

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft Verfahren und Vorrichtungen zum maschinellen, rechnergesteuerten Verlegen von dünnem Draht auf der Oberfläche eines Substrates. Vorwiegend geht es dabei um metallischen Draht, aber auch um Draht aus nichtmetallischen Materialien wie Polymere, Glas oder Keramik. Für metallische Drähte ist der Anwendungsbereich die für das Auge nahezu unsichtbare elektrische Verbindung mikroelektronischer Bauteile und die Herstellung planarer Spulen, für nichtmetallische die Montage mikro-mechanischer und mikro-optischer Bauelemente.

[0002] Die Herstellung elektronischer Leiterplatten durch Verlegung diskreter Leitungsdrähte auf einem isolierenden Substrat war in den Anfangsjahren der Leiterplattentechnik unter Schlagwörtern wie "multiwire"-Technik oder "drahtgeschriebene Leiterplatte" bekannt geworden. Die Patentschriften DE 23 26 861, DE 32 47 344, DE 26 10 283, US 3,674,602, US 4,648,180 und US 4,864,723 beschreiben sie ganz allgemein, dazu Drahtverlegeeinrichtungen mit einem Verlegekopf, der über das Substrat hinweggeführt wird und dabei einen Leiterdraht auf der Substratoberfläche ablegt.

[0003] Inzwischen sind Leiterplatten mit direkt verlegten Drähten nahezu vollkommen verdrängt durch Platten mit geätzten Leiterbahnen. Für Spezialanwendungen kann es aber immer noch vorteilhaft sein, Metalldraht auf einem isolierenden Substrat direkt zu verlegen. So beschreibt die Patentschrift US 7,000,314 runde Leitungsdrähte anstelle geätzter Leitungsbahnen, um die Packungsdichte und das Hochfrequenzverhalten einer Leiterplatte zu verbessern. Die Patentschrift DE 196 18 917 führt an, dass die Direktverlegung von Drähten in bestimmten Fällen vorteilhafter sei als die Leiterbahnerzeugung durch Ätzung aus einer großflächig abgeschiedenen Metallschicht. Bei vorgegebener Schaltung kommt dies Argument allgemein umso stärker zum Tragen, je größer die Fläche des Substrates ist, weil Material- und Arbeitsaufwand bei planarer (Abscheide- und Ätz-)Technik proportional zur Substratfläche ansteigen, bei der Verlegetechnik aber nur proportional zur Drahtlänge. Von besonderem Interesse ist die direkte Verlegung von isoliertem Draht, etwa in der Form preiswerten Kupferlackdrahtes, weil damit isolierende Leitungskreuzungen durch einfaches Übereinanderlegen der Drähte problemlos realisiert werden können. Im Gegensatz dazu muss bei der Kreuzung blanker Drähten eine isolierende Folie zwischengelegt werden wie in EP 1 004 226, und bei geätzten Schaltungen kann ein Kurzschluss der Leitungen nur durch aufwändiges Ausweichen in die dritte Dimension vermieden werden. Breite Anwendung findet die Drahtverlegetechnik heute zur Herstellung so genannter "Antennenspulen" für RFID-Transponder, wie in DE 44 10 732 ausgeführt. Schließlich beruht

die in DE 102 47 553 offenbarte "Optische Anzeigevorrichtung" entscheidend auf der Tatsache, dass, senkrecht auf das Substrat blickend, ein runder Leitungsdraht schmaler erscheint als eine typische geätzte Leiterbahn gleichen Querschnitts. Bei Verlegung des Drahtes auf einem Glassubstrat ergibt sich dadurch gegenüber der geätzten Leiterbahn eine höhere optische Transparenz, wenn man durch die Substratscheibe hindurchblickt. Wird der Drahtdurchmesser hinreichend klein gewählt, etwa unterhalb von 25 μm , so sind derartige Verbindungsdrähte für das unbewaffnete Auge nahezu unsichtbar.

[0004] Gemäß diesem Stand der Technik wird der zu verlegende Draht von einer Vorratsspule abgespult und im Verlegekopf über einen Umlenkanal oder eine Umlenkrolle so in unmittelbare Nähe der Substratoberfläche geführt, dass er nahezu parallel zu derselben verläuft. Er wird dann durch eine Andruckrolle oder ein anderes Werkzeug gegen die Substratoberfläche gedrückt und darauf befestigt, wie in der Patentschrift US 4,918,260 explizit beschrieben. Bevorzugt werden bei dieser Fügemethode thermoplastische Kleber benutzt, insbesondere Schmelzkleber, die zunächst als Beschichtung auf den Draht oder auf die Substratoberfläche eingebracht worden sind. Beim Verlegen wird dieser Kleber durch Erwärmung zum Schmelzen und Zerfließen gebracht und verbindet beide Fügepartner so eng wie möglich. Nach Erkalten des Klebers haftet der verlegte Draht dann permanent an der Substratoberfläche. Eng verwandte Fügemethoden, mittels derer ein Draht auf eine Substratoberfläche verlegt werden kann, sind das Löten und die Thermokompression. Auch bei ihnen wird die Oberflächenspannung eines schmelzflüssigen Verbindungsmaterials ausgenutzt, um eine enge Verbindung zwischen Draht und Substratoberfläche herzustellen. Schmelzflüssiges Metall wird, wie bekannt, in der Leiterplattentechnik dort eingesetzt, wo die Verbindung elektrisch leitend sein muss, beispielsweise an den Kontaktflächen elektronischer Bauteile ('bonding pads'). Dabei unterscheiden sich die Fügeverfahren Löten und Thermokompression, indem bei letzterem eines der zu verbindenden Materialien selbst schmelzflüssig wird, während bei ersterem das Lot als niedriger schmelzendes Verbindungsmaterial zusätzlich eingebracht wird.

[0005] Eine grundlegende Schwierigkeit ist bei allen genannten Verlegemethoden durch die Notwendigkeit gegeben, dass der Draht zur Befestigung eng auf die Substratoberfläche aufgedrückt werden muss. Nur wenn er die Oberfläche direkt – also mit einer gewissen positiven Andruckkraft – berührt, wird das bei Erwärmung zerfließende Verbindungsmaterial zugleich den Draht und die Substratoberfläche benetzen. Nur dann wird es sich durch Oberflächenspannung und Kapillarkraft so ausbreiten und in die Verbindungsfuge eindringen, wie es für eine gute Haf-

tung des Drahtes notwendig ist. Bleibt nach dem Schmelzen auch nur ein kleiner, endlicher Abstand zwischen Draht und Substratoberfläche bzw. den aufgetragenen Kleberschichten, so finden dieser Fließprozess und die Verklebung nicht statt.

[0006] Da der zu verlegende Draht nie perfekt geradlinig ist und die Substratoberfläche nie perfekt eben ist, muss die Andruckkraft hinreichend groß sein, den Draht so zu biegen, dass er sich überall der Oberflächenkontur anschmiegt. Um die erwähnte Überkreuzung isolierter Drähte zu berücksichtigen, soll die "Oberflächenkontur" hier auch querverlaufende Drähte mit umfassen, die schon in einem früheren Arbeitsgang auf der Substratoberfläche verlegt wurden. Über sie hinweg muss der aktuell zu verlegende Draht an das Substrat angedrückt werden. Das Andrücken mit einer gewissen Mindestkraft ist somit für eine erfolgreiche Verlegung essentiell.

[0007] Das Andrücken ist bei maschineller Verlegung einer der kritischsten Verfahrensschritte. Aufgrund des mechanischen Kontaktes kann das Andruckwerkzeug den Querschnitt eines dünnen Drahtes verformen. Es kann die Oberfläche oder Isolation des Drahtes verletzen und somit zu Kurzschlüssen führen. Infolge des mechanischen Kontaktes besteht zudem permanent die Gefahr, dass das Andruckwerkzeug durch Abrieb von Isolationsmaterial oder Kleber verschmutzt und fortlaufend gereinigt werden muss, wie in US 4,864,723 näher beschrieben. Alle diese Schwierigkeiten kann man unter dem Begriff "Handhabung des Drahtes" zusammenfassen. Sie werden umso größer, je dünner der zu verlegende Draht ist. Bei Drahtdurchmessern unter 0,1 mm sind sie meist so gravierend, dass die bekannten Verfahren der Drahtverlegung versagen.

[0008] Zur Lösung dieser Probleme schlägt US 6,400,882 ein Verlegeverfahren vor, bei dem die Andruckkraft quasi berührungslos erzeugt wird. Dazu wird die Biegesteifigkeit des Drahtes ausgenutzt. Der Draht wird, aus einem engen, beheizten Umlenkrohr kommend, unter einem flachen Winkel schräg gegen die Substratoberfläche gedrückt und klebt dort an. Ein spezielles Andruckwerkzeug ist nicht erforderlich. Dieses Verfahren löst die genannten Probleme jedoch nur teilweise, denn indirekt wirkt hier das Umlenkrohr als Andruckwerkzeug und unterliegt denselben Abrieb- und Verschmutzungsproblemen. Zum anderen funktioniert dies Verfahren nur bei dickeren Drähten mit hinreichender Biegesteifigkeit, und zum dritten existiert die Andruckkraft nur lokal, unmittelbar am Berührungspunkt des Drahtes am Substrat. Diese Situation mag bei dickem Draht funktionieren, bei dünnem Draht reichen jedoch Andruckkraft und Wärmeübertrag für eine gute Verklebung nicht aus.

[0009] Dies sollte nach der folgenden Darstellung der Erwärmungsprobleme noch besser verständlich

werden.

[0010] Ein weiteres Problem tritt bei Verlegung von dünnem Draht nach dem Stande der Technik in Fällen auf, bei denen eine Erwärmung zum Schmelzen eines Klebers erforderlich ist. Erfolgt die Erwärmung durch Berührung des Drahtes mit einem heißen Andruckwerkzeug, so besteht die Tendenz, dass der Draht nicht nur an der Substratoberfläche, sondern auch am Werkzeug haftet. Beim Zurückziehen des Werkzeuges kann er vom Substrat wieder abreißen. Wird stattdessen berührungslos durch Wärmestrahlung oder Anblasen mit Heißluft erwärmt, so besteht die Gefahr ungleichmäßiger Erwärmung. An den Stellen, wo der Draht die Substratoberfläche berührt, also guten thermischen Kontakt hat, werden sich Draht und Oberfläche gemeinsam erwärmen und verkleben. An Stellen mit schlechtem thermischem Kontakt wird sich der Draht jedoch schneller und höher erwärmen als die Substratoberfläche, was zu Überhitzung und Zersetzung des Klebers und mangelhafter Verklebung führen kann.

[0011] Schließlich besteht Bruchgefahr, wenn das Substrat spröde ist und nur geringe thermische Spannungen verträgt. Dies Problem existiert speziell bei der Verlegung von dünnem Draht (Durchmesser kleiner als 50 µm) auf Glassubstraten und Erwärmung mittels Strahlung. Wie eine einfache thermodynamische Abschätzung zeigt, ist es dann nicht ausreichend, allein den Draht auf die zur Klebung erwünschte Temperatur im Bereich von ca. 100–300°C aufzuheizen. Bleibt dabei die Substratoberfläche kalt, so kühlt sie den Draht im Moment der Berührung aufgrund ihrer Wärmekapazität sehr schnell ab, und das zur Klebung notwendige Fließen des Klebers unterbleibt. Bei Drähten im genannten Durchmesserbereich erfolgt der Temperatúrausgleich nämlich innerhalb weniger Mikrosekunden, während der mit dem Fließen verbundene Massentransportprozess mindestens eine Größenordnung langsamer ist. Für eine erfolgreiche Drahtverlegung ist es daher unumgänglich, die Substratoberfläche unter dem zu verlegenden Draht zu erwärmen. Der darauf aufliegende Draht hat bei gutem Kontakt dann praktisch dieselbe Temperatur wie sie, und das für eine gute Haftung des Drahtes notwendige Fließen kann stattfinden.

[0012] Die Erwärmung der Substratoberfläche erzeugt im Substrat jedoch mechanische Spannungen, die umso größer sind, je höher die Temperatur und je größer der erwärmte Oberflächenbereich sind. Um die Gefahr mechanischen Versagens infolge dieser Spannungen gering zu halten ist deshalb anzustreben, den erwärmten Bereich so klein wie möglich zu halten und dabei dennoch, wenn auch nur kurzzeitig, die zum Kleben notwendige Temperatur zu erreichen.

[0013] Der Erfindung liegt somit die Aufgabe zu-

grunde, die zur Verlegung von dünnem Draht auf einem Substrat notwendige Andruckkraft des Drahtes an die Substratoberfläche berührungsfrei entlang einem gewissen Abschnitt des Drahtes zu erzeugen um dann, für den Fall, dass während des Andrucks, in dem angedrückten Drahtabschnitt die Substratoberfläche auf die Fließtemperatur des Klebers aufheizen zu können.

[0014] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, dass die Andruckkraft elektrostatisch erzeugt wird.

[0015] Der wesentliche Vorteil des erfindungsgemäßen Verlegeverfahrens gegenüber dem Stand der Technik liegt darin, dass es berührungslos, ohne Andruckwerkzeug arbeitet, so dass der Draht und gegebenenfalls seine Isolierung unversehrt bleiben. Es existiert auch keine Verschmutzungsgefahr eines Andruckwerkzeuges. Ein anderer Vorteil ist, dass die elektrostatische Andruckkraft auf dem gesamten Auflage-Abschnitt des Drahtes wirkt. Dadurch schmiegt er sich, wie beschrieben, selbsttätig an bestehende Unebenheiten und Konturen der Substratoberfläche in einer Weise an, die mit mechanischen Andruckwerkzeugen nur schwer erreichbar ist. Dies Anschmiegen erfolgt schon bei Raumtemperatur und – infolge des sich beim Schmelzen verringernenden Abstandes – erst recht bei der höheren Schmelztemperatur. Der auf dem Draht befindliche Heißkleber kann deshalb nach dem Schmelzen die Substratoberfläche schnell benetzen, so dass eine sichere Verbindung resultiert. Generell vorteilhaft ist schließlich, dass der elektrostatische Andruck umso besser funktioniert, je dünner und biegsamer der zu verlegende Draht ist. Damit ergänzt das erfindungsgemäße Verfahren gerade im Bereich kleinster Drahtdurchmesser die bekannten Verfahren, die hier ihre größten Schwierigkeiten aufweisen.

[0016] Das erfindungsgemäße Verfahren und Vorrichtungen zur Durchführung desselben sind in den Zeichnungen beispielhaft illustriert. Es zeigen

[0017] **Fig. 1** eine bevorzugte Vorrichtung zur Verlegung eines Metalldrahtes auf einem isolierenden Substrat. Der Draht tritt aus einer Rohröffnung **24** aus. Im Gleichgewicht zwischen der elektrostatischen Anziehung und der Verlegezugkraft stellt sich ein flacher Winkel **23** zwischen Draht und Substratoberfläche ein.

[0018] **Fig. 2(a)** den Querschnitt eines mit Kleber beschichteten Metalldrahtes,

[0019] **Fig. 2(b)** den Querschnitt eines mit Lack isolierten und mit Kleber beschichteten Metalldrahtes, und

[0020] **Fig. 2(c)** den Querschnitt eines blanken

Drahtes, alle jeweils in geringem Abstand lose auf dem Substrat liegend, vor dem Verkleben.

[0021] **Fig. 3** die Querschnitte aus **Fig. 2** nach dem Schmelzen und Fließen des Verbindungsmaterials. Letzteres ist in (a) und (b) der auf den Draht aufgebraute Kleber, in (c) das Substratmaterial selbst. Die Oberfläche des geschmolzenen Verbindungsmaterials hat jeweils die Form einer Minimalfläche angenommen, die Oberflächenspannung verbindet Draht und Substrat eng miteinander.

[0022] **Fig. 4** die Kreuzung zweier isolierter Metalldrähte im Querschnitt, nach dem Fließen des Klebers. Der zuletzt verlegte Draht **11** schmiegt sich aufgrund der elektrostatischen Anziehung über den zuerst verlegten Draht **1** hinweg an die Substratoberfläche an.

[0023] **Fig. 5** eine Vorrichtung zur Verlegung des Drahtes ähnlich der Vorrichtung in **Fig. 1**, aber mit einer Umlenkrolle **36** anstelle der Rohröffnung **24**.

[0024] **Fig. 6** schematisch den Verlauf der elektrischen Feldlinien zwischen dem zu verlegenden Draht **1** und der Elektrode **29** unter der Substratplatte gemäß **Fig. 1** oder **Fig. 5**.

[0025] **Fig. 7** schematisch den Verlauf der elektrischen Feldlinien zwischen dem zu verlegenden Draht **1** und zwei Elektroden **37**, **38** auf der Substratoberfläche neben dem Draht.

[0026] **Fig. 8** eine alternative Elektrodenanordnung zur Erzeugung der elektrostatischen Andruckkraft. Hier ist der Draht **1** nicht angeschlossen; diese Vorrichtung funktioniert auch für nichtmetallische Drähte.

[0027] **Fig. 9** eine Vorrichtung zur Kontaktierung eines Bauteiles mit dem freien Ende eines Metalldrahtes, der durch elektrostatische Anziehung auf die mit Lot beschichtete Kontaktfläche niedergedrückt wird, während eine dauerhafte Verbindung durch Laserlöten erzeugt wird;

[0028] **Fig. 10(a)** bis (f) Schnittdarstellungen von Draht- und Elektrodenanordnungen zur Erzeugung elektronischer Felder, die einen auf einem Substrat zu verlegenden Draht an die Oberfläche des Substrats andrücken;

[0029] **Fig. 11(a)** eine schematisch vereinfachte Abschirmeinrichtung zum Schutz eines Bauelements (Chip-Modul oder Strap) gegen elektrische Felder, in einer den **Fig. 10(a)** bis **10(f)** entsprechenden Darstellung; und

[0030] **Fig. 11(b)** eine der Abschirmeinrichtung gemäß **Fig. 11(a)** funktionsanaloge Einrichtung mit einer Hilfselektrode zur Bildung eines Faraday-Käfigs.

[0031] Die wichtigsten Elemente zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in [Fig. 1](#) für den Fall dargestellt, dass ein mit Heißkleber beschichteter metallischer Draht auf einer isolierenden Substratplatte verlegt werden soll. Im Verlegekopf **20** tritt der Draht **1** aus einer Rohröffnung **24** aus und wird elektrostatisch auf die Oberfläche **4** der Substratplatte heruntergezogen. Zu diesem Zweck sind der Draht und eine unter der Substratplatte angeordnete Elektrode **29** an die Pole **18**, **19** einer elektrischen Spannungsquelle **32** angeschlossen. In [Fig. 1](#) ist die Verbindung des Pols **19** der Spannungsquelle nur bis zum Rand des Verlegekopfes **20** eingezeichnet, es wird aber hier und im folgenden unterstellt, dass eine weiterführende elektrische Verbindung zum Draht **1** im Inneren des Kopfes besteht.

[0032] Zum Verlegen wird der Verlegekopf **20** als Ganzes relativ zur Substratoberfläche in der Richtung **28** bewegt. Dabei spult sich der Draht **1** von der Vorratsspule **26** ab. Er läuft zunächst durch eine Bremseinrichtung **27**, die für eine vorbestimmte Zugkraft F_z des Drahtes sorgt, und weiter durch das Umlenkrohr **25**. Dessen Öffnung **24** befindet sich dicht über der Substratoberfläche. In dem mit **35** bezeichneten Abschnitt ist der Draht aufgrund der Zugkraft F_z gespannt und verläuft praktisch geradlinig. Er erreicht die Substratoberfläche am Punkt **8** unter einem flachen Winkel γ . Letzterer ist in [Fig. 1](#) mit dem Bezugszeichen **23** versehen. Der Berührungspunkt **8** und der Verlegewinkel γ stellen sich selbsttätig so ein, dass die senkrecht zur Oberfläche nach oben wirkende Komponente $F_z \sin \gamma$ der Zugkraft stets im Gleichgewicht ist mit der elektrostatischen Kraftdichte, die den Draht auf das Substrat niederdrückt. Typische Werte des Verlegewinkels liegen bei $\gamma = 1^\circ \dots 5^\circ$. Im Abschnitt **34**, jenseits des Oberflächen-Berührungspunktes **8**, verläuft der Draht dann wieder praktisch geradlinig. Aufgrund der elektrostatischen Andruckkraft liegt er hier eng auf der Substratoberfläche auf. Zwischen den beiden geradlinigen Abschnitten **33** und **35** existiert ein kurzer Übergangabschnitt **34**, in dem der Draht elastisch gekrümmt ist.

[0033] Im Auflageabschnitt **33** erfolgt die Verklebung des Drahtes auf die Substratoberfläche, indem letztere erhitzt wird, vorzugsweise nur in einem eng lokalisierten Bereich. Hierzu ist in [Fig. 1](#) beispielhaft eine Flamme **30** angedeutet, die aus einem Brennerrohr **31** austritt und auf die Substratoberfläche gerichtet ist. Wegen der erwähnten thermischen Spannungen im Substrat ist es vorteilhaft, die Breiten B_x (in der Verlegerichtung gemessen) und B_y (senkrecht zur Ebene der [Fig. 1](#) gemessen) der Flamme so klein wie möglich zu wählen. Eine Untergrenze besteht dabei durch die Forderung, dass die Flamme soviel Heizleistung liefern muss, dass der aufgeheizte Bereich die zum Schmelzen und Fließen des Klebers notwendige Temperatur erreicht.

[0034] Details dieser Verklebung sind in den [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) dargestellt. Ein ohne Andruckkraft verlegter Draht **1** würde lose auf dem Substrat liegen. Infolge innerer mechanischer Spannungen wäre er im Allgemeinen gekrümmt, und es würde eine gewisse unregelmäßig breite Fuge **9** zwischen Draht und Oberfläche bestehen. Dies zeigt [Fig. 2](#). Mit der Andruckkraft jedoch, die von der gegenseitigen elektrostatischen Anziehung von Draht und Elektrode **29** herrührt, wird der Draht auf die Oberfläche **4** heruntergezogen, und die Fugenbreite **9** verschwindet. Wird nun erwärmt, so schmilzt in den Fällen (a) und (b) der Heißkleber **3**, in (c) die Oberfläche **4** des Substrates, und nach dem Fließen des geschmolzenen Verbindungsmaterials resultiert die in [Fig. 3](#) gezeigte Situation. Hier hat der Heißkleber **3**, der zunächst als dünne Schicht auf dem Draht **1** oder auf dessen Isolierung **2** aufgebracht war, die Substratoberfläche **4** benetzt und sich aufgrund seiner Oberflächenspannung neu verteilt. Er ist in die Fuge **9** eingedrungen und füllt sie in der Art von Hohlkehlen **5** aus. Im Falle (c) zieht zunächst die elektrostatische Kraft den Draht in die schmelzende Oberfläche hinein, und nach der Benetzung wirkt dann die Oberflächenspannung im gleichen Sinne weiter. Auch hier bilden sich zwei Hohlkehlen **6** aus.

[0035] Entsprechende, aber komplexere Benetzungs- und Fließvorgänge finden bei der Überkreuzung zweier isolierter Drähte statt, wie in [Fig. 4](#) im Querschnitt skizziert. Draht **1** mit der Isolations-schicht **2** wurde zuerst verlegt und auf der Substratoberfläche **4** verklebt. Über ihn hinweg wurde dann der Draht **11** mit Isolations-schicht **12** geführt. Er schmiegt sich, gemäß seiner Biegesteifigkeit und der elektrostatischen Kraft an die durch **1**, **2**, **4** gegebene Kontur an. Beim Erwärmen fließt der Heißkleber auch in die konkav-konvexen Bereiche **7**.

[0036] Weitere Details und alternative Ausführungsformen des Verfahrens sowie typische Parameter der verwendeten Vorrichtungen erschließen sich aus der nachfolgenden genaueren Beschreibung der genannten Prozessschritte, der das Verfahren charakterisierenden Begriffe, und der [Fig. 5](#) bis [Fig. 9](#).

[0037] Dabei wird weiterhin vereinfachend unterstellt, dass ein runder Metalldraht, der dünn mit Heißkleber beschichtet ist, also ein so genannter "Backlackdraht", auf einer isolierenden Substratplatte, etwa aus Glas, verlegt werden soll. Allgemeinerer Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens und Vorrichtungen dazu, mit anderen Materialien und anderen Fügeverfahren, werden im Anschluss beschrieben. Die wichtigsten Begriffe sind diese:

Der Draht hat im Allgemeinen kreisförmigen Querschnitt. Die erfindungsgemäße elektrostatische Niederhaltung funktioniert aber auch bei anderen Querschnittsformen, insbesondere bei rechteckigem

Querschnitt.

[0038] Die genannten Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens kommen besonders gut zur Geltung, wenn der Drahtdurchmesser, beziehungsweise seine senkrecht zur Oberfläche gemessene Dicke, unterhalb von 50 μm liegt, weil dann die Biegesteifigkeit des Drahtes gering ist. In geringerem Maße existieren die Vorteile aber auch oberhalb dieses Grenzwertes.

[0039] Die Verlegezugkraft F_z muss passend zum verwendeten Drahtdurchmesser gewählt werden. Ein guter Anhaltspunkt für F_z ist der aus der Spulentechnik her bekannte "Wickelzug". Er liegt für Drahtdurchmesser von 10 ... 100 μm im Bereich von 1 ... 100 cN und entspricht einer relativen Dehnung des Drahtes von etwa 10^{-3} . Die Verlegezugkraft F_z wird von der in [Fig. 1](#) gezeigten Bremseinrichtung **27** erzeugt. Einfache Bremseinrichtungen arbeiten mittels Reibung, indem der Draht zwischen vorgespannten Bremsbacken hindurchgezogen wird. Dies ist für die Vorrichtung **27** angedeutet. Dabei besteht jedoch die Gefahr von Abrieb und Verschmutzung. Zur Vermeidung dieser Probleme, sowie bei höheren Ansprüchen an die Einstellbarkeit und Konstanz von F_z kann der Draht bekanntlich auch über eine Rolle geführt werden, die von einem so genannten "Torque-Motor" gebremst wird.

[0040] Die Verlegegeschwindigkeit. Da die hier interessierenden, relativ schweren Substrate typisch horizontal liegen, erfolgt die zur Verlegung notwendige Relativbewegung **28** zweckmäßig in der Weise, dass das Substrat feststeht und der leichtere Verlegekopf in einer horizontalen Ebene darüber hinweg bewegt wird. Die Verlegegeschwindigkeit v_0 sollte für eine kosteneffiziente maschinelle Drahtverlegung mindestens 0,1 m/s betragen, besser ist 1 m/s und darüber.

[0041] Draht-Umlenkung. Zur Verlegung muss der Draht aus der zunächst etwa senkrechten Zuführungsrichtung in eine nahezu horizontale Richtung umgelenkt werden. Damit aus dieser Umlenkung möglichst wenig innere Spannung im Draht resultiert, wird entweder ein sanft gebogenes Umlenkrohr **25** benutzt, wie in [Fig. 1](#), oder eine Umlenkrolle **36** gemäß [Fig. 5](#).

[0042] Die elektrostatische Andruckkraft F_E , die auf den Drahtabschnitt **33** wirkt, ist eine Folge der elektrischen Spannung U zwischen dem Draht **1** und der Elektrode **29** unter dem Substrat. [Fig. 6](#) zeigt im Querschnitt, wie das elektrische Feld verteilt ist. Im Bereich der Fuge **9**, zwischen Draht **1** und Substrat **4**, ist die Feldstärke am größten. Dadurch resultiert eine auf den Draht **1** nach unten wirkende Kraft $F_E(z)$. Hier bedeutet z den Abstand des Drahtes von der Oberfläche, also die Weite der Fuge **9**. Die Kraft ist maximal bei aufliegendem Draht ($z = 0$). Mit zunehmender Fu-

genweite z wird sie kleiner und verschwindet rasch, wenn z größer wird als der Drahtdurchmesser. Sie ist proportional zur Länge L_{33} des Drahtabschnittes **33**. Deshalb ist es zweckmäßig, sie durch eine längenbezogene Kraftdichte zu charakterisieren, $f_E(z) = F_E(z)/L_{33}$, mit der Dimension [N/m].

[0043] Die absolute Größe dieser Kraftdichte $f_E(z)$ hängt in komplizierter Weise vom Durchmesser und der Beschichtung des Drahtes ab, von der Dicke der Substratplatte und ihrer Dielektrizitätskonstante, sowie von der angelegten Spannung. Vereinfachend kann aber für Glas-Substrate von 4 mm Dicke und isolierte Drähte mittleren Durchmessers beim Minimalabstand für überschlägige Rechnungen $f_E(z = 0) \approx 0,05 U^2$ [N/m] angesetzt werden, wobei U der Effektivwert der angelegten Spannung in [kV] ist. Bei einer Spannung von $U = 2$ kV liegt die maximale Andruck-Kraftdichte also in der Größenordnung $f_E \approx 0,2$ [N/m].

[0044] Der Verlegewinkel **23**, der sich aufgrund des erwähnten Kräftegleichgewichts einstellt, folgt aus einer einfachen Energie-Abschätzung,

$$\gamma \approx (2F_{E0}/F_z)^{1/2}$$

[0045] Hier bedeutet $F_{E0} = \int f_E(z) dz$ die längenbezogene potentielle Energie der Kraftdichte $f_E(z)$, wobei die Integration von $z = 0$ bis zu einem sehr großem Abstand auszuführen ist, bei dem $f_E(z)$ verschwindet. Dies F_{E0} hat die Dimension [N] einer Kraft. Für einen Draht vom typischen Durchmesser 20 μm liegt ihre Größe bei $F_{E0} \approx 2U^2 \cdot 10^{-6}$ [N]. Mit $U = 2$ kV und einer Verlegekraft von $F_z = 10^{-2}$ N stellt sich der Verlegewinkel auf $\gamma \approx 2,3^\circ$ ein.

[0046] Der elastisch gekrümmte Drahtabschnitt **34** ist in seiner Länge L_K durch die elastische Biegesteifigkeit S des Drahtes und die Zugkraft F_z bestimmt. Näherungsweise gilt $L_K = (S/F_z)^{1/2}$. Für Kupferdrähte liegt diese Länge in der Größenordnung $L_K \approx 0,1 \dots 10$ mm, wenn der Drahtdurchmesser im Bereich 10 ... 100 μm variiert.

[0047] Die elektrische Spannung bestimmt entscheidend die Größe der elektrostatischen Andruckkraft. Da die Kraft quadratisch mit der Spannung wächst, ist es vorteilhaft für die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, die Spannung möglichst hoch zu wählen. Eine technische Obergrenze ist dabei durch das Einsetzen von Koronaentladung an scharfen Ecken und Kanten gegeben, sowie durch die elektrische Durchschlagsfestigkeit der zu verdrahtenden Substratplatte. In einer praktisch ausgeführten Vorrichtung zur Drahtverlegung auf einer 4 mm dicken Glasscheibe war eine Spannung von $U = 2$ kV voll ausreichend zum Verlegen von 20 μm Draht.

[0048] Ein bekanntes Problem elektrostatischer

Niederhaltungen ist, dass sich an den dielektrischen Grenzflächen elektrische Ladungen ansammeln. Sie wirken in jedem Falle der angelegten Spannung entgegen, schwächen also die elektrostatische Kraft. Sie lassen sich aber weitgehend vermeiden, indem man rasch, ehe noch größere Ladungen aufgebaut sind, die Polarität der angelegten Spannung umkehrt. Dadurch werden die Ladungen abgebaut und dann neue, mit umgekehrtem Vorzeichen, aufgebaut. Zu deren Abbau muss dann erneut umgepolt werden, usw. Da die Andruckkraft von U^2 abhängt, ändert sie sich bei den Umpolungen nicht. Diesen Polaritätsumschaltungen dient der in [Fig. 5](#) gezeigte Schalter **57**. Äquivalent zu einer Gleichspannungsquelle **32** mit einer solchen periodischen Polaritätsumschaltung **57** ist die Verwendung einer Wechselspannungsquelle mit symmetrisch rechteckigem Zeitverlauf.

[0049] Die Elektroden zur Erzeugung der elektrostatischen Andruckkraft in den Vorrichtungen der [Fig. 1](#) und [Fig. 5](#) sind der zu verlegende Draht **1** und die Gegenelektrode **29**. Letztere kann vorzugsweise die Form einer dünnen Metallfolie oder einer leitend beschichteten Glasplatte haben, die unter das Substrat gelegt wird. Diese besonders einfache Anordnung ist zugleich die günstigste. Bei gegebener Spannung U und mäßigen Substratdicken liefert sie die größte Kraft.

[0050] Alternativ können anstelle der einen Gegenelektrode **29** zwei Elektroden **37**, **38** vorgesehen werden, die in geringem Abstand symmetrisch zu beiden Seiten des zu verlegenden Drahtes **1** auf der Substratoberfläche aufliegen, vgl. [Fig. 7](#). Sie werden gemeinsam an den Pol **18** der Spannungsquelle angeschlossen, an dem in den vorhergehenden Beispielen die Elektrode **29** lag. Auch hier ist in dem elektrischen Feld, das sich ausbildet, die Feldstärke im Bereich der Fuge **9** maximal. Für den Draht **1** resultiert wiederum eine nach unten gerichtete Kraft, also ein Andruck an die Oberfläche **4**. Diese Anordnung ist bei großen Substratdicken vorteilhaft.

[0051] Eine weitere alternative Elektrodenanordnung zur Erzeugung der elektrostatischen Andruckkraft zeigt [Fig. 8](#). Hier wird eine Anzahl von Elektrodenpaaren **56a**, **56b** benutzt. Vorteilhaft ist die Verwendung einer größeren Anzahl dieser Elektroden-Paare. Sie sind streifenweise oder als Schachbrettmuster unter dem Substrat direkt in dem Bereich angeordnet, wo der zu verlegende Draht angedrückt werden soll. Alle Paare sind elektrisch parallel geschaltet. Jeweils eine Elektrode aller Paare ist an den Pol **18** der Spannungsquelle angeschlossen, die andere an den Pol **19**. Der Umschalter **57** erlaubt es wieder, diese Zuordnung umzuschalten. Der Draht **1** ist hier nicht mit der Spannungsquelle verbunden. Deshalb ist diese Elektrodenanordnung auch für das Verlegen einzelner kurzer Drahtstücke geeignet, sowie für nichtmetallischer "Drähte", die gewöhnlich als

"Fasern" bezeichnet werden.

[0052] Vorteilhaft sind schließlich auch ähnliche Anordnungen dieser Art mit Elektroden-Tripeln anstelle von Paaren unter dem Substrat. Sind diese Tripel symmetrisch aufgebaut und werden mit um 120° phasenverschobenen Sinus-Wechselspannungen gespeist, so resultiert im räumlichen Mittel über mehrere Elektroden-Tripel eine besonders gleichmäßige Andruckkraft.

[0053] In allen genannten Fällen müssen die Elektroden, gegebenenfalls einschließlich des zu verlegenden Drahtes, über geeignete elektrische Verbindungen an die benutzte Spannungsquelle angeschlossen werden. Im Falle einer Gleichspannungsquelle bedeutet dies, dass die Verbindungen durchgehend galvanisch leitend sein müssen. Bei Verwendung einer Wechselspannungsquelle ist auch eine kapazitive Ankopplung der Elektroden geeignet.

[0054] Die Sicherheit des Bedienpersonals und der zu verdrahtenden elektronischen Bauteile verdient besondere Beachtung bezüglich der Hochspannung, die zur Erzeugung der Andruckkraft notwendig ist. Praktische Erfahrungen mit anderen elektrostatischen Niederhaltungen zeigen, dass auch bei Spannungen von 5 kV und mehr der Personenschutz einfach dadurch gewährleistet werden kann, dass die Spannungsquelle mit einem hinreichend hohem Innenwiderstand versehen wird. Er begrenzt den möglichen Fehlerstrom, beispielsweise auf Werte < 20 mA, so dass auch bei versehentlicher Berührung keine Lebensgefahr für das Personal besteht.

[0055] Schwieriger ist der Schutz empfindlicher elektronischer Bauteile gegen Überspannungen, die galvanisch oder kapazitiv aus der Spannungsquelle **32** übergekoppelt werden können. In dieser Hinsicht ist es vorteilhaft, den zu verlegenden Draht **1** grundsätzlich auf Erdpotential zu halten, so dass nur die Gegenelektrode **29** auf Hochspannungspotential liegt.

[0056] Das Substratmaterial war in den bisher beschriebenen Ausführungsbeispielen als "isolierend" vorausgesetzt worden. Maßgeblich für eine solche Beurteilung der elektrischen Leitfähigkeit sind hier nicht absolute Werte, sondern die Erfordernisse der elektrostatischen Niederhaltung und des Verlegeprozesses. Wird der elektrische Widerstand zwischen Draht **1** und Gegenelektrode **29** mit R bezeichnet und die Kapazität mit C , so ist die elektrostatische Anziehung nur während einer Zeitspanne der Größenordnung $\tau = R C$ nach dem Einschalten einer Gleichspannung wirksam. Danach klingt die Anziehung rasch ab weil sich, wie erwähnt, an Grenzflächen elektrische Ladungen ansammeln. Kann der Verlegeprozess einschließlich der Kleberhärtung nicht in einer Zeit erledigt werden, die kurz gegen die genannte

Zeitkonstante τ ist, so muss die schon erwähnte, schnell wiederholte Umschaltung der Polarität angewandt werden. Dabei muss die Frequenz f_U der Umschaltung so hoch sein, dass $\tau f_U \gg 1$ gilt.

[0057] Beispielsweise möge bei der Drahtverlegung auf einer isolierenden Glasscheibe von 1 m^2 Größe der elektrische Widerstand $R = 1000 \text{ M}\Omega$ und die Kapazität $C = 1 \text{ nF}$ betragen. Dann ist $\tau = 1 \text{ s}$, und die Umschaltfrequenz sollte deutlich größer sein als 1 Hz .

[0058] Erheblich höhere Frequenzen sind erforderlich, wenn das Substrat eine gewisse elektrische Leitfähigkeit besitzt. Ein Beispiel ist die Drahtverlegung auf Papier, etwa zur Herstellung planarer Antennenspulen für RFID-Transponder. Mit $R = 1 \text{ M}\Omega$ und $C = 100 \text{ pF}$ wird hier $\tau = 10^{-4} \text{ s}$, und die Umschaltfrequenz sollte deutlich größer sein als 10 kHz .

[0059] Neben diesen als "isolierend" bezeichneten Substraten wie beispielsweise Glas, Keramik, Polymere, Teslin und synthetische Werkstoffe, Papier, Holz, Leder u. a. sind auch elektrisch leitende Materialien als Substrate, welche als Endlosrolle oder als Sheet vorliegen, zur Drahtverlegung nach dem erfindungsgemäßen Verfahren geeignet, also Metalle und mit einer leitenden Metallschicht überzogene Isolatoren. Auf elektrisch leitenden Substraten lassen sich insbesondere isolierte Metalldrähte in der beschriebenen Weise verlegen. Dabei müssen der Draht und das Substrat an die Spannungsquelle angeschlossen werden, damit zwischen ihnen die Anziehungskraft zustande kommt. Wenn die Isolationsschicht dünn ist, wie beispielsweise bei Kupferlackdraht, so ist dabei schon eine geringe elektrische Spannung ausreichend, etwa 100 V . Das erfindungsgemäße Verlegeverfahren mit Elektroden unter dem Substrat, bei dem der Draht nicht angeschlossen wird, funktioniert jedoch nur mit isolierenden Substraten, nicht mit elektrisch leitenden.

[0060] Als schmelzendes Verbindungsmaterial ist allgemein jedes Material geeignet, das bei Erwärmung flüssig wird und in diesem Zustand Draht und Substratoberfläche benetzt und mittels Oberflächenspannung verbindet, so dass sie nach Erkalten permanent verbunden bleiben. Wichtigstes Beispiel sind Heißkleber, oft auch als "Schmelzkleber" bezeichnet. Sie existieren einerseits als mehrfach wieder aufschmelzbare "Thermoplaste" und, andererseits, als thermisch reagierende und danach nicht wieder aufschmelzbare "Duroplaste". Das schmelzende Verbindungsmaterial kann auch ein Lot sein, also allgemein eine Metall-Legierung, deren Schmelzpunkt unterhalb der Schmelzpunkte von Draht und Substrat liegt. Der Fügeprozess ist dann ein Lötprozess, und Beispiel eines Lotes für Kupferdraht ist Zinnlot. Schließlich kommt als schmelzendes Verbindungsmaterial auch das Material der Substratoberfläche oder des

Drahtes selbst infrage. Das Fügeverfahren ist dann die so genannte Thermokompression. Der dabei gewöhnlich benutzte Andruck mit einem heißen Werkzeug kann, erfindungsgemäß, bei sehr dünnen Drähten durch die elektrostatische Andruckkraft und lokale Erwärmung der Substratoberfläche ergänzt oder ganz ersetzt werden. Im Zusammenhang mit Thermokompression nach dem Stand der Technik ist das erfindungsgemäße Verfahren speziell für isolierte Drähte in der Weise geeignet, dass der zu verbindende Draht zunächst mittels der elektrostatischen Andruckkraft unverrückbar auf dem Substrat fixiert wird, und dann in herkömmlicher Weise mittels eines heißen Werkzeuges durch Druck permanent verbunden wird.

[0061] Bei Verwendung von Heißkleber oder Lot als Verbindungsmaterial ist es vorteilhaft, dieses zunächst als dünne Schicht **2** auf dem zu verlegenden Draht **1** aufzubringen, wie in [Fig. 2\(a, b\)](#) angedeutet. Beim Schmelzen füllt es dann hohlkehlig die Fugen **5** der [Fig. 3](#). Alternativ kann das Verbindungsmaterial als Schicht auf der Substratoberfläche verwendet werden. Auch dann bilden sich beim Schmelzen Hohlkehlen, ähnlich den Fugen **6** der [Fig. 3\(c\)](#).

[0062] Mit Heißkleber beschichteter Draht ist kommerziell als so genannter "Backdraht" zur Herstellung freitragender Spulen erhältlich. Die verfügbaren Heißklebertypen unterscheiden sich in ihren Erweichungstemperaturen, beispielsweise Polyvinylbutyral (110°C), Phenoxyharz (140°C), oder modifiziertes aliphatisches Polyamid (180°C).

[0063] Der Verlegeprozess kann unterteilt werden in die beiden Schritte des Drahtablegens und der Drahtverklebung. Erfindungsgemäß muss an jedem Punkt der Verlegebahn die elektrostatische Anziehung bereits während des ersten Schrittes wirken und bis zum Ende des zweiten Schrittes bestehen bleiben. Für die zeitliche Gliederung dieser Schritte bestehen mehrere Alternativen

(a) kontinuierlich fortschreitendes Verlegen, wie es in den Drahtverlegemaschinen nach dem Stand der Technik ausgeführt wird. Dabei wird der Draht entlang einer vorher festgelegten und im Steuerrechner gespeicherten Verlegebahn abgespult und unmittelbar danach durch Erwärmung des Klebers mit dem Substrat permanent verbunden. Für diesen Prozess sind die in [Fig. 1](#), [Fig. 5](#), und [Fig. 8](#) skizzierten Verlegeköpfe bestimmt.

(b) Zweischritt-Verfahren, bei dem in einem ersten Schritt der Draht insgesamt ausgelegt und dabei während der Auslegezeit durch die elektrostatische Anziehung auf der Substratoberfläche niedergehalten wird. Die Erwärmung, die zur Verklebung führt, erfolgt erst danach im zweiten Schritt, sei es durch lokale Erwärmung der Substratoberfläche entlang der Verlegebahn oder durch Erwärmung der gesamten Substratoberfläche.

Zwischen diesen beiden Fällen liegen weitere Möglichkeiten, den Verlegeprozess zu führen, indem der Draht abschnittsweise ausgelegt und dann der jeweilige Abschnitt erwärmt und verklebt wird, ehe der nächste Abschnitt begonnen wird. Auch kann es vorteilhaft sein, den Draht nur am Anfang und/oder Ende eines jeden Abschnitts zu verkleben, so dass er dazwischen geradlinig verläuft, mit dem gegebenen Verlegezug F_z gespannt. Nach welcher dieser Möglichkeiten der Verlegeprozess im konkreten Fall tatsächlich geführt wird, kann von anderen Überlegungen abhängig gemacht werden, insbesondere von der verwendeten Wärmequelle und von der benötigten Verlegegeschwindigkeit.

(c) Das erfindungsgemäße Verlegeverfahren kann schließlich auch in der Weise modifiziert werden, dass die Erwärmung der Substratoberfläche zuerst erfolgt und der Draht danach rasch, ehe die Oberfläche wieder abgekühlt ist, auf die Oberfläche aufgelegt und elektrostatisch ange-drückt wird.

[0064] Die Erwärmung der Substratoberfläche bei maschineller Drahtverlegung kann mittels einer Flamme oder eines Heißluftgebläses vorgenommen werden, wobei der Wärmeübergang durch Konvektion erfolgt. Alternativ ist die Heizung der Substratoberfläche mittels Strahlung möglich, wobei die Strahlungsleistung im Substrat absorbiert wird. Bei Heißklebern ist die erforderliche Oberflächentemperatur etwa 100–300°C, bei Löt- und Thermokompression kann sie erheblich höher liegen, bis zu 1000°C. In jedem Falle ist es vorteilhaft, die zugeführte Heizleistung so zu steuern oder zu regeln, dass die maximale, für den Fügeprozess zulässige Oberflächentemperatur nicht überschritten wird. Insbesondere sollte die Heizung ausgeschaltet werden, wenn der Verlegekopf stillsteht.

[0065] Die Dynamik des Erwärmungsprozesses ist von Interesse für eine optimale Auslegung der Heizung. Zum kontinuierlichen maschinellen Verlegen mit unmittelbar folgender Aufheizung und Verklebung ist es vorteilhaft, die Heizung auf einen möglichst kleinen, scharf lokalisierten Bereich der Substratoberfläche zu beschränken. Dies reduziert die erwähnten mechanischen Spannungen im Substrat und die notwendige Heizleistung.

[0066] Im gleichen Sinne ist es vorteilhaft, die Heizung auch auf einen möglichst flachen Bereich an der Substratoberfläche zu beschränken. Bei Strahlungsheizung bedeutet dies, dass die Wellenlänge der Heizstrahlung so zu wählen ist, dass sie möglichst stark, unmittelbar an der Substratoberfläche absorbiert wird. Der dazu notwendige Absorptionskoeffizient des Substratmaterials folgt aus einer Betrachtung der Wärmeausbreitung im Substrat. Wird die Ausdehnung der Heizungsanordnung in der Verlegerich-

tung mit B_x bezeichnet, so ist die Heizdauer eines Oberflächenpunktes $t_H = B_x/v_0$. Während dieser Zeit dringt die Wärme von der Oberfläche aus eine gewisse Distanz $B_z = 2gt_H^{1/2}$ in das Innere des Substrates ein, wobei g die Temperaturleitfähigkeit des Substrates angibt. Im Vergleich zu dieser Distanz sollte die Eindringtiefe der Strahlung klein sein, der Absorptionskoeffizient also $\alpha > 1/B_z$ sein. Beispielsweise beträgt bei einer Verlegegeschwindigkeit von $v_0 = 1$ m/s und einer Heizflecklänge von $B_x = 1$ mm die Heizdauer $t_H = 1$ Millisekunde. In dieser Zeit dringt in Glas ($g \approx 0,001$ m/s^{1/2}) die Wärme bis zu einer Tiefe $B_z \approx 50$ µm ein. Um einfallende Laserstrahlung über diese Distanz nahezu vollständig zu absorbieren, muss das Substratmaterial bei der Laserwellenlänge einen Absorptionskoeffizient $\alpha \geq 10^3$ cm⁻¹ haben. In diesem Sinne sind der CO- und der CO₂-Laser besonders gut zur Erwärmung von Glassubstraten geeignet.

[0067] Eine ausführlichere Analyse dieser Erwärmungsdynamik zeigt auch noch, dass die benötigte Heizleistung mit $v_0^{1/2} B_x^{1/2} B_y$ skaliert und im vorstehend beschriebenen Fall bei etwa 10 W liegt.

[0068] Eine alternative Form der erfindungsgemäßen Fixierung eines Drahtes ist in [Fig. 9](#) skizziert. Hier trägt eine Platine **41** ein elektronisches Bauteil **42** mit metallischen Kontaktflächen **44**, **45**. Das freie Ende **48** des Drahtes **1** soll durch Lötung mechanisch und elektrisch mit der Kontaktfläche **44** verbunden werden, die hier die Rolle des Substrates übernimmt. Dazu wird der Verlegekopf **20** bei zunächst ausgeschalteter Spannungsquelle **32** so gesteuert, dass das Drahtende **48** dicht oberhalb der Kontaktfläche **44** positioniert ist. Der verbleibende Abstand **46** zwischen Draht und Kontaktfläche kann im Bereich von 0,03–0,3 mm liegen, abhängig von der Präzision der Steuerung. Um den Draht nun zur Lötung auf der Kontaktfläche zu fixieren, wird die Spannungsquelle **32** eingeschaltet. Einer ihrer Pole ist über den Verlegekopf mit dem Draht **1** verbunden. Ihr anderer Pol ist mit der zweiten Kontaktfläche **45** des Bauteils verbunden, oder auch mit einer metallischen Fläche der Platine **41** oder mit einer Elektrode **29** unter der Platine. Infolge der elektrostatischen Anziehungskraft wird dann das Drahtende **48** elastisch nach unten gebogen. Es nähert sich der Kontaktfläche **44**, wodurch sich die Anziehungskraft noch vergrößert. Bei hinreichender Höhe der angelegten Spannung U schnell es gegen die Kontaktfläche und bleibt dort fixiert. Die Lötung erfolgt durch Erwärmung mittels eines Laserstrahls **50**, der von einer Optik **70** auf die Kontaktfläche fokussiert wird. Als schmelzendes Verbindungsmaterial dient in diesem Beispiel eine Lötspur, die in bekannter Weise als "Verzinnung" auf der Kontaktfläche und/oder auf dem Draht aufgebracht ist.

[0069] Die Höhe der Spannung, die zur Fixierung notwendig ist, hängt von der Biegesteifigkeit und der Länge des freien Drahtendes sowie von der Größe

der Kontaktfläche ab. Erfahrungsgemäß ist bei einem 20 µm Kupferdraht mit 10 mm freiem Ende eine Spannung von 200 V ausreichend.

[0070] Wenn der zu fixierende Draht isoliert ist, wie beispielsweise Kupferlackdraht, bildet die Isolations-schicht einen natürlichen Anschlag, der das Minimum des Abstandes **46** bestimmt. Ein Problem kann hier vermutet werden für den Fall, dass der Draht blank ist. Im Zustand der Fixierung schließt er die Spannungsquelle kurz, so dass die niederhaltende Kraft verschwindet. Dies Problem ist jedoch ein theoretisches. Die Praxis zeigt, dass ein blanker Draht sehr wohl so niedergehalten wird, wie es für die Lötverbindung notwendig ist. Er prellt beim Aufschlag auf die Kontaktfläche ab, gibt dabei den Kurzschluss frei, wird aber sofort erneut angezogen, usw. Im Mittel hält er sich sehr dicht bei der Oberfläche auf und berührt sie auch, wie es für das Fließen und Benetzen des Lotes notwendig ist.

[0071] Der Verlegekopf muss neben den genannten Vorrichtungen zum Bremsen und Umlenken des Drahtes eine Reihe weiterer Vorrichtungen enthalten, die dem Fachmann geläufig sind, und die deshalb hier nicht im Einzelnen beschrieben werden müssen. Zu ihnen zählen Vorrichtungen

- zur Bewegung des Kopfes parallel zur Substratoberfläche, entlang vorgegebener, im Steuerungsrechner gespeicherter Bahnen, welche die zu verbindenden Kontaktpunkte sowie mögliche Klebepunkte enthalten,
- zur Verbindung des Drahtes (zum 'bonden') an Bauelement- Kontaktflächen, die gewöhnlich Anfangs- und Endkontakte jeder zu verlegenden Verbindungsleitung darstellen,
- zum Abschneiden des Drahtes nach Herstellung des Endkontaktes einer Leitung,
- zum Vorschub des Drahtes, speziell nach dem Abschneiden, um ein kurzes Stück neuen Drahtes für den Anfangskontakt der nächsten zu verlegenden Leitung aus dem Verlegekopf unter die Kontaktier Vorrichtung zu befördern, wie in [Fig. 9](#) illustriert,
- zur Abisolierung der Drahtenden, falls erforderlich,
- zum Festhalten des Drahtes mittels einer Zange oder Klammer ('clamp'), wenn er in Form eines die elektrischen Kontaktstellen zugentlastenden Bogens ('loop') verlegt werden soll,
- und möglicherweise die in [Fig. 1](#) angedeutete Spule **26** mit einem größeren, für viele Arbeitsgänge ausreichenden Vorrat des Drahtes **1**. Dies bietet sich gerade bei der Verlegung sehr dünner Drähte an, deren Masse gering ist und die bei externer Zuführung besonders reißgefährdet wären.

[0072] Die Verlegebahn, entlang welcher der Draht verlegt wird, ist allgemein gekrümmt. Dies erfordert, dass der Draht durchgehend verklebt wird. Alternativ

dazu kann die Bahn die Form eines Polygonzuges haben, bei dem der Draht abschnittsweise gerade ist und nur an den Eckpunkten mit dem Substrat verklebt sein muss. Dies kann den Vorteil einer höheren Verlegegeschwindigkeit bieten.

[0073] Die Verlegebahnen werden aus der Schaltung und der Anordnung der Bauteile von einem Programm ('router') ermittelt und im Steuerrechner des Verlegekopfes gespeichert. Letzterer muss dann bei der Verlegung so gesteuert werden, dass der Berührungspunkt **8** der Verlegebahn folgt und dabei zugleich der gespannte Drahtabschnitt **35** stets tangential zur Sollbahn liegt.

[0074] Weitere Anwendungen und alternative Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens können Vorteile bieten bei der Montage mikro-mechanischer und mikro-optischer Bauteile als Ersatz für die so genannten "Haftkleber". Letztere werden häufig eingesetzt, um auf einer Montagefläche oder Platine ein kleines Bauteil zunächst temporär zu fixieren, das erst später endgültig befestigt wird. Wird bei solcher Montage statt Haftkleber Heißkleber mit elektrostatischem Andruck benutzt, so besteht die vorteilhafte Möglichkeit, das Bauteil im kalten Zustand noch mehrfach zu bewegen und zu justieren, ehe es erwärmt und verklebt wird. Wie erläutert, ist diese Fixierung auf der Substratoberfläche gleichermaßen für blanke wie für isolierte Metalldrähte möglich, aber auch für nichtmetallische "Drähte", wie Textilfasern, Polymerfasern und Glasfasern, insbesondere auch Lichtleitfasern. Dabei muss, wie anhand der Beispiele und Zeichnungen gezeigt wurde, die Elektrodenanordnung im konkreten Fall danach ausgesucht werden, welche Kombination von Leitfähigkeiten (metallisch oder isolierend) der zu verlegende Draht und das Substratmaterial darstellen.

[0075] Die Einsatzmöglichkeiten des insoweit erläuterten Drahtverlegungsverfahrens zur Drahtverlegung werden entscheidend bestimmt durch die Größe der erzielbaren elektrostatischen Anziehungskraft, die den Draht auf dem Substrat niederhält. Sie lässt sich durch Erhöhung der angelegten Spannung solange vergrößern, bis ein elektrischer Durchschlag erfolgt. Kritisch dafür ist zum einen das Substrat, zum anderen das den Draht umgebende Medium. Ersteres begrenzt die nutzbare Spannung bei sehr dünner Substratdicke, bei etwa 0,1 mm und darunter. Bei dieser Substratdicke liegt die Durchschlagsspannung im Bereich von 1–10 kV, je nach Substratmaterial.

[0076] Bei dickeren Substraten ist die nutzbare Spannung durch die Durchschlagsfestigkeit des den Draht umgebenden Mediums begrenzt. Erhöht man in Luft die Spannung so weit, dass die elektrische Feldstärke an der Drahtoberfläche einen Wert von ca. 3–10 kV/mm überschreitet, so bildet sich um den Draht herum eine dünne, schlauchförmige Koro-

na-Entladung aus. Sie nimmt den überschießenden Teil der Spannungserhöhung aufnimmt und begrenzt somit die erzielbare Kraft.

[0077] Eine Ausweitung dieser Grenze ist möglich, indem das den Draht umgebende Medium modifiziert wird. Eine einfache Möglichkeit besteht darin, die Drahtverlegung im Vakuum vorzunehmen. Dann entfällt das Problem der Koronaentladung vollständig. Alternativ kann die Drahtverlegung in einem Raum erfolgen, der mit einem Gas hoher elektrischer Durchschlagsfestigkeit und hohem Druck gefüllt ist. Dies erhöht die Spannung, bei der Korona-Entladung einsetzt. Aus der Hochspannungstechnik ist bekannt, dass Kohlendioxid CO_2 sowie mit Schwefelhexafluorid SF_6 versetzter Stickstoff N_2 hierfür besonders geeignete Gase sind. Beide haben eine höhere Durchschlagsfestigkeit als Luft, und bei beiden steigt die Durchschlagsfestigkeit monoton mit dem Druck an. Mit ihnen lässt sich die nutzbare Spannung um einen Faktor ca. 10–30 gegenüber atmosphärischer Luft erhöhen, wenn ein Gasdruck bis zu 10 bar verwendet wird. Da die elektrostatische Kraft mit dem Quadrat der Spannung wächst, kann die nutzbare Kraft auf diese Weise um einen Faktor ca. 100–1000 erhöht werden. Als weitere Alternative kann eine isolierende Flüssigkeit als Umgebungsmedium gewählt werden. Die in der Hochspannungstechnik verwendeten Isolieröle mit Durchschlagsfestigkeiten von 20 kV/mm und mehr erlauben ähnliche Spannungserhöhungen gegenüber Luft wie die erwähnten Isolier-Gase unter Druck.

[0078] Wie vorausgehend schon erläutert, ist es für die maschinelle Drahtverlegung mit praktisch interessanten Verlegegeschwindigkeiten vorteilhaft, nur einen kleinen, scharf lokalisierten Bereich der Substratoberfläche mit einem Laserstrahl zu heizen. Voraussetzung dafür ist eine hinreichend starke Absorption der Laserstrahlung durch das Substratmaterial. Da dessen Absorptionskoeffizient $\alpha(\lambda)$ allgemein von der benutzten Laser-Wellenlänge λ abhängt, stellt sich bei vorgegebenem Substratmaterial das Problem, eine passende Wellenlänge und dazu einen Laser mit hinreichend hoher Leistung zu finden. Dies ist nicht in jedem Falle möglich oder wirtschaftlich.

[0079] Andererseits ist es auf einfache Weise möglich, das Absorptionsvermögen des Substrates zu erhöhen, so dass die Strahlung eines vorgegebenen Lasers hinreichend stark absorbiert wird. Dies impliziert eine Färbung des Substrates, entweder im Ganzen oder nur oberflächlich auf der dem Draht zugewandten Seite, oder eine Beschichtung dieser Substratseite mit einem stark absorbierenden Material. Dabei ist der Begriff der Färbung hier verallgemeinert zu verstehen, denn der Farbstoff muss nur bei der verwendeten Laserwellenlänge absorbieren. Bei allen anderen Wellenlängen spielt sein Absorptionsvermögen keine Rolle. Wenn die verwendete Laserwellen-

länge jenseits des Sichtbaren im Ultraviolett oder Infraroten liegt, wie beispielsweise bei typischen Diodenlasern ($\lambda = 808 \text{ nm}$) oder beim YAG-Laser ($\lambda = 1064 \text{ nm}$), so können also Farbstoffe eingesetzt werden, die im sichtbaren Spektralbereich nur eine praktisch vernachlässigbar geringe Absorption besitzen, so dass der Farbstoffzusatz die vom Auge wahrgenommene Farbe des Substratmaterials nicht verändert.

[0080] Diese Methode der oberflächlichen Absorptionserhöhung ist in der Technik des so genannten Durchstrahlschweißens von Polymeren bekannt, und hierzu geeignete Farbstoffe sind kommerziell verfügbar. Aus den deutschen Patentanmeldungen DE 44 15 802 A1 und DE 102 52 007 A1 sind für eine Verwendung in thermoplastischen Kunststoffen geeignete, absorptionserhöhende, mit Zinndioxid beschichtete Pigmente mit sehr geringer vom Auge wahrnehmbarer Farbwirkung bekannt. Die Patentschrift US 7,201,963 behandelt absorptionserhöhende Beschichtungen von Thermoplasten und die Auswahl geeigneter Farbstoffe.

[0081] Kommt es nicht darauf an, eine Färbung zu vermeiden, so ist eine Schwarzfärbung des Substratmaterials, etwa durch Zumischung von Ruß, die einfachste Möglichkeit der Absorptionserhöhung. Beispielsweise verringert eine Russzumischung von 0,1% die Eindringtiefe von Laserstrahlung auf 0,1 mm. [vgl. Dirk Hänsch, "Die optischen Eigenschaften von Polymeren und ihre Bedeutung für das Durchstrahlschweißen mit Diodenlaser", Shaker Verlag 2001, ISBN 3826590538]. Dies kommt dem geforderten Absorptionskoeffizienten $\alpha = 10^3 \text{ cm}^{-1}$ nahe.

[0082] Zur lokalen Aufheizung des Substrates bis auf die Schmelztemperatur des Verbindungsmaterials ist auch die von Mikrowellenöfen her bekannte Hochfrequenzheizung geeignet. Sie ist zur Drahtverlegung auf nichtmetallischen Substratmaterialien einsetzbar, die eine gewisse, nicht zu niedrige Hochfrequenzabsorption besitzen, wie etwa Polymere mit sauerstoffhaltigen Molekülgruppen. Hierfür wird dicht über oder neben dem Draht an der Position der Wärmequelle **30** eine Elektrode angeordnet, an die eine hochfrequente Hochspannung, beispielsweise von 2,4 GHz, angelegt wird. Das elektrische Feld dieser Spannung durchdringt das Substratmaterial und heizt es auf. Das geheizte Substratvolumen ist umso kleiner, je dichter sich die Elektrode an der Substratoberfläche **4** befindet.

[0083] Bei dem insoweit beschriebenen Verfahren zum maschinellen Drahtverlegen werden im Wesentlichen (abgesehen von der Variante gemäß **Fig. 8**) eine einzelne ausgedehnte Gegenelektrode **29** unter dem Substrat benutzt. Infolgedessen ist die elektrostatische Anziehungskraft f_E , die von dieser Elektrode ausgehend auf den Draht wirkt, überall senkrecht zur

Oberfläche des Substrates gerichtet. Dies ist in **Fig. 10a** illustriert. Wird die Gegenelektrode **29** jedoch in ihrer seitlichen Ausdehnung begrenzt und einfach oder mehrfach seitlich zum Draht angeordnet wie in den **Fig. 10(b)** und **10(c)** dargestellt, so erhält die durch den Pfeil **55** repräsentierte Anziehungskraft eine seitliche Komponente, die bei der Drahtverlegung zur lateralen Steuerung des Verlegepfades, insbesondere zur Verlegung entlang gekrümmter Verlegepfade vorteilhaft ausgenutzt werden kann.

[0084] Diese Möglichkeit, durch Strukturierung der Gegenelektrode Seitenkräfte zu erzeugen, wird unter Bezugnahme auf ein in den **Fig. 10(a)** bis **10(f)** eingezeichnetes Koordinatensystem näher erläutert. Hier ist jeweils eine Drahtverlegeeinrichtung im Querschnitt dargestellt, an einer Stelle im Bereich **35**, wo der Draht **1** die Substratoberfläche **4** gerade noch nicht berührt. In allen in den **Fig. 10(a)** bis **10(e)** dargestellten Fällen ist der zu verlegende Draht **1** an den Pol **19** der Spannungsquelle **32** angeschlossen, und es wird zunächst unterstellt, dass die Ausdehnung der Elektroden in X-Richtung, senkrecht zur Zeichenebene, wesentlich größer ist als die in Z-Richtung gemessene Substratdicke.

[0085] Die **Fig. 10(b)** zeigt die Situation über der Kante der Gegenelektrode **29**, die gegenüber dem Draht in positiver Y-Richtung ein Stück verschoben ist. Die Anziehungskraft **55**, die vom Draht zur Gegenelektrode **29** hin gerichtet ist, erhält durch diese Verschiebung eine positive Y-Komponente und wirkt daher nicht nur nach unten, sondern auch seitlich. Gemäß **Fig. 10(c)** ist zusätzlich eine Hilfselektrode **51** vorgesehen, deren Kante gegenüber dem Draht etwas in negativer Y-Richtung verschoben ist. Sie ist mit demselben Pol **19** der Spannungsquelle verbunden wie der Draht. An dieser Kante der Hilfselektrode **51** sammelt sich daher gleichnamige Ladung an wie auf dem Draht und wirkt damit abstoßend auf den Draht. Die von der Gegenelektrode **29** und der Hilfselektrode **51** auf den Draht ausgeübten Kräfte resultieren in einer Gesamtkraft **55** in positiver Y-Richtung. Bei Vertauschung der Anschlüsse der Elektroden **29** und **51**, mittels eines Umschalters erhält man eine Gesamtkraft in negativer Y-Richtung. Mit diesen Elektroden kann der Draht daher nach der einen oder anderen Seite abgelenkt werden und so der Verlegepfad beeinflusst werden. Letzterer hängt im Übrigen von der Größe und Richtung der verwendeten Verlegezugkraft F_z sowie von der Biegesteifigkeit des Drahtes ab.

[0086] Besonders vorteilhaft für die Drahtverlegung entlang einem fest vorgegebenem Pfad ist die Anordnung gemäß **Fig. 10(d)** mit einer einzelnen schmalen, streifenförmigen Gegenelektrode **52**, die dem Verlegepfad folgt. Sie wirkt jedenfalls anziehend auf den Draht **1** und ermöglicht dessen Verlegung. Die Kraft **55** ist einfach nach unten gerichtet, wenn sich

der Draht genau über der Mitte der Gegenelektrode **52** befindet. Weicht die Drahtposition jedoch in positiver oder negativer Y-Richtung von dieser Mittellage ab, z. B. weil der Draht verbogen ist oder weil der Verlegepfad in der XY-Ebene gekrümmt verläuft, so tritt eine seitliche Kraftkomponente auf, die den Draht in die Mittellage zu ziehen sucht. Sie bewirkt (innerhalb gewisser Grenzen), dass der Draht bei seiner Verlegung dem durch die Gegenelektrode **52** vorgegebenen Pfad folgt. Die erwähnte, stets zur Mittellage rücktreibende Y-Kraftkomponente kann dadurch vergrößert werden, dass auf beiden Seiten der Gegenelektrode **52** streifenförmige Hilfselektroden **51** bzw. **53** angeordnet werden, die auf dem Potential des Drahtes **1** liegen. Jede von ihnen erzeugt dann eine abstoßende Y-Kraftkomponente, falls der Draht **1** sich ihr nähert und bewirkt damit eine bessere Zentrierung des Drahtes über der Gegenelektrode **52**. Ein vergleichbarer Zentrierungseffekt kann gemäß **Fig. 10(e)** erreicht werden durch zwei Hilfselektroden **54** und **56**, die auf der Substratoberfläche **4** zu beiden Seiten des Verlegepfades angeordnet werden. Sie sind mit demselben Pol **19** der Spannungsquelle **32** verbunden wie der Draht **1**. Daher besteht zwischen ihnen und dem Draht keine Anziehungskraft, sondern eine schwache, vom Abstand und der Umgebung abhängige Abstoßungskraft. Die Gegenelektrode **29** hat in diesem Ausführungsbeispiel die durchgehende Form wie in **Fig. 10(a)**. Aus Symmetriegründen hat die von den Hilfselektroden **54** und **56** zusammen auf den Draht ausgeübte Kraft keine Y-Komponente, wenn sich der Draht mittig über der Lücke zwischen **54** und **56** befindet. In diesem Falle wirkt nur eine nach unten gerichtete Gesamtkraft, die zur Gegenelektrode **29** gerichtet ist. Weicht der Draht **1** jedoch seitlich von der Mittellage ab und nähert sich einer der Hilfselektroden, so übt diese eine abstoßende, jeweils zur Mittellage zurücktreibende Kraft aus.

[0087] Nach diesem Prinzip der Kombination anziehender und abstoßender Kraftkomponenten funktioniert auch die Drahtverlegung gemäß **Fig. 10(f)**. Hier wird der Draht **1** auf dem Substrat in der Form einer flachen Spule mit mehreren Windungen verlegt. Dabei besteht typisch die Forderung, die einzelnen Windungen der Spule formschlüssig, möglichst dicht nebeneinander, zu verlegen, wie gemäß **Fig. 10(f)** die im Querschnitt dargestellten Drähte **58** verlegt sind, und der Draht **1** soll unmittelbar anschließend als nächste Windung verlegt werden. Dies wird dadurch erreicht, dass die Kante der Gegenelektrode **29** unterhalb der letzten verlegten Windungen positioniert wird, beispielsweise mittels einer dafür vorgesehenen Verschiebeeinrichtung. Die anziehende Kraft **55** zwischen dieser Kante und dem Draht **1** hat dann gemäß **Fig. 10(b)** eine positive Y-Kraftkomponente, die die neue Windung seitlich gegen die bereits verlegten Windungen **58** drückt. Da letztere jeweils Abschnitte des Drahtes **1** darstellen, haben sie alle dasselbe elektrische Potential wie der Draht **1**. In **Fig. 10(f)** ist

dies durch die gestrichelt eingezeichneten Verbindungen **59** angedeutet. Daher wirken diese Windungen **58** schwach abstoßend auf den Draht **1** ähnlich wie die Hilfselektrode **56** gemäß **Fig. 10(e)** und können dessen formschlüssige Verlegung behindern. Dieses Problem wird dadurch gelöst, dass eine streifenförmige Hilfselektrode **54** auf der Substratoberfläche angeordnet wird, auf der den Spulenwindungen **58** gegenüberliegenden Seite des Drahtes **1**. Diese Hilfselektrode **54** wird mit dem Draht **1** elektrisch verbunden und wirkt deshalb ebenfalls abstoßend auf den Draht. Sie kompensiert somit die abstoßende Wirkung der Windungen **58** und ermöglicht es, dass die Gesamtkraft **55** in Richtung der Kante der Gegenelektrode **52** wirkt und tatsächlich zur formschlüssigen Verlegung führt.

[0088] Die verschiedenen elektrischen Verbindungen der Elektroden in den **Fig. 10(a)** bis **10(f)** mit den Polen **18** und **19** der Spannungsquelle erlauben insoweit eine grobe Steuerung der Krafttrichtung. Für den Fachmann ergibt sich zwanglos, dass jeweils auch eine Feinsteuerung von Richtung und Größe der Kraft möglich ist, indem einzelne Elektroden an Teilspannungen der Spannungsquelle **32** angeschlossen werden. Des weiteren erkennt der Fachmann anhand der genannten Darstellungen unmittelbar, dass eine feinere Strukturierung der Gegenelektrode **29** und der Hilfselektrode **54** entlang der X- und Y-Richtungen noch weitere umfassende Gestaltungsmöglichkeiten für die Beeinflussung der Kraft **55** bietet. Durch Aufteilung der Gegenelektrode **29** in eine 2-dimensionale Anordnung vieler kleiner Teilelektroden und Anlegen geeigneter Teilspannungen lassen sich sehr allgemeine, auch zeitlich variierbare Potential- und Kraftverteilungen $f(X, Y, t)$ als Funktion des Ortes (X, Y) und der Zeit (t) über der Substratoberfläche **4** erzeugen. Beim Verlegen folgt der Draht der jeweiligen Verteilung, soweit es seine Biegesteifigkeit sowie die Richtung und Größe der Verlegezugkraft F_z erlauben. Der Draht passt sich dem Verlauf des elektrisch erzeugten Potentialgebirges an, analog zu einem Wasserlauf, der in einer vorgegebenen Topographie dem Weg folgt, der einer Minimierung der potentiellen Energie ergibt.

[0089] Bei Verwendung einer ausgedehnten Gegenelektrode unter dem Substrat herrscht nahezu überall an der Substratoberfläche eine gleichmäßig hohe elektrische Feldstärke, wobei die Richtung des Feldes senkrecht auf der Oberfläche steht. Nur in unmittelbarer Nähe des Drahtes ist das Feld verzerrt, wie der **Fig. 6** entnehmbar ist. Bei direkter Anwendung der elektrostatischen Drahtverlegung zur Verbindung elektronischer Bauteile, die sich auf dem Substrat befinden, wären diese dem beschriebenen Feld zwischen Draht und Gegenelektrode ausgesetzt. Bei sehr empfindlichen Bauteilen kann dies problematisch sein, zumal es sich bei dem zur Kraftentfaltung erzeugten Feld um ein elektrisches Wechselfeld han-

delt. Je nach Größe, Orientierung und Leitfähigkeit eines Bauteiles können die darin auftretenden Einflussspannungen Werte erreichen, die mit der Gefahr eines Durchschlags oder gar der Zerstörung des Bauteiles verbunden sind.

[0090] Diese Gefahr kann dadurch vermieden werden, dass das Bauteil während der Drahtverlegung gegen das elektrische Feld abgeschirmt wird. Dies ist in bekannter Weise möglich, indem das Bauteil in einem Faraday-Käfig eingeschlossen wird. Dazu wird eine gut leitende Abschirmhaube **61** passender Größe über das gefährdete Bauteil **60** gestülpt und elektrisch mit der Gegenelektrode **29** verbunden. Zusammen mit der Gegenelektrode **29** bildet die Haube **61** dann einen Faraday-Käfig, der allerdings am Rand durch einen flachen Spalt **63** unterbrochen ist. Durch Wahl hinreichender Breite dieses Randes kann die Rest-Feldstärke, die durch den Rand noch in das Innere des Käfigs hineinwirkt, klein gehalten werden (**Fig. 11(a)**).

[0091] Beim Ausführungsbeispiel gemäß **Fig. 11(b)** liegt ein ähnlicher Faraday-Käfig vor, der von der Haube **61** und der Hilfselektrode **61/u** gebildet ist, die an der Unterseite des Substrats angeordnet und an das Potential des Drahtes **1** angeschlossen ist.

[0092] Anstelle einer Anwendung von Heißklebe-, Löt- oder Schweißverfahren sind zur maschinellen Drahtverlegung mittels elektrostatischer Niederhaltung auch andere, wärmearme Fügeverfahren geeignet, die auf der Verwendung eines schon bei Umgebungstemperatur mehr oder weniger flüssigen oder pastösen Klebstoffs beruhen. Bei solchen Verfahren wird der Klebstoff zunächst auf mindestens einen der Fügepartner, d. h. auf den Draht oder auf das Substrat, oder auf beide aufgebracht. Beim nachfolgenden Drahtverlegeprozess kommt es dann darauf an, dass der Draht mit geeigneter Andruckkraft an die Oberfläche des Substrats angedrückt wird. Ohne solche Niederhaltung wäre infolge allgemein vorhandener Krümmungen des Drahtes und/oder Substratoberfläche der Kontakt der Fügepartner nur punktwise gegeben. Erst bei formschlüssigem, linienhaftem Kontakt kann der Klebstoff fließen und beide Fügepartner gemeinsam benetzen, also die stoffschlüssige Verbindung herstellen. Die Größe der Andruckkraft bestimmt die Genauigkeit des Formschlusses und, zusammen mit der Viskosität des Klebstoffes, die erzielbare Haftung des Drahtes.

[0093] Düninflüssiger Klebstoff fließt rasch und ist deshalb in der Lage, kleine Lücken im Formschluss auszufüllen, wie sie bei mäßig hoher Andruckkraft bleiben. Düninflüssiger Klebstoff bietet allerdings nur geringe Haftung. Ausreichende Haftung wird erst durch eine nachfolgende Erhöhung der Viskosität erreicht, also durch Härtung des Klebstoffes. Sie wird bei Heißklebern, Löt- und Schweißverfahren durch

Abkühlung bewirkt, bei wärmearmen Klebstoffen durch chemische Reaktion, ausgelöst durch die Einwirkung energiereicher Strahlung oder chemischer Stoffe. Beispiel für solche dünnflüssigen Klebstoffe mit Strahlungshärtung sind die in der Leiterplattenherstellung vielfach verwendeten licht- oder UV-härtenden Acrylat-Klebstoffe; ein Beispiel für chemische Härtung die mit Feuchtigkeit reagierenden Cyanaacrylat-Klebstoffe.

[0094] Bei hochviskosen Klebstoffen kann die Härtung entfallen, sofern genügend hohe Andruckkraft verwendet wird. Weil diese Klebstoffe kaum fließen, ist ein genauere Formschluss, also eine höhere Andruckkraft notwendig als bei niedrigviskosen Klebstoffen. Als Beispiel mögen die von Klebebändern und Klebe-Etiketten her bekannten hochviskosen Haftkleber dienen.

[0095] Bei der Drahtverlegung mit wärmearmen Klebstoffen wird nach dem Stand der Technik die notwendige formschlüssige Niederhaltung durch Andrücken des Drahtes mit Stempeln oder ähnlichen Werkzeugen an das Substrat erreicht. In der Beschreibung DE 10 2005 002 370 A1 der Drahtschreibetechnik wird nur allgemein eine stoffschlüssige Verbindung gefordert, als Beispiel wird angegeben, dass der Draht auf das Substrat abgesenkt und mittels UV-härtender Kleberpunkte angeheftet wird. In der Patentschrift US 4,850,807 wird die Verwendung eines mikroverkapselten Klebers beschrieben, der bei hinreichendem Druck freigesetzt wird und die Verklebung bewirkt. Auch hierfür ist natürlich ein Andruckwerkzeug notwendig. Dabei bestehen die schon erwähnten Gefahren der Drahtverformung und -Beschädigung, der Werkzeugverschmutzung und des Anhaftens des Drahtes am Stempel statt am Substrat.

[0096] Es folgt somit als Erweiterung der Aufgabenstellung, auch für die Drahtverlegung mit flüssigem oder pastösem Klebstoff die notwendige Andruckkraft des Drahtes an die Substratoberfläche berührungsfrei entlang einem gewissen Abschnitt des Drahtes zu erzeugen und sie gegebenenfalls für eine physikalische oder chemische Härtung eine zeitlang aufrecht zu erhalten, was, dem Erfindungsgedanken entsprechend, durch elektrostatische Erzeugung der Andruckkraft geschieht.

[0097] Zweckmäßig ist in jedem Fall eine Vorbehandlung des Substrats im Sinne eines Versetzen in einen haftungsfreundlichen, die Benetzung fördernden, verlässlich reproduzierbaren Zustand, z. B. durch Abwischen, Abbürsten, Abwaschen, Reinigen, Begasen, Besprühen, Bestrahlen, Ionisierung, und dergleichen, da hier für die Drahtverlegung in industriellem Maßstab eine hohe Zuverlässigkeit des Verlegeprozesses unabdingbar ist. Die Verlegung muss unabhängig vom Wetter (Luftfeuchtigkeit, Temperatur) funktionieren und die Haftung des verlegten

Drahtes darf nicht von Vorbehandlungen des Substratmaterials (Lagerung, Verpackung, Berührung, etc.) abhängen, welche die Adhäsionseigenschaften der Oberfläche verändern können. Beispielsweise ist eine oberflächliche Ätzung mit einem ($O_2 + CF_4$)-Plasma, beschrieben in US 5,283,119, eine geeignete Methode, eine gute Haftung an polymeren Kunststoffen unabhängig von der Vorgeschichte sicherzustellen.

[0098] Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das beschriebene Verfahren besonders vorteilhaft einsetzbar ist bei der Verlegung und/oder Verklebung dünnster, nahezu unsichtbarer Metalldrähte auf großen durchsichtigen Substraten. Es erlaubt eine einfache, sichere Handhabung der Drähte beim Verlegen und bietet ihre sichere Fixierung bis zum Ende des Fixierungsprozesses. Es ergänzt gerade im Bereich kleinster Drahtdurchmesser die herkömmlichen Drahtverlegeverfahren, die hier ihre größten Schwierigkeiten aufweisen. Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich insbesondere auch zur Herstellung von Transpondern für den Einsatz in Sicherheitsdokumenten wie Pässe oder Chipkarten oder dergleichen.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- DE 2326861 [0002]
- DE 3247344 [0002]
- DE 2610283 [0002]
- US 3674602 [0002]
- US 4648180 [0002]
- US 4864723 [0002, 0007]
- US 7000314 [0003]
- DE 19618917 [0003]
- EP 1004226 [0003]
- DE 4410732 [0003]
- DE 10247553 [0003]
- US 4918260 [0004]
- US 6400882 [0008]
- DE 4415802 A1 [0080]
- DE 10252007 A1 [0080]
- US 7201963 [0080]
- DE 102005002370 A1 [0095]
- US 4850807 [0095]
- US 5283119 [0097]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Dirk Hänsch, "Die optischen Eigenschaften von Polymeren und ihre Bedeutung für das Durchstrahlschweißen mit Diodenlaser", Shaker Verlag 2001 [0081]
- ISBN 3826590538 [0081]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Verlegen von dünnem Draht (1) auf der Oberfläche (4) eines Substrats mittels eines rechnergesteuerten Verlegekopfes (20), der relativ zum Substrat bewegbar ist und der den Draht dicht über der Oberfläche und nahezu parallel zu derselben mit definierter Zugkraft abspult, wobei die Verbindung von Draht und Oberfläche mittels der Oberflächenspannung eines durch Wärmezufuhr schmelzenden Verbindungsmaterials bewirkt wird, welches Draht (1) und Substratoberfläche (4) benetzt, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Draht (1) bis zur Aushärtung des Verbindungsmaterials mittels elektrostatischer Andruckkraft auf dem Substrat fixiert wird.

2. Fügeverfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das schmelzende Verbindungsmaterial ein Heißkleber ist, oder ein Lot oder das Substratmaterial selbst, oder das Drahtmaterial selbst das schmelzende Verbindungsmaterial ist.

3. Fügeverfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet,
 – dass der Draht (1) elektrisch leitend ist, und
 – dass das Substrat elektrisch isolierend ist, und
 – dass die elektrostatische Andruckkraft erzeugt wird, indem der leitende Draht (1) und eine unter dem Substrat angeordnete Elektrode (29; 29, 51) an die Pole (18, 19) einer elektrischen Spannungsquelle (32) angeschlossen werden, oder
 – indem der leitende Draht (1) an den einen Pol (19) einer elektrischen Spannungsquelle (32) angeschlossen wird, und zwei symmetrisch neben dem Draht (1) angeordnete Elektroden (37, 38) gemeinsam an deren anderen Pol (18).

4. Fügeverfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei der Draht elektrisch leitend ist, dadurch gekennzeichnet,
 – dass das Substrat eine elektrisch leitende Oberflächenschicht hat, und
 – dass die elektrostatische Andruckkraft erzeugt wird, indem der leitende Draht (1) an den einen Pol der Spannungsquelle (32) angeschlossen wird und die leitende Oberflächenschicht an den anderen Pol (18).

5. Fügeverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die elektrostatische Andruckkraft erst eingeschaltet wird wenn der Draht über der vorgesehenen Fügestelle positioniert worden ist.

6. Fügeverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Andruckkraft von der Spannung einer Gleichspannungsquelle oder von der Spannung einer Wechselspannungsquelle hervorgerufen wird.

7. Fügeverfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet,
 – dass das Substrat elektrisch isolierend ist, und
 – dass die elektrostatische Andruckkraft von mindestens einem Paar von Elektroden (56a, 56b) erzeugt wird, die an der Verlegestelle unter dem Substrat nebeneinander angeordnet und an die Pole (18, 19) der Spannungsquelle angeschlossen werden (Fig. 8), oder von mindestens einem Tripel von Elektroden (51, 52, 53) erzeugt wird, die an der Verlegestelle unter dem Substrat nebeneinander angeordnet und von einer Wechselspannungsquelle mit drei gleichgroßen, sinusförmigen, und um 120° gegeneinander phasenverschobenen Ausgangsspannungen gespeist werden (Fig. 10a).

8. Fügeverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Innenwiderstand der Spannungsquelle so hoch gewählt wird, dass ihr Kurzschlussstrom kleiner als 30 mA ist.

9. Fügeverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei anliegender Spannung die Substratoberfläche in einem Bereich, wo der Draht aufliegt, mindestens bis zur Schmelztemperatur des Verbindungsmaterials erwärmt wird.

10. Fügeverfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Erwärmung der Substratoberfläche durch ein Heißluftgebläse erfolgt, oder durch Wärmestrahlung, die vom Substrat in einem oberflächennahen Bereich absorbiert wird, oder durch Laserstrahlung, die vom Substrat in einem oberflächennahen Bereich absorbiert wird.

11. Vorrichtung zum Verlegen von dünnem Draht auf der Oberfläche eines Substrats mittels eines rechnergesteuerten Verlegekopfes (20), der relativ zum Substrat bewegbar ist und der den Draht (1) dicht über der Oberfläche und nahezu parallel zu derselben mit definierter Zugkraft abspult, wobei die Verbindung von Draht und Oberfläche mittels der Oberflächenspannung eines durch Wärmezufuhr schmelzenden Verbindungsmaterials bewirkt wird, welches Draht und Substratoberfläche benetzt, gekennzeichnet durch mindestens eine elektrische Spannungsquelle (32) und mindestens eine daran angeschlossene und in der Nähe des Drahtes angeordnete Elektrode, mittels derer der Draht (1) bis zur Aushärtung des Verbindungsmaterials durch elektrostatische Andruckkraft auf dem Substrat fixiert werden kann.

12. Drahtverlegevorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass das schmelzende Verbindungsmaterial ein Heißkleber (17, 21) oder ein Lot ist, oder das Substratmaterial selbst ist, oder dass das Drahtmaterial selbst das schmelzende Verbindungsmaterial ist.

13. Drahtverlegevorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet,
 – dass der Draht (1) elektrisch leitend ist, das Substrat elektrisch isolierend ist, und
 – dass die Elektrode (29) unter dem Substrat angeordnet, und Draht (1) und Elektrode (29) an die beiden Pole (18, 19) der Spannungsquelle angeschlossen sind, oder
 – dass zwei Elektroden (54, 56) symmetrisch neben dem Draht auf der Substratoberfläche (4) angeordnet sind, und
 – der Draht an den einen Pol der Spannungsquelle angeschlossen ist und die beiden Elektroden gemeinsam an den anderen Pol angeschlossen sind, oder
 – dass das Substrat eine elektrisch leitende Oberflächenschicht hat, und
 – der Draht an den einen Pol der Spannungsquelle angeschlossen ist und die leitende Oberflächenschicht an den anderen.

14. Drahtverlegevorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Spannungsquelle (32) eine Gleichspannungsquelle oder eine Wechsellspannungsquelle ist, und dass mindestens zwei Elektroden (29, 51, 52, 53, 54, 56) vorgesehen sind, die an der Verlegestelle unter oder auf dem Substrat so angeordnet sind, dass ihre Kanten im Wesentlichen parallel zum Draht (1) verlaufen und die Elektroden an die Pole (18, 19) der Spannungsquelle (32) angeschlossen sind.

15. Drahtverlegevorrichtung nach einem der Ansprüche 11 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass der Kurzschlussstrom der Spannungsquelle kleiner als 30 mA ist.

16. Drahtverlegevorrichtung nach einem der Ansprüche 11 bis 15, gekennzeichnet durch eine Heizvorrichtung, welche bei anliegender Spannung die Substratoberfläche in einem Bereich, wo der Draht aufliegt, mindestens bis zur Schmelztemperatur des Verbindungsmaterials erwärmt.

17. Drahtverlegevorrichtung nach Anspruch 16, gekennzeichnet durch ein Heißluftgebläse, das die Substratoberfläche erwärmt, oder durch eine Wärmestrahlungsquelle, deren Strahlung in einem oberflächennahen Bereich der Substratoberfläche absorbiert wird und dadurch die Substratoberfläche erwärmt, oder durch eine Laserstrahlungsquelle, deren Strahlung in einem oberflächennahen Bereich der Substratoberfläche absorbiert wird und dadurch die Substratoberfläche erwärmt.

18. Fügeverfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Erwärmung des Substrats durch Absorption von Strahlungsenergie in einem Oberflächenbereich bzw. einem der Oberfläche nahen Bereich des Substrats erfolgt, dadurch ge-

kennzeichnet, dass während der Anlegung des zur Vorfixierung des Drahtes genutzten elektrischen Feldes, das die den Draht an das Substrat andrückende Kraft bewirkt, ein die Durchschlagsfestigkeit der Elektroden-Substrat-Draht-Strecke erhöhendes Vakuum erzeugt wird.

19. Fügeverfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass der Arbeitsbereich, in dem die Fixierung des Drahtes am Substrat erfolgt, während der Zeitspanne, in der die den Draht an das Substrat andrückende, elektrostatische Kraft ausgeübt wird, ein die Durchschlagsfestigkeit der Elektroden-/Substrat-/Draht-Strecke erhöhendes Medium – Gas oder Flüssigkeit – eingesetzt wird.

20. Fügeverfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass das zur Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit verwendete Medium ein Gas, z. B. N₂ oder SF₆ oder eine Mischung der beiden Gase ist, das/die unter einem erhöhten Druck in einem Bereich bis 10 bar gehalten ist, z. B. einem Druck zwischen 5 und 10 bar, oder eine Flüssigkeit ist, die eine geeignet hohe Durchschlagsfestigkeit hat.

21. Fügeverfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Erwärmung des Fixierungsmaterials durch Absorption von Laserstrahlung erfolgt, das als Heizenergiequelle genutzt wird, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erhöhung der Absorption der Laserstrahlung dem Substratmaterial zumindest in einem dem Draht benachbarten, der Oberfläche nahen Bereich entweder durch Zusätze oder eine Beschichtung Farbstoffe oder Pigmente zugefügt werden, die bei der Laserwellenlänge eine hohe Absorption haben.

22. Fügeverfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass die Erwärmung der Substratfläche durch Erzeugung eines Hochfrequenzfeldes erfolgt.

23. Fügeverfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Steuerelektroden (29; 29, 51; 51, 52, 53) vorgesehen sind, mittels derer elektrische Feldkomponenten erzeugbar sind, unter deren Wirkung eine seitliche Kraftwirkung auf den Draht (1) erreichbar ist (Fig. 10(b)).

24. Fügeverfahren nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei Elektroden (29, 51) vorgesehen sind, die mit Teilspannungen der zur Felderzeugung vorgesehenen Spannungsquelle (32) beaufschlagbar sind.

25. Fügeverfahren nach Anspruch 23 oder Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, dass auf beiden Seiten des Substrats mit Teilspannungen der Spannungsquelle ansteuerbare Elektroden verwendet

werden (**Fig. 10(e), 10(f)**).

26. Fügeverfahren nach einem der Ansprüche 23 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine der zur Erzeugung von Feldquerkomponenten vorgesehene Elektrode (**29**) verschiebbar ist, vorzugsweise in einer parallel zur Verlegungsebene des Drahtes (**1**) verlaufenden Ebene.

27. Fügeverfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zum Schutz eines elektronischen Bauteils (**60**), mit dem der Draht (**1**) elektrisch verbindbar sein muss, mindestens eine elektrisch leitende Abschirmhaube (**61**) auf der dem Substrat abgewandten Seite des Bauteils angeordnet wird und elektrisch mit einer auf der dem Bauteil gegenüberliegenden Seite des Substrats angeordneten Gegenelektrode (**29; 61/u**) verbunden ist (**Fig. 11(a), 11(b)**).

28. Fügeverfahren nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass die Abschirmelektroden (**61, 61/u**) des zu schützenden Bauteils (**60**) dieses vollkommen überdecken.

29. Fügeverfahren nach Anspruch 1, wobei das Fixieren des Drahtes am Substrat mit Mitteln erfolgt, die eine stoffschlüssige Verbindung des Drahtes mit dem Substrat vermitteln, gekennzeichnet durch die Verwendung eines bei der Verlegungstemperatur flüssigen oder pastösen Haftklebstoffes, der aufgrund seiner Adhäsion nach vorübergehend elektrostatisch erzeugter Anzugskraft den verlegten Draht dauerhaft festhält.

30. Fügeverfahren nach Anspruch 29, wobei der Haftkleber während der Verlegung fortlaufend kontinuierlich oder an verteilt angeordneten Haftstellen lokal auf die Substratoberfläche appliziert wird.

31. Fügeverfahren nach Anspruch 29 oder Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, dass der Haftkleber während des Verlegungsvorganges in Form einer dünnen Schicht jeweils in demjenigen Bereich (**35**) aufgebracht wird, der dem Anlagebereich unmittelbar vorausgeht, in dem der Draht schon in Kontakt mit dem Klebstoff am Substrat haftet.

32. Fügeverfahren nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, dass die Haft-Klebstoffschicht schon vor der Verlegung des Drahtes großflächig auf die Substratoberfläche appliziert wird.

33. Fügeverfahren nach Anspruch 29, dadurch gekennzeichnet, dass der Haft-Klebstoff während der Verlegung fortlaufend, kontinuierlich oder diskontinuierlich abschnittsweise auf die Drahtoberfläche appliziert wird.

34. Fügeverfahren nach Anspruch 29, gekenn-

zeichnet durch Verwendung eines bei der Verlegungstemperatur flüssigen oder pastösen Reaktionsklebstoffes, der durch Einstrahlung energiereicher Strahlung härtbar ist und Härtung durch Einstrahlung in demjenigen Bereich (**33**), wo der Draht infolge der elektrostatischen Anziehungskraft formschlüssig auf der Substratoberfläche aufliegt.

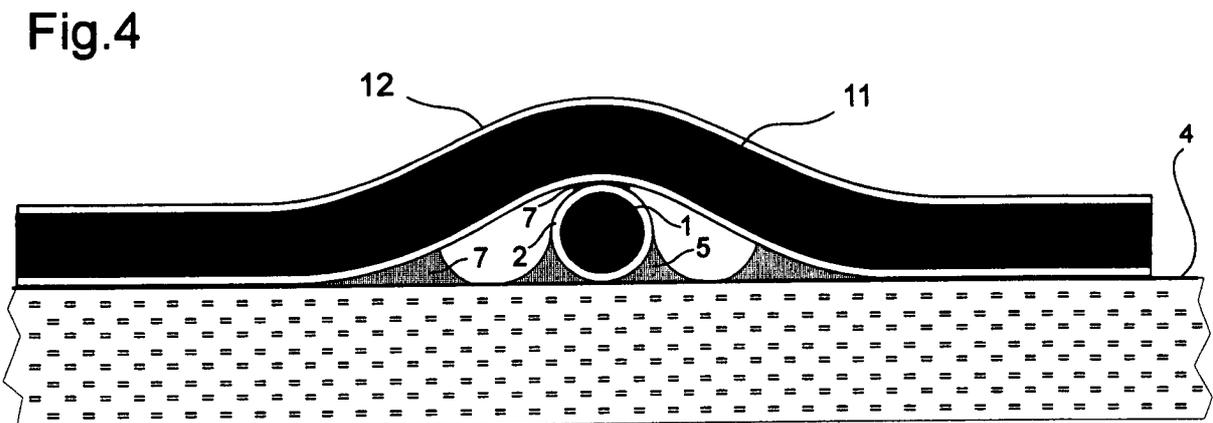
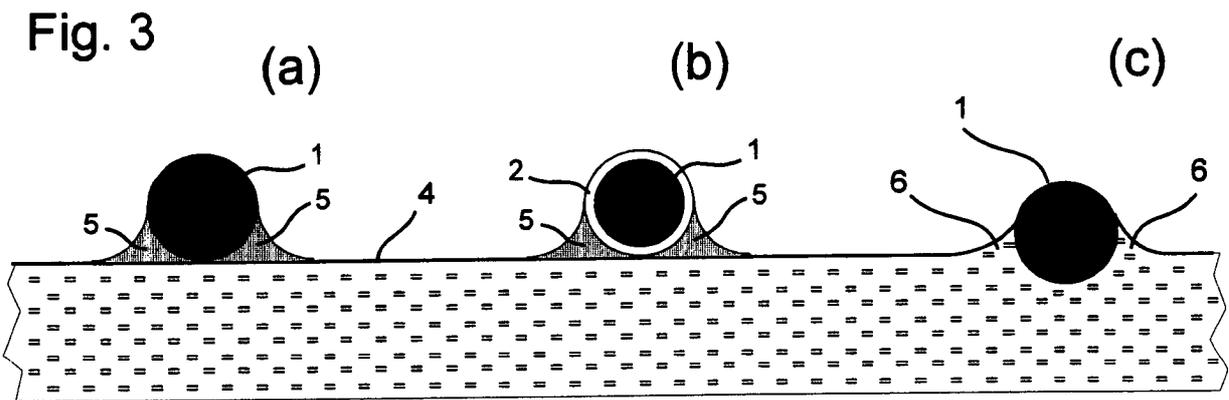
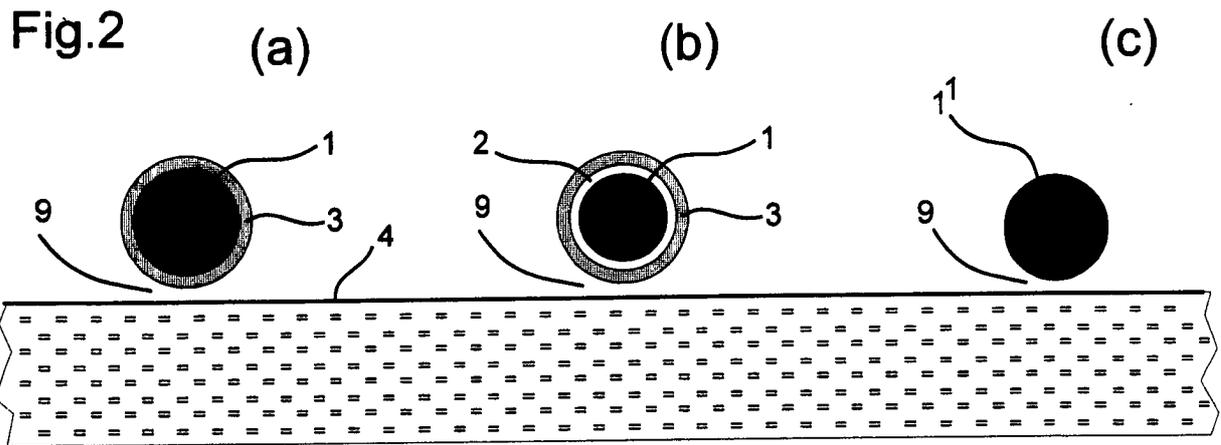
35. Fügeverfahren nach Anspruch 34, gekennzeichnet durch die Verwendung eines Klebstoffs, der durch energiereiche elektromagnetische Strahlung härtbar ist, wobei die energiereiche Strahlung elektromagnetische Strahlung – UV, sichtbares Licht oder Infrarotstrahlung – ist, die zur Härtung des Klebstoffes führt, oder durch eine ionisierend wirkende Strahlung die Härtung des Klebstoffes auslösbar ist.

36. Fügeverfahren nach Anspruch 29, gekennzeichnet durch die Verwendung eines bei der Verlegungstemperatur flüssigen oder pastösen Reaktionsklebstoffes, der durch chemische Einwirkung härtbar ist, die in der Weise erfolgt, dass der Kleber in dem Bereich (**33**), innerhalb dessen der Draht infolge der elektrostatischen Anziehungskraft formschlüssig auf der Substratoberfläche aufliegt, reagiert.

37. Fügeverfahren nach Anspruch 36, dadurch gekennzeichnet, dass die chemische Einwirkung zur Aushärtung des Haftklebstoffes durch Zuführung einer gasförmigen oder flüssigen Härterkomponente erfolgt.

38. Chipkarte für RFID-Anwendungen, mit mindestens einem Transponder, der eine aus Draht geformte Antenne umfasst, gekennzeichnet durch ihre Herstellung unter Anwendung der Verfahrensweisen nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen



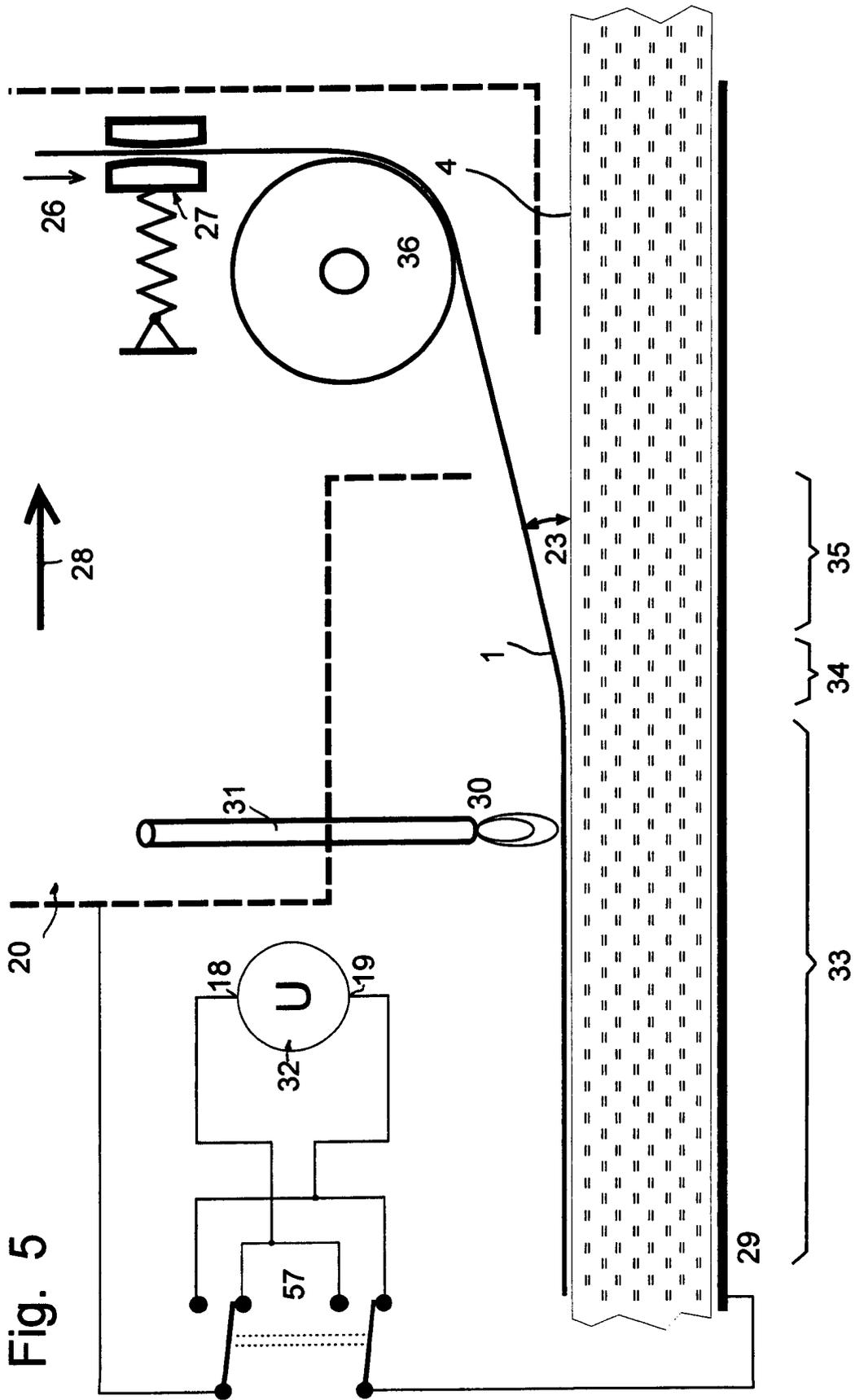


Fig. 5

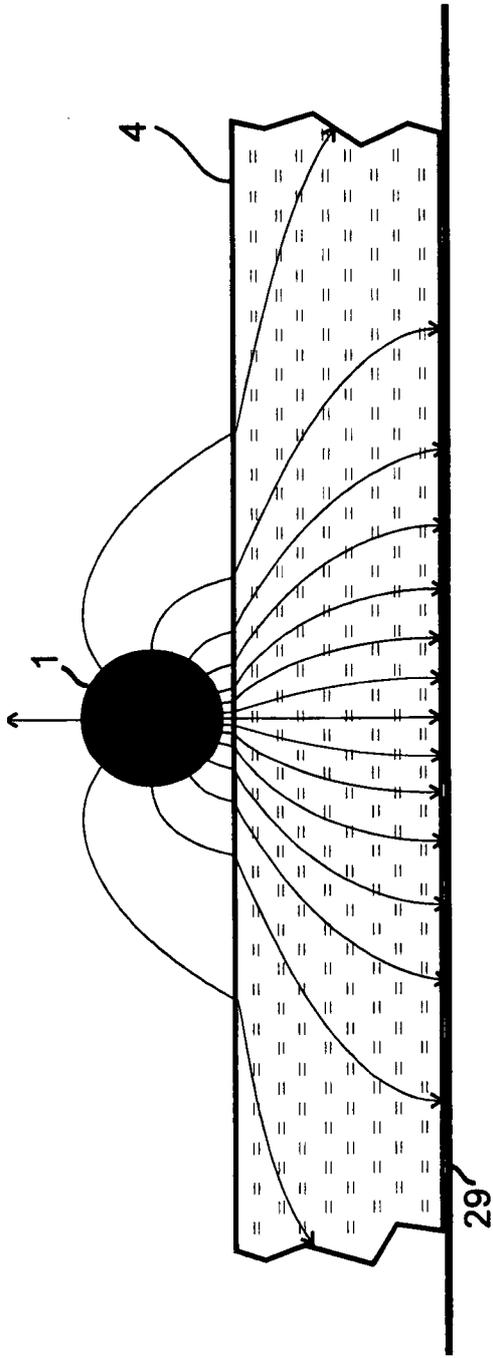


Fig. 6

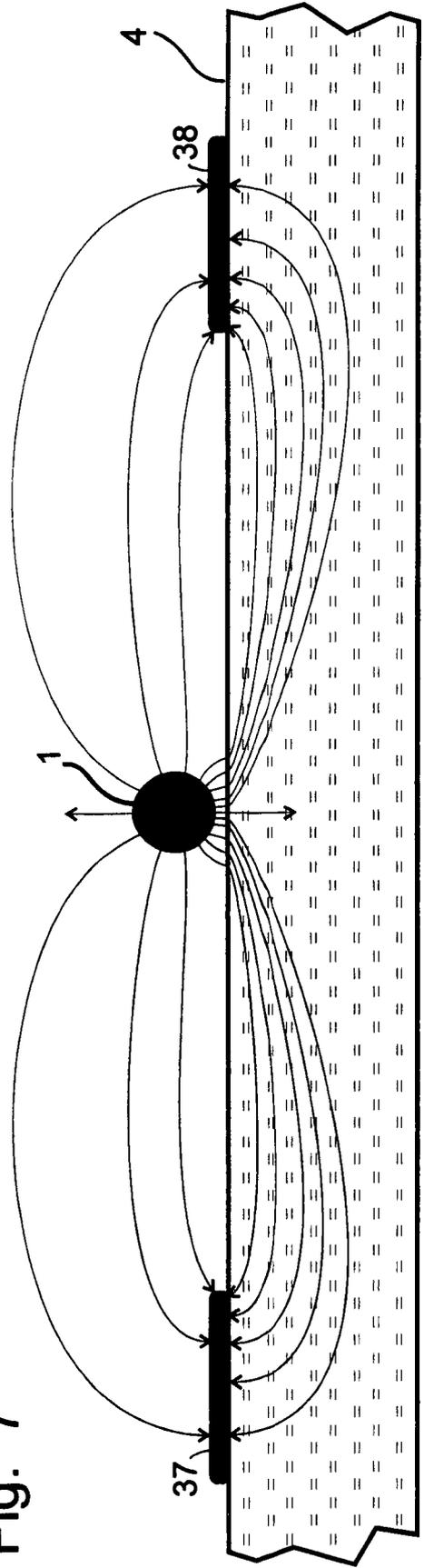


Fig. 7

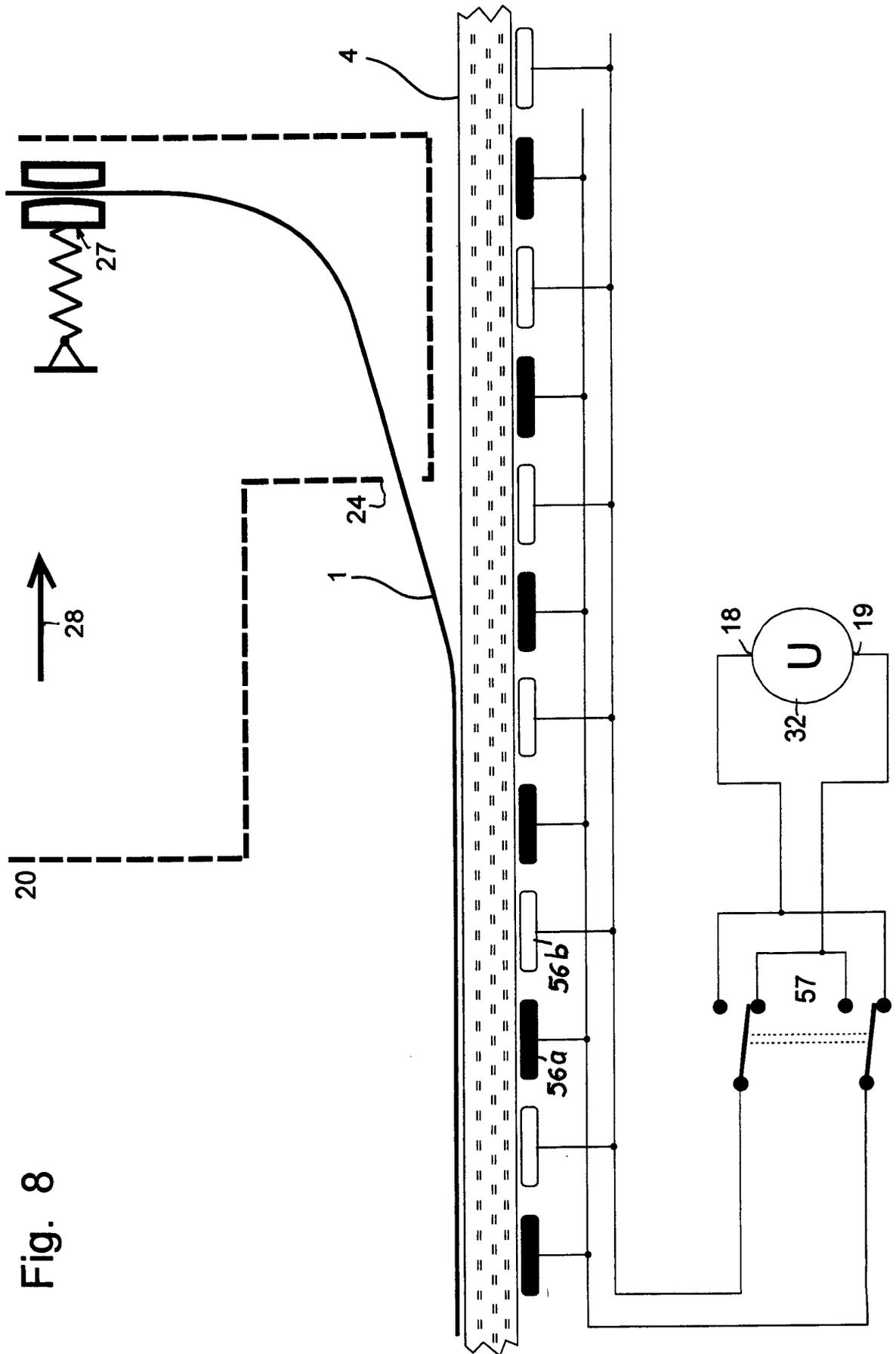


Fig. 8

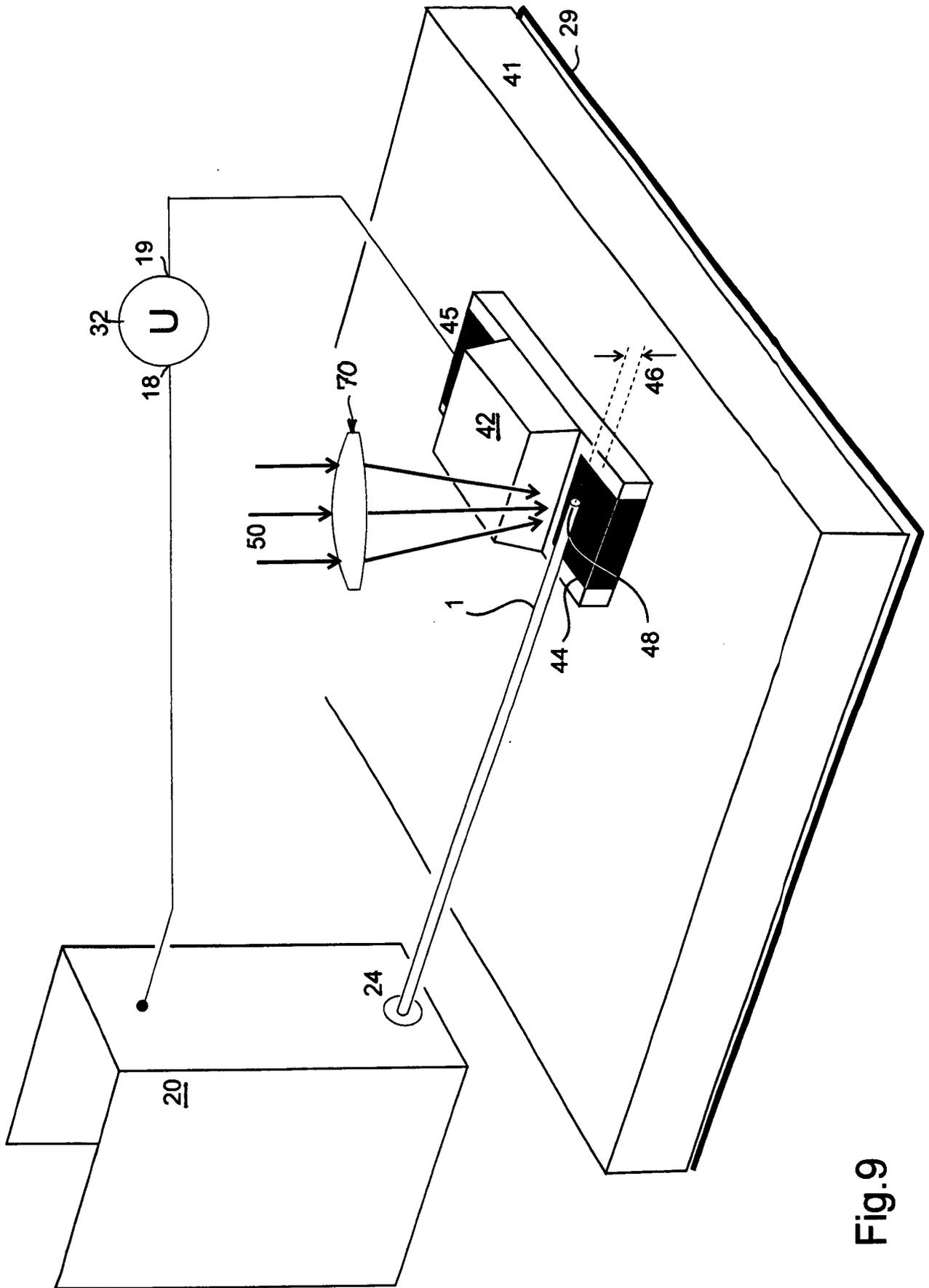


Fig.9

Fig. 10

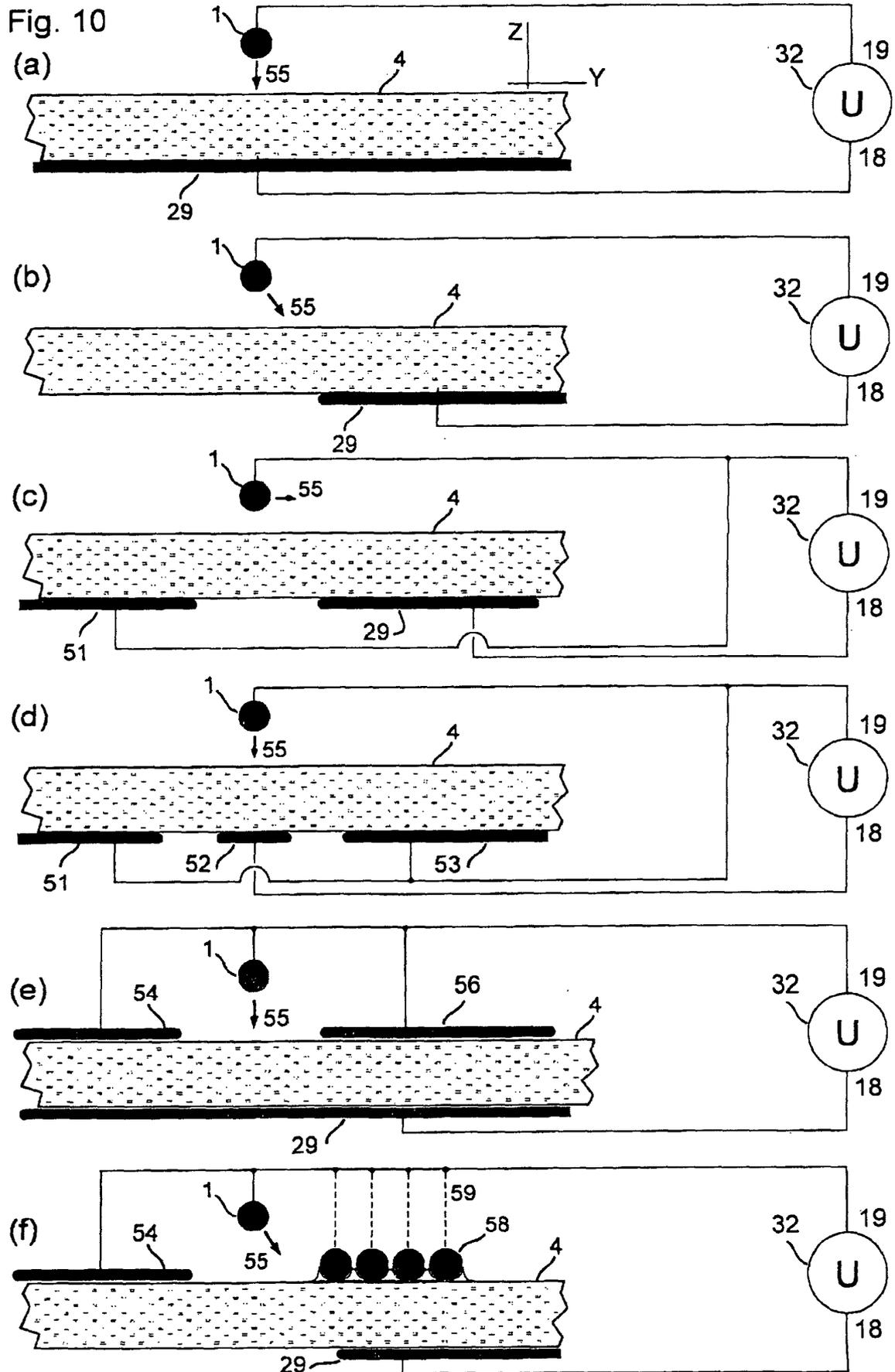


Fig. 11

