

## VERFAHREN ZUM TEMPERIEREN VON BAUTEILEN ZUR HERSTELLUNG EINER LÖT- ODER SINTERVERBINDUNG UND LÖT- ODER SINTERVORRICHTUNG

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Temperieren von Bauteilen zur Herstellung einer Löt- oder Sinterverbindung zwischen den Bauteilen, wobei zum Bereitstellen von auf die Bauteile zu übertragender Wärmeenergie wenigstens eine regelbare Wärmequelle vorgesehen ist.

Des Weiteren betrifft die Erfindung eine Löt- oder Sintervorrichtung zum Herstellen einer Löt- oder Sinterverbindung zwischen Bauteilen, wobei die Löt- oder Sintervorrichtung wenigstens eine regelbare Wärmequelle aufweist, welche zum Bereitstellen von auf die Bauteile zu übertragender Wärmeenergie eingerichtet ist.

### Stand der Technik

Beim Sintern und Löten können zwei oder mehr Bauteile, insbesondere elektronische Bauteile und Substrate, mittels eines Fügwerkstoffs miteinander elektrisch und/oder thermisch leitend verbunden werden, wobei hierbei der verbindende Fügwerkstoff gesintert bzw. aufgeschmolzen wird. Die zu verbindenden Bauteile können hierbei zwischen einem Oberwerkzeug und einem Unterwerkzeug verpresst werden, wobei der Pressdruck beim Sintern der Regel wesentlich höher ist als beim Löten. Die zum Sintern oder Löten notwendige Wärmeenergie kann bei herkömmlichen Sinter- oder Lötvorrichtungen über das Oberwerkzeug und das Unterwerkzeug auf die Bauteile übertragen werden.

Beispielhafte herkömmliche Sinter- oder Lötvorrichtungen sowie entsprechende Verfahren sind zum Beispiel in DE 10 2006 034 600 B4, DE 203 00 375 U1, DE 10 2004 047 359 B3, DE 10 2012 206 403 B3 und WO 2014/135151 A2 beschrieben.

Die zur Herstellung von Löt- oder Sinterverbindungen verwendeten Vorrichtungen oder Anlagen können eine oder mehrere Prozesskammern aufweisen, in denen die zur Durchführung des Löt- bzw. Sinterverfahrens nötige Prozessatmosphäre eingestellt und insbesondere auch während des Verfahrens verändert werden kann. Die zu verbindenden Bauteile, die vorgängig zu Baugruppen zusammengefasst werden und gegebenenfalls in geeigneter Weise zur Einhaltung der gewünschten Positionen durch geeignete Mittel relativ zueinander

fixiert sein können, können durch geeignete Transportmittel zu, von und zwischen den verschiedenen Prozesskammern transportiert werden. Die Prozessatmosphäre in einer jeweiligen Prozesskammer kann beispielsweise hinsichtlich ihrer Stoffzusammensetzung, ihres Drucks und/oder ihrer Temperatur eingestellt und/oder verändert werden. Beispielsweise können Drücke zwischen 1 hPa und 1200 hPa unter der Verwendung unterschiedlicher Prozessgasgemische einstellbar sein.

Bei herkömmlichen Löt- oder Sintervorrichtungen kann der Eintrag der Wärmeenergie über das Oberwerkzeug und/oder das Unterwerkzeug erfolgen. Grundsätzlich können auch im Abstand veränderliche beheizte Platten oder Infrarotstrahler als Wärmequelle dienen. Eine weitere Möglichkeit zur Erwärmung der Bauteile besteht darin, die Wärmeenergie durch Induktion in die Bauteile oder in eine geeignete Trägerplatte einzubringen. Dazu können in der Prozesskammer oberhalb und/oder unterhalb der zu verbindenden Bauteile eine oder mehrere Induktionsvorrichtungen angeordnet sein. Hierdurch werden entsprechende Induktionszonen geschaffen, die so ausgestaltet sind, dass die von den Induktionsvorrichtungen erzeugte elektromagnetische Energie in die Bauteile eingetragen wird und dort Wirbelströme erzeugt, welche die Bauteile erwärmen. Zur Kühlung der Induktionsvorrichtungen können diese direkt mit einem fluiddurchströmten Kühlkreislauf verbunden sein, wobei auch eine Kühlung durch thermischen Kontakt mit Wandungen der Prozesskammer erfolgen kann. Auch eine Kühlung über Konvektion ist möglich.

Grundsätzlich kann der Abstand der Induktionsvorrichtungen zu den Bauteilen bzw. der Trägerplatte verändert werden, um den Wärme- bzw. Energieeintrag bei unterschiedlicher Beschaffenheit der Bauteile optimal zu gestalten. Hierfür können die vorhandenen Induktionsvorrichtungen gemeinsam oder individuell angehoben oder abgesenkt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, für einen optimierten Energieeintrag die Form der Induktionsvorrichtungen an die Form der Bauteile bzw. der Trägerplatten anzupassen.

Im Vergleich zu einer Bauteilerwärmung mittels Wärmestrahlung oder thermischem Kontakt ist ein Energieeintrag durch Induktion sehr gut kontrollierbar. Bei Induktionsvorrichtungen ist der Wärmeeintrag zwischen keiner Leistung und maximaler Leistung innerhalb von Bruchteilen von Sekunden stufenlos regelbar.

Um bei einem Einsatz von Wärmequellen, bei denen der Eintrag von Wärmeenergie in hochdynamischer Weise angepasst werden kann, wie dies insbesondere bei den genannten Induktionsvorrichtungen möglich ist, für eine zeitlich und/oder räumlich präzise und differenzierte Temperaturführung zu nutzen, ist es erforderlich, eine angepasste Regelung der Wärmequelle bereitzustellen, wobei auch Verzögerungen beim Wärmetransport innerhalb der Bauteile Rechnung getragen werden soll. Hierbei kommt einer exakten Messung der Bauteiltemperaturen eine große Bedeutung zu.

Herkömmlicherweise wird die Bauteiltemperatur durch einen oder mehrere Temperatursensoren gemessen, die mit den Bauteilen in thermischem Kontakt stehen, d.h. der Temperatursensor liegt an dem zu messenden Bauteil an oder ist in dieses integriert. Wenn hierbei der Ort, an dem die Wärmeenergie in das Bauteil eingetragen wird, vom Ort der Temperaturmessung beabstandet ist, kann durch die begrenzte Wärmeleitfähigkeit der Bauteile eine zeitliche Verzögerung zwischen Energieeintrag und der Temperaturmessung entstehen, welche dazu führen kann, dass die Regelung der Bauteiltemperatur unpräzise wird und es aufgrund von "Überschwingern" zu einer thermischen Überlastung der Bauteile kommt.

Um derartige Ungenauigkeiten zu reduzieren, kann der Ort der Temperaturmessung so gewählt werden, dass dieser möglichst nahe am Ort des Energieeintrags liegt. Hierbei kann die Regelung der Wärmequelle zwar rasch auf Temperaturänderungen reagieren. Allerdings kann hierbei die tatsächliche Temperatur der Bauteile nicht sehr genau gemessen werden, da diese nicht direkt, sondern indirekt über eine thermische Kopplung und damit verzögert mit Wärmeenergie beaufschlagt werden.

In DE 10 2004 047 359 B3 wird vorgeschlagen, zur Temperaturmessung ein berührungsloses optisches Messsystem, beispielsweise ein Pyrometer, einzusetzen. Derartige optische Messsysteme weisen jedoch den Nachteil auf, dass die gemessene Temperatur nicht absolut ist, sondern von den Material- und Oberflächeneigenschaften der Bauteile abhängen.

Die DE 11 2008 000 853 T1 beschreibt eine Temperaturmessung in einer Wärmebehandlungskammer mit einem Heizelement, einem Bauteil, einem Kontakt-Temperatursensor und einem Nichtkontakt-Temperatursensor. Der Nichtkontakt-Temperatursensor ist außerhalb der Wärmebehandlungskammer angeordnet, und der Temperaturort zur Erfassung der Temperatur des Kontakt-Temperatursensors und des Nichtkontakt-Temperatursensors

sind nahezu identisch, so dass eine Differenz eines Messwertes des Nichtkontakt-Temperatursensors durch den Messwert des Kontakt-Temperatursensors beseitigt werden kann. Die Formstabilität und die Sensormasse sind dabei sehr gering, was den Nachteil mit sich bringt, dass ein Messspalt entsteht, wodurch sich Änderungen der Molekülzahl schnell auf Temperaturänderungen auswirken.

#### Beschreibung der Erfindung

Es ist die Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zum Temperieren von Bauteilen zur Herstellung einer Löt- oder Sinterverbindung zwischen den Bauteilen anzugeben, welches eine präzise Einstellung der Bauteiltemperatur und eine flexible Anordnung der Temperatursensoren ermöglicht. Diese Erfindung zielt weiterhin darauf ab, Störeinflüsse von Druck-/Gasschwankungen auf den berührungslosen Sensor auszugleichen.

Die Lösung der Aufgabe erfolgt durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Es wird ein Verfahren zum Temperieren von Bauteilen zur Herstellung einer Löt- oder Sinterverbindung zwischen den Bauteilen vorgeschlagen, wobei zum Bereitstellen von auf die Bauteile zu übertragender Wärmeenergie wenigstens eine regelbare Wärmequelle vorgesehen ist. Es werden eine erste Temperatur eines Bauteils oder einer mit einem Bauteil in thermischem Kontakt stehenden Komponente einer Löt- oder Sintervorrichtung an einem ersten Temperaturort mittels zumindest eines ersten Temperatursensors, welcher mit dem Bauteil oder der Komponente in thermischem Kontakt steht und an einem zweiten Temperaturort eine zweite Temperatur eines Bauteils oder einer mit einem Bauteil in thermischem Kontakt stehenden Komponente einer Löt- oder Sintervorrichtung mittels zumindest eines zweiten Temperatursensors kontaktlos gemessen. Der erste Temperaturort ist räumlich derart vom zweiten Temperaturort beabstandet, dass ein Temperaturgradient zwischen erster und zweiter Temperatur bei Temperaturveränderung erwartbar ist. Die gemessene zweite Temperatur wird auf der Grundlage der gemessenen ersten Temperatur kalibriert, um eine kalibrierte zweite Temperatur zu ermitteln, wobei die Wärmequelle zumindest auf der Grundlage der kalibrierten zweiten Temperatur geregelt wird. Die Messung der ersten und der zweiten Temperatur erfolgt bevorzugt an unterschiedlichen Orten. Bei der oder den Komponenten einer Löt- oder Sintervorrichtung, welche mit einem Bauteil in thermischem

Kontakt stehen und im Folgenden auch kurz als Vorrichtungskomponenten bezeichnet werden, kann es sich beispielsweise um Trägerplatten, Trägerrahmen oder Bauteilträger handeln, auf welchen die zu verbindenden Bauteile während des Herstellungsprozesses gelagert sind. Die erste Temperatur kann auch zusätzlich durch einen Temperatursensor ermittelt werden, welcher in ein Bauteil integriert ist und mit einer Steuereinheit, welche zur Durchführung des Verfahrens ausgelegt ist, verbindbar ist, um die erste Temperatur eines Bauteils an die Steuereinheit zu übermitteln. Sofern also die erste Temperatur eines Bauteils bzw. einer Vorrichtungskomponenten von mehreren ersten Temperatursensoren gemessen wird, kann die erste Temperatur in geeigneter Weise, beispielsweise durch Mittelwertbildung der von den mehreren ersten Temperatursensoren gemessenen Temperaturen oder sonstige Methoden, ermittelt werden. Entsprechendes gilt auch für die zweite Temperatur.

Die räumliche Beabstandung des ersten und zweiten Temperaturort bedeutet, dass diese jedenfalls räumlich verteilt, d.h. entweder auf einer Seite der Bauteile mit einem räumlichen Abstand zueinander angeordnet sind, oder auf gegenüberliegenden Seiten der Bauteile angeordnet sind. So können der erste und zweite Temperatursensor bei Anordnung auf derselben Seite der Bauteile zumindest 5%, insbesondere 10% des Bauteildurchmessers beabstandet sein. Jedenfalls kann in einer Aufheizphase oder Abkühlphase erwartet werden, dass die an verschiedenen Orten messenden erste und zweite Temperatursensoren Messwerte erfassen, die einen Temperaturgradienten ausweisen. In einem thermischen Gleichgewicht, d.h. bei längerer Verweildauer bei konstanten Temperaturverhältnissen kann der Temperaturgradient klein werden, bzw. ganz verschwinden. Allerdings kann bei zumindest sich ändernden Wärmeeintrag der Wärmequelle wie in der Aufheiz- oder Abkühlphase aufgrund der räumlichen Beabstandung erwartet werden, dass der erste und zweite Temperatursensor unterschiedliche Messwerte erfassen. Es kann jedenfalls nicht davon ausgegangen werden, dass der erste Temperatursensor denselben Messwert wie der zweite Temperatursensor erfasst, somit kann eine Kalibrierung des zweiten Temperatursensors durch den ersten Temperatursensor im Rahmen eines Temperaturgradienten bei Temperaturveränderung ermöglicht werden, insbesondere bei dynamischen Temperaturverhältnissen. Vorteilhaft kann durch die beabstandete Anordnung der Temperatursensoren eine hohe Flexibilität der Anordnung erreicht werden, so kann vorzugsweise durch den zweiten Temperatursensor auf einer der Wärmequelle zugewandten Seite der Bauteile bzw. eines Bauteilträgers, als ein mit dem Bauteil in thermischem Kontakt stehenden Komponente, die zweite Temperatur zur Regelung der Wärmequelle erfasst werden,

während der erste Temperatursensor an einer mechanisch leicht zugänglichen Stelle der Bauteile bzw. des Bauteilträgers angeordnet werden kann, um die erste Temperatur zu erfassen. Somit ist bei einer beabstandeten Anordnung eine präzise Kalibrierung der zweiten Temperatur des zweiten Temperatursensors durch die erste Temperatur des ersten Temperatursensor auch bei beengten Platzverhältnissen oder schwer zugänglichen Temperaturorten möglich, auch können beispielsweise bereits in dem Bauteil integrierte Temperatursensoren als erste Temperatursensoren genutzt werden.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren werden somit die erste und die zweite Temperatur in geeigneter Weise kombiniert, um eine optimale Temperaturführung an den Bauteilen zu erreichen. Bevorzugt erfolgt das Messen der ersten und zweiten Temperatur in einer Weise, dass sich beide Temperaturen für einen bestimmten Zeitraum im Wesentlichen nicht ändern, so dass der Einfluss von Verzögerungen beim Wärmeausgleich innerhalb der Bauteile bzw. zwischen den Bauteilen und den damit in Kontakt stehenden Vorrichtungskomponenten weitgehend reduziert werden kann. Die erste und zweite Temperatur können an demselben Bauteil bzw. an derselben Vorrichtungskomponente oder an verschiedenen Bauteilen bzw. Vorrichtungskomponenten und jedenfalls an zwei räumlich beabstandeten Temperaturorten gemessen werden.

In diesem Zusammenhang bedeutet Kalibrierung die Summe der Tätigkeiten, die dazu dienen, unter festgelegten Bedingungen den Zusammenhang zwischen den von dem zweiten Temperatursensor ausgegebenen Messwerten der Temperaturgröße mit zugehöriger Messunsicherheit mit den Messwerten des ersten Messsensors als Referenztemperatursensor mit zugehöriger Messunsicherheit festzustellen. Mittels dieses Zusammenhangs kann der Einfluss der räumlichen Beabstandung des ersten zum zweiten Temperaturort berücksichtigt werden, aber auch weitere messtechnisch bedingte Unterschiede.

Durch das Ermitteln einer kalibrierten zweiten Temperatur wird insbesondere der Tatsache Rechnung getragen, dass in der Regel bei berührungslos arbeitenden Temperatursensoren die gemessene zweite Temperatur von der tatsächlichen Temperatur an diesem Messpunkt abweicht, was darauf zurückzuführen ist, dass eine berührungslos gemessene Temperatur aufgrund von Materialeigenschaften und/oder Oberflächeneigenschaften des Bauteils, bzw. der Vorrichtungskomponente dessen Temperatur gemessen wird, variieren kann.

Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung wird das Verfahren in einer einstellbaren Prozessatmosphäre durchgeführt, wobei ein Einstellen der Prozessatmosphäre zumindest das Einstellen einer Stoffzusammensetzung, eines Drucks und/oder einer Temperatur der Prozessatmosphäre umfasst. Beispielsweise kann die Prozessatmosphäre in Abhängigkeit vom jeweiligen Prozessstadium reaktive oder nicht-reaktive Prozessgase enthalten. Sofern sich die Temperatur der Prozessatmosphäre ändert, kann diese Temperaturänderung auch in die Regelung der Wärmequelle mit einbezogen werden.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung ist der erste Temperatursensor aus einer Gruppe ausgewählt, welche zumindest Heißleiter, Kaltleiter, Halbleiter-Temperatursensoren, Thermoelemente und schwingkreisbasierte Temperaturfühler umfasst. Alternativ oder zusätzlich ist der zweite Temperatursensor ein zur Detektion von Wärmestrahlung eingerichteter Sensor und ist bevorzugt aus einer Gruppe ausgewählt, welche zumindest Pyrometer, Bolometer und Thermosäulen umfasst. Die für den oder die ersten Temperatursensoren beispielhaft genannten Sensortypen stellen typische Beispiele für kontaktbasierte Temperatursensoren dar. Entsprechend sind die für den oder die zweiten Temperatursensoren beispielhaft genannten Sensortypen typische berührungslos arbeitende Temperatursensoren.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung ist die wenigstens eine Wärmequelle zur kontaktbasierten oder zur kontaktlosen Wärmeübertragung auf die Bauteile oder auf die eine oder mehreren genannten Komponenten eingerichtet. Die Wärmequelle ist bevorzugt aus einer Gruppe ausgewählt, welche zumindest thermisch, induktiv oder kapazitiv mit den Bauteilen oder mit der oder den genannten Komponenten koppelbare Erzeuger von elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern, bevorzugt Heizplatten, Induktionsheizelemente oder Infrarotstrahler umfasst. Die Aufzählung der möglichen Wärmequellen ist nicht abschließend. Es hat sich jedoch gezeigt, dass induktiv mit den Bauteilen oder mit der oder den genannten Komponenten koppelbare Erzeuger von magnetischen Feldern, welche auch als Induktionsvorrichtungen oder Induktoren bezeichnet werden können, in besonderer Weise geeignet sind. Bei derartigen Induktionsvorrichtungen kann die Wärmeleistung in vielfältiger Weise geregelt werden, beispielsweise durch Änderungen der Betriebsspannung, des Betriebsstroms oder der Frequenz.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung erfolgt das Regeln der Wärmequelle in einem die Herstellung der Löt- oder Sinterverbindung umfassenden Prozessschritt und die

kalibrierte Temperatur wird zumindest in einem dem Prozessschritt vorgeschalteten Kalibrierschritt ermittelt, wobei der Kalibrierschritt das Erzeugen und Speichern einer jeweiligen Kalibrierfunktion umfasst, auf deren Grundlage aus einer gemessenen zweiten Temperatur die kalibrierte zweite Temperatur ermittelbar ist. Das Durchführen des Kalibrierschritts kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass bei zwei unterschiedlichen Bauteil- bzw. Komponententemperaturen jeweils die erste und die zweite Temperatur gemessen wird, um anschließend aus den Messwerten die Kalibrierfunktion zu ermitteln. Es können auch mehrere Kalibrierschritte durchgeführt werden, in denen mehrere jeweilige Kalibrierfunktionen ermittelt werden. Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, dass die Kalibrierfunktion jeweils bauteilspezifisch bzw. komponentenspezifisch erzeugt und gespeichert wird.

Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung wird der Kalibrierschritt vor jeder Durchführung eines Prozessschritts durchgeführt, wobei das Regeln der Wärmequelle im Prozessschritt auf der Grundlage der zuvor ermittelten Kalibrierfunktion durchgeführt wird. Hierbei ist es nicht erforderlich, dass die Eigenschaften desjenigen Bauteils bzw. derjenigen Vorrichtungskomponente, an dem bzw. der die zweite Temperatur gemessen wird, bekannt sein muss, um eine geeignete Kalibrierfunktion auszuwählen. Durch die vorgängige Durchführung des Kalibrierschritts vor der Durchführung des Prozessschritts wird sichergestellt, dass die Temperaturführung durch fehlerhafte Auswahl der Kalibrierfunktionen nicht zu Bauteilschäden führen.

Alternativ oder zusätzlich kann der Kalibrierschritt zusätzlich auch einmal oder mehrmals während des Prozessschritts durchgeführt werden, bevorzugt zu vorbestimmten Zeitpunkten oder zu Zeitpunkten, an denen sich die Temperatur der Bauteile bzw. der Vorrichtungskomponenten im Wesentlichen nicht ändert. Die genannte Durchführung eines Kalibrierschritts an Zeitpunkten, an denen sich die Temperatur der Bauteile bzw. Vorrichtungskomponenten im Wesentlichen nicht ändert, bezieht sich auf die Durchführung einer Kalibrierung, bei denen eine Temperaturkurve der Bauteile bzw. der Vorrichtungskomponenten jeweilige Plateaus mit unterschiedlichen Temperaturen aufweist. Dies dient dazu, eine bestimmte Ausgleichszeit abzuwarten, um Latenzen, die sich aus den unterschiedlichen Temperaturmessprinzipien und der räumlichen Lage der Messpunkte ergeben, zu eliminieren.

In dem Zusammenhang hat es sich als vorteilhaft erwiesen, wenn vor der Durchführung eines Prozessschritts aus mehreren bauteilspezifisch oder komponentenspezifisch gespei-

cherten Kalibrierfunktionen eine den zu prozessierenden Bauteilen entsprechende Kalibrierfunktion ausgewählt wird, wobei das Regeln der Wärmequelle im Prozessschritt auf der Grundlage der ausgewählten Kalibrierfunktion durchgeführt wird. Grundsätzlich kann auch zunächst eine Kalibrierfunktion ausgewählt werden, welche dann während der Durchführung des Prozessschritts überprüft und/oder angepasst werden kann.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung ist die Kalibrierfunktion eine lineare Funktion oder eine Polynomfunktion, bevorzugt vierten Grades. Die Verwendung einer linearen Funktion hat sich als rechnerisch einfach erwiesen, wobei hierbei gegebenenfalls entstehende Ungenauigkeiten toleriert werden können. Eine Polynomfunktion, insbesondere eine Polynomfunktion vierten Grades, eignet sich in besonderer Weise um die Messcharakteristik eines Pyrometers zu kalibrieren.

Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung erfolgt das Regeln der Wärmequelle in einem zweistufigen Verfahren, wobei in einer ersten Stufe auf der Grundlage der gemessenen ersten Temperatur und einer vorgegebenen Solltemperatur eine modifizierte Solltemperatur ermittelt wird, und wobei in einer zweiten Stufe auf der Grundlage der gemessenen oder der kalibrierten zweiten Temperatur und der modifizierten Solltemperatur eine Leistung der Wärmequelle geregelt wird. Eine derartige zweistufige Regelung wird auch als Kaskadenregelung bezeichnet. Bei der vorgegebenen Solltemperatur muss es sich nicht zwingend um eine feste Solltemperatur handeln, sondern es kann auch ein Verlauf oder eine Rampe der Solltemperatur zugrunde gelegt werden. Insbesondere beschränken sich die Ausdrücke "auf der Grundlage der gemessenen ersten Temperatur, der vorgegebenen Solltemperatur, der gemessenen oder der kalibrierten zweiten Temperatur und der modifizierten Solltemperatur" nicht nur auf Absolutwerte der genannten Größen, sondern umfassen ausdrücklich auch deren jeweilige zeitliche Verläufe, d.h. insbesondere deren mathematische Ableitungen nach der Zeit. Im Übrigen schließt das Ermitteln der modifizierten Solltemperatur auf der Grundlage der gemessenen ersten Temperatur und der vorgegebenen Solltemperatur nicht aus, dass gegebenenfalls noch weitere Parameter oder Messwerte in die Ermittlung der modifizierten Solltemperatur einbezogen werden können. Entsprechend kann auch das Regeln der Leistung der Wärmequelle nicht ausschließlich auf der Grundlage der gemessenen oder der kalibrierten zweiten Temperatur und der modifizierten Solltemperatur erfolgen. Vielmehr können auch hier weitere Parameter oder Messwerte einbezogen werden. Insbesondere können in jeder Stufe des zweistufigen Verfahrens auch Rückkopplungen in den jeweiligen Regelschleifen vorgesehen werden.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens sind die zu verbindenden Bauteile in einer Haupterstreckungsebene angeordnet, wobei der erste Temperatursensor auf der einen Seite der Haupterstreckungsebene und die Wärmequelle und der zweite Temperatursensor auf der anderen Seite der Haupterstreckungsebene angeordnet sind. Während hierbei der zweite Temperatursensor und die Wärmequelle auf der gleichen Seite der Bauteilanordnung angeordnet sind und somit Änderungen der Bauteiltemperatur mit einer sehr geringen zeitlichen Verzögerung erfasst werden können, unterliegt die von dem ersten Temperatursensor aufgrund seiner räumlichen Anordnung ermittelte erste Temperatur einer gewissen Latenz, die auf der Wärmeleitung innerhalb des oder der Bauteile bzw. der Vorrichtungskomponenten beruht.

Alternativ können der erste und der zweite Temperatursensor auf der einen Seite der Haupterstreckungsebene und die Wärmequelle auf der anderen Seite der Haupterstreckungsebene angeordnet sein. Ferner können auch der erste und der zweite Temperatursensor und die Wärmequelle auf der gleichen Seite der Haupterstreckungsebene angeordnet sein.

Die Erfindung betrifft in einem weiteren Aspekt eine Löt- oder Sintervorrichtung zum Herstellen einer Löt- oder Sinterverbindung zwischen Bauteilen, umfassend wenigstens eine regelbare Wärmequelle, welche zum Bereitstellen von auf die Bauteile zu übertragender Wärmeenergie eingerichtet ist, zumindest an zumindest einem ersten Temperaturort einen ersten Temperatursensor, welcher mit einem Bauteil oder einer mit einem Bauteil thermisch kontaktierbaren Komponente der Löt- oder Sintervorrichtung thermisch kontaktierbar ist und dazu eingerichtet ist, eine erste Temperatur des Bauteils oder der Komponente zu messen, und an zumindest einem zweiten Temperaturort einen zweiten Temperatursensor, welcher dazu eingerichtet ist, eine zweite Temperatur eines Bauteils oder einer mit einem Bauteil thermisch kontaktierbaren Komponente der Löt- oder Sintervorrichtung kontaktlos zu messen. Der erste Temperaturort ist räumlich derart vom zweiten Temperaturort beabstandet, dass ein Temperaturgradient zwischen erster und zweiter Temperatur bei Temperaturveränderung erwartbar ist. Eine Steuereinheit, welche mit der Wärmequelle und mit dem ersten und dem zweiten Temperatursensor verbunden ist, ist dazu eingerichtet, das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche durchzuführen. Wie bereits vorstehend erwähnt, kann der erste Temperatursensor bzw. ein weiterer erster Temperatursensor ein Temperatursensor sein, welcher in ein Bauteil integriert ist und mit der Steuereinheit

verbindbar ist, um eine erste Temperatur dieses Bauteils an die Steuereinheit zu übermitteln.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform weist die Wärmequelle ein Messfenster auf, welches von den Bauteilen oder von der oder den genannten Komponenten der Löt- oder Sintervorrichtung emittierte Infrarotstrahlung in Richtung auf den zweiten Temperatursensor passieren lässt.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist in dem Messfenster ein zumindest in Richtung des zweiten Temperatursensors weisender Tubus angeordnet, welcher dazu eingerichtet ist, von den Bauteilen oder von der oder den genannten Komponenten der Löt- oder Sintervorrichtung emittierte Infrarotstrahlung in Richtung auf den zweiten Temperatursensor zu lenken und bevorzugt den zweiten Temperatursensor von Infrarotstrahlung, welche nicht von den Bauteilen oder von der oder den genannten Komponenten emittiert wurde, abzuschirmen.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Löt- oder Sintervorrichtung sind die Bauteile, die wenigstens eine Wärmequelle, der zumindest erste Temperatursensor, und der zumindest zweite Temperatursensor in bzw. an einer gasdichten Prozesskammer mit einstellbarer Prozessatmosphäre, insbesondere Vakuum, angeordnet, wobei vorzugsweise der zweite Temperatursensor auf einer den Bauteilen abgewandten Seite der Wärmequelle angeordnet ist. Mit anderen Worten kann die Löt- oder Sintervorrichtung zumindest eine gasdichte Prozesskammer umfassen, in der eine Prozessatmosphäre, z.B. eine sauerstoffarme oder sauerstofffreie Atmosphäre, insbesondere Vakuum einstellbar ist, so dass die Bauteile oxidationsfrei thermisch behandelt, insbesondere gelötet oder gesintert werden können. Sowohl der erste als auch der zweite Temperatursensor sind in oder an der Prozesskammer angeordnet, so dass die Messwertsignale der Temperatursensoren als erste und zweite Temperatur nach außerhalb der Prozesskammer übertragen werden. Der zweite Temperatursensor kann innerhalb oder außerhalb der Prozesskammer angeordnet sein, im letzten Fall kann der zweite Temperatursensor durch ein optisches Fenster der Prozesskammerwandung den zweiten Temperaturort beobachten. Eine Steuereinheit, vorzugsweise außerhalb der Prozesskammer angeordnet, kalibriert die zweite Temperatur auf Basis der ersten Temperatur und regelt die Wärmequelle auf Basis der kalibrierten zweiten Temperatur. So kann eine exakte Wärmequellenregelung erreicht werden, die z.B. auch

zur Einhaltung eines definierbaren Temperaturgradienten zwischen erstem und zweiten Temperaturort genutzt werden kann.

### Zeichnungen

Weitere Vorteile ergeben sich aus der folgenden Zeichnungsbeschreibung. In den Zeichnungen sind Ausführungsbeispiele der Erfindung dargestellt. Die Zeichnungen, die Beschreibung und die Ansprüche enthalten zahlreiche Merkmale in Kombination. Der Fachmann wird die Merkmale zweckmäßigerweise auch einzeln betrachten und zu sinnvollen weiteren Kombinationen zusammenfassen.

Es zeigen:

- |                     |                                                                                                                       |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fig. 1</b>       | eine schematische Schnittansicht einer Löt- oder Sintervorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel,                   |
| <b>Fig. 2 und 3</b> | schematische Schnittansichten von Löt- oder Sinteranlagen gemäß weiteren Ausführungsbeispielen,                       |
| <b>Fig. 4</b>       | ein Diagramm mit zwei beispielhaften Temperaturverläufen einer ersten und einer zweiten Temperatur;                   |
| <b>Fig. 5</b>       | ein schematisches Diagramm zur Erläuterung der Ermittlung einer Kalibrierfunktion für die zweite Temperatur;          |
| <b>Fig. 6</b>       | ein schematisches Blockschaltbild einer zweistufigen Temperaturregelung;                                              |
| <b>Fig. 7</b>       | ein Diagramm mit verschiedenen beispielhaften Temperaturverläufen und einem Verlauf einer relativen Heizleistung; und |
| <b>Fig. 8</b>       | ein Diagramm mit weiteren beispielhaften Temperaturverläufen und einem Verlauf einer relativen Heizleistung.          |

Im Folgenden werden für gleiche oder gleichartige Elemente die gleichen Bezugszeichen verwendet.

Fig. 1 zeigt in schematischer, vereinfachter Schnittansicht eine Lötvorrichtung 10 gemäß einem Ausführungsbeispiel. Die Lötvorrichtung 10 umfasst einen topartigen, nach unten offenen Transportrahmen 14, in dessen bodenseitiger Öffnung ein Bauteilträger 12 eingelegt ist, welcher eine Komponente der Lötvorrichtung 10 darstellt. Auf dem Bauteilträger 12 sind zu verbindende Bauteile 16, 18 aufgelegt. Die Bauteile 18 können beispielsweise Substrate sein, welche jeweils mit mehreren Bauteilen 16, beispielsweise Leistungshalbleiter, durch den Lötvorgang verbunden werden sollen. Zwischen den Bauteilen 16 und den Bauteilen 18 kann jeweils ein Fügwerkstoff (nicht dargestellt) vorgesehen sein. Unterhalb des Transportrahmens 14 mit dem darin angeordneten Bauteilträger 12 ist eine Induktionsvorrichtung 20 angeordnet, welche dazu eingerichtet ist, ein starkes Magnetfeld zu erzeugen, welches Wirbelströme zumindest in dem Bauteilträger 12 induzieren kann. Diese Wirbelströme bewirken eine Erwärmung des Bauteilträgers 12. Es versteht sich, dass anstelle der Induktionsvorrichtung 20 auch andere Wärmequellen vorgesehen sein können. Der Abstand zwischen dem Bauteilträger 12 bzw. dem Transportrahmen 14 einerseits und der Induktionsvorrichtung 20 ist veränderbar.

Die Lötvorrichtung 10 weist ferner einen ersten Temperatursensor 24 an einem ersten Temperaturort, hier auf einer Oberseite eines Substrats als Bauteil 18 auf, welcher durch den Transportrahmen 14 hindurchgeführt ist und federbeaufschlagt in Kontakt mit einem der Bauteile 18 steht und welcher dazu eingerichtet ist, eine erste Temperatur zu messen.

Die Induktionsvorrichtung 20 weist ein Messfenster 22 auf, welches von einer Unterseite des Bauteilträgers 12 als zweiten Temperaturort abgestrahlte Infrarotstrahlung in Richtung eines unterhalb des Messfensters 22 angeordneten zweiten Temperatursensors 26 passieren lässt, so dass mittels des zweiten Temperatursensors 26 eine zweite Temperatur gemessen werden kann. In dieser Ausführungsbeispiel sind erster und zweiter Temperaturort auf gegenüberliegenden Seiten des Bauteilträgers 12 angeordnet.

Vorzugsweise kann der ersten Temperaturort eine Oberfläche eines Bauteils 18 sein. Der zweite Temperaturort kann vorzugsweise eine Oberfläche eines direkten oder indirekten Wärmeeintrages (z.B. Strahlungswärme) der Wärmequelle 20 auf der Unterseite des Bauteils 18 oder eines Bauteilträgers 12 sein.

Der erste Temperatursensor 24 ist als Kontakt-Temperatursensor ausgebildet und kann ein Heißleiter, Kaltleiter, Halbleiter-Temperatursensor, Thermoelement, schwingkreisbasierter Temperaturfühler oder dergleichen sein. Der zweite Temperatursensor 26 ist ein kontaktlos messender Temperatursensor, beispielsweise ein Pyrometer, Volometer oder eine Thermosäule, welcher die Temperatur durch Detektion der vom Messobjekt abgestrahlten Infrarotstrahlung misst.

Gemäß einer nicht dargestellten Abwandlung kann im Bereich des Messfensters 22 ein Tubus angeordnet sein, welcher auch den zweiten Temperatursensor 26 umgibt und einerseits die zu detektierende vom Bauteilträger 12 abgestrahlte Infrarotstrahlung bündelt oder lenkt und dabei gleichzeitig Fremdstrahlung, welche die Temperaturmessung verfälschen könnte, vom zweiten Temperatursensor 26 fernhält.

In Fig. 2 ist eine Lötvorrichtung 110 gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel dargestellt, welche ähnlich wie die Lötvorrichtung 10 von Fig. 1 aufgebaut ist. Die Lötvorrichtung 110 umfasst mehrere, im vorliegenden Ausführungsbeispiel drei Bauteilträger 12, wobei jedem Bauteilträger 12 eine separat ansteuerbare Induktionsvorrichtung 20 zugeordnet ist. Die Abstände der Induktionsvorrichtungen 20 zu den Bauteilträgern 12 sind individuell verstellbar. Alle drei Bauteilträger 12 sind an einem gemeinsamen Transportrahmen 14 angeordnet. Die jeweils zugeordneten Temperatursensoren 24, 26 sind ähnlich wie bei dem Ausführungsbeispiel von Fig. 1 angeordnet.

Die Komponenten der Lötvorrichtung 110 befinden sich in einer Prozesskammer 28, welche für den Lötprozess eine bevorzugt einstellbare Prozessatmosphäre bereitstellt. Die Prozesskammer 28 kann temperiert, evakuiert und/oder mit Druck beaufschlagt werden oder auch mit unterschiedlichen Prozessgasen geflutet werden. Der Druck und/oder die Temperatur dieser Prozessatmosphäre kann auf vorgegebene Werte eingestellt und insbesondere auch verändert werden. Der erste und der zweite Temperatursensor 24, 26 sind in oder an der Prozesskammer 28 angeordnet. Insbesondere ist der zweite Temperatursensor 28 außerhalb der Prozesskammer angeordnet und betrachtet die zweite Temperaturstelle durch ein optisches Durchgangsfenster der Prozesskammerwandung.

Fig. 3 zeigt eine Lötvorrichtung 210 gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel, welches im Prinzip eine Spiegelung der Lötvorrichtung 110 von Fig. 2 an einer horizontalen Achse

darstellt. Im Unterschied zum Ausführungsbeispiel von Fig. 1 und 2 stehen die ersten Temperatursensoren 24 nicht mit den Bauteilen 18 in thermischem Kontakt, sondern mit den Unterseiten der Bauteilträger 12 als ersten Temperaturort. Die zweiten Temperatursensoren 26 wiederum messen nicht die Temperatur der Bauteilträger 12, sondern können direkt die Temperaturen der oberhalb der Bauteilträger 12 angeordneten Bauteile 16 und/oder 18 als zweiten Temperaturort erfassen.

Bei allen drei Ausführungsbeispielen sind die Vorrichtungen, die zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens eingerichtet sind, als Lötvorrichtungen 10, 110, 210 dargestellt. Es versteht sich, dass die hier beispielhaft beschriebene Anordnung der Temperatursensoren 24, 26 alternativ auch bei entsprechend ausgestalteten Sintervorrichtungen vorgesehen werden können. Bei derartigen Sintervorrichtungen sind in der Regel zusätzliche Werkzeuge vorgesehen, welche die zur Herstellung einer Sintervorrichtung erforderlichen Pressdrücke auf die zu verbindenden Bauteile ausüben können. Diese Werkzeuge können gegebenenfalls geeignete Messöffnungen aufweisen, durch welche die zur Temperaturmessung erforderlichen Zugänge zur kontaktlosen oder kontaktbehafteten Temperaturmessung an den Bauteilen bzw. an Komponenten der Sintervorrichtung geschaffen werden.

Es versteht sich weiterhin, dass auch die Lötvorrichtungen 10, 110, 210 gegebenenfalls erforderliche Werkzeuge zum Aufbringen von Pressdruck auf die Bauteile 16, 18 aufweisen können. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind diese in den vorliegenden Ausführungsbeispielen nicht dargestellt.

Nachfolgend wird nun in vereinfachter Weise ein erfindungsgemäßes Verfahren zum Temperieren von Bauteilen zur Herstellung von Löt- oder Sinterverbindungen zwischen den Bauteilen 16, 18 beschrieben. Dieses Verfahren kann mittels der Lötvorrichtungen 10, 110, 210 gemäß Fig. 1 bis 3 durchgeführt werden, beispielsweise in einer Steuereinheit (nicht dargestellt), welche mit den Temperatursensoren 24, 26 sowie der bzw. den Induktionsvorrichtungen 20 als Wärmequellen verbunden sein kann. Mit Hilfe einer derartigen Steuereinheit kann insbesondere die von den Wärmequellen 20 erzeugte Wärmeleistung geregelt werden, um die Bauteile 16, 18 auf eine gewünschte Temperatur zu erwärmen und auch durch Reduzierung oder Abschaltung der Heizleistung wieder abzukühlen.

Während der erste Temperatursensor 24 aufgrund seiner kontaktbasierten Arbeitsweise die Bauteil- oder Komponententemperatur am ersten Temperaturort sehr genau ermitteln kann,

unterliegt die vom zweiten, berührungslos arbeitenden Temperatursensor 26 ermittelte Bauteil- oder Komponententemperatur am zweiten Temperaturort einem systematischen Messfehler. Ein Beispiel für einen derartigen kontaktlos arbeitenden Temperatursensor ist ein Pyrometer. Hierbei wird die von einem Messkörper, dessen Temperatur zu ermitteln ist, abgestrahlte Strahlungsleistung  $P$  ermittelt. Aus technischen Gründen wird hierbei in der Regel nur ein bestimmter, im Infrarotbereich liegender Wellenlängenbereich berücksichtigt. Gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz gilt für die Gesamtstrahlungsleistung  $P$  eines realen Körpers

$$P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4, \quad (1)$$

wobei  $\varepsilon$  der Emissionsgrad,  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante ( $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ),  $A$  die Fläche (in  $\text{m}^2$ ) und  $T$  die Temperatur (in K) ist. Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  stellt somit die Wärmestrahlfähigkeit des Messobjekts dar und hängt sowohl vom Material als auch von der Oberflächenbeschaffenheit des Messobjekts ab. Das Ermitteln der zweiten Temperatur erfolgt bevorzugt bei kleinen Wellenlängen. Die Messwellenlängen eines Pyrometers betragen bevorzugt nicht mehr als  $5 \mu\text{m}$ , besonders bevorzugt nicht mehr als  $2 \mu\text{m}$ , um den Einfluss von ungenau bestimmten Emissionsgraden  $\varepsilon$  auf die Messgenauigkeit zu begrenzen.

Da der Emissionsgrad  $\varepsilon$  des Messobjekts, d.h. eines Bauteils oder einer Komponente der Löt- oder Sintervorrichtung, häufig nicht exakt bekannt ist oder auch lokalen Variationen unterliegt, kann die gemessene zweite Temperatur einen systematischen Messfehler aufweisen. Aus diesem Grund wird auf der Grundlage der gemessenen zweiten Temperatur eine kalibrierte zweite Temperatur ermittelt, wobei als Kalibriergröße die gemessene erste Temperatur herangezogen wird. Um hierbei auszuschließen, dass die tatsächliche Temperatur an der Messstelle des ersten Temperaturorts, an welcher die erste Temperatur gemessen wird, sich von der tatsächlichen Temperatur der Messstelle des zweiten Temperaturorts, an welcher die zweite Temperatur gemessen wird, unterscheidet, sollten sich die Temperaturen der Bauteile 16, 18 bzw. der mit den Bauteilen in thermischem Kontakt stehenden Komponenten der Lötvorrichtung 10, 110, 210 möglichst in einem Gleichgewicht befinden, d.h. es sollten keine Temperaturgradienten zwischen den verschiedenen Messstellen des ersten und zweiten Temperaturorts mehr vorliegen. Dies kann beispielsweise

dadurch erreicht werden, dass die Heizleistung der Wärmequelle für eine bestimmte Ausgleichszeit konstant gehalten oder auf eine konstante Temperatur geregelt wird und erst dann die entsprechenden Temperaturmesswerte ermittelt werden.

Das Ermitteln der kalibrierten zweiten Temperatur kann beispielsweise auf der Grundlage einer Kalibrierfunktion erfolgen, welche im Rahmen eines Kalibrierschritts ermittelt wurde. Das Ermitteln einer solchen Kalibrierfunktion wird nachfolgend noch näher beschrieben.

Ein Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht somit darin, dass die Messung der ersten Temperatur, die mit einem Temperatursensor in thermischem Kontakt mit einem Bauteil oder einer Vorrichtungskomponente am ersten Temperaturort erfolgt und daher träge ist, aber einen sehr genauen Messwert liefert, mit der Messung der zweiten Temperatur, die durch einen berührungslos arbeitenden Temperatursensor am zweiten Temperaturort erfolgt und daher schnell ist, jedoch aufgrund der Materialabhängigkeit nur ungenaue Messwerte liefert, in geeigneter Weise kombiniert wird. Durch diese Kombination der Messwerte für die erste und die zweite Temperatur wird eine optimale Temperaturführung an den Bauteilen erreicht. Daneben ist eine flexible und beabstandete Anordnung des ersten und zweiten Temperatursensors möglich.

Fig. 4 zeigt beispielhafte zeitliche Verläufe für die erste Temperatur (T1) und die zweite Temperatur (T2), wobei der Absolutwert der Zeitskala arbiträr ist. Die Temperaturen T1, T2 wurden auf gegenüberliegenden Seiten eines aus Kupfer bestehenden Bauteils gemessen, welche eine Dicke von 5 mm aufweist. Eine Wärmequelle 20 ist hierbei auf der gleichen Seite angeordnet wie der die zweite Temperatur T2 erfassende Temperatursensor 26, während der die erste Temperatur T1 erfassende Temperatursensor 24 auf der der Wärmequelle 20 abgewandten Seite des Bauteils angeordnet ist (vgl. die Anordnungen von Fig. 1 und 2).

Während ein Maximum der zweiten Temperatur T2 bei etwa  $t = 48$  sec liegt, erreicht die erste Temperatur T1 bei ungefähr  $t = 55$  sec ein Plateau, d.h. die erste Temperatur T1 bleibt ab diesem Zeitpunkt annähernd konstant. Die Zeitdifferenz von 7 sec zwischen dem Erreichen des Maximums der zweiten Temperatur T2 und dem Erreichen des Plateaus der ersten Temperatur T1 beruht auf der Latenzzeit aufgrund des Wärmetransports zwischen den beiden Seiten des Bauteils.

Des Weiteren ist in Fig. 4 erkennbar, dass die erste Temperatur T1 einen wesentlich trägeren und damit schwankungsärmeren Verlauf aufweist als die zweite Temperatur T2. Zudem besteht aufgrund der noch nicht durchgeführten Kalibration (in Fig. 4 ist die gemessene zweite Temperatur T2 dargestellt) zwischen beiden Temperaturen T1, T2 ungefähr eine Temperaturdifferenz von ca. 20 bis 25°C.

Mit Bezug auf Fig. 5 wird nun nachfolgend in beispielhafter Weise die Durchführung eines Kalibrationsschritts erläutert. Hierfür werden an einem beispielhaften Bauteil, dessen Temperatur fortdauernd bzw. in Intervallen erhöht wird, zu einem ersten Zeitpunkt t1 eine erste Temperatur T1.1 kontaktierend und eine zweite Temperatur T2.1 kontaktfrei gemessen. Zu einem zweiten Zeitpunkt t2 werden nun eine erste Temperatur T1.2 und eine zweite Temperatur T2.2 gemessen.

Unter der vereinfachten Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen einer gemessenen zweiten Temperatur T2 und einer kalibrierten zweiten Temperatur T2' lässt sich die kalibrierte zweite Temperatur T2' gemäß der Gleichung

$$T2' = k \cdot T2 + T_{\text{offset}}, \quad (2)$$

ermitteln, wobei k ein Kalibrationsfaktor und  $T_{\text{offset}}$  eine Differenztemperatur zum Zeitpunkt t1 ist. Der Faktor k lässt sich aus den zu den Zeitpunkten t1 und t2 gemessenen Temperaturen gemäß der folgenden Gleichung bestimmen:

$$k = \frac{T1.2 - T1.1}{T2.2 - T2.1}. \quad (3)$$

Die Differenztemperatur  $T_{\text{offset}}$  lässt sich aus den Temperaturmesswerten gemäß der folgenden Gleichung bestimmen:

$$T_{\text{offset}} = T1.1 - (T2.1 \cdot k). \quad (4)$$

Die Temperaturmessungen für die Bestimmung der Kalibrierfunktion erfolgt vorteilhafterweise zu Zeitpunkten, an denen das Bauteil keinen Temperaturgradienten aufweist, d.h. die Bauteiltemperatur wird jeweils für eine geeignete Zeitdauer, beispielsweise 5 sec auf einem Plateau konstant gehalten, wobei selbstverständlich die Bauteiltemperatur zwischen den beiden Zeitpunkten t1 und t2 verändert werden muss. Grundsätzlich besteht auch die

Möglichkeit, eine Kalibrierung jeweils zu vorgegebenen Zeitpunkten, beispielsweise in Abständen von 10 sec, erneut durchzuführen.

Alternativ kann die Durchführung des Kalibrierschritts auch im Rahmen eines Musterkalibrierschritts erfolgen, bei dem für ein Musterbauteil, dessen Abstrahleigenschaften den später verarbeiteten Bauteilen bzw. in Bauteilkontakt stehenden Vorrichtungskomponenten entsprechen, durchgeführt werden, um eine Kalibrierfunktion zu speichern. Auf diese Kalibrierfunktion kann dann später bei der Durchführung des eigentlichen Prozessschritts, d.h. des eigentlichen Löt- bzw. Sintervorgangs zurückgegriffen werden, ohne dass während der Durchführung des Prozessschritts erneute Kalibrierungen durchgeführt werden müssen.

Anstelle der mit Bezug auf Fig. 5 erläuterten Kalibrierung kann auch der Emissionsgrad  $\varepsilon$  direkt ermittelt werden. Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, dass ähnlich wie mit Bezug auf Fig. 5 beschrieben, zunächst bei einer Umgebungstemperatur von beispielsweise 20° die erste Temperatur  $T_{1.1}$  kontaktierend und die zweite Temperatur  $T_{2.1}$  kontaktfrei ermittelt wird. Anschließend wird das als Testobjekt dienende Bauteil auf eine höhere Temperatur, beispielsweise zwischen 150°C und 250°C erwärmt und wiederum die erste Temperatur  $T_{1.2}$  und die zweite Temperatur  $T_{2.2}$  ermittelt.

Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  lässt sich anschließend gemäß der folgenden Gleichung berechnen:

$$\varepsilon = \frac{T_{2.2}^4 - T_{2.1}^4}{T_{1.2}^4 - T_{1.1}^4}. \quad (5)$$

Hierfür wurde angenommen, dass  $T_{2.2}^4$  kleiner als  $T_{1.2}^4$  ist. Ansonsten wären die Werte zu tauschen, so dass der Emissionsgrad  $\varepsilon \leq 1$  ist.

Mit Bezug auf Fig. 6 wird nun eine zweistufige Regelung oder Kaskadenregelung einer Wärmequelle beschrieben, wobei die Regelgröße für diese Wärmequelle durch eine Funktion  $u_2(t)$  beschrieben wird. An einem Messobjekt sind zwei Temperatursensoren angeordnet, wobei ein im Kontakt mit dem Messobjekt stehender erster Temperatursensor die erste Temperatur  $T_1$  erzeugt und ein berührungslos messender Temperatursensor die zweite Temperatur  $T_2$  erzeugt. Der Verlauf der ersten Temperatur  $T_1$  wird durch eine Funktion  $y_{M1}(t)$  und der Verlauf der zweiten Temperatur  $T_2$  durch eine Funktion  $y_{M2}(t)$  beschrieben. Als Eingangsgröße der Regelung dient eine Solltemperaturfunktion  $w_1(t)$ .

Aus den Signalen  $w1(t)$  und  $yM1(t)$  wird durch Differenzbildung eine Differenzfunktion  $e1(t)$  gemäß der Gleichung

$$e1(t) = w1(t) - yM1(t) \quad (6)$$

erzeugt und einem Führungsregler R1 zugeführt. Der Führungsregler R1 kann beispielsweise als PI-Regler (Proportional-Integral-Regler) ausgebildet sein, welcher eine Regelfunktion  $u1(t)$  gemäß der Gleichung

$$u1(t) = e1(t) * kp + ki * \int e1(t) dt \quad (7)$$

erzeugt, wobei  $kp$ ,  $ki$  jeweilige Verstärkungsfaktoren sind. Durch positive Kopplung mit der Solltemperaturfunktion  $w1(t)$  wird aus  $u1(t)$  eine modifizierte Solltemperaturfunktion  $w2(t)$  gemäß der Gleichung

$$w2(t) = \text{Min}(u1(t), dTmax) + w1(t) \quad (8)$$

ermittelt.

In der zweiten Regelstufe wird die Differenz der modifizierten Solltemperaturfunktion  $w2(t)$  und der Funktion  $yM2(t)$  gemäß der Gleichung

$$e2(t) = w2(t) - yM2(t) \quad (9)$$

gebildet, um eine Eingangsfunktion  $e2(t)$  für den Folgeregler R2 zu erzeugen. Der Folgeregler R2 erzeugt hieraus die Regelgröße oder Regelfunktion  $u2(t)$  für die Wärmequelle gemäß der Gleichung

$$u2(t) = e2(t) * kp + ki * \int e2(t) dt, \quad (10)$$

wobei  $kp$ ,  $ki$  jeweilige Verstärkungsfaktoren sind.

Es versteht sich, dass die konkrete Ausgestaltung der Kaskadenregelung hier nur rein beispielhaft ist und gegebenenfalls auch in geeigneter Weise modifiziert werden kann.

Die Einstellung der Leistung der Wärmequelle erfolgt in geeigneter Weise. So kann beispielsweise bei der Verwendung einer Induktionsvorrichtung 20 gemäß Fig. 1 bis 3 als Wärmequelle die Regelung durch eine Steuereinheit der Induktionsvorrichtung 20 mittels Anpassungen der Frequenz, des Stroms und/oder der Spannung erfolgen. Zusätzlich kann auch der Abstand der Induktionsvorrichtung 20 in die Regelung mit einbezogen werden. Bei Anwendung einer Infrarotheizung oder einer ohmschen Heizvorrichtung kann der Heizstrom geregelt werden.

Durch die schnelle Reaktion der Wärmequelle bzw. der der Induktionsvorrichtung 20 zugewandten Seite der Bauteile 16, 18 bzw. des Bauteilträgers 12 kann der Temperaturverlauf der der Induktionsvorrichtung 20 zugewandten Bauteilseite nach einem großen Spektrum an Funktionen geregelt werden, beispielsweise Rampen, S-Kurven, quadratische Funktion, e-Funktion, Haltephasen oder Polynome höheren Grades.

Dieses Verhalten lässt sich auch ausnutzen, um die Erwärmung der Bauteile 16, 18 zu beschleunigen. Dazu kann die Temperatur der der Induktionsvorrichtung 20 zugewandten Bauteilseite kurzzeitig erhöht werden, um die Temperaturdifferenz zwischen den beiden gegenüberliegenden Seiten der Bauteile 16, 18 zu vergrößern.

Durch die Variationen der Bauteilbeschaffenheit, insbesondere der der Induktionsvorrichtung 20 zugewandten Bauteilseite, kann mit dem berührungslos messenden zweiten Temperatursensor 26 keine absolut genaue Temperatur erfasst werden. Dieser Nachteil wird durch die Messung der von der Induktionsvorrichtung 20 abgewandten Bauteilseite mittels des ersten Temperatursensors 24 kompensiert, da durch diesen Wert das Temperaturniveau kontinuierlich angepasst wird, so dass an den Bauteilen 16, 18 immer die gewünschte Temperatur eingestellt werden kann.

Unter bestimmten Umständen kann es durch externe Effekte, beispielsweise durch in die Prozesskammer 28 einströmendes Gas zu Einwirkungen auf den kontaktierenden ersten Temperatursensor 24 kommen, wodurch der Regelungsvorgang beeinträchtigt werden kann. Hierfür kann gemäß einer Abwandlung der mit Bezug auf Fig. 6 beschriebenen Kaskadenregelung Rechnung getragen werden. Hierbei kann die vom Führungsregler R1 erzeugte Stellgröße  $u_1(t)$  zu einem gegebenen Zeitpunkt, z.B. dem Zeitpunkt einer beabsichtigten Gaseinleitung, auf einen geeigneten Wert  $u_{1\text{freeze}}$  „eingefroren“ werden, wodurch eine verbesserte Temperaturführung erreicht werden kann. Die Erzeugung der modifizierten

Solltemperatur  $w_2(t)$  erfolgt somit nicht auf der Grundlage von  $u_1(t)$  und der Solltemperatur  $w_1(t)$ , sondern auf der Grundlage von  $u_{1\text{freeze}}$  und  $w_1(t)$ .

Mit Bezug nun auf Fig. 7 und 8 werden typische zeitliche Verläufe der Funktionen  $w_1(t)$ ,  $y_{M1}(t)$ ,  $y_{M2}(t)$  und  $u_2(t)$  beschrieben, wobei in den Diagrammen charakteristische Ereignispunkte mit Ziffern gekennzeichnet sind.

Wie in Fig. 7 zu erkennen ist, treten bei den Ereignispunkten 1 und 3 Einbrüche der ersten Temperatur  $T_1$  auf, welche beispielsweise durch in die Prozesskammer einströmendes Gas verursacht werden. Diese Temperatureinbrüche führen bei einer Kaskadenregelung ohne die zuvor beschriebene "Einfrierfunktion" zu einem übermäßigen Gegensteuern der Kaskadenregelung, welche sich bei den Ereignispunkten 2 und 4 in Temperaturspitzen im Verlauf der zweiten Temperatur  $T_2$  bemerkbar machen.

Durch das "Einfrieren" der durch den Führungsregler erzeugten Stellgröße  $u_1(t)$  auf den Wert  $u_{1\text{freeze}}$  unmittelbar vor dem Einsetzen von Ereignissen, welche kurzzeitige Temperaturänderungen der Bauteile zur Folge haben können, kann eine verbesserte Temperaturführung der Bauteiltemperaturen erreicht werden.

Mit Bezug nun auf Fig. 8 werden ebenfalls mit Ziffern gekennzeichnete charakteristische Ereignisse und Vorgänge bei der Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens mit Hilfe der zuvor beschriebenen Kaskadenregelung erläutert. Der mit Ziffer 1 bezeichnete Abschnitt des Verlaufs der zweiten Temperatur  $T_2$  ( $y_{M2}(t)$ ) charakterisiert die untere Messbereichsgrenze eines Pyrometers. Während dieses Zeitraums weist die Regelgröße  $u_2(t)$  einen konstanten Verlauf auf, was durch die Ziffer 2 gekennzeichnet ist.

Bei einem Ereignispunkt 3 setzt die Regelung ein. Bei einem Ereignispunkt 4 erfolgt ein starker Überschwinger der zweiten Temperatur  $T_2$ , welcher jedoch im Verlauf der Temperatur  $T_1$  ( $y_{M1}(t)$ ) zu keinem Überschwinger führt, siehe Ziffer 7.

Ziffer 5 charakterisiert die Differenz zwischen der unkalibrierten zweiten Temperatur  $T_2$ , welche aufgrund abweichender Oberflächeneigenschaften des Messobjekts bzw. der Bauteile höher ist als die Solltemperatur, welche durch die Funktion  $w_1(t)$  gekennzeichnet ist.

Bei einem Ereignispunkt 6 erreicht die erste Temperatur  $T_1$  exakt die vorgegebene Solltemperatur, wobei der Messfehler des berührungslos messenden zweiten Temperatursensors 28 durch die vorstehend beschriebene Kalibration kompensiert wird.

Bezugszeichenliste

|              |                                    |
|--------------|------------------------------------|
| 10, 110, 210 | Lötvorrichtung                     |
| 12           | Bauteilträger, Komponente          |
| 14           | Transportrahmen                    |
| 16, 18       | Bauteil                            |
| 20           | Induktionsvorrichtung, Wärmequelle |
| 22           | Messfenster                        |
| 24           | erster Temperatursensor            |
| 26           | zweiter Temperatursensor           |
| 28           | Prozesskammer                      |
| R1           | Führungsregler                     |
| R2           | Folgeregler                        |

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Temperieren von Bauteilen (16, 18) zur Herstellung einer Löt- oder Sinterverbindung zwischen den Bauteilen (16, 18), wobei zum Bereitstellen von auf die Bauteile (16, 18) zu übertragender Wärmeenergie wenigstens eine regelbare Wärmequelle (20) vorgesehen ist, wobei eine erste Temperatur eines Bauteils (16, 18) oder einer mit einem Bauteil (16, 18) in thermischem Kontakt stehenden Komponente (12) einer Löt- oder Sintervorrichtung (10, 110, 210) an zumindest einem ersten Temperaturort mittels zumindest eines ersten Temperatursensors (24) gemessen wird, welcher mit dem Bauteil (16, 18) oder der Komponente (12) in thermischem Kontakt steht, und eine zweite Temperatur eines Bauteils (16, 18) oder einer mit einem Bauteil (16, 18) in thermischem Kontakt stehenden Komponente (12) einer Löt- oder Sintervorrichtung (10, 110, 210) an zumindest einem zweiten Temperaturort mittels zumindest eines zweiten Temperatursensors (26) kontaktlos gemessen wird, wobei der erste Temperaturort räumlich derart vom zweiten Temperaturort beabstandet ist, dass ein Temperaturgradient zwischen erster und zweiter Temperatur bei Temperaturveränderung erwartbar ist, und wobei die gemessene zweite Temperatur auf der Grundlage der gemessenen ersten Temperatur kalibriert wird, um eine kalibrierte zweite Temperatur zu ermitteln, und wobei die Wärmequelle (20) zumindest auf der Grundlage der kalibrierten zweiten Temperatur geregelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren in einer einstellbaren Prozessatmosphäre durchgeführt, wobei ein Einstellen der Prozessatmosphäre zumindest das Einstellen einer Stoffzusammensetzung, eines Drucks und/oder einer Temperatur der Prozessatmosphäre umfasst.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Temperatursensor (24) aus einer Gruppe ausgewählt ist, welche zumindest Heißleiter, Kaltleiter, Halbleiter-Temperatursensoren, Thermoelemente und schwingkreisbasierte Temperaturfühler umfasst, und/oder dass der zweite Temperatursensor (26) ein zur Detektion von Wärmestrahlung eingerichteter Sensor ist und bevorzugt aus einer Gruppe ausgewählt ist, welche zumindest Pyrometer, Bolometer und Thermosäulen umfasst.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die wenigstens eine Wärmequelle (20) zur kontaktbasierten oder zur kontaktlosen Wärmeübertragung auf die Bauteile (16, 18) oder auf die eine oder mehreren genannten Komponenten (12) eingerichtet ist und bevorzugt aus einer Gruppe ausgewählt ist, welche zumindest thermisch, induktiv oder kapazitiv mit den Bauteilen (16, 18) oder mit der oder den genannten Komponenten (12) koppelbare Erzeuger von elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern, bevorzugt Heizplatten, Induktionsheizelemente oder Infrarotstrahler, umfasst.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Regeln der Wärmequelle (20) in einem die Herstellung der Löt- oder Sinterverbindung umfassenden Prozessschritt erfolgt und die kalibrierte Temperatur zumindest in zumindest einem dem Prozessschritt vorgeschalteten Kalibrierschritt ermittelt wird, wobei der Kalibrierschritt das Erzeugen und Speichern einer jeweiligen Kalibrierfunktion umfasst, auf deren Grundlage aus einer gemessenen zweiten Temperatur die kalibrierte zweite Temperatur ermittelbar ist.
6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kalibrierschritt vor jeder Durchführung eines Prozessschritts durchgeführt wird, wobei das Regeln der Wärmequelle (20) im Prozessschritt auf der Grundlage der zuvor ermittelten Kalibrierfunktion durchgeführt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kalibrierschritt zusätzlich auch einmal oder mehrmals während des Prozessabschnitts durchgeführt wird, bevorzugt zu vorbestimmten Zeitpunkten oder zu Zeitpunkten, an denen sich die Temperatur der Bauteile (16, 18) im Wesentlichen nicht ändert.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass vor der Durchführung eines Prozessschritts aus mehreren bauteilspezifisch oder komponentenspezifisch gespeicherten Kalibrierfunktionen eine den zu prozessierenden Bauteilen (16, 18) entsprechende Kalibrierfunktion ausgewählt wird, wobei das Regeln der Wärmequelle (20) im Prozessschritt auf der Grundlage der ausgewählten Kalibrierfunktion durchgeführt wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kalibrierfunktion eine lineare Funktion oder eine Polynomfunktion, bevorzugt vierten Grades, ist.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Regeln der Wärmequelle (20) in einem zweistufigen Verfahren erfolgt, wobei in einer ersten Stufe auf der Grundlage der gemessenen ersten Temperatur und einer vorgegebenen Solltemperatur eine modifizierte Solltemperatur ermittelt wird, und wobei in einer zweiten Stufe auf der Grundlage der gemessenen oder der kalibrierten zweiten Temperatur und der modifizierten Solltemperatur eine Leistung der Wärmequelle (20) geregelt wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zu verbindenden Bauteile (16, 18) in einer Haupterstreckungsebene angeordnet sind, wobei der erste Temperatursensor (24) auf der einen Seite der Haupterstreckungsebene und die Wärmequelle (20) und der zweite Temperatursensor (26) auf der anderen Seite der Haupterstreckungsebene angeordnet sind, oder wobei der erste und der zweite Temperatursensor (24, 26) auf der einen Seite der Haupterstreckungsebene und die Wärmequelle (20) auf der anderen Seite der Haupterstreckungsebene angeordnet sind, oder wobei der erste und der zweite Temperatursensor (24, 26) und die Wärmequelle (20) auf der gleichen Seite der Haupterstreckungsebene angeordnet sind.

12. Löt- oder Sintervorrichtung (10, 110, 210) zum Herstellen einer Löt- oder Sinterverbindung zwischen Bauteilen (16, 18), mit wenigstens einer regelbaren Wärmequelle (20), welche zum Bereitstellen von auf die Bauteile (16, 18) zu übertragender Wärmeenergie eingerichtet ist, an zumindest einem ersten Temperaturort mit zumindest einem ersten Temperatursensor (24), welcher mit einem Bauteil (16, 18) oder einer mit einem Bauteil (16, 18) thermisch kontaktierbaren Komponente (12) der Löt- oder Sintervorrichtung (10, 110, 210) thermisch kontaktierbar ist und dazu eingerichtet ist, eine erste Temperatur des Bauteils (16, 18) oder der genannten Komponente (12) zu messen, und an zumindest einem zweiten Temperaturort mit einem zweiten Temperatursensor (26), welcher dazu eingerichtet ist, eine zweite Temperatur eines Bauteils (16, 18) oder einer mit einem Bauteil (16, 18) thermisch kontaktierbaren Komponente (12) der Löt- oder Sintervorrichtung (10, 110, 210) kontaktlos zu messen, wobei der erste Temperaturort räumlich derart vom zweiten Temperaturort beabstandet ist, dass ein Temperaturgradient zwischen erster und zweiter Temperatur bei Temperaturveränderung erwartbar ist, und mit einer Steuereinheit, welche mit der Wärmequelle (20) und mit dem ersten und dem zweiten Temperatursensor (24, 26) verbunden ist, und dazu eingerichtet ist, das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche durchzuführen.
13. Löt- oder Sintervorrichtung (10, 110, 210) nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Wärmequelle (20) ein Messfenster (22) aufweist, welches von den Bauteilen (16, 18) oder von der oder den genannten Komponenten (12) der Löt- oder Sintervorrichtung (10, 110, 210) emittierte Infrarotstrahlung in Richtung auf den zweiten Temperatursensor (26) passieren lässt.

14. Löt- oder Sintervorrichtung (10, 110, 210) nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass in dem Messfenster ein in zumindest in Richtung des zweiten Temperatursensors (26) weisender Tubus angeordnet ist, welcher dazu eingerichtet ist, von den Bauteilen (16, 18) oder von der oder den genannten Komponenten (12) der Löt- oder Sintervorrichtung (10, 110, 210) emittierte Infrarotstrahlung in Richtung auf den zweiten Temperatursensor (26) zu lenken und bevorzugt den zweiten Temperatursensor (26) von Infrarotstrahlung, welche nicht von den Bauteilen (16, 18) oder von der oder den genannten Komponenten (12) emittiert wurde, abzuschirmen.
15. Löt- oder Sintervorrichtung (10, 110, 210) nach einem der Ansprüche 12 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bauteile (16, 18), die wenigstens eine Wärmequelle (20), der zumindest erste Temperatursensor (24), und der zumindest zweite Temperatursensor (26) in oder an einer gasdichten Prozesskammer (28) mit einstellbarer Prozessatmosphäre, insbesondere Vakuum, angeordnet sind, wobei vorzugsweise der zweite Temperatursensor (24) auf einer den Bauteilen (16, 18) abgewandten Seite der Wärmequelle (20) angeordnet ist.