1-x}Al_xO_4:E$ ,  
 $Na_{1-x}Ca_xLi_{3-x}Si_{1-x}Mg_{2x}O_4:E$ ,  
 $NaLi_{3-2z}Mg_{3z}Si_{1-z}O_4:E$ ,  
 $NaLi_3Si_{1-2z}Al_zP_zO_4:E$ .

**[0052]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff eine der folgenden allgemeinen Summenformeln auf:

$(Na_rK_{1-r})_1Li_{3-x}Si_{1-x}Zn_xAl_xO_4:E$ ,  
 $(Na_rK_{1-r})_1Li_{3-x}Si_{1-x}Mg_xAl_xO_4:E$ ,

$(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_{1-x}\text{Ca}_x\text{Li}_3\text{Si}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_4\text{:E}$ ,  
 $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_{1-x}\text{Ca}_x\text{Li}_{3-x}\text{Si}_{1-x}\text{Mg}_{2x}\text{O}_4\text{:E}$ ,  
 $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1\text{Li}_{3-2z}\text{Mg}_{3z}\text{Si}_{1-z}\text{O}_4\text{:E}$ ,  
 $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1\text{Li}_3\text{Si}_{1-2z}\text{Al}_z\text{P}_z\text{O}_4\text{:E}$ , wobei  
 $0 \leq r \leq 1$ , beispielsweise  $r = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75;$   
 $0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1,0$ . Bevorzugt ist  $0 \leq r \leq 0,1$  oder  $0,1 < r \leq 0,4$  oder  $0,4 < r \leq 1,0$ ; besonders bevorzugt  
 $r = 0, 0,25, 0,5$  oder  $1,0$ .

**[0053]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff eine der folgenden allgemeinen Summenformeln auf:

$(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_1\text{Li}_{3-x}\text{Si}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Al}_x\text{O}_4\text{:E}$ ,  
 $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_1\text{Li}_{3-x}\text{Si}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_x\text{O}_4\text{:E}$ ,  
 $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_{1-x}\text{Ca}_x\text{Li}_3\text{Si}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_4\text{:E}$ ,  
 $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_{1-x}\text{Ca}_x\text{Li}_{3-x}\text{Si}_{1-x}\text{Mg}_{2x}\text{O}_4\text{:E}$ ,  
 $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_1\text{Li}_{3-2z}\text{Mg}_{3z}\text{Si}_{1-z}\text{O}_4\text{:E}$ ,  
 $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_1\text{Li}_3\text{Si}_{1-2z}\text{Al}_z\text{P}_z\text{O}_4\text{:E}$ , wobei  $0 \leq r' \leq 1$ ,  
 beispielsweise  $r' = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9;$   
 $0,95; 1,0$ , bevorzugt  $0,25 \leq r' \leq 0,75$ , besonders bevorzugt  $0,4 \leq r' \leq 0,6$  ganz besonders bevorzugt  $r' = 0,5$ .

**[0054]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff eine der folgenden allgemeinen Summenformeln auf:

$(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_{1-y}\text{Ca}_y\text{Li}_{3-2y}\text{Al}_3\text{Si}_{1-y}\text{O}_{4-4y}\text{N}_{4y}\text{:E}$ ,  
 $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})\text{Li}_{3-y}\text{Al}_y\text{SiO}_{4-2y}\text{N}_{2y}\text{:E}$ ,  
 $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})\text{Li}_{3-y}\text{Mg}_y\text{SiO}_{4-y}\text{N}_y\text{:E}$ ,  
 $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_{1-w}\text{Ca}_w\text{Li}_3\text{SiO}_{4-w}\text{N}_w\text{:E}$ ,  
 $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})\text{Li}_{3-w}\text{Al}_{2w}\text{Si}_{1-w}\text{O}_{4-w}\text{N}_w\text{:E}$ ,  
 $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_{1-w}\text{Ca}_w\text{Li}_{3-w}\text{Si}_{1-w}\text{Al}_{2w}\text{O}_{4-2w}\text{N}_{2w}\text{:E}$ , wobei  
 $0 \leq r \leq 1$ , beispielsweise  $r = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75;$   
 $0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1,0$ . Bevorzugt ist  $0 \leq r \leq 0,1$  oder  $0,1 < r \leq 0,4$  oder  $0,4 < r \leq 1,0$ ; besonders bevorzugt  
 $r = 0, 0,25, 0,5$  oder  $1,0$ .

**[0055]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff eine der folgenden allgemeinen Summenformeln auf:

$(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_{1-y}\text{Ca}_y\text{Li}_{3-2y}\text{Al}_3\text{Si}_{1-y}\text{O}_{4-4y}\text{N}_{4y}\text{:E}$ ,  
 $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})\text{Li}_{3-y}\text{Al}_y\text{SiO}_{4-2y}\text{N}_{2y}\text{:E}$ ,  
 $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})\text{Li}_{3-y}\text{Mg}_y\text{SiO}_{4-y}\text{N}_y\text{:E}$ ,  
 $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_{1-w}\text{Ca}_w\text{Li}_3\text{SiO}_{4-w}\text{N}_w\text{:E}$ ,  
 $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})\text{Li}_{3-w}\text{Al}_{2w}\text{Si}_{1-w}\text{O}_{4-w}\text{N}_w\text{:E}$ ,  
 $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_{1-w}\text{Ca}_w\text{Li}_{3-w}\text{Si}_{1-w}\text{Al}_{2w}\text{O}_{4-2w}\text{N}_{2w}\text{:E}$ , wobei  
 wobei  $0 \leq r' \leq 1$ , beispielsweise  $r' = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7;$   
 $0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1,0$ , bevorzugt  $0,25 \leq r' \leq 0,75$ , besonders bevorzugt  $0,4 \leq r' \leq 0,6$  ganz besonders  
 bevorzugt  $r' = 0,5$ .

**[0056]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff eine der folgenden allgemeinen Summenformeln auf:

$\text{Na}_{1-y}\text{Ca}_y\text{Li}_{3-2y}\text{Al}_3\text{Si}_{1-y}\text{O}_{4-4y}\text{N}_{4y}\text{:E}$ ,  
 $\text{NaLi}_{3-y}\text{Al}_y\text{SiO}_{4-2y}\text{N}_{2y}\text{:E}$ ,  
 $\text{NaLi}_{3-y}\text{Mg}_y\text{SiO}_{4-y}\text{N}_y\text{:E}$ ,  
 $\text{Na}_{1-w}\text{Ca}_w\text{Li}_3\text{SiO}_{4-w}\text{N}_w\text{:E}$ ,  
 $\text{NaLi}_{3-w}\text{Al}_{2w}\text{Si}_{1-w}\text{O}_{4-w}\text{N}_w\text{:E}$ ,  
 $\text{Na}_{1-w}\text{Ca}_w\text{Li}_{3-w}\text{Si}_{1-w}\text{Al}_{2w}\text{O}_{4-2w}\text{N}_{2w}\text{:E}$ .

**[0057]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff die allgemeine Summenformel  $(\text{MA})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4\text{:E}$  auf. Dabei ist MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, K, Rb, Cs, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst. Bevorzugt ist MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, K, Rb und Kombinationen daraus umfasst. TA ist aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst. TD ist aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, die Si, Ge, Sm, Mn, Ti, Zr, Hf, Ce und Kombinationen daraus umfasst. XB ist aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt, die O, S und Kombinationen daraus umfasst. E ist aus einer Gruppe ausgewählt, die Eu, Ce, Yb, Mn und Kombinationen daraus umfasst. Insbesondere

besetzt E die Gitterplätze von MA. Zum Ladungsausgleich kann sich dabei der Anteil der weiteren Elemente, beispielsweise der von TA und/oder TD, ändern. Beispielsweise ist  $E = \text{Eu}^{2+}$  und ersetzt  $\text{MA}^+$ , der Ladungsausgleich erfolgt über eine Änderung des Anteils an TA und/oder TD.

**[0058]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff die allgemeine Summenformel  $(\text{MA})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  auf. Dabei ist MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, die Li, Na, K, Rb und Kombinationen daraus umfasst. TA = Li, TD = Si, XB = O und E ist aus einer Gruppe ausgewählt, die Eu, Ce, Yb, Mn und Kombinationen daraus umfasst. Bevorzugt gilt: E = Eu oder eine Kombination aus Eu mit Ce, Yb und/oder Mn.

**[0059]** Überraschenderweise hat sich gezeigt, dass sich durch eine Variation der Zusammensetzung von MA die Eigenschaften des Leuchtstoffs, insbesondere bezüglich der Peakwellenlänge und der Halbwertsbreite, erheblich ändern lassen. Zudem weisen die Leuchtstoffe ein großes Absorptionsvermögen von Primärstrahlung im Bereich von 300 nm bis 460 nm oder 300 nm bis 500 nm, insbesondere zwischen 300 nm und 450 nm oder 300 nm und 430 nm auf.

**[0060]** Beispielsweise emittiert der Leuchtstoff der Formel  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  bei Anregung mit einer Primärstrahlung mit einer Wellenlänge von 400 nm im blauen Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums und zeigt eine schmalbandige Emission, das heißt eine Emission mit einer geringen Halbwertsbreite. Bei einer Anregung mit einer Primärstrahlung mit einer Wellenlänge von 400 nm emittiert dagegen der Leuchtstoff der Formel  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  sehr breitbandig vom blauen bis roten Spektralbereich, so dass ein weißfarbiger Leuchteindruck entsteht. Der Leuchtstoff der Formel  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  emittiert schmalbandig im blau-grünen Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums und die Leuchtstoffe der Formel  $(\text{Rb}_{0,5}\text{Li}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  und  $(\text{Na}_{0,25}\text{K}_{0,75})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  emittieren schmalbandig im grünen Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums. In nachstehender Tabelle sind die Eigenschaften der Leuchtstoffe dargestellt:

	$\lambda_{\text{prim}}$	$\lambda_{\text{peak}}$	$\lambda_{\text{dom}}$	FWHM
$\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$	400 nm	469 nm	473 nm	32 nm
$\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$	400 nm	-	-	-
$(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$	400 nm	486 nm	493 nm	19,2 nm
$(\text{Rb}_{0,5}\text{Li}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$	400 nm	528 nm	538,7 nm	42,8 nm
$(\text{Na}_{0,25}\text{K}_{0,75})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$	400 nm	529 nm	541,4 nm	45 nm

**[0061]** Durch die unterschiedlichen Emissionseigenschaften sind die Leuchtstoffe für die verschiedensten Anwendungen geeignet.

**[0062]** Als blauer Spektralbereich wird der Bereich des elektromagnetischen Spektrums zwischen 420 nm und 520 nm, verstanden.

**[0063]** Als grüner Spektralbereich wird der Bereich des elektromagnetischen Spektrums zwischen einschließlich 520 nm und 580 nm verstanden.

**[0064]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff die allgemeine Summenformel  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  auf,  $0 \leq r \leq 1$ , beispielsweise  $r = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1,0$ . Bevorzugt ist  $0 \leq r \leq 0,1$  oder  $0,1 < r \leq 0,4$  oder  $0,4 < r \leq 1,0$ ; besonders bevorzugt  $r = 0, 0,25, 0,5$  oder  $1,0$ . Überraschenderweise ändern sich die Eigenschaften des Leuchtstoffs, insbesondere die Peakwellenlänge und die Halbwertsbreite, bei einer Variation der Anteile an Na und K in dem Leuchtstoff. Dadurch sind durch diese Leuchtstoffe die verschiedensten Anwendungen einsetzbar.

**[0065]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff die Formel  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0,4 < r \leq 1$ , bevorzugt  $0,45 < r \leq 1$ , ganz besonders bevorzugt  $r = 0,5$  oder  $1$  auf. Bevorzugt ist TA = Li, TD = Si und XB = O. Beispielsweise weist der Leuchtstoff die Formel  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  oder  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  auf. Die Peakwellenlänge des Leuchtstoffs liegt im blauen Spektralbereich, insbesondere im Bereich zwischen 450 nm und 500 nm.

**[0066]** Der Leuchtstoff  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0,4 < r \leq 1$ , beispielsweise  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  oder  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  eignet sich insbesondere für die Verwendung in Konversions-LEDs, die weiße Strahlung

emittieren. Dazu kann der Leuchtstoff mit einem roten und grünen Leuchtstoff kombiniert werden. Bisherige weiß emittierende Konversions-LEDs verwenden einen Halbleiterchip, der eine blaue Primärstrahlung emittiert und einen roten und grünen Leuchtstoff. Durch eine Überlagerung der blauen Primärstrahlung und der roten und grünen Sekundärstrahlung entsteht weißes Licht. Nachteilig an dieser Lösung ist, dass die epitaktisch aufgewachsenen Halbleiterchips, basierend beispielsweise auf GaN oder InGaN, Schwankungen in der Peakwellenlänge der emittierten Primärstrahlung aufweisen können. Dies führt zu Schwankungen in der weißen Gesamtstrahlung, wie eine Änderung des Farborts und der Farbwiedergabe, da die Primärstrahlung den blauen Anteil zu der Gesamtstrahlung beiträgt. Dies ist insbesondere bei dem Einsatz mehrerer Halbleiterchips in einer Vorrichtung problematisch. Um Schwankungen zu verhindern, müssen die Halbleiterchips entsprechend ihren Farborten sortiert werden ("Binning"). Je enger die Toleranzen bezüglich der Wellenlänge der emittierten Primärstrahlung gesetzt werden, desto höher ist die Qualität von Vorrichtungen, die aus mehr als einem Halbleiterchip bestehen. Aber auch nach einer Sortierung mit engen Toleranzen kann sich die Peakwellenlänge der Halbleiterchips bei variablen Betriebstemperaturen und Durchlassströmen signifikant ändern. In Allgemeinbeleuchtungs- und anderen Anwendungen kann dies zu einer Änderung der optischen Eigenschaften, wie des Farborts und der Farbtemperatur, führen. Bei Hinterleuchtungsanwendungen kann dies zudem zu einer Verschiebung des blauen Farborts führen und damit zu einer Änderung des Farbraums.

**[0067]** Der Leuchtstoff  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0,4 < r \leq 1$  lässt sich effizient mit einer Primärstrahlung von 300 nm bis 460 nm, bevorzugt 300 nm bis 440 nm anregen. Die Kombination eines Halbleiterchips mit einer Primärstrahlung von 300 nm bis 440 nm, beispielsweise basierend auf GaInN, führt zu der Emission einer Sekundärstrahlung im blauen Spektralbereich, die über einen deutlich breiteren Temperaturbereich und größere Bereiche für die Durchlassströme stabil ist. Da die Primärstrahlung von 300 nm bis 440 nm nicht oder kaum sichtbar ist, können verschiedenste Halbleiterchips als Primärstrahlungsquelle eingesetzt werden und dennoch ein konstantes und stabiles Emissionsspektrum der Konversions-LED erhalten werden. So kann ein aufwendiges "Binning" der Halbleiterchips vermieden oder vereinfacht und die Effizienz gesteigert werden. In Kombination mit einem grünen und einen roten Leuchtstoff eignet sich  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0,4 < r \leq 1$  damit besonders gut für dessen Anwendung in einer weißen Konversions-LED.

**[0068]** Zudem eignet sich der Leuchtstoff  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0,4 < r \leq 1$ , insbesondere  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  für die Verwendung in Konversions-LEDs, die eine blaue Strahlung emittieren. Solche Konversions-LEDs werden beispielsweise für Signallichter, wie Blaulichter, verwendet. Da diese Signallichter zum einen sehr hell sein müssen und zum anderen in einem bestimmten Farbortbereich oder an einem bestimmten Farbort liegen müssen, sind nicht alle Blaulichtquellen für diese Verwendung geeignet. Zum anderen sind Konversions-LEDs mit dem Leuchtstoff  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0,4 < r \leq 1$ , insbesondere  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  geeignet, die Melatoninproduktion beim Menschen zu unterdrücken. Die Konversions-LEDs können damit gezielt eingesetzt werden, um die Wachsamkeit und/oder die Konzentrationsfähigkeit zu steigern. Beispielsweise können sie dazu beitragen, einen Jet-Lag schneller zu überwinden. Außerdem eignet sich der Leuchtstoff beziehungsweise eine Konversions-LED mit dem Leuchtstoff für "color on demand"-Anwendungen, das heißt für Konversions-LEDs mit an Verbraucherwünschen angepassten blauen Farborten, beispielsweise zur Realisierung bestimmter markenspezifischer oder produktspezifischer Farben beispielsweise in der Werbung oder auch im Design der Innenausstattung für Autos.

**[0069]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff die Formel  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0 \leq r \leq 0,15$  bevorzugt  $0 \leq r \leq 0,1$ , besonders bevorzugt  $r = 0$  auf. Bevorzugt ist  $\text{TA} = \text{Li}$ ,  $\text{TD} = \text{Si}$  und  $\text{XB} = \text{O}$ . Beispielsweise ist der Leuchtstoff  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$ . Der Leuchtstoff emittiert sehr breitbandig vom blauen bis roten Spektralbereich, so dass ein weißer Leuchteindruck entsteht.

**[0070]** Der Leuchtstoff  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0 \leq r \leq 0,15$ , insbesondere  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  eignet sich beispielsweise für die Verwendung in Konversions-LEDs, die weiße Strahlung emittieren. Durch die breite Emission des Leuchtstoffs kann dieser mit Vorteil als einziger Leuchtstoff in einer Konversions-LED eingesetzt werden. Im Vergleich zu den bekannten weiß emittierenden Konversions-LEDs, die einen blau emittierenden Halbleiterchip und einen roten und grünen Leuchtstoff zur Erzeugung von weißem Licht einsetzen, kann hier auf das aufwendige Binning der Halbleiterchips verzichtet werden oder dieses zumindest mit einer größeren Toleranz durchgeführt werden. Es können Halbleiterchips eingesetzt werden, die eine Primärstrahlung aufweisen, die vom menschlichen Auge nicht oder nur kaum wahrgenommen wird (300 nm bis 460 nm, bevorzugt bis 430 nm oder 440 nm). Herstellungs-, temperatur- oder durchlassstrombedingte Schwankungen der Primärstrahlungen wirken sich nicht negativ auf die Gesamtstrahlungseigenschaften aus. Im Vergleich zur Verwendung von zwei oder mehr Leuchtstoffen ist keine Farbanpassung durch Variation der Konzentrationen der Leuchtstoffe notwendig, da das Emissionsspektrum von nur einem Leuchtstoff erzeugt wird und damit konstant ist. Die Konversions-LEDs können so mit hohem Durchsatz hergestellt werden, da keine Farbanpassung oder

ein aufwendiges Chip-Binning notwendig ist. Es treten keine Farbverschiebungen oder andere negative Effekte auf das Emissionsspektrum durch selektive Degradierung nur eines Leuchtstoffs auf. Je nach Anwendung kann auch eine Teilkonversion der Primärstrahlung erfolgen. Da es möglich ist, den Leuchtstoff mit einer Primärstrahlung im Bereich von 300 nm bis 460 nm anzuregen, führt ein Beitrag der Primärstrahlung, bevorzugt im kurzwelligen blauen Bereich des elektromagnetischen Spektrums, zu der Gesamtstrahlung dazu, dass damit beleuchtete Gegenstände weißer, strahlender und deshalb attraktiver wirken. Damit können beispielsweise optische Aufheller in Textilien angeregt werden.

**[0071]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff die allgemeine Summenformel  $(Rb_rLi_{1-r})_1(TA)_3(TD)_1(XB)_4 \cdot E$  auf, wobei  $0 \leq r \leq 1$ , beispielsweise  $r = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1,0$ , bevorzugt  $0,25 \leq r \leq 0,75$ , besonders bevorzugt  $0,4 \leq r \leq 0,6$  ganz besonders bevorzugt  $r = 0,5$ . Es hat sich gezeigt, dass diese Leuchtstoffe eine geringe Halbwertsbreite aufweisen und vielseitig anwendbar sind.

**[0072]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff die Formel  $(Na_rK_{1-r})_1(TA)_3(TD)_1(XB)_4 \cdot E$  mit  $0,1 < r \leq 0,4$ , bevorzugt  $0,15 < r \leq 0,35$ , besonders bevorzugt  $0,2 < r \leq 0,3$ , ganz besonders bevorzugt  $r = 0,25$  oder  $(Rb_rLi_{1-r})_1(TA)_3(TD)_1(XB)_4 \cdot E$  mit  $0 \leq r \leq 1$ , bevorzugt  $0,25 \leq r \leq 0,75$ , besonders bevorzugt  $0,4 \leq r \leq 0,6$  auf. Bevorzugt ist  $TA = Li$ ,  $TD = Si$  und  $XB = O$ . Die Peakwellenlänge des Leuchtstoffs liegt im grünen Spektralbereich und weist eine Halbwertsbreite von unter 50 nm auf.

**[0073]** In vielen Display-Anwendungen wie Fernsehern, Computer-Monitoren, Tablets und Smartphones sind die Hersteller bestrebt, die Farben lebendig und naturgetreu wiederzugeben, da dies für die Verbraucher sehr attraktiv ist.

**[0074]** Lichtquellen für die Hinterleuchtung von Displays, beispielsweise von LCD Displays, unterscheiden sich von Lichtquellen für die Allgemeinbeleuchtung. Die Anforderungen an Lichtquellen für die Allgemeinbeleuchtung bestehen insbesondere in einer hohen Lichtausbeute kombiniert mit einem kontinuierlichen Spektrum, um einen hohen Farbwiedergabeindex zu erreichen. Bei LCD-Displays („liquid crystal displays) und anderen Displays werden die Farben durch die Primärfarben Rot, Grün und Blau wiedergegeben. Die Bandbreite an Farben, die an einem Display wiedergegeben werden können, ist daher durch das aufgespannte Farbdreieck der Farben Rot, Grün und Blau limitiert. Diese Farben werden von dem Spektrum für die Hinterleuchtung von roten, grünen und blauen Farbfiltern entsprechend herausgefiltert. Jedoch ist der Wellenlängenbereich der transmittierten Strahlung der Farbfilter immer noch sehr breit. Deshalb werden Lichtquellen mit sehr schmalbandigen Emissionen, also einer geringen Halbwertsbreite, im grünen, blauen und roten Spektralbereich benötigt, um einen möglichst breiten Farbraum abzudecken. Als Lichtquellen für Hinterleuchtungsanwendungen werden vorwiegend ein blau emittierender Halbleiterchip mit einem Leuchtstoff mit einer Peakwellenlänge im grünen und einem Leuchtstoff mit einer Peakwellenlänge im roten Spektralbereich kombiniert, wobei die Leuchtstoffe eine möglichst geringe Halbwertsbreite der Emission aufweisen. Im Idealfall sind die Emissionspeaks dabei deckungsgleich zu dem Transmissionsbereich des jeweiligen Farbfilters, um so wenig Licht wie möglich zu verlieren, die maximale Effizienz zu erreichen und ein Übersprechen beziehungsweise eine Überlappung der verschiedenen Farbkanäle, das den erreichbaren Farbraum limitiert, zu reduzieren.

**[0075]** Konversions-LEDs für Hinterleuchtungsanwendungen setzen herkömmlich als grünen Leuchtstoff beispielsweise ein Yttrium-Aluminium-Granat, ein Lutetium-Aluminium-Granat oder ein  $\beta$ -SiAlON ein. Yttrium-Aluminium-Granat weist allerdings einen Emissionspeak mit einer großen Halbwertsbreite auf, so dass durch die erheblichen Filterverluste der erreichbare Farbraum beschränkt wird und auch die Effizienz gesenkt wird.  $\beta$ -SiAlON weist mit einer Halbwertsbreite von unter 60 nm eine schmalbandige Emission im grünen Spektralbereich auf, die zu einer gesättigteren Grünwiedergabe führt als mit dem Granat-Leuchtstoff. Den  $\beta$ -SiAlONen fehlt es aber an einer guten internen und externen Quanteneffizienz, was die gesamte Hinterleuchtung wenig effizient gestaltet. Des Weiteren erfordert die Herstellung dieser Leuchtstoffe sehr hohe Temperaturen und ein aufwendiges Equipment. Damit ist der Leuchtstoff in seiner Herstellung sehr teuer und damit auch die Herstellung von Konversions-LEDs mit diesem Leuchtstoff.

**[0076]** Auch Quantenpunkte werden aufgrund ihrer sehr schmalbandigen Emission zur Konversion von Primärstrahlung für Hinterleuchtungsanwendungen eingesetzt. Quantenpunkte sind allerdings sehr instabil, insbesondere bei den Umgebungsbedingungen einer Konversions-LED für Hinterleuchtungsanwendungen. Zudem weisen die meisten kommerziell erhältlichen Quantenpunkte schädliche Elemente wie Hg oder Cd auf, deren Konzentration unter den Regulierungen des RoHS (Beschränkung gefährlicher Stoffe, "reduction of hazardous substances", EU-Richtlinie 2011/65/EU) in kommerziellen Elektro- und Elektronikgeräten limitiert ist.

**[0077]** Überraschenderweise weisen die erfindungsgemäßen Leuchtstoffe  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0,1 < r \leq 0,4$  und  $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0 \leq r' \leq 1$ , beispielsweise  $(\text{Rb}_{0,5}\text{Li}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  und  $(\text{Na}_{0,25}\text{K}_{0,75})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  eine Peakwellenlänge im grünen Spektralbereich und eine sehr kleine Halbwertsbreite auf und sind deshalb insbesondere für weiß emittierende Konversions-LEDs in Verbindung mit einem blau Primärstrahlung emittierenden Halbleiterchip und einem roten Leuchtstoff für Hinterleuchtungsanwendungen insbesondere für Anzeigeelemente wie Displays geeignet. Mit Vorteil kann mit einer solchen Konversions-LED eine besonders große Bandbreite an Farben erreicht werden. Durch die geringe Halbwertsbreite der erfindungsgemäßen Leuchtstoffe  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0,1 < r \leq 0,4$  und  $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0 \leq r' \leq 1$ , beispielsweise  $(\text{Rb}_{0,5}\text{Li}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  und  $(\text{Na}_{0,25}\text{K}_{0,75})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  zeigen die Emissionspeaks eine sehr große Überlappung mit dem Transmissionsbereich eines Standard-Grünfilters, so dass nur wenig Licht verlorengeht und der erreichbare Farbraum groß ist.

**[0078]** Grüne LEDs, die eine Strahlung im grünen Wellenlängenbereich emittieren, können zum einen durch direkt grün emittierende Halbleiterchips oder in Form von Konversions-LEDs, umfassend einen blau oder UV emittierenden Halbleiterchip und einen grünen Leuchtstoff, erhalten werden. Direkt grün emittierende Halbleiterchips zeigen eine sehr geringe Quanteneffizienz. Bei den Konversions-LEDs kann die Primärstrahlung zum einen vollständig in grüne Sekundärstrahlung konvertiert werden (Vollkonversion) oder zum anderen nur teilweise in grüne Sekundärstrahlung konvertiert werden (Teilkonversion) und der verbleibende Anteil an Primärstrahlung wird mittels eines Filters herausgefiltert.

**[0079]** Herkömmlich werden  $(\text{Y,Lu})_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ , Orthosilikate oder Oxonitridoorthosilikate als grüne Leuchtstoffe eingesetzt. Die herkömmlichen Konversions-LEDs weisen oft eine geringe Effizienz und Farbreinheit auf. Um diese Nachteile zu umgehen, werden Filter eingesetzt, um die Emission anzupassen. Dies wirkt sich allerdings negativ auf die Gesamtleistung der Konversions-LED aus.

**[0080]** Konversions-LEDs mit einem Halbleiterchip und einem erfindungsgemäßen grünen Leuchtstoff der Formel  $(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0,1 < r \leq 0,4$  und  $(\text{Rb}_r\text{Li}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4:\text{E}$  mit  $0 \leq r' \leq 1$ , beispielsweise  $(\text{Rb}_{0,5}\text{Li}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  und  $(\text{Na}_{0,25}\text{K}_{0,75})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  sind dagegen sehr effizient und zeigen auch ohne Einsatz eines Farbfilters eine hohe Farbreinheit und eine hohe Leistung.

**[0081]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform kristallisiert der Leuchtstoff in einer Kristallstruktur mit gleicher Atomsequenz wie in  $\text{UCr}_4\text{C}_4$ ,  $\text{CsKNa}_2\text{Li}_{12}\text{Si}_4\text{O}_{16}$  oder  $\text{RbLi}_5\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_2$ . Dass der Leuchtstoff in einer Kristallstruktur mit gleicher Atomsequenz wie in  $\text{UCr}_4\text{C}_4$ ,  $\text{CsKNa}_2\text{Li}_{12}\text{Si}_4\text{O}_{16}$  oder  $\text{RbLi}_5\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_2$  kristallisiert, bedeutet hier und im Folgenden, dass die Abfolge der Atome des Leuchtstoffs demselben Muster folgt wie die Abfolge der Atome in  $\text{UCr}_4\text{C}_4$ ,  $\text{CsKNa}_2\text{Li}_{12}\text{Si}_4\text{O}_{16}$  oder  $\text{RbLi}_5\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_2$ . Mit anderen Worten zeigt die Kristallstruktur die gleichen Struktur motive wie  $\text{UCr}_4\text{C}_4$ ,  $\text{CsKNa}_2\text{Li}_{12}\text{Si}_4\text{O}_{16}$  oder  $\text{RbLi}_5\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_2$ . Beispielsweise kristallisiert der Leuchtstoff der Formel  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_3:\text{Eu}$  in einer Kristallstruktur mit gleicher Atomsequenz wie in  $\text{CsKNa}_2\text{Li}_{12}\text{Si}_4\text{O}_{16}$ , dabei besetzt K die Plätze des Cs und des Na, Na die Plätze des Na, Li die Plätze des Li, Si die Plätze des Si und O die Plätze des O. Durch die Variation der Ionenradien bei der Substitution mit anderen Atomsorten kann sich die absolute Position (Atomkoordinaten) der Atome ändern.

**[0082]** Der Leuchtstoff kann auch in einer Kristallstruktur mit gleicher Atomsequenz wie in den von  $\text{UCr}_4\text{C}_4$  abgeleiteten Strukturen  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$  oder  $\text{KLi}_3\text{GeO}_4$  kristallisieren.

**[0083]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform kristallisiert der Leuchtstoff im gleichen Strukturtyp wie

- $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$
- $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$
- $\text{RbLi}_5\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_2$
- $\text{UCr}_4\text{C}_4$
- $\text{CsKNa}_2\text{Li}_{12}\text{Si}_4\text{O}_{16}$  oder
- $\text{CsKNaLi}_9\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_4$ .

**[0084]** Die Kristallstrukturen der Ausführungsformen zeichnen sich insbesondere durch ein dreidimensional verknüpftes Raumnetzwerk aus. Dabei sind TA, TB, TC, TD, TE und/oder TF von XA, XB, XC und/oder XD umgeben und die sich daraus ergebenden Baueinheiten über gemeinsame Ecken und Kanten verknüpft. Diese Anordnung führt zu einer sich dreidimensional erstreckenden anionischen Substruktur. In den sich daraus ergebenden Hohlräumen sind MA, MB, MC und/oder MD angeordnet.

**[0085]** Gemäß zumindest eine Ausführungsform weist der Leuchtstoff eine Kristallstruktur auf, in der TA, TB, TC, TD, TE und/oder TF von XA, XB, XC und/oder XD umgeben sind und die sich daraus ergebenden Baueinheiten über gemeinsame Ecken und Kanten zu einem dreidimensionalen Raumnetz mit Hohlräumen verknüpft sind und in den Hohlräumen MA, MB, MC und/oder MD angeordnet sind.

**[0086]** Beispielsweise sind in der Kristallstruktur der Ausführungsform  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4\cdot\text{E}$ , welche isotyp zu  $\text{KLi}_3\text{GeO}_4$  ist, Li und Si von O umgeben und bilden die anionische Substruktur in Form eines Raumnetzes aus verzerrten (Li/Si) $\text{O}_4$ -Tetraedern. In den sich dabei ergebenden Hohlräumen sind die K-Atome verzerrt würfelförmig von 8 O-Atomen umgeben.

**[0087]** In der Kristallstruktur des Ausführungsbeispiels  $\text{RbLi}_5\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_2\cdot\text{E}$  sind ein Teil der Li-Atome und Si von O umgeben und bilden die anionische Substruktur in Form eines Raumnetzes aus. Dabei sind die Si-Atome verzerrt tetraedrisch von 4 O-Atomen umgeben. Die an der Substruktur beteiligten Li-Atome sind in ihrer ersten Koordinationssphäre verzerrt trigonal planar von 3 O-Atomen umgeben. Unter Hinzunahme weiterer O-Atome in der Umgebung lässt sich die Koordination auch als verzerrt tetraedrisch bzw. verzerrt trigonal bipyramidal beschreiben. In den sich ergebenden Hohlräumen sind die Rb-Atome verzerrt würfelförmig von 8 O-Atomen umgeben, während der andere Teil der Li-Atome verzerrt quadratisch planar von 4 O-Atomen umgeben ist.

**[0088]** In Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der hier offenbarten Leuchtstoffe kann es zu einer starken Verzerrung der Koordinationssphäre um MA, MB, MC und/oder MD kommen. Das führt beispielsweise im Falle des Ausführungsbeispiels  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4\cdot\text{E}$  dazu, dass die Umgebung der Na-Atome als verzerrtes trigonales Prisma bzw. unter Hinzunahme eines weiteren O-Atoms als verzerrter gekappter Würfel vorliegt.

**[0089]** Die angegebenen Ausführungsformen des Leuchtstoffs können gemäß nachfolgend angegebenen Verfahren hergestellt werden. Alle für den Leuchtstoff beschriebenen Merkmale gelten somit auch für das Verfahren zu dessen Herstellung und umgekehrt.

**[0090]** Es wird ein Verfahren zur Herstellung eines Leuchtstoffs angegeben.

**[0091]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform weist der Leuchtstoff die allgemeine Summenformel auf:  
 $(\text{MA})_a(\text{MB})_b(\text{MC})_c(\text{MD})_d(\text{TA})_e(\text{TB})_f(\text{TC})_g(\text{TD})_h(\text{TE})_i(\text{TF})_j(\text{XA})_k(\text{XB})_l(\text{XC})_m(\text{XD})_n$ .

**[0092]** Dabei ist MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, MB ist aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt, MC ist aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt, MD ist aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, TA ist aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt, TB ist aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt, TC ist aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt, TD ist aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt, TE ist aus einer Gruppe von pentavalenten Elementen ausgewählt, TF ist aus einer Gruppe von hexavalenten Elementen ausgewählt, XA ist aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt, die Halogene umfasst, XB aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt, die O, S und Kombinationen daraus umfasst, XC = N und XD = C. Weiter gilt:  $a + b + c + d = t$ ;

$$- e + f + g + h + i + j = u$$

$$- k + l + m + n = v$$

$$- a + 2b + 3c + 4d + e + 2f + 3g + 4h + 5i + 6j - k - 2l - 3m - 4n = w$$

$$- 0.8 \leq t \leq 1$$

$$- 3.5 \leq u \leq 4$$

$$- 3.5 \leq v \leq 4$$

$$- (-0.2) \leq w \leq 0.2. \text{ Bevorzugt gilt: } 0 \leq m < 0,875 v \text{ und/oder } v \geq l > 0,125 v.$$

**[0093]** Das Verfahren umfasst folgende Verfahrensschritte:

A) Vermengen von Edukten des Leuchtstoffs,

B) Aufheizen des unter A) erhaltenen Gemenges auf eine Temperatur T1 zwischen 500 und 1400 °C, bevorzugt zwischen 700 und 1400 °C,

C) Glühen des Gemenges bei einer Temperatur T1 von 500 bis 1400 °C, bevorzugt zwischen 700 und 1400 °C, für 0,5 Minuten bis zehn Stunden.

**[0094]** In einer Ausführungsform liegen die Edukte als Pulver vor.

**[0095]** In einer Ausführungsform folgt nach Verfahrensschritt C) ein weiterer Verfahrensschritt:

D) Abkühlen des Gemenges auf Raumtemperatur. Unter Raumtemperatur werden insbesondere 20 °C verstanden.

**[0096]** In einer Ausführungsform folgen auf Verfahrensschritt D) erneut die Verfahrensschritte B) und C), wobei dann der in Verfahrensschritt D) erhaltene Leuchtstoff aufgeheizt beziehungsweise geglüht wird. Durch diesen weiteren Glühvorgang können die optischen Eigenschaften des Leuchtstoffs verbessert werden.

**[0097]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform schmelzen die Edukte beim Aufheizen des unter A) erhaltenen Gemenges in Verfahrensschritt B).

**[0098]** Die Auf- und Abkühlraten können beispielsweise bei 250 °C pro Stunde liegen.

**[0099]** In einer Ausführungsform finden die Verfahrensschritte B), C) und/oder D) unter Formiergasatmosphäre statt. Bevorzugt liegt in dem Formiergas das Verhältnis von Stickstoff:Wasserstoff bei 92,5:7,5.

**[0100]** In einer Ausführungsform finden die Verfahrensschritte B), C) und/oder D) in einem Rohrofen statt.

**[0101]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform umfasst das Verfahren den folgenden Verfahrensschritt A):  
A) Vermengen der Edukte umfassend  $K_2CO_3$ ,  $Na_2CO_3$  und/oder  $RbCO_3$ .

**[0102]** Gemäß zumindest einer Ausführungsform umfasst das Verfahren den folgenden Verfahrensschritt A):  
A) Vermengen der Edukte umfassend oder bestehend aus  $SiO_2$ ,  $Eu_2O_3$ ,  $Li_2CO_3$  und zumindest ein Carbonat aus  $K_2CO_3$ ,  $Na_2CO_3$  und  $RbCO_3$ .

**[0103]** Das Verfahren zur Herstellung ist im Vergleich zu vielen anderen Herstellungsverfahren für Leuchtstoffe sehr einfach durchzuführen. Insbesondere wird keine Schutzgasatmosphäre benötigt, da weder die Edukte noch die Produkte feuchtigkeits- oder sauerstoffempfindlich sind. Zudem erfolgt die Synthese bei moderaten Temperaturen und ist daher sehr energieeffizient. Die Anforderungen beispielsweise an den verwendeten Ofen sind damit gering. Die Edukte sind kostengünstig kommerziell erhältlich und nicht toxisch.

#### Ausführungsbeispiele

**[0104]** Das erste Ausführungsbeispiel (AB1) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs weist die Summenformel  $NaLi_3SiO_4:Eu^{2+}$  (2 Mol%  $Eu^{2+}$  bezogen auf die Stoffmenge von Na) auf und wird wie folgt hergestellt:  $Na_2CO_3$ ,  $Li_2CO_3$ ,  $SiO_2$  und  $Eu_2O_3$  werden in einem der Summenformel entsprechenden stöchiometrischen Verhältnis in einem offenen Nickeltiegel geschmolzen. Die Einwaagen der Edukte finden sich in nachfolgender Tabelle 1. Der Nickeltiegel mit den gemischten Edukten wird für eine Stunde auf etwa 1000 °C unter einer Formiergasatmosphäre ( $N_2:H_2 = 92,5:7,5$ ) erhitzt und anschließend abgekühlt. Weiteres Aufheizen unter derselben Formiergasatmosphäre und auf Temperaturen unter dem Schmelzpunkt des Leuchtstoffs können durchgeführt werden, um die optischen Eigenschaften des Leuchtstoffs weiter zu verbessern.

Tabelle 1:

Edukt	Stoffmenge / mmol	Masse / g
$Na_2CO_3$	21.82	2.313
$Li_2CO_3$	66.21	4.892
$SiO_2$	43.94	2.640
$Eu_2O_3$	0.44	0.155

**[0105]** Die Edukte des Leuchtstoffs sind kommerziell erhältlich, stabil und zudem sehr preisgünstig. Die einfache Synthese bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen macht den Leuchtstoff sehr preisgünstig in seiner Herstellung und dadurch auch wirtschaftlich attraktiv.

**[0106]** Der Leuchtstoff des ersten Ausführungsbeispiels (AB1) zeigt eine Emission im blauen Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums.

**[0107]** Das zweite Ausführungsbeispiel (AB2) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs weist die Summenformel  $KLi_3SiO_4:Eu^{2+}$  (2 Mol%  $Eu^{2+}$  bezogen auf die Stoffmenge von K) auf und wird wie folgt hergestellt:  $K_2CO_3$ ,  $Li_2CO_3$ ,  $SiO_2$  und  $Eu_2O_3$  werden in einem der Summenformel entsprechenden stöchiometrischen Verhältnis in einem offenen Nickeltiegel geschmolzen. Die Einwaagen der Edukte finden sich in nachfolgender Tabelle 2. Der Nickeltiegel mit den gemischten Edukten wird für eine Stunde auf etwa 1000 °C unter einer Formier-

gasatmosphäre ( $N_2:H_2 = 92,5:7,5$ ) erhitzt und anschließend abgekühlt. Weiteres Aufheizen unter derselben Formiergasatmosphäre und auf Temperaturen unter dem Schmelzpunkt des Leuchtstoffs können durchgeführt werden, um die optischen Eigenschaften des Leuchtstoffs weiter zu verbessern.

Tabelle 2:

Edukt	Stoffmenge / mmol	Masse / g
$K_2CO_3$	40.78	5.636
$Li_2CO_3$	123.71	9.141
$SiO_2$	82,10	4.933
$Eu_2O_3$	0.82	0.290

**[0108]** Der Leuchtstoff des zweiten Ausführungsbeispiels (AB2) zeigt eine breite Emission vom blauen bis roten Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums und emittiert damit weiße, insbesondere warmweiße Strahlung mit einer Farbtemperatur unter 3500 K.

**[0109]** Das dritte Ausführungsbeispiel (AB3) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs weist die Summenformel  $(Na_{0,5}K_{0,5})Li_3SiO_4:Eu^{2+}$  (2 Mol%  $Eu^{2+}$  bezogen auf die Stoffmenge von Na und K) beziehungsweise  $NaKLi_6Si_2O_8:Eu^{2+}$  auf und wird wie folgt hergestellt:  $K_2CO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $Li_2CO_3$ ,  $SiO_2$  und  $Eu_2O_3$  werden in einem der Summenformel entsprechenden stöchiometrischen Verhältnis in einem offenen Nickeltiegel geschmolzen. Die Einwaagen der Edukte finden sich in nachfolgender Tabelle 3. Der Nickeltiegel mit den gemischten Edukten wird für eine Stunde bis acht Stunden auf 800 °C bis 1100 °C unter einer Formiergasatmosphäre ( $N_2:H_2 = 92,5:7,5$ ) erhitzt und anschließend abgekühlt. Weiteres Aufheizen unter derselben Formiergasatmosphäre und auf Temperaturen unter dem Schmelzpunkt des Leuchtstoffs können durchgeführt werden, um die optischen Eigenschaften des Leuchtstoffs weiter zu verbessern.

Tabelle 3:

Edukt	Stoffmenge / mmol	Masse / g
$Na_2CO_3$	10,65	1,129
$K_2CO_3$	10,44	1,443
$Li_2CO_3$	63,97	4,727
$SiO_2$	42,46	2,551
$Eu_2O_3$	0,43	0,150

**[0110]** Der Leuchtstoff des dritten Ausführungsbeispiels (AB3) zeigt eine Emission im blauen Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums.

**[0111]** Das vierte Ausführungsbeispiel (AB4) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs weist die Summenformel  $(Na_{0,25}K_{0,75})Li_3SiO_4:Eu^{2+}$  (2 Mol%  $Eu^{2+}$  bezogen auf die Stoffmenge von Na und K) beziehungsweise  $NaK_3Li_{12}Si_4O_{16}:Eu^{2+}$  auf und wird wie folgt hergestellt:  $K_2CO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $Li_2CO_3$ ,  $SiO_2$  und  $Eu_2O_3$  werden in einem der Summenformel entsprechenden stöchiometrischen Verhältnis in einem offenen Nickeltiegel gemischt. Die Einwaagen der Edukte finden sich in nachfolgender Tabelle 4. Der Nickeltiegel mit den gemischten Edukten wird für vier Stunden auf 900 °C bis 1100 °C unter einer Formiergasatmosphäre ( $N_2:H_2 = 92,5:7,5$ ) erhitzt und anschließend abgekühlt. Weiteres Aufheizen unter derselben Formiergasatmosphäre und auf Temperaturen unter dem Schmelzpunkt des Leuchtstoffs können durchgeführt werden, um die optischen Eigenschaften des Leuchtstoffs weiter zu verbessern.

Tabelle 4:

Edukt	Stoffmenge / mmol	Masse / g
$Na_2CO_3$	5.24	0.555
$K_2CO_3$	15.50	2.142

Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	62.90	4.648
SiO <sub>2</sub>	41.75	2.508
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42	0.147

**[0112]** Der Leuchtstoff des vierten Ausführungsbeispiels (AB4) zeigt eine Emission im grünen Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums.

**[0113]** Das fünfte Ausführungsbeispiel (AB5) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs weist die Summenformel (Rb<sub>0,5</sub>Li<sub>0,5</sub>)Li<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup> (2 Mol% Eu<sup>2+</sup> bezogen auf die Stoffmenge von (Rb<sub>0,5</sub>Li<sub>0,5</sub>)) beziehungsweise RbLiLi<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>:Eu<sup>2+</sup> auf und wird wie folgt hergestellt: Rb<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> und Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> werden in einem der Summenformel entsprechenden stöchiometrischen Verhältnis in einem offenen Nickeltiegel gemischt. Die Einwaagen der Edukte finden sich in nachfolgender Tabelle 5. Der Nickeltiegel mit den gemischten Edukten wird für vier Stunden auf etwa 1000 °C unter einer Formiergasatmosphäre (N<sub>2</sub>:H<sub>2</sub> = 92,5:7,5) erhitzt und anschließend abgekühlt. Anschließend wird das erhaltende Produkt gemahlen und man erhält ein grünes Pulver.

**[0114]** Weiteres Aufheizen unter derselben Formiergasatmosphäre und auf Temperaturen unter dem Schmelzpunkt des Leuchtstoffs können durchgeführt werden, um die optischen Eigenschaften des Leuchtstoffs weiter zu verbessern.

Tabelle 5:

Edukt	Stoffmenge / mmol	Masse / g
Rb <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	17.05	3.937
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	52.30	3.864
SiO <sub>2</sub>	34.56	2.076
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.35	0.122

**[0115]** Der Leuchtstoff des fünften Ausführungsbeispiels (AB5) zeigt eine Emission im grünen Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums.

**[0116]** Weitere vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den im Folgenden in Verbindung mit den Figuren beschriebenen Ausführungsbeispielen.

**[0117]** Fig. 1A, Fig. 1B, Fig. 1C, Fig. 1D, Fig. 1E, Fig. 1F zeigen eine Auswahl von möglichen, elektroneutralen Summenformeln von Substitutionsexperimenten.

**[0118]** Fig. 2, Fig. 13, Fig. 23, Fig. 38, Fig. 63 zeigen Emissionsspektren von Ausführungsbeispielen des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs.

**[0119]** Fig. 3, Fig. 14, Fig. 24, Fig. 39, Fig. 64 zeigen die Kubelka-Munk-Funktionen für Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs.

**[0120]** Fig. 4, Fig. 43, Fig. 66 zeigen einen Vergleich von optischen Eigenschaften eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs mit Vergleichsbeispielen.

**[0121]** Fig. 5, Fig. 6, Fig. 44, Fig. 67 zeigen einen Vergleich von Emissionsspektren eines Ausführungsbeispiels mit Vergleichsbeispielen.

**[0122]** Fig. 7 zeigt einen Vergleich der Kubelka-Munk-Funktion eines Ausführungsbeispiels mit Vergleichsbeispielen.

**[0123]** Fig. 8, Fig. 18, Fig. 25 zeigen Ausschnitte der Kristallstruktur für Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs.

**[0124]** Fig. 9, Fig. 19, Fig. 40, Fig. 65 zeigen Röntgenbeugungspulverdiffraktogramme unter Verwendung von Kupfer-K<sub>α1</sub>-Strahlung.

- [0125]** Fig. 10, Fig. 20, Fig. 26 zeigen Rietveld-Verfeinerungen von Röntgenpulverdiffraktogrammen von Ausführungsbeispielen des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs.
- [0126]** Fig. 11, Fig. 12, Fig. 21, Fig. 22, Fig. 27, Fig. 28 zeigen charakteristische Eigenschaften von Ausführungsbeispielen des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs.
- [0127]** Fig. 15, Fig. 16 zeigen Vergleiche von Emissionsspektren einer Konversions-LED mit einem Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs mit Vergleichsbeispielen.
- [0128]** Fig. 17 zeigt einen Vergleich von optischen Eigenschaften einer Konversions-LED mit einem Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs mit Vergleichsbeispielen.
- [0129]** Fig. 29 zeigt einen Vergleich von Emissionsspektren eines Ausführungsbeispiels mit Vergleichsbeispielen und der Empfindlichkeitskurve für die Melatoninproduktion.
- [0130]** Fig. 30 zeigt die Überlappung von Emissionsspektren verschiedener Leuchtstoffe und verschiedener blau emittierender LEDs mit der Empfindlichkeitskurve für die Melatoninproduktion.
- [0131]** Fig. 31 zeigt Farborte verschiedener Leuchtstoffe in der CIE-Normtafel (1931).
- [0132]** Fig. 32, Fig. 33, Fig. 34 zeigen Vergleiche der Farbreinheit bei unterschiedlichen Dominanzwellenlängen der Primärstrahlung eines Ausführungsbeispiels mit Vergleichsbeispielen.
- [0133]** Fig. 35, Fig. 36, Fig. 37 zeigen simulierte LED-Spektren bei verschiedenen Anregungswellenlängen.
- [0134]** Fig. 41 zeigt die Reflexpositionen und die relative Intensität der Reflexe des Röntgenbeugungspulverdiffraktogramms eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs.
- [0135]** Fig. 42 zeigt das thermische Quenchverhalten eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs im Vergleich zu einem herkömmlichen Leuchtstoff.
- [0136]** Fig. 45 zeigt die Abdeckung des Farbraums rec2020 durch unterschiedliche Kombinationen an grünem und rotem Leuchtstoff.
- [0137]** Fig. 46 bis Fig. 53 zeigen graphische Darstellungen der Abdeckung des Farbraums rec2020 durch unterschiedliche Kombinationen an grünem und rotem Leuchtstoff.
- [0138]** Fig. 54A, Fig. 54B und Fig. 54C zeigen die Abdeckung verschiedener Standardfarbräume und Farborte von gefilterten Spektren
- [0139]** unterschiedlicher Kombinationen an grünem und rotem Leuchtstoff.
- [0140]** Fig. 55 bis Fig. 58 zeigen die aufgespannten Farbräume unterschiedlicher Kombinationen an grünem und rotem Leuchtstoff bei einer Anregung mit einer Primärstrahlung  $\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$ .
- [0141]** Fig. 59 bis Fig. 62 zeigen die Emissionsspektren von Konversions-LEDs mit unterschiedlichen Kombinationen an grünem und rotem Leuchtstoff.
- [0142]** Fig. 1A, Fig. 1B, Fig. 1C, Fig. 1D, Fig. 1E und Fig. 1F zeigen Tabellen mit möglichen, elektroneutralen Leuchtstoffen, die durch Substitutionsexperimente, analog der allgemeinen Summenformel  $(\text{MA})_a(\text{MB})_b(\text{MC})_c(\text{MD})_d(\text{TA})_e(\text{TB})_f(\text{TC})_g(\text{TD})_h(\text{TE})_i(\text{TF})_j(\text{XA})_k(\text{XB})_l(\text{XC})_m(\text{XD})_n$ , erreichbar sind. Die gezeigten Substitutionen sind nur beispielhaft, andere Substitutionen sind ebenso möglich. Der Aktivator E ist jeweils nur in der allgemeinen Formel und nicht in den konkreten Ausführungsformen dargestellt, aber dennoch auch in den konkreten Ausführungsformen vorhanden.
- [0143]** In Fig. 2 ist das Emissionsspektrum des ersten Ausführungsbeispiels AB1 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs mit der Summenformel  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$  dargestellt. Auf der x-Achse ist die Wellenlänge in Nanometern aufgetragen und auf der y-Achse die Emissionsintensität in Prozent. Zur Messung des Emissionsspektrums wurde der erfindungsgemäße Leuchtstoff mit Primärstrahlung einer Wellenlänge von 400 nm angeregt. Der

Leuchtstoff weist eine Halbwertsbreite von 32 nm oder  $1477 \text{ cm}^{-1}$  und eine Dominanzwellenlänge von 473 nm auf, die Peakwellenlänge liegt etwa bei 469 nm.

**[0144]** Fig. 3 zeigt eine normierte Kubelka-Munk-Funktion (K/S), aufgetragen gegen die Wellenlänge  $\lambda$  in nm, für das erste Ausführungsbeispiel (AB1) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs. K/S wurde dabei wie folgt berechnet:

$K/S = (1 - R_{\text{inf}})^2 / 2R_{\text{inf}}$ , wobei  $R_{\text{inf}}$  der diffusen Reflexion (Remission) des Leuchtstoffs entspricht.

**[0145]** Aus Fig. 3 ist ersichtlich, dass das Maximum von K/S für das erste Ausführungsbeispiel (AB1) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs bei etwa 360 nm liegt. Hohe K/S-Werte bedeuten eine hohe Absorption in diesem Bereich. Der Leuchtstoff kann effizient mit einer Primärstrahlung ab etwa 300 nm bis 430 nm oder 440 nm angeregt werden.

**[0146]** In Fig. 4 ist ein Vergleich der Halbwertsbreite (FWHM), der Peakwellenlänge ( $\lambda_{\text{peak}}$ ), der Dominanzwellenlänge ( $\lambda_{\text{dom}}$ ) und der Lichtausbeute (LER) zwischen einem ersten Vergleichsbeispiel (VB1:  $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ ), einem zweiten Vergleichsbeispiel (VB2:  $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}$ ), einem dritten Vergleichsbeispiel (VB3:  $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ ) und dem ersten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  (AB1) gezeigt. VB1 und VB3 unterscheiden sich in der Konzentration an Eu. Alle Leuchtstoffe emittieren Strahlung im blauen Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Die Peakwellenlänge des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  ist im Vergleich zu den Vergleichsbeispielen etwas langwelliger. Wie ersichtlich, weist der erfindungsgemäße Leuchtstoff  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  eine deutlich geringere Halbwertsbreite und/oder eine höhere Lichtausbeute (LER) als die Vergleichsbeispiele auf. Die Verschiebung der Peakwellenlänge zu einer längeren Wellenlänge und die kleinere Halbwertsbreite führen zu einer Erhöhung der Überlappung mit der Augenempfindlichkeitskurve.

**[0147]** Somit weist der erfindungsgemäße Leuchtstoff eine sehr hohe und im Vergleich zu den Vergleichsbeispielen höhere Lumineszenzeffizienz beziehungsweise Lichtausbeute auf.

**[0148]** Die Fig. 5 und Fig. 6 zeigen die Emissionsspektren von VB1, VB2, VB3 und AB1, wie sie in Fig. 4 beschrieben sind. In Fig. 5 ist auf der x-Achse die Wellenlänge in Nanometern aufgetragen und auf der y-Achse die Emissionsintensität in Prozent. In Fig. 6 ist auf der x-Achse die Wellenzahl in  $\text{cm}^{-1}$  aufgetragen und auf der y-Achse die Emissionsintensität in Prozent. Hier wird die deutlich geringere Halbwertsbreite des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  im Vergleich zu VB1 und VB3 ( $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ ) ersichtlich.  $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ -Leuchtstoffe zeigen zudem im Gegensatz zu AB1 eine geringe Absorption ab einer Wellenlänge von 350 nm (vergleiche Fig. 7). Zusammen mit der relativ großen Halbwertsbreite führt das zu einer relativ schlechten Farbreinheit der Leuchtstoffe VB1 und VB3. Der bekannte Leuchtstoff VB2 zeigt zwar eine kleine Halbwertsbreite, hat aber den Nachteil, dass dieser Chlor enthält. Viele Anwendungen unterliegen strikten Bedingungen was den Chlorgehalt angeht, so dass die Anwendung dieses Leuchtstoffs schon deswegen begrenzt ist. Nachteilig ist auch die Gefahr der Freisetzung von korrosivem HCl bei dessen Herstellung, was die Kosten für das Synthese-Equipment und deren Instandhaltungsmaßnahmen steigert.

**[0149]** Fig. 7 zeigt eine normierte Kubelka-Munk-Funktion (K/S), aufgetragen gegen die Wellenlänge  $\lambda$  in nm, für verschiedene Leuchtstoffe VG1, VG2, VG3 und AB1, wie sie in Fig. 4 definiert sind. Die Kurve mit den Bezugszeichen VG1, VG2 und VG3 repräsentiert K/S für bekannte Leuchtstoffe, die Kurve mit den Bezugszeichen AB1 repräsentiert K/S für das erste Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs. Es ist ersichtlich, dass der erfindungsgemäße Leuchtstoff AB1 im Vergleich zu den Vergleichsbeispielen VG1, VG2 und VG3 bei größeren Wellenlängen, insbesondere im Bereich ab 360 nm, eine höhere Absorption aufweist. Dies ist besonders vorteilhaft, da eine effiziente Anregung des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs mit einer Primärstrahlung einer Peakwellenlänge im UV-Bereich bis blauen Bereich des elektromagnetischen Spektrums, insbesondere im Bereich zwischen 300 nm bis 460 nm, bevorzugt zwischen 300 nm bis 430 nm oder 440 nm, möglich ist. Deshalb ist der erfindungsgemäße Leuchtstoff besonders gut in Kombination mit Halbleiterchips, die eine Primärstrahlung im Bereich zwischen 300 nm bis 430 nm oder 440 nm aufweisen, anwendbar.

**[0150]** Fig. 8 zeigt die tetragonale Kristallstruktur des Leuchtstoffs  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  in einer schematischen Darstellung. Die schraffierten Kreise stellen die Na-Atome dar. Die Kristallstruktur entspricht der Kristallstruktur von  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$ , wie sie in B. Nowitzki, R. Hoppe, Neues über Oxide vom Typ  $\text{A}[(\text{TO})_n]$ :  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$ ,  $\text{NaLi}_3\text{GeO}_4$ ,  $\text{NaLi}_3\text{TiO}_4$ , Revue de Chimie minérale, 1986, 23, 217–230 beschrieben ist. Die Kristallstruktur ist zu der von  $\text{CaLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$ , beschrieben in P. Pust, A. S. Wochnik, E. Baumann, P. J. Schmidt, D. Wiechert, C. Scheu, W. Schnick,  $\text{Ca}[\text{LiAl}_3\text{N}_4]:\text{Eu}^{2+}$  – A Narrow-Band Red-Emitting Nitridolithoaluminate, Chemistry of Materials 2014 26, 3544–3549 isotyp.

**[0151]** In **Fig. 9** sind zwei Röntgenbeugungspulverdiffraktogramme unter Verwendung von Kupfer- $K_{\alpha 1}$ -Strahlung angegeben. Auf der x-Achse sind die Beugungswinkel in  $^{\circ}2\theta$ -Werten angegeben und auf der y-Achse die Intensität. Das mit dem Bezugszeichen I versehene Röntgenbeugungspulverdiffraktogramm zeigt das des ersten Ausführungsbeispiels AB1 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$ . Das mit dem Bezugszeichen II versehene Röntgenbeugungspulverdiffraktogramm zeigt das aus der Kristallstruktur von  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$  (B. Nowitzki, R. Hoppe, Neues über Oxide vom Typ  $A[(\text{TO})_n]$ :  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$ ,  $\text{NaLi}_3\text{GeO}_4$ ,  $\text{NaLi}_3\text{TiO}_4$ , *Revue de Chimie minérale*, 1986, 23, 217–230) simulierte Röntgenbeugungspulverdiffraktogramm für  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$ . Aus der Übereinstimmung der Reflexe ist erkennbar, dass der erfindungsgemäße Leuchtstoff  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  in derselben Kristallstruktur kristallisiert wie  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$ .

**[0152]** In **Fig. 10** findet sich eine kristallographische Auswertung. **Fig. 10** zeigt eine Rietveld-Verfeinerung des Röntgenpulverdiffraktogramms des ersten Ausführungsbeispiels AB1, also für  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$ . Für die Rietveld-Verfeinerung wurden die Atomparameter für  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$  (Tabelle 7 in B. Nowitzki, R. Hoppe, *Revue de Chimie minérale*, 1986, 23, 217–230) verwendet, um zu zeigen, dass die Kristallstruktur von  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  der von  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$  entspricht. Im oberen Diagramm ist dabei die Überlagerung der gemessenen Reflexe mit den berechneten Reflexen für  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$  dargestellt. Im unteren Diagramm sind die Unterschiede der gemessenen und der berechneten Reflexe dargestellt.

**[0153]** **Fig. 11** zeigt kristallographische Daten von  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$ .

**[0154]** **Fig. 12** zeigt Atomlagen in der Struktur von  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$ .

**[0155]** In **Fig. 13** ist das Emissionsspektrum des zweiten Ausführungsbeispiels AB2 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs mit der Summenformel  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  dargestellt. Auf der x-Achse ist die Wellenlänge in Nanometern aufgetragen und auf der y-Achse die Emissionsintensität in Prozent. Zur Messung des Emissionsspektrums wurde der erfindungsgemäße Leuchtstoff mit Primärstrahlung einer Wellenlänge von 400 nm angeregt. Der Leuchtstoff zeigt eine breitbandige Emission von etwa 430 nm bis etwa 780 nm auf und emittiert damit weiße Strahlung beziehungsweise erzeugt die emittierte Strahlung einen weißen Leuchteindruck. Mit Vorteil liegt der Farbort des Leuchtstoffs nah an dem des Planckschen Strahlers bei 2700 K. Der Farbort liegt bei folgenden Koordinaten CIE-x = 0,449 und CIE-y = 0,397 in der CIE-Normfarbtafel von 1931. Die Farbtemperatur (CCT) liegt bei 2742 K, die Lichtausbeute oder Lumineszenzeffizienz bei 290 lm/W, der CRI (Farbwiedergabeindex) liegt bei 81 und der Farbwiedergabeindex R9 bei 21. Damit eignet sich eine Konversions-LED umfassend den erfindungsgemäßen Leuchtstoff  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  insbesondere für die Allgemeinbeleuchtung.

**[0156]** **Fig. 14** zeigt eine normierte Kubelka-Munk-Funktion (K/S), aufgetragen gegen die Wellenlänge  $\lambda$  in nm, für das zweite Ausführungsbeispiel (AB2) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs. Aus **Fig. 14** ist ersichtlich, dass das Maximum von K/S für das zweite Ausführungsbeispiel (AB2) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs bei etwa 340 nm liegt. Der Leuchtstoff kann effizient mit einer Primärstrahlung ab etwa 300 nm bis 430 nm oder 440 nm angeregt werden.

**[0157]** **Fig. 15** und **Fig. 16** zeigen simulierte Emissionsspektren von verschiedenen Konversions-LEDs, die weiße Strahlung emittieren. Als Primärstrahlungsquelle dient eine auf InGaN basierende Halbleiterschichtenfolge, die eine Primärstrahlung mit einer Peakwellenlänge von 410 nm (**Fig. 15**) beziehungsweise mit einer Peakwellenlänge von 390 nm (**Fig. 16**) emittiert. Der Aufbau der Konversions-LEDs ist in **Fig. 17** gezeigt. Wie ersichtlich, zeigen die erfindungsgemäßen Konversions-LEDs (LED 1 und LED 2) unter Einsatz von nur einem Leuchtstoff, dem erfindungsgemäßen  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ , ähnliche Emissionsspektren wie die Vergleichsbeispiele VLED2 und VLED1 mit jeweils einem grünen und einem roten Leuchtstoff. Mit Vorteil ist es damit mit dem erfindungsgemäßen Leuchtstoff möglich, eine Konversions-LED bereitzustellen, die warmweißes Licht mit einer Farbtemperatur unter 3500 K, bevorzugt unter 3000 K, emittiert und dazu nur einen Leuchtstoff benötigt und nicht wie bekannte weiß emittierende Konversions-LEDs, die zumindest einen grünen und einen roten Leuchtstoff in Kombination mit einer blauen Primärstrahlung benötigen.

**[0158]** In **Fig. 17** sind verschiedene Eigenschaften von Konversions-LEDs mit dem erfindungsgemäßen Leuchtstoff  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  (LED1, LED2) und den Vergleichsbeispielen (VLED1 und VLED2) gegenübergestellt.  $\lambda_{\text{prim}}$  steht dabei für die Wellenlänge der Primärstrahlung. In der dritten und vierten Spalte sind der erste und zweite Leuchtstoff angegeben. CIE-x und CIE-y geben die Farbkoordinaten x und y der Strahlung in der CIE-Normfarbtafel von 1931 an. CCT/K gibt die korrelierte Farbtemperatur der Gesamtstrahlung in Kelvin an. R9 steht für einen dem Fachmann bekannten Farbwiedergabeindex (gesättigtes Rot). LER steht für die Lichtausbeute ("luminous efficacy") in Lumen pro Watt. Wie ersichtlich, weisen die Konversions-LEDs mit dem erfindungsgemäßen Leuchtstoff  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  als einzigen Leuchtstoff ähnliche optische Eigenschaften auf

wie herkömmliche Konversions-LEDs, basierend auf zwei Leuchtstoffen. Dabei fallen aber die Nachteile weg, die sich bei dem Einsatz von zwei oder mehreren Leuchtstoffen ergeben. Zum einen hängt das resultierende Spektrum stark von dem eingesetzten Verhältnis der Leuchtstoffe ab. Durch Chargenschwankungen in der Leuchtstoffherstellung sind dadurch häufige Anpassungen der Konzentration der Leuchtstoffe notwendig, was die Herstellung der Konversions-LEDs sehr aufwendig macht. Die Leuchtstoffe zeigen zudem unterschiedliche Emissionseigenschaften je nach Temperatur, der Strahlungsdichte der Primärstrahlung und der Anregungswellenlänge und weisen zudem ein unterschiedliches Degradierverhalten, also eine unterschiedliche Stabilität hinsichtlich Temperatur-, Strahlungs-, Feuchtigkeits- oder Gaseinflüssen, auf. Auch die Herstellung von Leuchtstoffmischungen kann schwierig sein, wenn die Leuchtstoffe sich in ihren physikalischen Eigenschaften wie beispielsweise der Dichte, Korngröße und im Sedimentationsverhalten stark unterscheiden. All diese Effekte führen bei der Verwendung von zwei Leuchtstoffen zu schwankenden Farbverteilungen und Farbverschiebungen in den Produkten. Um herkömmlich einen hohen Farbwiedergabeindex, vorteilhafterweise mit niedriger Farbtemperatur, insbesondere unter 3500 K oder unter 3000 K, zu erzielen, werden rot emittierende Leuchtstoffe benötigt. Alle bekannten rot emittierenden Leuchtstoffe können allerdings nur mittels aufwendiger Herstellungsmethoden synthetisiert werden und sind deshalb sehr viel teurer als bekannte grüne und gelbe Leuchtstoffe. Der erfindungsgemäße Leuchtstoff  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  kann dagegen kostengünstig hergestellt werden, da die Edukte kommerziell erhältlich, stabil und zudem sehr preisgünstig sind. Zudem erfordert die Synthese keine Inertgasatmosphäre und gestaltet sich daher vergleichsweise einfach.

**[0159]** Die Verwendung des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs in einer weiß emittierenden Konversions-LED weist zahlreiche Vorteile auf. Es kann eine Primärstrahlung eingesetzt werden, die vom menschlichen Auge nicht oder nur kaum wahrgenommen wird (300 nm bis 430 nm oder 440 nm). Schwankungen der Primärstrahlungen wirken sich so nicht negativ auf die Gesamtstrahlungseigenschaften aus. Es ist keine Farbanpassung notwendig, da das Emissionsspektrum konstant ist. Die Konversions-LEDs können mit hohem Durchsatz hergestellt werden, da keine Farbanpassung oder ein aufwendiges Chip-Binning notwendig ist. Es treten keine Farbverschiebungen oder andere negative Effekte auf das Emissionsspektrum durch selektive Degradierung nur eines Leuchtstoffs oder durch Temperatur- oder Durchlassstromschwankungen verursachte Änderungen der Primärstrahlung auf. Des Weiteren weist die Konversions-LED keine Eigenfarbe auf, sondern zeigt im ausgeschalteten Zustand ein weißes Erscheinungsbild. Deshalb ist der Leuchtstoff auch für "remote-phosphor"-Anordnungen geeignet, bei denen kein gelbes oder oranges Erscheinungsbild im ausgeschalteten Zustand erwünscht ist. Je nach Anwendung kann auch eine Teilkonversion der Primärstrahlung erfolgen. Da es möglich ist, den Leuchtstoff mit einer Primärstrahlung im Bereich von 300 nm bis 430 nm oder 440 nm anzuregen, führt ein Beitrag der Primärstrahlung, bevorzugt im kurzwelligen blauen Bereich des elektromagnetischen Spektrums, zu der Gesamtstrahlung dazu, dass damit beleuchtete Gegenstände weißer, strahlender und deshalb attraktiver wirken. Damit können beispielsweise optische Aufheller in Textilien angeregt werden.

**[0160]** Fig. 18 zeigt die trikline Kristallstruktur des Leuchtstoffs  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  in einer schematischen Darstellung. Die schraffierten Kreise stellen die K-Atome dar. Die Kristallstruktur entspricht der Kristallstruktur von  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$ , wie sie in K. Werthmann, R. Hoppe, Über Oxide des neuen Formeltyps  $\text{A}(\text{T4O4})$ : Zur Kenntnis von  $\text{KLi}_3\text{GeO}_4$ ,  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$  und  $\text{KLi}_3\text{TiO}_4$ , Z. Anorg. Allg. Chem., 1984, 509, 7–22 beschrieben ist. Die Kristallstruktur ist zu der von  $\text{SrLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$ , beschrieben in P. Pust, V. Weiler, C. Hecht, A. Tücks, A. S. Wochnik, A.-K. Henß, D. Wiechert, C. Scheu, P. J. Schmidt, W. Schnick, Narrow-Band Red-Emitting  $\text{Sr}[\text{LiAl}_3\text{N}_4]:\text{Eu}^{2+}$  as a Next-Generation LED-Phosphor Material Nat. Mater. 2014 13, 891–896 isotyp.

**[0161]** In Fig. 19 sind zwei Röntgenbeugungspulverdiffraktogramme unter Verwendung von Kupfer- $\text{K}\alpha_1$ -Strahlung angegeben. Auf der x-Achse sind die Beugungswinkel in  $^\circ 2\theta$ -Werten angegeben und auf der y-Achse die Intensität. Das mit dem Bezugszeichen III versehene Röntgenbeugungspulverdiffraktogramm zeigt das des zweiten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$ . Das mit dem Bezugszeichen IV versehene Röntgenbeugungspulverdiffraktogramm zeigt das aus der Kristallstruktur von  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$  simulierte Röntgenbeugungspulverdiffraktogramm für  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$ . Aus der Übereinstimmung der Reflexe ist erkennbar, dass der erfindungsgemäße Leuchtstoff  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  in derselben Kristallstruktur kristallisiert wie  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$ .

**[0162]** In Fig. 20 findet sich eine kristallographische Auswertung. Fig. 20 zeigt eine Rietveld-Verfeinerung des Röntgenpulverdiffraktogramms des zweiten Ausführungsbeispiels AB2, also  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$ . Für die Rietveld-Verfeinerung wurden die Atomparameter für  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$  (K. Werthmann, R. Hoppe, Über Oxide des neuen Formeltyps  $\text{A}(\text{T4O4})$ : Zur Kenntnis von  $\text{KLi}_3\text{GeO}_4$ ,  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$  und  $\text{KLi}_3\text{TiO}_4$ , Z. Anorg. Allg. Chem., 1984, 509, 7–22) verwendet, um zu zeigen, dass die Kristallstruktur von  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  der von  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$  entspricht. Im oberen Diagramm ist dabei die Überlagerung der gemessenen Reflexe mit den berechneten Reflexen für  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$  dargestellt. Im unteren Diagramm sind die Unterschiede der gemessenen und der berechneten Reflexe dargestellt. Ein Peak einer unbekanntenen Nebenphase wurde mit Sternchen markiert.

**[0163]** Fig. 21 zeigt kristallographische Daten von  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$ .

**[0164]** Fig. 22 zeigt Atomlagen in der Struktur von  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$ .

**[0165]** In Fig. 23 ist das Emissionsspektrum des dritten Ausführungsbeispiels AB3 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs mit der Summenformel  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  dargestellt. Auf der x-Achse ist die Wellenlänge in Nanometern aufgetragen und auf der y-Achse die Emissionsintensität in Prozent. Zur Messung des Emissionsspektrums wurde der erfindungsgemäße Leuchtstoff mit Primärstrahlung einer Wellenlänge von 400 nm ange-regt. Der Leuchtstoff weist eine Halbwertsbreite kleiner als 20 nm und eine Peak-Wellenlänge von 486 nm auf. Mit dieser geringen Halbwertsbreite gehört dieser Leuchtstoff zu den schmalbandigsten bekannten  $\text{Eu}^{2+}$ -dotier-ten Leuchtstoffen. Die Peak-Wellenlänge liegt im blau-grünen, auch als cyanfarben bezeichnenbaren, Spektral-bereich des elektromagnetischen Spektrums. Bislang sind nur wenige Leuchtstoffe mit einer Peakwellenlänge in diesem Bereich bekannt und keiner dieser Leuchtstoffe weist eine derart kleine Halbwertsbreite auf. Mit einer Peakwellenlänge von 486 nm und der kleinen Halbwertsbreite weist der Leuchtstoff eine gute Überlappung mit der Augenempfindlichkeitskurve auf. Die Konversion der UV- beziehungsweise blauen Primärstrahlung in eine Sekundärstrahlung mit einer etwas längeren Wellenlänge im blauen Bereich des elektromagnetischen Spektrums (Peak-Wellenlänge von 486 nm) erhöht die Effizienz der Konversions-LED. Die Peakwellenlänge der Sekundärstrahlung liegt im Vergleich zu der Primärstrahlung näher am Maximum der Augenempfindlich-keit bei 555 nm, wodurch die emittierte Strahlung einen höheren Überlapp mit der Augenempfindlichkeitskurve aufweist und somit als heller empfunden wird.

**[0166]** Fig. 24 zeigt eine normierte Kubelka-Munk-Funktion (K/S), aufgetragen gegen die Wellenlänge  $\lambda$  in nm, für das dritte Ausführungsbeispiel (AB3) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs. Aus Fig. 24 ist ersichtlich, dass das Maximum von K/S für das dritte Ausführungsbeispiel (AB3) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs zwischen 350 nm und 420 nm liegt. Bis zu 500 nm liegt K/S deutlich über dem Wert Null. Der Leuchtstoff  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  kann effizient mit einer Primärstrahlung ab etwa 340 nm angeregt werden.

**[0167]** Fig. 25 zeigt die tetragonale Kristallstruktur des Leuchtstoffs  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  in einer schemati-schen Darstellung. Die schraffierten Kreise stellen die Na-Atome dar, die weiß ausgefüllten Kreise die K-Ato-me. Die Kristallstruktur wurde aus Röntgenpulverdiffraktogramm-Daten ermittelt. Als Ausgangspunkt wurde die Kristallstruktur von  $\text{CsKNa}_2\text{Li}_{12}\text{Si}_4\text{O}_{16}$  unter Austausch von Cs gegen K verwendet.

**[0168]** In Fig. 26 findet sich eine kristallographische Auswertung. Fig. 26 zeigt eine Rietveld-Verfeinerung des Röntgenpulverdiffraktogramms des dritten Ausführungsbeispiels AB3, also  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ . Die Parameter und Atomkoordinaten aller nicht Li-Atome wurden frei verfeinert. Im oberen Diagramm ist dabei die Überlagerung der gemessenen Reflexe mit den berechneten Reflexen für  $\text{CsKNa}_2\text{Li}_{12}\text{Si}_4\text{O}_{16}$  dargestellt. Im unteren Diagramm sind die Unterschiede der gemessenen und der berechneten Reflexe dargestellt. Der Leuchtstoff  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  ist strukturell isotyp zu den Verbindungen  $\text{CsKNa}_2\text{Li}_8\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_4$ ,  $\text{RbNa}_3\text{Li}_8\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_4$ ,  $\text{CsNa}_3\text{Li}_8\{\text{Li}[\text{GeO}_4]\}_4$  und  $\text{RbNa}_3\text{Li}_8\{\text{Li}[\text{TiO}_4]\}_4$ .

**[0169]** Die Struktur ist auch ähnlich zu der von dem ersten Ausführungsbeispiel  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  und dem zwei-ten Ausführungsbeispiel  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}$  des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs, weist aber eine komplizierte An-ordnung der Alkalimetalle auf

**[0170]** Fig. 27 zeigt kristallographische Daten von  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4$ .

**[0171]** Fig. 28 zeigt Atomlagen in der Struktur von  $(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4$ .

**[0172]** Die Fig. 29 zeigt die Emissionsspektren von dem dritten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs AB3 und drei Vergleichsbeispielen CIS, OS und G, wobei CIS für  $\text{Ca}_8\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4\text{Cl}_2:\text{Eu}$ , OS für  $(\text{Sr},\text{Ba})_2\text{SiO}_4:\text{Eu}$  und G für  $\text{Lu}_3(\text{Al},\text{Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  steht. Alle Leuchtstoffe emittieren im blauen bis blaugrünen Be-reich des elektromagnetischen Spektrums. AB3 weist wie ersichtlich die geringste Halbwertsbreite auf und die Peakwellenlänge ist im Vergleich zu den Vergleichsbeispielen zu kürzeren Wellenlängen verschoben. Damit eignet sich der erfindungsgemäße Leuchtstoff mit einer beispielsweise für eine Anwendung in Signallichtern wie Blaulichtern von beispielsweise Polizei-, Kranken-, Notarzt- oder Feuerwehrfahrzeugen, deren Dominanz-wellenlänge bevorzugt in einem Bereich zwischen 465 nm und 480 nm liegt. Der Einsatz der Vergleichsbei-spiele ist dafür weniger gut geeignet, da deren Peakwellenlängen bei über 510 nm liegen, wohingegen der erfindungsgemäße Leuchtstoff eine Peakwellenlänge von 486 nm aufweist.

**[0173]** Die mit smel bezeichnete Kurve zeigt die Empfindlichkeitskurve für die Melatoninproduktion, das heißt, mit welchen Wellenlängen die Melatoninproduktion im Körper am besten unterdrückt werden kann ("human response function for melanopic effects"; Lucas et al., Trends in Neurosciences January 2014 Vol. 37 No. 1). Wie ersichtlich, zeigt das Emissionsspektrum von AB3 eine hohe Überlappung mit smel, so dass diese Strahlung effektiv zur Unterdrückung der Melatoninbildung eingesetzt werden kann. So kann eine Bestrahlung mit dieser Strahlung zu einer erhöhten Wachsamkeit oder auch Konzentrationsfähigkeit führen.

**[0174]** Fig. 30 zeigt die Überlappung von Emissionsspektren verschiedener Leuchtstoffe (AB3, CIS, OS und G, wie unter Fig. 29 beschrieben) und verschiedener blau emittierender LEDs (unkonvertiert) mit der Empfindlichkeitskurve für die Melatoninproduktion. Bei den LEDs handelt es sich um lichtemittierende Dioden mit auf InGaN basierenden Halbleiterchips. Die LEDs Ipeak430nm (Peakwellenlänge 430 nm) und Ipeak435nm (Peakwellenlänge 435 nm) sind nicht üblicherweise in großen Stückzahlen kommerziell erhältlich, aber sehr effizient. Die LEDs Ipeak440nm (Peakwellenlänge 440 nm), Ipeak445nm (Peakwellenlänge 445 nm), Ipeak450nm (Peakwellenlänge 450 nm) und Ipeak455nm (Peakwellenlänge 455 nm) sind kommerziell erhältlich, preisgünstig und effizient. Die LEDs Ipeak460nm (Peakwellenlänge 460 nm), Ipeak465nm (Peakwellenlänge 465 nm) und Ipeak470nm (Peakwellenlänge 470 nm) sind nur wenig effizient und kommerziell nicht üblicherweise erhältlich. Auf InGaN basierende Halbleiterchips können prinzipiell eine Strahlung mit einer Peakwellenlänge bis zu 500 nm emittieren, allerdings sinkt mit zunehmender Wellenlänge die Effizienz, weshalb diese üblicherweise nur bis zu einer Peakwellenlänge bis etwa 460 nm in großen Stückzahlen hergestellt werden. Dadurch sind die Anwendungsgebiete von InGaN-basierten Halbleiterchips in lichtemittierenden Dioden (ohne Leuchtstoff) begrenzt. Wie ersichtlich, zeigt die Emission des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs AB3 einen größeren Überlapp mit der Empfindlichkeitskurve für die Melatoninproduktion als die Leuchtstoffe CIS, OS und G und auch als die InGaN-basierten LEDs. Damit kann die Melatoninproduktion mit dem erfindungsgemäßen Leuchtstoff effizient unterdrückt werden.

**[0175]** In Fig. 31 ist die CIE-Normtafel (1931) gezeigt, wobei auf der x-Achse der CIE-x-Anteil der Grundfarbe Rot und auf der y-Achse der CIE-y-Anteil der Grundfarbe Grün aufgetragen ist. In die CIE-Normtafel sind die Farborte verschiedener Leuchtstoffe (AB3, CIS, OS und G, wie unter Fig. 29 beschrieben) eingezeichnet. Die schwarzen Vierecke stellen Farborte verschiedener blauer und blaugrüner InGaN-Halbleiterchips mit Peakwellenlängen zwischen 430 nm und 492 nm und Dominanzwellenlängen zwischen 436 nm und 493 nm dar. Der schwarze Punkt markiert den Weißpunkt Ew mit den Koordinaten CIE-x = 1/3 und CIE-y = 1/3. Die schwarzen Linien, die die Farbpunkte eines blauen Indiumgalliumnitrid-Halbleiterchips ( $\lambda_{\text{peak}} = 445 \text{ nm}$ ;  $\lambda_{\text{dom}} = 449 \text{ nm}$ ) mit den Farborten der Leuchtstoffe verbindet, repräsentieren die Konversionslinien von Konversions-LEDs, die aus dem Indiumgalliumnitrid-Halbleiterchip und den entsprechenden Leuchtstoffen aufgebaut sind. Die mit EVL gekennzeichnete Fläche zeigt den typischen blauen Farbraum für Produkte zur Anwendung im Bereich der Signallichter für beispielsweise Polizeifahrzeuge. Die offenen Kreise markieren Farborte mit 100 %iger Farbreinheit für ausgewählte Dominanzwellenlängen bei 468 nm, 476 nm und 487 nm. Die gestrichelte Linie repräsentiert Farborte mit Dominanzwellenlängen bei 487 nm mit unterschiedlicher Farbreinheit. Farborte auf dieser gestrichelten Linie, die näher an dem offenen Kreis 487 liegen, zeigen höhere Farbreinheiten als Farborte, die näher an dem Weißpunkt E liegen. Aus dieser Figur werden die vorteilhaften Effekte des neuen Leuchtstoffs AB3 deutlich: Die Konversionslinie (K) einer typischen blauen LED zu dem Farbort des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs AB3 schneidet den EVL-Farbraum in der Mitte, wohingegen die Konversionslinien derselben blauen LED mit den Leuchtstoffen OS, CIS und G nur eine geringe Überlappung mit dem EVL-Farbraum zeigen. Damit können mit Vorteil mehrere Farbräume innerhalb des EVL-Farbraums durch Verwendung des Leuchtstoffs AB3 erzielt werden als mit den herkömmlichen Leuchtstoffen. Zudem schneidet die Konversionslinie K die gestrichelte Linie für die Dominanzwellenlänge 487 nm in dem Punkt I1, der im Vergleich zu den Schnittpunkten der Konversionslinien der bekannten Leuchtstoffe eine höhere Farbreinheit aufweist. Dieselbe Verbesserung der Farbreinheit unter Verwendung des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs AB3 zeigt sich auch für andere Zieldominanzwellenlängen, insbesondere innerhalb des EVL-Farbraums. Die korrespondierenden Linien sind der Übersichtlichkeit halber nicht gezeigt. Eine hohe Farbreinheit führt zu einem gesättigteren Farbeindruck. Mit dem erfindungsgemäßen Leuchtstoff ist es damit möglich, zusätzliche Farborte zu erzielen, die bislang nicht erreicht werden können. Der erfindungsgemäße Leuchtstoff ( $\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5}\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ ) eignet sich daher besonders für Konversions-LEDs, die eine blaue Strahlung mit hoher Farbsättigung emittieren. Diese Konversions-LEDs sind geeignet für den Einsatz in Blaulichtern oder auch für "Color-on-Demand"-Anwendungen.

**[0176]** Die Fig. 32, Fig. 33 und Fig. 34 zeigen einen Vergleich der erzielbaren Farbreinheiten unterschiedlicher Konversions-LEDs bei verschiedenen Zieldominanzwellenlängen und Wellenlängen der Primärstrahlung. Zur Durchführung der Simulationsexperimente wurde ein blauer Halbleiterchip mit den unterschiedlichen Leuchtstoffen AB3, CIS, OS und G kombiniert. Dabei wurden Halbleiterchips basierend auf InGaN verwendet, die eine

hohe Effizienz aufweisen. Der Gehalt an Leuchtstoff wurde für jedes Experiment variiert, um die Zieldominanzwellenlänge zu erreichen, anschließend wurde die Farbreinheit aus den resultierenden Spektren ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass für alle gewählten Zieldominanzwellenlängen und alle gewählten Wellenlängen der Primärstrahlung die Konversions-LEDs mit dem Leuchtstoff AB3 eine signifikant höhere Farbreinheit zeigen als die Vergleichsbeispiele.

**[0177]** Die **Fig. 35**, **Fig. 36** und **Fig. 37** zeigen die zu den **Fig. 32**, **Fig. 33** und **Fig. 34** korrespondierenden simulierten Emissionsspektren der Konversions-LEDs. Dabei zeigt **Fig. 35** die Emissionsspektren einer Konversions-LED mit einer Primärstrahlung von 430 nm und einer Konversions-LED mit einer Primärstrahlung von 455 nm jeweils mit dem Leuchtstoff AB3 bei einer Zieldominanzwellenlänge von 487 nm. **Fig. 36** zeigt die Emissionsspektren einer Konversions-LED mit einer Primärstrahlung von 430 nm und einer Konversions-LED mit einer Primärstrahlung von 455 nm jeweils mit dem Leuchtstoff AB3 bei einer Zieldominanzwellenlänge von 468 nm. **Fig. 37** zeigt die Emissionsspektren einer Konversions-LED mit einer Primärstrahlung von 430 nm und einer Konversions-LED mit einer Primärstrahlung von 455 nm jeweils mit dem Leuchtstoff AB3 bei einer Zieldominanzwellenlänge von 476 nm.

**[0178]** In **Fig. 38** ist das Emissionsspektrum des vierten Ausführungsbeispiels AB4 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs mit der Summenformel  $(\text{Na}_{0,25}\text{K}_{0,75})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  dargestellt. Auf der x-Achse ist die Wellenlänge in nm aufgetragen und auf der y-Achse die Emissionsintensität in %. Zur Messung des Emissionsspektrums wurde der erfindungsgemäße Leuchtstoff mit einer Primärstrahlung einer Wellenlänge von 400 nm angeregt. Der Leuchtstoff weist eine Halbwertsbreite von weniger als 50 nm auf, eine Peakwellenlänge von 529 nm, eine Dominanzwellenlänge von 541 nm und einen Farbpunkt im CIE-Farbraum mit den Koordinaten CIE-x: 0,255 und CIE-y: 0,680. Die schmale Halbwertsbreite des Leuchtstoffs führt zu einer gesättigten grünen Emission des Leuchtstoffs.

**[0179]** **Fig. 39** zeigt eine normierte Kubelka-Munk-Funktion (K/S), aufgetragen gegen die Wellenlänge  $\lambda$  in nm, für das vierte Ausführungsbeispiel (AB4) des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs. Mit einer Primärstrahlung im Bereich zwischen 330 nm und 500 nm, bevorzugt 340 nm bis 460 nm, besonders bevorzugt 350 nm bis 450 nm, kann der erfindungsgemäße Leuchtstoff effizient angeregt werden. Dadurch ist der Leuchtstoff insbesondere für Hinterleuchtungsanwendungen geeignet, unter Verwendung eines Halbleiterchips mit einer Primärstrahlung im nahen UV-Bereich oder blauen Bereich des elektromagnetischen Spektrums.

**[0180]** In **Fig. 40** ist das Röntgenpulverdiffraktogramm des vierten Ausführungsbeispiels AB4 gezeigt. Auf der y-Achse ist die Intensität und auf der x-Achse die  $^{\circ}2\theta$ -Werte angegeben. In **Fig. 41** sind die Reflexpositionen und die relative Intensität in % der Reflexpositionen des Röntgenpulverdiffraktogramms angegeben.

**[0181]** In **Fig. 42** ist die Emissionsintensität in % gegen die Temperatur in  $^{\circ}\text{C}$  aufgetragen. Wie ersichtlich, zeigt das Ausführungsbeispiel AB4 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs eine hohe thermische Stabilität. In **Fig. 42** ist das thermische Quenchverhalten des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs AB4 im Vergleich zu einem herkömmlichen Leuchtstoff OS2, ein grünes Orthosilikat der Formel  $(\text{Sr},\text{Ba})_2\text{SiO}_4:\text{Eu}$  gezeigt. Die Leuchtstoffe wurden mit einer blauen Primärstrahlung mit einer Wellenlänge von 460 nm bei verschiedenen Temperaturen von 25 bis 225  $^{\circ}\text{C}$  angeregt und ihre Emissionsintensität wurde dabei aufgezeichnet. Es ist klar ersichtlich, dass der erfindungsgemäße Leuchtstoff AB4 einen deutlich niedrigeren Verlust an Emissionsintensität bei typischen Temperaturen, die in einer Konversions-LED herrschen, insbesondere Temperaturen über 140  $^{\circ}\text{C}$ , aufweist. Mit Vorteil kann der Leuchtstoff damit auch bei höheren Betriebstemperaturen in Konversions-LEDs eingesetzt werden.

**[0182]** Die **Fig. 43** zeigt verschiedene optische Eigenschaften des vierten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs AB4 im Vergleich zu herkömmlichen Leuchtstoffen G2 und OS2. OS2 steht dabei für einen Leuchtstoff der Formel  $(\text{Sr},\text{Ba})_2\text{SiO}_4:\text{Eu}$  und G2 für einen Leuchtstoff der Formel  $\text{Lu}_3(\text{Al},\text{Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ . Alle drei Leuchtstoffe zeigen eine ähnliche Dominanzwellenlänge. Dabei zeigt aber der erfindungsgemäße Leuchtstoff AB4 eine deutlich höhere Lichtausbeute (LER) und eine deutlich höhere Farbreinheit. Dies führt zu einer verbesserten Farbsättigung, womit eine höhere Farbraumabdeckung erreicht werden kann, und zu einer verbesserten Gesamteffizienz. Der Grund für die verbesserten Eigenschaften ist die geringe Halbwertsbreite des vierten Ausführungsbeispiels AB4 mit der Formel  $(\text{Na}_{0,25}\text{K}_{0,75})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs im Vergleich zu den herkömmlichen Leuchtstoffen. Die hohe Lichtausbeute erhöht die Effizienz von grünen Konversions-LEDs mit Teil- oder Vollkonversion im Vergleich zu grünen Konversions-LEDs mit bekannten grünen Leuchtstoffen mit einer vergleichbaren Dominanz- und/oder Peakwellenlänge.

**[0183]** Fig. 44 zeigt einen Vergleich der Emissionsspektren des vierten Ausführungsbeispiels AB4 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs im Vergleich zu den unter Fig. 43 beschriebenen herkömmlichen Leuchtstoffen G2 und OS2.

**[0184]** In Fig. 45 ist die Abdeckung des Farbraums rec2020 (xy) im CIE-Farbraumsystem und rec2020 (u'v') im CIE-LUV-Farbraumsystem (1976) durch unterschiedliche Kombinationen an einem grünen Leuchtstoff und einem roten Leuchtstoff in Verbindung mit einer blauen Primärstrahlung unterschiedlicher Dominanzwellenlänge gezeigt. AB4 steht dabei für das vierte Ausführungsbeispiel  $(\text{Na}_{0,25}\text{K}_{0,75})\text{Li}_3\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$  des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs und AB5 für das fünfte Ausführungsbeispiel  $(\text{Rb}_{0,5}\text{Li}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4$  des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs, BS steht für einen herkömmlichen grün emittierenden Beta-SiAlON:Eu-Leuchtstoff. Die Anteile an blauer, grüner und roter Strahlung wurden so angepasst, dass der weiße Farbort für typische Hinterleuchtungsanwendungen (CIE-x = 0,278 und CIE-y = 0,255) erzielt wurde. Auf das resultierende Spektrum wurden typische Farbfilterkurven angewendet und die resultierenden Farbpunkte für Blau, Grün und Rot wurden berechnet. Die Überlappung des resultierenden Farbraums mit den Standardfarbräumen wurde anschließend berechnet und verglichen. In allen Fällen ist ersichtlich, dass die erhaltenen Spektren mit den Ausführungsbeispielen AB4 und AB5 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs zu einer größeren Abdeckung des jeweiligen Farbraums führen. Mit den erfindungsgemäßen Leuchtstoffen kann somit eine größere Bandbreite an Farben wiedergegeben werden. Damit kann beispielsweise eine Anzeigevorrichtung, wie ein Display, mit einer Konversions-LED umfassend den erfindungsgemäßen Leuchtstoff, eine deutlich erhöhte Anzahl an Farben wiedergeben als es bislang mit herkömmlichen Leuchtstoffen möglich ist.

**[0185]** Die Fig. 46 bis Fig. 53 zeigen eine grafische Darstellung der in Fig. 45 beschriebenen Ergebnisse der Farbraumabdeckung für eine Dominanzwellenlänge der Primärstrahlung bei 448 nm. In den Diagrammen ist jeweils der eingesetzte zweite rote Leuchtstoff mit seiner Summenformel angegeben.

**[0186]** Die Fig. 54A, Fig. 54B und Fig. 54C zeigen eine umfassendere Liste der Daten aus Fig. 45, die zusätzlich die Farborte der gefilterten Spektren und Abdeckungen mit anderen Standardfarbräumen zeigen.

**[0187]** Die Fig. 55 bis Fig. 58 zeigen die aufgespannten Farbräume verschiedener Beispiele der in Fig. 45 dargestellten Kombinationen mit einer Wellenlänge der Primärstrahlung  $\lambda_{\text{dom}} = 448$  nm. Jede Figur zeigt einen Vergleich von drei verschiedenen grünen Leuchtstoffen (AB4, AB5 oder BS) jeweils kombiniert mit einem roten Leuchtstoff, der mit seiner Summenformel in den Figuren angegeben ist. Die aufgespannten Farbräume mit den erfindungsgemäßen Ausführungsbeispielen AB4 und AB5 sind nahezu deckungsgleich. Es ist ersichtlich, dass mit den Ausführungsbeispielen AB4 und AB5 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs eine größere Bandbreite an Farben wiedergegeben werden kann, vor allem in der grünen und roten Ecke des aufgespannten Farbdreiecks (mit Pfeilen markiert). Dies wird der sehr schmalbandigen Emission der erfindungsgemäßen Leuchtstoffe AB4 und AB5 zugeordnet. Die Bandbreite an grünen Farben wird damit durch die Verwendung der erfindungsgemäßen Leuchtstoffe AB4 und AB5 im Vergleich zu herkömmlichen Leuchtstoffen vergrößert. Die schmale Halbwertsbreite der erfindungsgemäßen Leuchtstoffe reduziert zudem den durch die Filterung entstehenden Verlust an Strahlung. Im Vergleich zu dem bekannten Leuchtstoff  $\beta$ -SiAlON (BS) können die erfindungsgemäßen Leuchtstoffe ausgehend von preisgünstigen Edukten hergestellt werden und zudem erfolgt die Synthese bei moderaten Temperaturen. Dies hält die Herstellungskosten gering, was die Leuchtstoffe auch wirtschaftlich sehr attraktiv für die Herstellung von Massenprodukten, wie LCD-Fernseher, Computer-Monitore oder Displays für Smartphones oder Tablets macht.

**[0188]** Die Fig. 59 bis Fig. 62 zeigen die korrespondierenden Konversion-LED-Spektren der Beispiele der Fig. 55 bis Fig. 58. Der rote Leuchtstoff ist mit seiner Summenformel in den Figuren angegeben.

**[0189]** In Fig. 63 ist das Emissionsspektrum des fünften Ausführungsbeispiels AB5 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs mit der Summenformel  $(\text{Rb}_{0,5}\text{Li}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4$  dargestellt. Auf der x-Achse ist die Wellenlänge in nm aufgetragen und auf der y-Achse die Emissionsintensität in %. Zur Messung des Emissionsspektrums wurde der erfindungsgemäße Leuchtstoff mit Licht einer Wellenlänge von 400 nm angeregt. Der Leuchtstoff weist eine Halbwertsbreite von 43 nm auf und eine Peakwellenlänge von 528 nm und eine Dominanzwellenlänge von 539 nm. Die Koordinaten CIE-x und CIE-y liegen bei 0,238 und 0,694. Damit erweist sich der Leuchtstoff als sehr geeignet für Hinterleuchtungsanwendungen, die einen gesättigten Grünton aufweisen müssen.

**[0190]** Fig. 64 zeigt eine normierte Kubelka-Munk-Funktion (K/S), aufgetragen gegen die Wellenlänge  $\lambda$  in nm, für das fünfte Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs. Das Maximum von K/S für das fünfte Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs liegt etwa bei 400 nm, der Bereich hoher Absorption erstreckt sich allerdings in den blaugrünen Spektralbereich bis hin zu etwa 500 nm. Deshalb kann

der Leuchtstoff effizient mit einer Primärstrahlung einer Wellenlänge zwischen 330 und 500 nm, bevorzugt 340 und 460 nm, besonders bevorzugt 350 bis 450 nm, angeregt werden.

**[0191]** Fig. 65 zeigt das Röntgenpulverdiffraktogramm des fünften Ausführungsbeispiels AB5 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs mit dem Bezugszeichen V. Das mit dem Bezugszeichen VI versehene Röntgenpulverdiffraktogramm zeigt ein simuliertes der Verbindung  $\text{RbLi}(\text{Li}_3\text{SiO}_4)_2$  (K. Bernet, R. Hoppe, Ein „Lithosilicat“ mit Kolumnareinheiten:  $\text{RbLi}_5\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_2$ , Z. Anorg. Allg. Chem., 1991, 592, 93–105). Peaks in dem Röntgenpulverdiffraktogramm V, die der Nebenphase  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  zugeordnet werden können, sind mit Sternchen gekennzeichnet.

**[0192]** Die Fig. 66 zeigt verschiedene optische Eigenschaften des fünften Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs AB5 im Vergleich zu herkömmlichen Leuchtstoffen G1 und OS1. OS1 steht dabei für einen Leuchtstoff der Formel  $(\text{Sr},\text{Ba})_2\text{SiO}_4:\text{Eu}$  und G1 für einen Leuchtstoff der Formel  $\text{Lu}_3(\text{Al},\text{Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ . Im Vergleich zu den Leuchtstoffen G2 und OS2 weisen die Leuchtstoffe G1 und OS1 einen anderen Eu- beziehungsweise Ce-Gehalt auf, um jeweils die gleiche Dominanzwellenlänge zu erzielen wie das Ausführungsbeispiel AB5. Alle drei Leuchtstoffe zeigen eine ähnliche Dominanzwellenlänge. Dabei zeigt aber der erfindungsgemäße Leuchtstoff AB5 eine deutlich höhere Lichtausbeute (LER) und eine deutlich höhere Farbreinheit. Dies führt zu einer verbesserten Farbsättigung, womit eine höhere Farbraumabdeckung erreicht werden kann, und zu einer verbesserten Gesamteffizienz. Der Grund für die verbesserten Eigenschaften ist die geringe Halbwertsbreite des vierten Ausführungsbeispiels AB5 mit der Formel  $(\text{Rb}_{0,5}\text{Li}_{0,5})\text{Li}_3\text{SiO}_4$  des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs im Vergleich zu den herkömmlichen Leuchtstoffen. Die hohe Lichtausbeute erhöht die Effizienz von grünen Konversions-LEDs mit Teil- oder Vollkonversion im Vergleich zu grünen Konversions-LEDs mit bekannten grünen Leuchtstoffen mit einer vergleichbaren Peakwellenlänge.

**[0193]** Fig. 67 zeigt einen Vergleich der Emissionsspektren des fünften Ausführungsbeispiels AB5 des erfindungsgemäßen Leuchtstoffs im Vergleich zu den unter Fig. 66 beschriebenen herkömmlichen Leuchtstoffen G1 und OS1.

**[0194]** Die Erfindung ist nicht durch die Beschreibung anhand der Ausführungsbeispiele auf diese beschränkt. Vielmehr umfasst die Erfindung jedes neue Merkmal sowie jede Kombination von Merkmalen, was insbesondere jede Kombination von Merkmalen in den Patentansprüchen beinhaltet, auch wenn dieses Merkmal oder diese Kombination selbst nicht explizit in den Patentansprüchen oder Ausführungsbeispielen angegeben ist.

**[0195]** Diese Patentanmeldung beansprucht die Priorität der deutschen Patentanmeldung 10 2016 114 993.4, deren Offenbarungsgehalt hiermit durch Rückbezug aufgenommen wird.

#### Bezugszeichenliste

ppm	parts per million
$\lambda_{\text{peak}}$	Peakwellenlänge
$\lambda_{\text{dom}}$	Dominanzwellenlänge
AB1	erstes Ausführungsbeispiel
AB2	zweites Ausführungsbeispiel
AB3	drittes Ausführungsbeispiel
AB4	viertes Ausführungsbeispiel
AB5	fünftes Ausführungsbeispiel
g	Gramm
E	Emission
mmol	Millimol
Mol%	Molprozent
$R_{\text{inf}}$	diffuse Reflexion
lm	Lumen
W	Watt
LER	Lichtausbeute
LED	lichtemittierende Diode
CRI	Farbwiedergabeindex
CCT	korrelierte Farbtemperatur
R9	Farbwiedergabeindex
K/S	Kubelka-Munk-Funktion
K	Kelvin

<b>cm</b>	Zentimeter
<b>nm</b>	Nanometer
<b>°2<math>\theta</math></b>	Grad 2 Theta
<b>I, II, III, IV, V, VI</b>	Röntgenpulverdiffraktogramm
<b>Ew</b>	Weißpunkt
<b>K</b>	Konversionslinie
<b>T</b>	Temperatur
<b>°C</b>	Grad Celsius

**ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

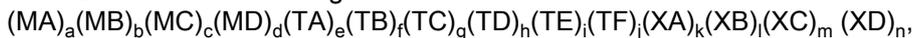
- WO 2013/175336 A1 [0018, 0018]
- DE 102016114993 [0195]

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- B. Nowitzki, R. Hoppe, Neues über Oxide vom Typ  $A[(TO)_n]$ :  $NaLi_3SiO_4$ ,  $NaLi_3GeO_4$ ,  $NaLi_3TiO_4$ , Revue de Chimie minérale, 1986, 23, 217–230 [0150]
- P. Pust, A. S. Wochnik, E. Baumann, P. J. Schmidt, D. Wiechert, C. Scheu, W. Schnick,  $Ca[LiAl_3N_4]:Eu^{2+}$  – A Narrow-Band Red-Emitting Nitridolithoaluminate, Chemistry of Materials 2014 26, 3544–3549 [0150]
- B. Nowitzki, R. Hoppe, Neues über Oxide vom Typ  $A[(TO)_n]$ :  $NaLi_3SiO_4$ ,  $NaLi_3GeO_4$ ,  $NaLi_3TiO_4$ , Revue de Chimie minérale, 1986, 23, 217–230 [0151]
- B. Nowitzki, R. Hoppe, Revue de Chimie minérale, 1986, 23, 217–230 [0152]
- K. Werthmann, R. Hoppe, Über Oxide des neuen Formeltyps  $A[(T_4O_4)]$ : Zur Kenntnis von  $KLi_3GeO_4$ ,  $KLi_3SiO_4$  und  $KLi_3TiO_4$ , Z. Anorg. Allg. Chem., 1984, 509, 7–22 [0160]
- P. Pust, V. Weiler, C. Hecht, A. Tücks, A. S. Wochnik, A.-K. Henß, D. Wiechert, C. Scheu, P. J. Schmidt, W. Schnick, Narrow-Band Red-Emitting  $Sr[LiAl_3N_4]:Eu^{2+}$  as a Next-Generation LED-Phosphor Material Nat. Mater. 2014 13, 891–896 [0160]
- K. Werthmann, R. Hoppe, Über Oxide des neuen Formeltyps  $A[(T_4O_4)]$ : Zur Kenntnis von  $KLi_3GeO_4$ ,  $KLi_3SiO_4$  und  $KLi_3TiO_4$ , Z. Anorg. Allg. Chem., 1984, 509, 7–22 [0162]
- "human response function for melanopic effects"; Lucas et al., Trends in Neurosciences January 2014 Vol. 37 No. 1 [0173]
- K. Bernet, R. Hoppe, Ein „Lithosilicat“ mit Kolumnareinheiten:  $RbLi_5\{Li[SiO_4]\}_2$ , Z. Anorg. Allg. Chem., 1991, 592, 93–105 [0191]

### Patentansprüche

1. Leuchtstoff mit der allgemeinen Summenformel



wobei

- MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt ist, die Li, Na, K, Rb, Cs, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst,
- MB aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt ist, die Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Mn, Eu, Yb, Ni, Fe, Co und Kombinationen daraus umfasst,
- MC aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt ist, die Y, Fe, Cr, Sc, In, Seltenerdmetalle und Kombinationen daraus umfasst,
- MD aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt ist, die Zr, Hf, Mn, Ce und Kombinationen daraus umfasst,
- TA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt ist, die Li, Na, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst,
- TB aus einer Gruppe von divalenten Metallen ausgewählt ist, Mg, Zn, Mn, Eu, Yb, Ni und Kombinationen daraus umfasst,
- TC aus einer Gruppe von trivalenten Metallen ausgewählt ist, die B, Al, Ga, In, Y, Fe, Cr, Sc, Seltenerdmetalle und Kombinationen daraus umfasst,
- TD aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt ist, die Si, Ge, Sn, Mn, Ti, Zr, Hf, Ce und Kombinationen daraus umfasst,
- TE aus einer Gruppe von pentavalenten Elementen ausgewählt ist, die P, Ta, Nb, V und Kombinationen daraus umfasst,
- TF aus einer Gruppe von hexavalenten Elementen ausgewählt ist, die W, Mo und Kombinationen daraus umfasst,
- XA aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt ist, die F, Cl, Br und Kombinationen daraus umfasst,
- XB aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt ist, die O, S und Kombinationen daraus umfasst,
- XC = N
- XD = C
- $a + b + c + d = t$
- $e + f + g + h + i + j = u$
- $k + l + m + n = v$
- $a + 2b + 3c + 4d + e + 2f + 3g + 4h + 5i + 6j - k - 2l - 3m - 4n = w$
- $0.8 \leq t \leq 1$
- $3.5 \leq u \leq 4$
- $3.5 \leq v \leq 4$
- $(-0.2) \leq w \leq 0.2$  und
- $0 \leq m < 0,875 v$  und/oder  $v \geq l > 0,125 v$ .

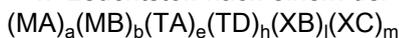
2. Leuchtstoff nach Anspruch 1, wobei

- $a + b + c + d = 1$
- $e + f + g + h + i + j = 4$
- $k + l + m + n = 4$
- $a + 2b + 3c + 4d + e + 2f + 3g + 4h + 5i + 6j - k - 2l - 3m - 4n = 0$  und
- $m < 3,5$ .

3. Leuchtstoff nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei

- $n = 0$ ,
- $k = 0$ ,
- $v = 4$  und
- $m < 3,5$  und  $l > 0,5$ .

4. Leuchtstoff nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit der allgemeinen Summenformel

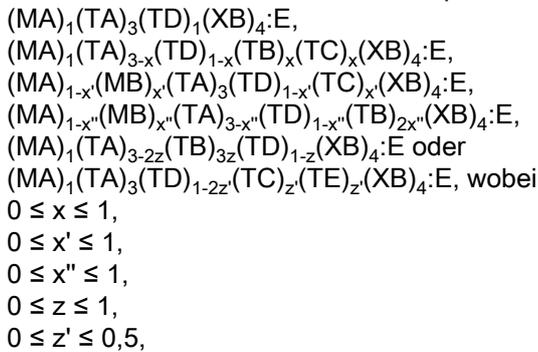


- $a + b = t$
- $e + h = u$
- $l + m = v$
- $a + 2b + e + 4h - 2l - 3m = w$
- $0.8 \leq t \leq 1$
- $3.5 \leq u \leq 4$

- $3.5 \leq v \leq 4$
- $(-0.2) \leq w \leq 0.2$
- $0 \leq m < 0,875$  v und/oder  $v \geq l > 0,125$  v.

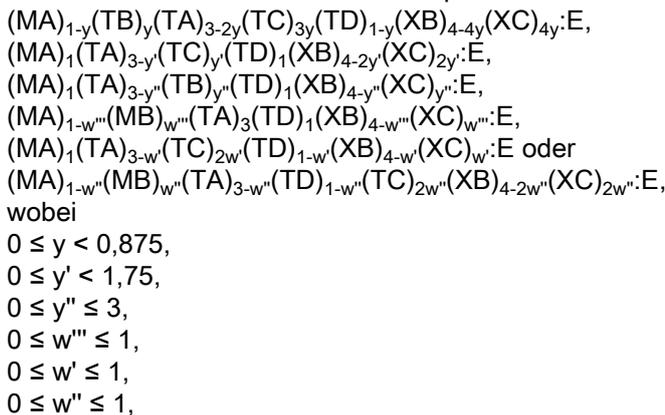
5. Leuchtstoff nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit einer Kristallstruktur in der TA, TB, TC, TD, TE und/oder TF von XA, XB, XC und/oder XD umgeben sind und die sich daraus ergebenden Baueinheiten über gemeinsame Ecken und Kanten zu einem dreidimensionalen Raumnetz mit Hohlräumen verknüpft sind und in den Hohlräumen MA, MB, MC und/oder MD angeordnet sind.

6. Leuchtstoff nach einem der Ansprüche 1 oder 2 mit einer der folgenden allgemeinen Summenformeln



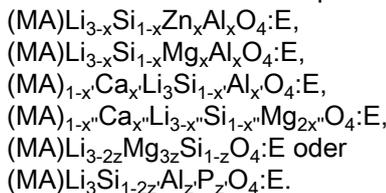
und E aus einer Gruppe ausgewählt ist, die Eu, Ce, Yb, Mn und Kombinationen daraus umfasst.

7. Leuchtstoff nach einem der Ansprüche 1 oder 2 mit einer der folgenden allgemeinen Summenformeln

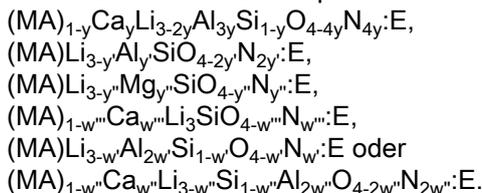


und E aus einer Gruppe ausgewählt ist, die Eu, Ce, Yb, Mn und Kombinationen daraus umfasst.

8. Leuchtstoff nach Anspruch 6 mit einer der folgenden allgemeinen Summenformeln

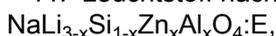


9. Leuchtstoff nach Anspruch 7 mit einer der folgenden allgemeinen Summenformeln



10. Leuchtstoff nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt ist, die Li, Na, K, Rb und Kombinationen daraus umfasst.

11. Leuchtstoff nach Anspruch 6 oder 8 mit einer der folgenden allgemeinen Summenformeln



$\text{NaLi}_{3-x}\text{Si}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Al}_x\text{O}_4\cdot\text{E}$ ,  
 $\text{Na}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Li}_3\text{Si}_{1-x}\text{Al}_x\text{O}_4\cdot\text{E}$ ,  
 $\text{Na}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Li}_{3-x}\text{Si}_{1-x}\text{Mg}_{2x}\text{O}_4\cdot\text{E}$ ,  
 $\text{NaLi}_{3-2z}\text{Mg}_{3z}\text{Si}_{1-z}\text{O}_4\cdot\text{E}$  oder  
 $\text{NaLi}_3\text{Si}_{1-2z}\text{Al}_z\text{P}_z\text{O}_4\cdot\text{E}$ .

12. Leuchtstoff nach Anspruch 7 oder 9 mit einer der folgenden allgemeinen Summenformeln

$\text{Na}_{1-y}\text{Ca}_y\text{Li}_{3-2y}\text{Al}_{3y}\text{Si}_{1-y}\text{O}_{4-4y}\text{N}_{4y}\cdot\text{E}$ ,  
 $\text{NaLi}_{3-y}\text{Al}_y\text{SiO}_{4-2y}(\text{XC})_{2y}\cdot\text{E}$ ,  
 $\text{NaLi}_{3-y}\text{Mg}_y\text{SiO}_{4-y}\text{N}_y\cdot\text{E}$ ,  
 $\text{Na}_{1-w}\text{Ca}_w\text{Li}_3\text{SiO}_{4-w}\text{N}_w\cdot\text{E}$ ,  
 $\text{NaLi}_{3-w}\text{Al}_{2w}\text{Si}_{1-w}\text{O}_{4-w}\text{N}_w\cdot\text{E}$  oder  
 $\text{Na}_{1-w}\text{Ca}_w\text{Li}_{3-w}\text{Si}_{1-w}\text{Al}_{2w}\text{O}_{4-2w}\text{N}_{2w}\cdot\text{E}$ .

13. Leuchtstoff nach Anspruch 6 mit der allgemeinen Summenformel  $(\text{MA})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4\cdot\text{E}$ ,

wobei

MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt ist, die Li, Na, K, Rb, Cs, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst,

– TA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt ist, die Li, Na, Cu, Ag und Kombinationen daraus umfasst,

– TD aus einer Gruppe von tetravalenten Metallen ausgewählt ist, die Si, Ge, Sn, Mn, Ti, Zr, Hf, Ce und Kombinationen daraus umfasst,

– XB aus einer Gruppe von Elementen ausgewählt ist, die O, S und Kombinationen daraus umfasst und

– E aus einer Gruppe ausgewählt ist, die Eu, Ce, Yb, Mn und Kombinationen daraus umfasst.

14. Leuchtstoff nach Anspruch 13 mit der allgemeinen Summenformel  $(\text{MA})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4\cdot\text{E}$ ,

wobei

MA aus einer Gruppe von monovalenten Metallen ausgewählt ist, die Li, Na, K, Rb und Kombinationen daraus umfasst,

– TA = Li

– TD = Si

– XB = O

– E aus einer Gruppe ausgewählt ist, die Eu, Ce, Yb, Mn und Kombinationen daraus umfasst.

15. Leuchtstoff nach Anspruch 13, mit der allgemeinen Summenformel

$(\text{Na}_r\text{K}_{1-r})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4\cdot\text{E}$ , wobei

$0 \leq r \leq 1$ .

16. Leuchtstoff nach Anspruch 13, mit der allgemeinen Summenformel

$(\text{Rb}_{r'}\text{Li}_{1-r'})_1(\text{TA})_3(\text{TD})_1(\text{XB})_4\cdot\text{E}$ , wobei

$0 \leq r' \leq 1$ .

17. Leuchtstoff nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Leuchtstoff im gleichen Strukturtyp wie

–  $\text{NaLi}_3\text{SiO}_4$

–  $\text{KLi}_3\text{SiO}_4$

–  $\text{RbLi}_5\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_2$

–  $\text{UCr}_4\text{C}_4$

–  $\text{CsKNa}_2\text{Li}_{12}\text{Si}_4\text{O}_{16}$  oder

–  $\text{CsKNaLi}_9\{\text{Li}[\text{SiO}_4]\}_4$

kristallisiert.

18. Verfahren zur Herstellung eines Leuchtstoffs nach den Ansprüchen 1 bis 17 umfassend die Verfahrensschritte:

A) Vermengen von Edukten des Leuchtstoffs,

B) Aufheizen des unter A) erhaltenen Gemenges auf eine Temperatur T1 zwischen 500 und 1400 °C,

C) Glühen des Gemenges bei einer Temperatur T1 von 500 bis 1400 °C für 0,5 Minuten bis zehn Stunden.

Es folgen 60 Seiten Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

FIG 1A

$\text{NaLi}_3\text{SiO}_4 \leftrightarrow \text{CaLiAl}_3\text{N}_4$	$\text{LiO}_2 \leftrightarrow \text{AlN}_2$
$\text{Na}_{1-y}\text{Ca}_y\text{Li}_{3-2y}\text{Al}_3\text{Si}_{1-y}\text{O}_4\text{-}4y\text{N}_{4y} : \text{E}$	$\text{NaLi}_{3-y}\text{Al}_y\text{SiO}_4\text{-}2y\text{N}_{2y} : \text{E}$
$\text{Na}_1\text{Ca}_0\text{Li}_3\text{Al}_0\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{N}_4$	$\text{NaLi}_3\text{Al}_0\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{N}_4$
$\text{Na}_0,9\text{Ca}_0,1\text{Li}_2,8\text{Al}_0,3\text{Si}_0,9\text{O}_3,6\text{N}_0,4$	$\text{NaLi}_2,9\text{Al}_0,1\text{Si}_0,3\text{O}_3,8\text{N}_0,$
$\text{Na}_0,8\text{Ca}_0,2\text{Li}_2,6\text{Al}_0,6\text{Si}_0,8\text{O}_3,2\text{N}_0,8$	$\text{NaLi}_2,8\text{Al}_0,2\text{Si}_0,3\text{O}_3,6\text{N}_0,4$
$\text{Na}_0,7\text{Ca}_0,3\text{Li}_2,4\text{Al}_0,9\text{Si}_0,7\text{O}_2,8\text{N}_1,2$	$\text{NaLi}_2,7\text{Al}_0,3\text{Si}_0,3\text{O}_3,4\text{N}_0,6$
$\text{Na}_0,6\text{Ca}_0,4\text{Li}_2,2\text{Al}_1,2\text{Si}_0,6\text{O}_2,4\text{N}_1,6$	$\text{NaLi}_2,6\text{Al}_0,4\text{Si}_0,3\text{O}_3,2\text{N}_0,8$
$\text{Na}_0,5\text{Ca}_0,5\text{Li}_2\text{Al}_1,5\text{Si}_0,5\text{O}_2\text{N}_2$	$\text{NaLi}_2,5\text{Al}_0,5\text{Si}_0,3\text{N}_1$
$\text{Na}_0,4\text{Ca}_0,6\text{Li}_1,8\text{Al}_1,8\text{Si}_0,4\text{O}_1,6\text{N}_2,$	$\text{NaLi}_2,4\text{Al}_0,6\text{Si}_0,2,8\text{N}_1,2$
$\text{Na}_0,3\text{Ca}_0,7\text{Li}_1,6\text{Al}_2,1\text{Si}_0,3\text{O}_1,2\text{N}_2,8$	$\text{NaLi}_2,3\text{Al}_0,7\text{Si}_0,2,6\text{N}_1,4$
$\text{Na}_0,2\text{Ca}_0,8\text{Li}_1,4\text{Al}_2,4\text{Si}_0,2\text{O}_0,8\text{N}_3,2$	$\text{NaLi}_2,2\text{Al}_0,8\text{Si}_0,2,4\text{N}_1,6$
$\text{Na}_0,1\text{Ca}_0,9\text{Li}_1,2\text{Al}_2,7\text{Si}_0,1\text{O}_0,4\text{N}_3,6$	$\text{NaLi}_2,1\text{Al}_0,9\text{Si}_0,2,2\text{N}_1,8$
$\text{Na}_0\text{Ca}_1\text{Li}_1\text{Al}_3\text{Si}_0\text{O}_0\text{N}_4$	$\text{NaLi}_2\text{Al}_1\text{Si}_0\text{N}_2$
	$\text{NaLi}_2\text{Al}_2\text{Si}_0\text{N}_2$
	$\text{NaLi}_1,9\text{Al}_1,1\text{Si}_0,1,8\text{N}_2,2$
	$\text{NaLi}_1,8\text{Al}_1,2\text{Si}_0,1,6\text{N}_2,4$
	$\text{NaLi}_1,7\text{Al}_1,3\text{Si}_0,1,4\text{N}_2,6$
	$\text{NaLi}_1,6\text{Al}_1,4\text{Si}_0,1,2\text{N}_2,8$
	$\text{NaLi}_1,5\text{Al}_1,5\text{Si}_0,1\text{N}_3$
	$\text{Na}_2\text{Li}_3\text{Al}_3\text{Si}_2\text{O}_2\text{N}_6$
	$\text{NaLi}_1,4\text{Al}_1,6\text{Si}_0,0,8\text{N}_3,2$
	$\text{NaLi}_1,3\text{Al}_1,7\text{Si}_0,0,6\text{N}_3,4$
	$\text{NaLi}_1,2\text{Al}_1,8\text{Si}_0,0,4\text{N}_3,6$
	$\text{NaLi}_1,1\text{Al}_1,9\text{Si}_0,0,2\text{N}_3,8$
	$\text{NaLi}_1\text{Al}_2\text{Si}_0\text{N}_4$

FIG 1B

FIG 1BA
FIG 1BB

FIG 1BA

LiO ↔ MgN		LiSi ↔ ZnAl	
NaLi <sub>3-y</sub> <sup>m</sup> Mg <sub>y</sub> <sup>n</sup> SiO <sub>4-y</sub> <sup>m</sup> N <sub>y</sub> <sup>n</sup> : E		NaLi <sub>3-x</sub> Si <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> Al <sub>x</sub> O <sub>4</sub> : E	
NaLi <sub>3</sub> Mg <sub>0</sub> Si <sub>4</sub> N <sub>0</sub>	NaLi <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>4</sub>	NaLi <sub>3</sub> Si <sub>1</sub> Zn <sub>0</sub> Al <sub>0</sub> O <sub>4</sub>	NaLi <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>4</sub>
NaLi <sub>2,9</sub> Mg <sub>0,1</sub> Si <sub>3,9</sub> N <sub>0,1</sub>		NaLi <sub>2,9</sub> Si <sub>0,9</sub> Zn <sub>0,1</sub> Al <sub>0,1</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2,8</sub> Mg <sub>0,2</sub> Si <sub>3,8</sub> N <sub>0,2</sub>		NaLi <sub>2,8</sub> Si <sub>0,8</sub> Zn <sub>0,2</sub> Al <sub>0,2</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2,7</sub> Mg <sub>0,3</sub> Si <sub>3,7</sub> N <sub>0,3</sub>		NaLi <sub>2,7</sub> Si <sub>0,7</sub> Zn <sub>0,3</sub> Al <sub>0,3</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2,6</sub> Mg <sub>0,4</sub> Si <sub>3,6</sub> N <sub>0,4</sub>		NaLi <sub>2,6</sub> Si <sub>0,6</sub> Zn <sub>0,4</sub> Al <sub>0,4</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2,5</sub> Mg <sub>0,5</sub> Si <sub>3,5</sub> N <sub>0,5</sub>	Na <sub>2</sub> Li <sub>5</sub> MgSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub> N	NaLi <sub>2,5</sub> Si <sub>0,5</sub> Zn <sub>0,5</sub> Al <sub>0,5</sub> O <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> Li <sub>5</sub> Si <sub>2</sub> ZnAlO <sub>8</sub>
NaLi <sub>2,4</sub> Mg <sub>0,6</sub> Si <sub>3,4</sub> N <sub>0,6</sub>		NaLi <sub>2,4</sub> Si <sub>0,4</sub> Zn <sub>0,6</sub> Al <sub>0,6</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2,3</sub> Mg <sub>0,7</sub> Si <sub>3,3</sub> N <sub>0,7</sub>		NaLi <sub>2,3</sub> Si <sub>0,3</sub> Zn <sub>0,7</sub> Al <sub>0,7</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2,2</sub> Mg <sub>0,8</sub> Si <sub>3,2</sub> N <sub>0,8</sub>		NaLi <sub>2,2</sub> Si <sub>0,2</sub> Zn <sub>0,8</sub> Al <sub>0,8</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2,1</sub> Mg <sub>0,9</sub> Si <sub>3,1</sub> N <sub>0,9</sub>		NaLi <sub>2,1</sub> Si <sub>0,1</sub> Zn <sub>0,9</sub> Al <sub>0,9</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2</sub> Mg <sub>1</sub> Si <sub>3</sub> N <sub>1</sub>	NaLi <sub>2</sub> MgSi <sub>3</sub> O <sub>3</sub> N	NaLi <sub>2</sub> Si <sub>0</sub> Zn <sub>1</sub> Al <sub>1</sub> O <sub>4</sub>	NaLi <sub>2</sub> ZnAlO <sub>4</sub>

FIG 1BB

NaLi1,9Mg1,1SiO2,9N1,1	
NaLi1,8Mg1,2SiO2,8N1,2	
NaLi1,7Mg1,3SiO2,7N1,3	
NaLi1,6Mg1,4SiO2,6N1,4	
NaLi1,5Mg1,5SiO2,5N1,5	Na <sub>2</sub> Li <sub>3</sub> Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> N <sub>3</sub>
NaLi1,4Mg1,6SiO2,4N1,6	
NaLi1,3Mg1,7SiO2,3N1,7	
NaLi1,2Mg1,8SiO2,2N1,8	
NaLi1,1Mg1,9SiO2,1N1,9	
NaLi1Mg2SiO2N2	NaLiMg <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub> N <sub>2</sub>
NaLi0,9Mg2,1SiO1,9N2,1	
NaLi0,8Mg2,2SiO1,8N2,2	
NaLi0,7Mg2,3SiO1,7N2,3	
NaLi0,6Mg2,4SiO1,6N2,4	
NaLi0,5Mg2,5SiO1,5N2,5	Na <sub>2</sub> LiMg <sub>5</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub> N <sub>5</sub>
NaLi0,4Mg2,6SiO1,4N2,6	
NaLi0,3Mg2,7SiO1,3N2,7	
NaLi0,2Mg2,8SiO1,2N2,8	
NaLi0,1Mg2,9SiO1,1N2,9	
NaLi0Mg3SiO1N3	NaMg <sub>3</sub> SiO <sub>3</sub> N <sub>3</sub>

FIG 1C

LiSi ↔ MgAl		NaO ↔ CaN
NaLi <sub>3-x</sub> Si <sub>1-x</sub> Mg <sub>x</sub> Al <sub>x</sub> O <sub>4</sub> : E		Na <sub>1-w</sub> Ca <sub>w</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>4-w</sub> N <sub>w</sub> : E
NaLi <sub>3</sub> Si <sub>1</sub> Mg <sub>0</sub> Al <sub>0</sub> O <sub>4</sub>	NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub>	Na <sub>1</sub> Ca <sub>0</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> N <sub>0</sub>
NaLi <sub>2,9</sub> Si <sub>0,9</sub> Mg <sub>0,1</sub> Al <sub>0,1</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,9</sub> Ca <sub>0,1</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>3,9</sub> N <sub>0,1</sub>
NaLi <sub>2,8</sub> Si <sub>0,8</sub> Mg <sub>0,2</sub> Al <sub>0,2</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,8</sub> Ca <sub>0,2</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>3,8</sub> N <sub>0,2</sub>
NaLi <sub>2,7</sub> Si <sub>0,7</sub> Mg <sub>0,3</sub> Al <sub>0,3</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,7</sub> Ca <sub>0,3</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>3,7</sub> N <sub>0,3</sub>
NaLi <sub>2,6</sub> Si <sub>0,6</sub> Mg <sub>0,4</sub> Al <sub>0,4</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,6</sub> Ca <sub>0,4</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>3,6</sub> N <sub>0,4</sub>
NaLi <sub>2,5</sub> Si <sub>0,5</sub> Mg <sub>0,5</sub> Al <sub>0,5</sub> O <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> Li <sub>5</sub> SiMgAlO <sub>8</sub>	Na <sub>0,5</sub> Ca <sub>0,5</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>3,5</sub> N <sub>0,5</sub>
NaLi <sub>2,4</sub> Si <sub>0,4</sub> Mg <sub>0,6</sub> Al <sub>0,6</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,4</sub> Ca <sub>0,6</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>3,4</sub> N <sub>0,6</sub>
NaLi <sub>2,3</sub> Si <sub>0,3</sub> Mg <sub>0,7</sub> Al <sub>0,7</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,3</sub> Ca <sub>0,7</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>3,3</sub> N <sub>0,7</sub>
NaLi <sub>2,2</sub> Si <sub>0,2</sub> Mg <sub>0,8</sub> Al <sub>0,8</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,2</sub> Ca <sub>0,8</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>3,2</sub> N <sub>0,8</sub>
NaLi <sub>2,1</sub> Si <sub>0,1</sub> Mg <sub>0,9</sub> Al <sub>0,9</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,1</sub> Ca <sub>0,9</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>3,1</sub> N <sub>0,9</sub>
NaLi <sub>2</sub> Si <sub>0</sub> Mg <sub>1</sub> Al <sub>1</sub> O <sub>4</sub>	NaLi <sub>2</sub> MgAlO <sub>4</sub>	Na <sub>0</sub> Ca <sub>1</sub> Li <sub>3</sub> SiO <sub>3</sub> N <sub>1</sub>
		CaLi <sub>3</sub> SiO <sub>3</sub> N

FIG 1D

LiSiO ↔ Al <sub>2</sub> N		NaLiSiO <sub>2</sub> ↔ CaAl <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	
NaLi <sub>3-w</sub> Al <sub>2w</sub> Si <sub>1-w</sub> O <sub>4-w</sub> N <sub>w</sub> : E		Na <sub>1-w</sub> Ca <sub>w</sub> Li <sub>3-w</sub> Si <sub>1-w</sub> Al <sub>2w</sub> O <sub>4-2w</sub> N <sub>2w</sub> : E	
NaLi <sub>3</sub> Al <sub>0</sub> Si <sub>10</sub> 4N <sub>0</sub>	NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub>	Na <sub>1</sub> Ca <sub>0</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>1</sub> Al <sub>0</sub> 4N <sub>0</sub>	NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub>
NaLi <sub>2,9</sub> Al <sub>0,2</sub> Si <sub>0,9</sub> O <sub>3,9</sub> N <sub>0,1</sub>		Na <sub>0,9</sub> Ca <sub>0,1</sub> Li <sub>2,9</sub> Si <sub>0,9</sub> Al <sub>0,2</sub> O <sub>3,8</sub> N <sub>0,2</sub>	
NaLi <sub>2,8</sub> Al <sub>0,4</sub> Si <sub>0,8</sub> O <sub>3,8</sub> N <sub>0,2</sub>		Na <sub>0,8</sub> Ca <sub>0,2</sub> Li <sub>2,8</sub> Si <sub>0,8</sub> Al <sub>0,4</sub> O <sub>3,6</sub> N <sub>0,4</sub>	
NaLi <sub>2,7</sub> Al <sub>0,6</sub> Si <sub>0,7</sub> O <sub>3,7</sub> N <sub>0,3</sub>		Na <sub>0,7</sub> Ca <sub>0,3</sub> Li <sub>2,7</sub> Si <sub>0,7</sub> Al <sub>0,6</sub> O <sub>3,4</sub> N <sub>0,6</sub>	
NaLi <sub>2,6</sub> Al <sub>0,8</sub> Si <sub>0,6</sub> O <sub>3,6</sub> N <sub>0,4</sub>		Na <sub>0,6</sub> Ca <sub>0,4</sub> Li <sub>2,6</sub> Si <sub>0,6</sub> Al <sub>0,8</sub> O <sub>3,2</sub> N <sub>0,8</sub>	
NaLi <sub>2,5</sub> Al <sub>1</sub> Si <sub>0,5</sub> O <sub>3,5</sub> N <sub>0,5</sub>	Na <sub>2</sub> Li <sub>5</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>0,7</sub> N	Na <sub>0,5</sub> Ca <sub>0,5</sub> Li <sub>2,5</sub> Si <sub>0,5</sub> Al <sub>1</sub> O <sub>3</sub> N <sub>1</sub>	NaCaLi <sub>5</sub> SiAl <sub>2</sub> O <sub>6</sub> N <sub>2</sub>
NaLi <sub>2,4</sub> Al <sub>1,2</sub> Si <sub>0,4</sub> O <sub>3,4</sub> N <sub>0,6</sub>		Na <sub>0,4</sub> Ca <sub>0,6</sub> Li <sub>2,4</sub> Si <sub>0,4</sub> Al <sub>1,2</sub> O <sub>2,8</sub> N <sub>1,2</sub>	
NaLi <sub>2,3</sub> Al <sub>1,4</sub> Si <sub>0,3</sub> O <sub>3,3</sub> N <sub>0,7</sub>		Na <sub>0,3</sub> Ca <sub>0,7</sub> Li <sub>2,3</sub> Si <sub>0,3</sub> Al <sub>1,4</sub> O <sub>2,6</sub> N <sub>1,4</sub>	
NaLi <sub>2,2</sub> Al <sub>1,6</sub> Si <sub>0,2</sub> O <sub>3,2</sub> N <sub>0,8</sub>		Na <sub>0,2</sub> Ca <sub>0,8</sub> Li <sub>2,2</sub> Si <sub>0,2</sub> Al <sub>1,6</sub> O <sub>2,4</sub> N <sub>1,6</sub>	
NaLi <sub>2,1</sub> Al <sub>1,8</sub> Si <sub>0,1</sub> O <sub>3,1</sub> N <sub>0,9</sub>		Na <sub>0,1</sub> Ca <sub>0,9</sub> Li <sub>2,1</sub> Si <sub>0,1</sub> Al <sub>1,8</sub> O <sub>2,2</sub> N <sub>1,8</sub>	
NaLi <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>0</sub> 3N <sub>1</sub>	NaLi <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> N <sub>1</sub>	Na <sub>0</sub> Ca <sub>1</sub> Li <sub>2</sub> Si <sub>0</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	CaLi <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub> N <sub>2</sub>

FIG 1E

NASi ↔ CaAl		NaSiLi ↔ CaMg2	
Na <sub>1-x</sub> Ca <sub>x</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> O <sub>4</sub> : E		Na <sub>1-x</sub> Ca <sub>x</sub> Li <sub>3-x</sub> Si <sub>1-x</sub> Mg <sub>2x</sub> O <sub>4</sub> : E	
Na <sub>1</sub> Ca <sub>0</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>1</sub> Al <sub>0</sub> O <sub>4</sub>	NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub>	Na <sub>1</sub> Ca <sub>0</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>1</sub> Mg <sub>0</sub> O <sub>4</sub>	NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub>
Na <sub>0,9</sub> Ca <sub>0,1</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>0,9</sub> Al <sub>0,1</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,9</sub> Ca <sub>0,1</sub> Li <sub>2,9</sub> Si <sub>0,9</sub> Mg <sub>0,2</sub> O <sub>4</sub>	
Na <sub>0,8</sub> Ca <sub>0,2</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>0,8</sub> Al <sub>0,2</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,8</sub> Ca <sub>0,2</sub> Li <sub>2,8</sub> Si <sub>0,8</sub> Mg <sub>0,4</sub> O <sub>4</sub>	
Na <sub>0,7</sub> Ca <sub>0,3</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>0,7</sub> Al <sub>0,3</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,7</sub> Ca <sub>0,3</sub> Li <sub>2,7</sub> Si <sub>0,7</sub> Mg <sub>0,6</sub> O <sub>4</sub>	
Na <sub>0,6</sub> Ca <sub>0,4</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>0,6</sub> Al <sub>0,4</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,6</sub> Ca <sub>0,4</sub> Li <sub>2,6</sub> Si <sub>0,6</sub> Mg <sub>0,8</sub> O <sub>4</sub>	
Na <sub>0,5</sub> Ca <sub>0,5</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>0,5</sub> Al <sub>0,5</sub> O <sub>4</sub>	NaCaLi <sub>6</sub> SiAlO <sub>4</sub>	Na <sub>0,5</sub> Ca <sub>0,5</sub> Li <sub>2,5</sub> Si <sub>0,5</sub> Mg <sub>1,0</sub> O <sub>4</sub>	NaCaLi <sub>5</sub> SiMg <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Na <sub>0,4</sub> Ca <sub>0,6</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>0,4</sub> Al <sub>0,6</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,4</sub> Ca <sub>0,6</sub> Li <sub>2,4</sub> Si <sub>0,4</sub> Mg <sub>1,2</sub> O <sub>4</sub>	
Na <sub>0,3</sub> Ca <sub>0,7</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>0,3</sub> Al <sub>0,7</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,3</sub> Ca <sub>0,7</sub> Li <sub>2,3</sub> Si <sub>0,3</sub> Mg <sub>1,4</sub> O <sub>4</sub>	
Na <sub>0,2</sub> Ca <sub>0,8</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>0,2</sub> Al <sub>0,8</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,2</sub> Ca <sub>0,8</sub> Li <sub>2,2</sub> Si <sub>0,2</sub> Mg <sub>1,6</sub> O <sub>4</sub>	
Na <sub>0,1</sub> Ca <sub>0,9</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>0,1</sub> Al <sub>0,9</sub> O <sub>4</sub>		Na <sub>0,1</sub> Ca <sub>0,9</sub> Li <sub>2,1</sub> Si <sub>0,1</sub> Mg <sub>1,8</sub> O <sub>4</sub>	
Na <sub>0</sub> Ca <sub>1</sub> Li <sub>3</sub> Si <sub>0</sub> Al <sub>1</sub> O <sub>4</sub>	CaLi <sub>3</sub> AlO <sub>4</sub>	Na <sub>0</sub> Ca <sub>1</sub> Li <sub>2</sub> Si <sub>0</sub> Mg <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	CaLi <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> O <sub>4</sub>

FIG 1F

Li <sub>2</sub> Si ↔ Mg <sub>3</sub>		Si <sub>2</sub> ↔ AlP	
NaLi <sub>3-2z</sub> Mg <sub>3z</sub> Si <sub>1-z</sub> O <sub>4</sub> : E			
NaLi <sub>3</sub> Mg <sub>0</sub> Si <sub>1</sub> O <sub>4</sub>	NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub>	NaLi <sub>3</sub> SiAl <sub>0</sub> P <sub>0</sub> O <sub>4</sub>	NaLiSiO <sub>4</sub>
NaLi <sub>2,8</sub> Mg <sub>0,3</sub> Si <sub>0,9</sub> O <sub>4</sub>		NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>8</sub> Al <sub>0,1</sub> P <sub>0,1</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2,6</sub> Mg <sub>0,6</sub> Si <sub>0,8</sub> O <sub>4</sub>		NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>6</sub> Al <sub>0,2</sub> P <sub>0,2</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2,4</sub> Mg <sub>0,9</sub> Si <sub>0,7</sub> O <sub>4</sub>		NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> Al <sub>0,3</sub> P <sub>0,3</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2,2</sub> Mg <sub>1,2</sub> Si <sub>0,6</sub> O <sub>4</sub>		NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub> Al <sub>0,4</sub> P <sub>0,4</sub> O <sub>4</sub>	
NaLi <sub>2</sub> Mg <sub>1,5</sub> Si <sub>0,5</sub> O <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> Li <sub>4</sub> Mg <sub>3</sub> SiO <sub>8</sub>	NaLi <sub>3</sub> SiOAl <sub>0,5</sub> P <sub>0,5</sub> O <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> Li <sub>6</sub> Al <sub>0,8</sub> P <sub>0,8</sub> O <sub>8</sub>
NaLi <sub>1,8</sub> Mg <sub>1,8</sub> Si <sub>0,4</sub> O <sub>4</sub>			
NaLi <sub>1,6</sub> Mg <sub>2,1</sub> Si <sub>0,3</sub> O <sub>4</sub>			
NaLi <sub>1,4</sub> Mg <sub>2,4</sub> Si <sub>0,2</sub> O <sub>4</sub>			
NaLi <sub>1,2</sub> Mg <sub>2,7</sub> Si <sub>0,1</sub> O <sub>4</sub>			
NaLi <sub>1</sub> Mg <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub>	NaLiMg <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		

FIG 2

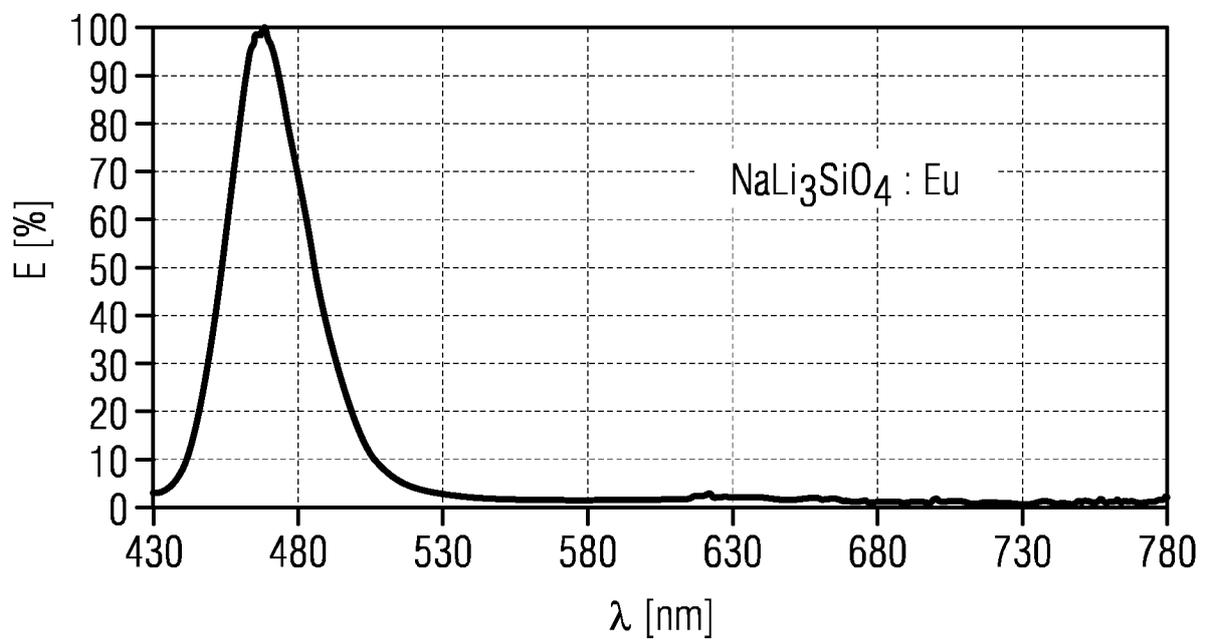


FIG 3

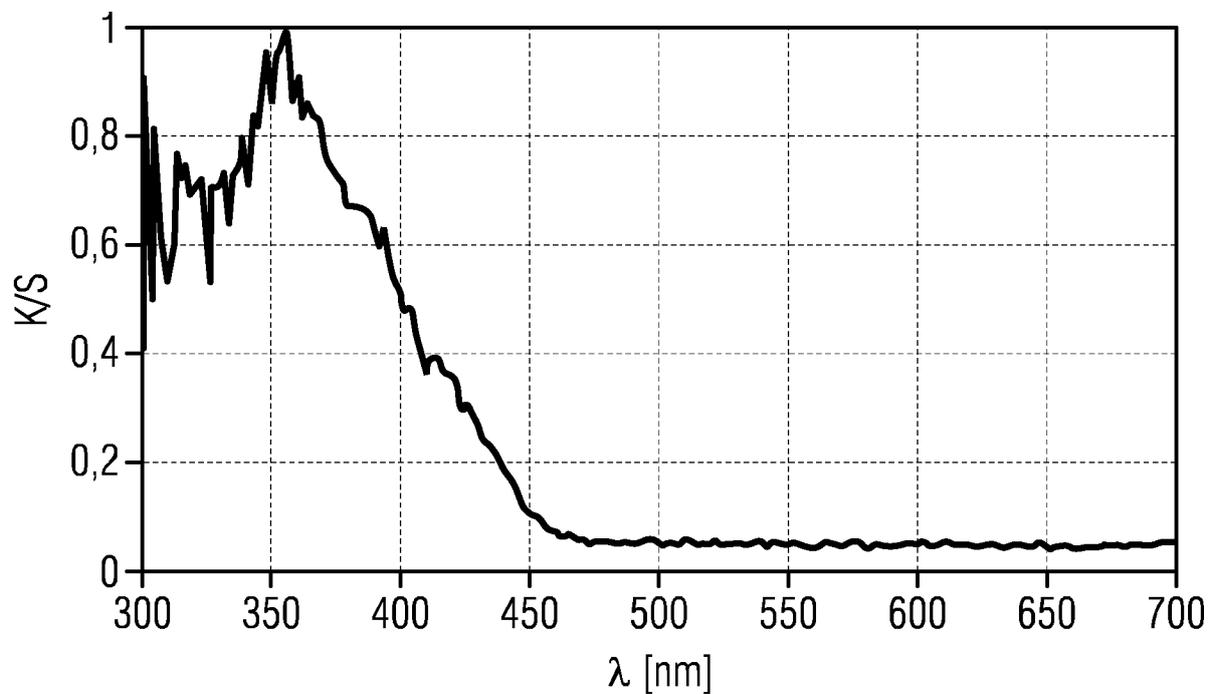


FIG 4

		FHWM/ 1/cm	$\lambda_{\text{peak}}$ /nm	$\lambda_{\text{dom}}$ /nm	LER/ lm/W
VB1	BaMgAl <sub>10</sub> O <sub>17</sub> : Eu	2524	452	465	64
VB2	Si <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl: Eu	1516	449	457	45
VB3	BaMgAl <sub>10</sub> O <sub>17</sub> : Eu	2646	457	471	100
AB1	NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> : Eu	1477	469	473	105

FIG 5

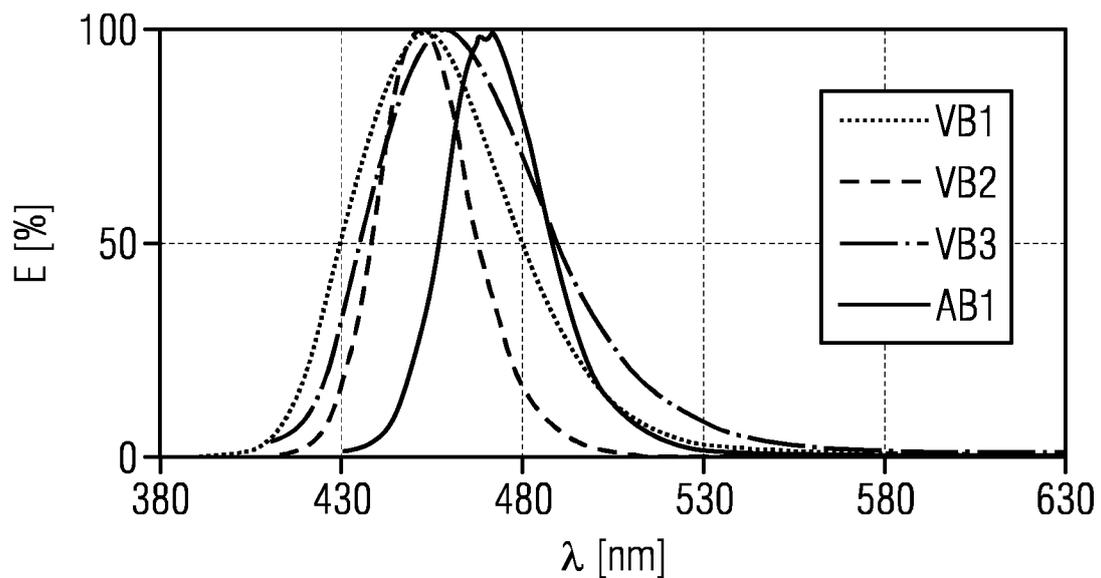


FIG 6

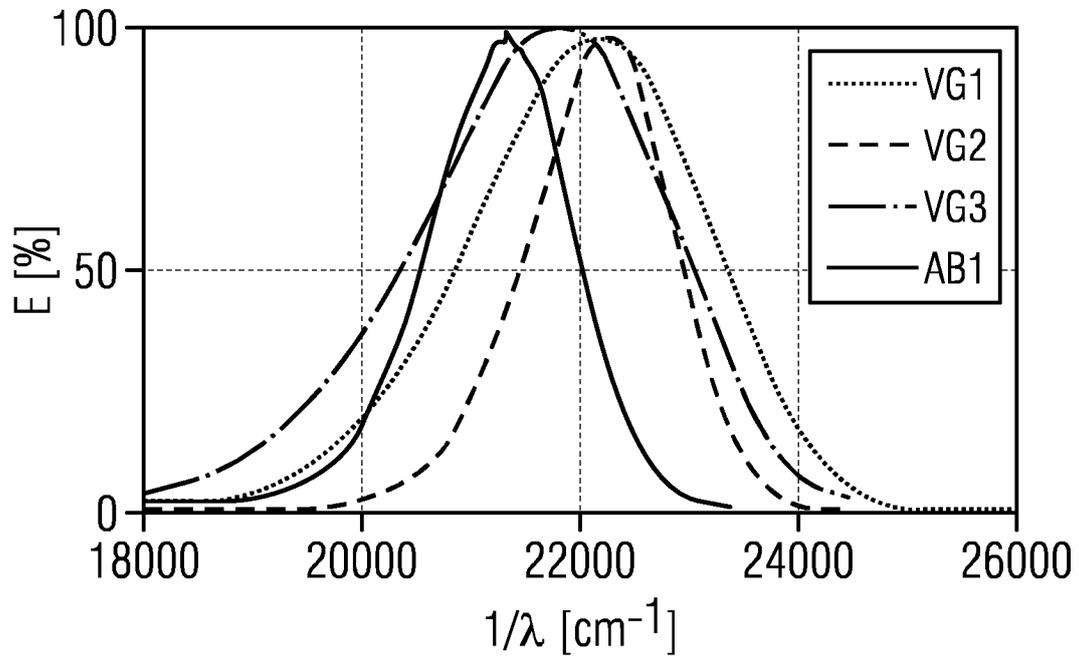


FIG 7

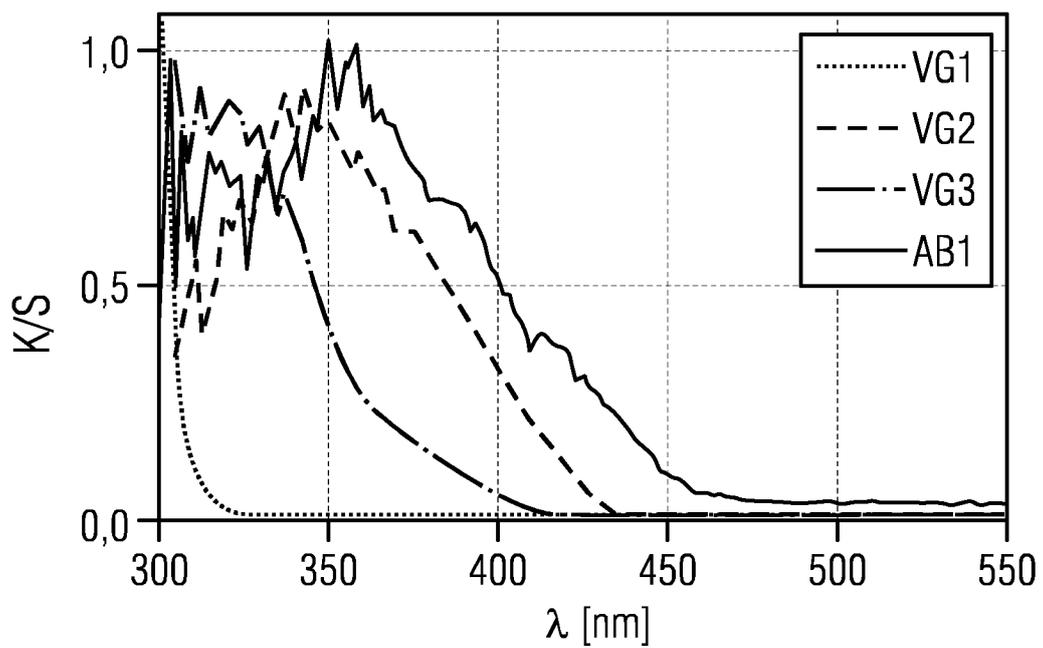


FIG 8

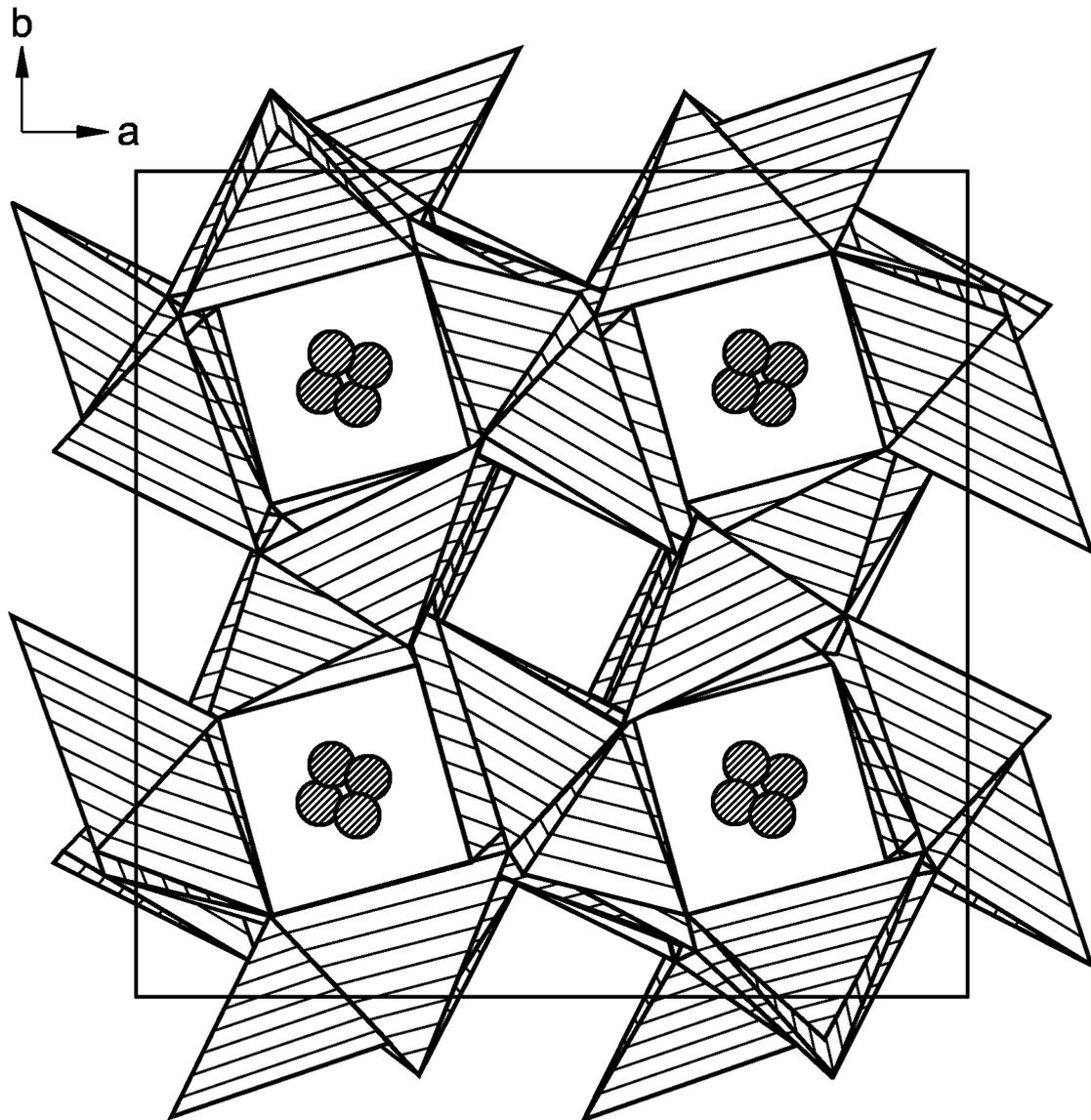


FIG 9

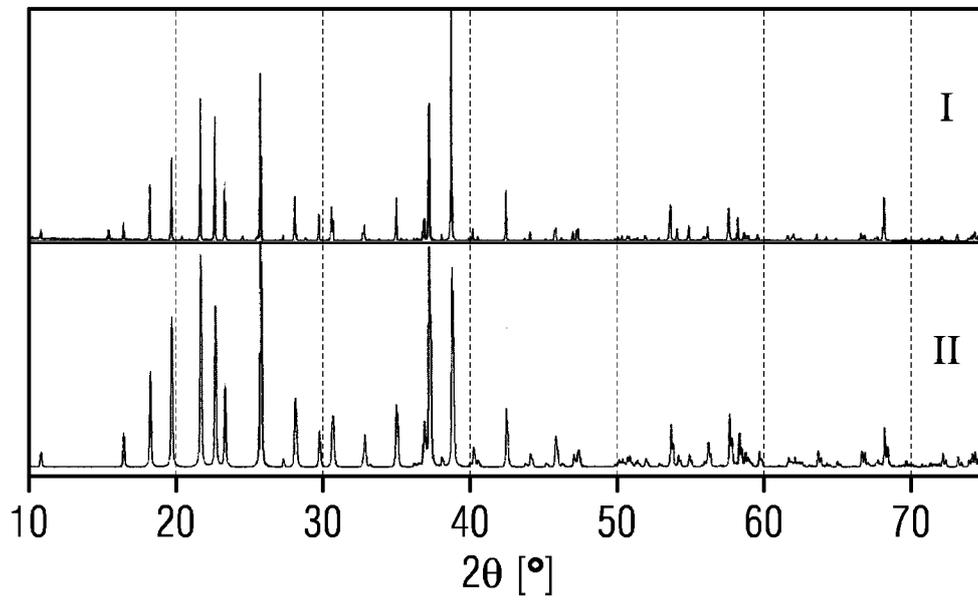
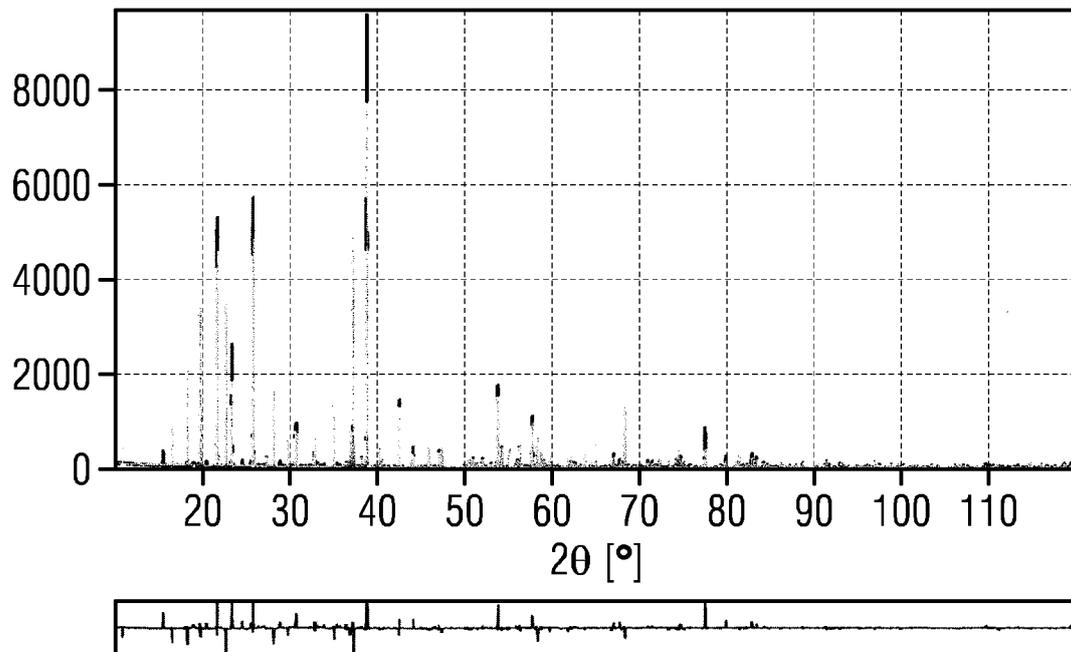


FIG 10



## FIG 11

Summenformel	NaLi <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub>
M/g x mol <sup>-1</sup>	135.88
Kristallsystem	tetragonal
Raumgruppe	/4 <sub>1</sub> /a (no 88)
d/Å	10.77889(7)
c/Å	12.64137(8)
Zellvolumen/Å <sup>3</sup>	1468.73
Z	16
Dichte/g x cm <sup>-3</sup>	2,46
T/K	293(2)
Diffractometer	PANalytical Empyrean
Strahlung	Cu-Ka <sub>1</sub> ( $\lambda = 1.540598$ )
Messbereich	10 < 2 $\theta$ < 120
	0 ≤ h ≤ 12
	0 ≤ k ≤ 12
	0 ≤ l ≤ 14
unabhängige Reflexe	546
R <sub>p</sub>	0.1240
R <sub>wp</sub> ; R <sub>exp</sub>	0.1623; 0.0938
Goof	1.730

## FIG 12

Atom	x	y	z	Besetzung
Si1	0.0385	0.0687	0.3054	1
Na1	0.2642	0.0285	0.1556	1
Li1	0.0307	0.0920	0.0640	1
Li2	0.0210	0.0934	0.5557	1
Li3	0.3661	0.2520	0.0722	1
O1	0.1730	0.1993	0.0476	1
O2	0.4625	0.1023	0.0876	1
O3	0.1620	0.1529	0.2962	1
O4	0.1739	0.1689	0.5668	1

FIG 13

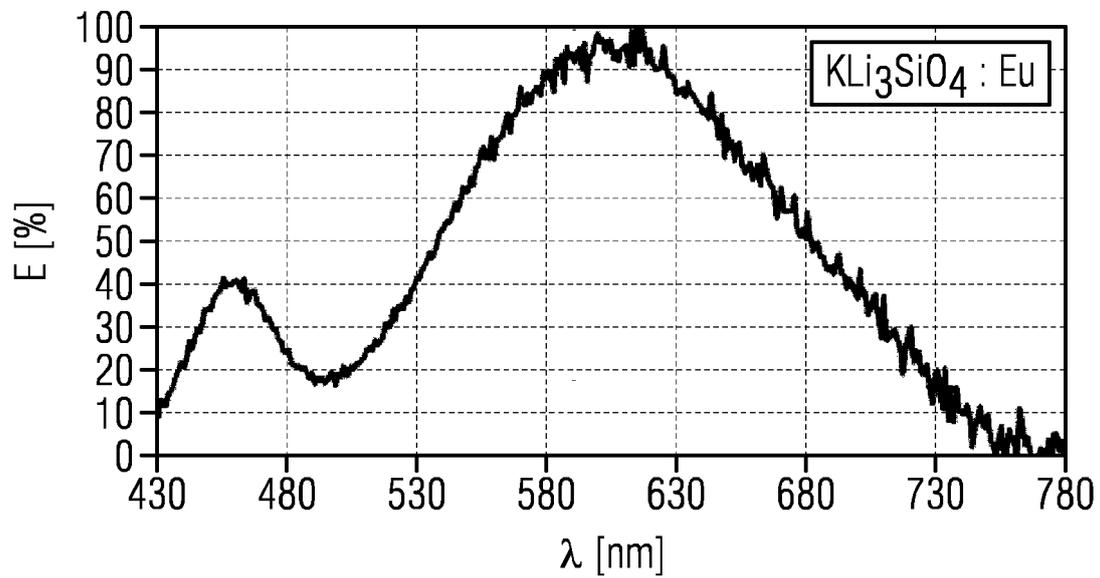


FIG 14

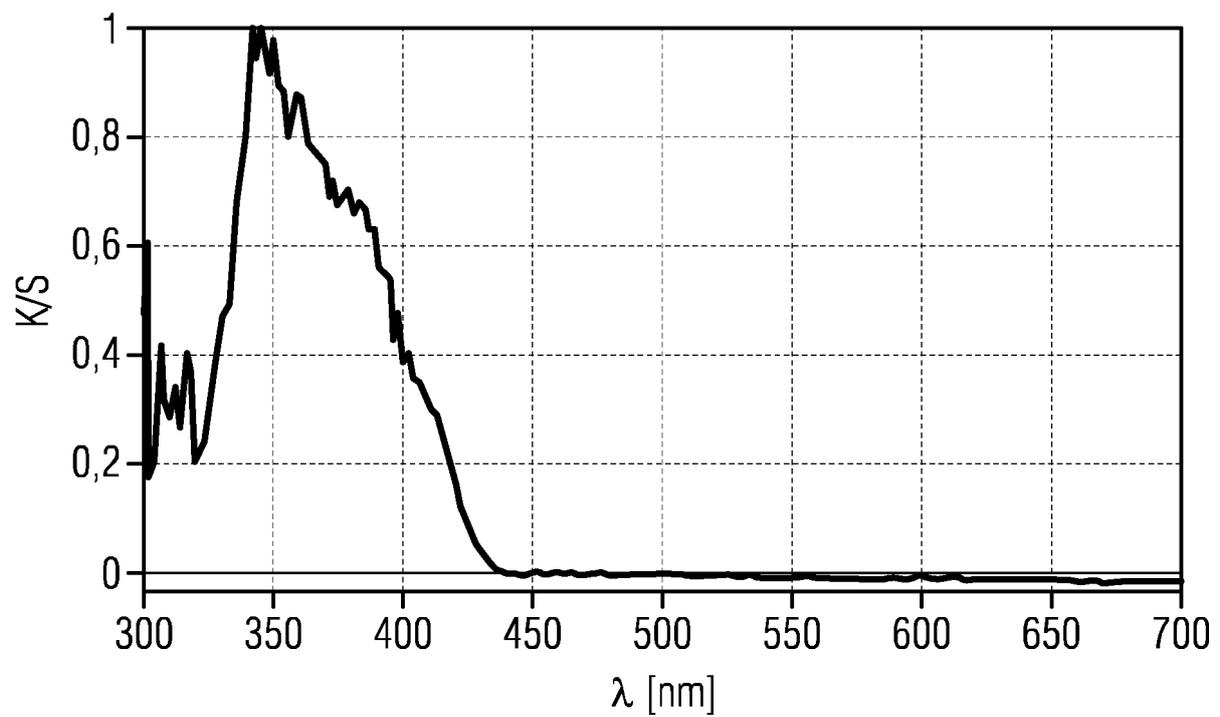


FIG 15

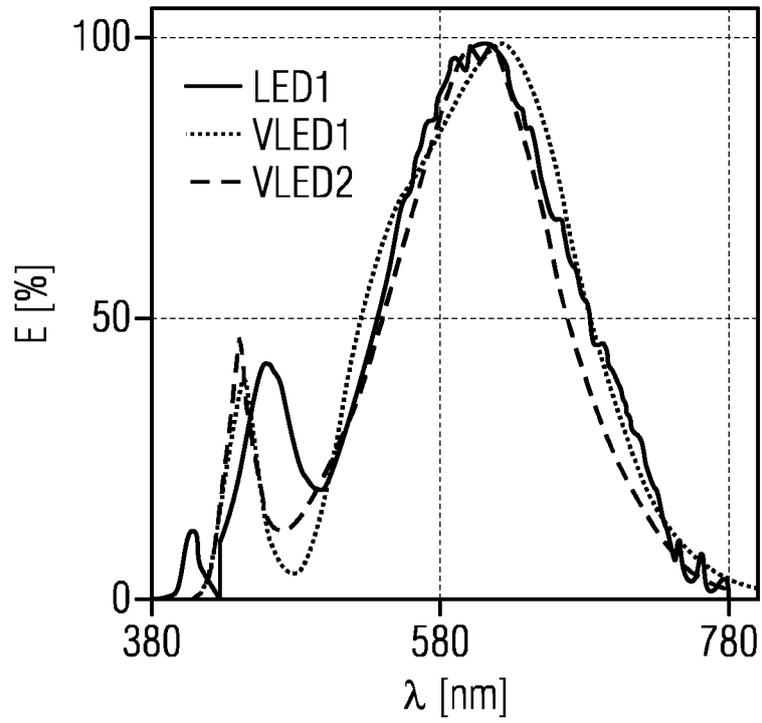


FIG 16

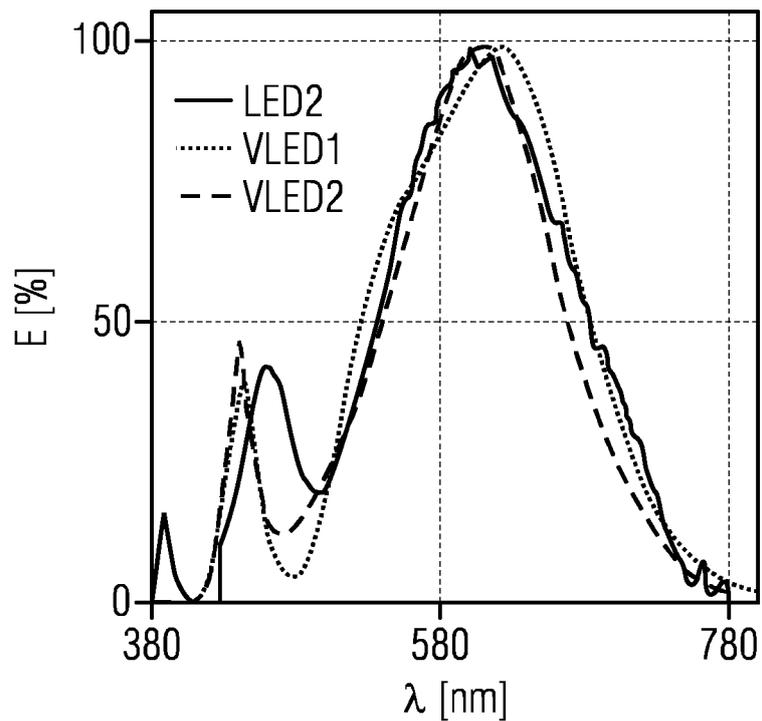


FIG 17

LED	$\lambda_{\text{prim}}/\text{nm}$	1. Leuchtstoff	2. Leuchtstoff	CIE-x	CIE-y	CCT/K	CRI	R9	LER/ lm/W
VLED1	445	(Lu,Y) <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce	CaAlSiN <sub>3</sub> :Eu	0,461	0,420	2755	81	36	296
VLED2	441	Lu <sub>3</sub> (Al,Ga) <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce	(Ca,Sr,Ba) <sub>2</sub> Si <sub>5</sub> N <sub>8</sub> :Eu	0,458	0,400	2639	81	14	299
LED1	410	KLi <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> :Eu		0,449	0,396	2744	81	21	286
LED2	390	KLi <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> :Eu		0,450	0,397	2741	81	21	286

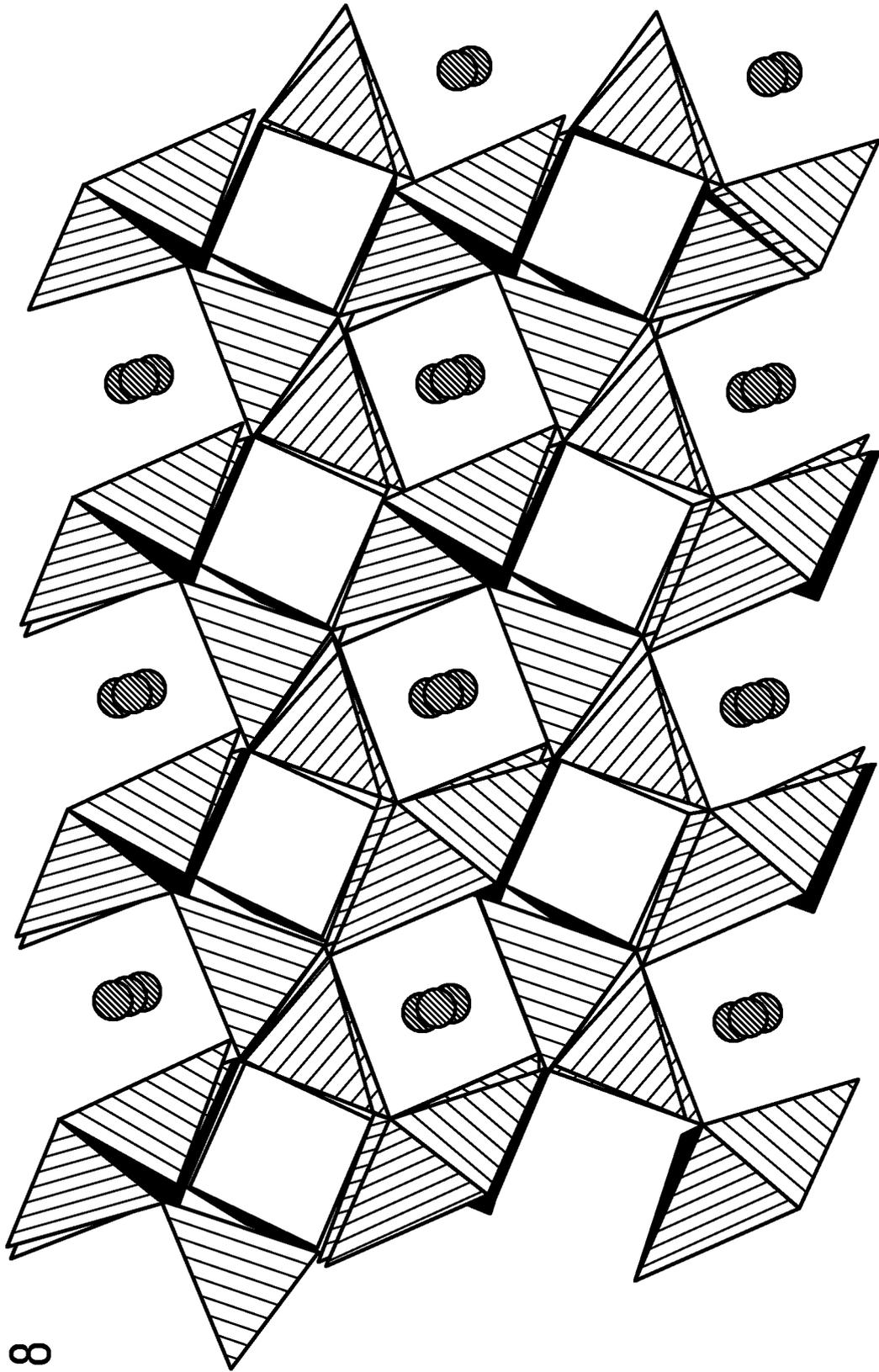


FIG 18

FIG 19

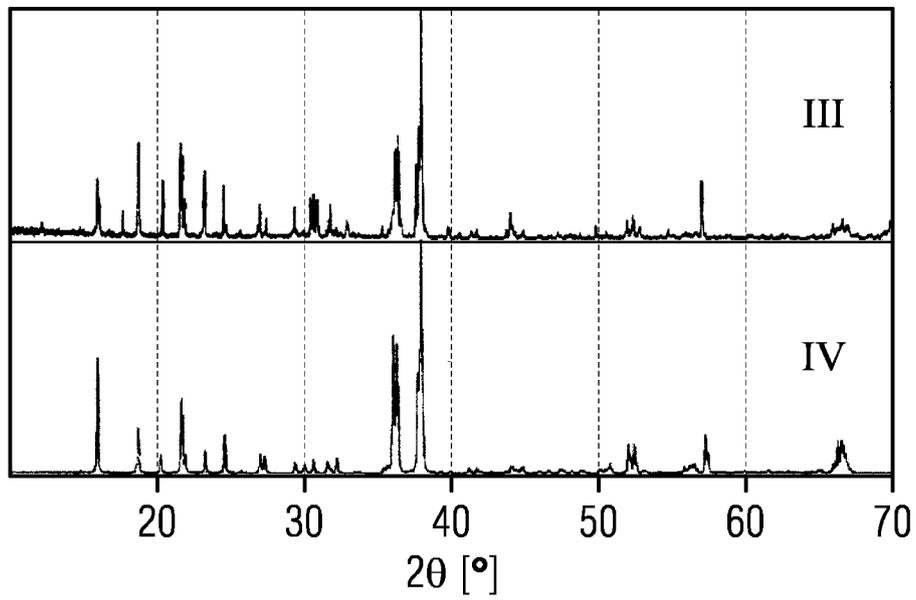
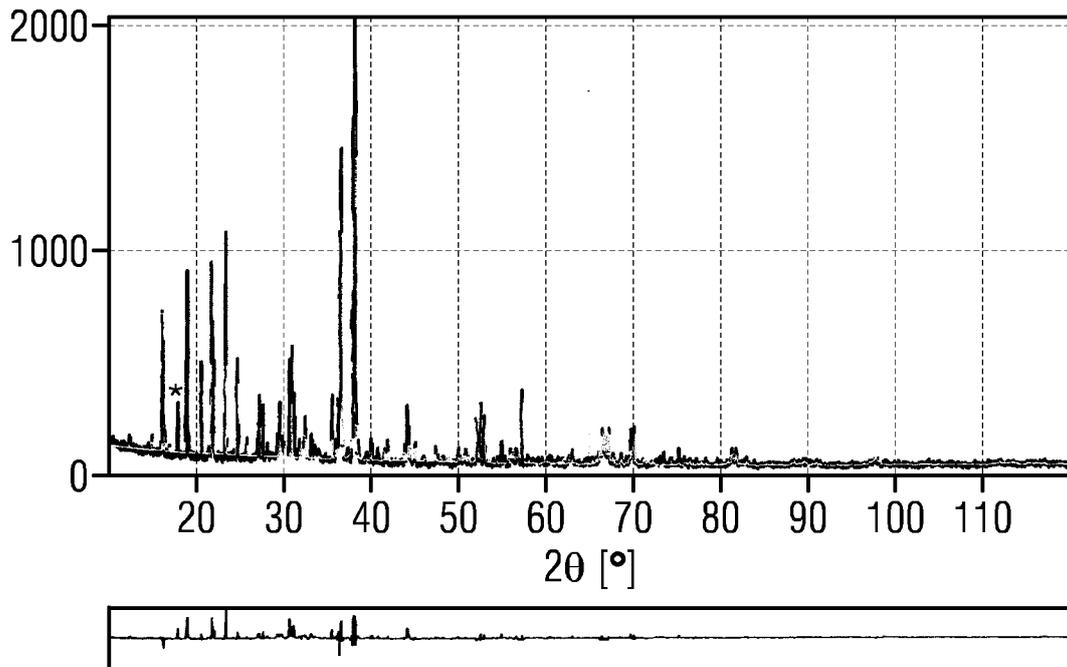


FIG 20



## FIG 21

Summenformel	$\text{KLi}_3\text{SiO}_4$
M/g x mol <sup>-1</sup>	151.99
Kristallsystem	trikein
Raumgruppe	P-1 (no 2)
a/Å	5.7048(2)
b/Å	7.3583(2)
c/Å	9.7299(2)
$\alpha/^\circ$	83.38572(6)
$\beta/^\circ$	76.33540(8)
$\gamma/^\circ$	79.95622(8)
Zellvolumen/Å <sup>3</sup>	389.626
Z	4
Dichte/g x cm <sup>-3</sup>	2.59
T/K	293(2)
Diffraktometer	PANalytical Empyrean
Strahlung	Cu-Ka <sub>1</sub> ( $\lambda = 1.540598$ )
Messbereich	$10 < 2\theta < 120$
	$-6 \leq h \leq 6$
	$-8 \leq k \leq 8$
	$0 \leq l \leq 10$
unabhängige Reflexe	1160
R <sub>p</sub>	0.1767
R <sub>wp</sub> ; R <sub>exp</sub>	0.2356; 0.1147
Goof	2.054

## FIG 22

Atom	x	y	z	Besetzung
K1	0.0015	0.3837	0.8853	1
K2	0.0458	0.1423	0.6281	1
Si1	0.4409	0.7898	0.1347	1
Si2	0.8351	0.2933	0.3512	1
Li1	0.1887	0.4454	0.3960	1
Li2	0.1999	0.1723	0.1452	1
Li3	0.4368	0.0492	0.3770	1
Li4	0.4801	0.3258	0.6107	1
Li5	0.5321	0.4223	0.1295	1
Li6	0.7997	0.0608	0.1036	1
O1	0.1385	0.2057	0.3474	1
O2	0.1917	0.9327	0.0942	1
O3	0.1970	0.4883	0.5897	1
O4	0.3453	0.6097	0.2560	1
O5	0.3819	0.3241	0.0084	1
O6	0.3974	0.1033	0.7791	1
O7	0.6381	0.1623	0.4637	1
O8	0.8178	0.2891	0.1772	1

FIG 23

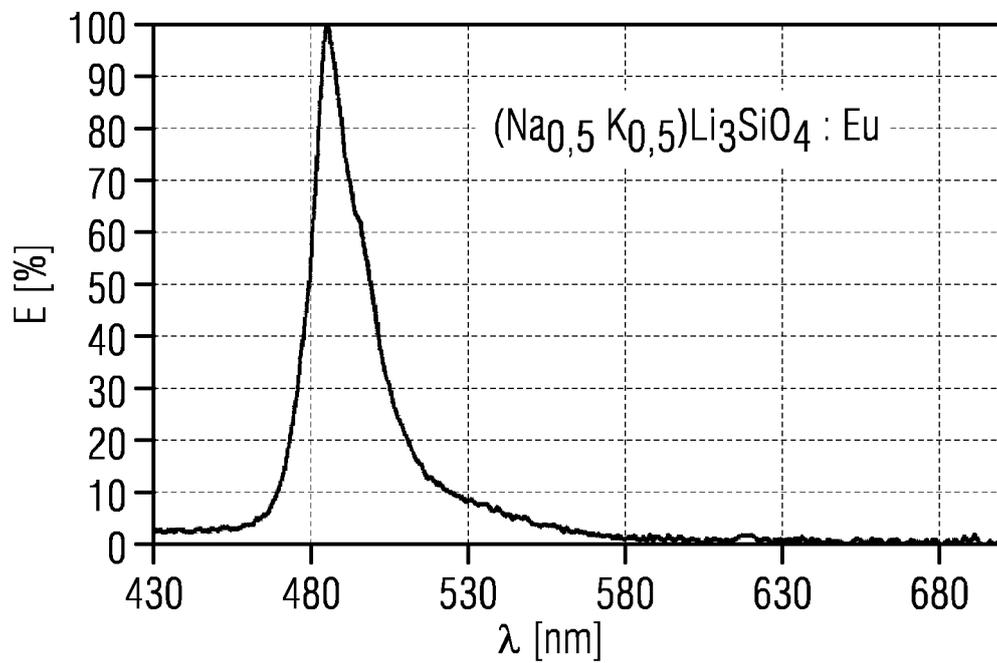


FIG 24

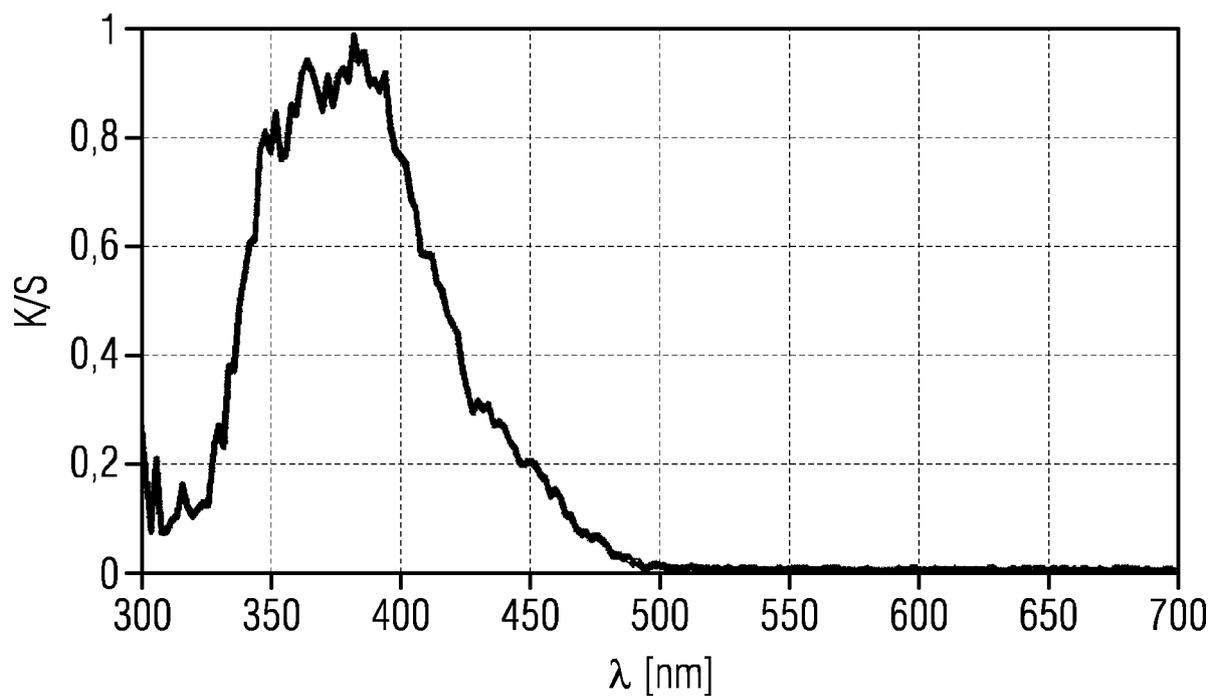


FIG 25

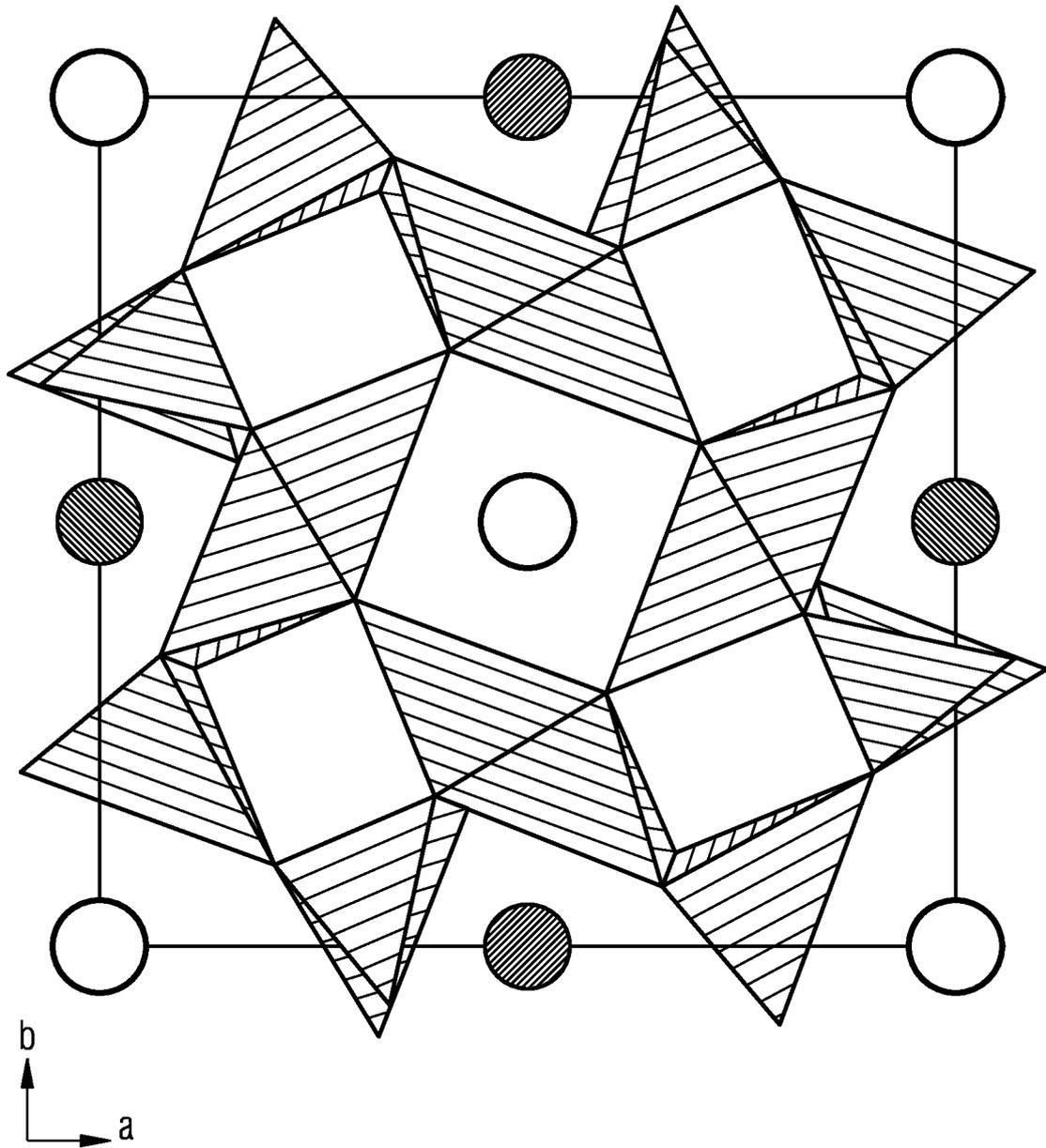
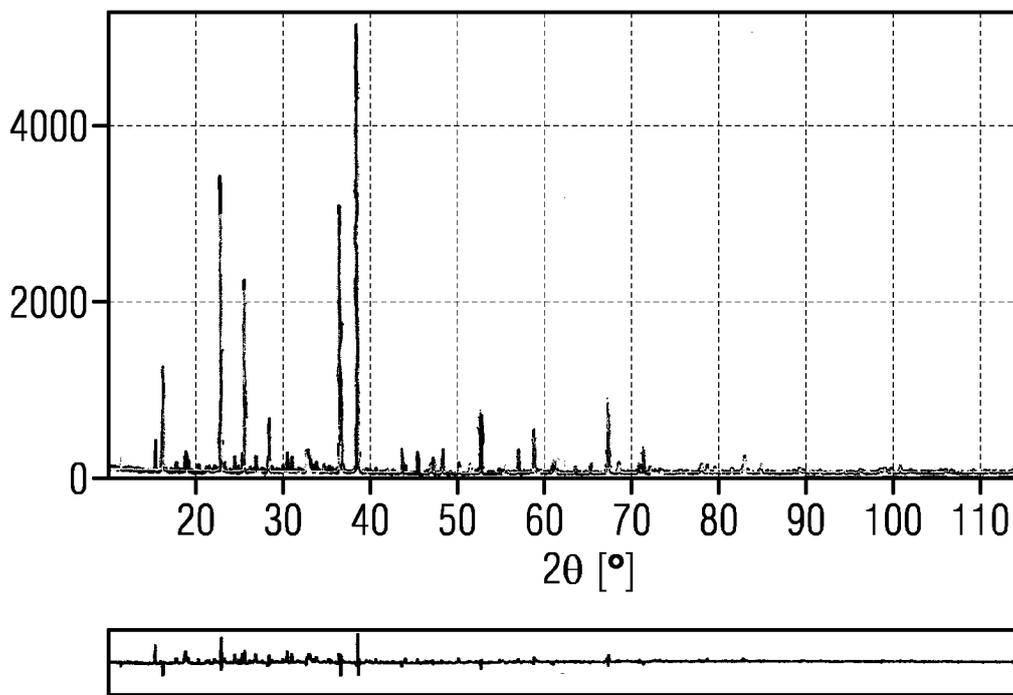


FIG 26



## FIG 27

Summenformel	NaKLi <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
M/g x mol <sup>-1</sup>	288.25
Kristallsystem	tetragonal
Raumgruppe	/4/m (no 87)
d/Å	10.9488(1)
c/Å	6.26376(9)
Zellvolumen/Å <sup>3</sup>	750.88
Z	4
Dichte/g x cm <sup>-3</sup>	2,55
T/K	293(2)
Diffraktometer	PANalytical Empyrean
Strahlung	Cu-Ka <sub>1</sub> ( $\lambda=1.540598$ )
Messbereich	10 < 2 $\theta$ < 120
	0 ≤ h ≤ 12
	0 ≤ k ≤ 12
	0 ≤ l ≤ 7
unabhängige Reflexe	312
R <sub>p</sub>	0.1299
R <sub>wp</sub> ; R <sub>exp</sub>	0.1755; 0.1024
GooF	1.714

FIG 28

Atom	x	y	z	Besetzung
O1	0.2038(2)	0.0920(3)	0.2299(4)	1
O2	0.3927(4)	0.1728(3)	0	1
O3	0.0688(4)	0.3385(4)	0	1
Li1	0.2108	0.4263	0	1
Li2	0.1163	0.2439	0.241800	1
Na1	0	0.5	0.25	1
K1	0	0	0	1
K2	0	0	0.5	1
Si1	0.2794(2)	0.0786(2)	0	1

FIG 29

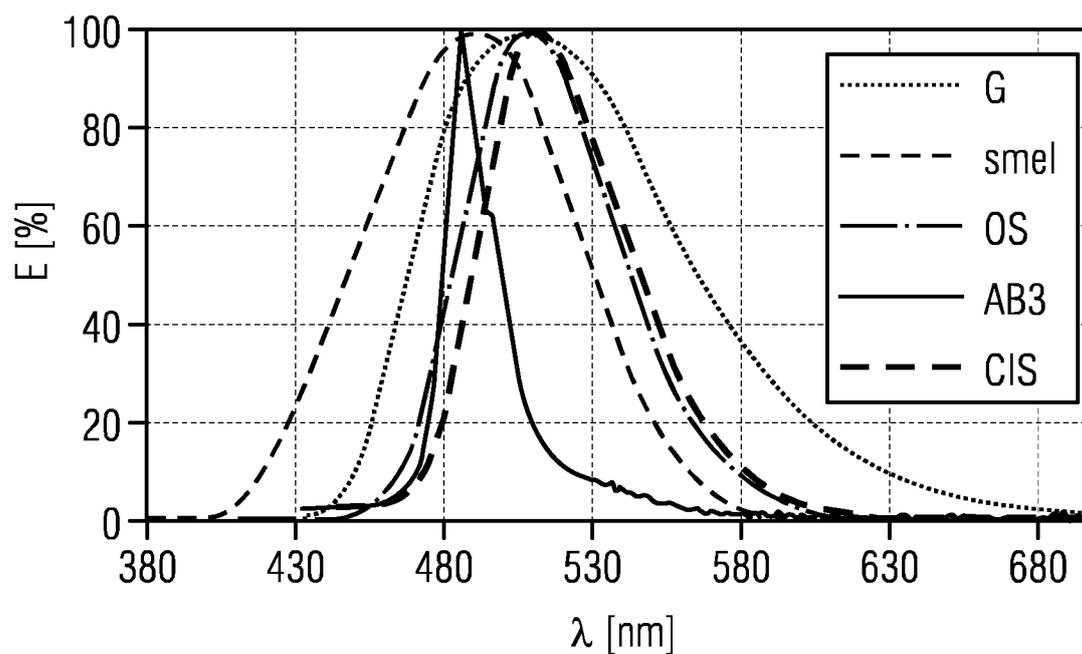


FIG 30

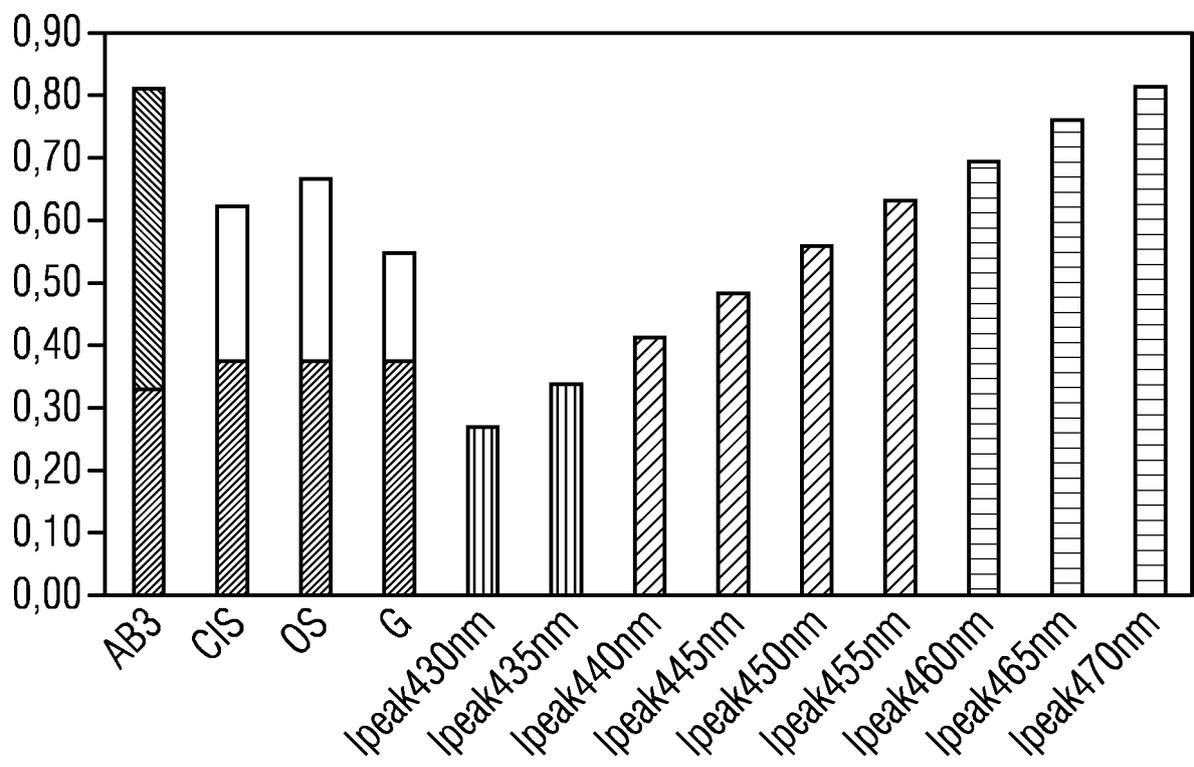


FIG 31

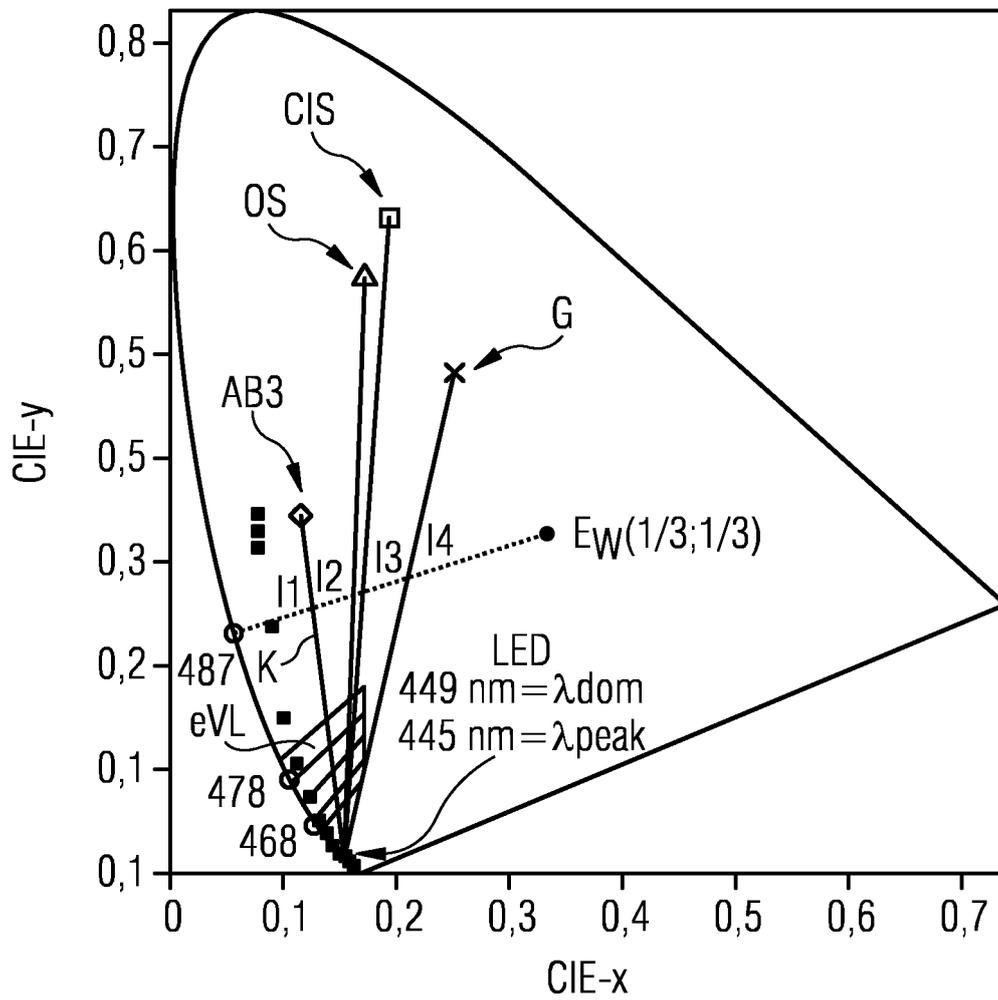


FIG 32

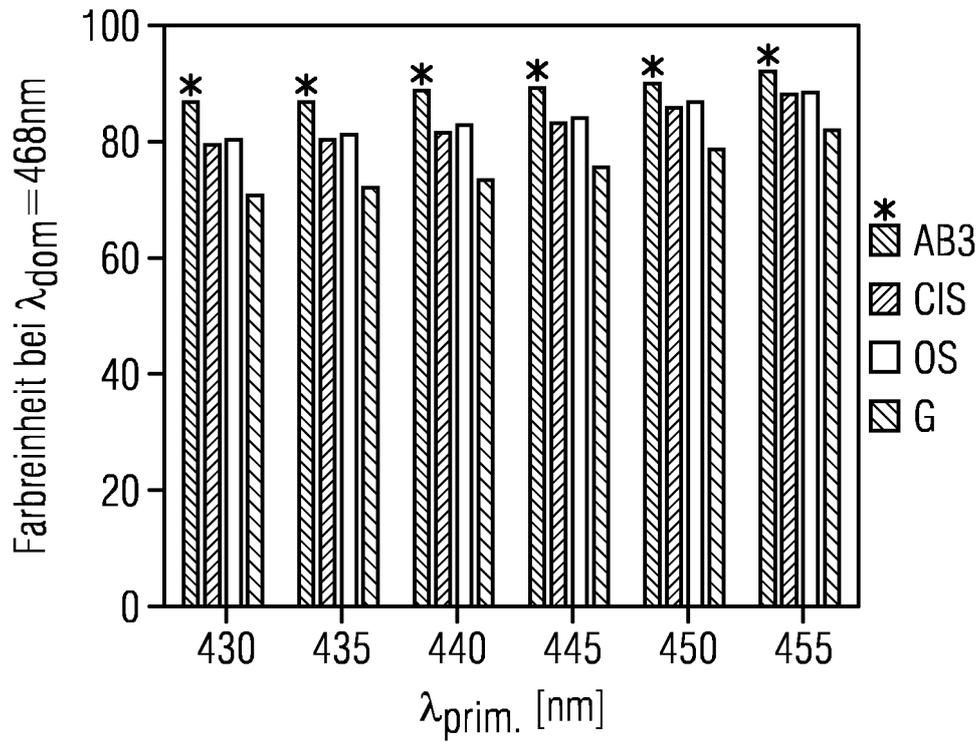


FIG 33

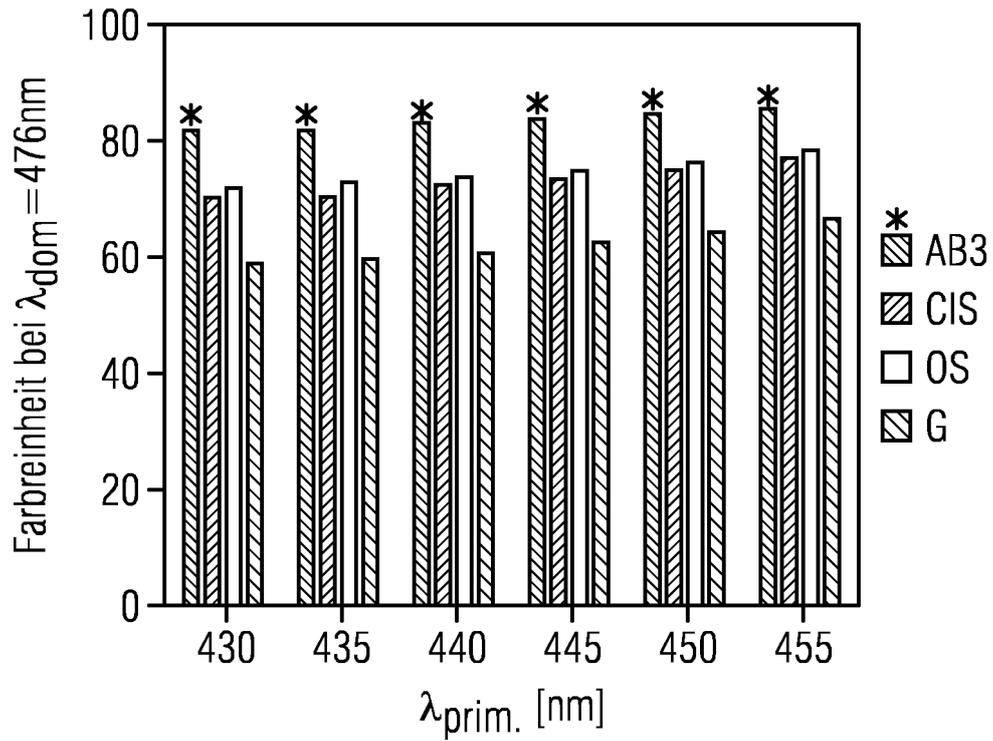


FIG 34

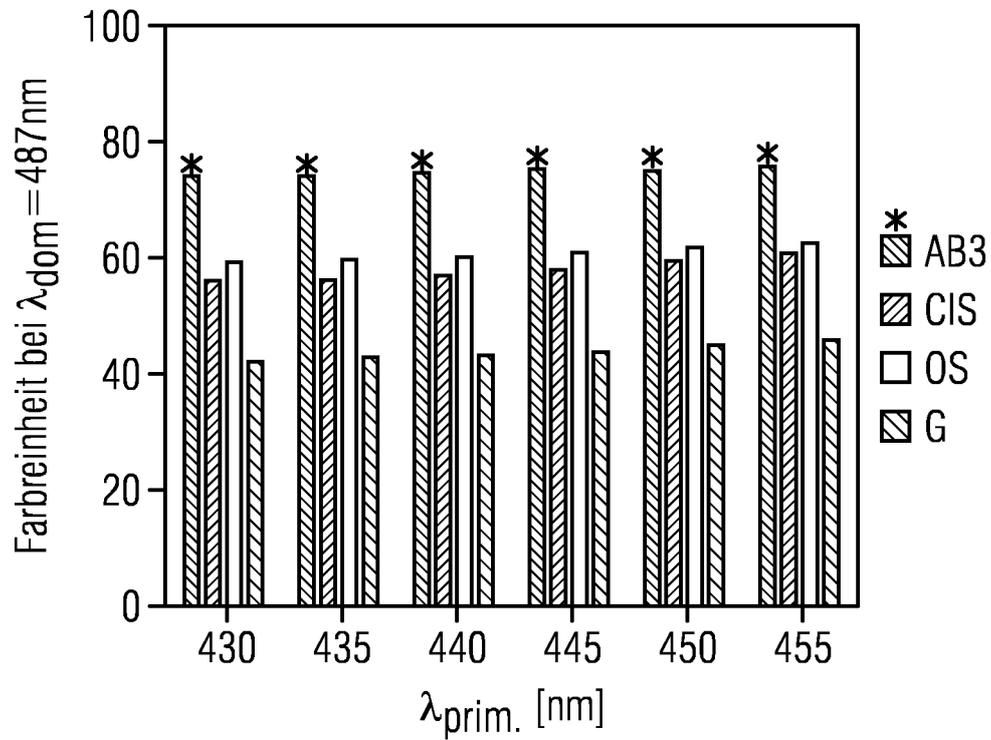


FIG 35

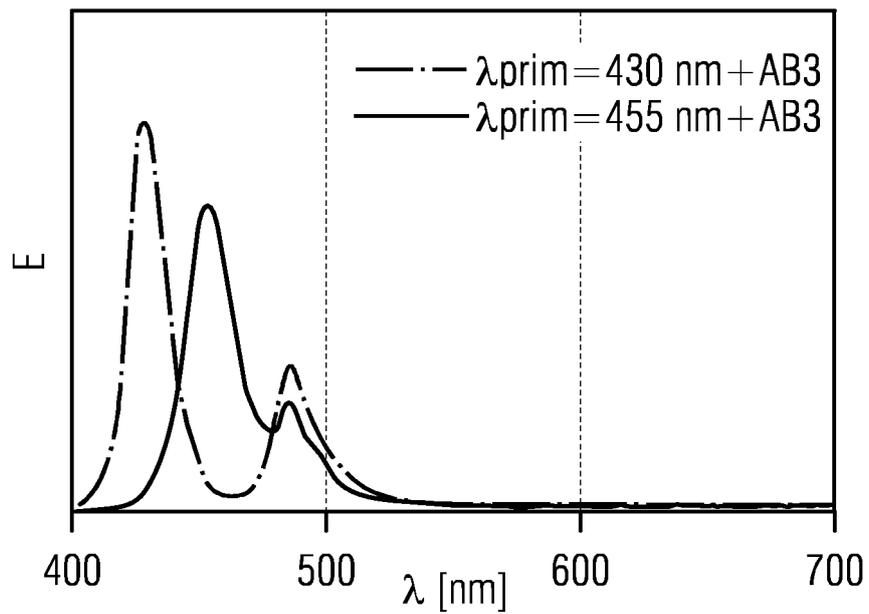


FIG 36

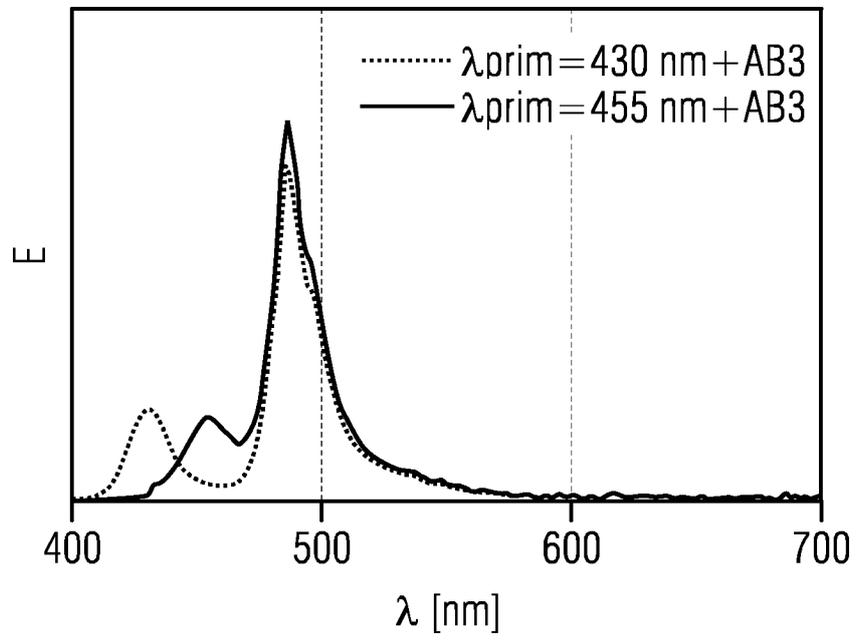


FIG 37

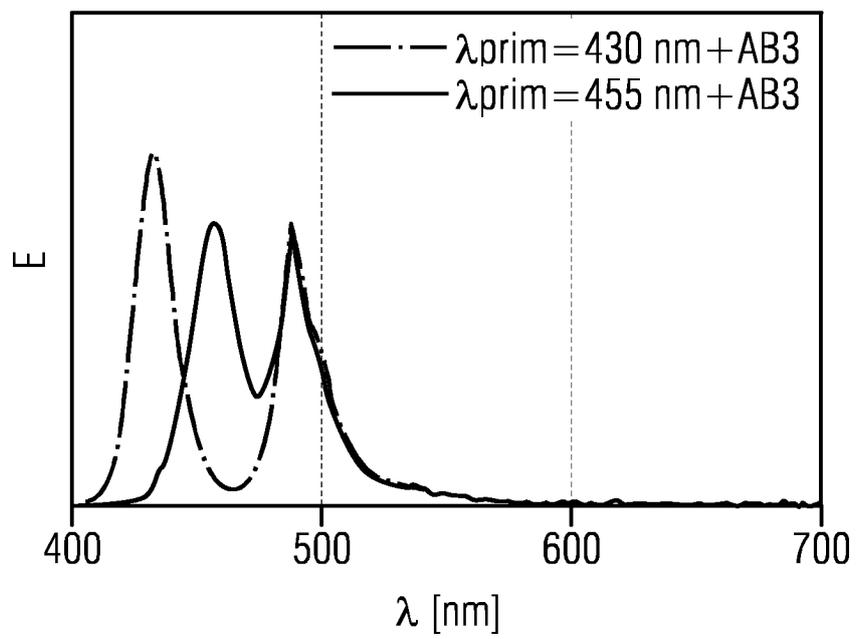


FIG 38

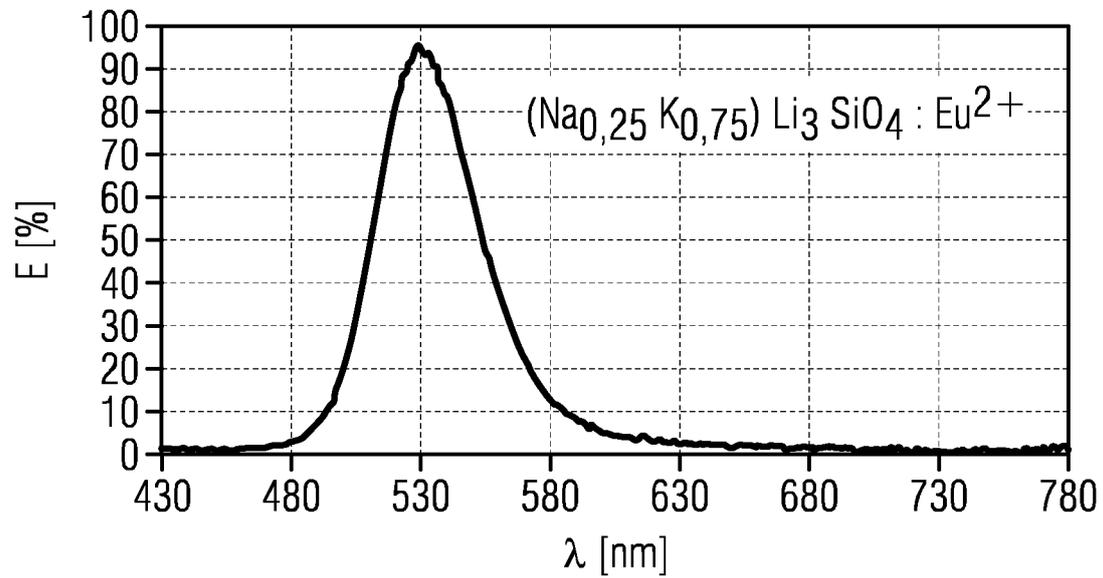


FIG 39

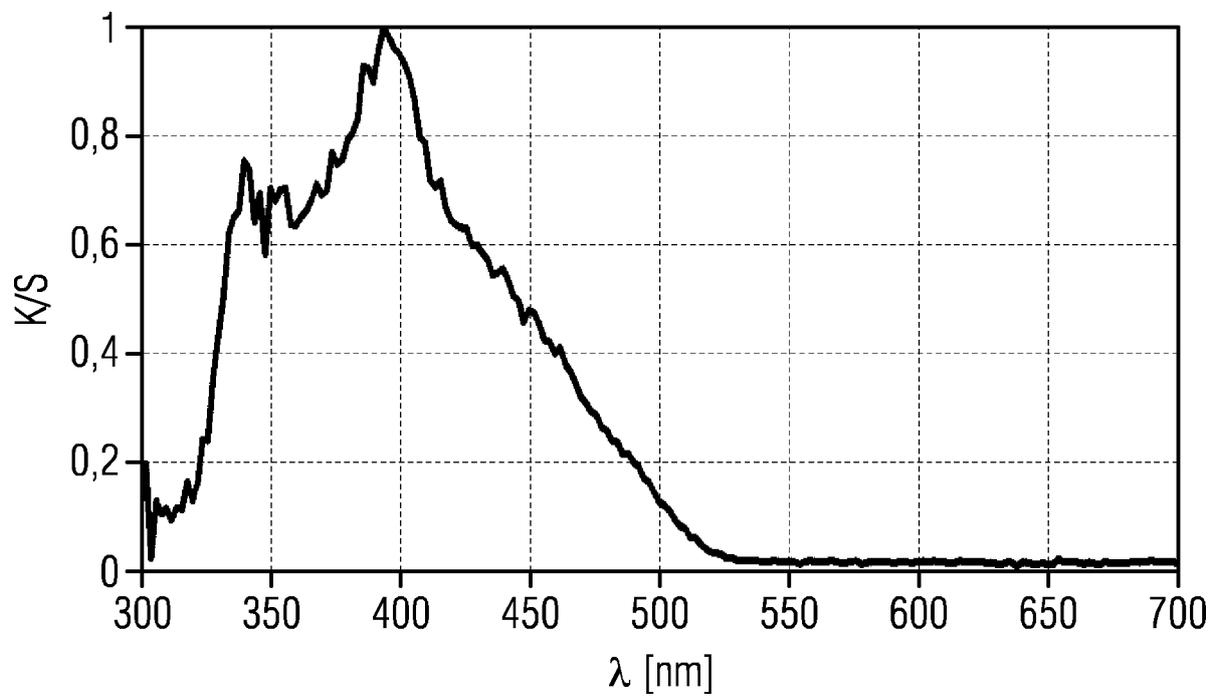
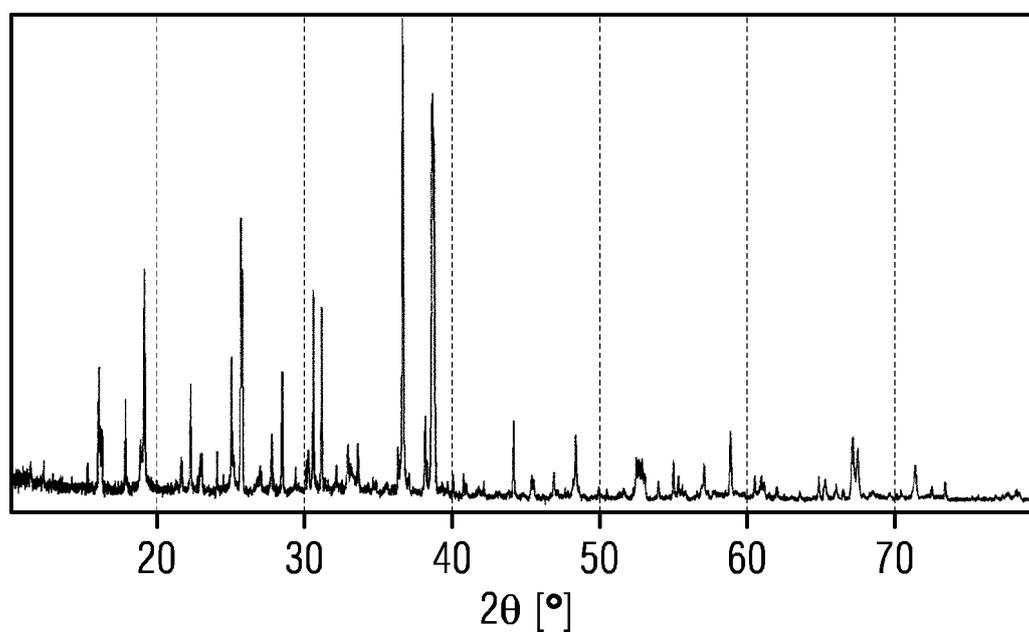


FIG 40



## FIG 41

No.	Pos. / ° 2θ	Rel. Int. / %
1	16,031	14,08
2	17,817	16,07
3	19,111	42,47
4	22,240	17,38
5	22,932	3,38
6	25,009	27,24
7	25,636	48,36
8	25,723	41,59
9	28,447	23,40
10	30,551	43,82
11	31,105	37,48
12	36,612	100,00
13	38,130	14,42
14	38,635	75,76
15	38,745	54,49
16	44,152	13,75
17	48,346	11,24
18	52,470	7,77
19	52,656	6,35
20	52,848	5,80
21	53,025	2,50
22	54,982	7,51
23	58,851	13,29
24	67,123	10,83
25	67,449	9,01
26	71,314	6,12

FIG 42

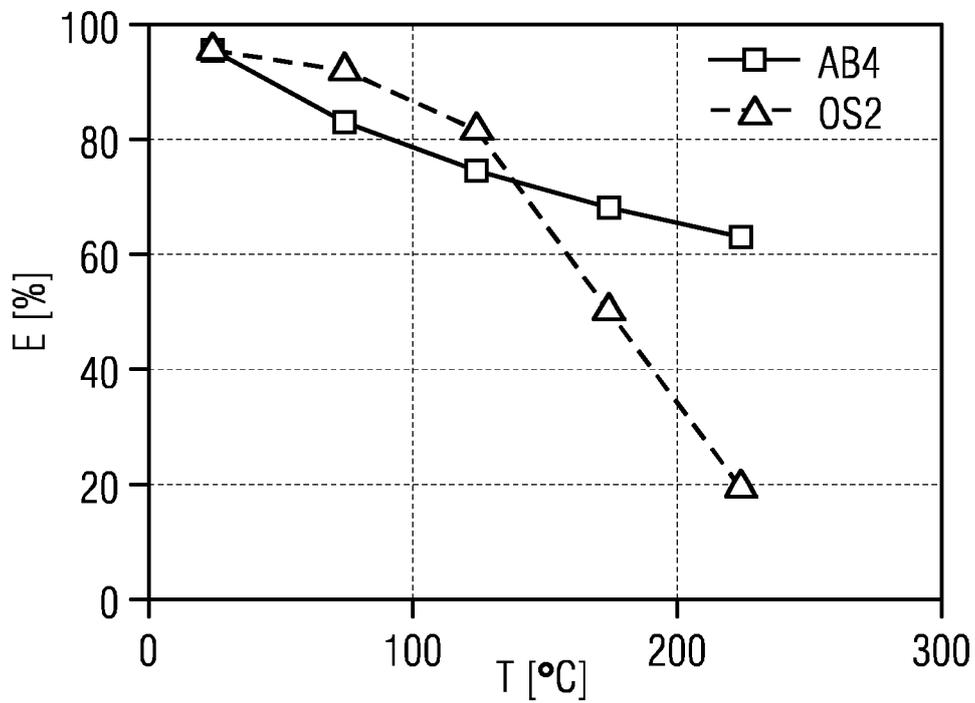


FIG 43

	AB4	G2	OS2
CIE-x:	0,255	0,287	0,263
CIE-y:	0,680	0,536	0,645
LER/lm/W <sub>opt</sub>	529,0	418,6	490,8
$\lambda_{\text{peak}}$ /nm	529	523	522
$\lambda_{\text{dom}}$ /nm	541,4	541,3	541,5
FWHM/nm	45,0	102,0	65,3
Farbreinheit/%	83,9	49,0	75,3

FIG 44

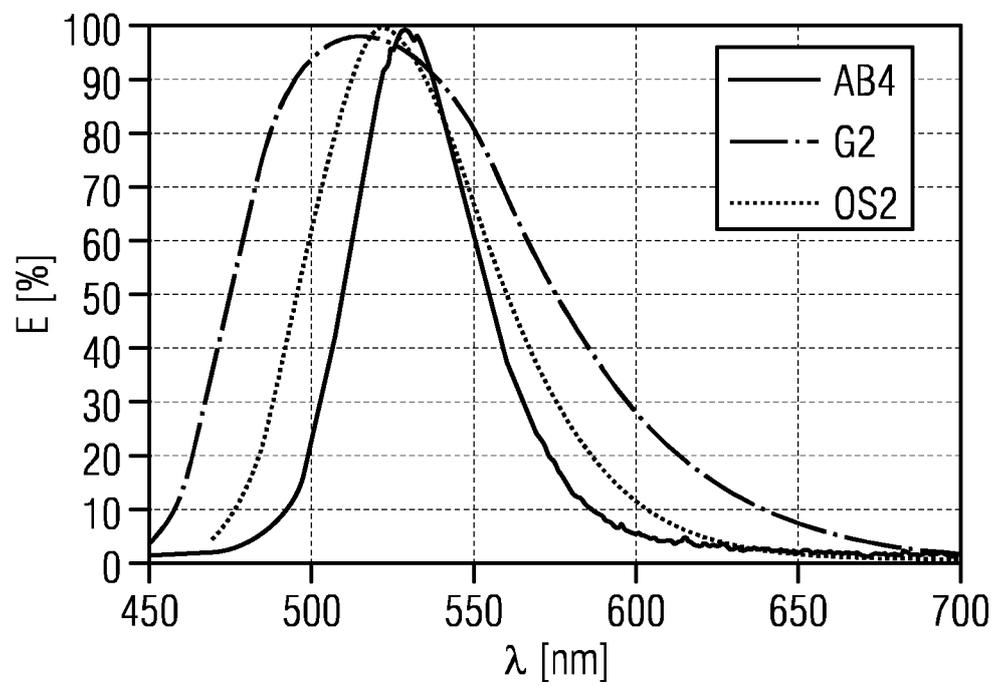


FIG 45

$\lambda$ dom/nm (blau)	1. Leuchtstoff (grün)	2. Leuchtstoff (rot)	Abdeckung des Farbraums rec 2020 (xy)	Abdeckung des Farbraums rec 2020 (u'v')
448	AB4	SrLiAl3N4:Eu	82,4%	85,3%
448	AB5	SrLiAl3N4:Eu	83,6%	85,9%
448	BS	SrLiAl3N4:Eu	72,5%	80,3%
448	AB4	Sr(Sr,Ca)Si2Al2N6:Eu	78,1%	78,3%
448	AB5	Sr(Sr,Ca)Si2Al2N6:Eu	79,1%	78,8%
448	BS	Sr(Sr,Ca)Si2Al2N6:Eu	69,6%	75,4%
448	AB4	K2SiF6:Mn	80,2%	80,2%
448	AB5	K2SiF6:Mn	81,3%	80,6%
448	BS	K2SiF6:Mn	70,9%	77,0%
448	AB4	Mg4GeO5.5F:Mn	82,8%	86,0%
448	AB5	Mg4GeO5.5F:Mn	83,9%	86,4%
448	BS	Mg4GeO5.5F:Mn	72,9%	80,8%
445	AB4	SrLiAl3N4:Eu	82,1%	84,8%
445	AB5	SrLiAl3N4:Eu	83,2%	85,3%
445	BS	SrLiAl3N4:Eu	72,1%	79,5%
445	AB4	Sr(Sr,Ca)Si2Al2N6:Eu	77,8%	77,9%
445	AB5	Sr(Sr,Ca)Si2Al2N6:Eu	78,8%	78,3%
445	BS	Sr(Sr,Ca)Si2Al2N6:Eu	69,3%	74,8%
445	AB4	K2SiF6:Mn	79,8%	79,7%
445	AB5	K2SiF6:Mn	81,0%	80,1%
445	BS	K2SiF6:Mn	70,5%	76,4%
445	AB4	Mg4GeO5.5F:Mn	82,4%	85,4%
445	AB5	Mg4GeO5.5F:Mn	83,6%	85,8%
445	BS	Mg4GeO5.5F:Mn	72,4%	80,0%
455	AB4	SrLiAl3N4:Eu	82,3%	84,7%
455	AB5	SrLiAl3N4:Eu	83,4%	85,2%
455	BS	SrLiAl3N4:Eu	73,2%	81,8%
455	AB4	Sr(Sr,Ca)Si2Al2N6:Eu	77,8%	77,6%
455	AB5	Sr(Sr,Ca)Si2Al2N6:Eu	78,8%	78,0%
455	BS	Sr(Sr,Ca)Si2Al2N6:Eu	69,9%	76,0%
455	AB4	K2SiF6:Mn	80,0%	79,5%
455	AB5	K2SiF6:Mn	81,2%	80,0%
455	BS	K2SiF6:Mn	71,4%	77,8%
455	AB4	Mg4GeO5.5F:Mn	82,7%	85,4%
455	AB5	Mg4GeO5.5F:Mn	83,8%	85,8%
455	BS	Mg4GeO5.5F:Mn	73,6%	82,4%

FIG 46

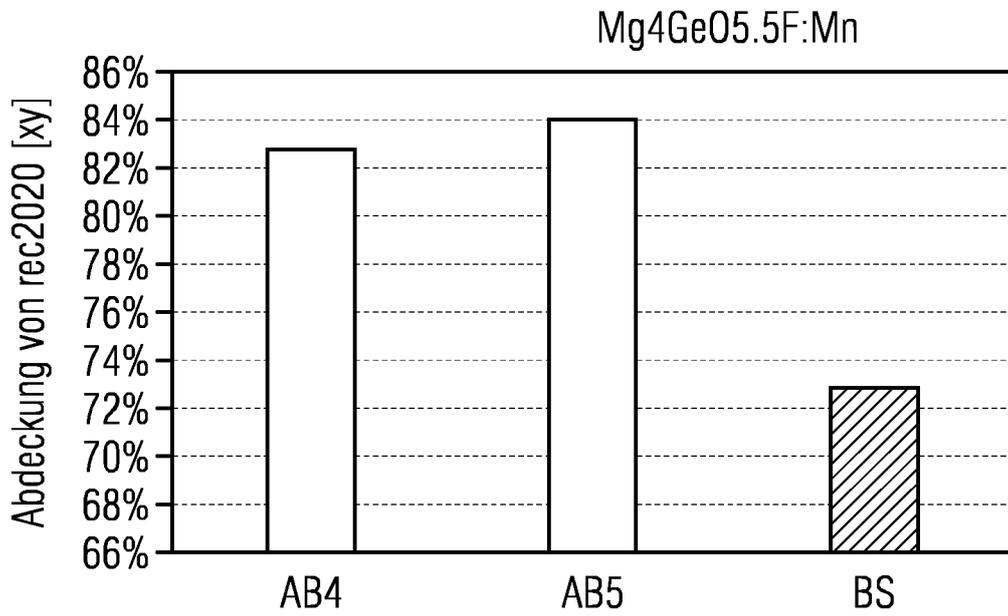


FIG 47

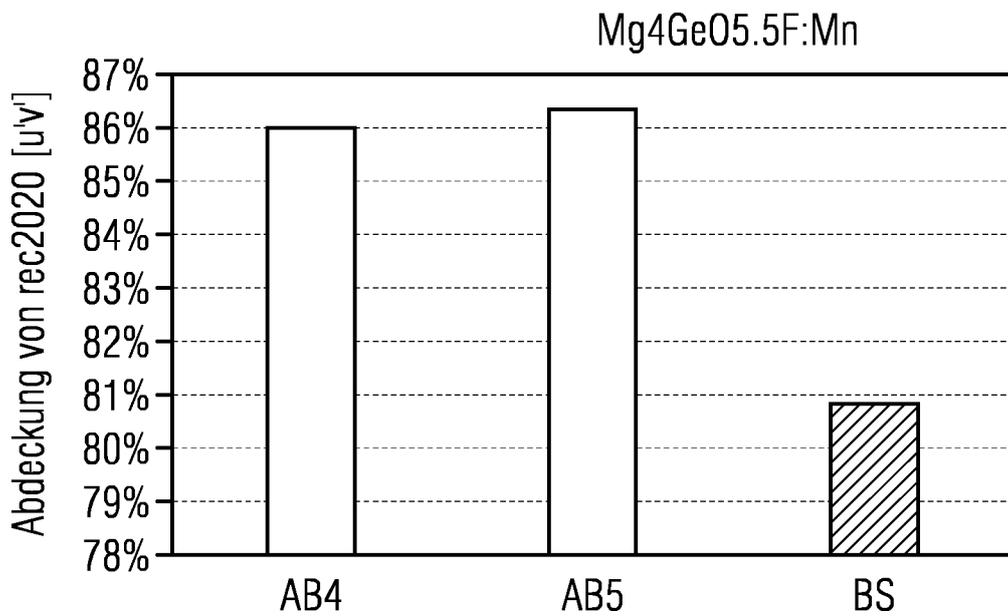


FIG 48

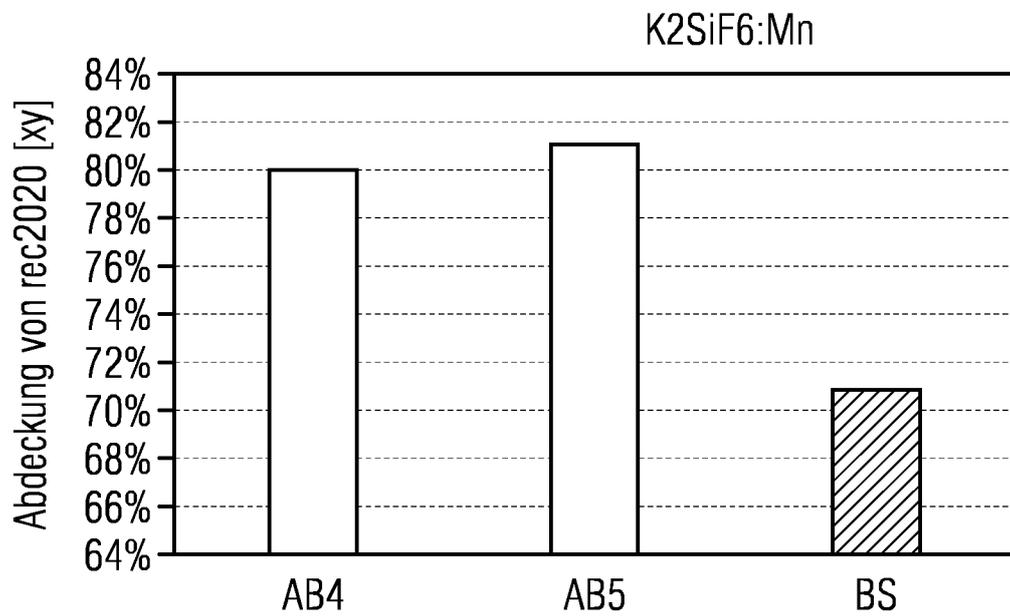


FIG 49

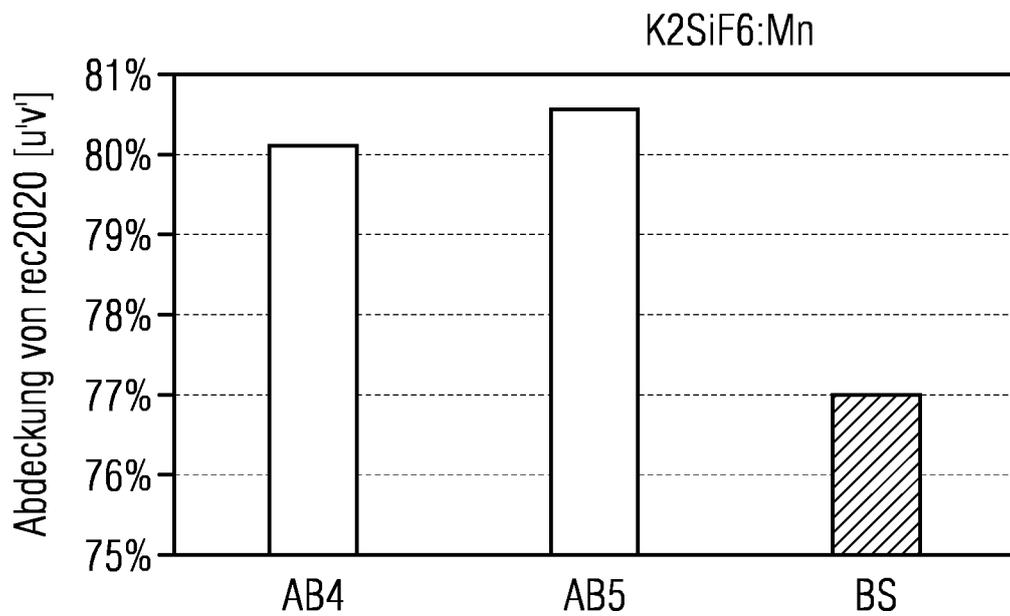


FIG 50

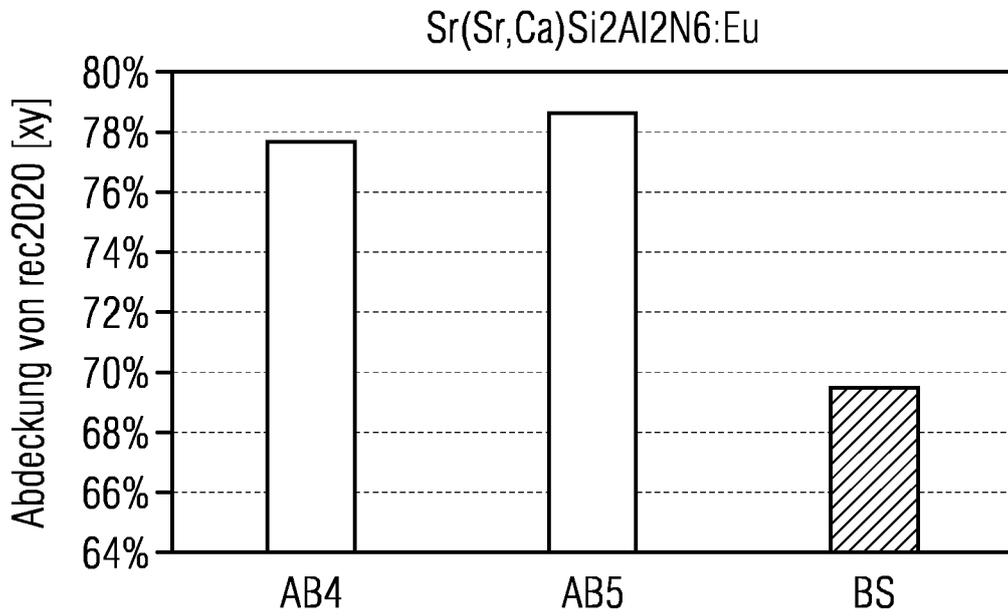


FIG 51

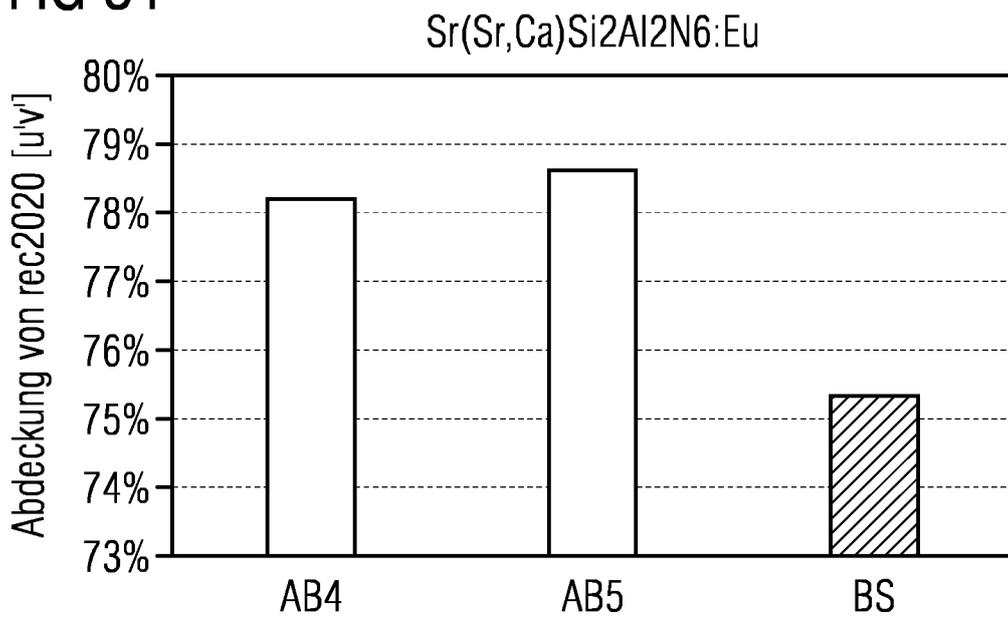


FIG 52

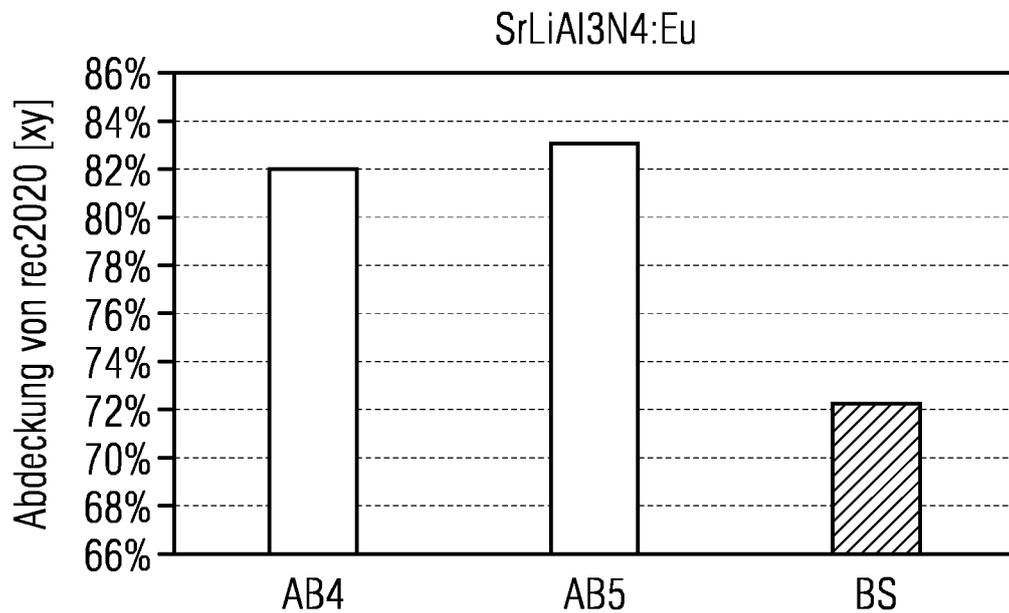


FIG 53

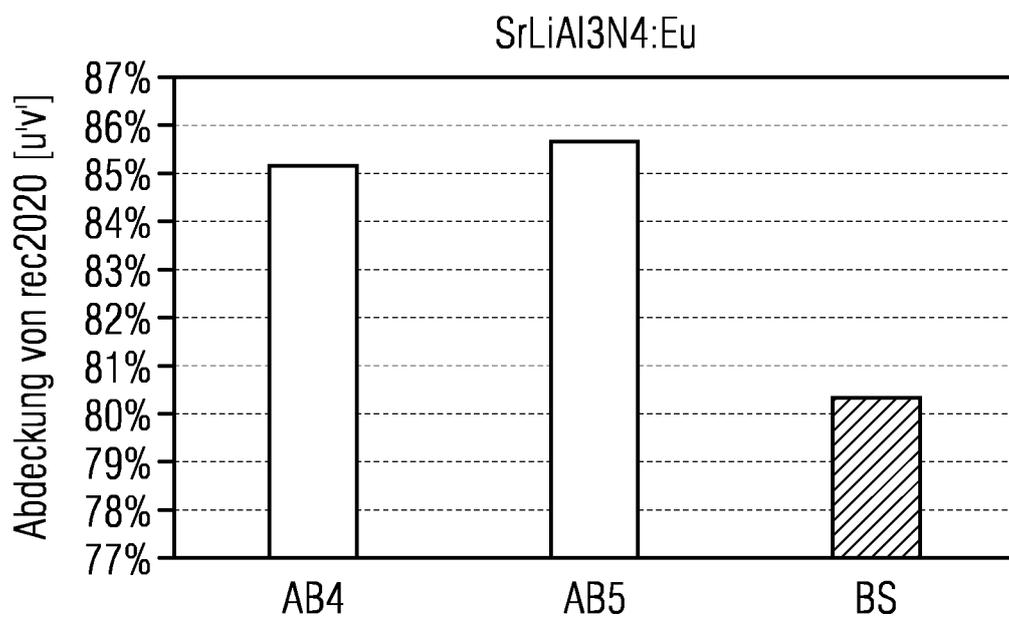


FIG 54A

FIG 54AA
FIG 54AB
FIG 54AC
FIG 54AD

FIG 54AA

blau	grün	rot		ungefiltert	gefiltert rot	gefiltert grün	gefiltert blau	
$\lambda_{dom}=445\text{ nm}$	AB4	$\text{SrLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,703	0,216	0,155	
			CIE y	0,255	0,290	0,724	0,065	
			CIE u'	0,202	0,555	0,077	0,179	
			CIE v'	0,417	0,514	0,579	0,169	
				xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,7%			
			Abdeckung (NTSC)	95,3%	94,5%			
			Abdeckung (Adobe)	98,0%	98,3%			
			Abdeckung (DCI-P3)	97,3%	98,3%			
			Abdeckung (rec2020)	82,1%	84,8%			
			$\lambda_{dom}=445\text{ nm}$	AB4	$\text{Sr}(\text{Sr},\text{Ca})\text{Si}_2\text{Al}_2\text{N}_6:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,685
CIE y	0,255	0,308				0,717	0,062	
CIE u'	0,202	0,514				0,080	0,181	
CIE v'	0,417	0,520				0,579	0,163	
	xy					u'v'		
Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,7%						
Abdeckung (NTSC)	93,5%	93,5%						
Abdeckung (Adobe)	96,0%	97,2%						
Abdeckung (DCI-P3)	97,6%	98,5%						
Abdeckung (rec2020)	77,8%	77,9%						

## FIG 54AB

$\lambda_{\text{dom}} = 445 \text{ nm}$	AB4	$\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,689	0,216	0,155
			CIE y	0,255	0,304	0,724	0,064
			CIE u'	0,202	0,524	0,077	0,180
			CIE v'	0,417	0,519	0,579	0,167
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,7%		
			Abdeckung (NTSC)	95,4%	94,6%		
			Abdeckung (Adobe)	98,0%	98,3%		
			Abdeckung (DCI-P3)	97,6%	98,5%		
			Abdeckung (rec2020)	79,8%	79,7%		
$\lambda_{\text{dom}} = 445 \text{ nm}$	AB4	$\text{Mg}_4\text{GeO}_{5.5}\text{F}:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,706	0,215	0,155
			CIE y	0,255	0,288	0,725	0,065
			CIE u'	0,202	0,560	0,076	0,179
			CIE v'	0,417	0,514	0,579	0,169
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,7%		
			Abdeckung (NTSC)	95,5%	94,6%		
			Abdeckung (Adobe)	98,2%	98,4%		
			Abdeckung (DCI-P3)	97,3%	98,3%		
			Abdeckung (rec2020)	82,4%	85,4%		
$\lambda_{\text{dom}} = 445 \text{ nm}$	AB5	$\text{SrLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,705	0,210	0,155
			CIE y	0,255	0,288	0,731	0,066
			CIE u'	0,202	0,558	0,074	0,179
			CIE v'	0,417	0,514	0,579	0,171
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,7%		
			Abdeckung (NTSC)	96,6%	95,1%		
			Abdeckung (Adobe)	99,2%	98,6%		
			Abdeckung (DCI-P3)	97,5%	98,3%		
			Abdeckung (rec2020)	83,2%	85,3%		
$\lambda_{\text{dom}} = 445 \text{ nm}$	AB5	$\text{Sr}(\text{Sr},\text{Ca})\text{Si}_2\text{Al}_2\text{N}_6:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,685	0,219	0,156
			CIE y	0,255	0,307	0,723	0,063
			CIE u'	0,202	0,516	0,078	0,181
			CIE v'	0,417	0,520	0,579	0,165
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,7%		
			Abdeckung (NTSC)	94,6%	94,1%		
			Abdeckung (Adobe)	97,1%	97,8%		
			Abdeckung (DCI-P3)	97,7%	98,5%		
			Abdeckung (rec2020)	78,8%	78,3%		

FIG 54AC

$\lambda_{\text{dom}} = 445 \text{ nm}$	AB5	$\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,690	0,210	0,155
			CIE y	0,255	0,303	0,731	0,065
			CIE u'	0,202	0,526	0,074	0,179
			CIE v'	0,417	0,519	0,579	0,169
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,9%		99,7%	
			Abdeckung (NTSC)	96,7%		95,2%	
			Abdeckung (Adobe)	99,2%		98,7%	
			Abdeckung (DCI-P3)	97,7%		98,5%	
			Abdeckung (rec2020)	81,0%		80,1%	
$\lambda_{\text{dom}} = 445 \text{ nm}$	AB5	$\text{Mg}_4\text{GeO}_{5.5}\text{F}:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,707	0,209	0,155
			CIE y	0,255	0,286	0,731	0,066
			CIE u'	0,202	0,564	0,074	0,178
			CIE v'	0,417	0,513	0,580	0,172
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,9%		99,6%	
			Abdeckung (NTSC)	96,7%		95,2%	
			Abdeckung (Adobe)	99,3%		98,7%	
			Abdeckung (DCI-P3)	97,4%		96,3%	
			Abdeckung (rec2020)	83,6%		85,8%	
$\lambda_{\text{dom}} = 445 \text{ nm}$	BS	$\text{SrLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,688	0,283	0,159
			CIE y	0,255	0,301	0,687	0,042
			CIE u'	0,202	0,526	0,106	0,200
			CIE v'	0,417	0,518	0,579	0,119
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,2%		97,5%	
			Abdeckung (NTSC)	80,5%		84,6%	
			Abdeckung (Adobe)	82,2%		87,6%	
			Abdeckung (DCI-P3)	93,0%		93,4%	
			Abdeckung (rec2020)	72,1%		79,5%	

FIG 54AD

$\lambda_{\text{dom}} = 445 \text{ nm}$	BS	$\text{Sr}(\text{Sr}, \text{Ca})\text{Si}_2\text{Al}_2\text{N}_6:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,674	0,286	0,159
			CIE y	0,255	0,315	0,684	0,041
			CIE u'	0,202	0,496	0,108	0,201
			CIE v'	0,417	0,522	0,579	0,117
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,1%	97,2%		
			Abdeckung (NTSC)	79,7%	84,1%		
			Abdeckung (Adobe)	81,4%	87,1%		
			Abdeckung (DCI-P3)	92,2%	92,9%		
			Abdeckung (rec2020)	69,3%	74,8%		
$\lambda_{\text{dom}} = 445 \text{ nm}$	BS	$\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,678	0,283	0,159
			CIE y	0,255	0,312	0,687	0,042
			CIE u'	0,202	0,504	0,108	0,200
			CIE v'	0,417	0,521	0,579	0,118
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,2%	97,5%		
			Abdeckung (NTSC)	80,5%	84,7%		
			Abdeckung (Adobe)	82,2%	87,6%		
			Abdeckung (DCI-P3)	93,1%	93,4%		
			Abdeckung (rec2020)	70,5%	76,4%		
$\lambda_{\text{dom}} = 445 \text{ nm}$	BS	$\text{Mg}_4\text{GeO}_{5.5}\text{F}:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,690	0,282	0,159
			CIE y	0,255	0,300	0,688	0,042
			CIE u'	0,202	0,529	0,106	0,200
			CIE v'	0,417	0,517	0,579	0,119
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,2%	97,5%		
			Abdeckung (NTSC)	80,6%	84,7%		
			Abdeckung (Adobe)	82,3%	87,7%		
			Abdeckung (DCI-P3)	93,2%	93,5%		
			Abdeckung (rec2020)	72,4%	80,0%		

## FIG 54B

FIG  
54BAFIG  
54BBFIG  
54BCFIG  
54BD

## FIG 54BA

blau	grün	rot		ungefiltert	gefiltert rot	gefiltert grün	gefiltert blau	
$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	AB4	$\text{SrLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,704	0,215	0,153	
			CIE y	0,255	0,290	0,724	0,064	
			CIE u'	0,202	0,556	0,077	0,177	
			CIE v'	0,417	0,514	0,579	0,167	
				xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	100,0%	99,8%			
			Abdeckung (NTSC)	95,8%	95,2%			
			Abdeckung (Adobe)	98,5%	99,0%			
			Abdeckung (DCI-P3)	97,3%	99,5%			
			Abdeckung (rec2020)	82,4%	85,3%			
$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	AB4	$\text{Sr}(\text{Sr},\text{Ca})\text{Si}_2\text{Al}_2\text{N}_6:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,685	0,224	0,153	
			CIE y	0,255	0,308	0,717	0,062	
			CIE u'	0,202	0,515	0,080	0,179	
			CIE v'	0,417	0,520	0,578	0,162	
				xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	100,0%	99,9%			
			Abdeckung (NTSC)	94,0%	94,1%			
			Abdeckung (Adobe)	96,5%	97,9%			
			Abdeckung (DCI-P3)	97,6%	98,7%			
			Abdeckung (rec2020)	78,1%	78,3%			

## FIG 54BB

$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	AB4	$\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,690	0,215	0,153
			CIE y	0,255	0,304	0,724	0,063
			CIE u'	0,202	0,524	0,076	0,177
			CIE v'	0,417	0,519	0,579	0,165
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	100,0%	99,9%		
			Abdeckung (NTSC)	96,0%	95,3%		
			Abdeckung (Adobe)	98,6%	99,0%		
			Abdeckung (DCI-P3)	97,5%	98,7%		
			Abdeckung (rec2020)	80,2%	80,2%		
$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	AB4	$\text{Mg}_4\text{GeO}_{5.5}\text{F}:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,706	0,214	0,153
			CIE y	0,255	0,287	0,725	0,065
			CIE u'	0,202	0,561	0,076	0,176
			CIE v'	0,417	0,514	0,579	0,168
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	100,0%	99,8%		
			Abdeckung (NTSC)	96,0%	95,3%		
			Abdeckung (Adobe)	98,8%	99,1%		
			Abdeckung (DCI-P3)	97,3%	98,5%		
			Abdeckung (rec2020)	82,8%	86,0%		
$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	AB5	$\text{SrLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,705	0,209	0,153
			CIE y	0,255	0,288	0,730	0,065
			CIE u'	0,202	0,559	0,074	0,176
			CIE v'	0,417	0,514	0,579	0,169
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,8%		
			Abdeckung (NTSC)	97,0%	95,7%		
			Abdeckung (Adobe)	99,6%	99,3%		
			Abdeckung (DCI-P3)	97,4%	98,5%		
			Abdeckung (rec2020)	83,6%	85,9%		
$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	AB5	$\text{Sr}(\text{SrCa})\text{Si}_2\text{Al}_2\text{N}_6:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,686	0,219	0,154
			CIE y	0,255	0,307	0,722	0,063
			CIE u'	0,202	0,516	0,078	0,178
			CIE v'	0,417	0,520	0,579	0,164
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	100,0%	99,9%		
			Abdeckung (NTSC)	95,1%	94,8%		
			Abdeckung (Adobe)	97,6%	98,5%		
			Abdeckung (DCI-P3)	97,8%	98,8%		
			Abdeckung (rec2020)	79,1%	78,8%		

FIG 54BC

$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	AB5	$\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,691	0,209	0,153
			CIE y	0,255	0,303	0,730	0,064
			CIE u'	0,202	0,526	0,074	0,177
			CIE v'	0,417	0,519	0,579	0,167
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	100,0%	99,8%		
			Abdeckung (NTSC)	97,2%	95,8%		
			Abdeckung (Adobe)	99,6%	99,3%		
			Abdeckung (DCI-P3)	97,7%	98,6%		
			Abdeckung (rec2020)	81,3%	80,6%		
$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	AB5	$\text{Mg}_4\text{GeO}_{5.5}\text{F}:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,708	0,208	0,153
			CIE y	0,255	0,286	0,731	0,066
			CIE u'	0,202	0,564	0,073	0,176
			CIE v'	0,417	0,513	0,579	0,170
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,7%		
			Abdeckung (NTSC)	97,2%	95,8%		
			Abdeckung (Adobe)	99,7%	99,3%		
			Abdeckung (DCI-P3)	97,4%	98,4%		
			Abdeckung (rec2020)	83,9%	86,4%		
$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	BS	$\text{SrLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,690	0,283	0,157
			CIE y	0,255	0,301	0,687	0,043
			CIE u'	0,202	0,528	0,106	0,196
			CIE v'	0,417	0,518	0,579	0,120
			xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,5%	98,2%		
			Abdeckung (NTSC)	81,0%	85,4%		
			Abdeckung (Adobe)	82,7%	88,5%		
			Abdeckung (DCI-P3)	93,6%	94,2%		
			Abdeckung (rec2020)	72,5%	80,3%		

FIG 54BD

$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	BS	$\text{Sr}(\text{Sr}, \text{Ca})\text{Si}_2\text{Al}_2\text{N}_6:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,675	0,286	0,157
			CIE y	0,255	0,315	0,683	0,042
			CIE u'	0,202	0,497	0,108	0,197
			CIE v'	0,417	0,522	0,579	0,118
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,4%		98,0%	
			Abdeckung (NTSC)	80,2%		84,8%	
			Abdeckung (Adobe)	81,9%		87,9%	
			Abdeckung (DCI-P3)	92,8%		93,7%	
			Abdeckung (rec2020)	69,6%		75,4%	
$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	BS	$\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,679	0,282	0,157
			CIE y	0,255	0,311	0,687	0,042
			CIE u'	0,202	0,505	0,106	0,196
			CIE v'	0,417	0,521	0,579	0,119
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,5%		98,2%	
			Abdeckung (NTSC)	81,1%		85,4%	
			Abdeckung (Adobe)	82,7%		88,5%	
			Abdeckung (DCI-P3)	93,7%		94,3%	
			Abdeckung (rec2020)	70,9%		77,0%	
$\lambda_{\text{dom}} = 448 \text{ nm}$	BS	$\text{Mg}_4\text{GeO}_{5.5}\text{F}:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,692	0,282	0,157
			CIE y	0,255	0,299	0,687	0,043
			CIE u'	0,202	0,532	0,106	0,196
			CIE v'	0,417	0,517	0,579	0,120
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,5%		98,2%	
			Abdeckung (NTSC)	81,1%		85,4%	
			Abdeckung (Adobe)	82,8%		88,6%	
			Abdeckung (DCI-P3)	93,8%		94,3%	
			Abdeckung (rec2020)	72,9%		80,8%	

## FIG 54C

FIG  
54CAFIG  
54CBFIG  
54CCFIG  
54CD

## FIG 54CA

blau	grün	rot		ungefiltert	gefiltert rot	gefiltert grün	gefiltert blau	
$\lambda_{\text{dom}} = 455 \text{ nm}$	AB4	$\text{SrLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,705	0,214	0,147	
			CIE y	0,255	0,290	0,719	0,067	
			CIE u'	0,202	0,556	0,077	0,168	
			CIE v'	0,417	0,515	0,579	0,171	
				xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,8%	99,3%			
			Abdeckung (NTSC)	97,0%	96,8%			
			Abdeckung (Adobe)	99,5%	99,4%			
			Abdeckung (DCI-P3)	96,5%	97,7%			
			Abdeckung (rec2020)	82,3%	84,7%			
$\lambda_{\text{dom}} = 455 \text{ nm}$	AB4	$\text{Sr}(\text{Sr}, \text{Ca})\text{Si}_2\text{Al}_2\text{N}_6:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,686	0,224	0,148	
			CIE y	0,255	0,308	0,711	0,064	
			CIE u'	0,202	0,515	0,081	0,170	
			CIE v'	0,417	0,521	0,577	0,166	
				xy		u'v'		
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,5%			
			Abdeckung (NTSC)	95,0%	95,8%			
			Abdeckung (Adobe)	97,6%	99,2%			
			Abdeckung (DCI-P3)	96,8%	97,7%			
			Abdeckung (rec2020)	77,8%	77,6%			

## FIG 54CB

$\lambda_{\text{dom}} = 455 \text{ nm}$	AB4	$\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,691	0,214	0,147
			CIE y	0,255	0,304	0,719	0,066
			CIE u'	0,202	0,525	0,076	0,169
			CIE v'	0,417	0,519	0,578	0,169
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,8%	99,3%		
			Abdeckung (NTSC)	97,2%	97,0%		
			Abdeckung (Adobe)	99,6%	99,4%		
			Abdeckung (DCI-P3)	96,6%	97,5%		
			Abdeckung (rec2020)	80,0%	79,5%		
$\lambda_{\text{dom}} = 455 \text{ nm}$	AB4	$\text{Mg}_4\text{GeO}_{5,5}\text{F}:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,707	0,213	0,147
			CIE y	0,255	0,288	0,720	0,067
			CIE u'	0,202	0,562	0,076	0,168
			CIE v'	0,417	0,514	0,578	0,172
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,8%	99,3%		
			Abdeckung (NTSC)	97,2%	96,9%		
			Abdeckung (Adobe)	99,7%	99,4%		
			Abdeckung (DCI-P3)	96,4%	97,6%		
			Abdeckung (rec2020)	82,7%	85,4%		
$\lambda_{\text{dom}} = 455 \text{ nm}$	AB5	$\text{SrLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,706	0,208	0,148
			CIE y	0,255	0,289	0,725	0,067
			CIE u'	0,202	0,559	0,074	0,168
			CIE v'	0,417	0,514	0,578	0,173
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,8%	99,2%		
			Abdeckung (NTSC)	98,1%	97,3%		
			Abdeckung (Adobe)	99,9%	99,3%		
			Abdeckung (DCI-P3)	96,6%	97,6%		
			Abdeckung (rec2020)	83,4%	85,2%		
$\lambda_{\text{dom}} = 455 \text{ nm}$	AB5	$\text{Sr}(\text{Sr},\text{Ca})\text{Si}_2\text{Al}_2\text{N}_6:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,687	0,219	0,148
			CIE y	0,255	0,308	0,716	0,065
			CIE u'	0,202	0,517	0,078	0,170
			CIE v'	0,417	0,521	0,578	0,168
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,4%		
			Abdeckung (NTSC)	96,2%	96,4%		
			Abdeckung (Adobe)	98,7%	99,5%		
			Abdeckung (DCI-P3)	96,9%	97,6%		
			Abdeckung (rec2020)	78,8%	78,0%		

FIG 54CC

$\lambda_{\text{dom}} = 455 \text{ nm}$	AB5	$\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,692	0,208	0,148
			CIE y	0,255	0,303	0,725	0,066
			CIE u'	0,202	0,526	0,074	0,169
			CIE v'	0,417	0,519	0,578	0,171
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,8%		99,2%	
			Abdeckung (NTSC)	98,3%		97,4%	
			Abdeckung (Adobe)	99,8%		99,3%	
			Abdeckung (DCI-P3)	96,7%		97,4%	
			Abdeckung (rec2020)	81,2%		80,0%	
$\lambda_{\text{dom}} = 455 \text{ nm}$	AB5	$\text{Mg}_4\text{GeO}_{5.5}\text{F}:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,708	0,207	0,148
			CIE y	0,255	0,286	0,726	0,068
			CIE u'	0,202	0,565	0,073	0,168
			CIE v'	0,417	0,513	0,578	0,173
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,8%		99,2%	
			Abdeckung (NTSC)	98,3%		97,4%	
			Abdeckung (Adobe)	99,8%		99,3%	
			Abdeckung (DCI-P3)	96,5%		96,5%	
			Abdeckung (rec2020)	83,8%		85,8%	
$\lambda_{\text{dom}} = 455 \text{ nm}$	BS	$\text{SrLiAl}_3\text{N}_4:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,693	0,280	0,151
			CIE y	0,255	0,300	0,682	0,048
			CIE u'	0,202	0,532	0,105	0,184
			CIE v'	0,417	0,518	0,578	0,131
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,9%		99,7%	
			Abdeckung (NTSC)	82,6%		87,5%	
			Abdeckung (Adobe)	84,4%		91,2%	
			Abdeckung (DCI-P3)	95,3%		96,7%	
			Abdeckung (rec2020)	73,2%		81,8%	

FIG 54CD

$\lambda_{\text{dom}} = 445 \text{ nm}$	BS	$\text{Sr}(\text{Sr}, \text{Ca})\text{Si}_2\text{Al}_2\text{N}_6:\text{Eu}$	CIE x	0,278	0,677	0,284	0,151
			CIE y	0,255	0,314	0,678	0,047
			CIE u'	0,202	0,500	0,108	0,185
			CIE v'	0,417	0,522	0,578	0,129
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,7%		
			Abdeckung (NTSC)	81,6%	86,9%		
			Abdeckung (Adobe)	83,5%	90,5%		
			Abdeckung (DCI-P3)	94,3%	96,1%		
			Abdeckung (rec2020)	69,9%	76,0%		
$\lambda_{\text{dom}} = 455 \text{ nm}$	BS	$\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,682	0,280	0,151
			CIE y	0,255	0,311	0,682	0,047
			CIE u'	0,202	0,508	0,105	0,184
			CIE v'	0,417	0,521	0,578	0,130
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,7%		
			Abdeckung (NTSC)	82,6%	87,6%		
			Abdeckung (Adobe)	84,5%	91,2%		
			Abdeckung (DCI-P3)	95,4%	96,8%		
			Abdeckung (rec2020)	71,4%	77,8%		
$\lambda_{\text{dom}} = 455 \text{ nm}$	BS	$\text{Mg}_4\text{GeO}_{5.5}\text{F}:\text{Mn}$	CIE x	0,278	0,695	0,280	0,151
			CIE y	0,255	0,298	0,683	0,048
			CIE u'	0,202	0,536	0,105	0,184
			CIE v'	0,417	0,517	0,578	0,131
				xy		u'v'	
			Abdeckung (sRGB)	99,9%	99,7%		
			Abdeckung (NTSC)	82,7%	87,6%		
			Abdeckung (Adobe)	84,6%	91,3%		
			Abdeckung (DCI-P3)	95,4%	96,8%		
			Abdeckung (rec2020)	73,6%	82,4%		

FIG 55

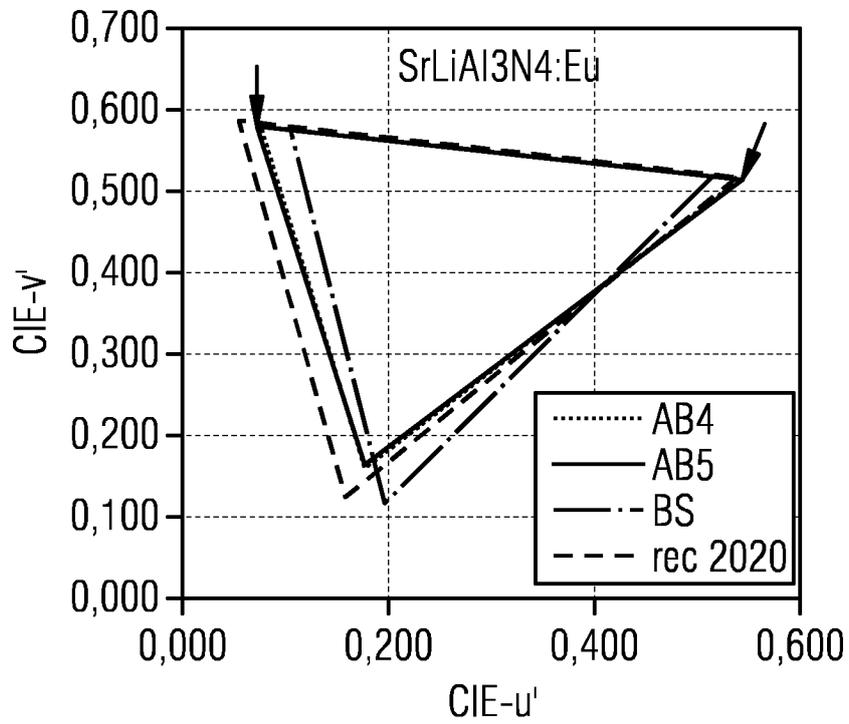


FIG 56

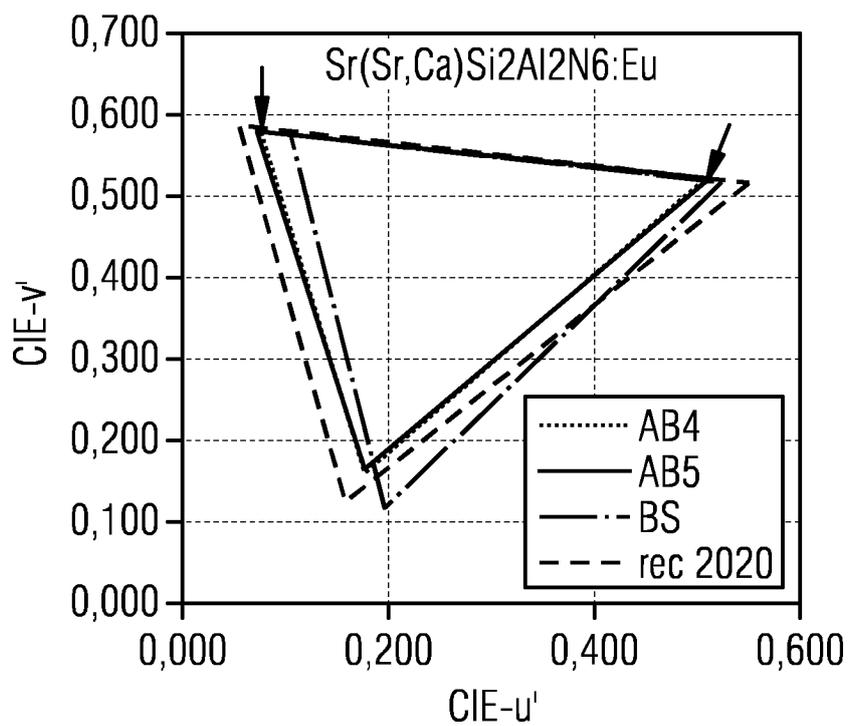


FIG 57

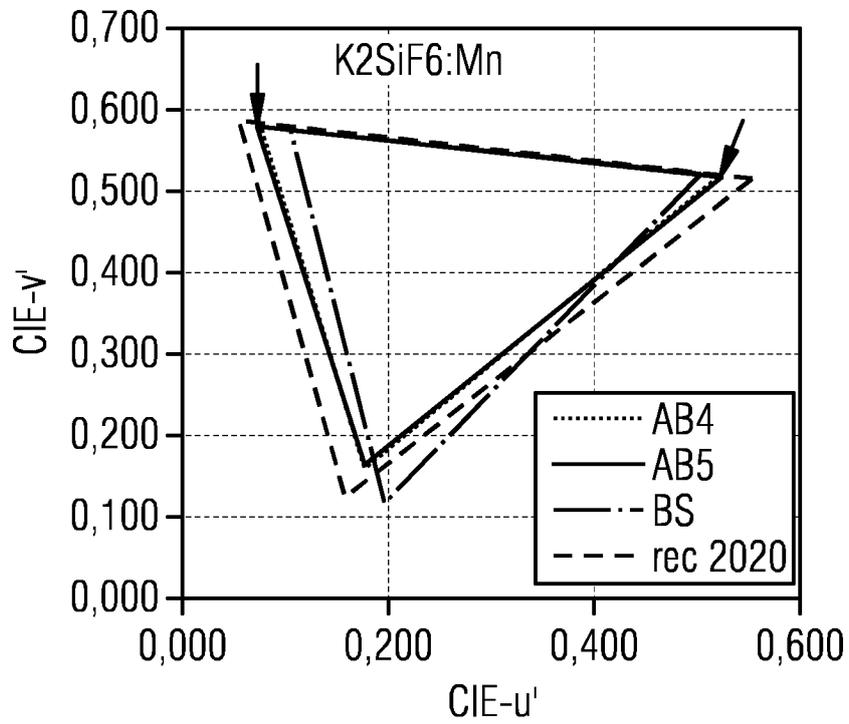


FIG 58

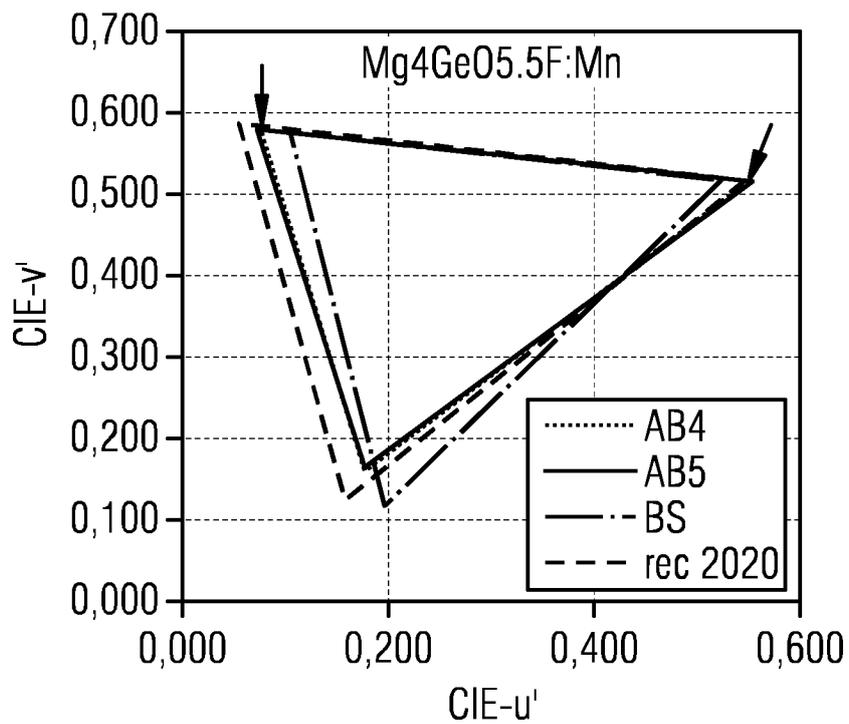


FIG 59

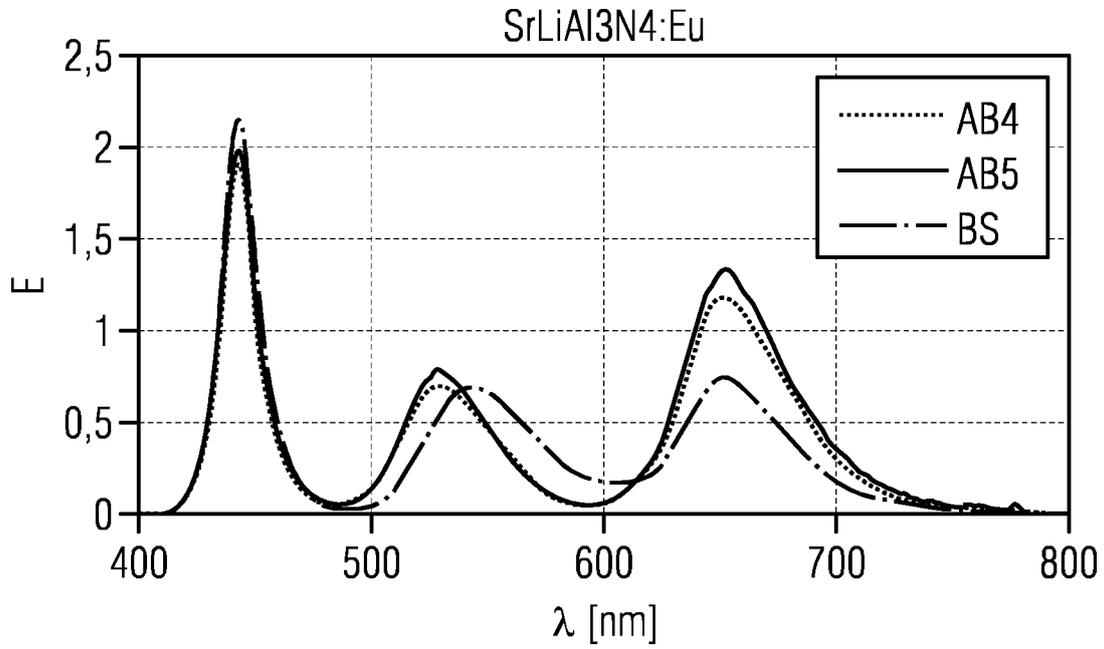


FIG 60

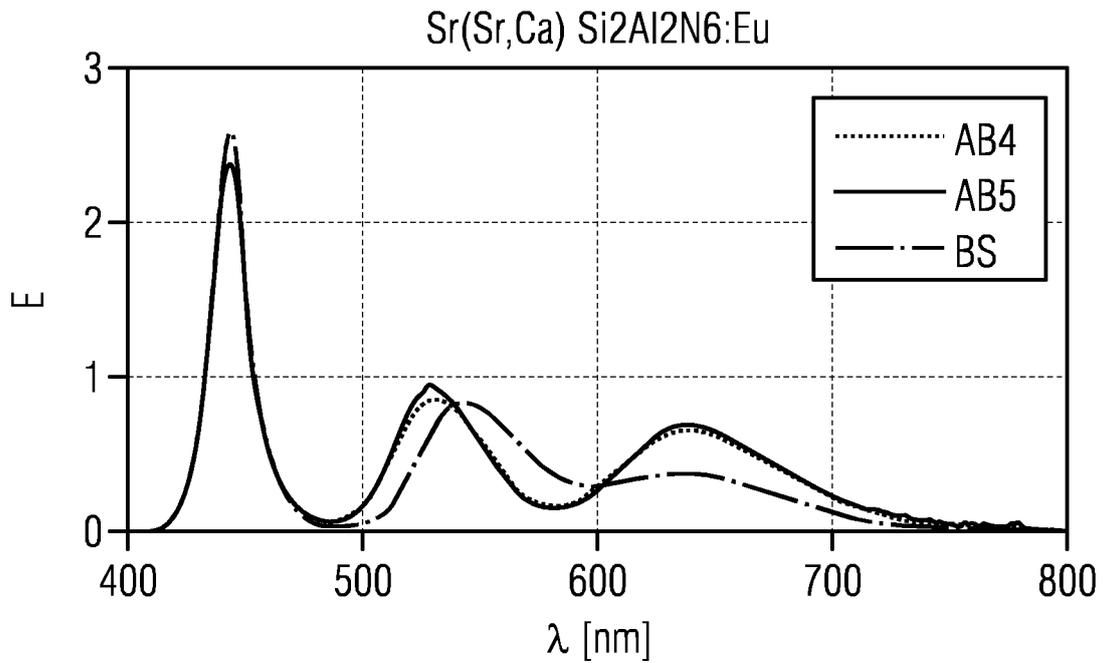


FIG 61

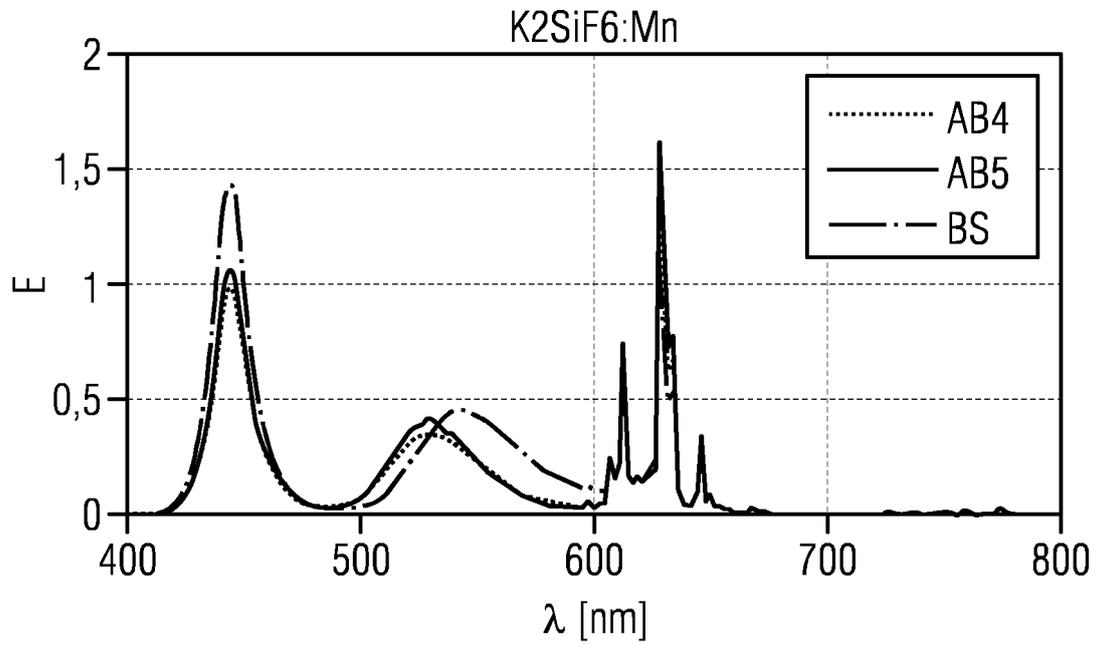


FIG 62

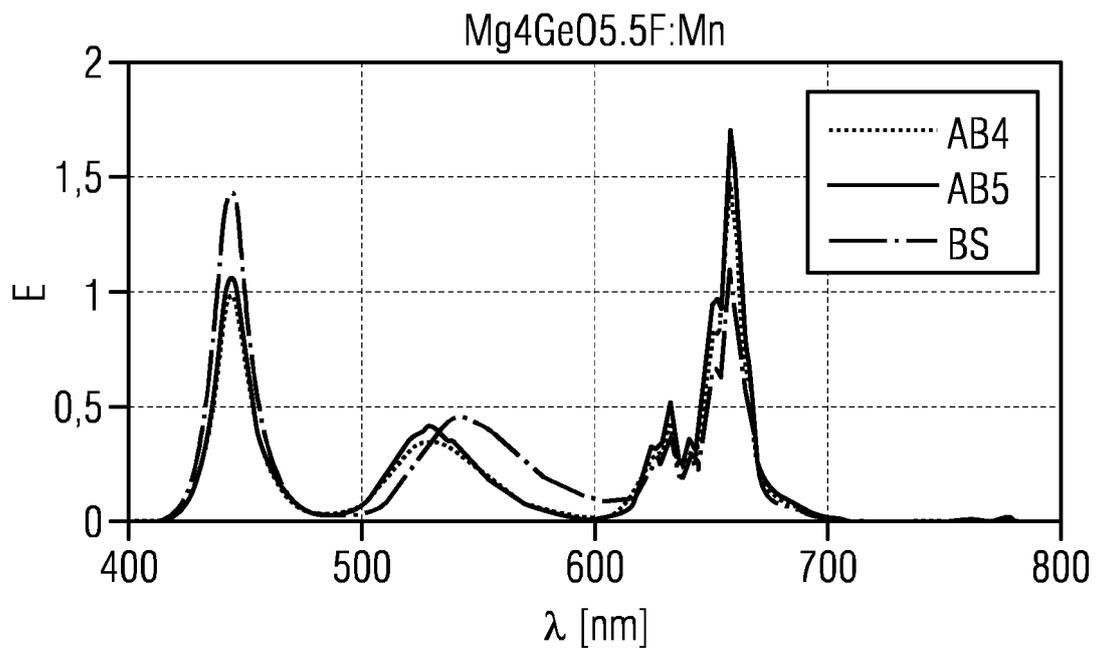


FIG 63

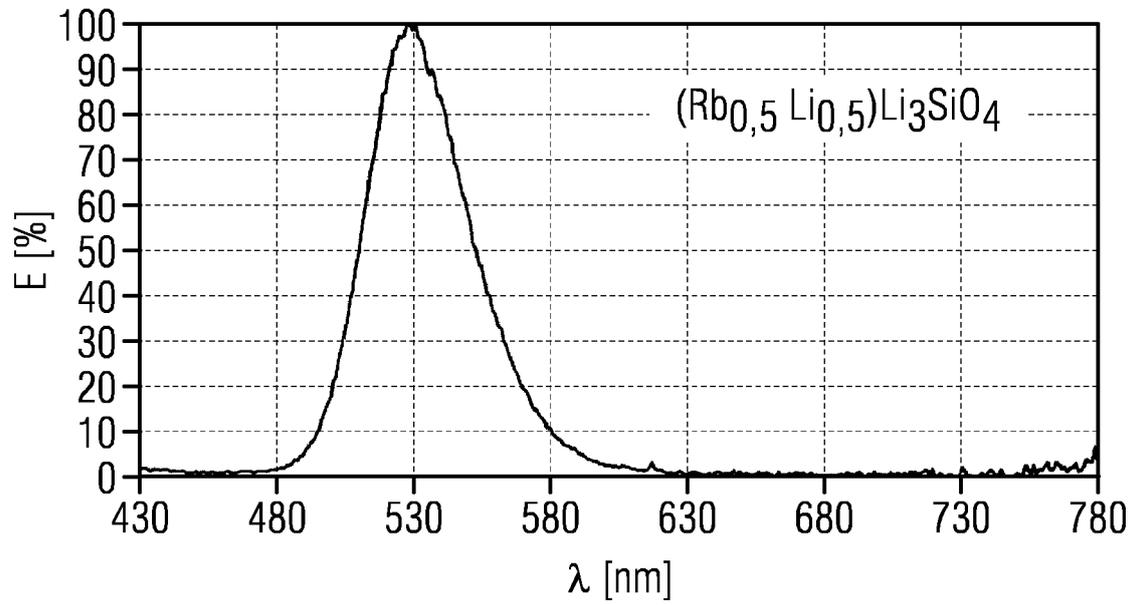


FIG 64

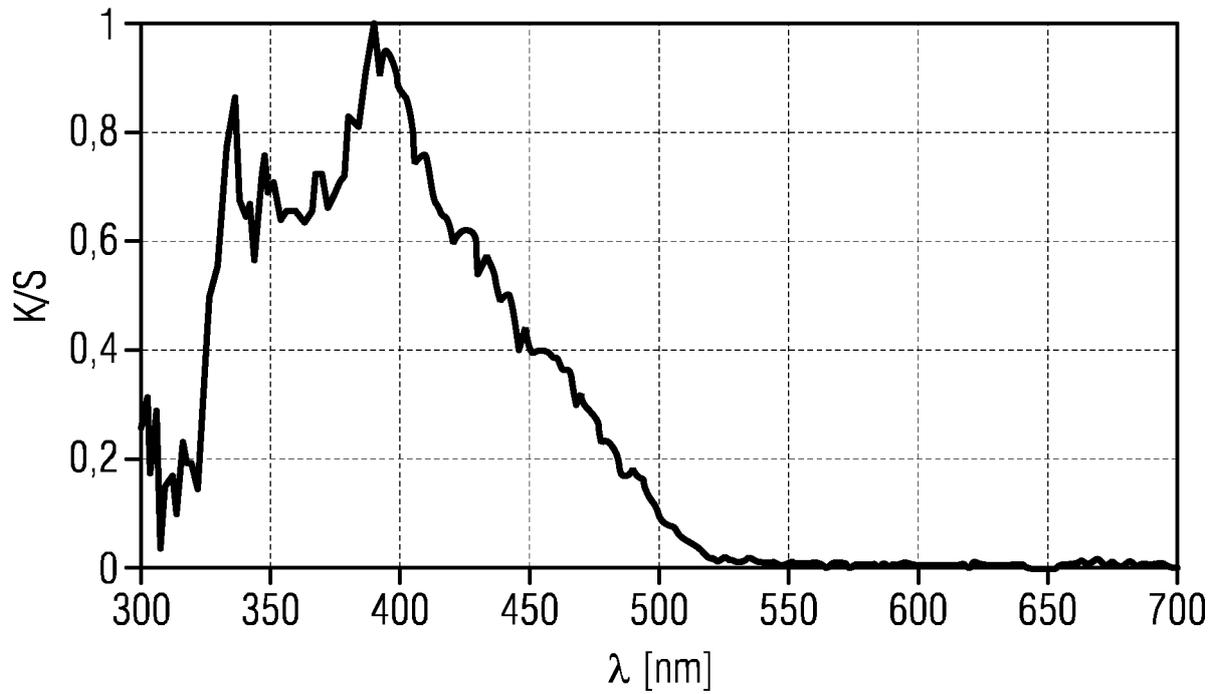


FIG 65

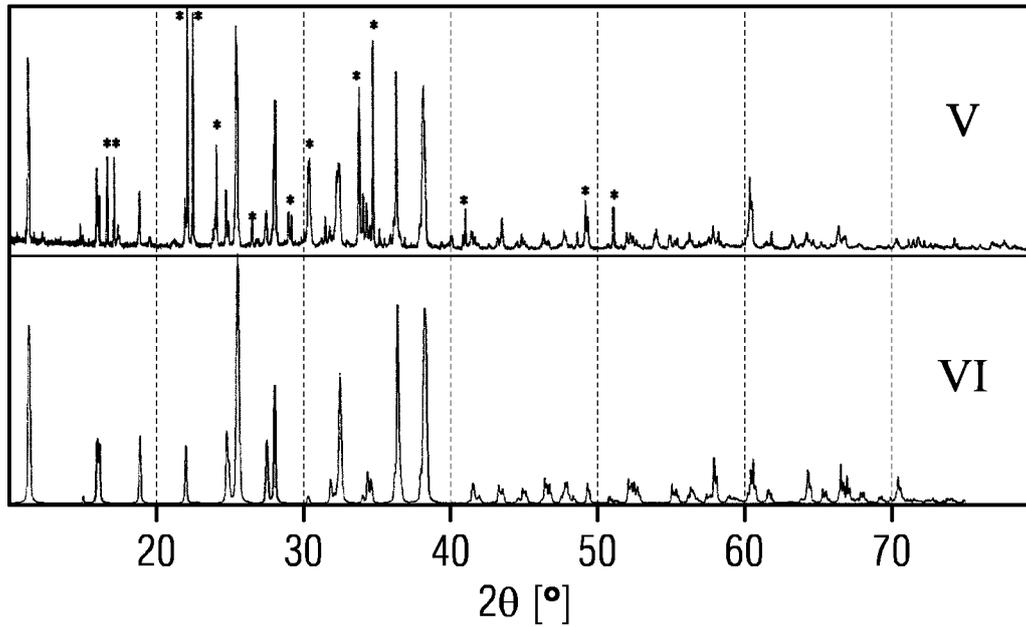


FIG 66

	AB5	G1	OS1
CIE-x:	0,238	0,281	0,250
CIE-y:	0,694	0,531	0,645
LER/Im/W <sub>opt</sub>	531,4	413,1	482,0
$\lambda_{\text{peak}}$ /nm	528	520	522
$\lambda_{\text{dom}}$ /nm	538,7	538,7	538,5
FWHM/nm	42,8	101,9	64,6
Farbreinheit/%	84,3	46,1	72,5

FIG 67

