(19)日本国特許庁(JP)　(12)公表特許公報(A)　(11)公表番号
特表2024-536401
(P2024-536401A)
(43)公表日　令和6年10月4日(2024.10.4)

(51)国際特許分類		FI			テーマコード（参考）
Ｇ０１Ｎ　25/18　(2006.01)		Ｇ０１Ｎ	25/18	Ｄ	２Ｆ０５６
Ｇ０１Ｋ　7/02　(2021.01)		Ｇ０１Ｋ	7/02	Ｚ	２Ｇ０４０
Ｇ０１Ｋ　17/20　(2006.01)		Ｇ０１Ｋ	17/20		

審査請求　未請求　予備審査請求　未請求　（全18頁）

(21)出願番号　特願2024-520982(P2024-520982)
(86)(22)出願日　令和4年10月7日(2022.10.7)
(85)翻訳文提出日　令和6年5月28日(2024.5.28)
(86)国際出願番号　PCT/EP2022/077935
(87)国際公開番号　WO2023/057625
(87)国際公開日　令和5年4月13日(2023.4.13)
(31)優先権主張番号　102021211392.3
(32)優先日　令和3年10月8日(2021.10.8)
(33)優先権主張国・地域又は機関
ドイツ(DE)
(81)指定国・地域　AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC,
最終頁に続く

(71)出願人　504174917
フラウンホッファー－ゲゼルシャフト・ツァー・フォデラング・デル・アンゲワンテン・フォーシュング・エー．ファウ
．
ドイツ連邦共和国 ミュンヘン ８０６３６ ハンザシュトラーセ ２７ｃ
(74)代理人　240000327
弁護士　弁護士法人クレオ国際法律特許事務所
(72)発明者　マイヤー エアハルト
ドイツ連邦共和国 ８３６０７ ホルツキルヒェン キーム－パウリ－シュトラーセ １０アー
(72)発明者　フィッセル ミヒャエル
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　対流熱伝達率と境界層の厚さの検出方法

(57)【要約】
本開示は、周囲で流れが発生する本体（６）の表面（６５）の上方の境界層の厚さを決定するための境界層センサー（１）に関する。前記センサーは、第１の温度測定装置（３１）、第２の温度測定装置（３２）、および第３の温度測定装置（３３）を有し、それぞれが、周囲で流れが生じる本体（６）の表面（６５）から所定の距離（Ｘ１、Ｘ２、Ｘ３）を隔てて配置されており、少なくとも第２の温度測定装置（３２）および第３の温度測定装置（３３）は、少なくとも１本のワイヤ（２１、２２、２３、２４）を含むか、または少なくとも１本のワイヤ（２１、２２、２３、２４）からなり、ワイヤ（２１、２２、２３、２４）は、表面（６５）から表面に隣接する半空間内に延在し、直径が約３００μm以下である。本開示はまた、このような境界層センサーを有する風力タービン、車両、航空機、室内環境測定装置、または船舶、ならびに境界層の厚さの検出方法に関する。

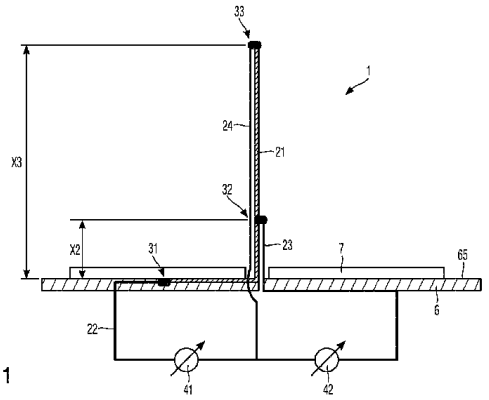


Fig. 1

【特許請求の範囲】
【請求項１】
周囲で流れが発生しかつ／または加熱される本体（６）の表面（６５）上の対流熱伝達率ｈ$_C$の検出方法であって、第１の温度（Ｔ$_O$）、第２の温度（Ｔ$_X$）および第３の温度（Ｔ$_L$）がそれぞれ、前記周囲で流れが発生する本体（６）の前記表面（６５）から所定の距離（Ｘ１、Ｘ２、Ｘ３）を隔てて測定され、少なくとも第１の温度測定装置（３１）と第２の温度測定装置（３２）と第３の温度測定装置（３３）とが、前記温度（Ｔ$_O$、Ｔ$_X$、Ｔ$_L$）を測定するために使用される方法において、
前記対流熱伝達率ｈ$_C$は、前記温度（Ｔ$_O$、Ｔ$_X$、Ｔ$_L$）、前記表面（６５）上の温度を測定するための前記第２の装置（３２）の前記距離Ｘ２および熱伝導率λ$_M$から下式のように決定される、
ことを特徴とする対流熱伝達率ｈ$_C$の検出方法。
【数１】

$$h_c = \frac{\lambda_M \cdot [(T_O - T_L) - (T_x - T_L)]}{X2 \cdot (T_x - T_L)}$$

【請求項２】
周囲で流れが発生しかつ／または加熱される本体（６）の表面（６５）の上方の境界層の厚さｄの検出方法であって、第１の温度（Ｔ$_O$）、第２の温度（Ｔ$_X$）および第３の温度（Ｔ$_L$）がそれぞれ、前記周囲で流れが発生する本体（６）の前記表面（６５）から所定の距離（Ｘ１、Ｘ２、Ｘ３）を隔てて測定され、少なくとも第１の温度測定装置（３１）と第２の温度測定装置（３２）と第３の温度測定装置（３３）とが、前記温度（Ｔ$_O$、Ｔ$_X$、Ｔ$_L$）を測定するために使用される方法において、
前記境界層の厚さｄは、前記温度（Ｔ$_O$、Ｔ$_X$、Ｔ$_L$）および前記表面（６５）上の温度を測定するための前記第２の装置（３２）の前記距離Ｘ２から、下式のように決定され、
【数２】

$$d = \frac{\lambda_L \cdot X2 \cdot (T_x - T_L)}{\lambda_M \cdot [(T_O - T_L) - (T_x - T_L)]}$$

ここで、λ$_L$は前記表面（６５）の周囲の流動媒体の熱伝導率を示し、λ$_M$は前記温度測定装置（３１、３２、３３）の熱伝導率を示す、
ことを特徴とする境界層の厚さｄの検出方法。
【請求項３】
前記表面（６５）から前記第２の温度（Ｔ$_X$）の測定位置までの距離である前記距離Ｘ２が、１ｍｍ～３ｍｍまたは２ｍｍである、
ことを特徴とする請求項１または２に記載の方法。
【請求項４】
前記第１の温度（Ｔ$_O$）が前記表面（６５）の温度に対応するように、前記距離Ｘ１が０ｍｍである、
ことを特徴とする請求項１～３のいずれか一項に記載の方法。
【請求項５】
前記距離Ｘ３が、前記第３の温度（Ｔ$_L$）が前記周囲で流れが発生する本体（６）の周囲の温度に対応するように、大きい距離である、
ことを特徴とする請求項１～４のいずれか一項に記載の方法。
【請求項６】

前記距離Ｘ３が９ｍｍ～２０ｍｍの間で選択される、
ことを特徴とする請求項１～５のいずれか一項に記載の方法。
【請求項７】
前記距離Ｘ３が１０ｍｍ～１４ｍｍの間で選択される、
ことを特徴とする請求項１～５のいずれか一項に記載の方法。
【請求項８】
前記距離Ｘ３が１１ｍｍ～１６ｍｍの間で選択される、
ことを特徴とする請求項１～５のいずれか一項に記載の方法。
【請求項９】
前記第１の温度測定装置（３１）、前記第２の温度測定装置（３２）および前記第３の温度測定装置（３３）が熱電対によって形成され、第１の熱起電力（ｔｈｅｒｍｏｅｌｅｃｔｒｉｃ　ｖｏｌｔａｇｅ）U_1が前記第１の温度測定装置（３１）と前記第３の温度測定装置（３３）との間で測定され、第２の熱起電力U_2が前記第２の温度測定装置（３２）と前記第３の温度測定装置（３３）との間で測定される、
ことを特徴とする請求項１～８のいずれか一項に記載の方法。
【請求項１０】
以下のパラメータΛが校正測定によって決定される、
ことを特徴とする請求項１～９のいずれか一項に記載の方法。
【数３】

$$\Lambda = \frac{\lambda_M}{X2}$$

【請求項１１】
前記校正測定がレーザー微分干渉法によって実施される、
ことを特徴とする請求項１０に記載の方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本開示は、周囲で流れが発生しかつ／または加熱される本体の表面上の対流熱伝達率の検出方法に関する。この方法においては、流れが発生する本体の表面から所定の距離を隔てて、第１の温度、第２の温度および第３の温度がそれぞれ測定され、少なくとも、第１の温度測定装置と第２の温度測定装置と第３の温度測定装置とが、温度測定のために使用される。本開示はまた、周囲で流れが発生しかつ／または加熱される本体の表面上の境界層の厚さの検出方法であって、周囲で流れが発生する本体の表面から所定の距離を隔てて、３つの温度をそれぞれ測定する方法に関する。
【背景技術】
【０００２】
加熱面の対流熱伝達率を決定する装置は、独国特許出願公開第１０　２０１６　１０７２１２号明細書から知られている。この公知の装置は、対流面の表面温度と周囲温度との間の温度差、および境界層内の対流面近傍の温度と周囲温度との間のさらなる温度差を測定する。このよく知られたセンサーは、境界層内の温度プロファイルが、対流熱伝達率を定数とする指数曲線を含むという洞察に基づいている。したがって、３つの支持点を決定することにより、指数曲線を決定し、そこから対流熱伝達率を決定することができる。この公知の装置は、以下においてＣＨＭセンサーと呼ぶこともある。
【０００３】
あるいは、対流面上の気温の指数関数的な降下は、レーザー微分干渉計（ｌａｓｅｒ　ｄｉｆｆｅｒｅｎｔｉａｌ　ｉｎｔｅｒｆｅｒｏｍｅｔｅｒ）を用いて光学的に測定することもできる。この種の測定セットアップを用いれば、温度プロファイルを正確に検出す

ることができ、したがって対流熱伝達率h_Cの正確な検出が可能となる。しかし、技術的設備の量が非常に多いので、この種の測定は日常的な測定には適さない。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００４】

レーザー微分干渉法によって光学的に決定される対流熱伝達率の測定値は、独国特許出願公開第１０　２０１６　１０７　２１２号明細書により公知である、境界層における熱電対の設計を用いて測定された値とは異なることが示されている。したがって、先行技術に基づき、本開示の目的は、公知の光学的測定よりも必要な技術的設備が少ないにもかかわらず、同様に正確な測定結果を提供する、対流熱伝達率の検出方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【０００５】

本開示によれば、この目的は、請求項１に記載の方法および請求項２に記載の方法によって達成される。

【０００６】

本開示によれば、対流熱伝達率h_Cを検出するために、周囲で流れが発生しかつ／または加熱される本体の表面上の少なくとも３つの温度を測定することが提案される。温度を測定するために、少なくとも第１の温度測定装置、第２の温度測定装置、および第３の温度測定装置を用いることができ、これらはそれぞれ、周囲で流れが発生する本体の表面から所定の距離に、そしてそれぞれの場合において異なる距離を隔てて配置される。本開示のいくつかの実施形態において、少なくとも３つの温度測定装置は、抵抗温度計および／または熱電対であることができる。本明細書では、周囲で流れが発生する本体の表面からの距離は、それぞれの温度測定装置と表面との間の法線ベクトルの長さとして定義される。

【０００７】

本開示のいくつかの実施形態では、第１の温度測定装置は、周囲で流れが発生しかつ／または加熱される本体の表面上に直接配置され、第３の温度測定装置は、それが周囲温度を構成するように、表面からより長い距離を隔てて配置される。第２の温度測定装置は、境界層内に、例えば約１ｍｍから約３ｍｍの間の距離を隔てて配置される。

【０００８】

本開示によって、温度測定装置のリード線および／または機械的固定装置を介して流出する熱が、測定値の錯誤につながることが判明した。従来技術では、この熱の流れはこれまで考慮されていなかったため、対流熱伝達率h_Cは、流動媒体の熱伝導率λ_L、第２の温度測定装置の距離Ｘ２、および３つの測定温度T_O、T_X、T_Lから、境界層内の温度の乱れのない指数曲線を仮定した以下の式から決定されていた。

【数１】

$$h_C = \frac{\lambda_L \cdot [ln(T_O - T_L) - ln\,(T_x - T_L)]}{X2}$$

【０００９】

しかし、本開示によれば、温度測定装置の個々の構成要素を介した熱伝導のために、点Ｘ２における温度T_Xは、乱れのない指数関数的な温度曲線から逸脱した異なる値をとることがわかった。したがって、本開示によれば、対流熱伝達率h_Cは、測定された温度、第２の温度測定装置の距離Ｘ２、および本開示に従って使用される装置の熱伝導率λ_Mから、以下の式のように正しく決定されるべきであることが知見された。

【数２】

$$h_C = \frac{\lambda_M \cdot [(T_O - T_L) - (T_x - T_L)]}{X2 \cdot (T_x - T_L)}$$

【００１０】
このようにして測定された対流熱伝達率ｈ$_C$は、レーザー微分干渉計によって測定された値に実質的に対応し、対流熱伝達率ｈ$_C$は、本開示によれば、かなり少ない技術設備によって得ることができる。このように、本開示によれば、対流熱伝達率を検出するために、３つの温度測定装置のみを含む公知の装置を使用し、検出された測定値の修正された評価によって精度の著しい改善を達成することが提案される。
【００１１】
同様に、本開示のいくつかの実施形態では、周囲で流れが発生しかつ／または加熱される本体の表面の上方の境界層の厚さｄを決定することも可能である。ここでの境界層の厚さｄは、周囲で流れが発生する表面の上方で、表面と環境との間の最大温度差がｅ$^{-1}$、すなわち約３６．７８８％まで低下したときの距離Ｘ＝ｄを示す（ｅはオイラー数を示す）。対流熱伝達率ｈ$_C$は、流動媒体の熱伝導率λ$_L$と境界層の厚さｄからｈ$_C$＝λ$_L$・ｄ$^{-1}$のように計算できるため、境界層の厚さｄは、測定温度Ｔ$_O$、Ｔ$_X$およびＴ$_L$、表面上の温度を測定するための第２の装置の距離Ｘ２、および流動媒体の熱伝導率λ$_L$とセンサー配列の熱伝導率λ$_M$から次の式のように求められる。
【数３】

$$d = \frac{\lambda_L \cdot X2 \cdot (T_x - T_L)}{\lambda_M \cdot [(T_O - T_L) - (T_x - T_L)]}$$

【００１２】
本開示のいくつかの実施形態において、第３の温度Ｔ$_L$が測定される距離Ｘ３は、約９ｍｍ～約２０ｍｍであり得る。本開示の他の実施形態では、距離Ｘ３は、約１０ｍｍ～約１４ｍｍであり得る。本開示のさらに他の実施形態では、距離Ｘ３は、約１１ｍｍ～約１６ｍｍとなるように選択することができる。これにより、第３の温度測定装置を使用して、表面温度にほとんど影響されない周囲温度を確実に測定することができる。
【００１３】
本開示のいくつかの実施形態では、第１の温度測定装置、第２の温度測定装置、および第３の温度測定装置は、それぞれ熱電対によって形成することができ、第１の熱起電力（ｔｈｅｒｍｏｅｌｅｃｔｒｉｃ　ｖｏｌｔａｇｅ）Ｕ$_1$は、第１の温度測定装置と第３の温度測定装置との間で測定され、第２の熱起電力Ｕ$_2$は、第２の温度測定装置と第３の温度測定装置との間で測定される。本開示によれば、境界層の厚さｄまたは対流熱伝達率ｈ$_C$を測定するために、第１および第３の温度測定装置、または第２および第３の温度測定装置の温度差のみを相関させることが提案されているので、これらの温度差は、測定された熱起電力によって直接表すことができる。これにより、対流熱伝達率を表す電気信号を、アナログ演算回路などの技術設備をほとんど使用せずに直接生成できるため、測定値の評価が容易になる。この種のアナログ演算回路は、例えばオペアンプによって実現できる。
【００１４】

本開示のいくつかの実施形態では、パラメータ$\Lambda = \frac{\lambda_M}{X2}$は、校正測定によって決定することができる。校正測定は、第２の温度測定装置によって測定された温度T_Xが、センサーのリード線や任意選択の機械的固定装置および流動媒体の両方によって影響を受けるという事実を考慮に入れている。この影響は、熱流のコンピュータシミュレーションによって数学的に決定することもできるし、特に簡単な方法では、各センサーまたは各センサータイプの校正測定によって決定することもできる。

【００１５】

本開示のいくつかの実施形態では、校正測定はレーザー微分干渉法を用いて実施することができる。レーザー微分干渉法は非接触での測定値を提供するため、乱れのない境界層の実際の温度T_Xを測定するために使用することができる。このようにして得られた測定値を、第２の温度測定装置の測定値と比較することにより、本開示によるセンサーを簡単な方法で校正することができる。

【図面の簡単な説明】

【００１６】

【図１】公知のＣＨＭセンサーの概略図である。

【図２】熱流を説明するためのＣＨＭセンサーの等価回路図である。

【図３】本開示による測定信号の評価と公知の測定信号の評価による対流熱伝達率対流速の比較を示す。

【図４】本開示による測定値と従来技術による測定値を評価した場合における、異なる対流熱伝達率の表面から第２の温度測定装置までの距離Ｘ２に対する第２の温度測定装置の測定値を示す。

【図５】異なる校正値（λ）に対する一定の熱伝達率における第２の温度測定装置の測定値を示す。

【発明を実施するための形態】

【００１７】

以下、図面および例示的な実施形態に基づいて本開示をより詳細に説明する。

【００１８】

図１は、表面６５を有する、周囲で流れが発生する本体６の断面図を示す。本体６は、例えば、車両または航空機または船舶の一部とすることができる。本開示の他の実施形態では、本体６は風力タービンの一部とすることができる。本開示のさらに他の実施形態では、本体６は、対流熱伝達率および／または環境との輻射熱の交換を測定する室内環境測定装置の一部とすることができる。境界層センサー１の動作中、強制流または対流が本体６の周囲を流れ、表面６５に隣接する本体６の半空間に流れが形成される。この流れは、本体６または表面６５に対して少なくとも部分的に平行に流れることができる。本開示によれば、境界層センサーまたはＣＨＭセンサー１は、境界層の厚さおよび／または表面６５の上方の対流熱伝達率h_Cを検出するために使用される。

【００１９】

境界層センサー１は、３つの温度または２つの温度差を検出するように設計されている。この目的のために、境界層センサーは、表面６５から第１の距離Ｘ１を隔てて配置された第１の温度測定装置３１を有する。図示された例示的な実施形態では、第１の温度測定装置３１は表面６５上に直接配置されている。したがって、距離Ｘ１は０ｍｍである。

【００２０】

さらに、境界層センサー１は、表面６５の上方の距離Ｘ２の位置に配置された第２の温度測定装置３２を有する。この距離Ｘ２は、例えば、１ｍｍから約３ｍｍの間とすることができる。距離Ｘ２は、第２の温度測定装置３２が表面６５の上方に形成される境界層内に位置するように選択される。

【００２１】

最後に、境界層センサー１は、表面６５の上方に距離Ｘ３を隔てて配置される第３の温

度測定装置３３を有する。この距離Ｘ３は、例えば、約９ｍｍと約２０ｍｍとの間、または約１０ｍｍと約１４ｍｍとの間、または約１１ｍｍと約１６ｍｍとの間とすることができる。距離Ｘ３は、第３の温度測定装置が、境界層の外側で表面６５の上方を流れる媒体の周囲温度を測定するように選択される。したがって、表面６５の上方の距離Ｘ３は、予想される流速に基づいて、流速が遅い場合には長い距離が選択され、流速が速い場合には短い距離が選択されるように、選択することができる。

【００２２】

図示された例示的な実施形態では、第１、第２および第３の温度測定装置３１、３２および３３は、熱電対として設計されている。この目的のために、境界層センサー１は、第１の材料からなる第１のワイヤ２１を有する。この第１のワイヤ２１の一端は、第２のワイヤ２２の一端に接続されている。この第２のワイヤ２２は、接触点で熱起電力を形成することができるように第２の材料でできており、熱起電力は表面６５の温度T_Oの測定値を表す。

【００２３】

第１のワイヤ２１は、また、表面６５から距離Ｘ３を隔てて配置された第２の端部を有する。この端部には、第４のワイヤ２４との第３の接触点が形成される。この接触点は、温度T_Lを測定するための第３の温度測定装置３３を形成する。同様に、第３のワイヤ２３とのさらなる接触点が、第１のワイヤ２１の長手方向の延長に沿って配置される。この接触点は、温度T_Xを測定するための第２の温度測定装置３２を形成する。

【００２４】

本開示のいくつかの実施形態では、このようにして２つの熱起電力を測定することができる。第１の熱起電力は、第２のワイヤ２２と第４のワイヤ２４との間の第１の測定装置４１によって測定され、第２の熱起電力は、第４のワイヤ２４と第３のワイヤ２３との間の第２の測定装置４２によって測定される。したがって、第１の熱起電力は温度差$T_O - T_L$の測定値である。第２の熱起電力は温度差$T_X - T_L$の測定値である。

【００２５】

境界層センサー１は、粘着テープ７を用いて簡単な方法で表面６５に取り付けることができる。このため、境界層センサー１は、例えば流路での実験などの一時的または移動式の使用にも適している。さらに、粘着テープにより、表面の形状を乱すことなく取り付けることができる。

【００２６】

いくつかの実施形態では、境界層センサー１は、温度T_O、T_L、T_Xを測定するための装置３１、３２、３３を、その意図された位置に保持するさらなる要素、特に機械的固定装置を備えていてもよい。これにより、距離Ｘ２、Ｘ３の変形や変化を防止し、および／または、境界層センサー１の機械的損傷のリスクを低減することができる。

【００２７】

表面６５上の境界層内の温度プロファイルは指数関数に従う。そのため、測定値を評価するための公知の方法は、基本的に、測定値T_O、T_L、T_Xから指数関数の係数を導出することに基づいており、これらの係数は境界層の厚さおよび／または対流熱伝達率を表す。しかし、本開示によれば、第１、第３および第４のワイヤ２１、２３、２４、ならびに任意選択の機械的支持構造体または機械的固定装置が、距離Ｘ２における測定値T_Xを歪ませる熱流を導出するために使用されることが判明した。その結果、境界層センサー１によって決定された対流熱伝達率h_Cは、レーザー微分干渉法によって非接触で測定された対流熱伝達率h_Cとは異なる。そこで本開示では、境界層の厚さｄおよび対流熱伝達率h_Cをより正確に検出するために、第１および第２の熱起電力の代替評価を提案する。本開示による式の導出を図２に基づいて説明する。

【００２８】

図２は、図１に示したセンサーの熱等価回路図を示す。第１の温度測定装置３１、第２の温度測定装置３２および第３の温度測定装置３３は、ここでは、これらの装置によって測定された温度レベルT_O、T_XおよびT_Lによってそれぞれ示される。温度T_Oを有す

る表面６５から温度T_Lを有する周囲の半空間への対流熱伝達により、熱量ｑ２＋ｑ４がセンサー１に沿って流れる。この点に関して、以下の式が適用される。

【数４】

$$q2 = h_c \cdot (T_O - T_x)$$

$$q4 = h_c \cdot (T_x - T_L)$$

【００２９】

さらに、第１のワイヤ２１、第３のワイヤ２３および第４のワイヤ２４、ならびに図１には示されていない、存在し得る機械的支持構造体に沿った熱伝達により、熱量ｑ１＋ｑ３が表面６５から流れる。この点に関して、以下の式が適用される。

【数５】

$$q1 = \frac{\lambda_M}{X2} \cdot (T_O - T_x)$$

$$q3 = \frac{\lambda_1}{X3 - X2} \cdot (T_X - T_L)$$

【００３０】

図２で説明したように、センサーに沿った熱流は、電気工学で周知のキルヒホッフの法則に従って電気等価回路図で表すことができ、それぞれの温度レベルは電圧に対応し、熱流密度は電流に対応する。したがって、図２に示す等価回路図には、次のキルヒホッフの第１法則が適用される。

【数６】

$$q_{GES} = q_1 + q_2 = q_3 + q_4$$

【００３１】

さらに、キルヒホッフの第２法則が適用される。

【数７】

$$T_O - T_L = (T_O - T_X) + (T_X - T_L)$$

【００３２】

（輻射熱を無視した）表面６５から発せられる対流熱の総量は、表面６５と表面６５の周囲の媒体との間の温度差に相当する。したがって、次式が適用される。

【数８】

$$q_{GES} = (T_O - T_L) \cdot h_C = [(T_O - T_X) + (T_X - T_L)] \cdot h_C$$

【００３３】

これは、次式のようになる。

【数９】

$$q_{GES} = q_2 + q_4 = q_1 + q_2$$

したがって、次式のようになる。

【数１０】

$$q_4 = q_1$$

このことから、次式のようになる。

【数１１】

$$(T_X - T_L) \cdot h_C = (T_O - T_X) \cdot \frac{\lambda_M}{X2}$$

ここで、λ_Mはセンサー配列１の熱伝導率を表し、これは形状およびそれぞれ使用される材料に起因する。Ｘ２もセンサー１の形状に起因する定数であるため、対流熱伝導率h_Cは、定数$\Lambda = \frac{\lambda_M}{X2}$と測定された温度差にのみ依存する。ここで定数Λはセンサーの熱伝達率を表す。上述のように、温度差は熱起電力U_1とU_2によって直接与えられるので、対流熱伝達率h_Cおよびそれから導かれる境界層厚さ値は、単純に減算、乗算、除算によって求めることができる。ここで、定数Λは校正測定によって有利に決定することができる。これにより、一方では、時間のかかる計算を避けることができ、他方では、異なるが名目上は同一であるセンサー１からのサンプル散乱を簡単な方法で考慮することができる。

【００３４】

以下、例示的な実施形態により、本関係をより詳細に説明する。表面温度T_Oが２０℃である表面６５を考える。表面６５は、空気温度T_L＝０℃である環境に位置している。温度T_Oを測定するための第１の装置３１および温度T_Lを測定するための第３の装置３３に加えて、センサー１は、表面６５からＸ２＝２ｍｍの距離にある温度T_Xを測定するための第２の装置３２も備えている。図示された例示的な実施形態では、測定温度T_X＝１７．１℃である。

【００３５】

本開示に従って使用されるセンサーは、校正係数Λ＝３０Ｗ・ｍ$^{-2}$・Ｋ$^{-1}$を有する。本開示に従って得られた測定値$T_O - T_L$および$T_X - T_L$を評価する場合、対流熱伝達率h_Cは、次式から得られる。

【数１２】

$$h_c = \frac{\lambda_M \cdot [(T_O - T_L) - (T_X - T_L)]}{X2 \cdot (T_X - T_L)}$$

したがって、本開示によれば、対流熱伝達率h_C＝５Ｗ・ｍ$^{-2}$・Ｋ$^{-1}$である。

【００３６】

この結果、総熱流束密度は１００Ｗ・ｍ$^{-2}$となる。図２に示す部分熱流束密度は、次のようになる。

q_1＝８５．５Ｗ・ｍ$^{-2}$

q_2＝１４．５Ｗ・ｍ$^{-2}$

q_3＝１４．５Ｗ・ｍ$^{-2}$

$q_4 = 85.5 W \cdot m^{-2}$

【００３７】

従来技術に従って得られた測定値$T_O - T_L$および$T_X - T_L$を評価する場合、対流熱伝達率h_Cは次式から得られる。

【数１３】

$$h_C = \frac{\lambda_L \cdot [ln(T_O - T_L) - ln(T_X - T_L)]}{X2}$$

このようにして計算された対流熱伝達率の値は、$h_C = 2.17 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$となる。これから、総熱流量は$43.4 W \cdot m^{-2}$と計算される。従来技術によれば、センサーの材料を介した熱流は考慮されていないため、第２の温度測定装置３２の測定値T_Xの量は体系的に過大評価され、その結果、図示された例示的な実施形態では約５６％の測定誤差が生じる。

【００３８】

例示的な実施形態において上述した状況を、図３～４に基づいて以下に再度説明する。図３において、縦軸は対流熱伝達率h_Cを、横軸は流速ｖ（単位：$m \cdot s^{-1}$）を示す。この図は、図１に示したセンサーを用いて風洞内で測定された対流熱伝達率h_Cの値を流速に対して示しており、公知の方法に従って測定値を評価した場合（×）と、本開示で提案された方法に従って測定値を評価した場合（〇）を示す。図３は、従来技術による対流熱伝達率の測定値が体系的に過小評価されていることを示しており、流速ｖが増えるにつれて測定誤差が大きく増加している。本開示によれば、それ自体公知の熱センサーを用いて、高い流速であっても、対流熱伝達率h_Cの測定値を精度良く検出することが初めて可能になった。

【００３９】

図４は、センサー１の材料を介して流出または侵入する熱流が測定値T_Xに及ぼす影響を、距離Ｘ２に基づいて示している。ここで、縦軸にはケルビン単位の測定値$T_X - T_L$が対数スケールでプロットされ、横軸には温度T_Xを測定するための第２の装置３２の距離Ｘ２がプロットされている。合計６つの曲線が示されており、３つの異なる対流熱伝達係数についてそれぞれ２つずつの曲線が対応している。ここで、各曲線は以下の通り。

【表１】

曲線Ａ	$h_C = 4.83 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$についての従来技術による予想測定値$T_X$を示す。
曲線A_n	$h_C = 4.83 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$についての本開示による予想測定値$T_X$を示す。
曲線Ｂ	$h_C = 10.0 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$についての従来技術による予想測定値$T_X$を示す。
曲線B_n	$h_C = 10.0 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$についての本開示による予想測定値$T_X$を示す。
曲線Ｃ	$h_C = 20.0 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$についての従来技術による予想測定値$T_X$を示す。
曲線C_n	$h_C = 20.0 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$についての本開示による予想測定値$T_X$を示す。

【００４０】

図４は、特に対流熱伝達率が大きく、センサーの形状が比較的大きい場合、すなわち距離Ｘ２が大きくなる場合、本開示による方法により精度が大幅に向上することを示している。

【００４１】

図５は、センサーの形状とセンサーに使用される材料に基づく測定値T_Xの依存性を示している。ここで、ケルビン単位の測定値$T_X - T_L$は、縦軸に直線的にプロットされている。横軸は定数$\Lambda = \frac{\lambda_M}{X2}$を示す。横軸に示される値は、したがって、センサーの材料またはその断面の熱伝導率および温度T_Xを測定するための第２の装置３２の表面６５からの距離の測定値である。

【００４２】

図５は、パラメータΛの増加に伴い、測定値T_Xがほぼ対数的に増加することを示している。加えて、図５は、特に機械的に堅牢なセンサーでは、大量の材料が使用されているために熱伝導率λ_Mが大きく、測定値にかなりの誤差が生じ、その誤差は２倍以上になり得ることを示している。

【００４３】

もちろん、本開示は図示の実施形態に限定されない。したがって、上記の説明は限定的なものではなく、説明的なものとみなされるべきである。以下の特許請求の範囲は、示された特徴が本開示の少なくとも１つの実施形態に存在することを意味するものとして理解されるべきである。これは、さらなる特徴の存在を排除するものではない。明細書または特許請求の範囲が「第１」の特徴および「第２」の特徴を定義する限り、この呼称は、優先順位を確立することなく、類似の特徴を区別するために使用される。これらの成果につながる研究は、欧州連合から資金援助を受けている。

【図面】

【図１】

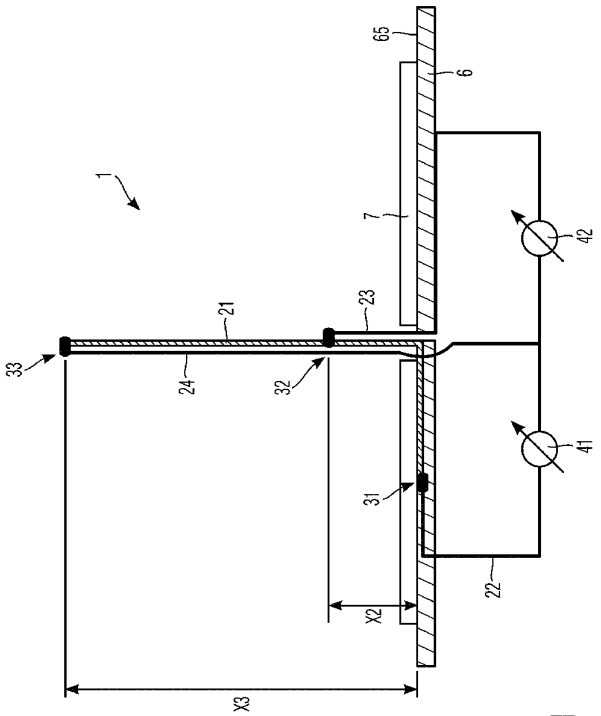


Fig. 1

【図２】

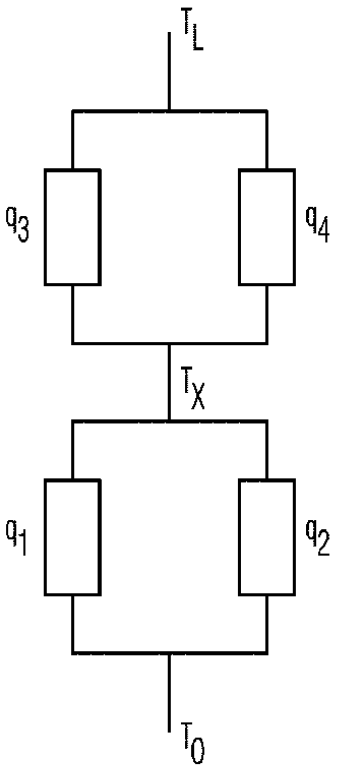


Fig. 2

【図３】

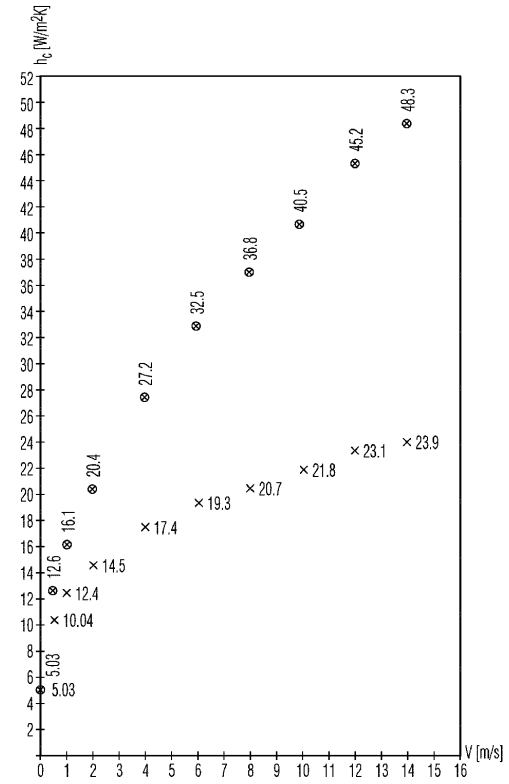


Fig. 3

【図４】

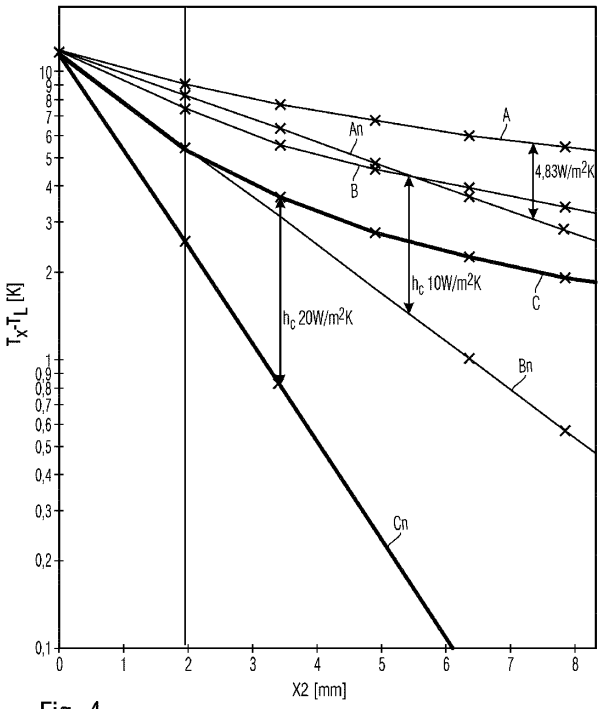


Fig. 4

【図５】

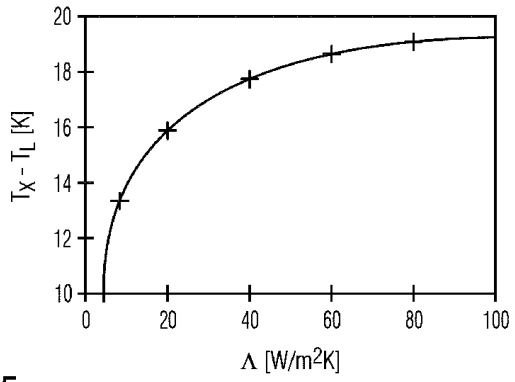


Fig. 5

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2022/077935

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01K 3/14(2006.01)i; ***G01K 7/02***(2006.01)i; ***G01K 13/02***(2006.01)i; ***G01K 17/20***(2006.01)i

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)

G01B; G01K; G01N

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, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	ERHARD MAYER ET AL. "Messung des konvektiven Wärmeübergangs - Entwicklung eines neuen Sensors und bauphysikalische Anwendungen" *BAUPHYSIK.*, DE, Vol. 40, No. 5, 01 October 2018 (2018-10-01), pages 336-343 DOI: 10.1002/bapi.201800015 ISSN: 0171-5445, XP055708598 the whole document	1-11
A	US 10209146 B1 (RAWLINGS CHRISTOPHER K [US] ET AL) 19 February 2019 (2019-02-19) abstract figures 1-5 column 4, line 16 - column 6, line 33	1-11
A	EP 3446087 A1 (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG [DE]) 27 February 2019 (2019-02-27) abstract paragraphs [0009] - [0083]; figures 1-3	1-11
A	DE 102019206013 A1 (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG [DE]) 29 October 2020 (2020-10-29) abstract paragraphs [0024] - [0039]; figures 1-4	1-11

☐ 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	Date of mailing of the international search report
31 January 2023	**08 February 2023**
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 **Totò, Nicola** Telephone No.

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (January 2015)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2022/077935

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US 10209146 B1	19 February 2019	NONE	
EP 3446087 A1	27 February 2019	CN 109313089 A	05 February 2019
		DE 102016107212 A1	19 October 2017
		EP 3446087 A1	27 February 2019
		WO 2017182507 A1	26 October 2017
DE 102019206013 A1	29 October 2020	DE 102019206013 A1	29 October 2020
		EP 3959481 A1	02 March 2022
		WO 2020216882 A1	29 October 2020

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (January 2015)

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2022/077935

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G01K3/14 G01K7/02 G01K13/02 G01K17/20
ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G01B G01K G01N

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, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	ERHARD MAYER ET AL: "Messung des konvektiven Wärmeübergangs - Entwicklung eines neuen Sensors und bauphysikalische Anwendungen", BAUPHYSIK., Bd. 40, Nr. 5, 1. Oktober 2018 (2018-10-01), Seiten 336-343, XP055708598, DE ISSN: 0171-5445, DOI: 10.1002/bapi.201800015 das ganze Dokument	1-11
A	US 10 209 146 B1 (RAWLINGS CHRISTOPHER K [US] ET AL) 19. Februar 2019 (2019-02-19) Zusammenfassung Abbildungen 1-5 Spalte 4, Zeile 16 - Spalte 6, Zeile 33	1-11

-/--

[X] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen [X] 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	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
31. Januar 2023	08/02/2023

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Totò, Nicola

Formblatt PCT/ISA/210 (Blatt 2) (April 2005)

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2022/077935

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	EP 3 446 087 A1 (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG [DE]) 27. Februar 2019 (2019-02-27) Zusammenfassung Absätze [0009] - [0083]; Abbildungen 1-3	1-11
A	DE 10 2019 206013 A1 (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG [DE]) 29. Oktober 2020 (2020-10-29) Zusammenfassung Absätze [0024] - [0039]; Abbildungen 1-4	1-11

Formblatt PCT/ISA/210 (Fortsetzung von Blatt 2) (April 2005)

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2022/077935

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 10209146 B1	19-02-2019	KEINE	
EP 3446087 A1	27-02-2019	CN 109313089 A	05-02-2019
		DE 102016107212 A1	19-10-2017
		EP 3446087 A1	27-02-2019
		WO 2017182507 A1	26-10-2017
DE 102019206013 A1	29-10-2020	DE 102019206013 A1	29-10-2020
		EP 3959481 A1	02-03-2022
		WO 2020216882 A1	29-10-2020

Formblatt PCT/ISA/210 (Anhang Patentfamilie) (April 2005)

フロントページの続き

MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CV,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IQ,IR,IS,IT,JM,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,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,WS,ZA,ZM,ZW

ドイツ連邦共和国 ８３６２６ ヴァライ フラウンホッファーシュトラーセ １０

(72)発明者 シンプソン ジョン カレン

ドイツ連邦共和国 ８３６２６ ヴァライ フラウンホッファーシュトラーセ １０

Ｆターム（参考） 2F056 YP10

2G040 AB08 BA14 BA25 CA02 DA03 EA08 HA01 ZA08