



(10) **DE 10 2014 018 340 B3** 2016.01.07

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 018 340.8**  
(22) Anmeldetag: **20.11.2014**  
(43) Offenlegungstag: –  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **07.01.2016**

(51) Int Cl.: **H04N 1/40 (2006.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**Bundesrepublik Deutschland, vertr. durch das  
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie,  
dieses vertreten durch den Präsidenten der  
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, 38116  
Braunschweig, DE**

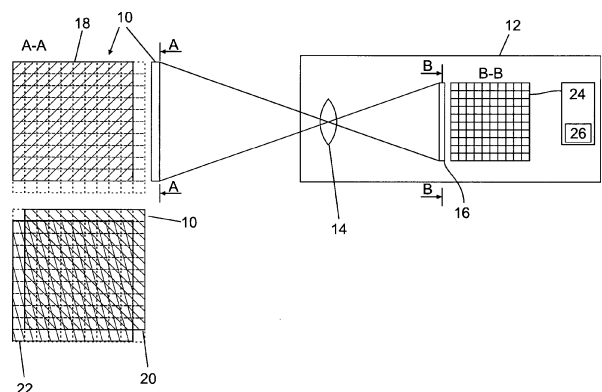
(72) Erfinder:  
**Gutschwager, Berndt, 12621 Berlin, DE; Hollandt,  
Jörg, Dr., 14532 Kleinmachnow, DE**

(74) Vertreter:  
**Gramm, Lins & Partner Patent- und  
Rechtsanwälte PartGmbB, 38122 Braunschweig,  
DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:  
**US 6 753 914 B1**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Ermitteln von Korrekturparametern zum Korrigieren von Messwerten von Bildpunkten, um die Ungleichheit des Übertragungsverhaltens einzelner oder aller Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems zu korrigieren**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln von Korrekturparametern zum Korrigieren von Messwerten von Bildpunkten, um die Ungleichheit des Übertragungsverhaltens einzelner oder aller Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems zu korrigieren, wobei das Bildaufnahmesystem eine Vielzahl an Bildpunkt-Spalten und eine Vielzahl an Bildpunkt-Zeilen aus Bildpunkten aufweist, mit den Schritten: Aufnehmen einer Strahlungsquelle mit zeitlich hinreichend konstanter Strahldichte mit dem Bildaufnahmesystem, sodass ein Primär-Bild erhalten wird, Aufnehmen dieser Strahlungsquelle mit Spalten-Versatz, sodass ein spaltenversetztes Bild erhalten wird, Aufnehmen dieser Strahlungsquelle mit Zeilen-Versatz, sodass ein zeilenversetztes Bild erhalten wird, und Berechnen einer Korrekturfaktormatrix aus dem Primär-Bild, dem zeilenversetzten Bild und dem spaltenversetzten Bild, die Korrekturparameter zum Korrigieren von Messwerten der Bildpunkte enthält.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln von Korrekturparametern zum Korrigieren von Messwerten von Bildpunkten eines Bildaufnahmesystems, insbesondere unter Verwendung einer Strahlungsquelle mit unbekannter Strahldichteverteilung. Derartige Bildaufnahmesysteme sind beispielsweise CCD-Kameras, insbesondere Infrarot-Kameras, die zur Messung von Temperaturverteilungen eingesetzt werden können. Die Bildpunkte des Bildaufnahmesystems stellen jeweils einzelne Detektoren für Strahlung dar und unterscheiden sich in ihren Aufnahmecharakteristika voneinander. Das führt dazu, dass ein vollkommen homogener Strahler vom Bildaufnahmesystem als inhomogen abgebildet wird.

**[0002]** Um verlässliche Bilder zu liefern, muss das Bildaufnahmesystem daher korrigiert werden. Dafür muss für jeden Bildpunkt ein Korrekturfaktor bestimmt werden. Im Idealfall führt die Korrektur mittels des Korrekturfaktors zu einer vollständigen Eliminierung von Unterschieden zwischen den einzelnen Bildpunkten.

**[0003]** Die Kalibrierung eines Bildaufnahmesystems ist einfach möglich, wenn ein in seiner Strahldichteverteilung (oder in seiner Verteilung der Strahlungstemperatur) homogener flächiger Strahler aufgenommen wird. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass derartige Strahler im Allgemeinen nicht herstellbar sind.

**[0004]** Es ist zudem möglich, jeden einzelnen Bildpunkt mit einer zeitlich nicht schwankenden Strahlungsquelle zu beleuchten und aus dem gemessenen Ist-Wert und einem Soll-Wert den Korrekturfaktor zu bestimmen. Nachteilig daran ist die lange Dauer für die Kalibrierung. Ein weiteres Problem ist, dass auch zeitlich hochstabile Strahler nur schwer herzustellen sind.

**[0005]** Aus der US 6,753,914 B1 ist ein Verfahren zum Kalibrieren einer Zeilenkamera mit einer Abtastvorrichtung bekannt, bei dem ein vollständig weißes Objekt aufgenommen wird. Das Objekt wird kontinuierlich weiterbewegt, so dass die gleiche Stelle dieses Objekts von der Detektorzeile aufgenommen wird. Nachfolgend wird über die so mit einem Pixel aufgenommenen Messwerte der Mittelwert gebildet. Nachfolgend wird ein Korrekturwert berechnet, beispielsweise die Differenz zwischen dem Maximum aller gemessenen Werte und dem Mittelwert. Wird die Zeilenkamera danach für die optische Zeichenerkennung (englisch: Optical Character Recognition, OCR) eingesetzt, so wird dieser Korrekturwert dazu verwendet, um die Sicherheit bei der Entscheidung zu erhöhen, ob eine gemessene Grauwert oberhalb oder unterhalb eines vorgegebenen Schwellenwerts liegt. Aus der genannten Druckschrift sind daher die Schritte (a) und das Berechnen einer Korrekturfaktormatrix bekannt. Dieses Verfahren erhöht die Erkennungswahrscheinlichkeit bei der optischen Buchstabenerkennung, ist aber für die Kalibrierung beispielsweise von hochgenauen Thermokameras nicht geeignet.

**[0006]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, in beliebigen Spektralbereichen die Kalibrierung von Bildaufnahmesystemen zu verbessern. Auch ist die Ermittlung der Strahldichteverteilung (bzw. der Verteilung der Strahlungstemperaturen) der verwendeten Strahlungsquelle möglich.

**[0007]** Die Erfindung löst das Problem durch ein Verfahren mit den Merkmalen von Anspruch 1. Die zeitliche Reihenfolge der Schritte (a), (b), und (c) zu einander kann beliebig gewählt werden.

**[0008]** Der Spaltenversatz kann nach rechts oder nach links erfolgen. Der Zeilenversatz kann nach unten oder nach oben erfolgen. Bei der Berechnung der Korrekturfaktormatrix ist die jeweilige Richtung des jeweiligen Versatzes mit zu berücksichtigen.

**[0009]** Vorteilhaft an dem Verfahren ist, dass auch eine in der Fläche inhomogene Strahlungsquelle verwendet werden kann, solange diese zeitlich hinreichend stabil ist. Hierunter wird verstanden, dass die Strahlungsquelle während der Aufnahme der zumindest drei Bilder ihre Abstrahlcharakteristik so wenig ändert, dass sie als konstant betrachtet werden kann. Selbstverständlich schwankt jede Strahlungsquelle in ihrer Strahldichteverteilung, maßgeblich ist jedoch, dass die zeitliche Schwankung so klein ist, dass die Annahme der zeitlichen Konstanz zu einem Fehler führt, der durch die Messunsicherheit beschreibbar ist.

**[0010]** Auch Bildaufnahmesysteme mit nur einem Einzeldetektor oder mit mehreren Einzeldetektoren und mit einer oder mehreren Abtastvorrichtungen können mit diesem Verfahren korrigiert werden.

**[0011]** Bei der Anwendung einer stabilen Strahlungsquelle und eines stabil arbeitenden Bildaufnahmesystems strebt der Wert der Messunsicherheit für gleiche Messbedingungen gegen Null. Die Messunsicherheit wird dann nur durch die Auflösung der Anzeige des Bildaufnahmesystems bestimmt. Bei einem hochwertigen Bildaufnahmesystem mit einer technisch gut angepassten Auflösung der Messwertanzeige mit dem Wert  $a$  der

Auflösung ergibt sich allgemein als Richtwert die erreichbare Messunsicherheit  $u$  bei Verwendung einer stabilen Strahlungsquelle aus:

$$u = a/(2 \cdot \sqrt{3}).$$

**[0012]** Wenn ein Wert für die Instabilität der Strahlungsquelle bekannt ist, oder die Instabilität der Strahlungsquelle während der Anwendung des beschriebenen Verfahrens durch ein weiteres unabhängig arbeitendes Messsystem ermittelt werden kann, so kann dieser Wert mit in die resultierende Messunsicherheit des beschriebenen Verfahrens durch Rechnung einbezogen werden.

**[0013]** Mit Hilfe des Kontrollbildes (Patentanspruch 2(i)) kann ein Kleinstwert der Messunsicherheit abgeschätzt werden. Die erreichbare Messunsicherheit muss dann allgemein größer als dieser Kleinstwert sein.

**[0014]** Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass dann, wenn die Strahlungsquelle hinsichtlich ihrer Strahldichteverteilung zeitlich hinreichend konstant ist, das Aufnehmen eines Objektpunktes auf der Strahlungsquelle mit drei verschiedenen Bildpunkten, die auch als Sensorpunkte bezeichnet werden können, dazu führt, dass das Übertragungsverhalten aller Bildpunkte auf einen, grundsätzlich beliebig wählbaren, Bildpunkt bezogen werden kann. Durch Bezug auf diesen ausgewählten Bezugs-Bildpunkt lassen sich alle notwendigen Korrekturfaktoren berechnen.

**[0015]** Der Erfindung liegt auch die Erkenntnis zugrunde, dass dann, wenn die Strahlungsquelle hinsichtlich ihrer Strahldichteverteilung zeitlich hinreichend konstant ist, das Aufnehmen von drei Objektpunkten auf der Strahlungsquelle mit nur einem Bildpunkt, der auch als Sensorpunkt bezeichnet werden kann, dazu führt, dass die Strahldichteverteilung (oder die Verteilung der Strahlungstemperatur) aller Objektpunkte auf einen, grundsätzlich beliebig wählbaren, Objektpunkt bezogen werden kann. Durch Bezug auf diesen ausgewählten Bezugs-Objektpunkt lassen sich alle Korrekturen für die anderen Objektpunkte und somit auch für die auf diese Objektpunkte projizierten aufgenommenen Bildpunkte, die auch als Sensorpunkte bezeichnet werden können, berechnen.

**[0016]** Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter dem Aufnehmen mit Spalten-Versatz verstanden, dass die Aufnahmerichtung so geändert wird, dass im spaltenversetzten Bild – bis auf Bildpunkte am Rand des Bildes – jeder Bildpunkt einen Bereich der Strahlungsquelle erfasst, der bei der Aufnahme des Primärbildes von jeweils einem anderen (durch den Abstand der Verschiebung festgelegten) Bildpunkt aufgenommen wurde, der in der gleichen Zeile liegt.

**[0017]** Unter dem Aufnehmen mit Zeilen-Versatz wird entsprechend verstanden, dass die Aufnahmerichtung so verändert wird, dass im zeilenversetzten Bild jeweils ein Bildsensorpunkt einen Bereich der Strahlungsquelle erfasst, der bei der Aufnahme des Primärbildes von jeweils einem anderen (durch den Abstand der Verschiebung festgelegten) Bildpunkt aufgenommen wurde, der in der gleichen Spalte liegt.

**[0018]** Die Spalten und Zeilen können durch Bildpunkte gebildet sein, die mit ihren Seiten relativ zueinander ausgerichtet sind, das ist aber nicht notwendig. Eine Spalte kann insbesondere auch eine Folge von Bildpunkten sein, die in äquidistanten Abständen entlang einer Geraden angeordnet sind, wobei eine Zeile dann eine Folge von Bildpunkten ist, die entlang einer zweiten Geraden angeordnet sind. Vorzugsweise verläuft die zweite Gerade senkrecht zur ersten Geraden.

**[0019]** Es sei darauf hingewiesen, dass die Orientierung der Strahlungsquelle zum Bildaufnahmesystem nicht relevant ist, solange der Versatz zwischen den Aufnahmen gewahrt ist.

**[0020]** Bildlich lässt sich das dadurch veranschaulichen, dass die Bildpunkte des Bildaufnahmesystems auf die Strahlungsquelle projiziert gedacht werden. Haben diese gedachten Projektionen beispielsweise eine Kantenlänge von 1 mm, so wird zum Aufnehmen eines spaltenversetzten Bildes das Bildaufnahmesystem so gewählt, insbesondere verschoben, dass jeder Bildpunkt danach einen Bereich der Strahlungsquelle aufnimmt, der zuvor von seinem Nachbarn aufgenommen wurde. Allerdings ist anzumerken, dass es sich zwar um den direkten Nachbarn handeln kann, nicht aber muss.

**[0021]** Unter dem Merkmal, dass die Korrekturfaktormatrix berechnet wird, wird insbesondere verstanden, dass die entsprechenden Korrekturparameter berechnet werden. Die Repräsentation dieser Daten ist nicht relevant, insbesondere ist es möglich, dass die einzelnen Korrekturparameter beispielsweise als Vektor reprä-

sentiert werden. Maßgeblich ist, dass die Korrekturparameter so bestimmt werden, dass die Korrekturfaktormatrix aus diesen bestimmbar ist.

**[0022]** Das Bildaufnahmesystem kann beliebige Sensoren aufweisen und ist z. B. bei der Verwendung von Ein-Element(oder Mehrelement)-Sensoren mit Abtastvorrichtungen anwendbar. Günstig ist ein Bildaufnahmesysteme, das einen CCD-Chip enthält. Es ist möglich und stellt eine bevorzugte Ausführungsform dar, dass das Bildaufnahmesystem digital arbeitet, das ist aber nicht notwendig. Das Verfahren ist auch anwendbar für die Aufnahme und Korrektur nur einer Zeile oder nur einer Spalte. Es entsteht dann (jeweils) kein zwei-dimensionales Bild. Erfindungsgemäß ist also auch ein Verfahren zum Ermitteln der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens einzelner Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems, insbesondere unter Verwendung einer Strahlungsquelle mit unbekannter Strahldichte-Verteilung, wobei das Bildaufnahmesystem eine Vielzahl an Bildpunkt-Spalten oder eine Vielzahl an Bildpunkt-Zeilen aus Bildpunkten aufweist, mit den Schritten: (a) Aufnehmen einer Strahlungsquelle mit zeitlich hinreichend konstanter Strahldichte mit dem Bildaufnahmesystem, sodass ein Primär-Bild erhalten wird, (b) entweder Aufnehmen dieser Strahlungsquelle mit Spalten-Versatz, sodass ein spaltenversetztes Bild erhalten wird, oder Aufnehmen dieser Strahlungsquelle mit Zeilen-Versatz, sodass ein zeilenversetztes Bild erhalten wird, und (c) Berechnen einer Korrekturfaktormatrix aus dem Primär-Bild und entweder dem zeilenversetzten Bild oder dem spaltenversetzten Bild, die Korrekturparameter zum Korrigieren von Messwerten der Bildpunkte enthält.

**[0023]** Bei der Anwendung des beschriebenen Verfahrens zur Korrektur nur einer Zeile (Spalte) wird die aufgenommene Zeile (Spalte) für die Berechnung auf die Lage des Bezugspunktes der Ergebnis-Matrix gebracht. Es werden für die Berechnung der Ergebnis-Matrix der Zeile (Spalte) nur die jeweiligen Zeilen-(Spalten)Werte verwendet.

**[0024]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Verfahren die Schritte: (i) Aufnehmen dieser Strahlungsquelle so, wie das Primär-Bild aufgenommen wurde, sodass ein Kontroll-Bild erhalten wird, und (ii) Erfassen einer Zeitinstabilität der Strahlungsquelle und des Bildaufnahmesystems aus dem Primär-Bild und dem Kontroll-Bild. Im Idealfall sind das Primär-Bild und das Kontroll-Bild gleich. Je kleiner die Abweichung zwischen Primär-Bild und Kontroll-Bild ist, desto geringer ist die Messunsicherheit, die durch die Annahme der zeitlichen Konstanz von Strahlungsquelle und Bildaufnahmesystem verursacht wird.

**[0025]** Das Erfassen der zeitlichen Stabilität der Strahlungsquelle umfasst beispielsweise das Berechnen eines Kennwerts, der umso größer wird, je größer die zeitliche Instabilität der Strahlungsquelle ist. Beispielsweise kann die mittlere quadratische Abweichung zwischen den Bildpunkten von Primär-Bild einerseits und Kontroll-Bild andererseits als Maß für die zeitliche Stabilität verwendet werden.

**[0026]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird das Aufnehmen mit Zeilen-Versatz so durchgeführt, dass im zeilenversetzten Bild für eine Mehrheit der Bildpunkte gilt, dass der jeweilige Bildpunkt Strahlung von einem Bereich der Strahlungsquelle erhält, dessen Strahlung bei der Aufnahme des Primär-Bilds zu einem Anteil von zumindest 80%, insbesondere zu einem Anteil von zumindest 90%, von nur einem anderen Bildpunkt aufgenommen wurde. Ideal ist, wenn für die Mehrheit der Bildpunkte gilt, dass der jeweilige Bildpunkt Strahlung von einem Bereich der Strahlungsquelle erhält, dessen Strahlung ausschließlich nur von einem anderen Bildpunkt aufgenommen wurde. In anderen Worten nimmt dann die Mehrheit der Bildpunkte einen Bereich der Strahlungsquelle auf, der zuvor von einem anderen Bildpunkt aufgenommen wurde. Das erlaubt eine Aussage über die relativen Abweichungen der beiden Bildpunkte zueinander.

**[0027]** Vorzugsweise beträgt der Zeilen-Versatz einen ganzzahligen, auf die Strahlungsquelle projizierten Bildpunkt-Abstand. Insbesondere beträgt der Zeilen-Versatz genau einen auf die Strahlungsquelle projizierten Bildpunkt-Abstand. Auf diese Weise wird der Einfluss einer in der Fläche Inhomogenität der Strahlungsquelle besonders klein gehalten. Dabei muss aber allgemein das Rauschen des Messsignals des Bildpunktes deutlich kleiner sein, als die Intensitätsänderung auf der Strahlungsquelle, welche sich durch den (kleinen) Versatz ergibt.

**[0028]** Günstig ist es, wenn der Spalten-Versatz einen ganzzahligen, auf die Strahlungsquelle projizierten Bildpunkt-Abstand beträgt. Besonders günstig ist ein Spalten-Versatz von genau einem auf die Strahlungsquelle projizierten Bildpunkt-Abstand. Dabei muss aber allgemein das Rauschen des Messsignals des Bildpunktes deutlich kleiner sein, als die Intensitätsänderung auf der Strahlungsquelle, welche sich durch den (kleinen) Versatz ergibt.

**[0029]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird das Aufnehmen mit Spalten-Versatz so durchgeführt, dass im spaltenversetzten Bild für eine Mehrheit der Bildpunkte gilt, dass der jeweilige Bildpunkt Strahlung von einem Bereich der Strahlungsquelle erhält, dessen Strahlung bei der Aufnahme des Primär-Bilds zu einem Anteil von zumindest 80%, insbesondere zu einem Anteil von zumindest 90%, von nur einem anderen Bildpunkt aufgenommen wurde. Ideal ist, wenn für die Mehrheit der Bildpunkte gilt, dass der jeweilige Bildpunkt Strahlung von einem Bereich der Strahlungsquelle erhält, dessen Strahlung ausschließlich nur von einem anderen Bildpunkt aufgenommen wurde. In anderen Worten nimmt dann die Mehrheit der Bildpunkte einen Bereich der Strahlungsquelle auf, der zuvor von einem anderen Bildpunkt aufgenommen wurde. Das erlaubt eine Aussage über die relativen Abweichungen der beiden Bildpunkte zueinander.

**[0030]** Vorzugsweise umfasst das Berechnen der Korrekturfaktormatrix bei Strahldichte proportionalen Signalwerten die folgenden Schritte: (a) aus dem Primär-Bild und dem spaltenversetzten Bild berechnen einer Spaltenquotient-Matrix mit den Quotienten von spaltengleichen oder von spaltenversetzten Messwerten (zwei nicht gleiche Berechnungsarten 1 und 2, siehe weiter unten), (b) aus dem Primär-Bild und dem zeilenversetzten Bild Berechnen einer Zeilenquotienten-Matrix mit den Quotienten von zeilengleichen oder von zeilenversetzten Messwerten (zwei nicht gleiche Berechnungsarten 1 und 2) und (c) Berechnen einer Ergebnis-Matrix aus der Spaltenquotienten-Matrix und der Zeilenquotienten-Matrix. Dabei zeigt die Ergebnis-Matrix entweder die relative Verteilung der Empfindlichkeit der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems (Berechnungsart 1) oder die relative Verteilung der Empfindlichkeit der Objektpunkte der Quelle (Berechnungsart 2).

**[0031]** In der Zeilenquotienten-Matrix und der Spaltenquotienten-Matrix sind, wenn der Spalten-Versatz und der Zeilen-Versatz jeweils genau einen auf die Strahlungsquelle projizierten Bildpunkt abstrahieren, die Verhältnisse angegeben, die die Messung an einer und derselben Stelle mit benachbarten Bildpunkten liefern. Unter der Annahme einer zeitlichen Konstanz heißt das, dass der Korrekturfaktor aller Elemente einer Zeile durch Multiplikation auf jeweils einen Bildpunkt zurückgerechnet werden kann. Das gleiche gilt für die Einträge einer Spalte. Es kann daher ein Bildpunkt als Referenz-Bildpunkt gewählt werden und alle sonstigen Bildpunkte können auf diesen Bildpunkt bezogen werden. Der entsprechende Korrekturfaktor gibt dann an, dass sich das Messergebnis bei der Vermessung der gleichen Stelle auf der Strahlungsquelle ändert, wenn statt des Referenz-Bildpunkts der jeweilige Bildpunkt verwendet wird.

**[0032]** Vorzugsweise umfasst das Berechnen der Korrekturfaktormatrix bei Temperaturmesswerten die folgenden Schritte: (a) aus dem Primär-Bild und dem zeilenversetzten Bild Berechnen einer Spaltendifferenz-Matrix mit den Differenzen von spaltengleichen oder von spaltenversetzten Messwerten (zwei nicht gleiche Berechnungsarten 1 und 2, siehe unten), (b) aus dem Primär-Bild und dem zeilenversetzten Bild Berechnen einer Zeilendifferenz-Matrix mit den Differenzen von zeilengleichen oder von zeilenversetzten Messwerten (zwei nicht gleiche Berechnungsarten 1 und 2) und (c), Berechnen einer Ergebnis-Matrix aus der Spaltendifferenz-Matrix und der Zeilendifferenz-Matrix, wobei die Ergebnis-Matrix entweder die Differenzen der angezeigten Strahlungstemperatur der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems (Berechnungsart 1) oder die Differenzen der gemessenen Strahlungstemperatur der Objektpunkte der Quelle (Berechnungsart 2) zeigt, und (d) Durchführung von Iterationsschritten der Berechnungen nach (a), (b) und (c), ohne erneute Messungen, zur Verringerung von Abweichungen, bis zur gewünschten Unsicherheit.

**[0033]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist das Aufnehmen der Strahlungsquelle ein Aufnehmen eines Strahldichte-proportionalen Signals.

**[0034]** Die Algorithmen 1.1 und 1.2 beruhen auf der Berechnung (Ermittlung) der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens bei der Aufnahme eines Strahldichte-proportionalen Signals der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems. Es erfolgt (nur) eine Berechnung mit dem gültigen Ergebnis.

**[0035]** Beim Algorithmus 1.1 erfolgt eine jeweilige Verhältnisbildung der Signale benachbarter Bildpunkte, welche auf die gleiche Stelle der Strahlungsquelle blickten. Mit der Ergebnis-Matrix E wird (zuerst) die relative Verteilung der Empfindlichkeit der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems ermittelt.

**[0036]** Beim Algorithmus 1.2. erfolgt eine jeweilige Verhältnisbildung der Signale eines Bildpunktes, der auf zwei benachbarte Punkte des Strahlers blickte. Mit der Ergebnis-Matrix E wird (zuerst) die relative Verteilung der Intensität der Objektpunkte der Quelle ermittelt.

**[0037]** Gemäß einer alternativen Ausführungsform ist das Aufnehmen der Strahlungsquelle ein Aufnehmen eines zur Strahlungstemperatur proportionalen Signals.

**[0038]** Es erfolgen dann vorzugsweise mehrere Berechnungen iterativ. Es wird eine Abbruchbedingung je nach Anwendung festgelegt. Die Beispielrechnungen zeigen im Allgemeinen zwei bis drei notwendige Iterationen. Bei diesen Berechnungen wird die Planck-Funktion benutzt. Es besteht ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Strahlungstemperatur und der Strahldichte. Das ist der Grund für die iterative Berechnung.

**[0039]** Beim Algorithmus 2.1. erfolgt eine jeweilige Differenzbildung der Signale benachbarter Bildpunkte, welche auf die gleiche Stelle des Strahlers blickten. Mit der Ergebnis-Matrix E werden (zuerst) die Werte der Differenzen der gemessenen Strahlungstemperaturen der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems ermittelt.

**[0040]** Beim Algorithmus 2.2. erfolgt eine jeweilige Differenzbildung der Signale eines Bildpunktes, der auf zwei benachbarte Punkte des Strahlers blickte. Mit der Ergebnis-Matrix E werden (zuerst) die Werte der Differenzen der gemessenen Strahlungstemperaturen der Objektpunkte der Quelle ermittelt.

**[0041]** Alle vier Algorithmen können jeweils mit unterschiedlicher Wahl des Referenzpunktes (Bezugspunkt) ausgeführt werden. Es ist somit eine Vielzahl von unterschiedlichen Berechnungsvarianten vorhanden.

**[0042]** Nachfolgend werden die vier Algorithmen zum Berechnen der Ergebnis-Matrix aus den aufgenommenen Bildern mit Bezug auf die **Fig. 1a**, **Fig. 1b**, **Fig. 1c**, **Fig. 2a**, **Fig. 2b** und **Fig. 2c** beschrieben. Bei allen vier Algorithmen erfolgt die Berechnung ausgehend von einem Spaltenversatz durch Verschiebung des Bildaufnahmesystems nach rechts (mit Blick zur Strahlungsquelle) und ausgehend von einem Zeilenversatz durch Verschiebung des Bildaufnahmesystems nach unten (mit Blick zur Strahlungsquelle).

#### A. Algorithmus 1.1

**[0043]** Das Bildaufnahmesystem zeigt für alle Bildpunkte strahldichteproporale Werte an. Mit der Ergebnis-Matrix E wird (zuerst) die relative Verteilung der Empfindlichkeit der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems ermittelt.

##### 1. Berechnungsschritt 1

Primär-Bild:	P	mit den Elementen $p_{i,j}$
Spaltenversatz-Bild:	S	mit den Elementen $s_{i,j}$
Zeilenversatz-Bild:	Z	mit den Elementen $z_{i,j}$
Spaltenquotient-Matrix	Q	mit den Elementen $q_{i,j}$
Zeilenquotient-Matrix	R	mit den Elementen $r_{i,j}$
Ergebnis-Matrix:	E	mit den Elementen $e_{i,j}$

**[0044]** Alle Bilder und alle Matrizen jeweils mit  $i$ -Zeilen,  $i = 1 \dots n$  und  $j$ -Spalten,  $j = 1 \dots m$ .  $n$ ,  $m$ ,  $B$  und  $b$  sind natürliche Zahlen.

##### 1.1 Berechnung der Spaltenquotient-Matrix Q

Wahl einer Bezugsspalte  $Q_j$  mit  $j = B$  im Bereich von  $j = 1$  bis  $j = m$   
 Berechnung des jeweiligen Quotienten  $q_{i,j} = s_{i,j}/p_{i,j+1}$  für alle  $q_{i,j}$  mit  $j < B$ .  
 Jeder Quotient  $q_{i,j}$  (der Bezugsspalte) für  $j = B$  erhält den Wert 1.  
 Berechnung des jeweiligen Quotienten  $q_{i,j} = p_{i,j}/s_{i,j-1}$  für alle  $q_{i,j}$  mit  $j > B$ .

**[0045]** **Fig. 1a** zeigt ein Schema der Matrix Q mit der Bezugsspalte  $Q_B$ .

##### 1.2 Berechnung der Zeilenquotient-Matrix R

Wahl einer Bezugszeile  $R_i$  mit  $i = b$  im Bereich von  $i = 1$  bis  $i = n$   
 Berechnung des jeweiligen Quotienten  $r_{i,j} = z_{i,j}/p_{i+1,j}$  für alle  $r_{i,j}$  mit  $i < b$ .  
 Jeder Quotient  $r_{i,j}$  (der Bezugszeile) für  $i = b$  erhält den Wert 1.  
 Berechnung des jeweiligen Quotienten  $r_{i,j} = p_{i,j}/z_{i-1,j}$  für alle  $r_{i,j}$  mit  $i > b$ .

**[0046]** **Fig. 1b** zeigt ein Schema der Matrix Q mit der Bezugszeile  $R_b$ .

## 1.3 Berechnung der Ergebnis-Matrix E

Bildung des (eines) Bezugspunktes der Matrix E mit dem Wert  $e_{i=b,j=B} = 1$ .  
 $y$  und  $x$  sind natürliche Zahlen  
 Berechnung der Elemente:

$$e_{i=b,j=B+y} = e_{i=b,j=B+y-1} \times q_{i=b,j=B+y}$$

mit  $1 \leq y \leq m - B$

$$e_{i=b,j=B-y} = e_{i=b,j=B-y+1} \times q_{i=b,j=B-y}$$

mit  $1 \leq y < B$

$$e_{i=b+x,j=B} = e_{i=b+x-1,j=B} \times r_{i=b+x,j=B}$$

mit  $1 \leq x \leq n - b$

$$e_{i=b-x,j=B} = e_{i=b-x+1,j=B} \times r_{i=b-x,j=B}$$

mit  $1 \leq x < b$

**[0047]** Fig. 1c zeigt schematisch die Ergebnis-Matrix E.

Berechnung der weiteren Elemente der Ergebnis-Matrix E.

**[0048]** Für alle Elemente (e) mit  $j < B$  und  $i < b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} \times e_{i,j+1} + r_{i,j} \times e_{i+1,j})/2$$

**[0049]** Für alle Elemente (e) mit  $j < B$  und  $i > b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} \times e_{i,j+1} + r_{i,j} \times e_{i-1,j})/2$$

**[0050]** Für alle Elemente (e) mit  $j > B$  und  $i < b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} \times e_{i,j-1} + r_{i,j} \times e_{i+1,j})/2$$

**[0051]** Für alle Elemente (e) mit  $j > B$  und  $i > b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} \times e_{i,j-1} + r_{i,j} \times e_{i-1,j})/2$$

**[0052]** Die Ergebnis-Matrix E zeigt nun die relative Verteilung der Empfindlichkeit der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems zum Bezugspunkt der Ergebnis-Matrix E. Die Korrekturfaktormatrix  $K_0$  ergibt sich aus:

$$K_0 = E.$$

**[0053]** Die Korrekturfaktormatrix  $K_0$  mit den Korrekturfaktoren  $k_0(p_{i,j})$  gibt den Wert der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems an und kann für die Korrektur genutzt werden.

**[0054]** Die korrigierte Matrix P1 entsteht aus dem Bild P und berechnet sich aus:

$$P1_{i,j} = P_{i,j}/k_0(p_{i,j}).$$

**[0055]** In anderen Worten wird die korrigierte Matrix P1 erhalten, indem die Einträge der Matrix P durch den Wert der Matrix  $K_0$  dividiert wird, der an der jeweils gleichen Stelle steht.

## B. Algorithmus 1.2

**[0056]** Das Bildaufnahmesystem zeigt für alle Bildpunkte strahllichtproportionale Werte an. Mit der Ergebnis-Matrix E wird (zuerst) die relative Verteilung der Intensität der Objektpunkte der Quelle ermittelt.

## 1. Berechnungsschritt 1

## 1.1 Berechnung der Spaltenquotient-Matrix Q

Wahl einer Bezugsspalte  $Q_j$  mit  $j = B$  im Bereich von  $j = 1$  bis  $j = m$   
 Berechnung des jeweiligen Quotienten  $q_{i,j} = p_{i,j}/s_{i,j}$  für alle  $q_{i,j}$  mit  $j < B$ .  
 Jeder Quotient  $q_{i,j}$  (der Bezugsspalte) für  $j = B$  erhält den Wert 1.  
 Berechnung des jeweiligen Quotienten  $q_{i,j} = s_{i,j}/p_{i,j}$  für alle  $q_{i,j}$  mit  $j > B$ .

**[0057]** Fig. 1a zeigt ein Schema der Matrix Q mit der Bezugsspalte  $Q_B$ .

## 1.2 Berechnung der Zeilenquotient-Matrix R

Wahl einer Bezugszeile  $R_i$  mit  $i = b$  im Bereich von  $i = 1$  bis  $i = n$   
 Berechnung des jeweiligen Quotienten  $r_{i,j} = p_{i,j}/z_{i,j}$  für alle  $r_{i,j}$  mit  $i < b$ .  
 Jeder Quotient  $r_{i,j}$  (der Bezugszeile) für  $i = b$  erhält den Wert 1.  
 Berechnung des jeweiligen Quotienten  $r_{i,j} = z_{i,j}/p_{i,j}$  für alle  $r_{i,j}$  mit  $i > b$ .

**[0058]** Fig. 1b zeigt ein Schema der Matrix Q mit der Bezugszeile  $R_b$ .

## 1.3 Berechnung der Ergebnis-Matrix E

Bildung des (eines) Bezugspunktes der Matrix E mit dem Wert  $e_{i=b,j=B} = 1$ .  
 $y$  und  $x$  sind natürliche Zahlen  
 Berechnung der Elemente:

$$e_{i=b,j=B+y} = e_{i=b,j=B+y-1} \times q_{i=b,j=B+y}$$

mit  $1 \leq y \leq m - B$

$$e_{i=b,j=B-y} = e_{i=b,j=B-y+1} \times q_{i=b,j=B-y}$$

mit  $1 \leq y < B$

$$e_{i=b+x,j=B} = e_{i=b+x-1,j=B} \times r_{i=b+x,j=B}$$

mit  $1 \leq x \leq n - b$

$$e_{i=b-x,j=B} = e_{i=b-x+1,j=B} \times r_{i=b-x,j=B}$$

mit  $1 \leq x < b$

**[0059]** Fig. 1c zeigt schematisch die Ergebnis-Matrix E.

Berechnung der weiteren Elemente der Ergebnis-Matrix E

**[0060]** Für alle Elemente (e) mit  $j < B$  und  $i < b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} \times e_{i,j+1} + r_{i,j} \times e_{i+1,j})/2$$

**[0061]** Für alle Elemente (e) mit  $j < B$  und  $i > b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} \times e_{i,j+1} + r_{i,j} \times e_{i-1,j})/2$$

**[0062]** Für alle Elemente (e) mit  $j > B$  und  $i < b$  folgt,



$$e_{i,j} = (q_{i,j} \times e_{i,j-1} + r_{i,j} \times e_{i+1,j})/2$$

**[0063]** Für alle Elemente (e) mit  $j > B$  und  $i > b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} \times e_{i,j-1} + r_{i,j} \times e_{i-1,j})/2.$$

**[0064]** Die Ergebnis-Matrix E zeigt nun die relative Verteilung der Intensität der Objektpunkte der Quelle zum Bezugspunkt der Ergebnis-Matrix E.

**[0065]** Die Korrekturfaktormatrix  $K_0$  ergibt sich aus:

$$K_0 = \frac{p_{i,j}/p_{i=b,j=B}}{E}.$$

**[0066]** Die Korrekturfaktormatrix  $K_0$  mit den Korrekturfaktoren  $k_0(p_{i,j})$  gibt den Wert der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems an und kann für die Korrektur genutzt werden. Die korrigierte Matrix P1 entsteht aus dem Bild P und berechnet sich aus:

$$P1_{i,j} = P_{i,j}/k_0(p_{i,j}) \quad P1 = P/K_0.$$

### C. Algorithmus 2.1

**[0067]** Das Bildaufnahmesystem zeigt für alle Bildpunkte Strahlungstemperaturen  $t_{\lambda,S}$  in Grad Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) an. Erfolgt die Anzeige in einer anderen Maßeinheit der Strahlungstemperatur, so werden die angezeigten Werte in die Maßeinheit  $^{\circ}\text{C}$  umgerechnet, bevor der Algorithmus ausgeführt wird. Mit der Ergebnis-Matrix E werden (zuerst) die Werte der Differenzen der gemessenen Strahlungstemperaturen der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems ermittelt.

#### 1. Berechnungsschritt 1

##### 1.1 Berechnung der Spaltendifferenz-Matrix Q

Wahl einer Bezugsspalte  $Q_j$  mit  $j = B$  im Bereich von  $j = 1$  bis  $j = m$   
 Berechnung der jeweiligen Differenz  $q_{i,j} = s_{i,j} - p_{i,j+1}$  für alle  $q_{i,j}$  mit  $j < B$ .  
 Jede Differenz  $q_{i,j}$  (der Bezugsspalte) für  $j = B$  erhält den Wert 0.  
 Berechnung der jeweiligen Differenz  $q_{i,j} = p_{i,j} - s_{i,j-1}$  für alle  $q_{i,j}$  mit  $j > B$ .

**[0068]** Fig. 2a zeigt schematisch die Spaltendifferenz-Matrix Q.

##### 1.2 Berechnung der Zeilendifferenz-Matrix R

Wahl einer Bezugszeile  $R_i$  mit  $i = b$  im Bereich von  $i = 1$  bis  $i = n$   
 Berechnung der jeweiligen Differenz  $r_{i,j} = z_{i,j} - p_{i+1,j}$  für alle  $r_{i,j}$  mit  $i < b$ .  
 Jede Differenz  $r_{i,j}$  (der Bezugszeile) für  $i = b$  erhält den Wert 0.  
 Berechnung der jeweiligen Differenz  $r_{i,j} = p_{i,j} - z_{i-1,j}$  für alle  $r_{i,j}$  mit  $i > b$ .

**[0069]** Fig. 2b zeigt schematisch die Zeilendifferenz-Matrix R.

##### 1.3 Berechnung der Ergebnis-Matrix E

Bildung des (eines) Bezugspunktes der Matrix E mit dem Wert  $e_{i=b,j=B} = 0$ .  
 $y$  und  $x$  sind natürliche Zahlen  
 Berechnung der Elemente:

$$e_{i=b,j=B+y} = e_{i=b,j=B+y-1} + q_{i=b,j=B+y}$$

mit  $1 \leq y \leq m - B$

$$e_{i=b,j=B-y} = e_{i=b,j=B-y+1} + q_{i=b,j=B-y}$$

mit  $1 \leq y < B$

$$e_{i=b+x,j=B} = e_{i=b+x-1,j=B} + r_{i=b+x,j=B}$$

mit  $1 \leq x \leq n - b$

$$e_{i=b-x,j=B} = e_{i=b-x+1,j=B} + r_{i=b-x,j=B}$$

mit  $1 \leq x < b$

**[0070]** Fig. 2c zeigt schematisch die Ergebnis-Matrix E.

Berechnung der weiteren Elemente der Ergebnis-Matrix E

**[0071]** Für alle Elemente (e) mit  $j < B$  und  $i < b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} + e_{i,j+1} + r_{i,j} + e_{i+1,j})/2$$

**[0072]** Für alle Elemente (e) mit  $j < B$  und  $i > b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} + e_{i,j+1} + r_{i,j} + e_{i-1,j})/2$$

**[0073]** Für alle Elemente (e) mit  $j > B$  und  $i < b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} + e_{i,j-1} + r_{i,j} + e_{i+1,j})/2$$

**[0074]** Für alle Elemente (e) mit  $j > B$  und  $i > b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} + e_{i,j-1} + r_{i,j} + e_{i-1,j})/2$$

**[0075]** Die Ergebnis-Matrix E zeigt nun ermittelte Differenzen der angezeigten Strahlungstemperatur der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems zum Bezugspunkt der Ergebnis-Matrix E. Diese ermittelten Differenzen der angezeigten Strahlungstemperatur der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems sind, bei einer Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems, mit Abweichungen behaftet. Deshalb folgt eine weitere Berechnung oder es folgen mehrere Berechnungen (Iterationen), nachdem jeweils die (erneut) ermittelten Werte der Differenzen der Strahlungstemperatur der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems, zur Korrektur der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems mit verwendet wurden.

#### 1.4 Berechnung der Differenzen der ermittelten Strahlungstemperaturen des Primärbildes P

Berechnung der Differenz der gemessenen Strahlungstemperatur aufgrund der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens des Bildaufnahmesystems in erster Näherung.

$$d_{i,j} = e_{i,j}$$

Berechnung der Matrix P1 mit der ersten Korrektur (Differenzbildung) des Primär-Bildes P

$$p1_{i,j} = p_{i,j} - d_{i,j}$$

**[0076]** Es sind nun die ersten Korrekturwerte (in erster Näherung) für jeden Bildpunkt als Temperaturdifferenz vorhanden, mit diesen wurde das Primär-Bild P korrigiert, es entstand die Matrix P1. Diese Korrekturwerte gelten nur für die jeweils ermittelte Strahlungstemperatur eines Bildpunktes. Diese Korrekturwerte (Temperaturdifferenzen) müssen nun in Korrekturfaktoren umgerechnet werden. Damit wird es möglich, die Ungleichheit des Übertragungsverhaltens des Bildaufnahmesystems (in erster Näherung) mit Gültigkeit für einen weiten Messbereich der Strahlungstemperatur zu korrigieren.

1.5 Berechnung der Korrekturfaktoren für das Primärbild P,  
für das Spaltenversatz-Bild S und für das Zeilenversatz-Bild Z

**[0077]** Die Umrechnung der Korrekturwerte in Korrekturfaktoren erfolgt mit Hilfe der Berechnung der resultierenden Strahldichten  $L_{\lambda,S}$  als Funktion der Temperatur  $T$  (in Kelvin) bei konstanten Bedingungen für die jeweilige Anwendung der Planck-Funktion bei der Anwendung einer bekannten Schwerpunktwellenlänge  $\lambda$  oder bei der Anwendung eines Wellenlängenbereiches ( $\lambda_1$  bis  $\lambda_2$ ) des Bildaufnahmesystems.

Planck-Funktion:

$$L_{\lambda,S} = \frac{c_1}{\pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{1}{n^2 \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T)} - 1}$$

mit

$$c_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

$$c_2 = 1,438786 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

$$\Omega_0 = 1 \text{ sr}$$

$$n = 1,000295 \text{ bei } 101,9 \text{ kPa}$$

**[0078]** Für die folgende Berechnung können die beiden ersten Terme der Planck-Funktion entfallen, da jeweils die Verhältnisse der resultierenden Strahldichten gebildet werden und das Ergebnis der beiden ersten Terme während der Bildaufnahmen jeweils konstant bleibt. Es wird:

$$X_{\lambda,S} = \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T)} - 1}$$

**[0079]**  $X_{\lambda,S}$  ist ein strahldichtepropotionaler Wert.

Berechnung eines strahldichtepropotionalen Wertes für das Primär-Bild P.

$$X_{\lambda,S}(p_{i,j}) = \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T(p_{i,j}))} - 1} ,$$

mit  $\lambda$  als Schwerpunktwellenlänge des Bildaufnahmesystems und  $T$  (in Kelvin) als Wert der ermittelten Strahlungstemperatur des jeweiligen Bildpunkts  $p_{i,j}$ . Berechnung eines strahldichtepropotionalen Wertes für die Matrix P1 (korrigiertes Primärbild P).

$$X_{\lambda,S}(p1_{i,j}) = \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T(p1_{i,j}))} - 1}$$

mit  $\lambda$  als Schwerpunktwellenlänge des Bildaufnahmesystems und  $T$  (in Kelvin) als Wert der Strahlungstemperatur des jeweiligen Bildpunktes  $p1_{i,j}$ . Berechnung der ersten Korrekturfaktoren  $k_0$  (in erster Näherung) des Bildaufnahmesystems.

$$k_0(p_{i,j}) = \frac{X_{\lambda,S}(p_{i,j})}{X_{\lambda,S}(p1_{i,j})}$$

**[0080]** Die Korrekturfaktoren  $k_0(p_{i,j})$  bilden die Korrekturfaktormatrix  $K_0$ . Berechnung von Strahldichten (Planck-Funktion) mit Werten der Strahlungstemperatur  $T$  (in Kelvin) der Bildpunkte des Primär-Bildes P, der Bildpunkte des Spaltenversatz-Bildes S und der Bildpunkte des Zeilenversatz-Bildes Z bei der bekannten Schwerpunktwellenlänge  $\lambda$  bzw. in einem Wellenlängenintervall.

Primär-Bild P:

$$L_{\lambda,S}(p_{i,j}) = \frac{c_1}{\pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{1}{n^2 \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T(p_{i,j}))} - 1}$$

Spaltenversatz-Bild S:

$$L_{\lambda,S}(s_{i,j}) = \frac{c_1}{\pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{1}{n^2 \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T(s_{i,j}))} - 1}$$

Zeilenversatz-Bild Z:

$$L_{\lambda,S}(z_{i,j}) = \frac{c_1}{\pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{1}{n^2 \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{n \cdot \lambda \cdot T(z_{i,j})} - 1}}$$

**[0081]** Es folgt die Korrektur der berechneten Strahldichten der drei Bilder P, S, Z durch die Division jeder berechneten Strahldichte mit dem zugehörigen ermittelten Korrekturfaktor  $k_0(p_{i,j})$  (in erster Näherung).

$$L_{k_1,\lambda,S}(p_{i,j}) = \frac{L_{\lambda,S}(p_{i,j})}{k_0(p_{i,j})}$$

$$L_{k_1,\lambda,S}(s_{i,j}) = \frac{L_{\lambda,S}(s_{i,j})}{k_0(p_{i,j})}$$

$$L_{k_1,\lambda,S}(z_{i,j}) = \frac{L_{\lambda,S}(z_{i,j})}{k_0(p_{i,j})}$$

**[0082]** Aus den korrigierten Strahldichten werden nun mit Hilfe der inversen Planck-Funktion die resultierenden korrigierten Strahlungstemperaturen für die Bildpunkte aller drei Bilder P, S, Z berechnet.  
inverse Planck-Funktion:

$$T_{\lambda,S} = \frac{c_2}{n \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{\ln(c_1/L_{\lambda,S} \cdot \pi \cdot \Omega_0 \cdot n^2 \cdot \lambda^5 + 1)} \quad (T_{\lambda,S} \text{ in Kelvin})$$

Primär-Bild P, erste Korrektur:

$$T_{k_1,\lambda,S}(p_{i,j}) = \frac{c_2}{n \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{\ln(c_1/L_{k_1,\lambda,S}(p_{i,j}) \cdot \pi \cdot \Omega_0 \cdot n^2 \cdot \lambda^5 + 1)}$$

Spaltenversatz-Bild S, erste Korrektur:

$$T_{k_1,\lambda,S}(s_{i,j}) = \frac{c_2}{n \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{\ln(c_1/L_{k_1,\lambda,S}(s_{i,j}) \cdot \pi \cdot \Omega_0 \cdot n^2 \cdot \lambda^5 + 1)}$$

Zeilenversatz-Bild Z, erste Korrektur:

$$T_{k_1,\lambda,S}(z_{i,j}) = \frac{c_2}{n \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{\ln(c_1/L_{k_1,\lambda,S}(z_{i,j}) \cdot \pi \cdot \Omega_0 \cdot n^2 \cdot \lambda^5 + 1)}$$

**[0083]** Für die drei Bilder P, S, Z existieren nun drei Matrizen mit den jeweils korrigierten Werten der (zuerst ermittelten) Strahlungstemperaturen für jeden Bildpunkt. Diese Matrizen werden bezeichnet mit  $P_{k_1}$ ,  $S_{k_1}$  und  $Z_{k_1}$ . Die Werte der Matrix  $P_{k_1}$  sind identisch mit den Werten der Matrix  $P_1$  (siehe oben). Es ist zu beachten, dass die Strahlungstemperaturen  $t_{k_1,\lambda,S}$  der Matrizen  $P_{k_1}$ ,  $S_{k_1}$  und  $Z_{k_1}$  (im Allgemeinen) wieder in der Einheit °C angegeben werden. Es gilt dann:

$$t_{kn,\lambda,S} = T_{kn,\lambda,S} - 273,15 \text{ K.}$$

**[0084]** Die berechnete Korrekturfaktormatrix  $K_0$  mit den Korrekturfaktoren  $k_0(p_{i,j})$  gibt den Wert der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems an und kann für die Korrektur genutzt werden. Bei der Anwendung von Berechnungsschritt 2 und weiteren Berechnungsschritten ergeben sich neue Werte für die Korrekturfaktormatrizen  $K_1$ ,  $K_2$  bis  $K_n$  mit den (neuen) Korrekturfaktoren  $k_1(p_{i,j})$ ,  $k_2(p_{i,j})$  bis  $k_n(p_{i,j})$ , für deren Werte jeweils kleinere Unsicherheiten zu erwarten sind.

## 2. Berechnungsschritt 2

**[0085]** Es folgt nun eine 1. Iteration des Berechnungsschritts 1, wobei anstelle der Bilder P, S, Z die Matrizen  $P_{k_1}$ ,  $S_{k_1}$ ,  $Z_{k_1}$  verwendet werden. Es ergeben sich für die 1. Iteration folgende Bezeichnungen.

Primär-Bild-Matrix:	$P_{k1}$
Spaltenversatz-Bild-Matrix:	$S_{k1}$
Zeilenversatz-Bild-Matrix:	$Z_{k1}$
Spaltendifferenz-Matrix	$Q_{k1}$
Zeilendifferenz-Matrix	$R_{k1}$
Ergebnis-Matrix:	$E_{k1}$
Korrekturfaktor-Matrix:	$K_1$

#### Berechnung der Ergebnis-Matrix $E_{k1}$

**[0086]** Die Berechnung der Ergebnis-Matrix  $E_{k1}$  erfolgt nach den Vorgaben von Punkt 1.3 wobei aber die Matrizen  $P_{k1}$ ,  $S_{k1}$  und  $Z_{k1}$  für diese Berechnung verwendet werden.

#### Berechnung der Differenzen der Strahlungstemperaturen der Matrix P1

Berechnung der Differenz der (korrigierten) Strahlungstemperatur aufgrund der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens des Bildaufnahmesystems.

$$d1_{i,j} = e_{k1,i,j}$$

Berechnung der Matrix P2 mit der Korrektur (Differenzbildung) der Matrix P1

$$p2_{i,j} = p1_{i,j} - d1_{i,j}$$

**[0087]** Es sind nun die zweiten Korrekturwerte für jeden Bildpunkt als Temperaturdifferenz vorhanden, mit diesen wurde die Matrix P1 korrigiert, es entstand die Matrix P2. Die Berechnung eines strahldichte-proportionalen Wertes  $X_{\lambda,S}(p_{i,j})$  für das Primär-Bild P erfolgte bereits in Punkt 1.5. Berechnung eines strahldichte-proportionalen Wertes für die Matrix P2

$$X_{\lambda,S}(p2_{i,j}) = \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T(p2_{i,j}))} - 1}$$

mit  $\lambda$  als Schwerpunktwellenlänge des Bildaufnahmesystems und T (in Kelvin) als Wert der Strahlungstemperatur des jeweiligen Bildpunktes  $p2_{i,j}$ . Berechnung der neuen (zweiten) Korrekturfaktoren  $k_1$  des Bildaufnahmesystems.

$$k_1(p_{i,j}) = \frac{X_{\lambda,S}(p_{i,j})}{X_{\lambda,S}(p2_{i,j})}$$

**[0088]** Die Korrekturfaktoren  $k_1(p_{i,j})$  bilden die Korrekturfaktormatrix  $K_1$ , wodurch die bisherige Korrekturfaktormatrix  $K_0$  ersetzt wird.

**[0089]** Die berechnete Korrekturfaktormatrix  $K_1$  mit den Korrekturfaktoren  $k_1(p_{i,j})$  gibt nun den (neuen) Wert der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems an und kann für die Korrektur genutzt werden. Die Korrekturfaktormatrix  $K_1$  weist allgemein kleinere Unsicherheiten gegenüber der (ersten) Korrekturfaktormatrix  $K_0$  auf.

**[0090]** Die Matrizen  $P_{k2}$ ,  $S_{k2}$  und  $Z_{k2}$  werden nun, wie im Punkt 1.5 beschrieben, berechnet, dabei wird aber die Korrekturfaktormatrix  $K_1$  verwendet.

### 3. Berechnungsschritt 3

**[0091]** Es kann eine 2. Iteration des Berechnungsschritt 1 erfolgen, wobei anstelle der Bilder P, S, Z die Matrizen  $P_{k2}$ ,  $S_{k2}$ ,  $Z_{k2}$  verwendet werden, diese sind als Ergebnis des Berechnungsschritts 2 entstanden. Es ergeben sich für die 2. Iteration folgende Bezeichnungen.

Primär-Bild-Matrix:	$P_{k2}$
Spaltenversatz-Bild-Matrix:	$S_{k2}$
Zeilenversatz-Bild-Matrix:	$Z_{k2}$
Spaltendifferenz-Matrix	$Q_{k2}$
Zeilendifferenz-Matrix	$R_{k2}$
Ergebnis-Matrix:	$E_{k2}$
Korrekturfaktoren-Matrix:	$K_2$

#### Berechnung der Ergebnis-Matrix $E_{k2}$

**[0092]** Die Berechnung der Ergebnis-Matrix  $E_{k2}$  erfolgt nach den Vorgaben von Punkt 1.3 wobei aber die Matrizen  $P_{k2}$ ,  $S_{k2}$  und  $Z_{k2}$  für diese Berechnung verwendet werden.

#### Berechnung der Differenzen der Strahlungstemperaturen der Matrix P2

Berechnung der Differenz der (korrigierten) Strahlungstemperatur aufgrund der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens des Bildaufnahmesystems.

$$d2_{i,j} = e_{k2,i,j}$$

Berechnung der Matrix P3 mit der Korrektur (Differenzbildung) der Matrix P2

$$p3_{i,j} = p2_{i,j} - d2_{i,j}$$

**[0093]** Es sind nun die dritten Korrekturwerte für jeden Bildpunkt als Temperaturdifferenz vorhanden, mit diesen wurde die Matrix P2 korrigiert, es entstand die Matrix P3. Die Berechnung eines strahldichteproportionalen Wertes  $X_{\lambda,S}(p_{i,j})$  für das Primär-Bild P erfolgte bereits in Punkt 1.5. Berechnung eines strahldichteproportionalen Wertes für die Matrix P3

$$X_{\lambda,S}(p3_{i,j}) = \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T(p3_{i,j}))} - 1}$$

mit  $\lambda$  als Schwerpunktwellenlänge des Bildaufnahmesystems und T (in Kelvin) als Wert der Strahlungstemperatur des jeweiligen Bildpunktes  $p3_{i,j}$ . Berechnung der neuen (dritten) Korrekturfaktoren  $k_2$  des Bildaufnahmesystems.

$$k_2(p_{i,j}) = \frac{X_{\lambda,S}(p_{i,j})}{X_{\lambda,S}(p3_{i,j})}$$

**[0094]** Die Korrekturfaktoren  $k_2(p_{i,j})$  bilden die Korrekturfaktormatrix  $K_2$ , wodurch die bisherige Korrekturfaktormatrix  $K_1$  ersetzt wird. Die berechnete Korrekturfaktormatrix  $K_2$  mit den Korrekturfaktoren  $k_2(p_{i,j})$  gibt nun den (neuen) Wert der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems an und kann für die Korrektur genutzt werden. Die Korrekturfaktormatrix  $K_2$  weist allgemein kleinere Unsicherheiten gegenüber der (ersten und zweiten) Korrekturfaktormatrix  $K_0$  und  $K_1$  auf. Für weitere Iterationen können nun die Matrizen  $P_{k3}$ ,  $S_{k3}$  und  $Z_{k3}$ , wie im Punkt 1.5 beschrieben, berechnet werden, dabei wird aber die Korrekturfaktormatrix  $K_2$  verwendet.

#### 4. Berechnungsschritt 4 bis n

**[0095]** Es können weitere Iterationen, analog zu den Punkten 2 und 3 durchgeführt werden. Die verbleibende Unsicherheit in der praktischen Bestimmung der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems wird durch das Rauschen des Bildaufnahmesystems und durch Kurzzeit-Instabilitäten der verwendeten Komponenten mit bestimmt.

**[0096]** Die Änderung der Werte der berechneten Strahlungstemperaturen einer Iteration zu den Werten der gemessenen Strahlungstemperaturen, beziehungsweise zu den Werten der jeweils berechneten Strahlungstemperaturen der vorherigen Iteration, wird als Kriterium für den Abbruch der Iterationen verwendet. Der Grenz-

wert für die Änderung wird je nach angestrebter Unsicherheit festgelegt. Berechnungen mit 2 Iterationen können bereits sehr kleine Änderungen aufweisen.

#### D. Berechnung der Variante 2.2

**[0097]** Das Bildaufnahmesystem zeigt für alle Bildpunkte Strahlungstemperaturen  $t_{\lambda,S}$  in Grad Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) an. Erfolgt die Anzeige in einer anderen Maßeinheit der Strahlungstemperatur, so werden die angezeigten Werte in die Maßeinheit  $^{\circ}\text{C}$  umgerechnet, bevor der Algorithmus ausgeführt wird. Mit der Ergebnis-Matrix E werden (zuerst) die Werte der Differenzen der gemessenen Strahlungstemperaturen der Objektpunkte der Quelle ermittelt.

##### 1. Berechnungsschritt 1

###### 1.1 Berechnung der Spaltendifferenz-Matrix Q

Wahl einer Bezugsspalte  $Q_j$  mit  $j = B$  im Bereich von  $j = 1$  bis  $j = m$   
 Berechnung der jeweiligen Differenz  $q_{i,j} = p_{i,j} - s_{i,j}$  für alle  $q_{i,j}$  mit  $j < B$ .  
 Jede Differenz  $q_{i,j}$  (der Bezugsspalte) für  $j = B$  erhält den Wert 0.  
 Berechnung der jeweiligen Differenz  $q_{i,j} = s_{i,j} - p_{i,j}$  für alle  $q_{i,j}$  mit  $j > B$ .

**[0098]** Fig. 2a zeigt schematisch die Spaltendifferenz-Matrix Q.

###### 1.2 Berechnung der Zeilendifferenz-Matrix R

Wahl einer Bezugszeile  $R_i$  mit  $i = b$  im Bereich von  $i = 1$  bis  $i = n$   
 Berechnung der jeweiligen Differenz  $r_{i,j} = p_{i,j} - z_{i,j}$  für alle  $r_{i,j}$  mit  $i < b$ .  
 Jede Differenz  $r_{i,j}$  (Bezugszeile) für  $i = b$  erhält den Wert 0.  
 Berechnung der jeweiligen Differenz  $r_{i,j} = z_{i,j} - p_{i,j}$  für alle  $r_{i,j}$  mit  $i > b$ .

**[0099]** Fig. 2b zeigt schematisch die Zeilendifferenz-Matrix R.

###### 1.3 Berechnung der Ergebnis-Matrix E

Bildung des (eines) Bezugspunktes der Matrix E mit dem Wert  $e_{i=b,j=B} = 0$ .  
 $y$  und  $x$  sind natürliche Zahlen  
 Berechnung der Elemente:

$$e_{i=b,j=B+y} = e_{i=b,j=B+y-1} + q_{i=b,j=B+y}$$

mit  $1 \leq y \leq m - B$

$$e_{i=b,j=B-y} = e_{i=b,j=B-y+1} + q_{i=b,j=B-y}$$

mit  $1 \leq y < B$

$$e_{i=b+x,j=B} = e_{i=b+x-1,j=B} + r_{i=b+x,j=B}$$

mit  $1 \leq x \leq n - b$

$$e_{i=b-x,j=B} = e_{i=b-x+1,j=B} + r_{i=b-x,j=B}$$

mit  $1 \leq x < b$

**Fig. 2c** zeigt schematisch die Ergebnis-Matrix E.

Berechnung der weiteren Elemente der Ergebnis-Matrix E

**[0100]** Für alle Elemente ( $e$ ) mit  $j < B$  und  $i < b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} + e_{i,j+1} + r_{i,j} + e_{i+1,j})/2$$

**[0101]** Für alle Elemente (e) mit  $j < B$  und  $i > b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} + e_{i,j+1} + r_{i,j} + e_{i-1,j})/2$$

**[0102]** Für alle Elemente (e) mit  $j > B$  und  $i < b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} + e_{i,j-1} + r_{i,j} + e_{i+1,j})/2$$

**[0103]** Für alle Elemente (e) mit  $j > B$  und  $i > b$  folgt,

$$e_{i,j} = (q_{i,j} + e_{i,j-1} + r_{i,j} + e_{i-1,j})/2$$

**[0104]** Die Ergebnis-Matrix E zeigt nun ermittelte Differenzen der gemessenen Strahlungstemperatur der Objektpunkte der Quelle zum Bezugspunkt der Ergebnis-Matrix E. Diese ermittelten Differenzen der Strahlungstemperatur der Objektpunkte der Quelle sind, bei einer Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems, mit Abweichungen behaftet. Deshalb folgt eine weitere Berechnung oder es folgen mehrere Berechnungen (Iterationen), nachdem jeweils die (erneut) ermittelten Werte der Differenzen der Strahlungstemperatur der Objektpunkte, zur Korrektur der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte des Bildaufnahmesystems verwendet wurden.

#### 1.4 Berechnung der Differenzen der ermittelten Strahlungstemperaturen des Primärbildes P

Differenzen zum Bezugspunkt  $\Delta p_{i,j} = p_{i,j} - p_{i=b,j=B}$

Berechnung der Differenz der gemessenen Strahlungstemperatur aufgrund der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens des Bildaufnahmesystems in erster Näherung.

$$d_{i,j} = \Delta p_{i,j} - e_{i,j}$$

Berechnung der Matrix P1 mit der ersten Korrektur (Differenzbildung) des Primär-Bildes P

$$p1_{i,j} = p_{i,j} - d_{i,j}$$

**[0105]** Es sind nun die ersten Korrekturwerte (in erster Näherung) für jeden Bildpunkt als Temperaturdifferenz vorhanden, mit diesen wurde das Primär-Bild P korrigiert, es entstand die Matrix P1. Diese Korrekturwerte gelten nur für die jeweils ermittelte Strahlungstemperatur eines Bildpunktes. Diese Korrekturwerte (Temperaturdifferenzen) müssen nun in Korrekturfaktoren umgerechnet werden. Damit wird es möglich, die Ungleichheit des Übertragungsverhaltens des Bildaufnahmesystems (in erster Näherung) mit Gültigkeit für einen weiten Messbereich der Strahlungstemperatur zu korrigieren.

#### 1.5 Berechnung der Korrekturfaktoren für das Primärbild P, für das Spaltenversatz-Bild S und für das Zeilenversatz-Bild Z

**[0106]** Die Umrechnung der Korrekturwerte in Korrekturfaktoren erfolgt mit Hilfe der Berechnung der resultierenden Strahldichten  $L_{\lambda,S}$  als Funktion der Temperatur T (in Kelvin) bei konstanten Bedingungen für die jeweilige Anwendung der Planck-Funktion bei der Anwendung einer bekannten Schwerpunktwellenlänge  $\lambda$  oder bei der Anwendung eines Wellenlängenbereiches ( $\lambda_1$  bis  $\lambda_2$ ) des Bildaufnahmesystems.

Planck-Funktion:

$$L_{\lambda,S} = \frac{c_1}{\pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{1}{n^2 \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T)} - 1}$$

mit

$$c_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

$$c_2 = 1,438786 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

$$\Omega_0 = 1 \text{ sr}$$

$$n = 1,000295 \text{ bei } 101,9 \text{ kPa}$$



**[0107]** Für die folgende Berechnung können die beiden ersten Terme der Planck-Funktion entfallen, da jeweils die Verhältnisse der resultierenden Strahldichten gebildet werden und das Ergebnis der beiden ersten Terme während der Bildaufnahmen jeweils konstant bleibt. Es wird:

$$X_{\lambda,S} = \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T)} - 1}$$

**[0108]**  $X_{\lambda,S}$  ist ein strahldichte-proportionaler Wert.

**[0109]** Berechnung eines strahldichte-proportionalen Wertes für das Primär-Bild P.

$$X_{\lambda,S}(p_{i,j}) = \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T(p_{i,j}))} - 1},$$

mit  $\lambda$  als Schwerpunktwellenlänge des Bildaufnahmesystems und T (in Kelvin) als Wert der ermittelten Strahlungstemperatur des jeweiligen Bildpunktes  $p_{i,j}$ . Berechnung eines strahldichte-proportionalen Wertes für die Matrix P1 (korrigiertes Primärbild P).

$$X_{\lambda,S}(p1_{i,j}) = \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T(p1_{i,j}))} - 1}$$

mit  $\lambda$  als Schwerpunktwellenlänge des Bildaufnahmesystems und T (in Kelvin) als Wert der Strahlungstemperatur des jeweiligen Bildpunktes  $p1_{i,j}$ . Berechnung der ersten Korrekturfaktoren  $k_0$  (in erster Näherung) des Bildaufnahmesystems.

$$k_0(p_{i,j}) = \frac{X_{\lambda,S}(p_{i,j})}{X_{\lambda,S}(p1_{i,j})}$$

**[0110]** Die Korrekturfaktoren  $k_0(p_{i,j})$  bilden die Korrekturfaktormatrix  $K_0$ . Berechnung von Strahldichten (Planck-Funktion) mit Werten der Strahlungstemperatur T (in Kelvin) der Bildpunkte des Primär-Bildes P, der Bildpunkte des Spaltenversatz-Bildes S und der Bildpunkte des Zeilenversatz-Bildes Z bei der bekannten Schwerpunktwellenlänge  $\lambda$  bzw. in einem Wellenlängenintervall.  
Primär-Bild P:

$$L_{\lambda,S}(p_{i,j}) = \frac{c_1}{\pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{1}{n^2 \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T(p_{i,j}))} - 1}$$

Spaltenversatz-Bild S:

$$L_{\lambda,S}(s_{i,j}) = \frac{c_1}{\pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{1}{n^2 \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T(s_{i,j}))} - 1}$$

Zeilenversatz-Bild Z:

$$L_{\lambda,S}(z_{i,j}) = \frac{c_1}{\pi \cdot \Omega_0} \cdot \frac{1}{n^2 \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(n \cdot \lambda \cdot T(z_{i,j}))} - 1}$$

**[0111]** Es folgt die Korrektur der berechneten Strahldichten der drei Bilder P, S, Z durch die Division jeder berechneten Strahldichte mit dem zugehörigen ermittelten Korrekturfaktor  $k_0(p_{i,j})$  (in erster Näherung).

$$L_{k_1,\lambda,S}(p_{i,j}) = \frac{L_{\lambda,S}(p_{i,j})}{k_0(p_{i,j})}$$

$$L_{k_1,\lambda,S}(s_{i,j}) = \frac{L_{\lambda,S}(s_{i,j})}{k_0(p_{i,j})}$$

$$L_{k_1,\lambda,S}(z_{i,j}) = \frac{L_{\lambda,S}(z_{i,j})}{k_0(p_{i,j})}$$

**[0112]** Aus den korrigierten Strahldichten werden nun mit Hilfe der inversen Planck-Funktion die resultierenden korrigierten Strahlungstemperaturen für die Bildpunkte aller drei Bilder P, S, Z berechnet.  
inverse Planck-Funktion:

$$T_{\lambda,S} = \frac{c_2}{n \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{\ln(c_1/L_{\lambda,S} \cdot \pi \cdot \Omega_0 \cdot n^2 \cdot \lambda^5 + 1)} \quad (T_{\lambda,S} \text{ in Kelvin})$$

Primär-Bild P, erste Korrektur:

$$T_{k1,\lambda,S}(p_{i,j}) = \frac{c_2}{n \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{\ln(c_1/L_{k1,\lambda,S}(p_{i,j}) \cdot \pi \cdot \Omega_0 \cdot n^2 \cdot \lambda^5 + 1)}$$

Spaltenversatz-Bild S, erste Korrektur:

$$T_{k1,\lambda,S}(s_{i,j}) = \frac{c_2}{n \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{\ln(c_1/L_{k1,\lambda,S}(s_{i,j}) \cdot \pi \cdot \Omega_0 \cdot n^2 \cdot \lambda^5 + 1)}$$

Zeilenversatz-Bild Z, erste Korrektur:

$$T_{k1,\lambda,S}(z_{i,j}) = \frac{c_2}{n \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{\ln(c_1/L_{k1,\lambda,S}(z_{i,j}) \cdot \pi \cdot \Omega_0 \cdot n^2 \cdot \lambda^5 + 1)}$$

**[0113]** Für die drei Bilder P, S, Z existieren nun drei Matrizen mit den jeweils korrigierten Werten der (zuerst ermittelten) Strahlungstemperaturen für jeden Bildpunkt. Diese Matrizen werden bezeichnet mit  $P_{k1}$ ,  $S_{k1}$  und  $Z_{k1}$ . Die Werte der Matrix  $P_{k1}$  sind identisch mit den Werten der Matrix P1 (siehe oben). Es ist zu beachten, dass die Strahlungstemperaturen  $t_{k1,\lambda,S}$  der Matrizen  $P_{k1}$ ,  $S_{k1}$  und  $Z_{k1}$  (im Allgemeinen) wieder in der Einheit °C angegeben werden. Es gilt dann:

$$t_{kn,\lambda,S} = T_{kn,\lambda,S} - 273,15 \text{ K.}$$

**[0114]** Die berechnete Korrekturfaktormatrix  $K_0$  mit den Korrekturfaktoren  $k_0(p_{i,j})$  gibt den Wert der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems an und kann für die Korrektur genutzt werden. Bei der Anwendung von Berechnungsschritt 2 und weiteren Berechnungsschritten ergeben sich neue Werte für die Korrekturfaktormatrizen  $K_1$ ,  $K_2$  bis  $K_n$  mit den (neuen) Korrekturfaktoren  $k_1(p_{i,j})$ ,  $k_2(p_{i,j})$  bis  $k_n(p_{i,j})$ , für deren Werte jeweils kleinere Unsicherheiten zu erwarten sind.

## 2. Berechnungsschritt 2

**[0115]** Es folgt nun eine 1. Iteration des Berechnungsschritts 1, wobei anstelle der Bilder P, S, Z die Matrizen  $P_{k1}$ ,  $S_{k1}$ ,  $Z_{k1}$  verwendet werden. Es ergeben sich für die 1. Iteration folgende Bezeichnungen.

Primär-Bild-Matrix:	$P_{k1}$
Spaltenversatz-Bild-Matrix:	$S_{k1}$
Zeilenversatz-Bild-Matrix:	$Z_{k1}$
Spaltendifferenz-Matrix	$Q_{k1}$
Zeilendifferenz-Matrix	$R_{k1}$
Ergebnis-Matrix:	$E_{k1}$
Korrekturfaktor-Matrix:	$K_1$

**[0116]** Die Korrekturfaktoren  $k_1(p_{i,j})$  bilden die Korrekturfaktormatrix  $K_1$ , wodurch die bisherige Korrekturfaktormatrix  $K_0$  ersetzt wird. Die berechnete Korrekturfaktormatrix  $K_1$  mit den Korrekturfaktoren  $k_1(p_{i,j})$  gibt nun den (neuen) Wert der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems an und kann für die Korrektur genutzt werden. Die Korrekturfaktormatrix  $K_1$  weist allgemein kleinere Unsicherheiten gegenüber der (ersten) Korrekturfaktormatrix  $K_0$  auf. Die Matrizen  $P_{k2}$ ,  $S_{k2}$  und  $Z_{k2}$  werden nun, wie im Punkt 1.5 beschrieben, berechnet, dabei wird aber die Korrekturfaktormatrix  $K_1$  verwendet.

## 3. Berechnungsschritt 3

**[0117]** Es kann eine 2. Iteration des Berechnungsschritt 1 erfolgen, wobei anstelle der Bilder P, S, Z die Matrizen  $P_{k2}$ ,  $S_{k2}$ ,  $Z_{k2}$  verwendet werden, diese sind als Ergebnis des Berechnungsschritts 2 entstanden. Es ergeben sich für die 2. Iteration folgende Bezeichnungen.

Primär-Bild-Matrix:	$P_{k2}$
Spaltenversatz-Bild-Matrix:	$S_{k2}$
Zeilenversatz-Bild-Matrix:	$Z_{k2}$
Spaltendifferenz-Matrix	$Q_{k2}$
Zeilendifferenz-Matrix	$R_{k2}$
Ergebnis-Matrix:	$E_{k2}$
Korrekturfaktoren-Matrix:	$K_2$

**[0118]** Die berechnete Korrekturfaktormatrix  $K_2$  mit den Korrekturfaktoren  $k_2(p_{ij})$  gibt nun den (neuen) Wert der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems an und kann für die Korrektur genutzt werden. Die Korrekturfaktormatrix  $K_2$  weist allgemein kleinere Unsicherheiten gegenüber der (ersten und zweiten) Korrekturfaktormatrix  $K_0$  und  $K_1$  auf.

**[0119]** Für weitere Iterationen können nun die Matrizen  $P_{k3}$ ,  $S_{k3}$  und  $Z_{k3}$ , wie im Punkt 1.5 beschrieben, berechnet werden, dabei wird aber die Korrekturfaktormatrix  $K_2$  verwendet.

## 4. Berechnungsschritt 4 bis n

**[0120]** Es können weitere Iterationen, analog zu den Punkten 2 und 3 durchgeführt werden. Die verbleibende Unsicherheit in der praktischen Bestimmung der Ungleichheit des Übertragungsverhaltens der Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems wird durch das Rauschen des Bildaufnahmesystems und durch Kurzzeit-Instabilitäten der verwendeten Komponenten mit bestimmt.

**[0121]** Die Änderung der Werte der berechneten Strahlungstemperaturen einer Iteration zu den Werten der gemessenen Strahlungstemperaturen, beziehungsweise zu den Werten der jeweils berechneten Strahlungstemperaturen der vorherigen Iteration, wird als Kriterium für den Abbruch der Iterationen verwendet. Der Grenzwert für die Änderung wird je nach angestrebter Unsicherheit festgelegt. Berechnungen mit 2 Iterationen können bereits sehr kleine Änderungen aufweisen.

**[0122]** Im Folgenden wird ein Beispiel für eine Aufnahme der Bilder mit Bezug auf **Fig. 3** näher erläutert. **Fig. 3** zeigt schematisch eine Strahlungsquelle **10** und ein Bildaufnahmesystem **12** zum Aufnehmen der Strahlungsquelle **10**. Das Bildaufnahmesystem **12** umfasst eine schematisch gezeigte Optik **14** und einen Bildsensor **16**. Schematisch eingezeichnet ist eine Draufsicht, also eine Ansicht in Richtung B-B, auf den Bildsensor **16**. Es ist zu erkennen, dass der Bildsensor **16** eine Vielzahl an Bildpunkt-Spalten und eine Vielzahl an Bildpunkt-Zeilen aufweist.

**[0123]** Wird mit dem Bildsensor **16** ein Bild aufgenommen, so entsteht ein Primär-Bild P mit den Elementen  $p_{ij}$ . Mit dem Bezugszeichen **18** ist die Projektion des Bildsensors **16** durch die Optik **14** auf die Strahlungsquelle **10** bezeichnet, die ganz links in einer Draufsicht in Blickrichtung A gezeigt ist. Es ist zu beachten, dass in den Berechnungen (Variante 1.1 ... Variante 2.2) ein Spaltenversatz nach rechts und ein Zeilenversatz nach unten verwendet wurde.

**[0124]** Nach dem Aufnehmen des Primär-Bilds wird ein spaltenversetztes Bild mit Spalten-Versatz aufgenommen. Die Projektion dieses Bildes auf die Strahlungsquelle **10** ist schematisch unterhalb der Projektion **18** des Primär-Bilds gezeigt, um die Übersichtlichkeit zu erhöhen. Die Projektion des spaltenversetzten Bildes hat das Bezugszeichen **20**, die Projektion des zeilenversetzten Bildes das Bezugszeichen **22**. Es ist zu erkennen, dass der Zeilenversatz und der Spaltenversatz in der vorliegenden Ausführungsform, in seinem Raster und in seiner Größe, genau dem einfachen projizierten Bildabstand entspricht.

**[0125]** Wird ein Kontroll-Bild aufgenommen, so entspricht dessen Projektion im Idealfall genau der Projektion **18** des Primär-Bilds. Aus diesem Grund ist die Projektion des Kontroll-Bilds in **Fig. 3** nicht eingezeichnet.

**[0126]** Fig. 3 zeigt schematisch zudem eine Signalverarbeitungs- und Auswerteeinheit **24**, die mit dem Bildsensor **16** verbunden ist und einen Speicher **26** aufweist.

**[0127]** Die Signalverarbeitungs- und Auswerteeinheit **24** oder ein externes Gerät, z. B. ein Rechner (PC), welches mit der Signalverarbeitungs- und Auswerteeinheit **24** verbunden ist, führt eines der oben beschriebenen Verfahren durch, sodass die Korrekturmatrix erhalten wird. Die Werte der Korrekturmatrix werden im Speicher **26** oder im Speicher eines externen Gerätes abgelegt. Nach Abschluss der Kalibrierung werden die Messwerte, die von dem Bildsensor **16** aufgenommen werden, anhand der Korrekturparameter, die im Speicher **26** oder im externen Gerät abgelegt sind, von der Signalverarbeitungs- und Auswerteeinheit **24** oder von dem externen Gerät korrigiert.

**[0128]** Fig. 4 zeigt eine Anordnung, bei der die Verschiebung in Zeilen- und Spaltenrichtung sich auf Reihen von Bildpunkten bezieht, deren Eckpunkte benachbart sind.

#### Bezugszeichenliste

<b>10</b>	Strahlungsquelle
<b>12</b>	Bildaufnahmesystem
<b>14</b>	Optik
<b>16</b>	Bildsensor
<b>18</b>	Projektion des Primär-Bildes
<b>20</b>	Projektion des spaltenversetzten Bildes
<b>22</b>	Projektion des zeilenversetzten Bildes
<b>24</b>	Auswerteeinheit
<b>26</b>	Speicher

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln von Korrekturparametern zum Korrigieren von Messwerten von Bildpunkten, um die Ungleichheit des Übertragungsverhaltens einzelner oder aller Bildpunkte eines Bildaufnahmesystems zu korrigieren, wobei das Bildaufnahmesystem eine Vielzahl an Bildpunkt-Spalten und eine Vielzahl an Bildpunkt-Zeilen aus Bildpunkten aufweist, mit den Schritten:

- (a) Aufnehmen einer Strahlungsquelle mit zeitlich hinreichend konstanter Strahldichte mit dem Bildaufnahmesystem, sodass ein Primär-Bild erhalten wird,
- (b) Aufnehmen dieser Strahlungsquelle mit Spalten-Versatz, sodass ein spaltenversetztes Bild erhalten wird,
- (c) Aufnehmen dieser Strahlungsquelle mit Zeilen-Versatz, sodass ein zeilenversetztes Bild erhalten wird, und
- (d) Berechnen einer Korrekturfaktormatrix aus dem Primär-Bild, dem zeilenversetzten Bild und dem spaltenversetzten Bild, die Korrekturparameter zum Korrigieren von Messwerten der Bildpunkte enthält.

2. Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch die Schritte:

- (i) Aufnehmen dieser Strahlungsquelle zeitlich nach der Ausführung der Schritte (a), (b), und (c) so, wie das Primär-Bild aufgenommen wurde, sodass ein Kontroll-Bild erhalten wird, und
- (ii) Erfassen einer gemeinsamen zeitlichen Stabilität der Strahlungsquelle und des Bildaufnahmesystems aus dem Primär-Bild und dem Kontroll-Bild.

3. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Aufnehmen mit Zeilen-Versatz so erfolgt, dass im zeilenversetzten Bild für eine Mehrheit der Bildpunkte gilt, dass der jeweilige Bildpunkt Strahlung von einem Bereich der Strahlungsquelle erhält, dessen Strahlung bei der Aufnahme des Primär-Bilds zu einem Anteil von zumindest 80%, insbesondere von zumindest 90%, von nur einem anderen Bildpunkt aufgenommen wurde.

4. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Zeilen-Versatz einen ganzzahligen auf die Strahlungsquelle projizierten Bildpunkt-Abstand beträgt.

5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Aufnehmen mit Spalten-Versatz so erfolgt, dass im spaltenversetzten Bild für eine Mehrheit der Bildpunkte gilt, dass der jeweilige Bildpunkt Strahlung von einem Bereich der Strahlungsquelle erhält, dessen Strahlung bei der Aufnahme des Primär-Bilds zu einem Anteil von zumindest 80%, insbesondere von zumindest 90%, von nur einem anderen Bildpunkt aufgenommen wurde.

6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Berechnen der Korrekturfaktormatrix die folgenden Schritte umfasst:

- (a) aus dem Primär-Bild und dem spaltenversetzten Bild Berechnen einer Spaltenquotient-Matrix mit den Quotienten von spaltenversetzten Messwerten,
- (b) aus dem Primär-Bild und dem zeilenversetzten Bild Berechnen einer Zeilenquotient-Matrix mit den Quotienten von zeilenversetzten Messwerten und
- (c) Berechnen einer Ergebnis-Matrix aus der Spaltenquotient-Matrix und der Zeilenquotient-Matrix.

7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Berechnen der Korrekturfaktormatrix die folgenden Schritte umfasst:

- (a) aus dem Primär-Bild und dem zeilenversetzten Bild Berechnen einer Spaltendifferenz-Matrix mit den Differenzen von spaltenversetzten Messwerten,
- (b) aus dem Primär-Bild und dem zeilenversetzten Bild Berechnen einer Zeilendifferenz-Matrix mit den Differenzen von zeilenversetzten Messwerten und
- (c) Berechnen einer Ergebnis-Matrix aus der Spaltendifferenz-Matrix und der Zeilendifferenz-Matrix.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Algorithmen 1.1 und 1.2

Algorithmen 2.1 und 2.2

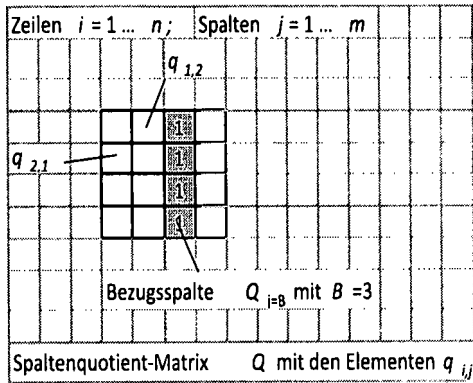


Fig. 1a

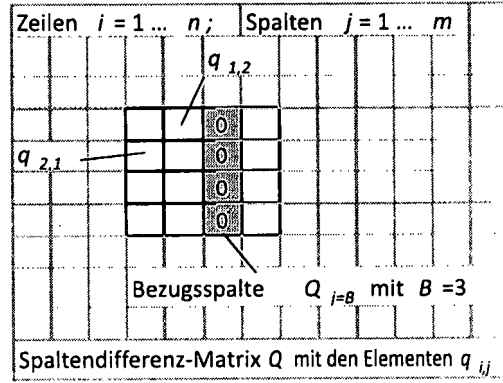


Fig. 2a

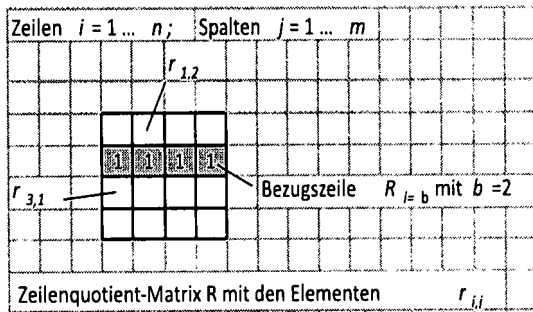


Fig. 1b

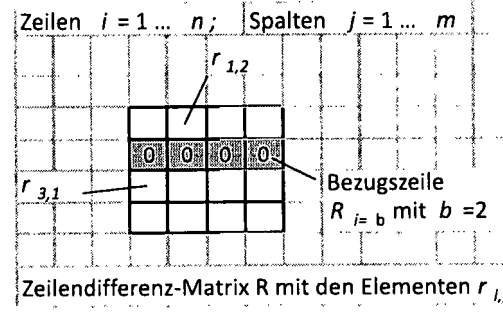


Fig. 2b

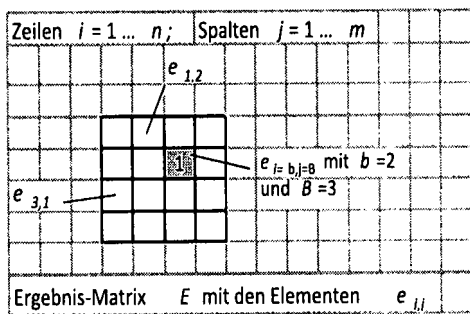


Fig. 1c

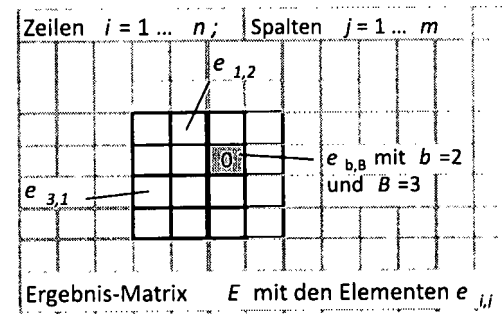


Fig. 2c

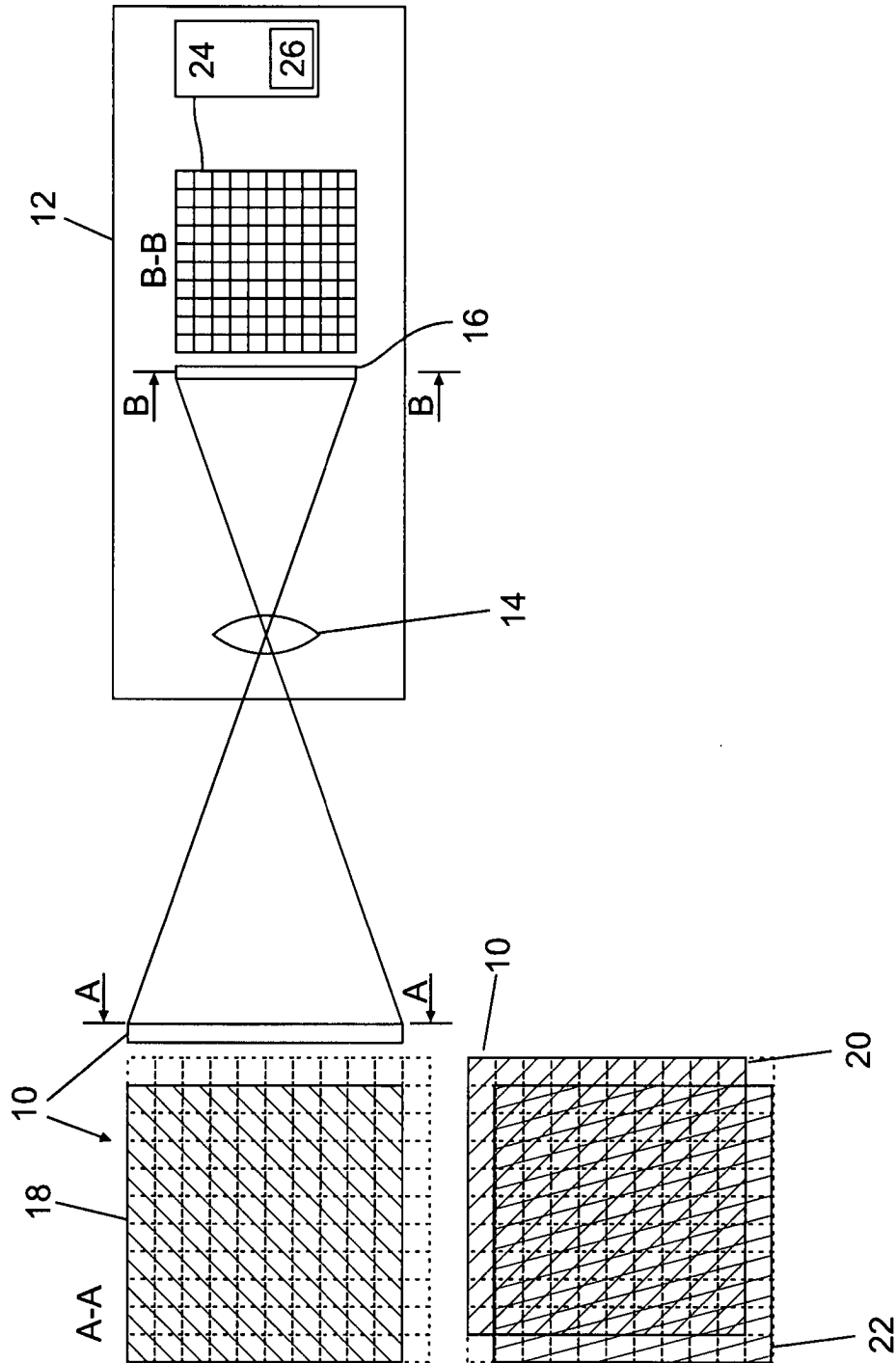


Fig. 3

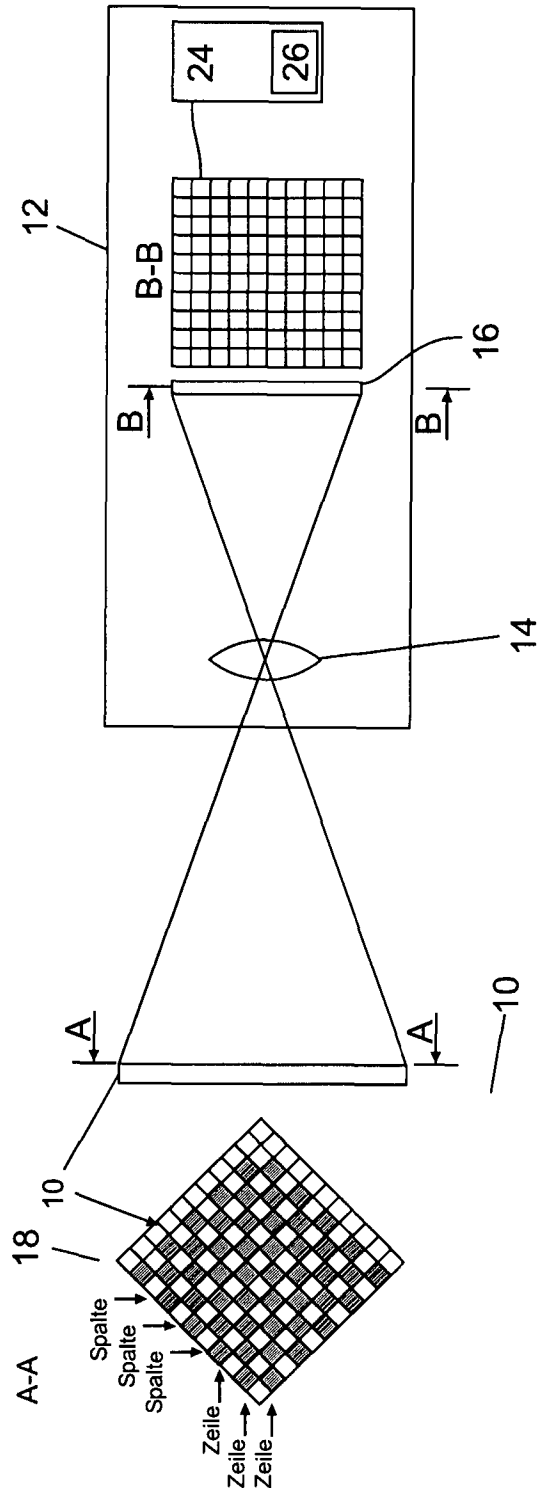


Fig. 4