(19) SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 721 368 A2

(51) Int. Cl.: B23K 20/10 (2006.01)
B23K 101/38 (2006.01)

**Patentanmeldung für die Schweiz und Liechtenstein**
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

# (12) PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: 001350/2024

(22) Anmeldedatum: 08.12.2024

(43) Anmeldung veröffentlicht: 13.06.2025

(30) Priorität: 07.12.2023 US 63/607,533

(71) Anmelder:
Kulicke and Soffa Industries, Inc., 1005 Virginia Drive
Fort Washington, PA 19034 (US)

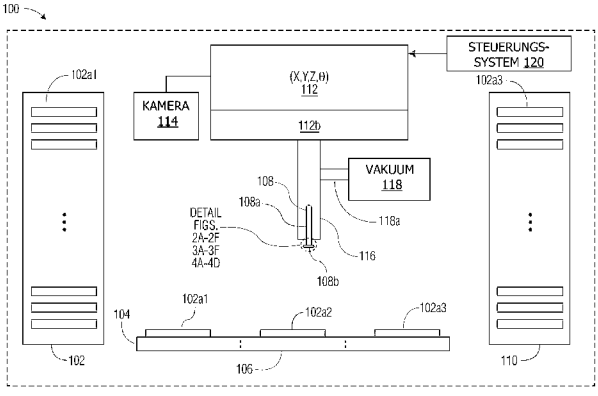
(72) Erfinder:
Todd J. Walker, Lake Forest, CA (US)
Omid Niayesh, Irvine, CA (US)
Henri Seppaenen, Irvine, CA (US)

(74) Vertreter:
freigutpartners gmbh, Gämsenstrasse 3
8006 Zürich (CH)

## (54) Leitfähiger Stift, Leistungsmodul mit einem leitfähigen Stift sowie Ultraschallschweisssystem und Verfahren zum Schweissen eines leitfähigen Stiftes an ein Werkstück

(57) Die Erfindung betrifft einen leitfähigen Stift (108) für das Ultraschallschweissen. Der leitfähige Stift (108) umfasst einen Rumpfabschnitt (108a). Der leitfähige Stift (108) umfasst auch einen Stiftkopf (108b) an einem Ende des Rumpfabschnitts (108a). Der Stiftkopf (108b) definiert eine Bondfläche, die so konfiguriert ist, dass sie mittels Ultraschall an ein Werkstück (102a1, 102a2, 102a3) geschweisst werden kann. Die Bondfläche umfasst mindestens eine von (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

Weitere Erfindungen betreffen ein Leistungsmodul, umfassend ein Halbleiterelement, ein Trägerelement zum Tragen des Halbleiterelements und mindestens einen leitfähigen Stift, der mit dem Trägerelement ultraschallverschweisst ist, ein Ultraschallschweisssystem, das zum Schweissen eines leitfähigen Stiftes an ein Werkstuck konfiguriert ist und ein Verfahren zum Ultraschallschweissen eines leitfähigen Stiftes an ein Werkstuck.



## Beschreibung

### VERWEIS AUF VERBUNDENE ANMELDUNG

**[0001]** Diese Anmeldung beansprucht den Benefit der US-Provisorischen Anmeldung Nr. 63/607,533, eingereicht am 7. Dezember 2023, deren Inhalt durch Verweis in diese Anmeldung aufgenommen wird.

### FACHGEBIET

**[0002]** Die Erfindung bezieht sich auf das Ultraschallschweissen und insbesondere auf verbesserte Systeme und Verfahren zur Durchführung von Ultraschallschweissvorgängen, einschliesslich des Schweissens von leitfähigen Stiften.

### HINTERGRUND

**[0003]** Ultraschallenergie wird häufig zur Herstellung von Verbindungen zwischen zwei oder mehr Materialien verwendet. Drahtbondsysteme (z. B. Kugelbondmaschinen, Keilbondmaschinen, Bandbondmaschinen usw.) werden beispielsweise verwendet, um einen Draht oder ein Band an eine Bondstelle zu bonden. Beim Drahtbonden werden relativ geringe Energiemengen (z. B. Bondkraft, Ultraschallenergie usw.) verwendet. Beispielhafte Drahtbondsysteme werden von Kulicke and Soffa Industries, Inc. in Fort Washington, Pennsylvania, vermarktet.

**[0004]** Bei bestimmten Anwendungen werden andere Materialien als Draht verbunden. Für solche Anwendungen wurde das Schweissen in Betracht gezogen. Ultraschallschweissen ist ebenfalls eine weit verbreitete Technologie. Beim Ultraschallschweissen kann ein Ultraschallkonverter (der z. B. eine Sonotrode trägt) verwendet werden, um elektrische Energie in mechanische Bewegung/Schrubben umzuwandeln (z. B. lineare Bewegung/Schrubben, Torsionsbewegung/Schrubben usw.). Die vorhandene Ultraschallschweisstechnologie und -ausrüstung ist jedoch nur begrenzt in der Lage, Lösungen bereitzustellen, die die Marktnachfrage in Bezug auf Kosten, betriebliche Effizienz, Flexibilität, Portabilität und damit verbundene Faktoren erfüllen können.

**[0005]** US-Patent Nr. 10.882.134 (mit dem Titel „Ultraschallschweisssysteme und Verfahren zu deren Verwendung"), US-Patent Nr. 11.364.565 (mit dem Titel „Ultraschallschweisssysteme und Verfahren zu deren Verwendung") und US- Patente Nr. 11.850.676 und 12.070.814 (mit dem Titel „Ultraschallschweisssysteme, Verfahren zu deren Verwendung und damit verbundene Werkstücke einschliesslich geschweisster leitfähiger Stifte"), die Kulicke and Soffa Industries, Inc. zugewiesen wurden, beziehen sich auf Verbesserungen in der Ultraschallschweisstechnologie und werden durch Verweis in ihrer Gesamtheit aufgenommen.

**[0006]** Dennoch sind Verbesserungen im Zusammenhang mit Anwendungen des Ultraschallschweissens erforderlich, einschliesslich des Ultraschallschweissens von Stiften (bei dem solche Stifte häufig in Leistungsmodule gelötet und/oder eingepresst werden). Daher wäre es wünschenswert, die Ultraschallschweisstechnologie einschliesslich des Ultraschallschweissens von Stiften zu verbessern.

### ZUSAMMENFASSUNG

**[0007]** Gemäss einer beispielhaften Ausführungsform der Erfindung wird ein leitfähiger Stift für das Ultraschallschweissen bereitgestellt. Der leitfähige Stift umfasst einen Rumpfabschnitt. Der leitfähige Stift umfasst ausserdem einen Stiftkopf an einem Ende des Rumpfabschnitts. Der Stiftkopf definiert eine Bondfläche, die so konfiguriert ist, dass sie mittels Ultraschall an ein Werkstück geschweisst werden kann. Die Bondfläche umfasst mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

**[0008]** Gemäss anderen Ausführungsformen der Erfindung kann der im unmittelbar vorhergehenden Absatz beschriebene leitfähige Stift eines oder mehrere der folgenden Merkmale aufweisen: die Bondfläche umfasst die nicht ebene Fläche; die nicht ebene Fläche ist eine gekrümmte Fläche; die gekrümmte Fläche hat einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm; die Bondfläche umfasst die im zentralen Bereich der Bondfläche definierte Öffnung; die Öffnung eine maximale Tiefe zwischen 10 µm und 1000 µm aufweist; die Öffnung sich über die gesamte Länge des Rumpfabschnitts des leitfähigen Stifts erstreckt; die Öffnung eine konische Öffnung ist; die Öffnung eine gekrümmte Öffnung ist; die gekrümmte Öffnung einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm aufweist; die Öffnung eine zylindrische Öffnung ist; die nicht ebene Oberfläche eine gewinkelte Oberfläche ist; die gewinkelte Oberfläche in einem Winkel zwischen 1 Grad und 15 Grad in Bezug auf eine horizontale Ebene konfiguriert ist, wobei die horizontale Ebene senkrecht zu einer Längsrichtung des Rumpfabschnitts ist; und/oder die Bondfläche so konfiguriert ist, dass sie unter Verwendung von Torsionsschwingungen mittels Ultraschall an ein Werkstück geschweisst werden kann.

**[0009]** Gemäss einer weiteren beispielhaften Ausführungsform der Erfindung ist ein Leistungsmodul vorgesehen. Das Leistungsmodul umfasst ein Halbleiterelement. Das Leistungsmodul umfasst auch ein Trägerelement zum Tragen des Halbleiterelements. Das Leistungsmodul umfasst auch mindestens einen leitfähigen Stift, der mittels Ultraschall an das Trägerelement geschweisst ist. Der leitfähige Stift umfasst einen Rumpfabschnitt und einen Stiftkopf an einem Ende des Rumpfabschnitts. Der Stiftkopf definiert eine Bondfläche, die an das Trägerelement geschweisst wird. Die Bondfläche des leitfähigen Stifts umfasste vor dem Ultraschallschweissen an das Trägerelement mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

**[0010]** Gemäss anderen Ausführungsformen der Erfindung kann das im unmittelbar vorhergehenden Absatz genannte Leistungsmodul eines oder mehrere der folgenden Merkmale aufweisen: Die Bondfläche umfasste die nicht ebene Fläche, bevor sie mit dem Trägerelement ultraschallverschweisst wurde; die nicht ebene Fläche war eine gekrümmte Fläche; die gekrümmte Fläche hatte einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm; die Bondfläche die die im zentralen Bereich der Bondfläche definierte Öffnung enthielt, bevor sie mit dem Trägerelement ultraschallverschweisst wurde; die Öffnung eine maximale Tiefe zwischen 10 µm und 1000 µm aufwies; die Öffnung sich über die gesamte Länge des Rumpfabschnitts des leitfähigen Stifts erstreckte; die Öffnung eine konische Öffnung war; die Öffnung eine gekrümmte Öffnung war; die gekrümmte Öffnung einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm aufwies; die Öffnung eine zylindrische Öffnung war; die nicht ebene Oberfläche eine abgewinkelte Oberfläche war; die abgewinkelte Oberfläche in einem Winkel zwischen 1 Grad und 15 Grad in Bezug auf eine horizontale Ebene konfiguriert war, wobei die horizontale Ebene senkrecht zu einer Längsrichtung des Rumpfabschnitts war; und/oder die Bondfläche so konfiguriert war, um unter Verwendung von Torsionsschwingungen mittels Ultraschallgeschweisst an ein Werkstück geschweisst zu werden.

**[0011]** Gemäss einer weiteren beispielhaften Ausführungsform der Erfindung wird ein Ultraschallschweisssystem bereitgestellt, das zum Schweissen eines leitfähigen Stifts an ein Werkstück konfiguriert ist. Das Ultraschallschweisssystem umfasst eine Sonotrode, die so konfiguriert ist, dass sie den leitfähigen Stift während eines Schweissvorgangs mittels Ultraschall an das Werkstück schweisst. Das Ultraschallschweisssystem umfasst auch ein Steuerungssystem, das so konfiguriert ist, dass es den Schweissvorgang steuert, wobei der Schweissvorgang das Bonden einer Bondfläche des leitfähigen Stifts an das Werkstück umfasst, wobei die Bondfläche mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer in einem zentralen Bereich der Bondfläche definierten Öffnung umfasst.

**[0012]** Gemäss anderen Ausführungsformen der Erfindung kann das im unmittelbar vorhergehenden Absatz beschriebene Ultraschallschweisssystem eines oder mehrere der folgenden Merkmale aufweisen: das Steuerungssystem ist so konfiguriert, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der Bondfläche anwendet; die Bondfläche umfasst die nicht ebene Fläche, das Steuerungssystem ist so konfiguriert, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der nicht ebenen Fläche anwendet; die Bondfläche umfasst die in dem zentralen Bereich definierte Öffnung, das Steuerungssystem ist so konfiguriert, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der in dem zentralen Bereich definierten Öffnung anwendet; die Bondfläche die nicht ebene Fläche und die im zentralen Bereich der nicht ebenen Fläche definierte Öffnung umfasst, das Steuerungssystem so konfiguriert ist, dass es während des Schweissvorgangs Prozessparameter auf der Grundlage der nicht ebenen Fläche und der im zentralen Bereich der nicht ebenen Fläche definierten Öffnung anwendet; die Prozessparameter umfassen mindestens ein Auswahl aus Bondkraft, Bondenergie und Bonddauer; und/oder der Schweissvorgang Torsionsschwingungen nutzt, die von der Sonotrode aufgebracht werden. Ferner sollte klar sein, dass eines oder mehrere der in den vorstehenden Absätzen dieser Zusammenfassung beschriebenen Merkmale eines leitfähigen Stifts und/oder eines Leistungsmoduls in Verbindung mit dem Ultraschallschweisssystem verwendet werden können.

**[0013]** Gemäss einer weiteren beispielhaften Ausführungsform der Erfindung wird ein Verfahren zum Ultraschallschweissen eines leitfähigen Stifts an ein Werkstück bereitgestellt. Das Verfahren umfasst die folgenden Schritte: (a) Bereitstellen eines Werkstücks; und (b) Ultraschallschweissen des leitfähigen Stifts an das Werkstück, wobei der leitfähige Stift einen Rumpfabschnitt und einen Stiftkopf an einem Ende des Rumpfabschnitts umfasst, wobei der Stiftkopf eine Bondfläche definiert, die so konfiguriert ist, dass sie mittels Ultraschall an das Werkstück geschweisst werden kann, wobei die Bondfläche mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer in einem zentralen Bereich der Bondfläche definierten Öffnung umfasst.

**[0014]** Gemäss anderen Ausführungsformen der Erfindung kann das im unmittelbar vorhergehenden Absatz beschriebene Verfahren eines oder mehrere der folgenden Merkmale aufweisen: Schritt (b) umfasst das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der Bondfläche; Schritt (b) umfasst das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der nicht ebenen Fläche; Schritt (b) umfasst das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der in dem zentralen Bereich definierten Öffnung; Schritt (b) umfasst das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der nicht ebenen Oberfläche und der Öffnung, die im zentralen Bereich der nicht ebenen Oberfläche definiert ist; Schritt (b) umfasst das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens, wobei die Prozessparameter mindestens eine Auswahl aus Bondkraft, Bondenergie und Bonddauer umfassen; und/oder Schritt (b) umfasst das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens, wobei das Ultraschallschweissen Torsionsschwingungen nutzt, die durch eine Sonotrode aufgebracht werden, die so konfiguriert ist, dass sie den leitfähigen Stift mittels Ultraschall an das Werkstück schweisst. Ferner sollte klar sein, dass jedes Merkmal eines leitfähigen Stifts und/oder eines Leistungsmoduls, das in den vorhergehenden Absätzen dieser Zusammenfassung beschrieben ist, in Verbindung mit dem Ultraschallschweisssystem verwendet werden kann.

## KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**[0015]** Die Erfindung wird am besten anhand der folgenden detaillierten Beschreibung verstanden, wenn sie in Verbindung mit den beigefügten Zeichnungen gelesen wird. Es wird betont, dass die verschiedenen Merkmale der Zeichnungen

gemäss der üblichen Praxis nicht massstabsgetreu sind. Im Gegenteil, die Abmessungen der verschiedenen Merkmale werden zur besseren Übersichtlichkeit willkürlich vergrössert oder verkleinert. In den Zeichnungen sind die folgenden Abbildungen enthalten:

ABB. 1 ist eine Blockdiagramm-Seitenansicht eines Ultraschallschweisssystems gemäss einer beispielhaften Ausführungsform der Erfindung;

ABB. 2A-2F sind Seitenansichten im Querschnitt von leitfähigen Stiften (oder Teilen davon) gemäss verschiedenen beispielhaften Ausführungsformen der Erfindung;

Die ABBILDUNGEN 3A-3F sind Seitenansichten im Querschnitt von leitfähigen Stiften (oder Teilen davon) gemäss verschiedenen beispielhaften Ausführungsformen der Erfindung;

die ABBILDUNGEN 4A-4D sind Seitenansichten im Querschnitt von leitfähigen Stiften (oder Teilen davon) gemäss verschiedenen beispielhaften Ausführungsformen der Erfindung;

Figur 5 ist eine Blockdiagramm-Seitenansicht eines Leistungsmoduls gemäss einem Ausführungsbeispiel der Erfindung; und

Figur 6 ist ein Flussdiagramm eines Verfahrens zum Ultraschallschweissen eines leitfähigen Stifts an ein Werkstück gemäss verschiedenen Ausführungsbeispielen der Erfindung.

## DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

**[0016]** Bestimmte beispielhafte Ausführungsformen der Erfindung beziehen sich auf Ultraschallschweisssysteme und Verfahren zu deren Verwendung, beispielsweise in Verbindung mit leitfähigen Stiften und/oder Leistungsmodulen. Solche Ultraschallschweisssysteme können zum Schweissen von leitfähigen Stiften (und/oder Kupferanschlüssen oder anderen leitfähigen Anschlüssen) an ein Werkstück (z. B. ein Substrat, ein Trägerelement usw.) verwendet werden.

**[0017]** Ultraschallschweisssysteme umfassen in der Regel einen Ultraschallschweisskonverter. Solche Konverter können beispielsweise für den Betrieb in einem linearen Modus/einer linearen Bewegung oder in einem Torsionsmodus/einer Torsionsbewegung ausgelegt sein. Ein linearer Ultraschallkonverter trägt beispielsweise eine Sonotrode, und während des Betriebs vibriert ein Kontaktabschnitt der Sonotrode mit Ultraschall in einer im Wesentlichen linearen Bewegung. Im Gegensatz dazu trägt ein torsionaler Ultraschallkonverter eine Sonotrode, und während des Betriebs vibriert der konkave Abschnitt der Sonotrode mit Ultraschall in einer im Wesentlichen rotierenden/torsionalen Bewegung.

**[0018]** Bestimmte Ultraschallschweisssysteme, wie z. B. Stiftschweissmaschinen, können zum Schweissen/Bonden von leitfähigen Stiften an ein Werkstück verwendet werden. Herkömmliche Bondflächen (d. h. die geschweisste Seite) von leitfähigen Stiften für das Ultraschallschweissen sind fast immer im Wesentlichen flache oder ebene Oberflächen mit unterschiedlichen Rauheitsgraden. Herkömmliche leitfähige Stifte haben in der Regel eine Unterseite (die geschweisste Seite), die ein im Wesentlichen flaches Profil aufweist. Beim herkömmlichen Torsionsschweissen von Stiften kann es vorkommen, dass der Mittelpunkt der Bondfläche des leitfähigen Stifts (d. h. ein Punkt, der mit der Drehachse des leitfähigen Stifts und/oder der Sonotrode zusammenfällt) nicht genügend Bondenergie erfährt. Folglich kann die gebondete Übergangsfläche zwischen dem leitfähigen Stift und dem Werkstück (z. B. einem Trägerelement) Spannungskonzentrationen (z. B. aufgrund ungleichmässiger oder unzureichender Bindung), Delamination, Ermüdungsstellen, schlechte Leitfähigkeit oder andere Bondprobleme aufweisen. Bestimmte Aspekte der Erfindung befassen sich mit solchen Problemen, die mit herkömmlichen Bondflächen von leitfähigen Stiften verbunden sind.

**[0019]** Gemäss bestimmten Aspekten der Erfindung kann ein Stiftkopf eines leitfähigen Stifts eine Bondfläche aufweisen, die nicht planar ist. Die Bondfläche kann als ein nicht planares Profil aufweisend betrachtet werden. Beispiele für nicht planare Profile sind unter anderem ein geneigtes Profil, ein abgewinkeltes Profil, ein gekrümmtes Profil, die hierin und/oder im Rahmen der Erfindung beschrieben werden. Die nicht-planare Bondfläche des Stiftkopfes kann die Schweissverbindung des leitfähigen Stiftes wesentlich verbessern.

**[0020]** Gemäss bestimmten Aspekten der Erfindung kann ein Stiftkopf eines leitfähigen Stiftes eine Bondfläche aufweisen, die eine in einem zentralen Bereich der Bondfläche definierte Öffnung umfasst.

**[0021]** Unter Bezugnahme auf die Zeichnungen zeigt Fig. 1 ein Ultraschallschweisssystem 100. Das Ultraschallschweisssystem 100 ist so konfiguriert, dass es einen leitfähigen Stift (z. B. einen leitfähigen Stift 108, 208, 308, 408 der 1, 2A-2F, 3A-3F bzw. 4A-4D) mittels Ultraschall an ein Werkstück (z. B. Werkstück 102a1, 102a2, 102a3, ein Trägerelement usw.) schweisst. Das Ultraschallschweisssystem 100 umfasst eine Werkstückzuführung 102 zur Bereitstellung eines Werkstücks 102a1, wobei die Werkstückzuführung 102 so konfiguriert ist, dass sie eine Vielzahl von Werkstücken 102a1 transportieren kann (z. B. kann die Werkstückzuführung 102 ein Handhabungssystem für Magazine sein, das eine Vielzahl von Werkstücken 102a1 transportieren kann, oder eine andere Zuführungsstruktur, die für das anwendungsspezifische Werkstück geeignet ist, usw.). Zu den beispielhaften Werkstücken 102a1, die von der Werkstückzuführung 102 transportiert werden, gehören Halbleiterelemente, Leistungsmodule, Trägerelement, Komponenten von Leistungsmodulen, Leiterrah-

men, Batteriemodule usw. Die Werkstücke 102a1 werden (durch eine beliebige Transportvorrichtung, die in einem Materialhandhabungssystem 104 enthalten sein kann, wie z. B. eine Greifervorrichtung) von der Werkstückzuführung 102 zum Materialhandhabungssystem 104 transportiert.

**[0022]** Das Materialhandhabungssystem 104 bewegt das Werkstück 102a1 (z. B. unter Verwendung einer Förderanlage, einer Greifervorrichtung usw.) zu einer Auflagestruktur 106. Die Auflagestruktur 106 stützt das Werkstück (nun als festgeklemmtes Werkstück 102a2 bezeichnet, wenn es mit einer Werkstückklemme gegen die Auflagestruktur 106 geklemmt wird) während eines Schweissvorgangs. Nach dem Schweissvorgang (unten beschrieben in Bezug auf eine Schweisskopfbaugruppe 112) wird das nunmehr geschweisste Werkstück 102a3 (z. B. unter Verwendung einer Förderanlage, einer Greiferbaugruppe usw.) von einem der Auflagestruktur 106 nachgeschalteten Teil des Materialhandhabungssystems 104 zu einer Werkstückausgangszuführung 110 bewegt. Der Ausgangs-Werkstückvorrat 110 ist so konfiguriert, dass er geschweisste Werkstücke 102a3 nach der Bearbeitung durch die Schweisskopfbaugruppe 112 aufnimmt. Der Ausgangs-Werkstückvorrat 110 kann ein Handhabungssystem für Magazine zum Tragen einer Vielzahl von geschweissten Werkstücken 102a3 oder eine andere Versorgungsstruktur sein, die für das anwendungsspezifische Werkstück geeignet ist.

**[0023]** Das Ultraschallschweisssystem 100 umfasst eine Schweisskopfbaugruppe 112. Die Schweisskopfbaugruppe 112 umfasst einen Ultraschallwandler 112b, der eine Sonotrode 116 trägt, und ist entlang mehrerer im Wesentlichen horizontaler Achsen beweglich. In dem in Fig. 1 gezeigten Beispiel ist die Schweisskopfbaugruppe 112 so konfiguriert, dass sie sich entlang der x-Achse und der y-Achse des Ultraschallschweisssystems 100 bewegt. In dem in Fig. 1 gezeigten Beispiel ist die Schweisskopfbaugruppe 112 auch so konfiguriert, dass sie sich entlang der z-Achse des Ultraschallschweisssystems 100 und um eine Theta-Achse (∅-Achse) des Ultraschallschweisssystems 100 bewegt. Nicht alle diese Bewegungsachsen sind in jeder Anwendung erforderlich. Mit den Bewegungsachsen der Schweisskopfbaugruppe 112 kann die Sonotrode 116 in die richtigen Schweisspositionen in Bezug auf das festgeklemmte Werkstück 102a2 bewegt werden. Es ist auch eine Kamera 114 vorhanden (die optional von der Schweisskopfbaugruppe 112 oder einem anderen Teil des Ultraschallschweisssystems 100 getragen werden kann) für Bildgebungsvorgänge, die sich auf die Ausrichtung zwischen der Sonotrode 116 und dem festgeklemmten Werkstück 102a2 beziehen, die Ausrichtung der Komponenten des festgeklemmten Werkstücks 102a2 an sich, optische Inspektion der Schweissnähte nach dem Schweissvorgang usw.

**[0024]** Die Sonotrode 116 ist mit einem Vakuum 118 (z. B. einer Vakuumquelle) verbunden dargestellt. Die Sonotrode 116 kann einen Vakuumkanal (nicht dargestellt) definieren, der über eine Rohrleitung 118a mit einem Vakuum verbunden ist, um den leitfähigen Stift 108 von einer Zufuhr für leitfähige Stifte (nicht dargestellt) aufzunehmen.

**[0025]** Die Sonotrode 116 ist so dargestellt, dass sie den leitfähigen Stift 108 vor einem Ultraschallschweissvorgang trägt. Ein Rumpfabschnitt 108a des leitfähigen Stifts 108 ist mit der Sonotrode 116 angeordnet dargestellt. Wie dem Fachmann bekannt sein wird, ist der leitfähige Stift 108 (und andere leitfähige Stifte, die hierin dargestellt und/oder beschrieben sind) typischerweise zylindersymmetrisch und/oder hat entlang seiner Länge einen runden Querschnitt. Ein Stiftkopf 108b (an einem distalen Ende des Rumpfabschnitts 108a) ist unterhalb der Sonotrode 116 angeordnet dargestellt. Einzelheiten des leitfähigen Stifts 108 und des Stiftkopfs 108b sind in den Figuren 2A-2F, 3A-3F und 4A-4D dargestellt.

**[0026]** Das Ultraschallschweisssystem 100 ist einschliesslich eines Steuerungssystems 120 dargestellt. Das Steuerungssystem 120 ist so konfiguriert, dass es den Schweissprozess steuert (z. B. das Schweissen des leitfähigen Stifts 108 an das Werkstück 102a1/102a2/102a3). Der Schweissprozess umfasst das Ultraschallschweissen einer Bondfläche des leitfähigen Stifts an das Werkstück, wobei die Bondfläche mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer in einem zentralen Bereich der Bondfläche definierten Öffnung umfasst. In bestimmten Ausführungsformen ist das Steuerungssystem 120 so konfiguriert, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der Bondfläche anwendet.

**[0027]** In einem Beispiel kann das Steuerungssystem, wenn die Bondfläche eine nicht ebene Fläche umfasst, so konfiguriert werden, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der nicht ebenen Fläche anwendet.

**[0028]** In einem anderen Beispiel kann das Steuerungssystem, wenn die Bondfläche eine Öffnung umfasst, die im zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist, so konfiguriert werden, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der im zentralen Bereich definierten Öffnung anwendet.

**[0029]** In einem anderen Beispiel, wenn die Bondfläche die nichtplanare Fläche und die im zentralen Bereich der nichtplanaren Fläche definierte Öffnung umfasst, kann das Steuerungssystem so konfiguriert werden, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der nichtplanaren Fläche und der im zentralen Bereich der nichtplanaren Fläche definierten Öffnung anwendet.

**[0030]** Die Prozessparameter können mindestens eine Auswahl aus Bondkraft, Bondenergie und Bonddauer umfassen. Der Schweissprozess kann Torsionsschwingungen nutzen, die von der Sonotrode aufgebracht werden.

**[0031]** Mit dem Ultraschallschweisssystem 100 (oder anderen Systemen im Rahmen der Erfindung) können verschiedene Arten von Werkstücken geschweisst werden. Zu den beispielhaften Werkstücken gehören ein Leistungsmodul, ein Leiterrahmen und ein Batteriemodul.

**[0032]** Es versteht sich, dass sich der Begriff „Leistungsmodul“ (manchmal auch als Leistungselektronikmodul bezeichnet), wie er hier verwendet wird, auf ein Modul zur Aufnahme einer oder mehrerer Leistungskomponenten (z. B. Leistungs-

halbleiterelemente oder -bauelemente) bezieht. Beispiele für Leistungskomponenten umfassen MOSFETs, IGBTs, BJTs, Thyristoren, GTPs und JFETs. Ein solches Modul enthält typischerweise auch ein Trägerelement (z. B. ein leistungselektronisches Substrat) zum Tragen der Leistungskomponenten. Im Vergleich zu diskreten Leistungshalbleitern bieten Leistungsmodule in der Regel eine höhere Leistungsdichte. Wie dem Fachmann bekannt ist, sind die in den Zeichnungen dargestellten Leistungsmodule zur besseren Veranschaulichung vereinfacht dargestellt.

**[0033]** Gemäss der Erfindung können einem Leiter (z. B. einem leitfähigen Stift, einem Signalverbinder, einem leitfähigen Anschluss, einem Stromanschluss usw.) verschiedene Arten von Ultraschallbewegungen übertragen werden. Zum Beispiel kann die Sonotrode so konfiguriert werden, dass sie einen Leiter an ein Werkstück anschweisst, wobei mindestens eine Auswahl aus linearen Ultraschallbewegungen und torsionalen Ultraschallbewegungen verwendet wird.

**[0034]** Bestimmte dieser Werkstücke sind so konfiguriert, dass sie einen leitfähigen Stift aufnehmen können. Im Sinne dieser Beschreibung ist der Begriff „leitfähiger Stift" eine leitfähige Struktur, die an ein Werkstück geschweisst werden soll. Der leitfähige Stift kann ein freies Ende (nach dem Anschweissen an ein Werkstück) haben, und ein Rumpfabschnitt des leitfähigen Stifts kann sich im Wesentlichen vertikal von einem „geschweissten" Ende bis zum freien Ende erstrecken. Der Querschnitt des leitfähigen Stifts kann rund, quadratisch, rechteckig oder beliebig geformt sein. Der Begriff „leitfähiger Stift" umfasst auch leitfähige Aufnahmen oder Hülsen (z. B. in Röhrenform wie eine Niete), bei denen die leitfähige Aufnahme/Hülse mittels Ultraschall an ein Werkstück geschweisst und so konfiguriert ist, dass sie ein anderes leitfähiges Element aufnehmen kann. Gemäss bestimmten beispielhaften Ausführungsformen kann das Ultraschallschweisssystem 100 eine Zuführung für leitfähige Stifte umfassen, die so konfiguriert ist, dass sie eine Vielzahl von leitfähigen Stiften zum Schweissen unter Verwendung der Sonotrode 116 bereitstellt. Beispielhafte Konfigurationen für die Zuführung leitfähiger Stifte umfassen: eine Gitteranordnung (einschliesslich Spalten und Reihen leitfähiger Stifte, die zur Erleichterung der Aufnahme auf die Weise ausgerichtet sind), einen Schalenförderer, ein Magazin, eine Spule usw. Alternative Konfigurationen sind vorstellbar. Eine solche Zuführung leitfähiger Stifte kann so konfiguriert sein, dass sie mit einem Puffersystem arbeitet, so dass die Stifte durch einen Bereitstellungsbereich geführt werden, wo sie zum Schweissen aufgenommen werden können.

**[0035]** Beispielhafte Ausführungsformen des leitfähigen Stifts 108 sind in den Figuren 2A-2F, 3A-3F und 4A-4D als leitfähiger Stift 208, leitfähiger Stift 308 bzw. leitfähiger Stift 408 dargestellt.

**[0036]** Unter besonderer Bezugnahme auf 2A ist der leitfähige Stift 208 dargestellt. Der leitfähige Stift 208 umfasst einen Rumpfabschnitt 208a. Der leitfähige Stift 208 umfasst auch einen Stiftkopf 208b an einem distalen Ende (d. h. entlang der Z-Achse) des Rumpfabschnitts 208a. Der Stiftkopf 208b definiert eine Bondfläche 208c, die so konfiguriert ist, dass sie mittels Ultraschall an ein Werkstück geschweisst werden kann. Die Bondfläche 208c umfasst mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche 208c definiert ist. Längsrichtung LD des Rumpfabschnitts 208a und Horizontalebene HP sind dargestellt; Horizontalebene HP ist senkrecht zur Längsrichtung LD des Rumpfabschnitts 208a. Beispielhafte Bereiche für die Gesamtlänge (oder Höhe) des leitfähigen Stifts 208 (oder jedes anderen hierin dargestellten und/oder beschriebenen leitfähigen Stifts) sind: 1 mm - 100 mm; und 3 mm - 30 mm. Andere Bereiche sind vorstellbar.

**[0037]** Die Figuren 2B-2F zeigen verschiedene Ausführungsformen des leitfähigen Stifts 208, einschliesslich der Stiftköpfe 208b1, 208b2, 208b3, 208b4 bzw. 208b5. In den gesamten Figuren 2B-2F ist jeder jeweilige Stiftkopf mit einer Breite $W_1$ und einer gekrümmten Oberfläche (der Bondfläche 208c) mit einem Krümmungsradius $\rho_1$ dargestellt. Beispielhafte Bereiche für $W_1$ umfassen: 0,5 mm - 10 mm; und 1 mm - 4 mm. Beispielhafte Bereiche für den Krümmungsradius $\rho_1$ sind: 1 mm - 1000 mm; und 2 mm - 100 mm. Andere Bereiche sind vorstellbar.

**[0038]** Unter besonderer Bezugnahme auf 2B ist der Stiftkopf 208b1 einschliesslich der Bondfläche 208c1 dargestellt. Die Bondfläche 208c1 umfasst eine nicht planare Fläche 208c1a; insbesondere ist die nicht planare Fläche 208c1a eine gekrümmte Fläche. Die nicht planare Fläche 208c1a hat einen Krümmungsradius von $\rho_1$.

**[0039]** Unter Bezugnahme auf Fig. 2C ist nun der Stiftkopf 208b2 einschliesslich der Bondfläche 208c2 dargestellt. Die Bondfläche 208c2 umfasst eine nichtplanare Fläche 208c2a; insbesondere ist die nichtplanare Fläche 208c2a eine gekrümmte Fläche. Die Bondfläche 208c2 umfasst ferner eine Öffnung 208c2b, die im zentralen Bereich der Bondfläche 208c2 definiert ist. Insbesondere ist die Öffnung 208c2b eine abgewinkelte Öffnung 208c2b. Die Öffnung 208c2b ist als konische Öffnung mit einer Breite $W_2$, einem Winkel von $\theta_1$ und einer maximalen Tiefe von $d_1$ dargestellt. Ein beispielhafter Bereich für die Breite $W_2$ ist 0,1 mm - 3 mm. Beispielhafte Bereiche für den Winkel $\theta_1$ sind: 60 - 170 Grad; und 90-120 Grad. Beispielhafte Bereiche für $d_1$ sind: 10 µm - 1000 µm; und 1 µm - 3000 µm. Andere Bereiche sind vorstellbar.

**[0040]** Unter Bezugnahme auf Fig. 2D ist nun der Stiftkopf 208b3 einschliesslich der Bondfläche 208c3 dargestellt. Die Bondfläche 208c3 umfasst eine nicht planare Fläche 208c3a; insbesondere ist die nicht planare Fläche 208c3a eine gekrümmte Fläche. Die Bondfläche 208c3 umfasst ferner eine Öffnung 208c3b, die im zentralen Bereich der Bondfläche 208c3 definiert ist. Insbesondere ist die Öffnung 208c3b eine gekrümmte Öffnung. Die Öffnung 208c3b ist als kugelförmige Kappenöffnung oder kuppelförmige Öffnung mit einer Breite $W_2$, einem Krümmungsradius $\rho_2$ und einer maximalen Tiefe $d_2$ dargestellt. Ein Beispiel für einen Bereich der Breite $W_2$ ist 0,1 mm - 3 mm. Beispielbereiche für den Krümmungsradius $\rho_2$ sind: 2 mm - 100 mm; und 1 mm - 1000 mm. Beispielbereiche für die maximale Tiefe $d_2$ sind: 10 µm - 1000 µm; und 1 µm - 3000 µm. Andere Bereiche sind vorstellbar.

**[0041]** Unter Bezugnahme auf Fig. 2E ist nun der Stiftkopf 208b4 einschliesslich der Bondfläche 208c4 dargestellt. Die Bondfläche 208c4 umfasst eine nicht planare Fläche 208c4a; insbesondere ist die nicht planare Fläche 208c4a eine gekrümmte Fläche. Die Bondfläche 208c4 umfasst ferner eine Öffnung 208c4b, die im zentralen Bereich der Bondfläche 208c4 definiert ist. Insbesondere ist die Öffnung 208c4b eine zylindrische Öffnung. Die Öffnung 208c4b ist mit einer Breite $W_2$ und einer maximalen Tiefe $d_3$ dargestellt. Ein beispielhafter Bereich für die Breite $W_2$ liegt zwischen 0,1 mm und 3 mm. Beispielhafte Bereiche für die maximale Tiefe $d_3$ sind: 10 µm - 1000 µm; und 1 µm - 3000 µm. Andere Bereiche sind vorstellbar. Es sollte verstanden werden, dass die Öffnung 208c4b als rechteckige Öffnung, ovale Öffnung und andere geometrisch geformte Öffnungen ausgeführt sein kann.

**[0042]** Unter Bezugnahme auf Fig. 2F ist nun der Stiftkopf 208b5 einschliesslich der Bondfläche 208c5 dargestellt. Die Bondfläche 208c5 umfasst eine nicht planare Fläche 208c5a; insbesondere ist die nicht planare Fläche 208c5a eine gekrümmte Fläche. Die Bondfläche 208c5 umfasst ferner eine Öffnung 208c5b, die im mittleren Bereich der Bondfläche 208c5 definiert ist. Insbesondere ist die Öffnung 208c5b eine zylindrische Öffnung. Die Öffnung 208c5b ist mit einer Breite $W_2$ dargestellt und erstreckt sich über eine Länge (z. B. die volle Länge) des Rumpfabschnitts 208a. Ein beispielhafter Bereich für die Breite $W_2$ liegt zwischen 0,1 mm und 3 mm. Andere Bereiche sind vorstellbar. Es versteht sich, dass die Öffnung 208c5b als rechteckige Öffnung, ovale Öffnung, pyramidenförmige Öffnung und andere geometrisch geformte Öffnungen ausgeführt sein kann.

**[0043]** In Bezug auf Fig. 3A ist der leitfähige Stift 308 dargestellt. Der leitfähige Stift 308 umfasst einen Rumpfabschnitt 308a. Der leitfähige Stift 308 umfasst auch einen Stiftkopf 308b an einem distalen Ende (d. h. entlang der Z-Achse) des Rumpfabschnitts 308a. Der Stiftkopf 308b definiert eine Bondfläche 308c, die so konfiguriert ist, dass sie mittels Ultraschall an ein Werkstück geschweisst werden kann. Die Bondfläche 308c umfasst mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche 308c definiert ist. Die Längsrichtung LD des Rumpfabschnitts 308a und die Horizontalebene HP sind dargestellt; die Horizontalebene HP ist senkrecht zur Längsrichtung LD des Rumpfabschnitts 308a.

**[0044]** Die Figuren 3B-3F zeigen verschiedene Ausführungsformen des leitfähigen Stifts 308, einschliesslich der Stiftköpfe 308b1, 308b2, 308b3, 308b4 bzw. 308b5. In den gesamten Figuren 3B-3F ist jeder jeweilige Stiftkopf mit einer Breite $W_1$ und einer abgewinkelten Fläche der Bondfläche mit einem Winkel $\theta_2$ dargestellt. Die abgewinkelte Fläche ist in einem Winkel $\theta_2$ zur horizontalen Ebene HP angeordnet. Beispielhafte Bereiche für $W_1$ sind: 0,5 mm - 10 mm; und 1 mm - 4 mm. Beispielhafte Bereiche für den Winkel $\theta_2$ sind: 1-15 Grad; und 1-45 Grad. Andere Bereiche sind vorstellbar.

**[0045]** Unter besonderer Bezugnahme auf 3B ist der Stiftkopf 308b1 einschliesslich der Bondfläche 308c1 dargestellt. Die Bondfläche 308c1 umfasst eine nicht planare Fläche 308c1a; insbesondere ist die nicht planare Fläche 308c1a eine abgewinkelte Fläche. Die nicht planare Fläche 308c1a hat einen Winkel von $\theta_2$.

**[0046]** Unter Bezugnahme auf Fig. 3C ist nun der Stiftkopf 308b2 einschliesslich der Bondfläche 308c2 dargestellt. Die Bondfläche 308c2 umfasst eine nichtplanare Fläche 308c2a; insbesondere ist die nichtplanare Fläche 308c2a eine abgewinkelte Fläche. Die Bondfläche 308c2 umfasst ferner eine Öffnung 308c2b, die im zentralen Bereich der Bondfläche 308c2 definiert ist. Insbesondere ist die Öffnung 308c2b eine abgewinkelte Öffnung. Die Öffnung 308c2b ist als konische Öffnung mit einem Winkel von $\theta_1$, einer Breite $W_2$ und einer maximalen Tiefe $d_1$ dargestellt. Beispielhafte Bereiche für den Winkel $\theta_1$ sind: 60-170 Grad und 90-120 Grad. Ein beispielhafter Bereich für die Breite $W_2$ ist 0,1 mm-3 mm. Beispielhafte Bereiche für die maximale Tiefe $d_1$ sind: 10 µm-1000 µm und 1 µm-3000 µm. Andere Bereiche sind vorstellbar.

**[0047]** Unter Bezugnahme auf 3D ist nun der Stiftkopf 308b3 einschliesslich der Bondfläche 308c3 dargestellt. Die Bondfläche 308c3 umfasst eine nicht planare Fläche 308c3a; insbesondere ist die nicht planare Fläche 308c3a eine abgewinkelte Fläche. Die Bondfläche 308c3 umfasst ferner eine Öffnung 308c3b, die im zentralen Bereich der Bondfläche 308c3 definiert ist. Insbesondere ist die Öffnung 308c3b eine gekrümmte Öffnung. Die Öffnung 308c3b ist als kugelförmige Kappenöffnung oder kuppelförmige Öffnung mit einem Krümmungsradius $\rho_2$, einer Breite $W_2$ und einer maximalen Tiefe $d_2$ dargestellt. Beispielhafte Bereiche für den Krümmungsradius $\rho_2$ umfassen: 2 mm - 100 mm; und 1 mm - 1000 mm. Ein beispielhafter Bereich für die Breite $W_2$ ist 0,1 mm - 3 mm. Beispielhafte Bereiche für die maximale Tiefe $d_2$ umfassen: 10 µm - 1000 µm; und 1 µm - 3000 µm. Andere Bereiche sind vorstellbar.

**[0048]** Unter Bezugnahme auf Fig. 3E ist nun der Stiftkopf 308b4 einschliesslich der Bondfläche 308c4 dargestellt. Die Bondfläche 308c4 umfasst eine nicht planare Fläche 308c4a; insbesondere ist die nicht planare Fläche 308c4a eine abgewinkelte Fläche. Die Bondfläche 308c4 umfasst ferner eine Öffnung 308c4b, die im zentralen Bereich der Bondfläche 308c4 definiert ist. Insbesondere ist die Öffnung 308c4b eine zylindrische Öffnung. Die Öffnung 308c4b ist mit einer Breite $W_2$ und einer Tiefe $d_3$ dargestellt. Ein beispielhafter Bereich für die Breite $W_2$ liegt zwischen 0,1 mm und 3 mm. Beispielhafte Bereiche für die Tiefe von $d_3$ sind: 10 µm - 1000 µm; und zwischen 1 µm - 3000 µm. Andere Bereiche sind vorstellbar. Es sollte verstanden werden, dass die Öffnung 308c4b als rechteckige Öffnung, ovale Öffnung und andere geometrisch geformte Öffnungen ausgeführt sein kann.

**[0049]** Unter Bezugnahme auf Fig. 3F ist nun der Stiftkopf 308b5 einschliesslich der Bondfläche 308c5 dargestellt. Die Bondfläche 308c5 umfasst eine nicht ebene Fläche 308c5a; insbesondere ist die nicht ebene Fläche 308c5a eine abgewinkelte Fläche. Die Bondfläche 308c5 umfasst ferner eine Öffnung 308c5b, die im mittleren Bereich der Bondfläche 308c5 definiert ist. Insbesondere ist die Öffnung 308c5b eine zylindrische Öffnung. Die Öffnung 308c5b ist mit einer Breite

$W_2$ dargestellt und erstreckt sich über eine Länge (z. B. die volle Länge) des Rumpfabschnitts 308a. Ein beispielhafter Bereich für die Breite $W_2$ liegt zwischen 0,1 mm und 3 mm. Andere Bereiche sind vorstellbar. Es sollte verstanden werden, dass die Öffnung 308c5b als rechteckige Öffnung, ovale Öffnung, pyramidenförmige Öffnung und andere geometrisch geformte Öffnungen ausgeführt sein kann.

**[0050]** Unter Bezugnahme auf Fig. 4A ist nun der leitfähige Stift 408 dargestellt. Der leitfähige Stift 408 umfasst einen Rumpfabschnitt 408a. Der leitfähige Stift 408 umfasst auch einen Stiftkopf 408b an einem distalen Ende (d. h. entlang der Z-Achse) des Rumpfabschnitts 408a. Der Stiftkopf 408b definiert eine Bondfläche 408c, die so konfiguriert ist, dass sie mittels Ultraschall an ein Werkstück geschweisst werden kann. Die Bondfläche 408c umfasst mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche 408c definiert ist. Die Längsrichtung LD des Rumpfabschnitts 408a und die Horizontalebene HP sind dargestellt; die Horizontalebene HP ist senkrecht zur Längsrichtung LD des Rumpfabschnitts 408a.

**[0051]** Die Figuren 4B-4D zeigen verschiedene Ausführungsformen des leitfähigen Stifts 408 einschliesslich der Stiftköpfe 408b1, 408b2 bzw. 408b3. In den Figuren 4B-4D ist jeder Stiftkopf mit einer Breite $W_1$ dargestellt. Beispielhafte Bereiche für die Breite $W_1$ sind: 0,5 mm - 10 mm; und 1 mm - 4 mm. Andere Bereiche sind vorstellbar.

**[0052]** Unter Bezugnahme auf 4B ist nun der Stiftkopf 408b1 einschliesslich der Bondfläche 408c1 dargestellt. Die Bondfläche 408c1 umfasst eine Öffnung 408c1a, die im mittleren Bereich der Bondfläche 408c1 definiert ist. Insbesondere ist die Öffnung 408c1a eine schräge Öffnung. Die Öffnung 408c1a ist als konische Öffnung mit einem Winkel von $\theta_1$, einer Breite $W_2$ und einer maximalen Tiefe $d_1$ dargestellt. Beispielhafte Bereiche für den Winkel $\theta_1$ sind: 60-170 Grad und 90-120 Grad. Ein beispielhafter Bereich für die Breite $W_2$ ist 0,1 mm-3 mm. Beispielhafte Bereiche für die maximale Tiefe $d_1$ sind: 10 µm-1000 µm und zwischen 1 µm-3000 µm. Andere Bereiche sind vorstellbar.

**[0053]** Unter Bezugnahme auf 4C ist nun der Stiftkopf 408b2 einschliesslich der Bondfläche 408c2 dargestellt. Die Bondfläche 408c2 umfasst eine Öffnung 408c2a, die im mittleren Bereich der Bondfläche 408c2 definiert ist. Insbesondere ist die Öffnung 408c2a eine gekrümmte Öffnung. Die Öffnung 408c2a wird als kugelförmige Öffnung oder kuppelförmige Öffnung mit einem Krümmungsradius $\rho_2$, einer Breite $W_2$ und einer maximalen Tiefe $d_2$ dargestellt. Beispielhafte Bereiche für den Krümmungsradius $\rho_2$ sind: 2 mm - 100 mm; und 1 mm - 1000 mm. Ein beispielhafter Bereich für die Breite $W_2$ ist 0,1 mm - 3 mm. Beispielhafte Bereiche für die maximale Tiefe $d_2$ sind: 10 µm - 1000 µm; und zwischen 1 µm - 3000 µm. Andere Bereiche sind vorstellbar.

**[0054]** Unter Bezugnahme auf Fig. 4D ist nun der Stiftkopf 408b3 einschliesslich der Bondfläche 408c3 dargestellt. Die Bondfläche 408c3 umfasst eine Öffnung 408c3a, die im mittleren Bereich der Bondfläche 408c3 definiert ist. Insbesondere ist die Öffnung 408c3a eine zylindrische Öffnung. Die Öffnung 408c3a wird mit einer Breite $W_2$ und einer maximalen Tiefe $d_3$ dargestellt. Ein beispielhafter Bereich für die Breite $W_2$ liegt zwischen 0,1 mm und 3 mm. Beispielhafte Bereiche für die maximale Tiefe $d_3$ umfassen: 10 µm - 1000 µm; und 1 µm - 3000 µm. Andere Bereiche sind vorstellbar. Es versteht sich, dass die Öffnung 408c3a als rechteckige Öffnung, pyramidenförmige Öffnung, ovale Öffnung und andere geometrisch geformte Öffnungen ausgeführt sein kann.

**[0055]** In den Figuren 2C-2F, 3C-3F und 4B-4D werden die verschiedenen Öffnungen durchgehend als geometrische Formen dargestellt und beschrieben, wie z. B. konische Öffnungen, kuppelförmige Öffnungen, zylindrische Öffnungen usw. Es versteht sich, dass diese Beschreibungen beispielhafter Natur sind und nicht dazu gedacht sind, den Umfang der Ausführungsformen einzuschränken. Zum Beispiel sollen die „konischen" Öffnungen in 2C, 3C und 4B ähnliche Öffnungen umfassen, wie eine kegelstumpfförmige Öffnung, eine asymmetrische kegelartige Öffnung und dergleichen. In einem anderen Beispiel sollen die „kugelkappenförmigen/kuppelförmigen" Öffnungen von 2D, 3D und 4C ähnliche Öffnungen umfassen, wie z. B. eine spheroidförmige (oder rotationsellipsoidförmige) Öffnung, eine asymmetrische kugelähnliche Öffnung und dergleichen.

**[0056]** Es versteht sich, dass die hier beschriebenen leitfähigen Stifte aus einem Kupfermaterial bestehen können. Während hier leitfähige Stifte (und Anschlüsse und Sammelschienen) aus Kupfer (oder einer Kupferlegierung) beschrieben werden, versteht es sich, dass die Erfindung (und die zugehörigen Anschlüsse, Sammelschienen und Verfahren) nicht auf Kupfermaterialien beschränkt sind. Die leitfähigen Stifte können aus anderen leitfähigen Materialien, wie z. B. Aluminium, bestehen.

**[0057]** Unter Bezugnahme auf Fig. 5 ist nun ein Leistungsmodul 122 (ein bestimmter Typ eines Werkstücks) dargestellt. Das Leistungsmodul 122 umfasst ein Halbleiterelement 102an. Der hier verwendete Begriff „Halbleiterelement" soll sich auf jede Struktur beziehen, die einen Halbleiterchip oder -chip (z. B. ein Leistungshalbleiterelement) enthält (oder so konfiguriert ist, dass sie zu einem späteren Zeitpunkt einen solchen enthält). Zu den beispielhaften Halbleiterelementen gehören unter anderem ein Substrat (z. B. ein Leadframe, eine Leiterplatte, ein Trägerelement usw.), ein Substrat, das einen oder mehrere Halbleiterchips trägt, ein blanker Halbleiterchip, ein verpacktes Halbleiterbauelement, ein Flip-Chip-Halbleiterbauelement, ein in ein Substrat eingebetteter Chip, ein Stapel von Halbleiterchips. Ausserdem kann das Halbleiterelement ein Element enthalten, das so konfiguriert ist, dass es gebondet oder anderweitig in einem Halbleitergehäuse enthalten ist (z. B. ein Abstandshalter, der in einer gestapelten Chipkonfiguration gebondet werden soll, ein Substrat usw.).

**[0058]** Das Leistungsmodul 122 enthält auch ein Trägerelement 124 um das Halbleiterelement 102an zu tragen. Das Leistungsmodul 122 umfasst auch mindestens einen leitfähigen Stift 108 (z. B. leitfähiger Stift 208 der Figuren 2A-2F,

leitfähiger Stift 308 der Figuren 3A-3F und/oder leitfähiger Stift 408 der Figuren 4A-4D), der mittels Ultraschall an das Trägerelement 124 geschweisst ist. Der leitfähige Stift 108 umfasst einen Rumpfabschnitt 108a und einen Stiftkopf 108b an einem Ende des Rumpfabschnitts 108a. Vor dem Ultraschallschweissen umfasste der Stiftkopf 108b eine Bondfläche, die so konfiguriert war, dass sie mittels Ultraschall an ein Werkstück (z. B. Trägerelement 124) geschweisst werden konnte. Die Bondfläche des leitfähigen Stifts 108 umfasste vor dem Ultraschallschweissen an das Trägerelement mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht planaren Fläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

**[0059]** In Fig. 5 ist der leitfähige Stift 108 dargestellt, der mit dem Trägerelement 124 verbunden wurde. Es versteht sich, dass Fig. 5 eine sehr vereinfachte Form des Leistungsmoduls 122 darstellt; Details werden der Einfachheit halber weggelassen.

**[0060]** Figur 6 ist ein Flussdiagramm, das ein Verfahren zum Schweissen eines leitfähigen Stifts an ein Werkstück mittels Ultraschall veranschaulicht. Wie dem Fachmann bekannt ist, können bestimmte Schritte, die in dem Flussdiagramm enthalten sind, weggelassen werden; bestimmte zusätzliche Schritte können hinzugefügt werden; und die Reihenfolge der Schritte kann gegenüber der dargestellten Reihenfolge geändert werden - alles im Rahmen der Erfindung.

**[0061]** In Schritt 600 wird ein Werkstück (z. B. Werkstück 102a1/102a2/102a3 von Fig. 1, Trägerelement 124 von Fig. 5) bereitgestellt.

**[0062]** In Schritt 602 wird ein leitfähiger Stift (z. B. leitfähiger Stift 108 von Fig. 1, leitfähiger Stift 208 von Fig. 2A-2F, leitfähiger Stift 308 von Fig. 3A-3F, leitfähiger Stift 408 von Fig. 4A-4D) wird mittels Ultraschall an das Werkstück geschweisst. Der leitfähige Stift umfasst einen Rumpfabschnitt und einen Stiftkopf an einem Ende des Rumpfabschnitts. Der Stiftkopf definiert eine Bondfläche, die so konfiguriert ist, dass sie mittels Ultraschall an ein Werkstück geschweisst werden kann, wobei die Bondfläche mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer Öffnung umfasst, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

**[0063]** In bestimmten Ausführungsformen umfasst Schritt 602 das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems (z. B. Steuerungssystem 120 von Fig. 1) während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der Bondfläche.

**[0064]** In bestimmten Ausführungsformen umfasst Schritt 602 das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems (z. B. Steuerungssystem 120 von Fig. 1) während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der nicht ebenen Oberfläche.

**[0065]** In bestimmten Ausführungsformen umfasst Schritt 602 das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems (z. B. Steuerungssystem 120 von Fig. 1) während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der in dem zentralen Bereich definierten Öffnung.

**[0066]** In bestimmten Ausführungsformen umfasst Schritt 602 das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems (z. B. Steuerungssystem 120 von Fig. 1) während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der nicht ebenen Oberfläche und der Öffnung, die im zentralen Bereich der nicht ebenen Oberfläche definiert ist.

**[0067]** In bestimmten Ausführungsformen umfasst Schritt 602 das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems (z. B. Steuerungssystem 120 von Fig. 1) während des Ultraschallschweissens, wobei die Prozessparameter mindestens eine Auswahl aus Bondkraft, Bondenergie und Bonddauer umfassen.

**[0068]** In bestimmten Ausführungsformen umfasst Schritt 602 das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems (z. B. Steuerungssystem 120 von Fig. 1) während des Ultraschallschweissens, wobei das Ultraschallschweissen Torsionsschwingungen nutzt, die durch eine Sonotrode aufgebracht werden, die so konfiguriert ist, dass sie den leitfähigen Stift während eines Schweissvorgangs mittels Ultraschall an das Werkstück chweisst.

**[0069]** Obwohl die Erfindung vorliegend unter Bezugnahme auf spezifische Ausführungsformen dargestellt und beschrieben wird, soll die Erfindung nicht auf die gezeigten Details beschränkt werden. Vielmehr können verschiedene Änderungen an den Details innerhalb des Umfangs und der Bandbreite der Äquivalente der Ansprüche vorgenommen werden, ohne von der Erfindung abzuweichen.

**[0070]** Bevorzugte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung, insbesondere wie oben beschrieben, können gemäss den unten aufgeführten Punkten, vorteilhafterweise in Kombination mit einem oder mehreren der oben beschriebenen Merkmale oder gemäss den weiter unten dargelegten Ansprüchen, wie in den nummerierten Varianten und/oder Ausführungsformen beschrieben, realisiert werden.

1. Ein leitfähiger Stift für das Ultraschallschweissen, wobei der leitfähige Stift umfasst:

   einen Rumpfabschnitt; und

   einen Stiftkopf an einem Ende des Rumpfabschnitts, wobei der Stiftkopf eine Bondfläche definiert, die so konfiguriert ist, dass sie mittels Ultraschall an ein Werkstück geschweisst werden kann, wo-

bei die Bondfläche mindestens eine Auswahl umfasst aus (i) einer nicht ebene Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

2. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 1, bei dem die Bondfläche die nichtplanare Oberfläche aufweist.

3. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 2, bei dem die nicht planare Oberfläche eine gekrümmte Oberfläche ist.

4. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 3, wobei die gekrümmte Oberfläche einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm aufweist.

5. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 3, bei dem die Bondfläche ferner die Öffnung aufweist, die im zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

6. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 5, wobei die Öffnung eine maximale Tiefe zwischen 10 µm und 1000 µm aufweist.

7. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 5, bei dem sich die Öffnung über die gesamte Länge des Rumpfabschnitts des leitfähigen Stiftes erstreckt.

8. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 5, wobei die Öffnung eine konische Öffnung ist.

9. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 5, wobei die Öffnung eine gekrümmte Öffnung ist.

10. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 9, wobei die gekrümmte Öffnung einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm aufweist.

11. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 5, wobei die Öffnung eine zylindrische Öffnung ist.

12. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 2, wobei die nicht planare Oberfläche eine gewinkelte Oberfläche ist.

13. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 12, bei dem die abgewinkelte Oberfläche in einem Winkel zwischen 1 Grad und 15 Grad in Bezug auf eine horizontale Ebene konfiguriert ist, wobei die horizontale Ebene senkrecht zu einer Längsrichtung des Rumpfabschnitts ist.

14. Der leitfähige Stift der Ausführungsform 12, bei dem die Bondfläche ferner die Öffnung aufweist, die in dem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

15. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 14, wobei die Öffnung eine maximale Tiefe zwischen 10 µm und 1000 µm aufweist.

16. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 14, wobei sich die Öffnung über die gesamte Länge des Rumpfabschnitts des leitfähigen Stifts erstreckt.

17. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 14, wobei die Öffnung eine konische Öffnung ist.

18. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 14, bei dem die Öffnung eine gekrümmte Öffnung ist.

19. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 14, bei dem die Öffnung eine zylindrische Öffnung ist.

20. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 1, bei dem die Bondfläche die Öffnung enthält, die im zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

21. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 20, wobei die Öffnung eine konische Öffnung ist.

22. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 20, wobei die Öffnung eine gekrümmte Öffnung ist.

23. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 22, wobei die gekrümmte Öffnung einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm aufweist.

24. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 20, wobei die Öffnung eine zylindrische Öffnung ist.

25. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 20, wobei die Öffnung eine maximale Tiefe zwischen 10 µm und 1000 µm aufweist.

26. Der leitfähige Stift nach Ausführungsform 1, bei dem die Bondfläche so konfiguriert ist, dass sie unter Verwendung von Torsionsschwingungen mit einem Werkstück ultraschallverschweisst wird.

27. Ein Leistungsmodul, umfassend:

ein Halbleiterelement;

ein Trägerelement zum Tragen des Halbleiterelements; und

mindestens einen leitfähigen Stift, der mit dem Trägerelement ultraschallverschweisst ist, wobei der leitfähige Stift einen Rumpfabschnitt und einen Stiftkopf an einem Ende des Rumpfabschnitts aufweist, wobei der Stiftkopf eine Bondfläche definiert, die an das Trägerelement geschweisst ist,

wobei die Bondfläche des leitfähigen Stifts vor dem Ultraschallschweissen mit dem Trägerelement mindestens eines der folgenden Merkmale aufweist: (i) eine nicht planare Oberfläche und (ii) eine Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

28. Leistungsmodul nach Ausführungsform 27, bei dem die Bondfläche vor dem Ultraschallverschweissen mit dem Trägerelement die nichtplanare Fläche aufweist.

29. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 28, bei dem die nicht-ebene Oberfläche eine gekrümmte Oberfläche ist.

30. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 29, wobei die gekrümmte Oberfläche einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm aufweist.

31. Leistungsmodul nach Ausführungsform 28, bei dem die Bondfläche ferner die Öffnung aufweist, die im zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist, bevor sie mit dem Trägerelement ultraschallverschweisst wird.

32. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 31, wobei die Öffnung eine maximale Tiefe zwischen 10 µm und 1000 µm aufweist.

33. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 31, bei dem sich die Öffnung über die gesamte Länge des Rumpfabschnitts des leitfähigen Stifts erstreckt.

34. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 31, wobei die Öffnung eine konische Öffnung ist.

35. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 31, bei dem die Öffnung eine gekrümmte Öffnung ist.

36. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 35, wobei die gekrümmte Öffnung einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm aufweist.

37. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 31, wobei die Öffnung eine zylindrische Öffnung war.

38. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 28, wobei die nicht ebene Oberfläche eine gewinkelte Oberfläche war.

39. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 38, wobei die abgewinkelte Oberfläche in einem Winkel zwischen 1 Grad und 15 Grad in Bezug auf eine horizontale Ebene konfiguriert war, wobei die horizontale Ebene senkrecht zu einer Längsrichtung des Rumpfabschnitts ist.

40. Leistungsmodul nach Ausführungsform 38, wobei die Bondfläche ferner die Öffnung aufweist, die im zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist, bevor sie mit dem Trägerelement ultraschallverschweisst wird.

41. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 40, wobei die Öffnung eine maximale Tiefe zwischen 10 µm und 1000 µm aufweist.

42. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 40, bei dem sich die Öffnung über die gesamte Länge des Rumpfabschnitts des leitfähigen Stifts erstreckt.

43. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 40, wobei die Öffnung eine konische Öffnung ist.

44. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 40, bei dem die Öffnung eine gekrümmte Öffnung ist.

45. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 40, bei dem die Öffnung eine zylindrische Öffnung ist.

46. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 27, wobei die Bondfläche die Öffnung enthält, die im zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist, bevor sie mit dem Trägerelement ultraschallverschweisst wird.

47. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 46, wobei die Öffnung eine konische Öffnung war.

48. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 46, bei dem die Öffnung eine gekrümmte Öffnung ist.

49. Das Leistungsmodul von Ausführungsform 48, wobei die gekrümmte Öffnung einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm definiert.

50. Das Leistungsmodul von Ausführungsform 46, wobei die Öffnung eine zylindrische Öffnung war.

51. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 46, wobei die Öffnung eine maximale Tiefe zwischen 10 µm und 1000 µm aufweist.

52. Das Leistungsmodul nach Ausführungsform 27, bei dem die Bondfläche so konfiguriert war, dass sie unter Verwendung von Torsionsschwingungen mit einem Werkstück ultraschallverschweisst werden konnte.

53. Ein Ultraschallschweisssystem, das zum Schweissen eines leitfähigen Stiftes an ein Werkstück konfiguriert ist, wobei das Ultraschallschweisssystem umfasst:

    eine Sonotrode, die so konfiguriert ist, dass sie den leitfähigen Stift während eines Schweissvorgangs mittels Ultraschall an das Werkstück schweisst; und

    ein Steuerungssystem, das so konfiguriert ist, dass es den Schweissprozess steuert, wobei der Schweissprozess das Verbinden einer Bondfläche des leitfähigen Stifts mit dem Werkstück einschliesst, wobei die Bondfläche mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht ebenen Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist, einschliesst.

54. Das Ultraschallschweisssystem nach Ausführungsform 53, wobei das Steuerungssystem so konfiguriert ist, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der Bondfläche anwendet.

55. Das Ultraschallschweisssystem nach Ausführungsform 53, bei dem die Bondfläche die nichtplanare Fläche einschliesst, wobei das Steuerungssystem so konfiguriert ist, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der nichtplanaren Fläche anwendet.

56. Das Ultraschallschweisssystem nach Ausführungsform 53, bei dem die Bondfläche die im zentralen Bereich definierte Öffnung aufweist, wobei das Steuerungssystem so konfiguriert ist, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der im zentralen Bereich definierten Öffnung anwendet.

57. Ultraschallschweisssystem nach Ausführungsform 53, bei dem die Bondfläche die nichtplanare Fläche und die im zentralen Bereich der nichtplanaren Fläche definierte Öffnung umfasst, wobei das Steuerungssystem so konfiguriert ist, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der nichtplanaren Fläche und der im zentralen Bereich der nichtplanaren Fläche definierten Öffnung anwendet.

58. Das Ultraschallschweisssystem der Ausführungsform 53, wobei die Prozessparameter mindestens eine Auswahl aus Bondkraft, Bondenergie und Bonddauer umfassen.

59. Das Ultraschallschweisssystem nach Ausführungsform 53, bei dem der Schweissprozess Torsionsschwingungen nutzt, die von der Sonotrode aufgebracht werden.

60. Verfahren zum Ultraschallschweissen eines leitfähigen Stiftes an ein Werkstück, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

    (a) Bereitstellen eines Werkstücks; und

    (b) Ultraschallschweissen des leitfähigen Stifts an das Werkstück, wobei der leitfähige Stift einen Rumpfabschnitt und einen Stiftkopf an einem Ende des Rumpfabschnitts umfasst, wobei der Stiftkopf eine Bondfläche definiert, die so konfiguriert ist, dass sie mit dem Werkstück ultraschallverschweisst wird, wobei die Bondfläche mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht ebenen Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist, umfasst.

61. Verfahren nach Ausführungsform 60, wobei Schritt (b) die Anwendung von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der Bondfläche umfasst.

62. Verfahren nach Ausführungsform 60, wobei Schritt (b) das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der nicht ebenen Oberfläche umfasst.

63. Verfahren nach Ausführungsform 60, wobei Schritt (b) das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der im zentralen Bereich definierten Öffnung einschliesst.

64. Verfahren nach Ausführungsform 60, bei dem Schritt (b) das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der nichtplanaren Oberfläche und der im zentralen Bereich der nichtplanaren Oberfläche definierten Öffnung einschliesst.

65. Verfahren nach Ausführungsform 60, bei dem Schritt (b) das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens umfasst, wobei die Prozessparameter mindestens einen der folgenden Parameter umfassen: Bondkraft, Bondenergie und Bonddauer.

66. Verfahren nach Ausführungsform 60, wobei Schritt (b) das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens umfasst, wobei das Ultraschallschweissen Torsionsschwingungen verwendet, die durch eine Sonotrode aufgebracht werden, die so konfiguriert ist, dass sie den leitfähigen Stift mittels Ultraschall an das Werkstück schweisst.

**Patentansprüche**

1. Ein leitfähiger Stift zum Ultraschallschweissen, wobei der leitfähige Stift umfasst:
einen Rumpfabschnitt; und
einen Stiftkopf an einem Ende des Rumpfabschnitts, wobei der Stiftkopf eine Bondfläche definiert, die so konfiguriert ist, dass sie mittels Ultraschall an ein Werkstück geschweisst werden kann, wobei die Bondfläche mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht ebenen Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist, umfasst.
2. Der leitfähige Stift nach Anspruch 1, wobei die Bondfläche die nichtplanare Oberfläche umfasst.
3. Der leitfähige Stift nach Anspruch 2, wobei die nicht planare Oberfläche eine gekrümmte Oberfläche ist.
4. Der leitfähige Stift nach Anspruch 3, wobei die gekrümmte Oberfläche einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm aufweist.
5. Der leitfähige Stift nach Anspruch 3, wobei die Bondfläche ferner die im zentralen Bereich der Bondfläche definierte Öffnung enthält.
6. Der leitfähige Stift nach Anspruch 5, wobei die Öffnung eine maximale Tiefe zwischen 10 µm und 1000 µm aufweist.
7. Der leitfähige Stift nach Anspruch 5, wobei sich die Öffnung über eine gesamte Länge des Rumpfabschnitts des leitfähigen Stiftes erstreckt.
8. Der leitfähige Stift nach Anspruch 5, wobei die Öffnung eine konische Öffnung ist.
9. Der leitfähige Stift nach Anspruch 5, bei dem die Öffnung eine gekrümmte Öffnung ist.
10. Der leitfähige Stift nach Anspruch 9, wobei die gekrümmte Öffnung einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm aufweist.
11. Der leitfähige Stift nach Anspruch 5, wobei die Öffnung eine zylindrische Öffnung ist.
12. Der leitfähige Stift nach Anspruch 2, wobei die nicht ebene Oberfläche eine gewinkelte Oberfläche ist.
13. Der leitfähige Stift nach Anspruch 12, wobei die gewinkelte Oberfläche in einem Winkel zwischen 1 Grad und 15 Grad in Bezug auf eine horizontale Ebene konfiguriert ist, wobei die horizontale Ebene senkrecht zu einer Längsrichtung des Rumpfabschnitts ist.
14. Der leitfähige Stift nach Anspruch 12, wobei die Bondfläche ferner die Öffnung aufweist, die in dem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.
15. Der leitfähige Stift nach Anspruch 14, wobei die Öffnung eine maximale Tiefe zwischen 10 µm und 1000 µm aufweist.
16. Der leitfähige Stift nach Anspruch 14, wobei sich die Öffnung über eine gesamte Länge des Rumpfabschnitts des leitfähigen Stiftes erstreckt.
17. Der leitfähige Stift nach Anspruch 14, wobei die Öffnung eine konische Öffnung ist.
18. Der leitfähige Stift nach Anspruch 14, bei dem die Öffnung eine gekrümmte Öffnung ist.
19. Der leitfähige Stift nach Anspruch 14, wobei die Öffnung eine zylindrische Öffnung ist.
20. Der leitfähige Stift nach Anspruch 1, wobei die Bondfläche die im zentralen Bereich der Bondfläche definierte Öffnung enthält.
21. Der leitfähige Stift nach Anspruch 20, wobei die Öffnung eine konische Öffnung ist.

22. Der leitfähige Stift nach Anspruch 20, bei dem die Öffnung eine gekrümmte Öffnung ist.

23. Der leitfähige Stift nach Anspruch 22, wobei die gekrümmte Öffnung einen Krümmungsradius zwischen 2 mm und 100 mm aufweist.

24. Der leitfähige Stift nach Anspruch 20, wobei die Öffnung eine zylindrische Öffnung ist.

25. Der leitfähige Stift nach Anspruch 20, wobei die Öffnung eine maximale Tiefe zwischen 10 µm und 1000 µm aufweist.

26. Der leitfähige Stift nach Anspruch 1, bei dem die Bondfläche so konfiguriert ist, dass sie mit Hilfe von Torsionsschwingungen mit einem Werkstück ultraschallverschweisst werden kann.

27. Ein Leistungsmodul, umfassend:
ein Halbleiterelement;
ein Trägerelement zum Tragen des Halbleiterelements; und
mindestens einen leitfähigen Stift, der mit dem Trägerelement ultraschallverschweisst ist, wobei der leitfähige Stift einen Rumpfabschnitt und einen Stiftkopf an einem Ende des Rumpfabschnitts aufwiest, wobei der Stiftkopf eine Bondfläche definiert, die an das Trägerelement geschweisst ist,
wobei die Bondfläche des leitfähigen Stifts vor dem Anschweissen an das Trägerelement mittels Ultraschall mindestens eine Auswahl umfasste aus (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

28. Ein Ultraschallschweisssystem, das zum Schweissen eines leitfähigen Stiftes an ein Werkstück konfiguriert ist, wobei das Ultraschallschweisssystem umfasst
eine Sonotrode, die so konfiguriert ist, dass sie den leitfähigen Stift während eines Schweissvorgangs mittels Ultraschall an das Werkstück schweisst; und
ein Steuerungssystem, das so konfiguriert ist, dass es den Schweissprozess steuert, wobei der Schweissprozess das Verbinden einer Bondfläche des leitfähigen Stifts mit dem Werkstück einschliesst, wobei die Bondfläche mindestens eine Auswahl aus (i) einer nicht ebenen Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist, einschliesst.

29. Das Ultraschallschweisssystem nach Anspruch 28, wobei das Steuerungssystem so konfiguriert ist, dass es während des Schweissvorgangs Prozessparameter auf der Grundlage der Bondfläche anwendet.

30. Das Ultraschallschweisssystem nach Anspruch 28, bei dem die Bondfläche die nichtplanare Fläche umfasst, wobei das Steuerungssystem so konfiguriert ist, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der nichtplanaren Fläche anwendet.

31. Das Ultraschallschweisssystem nach Anspruch 28, bei dem die Bondfläche die im zentralen Bereich definierte Öffnung aufweist, wobei das Steuerungssystem so konfiguriert ist, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der im zentralen Bereich definierten Öffnung anwendet.

32. Das Ultraschallschweisssystem nach Anspruch 28, wobei die Bondfläche die nichtplanare Oberfläche und die im zentralen Bereich der nichtplanaren Oberfläche definierte Öffnung umfasst, wobei das Steuerungssystem so konfiguriert ist, dass es während des Schweissprozesses Prozessparameter auf der Grundlage der nichtplanaren Oberfläche und der im zentralen Bereich der nichtplanaren Oberfläche definierten Öffnung anwendet.

33. Das Ultraschallschweisssystem nach Anspruch 28, wobei die Prozessparameter mindestens eine Auswahl aus Bondkraft, Bondenergie und Bonddauer umfassen.

34. Das Ultraschallschweisssystem nach Anspruch 28, wobei der Schweissprozess eine von der Sonotrode aufgebrachte Torsionsschwingung nutzt.

35. Ein Verfahren zum Ultraschallschweissen eines leitfähigen Stiftes an ein Werkstück, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:
(a) Bereitstellen eines Werkstücks; und
(b) Ultraschallschweissen des leitfähigen Stifts an das Werkstück, wobei der leitfähige Stift einen Rumpfabschnitt und einen Stiftkopf an einem Ende des Rumpfabschnitts aufweist, wobei der Stiftkopf eine Bondfläche definiert, die so konfiguriert ist, dass sie mit dem Werkstück ultraschallgeschweisst werden kann, wobei die Bondfläche mindestens eine Auswahl umfasst aus (i) einer nicht planaren Oberfläche und (ii) einer Öffnung, die in einem zentralen Bereich der Bondfläche definiert ist.

36. Das Verfahren nach Anspruch 35, wobei Schritt (b) die Anwendung von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der Bondfläche umfasst.

37. Das Verfahren nach Anspruch 35, wobei Schritt (b) das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der nicht ebenen Oberfläche umfasst.

38. Das Verfahren nach Anspruch 35, wobei Schritt (b) das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der im zentralen Bereich definierten Öffnung einschliesst.

39. Das Verfahren nach Anspruch 35, wobei Schritt (b) das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens auf der Grundlage der nichtplanaren Oberfläche und der im zentralen Bereich der nichtplanaren Oberfläche definierten Öffnung umfasst.

40. Das Verfahren nach Anspruch 35, wobei Schritt (b) das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens umfasst, wobei die Prozessparameter mindestens eine Auswahl aus Bondkraft, Bondenergie und Bonddauer umfassen.

41. Das Verfahren nach Anspruch 35, wobei Schritt (b) das Anwenden von Prozessparametern unter Verwendung eines Steuerungssystems während des Ultraschallschweissens umfasst, wobei das Ultraschallschweissen Torsionsschwingungen verwendet, die von einer Sonotrode aufgebracht werden, die so konfiguriert ist, dass sie den leitfähigen Stift mittels Ultraschall an das Werkstück schweisst.

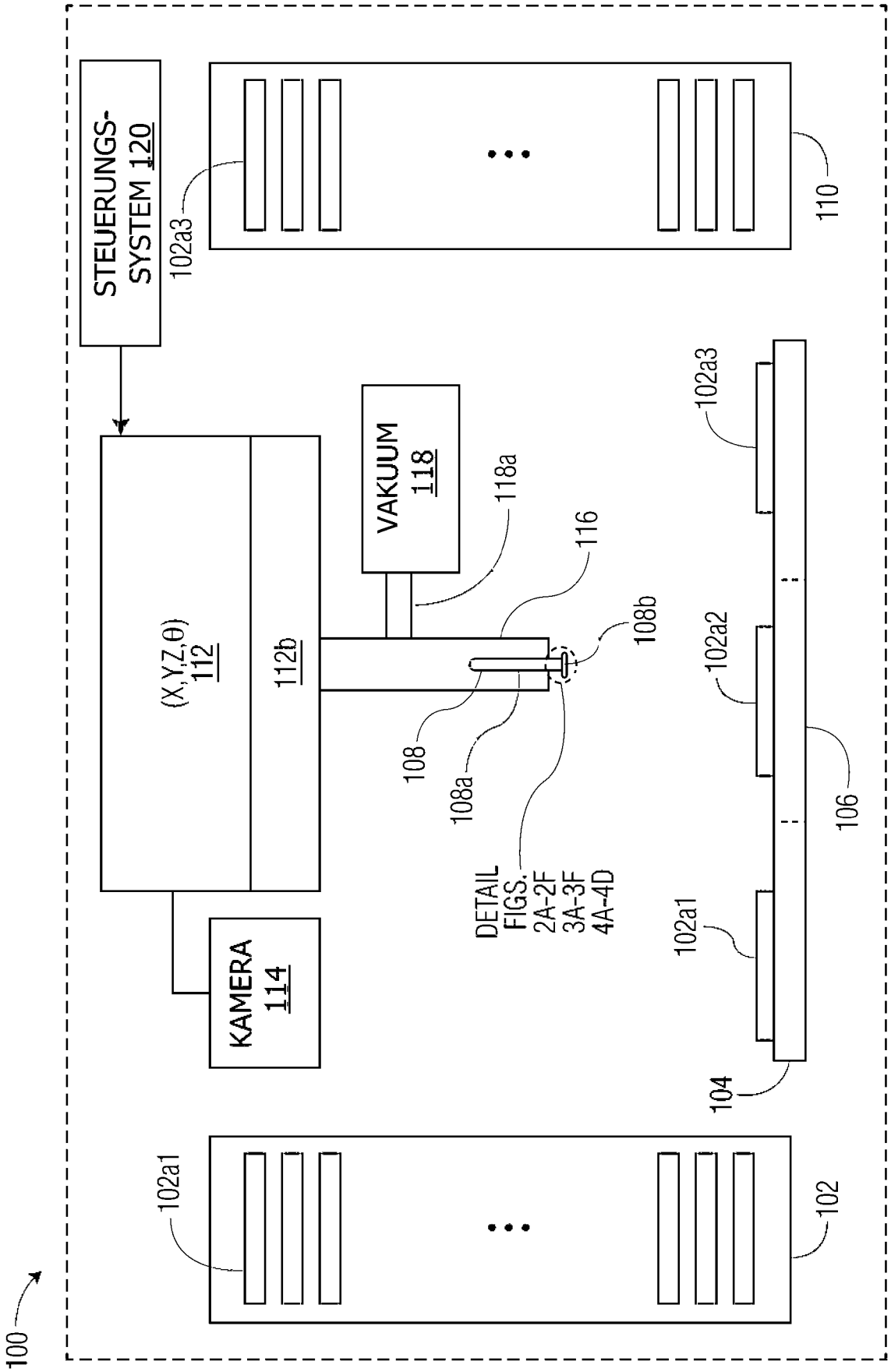

100
STEUERUNGS-SYSTEM 120
102a3
110
VAKUUM 118
118a
116
108b
(X,Y,Z,θ) 112
112b
108
108a
DETAIL FIGS. 2A-2F 3A-3F 4A-4D
KAMERA 114
102a3
102a2
106
102a1
104
102a1
102

FIG. 1

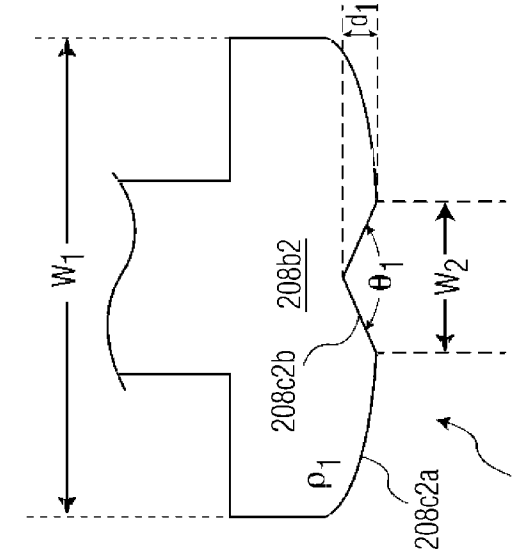



FIG. 2C

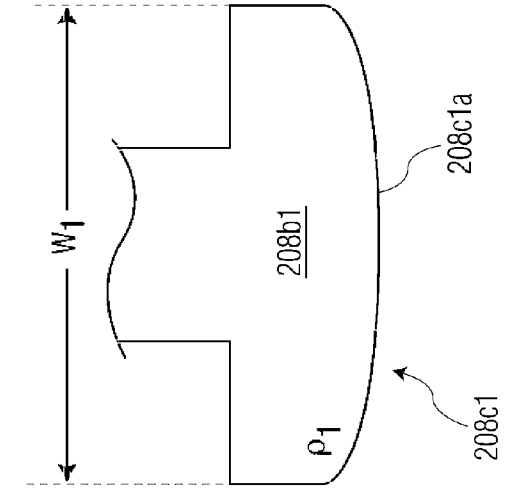



FIG. 2B

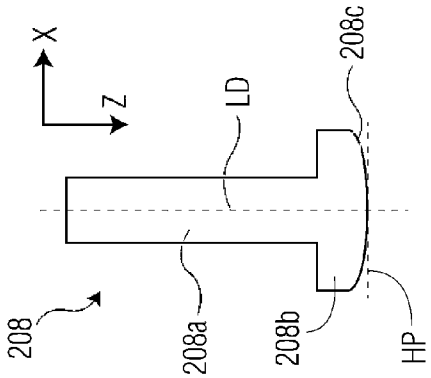



FIG. 2A

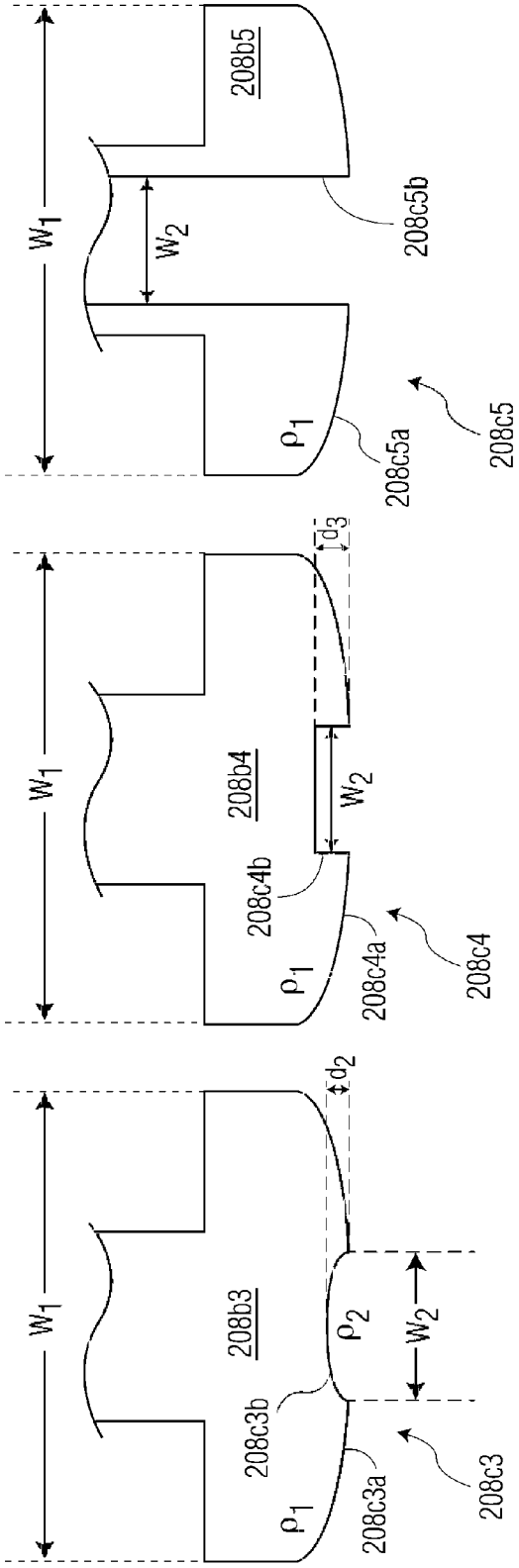



FIG. 2F

FIG. 2E

FIG. 2D

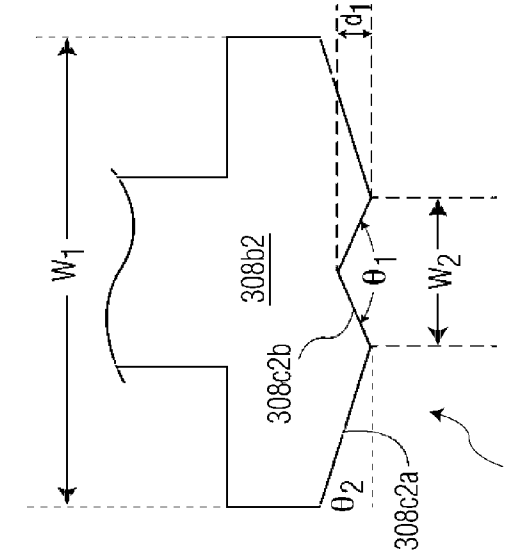



FIG. 3C

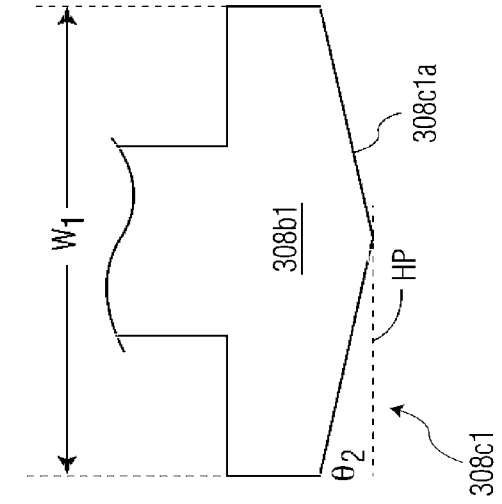



FIG. 3B

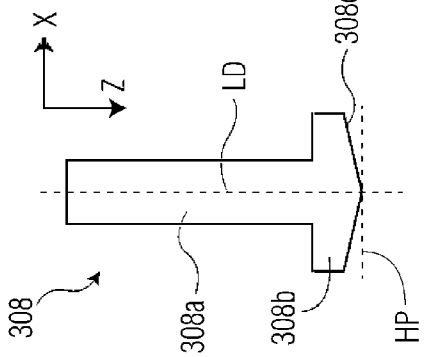



FIG. 3A

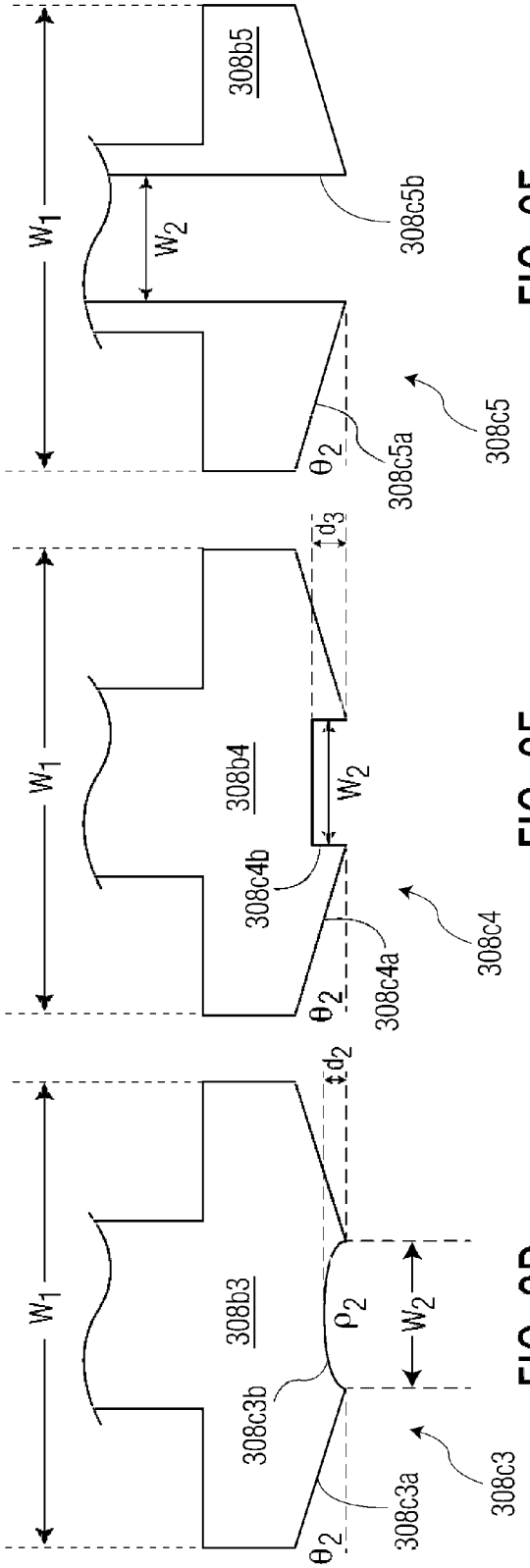



FIG. 3F

FIG. 3E

FIG. 3D

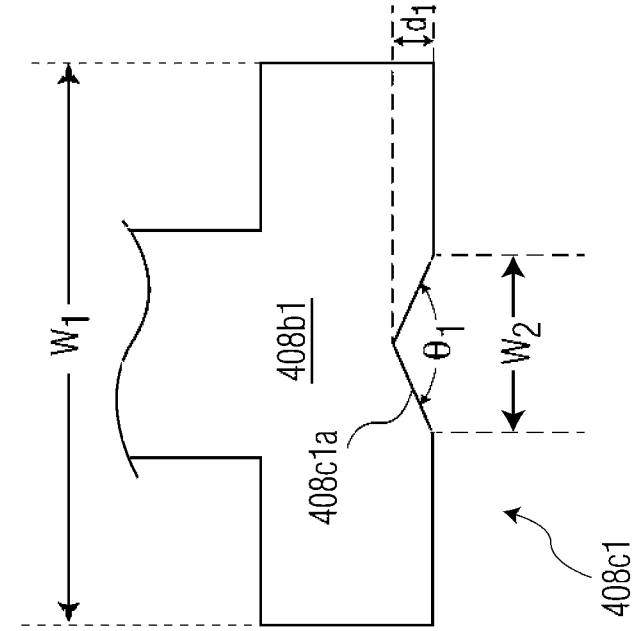



FIG. 4B

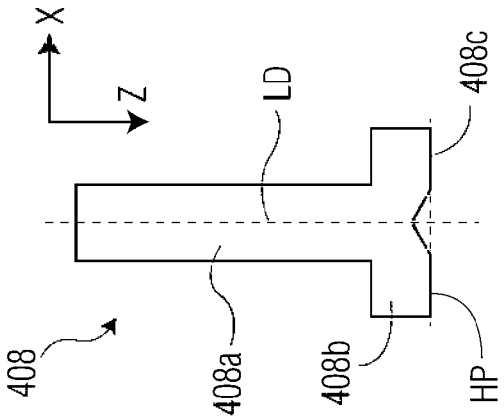



FIG. 4A

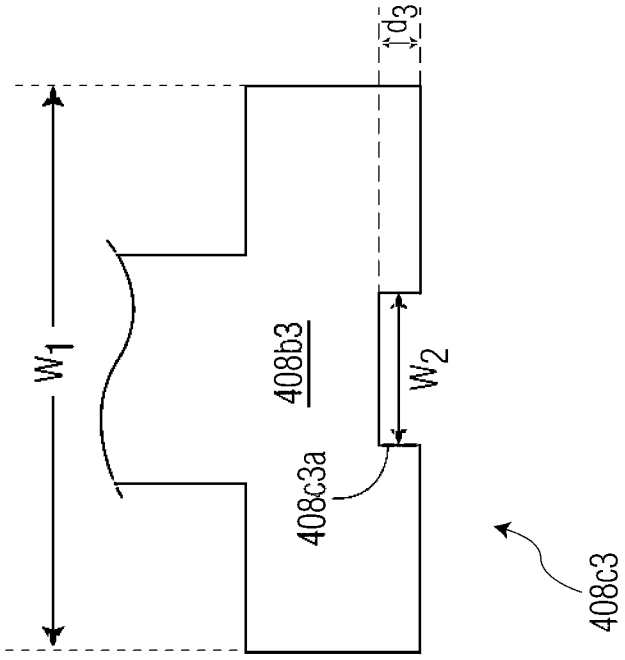



FIG. 4D

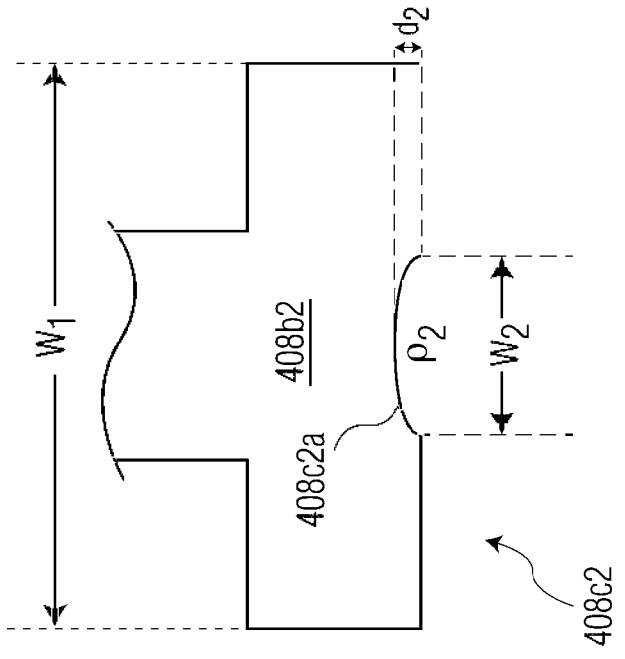



FIG. 4C

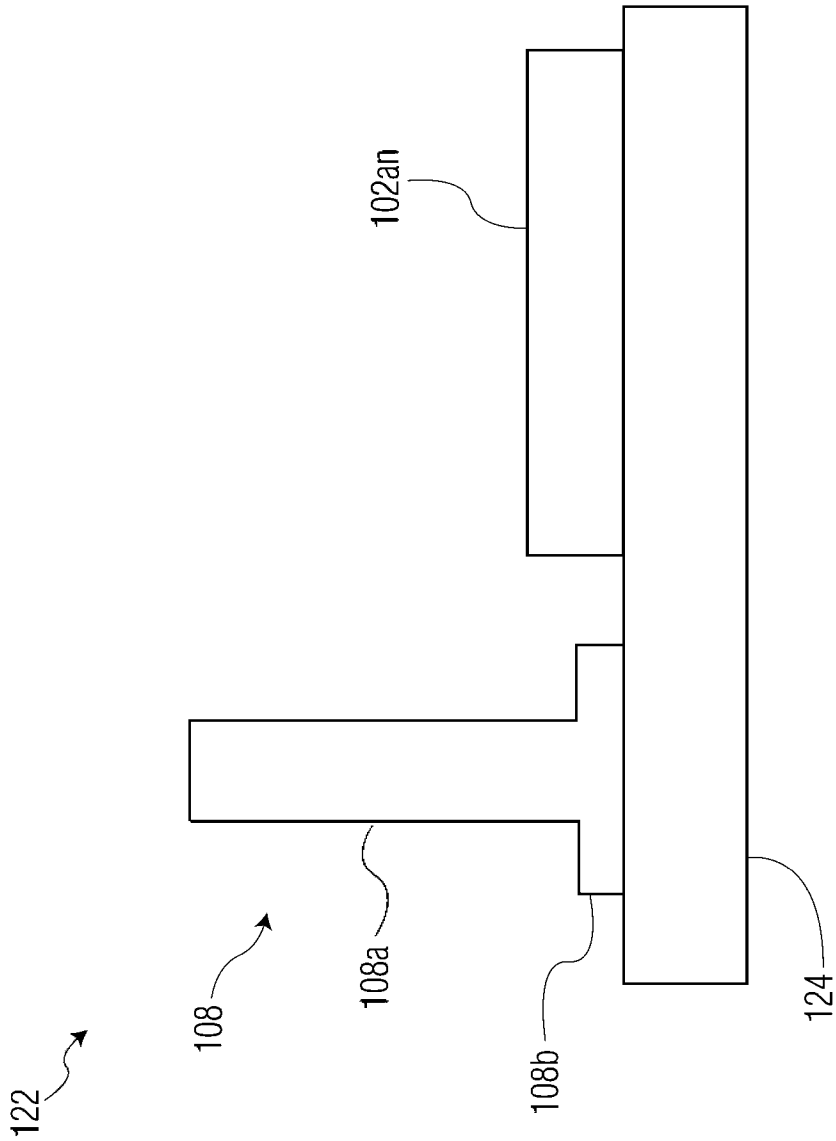



FIG. 5

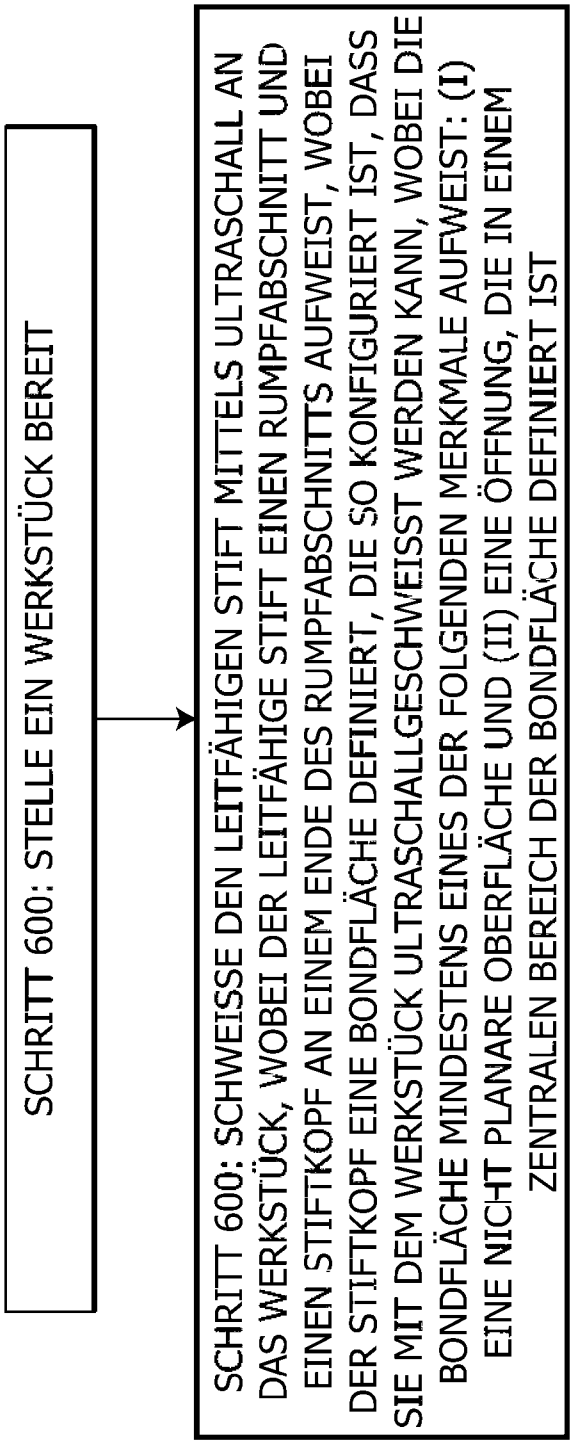

SCHRITT 600: STELLE EIN WERKSTÜCK BEREIT
SCHRITT 600: SCHWEISSE DEN LEITFÄHIGEN STIFT MITTELS ULTRASCHALL AN DAS WERKSTÜCK, WOBEI DER LEITFÄHIGE STIFT EINEN RUMPFABSCHNITT UND EINEN STIFTKOPF AN EINEM ENDE DES RUMPFABSCHNITTS AUFWEIST, WOBEI DER STIFTKOPF EINE BONDFLÄCHE DEFINIERT, DIE SO KONFIGURIERT IST, DASS SIE MIT DEM WERKSTÜCK ULTRASCHALLGESCHWEISST WERDEN KANN, WOBEI DIE BONDFLÄCHE MINDESTENS EINES DER FOLGENDEN MERKMALE AUFWEIST: (I) EINE NICHT PLANARE OBERFLÄCHE UND (II) EINE ÖFFNUNG, DIE IN EINEM ZENTRALEN BEREICH DER BONDFLÄCHE DEFINIERT IST

FIG. 6