

(19)



(11)

EP 2 186 382 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
25.07.2018 Patentblatt 2018/30

(51) Int Cl.:
H05B 33/08 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **08803855.9**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2008/061887

(22) Anmeldetag: **08.09.2008**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2009/034060 (19.03.2009 Gazette 2009/12)

(54) **VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR EINSTELLUNG DER FARB- ODER FOTOMETRISCHEN EIGENSCHAFTEN EINER LED-BELEUCHTUNGSEINRICHTUNG**

METHOD AND DEVICE FOR ADJUSTING THE COLOR OR PHOTOMETRIC PROPERTIES OF AN LED ILLUMINATION DEVICE

PROCÉDÉ ET DISPOSITIF DE RÉGLAGE DES PROPRIÉTÉS CHROMATIQUES OU PHOTOMÉTRIQUES D'UN DISPOSITIF D'ÉCLAIRAGE À DEL

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL NO PL PT RO SE SI SK TR

(30) Priorität: **07.09.2007 DE 102007044556**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
19.05.2010 Patentblatt 2010/20

(73) Patentinhaber: **Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. Betriebs KG**
80799 München (DE)

(72) Erfinder: **KRÄMER, Regine**
81825 München (DE)

(74) Vertreter: **Maikowski & Ninnemann**
Patentanwälte Partnerschaft mbB
Postfach 15 09 20
10671 Berlin (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
WO-A-02/47438 WO-A-2006/126124
WO-A-2007/019663 WO-A-2007/090283
US-A1- 2006 193 133 US-B1- 6 411 046

EP 2 186 382 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Einstellung der farb- oder fotometrischen Eigenschaften eines LED-Scheinwerfers gemäß dem Oberbegriff der Ansprüche 1, 28 und 48 sowie eine Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 54.

[0002] Es sind Beleuchtungsscheinwerfer mit lichtemittierenden Dioden (LEDs) bekannt, die beispielsweise als Kameraaufsatzlicht für Film- und Videokameras eingesetzt werden. Da die hierfür eingesetzten LEDs entweder die Farbtemperatur "tageslichtweiß" oder "warmweiß" aufweisen, ist eine stufenlose bzw. exakte Ein- oder Umschaltung von einer warmweißen auf eine tageslichtweiße Farbtemperatur mit definierten Normfarbwertanteilen nahe oder auf dem Planckschen Kurvenzug nicht möglich und bei beiden Varianten die Farbwiedergabe bei Film- und Videoaufnahmen unbefriedigend.

[0003] Typische Filmmaterialien für Filmaufnahmen wie "Cinema Color Negativ Film" sind für Tageslicht mit einer Farbtemperatur von 5600 K oder für Glühlampenlicht mit einer Farbtemperatur von 3200 K optimiert und erreichen mit diesen Lichtquellen zur Beleuchtung eines Sets hervorragende Farbwiedergabeeigenschaften. Werden bei Filmaufnahmen andere künstliche Lichtquellen zur Beleuchtung eines Sets eingesetzt, so müssen diese zum einen an die optimale Farbtemperatur von 3200 K bzw. 5600 K angepasst sein und zum anderen eine sehr gute Farbwiedergabequalität aufweisen. In der Regel wird hierfür die beste Farbwiedergabestufe mit einem Farbwiedergabeindex von $\text{CRI} \geq 90$... 100 gefordert.

[0004] Für einen LED-Scheinwerfer bestehend aus mehr als 3 LED-Farben gibt es unendlich bzw. nur durch die Auflösung der Ansteuerung begrenzt viele Möglichkeiten, um einen gewünschten Farbort wie z.B. $x/y = 0,423 / 0,399$, CCT 3200 K durch Mischung der verwendeten Grundfarben einzustellen. Je nach Mischungsverhältnis kann dabei auf verschiedene Parameter wie Lichtausbeute oder Farbwiedergabe optimiert werden. Bei einem vorwiegend für Film- und Fernsehaufnahmen eingesetzten Scheinwerfer kann die Mischung zusätzlich auf die Farbwiedergabeeigenschaften des Filmmaterials bzw. des Sensors einer Digitalkamera optimiert werden. Wird diese Optimierung nicht vorgenommen, so wird im ungünstigsten Fall zwar der korrekte Farbort eingestellt, dies aber mit sehr ungünstigen Farbwiedergabeeigenschaften. Besonders auf Grund der schmalbandigen Spektren der LED-Farben wie Blau, Grün, Rot, entstehen so leicht Spektren mit inakzeptabler Farbwiedergabe. Oder aber Spektren mit zwar guten bis sehr guten Farbwiedergabeeigenschaften ($\text{CRI} \geq 90$), welche aber bei Aufnahmen mit Film oder Digitalkameras erhebliche Farbstiche im Vergleich zu gängigen Lichtquellen wie Halogenleuchtstofflampen oder Tageslicht erzeugen.

[0005] Aus der Farbmeterik kann abgeleitet werden, dass für solche aus schmalbandigen LED-Spektren, ggf. auch in Kombination mit Leuchtstoff-LEDs erzeugte Gesamtspektren nie gleichzeitig alle für die Film- und Videobeleuchtung relevanten farbmeterischen Werte (Farbort, Farbwiedergabeindex sowie Mischlichtfähigkeit) Idealwerte annehmen können. Dennoch können sehr gute Ergebnisse erzielt werden, wenn gewährleistet ist, dass keiner der Optimierungsparameter zu weit vom Idealwert abweicht. In der Farbmeterik ist jedoch kein allgemeiner Algorithmus bekannt, in welchem Verhältnis mehr als 3 Spektren gemischt werden müssen, um gleichzeitig möglichst gute Werte für den gewünschten Farbort, Farbwiedergabeindex sowie Mischlichtfähigkeit mit Film zu erhalten.

[0006] Wie beim Einsatz von Leuchtstofflampen für die Beleuchtung bei Film- oder Videoaufnahmen kann es jedoch bei künstlichen Lichtquellen mit einem nicht kontinuierlichen Spektralverlauf vorkommen, dass diese Lichtquellen zwar die geforderten Werte für Farbtemperatur und Farbwiedergabe erreichen, aber dennoch bei der Verwendung für Filmaufnahmen gegenüber Glühlampen- bzw. HMI-Lampen oder Tageslicht einen erheblichen Farbstich aufweisen. Man spricht in diesem Fall von einer ungenügenden Mischlichtfähigkeit. Dieser Effekt kann auch bei einem Einsatz verschiedenfarbiger LEDs in einem LED-Scheinwerfer auftreten. So wurde bei einem Test mit einer auf eine Farbtemperatur von 5600 K und einem Farbwiedergabeindex von $\text{CRI} = 96$ optimierten LED-Kombination bei Filmaufnahmen ein massiver Rotstich im Vergleich zu HMI-Lampen festgestellt. Auch Versuche mit tageslichtweißen LEDs ergaben keine zufriedenstellenden Ergebnisse bezüglich der Mischlichtfähigkeit.

[0007] Aus der US 2004/0105261 A1 ist ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Abgabe und Modulation von Licht mit einem vorgegebenen Lichtspektrum bekannt. Die bekannte lichttechnische Einrichtung weist mehrere Gruppen Licht emittierender Vorrichtungen auf, von denen jede Gruppe ein vorgegebenes Lichtspektrum abgibt und eine Steuereinrichtung die Energiezufuhr zu den einzelnen Licht abgebenden Vorrichtungen so steuert, dass die insgesamt resultierende Strahlung das vorgegebene Lichtspektrum aufweist. Dabei können durch eine Kombination tageslichtweißer und warmweißer LEDs und Änderung der Intensitäten beliebige Farbtemperaturen zwischen den warmweißen und tageslichtweißen LEDs eingestellt werden.

[0008] Nachteilig bei diesem Verfahren ist die ebenfalls nicht optimale Farbwiedergabe bei Film- und Videoaufnahmen und die fehlende Möglichkeit, eine vorgegebene Farbtemperatur und einen exakten Farbort einzustellen. Je nach Auswahl der einzelnen LEDs oder Gruppen von LEDs und der jeweils eingestellten Farbtemperatur ist dabei mit zum Teil erheblichen Farbabweichungen vom Planck'schen Kurvenzug zu rechnen, die nur durch das Vorsetzen von Korrekturfiltern korrigiert werden können. Darüber hinaus ist die Lichtausbeute bei einer warmweißen Einstellung der Kombination tageslichtweißer und warmweißer LEDs nicht optimal, da hierbei durch die Sekundäremission des Leuchtstoffs relativ

hohe Umwandlungsverluste auftreten. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass zur Einstellung einer warm- oder tageslichtweißen Farbtemperatur ein Großteil der LEDs der jeweils anderen Farbtemperatur nicht oder nur stark gedimmt genutzt werden kann und somit der Ausnutzungsgrad für die bei Filmaufnahmen typischerweise benötigten Farbtemperaturen um 3200 K bzw. 5600 K nur ca. 50 % beträgt.

[0009] Aus der DE 20 2005 001 540 U1 ist eine in der Farbtemperatur einstellbare Lichtquelle für Tageslicht bekannt, bei der mindestens eine weißes Licht einer bestimmten Farbtemperatur emittierende LED mit verschiedenfarbiges Licht, insbesondere in den Grundfarben rot, grün und blau, emittierenden LEDs, kombiniert wird. Durch Veränderung der Leistung einzelner LED-Farben kann eine bestimmte Farbtemperatur oder eine bestimmte Normlichtqualität eingestellt werden, indem durch den Einsatz geeigneter Sensoren, Logik und Software, die den aktuellen Spektralverlauf der Lichtquelle erfassen können, eine vorgegebene Farbtemperatur oder Normlichtqualität automatisch ein- oder nachgeregelt wird.

[0010] Beim Einsatz von verschiedenfarbigen LEDs in Beleuchtungsscheinwerfern, insbesondere für fotografische und cinematografische Aufnahmen, deren Licht eine vorgegebene Farbtemperatur und Farbwiedergabe aufweisen und eine genügende Mischlichtfähigkeit besitzen soll, treten folgende Probleme auf.

[0011] Da LEDs das von ihnen abgegebene Licht nicht monochromatisch mit einer scharfen Spektrallinie emittieren, sondern mit einem Bandspektrum mit einer gewissen Breite, so dass das Emissionsspektrum einer LED als Gauß'sche Glockenkurve bzw. als Summe mehrerer Gauß'scher Glockenkurven angenommen werden kann und die Emissionsspektren von LEDs über die Gauß'sche Verteilung simuliert werden können. In Fig. 4 sind beispielhaft einige Emissionsspektren von LEDs als Funktion der relativen Leuchtdichte über der Wellenlänge dargestellt, denen zu entnehmen ist, dass die Wellenlängen von verschiedenfarbiges Licht abgebenden LEDs von blauem Licht über grünes Licht, amberfarbenem Licht bis zu rotem Licht ansteigen und die Form des Emissionsspektrums von weißes Licht abgebenden LEDs stark von den Emissionsspektren andersfarbiges Licht abgebenden LEDs abweicht. Diese Abweichung resultiert aus der Technologie zur Weißlichterzeugung, die auf der Grundlage eines blaues Licht emittierenden Halbleiterelements beruht, welches mit einer Phosphorbeschichtung versehen wird, die das blaue Licht zum Teil in gelbes Licht umwandelt, woraus neben dem ersten kleineren Peak im Wellenlängenbereich blauen Lichts ein zweiter, höherer Peak im gelben Bereich des Spektrums resultiert, was gemischt die Anteile weißen Lichts ergibt. Dabei kann über die Dicke der Phosphorbeschichtung die Farbtemperatur variiert werden, so dass auf diesem Wege sowohl gelbliche, warmweiße als auch tageslichtweiße LEDs hergestellt werden können.

[0012] Darüber hinaus weisen LEDs als Leuchtmittel eine starke Temperaturabhängigkeit auf. Mit steigender Sperrschichttemperatur ändern sich die Eigenschaften und Kennwerte von LEDs signifikant, wobei mit steigender Temperatur die Leuchtdichte stark abnimmt. Dies beruht darauf, dass bei höherer Temperatur der Anteil der strahlungslosen Rekombination zunimmt und mit steigender Temperatur eine Verschiebung der Emissionsspektren zu höherwelligen Bereichen, d. h. zum roten Spektrum hin, erfolgt. Fig. 5 zeigt in schematischer Darstellung die relative Leuchtdichte über der Sperrschichttemperatur von LEDs, die blaues, grünes und rotes Licht emittieren und aus unterschiedlichen Materialkombinationen bestehen. Daraus ergibt sich, dass die Temperaturabhängigkeit von LEDs je nach benutzten Materialien unterschiedlich stark ausgeprägt ist, was zur Folge hat, dass sich auch die farbmetrischen Eigenschaften einer aus verschiedenfarbigen LEDs additiv zusammengesetzten Lichtmischung zur Erzielung einer bestimmten Lichtfarbe bzw. Farbtemperatur ändern.

[0013] Um den Farbton bzw. die Farbtemperatur einer ursprünglich beispielsweise bei einer Ausgangstemperatur von 20°C eingestellten Grundmischung des von verschiedenfarbigen LEDs abgegebenen Lichts auch bei einer von der Ausgangstemperatur abweichenden Temperatur zu erhalten, kann ein Spektrometer vorgesehen und beispielsweise im Bereich der Frontlinse eines Beleuchtungsscheinwerfers eingesetzt werden, welches das Spektrum des vom Beleuchtungsscheinwerfer abgegebenen Lichts misst, oder ein Farbsensor wird im Bereich der Lichtaustrittsfläche eingesetzt, welcher Abweichungen des Istfarbe des Scheinwerfers registriert und dann in einem Puls-/Messmodus die Intensität sowie den Farbort der zur Lichterzeugung beteiligten LEDs erfasst. Somit können Verschiebungen der Peakwellenlängen sowie Veränderungen der Höhe der Peakwellenlänge erfasst und als Istwertgröße einer Regeleinrichtung zugeführt werden, deren Sollwert die Grundeinstellung bzw. Grundmischung des vom Beleuchtungsscheinwerfer abgegebenen Lichts ist. Durch einen entsprechenden Soll-Istwertvergleich kann die Lichtmischung nachgeregelt werden, um das Originalspektrum der Grundmischung einzuhalten.

[0014] Eine derartige Regelung der Farbtemperatur des von einem LED-Scheinwerfer abgegebenen Lichts ist jedoch wegen des erforderlichen Einsatzes eines teuren Farbsensors und dessen Anbringung im Strahlengang des LED-Scheinwerfers sowie wegen des erforderlichen Einsatzes eines geeigneten Rechners in Verbindung mit einer Regeleinrichtung sehr aufwendig und zeitraubend, da bei einer derartigen Regelung eine von der Temperatur abhängige Veränderung der Peaks sämtlicher im LED-Scheinwerfer verwendeten LED-Farben erfasst und bei der Regelung berücksichtigt werden muss. Die hierfür erforderliche Zeit steht jedoch beispielsweise bei Filmaufnahmen unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen nicht immer zur Verfügung.

[0015] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, die Lichtfarbe, Farbtemperatur oder den Farbort einer von einem LED-Scheinwerfer abgegebenen Lichtmischung mit minimalem Kosten- und Zeitaufwand unabhängig von der Umge-

bungstemperatur des LED-Scheinwerfers einzustellen und konstant zu halten.

[0016] Diese Aufgabenstellung wird erfindungsgemäß durch Verfahren mit den Merkmalen der Ansprüche 1, 28 und 48 gelöst.

[0017] Die erfindungsgemäßen Lösungen gewährleisten eine von der Temperatur, insbesondere von der Boardtemperatur der LEDs, unabhängige Einstellung und Einhaltung der Lichtfarbe, Farbtemperatur oder des Farbborts einer von einem LED-Scheinwerfer abgegebenen, aus Lichtstromanteilen verschiedenfarbiger LEDs zusammengesetzten Lichtmischung mit minimalem Herstellungs- und Zeitaufwand.

[0018] Die erfindungsgemäßen Verfahren gehen von unterschiedlichen Lösungsansätzen aus und ermöglichen unterschiedliche Einstellgenauigkeiten mit unterschiedlichem Herstellungs- und Zeitaufwand zur Erzielung einer von der Umgebungstemperatur des LED-Scheinwerfers unabhängigen, gewünschten Einstellung der Lichtfarbe, Farbtemperatur oder des Farbborts der Lichtmischung. Der Herstellungsaufwand und die Steuer- bzw. Regelzeit für die Einhaltung der gewünschten Lichtfarbe, Farbtemperatur oder des Farbborts der vom LED-Scheinwerfer abgegebenen Lichtmischung liegt insgesamt erheblich unter dem Herstellungs- und Regelzeitaufwand bei der Verwendung mehrerer Farbsensoren, da bei dem erfindungsgemäßen Verfahren nur ein Temperatursensor als Istwertgeber zum Einhalten der Lichtfarbe, der Farbtemperatur bzw. des Farbborts der vom LED-Scheinwerfer abgegebenen Lichtmischung erforderlich und die Regelungszeit in Abhängigkeit vom jeweils verwendeten Verfahren minimal ist.

[0019] Das erste alternative Verfahren zur Farbstabilisierung eines LED-Scheinwerfers bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen ist gekennzeichnet durch

- eine Grundeinstellung der Lichtmischung auf eine vorgegebene Lichtfarbe durch Einstellen der Lichtstromanteile für die verschiedenfarbigen LEDs bei einer Ausgangstemperatur des LED-Scheinwerfers,
- Ermittlung der von der Wellenlänge der verschiedenfarbigen LEDs abhängigen Ausgangs-Emissionsspektren $E_A(\lambda)$ der verschiedenfarbigen LEDs bei der Grundeinstellung,
- Ermittlung der von der Wellenlänge der verschiedenfarbigen LEDs abhängigen Emissionsspektren $E(\lambda)$ bei einer von der Ausgangstemperatur abweichenden, gemessenen Temperatur des LED-Scheinwerfers,
- Ermittlung der Lichtstromanteile der verschiedenfarbigen LEDs für eine die vorgegebene Lichtfarbe bei der gemessenen Temperatur aufweisenden Lichtmischung,
- Einstellung der ermittelten Lichtstromanteile der verschiedenfarbigen LEDs am LED-Scheinwerfer.

[0020] Bei diesem ersten erfindungsgemäßen Verfahren erfolgt zunächst eine Kalibrierung des Scheinwerfers mit einer optimalen Einstellung der Lichtstromanteile verschiedenfarbiger LED-Farbgruppen für eine gewünschte Lichtfarbe der vom LED-Scheinwerfer abgegebenen Lichtmischung in einer Grundeinstellung des LED-Scheinwerfers. Bei einer Veränderung der Umgebungstemperatur wird eine temperaturabhängige Neukalibrierung zur Korrektur der Lichtstromanteile der verschiedenfarbigen LEDs an der Lichtmischung vorgenommen, indem die Lichtstromanteile mit den temperaturabhängigen Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs neu berechnet und am Scheinwerfer eingestellt werden. Für dieses Verfahren werden bei jedem Korrekturvorgang die Emissionsspektren der einzelnen Farbgruppen der verschiedenfarbigen LEDs bei der gemessenen, aktuellen Temperatur benötigt, die mit einem Spektrometer gemessen werden müssen, was jedoch vergleichsweise zeitaufwendig ist, so dass dieses Verfahren beispielsweise für Filmaufnahmen nur bedingt einsetzbar ist, zumal der Einbau eines Spektrometers in einen LED-Scheinwerfer mit einem erheblichen Herstellungs- und Kostenaufwand verbunden ist.

[0021] Dementsprechend werden in Weiterbildungen dieser erfindungsgemäßen Lösung die Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs für die jeweils gemessene Temperatur mittels der Gauß-Verteilung oder über eine temperaturabhängige Normierung der in der Kalibrierung ermittelten Emissionsspektren approximiert, was bevorzugt im Rahmen einer Kalibrierung ebenso wie die darauf basierende Neuberechnung der Lichtstromanteile in Abh. der Temperatur erfolgt. Das Ergebnis, nämlich die Lichtstromanteile der LED-Farben in Abh. von der Temperatur, wird bevorzugt in Tabellen- oder Funktionsform im Scheinwerfer hinterlegt, da im Scheinwerfer dann keine Spektren zum Messen, Approximieren und Rechnen benötigt werden.

[0022] Beide weiterführende Lösungen gehen von der Erkenntnis aus, dass die Leuchtdichte und Peakwellenlänge sowie die Halbwertsbreite, d. h. die Breite des Emissionsspektrums bei 50 % der relativen Leuchtdichte der Peakwellenlänge der Emissionsspektren, linear oder quadratisch (Leuchtdichte von yellow, amber, rot) von der gemessenen Temperatur abhängig sind. Aus der jeweils gemessenen Temperatur können mittels beider Verfahren die Spektren für alle Farbgruppen der verschiedenfarbigen LEDs neu berechnet werden.

[0023] Die Approximation der Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs mittels der Gaußverteilung geht davon aus, dass die Emissionsspektren von LEDs mit Hilfe der Gauß'schen Glockenkurve

$$E(\lambda) = f_L * e^{-2,7725 \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{w_{50}} \right)^2}$$

durch Ermitteln der für jede Gruppe gleichfarbiger LEDs linear von der Temperatur abhängigen Peakwellenlänge λ_p des LED-Emissionsspektrums und Halbwertsbreite w_{50} des LED-Emissionsspektrums hinreichend genau (das ist ehrlich gesagt nicht genau genug, jedenfalls liefert das Verfahren keine genaueren Ergebnisse als das später beschriebene Einfach-Verfahren, lediglich die Lichtstromanteile konstant zu halten. Präziser gegenüber dem Einfachverfahren wird das Verfahren mit der Gauß-Approximation erst mit einer Überlagerung mehrerer Gaußspektren, leider müssen die Parameter der Gaußspektren 2..n derzeit noch "manuell" ermittelt werden, was für die Praxis nicht handhabbar ist. Lassen sich die überlagerten Spektren trotzdem irgendwie schützen?) nachgebildet werden. Der temperaturabhängige Intensitätsfaktor f_L dient zur Anpassung der Intensität des nachgebildeten Spektrums an die Intensität des Spektrums bei einer bestimmten Umgebungstemperatur. Die Funktion der Intensität des Spektrums in Abhängigkeit von der Temperatur ist für jede LED-Farbe eine lineare bzw. quadratische Funktion. Sind daher die linear von der Temperatur abhängigen Parameter λ_p und w_{50} aus der Grundeinstellung der Lichtmischung des LED-Scheinwerfers bei dessen Kalibrierung bekannt sowie der temperaturabhängige Faktor f_L bzw. die lineare bzw. quadratische Funktion der Intensität in Abh. von der Temperatur, so kann auf das jeweilige relative Emissionsspektrum jeder einzelnen Farbgruppe der verschiedenfarbigen LEDs bei von der Ausgangstemperatur abweichenden Temperaturen geschlossen werden, so dass Abweichungen der Emissionsspektren von der Grundeinstellung ermittelt und ausgeregelt werden können.

[0024] Basierend auf der Gaußverteilung kann das Emissionsspektrum der verschiedenfarbigen LEDs und damit der Lichtmischung des vom LED-Scheinwerfer abgegebenen Lichts noch genauer angenähert werden, wenn die von der Wellenlänge der verschiedenfarbigen LEDs abhängigen Emissionsspektren $E(\lambda)$ nach der Formel

$$E(\lambda) = f_L \cdot \frac{1}{\frac{w_{50}}{2} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{w_{50}/2} \right)^2}$$

durch Ermitteln der für jede Gruppe gleichfarbiger LEDs linear von der Temperatur abhängigen Peakwellenlänge λ_p des LED-Emissionsspektrums, der Halbwertsbreite w_{50} des LED-Emissionsspektrums und einem temperaturabhängigen Intensitätsfaktor f_L nachgebildet werden.

[0025] Die in dieser Approximationsformel verwendeten Parameter Peakwellenlänge λ_p , und Halbwertsbreite w_{50} sind für alle Farbgruppen der verschiedenfarbigen LEDs linear bzw. quadratisch von der Temperatur abhängig. Der temperaturabhängige Umrechnungsfaktor $f_L(T)$ stellt dabei einen Normierungsfaktor dar, welcher das approximierte Spektrum auf die gemessene relative Leuchtdichte in Abhängigkeit der Temperatur bezieht. Ersatzweise kann für den Faktor $f_L(T)$ auch die gemessene Abhängigkeit der maximalen spektralen Strahlungsleistung von der Temperatur verwendet werden. Somit können aus einem gemessenen Temperaturwert alle benötigten Parameter ermittelt und die Emissionsspektren berechnet werden. Auf diesem Wege ist beispielsweise eine Approximation der Emissionsspektren für die Farbgruppen amber, blau, grün und rot möglich.

[0026] Die Ermittlung des Emissionsspektrums für weiße LEDs stellt dabei einen Sonderfall dar, da es sich bei einer weißes Licht abgebenden LED um eine blaue LED mit Phosphorbeschichtung handelt, so dass das Emissionsspektrum zwei Peaks, nämlich einen Peak im blauen und einen Peak im gelben Spektralbereich, aufweist. Damit ist eine einfache Approximation über eine Gaußverteilung nicht möglich, jedoch können die beiden Peaks im Emissionsspektrum über jeweils eine Gaußverteilung angenähert werden.

[0027] In einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird dementsprechend das Emissionsspektrum für weiße LEDs über mehrere Gaußverteilungen, vorzugsweise über drei oder vier Gaußverteilungen, approximiert. Dabei wird von den beiden Gaußverteilungen zur Ermittlung der beiden Peaks im Emissionsspektrum eine dritte Gaußverteilung subtrahiert, um das berechnete Spektrum in dem zwischen den beiden Peaks liegenden "Tal" bei ca. 495 nm an die gemessene Emissionsverteilung anzunähern. Eine noch genauere Annäherung des berechneten Emissionsspektrums an eine gemessene Emissionsverteilung kann durch Addieren einer vierten Gaußverteilung erzielt werden, jedoch erweist sich als Kompromiss aus maximaler Genauigkeit und minimalem Rechenaufwand eine Annäherung über drei Gaußfunktionen als ausreichend.

[0028] Die erfindungsgemäßen Verfahren zur Approximation der Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs zur Erzeugung der gewünschten Lichtmischung des LED-Scheinwerfers weisen den Vorteil einer hinreichend genauen Annäherung der berechneten Emissionsspektren an tatsächlich gemessene Emissionsspektren auf, wobei die Verschiebung der Peakwellenlänge und Veränderungen der Halbwertsbreiten berücksichtigt werden, so dass die sich aus dem Licht verschiedenfarbiger LEDs zusammensetzende Lichtmischung sehr genau nachgeregelt werden kann. Vergleichsmessungen haben ergeben, dass die Farbtemperatur nach dieser Korrektur 28K für Kunstlicht oder Tungsten und 125K für Tageslicht oder Daylight bei Sichtbarkeitsschwellen von 50K für Tungsten bzw. 200K für Daylight beträgt, während ohne Farbkorrektur die Verschiebung 326K für Tungsten und 780K für Daylight beträgt und somit im deutlich sichtbaren Bereich liegt.

[0029] Ein Nachteil dieser Approximation der Emissionsspektren in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur des LED-Scheinwerfers besteht darin, dass zur Berechnung der einzelnen Farbgruppen der verschiedenfarbigen LEDs jeweils drei temperaturabhängige Parameter und für den Sonderfall der weißen Farbe neun temperaturabhängige Parameter und somit insgesamt 21 temperaturabhängige Parameter zur Berechnung des aktuellen Emissionsspektrums für ein Nachregeln des Systems zur Einhaltung der gewünschten Lichtfarbe bzw. Farbtemperatur der bei einer Ausgangstemperatur eingestellten Lichtmischung berechnet werden müssen. Damit ist ein erheblicher Aufwand im Vergleich zu dem nachstehend erläuterten alternativen Verfahren zur Approximation der Emissionsspektren einer aktuellen Temperatur über eine temperaturabhängige Verschiebung + Normierung der in der Kalibrierung bei einer Ausgangstemperatur ermittelten Emissionsspektren verbunden.

[0030] Bei diesem alternativen Verfahren ("Verschiebung der Peakwellenlänge") werden die von der Wellenlänge der verschiedenfarbigen LEDs abhängigen Emissionsspektren $E(\lambda)$ bei einer von der Ausgangstemperatur abweichenden, gemessenen Temperatur des LED-Scheinwerfers durch eine temperaturabhängige Verschiebung und Normierung der Ausgangs-Emissionsspektren E_A gemäß

$$E_T(\lambda) = f_L(T) \cdot f_{VL}(T) \cdot E_A(\lambda - \Delta\lambda_p(T))$$

approximiert, wobei $f_L(T)$ einen den relativen Leuchtdichteabfall über den gesamten Temperaturbereich darstellenden, temperaturabhängigen Umrechnungsfaktor (gemessene Leuchtdichte des Spektrums relativ zur Leuchtdichte des Ausgangs Spektrums), $\Delta\lambda_p(T)$ eine von der Temperatur abhängige Verschiebung der Peakwellenlänge zum Ausgangsspektrum bezeichnet und $f_{VL}(T)$ einen Normierungsfaktor darstellt, welcher das um $\Delta\lambda_p(T)$ geshiftete Spektrum auf die gleiche Leuchtdichte wie die des Originalspektrums normiert (aufgrund der anderen Lage zur $V(\lambda)$ -Kurve erforderlich)

[0031] Bei diesem alternativen Verfahren werden die Emissionsspektren in der Grundeinstellung des LED-Scheinwerfers, welche bei der Kalibrierung des LED-Scheinwerfers aufgenommen werden, um die Änderung der Peakwellenlänge geshiftet, sodann mit dem Faktor $f_{VL}(T)$ wieder auf die Ausgangsleuchtdichte der Spektren normiert und schließlich mit einem temperaturabhängigen Faktor aufgefasst. Der Faktor $f_L(T)$ stellt den gemessenen relativen Leuchtdichteabfall über den gesamten Temperaturbereich dar, so dass die mit den Faktoren $f_L(T) \cdot f_{VL}(T)$ multiplizierten Emissionsspektren der geshifteten Ausgangsmischung in ihrer Leuchtdichte an die tatsächlichen Emissionsspektren bei der jeweils aktuellen Temperatur angepasst werden. Um die Verschiebung der Peaks der einzelnen Farbgruppen der verschiedenfarbigen LEDs zu berücksichtigen, werden die Emissionsspektren entlang der die Wellenlänge angegebenden Abszisse bei der Darstellung der relativen Leuchtdichte über der Wellenlänge um den Wert $\Delta\lambda_p(T)$ verschoben.

[0032] Der Vorteil dieses Verfahrens zur Approximation der Emissionsspektren bei verschiedenen Umgebungstemperaturen des LED-Scheinwerfers liegt darin, dass im Gegensatz zur Approximation der Emissionsspektren über die Gaußverteilung nur 10 einfach zu ermittelnde anstelle von 21 temperaturabhängigen Parametern berechnet werden müssen, was zu einem deutlich verringerten Rechenaufwand und einer geringeren Fehleranfälligkeit führt. Nachteilig gegenüber der Approximation der Emissionsspektren über die Gaußverteilung ist jedoch, dass die Peakwellenlängenverschiebung weniger genau ist, da die Änderung der Halbwertsbreite sowie der Flankenverläufe der Emissionsspektren nicht berücksichtigt wird.

[0033] Bei beiden vorstehend beschriebenen Verfahren zur Approximation der Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs zur Farbstabilisierung eines LED-Scheinwerfers werden die von den Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs in der Grundeinstellung bei der Kalibrierung des LED-Scheinwerfers abweichenden Emissionsspektren bei einer von der Ausgangstemperatur in der Grundeinstellung abweichenden Umgebungstemperatur des LED-Scheinwerfers in eine Veränderung der Lichtstromanteile der jeweiligen Farbgruppen der verschiedenfarbigen LEDs zum Nachregeln der Lichtmischung umgesetzt. Hierfür und für den Einsatz eines weiteren, nachfolgend erläuterten Verfahrens zur Bestimmung der Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs bei von einer Ausgangstemperatur abweichenden Umgebungstemperatur des LED-Scheinwerfers wird eine programmgesteuerte Recheneinheit eingesetzt, in die die ermittelten Emissionsspektren der verwendeten LED-Farben oder die Emissionsspektren gewünschter LED-Farben eingegeben, mehrere Optimierungsparameter eingestellt und von der auf verschiedene Zielparameter optimierte Lichtstromanteile für die verschiedenfarbigen LEDs ermittelt oder an eine die verschiedenfarbigen LEDs ansteuernde Elektronik abgegeben werden.

[0034] Die programmgesteuerte Recheneinheit dient zur Berechnung von Lichtmischungen auf der Basis verschiedenfarbiger LEDs, indem mit Hilfe der Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs sowohl die Farbeigenschaften von Lichtmischungen der Lichtquellen mit verschiedenen Lichtstromanteilen ermittelt als auch optimierte Lichtmischungen für bestimmte Lichtarten berechnet werden können. Dabei können bis zu fünf Emissionsspektren ausgewählt, importiert und über eine Optimierungsfunktion die bestmögliche Mischung für voreingestellte Farbeigenschaften berechnet werden. Weiterhin können verschiedene in der Filmproduktion verwendete Lichtarten, wie beispielsweise Glühlucht 3200K für Kunstlicht bzw. Tungsten und Tageslicht oder HMI-Licht 5600K für Tageslicht bzw. Daylight ausgewählt werden, wobei über weitere Optionen durch die Eingabe von Optimierungs- und Zielparametern die Voreinstellungen

verfeinert werden können, um eine optimale Lichtmischung zu erhalten. Darüber hinaus bietet die programmgesteuerte Recheneinheit die Möglichkeit, die farbmetrischen Eigenschaften für eine manuell eingestellte Mischung zu ermitteln, so dass es beispielsweise möglich ist, die Änderung von Mischungen mit gleichen Anteilen aber unterschiedlichen Emissionsspektren zu untersuchen.

[0035] Als Optimierungsparameter sind die gewünschte Farbtemperatur der von den verschiedenfarbigen LEDs erzeugten Lichtmischung, die Mischlichtfähigkeit und die Referenzlichtart sowie das Filmmaterial bzw. der Kamerasensor, für welche gute Mischlichtfähigkeit erzielt werden soll, einstellbar, während die Zielparameter zur Optimierung der Lichtstromanteile aus einem oder mehreren der Parameter Farbtemperatur, minimaler Abstand vom Planckschen Kurvenzug, Farbwiedergabeindex und Mischlichtfähigkeit mit Film oder Digitalkamera bestehen und für die Zielparameter Sollwerte und/oder Toleranzwerte eingebbar sind.

[0036] Mit den von der programmgesteuerten Recheneinheit ermittelten Lichtstromanteilen kann der LED-Scheinwerfer zur temperaturabhängigen Farbkorrektur auf die jeweils neu berechnete Lichtmischung eingestellt werden. Die Berechnung kann online im Scheinwerfer erfolgen, oder vorab im Rahmen der Kalibrierung und die ermittelten Ergebnisse (Lichtstromanteile der LED-Farben in Abhängigkeit von der Temperatur) in Tabellenform oder als Funktion im Scheinwerferinternen Speicher hinterlegt werden. Um etwaige Abweichungen in der Leuchtdichte auszugleichen, die nach der Korrektur auftreten können, erfolgt nach einem weiteren Merkmal der erfindungsgemäßen Lösung zusätzlich eine Leuchtdichtemessung mit einem $V(\lambda)$ -Sensor, so dass aus der Differenz zwischen Ist- und Soll-Leuchtdichte der LED-Scheinwerfer über eine übereinstimmende Erhöhung oder Absenkung der den verschiedenfarbigen LEDs zugeführten elektrischen Leistung an den Leuchtdichte-Sollwert angeglichen wird.

[0037] Da die spektrale Verteilung der Emission der verschiedenfarbigen LEDs sehr stark von der Stromstärke abhängt und bei den LED-Typen im blauen und grünen Bereich die Dominantwellenlänge mit steigender Stromstärke sinkt, während bei den LED-Typen amber und rot die Dominantwellenlänge mit steigender Stromstärke ansteigt, würde bei einer Lichtmischung, d. h. einer additiven Zusammensetzung des von einem Beleuchtungsscheinwerfer abgegebenen Lichts aus dem von Farbgruppen verschiedenfarbiger LEDs abgegebenen Licht bei einer anteiligen Ansteuerung der verschiedenfarbigen LEDs zum Erzielen einer gewünschten Lichtmischung über die Stromstärke ein Versatz der Dominantwellenlänge von mehreren Nanometern auftreten, so dass sich die Farbtemperatur der vom Beleuchtungsscheinwerfer abgegebenen Lichtmischung signifikant ändern würde.

[0038] Wegen der starken Stromabhängigkeit der LEDs erfolgt eine anteilige Ansteuerung der LEDs und damit die Lichtmischung nicht über eine Stromstärkeregelung, sondern über eine Pulsweitenmodulation mit im Wesentlichen rechteckförmigen Stromimpulsen einstellbarer Pulsbreite und dazwischen liegenden Impulspausen, die zusammen eine Periodendauer der Pulsweitenmodulation ergeben. Die anteilige Ansteuerung oder Dimmung erfolgt dabei über eine Variation der Pulsbreite des Rechtecksignals bei fester Grundfrequenz, so dass bei einer 50-prozentigen Dimmung der rechteckförmige Impuls die halbe Breite der gesamten Periode aufweist.

[0039] Grundsätzlich könnte man natürlich auch eine analoge Dimmung trotz des oben beschriebenen Effekts der Verschiebung der dominanten Wellenlänge in Abhängigkeit vom Strom vornehmen, wenn diese Verschiebung entsprechend bei der Ermittlung der Lichtstromanteile berücksichtigt bzw. kompensiert wird. Lediglich der Einfachheit halber wird ein Betrieb mit Pulsweitenmodulation (PWM) vorgezogen. Die Betriebsfrequenz beträgt vorzugsweise > 20 kHz, um Schwebungen bei Highspeed-Filmaufnahmen zu vermeiden.

[0040] Dementsprechend besteht ein weiteres Merkmal der erfindungsgemäßen Lösung darin, die Lichtstromanteile für die verschiedenfarbigen LEDs durch Ansteuern der verschiedenfarbigen LEDs mittels Pulsweitenmodulation zu steuern. Diese Steuerung erfolgt in Verbindung mit der zuvor erläuterten Abgabe der Lichtstromanteile für die verschiedenfarbigen LEDs von der programmgesteuerten Recheneinheit durch Abgabe von den Lichtstromanteilen entsprechenden pulsweitenmodulierten Signalanteilen an eine die verschiedenfarbigen LEDs ansteuernde Elektronik.

[0041] Damit wird eine Farbstabilisierung eines LED-Scheinwerfers sichergestellt, bei der unabhängig von einer sich ändernden Umgebungstemperatur des LED-Scheinwerfers die Lichtfarbe bzw. Farbtemperatur oder der Farbort einer gewünschten Lichtmischung sowie gegebenenfalls weitere Parameter, die das vom LED-Scheinwerfer abgegebene Licht beeinflussen wie der Farbwiedergabeindex oder die Mischlichtfähigkeit, die Lichtstromanteile der Farbgruppen der verschiedenfarbigen LEDs nachgeführt bzw. ausgeglichen werden. Da zum Nachführen der Lichtstromanteile bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen nur ein Temperatursensor erforderlich ist und sämtliche für die Bestimmung der jeweiligen Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs erforderliche Parameter voreingegeben werden können, ermöglichen die vorstehend beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Emissionsspektren in Verbindung mit der programmgesteuerten Recheneinheit und einer pulsweitenmodulierten Signal abgebenden Steuerelektronik die unmittelbare Ansteuerung der einzelnen Farbgruppen der verschiedenfarbigen LEDs, ohne dass zusätzliche Eingaben vom Benutzer erforderlich sind, nachdem dieser die Optimierungs- und Zielparameter in der Grundeinstellung bzw. Kalibrierung des LED-Scheinwerfers festgelegt hat.

[0042] Daraus ergeben sich bei Anwendung des Verfahrens zur Approximation der Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs mit Hilfe der Gaußverteilung zur Korrektur der farb- oder fotometrischen Eigenschaften des LED-Scheinwerfers in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur die Verfahrensschritte

- Messen der Temperaturwerte an einer LED jeder Farbgruppe der verschiedenfarbigen LEDs,
- Ermitteln der Parameter λ_p , w_{50} und f_L für jede Farbgruppe über eine lineare bzw. quadratische Abhängigkeit von der Temperatur,
- Berechnung der neuen, temperaturabhängigen Emissionsspektren über die Gaußverteilung mit Hilfe der temperaturabhängigen Parameter,
- Einlesen der Emissionsspektren in die programmgesteuerte Recheneinheit und Berechnen der den Lichtstromanteilen entsprechenden pulswertenmodulierten Signalanteile für die Lichtmischung,
- Einstellen der pulswertenmodulierten Signalanteile für die verschiedenfarbigen LEDs am LED-Scheinwerfer und
- ggf. Messen der Leuchtdichte und Anpassen der vom LED-Scheinwerfer abgegebenen Lichtstärke an den Leuchtdichte-Sollwert durch eine übereinstimmende Erhöhung oder Absenkung der den verschiedenfarbigen LEDs zugeführten elektrischen Leistung.

[0043] Werden die vorstehenden Verfahrensschritte 1 bis 4 im Rahmen der Kalibrierung durchgeführt, so können die temperaturabhängigen Lichtstromanteile im Scheinwerfer hinterlegt werden, was im allgemeinen sinnvoller und schneller ist.

[0044] Zur Anwendung des Verfahrens zur Approximation der Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs über eine temperaturabhängige Verschiebung plus Normierung der in der Kalibrierung bei der Grundeinstellung des LED-Scheinwerfers ermittelten Emissionsspektren zur Korrektur der farb- oder fotometrischen Eigenschaften des LED-Scheinwerfers in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur dienen somit vorzugsweise die Verfahrensschritte

- Messen der Temperaturwerte an einer LED jeder Farbgruppe der verschiedenfarbigen LEDs,
- Ermitteln der Parameter f_L und $\Delta\lambda_p$ für jede Farbgruppe über eine lineare oder quadratische Abhängigkeit von der Temperatur,
- Berechnen der neuen, temperaturabhängigen Emissionsspektren $E_T(\lambda)$,
- Einlesen der temperaturabhängigen Emissionsspektren $E_T(\lambda)$ in die programmgesteuerte Recheneinheit und Berechnung der den Lichtstromanteilen entsprechenden pulswertenmodulierten Signalanteile für die Lichtmischung,
- Einstellen der pulswertenmodulierten Signalanteile für die verschiedenfarbigen LEDs am LED-Scheinwerfer,
- ggf. Messen der Leuchtdichte und Anpassung der vom LED-Scheinwerfer abgegebenen Lichtstärke an den Leuchtdichte-Sollwert durch eine übereinstimmende Erhöhung oder Absenkung der den verschiedenfarbigen LEDs zugeführten elektrischen Leistung.

[0045] Auch bei diesem Verfahren können die vorstehenden Verfahrensschritte 1 bis 4 im Rahmen der Kalibrierung durchgeführt und die temperaturabhängigen Lichtstromanteile im Scheinwerfer hinterlegt werden.

[0046] Bei beiden vorstehend beschriebenen Verfahren ist die Einbindung der programmgesteuerten Recheneinheit zur Berechnung der Lichtstromanteile der Lichtmischung des LED-Scheinwerfers bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen erforderlich und bietet den Vorteil einer sehr genauen Berechnung der Lichtstromanteile der einzelnen Farbgruppen. Insbesondere bei einer genauen Einstellung der verschiedenen, vom Programm der programmgesteuerten Recheneinheit angebotenen Optionen für eine genaue Berechnung der Lichtstromanteile der Lichtmischung sind nicht vernachlässigbare Rechenzeiten zu berücksichtigen, was für einige Anwendungsfälle, beispielsweise bei einem Filmset, nicht akzeptabel ist, da der LED-Scheinwerfer unterbrechungsfrei zur Verfügung stehen muss.

[0047] Als weiteres alternatives Verfahren besteht die Möglichkeit, dass die Spektren in Abhängigkeit von der Temperatur nicht approximiert, sondern im Rahmen der Kalibrierung mit sehr genauen Daten gemessen werden. Im Rahmen der Kalibrierung kann eine Neuberechnung der Mischungsanteile in Abhängigkeit von der Temperatur vorgenommen und die temperaturabhängigen Mischungsanteile in Tabellen- oder Funktionsform im Scheinwerfer hinterlegt werden.

[0048] Dementsprechend besteht ein alternatives Verfahren zur Einstellung der farb- oder fotometrischen Eigenschaften eines LED-Scheinwerfers, der aus verschiedenfarbigen LEDs zusammengesetzt ist, deren Lichtstromanteile die Lichtfarbe, Farbtemperatur und/oder den Farbtort der vom LED-Scheinwerfer abgegebenen Lichtmischung bestimmen und durch Ansteuern der verschiedenfarbigen LEDs mittels pulswertenmodulierter Signale eingestellt werden, in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur des LED-Scheinwerfers darin, dass die die verschiedenfarbigen LEDs entsprechend den Lichtstromanteilen der einzelnen Farbgruppen für die Grundeinstellung der Lichtmischung auf eine vorgegebene Lichtfarbe ansteuernden pulswertenmodulierten Signale temperaturabhängig verändert werden.

[0049] Dieses alternative Verfahren stellt eine sehr einfache Lösung für eine Farbkorrektur bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen dar und basiert auf der Temperaturabhängigkeit der die verschiedenfarbigen LEDs ansteuernden pulswertenmodulierten Signale mit dem Ziel, die relativen Lichtstromanteile der an der Farbmischung beteiligten Farben über den gesamten Umgebungstemperaturbereich konstant zu halten. Durch ein Anheben bzw. Absenken der pulswertenmodulierten Signalanteile werden die bei einer aktuell erfassten Umgebungstemperatur emittierten Spektren an die Lichtstromanteile der in der Grundeinstellung erfassten Ausgangsspektren bei der Kalibrierung des LED-Scheinwerfers angepasst, so dass die voreingestellte Lichtmischung weiter verwendet werden kann.

[0050] Dabei lässt sich die Temperaturabhängigkeit der pulsweitenmodulierten Signalanteile aus der Leuchtdichteänderung ermitteln., Untersuchungen haben ergeben, dass die verschiedenfarbigen LEDs zwar sehr unterschiedlich stark temperaturabhängig sind (LEDs, die im langwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums emittieren, fallen in der Leuchtdichte bei steigender Temperatur wesentlich stärker ab als LEDs des kurzwelligen Bereichs), , jedoch kann diese

Temperaturabhängigkeit der Leuchtdichte über einen großen Temperaturbereich, der für die praktische Anwendung von Bedeutung ist, für jede Farbe in einer linearen bzw. quadratischen Funktion ermittelt und beschrieben werden.

[0051] Ermittelt man dementsprechend die relative Leuchtdichteänderung in Bezug auf die bei der Grundeinstellung eingestellte Lichtmischung, so erhält man einen Faktor f_{PWM} für jede Farbgruppe der verschiedenfarbigen LEDs. Wird der entsprechende Anteil des pulsweitenmodulierten Signals für die betreffende LED-Farbe aus der Grundeinstellung der Lichtmischung mit dem Kehrwert des Faktors f_{PWM} multipliziert, so ergibt sich daraus der neue Anteil des pulsweitenmodulierten Signals für die betreffende LED-Farbe bei der aktuell gemessenen Umgebungstemperatur.

[0052] Eine Weiterbildung dieses vereinfachten alternativen Verfahrens zur Farbstabilisierung eines LED-Scheinwerfers besteht somit darin, dass ein der relativen Leuchtdichteänderung jeder Farbgruppe der verschiedenfarbigen LEDs in Bezug auf die Grundeinstellung entsprechender Faktor f_{PWM} ermittelt wird und dass die Multiplikation des der Grundeinstellung entsprechenden Wertes der pulsweitenmodulierten Signale PWM_A jeder Farbgruppe mit dem von der gemessenen Temperatur T abhängigen Kehrwert $1/f_{PWM}$ dieses Faktors den der gemessenen Temperatur T entsprechenden Wert der pulsweitenmodulierten Signale $PWM(T)$ jeder Farbgruppe gemäß der Gleichung

$$PWM(T) = PWM_A / f_{PWM}(T)$$

ergibt.

[0053] Auch bei diesem vereinfachten Verfahren können etwaige Abweichungen in der Leuchtdichte, die nach der Ermittlung der Lichtstromanteile der verschiedenfarbigen LEDs bei der aktuell gemessenen Temperatur auftreten können, dadurch ausgeglichen werden, dass eine Leuchtdichtemessung mit einem $V(\lambda)$ -Sensor durchgeführt, die Differenz zwischen dem gemessenen Leuchtdichte-Istwert und einem Leuchtdichte-Sollwert ermittelt und die vom LED-Scheinwerfer abgegebene Lichtstärke durch eine übereinstimmende Erhöhung oder Absenkung der den verschiedenfarbigen LEDs zugeführten elektrischen Leistung an den Leuchtdichte-Sollwert angeglichen wird.

[0054] Ein wesentlicher Vorteil dieser Korrektur über die Normierung der pulsweitenmodulierten Signalanteile zur Ansteuerung der verschiedenfarbigen LEDs besteht in der Einfachheit der Ermittlung der Korrekturfaktoren, da für eine Neueinstellung der Lichtmischung lediglich fünf Parameter über einfache Funktionen berechnet und nachfolgend die ursprünglichen Anteile mit diesen Parametern bewertet werden müssen. Dabei ist keine Berechnung über eine programmgesteuerte Recheneinheit erforderlich, so dass ein großer Anteil des Rechen- und Programmieraufwandes der beiden zuvor beschriebenen Verfahren zur Approximation der Emissionsspektren der verschiedenfarbigen LEDs und Korrektur der Lichtstromanteile der verschiedenfarbigen LEDs entfällt.

[0055] Aufgrund der sehr kurzen Rechenzeit kann die Korrektur zur Farbstabilisierung des LED-Scheinwerfers kontinuierlich stattfinden, so dass im Betrieb des LED-Scheinwerfers stabile Farbeigenschaften, wie Farbtemperatur, Farbwiedergabe, Abstand vom Planck'schen Kurvenzug und Mischlichtfähigkeit gewährleistet sind. Trotz der Einfachheit dieses Korrekturverfahrens sind die nach der Korrektur auftretenden Differenzen in den Farbwerten vergleichbar zu den vorstehend genannten Farbabweichungen bei Gauß'scher Approximation so gering, dass sie vernachlässigt werden können.

[0056] Obwohl bei der Anwendung der verschiedenen erfindungsgemäßen Verfahren zur Farbstabilisierung eines LED-Scheinwerfers bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen zur Gewährleistung eines geringen Herstellungs- und Zeitaufwandes keine Farbsensoren erforderlich sind, sondern lediglich ein Temperatursensor benötigt wird, können beispielsweise zur Berücksichtigung von Alterungsprozessen die Ausgangssignale eines zusätzlich am LED-Scheinwerfer installierten Farbsensors oder Spektrometers bei der Bestimmung der Lichtstromanteile der Farbgruppen der verschiedenfarbigen LEDs an der Lichtmischung in der Grundeinstellung berücksichtigt werden, wobei die Ausgangssignale des Farbsensors oder Spektrometers an die programmgesteuerte Recheneinheit zur Bestimmung der Lichtstromanteile oder den den Lichtstromanteilen entsprechenden pulsweitenmodulierten Signalen der Farbgruppen der verschiedenfarbigen LEDs an der Lichtmischung in der Grundeinstellung abgegeben werden.

[0057] Den RGB- bzw. XYZ-Signalen des Farbsensors kann, wenn dieser kalibriert ist, zum einen der Farbort x, y und hieraus berechnet die dominante Wellenlänge der Farbe und zum andern die Helligkeit der einzelnen LEDs entnommen werden. Gleichzeitig zu den Farbwerten wird die aktuelle Temperatur vom Temperatursensor ausgelesen, damit die neuen Messwerte mit den im Speicher hinterlegten temperaturabhängigen Kennlinien (λ_p, w_{50} und Helligkeiten) korreliert werden können. Hieraus können die zur Gauß-Approximation erforderlichen Parameter Intensität sowie Peakwellenlänge bestimmt werden, die Halbwertsbreite wird gegenüber dem Originalspektrum näherungsweise als konstant betrachtet.

[0058] Im Rahmen der Farbbregelung der LED-Beleuchtungseinrichtung wird eine temperaturabhängige Leistungsbegrenzung durchgeführt, da die Gesamtleistung der LED-Beleuchtungseinrichtung bzw. der allen LEDs der LED-Farben

zugeführte Gesamtstrom einen vorgegebenen, vorzugsweise temperaturabhängigen Grenzwert nicht übersteigen darf; denn es macht wenig Sinn, bei steigender Temperatur und folglich abnehmender Helligkeit der LED-Beleuchtungseinrichtung mehr Strom in der Erwartung zuzuführen, damit den Helligkeitsabfall einzelner oder mehrerer Farben zu kompensieren. Mit einer Erhöhung der Stromzufuhr und damit der Gesamtleistung der LED-Beleuchtungseinrichtung steigt die Temperatur weiter an, so dass die Lichtausbeute weiter absinkt, bis einzelne oder mehrere LEDs überlastet und damit zerstört werden oder eine hardwaremäßige Strombegrenzung eingreift.

[0059] Dem entsprechend ist eine Begrenzung der Leistungsaufnahme des LED-Scheinwerfers und/ oder des den LEDs zugeführten Gesamtstromes vorgesehen, wobei die Leistungsaufnahme des LED-Scheinwerfers und/oder der den LEDs zugeführte Gesamtstrom temperaturabhängig begrenzt werden können.

[0060] Ein weiteres Verfahren zur temperaturabhängigen Einstellung der farb- oder fotometrischen Eigenschaften einer LED-Beleuchtungseinrichtung mit Licht unterschiedlicher Farbe bzw. Wellenlänge abstrahlenden LEDs, deren Lichtstromanteile die Lichtfarbe, Farbtemperatur und/oder einen Farbtort der von der LED-Beleuchtungseinrichtung abgegebenen Lichtmischung bestimmen und durch Ansteuern der zu LED-Farbgruppen jeweils gleicher Farbe zusammengefassten und aus farbigen und weißen LEDs bestehenden verschiedenfarbigen LEDs mittels pulsweitenmodulierter Steuersignale eingestellt werden, ist durch eine Farbsteuerung der LED-Beleuchtungseinrichtung mittels die Helligkeit (Y) in Abhängigkeit von der Boardtemperatur (Tb) der auf einer Platine angeordneten LEDs und/oder der Junctiontemperatur mindestens einer LED für jede LED-Farbe oder LED-Farbgruppe bei vorgegebenem Strom im eingeschwungenen Zustand wiedergebenden Temperaturkennlinie ($Y = f(Tb)$) der LED-Beleuchtungseinrichtung gekennzeichnet.

[0061] Bei diesem Verfahren erfolgt eine Ermittlung von Temperaturkennlinien der LED-Beleuchtungseinrichtung durch eine Ermittlung der Funktion der Helligkeit (Y) in Abhängigkeit von der Boardtemperatur Tb für jede LED-Farbe bei vorgegebenem Strom im eingeschwungenen Zustand ($Y = f(Tb)$), eine Normierung der Kennlinien auf ($Y(Tb1) = 1$), wobei (Tb1) ein willkürlich gewählter Temperaturwert in der Nähe des späteren Arbeitspunktes ist, eine Ermittlung der Parameter (a, b, c, d) für eine lineare Funktion der Form

$$Y(Tb) = a + b \cdot Tb$$

ein Polynom zweiten Grades der Form

$$Y(Tb) = a + b \cdot Tb + c \cdot Tb^2$$

oder ein Polynom dritten Grades der Form

$$Y(Tb) = a + b \cdot Tb + c \cdot Tb^2 + d \cdot Tb^3$$

und ein Speichern der Parameter a, b, c, d in Leuchtmodulen der LED-Beleuchtungseinrichtung, in der LED-Beleuchtungseinrichtung oder in einem externen Controller.

[0062] Zur vorzugsweise stichprobenhaften Ermittlung von Kalibrier-Korrekturfaktoren für die LED-Beleuchtungseinrichtung erfolgt eine Messung der Helligkeit (Y) und Boardtemperatur (Tb) für jede LED-Farbe unmittelbar nach dem Einschalten der LED-Beleuchtungseinrichtung mit dem Ergebnis $Y(Tb_{cal}, t_0)$, eine Messung der Helligkeit (Y) und Boardtemperatur (Tb) für jede LED-Farbe im eingeschwungenen Zustand und Umrechnung der Helligkeit ($Y(Tb), t_1$) auf eine Boardtemperatur (Tb1) mittels der Kennlinie ($Y = f(Tb)$) mit dem Ergebnis $Y(Tb1, t_1)$, sowie die Bildung von Korrekturfaktoren

$$kY_{cal} = Y(Tb1, t_1) / Y(Tb_{cal}, t_0)$$

die für die während der Kalibrierung gemessene Boardtemperatur (Tbcal) gelten.

[0063] Zur Helligkeitskalibrierung für ein Leuchtmodul der LED-Beleuchtungseinrichtung wird eine Messung der Helligkeit (Y) und der Boardtemperatur (T_b) für LED-Farbe unmittelbar nach dem Einschalten mit dem Ergebnis $Y(Tb_{cal}, t_0)$, eine Umrechnung auf die Helligkeit im statischen Zustand bei einer angenommenen Boardtemperatur (Tb1) für jede LED-Farbe entsprechend

$$Y(T_{b1}) = Y(Tb_{cal}, t_0) \cdot kY_{cal}$$

vorgenommen und die auf die angenommene Boardtemperatur (T_{b1}) umgerechneten Helligkeiten (Y) der LED-Farben in der LED-Beleuchtungseinrichtung gespeichert.

[0064] Zur Farbkalibrierung der LED-Beleuchtungseinrichtung erfolgt eine Messung des Spektrums und hieraus abgeleitete Helligkeit (Y) sowie der Normfarbwertanteile (x, y) für jede LED-Farbe der LED-Beleuchtungseinrichtung, eine Umrechnung der Scheinwerferhelligkeit auf eine Boardtemperatur (T_{b1}) mittels der Kennlinie ($Y = f(T_b)$) und Skalierung der Spektren auf ($Y = Y(T_{b1})$), eine Speicherung der Kalibrierdaten (x, y) und ($Y(T_{b1})$) für jede LED-Farbe in der LED-Beleuchtungseinrichtung, eine Berechnung der optimalen Lichtstromanteile der LED-Farben aus den gemessenen Spektren für N-Farbtemperaturstützpunkte unter Einsatz der programmgesteuerten Recheneinheit, ein Speichern der Lichtstromanteile der LED-Farben für N-Farbtemperaturstützpunkte im Speicher der LED-Beleuchtungseinrichtung und/oder ein Speichern der Lichtstromanteile der LED-Farben in Tabellenform in Abhängigkeit vom Zielfarbart (x, y).

[0065] Schließlich kann eine Farbregelung der LED-Beleuchtungseinrichtung unter Einbeziehung der gespeicherten Kalibrierdaten für N-Farbtemperaturstützpunkte und/oder als Farborttabelle für die Lichtstromanteile der LED-Farben, der Temperaturkennlinien je Farbe und der Helligkeit (Y) und des Farborts (x, y) für jede LED-Farbe durch Ermittlung der PWM-Steuersignale für die LED-Farben (PWM_A) für den gewünschten Farbort (x, y) und die gewünschte Helligkeit (Y), Messung der Boardtemperatur (T_b), Ermittlung der temperaturabhängigen PWM-Korrekturfaktoren für jede LED-Farbe aus den im Speicher hinterlegten Näherungskennlinien ($f_{PWM} = 1/Y$), Erfassung der Gesamtleistung der LED-Beleuchtungseinrichtung oder der den einzelnen LEDs der LED-Beleuchtungseinrichtung zugeführten Stromstärke und Ansteuerung der LEDs der LED-Beleuchtungseinrichtung mit den PWM-Korrekturfaktoren bei einer Gesamtleistung der LED-Beleuchtungseinrichtung oder der den LEDs der LED-Beleuchtungseinrichtung zugeführten Stromstärke kleiner als der vorgegebene Maximalwert (P_{max} , I_{max}) oder Ermittlung eines Cut Off-Faktors (k_{Cutoff}) zur Strom- oder Leistungsbegrenzung für alle LED-Farben aus

$$k_{Cutoff} = P_{max} / P_{neu}$$

bzw.

$$k_{Cutoff} = I_{max} / I_{neu}$$

und Ansteuerung der LEDs der LED-Beleuchtungseinrichtung mit neuen PWM-Faktoren entsprechend $PWM_T = PWM_A \cdot f_{PWM} \cdot k_{Cutoff}$ erfolgen.

[0066] Die vorstehend erläuterten Berechnungsschritte zur Ermittlung der temperaturabhängigen Spektren und daran anschließenden Neuberechnungen der Mischungsverhältnisse können sowohl "online" im Scheinwerfer als auch vorab im Rahmen der Kalibrierung erfolgen.

[0067] Eine Vorrichtung zur temperaturabhängigen Einstellung der farb- oder fotometrischen Eigenschaften einer LED-Beleuchtungseinrichtung mit verschiedenfarbigen LED-Farbgruppen, deren Lichtstromanteile die Lichtfarbe, Farbtemperatur und/oder den Farbort der von der LED-Beleuchtungseinrichtung abgegebenen Lichtmischung bestimmen, ist gekennzeichnet durch eine Eingabevorrichtung zur Einstellung der Lichtfarbe, Farbtemperatur und/oder des Farborts der von der LED-Beleuchtungseinrichtung abzugebenden Lichtmischung und zur Vorgabe von anwendungsspezifischen Zielparametern und deren zulässige Abweichungen von einem Idealwert, eine im Gehäuse der LED-Beleuchtungseinrichtung und/oder im Bereich mindestens einer LED der verschiedenfarbigen LED-Farbgruppen angeordnete Temperatur-Messeinrichtung, die ein der gemessenen Temperatur entsprechendes Temperatursignal abgibt, eine Steuereinrichtung zur Ansteuerung der LEDs der verschiedenfarbigen LED-Farbgruppen mit pulswidenmodulierten Stromimpulsen, einen Speicher mit für jede LED-Farbgruppe gespeicherten Kalibrierdaten für mindestens einen das Emissionsspektrum bestimmenden Wert in Abhängigkeit von der Temperatur und einen mit der Steuereinrichtung und dem Speicher verbundenen Mikroprozessor zur Bestimmung von den Lichtstromanteilen für jede LED-Farbgruppe entsprechenden pulswidenmodulierten Steuersignalen zur Ansteuerung der LEDs der LED-Farbgruppen in Abhängigkeit von dem von der Temperatur-Messeinrichtung abgegebenen Temperatursignal.

[0068] Die Eingabevorrichtung zur Einstellung der Lichtfarbe, Farbtemperatur und/oder des Farborts der von der LED-Beleuchtungseinrichtung abzugebenden Lichtmischung und zur Vorgabe von anwendungsspezifischen Zielparametern und deren zulässige Abweichungen von einem Idealwert besteht vorzugsweise aus einer Mischeinrichtung oder DMX-Konsole.

[0069] Die Steuereinrichtung zur Ansteuerung der LED-Farbgruppen mit pulswidenmodulierten Stromimpulsen weist einen mit dem Mikroprozessor verbundenen, programmgesteuerten Eingang, einen mit der Eingabevorrichtung verbundenen Lichtmischeingang und einen mit einem Sensor und/oder eine Kalibrations-Handgerät verbundenen Sensor- und/oder Kalibrationseingang auf und ist mit einer Speisespannungsquelle verbunden.

[0070] Anhand von Ausführungsbeispielen werden nachstehend die erfindungsgemäßen Verfahren und deren jewei-

lige Vorzüge weiter erläutert. Es zeigen:

- Fig. 1 eine schematische Darstellung der Absteuerung einer als LED-Spotlight oder LED-Panel unterschiedlicher Größe ausgebildeten LED-Beleuchtungseinrichtung;
- Fig. 2 eine perspektivische Darstellung eines Leuchtmoduls mit einem Modulträger und einer mit dem Sockel eines Modul-Kühlkörpers verbundenen Lichtquelle;
- Fig. 3 ein Blockschaltbild einer Modulelektronik mit gleichartig aufgebauten Treiberschaltungen;
- Fig. 4 Emissionsspektren von fünf verschiedenfarbigen LEDs einer LED-Beleuchtungseinrichtung;
- Fig. 5 eine grafische Darstellung der Temperaturabhängigkeit von LEDs unterschiedlicher Farbe und Materialzusammensetzung;
- Fig. 6 eine grafische Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Peakwellenlänge für die LED-Farbgruppen Amber und Rot (Abbildung 6.4 der DA);
- Fig. 7 eine grafische Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Halbwertsbreite für die LED-Farbgruppen Amber und Rot (Abbildung 6.7 der DA);
- Fig. 8 u. 9 eine grafische Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Spektren für Glühlicht und Tageslicht (Abbildungen 6.9 und 6.10 der DA);
- Fig. 10 eine grafische Darstellung der relativen Leuchtdichte für Glühlicht und Tageslicht in Abhängigkeit von der Temperatur (Abbildung 6.11 der DA);
- Fig. 11 eine grafische Darstellung der Farbtemperaturverschiebung für Glühlicht und Tageslicht in Abhängigkeit von der Temperatur (Abbildung 6.12 der DA);
- Fig. 12 ein schematisches Blockschaltbild einer programmgesteuerten Recheneinheit zur Ermittlung der Lichtstromanteile oder pulsweitenmodulierten Signale von Farbgruppen verschiedenfarbiger LEDs (Blockschaltbild Frau Krämer);
- Fig. 13 ein schematisches Blockschaltbild des Algorithmus zur Farbkorrektur mittels Spektrenapproximation über die Gauß'sche Normalverteilung ohne Lichtsensor;
- Fig. 14 eine grafische Darstellung der relativen Leuchtdichte über der Wellenlänge bei der Approximation der Emissionsspektren mittels Gaußverteilung für die Farbgruppen Amber und Blau;
- Fig. 15 ein schematisches Blockschaltbild des Algorithmus zur Farbkorrektur mittels Spektrenapproximation über die Gauß'sche Normalverteilung mit Lichtsensor;
- Fig. 16 ein schematisches Blockschaltbild des Algorithmus zur Farbkorrektur mittels Spektrenapproximation über die Gauß'sche Normalverteilung mit Lichtsensor und Helligkeitsausgleich;
- Fig. 17 ein schematisches Blockschaltbild des Algorithmus zur Farbkorrektur durch Berechnen temperaturabhängiger, optimierter Mischungsverhältnisse für die Farbtemperatureinstellungen;
- Fig. 18 ein schematisches Blockschaltbild des Algorithmus zur Ermittlung temperaturabhängiger Dimmfaktoren aus hinterlegten Kennlinien der temperaturabhängigen Mischungsverhältnisse für die Farbtemperatureinstellungen;

Fig. 19	ein schematisches Blockschaltbild des Algorithmus zur Farbkorrektur durch Ermittlung temperaturabhängiger Dimmfaktoren aus hinterlegten Kennlinien unter Berücksichtigung konstanter Lichtstromanteile ohne Helligkeitssensor;
5 Fig. 20	ein schematisches Blockschaltbild des Algorithmus zur Farbkorrektur durch Ermittlung temperaturabhängiger Dimmfaktoren aus hinterlegten Kennlinien unter Berücksichtigung konstanter Lichtstromanteile mit Helligkeitssensor;
10 Fig. 21 bis 23 Und 25 bis 29	Flussdiagramme und Kennlinien für die relative Helligkeit einer LED-Farbe bzw. LED-Farbgruppe in Abhängigkeit von der Boardtemperatur T_b für eine Farbsteuerung mittels Temperaturkennlinien;
15 Fig. 24	ein Ersatzschaltbild des Wärmewiderstandes zwischen LED-Board und Sperrschicht der LED-Chips,
Fig. 30 und 31	Spektren zur Verdeutlichung der Unterschiede von kalten und warmen Spektren für die Einstellung 3200K und 5600K;
20 Fig. 32	Farbtemperatur (CCT)-Abweichung kalt-warm in Abhängigkeit von der Farbtemperatur;
Fig. 33	Farbortabweichung dx , dy (kalt-warm) in Abhängigkeit vom Zielfarbart x für Zielfarborte x,y entlang des Planckschen Kurvenzugs im Farbtemperaturbereich zwischen 2200 K und 24000 K;
25 Fig. 34	die optimalen Lichtstromanteile warm und kalt als Funktion der Farbtemperatur CCT;
Fig. 35	eine Grafik der gemessenen Farbtemperatur eines 5-Kanal-LED-Moduls in Abhängigkeit von der NTC-Temperatur für die Einstellung CCT=3200 K mit implementierter Korrektur der Spektralshift;
30 Fig. 36	eine Grafik der gemessenen Farbtemperatur eines LED-Moduls in Abhängigkeit von der NTC-Temperatur für die Einstellung CCT = 5600 K mit implementierter Korrektur der Spektralshift;
35 Fig. 37	ein Flussdiagramm zur Ermittlung der Temperaturkennlinien in Abhängigkeit vom Dimmgrad (PWM) und der Flussspannung und
40 Fig. 38	Helligkeits-Temperaturkennlinien für gelbe und rote LEDs sowie eine lineare Inter- und Extrapolation für die gelbe LED für +/- 3nm Wellenlängenabweichung

[0071] Fig. 1 zeigt einen Längsschnitt durch den schematischen Aufbau einer als LED-Spotlight-Scheinwerfer 1 ausgebildeten LED-Beleuchtungseinrichtung mit einem zylinderförmigen Gehäuse 10, in dem eine LED-Lichtquelle 3 angeordnet ist, die sich aus einer Keramik-Platine, auf der Keramik-Platine in Chip-On-Board-Technologie angeordneten verschiedenfarbigen LEDs und einer über die LEDs angebrachten Vergussmasse zusammensetzt. Die LED-Lichtquelle 3 wird mit einem Wärmeleitkleber direkt auf einen Kühlkörper 11 aus gut wärmeleitendem Material wie Kupfer oder Aluminium aufgebracht, der die von den LEDs der LED-Lichtquelle 3 abgegebene Wärme ableitet. Ein an der Rückseite des LED-Scheinwerfers 1 angeordneter Lüfter 12 sorgt für eine zusätzliche Kühlung der LEDs.

[0072] Die Lichtmischung erfolgt durch einen konusförmigen oder alternativ zylinderförmigen Lichtmischstab 13, an dessen Ende eine als POC-Folie ausgebildete Streuscheibe 14 angebracht ist. Über eine in Längsrichtung des LED-Scheinwerfers 1 verstellbare Fresnel-Linse 15 kann der LED-Scheinwerfer 1 stufenlos zwischen einer Spot- und Flood-Stellung eingestellt werden.

[0073] Fig. 2 zeigt eine perspektivische Darstellung eines Leuchtmoduls, das aus einem viereckigen, als Leiterplatte ausgebildeten Modulträger 2, auf dem eine Modulelektronik 5 angeordnet ist und der eine Ausnehmung 21 aufweist, durch die ein die Oberfläche des Modulträgers 2 überragender Sockel 110 eines Modul-Kühlkörpers 11 gesteckt ist, und der zur Unterseite mit einer Steckerleiste 16 verbunden ist, über die die Modulelektronik mit einer Leistungssteuereinheit verbunden wird. Auf dem Sockel 110 des Modul-Kühlkörpers 16 ist eine Lichtquelle 3 mit mehreren auf einer quaderförmigen Metallkernplatine angeordneten LEDs 4, die Licht unterschiedlicher Wellenlänge und damit Farbe abgeben, einem Temperatursensor 6 und Leiterbahnen zur Verbindung der LEDs 4 und des Temperatursensor 6 zu den

Rändern der Metallkernplatine angeordnet, von wo sie über eine direkte Draht- oder Bondverbindung mit der Modulelektronik verbunden werden.

[0074] Die LEDs 4 setzen sich aus mehreren Licht unterschiedlicher Wellenlänge, d.h. unterschiedlicher Farbe abgebenden LEDs zusammen. Durch enges Anordnen der LEDs 22 auf der Metallkernplatine wird bereits eine durch die Auswahl der LEDs einstellbare Lichtmischung aus den unterschiedlichen Farben erzeugt, die durch zusätzliche Maßnahmen wie optische Lichtbündelung und Lichtmischung noch optimiert und durch weitere Steuerungs- und Regemaßnahmen unabhängig von beispielsweise der Temperatur konstant gehalten werden kann, um eine gewünschte Farbtemperatur, Helligkeit und dergleichen einstellen zu können.

[0075] Fig. 3 zeigt ein Funktionsschaltbild der Modulelektronik 5 zur Ansteuerung von sechs LED-Gruppen mit jeweils zwei in Reihe geschalteten, Licht gleicher Wellenlänge abgebenden LEDs 401, 402; 403, 404; 411, 412; 421, 422; 431, 432; 441, 442 sowie zur Regelung der von den LEDs abgegebenen Lichtmischung durch eine Helligkeitsansteuerung der einzelnen LED-Gruppen mittels einer pulsweitenmodulierten Steuerspannung und Ansteuerung einer temperaturstabilisierten Stromquelle zur Speisung der LED-Gruppen.

[0076] Die Modulelektronik 5 enthält einen Microcontroller 50, der sechs pulsweitenmodulierte Steuerspannungen PWM1 bis PWM6 an sechs identisch aufgebaute Konstantstromquellen 51 bis 56 abgibt. Der Microcontroller 50 ist über eine serielle Schnittstelle SER A und SER B mit einem externen Controller verbunden und weist Eingänge AIN1 und AIN2 auf, die über Verstärker 60, 70 mit einem Temperatursensor 6 und einem Helligkeits- oder Farbsensor 7 des Leuchtmoduls verbunden sind.

[0077] Die identisch aufgebauten Stromquellen 51 bis 56 sind sehr gut temperaturstabilisiert und enthalten eine temperaturstabilisierte Konstantstromquelle 57, die mit jeweils einem Ausgang PWM1 bis PWM6 der die pulsweitenmodulierten Steuerspannungen abgebenden Ausgänge PWM1 bis PWM6 des Microcontrollers 50 verbunden und über einen Widerstand 59 an eine Versorgungsspannung U_{LED1} bis U_{LED6} angeschlossen sind. Die temperaturstabilisierte Konstantstromquelle 57 ist ausgangsseitig mit der Anode der in Reihe geschalteten LEDs einer LED-Gruppe, die jeweils Licht gleicher Wellenlänge abgeben, und mit dem Steueranschluss eines elektronischen Schalters 58 verbunden, der einerseits mit der Kathode der in Reihe geschalteten LEDs und andererseits mit Massepotential GND verbunden ist.

[0078] Die temperaturstabilisierte Konstantstromquelle 57 zeichnet sich durch ein schnelles und sauberes Schalten mit einer Schaltfrequenz von 20 bis 40 kHz aus. Um die Verlustleistung des Leuchtmoduls so gering wie möglich zu halten, werden die in der Herstellungstechnologie unterschiedlichen LED-Chips mit bis zu sechs unterschiedlichen Versorgungsspannungen U_{LED1} bis U_{LED6} gespeist.

[0079] Mit der Anordnung der temperaturstabilisierten Stromquellen 51 - 56 auf dem Modulträger des Leuchtmoduls wird die Modularität des Systems verbessert und die Spannungsversorgung vereinfacht. Bei einer Reduzierung der unterschiedlichen Versorgungsspannungen U_{LED1} bis U_{LED6} durch eine Anwendung von nur zwei verschiedenen Spannungen zur gruppenweise zusammengefassten Spannungsversorgung der Stromquellen 51 - 56 für beispielsweise die roten und gelben LEDs einerseits und die blauen, grünen und weißen LEDs andererseits benötigt das Leuchtmodul nur noch fünf Schnittstellen, d. h. eine Verbindung des Leuchtmoduls über fünf Leitungen, nämlich zwei Versorgungsspannungen V_{LED1} und V_{LED2} , Massepotential GND und die seriellen Schnittstellen SER A und SER B mit einem externen Controller zur übergeordneten Steuerung und Regelung einer Vielzahl gleichartig aufgebauter Leuchtmodule.

[0080] Zur Verdeutlichung der verschiedenen erfindungsgemäßen Verfahren zur Einstellung der farb- oder fotometrischen Eigenschaften einer LED-Beleuchtungseinrichtung und des der Erfindung zugrunde liegende Problems werden nachfolgend anhand der Figuren 4 bis 11 die verschiedenen Parameter zusammenfassend erläutert, die die Farbabgabe von LEDs bestimmen.

[0081] Fig. 4 zeigt die Spektren verschiedenfarbiger LEDs in einer LED-Beleuchtungseinrichtung als Darstellung der relativen Leuchtdichte über der Wellenlänge des von einer LED-Beleuchtungseinrichtung abgegebenen Lichts. Da LEDs Licht nicht monochromatisch mit einer scharfen Spektrallinie emittieren, sondern in einem Spektrum mit einer gewissen Bandbreite, das angenähert als Gauß'sche Glockenkurve angenommen werden kann, können die Emissionsspektren von LEDs über eine Gauß'sche Verteilung simuliert werden. Fig. 4 zeigt in durchgezogener Linie das Emissionsspektrum einer weißen LED, in kurz gestrichelter Linie das Emissionsspektrum einer blauen LED, in lang gestrichelter Linie das Emissionsspektrum einer gelben oder amberfarbenen LED, in punktierter Linie das Emissionsspektrum einer roten LED und in strichpunktierter Linie das Emissionsspektrum einer grünen LED.

[0082] Dieser Spektraldarstellung ist zu entnehmen, dass die Form des Spektrums der weißes Licht abgebenden LED stark von den Spektren der farbiges Licht abgebenden LEDs abweicht. Dies folgt aus der Technologie zur Weißlichterzeugung, bei der als Grundlage zur Lichterzeugung ein blauer Chip benutzt wird, dessen Spektrum Ursache des ersten, kleineren Peaks des Spektrums der weißen LED sorgt. Die Phosphorbeschichtung des blauen LED-Chips wandelt das blaue Licht zum Teil in gelbes Licht um, aus dem der zweite, höhere Peak im gelben Bereich des Spektrums resultiert. Gemischt ergeben die Anteile weißes Licht. Über die Dicke der Phosphorbeschichtung kann die Farbtemperatur des weißen Lichts variiert werden, so dass auf diesem Weg sowohl warmweiße als auch tageslichtweiße LEDs hergestellt werden können.

[0083] Fig. 5 zeigt die Temperaturabhängigkeit von LEDs in einer Darstellung der relativen Leuchtdichte über der

Sperrschicht- oder Junction-Temperatur T in $^{\circ}\text{C}$ bei unterschiedlichen Materialkombinationen. Beim Einsatz von LEDs als Leuchtmittel stellt die Temperaturabhängigkeit der LEDs ein großes Problem dar. Mit steigender Sperrschichttemperatur T ändern sich die Eigenschaften und Kennwerte von LEDs signifikant. So nimmt mit steigender Temperatur T die Leuchtdichte stark ab, und es erfolgt eine Verschiebung der Spektren zu höherwelligen Bereichen, also zum roten Licht hin. Diese Temperaturabhängigkeiten sind je nach benutzten Materialien unterschiedlich stark ausgeprägt, was zur Folge hat, dass sich auch die farbmtrischen Eigenschaften einer additiv aus weißes Licht und farbiges Licht abgebenden LEDs ermischten Lichtzusammensetzung ändern.

[0084] Nachstehend sollen anhand der Fig. 6 bis 11 die Leuchtdichten, Peak-Wellenlängen und Halbwertsbreiten einzelner LED-Farbgruppen, die jeweils aus mehreren Licht derselben Farbe abgebenden LEDs zusammengesetzt sind, abhängig von an einer LED der jeweiligen Farbgruppe anliegenden Temperatur betrachtet und eine Analyse der Spektren und der Leuchtdichte sowie der Farbtemperatur und des Farborts der Lichtmischungen Kunstlicht (Tungsten) und Tageslicht (Daylight), ebenfalls abhängig von den anliegenden Temperaturen, vorgenommen werden.

[0085] Wie der Darstellung gemäß Fig. 5 zu entnehmen ist, weisen die verschiedenfarbigen LEDs eine unterschiedlich starke Temperaturabhängigkeit auf. Diejenigen LEDs, die im langwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums emittieren, fallen in der Leuchtdichte bei steigender Temperatur T in $^{\circ}\text{C}$ wesentlich stärker ab als die LEDs, die im kurzwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums emittieren. So weisen die LED-Farben Amber und Rot einen Leuchtdichteabfall von 128% bzw. 116% bei 20°C auf 65% bzw. 75% des Ausgangswertes bei 60°C auf. Die Farbgruppen Blau und Grün sind deutlich weniger temperaturabhängig bezüglich der Leuchtdichte. Da die weißen LEDs auf der Technologie der blauen LEDs aufbauen, resultiert ebenfalls eine deutlich geringere Temperaturabhängigkeit des Leuchtdichteabfalls weißer LEDs.

[0086] Wie bei der Leuchtdichte fällt auch für die Peakwellenlänge die Temperaturabhängigkeit bei verschiedenen LED-Typen unterschiedlich aus.

[0087] Fig. 6 zeigt beispielhaft die Temperaturabhängigkeit der Peakwellenlänge λ_p für die LED-Gruppen Amber und Rot und verdeutlicht eine Verschiebung der Peakwellenlängen λ_p mit steigender Umgebungs- oder Sperrschichttemperatur T in $^{\circ}\text{C}$ der LEDs. Auch bezüglich der Peakwellenlänge λ_p sind die LEDs im höherwelligen sichtbaren Bereich wie Amber und Rot stärker temperaturabhängig als LEDs der LED-Gruppen Blau und Grün, die weit weniger temperaturabhängig sind.

[0088] Wie die Leuchtdichte und die Peakwellenlänge λ_p der einzelnen LED-Farbgruppen ist auch die Halbwertsbreite w_{50} der emittierten Spektren linear von der Temperatur T in $^{\circ}\text{C}$ abhängig. Im Unterschied zu den beiden erstgenannten Parametern sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen LED-Farbgruppen hier nicht so gravierend. Beispielhaft sind in Fig. 7 die Verläufe der Halbwertsbreite w_{50} der LED-Farben Amber und Rot über der Temperatur T in $^{\circ}\text{C}$ dargestellt. Im Gegensatz zur Leuchtdichte und Peakwellenlänge λ_p ist die Halbwertsbreite w_{50} für die LEDs der Gruppen Blau und Grün ähnlich temperaturabhängig wie für die Gruppen Amber und Rot.

[0089] Zur Erläuterung der Temperaturabhängigkeit der Spektren für die Lichtmischungen "Kunstlicht" und "Tageslicht" ist in Fig. 8 die relative Leuchtdichte über der Wellenlänge in nm für die Lichtmischung "Kunstlicht" und in Fig. 9 für die Lichtmischung "Tageslicht" bei verschiedenen Sperrschichttemperaturen dargestellt.

[0090] Für beide Lichtmischungen ist ein deutlicher Abfall der Leuchtdichte mit der Temperatur zu erkennen, wobei sich durch die Verschiebung der Peakwellenlängen der einzelnen LED-Farbgruppen das Spektrum der Lichtmischung in Richtung des längerwelligen Bereiches verschiebt. Besonders offensichtlich wird in den Fig. 8 und 9 der starke Leuchtdichteabfall der LED-Farbgruppen Amber und Rot.

[0091] Fig. 10 zeigt die relative Leuchtdichte in % über der Temperatur T in $^{\circ}\text{C}$ der Lichtmischungen "Kunstlicht" und "Tageslicht" bezogen auf eine Umgebungstemperatur von 20°C und verdeutlicht, dass der Temperatureinfluss auf die einzelnen LED-Farbgruppen einen Leuchtdichterückgang in der Lichtmischung verursacht, der nicht vernachlässigbar ist. Dabei zeigt die Lichtmischung "Kunstlicht" einen größeren relativen Leuchtdichteabfall als die Lichtmischung "Tageslicht".

[0092] Fig. 11 zeigt die Farbtemperaturverschiebung $dCCT$ in K für "Kunstlicht" und "Tageslicht" abhängig von der Umgebungstemperatur T und verdeutlicht, dass durch die wesentlich stärkere Temperaturempfindlichkeit der LEDs in den Bereichen Rot und Amber bezüglich der Leuchtdichte zu einer Blauverschiebung der Lichtfarbe mit steigender Temperatur führt.

[0093] Um die vorstehend beschriebenen temperaturabhängigen Änderungen der Lichtfarbwerte zu korrigieren, können erfindungsgemäß verschiedene Verfahren angewandt werden. Zunächst muss der Scheinwerfer kalibriert werden, indem eine Grundmischung für die Einstellungen "Kunstlicht" mit 3200 K und "Tageslicht" mit 5600 K ermittelt wird. Um die korrekte Lichtfarbe am Scheinwerfer einstellen zu können, müssen die Anteile, das heißt Pulsbreiten einer Pulsweitenmodulation (PWM) bei der Ansteuerung der LED-Farbgruppen ermittelt werden. Diese werden mithilfe einer in Fig. 12 schematisch dargestellten programmgesteuerten Recheneinheit berechnet.

[0094] Um die korrekte Lichtfarbe am Scheinwerfer einstellen zu können, müssen die Anteile (Pulsbreiten T) einer Pulsweitenmodulation (PWM) für alle LED-Farbgruppen ermittelt werden. Dies wird mithilfe der programmgesteuerten Recheneinheit berechnet, deren prinzipieller Aufbau in Fig. 13 dargestellt ist.

Beschreibung Blockschaltbild LED-Mix

[0095] In die zur Lösung der vorstehenden Aufgabenstellung vorgesehene programmgesteuerte Recheneinheit können verschiedenen Spektren von LED-Farben eingelesen werden, beispielsweise für die in Fig. 12 angegebenen LED-Farben Rot, Blau, Gelb, Weiß und Amber. Der Benutzer kann eingabenseitig die folgenden, als Sollwerte dienenden Optimierungsparameter einstellen:

- Die Ziel-Farbtemperatur der LED-Mischung (z.B. 3200 K, 5600 K)
- Das Filmmaterial oder den Kamerasensor, bei dem kein Farbstich gegenüber der Referenzlichtart erzeugt werden soll (gute Mischlichtfähigkeit), (z.B. Kodak 5246D, Kodak 5274T)
- Referenzlichtart für die Kamera (z.B. Glühlampe 3200 K, Tageslicht 5600 K, HMI usw.), für welche gute Mischlichtfähigkeit erzielt werden soll

[0096] Die programmgesteuerte Recheneinheit optimiert mittels genetischer Algorithmen die Mischungsanteile der eingelesenen Farbspektren der LED-Farben auf die folgenden Parameter:

- Farbtemperatur
- Minimaler Abstand vom Planckschen Kurvenzug (d.h. möglichst kein Farbstich in Richtung grün oder magenta für das Auge erkennbar)
- Farbwiedergabeindex (möglichst nahe an 100)
- Mischlichtfähigkeit mit Film bzw. Digitalkamera. Der Farbabstand zwischen der ermittelten Mischung sowie der Referenzlichtart muss über das Aufnahmemedium Film bzw. Kamera minimal sein.

[0097] Für die vorstehend angegebenen Zielwerte CCT (K), Filmmaterial/Sensortyp und Referenzlichtart für Mischlichtfähigkeit kann der Benutzer neben den Sollwerten erlaubte Abweichungen bzw. Toleranzen ΔCCT (K), $\Delta\text{C}_{\text{Planck}}$ (Farbartabstand zum Planckschen Kurvenzug), ΔCRI , $\Delta\text{C}_{\text{Film}}$ (Farbartabstand Mischlichtfähigkeit) eingeben.

[0098] Das Ergebnis der Optimierung durch die programmgesteuerte Recheneinheit sind dann die Anteile der in das Programm eingegebenen LED-Spektren der LED-Farben zur Einstellung einer optimalen Mischung. Die Ausgabe der LED-Mischung, das heißt der Dimmfaktoren und der Lichtstromanteile für jede der LED-Farben sowie die mit dieser Mischung erzielten farbmetrischen Werte für den Farbart, die Farbtemperatur, den Farbtabstand zum Planckschen Kurvenzug, den Farbwiedergabeindex sowie die Mischlichtfähigkeit mit Film- bzw. Digitalkamera werden ebenfalls berechnet und ausgegeben. Die ausgegebenen Werte können vorab zur Einstellung bzw. Kalibrierung des Scheinwerfers verwendet werden oder direkt an der Elektronik zur Einstellung der Dimmfaktoren bzw. der für die Mischung erforderlichen Lichtstromanteile ausgegeben werden.

[0099] Zur Nachführung der Spektren der einzelnen LED-Farben bzw. LED-Farbgruppen einer Lichtmischung in Abhängigkeit von der gehäuseinternen Umgebungstemperatur, der Board- oder der Sperrschichttemperatur der LED-Chips können erfindungsgemäß verschiedene Verfahren angewendet werden, die nachstehend anhand der Figuren 13 bis 20 näher erläutert werden.

[0100] Fig. 13 zeigt eine erste Variante, bei der die Ansteuerung der LEDs der einzelnen LED-Farben mit Pulsweitenmodulation (PWM) online, das heißt durch unmittelbare Eingabe der temperaturabhängig ermittelten Dimmfaktoren, für die einzelnen LED-Farben an die Ansteuerelektronik der LEDs erfolgt bzw. die für die Lichtmischung erforderlichen Lichtstromanteile für jede der LED-Farben ausgegeben werden. Bei diesem ersten Verfahren wird kein Lichtsensor zur Leuchtdichtemessung eingesetzt.

[0101] In dem Mikroprozessor der programmgesteuerten Recheneinheit sind die Kalibrierdaten, das heißt die Kennlinien für die Peakwellenlänge $\text{peak}=f(T)$, die Halbwertsbreite $w_{50}=f(T)$ und die Leuchtdichte $Y_0=f(T)$ als Funktion der Temperatur im Speicher des Mikroprozessors für jede LED-Farbe als Funktion oder Tabelle gespeichert. Nach dem Start des Programms erfolgt

1. Messung der Temperatur an einer LED bzw. LED- Farbgruppe,
2. Ermittlung der temperaturabhängigen Parameter für die Peakwellenlänge $\text{peak}=f(T)$, die Halbwertsbreite $w_{50}=f(T)$ und die Leuchtdichte $Y_0=f(T)$ aus den hinterlegten Kennlinien,
- Berechnung der neuen Spektren über die Gaußsche Normalverteilung entsprechend der Gaußschen Glockenkurve

$$E(\lambda) = e^{-2,7725 \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{w_{50}} \right)^2}$$

oder für eine noch genauere Annäherung des Spektrums mittels der auf der Gaußverteilung beruhenden Formel

$$E(\lambda) = f_L \cdot \frac{1}{\frac{w_{50}}{2} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{w_{50}/2} \right)^2}$$

mit

λ_p der Peakwellenlänge des LED-Emissionsspektrums,
 w_{50} der Halbwertsbreite des LED-Emissionsspektrums und
 f_L einem temperaturabhängigen Umrechnungsfaktor

3. Einlesen der Spektren in die programmgesteuerte Recheneinheit und Berechnung der neuen an die gegenüber der Ausgangstemperatur geänderte Temperatur angepassten Dimmfaktoren für die neue Lichtmischung aus der Spektrenapproximation über die Gaußsche Normalverteilung,

4. Einstellung der der neuen Lichtmischung entsprechenden Dimmfaktoren an den LEDs der einzelnen LED-Farbgruppen des Scheinwerfers über die Ansteuerelektronik zur Ansteuerung der LEDs jeder LED-Farbgruppe. Die Programmschleife wird nach der Ansteuerung der LEDs durch eine erneute Temperaturmessung geschlossen. Fig. 14 zeigt eine grafische Darstellung der relativen Leuchtdichte über der Wellenlänge bei der Approximation der Emissionsspektren mittels Gaußverteilung für die Farbgruppen Amber und Blau und zeigt eine sehr gute Annäherung an die jeweils gemessenen Werte.

Bei zusätzlichem Einsatz eines Lichtsensors zur Leuchtdichtemessung kommt das in Fig. 15 als Flussdiagramm dargestellte Programm zum Einsatz, bei dem zu den vorstehend erläuterten Programmschritten 1 bis 4 der Programmschritt

5. Leuchtdichtemessung mit Lichtsensor und Dimmung des Scheinwerfers auf den Sollwert.

hinzukommt.

[0102] Auch bei dem in Fig. 15 als Flussdiagramm dargestellten Programm werden die Kalibrierdaten, d.h. die Kennlinien für die Peakwellenlänge $\text{peak}=f(T)$, die Halbwertsbreite $w_{50}=f(T)$ und die Leuchtdichte $Y_0=f(T)$ als Funktion der Temperatur im Speicher des Mikroprozessors für jede LED-Farbe als Funktion oder Tabelle gespeichert. Nach dem Start des Programms erfolgt eine Messung der Helligkeiten bzw. Leuchtdichte $Y_0=f(T)$ für jede LED-Farbgruppe der einzelnen LED-Farben des Scheinwerfers. Daran schließt sich im nächsten Programmschritt eine Temperaturmessung der gehäuseinternen Umgebungstemperatur der LEDs, d.h. der Board- oder Junction- bzw. Sperrschichttemperatur der LEDs des Scheinwerfers an. Aus diesen Messwerten werden die temperaturabhängigen Faktoren $Y_0=f(T_u)$ aus dem mit dem Mikroprozessor verbundenen Speicher ermittelt und anschließend die Korrekturfaktoren aus dem Quotienten

$$fk = Y_0(T_u) / Y_t(T_u)$$

mit der Ausgangshelligkeit Y_0 und der Helligkeit Y_t bei der Temperatur T berechnet, die den relativen Leuchtdichteabfall über den gesamten Temperaturbereich darstellen und einen temperaturabhängigen Umrechnungsfaktor der Leuchtdichte des Spektrums relativ zur Leuchtdichte des Ausgangsspektrums angeben. Als nächster Programmschritt schließt sich eine erneute Temperaturmessung an und aus den hinterlegten Kennlinien werden die temperaturabhängigen Faktoren für die Peakwellenlänge $\text{peak}=f(T)$, die Halbwertsbreite $w_{50}=f(T)$ und Leuchtdichte $Y_0=f(T)$ ermittelt. Analog dem in Fig. 13 dargestellten Flussdiagramm erfolgt anschließend eine Spektrenapproximation über die Gaußsche Normalverteilung.

[0103] Im nachfolgenden Programmschritt werden die mittels der Gaußschen Normalverteilung approximierten Spektren für jede Farbgruppe mit den entsprechend der vorstehenden Formel ermittelten farbabhängigen Korrekturfaktoren fk multipliziert. Mit Hilfe der in Fig. 12 dargestellten programmgesteuerten Recheneinheit werden anschließend die Dimmfaktoren für die Pulsweitenmodulation der einzelnen LEDs der LED-Farbgruppen des Scheinwerfers für die Lichtmischung bei der gemessenen Temperatur berechnet und die einzelnen LEDs jeder LED-Farbgruppe des Scheinwerfers mit den berechneten Dimmfaktoren über die Ansteuerelektronik angesteuert. Auch bei diesem Programmablauf wird die Programmschleife durch eine sich anschließende erneute Temperaturmessung geschlossen.

[0104] Die Beleuchtungseinrichtung kann mit Hilfe dieses Programmablaufs auf die neu berechnete Lichtmischung eingestellt werden und die Farbkorrektur infolge der geänderten gehäuseinternen Umgebungstemperatur, Board- oder Junctiontemperatur ist erfolgt. Um etwaige Abweichungen in der Leuchtdichte, die nach der Korrektur auftreten können, auszugleichen, erfolgt eine Leuchtdichtemessung mit einem Licht- oder V(A)-Sensor, mit dessen Hilfe die Differenz

zwischen Ist- und Soll-Leuchtdichte ermittelt und die Beleuchtungseinrichtung über eine gleichmäßige Dimmung aller Farbgruppen an den Sollwert angeglichen wird.

[0105] Der Vorteil des in Fig. 15 dargestellten Steuerprogramms besteht darin, dass eine Kompensation von Alterungseffekten möglich ist, da mit dem bei diesem Steuerprogramm vorgesehenen Lichtsensor ein zeitlicher Helligkeitsabfall erfassbar ist. Wird anstelle eines Licht- oder $V(\lambda)$ -Sensors ein RGB- oder Farbsensor oder ein Spektrometer als Sensorelement eingesetzt, so können zusätzlich neben Helligkeitsänderungen auch Farbänderungen der einzelnen LED-Farben des Scheinwerfers erfasst werden.

[0106] Eine weitere Variation besteht darin, bei Anordnung eines RGB- oder Farbsensors oder eines Spektrometers zusätzlich Änderungen der Peakwellenlänge $\text{peak}=f(T)$ und der Halbwertsbreite $w_{50}=f(T)$ zu erfassen.

[0107] Das in Fig. 16 dargestellte Flussdiagramm dient zur Erläuterung eines Steuerprogramms zur Ansteuerung der LEDs verschiedener LED-Farbgruppen eines Scheinwerfers mit einem Helligkeitsausgleich der temperaturabhängigen Lichtmischung unter Einsatz eines Lichtsensors.

[0108] Auch bei diesem Steuerprogramm ist die Ablage von Kalibrierdaten im Mikroprozessor für jede LED-Farbe als Funktion oder Tabelle für die temperaturabhängigen Parameter Peakwellenlänge $\text{peak}=f(T)$, Halbwertsbreite $w_{50}=f(T)$ und Leuchtdichte $Y_0=f(T)$ erforderlich. Nach dem Programmstart werden die aktuellen Helligkeiten Y_t für jede LED-Farbgruppe gemessen. Es schließt sich eine Messung der gehäuseinternen Umgebungstemperatur bzw. der Board- oder Junctiontemperatur T_u an. Anschließend werden die temperaturabhängigen Faktoren $Y_0=f(T_u)$ aus dem mit dem Mikroprozessor verbundenen Speicher ermittelt und daraus die Korrekturfaktoren f_k entsprechend dem Quotienten

$$f_k = Y_0(T_u) / Y_t(T_u)$$

mit der Ausgangshelligkeit Y_0 und der Helligkeit Y_t bei der Temperatur T berechnet.

[0109] Nach der Berechnung der Korrekturfaktoren f_k erfolgt erneut eine Temperaturmessung, die der Ermittlung der temperaturabhängigen Faktoren für die Peakwellenlänge $\text{peak}=f(T)$, die Halbwertsbreite $w_{50}=f(T)$ und Leuchtdichte $Y_0=f(T)$ aus den hinterlegten Kennlinien zugrunde gelegt wird. Wie bei den vorstehend beschriebenen Steuerprogrammen erfolgt anschließend eine Spektrenapproximation über die Gaußsche Normalverteilung. Daran schließt sich eine Multiplikation der Spektren mit den farbabhängigen Korrekturfaktoren f_k an, für die in einem nachfolgenden Programmschritt die neue Lichtmischung Y_{Soll} , d.h. neue Sollwerte für die Dimmfaktoren und Lichtstromanteile für die LEDs der LED-Farbgruppen des Scheinwerfers mit Hilfe der in Fig. 12 dargestellten programmgesteuerten Recheneinheit berechnet werden. Im Onlinebetrieb werden die LEDs des LED-Scheinwerfers mit den neuen Dimmfaktoren für die neue Lichtmischung angesteuert.

[0110] Nach der Ansteuerung der LEDs mit den neuen Dimmfaktoren erfolgt eine erneute Helligkeitsmessung zur Erfassung des Istwertes Y_{Ist} einzeln für jede LED-Farbgruppe mit Hilfe des Licht- oder $V(\lambda)$ -Sensors. Aus der Istwertmessung Y_{Ist} der Helligkeitsmessung und der Sollwertvorgabe für die Helligkeit Y_{Soll} wird ein Korrekturfaktor $f = Y_{\text{Ist}} / Y_{\text{Soll}}$ berechnet und anschließend die LEDs mit neuen Dimmfaktoren angesteuert, die sich aus dem Produkt der berechneten Dimmfaktoren mit dem Korrekturfaktor $f = Y_{\text{Ist}} / Y_{\text{Soll}}$ entsprechend der Beziehung

$$\text{PWM-Faktoren (neu)} = \text{PWM-Faktoren (berechnet)} * f$$

ergeben.

[0111] Auch bei diesem Steuerprogramm wird die Programmschleife mit einer erneuten Temperaturmessung geschlossen. Zusätzlich kann eine Kompensation von Alterungseffekten vorgesehen werden, indem mittels eines Licht- oder $V(\lambda)$ -Sensor ein zeitlicher Helligkeitsabfall erfasst wird. Beim Einsatz eines RGB- oder Farbsensor oder eines Spektrometers als Sensorelement können zusätzlich neben Helligkeitsänderungen auch Farbänderungen der einzelnen LED-Farben des Scheinwerfers und zusätzlich Änderungen der Peakwellenlänge $\text{peak}=f(T)$ und der Halbwertsbreite $w_{50}=f(T)$ erfasst werden.

[0112] Fig. 17 zeigt ein Flussdiagramm zur Kalibrierung eines LED-Scheinwerfers, das eine mehrdimensionale Tabelle zur Vorabberechnung der Mischungsverhältnisse der Lichtmischungen aus mehreren LED-Farben bei verschiedenen Temperaturen ergibt, wobei diese Berechnung vorab außerhalb des Scheinwerfers erfolgt.

[0113] Nach dem Start des Kalibrierungsprogramms ist zu entscheiden, ob eine Approximation über eine Gaußsche Normalverteilung gewünscht wird. Soll die Approximation über die Gaußsche Normalverteilung erfolgen, werden die temperaturabhängigen Parameter für die Peakwellenlänge $\text{peak}=f(T)$, die Halbwertsbreite $w_{50}=f(T)$ und die Helligkeit bzw. Leuchtdichte $Y_0=f(T)$ für jede LED-Farbe ermittelt bzw. gemessen. Daraus erfolgt für den gesamten Temperaturbereich des Scheinwerfereinsatzes eine Spektrenapproximation über die Gaußsche Normalverteilung.

[0114] Alternativ wird anstelle einer Approximation über die Gaußsche Normalverteilung eine Messung der temperaturabhängigen Spektren der LED-Farben durchgeführt.

[0115] Aus den Ergebnissen der beiden Alternativen werden mit Hilfe der in Fig. 12 dargestellten programmgesteuerten Recheneinheit die temperaturabhängig optimierten Lichtmischungen aus den einzelnen eingesetzten LED-Farben, das heißt, die Dimmfaktoren für die einzelnen LEDs der LED-Farbgruppen für N0 Farbtemperaturen, beispielsweise für Tageslicht, Kunstlicht und gegebenenfalls für zusätzliche Farbtemperaturstützpunkte berechnet. An diese Berechnung

schließt sich eine Speicherung der temperaturabhängigen Mischungsverhältnisse, das heißt der Dimmfaktoren für die einzelnen LEDs der LED-Farbgruppen des Scheinwerfers für die N0 Farbtemperatureinstellungen an. Diese N0 Farbtemperatureinstellungen können dann einem Steuerprogramm zur Regelung der Farbtemperatur eines Scheinwerfers entsprechend dem in Fig. 18 dargestellten Flussdiagramm zugrunde gelegt werden.

[0116] Fig. 18 setzt die Ermittlung und Speicherung von Kalibrierdaten im Mikroprozessor der Ansteuerungselektronik für die LEDs der einzelnen LED-Farbgruppen des Scheinwerfers für N0 Farbtemperaturstützpunkte in Form einer Funktion oder in Form einer im Speicher des Mikroprozessors abgelegten Funktion oder Tabelle voraus, aus der sich das Mischungsverhältnis, d.h. die Dimmfaktoren als Funktion der Umgebungstemperatur T_u und der Farbtemperatur CCT ergeben.

[0117] Nach dem Start des Regelungsprogramms erfolgt eine Messung der gehäuseinternen Umgebungstemperatur bzw. der Board- oder Junctiontemperatur der LEDs, der LED-Farbgruppen bzw. einzelner LEDs jeder LED-Farbgruppe. Aus dem Istwert der Temperaturmessung werden die temperaturabhängigen Dimmfaktoren aus den im Speicher der Ansteuerungselektronik hinterlegten Kennlinien ermittelt und die LEDs der einzelnen LED-Farbgruppen mit den temperaturabhängigen neuen Dimmfaktoren angesteuert. Auch bei diesem Regelungsprogramm wird die Programmschleife mit einer erneuten Temperaturmessung abgeschlossen.

[0118] In den Fig. 19 und 20 sind Flussdiagramme für zwei weitere Steuerungsverfahren zur Ermittlung von Dimmfaktoren für die temperaturabhängigen Lichtmischungen der LED-Farbgruppen einer Beleuchtungseinrichtung ohne und mit Einsatz einer Leuchtdichtemessung mit einem Licht- oder $V(\lambda)$ -Sensor dargestellt.

[0119] Fig. 19 zeigt den Ablauf eines Steuerungsprogramms, das auf der Einstellung konstanter Lichtstromanteile der einzelnen LED-Farbgruppen der Beleuchtungseinrichtung beruht, ohne dass eine Leuchtdichtemessung mit einem Licht- oder $V(\lambda)$ -Sensor erfolgt. In dem Speicher der Ansteuerungselektronik sind als Funktion oder Tabelle Kalibrierdaten, nämlich die Kennlinie für die Helligkeit $Y=f(T_u)$ für jede LED-Farbe der LED-Farbgruppen der Beleuchtungseinrichtung und die Stützpunkte für das jeweilige Mischungsverhältnis in Form der als Funktion der Farbtemperatur CCT als Dimmfaktoren abgelegt.

[0120] Nach dem Start des Programms erfolgt eine Temperaturmessung, die der Ermittlung der temperaturabhängigen Faktoren $Y=f(T_u)$ für die einzelnen LED-Farbgruppen aus den hinterlegten Kennlinien zugrunde gelegt wird. Durch eine entsprechende Normierung werden aus den ermittelten temperaturabhängigen Faktoren Y die jeweiligen Dimmfaktoren entsprechend der Gleichung

$$PWM(T_u) = PWM(T_0) / Y(T_u)$$

Mit T_0 der Ausgangs- oder Basistemperatur und T_u der aktuell gemessenen Temperatur berechnet. Die einzelnen LEDs jeder LED-Farbgruppe des Scheinwerfers werden mit den so berechneten Dimmfaktoren $PWM(T_u)$ in Abhängigkeit von der aktuellen Temperatur angesteuert und die Programmschleife durch eine erneute Temperaturmessung geschlossen.

[0122] Die Bestimmung von temperaturabhängigen Lichtmischungen der einzelnen LEDs der LED-Farbgruppen des Scheinwerfers unter Zugrundelegung konstanter Lichtstromanteile kann zusätzlich mit einer Leuchtdichtemessung mittels eines Licht- oder $V(\lambda)$ -Sensor verknüpft werden.

[0123] Fig. 20 zeigt ein Flussdiagramm eines Steuerungsprogramms zur Ermittlung von Dimmfaktoren für die einzelnen LEDs mehrerer LED-Farbgruppen eines Scheinwerfers mit einer Temperaturmessung und zusätzlichen Leuchtdichtemessung mittels eines Licht- oder $V(\lambda)$ -Sensor.

[0124] Auch in dieser Ausführungsform werden die als Funktion oder Tabelle im Speicher des Mikroprozessors der Ansteuerungselektronik abgelegten Kalibrierdaten der Helligkeit Y und der Stützpunkte für das Mischungsverhältnis in Form von Dimmfaktoren als Funktion der Umgebungstemperatur T_u und der Farbtemperatur CCT für die LEDs der einzelnen LED-Farbgruppen der Beleuchtungseinrichtung geladen. Nach dem Start des Programms erfolgt eine Messung der gehäuseinternen Umgebungstemperatur bzw. der Board- oder Junctiontemperatur T_u der LEDs, der LED-Farbgruppen bzw. einzelner LEDs jeder LED-Farbgruppe. Aus dem Istwert der Temperaturmessung werden die temperaturabhängigen Faktoren $Y=f(T_u)$ aus den hinterlegten Kennlinien ermittelt und die LEDs der einzelnen LED-Farbgruppen mit den berechneten, temperaturabhängigen neuen Dimmfaktoren

$$PWM(T_u) = PWM(T_0) / Y(T_u)$$

angesteuert.

[0125] Im Unterschied zu dem vorstehend anhand des in Fig. 19 dargestellten Flussdiagramms beschriebenen Steuerungsverfahrens erfolgt nach der Ansteuerung der LEDs jeder LED-Farbgruppe mit den neuen Dimmfaktoren nicht eine erneute Temperaturmessung, sondern zunächst eine Leuchtdichtemessung mithilfe des Licht- oder V(A)-Sensor, an die sich eine Berechnung der Korrekturfaktoren $f = Y_{\text{Ist}} / Y_{\text{Soll}}$ anschließt. Unter Zugrundelegung dieser Korrekturfaktoren f erfolgt die Ansteuerung der LEDs jeder LED-Farbgruppe des Scheinwerfers mit neuen Dimmfaktoren entsprechend der Gleichung

$$\text{PWM-Faktoren (neu)} = \text{PWM-Faktoren (berechnet)} * f$$

[0126] Bei diesem Steuerverfahren kann die nach der Berechnung der neuen Dimmfaktoren unter Zugrundelegung der ermittelten temperaturabhängigen Faktoren $Y=f(T_u)$ aus der hinterlegten Kennlinie eingefügte Ansteuerung der LEDs mit den neuen Dimmfaktoren entfallen und stattdessen nach der Berechnung der Dimmfaktoren entsprechend der Gleichung $\text{PWM}(T_u) = \text{PWM}(T_0) / Y(T_u)$ die Leuchtdichtemessung mit dem Licht- oder V(λ)-Sensor durchgeführt werden.

Zusätzlich können weitere Daten im Speicher hinterlegt werden, wie beispielsweise Kalibrierdaten, Daten für warm und kalt, Set-Lichtausbeuten und dergleichen, die nachstehend näher beschrieben werden.

[0127] In den Fig. 21 bis 23 und 25 bis 29 sind Flussdiagramme und Kennlinien für die relative Helligkeit einer LED-Farbe bzw. LED-Farbgruppe in Abhängigkeit von der Boardtemperatur T_b für ein weiteres Verfahren zur Farbstabilisierung einer LED-Beleuchtungseinrichtung dargestellt, bei dem die Farbsteuerung mittels Temperaturkennlinien erfolgt.

[0128] Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass die Helligkeit der LEDs der einzelnen LED-Farben von der Sperrschichttemperatur der LEDs bzw. von der gemessenen Boardtemperatur T_b abhängt, die anstelle der schwer messbaren Sperrschichttemperatur auf einer Leiterplatte gemessen wird, auf der Licht unterschiedlicher Wellenlänge bzw. Farbe abgebende LEDs zu einer Mischlicht abgebenden Lichtquelle angeordnet sind, die von einer Modulelektronik angesteuert wird, die zusammen mit der Leiterplatte auf einem Modulträger angeordnet ist und ein Leuchtmodul bildet, das zusammen mit einer Vielzahl weiterer Leuchtmodule zu einem LED-Panel zusammengefasst werden kann.

A) Die Helligkeit von LEDs als Funktion der Boardtemperatur T_b

[0129] Die Abhängigkeit der Helligkeit Y der LEDs der LED-Beleuchtungseinrichtung von der Sperrschichttemperatur bzw. von der gemessenen Boardtemperatur T_b wird durch eine Näherungsfunktion angenähert, die je nach gewünschtem Genauigkeitsgrad als lineare Funktion der Form

$$Y(T_b) = a + b * T_b$$

als Polynom zweiten Grades der Form

$$Y(T_b) = a + b * T_b + c * T_b^2 \quad (\text{Formel 1})$$

oder als Polynom dritten Grades der Form

$$Y(T_b) = a + b * T_b + c * T_b^2 + d * T_b^3$$

ausgebildet ist. Bei einer quadratischen Näherungsfunktion mit einem Polynom zweiten Grades ist die Güte der Annäherung bereits sehr gut, wie das in Fig. 21 dargestellte Diagramm für die LED-Farbe Amber, das zusammen mit der LED-Farbe Rot die stärkste Temperaturabhängigkeit aufweist, belegt.

[0130] Die gemessenen Kennlinien der relativen Helligkeit $Y(T_b)$ als Funktion der Boardtemperatur T_b in °C zeigen einen strom- bzw. leistungsabhängigen Kurvenverlauf. In allen Fällen ist der Kurvenverlauf für höhere LED-Leistungen am steilsten. Dieser Effekt ist sowohl bei einer Gleichstrom- als auch bei einer pulsweitenmodulierten PWM-Ansteuerung der LEDs festzustellen, wie dem in Fig. 22 dargestellten Diagramm zu entnehmen ist, in dem die relative Helligkeit in Prozent über der Boardtemperatur T_b in °C bei verschiedenen Dimmfaktoren und damit unterschiedlichen Stromstärken zu entnehmen ist.

[0131] Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass sich der die Boardtemperatur erfassende Temperatursensor in der Praxis in der Nähe der LED-Chips auf der LED-Leiterplatte der Lichtquelle eines Leuchtmoduls möglichst nah an

den lichtemittierenden LED-Chips befindet. Trotz dieser Nähe des Temperatursensors zu den lichtemittierenden LED-Chips ist zwischen der Temperaturmessstelle und der Sperrschicht der LED-Chips ein Wärmewiderstand vorhanden, so dass der gemessene Temperaturwert stets geringer als die Sperrschichttemperatur ist. Die Temperaturdifferenz hängt dabei für jeden LED-Chip von der dem betreffenden LED-Chip abzuführenden Wärmeleistung und somit von der aufgenommenen LED-Leistung ab. Da somit die Helligkeit der Licht unterschiedlicher Wellenlänge abgebenden LEDs von der Sperrschichttemperatur abhängt, die Kennlinien jedoch nur in Abhängigkeit von der Boardtemperatur aufgenommen werden, zeigen die gemessenen Kennlinien der Helligkeit als Funktion der Boardtemperatur einen strom- bzw. leistungsabhängigen Kurvenverlauf.

[0132] Hieraus ergibt sich die Problemstellung, dass die Kennlinien der Helligkeit Y als Funktion der Boardtemperatur T_b vom Strom bzw. von der aufgenommenen Leistung der einzelnen LEDs bzw. LED-Farbgruppen abhängen, so dass eine Helligkeitskorrektur mit der vorstehend angegebenen Formel 1, bei der die Abhängigkeit der Helligkeit der LEDs von der Boardtemperatur durch eine quadratische Näherungsfunktion angenähert wird, für abweichende LED-Ströme bzw. Wärmeleistungen mit systematischen Fehlern behaftet ist und nicht optimal arbeiten würde. Dieser Effekt würde beispielsweise beim Dimmen, d. h. bei der pulsweitenmodulierten Ansteuerung der LED-Beleuchtungseinrichtung auftreten.

[0133] Eine Verbesserung des Verfahrens, die Helligkeitskorrektur auf der Basis von Temperaturkennlinien $Y = f(T_b)$ durchzuführen, kann dadurch erreicht werden, dass die vorstehende Formel 1 wie folgt abgewandelt wird:

$$Y(T_b) = a + b (T_b + \Delta T) + c (T_b + \Delta T)^2 \quad (\text{Formel 2})$$

In die quadratische Näherungsfunktion $Y = f(T_b)$ wird ein Temperatur-Korrekturwert ΔT eingefügt, der die Änderungen der Temperaturdifferenz zwischen dem Temperatursensor und der Sperrschicht der LEDs aufgrund veränderter Wärmeleistungen berücksichtigt. Diese Form kann speziell dann gegenüber einem Polynom zweiten Grades (Formel 1) Vorteile bringen, wenn auch die Elektronik ein (ungewolltes) temperaturabhängiges Verhalten hat und der LED-Strom zusätzlich von der Temperatur abhängt.

[0134] Der Korrekturwert ΔT hängt dabei vom Wärmewiderstand zwischen dem Temperatursensor und der Sperrschicht der LEDs sowie von der momentan abzuführenden Wärmeleistung bzw. elektrischen Leistung der LEDs ab.

[0135] Er kann entweder aus diesen Größen, sofern bekannt, berechnet werden oder aber aus Messreihen mit verschiedenen elektrischen Leistungen ermittelt werden.

[0136] Bei bekanntem Wärmewiderstand zwischen dem Board und der Sperrschicht der LEDs lässt sich der stromabhängige Korrekturwert ΔT wie folgt aus den LED-Strömen berechnen:

$$R_w = \Delta T / P_w$$

[0137] Mit R_w dem Wärmewiderstand zwischen Board und Sperrschicht, P_w der abzuführenden Wärmemenge, die näherungsweise der LED-Leistung entspricht und ΔT der Temperaturdifferenz zwischen Board und Sperrschicht. Hieraus folgt

$$\Delta T = R_w * P_w$$

mit der Wärmeleistung P_w , die in etwa der LED-Leistung $U_{LED} * I_{LED}$ entspricht

[0138] Der Temperaturkorrekturwert ΔT muss dabei ebenso wie die Parameter a , b , und c individuell für jede LED-Farbe berücksichtigt werden. Die stromabhängige Wärmeleistung der LEDs wird vom Mikroprozessor aus den Werten $U_{LED} * I_{LED}$ ermittelt. Da bei LEDs ein Teil der Gesamtleistung in Licht umgewandelt wird, ist die Wärmeleistung der LEDs stets geringer als das Produkt $U * I$. Dies kann durch einen zusätzlichen Faktor f_w berücksichtigt werden

$$P_w = f_w * U_{LED} * I_{LED}$$

[0139] Der farbabhängige Korrekturwert ΔT errechnet sich somit zu:

$$\Delta T = R_w * f_w * I_{LED} * U_{LED}$$

[0140] Auf diese Weise lässt sich das jeweils gemessene Verhalten der Helligkeit Y in Abhängigkeit von der Board-

temperatur T_b sehr gut rekonstruieren, wie das in Fig. 23 dargestellte Diagramm am Beispiel einer gelben LED zeigt.

B) Die Stromabhängigkeit der Kennlinien

[0141] Die gemessenen Kennlinien der Helligkeit $Y(T_b)$ als Funktion der Boardtemperatur T_b zeigt gemäß Fig. 22 einen strom- bzw. leistungsabhängigen Kurvenverlauf. In allen Fällen ist der Kurvenverlauf für höhere LED-Leistungen am steilsten. Dieser Effekt ist sowohl bei einer Gleichspannungs- als auch einer PWM-Ansteuerung der LEDs und sowohl für AlInGaP- als auch in geringerem Ausmaß für InGaN-Materialien zu beobachten.

[0142] Dieser Effekt ist darauf zurück zu führen, dass sich der Temperatursensor aus praktischen Gründen in der Nähe der LEDs auf der LED-Platine, möglichst nahe an den Licht emittierenden Chips, befindet. Dennoch ist zwischen der Temperaturmessstelle und der Sperrschicht der Chips ein Wärmewiderstand. Der gemessene Temperaturwert ist daher stets geringer als die Sperrschichttemperatur. Die Temperaturdifferenz hängt dabei je Chip von der je Chip abzuführenden Wärmeleistung und somit von der aufgenommenen LED-Leistung ab, wie dem Ersatzschaltbild des Wärmewiderstandes zwischen LED-Board und Sperrschicht der Chips gemäß Fig. 24 entnommen werden kann.

[0143] Da die Helligkeit der LEDs von der Sperrschichttemperatur abhängt, die Kennlinien jedoch nur in Abhängigkeit der Boardtemperatur aufgenommen werden, zeigen die gemessenen Kennlinien Helligkeit als Funktion der Boardtemperatur einen strom- bzw. leistungsabhängigen Kurvenverlauf.

[0144] Aus der vorstehenden Feststellung, dass die Kennlinien der Helligkeit als Funktion der Boardtemperatur vom Strom bzw. von der aufgenommenen Gesamtleistung abhängen, ergibt sich, dass eine Helligkeitskorrektur nach Formel 2 für abweichende LED-Ströme bzw. Wärmeleistungen mit systematischen Fehlern behaftet ist und nicht optimal arbeiten würde. Dieser Effekt würde z.B. beim Dimmen des LED-Scheinwerfers auftreten.

[0145] Eine Verbesserung des Verfahrens der Helligkeitskorrektur auf Basis von Temperaturkennlinien $Y=f(T_{\text{board}})$ kann erreicht werden, indem Formel 2 wie folgt abgewandelt wird:

$$Y(T_b) = A + B * (T_b + \Delta T) + C * (T_b + \Delta T)^2 + D * (T_b + \Delta T)^3 \quad \text{Formel 3}$$

[0146] In die quadratische bzw. kubische Näherungsfunktion $Y=f(T_b)$ wird ein Temperatur-Korrekturwert ΔT eingefügt, welcher die Änderungen der Temperaturdifferenz zwischen Temperatursensor und Sperrschicht auf Grund veränderter Wärmeleistungen berücksichtigt.

[0147] Der Korrekturwert ΔT hängt dabei vom Wärmewiderstand zwischen Sensor und Sperrschicht sowie von der momentan abzuführenden Wärmeleistung bzw. elektrischen Leistung des LED-Moduls ab. Er kann entweder aus diesen Größen, sofern bekannt, berechnet werden oder aber aus Messreihen mit verschiedenen elektrischen Leistungen ermittelt werden.

[0148] Bei bekanntem Wärmewiderstand (Board - Sperrschicht) der LEDs lässt sich der stromabhängige Korrekturwert ΔT wie folgt aus den LED-Strömen berechnen:

$$R_w = \Delta T / P_w$$

R_w : Wärmewiderstand zwischen Board und Sperrschicht
 P_w : abzuführende Wärmemenge, näherungsweise LED-Leistung
 ΔT : Temperaturdifferenz zwischen Board und Sperrschicht

$$\Delta T = R_w * P_w$$

P_w : Wärmeleistung, entspricht in etwa LED-Leistung $U_{LED} * I_{LED}$

[0149] Der Temperaturkorrekturwert ΔT muss dabei ebenso wie die Parameter A, B, C und D individuell für jede LED-Farbe berücksichtigt werden.

[0150] Die stromabhängige Wärmeleistung der LEDs wird vom Mikroprozessor aus den Werten $U_{LED} * I_{LED}$ ermittelt. Da bei LEDs ein Teil der Gesamtleistung in Licht umgewandelt wird, ist die Wärmeleistung der LEDs stets geringer als das Produkt $U * I$. Dies kann durch einen zusätzlichen Faktor f_w berücksichtigt werden:

$$P_w = f_w * U_{LED} * I_{LED}$$

[0151] Der farbabhängige Korrekturwert ΔT errechnet sich somit zu:

$$\Delta T = R_w * f_w * I_{LED} * U_{LED} \quad \text{Formel 4}$$

[0152] Auf diese Weise lässt sich das gemessene Verhalten sehr gut rekonstruieren, wie die in Fig. 23 dargestellte Grafik am Beispiel einer gelben LED zeigt.

[0153] Die Helligkeits-Temperaturkennlinien werden auf eine "Arbeitstemperatur" T_n normiert, welche beispielsweise die typische Betriebstemperatur im warmen Zustand darstellt.

$$Y(T_b) = A + B * (T_b + \Delta T - T_n) + C * (T_b + \Delta T - T_n)^2 + D * (T_b + \Delta T - T_n)^3 \quad \text{Formel 5}$$

[0154] Werden die Kurven so normiert, dass $Y(T_b)$ zu "1" für die Arbeitstemperatur T_n wird, so ergibt sich der Parameter A stets zu "1". Damit kann das Hinterlegen dieses Parameters im Speicher entfallen.

[0155] Die Polynomparameter A bis D werden mit den gängigen Methoden der Mathematik anhand der für verschiedene Dimmgrade aufgenommenen Kurven Helligkeit als Funktion der Boardtemperatur für die virtuelle, auf PWM = 0 extrapolierte Kennlinie ermittelt.

[0156] Zur praktischen Ermittlung des Korrekturwertes ΔT ohne Berücksichtigung der Flussspannung werden gemäß Formel 4 der Wärmewiderstand R_w sowie der Korrekturfaktor f_w zur Ermittlung der Wärmeleistung der LEDs benötigt. Häufig sind diese Werte nicht bekannt. Da die Wärmeleistung der LEDs direkt proportional zur elektrischen Leistung der LEDs und damit direkt proportional zum Dimmgrad der LEDs ist, kann Formel 4 wie folgt umgeschrieben werden:

$$\Delta T \sim PWM$$

$$\Delta T = E * PWM \quad \text{Formel 6}$$

[0157] Mit PWM dem Dimmgrad zwischen (0...1) und dem Leistungsparameter E.

[0158] Sind die Polynomparameter A bis D sowie der Leistungsparameter E bekannt, so kann während des Scheinwerferbetriebs die relative Helligkeit der LED-Farben mit Formeln 5 und 6 aus den aktuellen Werten der Boardtemperatur T_b sowie der individuellen LED-Dimmgrade PWM berechnet werden:

$$Y(T_b) = A + B * (T_b + \Delta T - T_n) + C * (T_b + \Delta T - T_n)^2 + D * (T_b + \Delta T - T_n)^3$$

$$\text{mit } \Delta T = E * PWM$$

[0159] Zur praktischen Ermittlung des Korrekturwertes ΔT mit Berücksichtigung der Flussspannung führen die typischen Flussspannungstoleranzen der LEDs dazu, dass verschiedene, typ- und farbgleiche LEDs mit verschiedenen LED-Leistungen betrieben werden, auch wenn sie mit dem selben Strom und der selben PWM angesteuert werden. Eine Berücksichtigung der individuellen Flussspannungen führt folglich zu einer weiteren Verbesserung der Qualität der angewandten Temperaturkennlinien. Aus Formel 4 folgt:

$$\Delta T \sim PWM * U_{LED}$$

$$\Delta T = E_1 * PWM * U_{LED} \quad \text{Formel 7}$$

[0160] Der Parameter E_1 kann aus dem für Formel 6 ermittelten Wert E ermittelt werden, indem E durch die Flussspannung U_{Fref} des zu seiner Ermittlung verwendeten LED-Moduls dividiert wird.

[0161] Während des Scheinwerferbetriebs kann dann die relative Helligkeit der LED-Farben mit Formeln 5 und 7 aus den aktuellen Werten der Boardtemperatur T_b sowie der individuellen LED-Dimmgrade und Flussspannungen berechnet werden:

$$Y(T_b) = A + B * (T_b + \Delta T - T_n) + C * (T_b + \Delta T - T_n)^2 + D * (T_b + \Delta T - T_n)^3$$

$$\text{mit } \Delta T = E_1 * PWM * U_{LED}$$

[0162] Um die Helligkeit der individuellen LED-Farben während des Scheinwerferbetriebs konstant zu halten, werden die PWM-Ansteuersignale in Abhängigkeit von der Boardtemperatur, der PWM sowie ggf. der Flussspannung mit dem Temperatur-Korrekturfaktor $kT = 1/Y(T_b)$ multipliziert:

$$PWM = PWM * kT = PWM / Y(T_b)$$

Formel 8

Vorstehend bedeuten:

[0163]

$Y(T_b)$	relative Helligkeit in Abhängigkeit der Boardtemperatur
T_b	Boardtemperatur in °C
T_n	Arbeitstemperatur in °C
ΔT	leistungsabhängiger Temperatur-Korrekturwert in °C
A....D	Polynomkoeffizienten
E, E1	Leistungsparameter
PWM	PWM-Ansteuersignal (0....1)
R_w	Wärmewiderstand in K/W
U_{LED}	Flussspannung in V
I_{LED}	LED-Strom in A
P_w	Wärmeleistung in W
f_w	Korrekturfaktor

[0164] Der Ablauf des Verfahrens der Farbsteuerung von Licht unterschiedlicher Wellenlänge bzw. Farbe abgebenden LEDs mittels Temperaturkennlinien ist den in den Fig. 25 bis 29 dargestellten Flussdiagrammen zu entnehmen.

[0165] Das in Fig. 25 dargestellte Flussdiagramm dient der Ermittlung von Temperaturkennlinien eines LED-Moduls, wobei die Ermittlung der Temperaturkennlinien stichprobenhaft durchgeführt wird. Die ermittelten Kennlinien werden dann auf alle LED-Module übertragen und in deren Speicher hinterlegt. Vor dem Speichern kann noch eine nachstehend erläuterte Umrechnung (Inter-/Extrapolation) der Kennlinien-Parameter auf die individuellen dominanten Wellenlängen berücksichtigt werden.

[0166] In einem ersten Schritt wird die Helligkeit Y in Abhängigkeit von verschiedenen Boardtemperaturen T_b für jede LED-Farbe bei vorgegebenem Strom im eingeschwungenen Zustand gemessen und die Kennlinie $Y = f(T_b)$ ermittelt. In einem zweiten Schritt werden die Kennlinien auf einen willkürlich gewählten Temperaturwert in der Nähe des späteren Arbeitspunktes T_{b1} normiert, d. h. $Y(T_{b1}) = 1$ ermittelt.

[0167] In einem dritten Schritt werden je nach Wahl der Näherungsfunktion die Parameter a und b für eine lineare Näherungsfunktion der Form

$$Y(T_b) = a + b * T_b$$

für eine quadratische Näherungsfunktion, d. h. ein Polynom zweiten Grades der Form

$$Y(T_b) = a + b * T_b + c * T_b^2$$

oder für eine Näherungsfunktion mit einem Polynom dritten Grades der Form

$$Y(T_b) = a + b * T_b + c * T_b^2 + d * T_b^3$$

ermittelt. Die Parameter a und b bzw. a, b, c bzw. a, b, c, d werden in den LED-Modulen, in einer zentralen Steuerein-

richtung der LED-Beleuchtungseinrichtung oder in einem externen Controller gespeichert.

[0168] Das in Fig. 26 dargestellte Flussdiagramm zeigt die stichprobenhafte Ermittlung von Kalibrier-Korrekturverfahren für die LED-Module, die im Betrieb der LED-Beleuchtungseinrichtung für eine schnelle individuelle Helligkeitskalibrierung der LED-Module benötigt werden. Die Kalibrier-Korrekturfaktoren beschreiben den Faktor der Helligkeit im eingeschwungenen Zustand gegenüber dem Helligkeitsmesswert kurz nach dem Einschalten der LED-Beleuchtungseinrichtung und werden stichprobenhaft für jede LED-Farbe ermittelt.

[0169] In einem ersten Schritt zur Ermittlung der Kalibrier-Korrekturfaktoren für jedes LED-Modul wird die Helligkeit Y in Abhängigkeit von der Boardtemperatur T_{bcal} für jede LED-Farbe unmittelbar nach dem Einschalten gemessen und als Wert $Y(T_{bcal}, t_0)$ abgelegt.

[0170] In einem zweiten Schritt wird die Helligkeit Y und die Boardtemperatur T_b für jede LED-Farbe im eingeschwungenen Zustand gemessen und als Wert $Y(T_b, t_1)$ abgelegt. Daran anschließend wird der Helligkeitswert $Y(T_b, t_1)$ auf eine Boardtemperatur T_{b1} mittels der Kennlinie $Y = f(T_b)$ umgerechnet, wobei T_{b1} die Temperatur ist, für die die Kennlinien $Y = f(T_b)$ auf 1 normiert wurden. Als Ergebnis wird der Wert $Y(T_{b1}, t_1)$ abgelegt.

[0171] In einem dritten Schritt werden die Korrekturfaktoren entsprechend der Gleichung

$$kY_{cal} = Y(T_{b1}, t_1) / Y(T_{bcal}, t_0)$$

gebildet, die nur für die während der Kalibrierung gemessene Boardtemperatur T_{bcal} gelten. Gegebenenfalls muss ein Set mehrerer Kalibrierfaktoren für verschiedene Boardtemperaturen T_{bcal} während der Kalibrierung erzeugt werden.

[0172] In Fig. 27 ist ein Flussdiagramm für die Helligkeitskalibrierung eines LED-Moduls dargestellt, die dazu dient, die Helligkeiten der LED-Farben in jedem individuellen LED-Modul zu speichern. Die Modulelektronik des LED-Moduls kann diese aus dem Speicher auslesen und kompensieren. Somit leuchten die Farben aller LED-Module einer LED-Beleuchtungseinrichtung (beispielsweise eines Scheinwerfers) gleich hell, wenn ein externer Controller der LED-Beleuchtungseinrichtung Soll-Helligkeitssignale für die verschiedenen LED-Farben vorgibt.

[0173] In einem ersten Schritt der Helligkeitskalibrierung der LED-Module wird die Helligkeit Y und die Boardtemperatur T_b für jede LED-Farbe unmittelbar nach dem Einschalten der LED-Beleuchtungseinrichtung bzw. des LED-Moduls gemessen und als Wert $Y(T_{bcal}, t_0)$ abgelegt.

[0174] In einem zweiten Schritt wird für jede Farbe eine Umrechnung auf die Helligkeit im statischen Zustand bei einer Boardtemperatur T_{b1} entsprechend

$$Y(T_{b1}) = Y(T_{bcal}, t_0) * kY_{cal}$$

umgerechnet. Dabei entspricht der Faktor kY_{cal} den entsprechend dem Flussdiagramm gemäß Fig. 26 ermittelten Kalibrierkorrekturfaktoren.

[0175] In einem dritten Schritt werden die auf die Boardtemperatur T_{b1} umgerechneten Helligkeiten der LED-Farben im jeweiligen LED-Modul gespeichert.

[0176] Das in Fig. 28 dargestellte Flussdiagramm gibt das Verfahren zur Farbkalibrierung der LED-Beleuchtungseinrichtung bzw. eines Scheinwerfers wieder. Nach dem Start des Programms erfolgt in einem ersten Schritt die Messung des Spektrums und hieraus abgeleitet der Helligkeit Y sowie der Normfarbwertanteile x, y jede LED-Farbe des Scheinwerfers. Anschließend wird die Scheinwerferhelligkeit auf die Boardtemperatur T_{b1} mittels der Kennlinie $Y = f(T_b)$ umgerechnet und die Spektren werden auf $Y = Y(T_{b1})$ skaliert.

[0177] In einem zweiten Schritt werden die Kalibrierdaten x, y und $Y(T_{b1})$ für jede LED-Farbe im Scheinwerfer gespeichert. In einem dritten Schritt erfolgt die Berechnung der optimalen Lichtstromanteile der LED-Farben aus den gemessenen Spektren für N Farbtemperaturstützpunkte mittels der vorstehend beschriebenen programmgesteuerten Recheneinheit.

[0178] In einem vierten Schritt werden die Lichtstromanteile der LED-Farben für N Farbtemperaturstützpunkte im Speicher des Scheinwerfers gespeichert und/oder die Lichtstromanteile der LED-Farben in Tabellenform in Abhängigkeit vom Zielfarbbort, d. h. den Normfarbwertanteilen x, y gespeichert.

[0179] Fig. 29 zeigt ein Flussdiagramm der Farbregelung einer als Scheinwerfer ausgebildeten LED-Beleuchtungseinrichtung.

[0180] Im Rahmen der Farbregelung der LED-Beleuchtungseinrichtung wird eine temperaturabhängige Leistungsbegrenzung durchgeführt, da die Gesamtleistung der LED-Beleuchtungseinrichtung bzw. der allen LEDs der LED-Farben zugeführte Gesamtstrom einen vorgegebenen, vorzugsweise temperaturabhängigen Grenzwert nicht übersteigen darf; denn es macht wenig Sinn, bei steigender Temperatur und folglich abnehmender Helligkeit der LED-Beleuchtungseinrichtung mehr Strom in der Erwartung zuzuführen, damit den Helligkeitsabfall einzelner oder mehrerer Farben zu kompensieren. Mit einer Erhöhung der Stromzufuhr und damit der Gesamtleistung der LED-Beleuchtungseinrichtung steigt

die Temperatur weiter an, so dass die Lichtausbeute weiter absinkt, bis einzelne oder mehrere LEDs überlastet und damit zerstört werden oder eine hardwaremäßige Strombegrenzung eingreift.

[0181] Voraussetzung für die in Fig. 29 als Flussdiagramm dargestellte Farbregelung der LED-Beleuchtungseinrichtung ist die Speicherung von Kalibrierdaten für N Farbtemperaturstützpunkte und/oder einer Farborttabelle im Mikroprozessor der LED-Beleuchtungseinrichtung oder der LED-Module mit Lichtstromanteilen der LED-Farben als Funktion der Farbtemperatur (CCT) und/oder des Farborts (x, y), der Temperaturkennlinien $Y = f(T_b)$ für jede LED-Farbe und der Helligkeit und des Farborts Y, x, y für jede LED-Farbe.

[0182] In einem ersten Schritt der Farbregelung werden die PWM-Faktoren PWM_A der LED-Farben für den gewünschten Farbort und die Helligkeit gegebenenfalls mittels Interpolation ermittelt. In einem zweiten Schritt wird die Boardtemperatur T_b gemessen und in einem dritten Schritt die temperaturabhängigen PWM-Korrekturfaktoren für jede Farbe aus den im Speicher hinterlegten Kennlinien

$$fPWM = 1/Y_{REL}$$

ermittelt, wobei als Wert Y_{REL} die lineare Näherungsfunktion, quadratische Näherungsfunktion oder Näherungsfunktion dritten Grades gemäß vorstehender Beschreibung eingesetzt wird.

[0183] In einem vierten Schritt wird geprüft, ob die der LED-Beleuchtungseinrichtung zugeführte Gesamtleistung P_{neu} oder der individuelle LED-Strom I_{neu} einen vorgegebenen Maximalwert P_{max} bzw. I_{max} übersteigt. Ist dies der Fall, wird ein Cut-Off-Faktor $kCutoff$ zur Strom- bzw. Leistungsbegrenzung ermittelt, der für alle LED-Farben gültig ist und entsprechend

$$kCutoff = P_{max}/P_{neu} \text{ bzw.}$$

$$kCutoff = I_{max}/I_{neu}$$

bestimmt wird.

[0184] Übersteigt die neue Gesamtleistung nicht den vorgegebenen Maximalwert, so wird der Faktor $kCutoff = 1$ gesetzt.

[0185] In einem fünften Schritt werden neue PWM-Faktoren PWM_T entsprechend

$$PWM_T = PWM_A * fPWM * kCutoff$$

ermittelt und die LEDs mit den neuen PWM-Faktoren PWM_T angesteuert und anschließend zum ersten Verfahrensschritt der Ermittlung der PWM-Faktoren für die PWM_A der LED-Farben zurückgekehrt.

[0186] Die im Rahmen der Kalibrierung gemessenen Grundhelligkeiten der Farbkanäle dienen zur internen Helligkeitskorrektur der LED-Module. Damit werden sowohl die Helligkeitstoleranzen der LED-Chips als auch Toleranzen in der Elektronik kalibriert. Aus diesen Werten werden dann im Rahmen der Kalibrierung des LED-Beleuchtungssystems die farbabhängigen Helligkeitskorrekturfaktoren kY ermittelt und gespeichert. Die während der Kalibrierung für jede Farbe ermittelten Helligkeiten werden über die vorab im Labor als repräsentativ ermittelten Temperaturkennlinien auf die Arbeitstemperatur T_n umgerechnet.

[0187] Im Rahmen der Scheinwerferkalibrierung werden von allen angeschlossenen LED-Modulen die internen Grundhelligkeiten Y gelesen und aus ihnen, bezogen auf das LED-Modul mit der geringsten Helligkeit die Helligkeitskorrekturfaktoren kY für alle LED-Module berechnet und hinterlegt. Sie dienen zur internen Helligkeitskorrektur der LED-Module. Die von einem externen Controller erhaltenen PWM-Befehle werden intern in den LED-Modulen mit dem Helligkeitskorrekturfaktor kY multipliziert, so dass alle angeschlossenen LED-Module die gewünschte Farbe mit derselben Helligkeit darstellen.

[0188] Die Helligkeitskorrekturfaktoren kY werden bei der Kalibrierung der LED-Beleuchtungseinrichtung für jeden Kanal wie folgt berechnet:

$$kY = Y_{min}/Y$$

wobei Y_{min} das Minimum der Grundhelligkeiten Y aller angeschlossenen LED-Module ist.

[0189] Die Parameter für die Temperaturkennlinien unter Anwendung einer Näherungsfunktion dritten Grades werden

so gewählt, dass für jede Farbe die relative Helligkeit für die Arbeitstemperatur T_n und PWM = 1 auf 1 normiert wird. Der Polynomkoeffizient a beträgt dabei 1. Da die Temperaturkennlinien vom Spitzenstrom abhängen, muss im Falle einer Spitzenstromumschaltung auf das jeweilige Parameterset zurückgegriffen werden. Auf die Arbeitstemperatur T_n sind alle helligkeitsbezogenen Kalibrierdaten normiert.

[0190] Die maximale Sperrschichttemperatur der LED-Chips gibt den in der LED-Beleuchtung hinterlegten Wert für eine Abschalttemperatur bzw. eine maximale Boardtemperatur an, der unter dem Grenzwert für die maximale Sperrschichttemperatur der LED-Chips liegen muss.

[0191] Bei Überschreitung der maximalen Boardtemperatur T_{max} muss die Gesamtleistung des LED-Moduls solange gleichmäßig reduziert werden, bis die Boardtemperatur T_b kleiner oder gleich T_{max} ist. Die Leistungsreduzierung erfolgt über den farbusabhängigen Leistungsfaktor k_p .

[0192] Für die Berechnung der modulintern anzuwendenden Dimmfaktoren bzw. PWM-Signale wird wie folgt vorgegangen.

a) Berechnung der relativen Helligkeit Y_{rel} , in Abhängigkeit von der gemessenen Boardtemperatur T_b und einer auf den Wert $Y=1$ bei der Boardtemperatur T_n normierten Kurve $Y = f(T_b)$ sowie des PWM-Signals:

$$Y(T_b, PWM) = 1 + B * (T_b - T_n + dT) + C * (T_b - T_n + dT)^2 + D * (T_b - T_n + dT)^3$$

$$Y(T_n) = 1 + B * dT + C * dT^2 + D * dT^3$$

$$\text{Mit } dT = E * (1 - PWM_{intern})$$

einer leistungsabhängige Korrektur, die typisch zwischen -10 und -30°C liegt.
Normierung der leistungskorrigierten Kennlinie auf 1 für die Arbeitstemperatur T_n :

$$Y_{rel} = Y(T_b, PWM) / Y(T_n)$$

b) Ermittlung des temperaturabhängigen Korrekturfaktors k_T (je Kanal):

$$k_T = 1 / Y_{rel}$$

c) Ermittlung der Leistungsreduzierung k_p zur Einhaltung bzw. Unterschreitung der max. Boardtemperatur (je Modul):
Bei Überschreitung der maximalen Boardtemperatur T_{max} muss die Gesamtleistung des Moduls solange gleichmäßig reduziert werden, bis $T_b \leq T_{max}$. Die Leistungsreduzierung erfolgt über den farbusabhängigen Leistungsfaktor k_p .

Die Zeitkonstante t_p (% / s) beschreibt dabei die Geschwindigkeit für die Leistungsreduzierung und m deren Steigung. Beim Modulstart beträgt $k_p = 1$

Ist $T_b > T_{max}$, so wird die Soll-Leistung um folgendem temperaturabhängigen Faktor reduziert:

$$k_p = 1 - m (T_b - T_{max})$$

(Reduzierung mit Zeitkonstante t_p)

Fällt T_b unter T_{max} , so kann die Leistung wieder erhöht werden:

$$\text{Wenn } k_p < 1, \text{ dann } k_p = (1 - m(T_b - T_{max}))$$

(Erhöhung mit Zeitkonstante t_p)

Alternativ kann der Scheinwerfer bei Überschreiten der Grenz- bzw. Shut-offtemperatur anstatt gedimmt auch abgeschaltet werden, wenn keine Helligkeitsänderung während des Betriebs erlaubt ist. In diesem Fall beträgt

$$k_p = 0, \text{ wenn } T_b > T_{\max}$$

Der Leistungsfaktor k_p beträgt maximal $k_p = 1$

d) Ermittlung der temperaturbedingt theoretisch erforderlichen Dimmfaktoren bzw. PWM-Signale je Kanal:

$$PWM_{\text{theo}} = PWM_{\text{soll}} * k_T * k_Y$$

$PWM_{\text{theo, max}}$ = Maximum der für alle Farben ermittelten PWM-Anteile PWM_{theo}

e) Ermittlung der darstellbaren relativen Helligkeit des Moduls Y_{rel} je LED-Modul:

Wenn $PWM_{\text{theo, max}} \leq 1$, dann: $Y_{\text{rel, modul}} = k_p$
 Wenn $PWM_{\text{theo, max}} \geq 1$, dann: $Y_{\text{rel, modul}} = k_p / PWM_{\text{theo, max}}$

f) Daten für einen Gruppenangleich:

Alle angeschlossenen LED-Module erhalten von einer zentralen Leistungsteuereinheit den Befehl SetGroupBrightness, wodurch ihnen die relative Helligkeit des temperaturbedingt dunkelsten LED-Moduls im Scheinwerfer mitgeteilt. Alle anderen LED-Module gleichen ihre Helligkeit auf diese Helligkeit an, um temperaturbedingte Helligkeitsgradienten zu vermeiden.

Für den Gruppenangleich sendet jedes LED-Modul seine darstellbare relative Helligkeit $Y_{\text{rel, Modul}}$ an die zentrale Leistungsteuereinheit, die die Helligkeit des (temperaturbedingt) dunkelsten LED-Modul bestimmt und diese als $Y_{\text{rel, Group}}$ an alle LED-Module sendet, damit diese ihre Helligkeit darauf angleichen (reduzieren) können:

$$Y_{\text{rel, Group}} = \text{Minimum der von allen LED-Modulen erhaltenen Werte } Y_{\text{rel, Modul}}$$

g) Gruppenangleich LED-Module

Jedes LED-Modul gleicht seine Helligkeit auf die Gruppenhelligkeit an.

Der Faktor k_{Group} für den Gruppenangleich berechnet sich wie folgt; der Defaultwert für k_{Group} beträgt 1

$$k_{\text{Group}} = Y_{\text{rel, Group}} / Y_{\text{rel, Modul}}$$

h) Berechnung der internen Dimmfaktoren bzw. PWM-Signale

$$\begin{aligned} PWM(\text{intern}) &= PWM_{\text{soll}} * k_T * k_Y * Y_{\text{rel, Modul}} * k_{\text{Group}} \\ &= PWM_{\text{theo}} * Y_{\text{rel, Modul}} * k_{\text{Group}} \end{aligned}$$

Anschließend leuchten alle LED-Module derselben Farbe mit übereinstimmender Helligkeit.

[0193] Zur Leistungsstabilisierung innerhalb eines Scheinwerfers ist es erforderlich, die errechneten relativen Lichtstromanteile pro Grundfarbe zu normieren. Wird der Scheinwerfer z.B. so angesteuert, dass die PWM-Signale auf den Maximalwert $PWM_{\max}=1$ normiert werden, so wird jeweils die maximal mögliche Helligkeit erreicht. Dies ist jedoch nicht sinnvoll, da zum einen die Helligkeit einer eingestellten Farbe über die Betriebstemperatur konstant sein sollte, was mit Hilfe der Temperatur-Helligkeits-Kennlinien sehr einfach kompensiert werden kann. Zum anderen kann jedoch je nach Kühlung des Scheinwerfers die damit erzeugte LED-Leistung zu hoch sein, so dass der LED-Scheinwerfer schon bald seine oberste Grenztemperatur (Shutofftemperatur) erreicht und sich ausschalten würde. Bei passiver Kühlung muss der Scheinwerfer in der Regel mit einem internen Dimmfaktor betrieben werden, um nicht zu heiß zu werden. Dieser interne Dimmfaktor hängt jedoch sehr stark vom Mischungsverhältnis der LED-Farben und damit von der Farbtemperatur bzw. vom Farbbort ab.

[0194] Das für eine beliebige Farbe bzw. einen Farbmodus berechnete relative Lichtstromverhältnis wird daher auf eine maximale LED-Leistung $P_{\max}$ (W) bezogen, die im Speicher des Scheinwerfers hinterlegt wird.

[0195] Um die aktuelle Leistung einer eingestellten Farbmischung zu berechnen und auf $P_{\max}$ normieren zu können, wird für jeden Farbkanal die Leistungen $P_i(W)$ @PWM=1 während der Kalibrierung im Scheinwerfer hinterlegt.

Kompensation der temperaturbedingten Farbshift bei LED-Modulen

[0196] Bei aus LED-Modulen aufgebauten Scheinwerfern ist eine Änderung der Farbtemperatur in Abhängigkeit von der Temperatur zu beobachten. Das Ausmaß beträgt ca. 300 K für die Einstellungen 3200 K und 5600 K. Dieser Effekt ist auf die temperaturbedingte Verschiebung der dominanten Wellenlängen, insbesondere der roten und gelben LEDs, zurückzuführen. Da eine Kalibrierung mit einer Messung der Spektren und Berechnung der erforderlichen Lichtstromanteile im warmen Zustand erfolgt, der Scheinwerfer aber während des Aufheizens oder im gedimmten Zustand eine niedrigere Temperatur aufweist, bewirkt eine spektrale Verschiebung eine Erhöhung der Farbtemperatur.

[0197] Die entsprechend den vorstehend beschriebenen Verfahren in den LED-Modulen implementierte Temperaturkompensation kompensiert lediglich die Helligkeiten und sorgt dafür, dass die relativen Lichtstromanteile der Farbmischung über die Temperatur konstant bleiben. Die in den Fig. 30 und 31 dargestellten Spektren veranschaulichen die Unterschiede der kalten und warmen Spektren für die Einstellung 3200K (Fig. 30) und 5600K (Fig. 31), die bei NTC-Temperaturen von 70°C und 25°C gemessen wurden und die mit der bisher implementierten Methode der konstanten Lichtstromanteile auftreten. Die temperaturbedingte Farbverschiebung verläuft hierbei nicht exakt entlang des Planckschen Kurvenzugs, besonders bei geringen Farbtemperaturen treten Abweichungen von bis zu 5 Schwellwerteinheiten vom Planckschen Kurvenzug auf. Aus diesem Grunde wird erfindungsgemäß nicht nur die CCT-Abweichung, sondern auch die Farbortabweichung (dx, dy) kompensiert.

[0198] Fig. 32 zeigt die CCT-Abweichung kalt-warm in Abhängigkeit von der Farbtemperatur, Fig. 33 die Farbortabweichung dx, dy (kalt-warm) in Abhängigkeit vom Zielfarort x für Zielfarbtöne x,y entlang des Planckschen Kurvenzugs im Farbtemperaturbereich zwischen 2200 K und 24000 K und Fig. 34 die optimalen Lichtstromanteile warm und kalt als Funktion der Farbtemperatur CCT.

[0199] Für die Kompensation der Farbverschiebung bzw. Farbshift sind folgende Methoden auf der Scheinwerferebene möglich:

a) Eingabe eines Ausgleichsalgorithmus für die Farbtemperaturkorrektur $\Delta CCT = f(CCT, T_{NTC})$ in Verbindung mit Kalibrierdaten für eine NTC-Temperatur. Dieses Kompensationsverfahren ist einfach durchzuführen aber vergleichsweise ungenau, da Abweichungen vom Planckschen Kurvenzug nicht kompensiert werden, und ist nur für Farbtemperatureinstellungen, nicht aber für beliebige Farbtöne, beispielsweise nicht für Effektfarben, anwendbar.

Der Ausgleichsalgorithmus für die Farbtemperaturkorrektur kann experimentell oder mathematisch ermittelt werden. Bei einer experimentell Ermittlung werden für einen Scheinwerfer die optimalen Lichtstromanteile für verschiedene CCT-Stützpunkte im warmen Betriebszustand ($T_{NTC \text{ warm}}$), sowie die Helligkeits-Temperaturkennlinien ermittelt und der Scheinwerfer im kalten Zustand ($T_{NTC \text{ kalt}}$) auf verschiedene Soll-Farbtemperaturen eingestellt. Anschließend wird die Farbtemperatur des emittierten Lichts gemessen und die Differenz zwischen der Zielfarbtemperatur und der gemessenen Farbtemperatur in Abhängigkeit von der Zielfarbtemperatur aufgetragen. Für diese Wertepaare wird eine Näherungsfunktion, beispielsweise ein Polynom, ermittelt.

Bei mathematischer Ermittlung eines Ausgleichsalgorithmus für die Farbtemperaturkorrektur wird davon ausgegangen, dass von einem Scheinwerfer die optimalen Lichtstromanteile für verschiedene CCT-Stützpunkte im warmen Betriebszustand ($T_{NTC \text{ warm}}$) vorliegen. Dann werden im kalten Betriebszustand ($T_{NTC \text{ kalt}}$) die Spektren der Einzel-farben gemessen und diese "Kalt-Spektren" anhand der für den warmen Betriebszustand $T_{NTC \text{ warm}}$ ermittelten Lichtstromanteile für verschiedene CCT-Stützpunkte gemischt und die Farbtemperatur aus dem so erhaltenen Mischspektrum berechnet. Die Differenz zwischen der Zielfarbtemperatur und der aus den Kalt-Spektren berechneten Farbtemperatur wird in Abhängigkeit von der Zielfarbtemperatur aufgetragen. Für diese Wertepaare wird eine Näherungsfunktion (z.B. Polynom) ermittelt.

Die so gewonnene Näherungsfunktion stellt die anzuwendende Farbtemperaturkorrektur ΔCCT_{kalt} in Abhängigkeit von der Zielfarbtemperatur für einen kalten Scheinwerfer dar. Typischerweise wird die NTC-Temperatur im Betrieb zwischen $T_{NTC \text{ warm}}$ und $T_{NTC \text{ kalt}}$ liegen. Die in Abhängigkeit von der Zielfarbtemperatur ermittelte Farbtemperaturkorrektur $\Delta CCT_{\text{kalt}}(CCT_{\text{Ziel}})$ wird entsprechend dem aktuellen T_{NTC} -Wertes linear interpoliert:

$$\Delta CCT(CCT_{\text{Ziel}}, T_{NTC}) = \Delta CCT_{\text{kalt}}(CCT_{\text{Ziel}}) / (T_{NTC \text{ warm}} - T_{NTC \text{ kalt}}) * (T_{NTC} - T_{NTC \text{ kalt}})$$

Die Software gibt dem Scheinwerfer dann anstelle der gewünschten Zielfarbtemperatur die um den Wert $\Delta CCT(CCT_{\text{Ziel}}, T_{NTC})$ korrigierte Farbtemperatur vor.

Die Methode der Farbtemperaturkorrektur führt zu korrekten ähnlichsten Farbtemperaturen des emittierten Lichts bei verschiedenen NTC-Temperaturen. Sie ist jedoch nicht in der Lage, eventuell zusätzlich auftretende Farbabweichungen vom Planckschen Kurvenzug zu kompensieren, da die zu kompensierende Farbverschiebung durch die temperaturbedingte Verschiebung der dominanten Wellenlängen selten zufällig exakt entlang des Planckschen Kurvenzugs verläuft.

Alternativ können die optimalen Lichtstromanteile auch für den kalten Betriebszustand ermittelt werden und die Korrekturfunktion anhand der Spektren bzw. der Messdaten des Scheinwerfers im warmen Betriebszustand ermittelt werden.

b) Eingabe eines Ausgleichsalgorithmus zur Farbortkorrektur Δx und $\Delta y = f(x_{\text{Ziel}}, T_{\text{NTC}})$ oder Δx und $\Delta y = f(\text{CCT}_{\text{Ziel}}, T_{\text{NTC}})$ und der Kalibrierdaten für eine NTC-Temperatur. Auch dieses Kompensationsverfahren ist einfach durchführbar, funktioniert aber für die Korrektur des Farborts, beispielsweise für eine maximale Helligkeit. Es liefert aber nicht optimale Lichtstromanteile und birgt die Gefahr für eine CRI-Verschlechterung. Darüber hinaus ist es nur für eine Farbtemperatureinstellung, nicht aber für beliebige Farborte, z.B. für Effektfarben, anwendbar.

Dieses Kompensationsverfahren benötigt zwei Korrekturfunktionen für die Normfarbwertanteile x und y . Die Korrekturfunktionen für die Farbortkorrektur können analog des Ausgleichsalgorithmus für die Farbtemperatur entweder experimentell oder mathematisch ermittelt werden.

Die in Abhängigkeit des Zielfarborts ermittelten Farbortkorrekturen Δx , $\Delta y_{\text{kalt}}(\text{CCT}_{\text{Ziel}})$ werden entsprechend dem aktuellen T_{NTC} -Wert linear interpoliert:

$$\Delta x, \Delta y(\text{CCT}_{\text{Ziel}}, T_{\text{NTC}}) = \Delta x, \Delta y_{\text{kalt}}(\text{CCT}_{\text{Ziel}}) / (T_{\text{NTC warm}} - T_{\text{NTC kalt}}) * (T_{\text{NTC}} - T_{\text{NTC kalt}})$$

Die Software gibt dem Scheinwerfer dann anstelle des Farborts der gewünschten Zielfarbtemperatur die um die Werte $\Delta x(\text{CCT}_{\text{Ziel}}, T_{\text{NTC}})$ und $\Delta y(\text{CCT}_{\text{Ziel}}, T_{\text{NTC}})$ korrigierten Farborte vor.

Auch hier können alternativ die optimalen Lichtstromanteile für den kalten Betriebszustand ermittelt werden und die Korrekturfunktionen anhand der Spektren bzw. der Messdaten des Scheinwerfers im warmen Betriebszustand ermittelt werden.

Die beschriebene Methode der Farbortkorrektur führt zu korrekten Farborten entlang des Planckschen Kurvenzugs des emittierten Lichts bei verschiedenen NTC-Temperaturen. Gewünschte Farbtemperaturen können damit exakt entlang des Planckschen Kurvenzugs eingestellt werden.

Da bei dieser Farbortkompensation dem hinterlegten optimalen Lichtstromverhältnis einige Farben zugemischt werden müssen und es bei mehr als 3 Kanälen hierfür teilweise theoretisch unbegrenzt viele Kombinationsmöglichkeiten gibt, erfolgt das Zumischen an Farben unter Umständen ungünstig in Bezug auf eine optimale Farbwiedergabe und Mischlichtfähigkeit mit Film. Diese Unsicherheit wird mit dem nachstehend unter c) beschriebenen Kompensationsverfahren gelöst.

c) Interpolation optimale Mischung = $f(\text{CCT}, T_{\text{NTC}})$ und Farbort = $f(T_{\text{NTC}})$ und Ermittlung der Kalibrierdaten (optimale Mischung und Farborte) für zwei NTC-Temperaturen.

[0200] Diese Kompensationsverfahren ergibt den besten Farbwiedergabeindex (CRI), stellt die genaueste (x, y) Methode für die farbwiedergabeoptimierten und helligkeitsoptimierten Mischungen, die genaueste (x, y) Methode für Mischungen dar und ist für beliebige Farborte anwendbar. Es bedingt jedoch einen höheren Aufwand für die Softwareentwicklung (Kalibrierung, Scheinwerfer, Farbmetrik).

[0201] Der Zeitaufwand während der Scheinwerferkalibrierung erhöht sich nur marginal. Ohne Einsatz dieses Kompensationsverfahrens würde der Scheinwerfer im warmen und damit typischen Betriebszustand kalibriert, wobei sich der Zeitaufwand für die Kalibrierung im Wesentlichen aus dem Einsetzen des Scheinwerfers in die Messvorrichtung, Anschluss des Scheinwerfers an die Versorgung und Steuergeräte sowie das Starten der Kalibriersoftware und der Aufheizdauer auf die Kalibriertemperatur $T_{\text{NTC warm}}$ zusammensetzt. Die eigentliche Erfassung der Spektren erfolgt in Sekundenschnelle. Bei dem Kompensationsverfahren c) werden lediglich vor Beginn der Aufheizphase die "Kalt-Spektren" miterfasst und von der Software entsprechend verarbeitet, was innerhalb weniger Sekunden erfolgen kann und vom Benutzer keine zusätzlichen Aktivitäten erfordert.

[0202] Diese Methode kann für folgende Modi eingesetzt werden:

a. Einstellung einer gewünschten Farbtemperatur mit bestmöglicher Farbwiedergabe und Mischlichtfähigkeit, d.h. farbwiedergabeoptimiert.

Bei der Kalibrierung werden die Spektren der Grundfarben im kalten ($T_{\text{NTC kalt}}$) sowie warmen ($T_{\text{NTC warm}}$) Zustand erfasst und jeweils die optimalen Lichtstromanteile der verwendeten LED-Farben für einige CCT-Stützpunkte berechnet und im Scheinwerfer oder Steuergerät hinterlegt:

$Y_{\text{rel warm}}(\text{CCT})$ optimale Lichtstromanteile in Abh. der CCT für $T_{\text{NTC warm}}$

$Y_{\text{rel kalt}}(\text{CCT})$ optimale Lichtstromanteile in Abh. der CCT für $T_{\text{NTC kalt}}$

Diese optimalen Lichtstromanteile führen sowohl im kalten als auch im warmen Zustand zu farbwiedergabeoptimierten Lichtmischungen, die exakt den Farbort der gewünschten Farbtemperatur treffen.
Für NTC-Temperaturen ungleich $T_{NTC \text{ warm}}$ oder $T_{NTC \text{ kalt}}$ kann die optimale Mischung durch Interpolation erhalten werden:

$$Y_{\text{rel}}(CCT, T_{NTC}) = Y_{\text{rel_kalt}}(CCT) + (T_{NTC} - T_{NTC \text{ kalt}}) * (Y_{\text{rel_warm}}(CCT) - Y_{\text{rel_kalt}}(CCT)) / (T_{NTC \text{ warm}} - T_{NTC \text{ kalt}})$$

Soll eine Farbtemperatur eingestellt werden, die zwischen zwei CCT-Stützpunkten liegt, so werden die Mischungen der beiden CCT-Stützpunkte wie vorstehend beschrieben für die aktuelle NTC-Temperatur berechnet und anschließend so zwischen den beiden CCT-Stützpunkten interpoliert, dass die gewünschte Zielfarbtemperatur erreicht wird.
b. Einstellung beliebiger Farborte bzw. Effektfarben mit bestmöglicher Lichtausbeute bzw. Helligkeit, d.h. Helligkeitsoptimiert.

[0203] Für die Berechnung beliebiger Helligkeitsoptimierter Farborte, die sowohl "weiße" Farborte mit einer beliebigen Farbtemperatur als auch beliebige Effektfarben sein können, die innerhalb des darstellbaren LED-Gamuts liegen, werden gemäß der Gesetzmäßigkeiten der additiven Farbmischung nur die Normfarbwerte X, Y, Z der verwendeten Grundfarben benötigt. Die Normfarbwerte X, Y, Z können mit Hilfe der allgemein bekannten Formeln der Farbmessung aus dem Farbort x, y und dem Helligkeitsproportionalen Wert Y berechnet werden, so dass es genügt, die Werte x, y und Y in Abhängigkeit von der NTC-Temperatur zu kennen.

[0204] Bei Anwendung der Helligkeits-Temperaturkennlinien kann davon ausgegangen werden, dass der Normfarbwert Y konstant bleibt. Es genügt also, nur die Werte x, y in Abhängigkeit von der NTC-Temperatur zu hinterlegen.

[0205] Bei der Kalibrierung werden dafür aus den "Kalt-Spektren" und den "Warm-Spektren" der LED-Grundfarben deren Normfarbwertanteile berechnet und zusammen mit dem Helligkeitswert Y im Speicher des Scheinwerfers oder Steuergerätes hinterlegt:

Für die Berechnung der Mischungen zur Einstellung beliebiger Farben mit maximaler Helligkeit können die hierfür benötigten Farbvalenzen der Grundfarben in Abhängigkeit von der aktuellen NTC-Temperatur durch lineare Interpolation berechnet werden:

$$x(T_{NTC}) = x_{\text{kalt}} + (T_{NTC} - T_{NTC \text{ kalt}}) * (x_{\text{warm}} - x_{\text{kalt}})$$

$$y(T_{NTC}) = y_{\text{kalt}} + (T_{NTC} - T_{NTC \text{ kalt}}) * (y_{\text{warm}} - y_{\text{kalt}})$$

$Y(T_{NTC}) = Y_{\text{warm}}$ gemäß der angewandten Temperatur-Helligkeitskennlinien

[0206] Fig. 35 zeigt eine Grafik der gemessenen Farbtemperatur eines 5-Kanal-LED-Moduls in Abhängigkeit von der NTC-Temperatur für die Einstellung CCT=3200 K mit implementierter Korrektur der Spektralshift nach Methode c) und Fig. 36 eine Grafik der gemessenen Farbtemperatur eines LED-Moduls in Abhängigkeit der NTC-Temperatur für die Einstellung CCT = 5600 K mit implementierter Korrektur der Spektralshift nach Methode c) im Vergleich zum Verhalten ohne Korrektur der Spektralshift bei alleinigem Wirken der Temperaturkompensation.

[0207] Wie vorstehend ausgeführt, sind für jede LED-Grundfarbe die Kennlinien $Y_{\text{rel}} = f(T_{NTC}, PWM_i)$ implementiert:

$$Y(T_{NTC}) = A + B * (T_{NTC} - T_n + dT) + C * (T_{NTC} - T_n + dT)^2 + D * (T_{NTC} - T_n + dT)^3 \quad (\text{Formel 9})$$

$$\text{mit } dT = E * PWM \quad (\text{Formel 10})$$

wobei

$Y(T_{NTC})$ Helligkeit in Abhängigkeit der NTC-Temperatur

A, B, C, D Polynomkoeffizienten der Kennlinien

T_{NTC} aktuelle NTC-Temperatur

T_n Arbeitstemperatur Werden die Kurven auf $Y(T_{NTC})=1$ @ $T_{NTC}=T_n$ normiert, so beträgt der Polynomkoeffizient A=1.

dT Korrekturwert in Abhängigkeit der aktuellen LED-Leistung

E "Leistungsparameter"
 PWM LED-PWM-Ansteuersignale

[0208] Der Mikrocontroller errechnet für jede Farbe während des Scheinwerferbetriebs in Abhängigkeit der aktuellen NTC-Temperatur den Temperatur-Korrekturfaktor $kT = 1 / Y(T_{NTC})$. Die für die Einstellung einer gewünschten Farbe errechneten PWM-Signale werden mit dem für jede Farbe berechneten Korrekturfaktor kT multipliziert. Damit wird die Helligkeit der Farben über die Betriebstemperatur konstant gehalten.

[0209] Dabei werden folgende Effekte berücksichtigt:

Temperaturabhängigkeit der Helligkeit pro Farbe mit leistungsabhängiger Temperaturkorrektur der Kennlinien ("Leistungsparameter E" in Verbindung mit der internen PWM)

[0210] Die Kurven werden durch ein Polynom 3. Grades beschrieben Koeffizienten der Temperaturkennlinie: A, B, C, D sowie Leistungsparameter E.

[0211] Da bei gleichem Dimmgrad (PWM) und gleicher Stromansteuerung die LED-Leistung gleichfarbiger LEDs auf Grund der Flussspannungstoleranzen variieren kann, weil die Temperaturdifferenz zwischen dem am NTC gemessenen Wert und der Sperrschicht der LEDs von der Flussspannung abhängig ist, wird eine Korrektur durchgeführt, bei der die leistungsabhängige Temperaturkorrektur individuell für jedes LED-Modul in Abhängigkeit von der individuellen LED-Flussspannungen UF berechnet wird.

[0212] Aus der allgemein bekannten Formel für den thermischen Widerstand $R_{th} = dT / dP$ folgt, dass die Temperaturdifferenz zwischen NTC und Sperrschicht direkt proportional zur übertragenen Leistung ist. Die LED-Leistung wiederum ist direkt proportional zur Flussspannung: $P = U_F \cdot I$. Daraus folgt, dass die Temperaturdifferenz zwischen dem NTC und der Sperrschicht dT direkt proportional zur Flussspannung der LEDs ist: $dT \sim U_F$.

[0213] Der empirisch für ein typisches LED-Modul ermittelte Leistungsparameter E ist somit direkt proportional zur Flussspannung U_F der LEDs. Weicht die Flussspannung der individuellen LED von derjenigen LED ab, für welche die Kennlinien ermittelt worden sind, so kann die Formel 9 wie folgt erweitert werden:

$$dT = E \cdot U_F / U_{\text{gemessen}} \cdot PWM \quad (\text{Formel 9a})$$

[0214] Dabei ist

U_F : Flussspannung der LED-Farbe des individuellen LED-Moduls

U_{gemessen} : Flussspannung der LED-Farbe des LED-Moduls, an welchem die typischen Helligkeits-Temperaturkennlinien aufgenommen worden sind.

[0215] Die individuelle Flussspannung U_F hängt zudem in geringem Maße von der Temperatur ab. Sie kann entweder

- näherungsweise als konstant betrachtet werden und z.B. während der Kalibrierung einmalig ermittelt und hinterlegt werden oder
- sie wird in einer genaueren Methode während des Scheinwerferbetriebs vom Mikrocontroller gemessen oder
- der während der Kalibrierung ermittelte Wert wird in Abhängigkeit von der aktuellen NTC-Temperatur korrigiert. In den Datenblättern der LED-Hersteller finden sich die entsprechenden Daten dU_F / dT .

[0216] Zur Ermittlung der Temperaturkennlinien in Abhängigkeit vom Dimmgrad (PWM) und der Flussspannung sind somit folgende, im Flusssdiagramm gemäß Fig. 37 schematisch dargestellte Verfahrensschritte vorgesehen, wobei alle auszuwertenden Grafiken auf $Y=1$ bei Arbeitstemperatur $T_{NTC}=T_n$ normiert sein müssen.

1. Durchführung der Messungen (mit Spektrometer)

$$\begin{array}{ll} Y_{PWM100} = f(T_{NTC}) & \text{Helligkeit} = f(\text{Temperatur}) \text{ für PWM=100\%} \\ Y_{PWM20} = f(T_{NTC}) & \text{Helligkeit} = f(\text{Temperatur}) \text{ für PWM=20\%} \\ U_{\text{gemessen}} & \text{Flussspannung bei 25°C} \end{array}$$

2. Normierung der gemessenen Kennlinien auf $Y=1$ bei $T_{NTC}=T_n$ (z.B. 75°C)

3. Mathematische Ermittlung der temporären Polynomkoeffizienten B_{temp} , C_{temp} , D_{temp} für gemessene Kurve PWM=100 aus 4 Stützpunkten für ein Polynom 3. Grades der Form

$$Y_{PWM100} = A + B \cdot (T_{NTC} - T_n) + C \cdot (T_{NTC} - T_n)^2 + D \cdot (T_{NTC} - T_n)^3$$

EP 2 186 382 B1

Der Koeffizient A beträgt dabei 1 durch die vorangehende Normierung auf $Y=1$ bei $T_{NTC}=T_n$

4. Experimentelle Ermittlung von dT_{PWM20} für die gefittete Kurve PWM=20

$$Y(T_{NTC}) = 1 + B_{temp} \cdot (T_{NTC} - T_n + dT) + C_{temp} \cdot (T_{NTC} - T_n + dT)^2 + D_{temp} \cdot (T_{NTC} - T_n + dT)^3$$

(Parameter dT wird dabei solange variiert, bis diese Formel eine optimale Annäherung an die gemessene Kurve PWM=20 ergibt.)

5. Extrapolation von dT_{PWM20} auf dT_{PWM0} : $dT_{PWM0} = 5/4 \cdot dT_{PWM20}$

6. Ermittlung Polynomkoeffizienten B_1, C_1, D_1 für die vorangehend extrapolierte Kurve mit PWM=0

4 Stützpunkte aus folgender Kurve:

$$Y(T_{NTC}) = 1 + B_{temp} \cdot (T_{NTC} - T_n + dT_{PWM0}) + C_{temp} \cdot (T_{NTC} - T_n + dT_{PWM0})^2 + D_{temp} \cdot (T_{NTC} - T_n + dT_{PWM0})^3$$

ergeben die neue Gleichung für PWM=0

$$Y(T_{NTC}) = 1 + B_1 \cdot (T_{NTC} - T_n) + C_1 \cdot (T_{NTC} - T_n)^2 + D_1 \cdot (T_{NTC} - T_n)^3$$

7. Experimentelle Ermittlung von dT_{PWM100} für die gemessene Kurve PWM=100 (mit Polynomkoeffizienten B_1, C_1, D_1)

25

$$Y(T_{NTC}) = 1 + B_1 \cdot (T_{NTC} - T_n + dT_{PWM100}) + C_1 \cdot (T_{NTC} - T_n + dT_{PWM100})^2 + D_1 \cdot (T_{NTC} - T_n + dT_{PWM100})^3$$

30 (Parameter dT variieren, bis optimale Annäherung an die gemessene Kurve PWM=100)

8. Ermittlung des temporären Leistungsparameters E_{temp}

Ansatz: $dT_{PWM100} = E_{temp} \cdot PWM$

-> $E_{temp} = dT_{PWM100} / PWM$

9. Ermittlung des allgemeinen Leistungsparameters E_1

35 Ansatz: $dT(U_F) = E_{temp} \cdot U_F / U_{gemessen} \cdot PWM$

$= E_{temp} / U_{gemessen} \cdot U_F \cdot PWM$

$= E_1 \cdot U_F \cdot PWM$

Daraus folgt: $E_1 = E_{temp} / U_{gemessen}$

Soll die individuelle Flussspannung nicht berücksichtigt werden, so ist $E_1 = E_{temp}$

40 10. Die allgemeinen Temperaturkennlinien in Abhängigkeit von der PWM sowie der Flussspannung lauten nun:

$$Y(T_{NTC}) = 1 + B_1 \cdot (T_{NTC} - T_n + dT) + C_1 \cdot (T_{NTC} - T_n + dT)^2 + D_1 \cdot (T_{NTC} - T_n + dT)^3$$

45

$$\text{mit } dT = E_1 \cdot PWM \cdot U_F$$

[0217] Betrachtet man die Helligkeits-Temperaturkennlinien für die Farben gelb...orange...rot, so erkennt man, dass die Kurven für gelb (ca. 590 nm) am steilsten verlaufen, für orange bis rot (ca. 620 nm) zunehmend flacher. Die an einem LED-Modul mit gelben (dominante Wellenlänge 592 nm) und roten (dominante Wellenlänge 620 nm) gemessene Helligkeitsänderung zwischen $Y(20^\circ\text{C})/Y(74^\circ\text{C})$ weist den Faktor 1,80 für die roten bzw. 3,19 für die gelben LEDs auf. Dazwischen liegen lediglich 28 nm Unterschied in der dominanten Wellenlänge. Daraus ist offensichtlich, dass sich bereits typische Toleranzen der dominanten Wellenlängen von wenigen Nanometern stark auf die tatsächlichen Helligkeits-Temperaturkennlinien auswirken.

55 **[0218]** Aus diesem Grunde wird erfindungsgemäß eine Korrektur bzw. Anpassung der hinterlegten Temperatur-Koeffizienten in Abhängigkeit von der dominanten Wellenlänge, insbesondere für AlInGaP-Chips (amber, rot) durchgeführt, wobei die Kennlinien individuell für jedes LED-Modul an die individuellen dominanten Wellenlängen angepasst werden.

[0219] Die Korrektur der Helligkeits-Temperaturkennlinien um diesen Effekt kann nach folgendem Prinzip erfolgen:

- Im Labor werden pro Farbe mehrere Helligkeits-Temperatur-Kennlinien an LED-Modulen verschiedener dominanter Wellenlänge aufgenommen
- Daraus werden für jede Farbe die Polynomparameter A...E in Abhängigkeit von der dominanten Wellenlänge bestimmt.
- Im Rahmen der LED-Modulkalibrierung werden von jedem LED-Modul im kalten Zustand die Spektren der LED-Farben sowie die zugehörige NTC-Temperatur erfasst. Dies kann im Rahmen der Modulkalibrierung und -selektion erfolgen und stellt in der Regel keinen zusätzlichen Aufwand dar. Aus dem Spektrum werden die dominanten Wellenlängen je Farbe berechnet. Die vorab an einzelnen Modulen ermittelten Polynomparameter A...E werden entsprechend der Abweichung der individuellen dominanten Wellenlängen des zu kalibrierenden Moduls zur dominanten Wellenlänge des Moduls, von dem die Kennlinien ermittelt worden sind, korrigiert.

[0220] Die Umrechnung der Polynomparameter auf eine LED mit bestimmter dominanter Wellenlänge kann durch lineare Interpolation der Polynomparameter zweier bekannter Kurven zweier LEDs mit verschiedenen dominanten Wellenlängen auf die neue dominante Wellenlänge erfolgen. Die genauesten Ergebnisse erhält man, wenn die dominanten Wellenlängen der Originalkurven sowie die dominante Wellenlänge, auf die umgerechnet werden soll, möglichst nahe beisammen liegen. Dabei darf nicht zwischen gegebenen Kurven verschiedener LED-Technologien wie AlInGaP und InGaN interpoliert werden.

[0221] Wenn man beispielsweise die Kurve samt Polynomparameter A...D für ein Polynom 3. Grades für eine gelbe LED mit dominanter Wellenlänge $I_{\text{dom_gelb1}}$ benötigt, so benötigt man zusätzlich die Kurve samt Polynomparameter A...D für eine ähnliche LED mit abweichender dominanter Wellenlänge $I_{\text{dom_gelb2}}$ (mit etwas größerer Unsicherheit auch orange oder rot). Die Polynomparameter A...D für eine gelbe LED mit dominanter Wellenlänge $I_{\text{dom_gelb3}}$ erhält man dann durch lineare Interpolation der Polynomparameter für die Kurven mit $I_{\text{dom_gelb1}}$ bzw. $I_{\text{dom_gelb2}}$ in Abh. der Wellenlängendifferenz.

[0222] Das prinzipielle Vorgehen zeigt Fig. 38 anhand der Originalkurven für eine gelbe und eine rote LED sowie die daraus abgeleiteten Kurven für zwei theoretische gelbe LEDs, deren dominante Wellenlängen um ± 3 nm von der ursprünglichen gelben Kurve abweichen.

[0223] Vorteil dieser Methode ist, dass im Scheinwerferbetrieb die Helligkeit jedes LED-Moduls dann entsprechend seiner individuell gültigen Temperatur-Helligkeitskennlinie konstant gehalten werden kann, ohne dass diese individuell und messtechnisch in zeitraubenden Messungen der Helligkeit über die Temperatur ermittelt werden muss. Für die Ermittlung der individuellen Temperatur-Helligkeitskennlinie genügt es stattdessen, diese Kurve für ein "typisches" LED-Modul zu kennen und des weiteren die Spektren der individuellen LED-Module im kalten Zustand zu erfassen, was mit äußerst geringem Zeitaufwand möglich ist und typischerweise sowieso im Rahmen der Kalibrierung erfolgen würde.

[0224] Diese Methode kann natürlich für sämtliche LED-Farben angewendet werden. Der stärkste Effekt wird jedoch für die AlInGaP-Farben gelb...orange...rot auftreten.

Lichtausbeutestabilisierung

[0225] Da durch das temperaturabhängige Nachführen der farbwiedergabeoptimierten Mischungen sich die Lichtausbeute der Mischungen und damit die Helligkeit ändert und zudem die individuellen hinterlegten optimalen Lichtstromanteile der farbwiedergabeoptimierten Mischungen bei verschiedenen Scheinwerfern Mischungen mit verschiedener Lichtausbeute und damit verschiedenen Helligkeiten entstehen lassen können, werden zur Erweiterung der Helligkeitsstabilisierung und zum Angleichen mehrerer Scheinwerfer an einen farbwiedergabeoptimierten Weißmodus über die Lichtausbeute zwei Methoden zur Farb- und Helligkeitsstabilisierung angewandt:

- Lichtausbeutenormierung in Abhängigkeit der Boardtemperatur
- Lichtausbeute-Setangleich zwischen verschiedenen Scheinwerfern

[0226] Zunächst wurden also zum einen für die Farb- und Helligkeitsstabilisierung die von der Pulswidenmodulation abhängigen Helligkeits-Temperaturkennlinien eingesetzt und die für den warmen Betriebszustand berechneten Lichtstromanteile einer Farbmischung für verschiedene NTC-Temperaturen konstant gehalten.

[0227] Zum andern wurde eine "Leistungsnormierung" eingeführt, um für jede Farbmischung die maximale LED-Leistung bei Erreichen des warmen Betriebszustands konstant zu halten. Damit wird ein vorzeitiges Erreichen bzw. Überschreiten einer Abschalttemperatur verhindert. Mit Hilfe der Leistungsnormierung (z.B. 5 W LED-Leistung pro Modul) wird für jede eingestellte Farbmischung ein individueller "interner" Leistungs-Dimmfaktor berechnet und angewandt. Jede Farbmischung kann damit mit optimaler Helligkeit bzw. optimalem internem Dimmfaktor eingestellt werden, ohne dass bei normalen Umgebungsbedingungen die Shut-offtemperatur erreicht bzw. überschritten wird. Dabei erfolgt die Leistungsnormierung gezielt für den warmen Betriebszustand, weil hier wegen der negativen Helligkeits-Temperaturcharakteristik der LEDs ein höherer LED-Strom bzw. eine höhere LED-Leistung angewandt werden muss, um die Helligkeit

des Scheinwerfers über die Temperatur konstant zu halten. Bei Temperaturen unterhalb der Abschalttemperatur wird der Scheinwerfer automatisch mit geringerer Leistung betrieben. Um die Helligkeit konstant zu halten ohne dabei jemals eine höhere Leistung als $P_{\max}$ einstellen zu müssen, darf diese maximale Leistung erst bei der Abschalttemperatur erreicht werden.

[0228] Mit beiden vorangehenden Methoden konnte jeder eingestellte Farbart mit jeweils höchst möglicher als auch über die Betriebstemperatur konstanter Helligkeit eingestellt werden. Die gemessenen Helligkeitsänderungen pro FarbortEinstellung schwankten um weniger als 1 % zwischen kalt und warm.

[0229] Nachteilig ist, dass sich auf Grund des spektralen Shifts der verwendeten LED-Grundfarben über die Betriebstemperatur der eingestellte Farbart änderte. Das Ausmaß der Farbortänderung hing vom Farbart sowie der jeweiligen Farbmischung ab und betrug in der Größenordnung 300 K zwischen kalt und warm, wobei sich bei höheren Temperaturen die Farbtemperatur verringerte, da der Effekt der temperaturabhängigen Spektralshift insbesondere die AlInGaP-LEDs im gelben bis roten Farbbereich ausgeprägt ist. Die Änderung der dominanten Wellenlänge in Abhängigkeit beträgt ca. 0,1 nm/K für gelbe, orange und rote AlInGaP-LEDs. Abhilfe erfolgte über die vorstehend beschriebene Kompensation der temperaturabhängigen Spektralshift im Wesentlichen durch Duplizierung der Kalibrierdaten für den warmen auf den kalten Zustand und temperaturabhängiger linearer Interpolation. Dieser Algorithmus konnte die Farbortkonstanz über die Betriebstemperatur gravierend verbessern.

[0230] Mit der Kompensation der Spektralshift entstanden jedoch trotz Leistungsnormierung und Anwendung der Helligkeits-Temperaturkennlinien teils massive Lichtstromänderungen einer eingestellten Farbe bis weit über 10 % zwischen kaltem und warmem Betriebszustand. Ausmaß als auch Richtung der Helligkeitsänderung sind abhängig vom gewählten Farbart bzw. der Farbmischung und konnten somit nicht ohne weiteres bestimmt bzw. kompensiert werden.

[0231] Der Grund für diese Helligkeitsänderungen bei konstantem Farbart ist, dass sich durch das temperaturabhängige Nachführen der Lichtstromanteile bzw. der Änderung der Gewichte der einzelnen LED-Grundfarben die Lichtausbeute der jeweiligen Mischung mit der Betriebstemperatur ändert. Dieser Effekt ist völlig unabhängig vom Helligkeits-Temperaturverhalten der LEDs. Die bisher angewandte Normierung dieser sich mit der Temperatur ändernden Mischungen auf eine konstante LED-Gesamtleistung führte durch die sich ändernde Lichtausbeute der LED-Mischungen zwangsläufig zu nicht konstanten Helligkeiten.

[0232] Dieses Problem wird durch eine erweiterte Helligkeitsstabilisierung über die Lichtausbeute wie folgt gelöst: Für alle im Speicher hinterlegten optimalen Lichtstromanteile der CCT-Stützpunkte werden zusätzlich die zugehörigen Lichtausbeuten für den warmen Betriebszustand $\eta_{\text{NTC_warm}}(\text{CCT}, T_{\text{NTC_warm}})$ berechnet und im Speicher hinterlegt. Von den für abweichende Betriebstemperaturen nachgeführten Mischungen wird während des Betriebs die aktuelle Lichtausbeute $\eta_{\text{NTC}}(\text{CCT}, T_{\text{NTC}})$ errechnet. Aus dem Verhältnis dieser beiden Werte wird der Lichtausbeute-Korrekturfaktor $k_{\eta} = \eta_{\text{NTC_warm}} / \eta_{\text{NTC}}$ berechnet und die Soll-PWM-Anteile der LED-Mischung mit diesem Faktor multipliziert. Mit dieser Methode bleiben über die Betriebstemperatur sowohl Farbart als auch Helligkeit konstant.

Lichtausbeute-Setangleich

[0233] Jeder Scheinwerfer sorgt durch die modulinterne Temperaturkompensation und die im Scheinwerfer hinterlegten Kalibrierdaten Y, x, y (je Farbe) lediglich dafür, dass die eingestellte Farbe (CCT bzw. x, y) korrekt ist. In einem Set bestehend aus mehreren Scheinwerfern haben dann alle Scheinwerfer die gleiche Farbe - aber ggf. unterschiedliche Helligkeiten.

[0234] Selbst bei guter Selektion der LED-Chips können aber sowohl der Farbart als auch die Lichtausbeute der verwendeten LED-Grundfarben von Scheinwerfer zu Scheinwerfer variieren, da zur Einstellung farbwiedergabeoptimierter Farbtemperaturen für jeden Scheinwerfer für verschiedene CCT-Stützpunkte die optimalen Lichtstromanteile für den kalten und warmen Betriebszustand ermittelt und hinterlegt werden. Diese optimalen Lichtstromanteile und zugehörigen Lichtausbeuten können auf Grund der LED-Toleranzen von Scheinwerfer zu Scheinwerfer variieren. Verschiedene Scheinwerfer benötigen also individuelle LED-Mischungen, um den gewünschten Farbart sicher einstellen zu können.

[0235] Würde nun ein Set, bestehend aus mehreren Scheinwerfern, gemeinsam auf eine bestimmte Farbtemperatur eingestellt und die Farbmischung jedes Scheinwerfers auf dieselbe maximale Gesamtleistung $P_{\max, \text{warm}}$ bezogen, so könnten die Lichtausbeuten der einzelnen Scheinwerfer für die selbe Farbtemperatur um mehr als 30 % voneinander abweichen. Analog würde die Helligkeit der Scheinwerfer entsprechend variieren - bei gleicher Farbtemperatureinstellung und LED-Leistung. Es wäre unmöglich, ein Set aus mehreren Scheinwerfern auf gleiche Farbe bei gleicher Helligkeit einzustellen.

[0236] Um sicher zu stellen, dass alle an einen Controller angeschlossenen Scheinwerfer auch dieselbe Helligkeit aufweisen, ist daher eine Helligkeits-Abgleichsfunktion beispielsweise durch den Controller erforderlich, bei der sich für jede Farbe die jeweils helleren Scheinwerfer auf die niedrigste Helligkeit innerhalb des Sets einstellen, d.h. reduzieren.

[0237] Dieses Problem wird durch einen "Lichtausbeute-Setangleich" wie folgt gelöst: Für den farbwiedergabeoptimierten Weißmodus wird für die Farbmischungen aller CCT-Stützpunkte zusätzlich die

Lichtausbeute im warmen Zustand berechnet und hinterlegt. Von allen Scheinwerfern, die zu einem Set zusammengeschlossen werden, wird je CCT-Stützpunkt die kleinste Lichtausbeute aller zum Set gehörenden Scheinwerfer ermittelt und als Set-Lichtausbeute des CCT-Stützpunkts in allen Scheinwerfern hinterlegt. Hieraus wird während des Betriebs in Abhängigkeit der CCT und der aktuellen NTC-Temperatur jeweils der Set-Lichtausbeute-Korrekturfaktor

$$k\eta_{\text{Set}}(\text{CCT}, T_{\text{NTC}}) = \eta_{\text{Set}}(\text{CCT}, T_{\text{NTCwarm}}) / \eta(\text{CCT}, T_{\text{NTC}})$$

bestimmt und die ermittelten PWM-Anteile damit multipliziert, d.h. alle Scheinwerfer werden pro CCT-Stützpunkt auf die Helligkeit der geringsten Lichtausbeute innerhalb des Sets eingestellt.

[0238] Alle Scheinwerfer eines Sets leuchten damit im farbwiedergabeoptimierten Weißmodus mit der gleichen Helligkeit, welche sich über die Temperatur nicht mehr ändert. Ebenso bleibt der Farbort durch die vorangehend beschriebene Kompensation der Spektralshift über die gesamte Betriebstemperatur konstant.

[0239] Diese Methode eröffnet zweierlei Optionen:

a) Erzeugung beliebiger CCTs mit maximal möglicher Helligkeit. Die Helligkeit einer eingestellten CCT ist sowohl innerhalb aller Scheinwerfer eines Sets als auch über die Temperatur konstant. Bei Änderung der CCT kann sich jedoch die Helligkeit entsprechend der zugehörigen Set-Lichtausbeute ändern.

b) Erzeugung beliebiger CCTs mit konstanter Helligkeit, so dass die Helligkeit aller wählbaren CCTs sowohl innerhalb aller Scheinwerfer eines Sets als auch über die Temperatur konstant ist. Bei Änderung der CCT bleibt die Helligkeit konstant.

Hierfür wird lediglich von den Set-Lichtausbeuten $\eta_{\text{Set}}(\text{CCT}, T_{\text{NTCwarm}})$ der Minimalwert über alle CCTs, $\eta_{\text{Setmin}}(T_{\text{NTCwarm}})$, ermittelt und der aktuelle Set-Lichtausbeute-Korrekturfaktor $k\eta_{\text{Set}}(\text{CCT}, T_{\text{NTC}}) = \eta_{\text{Setmin}} / \eta(\text{CCT}, T_{\text{NTC}})$ angewandt. Auf diese Weise können alle Scheinwerfer innerhalb eines Sets beliebige Farbtemperaturen mit identischer Helligkeit erzeugen.

[0240] Zur Durchführung dieses Verfahrens sind folgende Daten erforderlich:

$Y_{\text{rel kalt}} = f(\text{CCT})$	optimierte Lichtstromanteile für CCT-Stützpunkte, kalter Betriebszustand
$Y_{\text{rel warm}} = f(\text{CCT})$	optimierte Lichtstromanteile für CCT-Stützpunkte, warmer Betriebszustand
$P100_i$	Leistungen je LED-Grundfarbe @PWM=1
$Y100_i$	Helligkeit je LED-Grundfarbe für warmen Betriebszustand @PWM=1
T_{NTCwarm}	NTC-Temperatur für warmen Betriebszustand
T_{NTCkalt}	NTC-Temperatur für kalten Betriebszustand
$\eta_{\text{Set}}=f(\text{CCT})$	Set-Lichtausbeuten für warmen Betriebszustand

[0241] Zur Berechnung der Lichtausbeute η einer Farbmischung dient folgende Formel:

Gegeben sind:

$Y_{\text{rel},i} = f(\text{CCT}, T_{\text{NTC}})$	Lichtstromanteile für gewünschte CCT für aktuelle NTC-Temperatur
$\text{PWM}_i = Y_{\text{rel},i} / Y100_i$	PWM-Signale zur Einstellung der Lichtstromanteile
$\text{Gesamthelligkeit} = \sum \text{PWM}_i * Y100_i$	Gesamthelligkeit der aktuellen Mischung vor der Korrektur
$\text{Gesamtleistung} = \sum \text{PWM}_i * P100_i$	Gesamtleistung der aktuellen Mischung vor Korrektur
$\eta = \text{Gesamthelligkeit} / \text{Gesamtleistung}$	Lichtausbeute der aktuellen Mischung (Formel 11)

[0242] Der Setangleich kann z.B. innerhalb der Kalibrierung erfolgen. Als Set könnten auch alle Scheinwerfer einer Fertigungsserie aufgefasst werden: Dann würden zudem alle Sets einer Fertigungsserie die gewünschten CCTs mit der selben Helligkeit darstellen.

[0243] Bei der Zusammenstellung individueller Sets kann der Setangleich auch vom Controller übernommen werden. Er liest dazu die entsprechenden Scheinwerferkalibrierdaten ein, bestimmt die minimalen Set-Lichtausbeuten und speichert diese als Set-Kalibrierdaten in den Kalibrierdaten ab.

[0244] Zum Setangleich wird wie folgt vorgegangen:

- Der Controller liest von allen angeschlossenen Scheinwerfern ein:

$Y_{\text{rel warm}} = f(\text{CCT})$	optimierte Lichtstromanteile für CCT-Stützpunkte, warmer Betriebszustand
---------------------------------------	--

(fortgesetzt)

P100_i Leistungen je LED-Grundfarbe @PWM=1
 Y100_i Helligkeit je LED-Grundfarbe für warmen Betriebszustand @PWM=1

- 5 - Der Controller berechnet nach Formel 1 für alle angeschlossenen Scheinwerfer und für alle CCT-Stützpunkte die Lichtausbeuten der CCT-Stützpunkte für $T_{NTCwarm}$: $\eta_{warm,k} = f(CCT)$
 - Der Controller bestimmt von allen Scheinwerfern je CCT-Stützpunkt aus den Werten $\eta_{warm,k} = f(CCT)$ die minimale Lichtausbeute des Scheinwerfersets zu $\eta_{Set} = f(CCT)$
 10 - Der Controller schreibt ins EEPROM der Scheinwerfer die Set-Lichtausbeuten $\eta_{Set} = f(CCT)$ (der Setangleich ist damit erfolgt.)
 - Wird beim Scheinwerfer eine Farbtemperatur eingestellt, so berechnen die Farbmétrikfunktionen für jede aktuelle Farbmischung in Abhängigkeit der NTC-Temperatur die aktuelle Lichtausbeute $\eta(CCT, T_{NTC})$ und bestimmen daraus den aktuellen Set-Lichtausbeute-Korrekturfaktor

$$k\eta_{Set}(CCT, T_{NTC}) = \eta_{Set_{min}} / \eta(CCT, T_{NTC}).$$

- 20 - Für die PWM-Ansteuerung werden die ermittelten PWM-Signale mit dem Set-Lichtausbeute-Korrekturfaktor $k\eta_{Set}(CCT, T_{NTC})$ multipliziert.

[0245] Mit den Indizes i für die Farbe und k für die Scheinwerfer

[0246] Um den korrekten Farbort sowie die Farbtreue beim Dimmen zu verbessern, werden nicht perfekt lineare Dimmkennlinien je Farbkanal aufgenommen, indem Näherungsfunktionen für die Dimmkennlinien je Farbe ermittelt, Dimmkoeffizienten a und x je Farbe im Scheinwerfer hinterlegt und die PWM-Ansteuersignale entsprechend der Kennlinie
 25 korrigiert werden.

Patentansprüche

- 30 **1.** Verfahren zur temperaturabhängigen Einstellung der farb- oder fotometrischen Eigenschaften einer LED-Beleuchtungseinrichtung mit Licht unterschiedlicher Farbe bzw. Wellenlänge abstrahlenden LEDs, deren Lichtstromanteile die Lichtfarbe, Farbtemperatur und/oder einen Farbort der von der LED-Beleuchtungseinrichtung abgegebenen Lichtmischung bestimmen und durch Ansteuern der zu LED-Farbgruppen jeweils gleicher Farbe zusammengefasst
 35 und aus farbigen und weißen LEDs bestehenden verschiedenfarbigen LEDs mittels pulsweitenmodulierter Steuersignale eingestellt werden, mit

- einer Temperaturmessung, insbesondere einer Messung der Temperatur innerhalb der LED-Beleuchtungseinrichtung, einer die LEDs aufnehmenden Platine und/oder der Junctiontemperatur mindestens einer LED,
 - einer Grundeinstellung der Lichtmischung auf eine vorgegebene Lichtfarbe, Farbtemperatur und/oder einen Farbort durch Einstellen von den Lichtstromanteilen der LED-Farbgruppen an der Lichtmischung bei einer Ausgangstemperatur der LED-Beleuchtungseinrichtung entsprechenden pulsweitenmodulierten Steuersignalen und
 40 - einer von der gemessenen Temperatur abhängigen Veränderung der den Lichtstromanteilen der LED-Farbgruppen an der auf eine vorgegebene Lichtfarbe, Farbtemperatur und/oder einen Farbort eingestellten Lichtmischung entsprechenden pulsweitenmodulierten Steuersignale, wobei
 45 - die Abhängigkeit der pulsweitenmodulierten Steuersignale von der Temperatur aus der sich über den relevanten Temperaturbereich linear oder quadratisch ändernden Helligkeit der LED-Farbgruppen ermittelt wird,

dadurch gekennzeichnet, dass

- 50 - ein dem Kehrwert der relativen Helligkeitsänderung der LED-Farbgruppen in Bezug auf die Grundeinstellung entsprechender Faktor (f_{PWM}) ermittelt
 - ein der gemessenen Temperatur (T) entsprechender Wert der pulsweitenmodulierten Steuersignale (PWM(T)) jeder LED-Farbgruppe durch eine Multiplikation des der Grundeinstellung entsprechenden Wertes der pulsweitenmodulierten Steuersignale (PWM_A) jeder LED-Farbgruppe mit dem von der gemessenen Temperatur (T) abhängigen Faktor (f_{PWM}) gemäß der Gleichung
 55

$$PWM(T) = PWM_A * f_{PWM}(T)$$

bestimmt wird,

- die pulswidenmodulierten Signale (PWM (T)) jeder LED-Farbgruppe an der LED-Beleuchtungseinrichtung eingestellt werden,
- eine Helligkeitsmessung durchgeführt und die Differenz zwischen dem gemessenen Helligkeits-Istwert und einem Helligkeits-Sollwert ermittelt wird und
- die von der LED-Beleuchtungseinrichtung abgegebene Lichtstärke durch eine übereinstimmende Erhöhung oder Absenkung der den LED-Farbgruppen zugeführten elektrischen Leistung an den Helligkeits-Sollwert angeglichen wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ausgangssignale eines zusätzlich an der LED-Beleuchtungseinrichtung installierten Farbsensors oder Spektrometers bei der Bestimmung der relativen Helligkeiten der LED-Farbgruppen berücksichtigt werden, indem die Ausgangssignale des Farbsensors oder Spektrometers an die programmgesteuerte Recheneinheit zur Bestimmung der Lichtstromanteile oder der den Lichtstromanteilen entsprechenden pulswidenmodulierten Steuersignalen der LED-Farbgruppen an der Lichtmischung abgegeben werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **gekennzeichnet durch** die Verfahrensschritte

- a. Einschalten der LED-Beleuchtungseinrichtung,
- b. Messung der Temperatur (T) im Gehäuse der LED-Beleuchtungseinrichtung und/oder im Bereich mindestens einer LED der verschiedenfarbigen LED-Farbgruppen,
- c. Ermittlung -temperaturabhängiger Faktoren $f_Y = f_{PWM}$ für jede LED-Farbgruppe aus den für jede LED-Farbgruppe in Kalibrierdaten gespeicherten Kennlinien $f_Y = f_{PWM} = Y_0(T_0) / Y_0(T)$ mit $Y_0 = f(T)$
- d. Berechnung neuer pulswidenmodulierter Steuersignale PWM(T) zur Ansteuerung der LEDs jeder LED-Farbgruppe aus der Multiplikation der für eine Basistemperatur (T_0) festgelegten PWM-Steuersignale PWM(A) zur Ansteuerung der LEDs jeder LED-Farbgruppe mit den ermittelten temperaturabhängigen Faktoren $f_Y = f_{PWM}$ für jede LED-Farbgruppe gemäß

$$PWM(T) = PWM(A) * f_{PWM}$$

- e. Ansteuerung der LEDs der verschiedenfarbigen LED-Farbgruppen mit den neuen pulswidenmodulierten Steuersignalen PWM(T) für jede LED-Farbgruppe und
- f. Rückkehr zum Verfahrensschritt b.

wobei als Kalibrierdaten die für eine Basistemperatur festgelegten PWM-Signale PWM(A) für die pulswidenmodulierten Steuersignale für jede LED-Farbgruppe für Lichtmischungsverhältnisse mit vorgegebenen Farbtemperaturen (CCT) oder Farborten (x,y) sowie die Helligkeit (Y_0) in Abhängigkeit von der Temperatur (T) eines vorgegebenen Temperaturbereichs ermittelt und als Funktion oder Tabelle $Y_0 = f(T)$ und (f_{PWM}) $PWM(A) = f(CCT)$ bzw. $PWM(A) = f(x,y)$ für jede LED-Farbgruppe gespeichert werden.

4. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass**

- a. die temperaturabhängigen Spektren der LED-Farbgruppen gemessen werden,
- b. temperaturabhängig optimierte PWM Steuersignale PWM(T) für die pulswidenmodulierten Steuersignale jeder LED-Farbgruppe für Lichtmischungsverhältnisse mit vorgegebenen Farbtemperatureinstellungen oder Farborteinstellungen berechnet werden und
- c. die temperaturabhängig optimierten PWM Steuersignale PWM(T) für die pulswidenmodulierten Steuersignale jeder LED-Farbgruppe für Lichtmischungsverhältnisse mit vorgegebenen Farbtemperatureinstellungen oder Farborteinstellungen gespeichert werden.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **gekennzeichnet durch** die Verfahrensschritte

- a. Einschalten der LED-Beleuchtungseinrichtung,
- b. Messung der Temperatur (T) im Gehäuse der LED-Beleuchtungseinrichtung und/oder im Bereich mindestens

- einer LED der verschiedenfarbigen LED-Farbgruppen,
 c. Ermittlung aktueller temperaturabhängiger PWM Steuersignale PWM(T) für jede LED-Farbgruppe aus den
 gespeicherten temperaturabhängig optimierten PWM Steuersignalen für die pulswertenmodulierte Steuersig-
 nale jeder LED-Farbgruppe für Lichtmischungsverhältnisse mit vorgegebenen Farbtemperatur- oder Farbort-
 einstellungen,
 d. Ansteuerung der LEDs der verschiedenfarbigen LED-Farbgruppen mit den temperaturabhängigen PWM
 Steuersignalen PWM(T) und
 e. Rückkehr zum Verfahrensschritt b.

Claims

1. Method for temperature-dependent setting of the colorimetric or photometric properties of an LED lighting device with LEDs that emit light of different colour or wavelength, the luminous flux components of which determine the light colour, colour temperature and/or colour locus of the light mixture emitted by the LED lighting device and are set by actuation of the different coloured LEDs, which are combined to LED colour groups of the same colour and which consist of coloured and white LEDs, by means of pulse width modulated control signals, including

- a temperature measurement, in particular a measurement of the temperature within the LED lighting device, of a circuit board receiving the LEDs and/or of the junction temperature of at least one LED,
- a basic setting of the light mixture to a predetermined light colour, colour temperature and/or a colour locus by setting pulse width modulated control signals corresponding to the luminous flux components of the LED colour groups of the light mixture at an initial temperature of the LED lighting device and
- a measured-temperature-dependent change of the pulse width modulated control signals corresponding to the luminous flux components of the LED colour groups of the light mixture that was set to a predetermined light colour, colour temperature and/or colour locus, wherein
- the dependence of the pulse width modulated control signals on the temperature is ascertained by way of the brightness of the LED colour groups that changes linearly or quadratically over the relevant temperature range,

characterized in that

- a factor (f_{PWM}) corresponding to the inverse of the relative brightness change of the LED colour groups in relation to the basic setting is ascertained,
- a value of the pulse width modulated control signals (PWM(T)), corresponding to the measured temperature (T), of each LED colour group is determined by multiplying the value of the pulse width modulated control signals (PWM_A), corresponding to the basic setting, of each LED colour group by the factor (f_{PWM}), depending on the measured temperature (T), according to the equation

$$PWM(T) = PWM_A * f_{PWM}(T) ,$$

- the pulse width modulated signals (PWM(T)) of each LED colour group in the LED lighting device are set,
- a brightness measurement is carried out and the difference between the measured brightness actual value and the brightness setpoint value is ascertained and
- the luminous intensity emitted by the LED lighting device is equalized to the brightness setpoint value by a corresponding increase or decrease in the electric power supplied to the LED colour groups.

2. Method according to Claim 1, **characterized in that** the output signals of a colour sensor or spectrometer additionally installed at the LED lighting device are taken into account when determining the relative brightness of the LED colour groups by virtue of the output signals of the colour sensor or spectrometer being output to the program-controlled computing unit for determining the luminous flux components or the pulse width modulated control signals of the LED colour groups, corresponding to the luminous flux components, of the light mixture.

3. Method according to Claim 1 or 2, **characterized by** the method steps of

- a. activating the LED lighting device,
- b. measuring the temperature (T) in the housing of the LED lighting device and/or in the region of at least one LED of the LED colour groups of different colours,

- c. ascertaining temperature-dependent factors $f_Y = f_{PWM}$ for each LED colour group from the characteristics $f_Y = f_{PWM} = Y_O(T_O)/Y_O(T)$, where $Y_O = f(T)$, which are stored for each LED colour group in calibration data,
 d. calculating new pulse width modulated control signals PWM(T) for actuating the LEDs of each LED colour group from multiplying the PWM control signals PWM(A), set for a base temperature (T_0), for actuating the LEDs of each LED colour group by the ascertained temperature-dependent factors $f_Y = f_{PWM}$ for each LED colour group according to

$$PWM(T) = PWM(A) * f_{PWM},$$

- e. actuating the LEDs of the LED colour groups of different colours with the new pulse width modulated control signals PWM(T) for each LED colour group and
 f. returning to method step b.,

wherein there is ascertainment of the PWM signals PWM(A), set for a base temperature, for the pulse width modulated control signals for each LED colour group for light mixture ratios with predetermined colour temperatures (CCT) or colour loci (x, y) and of the brightness (Y_O) depending on the temperature (T) of a predetermined temperature range as calibration data and storage thereof as a function or table $Y_O = f(T)$ and (f_{PWM}) $PWM(A) = f(CCT)$ or $PWM(A) = f(x, y)$ for each LED colour group.

4. Method according to at least one of the preceding Claims 1 to 3, characterized in that

- a. the temperature-dependent spectra of the LED colour groups are measured,
 b. there is calculation of PWM control signals PWM(T), optimized in a temperature-dependent manner, for the pulse width modulated control signals for each LED colour group for light mixture ratios with predetermined colour temperature settings or colour locus settings and
 c. there is storage of the PWM control signals PWM(T), optimized in a temperature-dependent manner, for the pulse width modulated control signals for each LED colour group for light mixture ratios with predetermined colour temperature settings or colour locus settings.

5. Method according to Claim 4, characterized by the method steps of

- a. activating the LED lighting device,
 b. measuring the temperature (T) in the housing of the LED lighting device and/or in the region of at least one LED of the LED colour groups of different colours,
 c. ascertaining current temperature-dependent PWM control signals PWM(T) for each LED colour group from the stored PWM control signals, optimized in a temperature-dependent manner, for the pulse width modulated control signals of each LED colour group for light mixture ratios with predetermined colour temperature or colour locus settings,
 d. actuating the LEDs of the LED colour groups of different colours with the temperature-dependent PWM control signals PWM(T) and
 e. returning to method step b.

Revendications

- 1.** Procédé de réglage en fonction de la température des propriétés de couleur ou photométriques d'un dispositif d'éclairage à LED comportant des LED émettant une lumière de couleurs ou de longueurs d'onde différentes, dont les composantes de flux lumineux déterminent la couleur de la lumière, la température de couleur et/ou une coordonnée de couleur du mélange de lumière émis par le dispositif d'éclairage à LED et sont réglées en commandant les LED de différentes couleurs combinées en groupes de couleurs de LED respectifs de même couleur et constituées de LED colorées et blanches au moyen de signaux de commande modulés en largeur d'impulsion, comportant :

- une mesure de température, en particulier une mesure de la température à l'intérieur du dispositif d'éclairage à LED, un circuit imprimé recevant les LED et/ou la température de jonction d'au moins une LED,
- un réglage de base du mélange de lumière à une couleur de lumière, une température de couleur et/ou une coordonnée de couleur prédéterminées en réglant des signaux de commande modulés en largeur d'impulsion correspondant aux composantes de flux lumineux des groupes de couleurs de LED au niveau du mélange de

lumière pour une température de sortie du dispositif d'éclairage à LED, et

- une modification dépendant de la température mesurée des signaux de commande modulés en largeur d'impulsion correspondant aux composantes de flux lumineux des groupes de couleurs de LED au niveau du mélange de lumière réglé à une couleur de lumière, une température de couleur et/ou une coordonnée de couleur prédéterminées, dans lequel

- la dépendance des signaux de commande modulés en largeur d'impulsion par rapport à la température est déterminée à partir de la luminosité des groupes de couleurs de LED qui varie linéairement ou quadratiquement dans la plage de températures concernée,

caractérisé en ce que

- un facteur (f_{PWM}) correspondant à l'inverse de la variation relative de la luminosité des groupes de couleurs de LED par rapport au réglage de base est déterminé,

- une valeur des signaux de commande modulés en largeur d'impulsion (PWM (T)) de chaque groupe de couleurs de DEL correspondant à la température mesurée (T) est déterminée en multipliant la valeur, correspondant au réglage de base, des signaux de commande modulés en largeur d'impulsion (PWM_A) de chaque groupe de couleurs de DEL par le facteur (f_{PWM}) dépendant de la température mesurée (T) conformément à l'équation :

$$PWM(T) = PWM_A * f_{PWM}(T),$$

- les signaux modulés en largeur d'impulsion (PWM (T)) de chaque groupe de couleurs de LED peuvent être réglés sur le dispositif d'éclairage à LED,

- une mesure de luminosité est effectuée et la différence entre la valeur de luminosité réelle mesurée et un point de consigne de luminosité est déterminée, et

- l'intensité lumineuse délivrée par le dispositif d'éclairage à LED est ajustée au point de consigne de luminosité en augmentant ou en diminuant de manière correspondante la puissance électrique fournie aux groupes de couleurs de LED.

2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** les signaux de sortie d'un capteur de couleur ou d'un spectromètre installé de manière supplémentaire sur le dispositif d'éclairage à LED sont pris en compte lors de la détermination de la luminosité relative des groupes de couleurs de LED en transmettant les signaux de sortie du capteur de couleur ou du spectromètre à l'unité de calcul commandée par programme pour déterminer les composantes de flux lumineux ou les signaux de commande modulés en largeur d'impulsion des groupes de couleurs de LED correspondant aux composantes de flux lumineux au niveau du mélange de lumière.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé par** les étapes consistant à :

a. activer le dispositif d'éclairage à LED,

b. mesurer la température (T) dans le boîtier de l'appareil d'éclairage à LED et/ou dans la région d'au moins une LED des différents groupes de couleurs de LED,

c. déterminer des facteurs dépendants de la température $f_y = f_{PWM}$ pour chaque groupe de couleurs de LED à partir des courbes caractéristiques enregistrées dans les données d'étalonnage pour chaque groupe de couleurs de LED $f_y = f_{PWM} = Y_o(T_o)/Y_o(T)$, avec $Y_o = f(T)$,

d. calculer de nouveaux signaux de commande modulés en largeur d'impulsion PWM(T) pour commander les LED de chaque groupe de couleurs de LED à partir de la multiplication des signaux de commande PWM(A) établis pour une température de base (T₀) afin de commander les LED de chaque groupe de couleurs de LED avec les facteurs dépendants de la température déterminés $f_y = f_{PWM}$ pour chaque groupe de couleurs de LED conformément à la formule :

$$PWM(T) = PWM(A) * f_{PWM},$$

e. commander les LED des différents groupes de couleurs de LED avec les nouveaux signaux de commande modulés en largeur d'impulsion PWM(T) pour chaque groupe de couleurs de LED,

f. retourner à l'étape b,

dans lequel les signaux modulés en largeur d'impulsion PWM(A) pour les signaux de commande modulés en largeur d'impulsion pour chaque groupe de couleurs de LED et pour des conditions de mélange de lumière comportant des températures de couleur prédéterminées (CCT) ou des coordonnées de couleurs (x, y) et la luminosité (Y₀) en fonction de la température (T) d'une plage de températures prédéterminée sont déterminés en tant que données d'étalonnage et sont mémorisés sous forme de fonction ou de tableau $Y_0 = f(T)$ et (f_{PWM}) PWM(A) = f(CCT) ou PWM(A) = f(x, y) pour chaque groupe de couleurs de LED.

4. Procédé selon au moins l'une des revendications précédentes 1 à 3, **caractérisé en ce que**

- a. les spectres dépendants de la température des groupes de couleurs de LED sont mesurés,
- b. des signaux de commande PWM dépendants de la température optimisés PWM(T) pour les signaux de commande modulés en largeur d'impulsion de chaque groupe de couleurs de LED sont calculés pour des conditions de mélange de lumière comportant des réglages prédéterminés de température de couleur ou de position de coordonnées de couleurs, et
- c. les signaux de commande PWM dépendants de la température optimisés PWM(T) pour les signaux de commande modulés en largeur d'impulsion de chaque groupe de couleurs de LED sont mémorisés pour des conditions de mélange de lumière comportant des réglages prédéterminés de température de couleur ou positions de coordonnées de couleur.

5. Procédé selon la revendication 4, **caractérisé par** les étapes consistant à :

- a. activer le dispositif d'éclairage à LED,
- b. mesurer la température (T) dans le boîtier de l'appareil d'éclairage à LED et/ou dans la région d'au moins une LED des différents groupes de couleurs de LED,
- c. déterminer les signaux de commande PWM dépendants de la température actuels PWM(T) pour chaque groupe de couleurs de LED à partir des signaux de commande PWM dépendants de la température optimisés mémorisés pour les signaux de commande modulés en largeur d'impulsion de chaque groupe de couleurs de LED pour des conditions de mélange de lumière comportant des réglages prédéterminés de température de couleur ou de positions de coordonnées de couleur,
- d. commander les LED des différents groupes de couleurs de LED avec les signaux de commande PWM dépendants de la température PWM(T) et
- e. retourner à l'étape b.

FIG 1

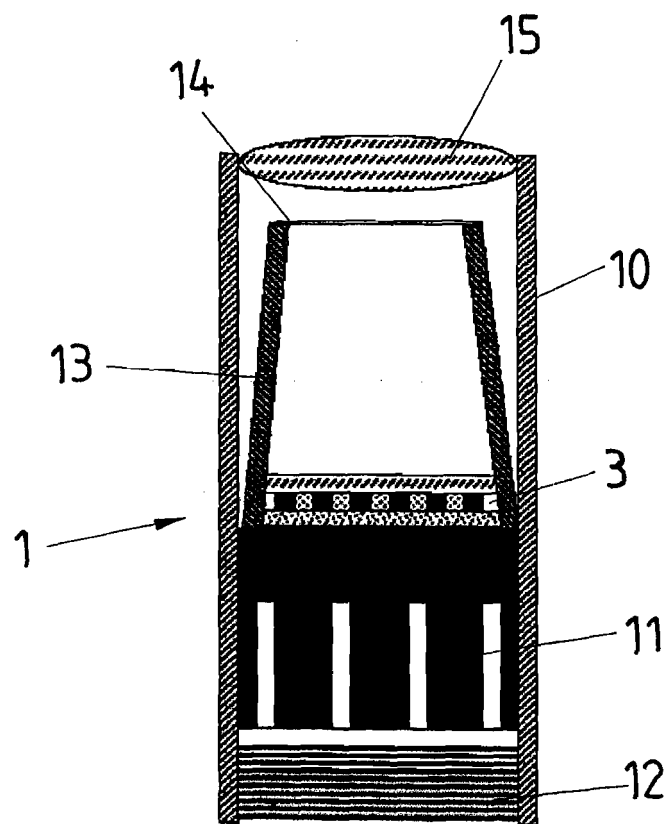
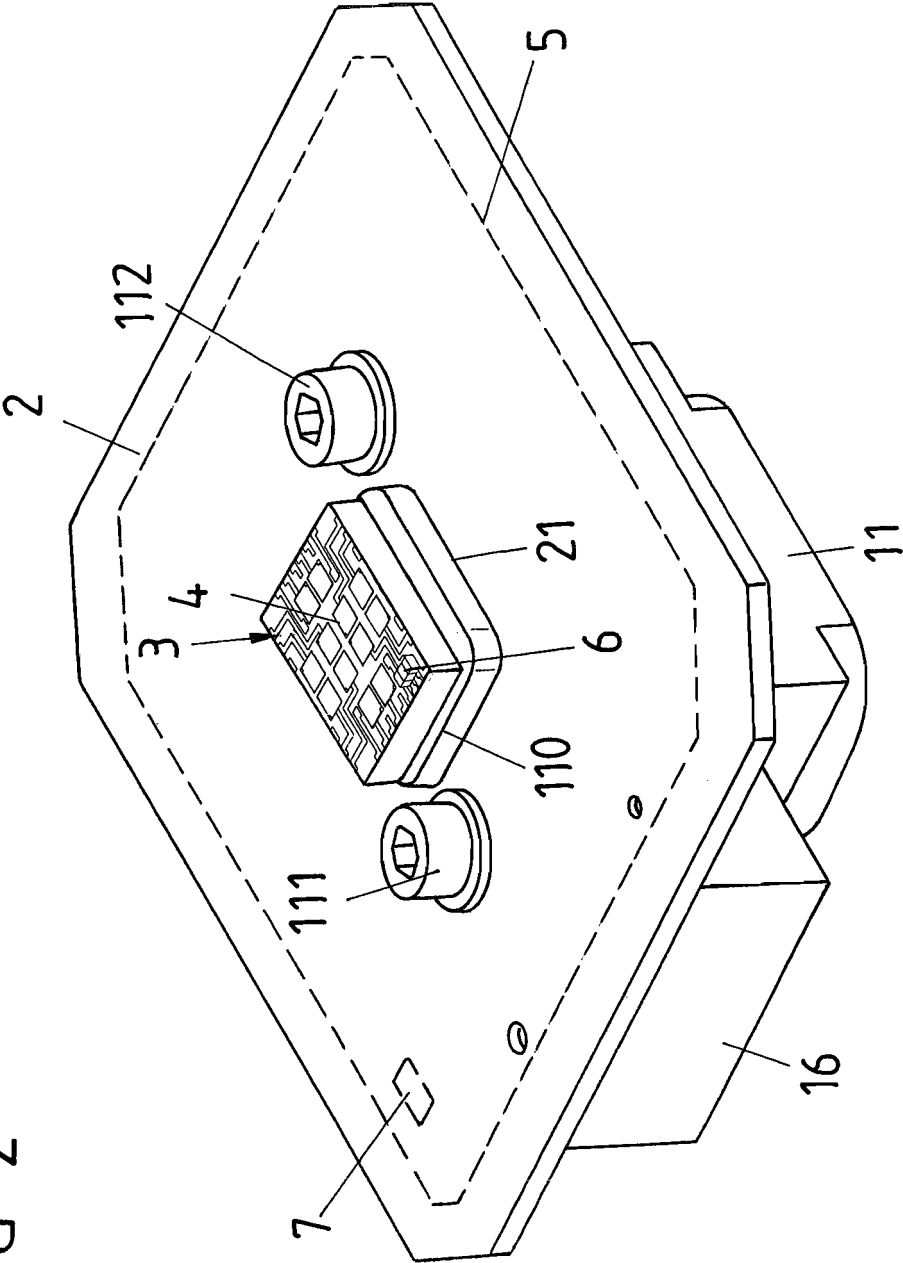


FIG 2



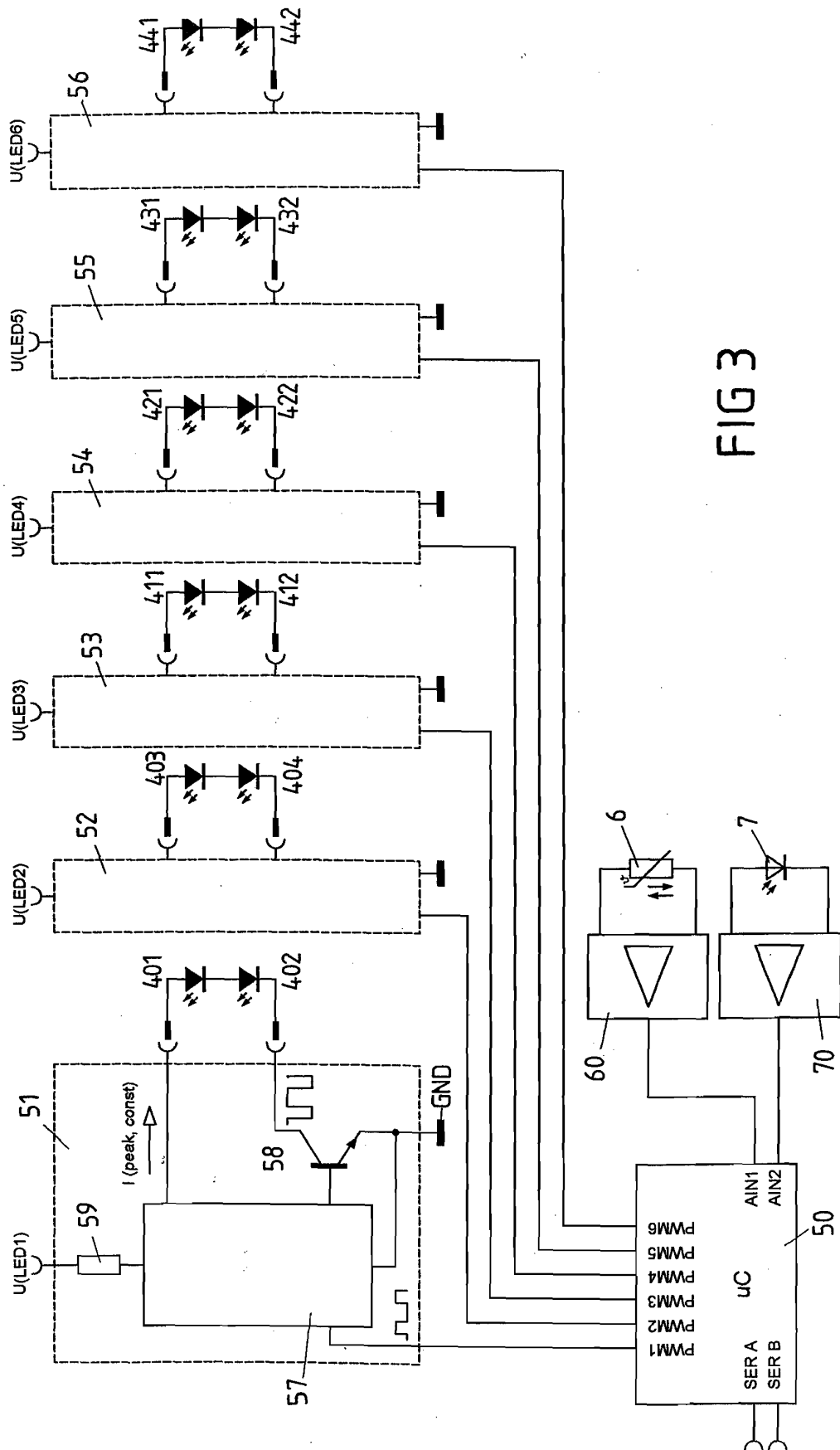


FIG 3

FIG 4

rel. Leuchtdichte

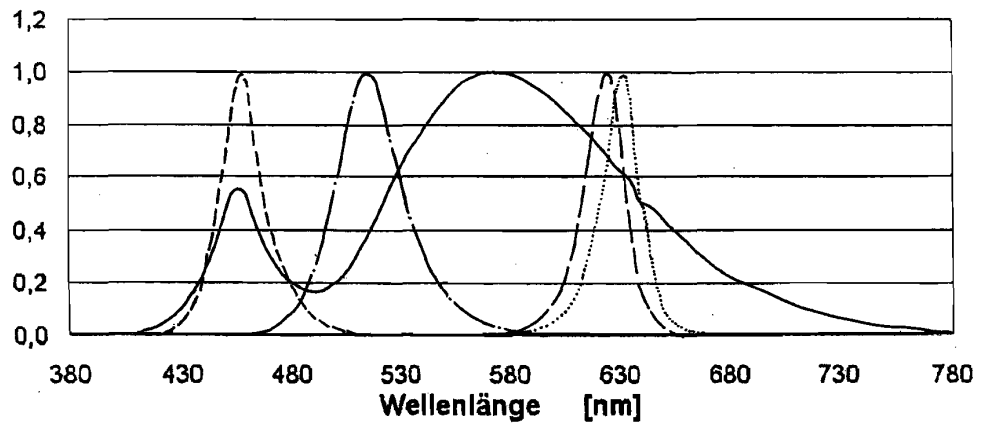


FIG 5

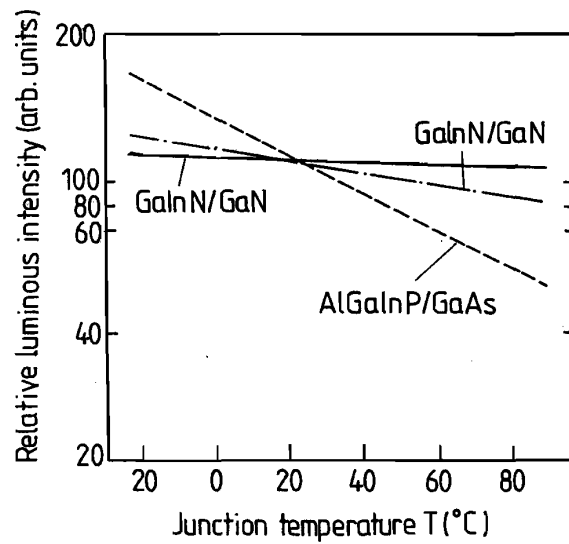


FIG 6

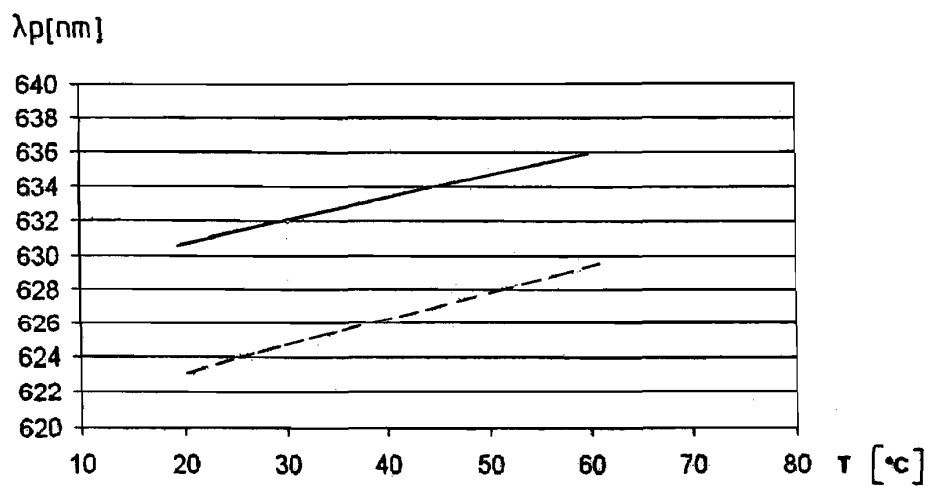


FIG 7

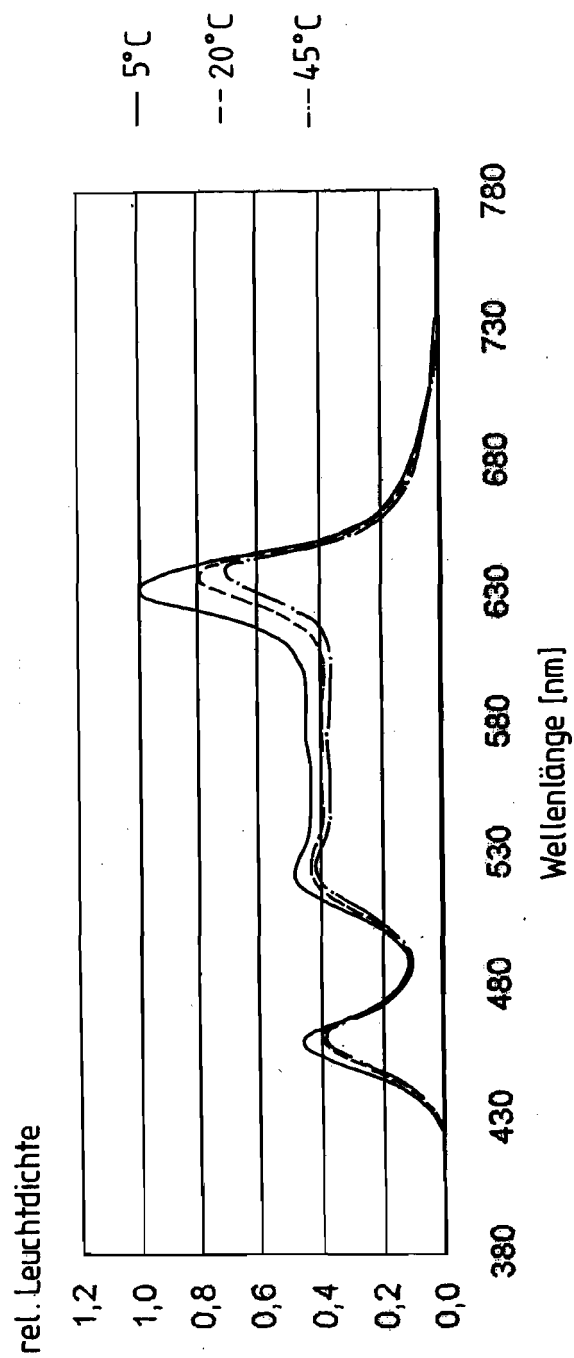
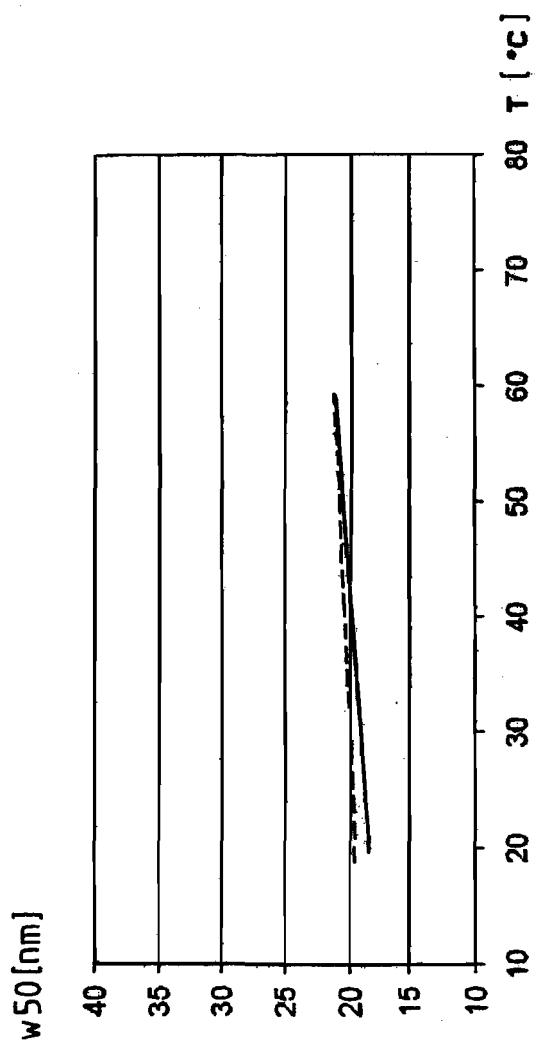


FIG 8

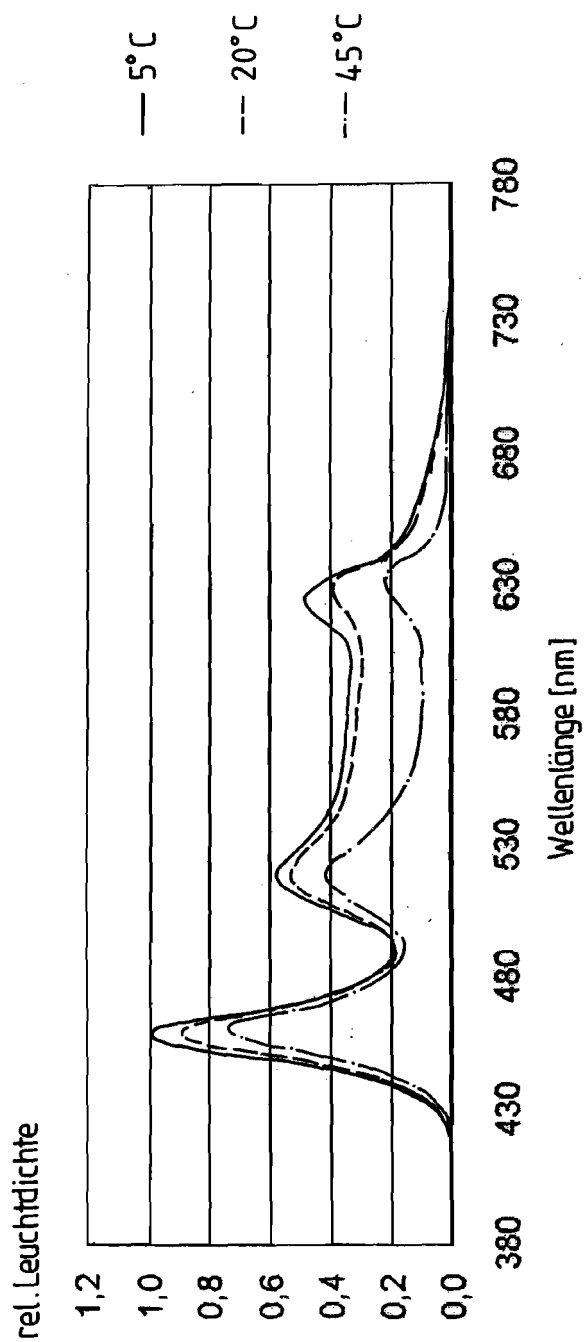


FIG 9

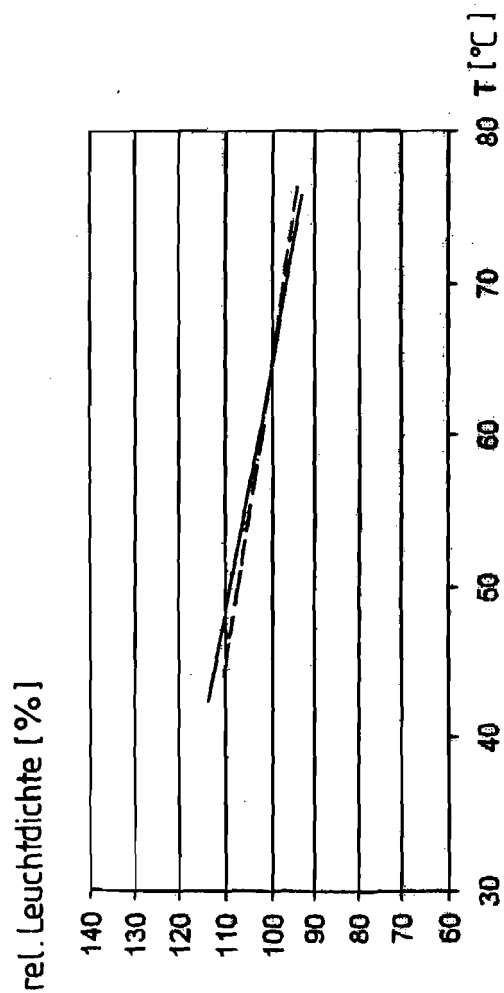


FIG 10

FIG 11

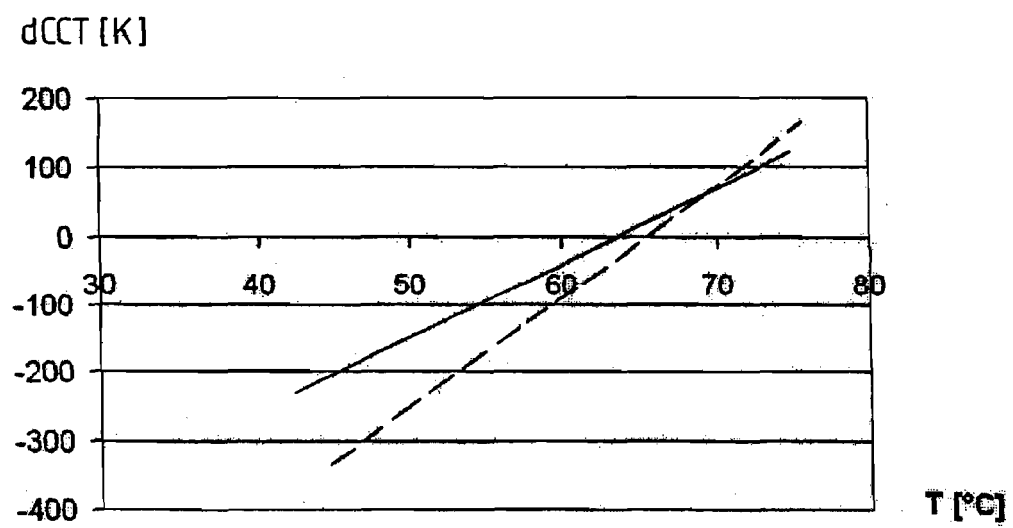


FIG 12

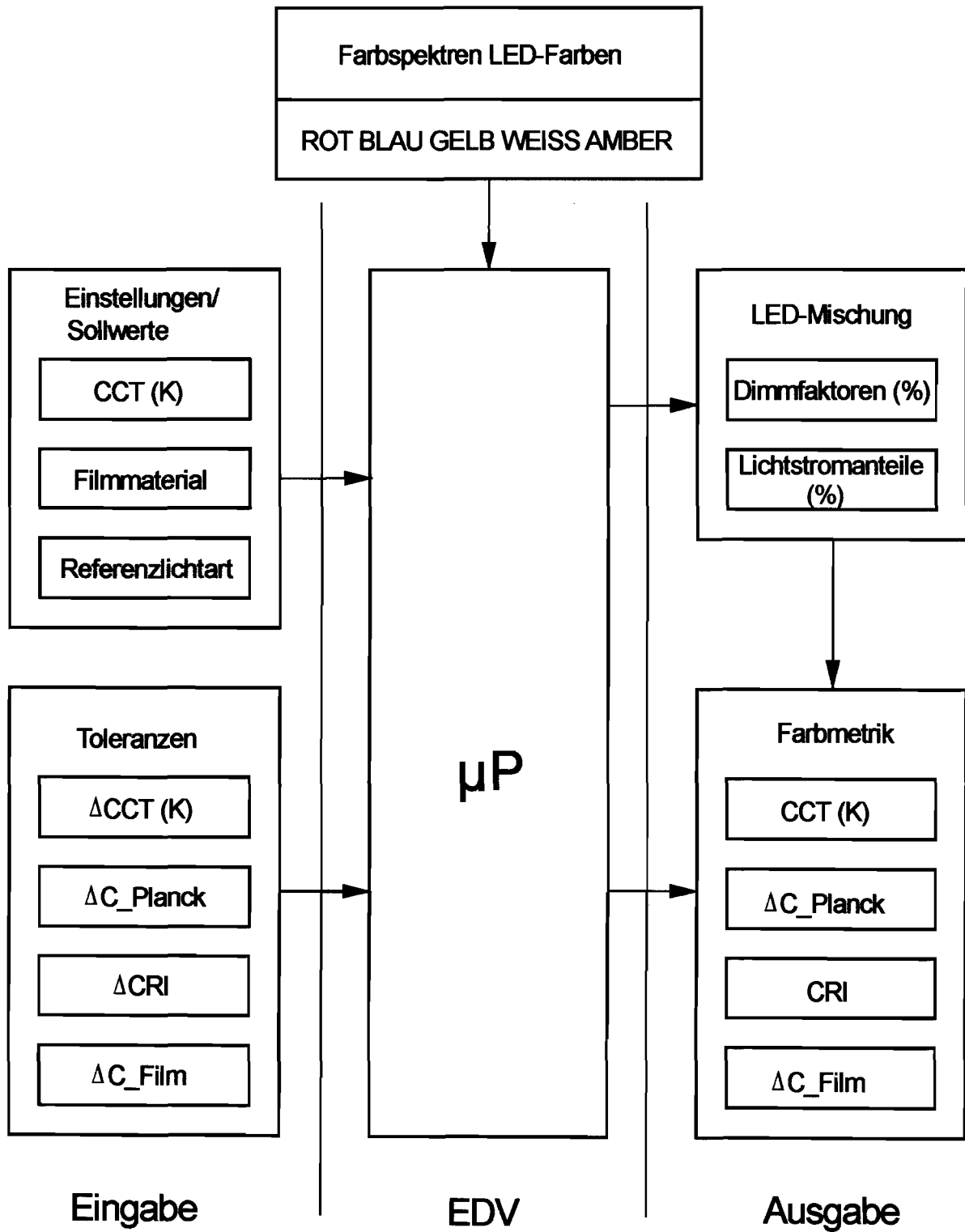


FIG 13

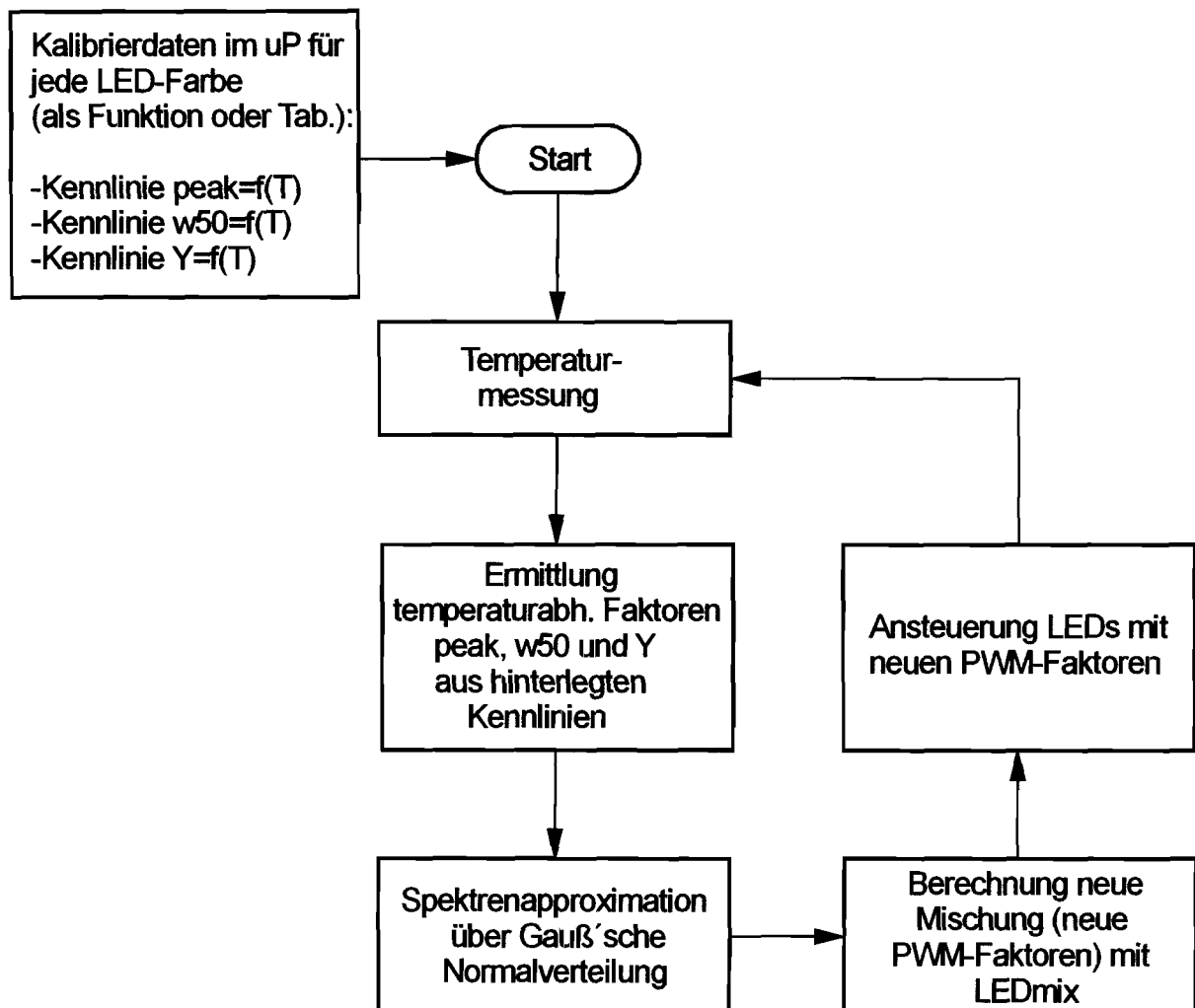
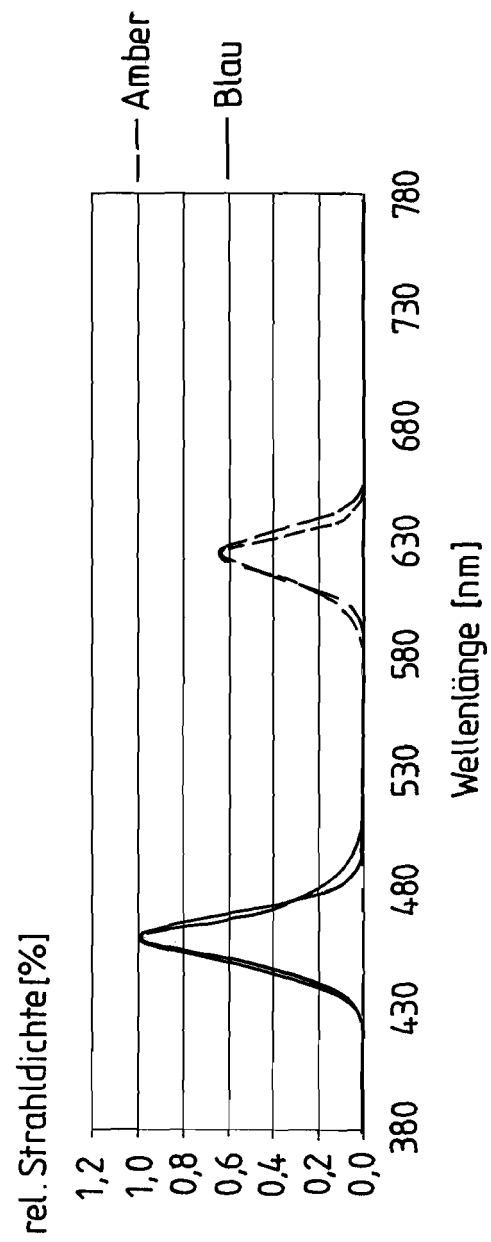
Gauß "online"
ohne Sensor

FIG 14



Gauß "online" ohne Lichtsensor

Kalibrierdaten im uP für
jede LED-Farbe
(als Funktion oder Tab.):

- Kennlinie $\text{peak}=f(T_u)$
- Kennlinie $w_{50}=f(T_u)$
- Kennlinie $Y_0=f(T_u)$

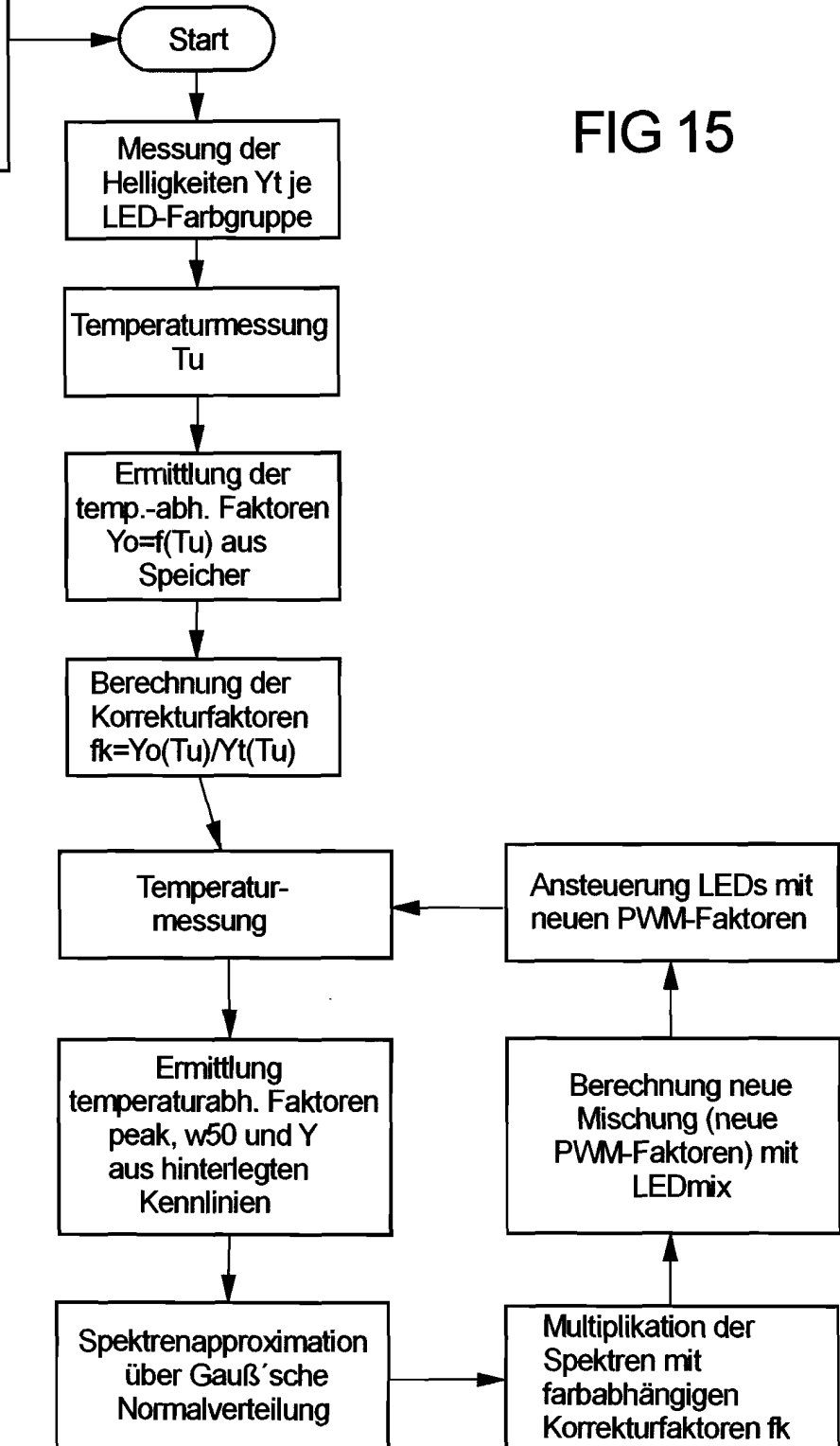


FIG 15

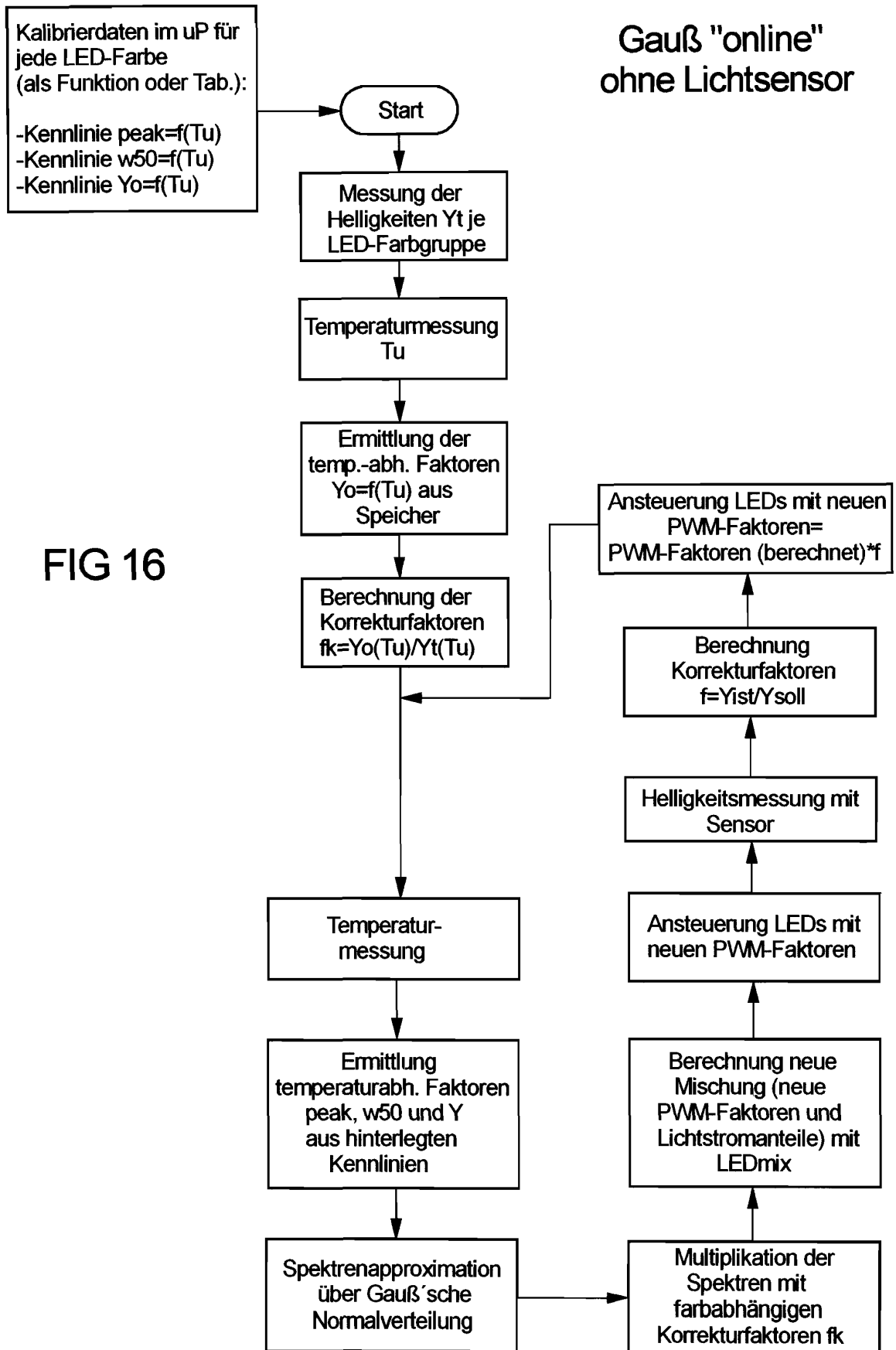


FIG 17

Gauß "vorab"
ohne Sensor

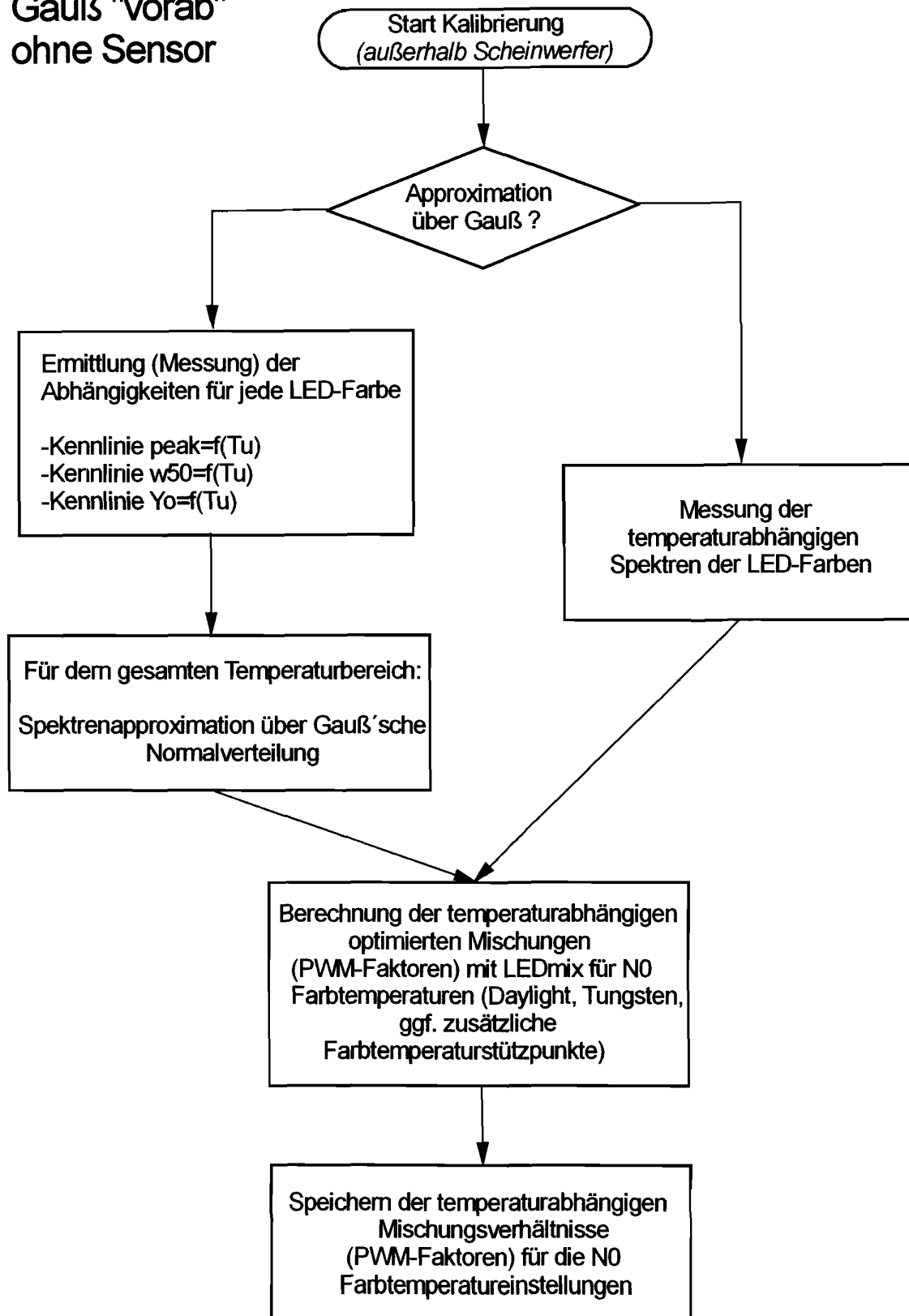


FIG 18

Gauß "vorab"
ohne Sensor

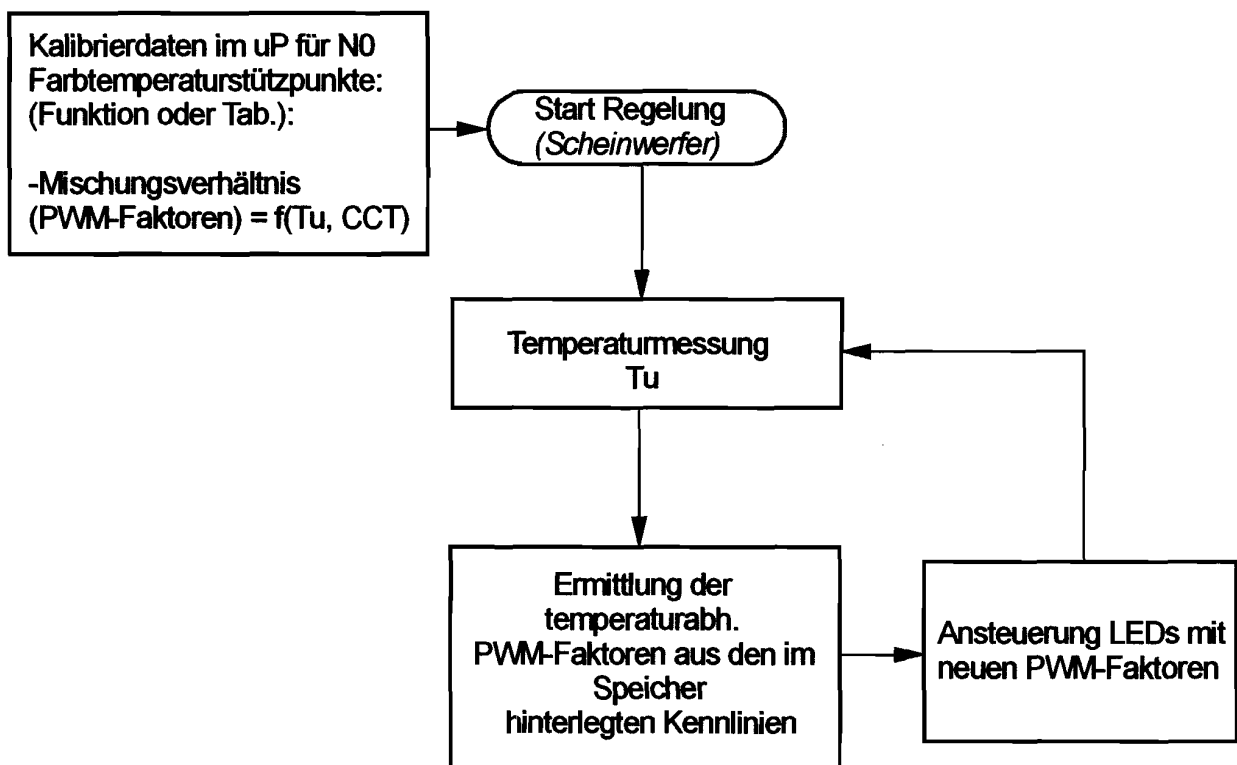


FIG 19

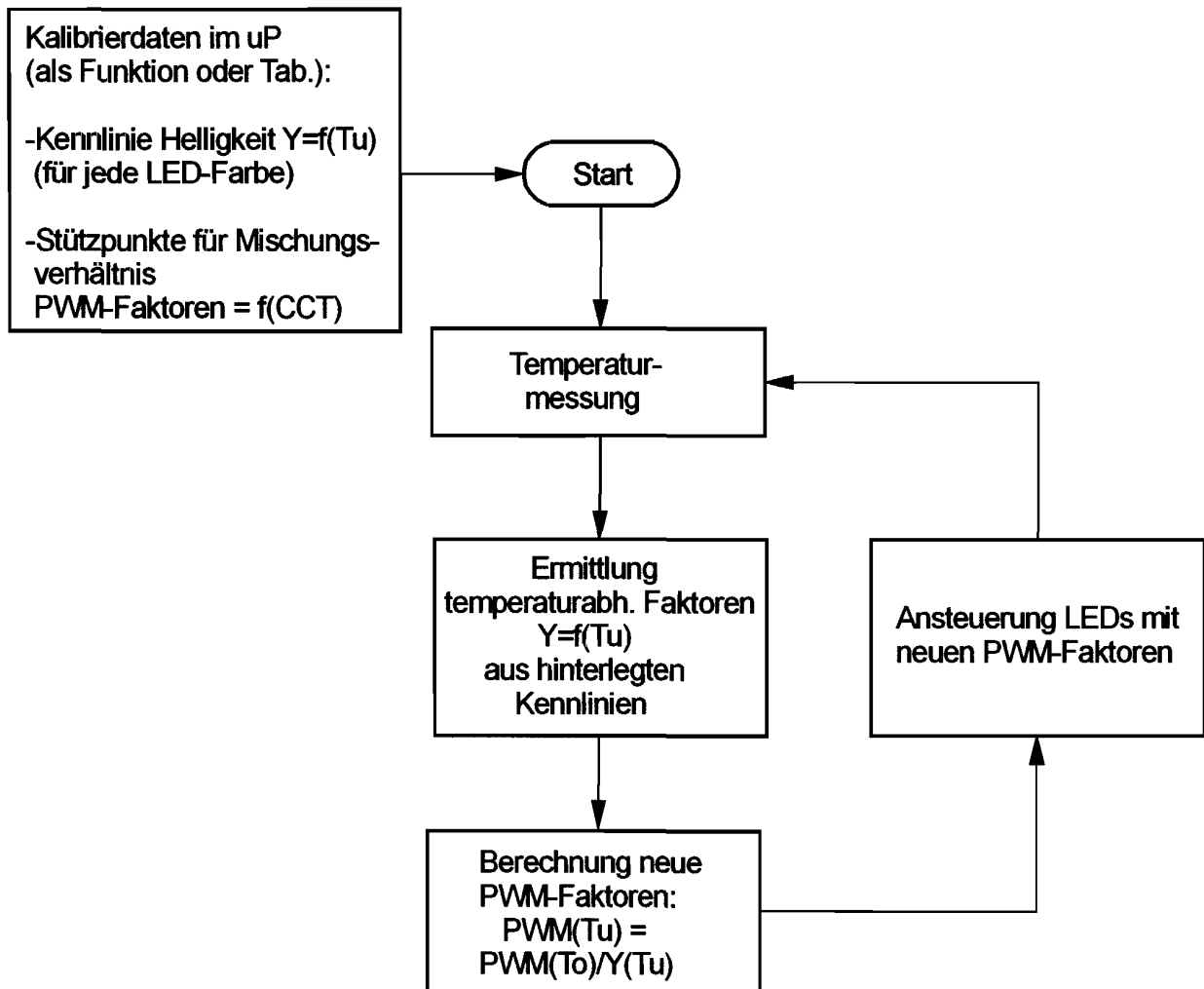
Konstante Lichtstromanteile
ohne Sensor

FIG 20

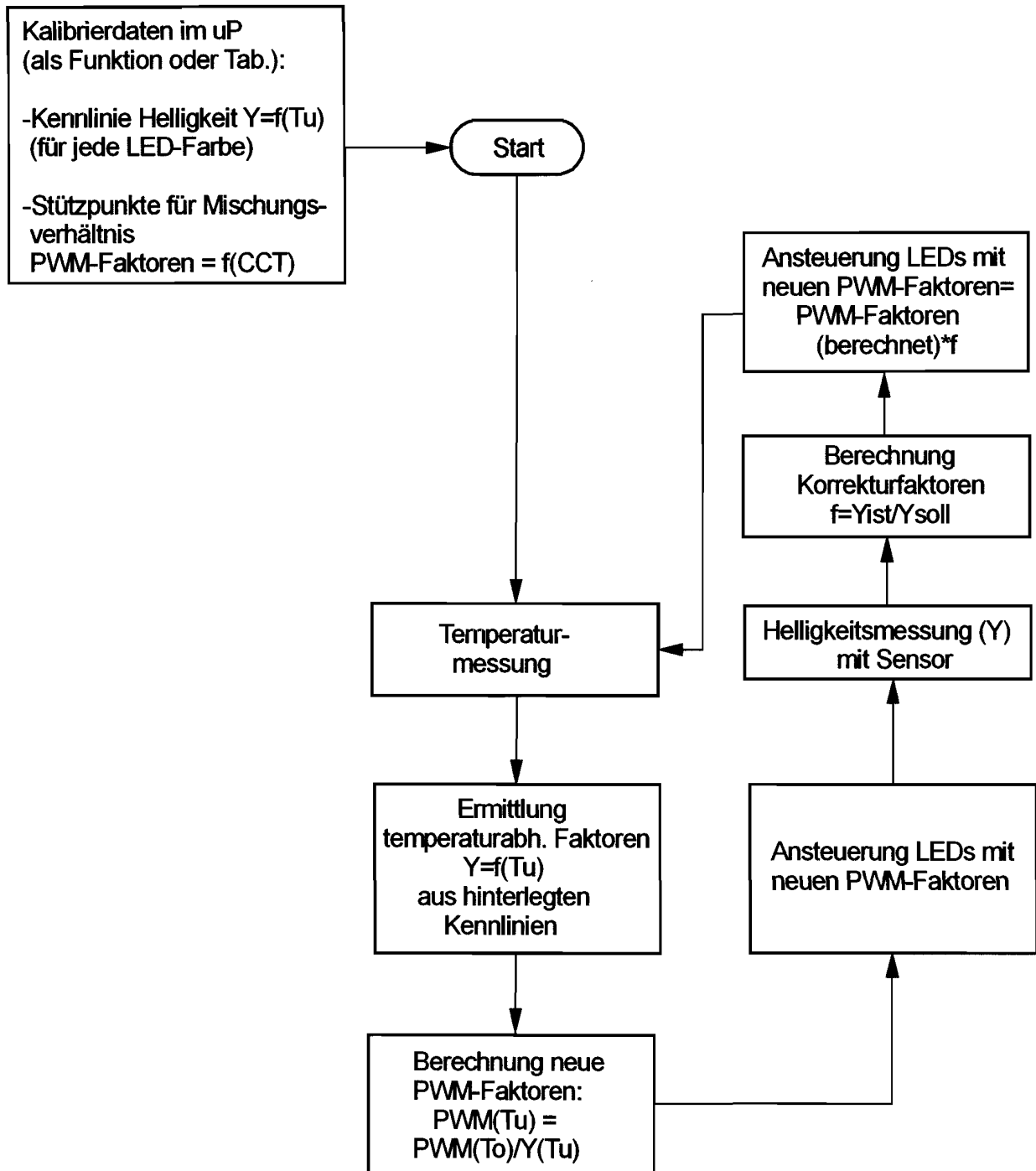


FIG 21

Helligkeit = f (Tboard) einer amberfarbenen LED
gemessen und gefittet

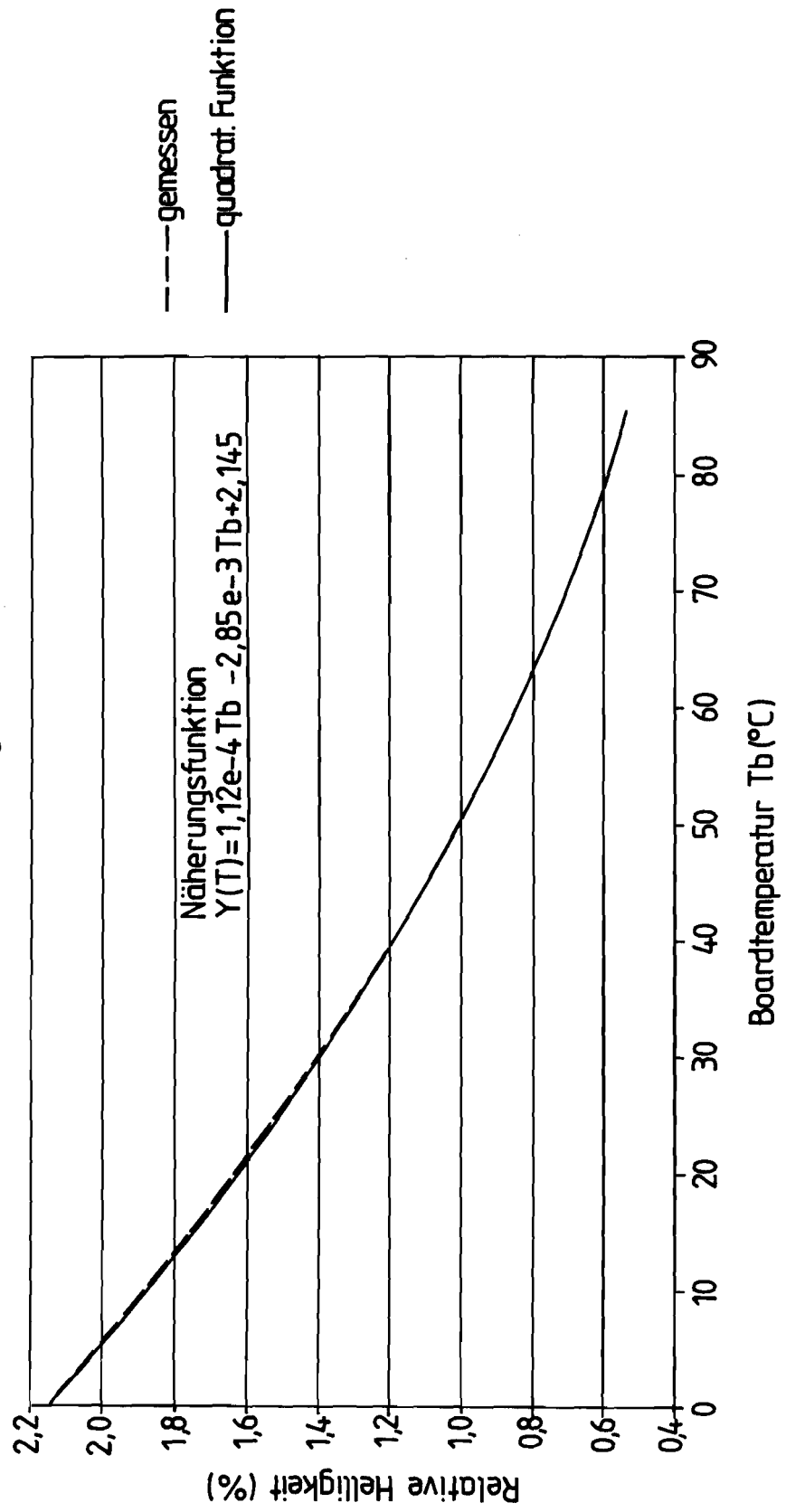


FIG 22

Helligkeit = $f(T)$ einer amberfarbenen LED
in Abhängigkeit vom Strom

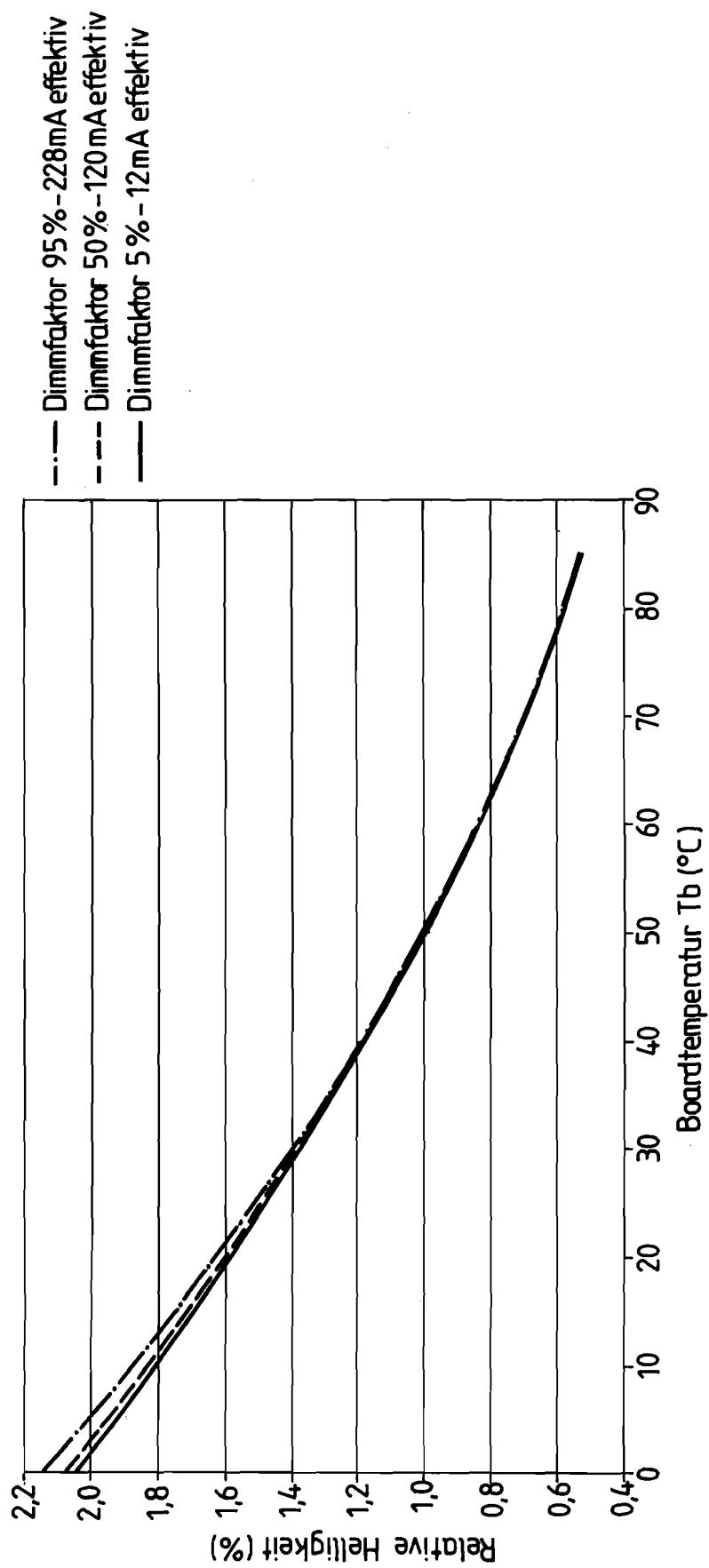


FIG 23

Kennlinie Helligkeit= $f(T_{\text{board}}, \text{LED-Leistung})$
für yellow
Vergleich Fitfunktion mit Messergebnissen

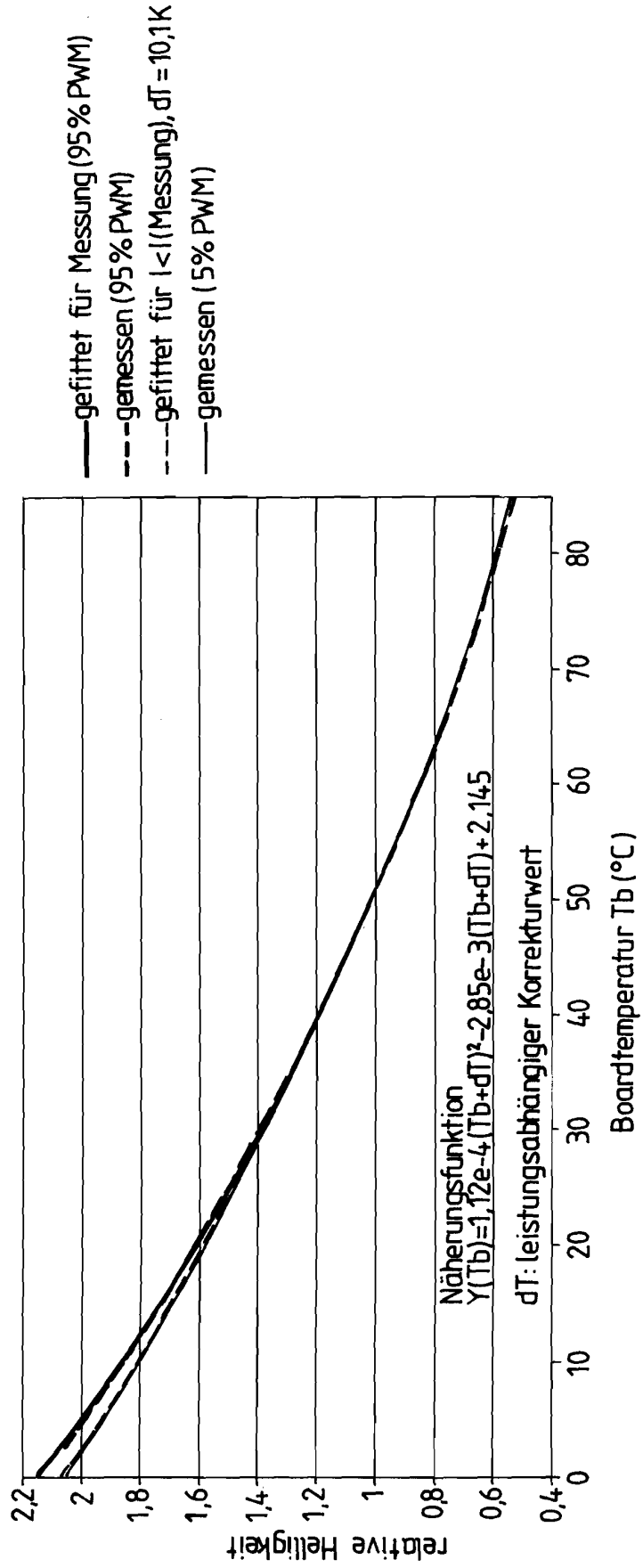


FIG 24

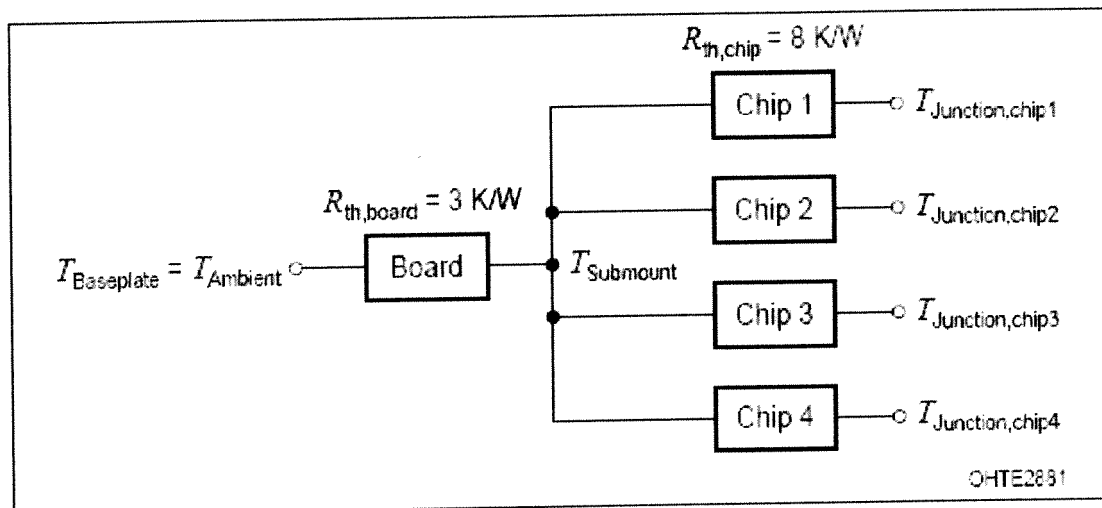


FIG 25

Farbsteuerung mittels Temperaturkennlinien

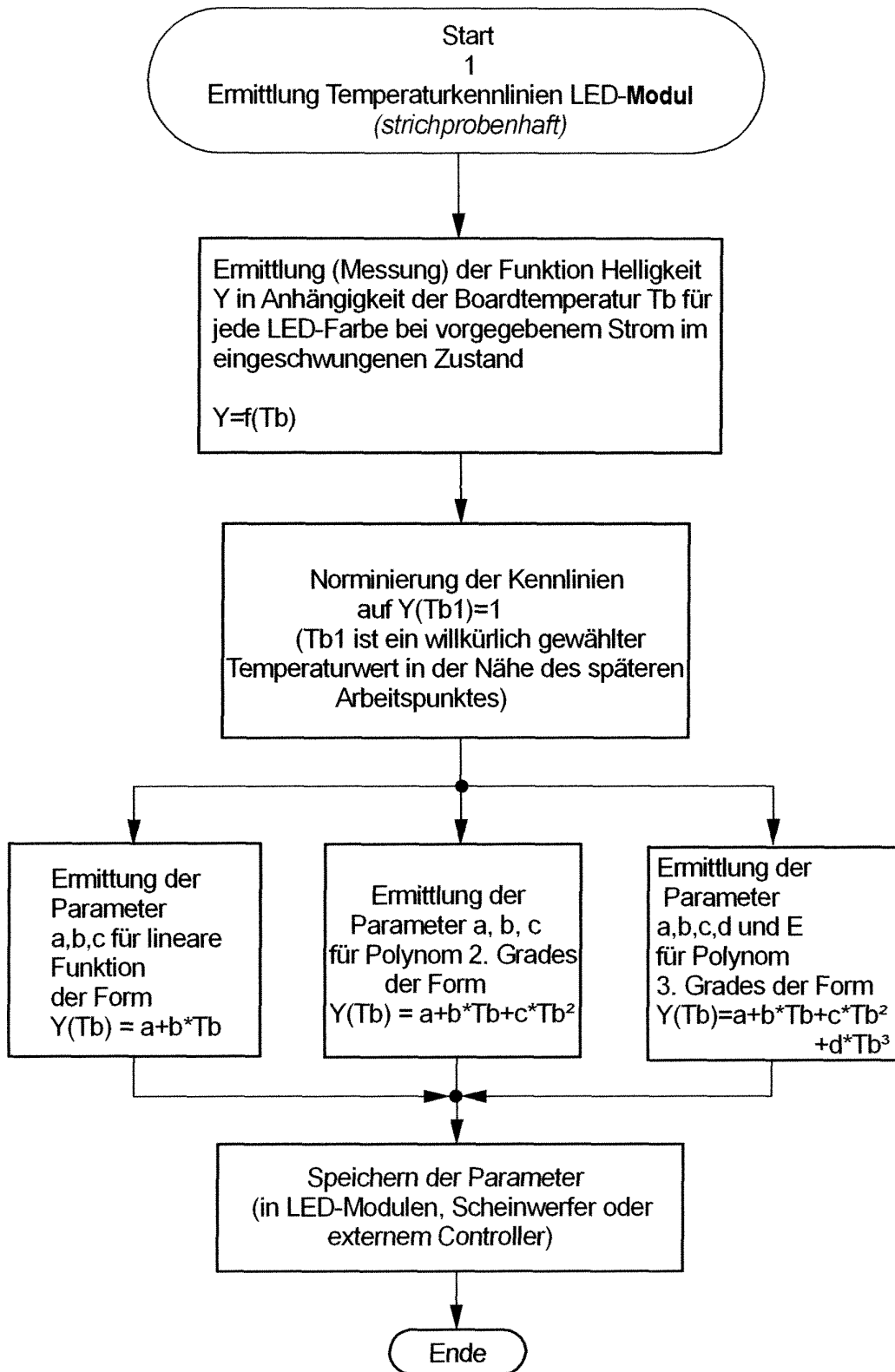


FIG 26

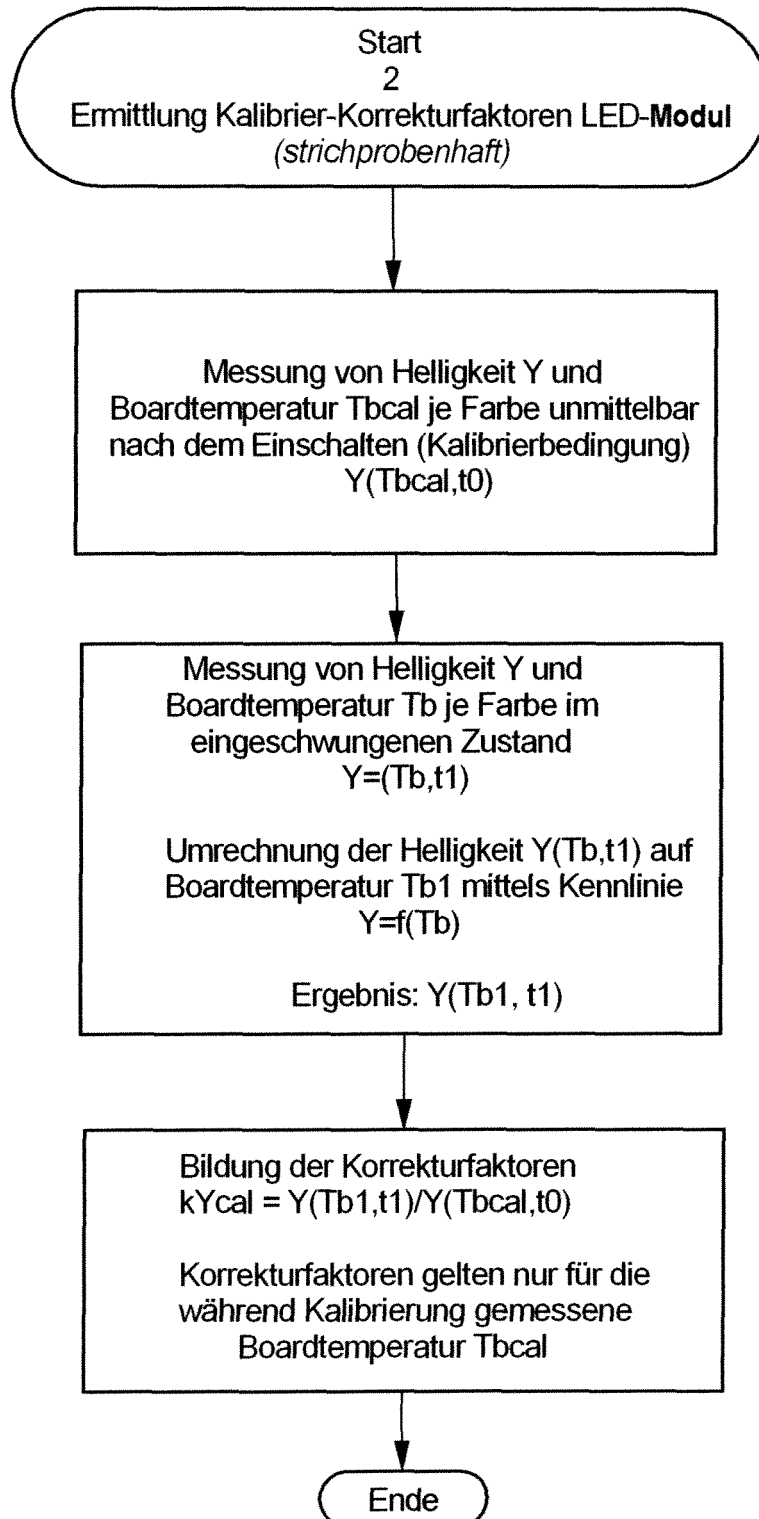


FIG 27

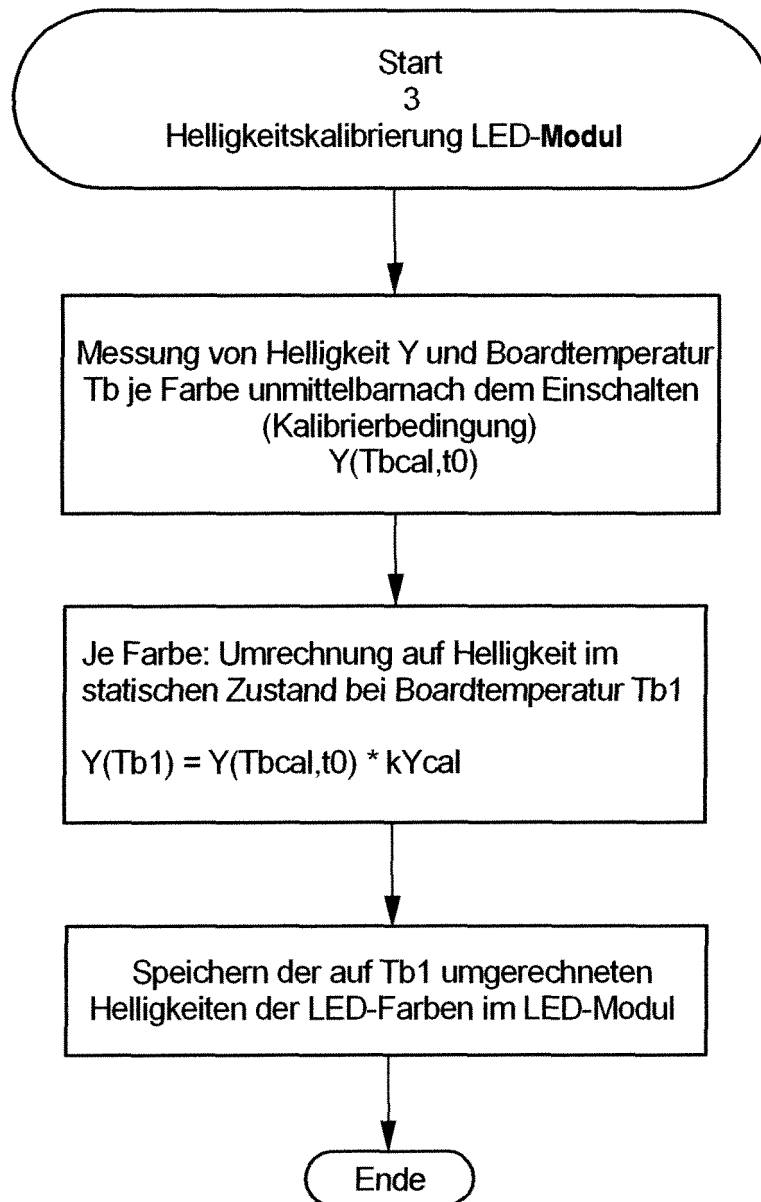


FIG 28

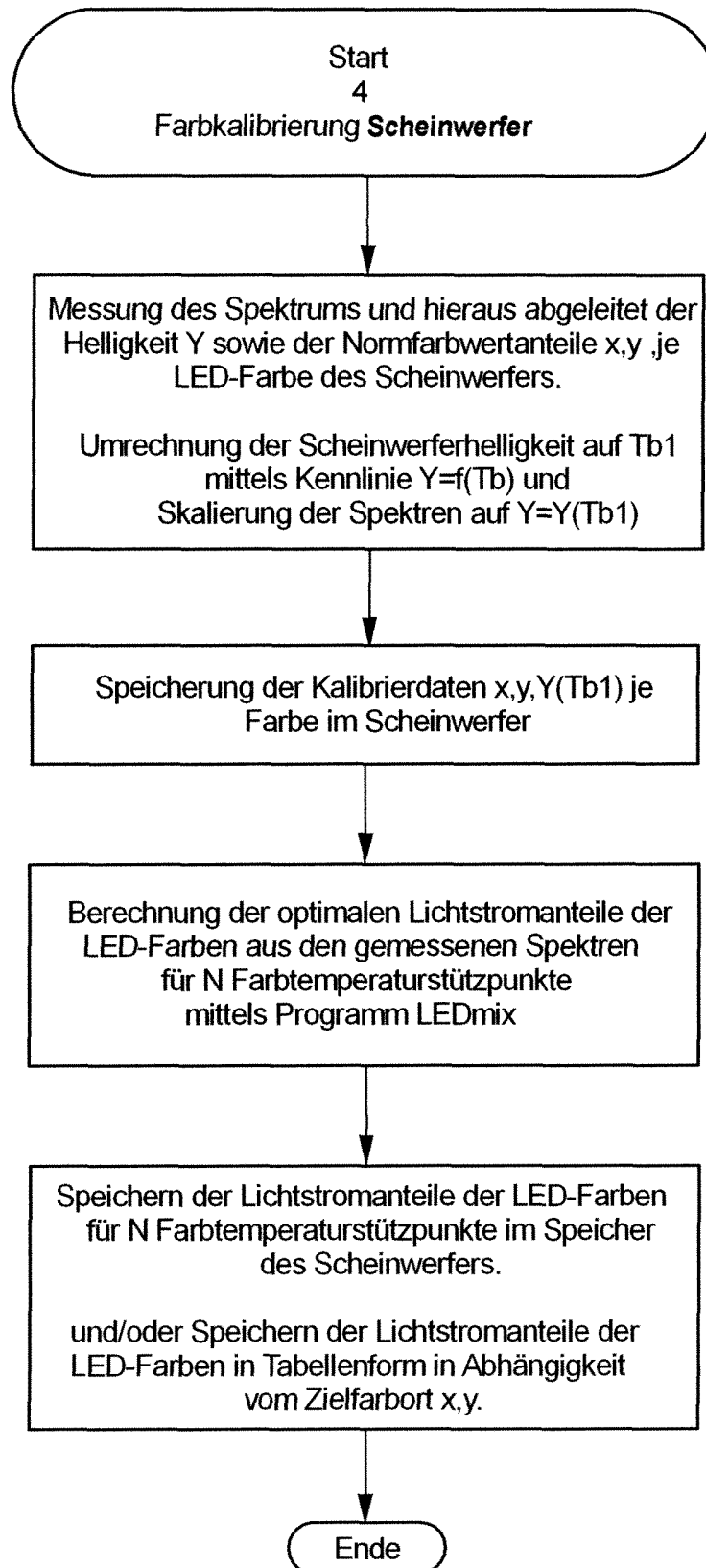


FIG 29

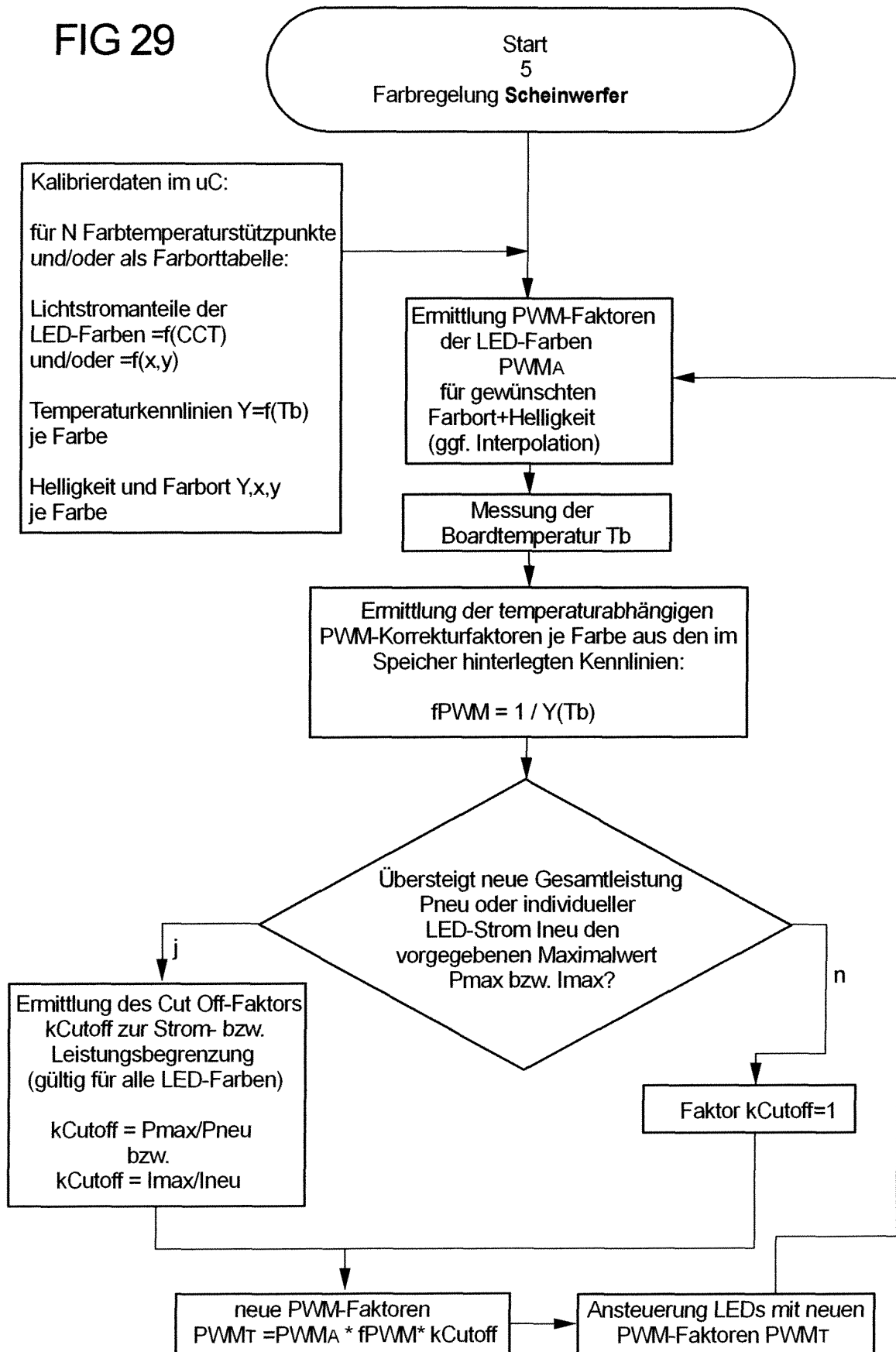


FIG 30

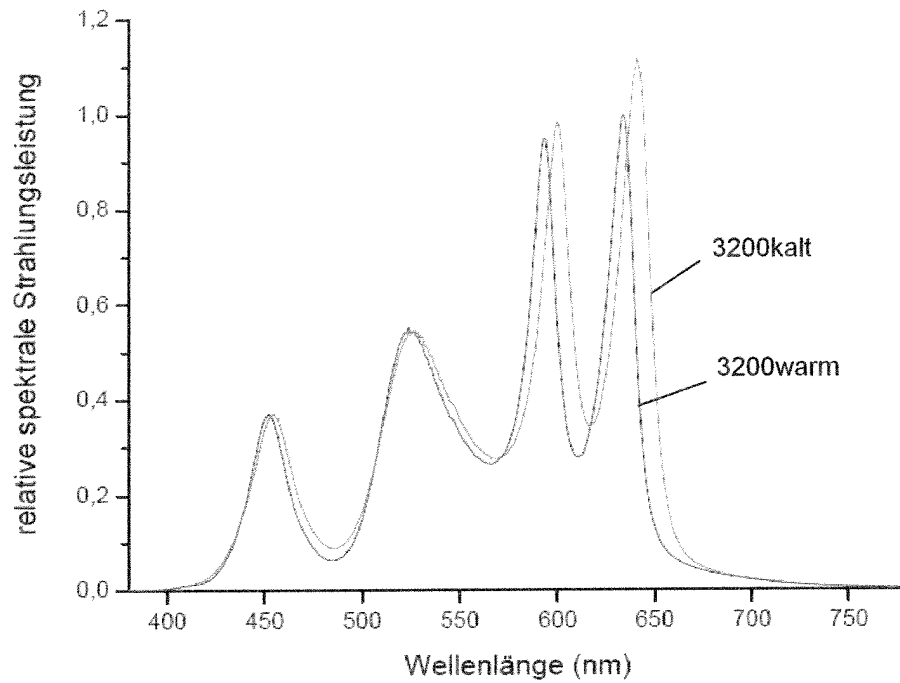


FIG 31

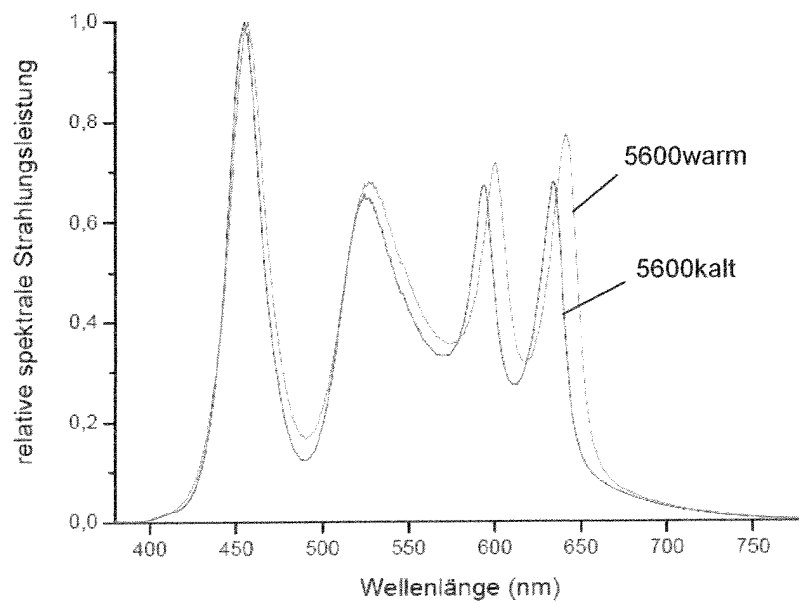


FIG 32

CCT-Abweichung kalt-warm in Abh. der Farbtemperatur

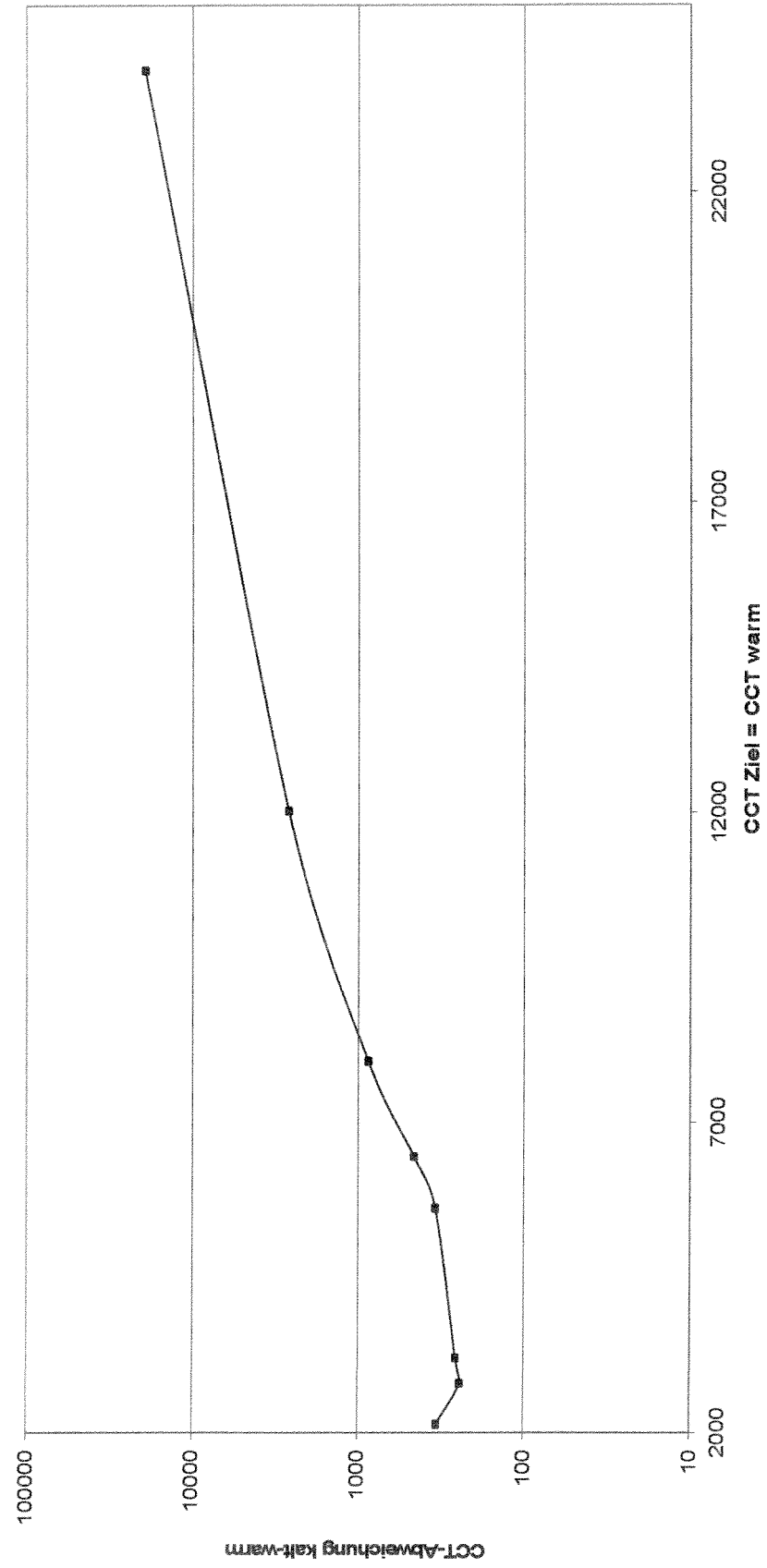


FIG 33

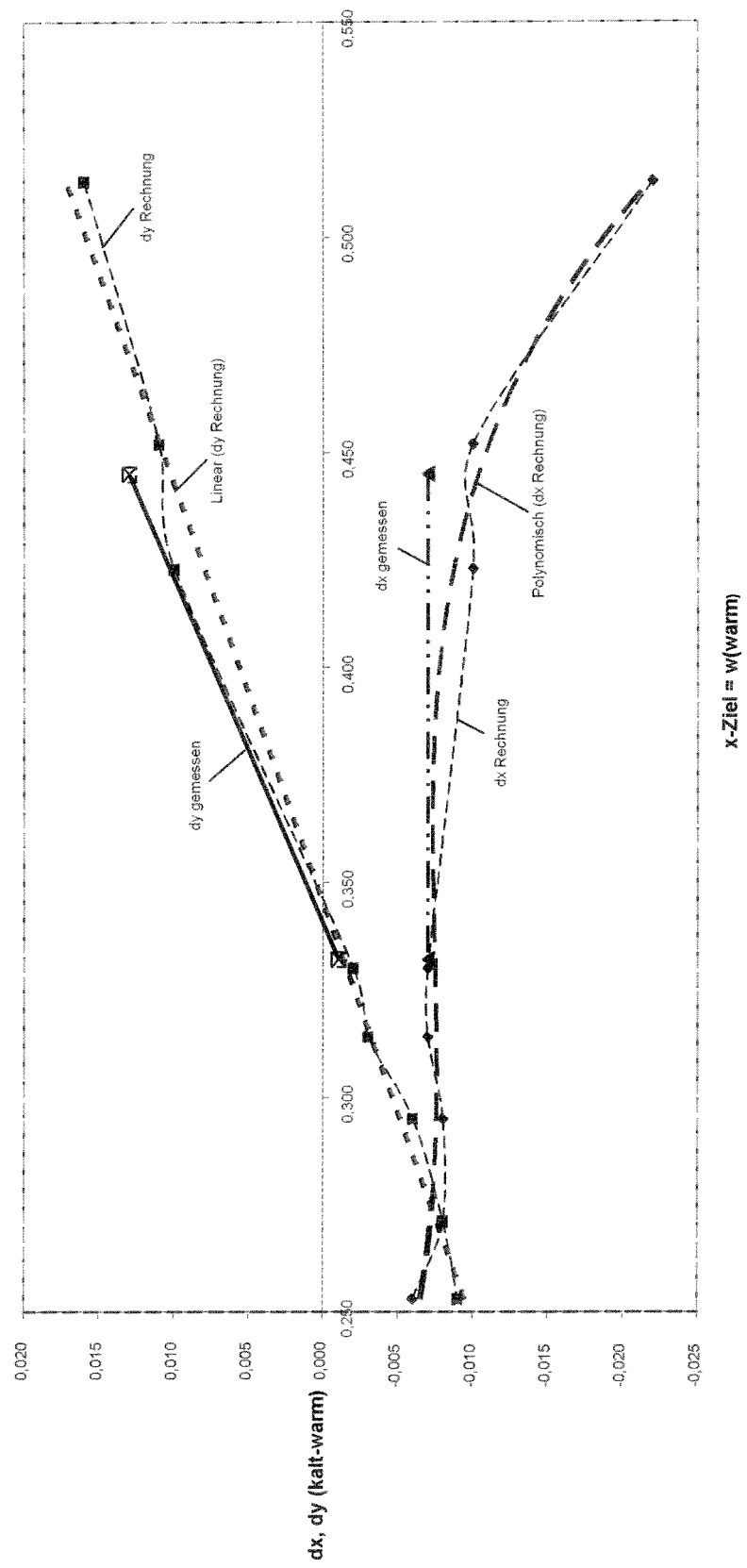


FIG 34

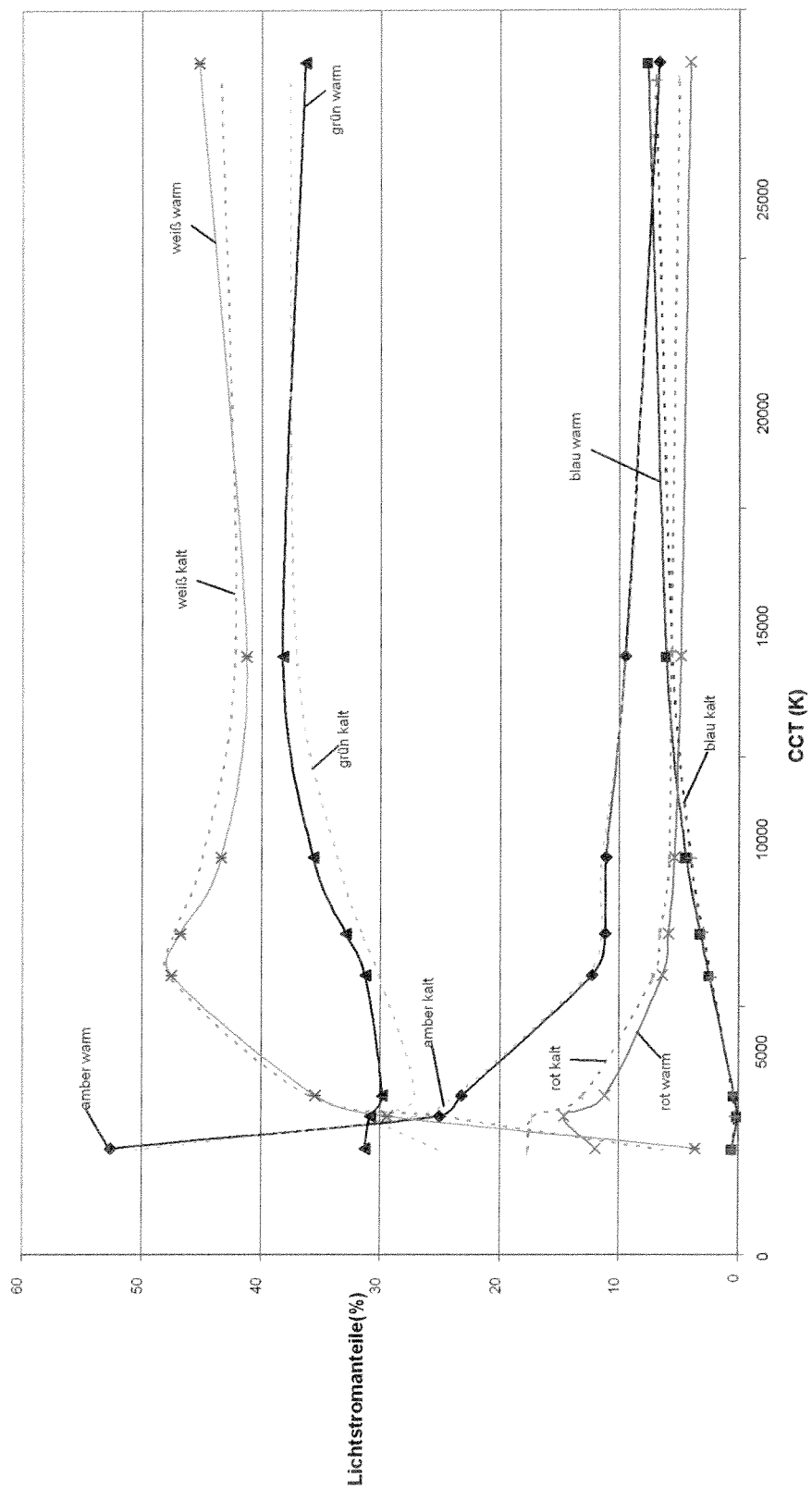


FIG 35

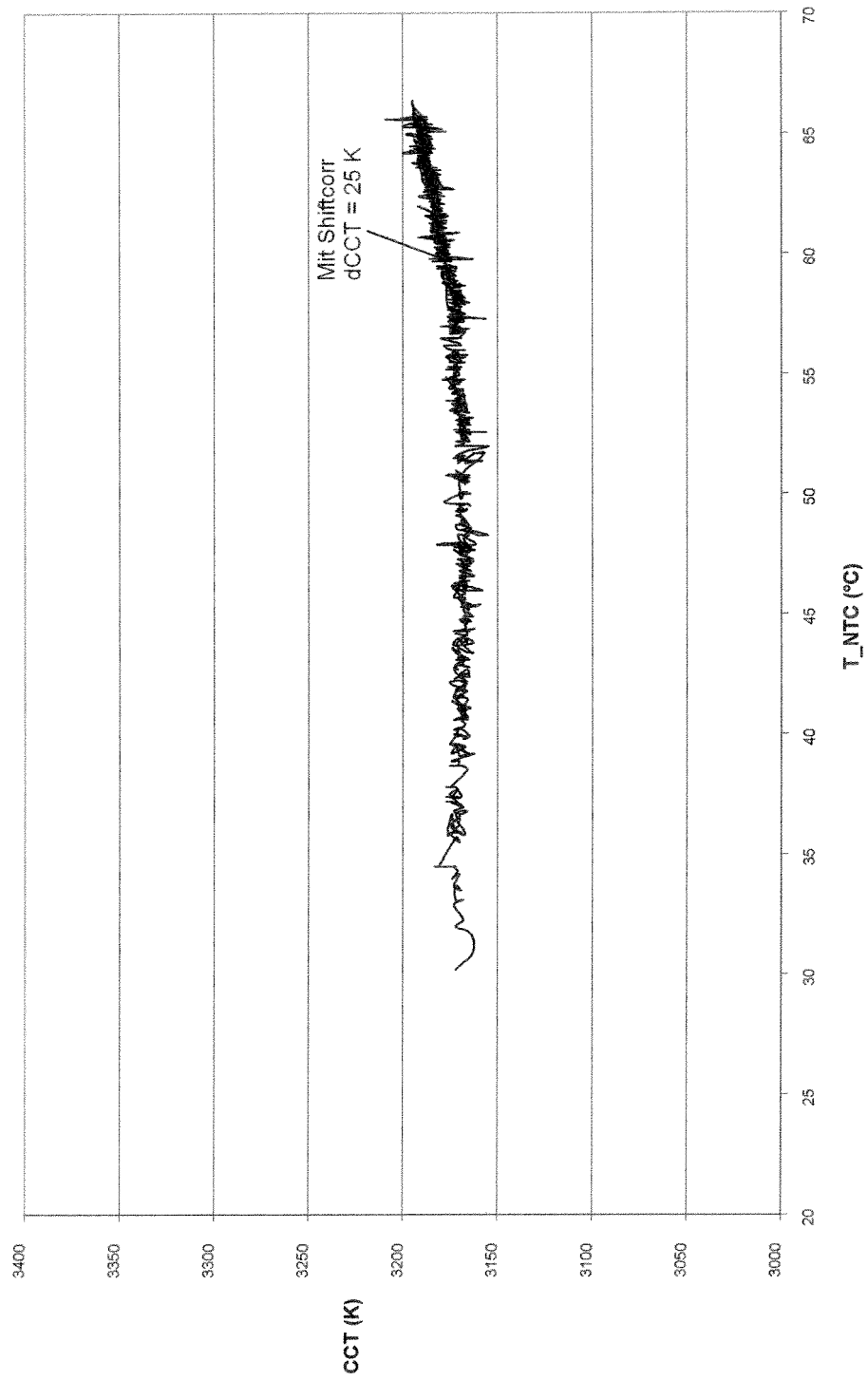


FIG 36

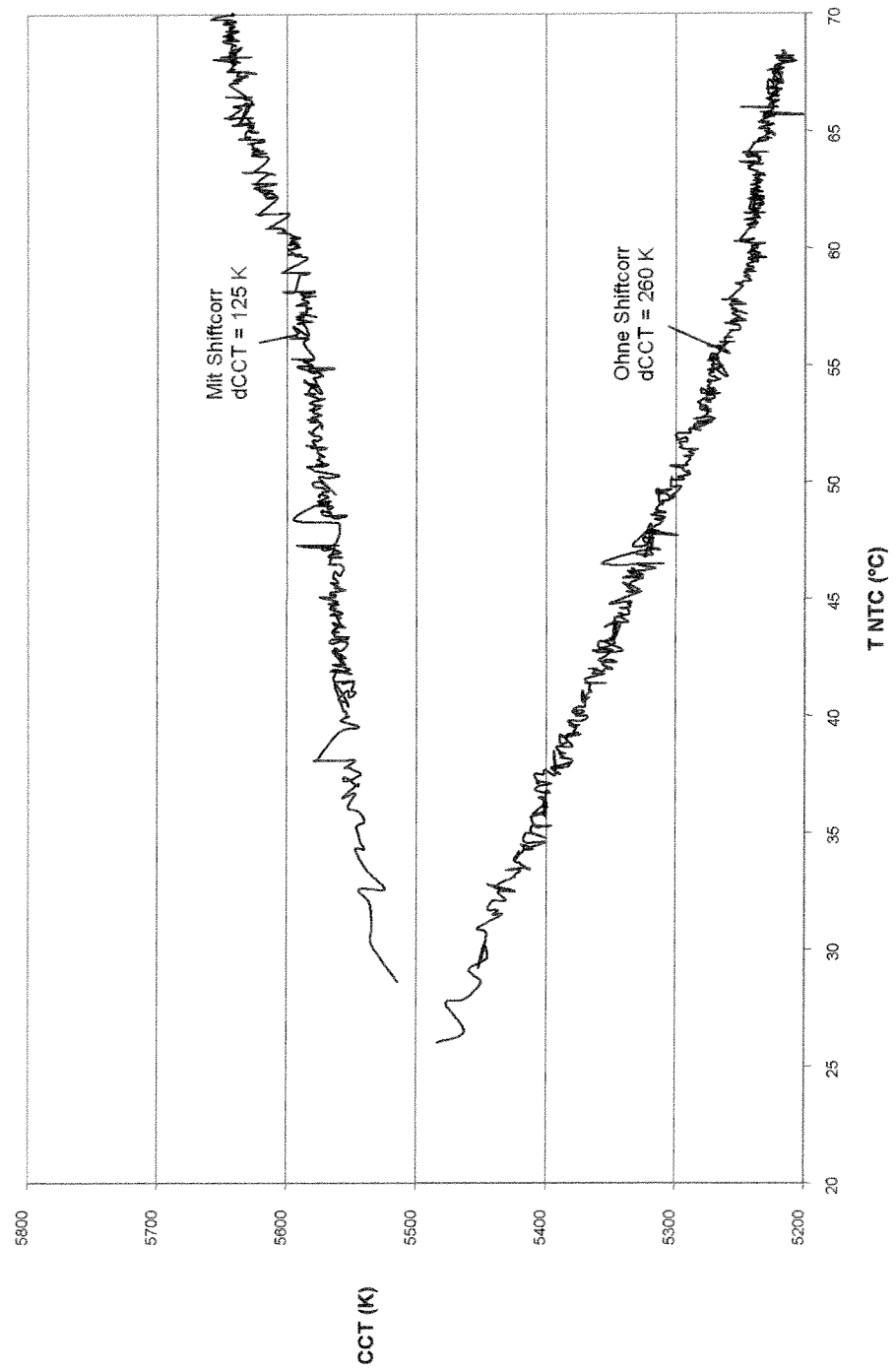


FIG 37

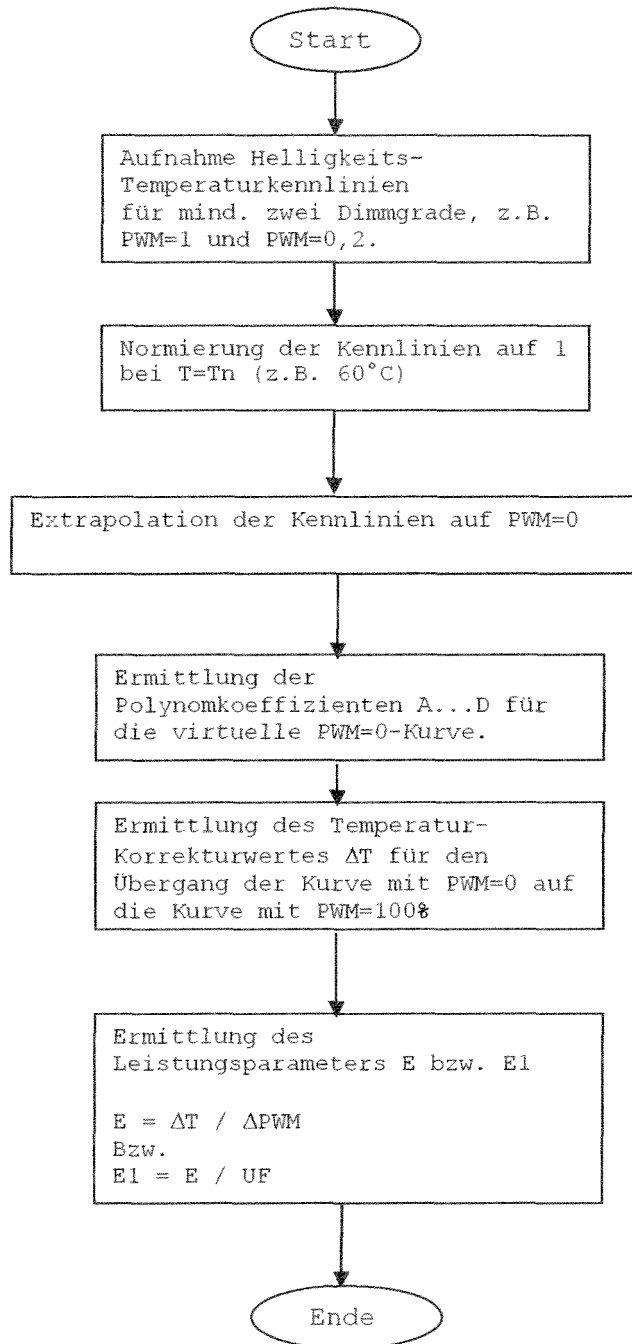
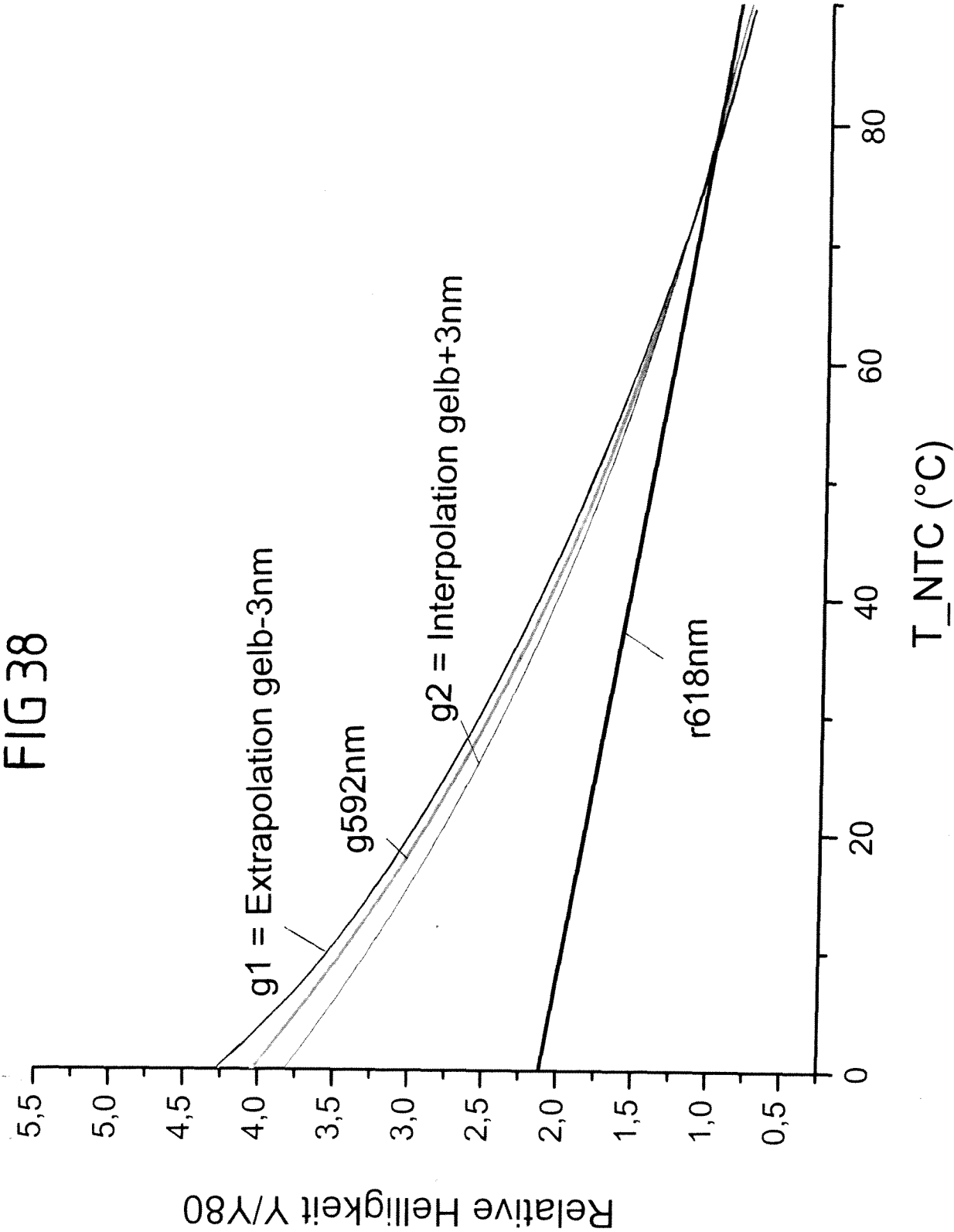


FIG 38



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- US 20040105261 A1 [0007]
- DE 202005001540 U1 [0009]