

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum

25. Juni 2020 (25.06.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer

WO 2020/126797 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G06F 30/20 (2020.01) G06F 119/08 (2020.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2019/084829

(22) Internationales Anmeldedatum:

12. Dezember 2019 (12.12.2019)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2018 222 473.0

20. Dezember 2018 (20.12.2018) DE

(71) Anmelder: ROLLS-ROYCE DEUTSCHLAND LTD &

CO KG [DE/DE]; Eschenweg 11, OT Dahlewitz, 15827

Blankenfelde-Mahlow (DE).

(72) Erfinder: BAUERSCHMIDT, Philipp; c/o Rolls-Royce

Deutschland Ltd & Co KG, Eschenweg 11, 15827 Blanken-

felde-Mahlow (DE). ZANGARO, Antonio; c/o Rolls-Roy-

ce Deutschland Ltd & Co KG, Eschenweg 11, 15827 Blan-
kenfelde-Mahlow (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für

jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

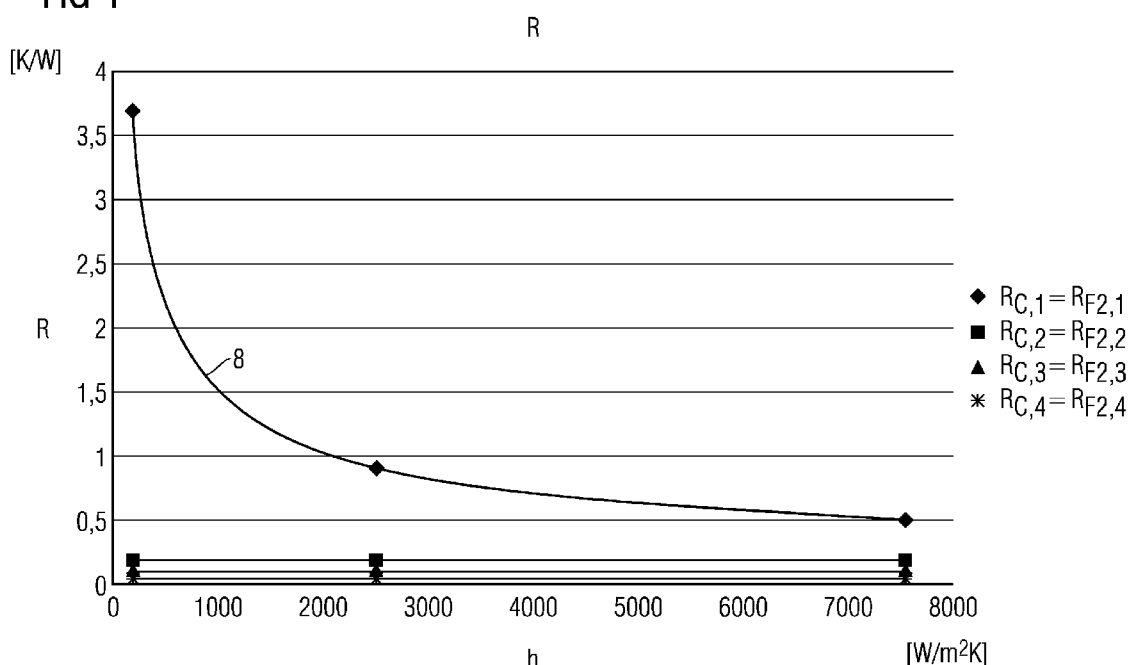
(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für

jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ,

(54) Title: SIMULATION OF THE THERMAL BEHAVIOUR OF A HEAT-EMITTING DEVICE

(54) Bezeichnung: SIMULATION DES THERMISCHEN VERHALTENS EINER WÄRMEABGEBENDEN VORRICHTUNG

FIG 4



(57) Abstract: The present invention relates to a computer-implemented method for determining thermal resistances (R) of a heat-emitting device (1) in conjunction with the heat-transfer coefficient (h), to an associated simulation system, to a computer program product, to a computer-readable medium, and to an aircraft (10).

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft ein Computerimplementiertes Verfahren zur Bestimmung von thermischen Widerständen (R) einer wärmeabgebenden Vorrichtung (1) in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten (h), ein zugehöriges Simulationssystem, ein Computerprogrammprodukt, ein Computerlesbares Medium und ein Luftfahrzeug (10).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT,
LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI,
SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN,
GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- *hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii)*

Veröffentlicht:

- *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

Beschreibung

Simulation des thermischen Verhaltens einer wärmeabgebenden Vorrichtung

5

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

Gebiet der Erfindung

10 Die vorliegende Erfindung betrifft ein computerimplementiertes Verfahren zur Bestimmung von thermischen Widerständen einer wärmeabgebenden Vorrichtung in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten, ein zugehöriges Simulationssystem, ein Computerprogrammprodukt, ein computerlesbares Medium und
15 ein Luftfahrzeug mit einem Simulationssystem.

Beschreibung des Stands der Technik

Die Zuverlässigkeit und Lebensdauer wärmeabgebender Vorrichtung, insbesondere elektrischer Systeme, hängt entscheidend
20 von ihrer thermischen Belastung ab. Design, Größe und Gewicht werden vom Kühlkonzept mitbestimmt. Daraus ergibt sich für die Elektronikentwicklung das Ziel, die thermischen Verhältnisse in den Systemen bereits in einer frühen Entwicklungsphase zu verstehen. Zusätzlich ist die thermische Überwachung elektrischer Systeme während des Betriebs in Echtzeit in einer vermehrten Anzahl von Anwendungen essentiell.
25

Die thermische Optimierung erfordert eine präzise Analyse der Wärmepfade. Grobe Abschätzungen und Erfahrung reichen aufgrund der gestiegenen Systemkomplexität und Anforderungen in der Regel nicht mehr aus.
30

Parameter wie z.B. Verlustleistungen, Kühlkörpergeometrie oder die Platzierung von elektrischen Bauelementen beeinflussen die Temperaturen, Wärmeströme und Strömungsverhältnisse in elektrischen Systemen. Diese wiederum beeinflussen die zu erwartende Lebensdauer der einzelnen Komponenten.
35

Um diese Parameter zu bestimmen bzw. Wärmeflüsse zu simulieren, müssen aktuell komplexe Tools zur Berechnung von Temperatur- und Strömungen programmiert werden.

5

Bei der Wärmeübertragung zwischen einem Festkörper und einem angrenzenden Fluid (= Kühlmedium oder Kühlmittel) beschreiben Nusselt-Korrelationen den Wärmeübergang. Im Falle der Wärmestrahlung kann das Stefan-Boltzmann-Gesetz angewandt werden.

10

Da beim übertragenen Wärmestrom die Wechselwirkungen aller Flächen, die mit der Wärmequelle in sichtbaren Kontakt sind, zu berücksichtigen sind, entstehen hier schnell komplexe Rechnungen.

15

Eine bekannte Möglichkeit für die schnelle Berechnung von Temperaturen in einem elektrischen System besteht darin, die wärmeabgebende Vorrichtung durch ein RC-Netzwerk zu „ersetzen“ (= simulieren). Dabei wird jede thermisch relevante Schicht im Wärmepfad durch einen thermischen Widerstand R und eine thermischen Kapazität C dargestellt.

20

Sind die thermischen Widerstände und Kapazität im Modell paarweise parallelgeschaltet, spricht man vom Foster-Netzwerk. Dieses ist mathematisch einfach zu beschreiben. Das Aufheizen und Abkühlen einer Wärmequelle kann damit im Falle eines eindimensionalen Wärmepfads meist zufriedenstellend beschrieben werden. Allerdings entsprechen die einzelnen R - und C -Werte des Foster-Netzwerks nicht den tatsächlichen Werten der einzelnen Schichten der wärmeabgebenden Vorrichtung. Das ergibt sich schon daraus, dass die einzelnen Kapazitäten des Foster-Netzwerks nicht gegen Masse, also die Umgebung, geschaltet sind.

25

30

35

Um nicht nur den thermischen Widerstand des gesamten Wärmepfads zu modellieren, sondern mit den tatsächlich im elektrischen System vorliegenden R - und C -Werten zu arbeiten, muss das Foster- in ein Cauer-Netzwerk transformiert werden. Die

Details der Transformation und ihre Beschreibung sind beispielsweise aus einschlägigen Normen bekannt.

Das zeitliche Verhalten eines eindimensionalen Wärmepfads lässt sich im Foster-Modell mit einer Summe von Exponentialfunktionen beschreiben. Auf ein einfaches Lastprofil P_L reagiert das System mit einem exponentiellen Temperaturanstieg. Eine zeitlich andere Anregung als Lastprofil, beispielsweise eine Folge von Rechteckimpulsen, lässt sich leicht durch die Überlagerung zeitlich versetzter Lastprofile mit angepasster Last P_{Li} abbilden. Dabei kann P_{Li} auch negative Werte annehmen.

Im Fall des eindimensionalen Wärmepfads kann dies mit überschaubarem Aufwand z.B. in Tabellenkalkulationsprogrammen berechnet werden. Für die Berechnung komplizierterer, mehrdimensionaler RC-Netzwerke empfehlen sich grafikorientierte Programme. Der Anwender baut sich sein RC-Netzwerk am Bildschirm auf und definiert die Rand- und Anfangsbedingungen. Die Herausforderung ist dabei, die realen Wärmepfade im elektrischen System und deren Wechselwirkung im Modell richtig abzubilden. Die Validierung des Modells durch den Vergleich mit Messergebnissen ist Pflicht. Numerische Berechnungsmethoden sind gegenüber der Berechnung mit RC-Netzwerken genauer, allerdings auch langsamer. Die numerische Berechnung des Auf- und Abkühlens komplexer elektrischer Systemen kann auch heute noch mehrere Tage dauern. Dies schließt eine Überwachung elektrischer Systeme während des Betriebs in Echtzeit aus.

30

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, den Stand der Technik dahingehend zu verbessern, dass eine Überwachung und Prognose des thermischen Verhaltens elektrischer Systeme in Echtzeit möglich ist und die gewonnen Information beispielsweise zur Anpassung des Betriebs verwendet werden können. Die

Erfindung soll insbesondere bei elektrischen Systemen in der Luftfahrt zum Einsatz kommen.

Die Erfindung ergibt sich aus den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche. Vorteilhafte Weiterbildungen und Ausgestaltungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche. Weitere Merkmale, Anwendungsmöglichkeiten und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung.

Ein Aspekt der Erfindung besteht darin, den Stand der Technik um eine Rücktransformation der R- und C-Werte des Cauer-Netzwerks in ein weiteres Foster-Netzwerk zu erweitern.

Die Erfindung beansprucht ein computerimplementiertes Verfahren zur Bestimmung von thermischen Widerständen einer wärmeabgebenden Vorrichtung in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten. Das Verfahren beinhaltet die Schritte:

a) Ermittlung von das thermische Verhalten simulierenden ersten Foster-Netzwerken für mindestens drei unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten, b) Transformation der ermittelten ersten Foster-Netzwerke in Cauer-Netzwerke, c) Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizient-abhängigen Kurvenverläufe der thermischen Widerstände des Cauer-Netzwerks durch Kurvenanpassung (auch als Fitting bezeichnenbar) anhand der transformierten Cauer-Netzwerke und d) Ermittlung von Zielwerten der thermischen Widerstände aus den Kurvenverläufen durch Interpolationen für einen vorgebbaren Ziel-Wärmeübergangskoeffizienten.

Dies hat den Vorteil, dass die Bestimmung von thermischen Widerständen einer wärmeabgebenden Vorrichtung in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten mit sehr geringem Rechenaufwand und innerhalb kürzester Zeit ermöglicht wird. Dies macht eine Anwendung des Verfahrens in Echtzeit möglich.

Ein wesentlicher Aspekt besteht darin, dass nur noch einfache Interpolationen benötigt sind, um das thermische Verhalten für jede Art von Randbedingungen zu berechnen. Dies führt zu

extrem kurzen Rechenzeiten im Bereich eine tausendstel Sekunde. Dies wiederum ermöglicht Echtzeitberechnung, um die Temperatur an kritischen Stellen des Systems während dem Betrieb zuverlässig vorherzusagen.

5

Die Ermittlung des ersten Foster-Netzwerks kann auf Basis einer thermischen Simulation aber auch auf Basis experimenteller Messungen erfolgen.

10 Die drei unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten können drei unterschiedliche Entwärmungsbedingungen der wärmeabgebenden Vorrichtung in der Umgebung darstellen. Für jeden einzelnen Wärmeübergangskoeffizienten wird dabei ein erstes Foster-Netzwerk und anschließend ein Cauer-Netzwerk erstellt.

15

Die thermischen Widerstände der ersten Foster-Netzwerke haben dabei keine Beziehung zu den tatsächlich vorliegenden thermischen Widerständen der wärmeabgebenden Vorrichtung. Das erste Foster-Netzwerk ist somit physikalisch nicht korrekt. Deshalb
20 werden die ersten Foster-Netzwerke in Cauer-Netzwerke überführt.

25

Die Cauer-Netzwerke sind physikalisch korrekt und repräsentieren die tatsächlichen thermischen Widerstände der wärmeabgebenden Vorrichtung. Die Cauer-Netzwerke haben aber den
Nachteil einer komplexen Kalkulation, die lange Rechenzeiten in Anspruch nimmt. Deshalb werden die aus den Cauer-Netzwerken erhaltenen thermischen Widerstände verwendet um
Wärmeübergangskoeffizient-abhängigen Kurvenverläufe durch
30 Kurvenanpassung zu ermitteln. Diese Kurvenverläufe können zur Ermittlung von Zielwerten der thermischen Widerstände durch Interpolationen für einen vorgebbaren Ziel-Wärmeübergangskoeffizienten verwendet werden.

35

In einer weiteren Ausgestaltung kann das computerimplementiertes Verfahren zur Bestimmung des thermischen Verhaltens der wärmeabgebenden Vorrichtung ausgebildet sein und weitere Schritte beinhalten: a) ein Rückfitten der thermischen Wider-

stände ($R_{C,i}$) und zugehörigen thermischen Kapazitäten ($C_{C,i}$) der Cauer-Netzwerke in zweite Foster-Netzwerke, wobei die thermischen Widerstände und thermischen Kapazitäten der zweiten Foster-Netzwerke ($C_{F2,i-1}$, $R_{F2,i-1}$) gleich den thermischen Widerständen und thermischen Kapazitäten der Cauer-Netzwerke ($C_{C,i-1}$, $R_{C,i-1}$), ausgenommen die thermische Kapazität und der thermische Widerstand des für die Kühlung verantwortlichen Glieds, sind, wobei das für Kühlung verantwortliche Glied durch den Wärmeübergangskoeffizienten (h) bestimmt ist, b) eine Ermittlung der komplexen thermischen Widerstände in den zweiten Foster-Netzwerken und c) eine Ermittlung des zeitabhängigen Temperaturverlaufs an der den Wärmeübergangskoeffizienten bestimmenden Grenzfläche der wärmeabgebenden Vorrichtung durch Einbeziehung der ermittelten komplexen thermischen Widerstände.

Dies hat den Vorteil, dass das Verfahren bestehende Annäherungsverfahren und mathematische Methoden (Foster-Netzwerk und Cauer-Netzwerk) kombiniert und die Berechnung des thermischen Verhaltens für jede Art von Kühlbedingungen und Lastprofilen mit sehr geringem Rechenaufwand und innerhalb kürzester Zeit ermöglicht. Dies macht eine Anwendung des Verfahrens in Echtzeit möglich.

In einer weiteren Ausführung ist die wärmeabgebende Vorrichtung ein leistungselektronisches System.

Dies hat den Vorteil, dass die Berechnung des transienten thermischen Verhaltens von leistungselektronischen Systemen für verschiedene Kühlbedingungen und Verlustleistungen möglich ist, was nach dem Stand der Technik mit hohem Rechen und Zeitaufwand verbunden ist.

In einer weiteren Ausführung wird aus dem ermittelten Temperaturverlauf der Betrieb der wärmeabgebenden Vorrichtung angepasst.

Dies hat den Vorteil, dass der Betrieb auf den vorhandenen Temperaturverlauf der wärmeabgebenden Vorrichtung reagiert und so Ausfälle oder Störungen vermieden werden können.

- 5 Die Erfindung beansprucht außerdem ein Simulationssystem zur Bestimmung des thermischen Verhaltens der wärmeabgebenden Vorrichtung ausgebildet das erfindungsgemäße Verfahren durchzuführen.
- 10 Die Erfindung beansprucht außerdem ein Computerprogrammprodukt, umfassend ein Computerprogramm, wobei das Computerprogramm in eine Speichereinrichtung eines Simulationssystems ladbar ist, wobei mit dem Computerprogramm die Schritte eines erfindungsgemäßen Verfahrens ausgeführt werden, wenn das Com-
- 15 puterprogramm auf dem Simulationssystem ausgeführt wird.

Die Erfindung beansprucht außerdem ein computerlesbares Medium, auf welchem ein Computerprogramm gespeichert ist, wobei das Computerprogramm in eine Speichereinrichtung eines Simulationssystems ladbar ist, wobei mit dem Computerprogramm die

20 Schritte eines erfindungsgemäßen Verfahrens ausgeführt werden, wenn das Computerprogramm auf dem Simulationssystem ausgeführt wird.

- 25 Die Erfindung beansprucht außerdem ein Luftfahrzeug mit einem erfindungsgemäßen Simulationssystem und einer wärmeabgebenden Vorrichtung.

Dies hat den Vorteil, dass im Luftfahrzeug in Echtzeit auf

30 kritische Temperaturänderungen der wärmeabgebenden Vorrichtung reagiert werden kann.

Unter Luftfahrzeug wird jede Art von fliegendem Fortbewegungs- oder Transportmittel, sei es bemannt oder unbemannt,

35 verstanden.

In einer weiteren Ausführung ist weißt das erfindungsgemäße Luftfahrzeug einem elektrischen oder hybrid-elektrischen Flugantrieb auf.

- 5 In einer weiteren Ausführung ist das erfindungsgemäße Luftfahrzeug ein Flugzeug.

Die Erfindung hat den weiteren Vorteil, dass das Verfahren und das Simulationssystem auf eine Vielzahl weiterer technischer Systeme übertragen werden kann.

10

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

- 15 Die Besonderheiten und Vorteile der Erfindung werden aus den nachfolgenden Erläuterungen mehrerer Ausführungsbeispiele anhand von schematischen Zeichnungen ersichtlich.

Es zeigen

20

Fig. 1 einen Schnitt durch ein elektrisches Bauteil,

Fig. 2 ein Foster-Netzwerk,

- 25 Fig. 3 ein Cauer-Netzwerk,

Fig. 4 Wärmeübergangskoeffizient-abhängigen Kurvenverläufe der thermischen Widerstände,

- 30 Fig. 5 eine Ansicht eines Flugzeugs.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

- Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer wärmeabgebenden Vorrichtung 1 mit einer ersten Schicht 2, einer zweiten Schicht 3, einer dritten Schicht 4 und einer vierten Schicht 5. Auf entgegengesetzter Seite des Wärmeeintrags
- 35

durch ein Lastprofil P_L kann ein Wärmeübergangskoeffizienten h in der Einheit $[W/m^2K]$ ermittelt werden.

Fig. 2 zeigt ein erstes Foster-Netzwerk mit i thermischen Widerständen des ersten Foster-Netzwerks $R_{F1,i}$, i thermischen Kapazitäten des ersten Foster-Netzwerks $C_{F1,i}$, einer möglichen Verbindung 6 zu anderen Komponenten und einer Erdung oder Anbindung an die Umgebung 7.

Der zeitabhängige komplexe thermische Widerstand $Z(t)$ einer wärmeabgebenden Vorrichtung in Abhängigkeit der Zeit t aus der eingebrachten zeitabhängigen Wärmeleistung $P_L(t)$ wie folgt:

$$Z(t) = \frac{T(t)}{P_L(t)} \quad (1)$$

Der komplexe thermische Widerstand $Z(t)$ in Abhängigkeit der Zeit t ergibt sich auch aus dem Foster-Netzwerk wie folgt, wobei R_i der thermische Widerstand und C_i die thermische Kapazität sind:

$$Z(t) = \sum_{i=1}^n R_i \left(1 - e^{\frac{-t}{R_i C_i}} \right) \quad (2)$$

Die thermischen Widerstände der ersten Foster-Netzwerke $R_{F1,i}$ haben dabei keine Beziehung zu den tatsächlich vorliegenden thermischen Widerständen R der wärmeabgebenden Vorrichtung 1. Das erste Foster-Netzwerk ist somit physikalisch nicht korrekt. Deshalb werden die ersten Foster-Netzwerke in Cauer-Netzwerke überführt.

Fig. 3 zeigt ein Cauer-Netzwerk mit i thermischen Widerständen des Cauer-Netzwerks $R_{C,i}$, i thermischen Kapazitäten des Cauer-Netzwerks $C_{C,i}$, einer möglichen Verbindung 6 zu anderen Komponenten und einer Erdung oder Anbindung an die Umgebung 7.

Die Cauer-Netzwerke sind physikalisch korrekt und repräsentieren die tatsächlichen thermischen Widerstände R der wärmeabgebenden Vorrichtung 1. Die Cauer-Netzwerke haben aber den
 5 Nachteil einer komplexen Kalkulation, die lange Rechenzeiten in Anspruch nimmt.

Deshalb werden die aus den Cauer-Netzwerken erhaltenen thermischen Widerstände $R_{C,i}$ bis $R_{C,i-1}$ (wobei die thermischen Widerstände und thermischen Kapazitäten der zweiten Foster-
 10 Netzwerke ($C_{F2,i-1}$, $R_{F2,i-1}$) gleich den thermischen Widerständen und thermischen Kapazitäten der Cauer-Netzwerke ($C_{C,i-1}$, $R_{C,i-1}$), ausgenommen die thermische Kapazität und der thermische Widerstand des für die Kühlung verantwortlichen Glieds, sind)
 15 verwendet, um die in Fig. 4 gezeigten Wärmeübergangskoeffizient-abhängigen Kurvenverläufe 8 durch Kurvenanpassung zu ermitteln. Diese Kurvenverläufe 8 können zur Ermittlung von Zielwerten der thermischen Widerstände R_z durch Interpolationen für einen vorgebbaren Ziel-Wärmeübergangskoeffizienten h_z
 20 verwendet werden.

Im Beispiel in Fig. 4 sind pro Kurvenverlauf 8 drei Stützpunkte, die zur Ermittlung des Kurvenverlaufs verwendet wurden, eingezeichnet. Für jeden beliebigen Ziel-
 25 Wärmeübergangskoeffizienten h_z kann mit den Kurvenverläufen der Zielwert des thermischen Widerstandes R_z durch Interpolation ermittelt werden.

Die Temperatur $T(t)$ an einer Grenzschicht in Abhängigkeit der
 30 Zeit t ergibt sich wie folgt:

$$T(t) = T_0 + \int_0^t P_L(\varphi) dZ(t - \varphi) d\varphi \quad (3)$$

Wobei φ die Integrationsvariable ist und für Z in Gleichung
 35 (3) Gleichung (2) verwendet werden kann.

Fig. 5 zeigt eine Ansicht eines elektrischen oder hybrid-
elektrischen Flugzeugs, als Beispiel eines Luftfahrzeugs 10,
mit einem Leistungselektronisches System 9 und einer elektri-
5 schen Maschine oder einem Motor 12. Der Motor 12 versetzt ei-
nen Propeller 11 in Rotation.

Obwohl die Erfindung im Detail durch die Ausführungsbeispiele
näher illustriert und beschrieben wurde, ist die Erfindung
10 durch die offenbarten Beispiele nicht eingeschränkt und ande-
re Variationen können vom Fachmann daraus abgeleitet werden,
ohne den Schutzzumfang der Erfindung zu verlassen.

Patentansprüche

1. Computerimplementiertes Verfahren zur Bestimmung von thermischen Widerständen einer wärmeabgebenden Vorrichtung (1)
5 in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten $[W/m^2K]$ (h) mit den Schritten:
 - a) eine Ermittlung von das thermische Verhalten simulierenden erste Foster-Netzwerken für mindestens drei unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten (h),
 - 10 b) eine Transformation der ermittelten ersten Foster-Netzwerke in Cauer-Netzwerke,
 - c) eine Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizient-abhängigen Kurvenverläufe (8) der thermischen Widerstände des Cauer-Netzwerks ($R_{C,i}$) durch Kurvenanpassung anhand der transformierten Cauer-Netzwerke und
 - 15 d) für einen vorgebbaren Ziel-Wärmeübergangskoeffizienten (h_z) eine Ermittlung von Zielwerten der thermischen Widerstände (R_z) aus den Kurvenverläufen durch Interpolationen.
- 20 2. Computerimplementiertes Verfahren nach Anspruch 1 zur Bestimmung des thermischen Verhaltens der wärmeabgebenden Vorrichtung (1) mit den weiteren Schritten:
 - a) ein Rückfitten der thermischen Widerstände ($R_{C,i}$) und zugehörigen thermischen Kapazitäten ($C_{C,i}$) der Cauer-Netzwerke
25 in zweite Foster-Netzwerke, wobei die thermischen Widerstände und thermischen Kapazitäten der zweiten Foster-Netzwerke ($C_{F2,i-1}$, $R_{F2,i-1}$) gleich den thermischen Widerständen und thermischen Kapazitäten der Cauer-Netzwerke ($C_{C,i-1}$, $R_{C,i-1}$), ausgenommen die thermische Kapazität und der
30 thermische Widerstand des für die Kühlung verantwortlichen Glieds, sind, wobei das für Kühlung verantwortliche Glied durch den Wärmeübergangskoeffizienten (h) bestimmt ist,
 - b) eine Ermittlung der komplexen thermischen Widerstände in den zweiten Foster-Netzwerken und
 - 35 c) eine Ermittlung des zeitabhängigen Temperaturverlaufs an der den Wärmeübergangskoeffizienten (h) bestimmenden Grenzfläche der wärmeabgebenden Vorrichtung (1) durch Ein-

beziehung der ermittelten komplexen thermischen Widerstände.

3. Computerimplementiertes Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche,
5 **dadurch gekennzeichnet,**
 dass die wärmeabgebende Vorrichtung ein leistungselektronisches System (9) ist.
- 10 4. Computerimplementiertes Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,**
 dass aus dem ermittelten Temperaturverlauf der Betrieb der wärmeabgebenden Vorrichtung (1) angepasst wird.
- 15 5. Simulationssystem zur Bestimmung des thermischen Verhaltens der wärmeabgebenden Vorrichtung (1) ausgebildet das Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4 durchzuführen.
- 20 6. Computerprogrammprodukt, umfassend ein Computerprogramm, wobei das Computerprogramm in eine Speichereinrichtung eines Simulationssystems ladbar ist, wobei mit dem Computerprogramm die Schritte eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 4 ausgeführt werden, wenn das Computerprogramm auf dem Simulationssystem ausgeführt wird.
25
- 30 7. Computerlesbares Medium, auf welchem ein Computerprogramm gespeichert ist, wobei das Computerprogramm in eine Speichereinrichtung eines Simulationssystems ladbar ist, wobei mit dem Computerprogramm die Schritte eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 4 ausgeführt werden, wenn das Computerprogramm auf dem Simulationssystem ausgeführt wird.
- 35 8. Luftfahrzeug (10) mit einem Simulationssystem nach Anspruch 5 und einer wärmeabgebenden Vorrichtung (1).
9. Luftfahrzeug (10) nach Anspruch 8 mit einem elektrischen oder hybrid-elektrischen Flugantrieb.

10. Luftfahrzeug (10) nach Anspruch 8 oder 9,
dadurch gekennzeichnet, dass das Luftfahrzeug (10) ein
Flugzeug ist.

FIG 1

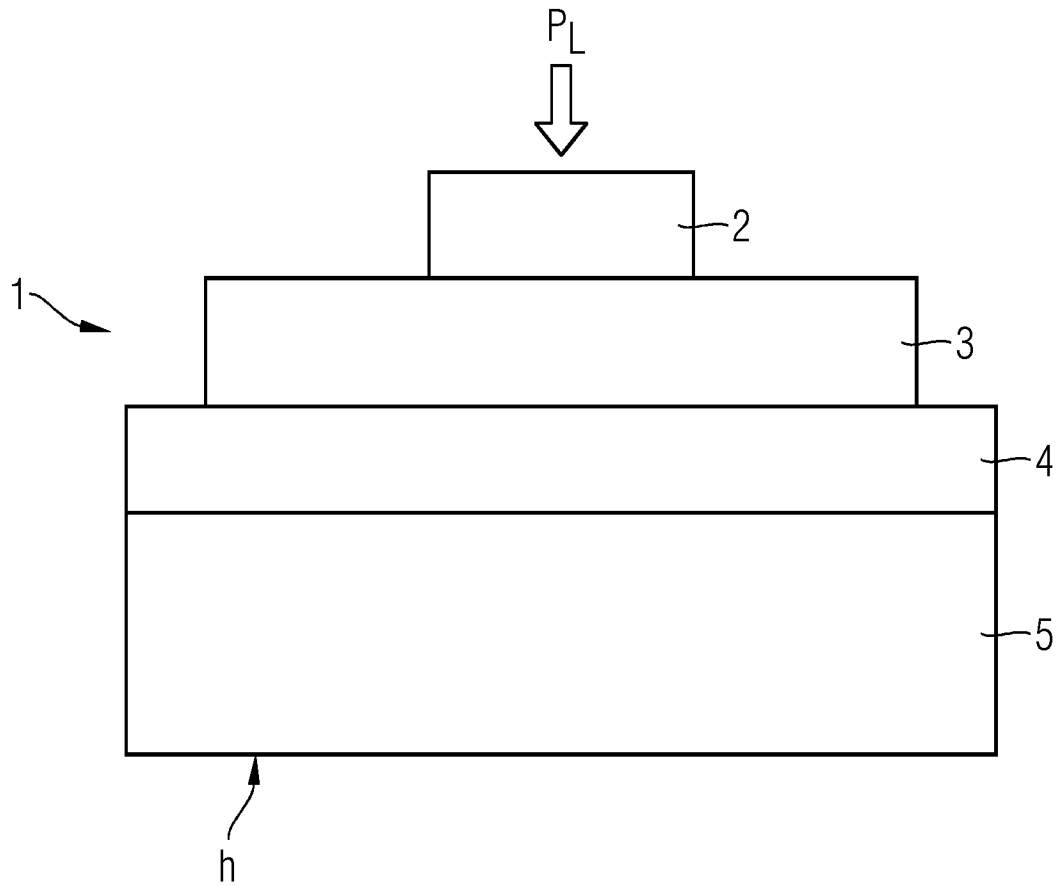


FIG 2

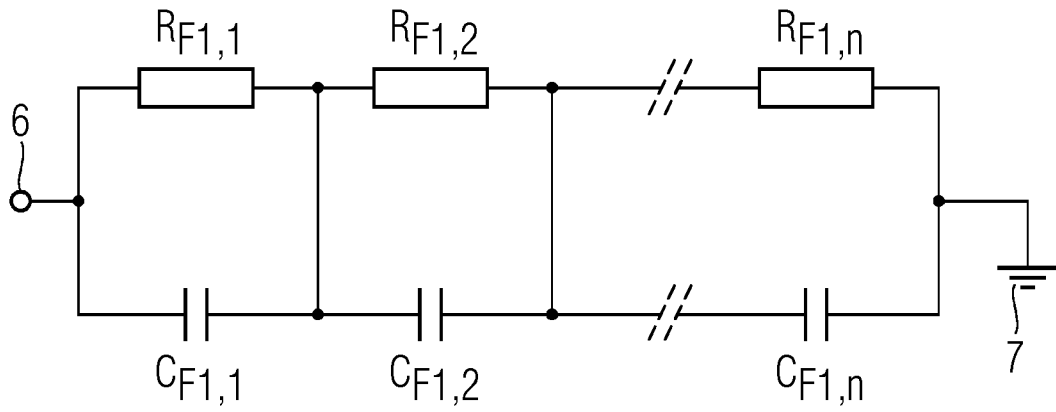


FIG 3

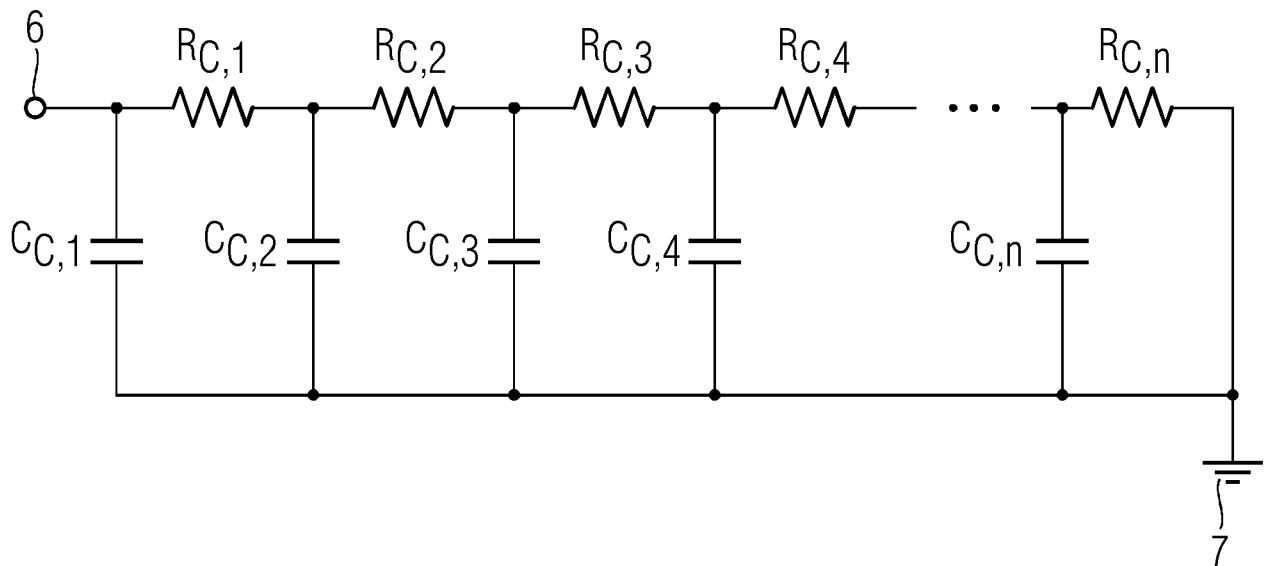


FIG 4

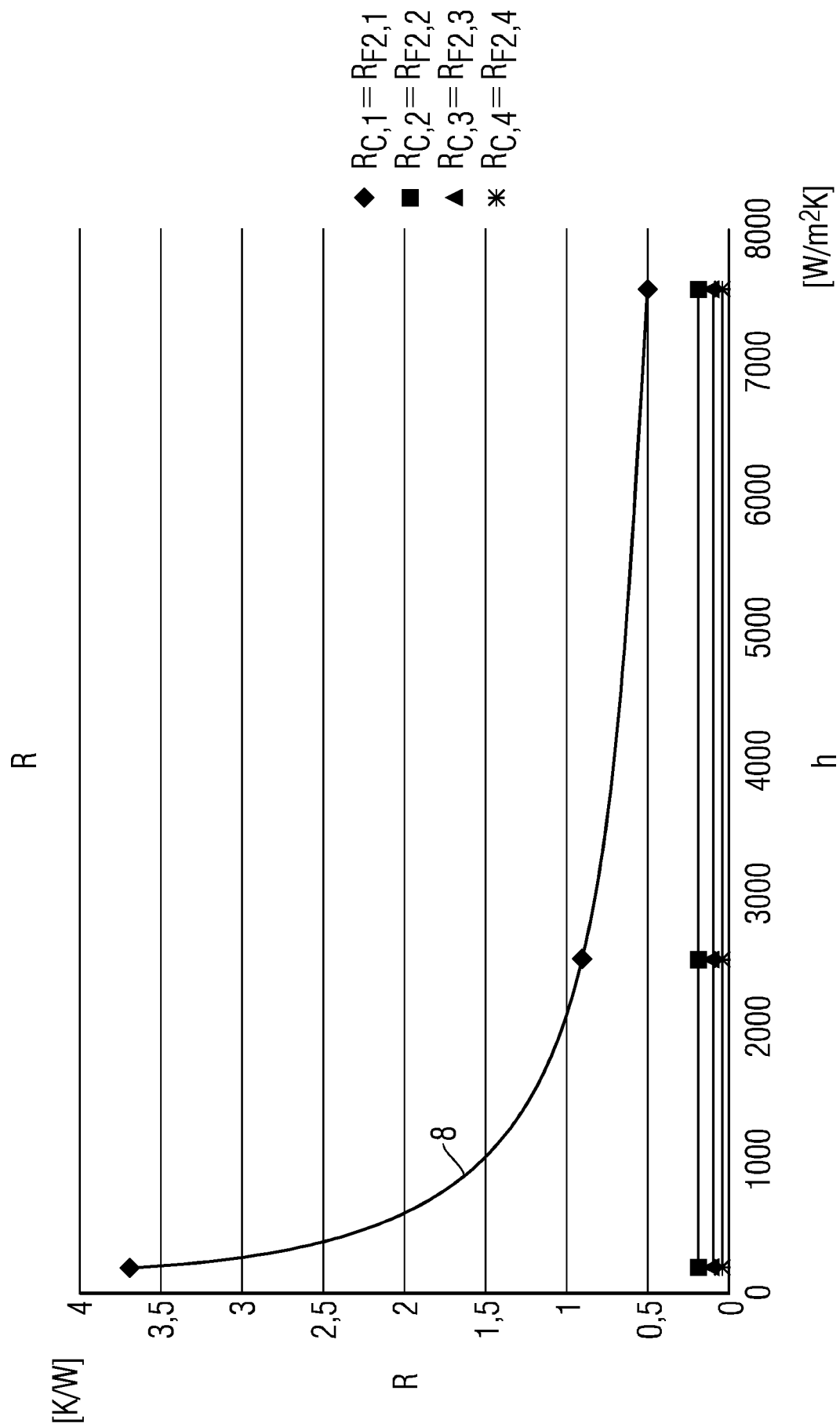
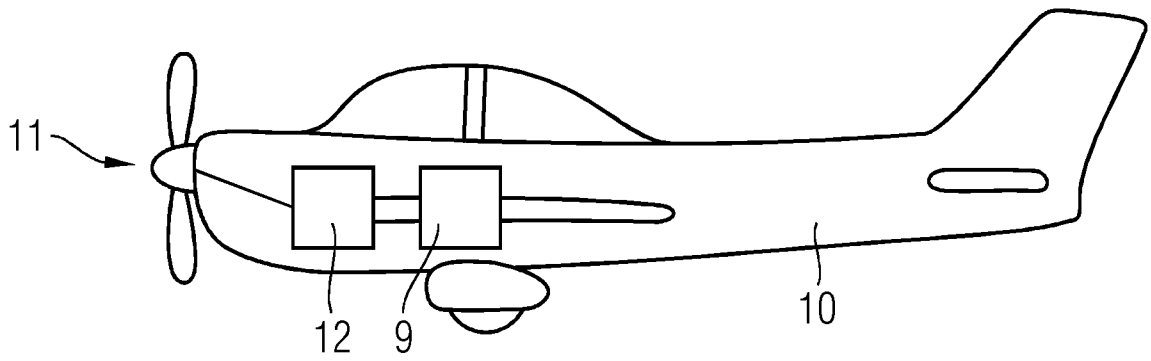


FIG 5



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2019/084829

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**G06F 30/20**(2020.01)i; **G06F 119/08**(2020.01)n

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	SHWETA NATARAJAN ET AL. "Measuring the Thermal Resistance in Light Emitting Diodes Using a Transient Thermal Analysis Technique" <i>IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, IEEE SERVICE CENTER, PISACATAWAY, NJ, US</i> , Vol. 60, No. 8, 01 August 2013 (2013-08-01), pages 2548-2555 DOI: 10.1109/TED.2013.2271485 ISSN: 0018-9383, XP011520753 abstract page 2548, column 2, last paragraph - page 2550, column 2, paragraph 1 figures 1-4 page 2550, column 2, paragraph 5	1-10
A	PAOLO EMILIO BAGNOLI ET AL. "Thermal Resistance Analysis by Induced Transient (TRAIT) Method for Power Electronic Devices Thermal Characterization-Part I: Fundamentals and Theory" <i>IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, USA</i> , Vol. 13, No. 6, 01 November 1998 (1998-11-01), ISSN: 0885-8993, XP011043229 abstract page 1211, column 1, paragraph 3 - page 1213, column 1, paragraph 1 figure 2	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

19 March 2020

Date of mailing of the international search report

06 April 2020

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Sohrt, Wolfgang

Telephone No.

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. G06F30/20

ADD. G06F119/08

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

G06F

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	SHWETA NATARAJAN ET AL: "Measuring the Thermal Resistance in Light Emitting Diodes Using a Transient Thermal Analysis Technique", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, IEEE SERVICE CENTER, PISACATAWAY, NJ, US, Bd. 60, Nr. 8, 1. August 2013 (2013-08-01), Seiten 2548-2555, XP011520753, ISSN: 0018-9383, DOI: 10.1109/TED.2013.2271485 Zusammenfassung Seite 2548, Spalte 2, letzter Absatz - Seite 2550, Spalte 2, Absatz 1 Abbildungen 1-4 Seite 2550, Spalte 2, Absatz 5 ----- -/-	1-10



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

19. März 2020

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

06/04/2020

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Sohrt, Wolfgang

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	PAOLO EMILIO BAGNOLI ET AL: "Thermal Resistance Analysis by Induced Transient (TRAIT) Method for Power Electronic Devices Thermal Characterization-Part I: Fundamentals and Theory", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, USA, Bd. 13, Nr. 6, 1. November 1998 (1998-11-01), XP011043229, ISSN: 0885-8993 Zusammenfassung Seite 1211, Spalte 1, Absatz 3 - Seite 1213, Spalte 1, Absatz 1 Abbildung 2 -----	1-10