



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
25.05.2022 Patentblatt 2022/21

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
H01H 1/00 (2006.01) H01H 59/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **20209398.5**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
H01H 1/0036; H01H 59/0009; H01H 2001/0084

(22) Anmeldetag: **24.11.2020**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(71) Anmelder: **Siemens Aktiengesellschaft**
80333 München (DE)

(72) Erfinder:
• **Raab, Oliver**
94496 Ortenburg (DE)
• **Schwarz, Markus**
80796 München (DE)

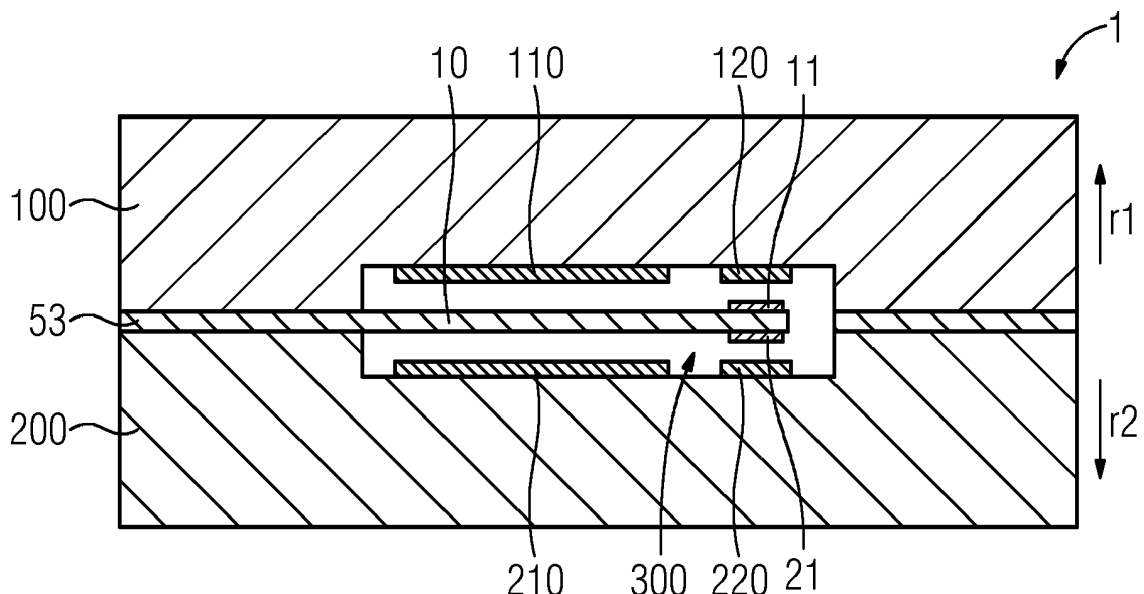
(54) **MIKROELEKTROMECHANISCHES SCHALTELEMENT, VORRICHTUNG UND HERSTELLUNGSVERFAHREN**

(57) Es wird ein mikroelektromechanisches Schaltelement (1) angegeben, umfassend
- ein Biegeelement (10) mit wenigstens einem an dem Biegeelement angeordneten ersten Schaltkontakt (11), wobei das Biegeelement (10) aus einer zentralen Stellung (p0) heraus in zwei gegenüberliegende Auslenkungsrichtungen (r1,r2) auslenkbar ist,
- sowie ein erstes Decksubstrat (100) und ein zweites Decksubstrat (200),
- wobei die beiden Decksubstrate (100,200) so ausge-

bildet sind, dass das Biegeelement (10) in einem Hohlraum (300) zwischen den beiden Decksubstraten (100,200) angeordnet ist,
- und wobei jedes der beiden Decksubstrate (100, 200) im Bereich des Biegeelements (10) eine Steuerelektrode (110, 210) aufweist, mit welcher eine Auslenkung des Biegeelements (10) beeinflusst werden kann.

Weiterhin wird eine Vorrichtung mit einem solchen Schaltelement (1) sowie ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Schaltelements (1) angegeben.

FIG 3



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein mikroelektromechanisches Schaltelement, das ein Biegeelement mit wenigstens einem an dem Biegeelement angeordneten ersten Schaltkontakt umfasst. Weiterhin betrifft die Erfindung eine Vorrichtung mit einem solchen Schaltelement sowie ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Schaltelements.

[0002] Aus dem Stand der Technik sind mikroelektromechanische Schaltelemente grundsätzlich bekannt und werden in der Fachwelt auch als MEMS-Schalter bezeichnet. Es handelt sich dabei um mechanische Festkörper-Schaltelemente, welche im Mikrometer- bis Nanometer-Bereich strukturiert sind und elektrostatisch aktuierte Biegeelemente umfassen, so dass sie durch die Änderung einer elektrischen Spannung geschaltet werden können. Häufig wird eine Mehrzahl solcher einzelner MEMS-Schalter zu einem Array angeordnet, insbesondere um eine hinreichend große Stromtragfähigkeit und/oder Spannungsfestigkeit zu erreichen. Solche MEMS-Schalter und darauf aufbauende Schaltvorrichtungen werden beispielsweise in der DE102017215236A1 und der WO2018028947A1 beschrieben.

[0003] Nachteilig bei den MEMS-Schaltern nach dem Stand der Technik ist, dass die Biegeelemente typischerweise relativ hohe Kräfte benötigen, um von ihrer Grundstellung in eine ausgelenkte Stellung gebracht zu werden. Oder anders ausgedrückt sind die Biegeelemente typischerweise so ausgelegt, dass sie in der ausgelenkten Stellung eine relativ hohe mechanische Rückstellkraft ausüben, durch welche sie sich nach Wegfall der Schaltspannung eigenständig in ihre Grundstellung zurückstellen können. Mit dieser hohen Rückstellkraft ist einerseits der Vorteil verbunden, dass die Schaltelemente nach Wegfall der Schaltspannung sehr zuverlässig zurück in die Grundposition gelangen und nicht im ausgelenkten Zustand festkleben.

[0004] Allerdings ist damit auch der Nachteil verbunden, dass für die Bewegung des Biegeelements in seine ausgelenkte Stellung eine betragsmäßig vergleichsweise hohe Schaltspannung erforderlich ist. Die Schaltspannung ist die Spannung, die zwischen einem Bereich des Biegeelements und einer gegenüberliegenden Steuerelektrode angelegt wird, um durch die elektrostatische Kraft eine Auslenkung des Biegeelements zu bewirken. Bei herkömmlichen MEMS-Schaltern liegen diese Schaltspannungen häufig bei einigen 10 V. Außerdem ist bei herkömmlichen Schaltelementen die Schaltdauer oft unerwünscht lang, was ebenfalls auf die beschriebene steife Ausführung der Biegeelemente zurückzuführen sein kann: Zumindest bei einer fest vorgegebenen Schaltspannung führt eine steifere Ausführung des Biegeelements zu einer höheren Schaltdauer.

[0005] Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein Schaltelement zur Verfügung zu stellen, welches die genannten Nachteile überwindet. Insbesondere soll ein Schaltelement zur Verfügung gestellt werden, welches mit einer vergleichsweise niedrigen Schaltspannung schaltbar ist und/oder welches vergleichsweise schnell schaltbar ist. Eine weitere Aufgabe ist es, eine Vorrichtung mit einem solchen Schaltelement sowie ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Schaltelements anzugeben.

[0006] Diese Aufgaben werden durch das in Anspruch 1 beschriebene Schaltelement, die in Anspruch 11 beschriebene Vorrichtung und das in Anspruch 14 beschriebene Herstellungsverfahren gelöst.

[0007] Das erfindungsgemäße mikroelektromechanische Schaltelement weist ein Biegeelement mit wenigstens einem an dem Biegeelement angeordneten ersten Schaltkontakt auf, wobei das Biegeelement aus einer zentralen Stellung heraus in zwei gegenüberliegende Auslenkungsrichtungen auslenkbar ist. Das Schaltelement weist ferner ein erstes und ein zweites Decksubstrat auf, wobei die beiden Decksubstrate so ausgebildet sind, dass das Biegeelement in einem Hohlraum zwischen den beiden Decksubstraten angeordnet ist. Dabei weist jedes der beiden Decksubstrate im Bereich des Biegeelements eine Steuerelektrode auf, mit welcher eine Auslenkung des Biegeelements beeinflusst werden kann.

[0008] Unter einem mikroelektromechanischen Schaltelement soll hier ein Schaltelement verstanden werden, welches mit den Mitteln der Mikrosystemtechnik hergestellt wird. Dabei wird unter dem Begriff Mikrosystemtechnik ganz allgemein die Technik verstanden, die in der Lage ist, mikroskopisch kleine mechanisch wirksame Komponenten herzustellen, beispielsweise Schalter oder Zahnräder, die eine Bewegung vollziehen können. Unter dem Begriff der Mikrosystemtechnik soll hier im weiteren Sinne auch die Nanosystemtechnik eingeschlossen sein, welche entsprechende Strukturen im Submikrometer- bis Nanometerbereich ermöglicht. Allgemein wird hier in der Regel auf Technologien zurückgegriffen, die aus der Halbleiterfertigung grundsätzlich bekannt sind. Solche MEMS-Schalter können auf Glas- und/oder Halbleiter-Substraten (sogenannten Wafern), beispielsweise aus Silizium oder Galliumarsenid gefertigt werden. Die Länge eines MEMS-Schaltelements beträgt hierbei weniger als 1mm, bevorzugt weniger als 100 µm. Hierbei ist das größte konstruktive Element eines einzelnen MEMS-Schaltelements typischerweise das Biegeelement. Dieses Biegeelement ist zweckmäßigerweise länglich geformt, um eine definierte, rückfedernde Auslenkung nach Art einer geraden Blattfeder zu ermöglichen. Das Biegeelement wird daher in den Fachkreisen häufig auch als Biegebalken oder als Schaltzunge bezeichnet. Grundsätzlich sind aber auch andere Proportionen möglich.

[0009] Das Biegeelement befindet sich in einem inneren Hohlraum des übergeordneten Schaltelement-Bauteils, welches aus mehreren flächigen Substraten zusammengesetzt ist und somit insgesamt als flächiges Bauteil vorliegt. Bei horizontaler Ausrichtung ist dieses Bauteil "oben" und "unten" (also zu seinen beiden Hauptflächen hin) nach außen durch zwei Decksubstrate abgedeckt und zwar so, dass der innere Hohlraum durch diese beiden Decksubstrate begrenzt ist. Bei herkömmlichen MEMS-Schaltelementen ist der Bereich des Biegeelements dagegen typischerweise nur einseitig

durch ein Decksubstrat begrenzt, welches z.B. wie in der DE102017215236A1 als Glaswafer ausgebildet sein kann. Dieses Decksubstrat trägt bei den bekannten MEMS-Schaltern die Steuerelektrode, welche gegenüber dem Biegebalken platziert ist und auf welcher die Schaltspannung aufgebracht wird. Diese Steuerelektrode wird im Stand der Technik zum Teil auch als Gate-Elektrode bezeichnet. Durch elektrostatische Wechselwirkung zwischen der Steuerelektrode und dem Biegeelement kann das Biegeelement ausgelenkt werden. Z.B. kann es aufgrund von elektrostatischer Anziehung in Richtung des Decksubstrats bewegt werden, so dass es bei dieser Auslenkung zur Ausbildung eines elektrischen Kontakts zwischen einem Kontaktelement des Biegebalkens und einem Kontaktelement des Decksubstrats kommen kann.

[0010] Ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Schaltelements ist, dass der Hohlraum hier von zwei Decks substraten begrenzt ist und dass jedes dieser beiden Decks substrate eine zugeordnete Steuerelektrode im Bereich des Biegebalkens trägt. Insbesondere kann dann mit jeder dieser beiden Steuerelektroden durch temporäres Anlegen einer Schaltspannung eine Auslenkung des Biegeelements beeinflusst bzw. bewirkt werden. Da diese beiden Steuerelektroden (bei horizontaler Ausrichtung des Bauteils betrachtet) oberhalb und unterhalb des Biegeelements liegen, kann dieses Biegeelement somit aktiv sowohl von oben als auch von unten aus bewegt werden. Insbesondere werden damit kontrollierte Auslenkungen von einer zentralen Stellung aus nach oben und unten ermöglicht. Zwar kann prinzipiell auch nur mit einer Steuerelektrode eine Auslenkung nach oben oder unten bewirkt werden, indem z.B. durch mittels einer obenliegenden Steuerelektrode je nach gewünschter Bewegungsrichtung eine anziehende oder eine abstoßende elektrostatische Kraft bewirkt wird. Die letztgenannte Variante ist technisch aber deutlich schwerer zu realisieren. In jedem Fall ermöglicht die Aktuierung mit zwei separaten gegenüberliegenden Steuerelektroden eine wesentlich kontrolliertere und präzisere Führung der Bewegung. Insbesondere kann durch elektrostatische Anziehung mittels der oberen Steuerelektrode von einer zentralen Stellung aus eine Auslenkung nach oben bewirkt werden, und durch elektrostatische Anziehung mittels der unteren Steuerelektrode kann eine Auslenkung nach unten bewirkt werden. Auf diese Weise kann besonders kontrolliert zwischen einer zentralen Stellung, einer nach oben ausgelenkten Stellung und einer nach unten ausgelenkten Stellung des Biegeelements gewechselt werden. Beispiels kann es sich bei der zentralen Stellung um eine Grundstellung des Biegeelements handeln, in welche sich das Biegeelement ohne die Einwirkung elektrostatischer Kräfte selbsttätig zurückstellt. Prinzipiell könnte aber auch eine Vorspannung des Biegeelements vorliegen, so dass auch eine nach "oben" (also zum ersten Decks substrat) oder eine nach "unten" (also zum zweiten Decks substrat) ausgelenkte Stellung die mechanische Grundstellung bilden kann.

[0011] Allgemein und unabhängig von der genauen Ausgestaltung ist das Biegeelement beim erfindungsgemäßen Schaltelement zwischen den beiden Steuerelektroden angeordnet, so dass es durch das Zusammenspiel beider Steuerelektroden elektrostatisch aktuiert werden kann. Hierdurch ergeben sich mehrere Vorteile für die Ansteuerung bzw. die Bewegung des Schalters: Zum einen kann das Biegeelement deutlich weicher ausgelegt werden, also mit anderen Worten eine niedrigere mechanische Rückstellkraft aufweisen, als wenn es nur mit einer Steuerelektrode ausgelenkt würde. Dies liegt daran, dass beispielsweise nach einer elektrostatischen Anziehung des Biegebalkens in Richtung der ersten Steuerelektrode die darauffolgende Rückstellung in Richtung der zweiten Steuerelektrode durch eine entsprechend anziehend wirkende Schaltspannung auf der zweiten Steuerelektrode unterstützt werden kann. Mit anderen Worten muss die Rückstellung aus einer ersten (elektrostatisch) ausgelenkten Position heraus nicht rein mechanisch erfolgen, sondern sie kann durch die zweite Elektrode auf einfache Weise elektrostatisch unterstützt werden. Ein weiches Biegeelement mit einer kleineren Rückstellkraft ermöglicht andererseits aber auch den Einsatz von betragsmäßig niedrigeren Schaltspannungen im Vergleich zum Stand der Technik (auf beiden Steuerelektroden).

[0012] Trotz einer weichen Ausgestaltung des Biegeelements kann beim erfindungsgemäßen Schaltelement ein Ankleben des Biegeelements in einem ausgelenkten Zustand zuverlässig verhindert werden, da die zweite Steuerelektrode durch die Ausbildung einer elektrostatischen Rückstellkraft das Ablösen aus dem ausgelenkten Zustand unterstützen kann. Weitere Vorteile ergeben sich für die Dynamik des Schaltverhaltens, da mit den beiden Steuerelektroden und dem weichen Biegeelement allgemein ein schnellerer und bei Bedarf auch ein dynamisch gesteuerter Schaltvorgang ermöglicht wird. So können an den Steuerelektroden nicht nur binäre Schaltsignale (Schaltspannung an oder aus) angelegt werden, sondern es können komplexere Spannungsprofile angelegt werden. Insbesondere durch das Zusammenspiel von beiden gegenüberliegenden Steuerelektroden kann dann die Bewegung des Biegeelements besonders genau kontrolliert werden. So kann beispielsweise das Biegeelement durch Einschalten der Schaltspannung auf der ersten Steuerelektrode (bei Überschreiten der sogenannten "Pull-In-Spannung") in Richtung dieser ersten Steuerelektrode bewegt werden. Mit einem geeigneten Spannungsprofil auf der gegenüberliegenden zweiten Steuerelektrode kann zusätzlich ein Abbremsen kurz vor dem mechanischen Auftreffen des Biegeelements bewirkt werden, was die mechanische Belastung des Biegeelements (und seiner Kontaktelemente) verringert und somit die Lebensdauer des Schaltelements deutlich verlängern kann. Allgemeiner ausgedrückt können durch geeignete Spannungsprofile an den beiden Steuerelektroden vorbestimmte Schaltcharakteristiken und somit die entsprechenden Bewegungs-Kennlinien des Biegeelements wesentlich genauer erreicht werden als nur mit einer Steuerelektrode. So ist es insbesondere auch möglich, bei der Rückstellung aus einer ausgelenkten Position des Biegeelements und einer damit einhergehenden elektrischen Trennung der entsprechenden Kontaktelemente nicht nur in die Grundstellung zurückzukehren, sondern das Biegeele-

ment über die neutrale Grundstellung hinaus temporär zu "überbiegen". Auf diese Weise kann ein Lichtbogen zwischen den gerade getrennten Kontaktelementen wesentlich zuverlässiger gelöscht werden, als wenn nur die Grundstellung erreicht würde, da der Abstand der Kontaktelemente erhöht wird und somit das elektrische Feld weiter verringert wird.

[0013] Die erfindungsgemäße Vorrichtung weist ein erfindungsgemäßes Schaltelement oder ein Array von mehreren solchen erfindungsgemäßen Schaltelementen als Teilelement(e) auf. Unabhängig von dem speziellen Anwendungszweck der Vorrichtung ergeben sich ihre Vorteile analog zu den oben beschriebenen Vorteilen des erfindungsgemäßen Schaltelements, insbesondere im Hinblick auf eine verringerte Schaltspannung, kürzere Schaltzeit und/oder eine präzisere Einstellung eines gewünschten Bewegungsprofils.

[0014] Das erfindungsgemäße Verfahren dient zur Herstellung eines erfindungsgemäßen Schaltelements. Dabei wird das Biegeelement durch subtraktive Fertigung aus wenigstens einer flächigen Schicht gebildet und anschließend freigestellt. Diese, das Biegeelement ausbildende Schicht bzw. das diese Schicht enthaltende Schichtsystem wird durch insgesamt zwei Waferbond-Schritte mit dem ersten Decks substrat und dem zweiten Decks substrat verbunden. Unter der "subtraktiven Fertigung" des Biegeelements soll verstanden werden, dass innerhalb der flächigen Schicht in einem Bereich um das Biegeelement herum Material entfernt wird, so dass das Biegeelement innerhalb seiner Schicht nach Art einer Insel oder zumindest nach Art einer Halbinsel stehenbleibt. Damit wird das Biegeelement sozusagen vom "Festland" (also den umgebenden Bereichen derselben Schicht) so weit abgetrennt, dass es prinzipiell unabhängig von diesen Bereichen ausgelenkt werden kann. Es verbleibt höchstens noch eine Art Steg im Fußbereich des Biegeelement, durch den es mit den übrigen Bereichen derselben Schicht verbunden sein kann.

[0015] Unter dem anschließenden "Freistellen" des Biegeelements soll verstanden werden, dass zumindest auf einem überwiegenden Teil der Längsausdehnung des Biegeelements die möglicherweise hier angrenzenden mechanisch tragenden flächigen Schichten auf beiden Hauptflächen (soweit noch vorhanden) entfernt werden, so dass das Biegeelement nach Art einer geraden Blattfeder senkrecht zur Schichtfläche nach oben und unten ausgelenkt werden kann. Typischerweise wird das Biegeelement in diesem Schritt schon zu einer seiner Hauptflächen hin freiliegen, so dass nur noch auf einer Rückseite eine mechanisch tragende benachbarte Schicht entfernt werden muss, um die benötigte Beweglichkeit zu ermöglichen.

[0016] Insgesamt wird in jedem Fall die Schicht, bzw. das Schichtsystem, welche(s) das Biegeelement enthält, durch insgesamt zwei Waferbond-Schritte mit dem ersten Decks substrat und dem zweiten Decks substrat verbunden. Dabei kann optional ein zusätzliches Trägersubstrat zum Einsatz kommen, welches beispielsweise das Schichtsystem des Biegeelements zunächst trägt, bevor dieses auf seiner freien Seite mit dem ersten Decks substrat verbunden wird. Nach anschließender Entfernung dieses Trägersubstrats kann auch die gegenüberliegende Seite des Schichtsystems (die dann frei liegt), in ähnlicher Weise über einen Waferbond-Schritt mit dem zweiten Decks substrat verbunden werden. Auf diese Weise wird ein Gesamtaufbau erreicht, bei dem das Schichtsystem, das das Biegeelement enthält, sandwichartig zwischen den beiden Decks substraten eingeschlossen ist. Zweckmäßig wird in den beiden Decks substraten vor dem jeweiligen Waferbond-Schritt in dem Bereich eine Ausnehmung geschaffen, in dem nach dem Bond-Schritt das Biegeelement angeordnet ist. Durch diese beiden Ausnehmungen wird der Hohlraum gebildet, in dem das Biegeelement im fertigen Zustand auslenkbar angeordnet ist.

[0017] Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung gehen aus den von den Ansprüchen 1, 11 und 14 abhängigen Ansprüchen sowie der folgenden Beschreibung hervor. Dabei können die beschriebenen Ausgestaltungen des Schaltelements, der Vorrichtung und des Herstellungsverfahrens allgemein vorteilhaft miteinander kombiniert werden. So kann insbesondere die erste Auslenkungsrichtung des Biegeelements einer Biegung in Richtung des ersten Decks substrats entsprechen, und die zweite Auslenkungsrichtung kann einer Biegung in Richtung des zweiten Decks substrats entsprechen. Mit anderen Worten kann das Biegeelement bei horizontaler Ausrichtung des insgesamt flächig geformten Bauteils nach "oben" und "unten" auslenkbar sein. Eine solche Beweglichkeit aus der Schichtebene des Biegeelements heraus ist mit einem blattfederartig geformten Biegeelement besonders einfach zu realisieren.

[0018] Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das Biegeelement durch eine Spannungsbeaufschlagung der Steuerelektrode des ersten Decks substrats in Richtung des ersten Decks substrats auslenkbar, und sie ist durch eine Spannungsbeaufschlagung der Steuerelektrode des zweiten Decks substrats in Richtung dieses zweiten Decks substrats auslenkbar. Dies kann insbesondere dadurch erreicht werden, dass jede der beiden Steuerelektroden zur Auslenkung des Biegeelements in die betreffende Richtung temporär mit einer Schaltspannung beaufschlagt wird, durch welche eine elektrostatische Anziehungskraft zwischen dem Biegeelement und dem zugeordneten Decks substrat bewirkt wird. Alternativ kann die jeweilige Steuerelektrode aber grundsätzlich auch mit einer Schaltspannung beaufschlagt werden, die in einer abstoßenden elektrostatischen Kraft zwischen dem Biegeelement und dem zugeordneten Decks substrat resultiert. Wesentlich ist im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung vor allem, dass durch das Vorhandensein von zwei Steuerelektroden eine Bewegung des Biegeelements in beide Auslenkungsrichtungen separat akuiert werden kann. Durch gleichzeitige Spannungsbeaufschlagung beider Steuerelektroden kann insbesondere allgemein eine besonders präzise Bewegungsführung nach einer vordefinierten Kennlinie erreicht werden.

[0019] Allgemein vorteilhaft kann das Biegeelement im Wesentlichen aus einem Halbleitermaterial gebildet sein. Dies ist besonders günstig, weil es für Einhaltung von definierten Schalteigenschaften vorteilhaft ist, wenn die mechanischen

Eigenschaften des Biegeelements bei einem definierten Herstellungsprozess erstens von Bauteil zu Bauteil präzise reproduziert werden können und wenn sie zweitens für ein gegebenes Bauteil auch über eine längere Betriebsdauer hinweg stabil bleiben. Dies ist mit bekannten Halbleiter-Schichtsystemen gut zu erreichen, da die Prozessierung solcher Halbleiter gut beherrschbar ist und einen weit fortgeschrittenen Entwicklungsstand erreicht hat. Außerdem ist sie vergleichsweise kostengünstig. Besonders geeignet ist daher beispielsweise Silizium als Halbleitermaterial. Insbesondere monokristallines Silizium ist in seinen mechanischen und elektrischen Eigenschaften sehr reproduzierbar zu prozessieren und langfristig stabil.

[0020] Alternativ kann das Biegeelement aber auch im Wesentlichen aus einem Metall und/oder einem oder mehreren Dielektrika gebildet sein. "Im Wesentlichen" soll hier allgemein bedeuten, dass die genannten Materialien den Hauptbestandteil bilden, wobei andere zusätzliche Materialien z.B. in Form von Beschichtungen des Biegeelements nicht ausgeschlossen sein sollen. Insbesondere kann das Biegeelement ein oder mehrere Kontaktelemente tragen, welche in Form von strukturierten Metallisierungen auf das Biegeelement aufgebracht sein können. Wenn das Biegeelement im Wesentlichen aus einem dielektrischen Material gebildet ist, kann es zweckmäßig auf seiner Ober- und Unterseite jeweils eine Steuerelektrode tragen, welche im fertigen Schaltelement gegenüberliegend zur jeweiligen Steuerelektrode des Decksubstrats angeordnet ist. Bei einer Ausgestaltung des Biegeelements aus einem halbleitenden oder metallischen Material kann dagegen das Biegeelement selbst die Gegenelektrode zu diesen beiden Steuerelektroden der Decksubstrate ausbilden.

[0021] Allgemein vorteilhaft kann wenigstens eines der Decksubstrate und insbesondere sogar beide Decksubstrate als isolierendes Decksubstrat ausgebildet sein. Insbesondere können sie im Wesentlichen aus Glas gebildet sein. Auch hier soll dies so verstanden werden, dass das Glas oder ein anderes isolierendes Material den Hauptbestandteil des jeweiligen Substrats bildet und zusätzliche Elemente, insbesondere in Form von lokalen Beschichtungen, dabei nicht ausgeschlossen sein sollen. So können insbesondere die genannten Steuerelektroden sowie zusätzliche Kontaktelemente als weitere Elemente auf der Oberfläche der Decksubstrate aufgebracht sein. Insbesondere können Steuerelektroden und Kontaktelemente auf der dem Biegeelement zugewandten Seite der Decksubstrate angeordnet sein. Es können jedoch auch auf der Außenseite der Decksubstrate z.B. Metallisierungen in Form von Leitungselementen und/oder Kontaktelementen und/oder anderen Bauelementen vorhanden sein. Zwischen den beiden Hauptflächen des jeweiligen Decksubstrats können elektrische Durchführungen vorgesehen sein, insbesondere in Form von sogenannten Vias, welche sich senkrecht zur Substratoberfläche durch das Substrat hindurch erstrecken, um Elemente auf Ober- und Unterseite elektrisch zu verbinden. Alternativ können jedoch auch leitfähige Substrate auf der dem Biegeelement zugewandten Seite mit einer elektrisch isolierenden Schicht beschichtet sein, so dass rein funktional ein elektrisch isolierendes Decksubstrat gebildet ist. Eine solche elektrisch isolierende Schicht kann beispielsweise eine Siliziumdioxid-Schicht oder auch eine Polymerschicht sein.

[0022] Gemäß einer allgemein vorteilhaften Ausführungsform kann der Hohlraum für das Biegeelement durch Ausnehmungen in den beiden Decksubstraten gebildet sein. Insbesondere können diese Ausnehmungen in den beiden Decksubstraten einander gegenüberliegend angeordnet sein und in ihrem Grundriss einander entsprechen, so dass durch ihr Zusammenwirken ein gemeinsamer Hohlraum gebildet ist. In diesem gemeinsamen Hohlraum kann das Biegeelement entsprechend nach oben und unten ausgelenkt werden. Vorteilhaft sind die Metallisierungen der beiden Steuerelektroden im Bereich der Ausnehmungen der jeweiligen Decksubstrate angeordnet. Auf diese Weise kann die jeweilige Steuerelektrode in elektrostatische Wechselwirkung mit dem innerhalb des Hohlraums angeordneten Biegeelement treten.

[0023] Allgemein vorteilhaft kann das Schaltelement im Bereich zwischen den beiden Decksubstraten ein Silicon-on-Insulator-Schichtsystem oder einen Teil eines solchen Schichtsystems aufweisen. Ein Silicon-on-Insulator (abgekürzt: SOI) Schichtsystem umfasst insbesondere eine Silizium-Isolator-Silizium-Schichtfolge. Vorteilhaft kann es sich bei einer der beiden Silizium-Schichten und besonders bevorzugt bei beiden Silizium-Schichten um monokristallines Silizium handeln. Die Isolator-Schicht kann bevorzugt im Wesentlichen durch eine Siliziumdioxid-Schicht (SiO_2) gebildet sein. Sie kann insbesondere als sogenannte vergrabene Oxidschicht (englisch: "buried oxide" oder kurz BOX-Schicht) realisiert sein. Die an sich bekannte SOI-Technologie ermöglicht eine besonders präzise Definition der Schichtdicken und der sonstigen Materialeigenschaften der einzelnen Schichten. So kann insbesondere das Biegeelement oder zumindest ein mechanisch tragender Teil des Biegeelements im Wesentlichen durch eine dieser Silizium-Schichten realisiert sein. Dabei kann eine subtraktive Fertigung des Biegebalkens beispielsweise durch Wegätzen von umgebenden Bereichen des Siliziums erfolgen. Die Schicht des Biegebalkens ist insbesondere die dünnere der beiden Silizium-Schichten eines typischen SOI-Substrats. Die mechanische Anbindung des Biegeelements an die übrigen Bereiche des Bauteils kann insbesondere über eine Isolator-Schicht des SOI-Substrats vermittelt sein. Mit anderen Worten kann das Biegeelement in seinem Fußbereich über die Isolatorschicht an einen mechanisch tragenden Teil des Schaltelements angekoppelt sein. Diese und weitere vorteilhafte Merkmale und Ausführungsvarianten des SOI-Schichtsystems und seiner Prozessierung werden ausführlicher in der DE102017215236A1 beschrieben, welche daher in ihrer Gesamtheit in die Offenbarung der vorliegenden Anmeldung mit einbezogen sein soll.

[0024] Beim fertigen erfindungsgemäßen Bauteil muss das beschriebene SOI-Schichtsystem allerdings nicht mehr

vollständig erhalten sein. Insbesondere kann die ursprünglich dickere der beiden Silizium-Schichten nach Fertigstellung des Bauteils vollständig entfernt sein. Auch die Isolatorschicht kann vollständig oder zumindest in Teilbereichen entfernt sein. Wesentlich bei dieser Ausführungsform ist, dass zumindest der Biegebalken aus einer Teilschicht des SOI-Schichtsystems hergestellt worden ist.

[0025] Allgemein ist es zweckmäßig, wenn das erste Decksubstrat einen ersten Gegenkontakt trägt, welcher in einer ersten Auslenkungsstellung des Biegeelements mit einem ersten Schaltkontakt des Biegeelements elektrisch kontaktierbar ist. Es soll also, wenn das Biegeelement zum ersten Decksubstrat hin ausgelenkt ist und in seinem Endbereich mit diesem in Berührung ist, ein elektrischer Kontakt zwischen dem ersten Schaltkontakt des Biegeelement und einem auf dem ersten Decksubstrat gegenüberliegend angeordneten ersten Gegenkontakt vermittelt werden. Besonders bevorzugt trägt das erste Decksubstrat sogar ein Paar von ersten Gegenkontakten, welche beide mit dem ersten Schaltkontakt des Biegeelements kontaktiert werden können. Auf diese Weise wird also in der ersten Auslenkungsstellung das Paar von ersten Gegenkontakten elektrisch miteinander verbunden. Diese beiden ersten Gegenkontakte können als sogenannte Lastkontakte eines ersten Last-Schaltkreises ausgebildet sein. So kann mittels des ersten Schaltkontakts der erste Last-Schaltkreis geschlossen werden. Bezüglich des ersten Last-Schaltkreises handelt es sich dann also um eine "ON"-Position des Schaltelements.

[0026] Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung kann außerdem das zweite Decksubstrat einen zweiten Gegenkontakt tragen, welcher in einer zweiten Auslenkungsstellung des Biegeelements mit einem zweiten Schaltkontakt des Biegeelements kontaktierbar ist. Die Funktionsweise des zweiten Schaltkontakts im Zusammenspiel mit dem zweiten Gegenkontakt ist analog wie bereits im Zusammenhang mit dem ersten Schaltkontakt und ersten Gegenkontakt beschrieben. So kann auch hier, auf dem zweiten Decksubstrat, insbesondere ein Paar von zweiten Gegenkontakten vorliegen, welche mittels des zweiten Schaltkontakts elektrisch miteinander verbunden werden können. Auf diese Weise kann insbesondere ein zweiter Last-Stromkreis gebildet sein, welcher in der zweiten Auslenkungsstellung des Biegeelements geschlossen ist. Mit anderen Worten kann dann mit dem Biegeelement zwischen einer "ON"-Position für den ersten Last-Schaltkreis und einer "ON"-Position für den zweiten Last-Schaltkreis umgeschaltet werden. Prinzipiell ist auch die Einnahme einer zentralen Grundstellung des Biegebalkens möglich, bei der das Schaltelement bezüglich beider Last-Schaltkreise auf "OFF" geschaltet ist.

[0027] Das Biegeelement kann so ausgelegt sein, dass diese zentrale Grundstellung in einem spannungslosen Zustand der beiden Steuerelektroden eingenommen wird. Alternativ kann das Biegeelement aber auch durch die Art der Prozessierung in die erste oder zweite Auslenkungsrichtung mechanisch vorgespannt sein, so dass die "ON"-Stellung des ersten Last-Schaltkreises oder die "ON"-Stellung des zweiten Last-Schaltkreises die Grundstellung des Schaltelements bildet. Eine solche Vorspannung kann beispielsweise so erreicht werden, wie es in der noch nicht offengelegten europäischen Patentanmeldung mit dem Anmeldeaktenzeichen 20182568.4 beschrieben ist. Auch diese Anmeldung soll daher in die Offenbarung der vorliegenden Anmeldung einbezogen sein.

[0028] Die Ausgestaltung mit einem zweiten Schaltkontakt und einem zweiten Gegenkontakt ist besonders vorteilhaft, da mit ihr ein Wechselschalter ausgebildet werden kann. Ein solcher Wechselschalter wird auch als Wechslerrelais bezeichnet und ermöglicht ein Umschalten zwischen zwei Last-Schaltkreisen. Eine Eingangsleitung kann somit wahlweise mit einer ersten oder einer zweiten Ausgangsleitung verbunden werden. Dies kann z.B. dadurch realisiert werden, dass ein Einzelkontakt des obenliegenden Kontaktpaars über ein Via mit einem Einzelkontakt des untenliegenden Kontaktpaars elektrisch verbunden wird, so dass die beiden Einzelkontakte zusammen mit der Eingangsleitung verbunden sind. Die Realisierung eines Wechselschalters ist beispielsweise für Anwendungen in der Telekommunikation besonders vorteilhaft oder für alle Arten von Logikschaltungen, bei denen ein Umschalten zwischen zwei oder mehr Ausgängen wünschenswert ist. Durch eine Kombination von mehreren solchen Schaltelementen, insbesondere in Serienschaltung, kann auch ein Umschalten zwischen mehr als zwei Ausgängen erfolgen.

[0029] Allgemein und unabhängig von der genauen Ausgestaltung des einzelnen Schaltelements kann die übergeordnete Vorrichtung ein Array von mehreren erfindungsgemäßen Schaltelementen aufweisen. Ein solches Array kann eine Parallelschaltung und/oder eine Serienschaltung von mehreren solchen Schaltelementen sein. Eine Parallelschaltung mehrerer Schaltelemente kann insbesondere dazu dienen, die Stromtragfähigkeit der gesamten Vorrichtung im Vergleich zu einem einzelnen Schaltelement zu erhöhen. Eine Serienschaltung mehrerer Schaltelemente kann insbesondere dazu dienen, die Spannungsfestigkeit im Vergleich zu einem einzelnen Schaltelement zu erhöhen. Auf diese Weise kann die Verwendung eines Arrays dazu beitragen, dass die Vorrichtung die Spezifikationen eines Leistungsschalters einer elektrischen Energieverteilungsleitung - insbesondere in einem Niederspannungs- oder Mittelspannungsnetz - erfüllt. Die Anzahl der einzelnen Schaltelemente in dem Array kann dabei an den jeweiligen Spezifikationen ausgerichtet werden. Sie kann beispielsweise bei einigen 10 bis einigen 1000 Schaltelementen liegen und für höhere Leistungsbereiche sogar mehrere hunderttausend betragen.

[0030] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform der Vorrichtung kann diese neben dem wenigstens einen Schaltelement ein oder mehrere dazu elektrisch in Serie oder parallel geschaltete Halbleiterelemente umfassen. Dabei kann es sich beispielsweise um Transistoren oder andere Halbleiterschaltelemente handeln, wie in der WO2018028947A1 beschrieben. Die zusätzlichen Halbleiterelemente können dabei grundsätzlich auf demselben Sub-

strat wie das Biegeelement gefertigt sein, also monolithisch integriert sein, oder sie können prinzipiell auch auf einem anderen Substrat gefertigt und erst nachträglich mit dem Schaltelement verbunden sein.

[0031] Die übergeordnete Vorrichtung kann für den Einsatz in ganz unterschiedlichen Anwendungen ausgelegt sein. So kann sie beispielsweise als Schaltgerät bzw. Schaltschütz, als Umrichter bzw. als Inverter, als Logikschaltung und/oder als logisches Gatter ausgebildet sein. Bei dem Schaltgerät oder Schaltschütz kann es sich insbesondere um ein Gerät für ein Niederspannungs- oder Mittelspannungsnetz handeln. Die Vorrichtung kann allgemein auch eine speicherprogrammierbare Steuerung, insbesondere eine Steuerung für eine industrielle Anlage sein. Erfindungsgemäße Schaltelemente können dabei beispielsweise in einer Eingangsstufe, einer Ausgangsstufe und/oder in einem Sicherheitsrelais einer solchen Anlagensteuerung zum Einsatz kommen.

[0032] Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung des Herstellungsverfahrens kann das Biegeelement durch subtraktive Fertigung aus einem Silicon-on-Insulator-Schichtsystem erhalten werden, wie bereits weiter oben für die entsprechende Ausführungsform des Schaltelements beschrieben wurde. Insbesondere kann das Biegeelement durch Freistellung eines Teils einer Siliziumschicht des SOI-Schichtsystems gebildet sein. Das Herstellungsverfahren kann eine Vielzahl von weiteren optionalen Fertigungsschritten umfassen, welche insbesondere aus der MEMS- und Halbleiter-Prozessierung grundsätzlich bekannt sind. So können beispielsweise zusätzliche Metallisierungsschritte, z.B. in Form einer Beschichtung durch Aufdampfen, Sputtern oder galvanische Abscheidung vorgesehen sein. Die metallischen Schichten für die Elektroden und/oder Kontaktelemente können beispielsweise Gold, Chrom oder Silber oder andere in der Halbleiterfertigung gängige Metalle umfassen. Die (vollständige oder teilweise) Entfernung von einzelnen Schichten kann beispielsweise durch Ätzen und/oder mechanisch/chemisches Polieren und/oder durch einen Lift-off-Prozess erfolgen. Vor allem Ätzprozesse wie chemisches Ätzen mit Flusssäure, reaktives Ionenätzen (RIE für englisch "reactive ion etching" oder DRIE für "deep reactive ion etching") können zur definierten Entfernung von (Teil-)Schichten zum Einsatz kommen. Eine präzise Strukturierung kann dabei durch übliche lithographische Strukturierungsmethoden erreicht werden.

[0033] Grundsätzlich kann bei der Herstellung die Handhabung der jeweiligen Substrate durch Greifen und Positionieren einzelner "funktioneller Substrate" des Bauteils, also z.B. der SOI- und Decksubstrate erfolgen. Alternativ kann ein solches funktionelles Substrat aber auch bei der Prozessierung von einem zusätzlichen Trägersubstrat gehalten werden und von diesem sozusagen huckepack durch den Prozess geführt werden. Die Entfernung eines solchen zusätzlichen Trägersubstrats ist beispielsweise durch einen sogenannten Tilt-Release-Schritt auf einfache Weise möglich, ohne dass die funktionellen Substrate dabei beschädigt werden.

[0034] Nachfolgend wird die Erfindung anhand einiger bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die angehängten Zeichnungen beschrieben, in denen:

Figur 1	eine schematische Querschnittsdarstellung eines Schaltelements nach dem Stand der Technik zeigt,
Figur 2	eine perspektivische Ausschnittsdarstellung eines weiteren bekannten Schaltelements zeigt,
Figur 3	eine Querschnittsdarstellung eines erfindungsgemäßen Schaltelements zeigt,
Figuren 4 bis 9	mehrere Prozessstadien bei der Herstellung des Schaltelements der Figur 3 zeigen,
Figuren 10 bis 12	schematische Aufsichten auf Teilbereiche eines erfindungsgemäßen Schaltelements zeigen und
Figur 13	eine schematische Querschnittsdarstellung eines Schaltelements nach einem weiteren Beispiel der Erfindung zeigt.

[0035] In den Figuren sind gleiche oder gleich wirkende Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen.

[0036] Figur 1 zeigt ein mikroelektromechanisches Schaltelement 1, welches aus dem Stand der Technik bekannt ist. Dieses Schaltelement ist insgesamt ähnlich aufgebaut wie in der DE102017215236A1 beschrieben, es ist hier jedoch der Übersicht halber etwas vereinfacht dargestellt. Das Schaltelement weist ein Silicon-on-Insulator-Schichtsystem 50 auf, welches hier eine erste Siliziumschicht 51, darauffolgend eine erste Oxidschicht 52 und darauffolgend eine zweite Siliziumschicht 53 umfasst. Auf die Schicht 53 kann auch zusätzlich noch eine zweite Oxidschicht als Teil des SOI-Schichtsystems 50 folgen oder zumindest während der Herstellung hier vorgelegen haben. Durch subtraktive Fertigung ist aus diesem SOI-Schichtsystem 50 und insbesondere aus deren zweiter Siliziumschicht 53 ein Biegeelement 10 definiert und anschließend freigestellt worden. Die Herstellung des Biegeelements umfasst dabei die Entfernung der umgebenden Bereiche der Siliziumschicht 53 und die lokale Entfernung der an das Biegeelement 10 angrenzenden Teile der Schichten 51 und 52. So wurde hier ein in der Dickenrichtung d auslenkbares Biegeelement 10 erzeugt, ähnlich wie in der DE102017215236A1 beschrieben. Auch die übrigen Fertigungsschritte können analog zu der DE102017215236A1 durchgeführt werden. Der Fußbereich 10a des Biegeelements, in dem dieses mechanisch mit den übrigen Teilen des SOI-Schichtsystems verbunden ist, ist hier etwas vereinfacht gestaltet bzw. gezeigt. Alternativ zu dieser einfacheren Realisierung kann der Fußbereich 10a aber auch analog zur DE102017215236A1 oder auch der noch nicht veröffentlichten europäischen Patentanmeldung 20182568.4 ausgestaltet sein.

[0037] Nach oben hin ist das Bauteil durch ein Decksubstrat 100 abgedeckt, welches beispielsweise aus Glas gebildet

sein kann. Dieses Decksubstrat 100 kann beispielsweise durch einen Waferbond-Schritt mit den verbleibenden Schichten des SOI-Schichtsystems 50 verbunden worden sein. Im Bereich des Biegebalkens weist das Decksubstrat eine Ausnehmung auf, so dass zusammen mit den entfernten Teilen der Schichten 51 und 52 ein Hohlraum gebildet wird, in dem das Biegeelement 10 ausgelenkt werden kann. Um diese Auslenkung zu bewirken, ist auf dem Decksubstrat 100 im Bereich oberhalb des Biegeelements 10 eine Steuerelektrode 110 vorgesehen. Durch eine Spannungsbeaufschlagung der Steuerelektrode 110 kann eine Auslenkung des Biegeelements elektrostatisch aktuiert werden. Wenn das Biegeelement 10 in Richtung d nach oben ausgelenkt wird, kann es in seinem Endbereich so weit in Kontakt mit dem Decksubstrat gebracht werden, dass ein auf dem Biegeelement 10 aufgebrachtener Schaltkontakt 11 und ein in der Ausnehmung des Decksubstrats 100 aufgebrachtener Gegenkontakt 120 elektrisch in Verbindung treten. Auf diese Weise kann das Schaltelement auf "ON" geschaltet werden, und ein zugehöriger Last-Stromkreis kann mit dem Schaltelement 1 geschlossen werden.

[0038] Das gezeigte Schaltelement 1 kann als Teil einer übergeordneten Vorrichtung vorliegen, welche insbesondere ein Array von untereinander ähnlichen Schaltelementen aufweisen kann. Ein solches MEMS-Array kann monolithisch aus denselben Substraten aufgebaut sein. In diesem Fall ist der in Figur 1 gezeigte Bereich als Ausschnitt aus einem größeren Bauelement zu verstehen, wobei sich die lateralen Schichten noch weiter nach rechts und links (und natürlich auch senkrecht zur Papierebene) erstrecken und in diesen Raumrichtungen noch weitere ähnlich aufgebaute Schaltelemente umfassen können.

[0039] Figur 2 zeigt eine perspektivische Ausschnittsdarstellung eines solchen konventionellen Schaltelements, welches bezüglich seiner Schichtfolge insbesondere ähnlich wie das Schaltelement der Figur 1 aufgebaut sein kann. Die räumliche Orientierung ist jedoch umgekehrt zur Figur 1 gewählt, so dass die Richtung d hier nach unten weist und das Decksubstrat 100 unterhalb des Biegeelements 10 liegt. Im Fußbereich 10a des Biegeelements ist dieses an die übrigen Schichten des SOI-Schichtsystems 50 angebunden und über die flächige Wafer-Verbindung mit dem Decksubstrat 100 verbunden. Im mittleren Bereich ist das Biegeelement relativ breit und tritt elektrostatisch mit der Steuerelektrode 110 auf dem Decksubstrat in Wechselwirkung, insbesondere wenn diese über den skizzierten Steuer-Schaltkreis mit einer Spannung beaufschlagt wird. Im Endbereich 10c ist das Biegeelement ebenfalls relativ breit und trägt einen hier nicht sichtbaren Schaltkontakt. Gegenüberliegend findet sich in diesem Beispiel ein Paar von nebeneinanderliegenden Gegenkontakten 120 auf dem Decksubstrat (also ein Eingangskontakt 121 und ein Ausgangskontakt 122). Bei Auslenkung des Biegeelements werden diese beiden Kontakte 121 und 122 mit dem Schaltkontakt des Biegeelements und durch diesen auch miteinander elektrisch verbunden. Die dargestellten "Taillierungen" - also die verringerte Breite des Biegeelements 10 sowohl zwischen Fußbereich 10a und mittlerem Bereich 10b als auch zwischen mittlerem Bereich 10b und Endbereich 10c dient jeweils dazu, auch bei einer eventuell vorliegenden Torsion des Biegeelements eine Korrektur dieser Verdrehung zu ermöglichen, so dass ein möglichst flächige Kontakt bzw. eine flächige Wechselwirkung der einander gegenüberliegenden Bereiche des Biegeelements 10 und des Decksubstrats 100 zustande kommen kann.

[0040] Figur 3 zeigt eine schematische Querschnittsdarstellung eines Schaltelements 1 nach einem ersten Beispiel der Erfindung. Die grundlegende Funktionalität ist analog zu der Funktionalität des herkömmlichen Schaltelements 1 der Figuren 1 und 2, soweit es im Folgenden nicht abweichend beschrieben ist. Insbesondere ist diese Funktionalität wie im Folgenden beschrieben erweitert.

[0041] So weist auch das erfindungsgemäße Schaltelement 1 der Figur 3 ein Biegeelement 10 auf, welches senkrecht zur Substratebene auslenkbar ist. Auch hier ist das Biegeelement aus einem Silizium-on-Insulator-Schichtsystem subtraktiv gefertigt, beispielsweise aus einer Siliziumschicht 53 eines solchen Schichtsystems. Ähnlich wie in Figur 1 ist das Bauteil nach oben hin durch ein erstes Decksubstrat 100 abgedeckt, welches im Bereich des Biegeelements eine Ausnehmung aufweist und dort eine erste Steuerelektrode 110 und einen ersten Gegenkontakt 120 (oder ein Paar solcher Gegenkontakte) trägt. Das Biegeelement 1 weist einen ersten Schaltkontakt 11 auf, welcher bei Auslenkung nach oben mit dem wenigstens einen Gegenkontakt in Verbindung gebracht werden kann. Die Auslenkung kann auch hier durch eine Spannungsbeaufschlagung der Steuerelektrode 110 bewirkt werden.

[0042] Im Unterschied zum Schaltelement der Figur 1 sind hier allerdings die erste Siliziumschicht und die erste Oxidschicht des SOI-Schichtsystems von der Unterseite des Bauteils entfernt worden. Das Bauteil ist hier stattdessen durch ein zweites Decksubstrat 200 abgedeckt, welches analog zum ersten Decksubstrat 100 ausgebildet und also ebenfalls im Wesentlichen aus Glas sein kann. Dieses zweite Decksubstrat ist in einem Waferbond-Schritt durch flächige Verbindung mit den verbleibenden Schichten des SOI-Schichtsystems (hier der Siliziumschicht 53) verbunden worden. Durch diese flächige Verbindung ergibt sich auch eine Kapselung des Bauteils nach unten hin. Die flächige Verbindung ist im gezeigten Ausschnitt lediglich in der unmittelbaren Umgebung des Biegeelements 10 unterbrochen, da hier das zweite Decksubstrat 200 eine Ausnehmung aufweist, welche zusammen mit der entsprechenden Ausnehmung des ersten Decksubstrats einen übergeordneten Hohlraum 300 bildet, in dem das Biegeelement 10 bewegt werden kann.

[0043] Wesentlich im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung ist, dass auch das zweite Decksubstrat 200 im Bereich des Biegeelements 10 eine Steuerelektrode aufweist. Diese zweite Steuerelektrode ist hier mit 210 bezeichnet. So kann durch Spannungsbeaufschlagung der beiden Steuerelektroden 110 und 210 (entweder gleichzeitig oder auch im Wechsel) eine Bewegung des Biegeelements in zwei gegenüberliegende Auslenkungsrichtungen r1 und r2 bewirkt

werden. Diese Bewegung kann dabei wesentlich präziser gemäß einer gewünschten Kennlinie gesteuert werden als dies mit nur einer Steuerelektrode beim herkömmlichen Schaltelement möglich ist.

[0044] Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Elementen und Funktionalitäten kann das Schaltelement der Figur 3 weitere Merkmale aufweisen, welche jedoch im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung als optional anzusehen sind und diese nur besonders vorteilhaft weiterbilden: So kann das Biegeelement auf seiner Unterseite (also gegenüberliegend zum ersten Schaltkontakt) einen zweiten Schaltkontakt 21 aufweisen. Außerdem kann das zweite Decks substrat 200 im entsprechenden Bereich ein oder mehrere zweite Gegenkontakte 220 aufweisen, welche bei einer Auslenkung des Biegeelements nach unten mit dem zweiten Schaltkontakt 21 in elektrisch leitende Verbindung gebracht werden können. Bei dieser Ausführungsvariante ist durch das Schaltelement ein Wechselschalter gebildet, welcher zwischen einem ersten Last-Schaltkreis und einem zweiten Last-Schaltkreis umschalten kann. Der erste Last-Schaltkreis ist geschlossen, wenn der erste Schaltkontakt 11 mit dem wenigstens einen ersten Gegenkontakt 120 in Verbindung ist, und er zweite Last-Schaltkreis ist geschlossen, wenn der zweite Schaltkontakt 21 mit dem wenigstens einen zweiten Gegenkontakt 220 in Verbindung ist.

[0045] Die Wahl der Materialien für die einzelnen Schichten und Elemente kann beispielsweise analog zur bereits zitierten DE102017215236A1 ausgestaltet sein. Auch die Schichtdicken und übrigen Eigenschaften können analog zu den dortigen Ausführungsformen ausgebildet sein. Ebenso kann die Ausgestaltung des Fußbereichs des Biegeelements abweichend von der hier dargestellten vereinfachten Form analog, wie in der DE102017215236A1 oder auch der noch unveröffentlichten europäischen Anmeldung 20182568.4 realisiert sein.

[0046] Auch für das Herstellungsverfahren für das erfindungsgemäße Schaltelement wird auf die beiden im vorigen Absatz zitierten Patentanmeldungen Bezug genommen. Das erfindungsgemäße Herstellungsverfahren erfolgt zunächst analog zu den dort beschriebenen Verfahrensschritten und weicht erst nach der Verbindung des ersten Decks substrats 100 mit dem SOI-Schichtsystem 50 von dem dortigen Herstellungsverfahren ab. Figuren 4 bis 9 zeigen eine Abfolge von ausgewählten Prozessstadien für ein beispielhaftes Herstellungsverfahren gemäß der vorliegenden Erfindung. So zeigt Figur 4 ein Zwischenstadium bei der Herstellung des Schaltelements der Figur 3, welches weitgehend in analoger Prozessführung wie bei den Figuren 1 bis 13 der DE102017215236A1 hergestellt wurde. Ein wesentlicher Unterschied zum dortigen Verfahren besteht lediglich darin, dass die beiden untenliegenden Schichten 51 und 52 des SOI-Schichtsystems 50 hier noch vollflächig erhalten sind und nicht wie in der dortigen Figur 13 im Bereich des Biegebalkens geöffnet wurden. Dieser vom Bauteil der dortigen Figur 13 abweichende Zustand kann dadurch erreicht werden, dass das SOI-Schichtsystem in einem früheren Prozessstadium, welches der dortigen Figur 5 entspricht, mit dem bis zum Stadium der dortigen Figur 12 prozessierten Decks substrat (entspricht dem dortigen Deckelwafer 200) in einem ersten Waferbond-Schritt flächig verbunden wird. Das Biegeelement 10 ist in diesem Prozessstadium also bereits innerhalb der Schicht 53 subtraktiv gefertigt, aber noch nicht von seiner flächigen Anbindung an die benachbarten Schichten 51 und 52 freigestellt.

[0047] Weitere, eher unwesentliche Unterschiede zwischen dem Prozessstadium der hier gezeigten Figur 4 und dem Bauteil der dortigen Figur 13 bestehen in dem dort etwas komplexer ausgeführten Fußbereich des Biegeelements und in weiteren optionalen zusätzlichen Elementen wie z.B. der dortigen Schicht 240. Diese alternativen Ausgestaltungen und Detail-Merkmale können jedoch analog auch bei dem Schaltelement der vorliegenden Erfindung realisiert werden.

[0048] Ausgehend vom Prozessstadium der Figur 4 werden nun die weiteren Prozessschritte nach einem Beispiel des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens beschrieben. Beispielhaft dafür sind in den Figuren 5 bis 9 einige weitere ausgewählte Stadien gezeigt. So ist in Figur 5 die untere Siliziumschicht 51 zumindest weitgehend entfernt worden. Diese Entfernung kann beispielsweise durch chemisch-mechanisches Polieren oder durch ein Ätzverfahren oder eine Kombination dieser Methoden realisiert werden. Dabei verbleibt die dünne erste Oxidschicht 52 jedoch noch weitgehend als Restschicht im Bauteil. Auch das eventuelle Verbleiben einer dünnen Restschicht der Siliziumschicht 51 soll dabei nicht ausgeschlossen sein. In dem zwischen Figur 5 und Figur 6 liegenden Schritt wird dann diese Restschicht im Endbereich des Biegeelements lokal geöffnet, so dass eine Ausnehmung 52a in der ersten Oxidschicht 52 entsteht. Diese lokale Öffnung kann beispielsweise durch lithographische Strukturierung und einen Ätzprozess erfolgen. Im Bereich dieser Öffnung 52a kann anschließend die Abscheidung einer metallischen Schicht erfolgen, wodurch hier der zweite Schaltkontakt 21 gebildet wird. Dies entspricht dem Stadium der Figur 7. Anschließend kann die Restschicht 52 entfernt werden (beispielsweise wiederum durch einen Ätzschritt), wodurch das in Figur 8 gezeigte Stadium erreicht wird. Schließlich wird in einem nachfolgenden Schritt das so heruntergedünnte Bauteil in einem zweiten Waferbond-Schritt mit dem zweiten Decks substrat 200 flächig verbunden. Zuvor wurde dieses zweite Decks substrat analog zum ersten Decks substrat 100 mit zumindest einer Ausnehmung 205 versehen und dort mit der Steuerelektrode 210 und dem optionalen zweiten Gegenkontakt (oder einem entsprechenden Paar von Gegenkontakten) versehen, analog zur Prozessierung des ersten Decks substrats 100 und somit zum "Glaswafer" der DE102017215236A1. Allerdings ist die Strukturierung bzw. Erzeugung des zweiten Schaltkontakts entsprechend den Figuren 6 und 7 im Rahmen der vorliegenden Erfindung als optional anzusehen. Wesentlich ist dagegen die beidseitige Abdeckung des Bauelements durch zwei Decks substrate 100, 200 mit ihren entsprechenden Ausnehmungen 105 und 205 sowie die Tatsache, dass in jedem dieser beiden Decks substrate 100 und 200 eine zugeordnete Steuerelektrode 110 bzw. 210 gebildet ist.

[0049] In den Figuren 10 bis 12 sind schematische Aufsichten für eine beispielhafte Realisierung einer Kontakt-Topologie gezeigt, mit welcher insbesondere die Funktionalität eines Wechselschalters erreicht werden kann. Die Figuren zeigen dabei jeweils einen Blick entlang der Dickenrichtung d, wobei jeweils derselbe Ausschnitt, aber unterschiedliche Teilebenen (teilweise überlagert) dargestellt sind. So zeigt Figur 10 das Biegeelement 10 in seinem Endbereich zusammen mit dem darauf angeordneten ersten Schaltkontakt 11. Außerdem zeigt diese Figur die im Bereich des ersten Decksubstrats, also darüberliegend angeordneten ersten Gegenkontakte. In diesem Beispiel liegt ein Paar von ersten Gegenkontakten vor, nämlich ein erster Eingangskontakt 121 und ein erster Ausgangskontakt 122. Diese beiden Kontakte 121 und 122 werden bei einer entsprechenden Auslenkung des Biegebalkens zum ersten Decksubstrat hin elektrisch leitend mit dem ersten Schaltkontakt 11 und somit auch miteinander verbunden.

[0050] Figur 11 zeigt dasselbe Biegeelement 10 zusammen mit dem zweiten Schaltkontakt 21, welcher auf der dem zweiten Decksubstrat 200 zugewandten Oberfläche des Biegeelements angeordnet ist. Außerdem zeigt diese Figur die im Bereich des zweiten Decksubstrats, also darunterliegend angeordneten zweiten Gegenkontakte. Auch hier liegt ein Paar von zweiten Gegenkontakten vor, nämlich ein zweiter Eingangskontakt 221 und ein zweiter Ausgangskontakt 222. Die Figuren 10 und 11 zeigen außerdem ein Via 400, durch welches die beiden Eingangskontakte 121 und 221 über die Bauteil-Ebenen hinweg zu einem übergeordneten Eingang verbunden sind. Abhängig von der Auslenkungsposition des Biegeelements kann also der Eingang alternativ entweder mit einem ersten Ausgang oder mit einem zweiten Ausgang verbunden werden. In der zentralen Stellung des Biegeelements ist der Eingang dagegen mit keinem der beiden Ausgänge verbunden. Somit ist ein Wechselschalter realisiert, welcher wahlweise auf den ersten Ausgang, den zweiten Ausgang oder auf "OFF" geschaltet werden kann. Figur 12 zeigt schließlich eine Überlagerung der in den Figuren 10 und 11 bereits dargestellten Elemente, durch welche dieses Umschalten von einem gemeinsamen Eingang (die miteinander verbundenen Kontakte 121 und 221) auf zwei alternative Ausgänge (122 oder 222) verdeutlicht wird.

[0051] Figur 13 zeigt schließlich eine schematische Querschnittsdarstellung eines Schaltelements 1 nach einem weiteren Beispiel der Erfindung. Der Bereich um das Biegeelement 10 mit seinen umgebenden Steuerelektroden und Kontakten ist analog zum Beispiel der Figur 3 ausgestaltet. Das Beispiel der Figur 13 unterscheidet sich im Wesentlichen dadurch, dass die beiden Steuerelektroden 110 und 120 hier durch zwei durch die beiden Decksubstrate 100 und 200 hindurchgeführte Vias 400 mit an der Oberfläche dieser Decksubstrate liegenden Kontaktpunkten verbunden sind. Auch der zweite Gegenkontakt 220 ist hier durch ein solches Via 400 mit einem Kontaktpunkt im Bereich des gegenüberliegenden Decksubstrats 100 verbunden. In ähnlicher Weise können auch der erste Gegenkontakt bzw. optional vorliegende, hier nicht dargestellte weitere Kontakte (z.B. 121, 122, 221, 222 wie beim Beispiel der Figur 12) durch ein entsprechendes Via mit einem außenliegenden Kontaktpunkt verbunden sein. Prinzipiell ist es zur Kontaktierung der einzelnen Kontakte und Elektroden auch ausreichend, wenn solche Vias nur durch eines der beiden Decksubstrate an die außenliegende Oberfläche geführt sind.

Bezugszeichenliste

[0052]

1	MEMS-Schaltelement
10	Biegeelement
10a	Fußbereich
10b	mittlerer Bereich
10c	freies Ende
11	erster Schaltkontakt
21	zweiter Schaltkontakt
50	SOI-Schichtsystem
51	erste Siliziumschicht
52	erste Oxidschicht
52a	Öffnung der ersten Oxidschicht
53	zweite Siliziumschicht
100	erstes Decksubstrat
105	Ausnehmung des ersten Decksubstrats
110	erste Steuerelektrode
120	erste Gegenkontakte (erstes Paar von Lastkontakten)
121	erster Eingangskontakt
122	erster Ausgangskontakt
200	zweites Decksubstrat
205	Ausnehmung des zweiten Decksubstrats
210	zweite Steuerelektrode

220	zweite Gegenkontakte (zweites Paar von Lastkontakten)
221	zweiter Eingangskontakt
222	zweiter Ausgangskontakt
300	übergeordneter Hohlraum
5 400	Via
d	Dickenrichtung
p0	zentrale Stellung
r1	erste Auslenkungsrichtung
r2	zweite Auslenkungsrichtung

Patentansprüche

1. Mikroelektromechanisches Schaltelement (1), umfassend

- ein Biegeelement (10) mit wenigstens einem an dem Biegeelement angeordneten ersten Schaltkontakt (11), wobei das Biegeelement (10) aus einer zentralen Stellung (p0) heraus in zwei gegenüberliegende Auslenkungsrichtungen (r1,r2) auslenkbar ist,
- sowie ein erstes Decksubstrat (100) und ein zweites Decksubstrat (200),
- wobei die beiden Decksubstrate (100, 200) so ausgebildet sind, dass das Biegeelement (10) in einem Hohlraum (300) zwischen den beiden Decksubstraten (100, 200) angeordnet ist,
- und wobei jedes der beiden Decksubstrate (100, 200) im Bereich des Biegeelements (10) eine Steuerelektrode (110,210) aufweist, mit welcher eine Auslenkung des Biegeelements (10) beeinflusst werden kann.

2. Schaltelement (1) nach Anspruch 1, bei welchem die erste Auslenkungsrichtung (r1) des Biegeelements (10) einer Biegung in Richtung des ersten Decksubstrats (100) entspricht und die zweite Auslenkungsrichtung (r2) einer Biegung in Richtung des zweiten Decksubstrats (200) entspricht.

3. Schaltelement (1) nach einem der Ansprüche 1 oder 2, bei welchem das Biegeelement (10)

- durch eine Spannungsbeaufschlagung der Steuerelektrode (110) des ersten Decksubstrats (100) in Richtung des ersten Decksubstrats (r1) auslenkbar ist
- und durch eine Spannungsbeaufschlagung der Steuerelektrode (210) des zweiten Decksubstrats (200) in Richtung des zweiten Decksubstrats (r2) auslenkbar ist.

4. Schaltelement (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem das Biegeelement (10) im Wesentlichen aus einem Halbleitermaterial, insbesondere Silizium, und/oder einem Metall und/oder einem oder mehreren Dielektrika gebildet ist.

5. Schaltelement (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem die Decksubstrate (100, 200) funktional als elektrisch isolierende Decksubstrate ausgebildet sind und insbesondere im Wesentlichen aus Glas gebildet sind.

6. Schaltelement (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem der Hohlraum (300) für das Biegeelement (10) durch Ausnehmungen (105,205) in beiden Decksubstraten (100, 200) gebildet ist.

7. Schaltelement (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, welches im Bereich zwischen den beiden Decks-ubstraten (100,200) ein Silicon-on-Insulator-Schichtsystem (50) oder ein Teil (53) eines solchen Schichtsystems aufweist.

8. Schaltelement (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem das erste Decksubstrat (100) einen ersten Gegenkontakt trägt (120), welcher in einer ersten Auslenkungsstellung des Biegeelements (10) mit einem ersten Schaltkontakt (11) des Biegeelement (10) kontaktierbar ist.

9. Schaltelement (1) nach Anspruch 8, bei welchem außerdem das zweite Decksubstrat (200) einen zweiten Gegenkontakt (220) trägt, welcher in einer zweiten Auslenkungsstellung des Biegeelements (10) mit einem zweiten Schaltkontakt (21) des Biegeelements (10) kontaktierbar ist.

10. Schaltelement (1) nach Anspruch 9, welches als Wechselschalter ausgebildet ist.

11. Vorrichtung mit einem mikroelektromechanischen Schaltelement (1) oder einem Array von mehreren mikroelektromechanischen Schaltelementen (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, welche neben dem wenigstens einen mikroelektromechanischen Schaltelement (10) ein oder mehrere dazu elektrisch in Serie oder parallel geschaltete Halbleiterelemente aufweist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 11 oder 12, welche als Schaltgerät, als Umrichter bzw. Inverter, als Logikschaltung und/oder als logisches Gatter ausgebildet ist.

14. Verfahren zur Herstellung eines Schaltelements (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei welchem

- das Biegeelement (10) durch subtraktive Fertigung aus wenigstens einer flächigen Schicht (53) gebildet und anschließend freigestellt wird

- und diese, das Biegeelement (10) ausbildende Schicht (53) bzw. ein diese Schicht (53) enthaltendes Schichtsystem durch insgesamt zwei Waferbond-Schritte mit dem ersten Decks substrat (100) und dem zweiten Decks substrat (200) verbunden wird.

15. Verfahren nach Anspruch 14, bei welchem das Biegeelement (10) durch subtraktive Fertigung aus einem Silicon-on-Insulator-Schichtsystem (50) erhalten wird.

FIG 1

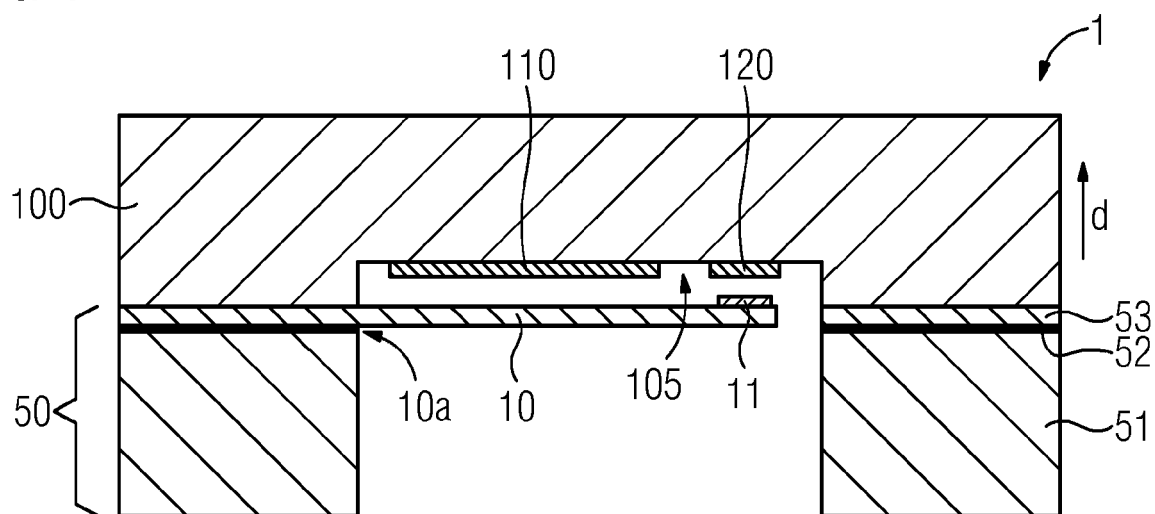


FIG 2

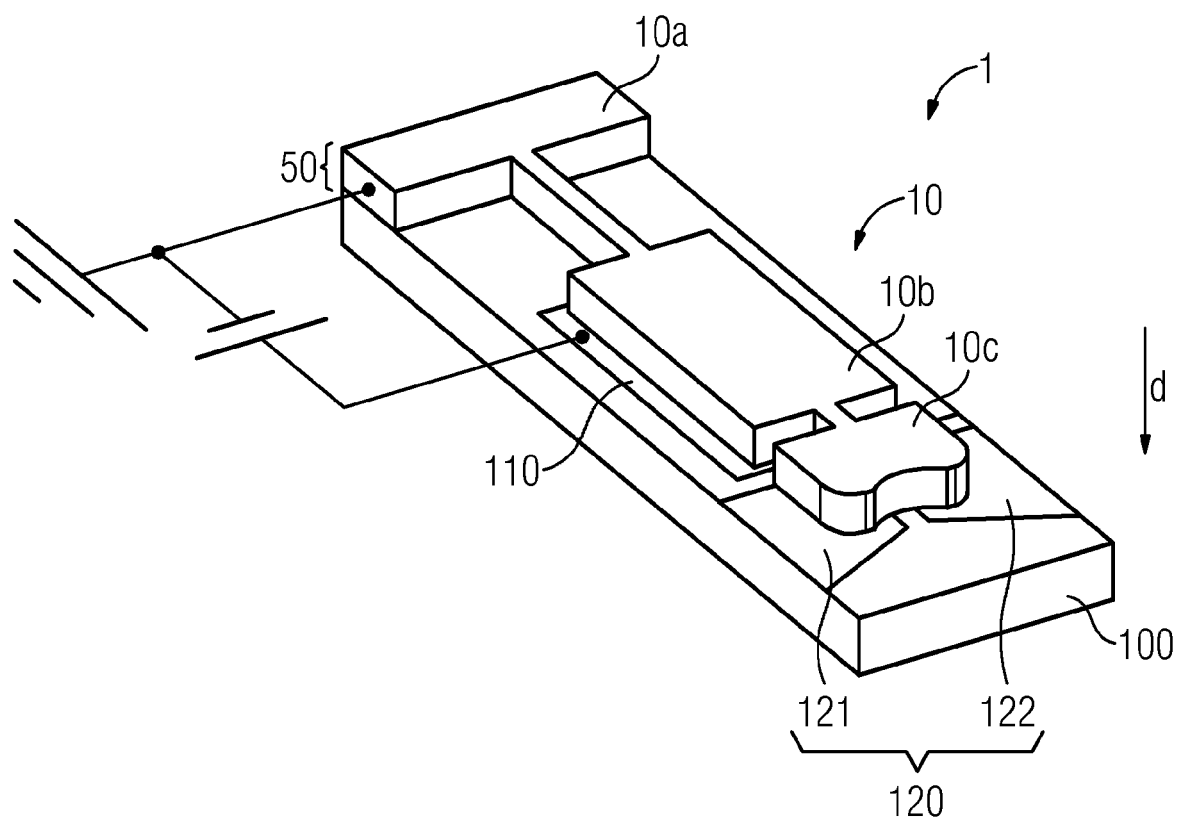


FIG 3

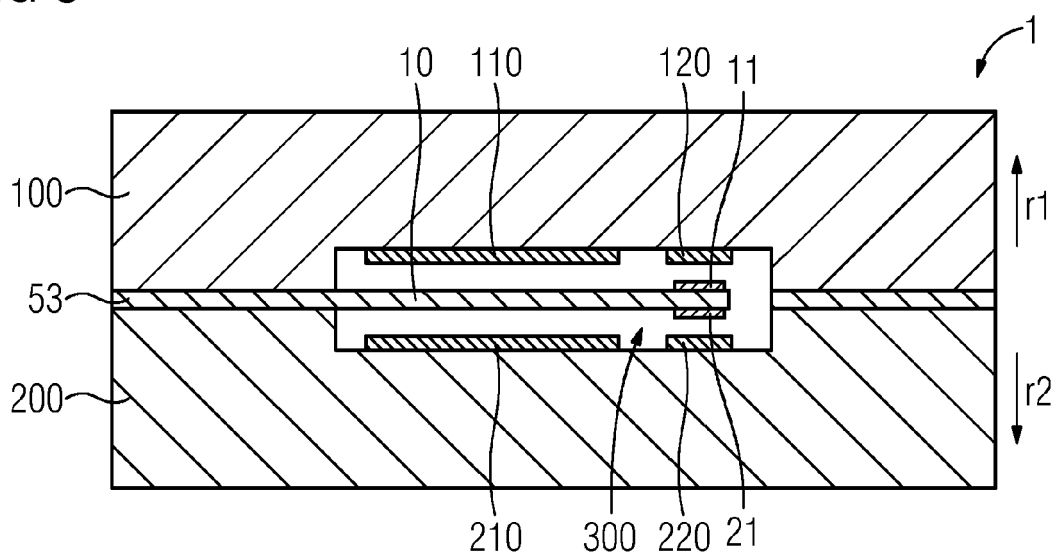


FIG 4

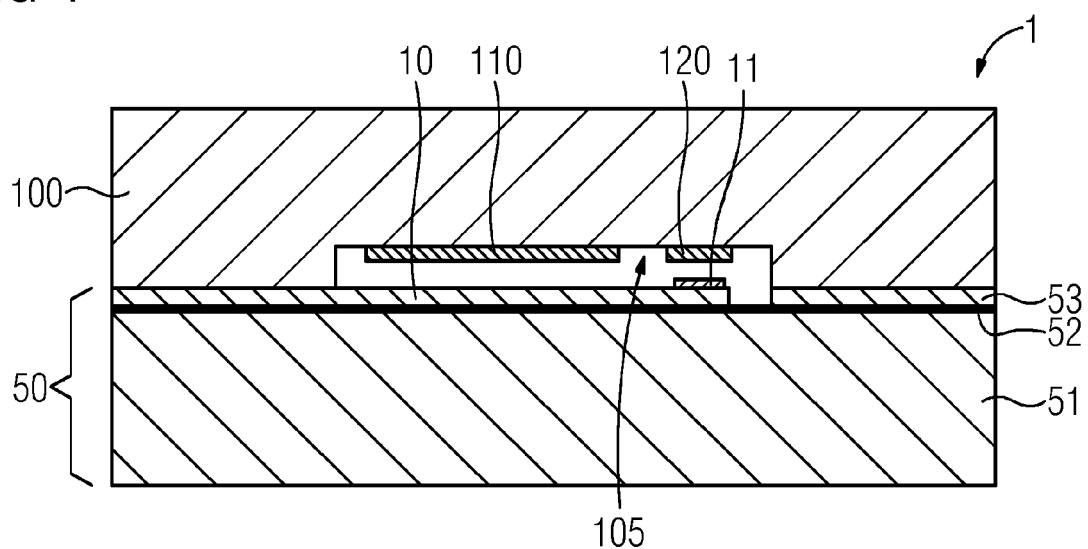


FIG 5

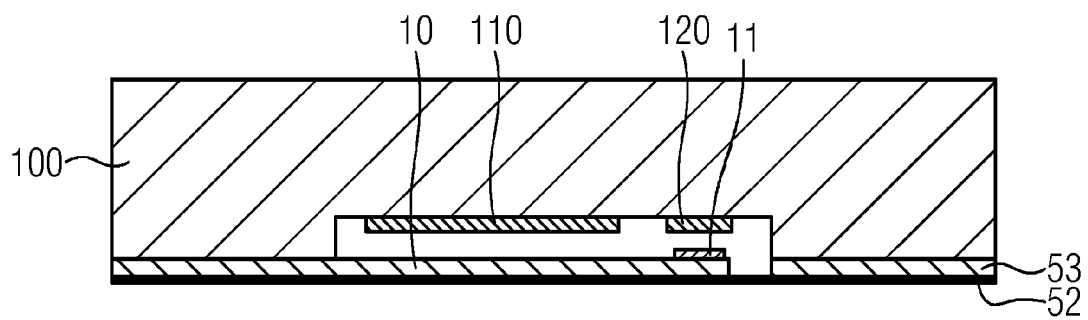


FIG 6

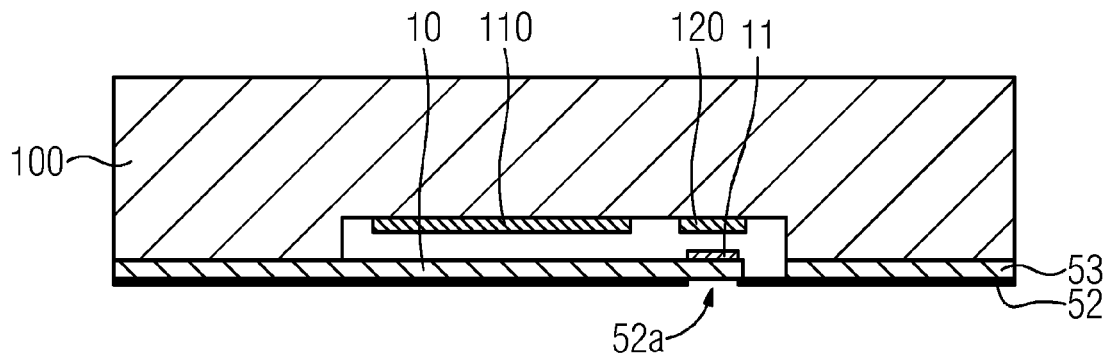


FIG 7

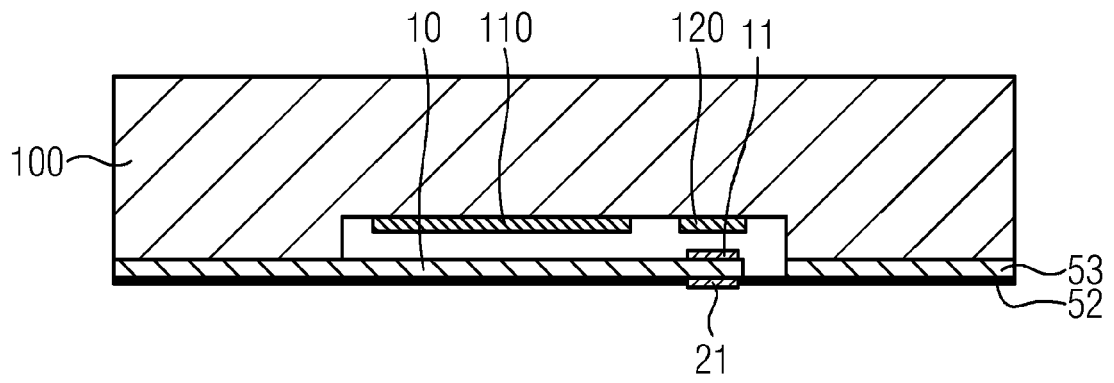


FIG 8

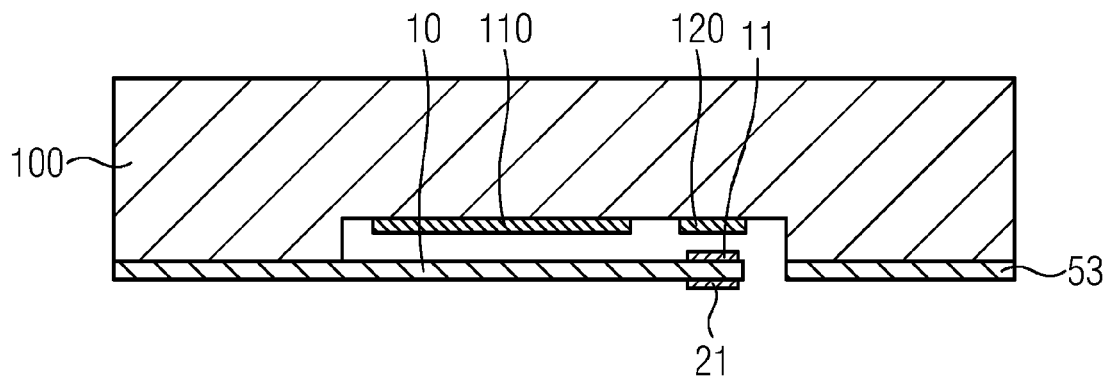


FIG 9

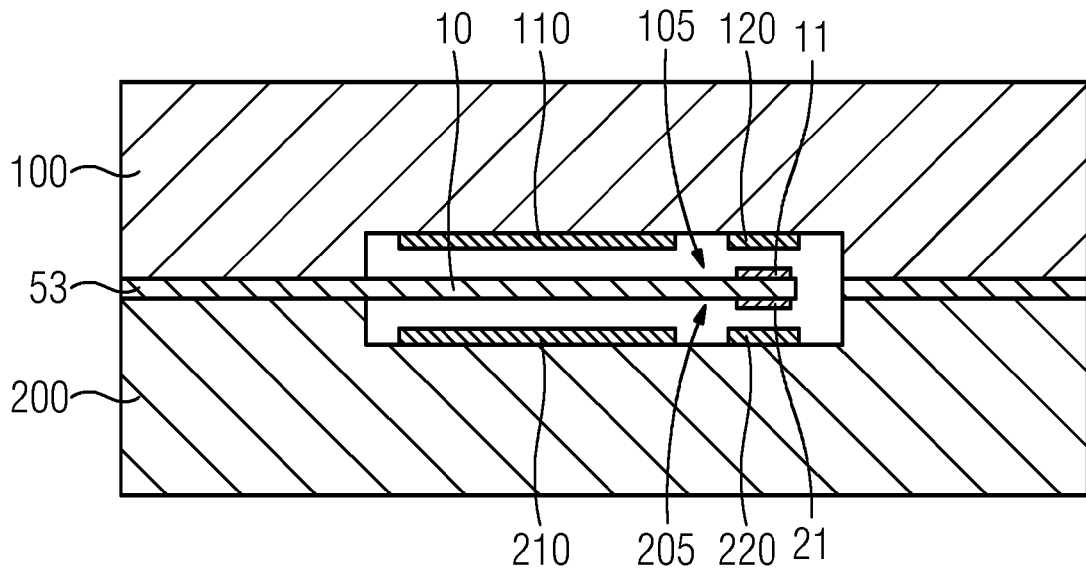


FIG 10

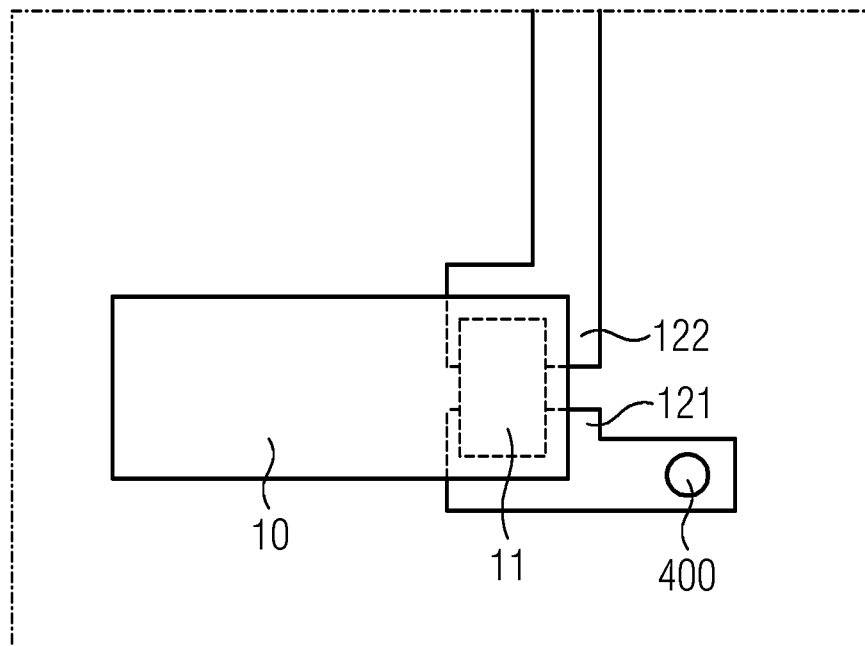


FIG 11

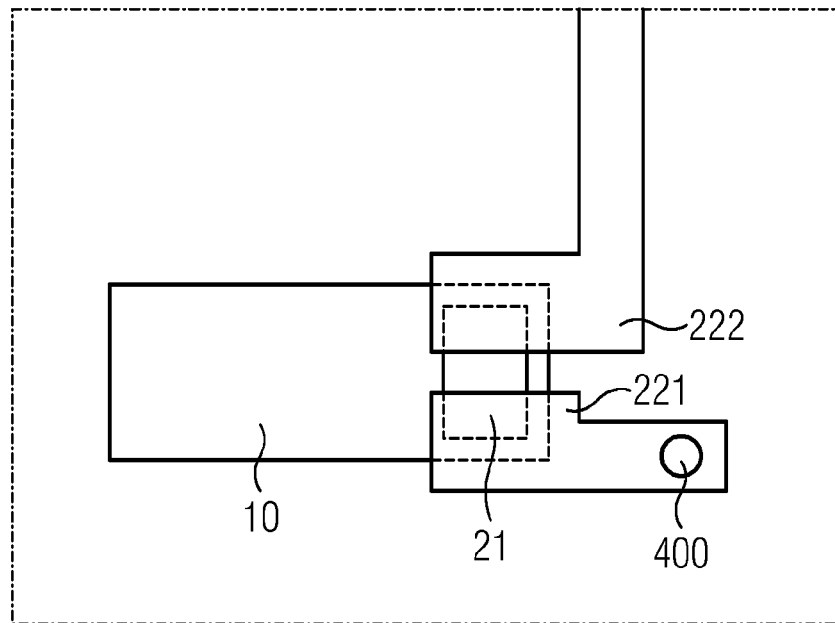


FIG 12

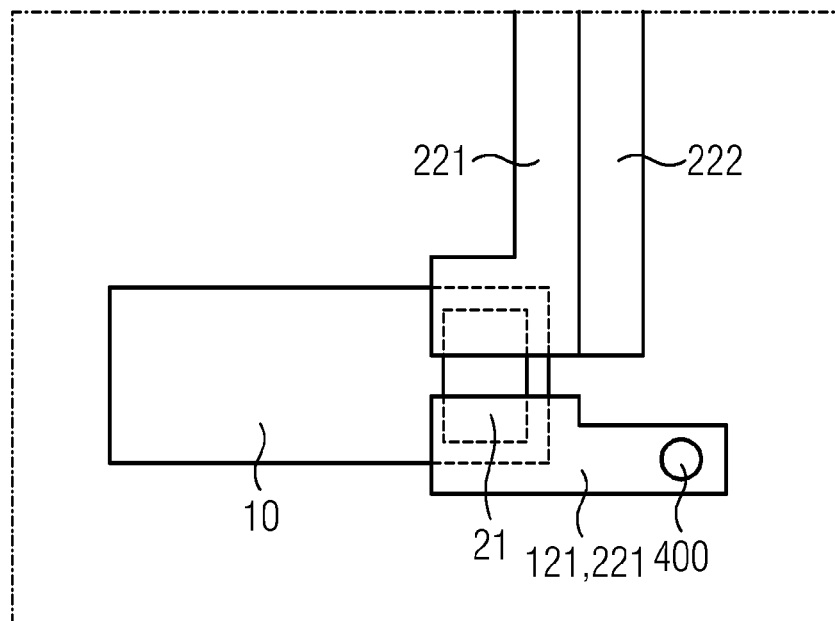
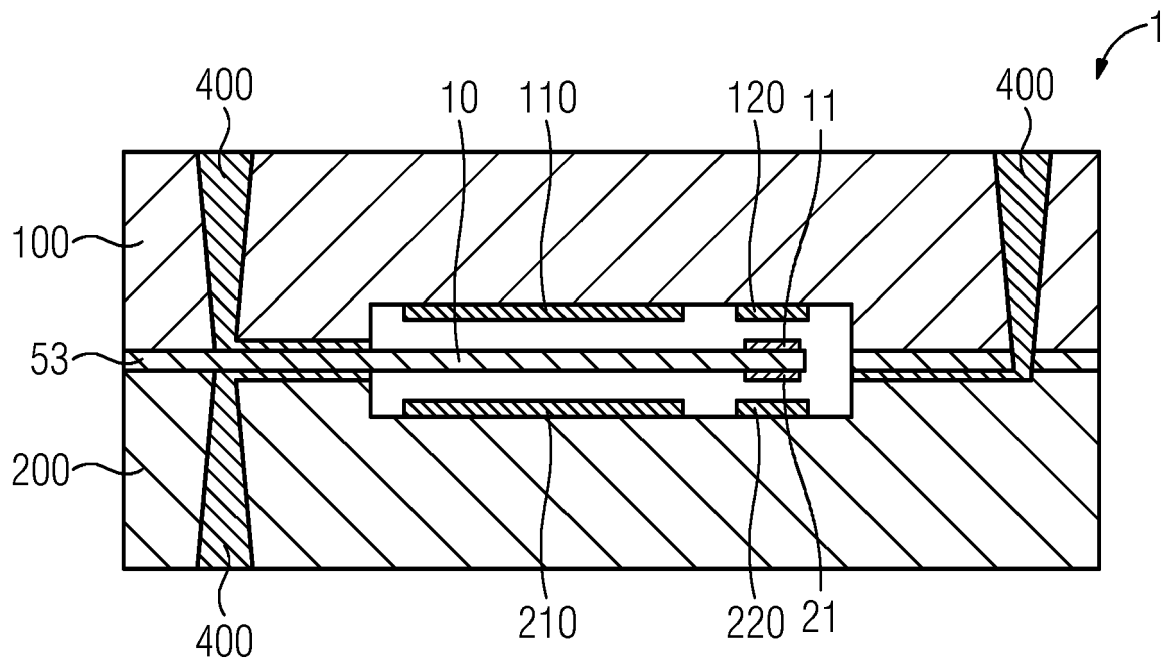


FIG 13





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 20 20 9398

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	WO 99/43013 A1 (SIEMENS AG [DE]; SCHLAAK HELMUT [DE] ET AL.) 26. August 1999 (1999-08-26)	1-4,6, 8-10,14	INV. H01H1/00 H01H59/00
Y	* Seiten 6-13; Abbildungen 1-12 *	5,7, 11-13,15	

X	WO 99/42843 A1 (AKEBONO BRAKE IND [JP]; ESASHI MASAYOSHI [JP] ET AL.) 26. August 1999 (1999-08-26)	1-4,14	
Y	* Absätze [0021] - [0054]; Abbildungen 1-10 *	5,7, 11-13,15 6,8-10	

Y	WO 2004/015728 A1 (XCOM WIRELESS INC [US]; HYMAN DANIEL J [US] ET AL.) 19. Februar 2004 (2004-02-19)	5	
A	* Absatz [0042]; Abbildungen 1-3 *	1-4,6-15	

Y	WO 2007/024732 A2 (INOVATIVE MICRO TECHNOLOGY [US]; WALLIS ANDREW D [US] ET AL.) 1. März 2007 (2007-03-01)	7,15	
A	* Absätze [0006] - [0008]; Abbildung 2 *	1-6,8-14	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) H01H

Y	US 2019/172672 A1 (BAUER ANNE [DE] ET AL) 6. Juni 2019 (2019-06-06)	11-13	
A	* Absätze [0001] - [0023]; Abbildungen 1-5 *	1-10,14, 15	

Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 4. Mai 2021	Prüfer Rucha, Johannes
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 20 20 9398

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

04-05-2021

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 9943013 A1	26-08-1999	DE 19807214 A1	16-09-1999
		EP 1057196 A1	06-12-2000
		TW 434617 B	16-05-2001
		WO 9943013 A1	26-08-1999
WO 9942843 A1	26-08-1999	DE 69928061 T2	20-04-2006
		EP 0997737 A1	03-05-2000
		JP H11237402 A	31-08-1999
		US 6230564 B1	15-05-2001
		WO 9942843 A1	26-08-1999
WO 2004015728 A1	19-02-2004	AU 2002368165 A1	25-02-2004
		EP 1527465 A1	04-05-2005
		JP 2005536013 A	24-11-2005
		WO 2004015728 A1	19-02-2004
WO 2007024732 A2	01-03-2007	US 2007236313 A1	11-10-2007
		WO 2007024732 A2	01-03-2007
US 2019172672 A1	06-06-2019	CN 109564839 A	02-04-2019
		DE 102016215001 A1	15-02-2018
		EP 3469619 A1	17-04-2019
		US 2019172672 A1	06-06-2019
		WO 2018028947 A1	15-02-2018

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 102017215236 A1 [0002] [0009] [0023] [0036] [0045] [0046] [0048]
- WO 2018028947 A1 [0002] [0030]
- EP 20182568 [0027] [0036]
- DE 20182568 [0045]