



(11) **EP 3 236 710 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
25.10.2017 Patentblatt 2017/43

(51) Int Cl.:
H05B 6/54 (2006.01)
H05B 6/62 (2006.01)
H05B 6/60 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **17167431.0**

(22) Anmeldetag: **20.04.2017**

(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:
MA MD

(30) Priorität: **22.04.2016 DE 102016107550**

(71) Anmelder:
• **Roland, Ulf**
04158 Leipzig (DE)
• **Kraus, Markus**
04435 Schkeuditz (DE)
• **Trommler, Ulf**
04571 Rötha (DE)
• **Holzer, Frank**
04103 Leipzig (DE)

• **Hoyer, Christian**
04288 Leipzig (DE)

(72) Erfinder:
• **Roland, Dr. Ulf**
04158 Leipzig (DE)
• **Kraus, Dr. Markus**
04318 Leipzig (DE)
• **Trommler, Dr. Ulf**
04571 Rötha (DE)
• **Holzer, Dr. Frank**
04299 Leipzig (DE)
• **Hoyer, Christian**
04229 Leipzig (DE)
• **Kopinke, Prof. Dr. Frank-Dieter**
04109 Leipzig (DE)

(74) Vertreter: **Gulde & Partner**
Patent- und Rechtsanwaltskanzlei mbB
Wallstraße 58/59
10179 Berlin (DE)

(54) **VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR THERMISCHEN BEHANDLUNG VON FESTSTOFFEN**

(57) Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur thermischen Behandlung von Feststoffen.

Die Vorrichtung (100) umfasst eine auf einer Oberfläche (A) eines Feststoffs (10) anordenbare binäre Elektrodenanordnung (20) mit jeweils mindestens zwei elektrisch voneinander isolierten Elektroden (22, 24). Die Elektrodenstruktur (20) ist elektrisch leitend mit einer Hochfrequenz-Spannungsquelle (30) verbunden, die dazu ausgebildet ist, an die Elektrodenanordnung (20) eine Hochfrequenz-Spannung mit einer Frequenz zwischen 100 kHz und 50 MHz anzulegen. Die Vorrichtung (100) umfasst eine Haltevorrichtung (42), welche dazu ausgebildet ist, eine translatorische Bewegung der Elektrodenanordnung (20) entlang der Oberfläche (A) eines Feststoffs (10) zu ermöglichen. Das Verfahren ist dadurch charakterisiert, dass durch Anlegen einer Hochfrequenz-Spannung an die Elektroden (22, 24) der Elektrodenanordnung (20) ein elektrisches Wechselfeld in dem Feststoff (10) erzeugt wird und durch dieses Wechselfeld eine Erwärmung des Feststoffes (10) erfolgt.

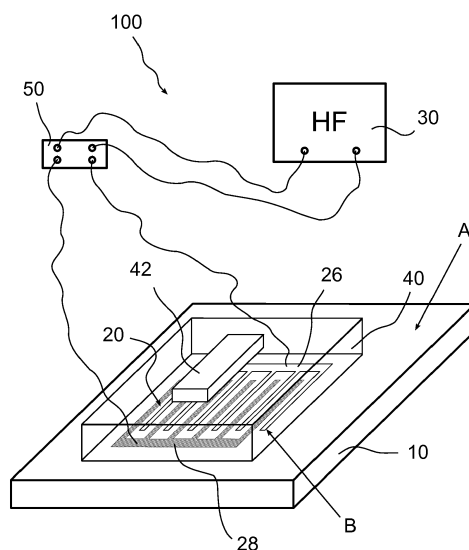


Fig. 1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur thermischen Behandlung von Feststoffen. Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren und eine Vorrichtung zur effizienten, direkt volumenbezogenen und hinsichtlich ihrer Temperaturverteilung gesteuerten thermischen Behandlung von Feststoffen mittels Hochfrequenzenergie. Dies kann u. a. für einen chemikalienfreien Holzschutz, die Trocknung oder die Dekontamination von Feststoffen eingesetzt werden.

Technologischer Hintergrund der Erfindung

[0002] Der Ablauf vieler technischer Prozesse kann durch die Temperatur wesentlich beeinflusst werden, da eine Vielzahl von physikalischen und chemischen Parametern mehr oder weniger stark temperaturabhängig sind. Im Kontext des Bauwesens und der Bausanierung betrifft dies unter anderem die Trockenlegung von Gebäuden, den Austrag von Chemikalien aus Baustoffen oder die thermische Bekämpfung von Holzschädlingen. Im letzteren Fall ist das Erreichen einer Letaltemperatur von ca. 55 °C eine Alternative zum Einsatz von toxischen Chemikalien als Holzschutzmittel [C. Hoyer et al., Chem. Ing. Technik 86 (2014) 1187]. In Wohn- und Nutzräumen wird der Qualität der Raumluft eine zunehmende Bedeutung beigemessen. Hier ist der Einsatz von Chemikalien oft kritisch zu sehen, wodurch thermische Behandlungsmethoden an Bedeutung gewinnen.

[0003] Aus der Vielzahl von Problemstellungen im Bauwesen, bei der Bausanierung und in anderen Anwendungsbereichen konzentriert sich das Anwendungspotenzial der Erfindung auf die Behandlung von mehr oder weniger ausgedehnten flächigen Materialien aus Feststoffen, die nur einseitig zugänglich sind oder die nur mit großem Aufwand beidseitig zugänglich wären. Besonders bevorzugt sind dabei Materialdicken von bis zu 10 cm. Exemplarisch seien hier Parkett- und andere Holzfußböden, Wandtäfelungen und andere Wandverkleidungen oder Estrichböden genannt. Oft lässt sich ein Sanierungsbedarf auf diese Baustrukturen begrenzen, so dass ein Bedarf an adäquaten Verfahren zur Behandlung von relativ dünnen, flächig ausgedehnten Feststoffstrukturen besteht, die es ermöglichen, beispielsweise Holzschädlinge thermisch zu bekämpfen oder Wasser und Chemikalien aus diesen Materialien zu entfernen. Für eine effiziente und schonende Behandlung ist es dabei notwendig, einerseits schnell möglichst homogene Temperaturverteilungen zu erzielen und andererseits die Erwärmung genau zu kontrollieren, um Materialschädigungen durch lokale Überhitzung zu vermeiden. Für sensible Oberflächenbeschichtungen wie Lacke oder Furniere ist es oft wünschenswert, die Oberflächentemperatur niedrig, gegebenenfalls sogar niedriger als die Volumentemperatur in der Feststoffmatrix zu halten. Die vorliegende Erfindung hat das Ziel, ein entsprechendes Verfahren auf Basis der direkten dielektrischen Erwärmung

unter Nutzung von Hochfrequenz-Energie zur Verfügung zu stellen. Die Vorrichtung erlaubt eine nicht-invasive Behandlung, was besonders auch Einsatzoptionen im Bereich des Denkmalschutzes und die Anwendung an Kunstgegenständen ermöglicht.

[0004] Nach dem Stand der Technik gibt es eine Reihe von Verfahren, die eine Erwärmung des Materialvolumens durch Wärmeleitung von der Oberfläche her ermöglichen. Genannt seien hier das Heißluftverfahren, bei dem die Oberfläche durch einen darüberstreichenen Luftstrom erwärmt wird, die Anwendung von Heizplatten oder Heizdecken oder das Infrarotverfahren, bei dem die primäre Energieabsorption praktisch ebenfalls auf die Oberfläche beschränkt ist. Die Wärmeleitung ins Innere der zu behandelnden Struktur wird vom Parameter spezifische Wärmeleitfähigkeit bestimmt, welche gerade für trockene Materialien oft gering ist, was zu langen Erwärmungszeiten führt. Grundsätzlich ist der Wärmefluss umso stärker, desto höher der Temperaturgradient, d. h. die Temperaturänderung pro Abstand, und damit desto höher die mit den genannten Verfahren eingestellte Oberflächentemperatur ist. Der Überhitzung an der Oberfläche sind jedoch aus materialtechnischen Gründen Grenzen gesetzt, zumal eine thermische Schädigung gerade dieser Sichtflächen besonders kritisch wäre. Für ausgedehnte Flächen wie beispielsweise Parkettfußböden in repräsentativen Räumen ist für die meisten Behandlungsmethoden eine sukzessive Behandlung notwendig. Dies bedeutet, dass Behandlungseinrichtungen wie Heizplatten oder IR-Strahler nach bestimmten Zeitregimes verschoben werden müssen, um die gesamte Fläche abzudecken. Eine Heißluftbehandlung der gesamten Fläche und der Räume hat hingegen den Nachteil, dass hohe Temperaturen für oft dort vorhandene andere Gegenstände (z. B. Gemälde) schädlich sind.

[0005] Um die Nachteile einer inhomogenen Temperaturverteilung, einer Überhitzung der Oberfläche und einer langsamen passiven Erwärmung des Inneren über die Wärmeleitfähigkeit zu umgehen, werden seit einiger Zeit direkte Heizverfahren wie die Anwendung von Mikrowellen (MW) [EP 1 374 676 B1] oder Radiowellen (RW) [DE 20 2010 001 410 U1] untersucht, für die eine Wärmeerzeugung im Volumen des Feststoffes charakteristisch ist. Die Erwärmung beruht auf der Wechselwirkung der eingesetzten elektromagnetischen Wellen mit Frequenzen meist im GHz- (für MW) bzw. MHz-Bereich (für RW) mit polaren Strukturen im Feststoff. Für die Mikrowellen-Erwärmung ist bei den meisten Anwendungen die Umorientierung des Wassermoleküls, das einen elektrischen Dipol darstellt, das dominierende Wirkprinzip. Durch die Interaktion des sich umorientierenden Wassermoleküls mit seiner Umgebung, die als innere Reibung beschrieben werden kann, entsteht Wärme. Aus diesem Grund lassen sich feuchte Materialien in der Regel gut mittels MW erwärmen. Für trockene Materialien ist die Methode hingegen häufig weniger geeignet. Die Temperaturprofile sind für die MW-Erwärmung meist sehr inhomogen, wodurch lokale Überhitzungen auftreten

ten. Dies ist einerseits auf die geringen Eindringtiefen der MW und andererseits auf Interferenzerscheinungen oder die Abstrahlungscharakteristiken der eingesetzten Hornantennen zurückzuführen. In der Konsequenz ist eine zwar im Vergleich zu den konventionellen Verfahren geringere, aber dennoch signifikante und oft kritische Überhitzung an verschiedenen Oberflächenpositionen zu konstatieren. Das RW-Verfahren nach dem beschriebenen Stand der Technik führt zwar zu wesentlich homogenen Temperaturprofilen, die beidseitige Anordnung von Elektroden im Hinblick auf das zu erwärmende Material führt jedoch zu Einschränkungen in der Anwendbarkeit der Methode besonders bei nur einseitig zugänglichen Strukturen, wie sie eingangs beschrieben wurden. Weitere Vorteile der Anwendung von RW gegenüber MW im beschriebenen Kontext sind die höhere Flexibilität hinsichtlich der zu erwärmenden Materialien und deren Feuchtegehalten sowie die höhere energetische Effizienz durch die Einsetzbarkeit eines elektronischen Anpassnetzwerkes. Die genannten Aspekte prädestinieren die RW-Methode für den Einsatz an flächigen, nicht zu dicken Strukturen zum Zwecke des chemikalienfreien Holzschutzes, der Trocknung oder der Dekontamination, wenn es gelingt, die Energieeinkopplung in die entsprechenden Materialien bei einseitiger Zugänglichkeit zu realisieren.

[0006] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur effizienten, direkt volumenbezogenen und hinsichtlich ihrer Temperaturverteilung gesteuerten thermischen Behandlung von Feststoffen mittels Hochfrequenzenergie zur Verfügung zu stellen, welche die die genannten Vorteile der Radiofrequenz-Erwärmung aufgreifen und dabei die beschriebenen Nachteile des Standes der Technik überwinden und eine einsatzfähige Vorrichtung bereitzustellen, die es erlaubt, die RW-Methode für die genannten Anwendungsfälle erfolgreich einzusetzen. Die noch vorhandene technologische Lücke, insbesondere hinsichtlich einer adäquat realisierbaren Elektrodenanordnung, soll durch die vorliegende Erfindung geschlossen werden. Die Nachteile des Standes der Technik sollen überwunden und eine einsatzfähige Vorrichtung bereitgestellt werden, die es erlaubt, die RW-Methode für die genannten Anwendungsfälle erfolgreich einzusetzen.

Zusammenfassung der Erfindung

[0007] Diese Aufgaben werden erfindungsgemäß durch die unabhängigen Patentansprüche gelöst. Bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen enthalten.

[0008] Die erfindungsgemäße Vorrichtung umfasst eine auf einer Oberfläche eines Feststoffs anordenbare binäre Elektrodenanordnung mit jeweils mindestens zwei elektrisch voneinander isolierten Elektroden (Elektrodenstruktur), wobei sich die Elektroden bevorzugt in einer planaren Ebene parallel zur Oberfläche des zu behandelnden Feststoffes befinden. Die Elektrodenstruktur

ist elektrisch leitend mit einer Hochfrequenz-Spannungsquelle verbunden, die dazu ausgebildet ist, an die Elektrodenanordnung eine Hochfrequenz-Spannung mit einer Frequenz zwischen 100 kHz und 50 MHz anzulegen.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung ist so ausgebildet, dass innerhalb einer unter der Vorrichtung angeordneten Struktur (Feststoff) ein hochfrequentes elektrisches Feld etabliert wird. Die erfindungsgemäße Vorrichtung umfasst eine Haltevorrichtung, welche dazu ausgebildet ist, eine translatorische Bewegung der Elektrodenanordnung entlang der Oberfläche eines Feststoffs zu ermöglichen.

[0009] Weiterhin ist es bevorzugt, dass die Elektroden als ineinandergreifende kammartige Strukturen ausgebildet sind, wobei jede der Strukturen eine Vielzahl von Einzelelektroden (Finger) aufweist, die über einen gemeinsamen Steg miteinander verbunden sind. In diesem Fall ist es bevorzugt, dass die Längsachsen der Einzelelektroden parallel oder im Wesentlichen parallel zueinander verlaufen. Weiter ist es bevorzugt, dass die Längsachsen der Stege parallel oder im Wesentlichen parallel zueinander verlaufen.

[0010] Es handelt sich um eine Vorrichtung zur effizienten thermischen Behandlung im Volumen durch eine auf der Oberfläche der zu erwärmenden Struktur angeordnete binäre Elektrodenstruktur zur Einspeisung von Hochfrequenz-Energie in vorwiegend flächig ausge dehnte Festkörper, welche mit einer Hochfrequenz-Spannungsquelle, die Spannungen mit einer Frequenz im Bereich zwischen 100 kHz und 50 MHz erzeugt, elektrisch leitend verbunden ist, und die ein dreidimensionales elektrisches Feld außerhalb der Elektroden ebene im zu behandelnden Festkörper erzeugt, das zu einer Erwärmung im Volumen führt. Elektroden einer Polarität können auch zu Gruppen verbunden werden, wobei dann zwischen den Einzelelektroden eine Kontaktierung erfolgt.

[0011] Unter einer solchen binären Elektrodenanordnung ist dabei eine zweiteilige Anordnung von einzelnen Elektroden zu zwei Elektrodengruppen zu verstehen. Die Elektroden der einzelnen Gruppen sind dabei jeweils elektrisch leitend miteinander verbunden, die beiden Elektrodengruppen der binären Elektrodenanordnung sind jedoch elektrisch voneinander isoliert. Durch die gegenseitige Lage der einzelnen Elektroden der Elektrodenanordnung kann eine gemeinsame Hauptachse definiert werden. Besonders bevorzugt erstreckt sich diese Hauptachse entlang der längsten Symmetrieachse der Elektrodenanordnung.

[0012] Die vorliegende Erfindung kann insbesondere eine binäre, im Wesentlichen zweidimensional ausgelegte Elektrodenstruktur beinhalten, die elektrisch leitend mit einem Hochfrequenz-Generator, der eine hochfrequente Spannung mit einer Frequenz im Bereich zwischen 100 kHz und 50 MHz bereitstellt, verbunden ist. Bevorzugt ist dabei ein Frequenzbereich von 1 MHz bis 30 MHz. Ganz besonders bevorzugt sind Frequenzen, die für industrielle, wissenschaftliche und medizinische

Anwendungen freigegeben sind (ISM-Frequenzen). Die Elektrodenstruktur ist so ausgelegt, dass die Einkopplung der elektromagnetischen Wellen in die zu behandelnde Struktur derart erfolgt, dass im Vergleich zu konventionellen, ausschließlich auf Wärmeleitung beruhenden Methoden eine homogenere dielektrische Erwärmung zu verzeichnen ist, da die Erwärmung direkt im Volumen erfolgt. Vorzugsweise enthält die Vorrichtung darüber hinaus ein elektronisches Anpassnetzwerk, das zwischen HF-Generator und Elektrodensystem geschaltet ist, um die zum Generator reflektierte HF-Leistung zu minimieren bzw. ganz zu eliminieren. Eine elektromagnetische Abschirmung, die die Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen von der Elektrodenstruktur in den Raum signifikant reduziert, ist ebenfalls Bestandteil von bevorzugten Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Vorrichtung. Neben diesen Grundkomponenten enthalten bevorzugte Realisierungen dieser Vorrichtung vorteilhafterweise einen oder mehrere Temperatursensoren und/oder Vorrichtungen zur automatischen Anlagensteuerung über ein Computersystem und/oder Vorrichtungen zur automatischen Bewegung der Vorrichtung über die zu behandelnde Fläche und/oder Vorrichtungen zur automatischen Temperaturregulierung der Oberfläche.

[0013] Die Idee der vorliegenden Erfindung besteht darin, durch Anwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung bei nur einseitiger Zugänglichkeit des zu behandelnden Feststoffes Temperaturprofile zu erzielen, die im Vergleich zu anderen Verfahren homogener sind und somit schneller zum Erreichen der Zielvorgaben führen. Dies bedeutet in der Regel, dass bereits der primäre Energieeintrag in den meisten Materialien eine Eindringtiefe von einigen Zentimetern hat. Es gelingt sogar, die Oberflächentemperatur niedriger zu halten als die Temperatur unterhalb der Oberfläche im Volumen des Festkörpers.

[0014] Das binäre Elektrodensystem ist vorteilhafterweise so ausgelegt, dass sich in einem Bereich der Vorrichtung geerdete Elektrodenteile (so genannte "kalte" Elektroden) und spannungsführende Elektrodenteile (so genannte "heiße" Elektroden) abwechseln (Interdigitalstruktur) und dadurch in dem darunter liegenden Material ein hochfrequentes elektromagnetisches Feld erzeugt wird. Wenn der Abstand zwischen den Elektroden in derselben Größenordnung wie die Breite der Elektroden ist, so wird ein elektromagnetisches Feld erzeugt, dessen Verteilung den Anforderungen einer hinreichend gleichmäßigen Erwärmung besonders gut genügt. Eine besonders bevorzugte und konstruktiv robuste Ausführung dieses binären Elektrodensystems stellt eine ineinander greifende Kammstruktur (Doppelkammstruktur) dar. Die Elektrodenanordnung umfasst daher zwei ineinandergreifende Kammstrukturen. Unter einer Kammstruktur ist dabei eine Struktur zu verstehen, bei der die einzelnen Elektroden der Elektrodenanordnung kammartig als Zinken oder Zähne nebeneinander entlang eines elektrisch leitenden Steges angeordnet sind. Insbesondere kann dabei der Steg parallel zur Hauptachse der Elektroden-

anordnung ausgerichtet sein. Die Kammstruktur kann dabei ein- oder zweiseitig ausgebildet sein, d. h. entlang des Steges können die einzelnen Elektroden entlang eines einzelnen Steges entweder nur in eine einzige Richtung oder in zwei voneinander unabhängige Richtungen zeigen. Bevorzugt liegen bei der zweiseitigen Ausbildung des Kammes die beiden Richtungen innerhalb einer gemeinsamen Ebene. Unter einer ineinandergreifenden Kammstruktur ist jede gegenseitige Anordnung zweier solcher Kammstrukturen zu verstehen, bei der die einzelnen Zinken beider Kämme ohne elektrischen Kontakt zueinander miteinander verzahnt sind.

[0015] Die Feldstärkemaxima an den Kanten der Elektroden können dadurch reduziert werden, dass abgeschrägte oder abgerundete Elektroden verwendet werden. Diese Veränderung führt dazu, dass sich die Überhitzung an den Kanten der Elektroden deutlich verringert, ohne dass der Effekt einer Einkopplung in das Material signifikant eingeschränkt wird. Zum Erreichen der gewünschten Veränderung sind bereits Biegeradien bzw. Abschrägungen von einigen Millimetern ausreichend. Halbrund gegenüber der Oberfläche ausgebildete Elektroden bzw. Elektrodenteile sind hingegen weniger geeignet, da die Energieeinkopplung zu stark auf die Mitte der Elektrode (entlang der Berührungslinie) konzentriert wäre. Vorzugsweise umfasst die Elektrodenanordnung daher eine Oberfläche, die auf der Oberfläche des Feststoffs anordenbar ist, wobei die der Oberfläche des Feststoffs zugewendeten Kanten der Oberfläche abgerundet oder abgeschrägt sind. Insbesondere kann es sich bei besagter Oberfläche um die Oberfläche handeln, welche auf der Oberfläche des Feststoffs so angeordnet werden kann, dass durch die Elektrodenanordnung eine maximal große Oberfläche des Feststoffs abgedeckt wird. Diese Oberfläche weist im Bezug zu angrenzenden Oberflächen der Elektrodenanordnung Kanten auf, welche abgerundet oder abgeschrägt sein können. Beim Anlegen einer Hochfrequenz-Spannung an die Elektrodenanordnung wird ein elektromagnetisches Wechselfeld erzeugt, dessen Feldlinien meist senkrecht an den einzelnen Oberflächen der Kontakte enden. An Spitzen tritt in der Regel eine Konzentration der Feldlinien ein. Durch ein Abrunden oder Abschrägen der Kanten kann eine homogenere Verteilung der Feldlinien im Festkörper erreicht werden, da so die Feldstärkemaxima an den Kanten der Elektroden verringert werden können und zugleich eine verbesserte und homogenere Durchdringung des Bereich zwischen den Kontakten erreicht werden kann. Bevorzugt ist weiterhin, dass alle der zu behandelnden Oberfläche zugewandten Kanten der Elektroden abgerundet oder abgeschrägt sind.

[0016] Die Elektroden können perforiert sein, um für die Fälle einer Trocknung oder eines Chemikalienaustretes aus der erwärmten Struktur einen ungehinderten Abtransport zu gewährleisten und damit eine Rekondensation zu verhindern. Vorzugsweise ist die Elektrodenanordnung also zumindest in Teilbereichen perforiert. Hierbei können einzelne Elektroden der Elektrodenan-

ordnung ganz oder teilweise perforiert sein. Die Perforation kann bevorzugt zirkular, quadratisch, rechteckig oder sechseckig ausgeführt sein. Ebenfalls möglich sind Mischformen daraus sowie eine Anzahl unterschiedlich großer Perforationsdurchlässe. In Bereichen hoher Feldliniendichte kann durch eine Variation der Perforationsdichte und/oder -art eine Erhöhung der Transportfähigkeit zugunsten einer homogenen Feldlinienverteilung erwirkt werden. Bei Bedarf kann sich unmittelbar an den Elektroden auch ein geeignetes Adsorptionsmittel befinden, das Wasser oder Schadstoffe binden und so den Austrag unterstützen kann. Für organische Schadstoffe können bevorzugt Aktivkohleschüttungen oder Aktivkohlelviese eingesetzt werden, die in einer vorteilhaften Ausgestaltung direkt mit den Elektroden verbunden sind.

[0017] Die erfindungsgemäße Elektrodenanordnung kann zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens auf die Oberfläche eines Feststoffs aufgebracht und entlang der Oberfläche des zu behandelnden Feststoffs translatorisch bewegt werden. Dieses Aufbringen kann als direkter Kontakt zwischen den jeweils einander gegenüberliegenden Oberflächen erfolgen. Ebenfalls möglich ist ein geringer Abstand zwischen den jeweiligen Oberflächen; vorzugsweise kleiner 1 mm, kleiner 2 mm, kleiner 5 mm oder kleiner 10 mm. Um bei einer translatorischen Bewegung der Elektrodenanordnung die Kontakte und die Oberfläche des zu behandelnden Materials vor Verschmutzung und/oder Beschädigung zu schützen, kann zumindest in besonders beanspruchten Bereichen eine Schutzschicht, beispielsweise aus einem Kunststoffpolymer wie PTFE oder PE oder auch aus einer textilen Schicht wie Filz, aufgebracht sein. Vorzugsweise umfasst die Elektrodenanordnung daher eine Oberfläche, die auf der Oberfläche des Feststoffs anordenbar ist, wobei die Oberfläche zumindest teilweise durch eine Schutzschicht geschützt ist. Bevorzugt ist weiterhin, dass die der zu behandelnden Oberfläche zugewandten Flächen der Elektroden derart beschichtet sind, dass eine Schädigung der Oberfläche bei der Bewegung während der Behandlung verhindert oder wesentlich vermindert wird.

[0018] Um die elektromagnetische Verträglichkeit der Anordnung zu gewährleisten, kann das binäre Elektroden-system vorzugsweise von einer elektromagnetischen Abschirmung oberhalb der zu behandelnden Fläche ganz oder teilweise umschlossen sein. Als Schirmungsmaterialien sind beispielsweise massive Metallbleche, Gaze oder metallbeschichtete Kunststofffolien geeignet. Vorzugsweise ist die Elektrodenanordnung zumindest teilweise von einer elektrisch leitfähigen Abschirmung umgeben. Bevorzugt ist weiterhin, dass die Elektroden von einer Schirmung bestehend aus einem elektrisch leitfähigen Material wie beispielsweise massivem Blech, Gaze oder metallbeschichteter Folie umgeben sind, so dass eine elektromagnetische Abstrahlung in den Raum signifikant verringert bzw. eliminiert wird.

[0019] Neben der räumlichen Ausprägung des elektromagnetischen Feldes in dem zu erwärmenden Material

ist aus verfahrenstechnischer Sicht eine kontinuierliche oder quasi-kontinuierliche translatorische Bewegung der Elektrodenanordnung eine Möglichkeit, die Erwärmungsprofile zu homogenisieren. Dies kann beispielsweise durch eine entsprechende manuelle Bewegung der Vorrichtung entlang der Oberfläche des Festkörpers erfolgen. Vorzugsweise umfasst die Vorrichtung jedoch ein Mittel zur automatisierten translatorischen Bewegung der Elektrodenanordnung. Dieses Mittel kann beispielsweise durch eine entsprechend gelagerte Aktuatorplattform bereitgestellt werden. Durch eine entsprechende Ansteuerung bzw. Vorprogrammierung der Bewegung mindestens der Elektrodenanordnung kann eine homogene Erwärmung des Feststoffs erreicht werden. Vorzugsweise verfügt die Vorrichtung über ein Mittel zur translatorischen Bewegung der Elektrodenanordnung mit der Peripherie wie Abschirmung über die behandelte Fläche.

[0020] Da die höchsten Feldstärken und damit die größten Aufheizraten an den Kanten der binären Elektrodenstruktur auftreten, ist es vorteilhaft, die Struktur der Elektroden so auszurichten, dass bei der kontinuierlichen Bewegung für die Erwärmung einer größeren Fläche nach Möglichkeit keine längere Positionierung einer Kante an einer Stelle des zu behandelnden Untergrundes auftritt. Diese Verfahrensweise soll zur besseren Veranschaulichung für einen Parkettfußboden in einem rechteckigen Raum erläutert werden. Um die gesamte Fläche zu behandeln, ist es sinnvoll, eine rechteckig ausgelegte Behandlungsvorrichtung parallel zu zwei gegenüberliegenden Wänden zu bewegen. Wenn die Elektrodenstruktur von einer quaderförmigen Abschirmung umgeben ist, welche parallel zur Wand bewegt wird, so wäre es vorteilhaft, die binäre Elektrodenstruktur in einem Winkel von 45° zu den Begrenzungen der Abschirmung und damit zur Bewegungsrichtung anzuordnen. Vorzugsweise werden die Elektroden daher weder parallel noch senkrecht in Relation zur bevorzugten Bewegungsrichtung angeordnet, wobei eine Anordnung der Elektroden im Winkel von 45° bevorzugt ist.

[0021] Vorzugsweise sind die Elektroden der Elektrodenanordnung senkrecht zur Hauptachse angeordnet, wobei die Länge der Elektroden entlang der Elektrodenanordnung variiert. Besonders bevorzugt ist dabei, dass die Länge der Elektroden entlang der Elektrodenanordnung linear variiert. Insbesondere ist eine Vorrichtung bevorzugt, die eine maximale Elektrodenlänge in der Mitte der Elektrodenanordnung aufweist und bei der sich die Länge der daran beiderseits angrenzenden Elektroden zu den äußeren Enden der Elektrodenanordnung hin linear verringert. Weiterhin bevorzugt ist, dass die Abschirmung der Elektrodenanordnung eine quadratische Grundfläche aufweist, in die die vorgenannte Ausführungsform mit beidseitig abfallender Elektrodenlänge derart angeordnet werden kann, dass die Hauptachse der eingeschlossenen Elektrodenstruktur durch zwei gegenüberliegende Eckpunkte verläuft. Eine solche Vorrichtung wird bevorzugt entlang der Seiten der quadrati-

schen Abschirmung bewegt, so dass hierbei eine Anordnung im Winkel von 45° zu den Kanten der Abschirmung vorliegt.

[0022] Eine solche Auslegung führt dazu, dass bei einer kontinuierlichen Bewegung der Anordnung parallel zur Wand jede Position auf der zu behandelnden Oberfläche nur kurzzeitig von einer Kante überstrichen wird. Dies wäre bei einer parallelen oder rechtwinkligen Anordnung einer Kammstruktur relativ zur Bewegungsrichtung und zum Rahmen nicht der Fall. Natürlich sind auch andere Geometrien der erfindungsgemäßen Anordnung unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen möglich. All diesen Anordnungen ist gemeinsam, dass durch eine im Wesentlichen zweidimensionale, flächige Elektrodenanordnung ein dreidimensionales elektrisches Feld in der zu behandelnden Struktur etabliert wird, das durch die Energieabsorption eine dielektrische Erwärmung im Volumen ermöglicht. Die Bewegung der Elektrodenanordnung und die immanente Wärmeleitung im Feststoff tragen zu einer Homogenisierung des Temperaturprofils bei, was bei der Wahl der Behandlungszeit und Behandlungsintensität (Leistungseintragsdichte) berücksichtigt werden sollte. Auch ein gepulster Energieeintrag mit der Ausnutzung der Wärmeleitung in den Phasen ohne Radiowellen-Anwendung ist eine verfahrenstechnische Option zur Homogenisierung der Temperaturverteilungen im Feststoff.

[0023] Für einen automatisierten und zeiteffizienten Behandlungsablauf ist die kontinuierliche Messung der Erwärmung von Vorteil. Da im Anwendungskontext das Einbringen von Sensoren in die zu behandelnde Struktur selbst in der Regel nicht möglich ist, sollte die berührungslose Messung der Oberflächentemperatur zwischen den Elektroden mittels optischer Sensoren zu Steuerung genutzt werden. Hierfür können vorzugsweise pyrometrische Sensoren in die Vorrichtung integriert werden. Besonders bevorzugt ist die zusätzliche Integration eines Computersystems, das auf der Basis der gemessenen Temperatur oder mehrerer gemessener Temperaturen die HF-Leistung und/oder die Bewegungsgeschwindigkeit der Vorrichtung über die zu behandelnde Struktur regelt, um eine Überhitzung der Oberfläche zu vermeiden und gleichzeitig durch die Sicherstellung einer Mindesttemperatur den Behandlungserfolg zu gewährleisten.

[0024] Obwohl die erfindungsgemäße Vorrichtung eine Erwärmung des Volumens ermöglicht, kann die Eindringtiefe der Erwärmung jedoch auch durch die Gestaltung der Elektrodenstruktur kontrolliert werden. Dies ist für Fälle ein großer Vorteil, bei denen der Untergrund unter der zu behandelnden Holzstruktur unbekannt ist und eine Erwärmung dieses Teils der Baustruktur minimiert werden soll.

[0025] Vorzugsweise umfasst die erfindungsgemäße Vorrichtung eine Regelungseinrichtung zur Regelung der Oberflächentemperatur des Feststoffes. Die Regelungseinrichtung kann ein Mittel zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Festkörpers umfassen.

Hierbei kann es sich um mindestens einen, vorzugsweise elektronischen oder optischen, Sensor handeln, der die Oberflächentemperatur erfasst. Die Regelungseinrichtung kann ein Mittel zur Bestimmung der Oberflächentemperatur des Festkörpers umfassen. Die Regelungseinrichtung kann ein Mittel zur Bestimmung der elektrischen Feldstärke umfassen. Hierbei kann es sich um mindestens einen Sensor handeln, der die elektrische Feldstärke erfasst. Die Regelungseinrichtung kann ein Mittel zur Auswertung und Steuerung umfassen. Hierbei kann es sich beispielsweise um ein Computersystem handeln, welches zur Auswertung der Messsignale der einzelnen Mittel zur Bestimmung und zur Steuerung der gesamten Vorrichtung ausgebildet ist. Insbesondere können zur Auswertung das oder die Mittel zur Bestimmung der Oberflächentemperatur und/oder das oder die Mittel zur Bestimmung der elektrischen Feldstärke mit dem Mittel zur Auswertung und Steuerung verbunden sein. Weiterhin können zur Steuerung das Mittel zur translatorischen Bewegung und/oder die Hochfrequenz-Spannungsquelle mit dem Mittel zur Auswertung und Steuerung verbunden sein. Durch das Mittel zur Auswertung und Steuerung können somit in Abhängigkeit von bestimmten Größen die an die Anordnung angelegte HF-Leistung und/oder das translatorische Bewegungsprofil derart angepasst werden, dass eine weitgehend homogene Bearbeitung des Feststoffs ermöglicht wird. Insofern kann das Mittel zur Auswertung und Steuerung in Kombination mit Sensoren eine Steuerung und Regelung der thermischen Behandlung von Feststoffen ermöglichen. Insbesondere kann die an die Elektroden angelegte HF-Leistung in Abhängigkeit von der gemessenen Oberflächentemperatur geregelt werden.

[0026] Weiterhin bevorzugt ist, dass die Vorrichtung mindestens ein Mittel zur Kühlung der Oberfläche des Feststoffs umfasst, welches eine Kühlung der Oberfläche des dielektrisch erwärmten Feststoffs ermöglicht. Diese Mittel zur Kühlung der Oberfläche des Feststoffs kann ebenfalls über das Mittel zur Auswertung und Steuerung geregelt sein. Vorzugsweise kann es sich bei dem Mittel zur Kühlung der Oberfläche um eine Einrichtung zur Luftführung handeln. Bei der Einrichtung zur Luftführung kann es sich beispielsweise um ein aktives System handeln, bei dem einzelnen Teilbereiche der Elektrodenanordnung Luft zugeführt wird. Die zugeführte Luft kann als Luftströmung von einer Vielzahl von Lüftern lokal erzeugt oder durch eine entsprechende Luftstromsteuerung den einzelnen Teilbereichen zugeführt werden. Der Luftstrom kann vorzugsweise über einen einzelnen Hauptlüfter erzeugt werden. Die zugeführte Luft kann zusätzlich über eine Kühleinrichtung gekühlt werden. Für die Führung des Luftstromes zur Kühlung kann auch eine Perforation in der Elektrodenstruktur genutzt werden.

[0027] Vorzugsweise ist in die elektrisch leitende Verbindung zwischen der Elektrodenanordnung und der Hochfrequenz-Spannungsquelle ein elektronisches Anpassnetzwerk zur Verringerung der von der Elektrodenanordnung zur Hochfrequenz-Spannungsquelle zurück-

reflektierten Hochfrequenz-Leistung geschaltet. Insbesondere kann ein elektronisches Anpassnetzwerk, eine so genannte Matchbox, zwischen HF-Spannungsquelle und Elektrodenanordnung derart geschaltet sein, dass die zum Generator reflektierte HF-Leistung verringert bzw. eliminiert wird.

[0028] Das erfindungsgemäße Verfahren basiert auf der Anwendung der vorab beschriebenen Vorrichtung und nutzt die sich daraus ergebenden Vorteile bei der thermischen Behandlung von Feststoffen. Insbesondere umfasst das vorgestellte Verfahren zur thermischen Behandlung von Feststoffen als Verfahrensschritte das Bereitstellen einer binären Elektrodenanordnung mit mindestens zwei elektrisch voneinander isolierten Elektroden, wobei die Elektrodenanordnung auf eine Oberfläche eines Feststoffs angeordnet wird, und das Anlegen einer Hochfrequenz-Spannung an die Elektrodenanordnung, wobei ein elektrisches Wechselfeld in einem Feststoff erzeugt wird und durch dieses Wechselfeld eine Erwärmung des Feststoffes im Volumen erfolgt. In einer vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird eine Erwärmung im Volumen erreicht, ohne dass eine Überhitzung der Oberfläche stattfindet. Das erfindungsgemäße Verfahren ist geeignet, eine kontrollierte und direkte Erwärmung der zu behandelnden Struktur zu ermöglichen und dabei ungewollte Überhitzungen an Teilen der Oberfläche und des Volumens sicher auszuschließen.

[0029] Vorzugsweise wird die Elektrodenanordnung während einer verfahrensgemäßen Verwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung entlang der Oberfläche des Feststoffs allgemein translatorisch, d.h. in beliebiger Richtung entlang besagter Oberfläche, bewegt. Bevorzugter erfolgt eine translatorische Bewegung jedoch ausschließlich in Richtungen die nicht parallel zu Kanten der Elektrodenanordnung verlaufen. Eine translatorische Bewegung kann vorzugsweise manuell durch einen Benutzer der Vorrichtung oder mittels eines entsprechenden Mittels zur translatorischen Bewegung der Elektrodenanordnung erfolgen.

[0030] Beim erfindungsgemäßen Verfahren kann durch eine Regelungseinrichtung die Oberflächentemperatur des Feststoffes kontrolliert und nach Bedarf eingestellt werden. Vorzugsweise kann dabei durch die Regelungseinrichtung eine zumindest abschnittsweise Kühlung der Oberfläche des Feststoffes erfolgen. Vorzugsweise wird die Elektrodenanordnung entlang der Oberfläche des Feststoffs manuell oder automatisiert translatorisch bewegt. In einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens wird die Kühlung der Oberfläche über einen Luftstrom realisiert, der über Perforationen in dem Elektrodensystem geführt wird. In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens werden Wasser und/oder Schadstoffe in einer bereitgestellten Substanz gebunden, die für die Aufnahme dieser Substanzen geeignet ist. In bevorzugten Ausgestaltungen des Verfahrens handelt es sich um Trockenmittel und/oder hydrophobe Adsorbentien wie Aktivkohle beispielsweise in granularer oder Vliesform.

Kurzbeschreibung der Figuren

[0031] Die Erfindung wird nachfolgend in Ausführungsbeispielen anhand der zugehörigen Zeichnungen erläutert. Es zeigen:

- Figur 1 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur thermischen Behandlung von flächig ausgedehnten Feststoffen;
- Figur 2 eine schematische Darstellung einer bevorzugten erfindungsgemäßen Elektrodenanordnung nach Fig. 1;
- Figur 3 schematische Darstellungen einer weiteren bevorzugten erfindungsgemäßen Vorrichtung zur thermischen Behandlung von flächig ausgedehnten Feststoffen in Aufsicht und in Seitenansicht;
- Figur 4 schematische Darstellungen von unterschiedlichen Ausgestaltungen des Querschnitts der Elektroden;
- Figuren 5a, 5b schematische Darstellungen einer Anwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung;
- Figur 6 Temperaturprofile für vier unterschiedliche Behandlungsregimes am Beispiel des Feststoffs Holz;
- Figur 7 ein Temperaturtiefenprofil für die vier Behandlungsregimes nach Figur 6 mit Angabe der Reichweite für das Erreichen einer Letaltemperatur von 60 °C;
- Figur 8 schematische Darstellung einer weiteren erfindungsgemäßen Elektrodenanordnung mit Angabe der Positionen der faseroptischen Temperatursensoren; und
- Figur 9 den zeitlichen Verlauf der Temperaturen in 10 mm Tiefe sowie die zeitlichen Verläufe von HF-Leistung und HF-Spannung bei Verwendung der in Figur 8 gezeigten erfindungsgemäßen Vorrichtung.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

[0032] Figur 1 zeigt eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung 100 zur thermischen Behandlung von Feststoffen 10. Die Vorrichtung 100 ist dabei aufliegend auf der Oberfläche A des Fest-

stoffs 10 dargestellt, wobei die laterale Ausdehnung in der Regel deutlich größer ist als in der Fig. 1 angegeben. Insbesondere befindet sich hierbei ein Teil der dargestellten Oberfläche A des Feststoffs 10 in direktem Kontakt mit der unterseitigen Oberfläche B der Elektrodenanordnung 20. Ein solcher direkter Kontakt zwischen der Elektrodenanordnung 20 und der Oberfläche A des Feststoffs 10 ist jedoch nicht zwingend erforderlich, erfindungsgemäß ist es ausreichend, wenn der von der Elektrodenanordnung 20 ausgehende Feldlinienverlauf zu einer entsprechenden Durchdringung des Feststoffs 10 führt.

[0033] Die Elektrodenanordnung 20 ist nach oben und zu den Seiten hin von einer Abschirmung 40 umgeben. Diese dient dazu, den Feldlinienverlauf auf das Volumen des Feststoffs 10 zu fokussieren und die parasitäre Abstrahlung in die Umgebung, d.h. außerhalb des Feststoffs 10, signifikant zu reduzieren. Oberhalb der Abschirmung 40 ist beispielhaft eine Haltevorrichtung 42 dargestellt. Vorliegend dient diese dazu, einem Benutzer der Vorrichtung 100 die manuelle Handhabung der Vorrichtung 100 zu erleichtern. Die Haltevorrichtung 42 kann dabei beispielsweise als Klemmhalterung, Umgriffhalterung oder als Schraub- bzw. Steckhalterung zur Befestigung eines Teleskopstangenkopfes ausgeführt sein. Ebenfalls kann die Haltevorrichtung 42 eine Möglichkeit zur Fixierung der Elektrodenanordnung 20 an ein Mittel zur translatorischen Bewegung der Elektrodenanordnung 20 aufweisen. Mithilfe einer entsprechenden Haltevorrichtung 42 kann die Elektrodenanordnung translatorisch entlang der Oberfläche A des Feststoffs 10 bewegt werden. Insbesondere ist erfindungsgemäß eine möglichst vollständige sukzessive Abdeckung einer zusammenhängenden Oberfläche A des Feststoffs 10 besonders bevorzugt. Hierbei kann das entsprechende Bewegungsprofil frei gewählt werden, insbesondere bei manueller Bewegung ist jedoch ein vollständig die Oberfläche A des Feststoffs 10 abdeckendes Zick-Zack-Profil bei der translatorischen Bewegung besonders bevorzugt. Erfindungsgemäß wird ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld in das Volumen des Feststoffs 10 eingekoppelt. Dieses HF-Feld wird vorzugsweise durch eine Hochfrequenz-Spannungsquelle 30 erzeugt. Dies kann über eine elektrisch leitende Verbindung mit der Elektrodenanordnung 20 verbunden sein. Vorzugsweise ist in die elektrische leitende Verbindung zwischen der Elektrodenanordnung 20 und der Hochfrequenz-Spannungsquelle 30 ein elektronisches Anpassnetzwerk 50 zur Verringerung der von der Elektrodenanordnung 20 zur Hochfrequenz-Spannungsquelle 30 rückreflektierten Hochfrequenz-Leistung geschaltet. Bei der dargestellten Elektrodenanordnung 20 handelt es sich um zwei ineinander greifenden Kammstrukturen. Die Zähne des Kamms und der verbindende Quersteg bilden dabei die einzelnen Elektroden aus. Der erste Steg 26 und der zweite Steg 28 stellen dabei auch leitfähige elektrische Verbindungen zwischen den einzelnen Zähnen eines Kamms dar. Die von der Hochfrequenz-Span-

nungsquelle 30 erzeugte Hochfrequenzspannung liegt an den Stegen 26, 28 an und ist somit auch mit den einzelnen Elektroden des jeweiligen Kamms verbunden. Erfindungsgemäß bildet sich somit zwischen den Doppelkämmen ein starkes elektromagnetisches Wechselfeld aus, wobei der dabei erzeugte Feldlinienverlauf vorzugsweise tief in das Volumen des Feststoffs 10 eindringt und zu einer Aufheizung des Materials führt.

[0034] Figur 2 zeigt eine schematische Darstellung einer beispielhaften erfindungsgemäßen Elektrodenanordnung 20 nach Fig. 1. Hierbei wird insbesondere die miteinander verzahnte kammartige Anordnung der ersten Elektroden 22 und der zweiten Elektroden 24 als Interdigitalstruktur deutlich. Die zum ersten Kamm gehörenden Elektroden 22a - 22f sind elektrisch leitend über den ersten Steg 26 miteinander verbunden, wobei der Steg ebenfalls als Elektrode wirkt. Die zum zweiten Kamm gehörenden Elektroden 24a - 24f sind elektrisch leitend über den zweiten Steg 28 miteinander verbunden. Auch dieser wirkt gleichzeitig als Elektrode. Beide Kämmen sind elektrisch vollständig gegeneinander isoliert und weisen keine elektrisch leitende Verbindung untereinander auf. Eine indirekte Verbindung erfolgt lediglich im Betrieb der Vorrichtung 100 durch den Anschluss beider Kämmen an die Hochfrequenz-Spannungsquelle. Die einzelnen Elektroden 22, 24 erstrecken sich entlang einer gemeinsamen Hauptachse X der Elektrodenanordnung 20, wobei in der gezeigten Darstellung der erste Steg 26 und der zweite Steg 28 ebenfalls parallel zur Hauptachse X der Elektrodenanordnung 20 verlaufen. Die Stege 26, 28 können jedoch auch beliebig anders zur Hauptachse X der Elektrodenanordnung 20 orientiert sein, insbesondere können die Elektroden 22, 24 auch ohne eine feste Stegstruktur elektrisch miteinander verbunden sein. Beispielsweise kann eine Verbindung der jeweils zusammengehörigen Elektroden auch mittels individueller Kabelverbindung oder Lötung erfolgen. Im beispielhaft dargestellten Fall liegen die Stege 26 und 28 in einer Ebene mit den Elektroden 22a - 22f und 24a - 24f. Es ist jedoch auch möglich, dass sich diese Stege weitgehend oberhalb der Ebene der Elektroden 22a - 22f und 24a - 24f befinden. In diesem Fall wirken die Stege praktisch nicht selbst als HF-Elektroden bezüglich des zu behandelnden Materials 10.

[0035] Ein wesentliches Merkmal der vorliegenden Erfindung ist die Bereitstellung einer Vorrichtung zur möglichst homogenen thermischen Behandlung von Feststoffen. Daher ist auch bei der Auslegung einer erfindungsgemäßen Elektrodenanordnung 20 ein entsprechendes Maß an Homogenität und Einheitlichkeit besonders bevorzugt. Insbesondere sollten die jeweiligen geometrischen Abstände, Maße und Winkel zwischen den einzelnen Elektroden 22, 24 einheitlich sein. In der Darstellung der Fig. 2 wird dies dadurch deutlich, dass hier zwei identische Kammstrukturen derart ineinandergreifen, dass die Elektrodenstege jeweils im gleichen Abstand parallel zueinander angeordnet sind. Insbesondere sind der linkseitige und rechtsseitige Abstand jeder

einzelnen Elektrode 22, 24 zu ihren beiden nächsten Nachbarn jeweils gleich groß. Das Tastverhältnis zwischen der Breite der Elektroden 22, 24 und dem Abstand der einzelnen Elektroden 22, 24 kann frei gewählt werden. Bevorzugt ist jedoch auch hier ein Tastverhältnis, welches in Abhängigkeit der an die Elektrodenanordnung 20 angelegten Hochfrequenz-Spannung und der jeweiligen Elektrodenform eine möglichst optimale Umsetzung der erfinderischen Idee des Verfahrens sicherstellt.

[0036] Figur 3 zeigt eine schematische Darstellung der wesentlichen Komponenten einer weiteren erfindungsgemäßen Vorrichtung 100 zur thermischen Behandlung von Feststoffen 10 in Aufsicht (oben) und in Seitenansicht (unten). Dargestellt ist eine Elektrodenanordnung 20 mit zwei ineinander greifenden Kammstrukturen, wobei es sich um zweiseitig ausgeführte Kammstrukturen handelt, bei denen die Elektroden 22, 24 sich an beiden Seiten (in der Figur oberhalb und unterhalb) der jeweiligen Stege 26, 28 befinden. Die Elektroden 22, 24 erstrecken sich wie dargestellt entlang einer gemeinsamen Hauptachse X, wobei auch bei dieser Ausführungsform die Stege 26, 28 jeweils parallel zu der Hauptachse X verlaufen. Die Elektroden 22, 24 der Elektrodenstruktur 20 sind senkrecht zur Hauptachse X angeordnet, wobei die Länge der Elektroden entlang der Elektrodenstruktur variiert. Es ist hervorzuheben, dass bei der Anordnung nach Fig. 3 die Stege oberhalb der Elektrodenstruktur und nicht in einer Ebene mit dieser angeordnet sind. Sie wirken in diesem Fall praktisch nicht als Elektroden bezüglich der zu erwärmenden Struktur 10. Die Länge der Elektroden 22, 24 entlang der Elektrodenstruktur 20 variiert linear. Insbesondere weist die Elektrodenanordnung 20 eine maximale Elektrodenlänge in der Mitte der Elektrodenstruktur 20 auf. Die Länge der daran beiderseits angrenzenden Elektroden 22, 24 verringert sich zu den äußeren Ende der Elektrodenstruktur 20 hin linear. Der Aufsicht ist zu entnehmen, dass die Abschirmung 40 im gezeigten Ausführungsbeispiel einen quadratischen Querschnitt bezüglich der Draufsicht aufweist. Die Elektrodenanordnung 20 ist dabei diagonal in die Grundfläche dieses Quadrates eingefasst. Das Quadrat folgt in der Regel der Lage der Abschirmung 40. Eine erfindungsgemäße translatorische Bewegung der gezeigten Elektrodenanordnung 20 erfolgt bevorzugt entlang der Seiten der quadratischen Abschirmung 40, daher liegt in dem gezeigten Ausführungsbeispiel in der gezeigten Anordnung ein Winkel von 45° zu den Kanten der Abschirmung 40 vor.

[0037] Figur 4 zeigt eine schematische Darstellung von unterschiedlichen Ausgestaltungen des Querschnitts der Elektroden 22, 24. Die einzelnen Elektroden 22, 24 der Elektrodenanordnung 20 weisen an ihrer Unterseite, d.h. an der der Oberfläche A des Feststoffs 10 zugewendeten Oberfläche B, jeweils einen Randbereich auf, welcher durch eine Kanten K gekennzeichnet ist. Zur Beeinflussung des Feldlinienverlaufs im Betrieb der erfindungsgemäßen Vorrichtung 100 kann die Form die-

ses Randbereichs, insbesondere die der Kanten K, im Unterscheid zu einer rechtwinkligen oder eckigen Ausgestaltung (Links), durch Abrunden (Rechts) oder Abschrägen (Mitte) modifiziert werden. Zum Schutz zumindest der Oberfläche B der Kontakte 22, 24 und/oder der Oberfläche A der zu behandelnden Struktur 10 können die Kontakte 22, 24 auch mit einer Schutzschicht 60 versehen sein. Die Schutzschicht 60 kann dabei beispielsweise den gesamten Kontakt 22, 24, lediglich einzelne Kontaktstellen oder nur die Oberfläche B der Kontakte 22, 24 umfassen. Letzteres ist zu illustrativen Zwecken bei der dargestellten Ausführungsform eines Kontaktes 22, 24 mit abgerundeten Kanten K (Rechts) dargestellt. All diese Ausführungsformen können auch eine Perforation aufweisen, die die Abführung von Substanzen von der zu behandelnden Festkörperstruktur 10 und/oder die Belüftung der Oberfläche A der Festkörperstruktur 10 gestattet.

20 Ausführungsbeispiel 1:

Modellierung der räumlichen Verteilung der Energieeinkopplung in die behandelte Struktur

[0038] Unter den vielfältigen Variationsmöglichkeiten bei der Anwendung sei ein Beispiel veranschaulicht, bei dem parallele Elektroden bzw. Elektrodenanteile mit wechselnder Polarität ("heiße", d. h. spannungsführende, und "kalte", d. h. geerdete, Elektroden) zur Erwärmung genutzt werden. Über den Elektroden ist eine Schirmung angeordnet, die sich auch über die angrenzende Oberfläche erstreckt. Die "kalten" Elektroden sind mit der geerdeten Schirmung und dem Matchboxgehäuse elektrisch leitend verbunden, während die "heißen" Elektroden spannungsführend über ein Kupferband mit dem elektronischen Anpassnetzwerk bzw. mit der Spannungsquelle zur Kontaktierung verbunden sind. Die Anordnung für eine vertikale Behandlung (beispielsweise eines Fragments einer Wandvertäfelung) ist schematisch in Fig. 5 dargestellt.

[0039] Figur 5 zeigt schematische Darstellungen einer Anwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit einer oberflächengebundenen binären Elektrodenanordnung am Beispiel einer zu erwärmenden Mauer. Dabei zeigt Fig. 5a die Schirmung mit darunterliegender, nicht sichtbarer Kammstruktur und Fig. 5b einen Schnitt durch die erfindungsgemäße Vorrichtung mit sichtbarer Kammstruktur.

[0040] Legt man für eine Simulation zugrunde, dass die Elektroden eine Breite von 20 mm besitzen und der Abstand der Elektrodenmitten jeweils 25 mm beträgt, so ergibt sich eine Spaltbreite zwischen den Elektroden von 5 mm. In Richtung zur Maueroberfläche wurden die Elektroden jeweils 5 mm im Winkel von 45° abgeschrägt, so dass auf der Oberfläche ein effektiver Elektrodenabstand von 15 mm vorlag, der auch für die Feldverteilung im Material maßgebend ist. Unter Verwendung von realistischen Annahmen für die Wärmeausbreitung im Mate-

rial, den Wärmeübergang zwischen Materialoberfläche und Luft sowie unter Nutzung der dielektrischen und physikalischen Parameter für das Material Holz wurden die Temperaturverteilungen für ein 50 mm dickes Holzbau-
teil nach bestimmten Zeiten des dielektrischen Energie-
eintrages ermittelt.

[0041] Dabei wurden vier unterschiedliche Szenarien verglichen: eine konventionelle Erwärmung mit einer Heizplatte, eine dielektrische Erwärmung unter Nutzung der erfindungsgemäßen Vorrichtung mittels Radiowellen-Energie sowie die Nutzung beider Verfahren im Impulsbetrieb (1 min Heizung, 2 min Pause). In allen Fällen wurde eine Leistung von 1 kW eingesetzt.

[0042] Figur 6 zeigt Temperaturprofile für vier unterschiedliche Behandlungsregimes am Beispiel des Feststoffs Holz. Dargestellt sind die vier sich ergebenden Temperaturprofile nach jeweils 3 min, 6 min, 9 min und 15 min. Dabei zeigt (a) das Temperaturprofil bei einer kontinuierlichen HF-Erwärmung, (b) das Temperaturprofil bei kontinuierlicher konventioneller HF-Erwärmung, (c) das Temperaturprofil bei Radiowellen-Erwärmung im Impulsbetrieb (1 min Leistung eingeschaltet, danach jeweils 2 min Pause) und (d) das Temperaturprofil bei konventioneller Erwärmung im Impulsbetrieb (Zeiten wie vorher).

[0043] Es wird deutlich, dass das Maximum der Erwärmung sowie der Energieeintrag insgesamt für den Fall der Radiowellen-Methode deutlich hinein in das Volumen des Materials verschoben sind. Für eine nicht thermisch isolierte Oberfläche kann die Oberflächentemperatur gegenüber der im Volumen zu erreichenden Zieltemperatur abgesenkt werden, beispielsweise, um sensible Beschichtungen nicht zu schädigen. Der Grad der Temperaturabsenkung kann durch die Wahl der isolierenden Oberflächenbedeckung bzw. die Einstellung des Wärmeabtransports von der Oberfläche beispielsweise durch einen kühlenden Luftstrom variiert werden. Die konventionelle Erwärmung mittels Heizplatte (analoge Resultate würden mit der Heißluft- und der IR-Behandlung erzielt) führt hingegen zu einer hohen Oberflächentemperatur, zu einer ausgeprägten Temperaturabnahme mit der Tiefe und zu einer deutlich geringeren Aufheizgeschwindigkeit im Volumen. Bei einer Verringerung der Oberflächentemperatur zum Schutz sensibler Oberflächen würde sich die ohnehin schon geringere Erwärmungsgeschwindigkeit des Volumens nochmals verringern.

[0044] Für die praktische Anwendung ergibt sich meist die Situation, dass eine bestimmte Maximaltemperatur nicht überschritten werden darf, jedoch eine Mindesttemperatur (z. B. die Letaltemperatur für die Schädlingsbekämpfung) erreicht werden muss.

[0045] Figur 7 zeigt ein Temperaturtiefenprofil für die vier Behandlungsregimes nach Fig. 6. Es werden die vier bereits genannten Verfahren für eine Situation gegenübergestellt, bei der die Maximaltemperatur auf 100 °C begrenzt ist. Dargestellt ist jeweils der Zeitpunkt, zu dem erstmalig an einem Ort die Grenztemperatur von 100 °C

erreicht wurde. Da die verfahrensgemäße Zieltemperatur 60 °C betrug, sind zudem die Eindringtiefen markiert, bis zu denen diese Temperatur erreicht wurde.

[0046] Auch hier zeigen sich wiederum die klaren Vorteile des Radiowellen-Verfahrens unter Verwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung und des erfindungsgemäßen Verfahrens bei einer verwendeten Leistung von 1 kW (kontinuierlich oder in den Pulsen im Impulsbetrieb). Die Eindringtiefen für die Radiowellen-Erwärmung (13 mm bzw. 17 mm, bezogen auf das Erreichen der Letaltemperatur von 60 °C) waren deutlich höher als die, die bei einer konventionellen Erwärmung mittels Heizplatte (oder analog mit dem Heißluft- oder Infrarotverfahren) erreicht wurden (5 mm und 8 mm für den kontinuierlichen bzw. den Impulsbetrieb). Die dafür benötigten Behandlungszeiten waren vergleichbar. Dies bedeutet gleichzeitig, dass für gleiche Eindringtiefen wesentlich längere Behandlungszeiten für die konventionelle Erwärmung notwendig wären, wenn in einem bestimmten Volumen die Zieltemperatur durchgängig erreicht werden soll. Es sei angemerkt, dass in dem beschriebenen Fall keine Bewegung der Vorrichtung über die zu behandelnde Oberfläche erfolgte. Bei einer mobilen Anwendung müsste die effektive Verweilzeit des Systems an der Position berücksichtigt werden.

Ausführungsbeispiel 2:

Erwärmung einer Parkettfläche mit einer Doppelkammstruktur

[0047] Für Demonstrationszwecke wurde eine Holzplatte mit einer Dicke von 20 mm unter Nutzung der in Fig. 8 dargestellten Doppelkammstruktur erwärmt. Für die Elektroden 22, 24 und die Stege 26, 28 wurden bei diesen orientierenden Versuchen Konstruktionselemente aus Stahl verwendet. Der Abstand zwischen den Elektroden 22, 24 betrug zwischen 20 mm und 25 mm.

[0048] Es wurden ein HF-Generator (Arbeitsfrequenz 13,56 MHz, Maximalleistung 3 kW) und ein elektronisches Anpassnetzwerk (maximale HF-Spannung 4 kV) verwendet.

[0049] Die Oberflächentemperatur wurde mittels einer IR-Kamera vermessen. In einer Tiefe von 10 mm unter der Holzoberfläche wurden faseroptische Temperatursensoren positioniert, um während der RW-Behandlung eine kontinuierliche Temperaturerfassung zu ermöglichen. Die Positionen der Sensoren relativ zur Elektrodenstruktur (mit x markiert) sind ebenfalls Fig. 8 zu entnehmen.

[0050] Figur 9 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen in 10 mm Tiefe bei Verwendung der in Fig. 8 gezeigten erfindungsgemäßen Vorrichtung und unter Verwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Es sind dies Resultate eines typischen Erwärmungsversuches unter Verwendung der erfindungsgemäßen Anordnung. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine vorgewählte Mindesttemperatur von 60 °C in einer Tiefe von

10 cm in der Holzplatte überall erreicht wurde. Eine Höchsttemperatur von 100 °C wurde nicht überschritten. Die Oberflächentemperaturen waren deutlich niedriger, wie Aufnahmen mittels IR-Kamera zeigten. Hier war eine mittlere Temperatur von ca. 75 °C bei einer maximalen Oberflächentemperatur von 82 °C zu konstatieren.

[0051] Es ist davon auszugehen, dass durch eine Optimierung der Elektrodenstruktur und durch spezielle Versuchsregimes (vgl. Ausführungsbeispiel 1) eine noch bessere Homogenität der Temperaturverteilung erzielt werden kann.

[0052] Die speziellen Versuchsregimes repräsentieren das erfindungsgemäße Verfahren, das durch seine Flexibilität eine erfolgreiche Behandlung sehr unterschiedlicher Praxissituationen erlaubt.

Bezugszeichenliste

[0053]

10	Feststoff
20	Elektrodenanordnung
22a, 22b,	erste Elektroden
24a, 24b,	zweite Elektroden
26	erster Steg
28	zweiter Steg
30	Hochfrequenz-Spannungsquelle
40	Abschirmung
42	Haltevorrichtung
50	Anpassnetzwerk
60	Schutzschicht

A	Oberfläche des Feststoffs 10
B	Oberflächen der Elektrodenanordnung 20
K	Kanten der Elektroden 22, 24
X	Hauptachse der Elektrodenanordnung 20

Patentansprüche

1. Vorrichtung (100) zur thermischen Behandlung von Feststoffen (10), umfassend eine auf einer Oberfläche (A) eines Feststoffs (10) anordenbare binäre Elektrodenanordnung (20) mit jeweils mindestens zwei elektrisch voneinander isolierten Elektroden (22, 24), wobei die Elektrodenanordnung (20) zwei ineinandergreifende Kammstrukturen umfasst, und die Elektrodenanordnung (20) elektrisch leitend mit einer Hochfrequenz-Spannungsquelle (30) verbunden sind, die dazu ausgebildet ist, an die Elektrodenanordnung (20) eine Hochfrequenz-Spannung mit einer Frequenz zwischen 100 kHz und 50 MHz anzulegen,
dadurch gekennzeichnet, dass
eine Haltevorrichtung (42) vorgesehen ist, dazu ausgebildet, eine translatorische Bewegung der Elektrodenanordnung (20) entlang der Oberfläche (A) ei-

nes Feststoffs (10) zu ermöglichen.

2. Vorrichtung (100) nach Anspruch 1, wobei die Vorrichtung (100) eine Oberfläche (B) umfasst, die auf der Oberfläche (A) des Feststoffs (10) anordenbar ist, wobei die der Oberfläche (A) des Feststoffs (10) zugewendeten Kanten (K) der Oberfläche (B) abgerundet oder abgeschrägt sind und/oder die Oberfläche (B) zumindest teilweise durch eine Schutzschicht (60) geschützt ist.
3. Vorrichtung (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Elektrodenanordnung (20) zumindest in Teilbereichen perforiert ist und/oder zumindest teilweise von einer elektrisch leitfähigen Abschirmung (26) umgeben ist.
4. Vorrichtung (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei jede der Kammstrukturen einen Steg (26, 28) umfasst, über den die jeweiligen Elektroden (22, 22a, 22b, 22c, 22d, 22e, 22f, 24, 24a, 24b, 24c, 24d, 24e, 24f) der Elektrodenanordnung (20) miteinander elektrisch verbunden sind, wobei die Stege (26, 28) parallel zu einer Hauptachse (X) der Elektrodenanordnung (20) verlaufen und wobei die Elektroden (22, 22a, 22b, 22c, 22d, 22e, 22f, 24, 24a, 24b, 24c, 24d, 24e, 24f) senkrecht zur Hauptachse (X) angeordnet sind und die Länge der Elektroden (22, 24) entlang der Elektrodenanordnung (20) variiert.
5. Vorrichtung (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiterhin umfassend ein Mittel zur translatorischen Bewegung der Elektrodenanordnung (20).
6. Vorrichtung (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiterhin umfassend eine Regelungseinrichtung zur Regelung der Oberflächentemperatur des Feststoffes (10).
7. Vorrichtung (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Vorrichtung (100) ein Adsorptionsmittel zur Aufnahme der aus dem Feststoff austretenden Stoffe aufweist.
8. Vorrichtung (100) nach Anspruch 7, wobei das Adsorptionsmittel mindestens eine der Elektroden (22, 24) direkt berührt.
9. Vorrichtung (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Elektrodenanordnung (20) mindestens eine Perforation aufweist, die ausgebildet ist, einen Luftstrom zur Kühlung zu führen.
10. Verfahren zur thermischen Behandlung von Feststoffen (10), folgende Verfahrensschritte umfassend:

- Bereitstellen einer Vorrichtung (100) zur thermischen Behandlung von Feststoffen (10) nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Elektrodenanordnung (20) auf eine Oberfläche (A) eines Feststoffs (10) angeordnet wird, und 5
 - Anlegen einer Hochfrequenz-Spannung mit einer Frequenz zwischen 100 kHz und 50 MHz an die Elektrodenanordnung (20), wobei ein elektrisches Wechselfeld in dem Feststoff (10) erzeugt wird und durch dieses Wechselfeld eine Erwärmung des Feststoffes (10) erfolgt. 10
11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei durch eine Regelungseinrichtung (70) die Oberflächentemperatur und/oder die Volumentemperatur des Feststoffes (10) geregelt werden. 15
12. Verfahren nach Anspruch 11, wobei durch die Regelungseinrichtung (70) mittels mindestens eines Mittels zur Kühlung der Oberfläche (A) des Feststoffes (10) eine zumindest abschnittsweise Kühlung der Oberfläche (A) des Feststoffes (10) erfolgt. 20
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 10 bis 12, wobei die Elektrodenanordnung (20) entlang der Oberfläche (A) des Feststoffes (10) allgemein translatorisch bewegt wird oder die translatorische Bewegung nicht parallel zu Kanten der Elektrodenanordnung (20) erfolgt. 25
30
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 10 bis 13, wobei die aus der behandelten Struktur des Feststoffes (10) austretenden Stoffe an einem Adsorbermaterial gebunden werden. 35
15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 10 bis 14, wobei eine Kühlung der Oberfläche des Feststoffes über einen Luftstrom erfolgt, wobei der Luftstrom vorzugsweise über Perforationen in den Elektroden (22, 24) der Elektrodenanordnung (20) geführt wird. 40
45
50
55

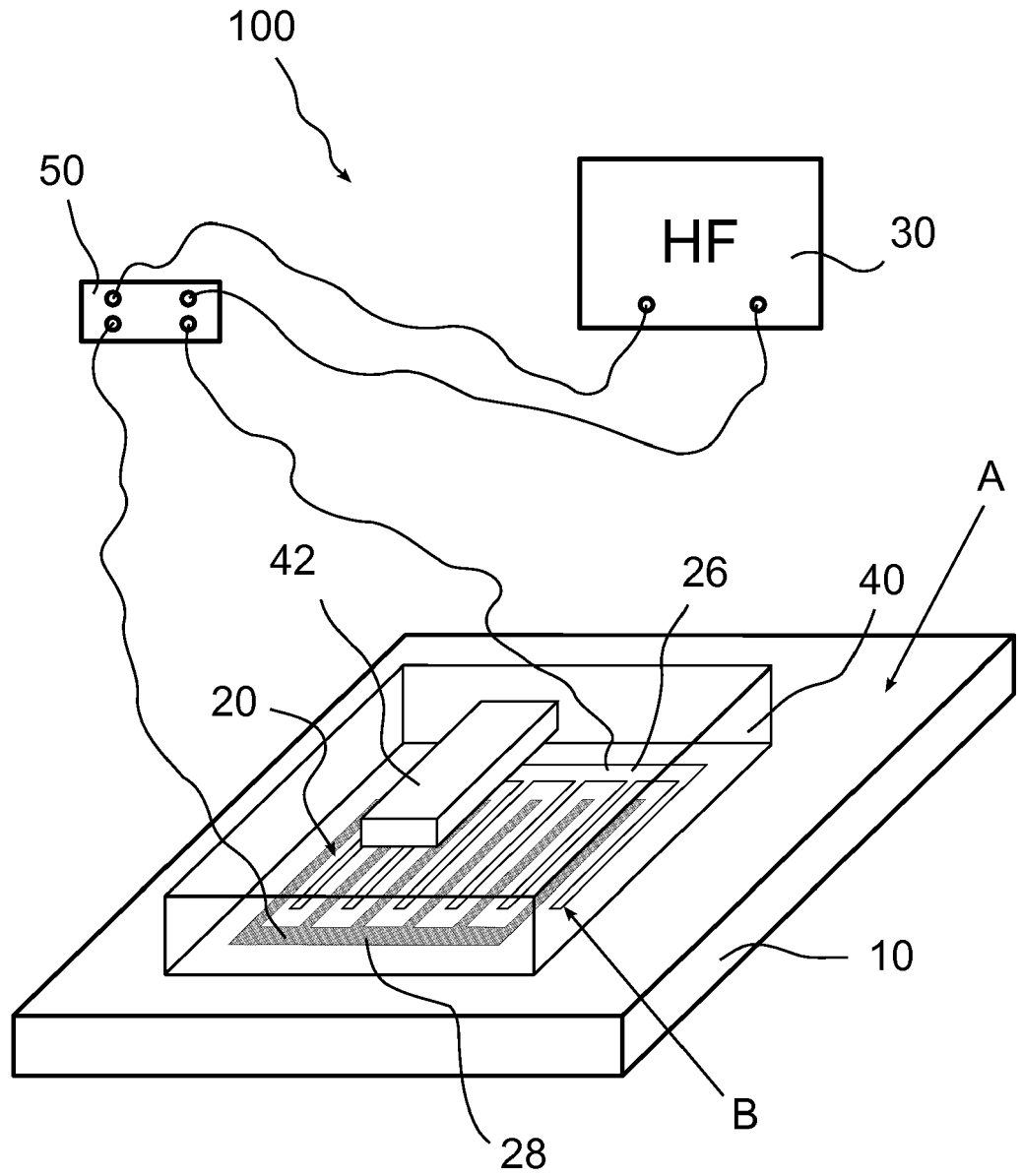


Fig. 1

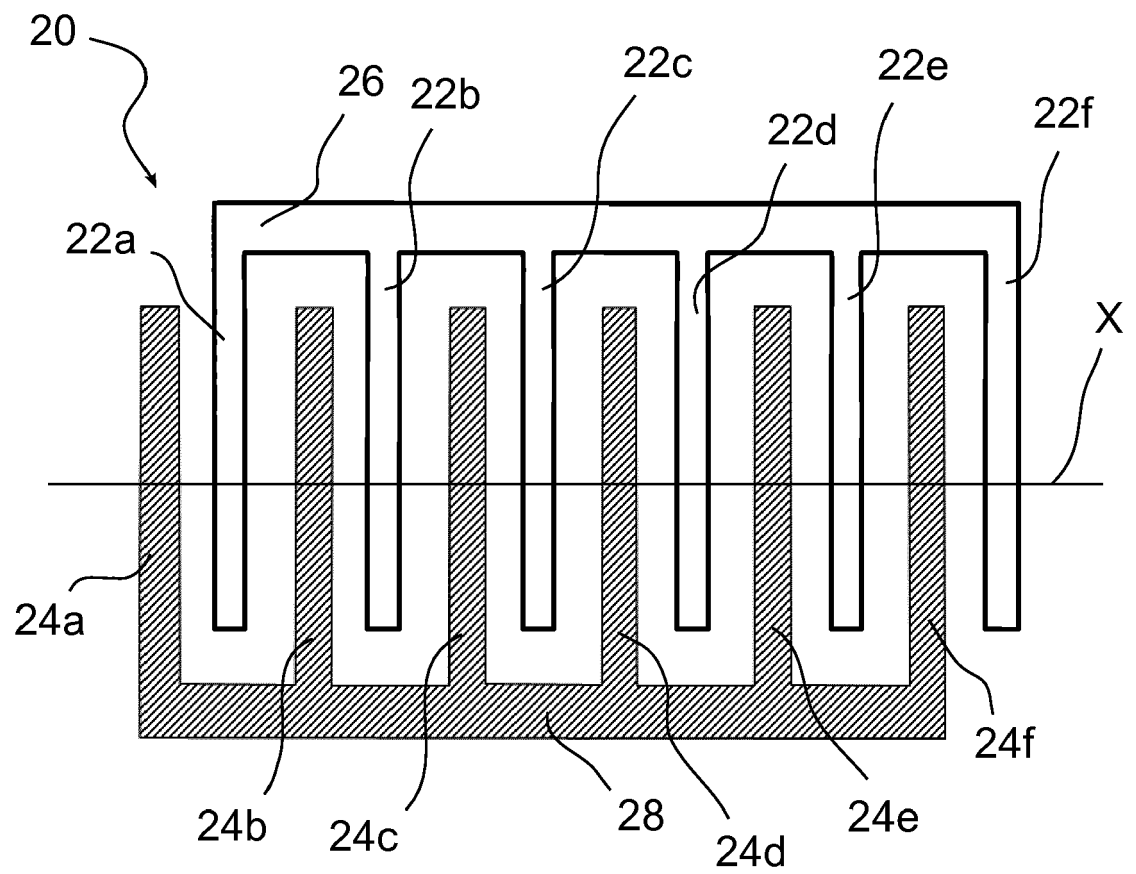


Fig. 2

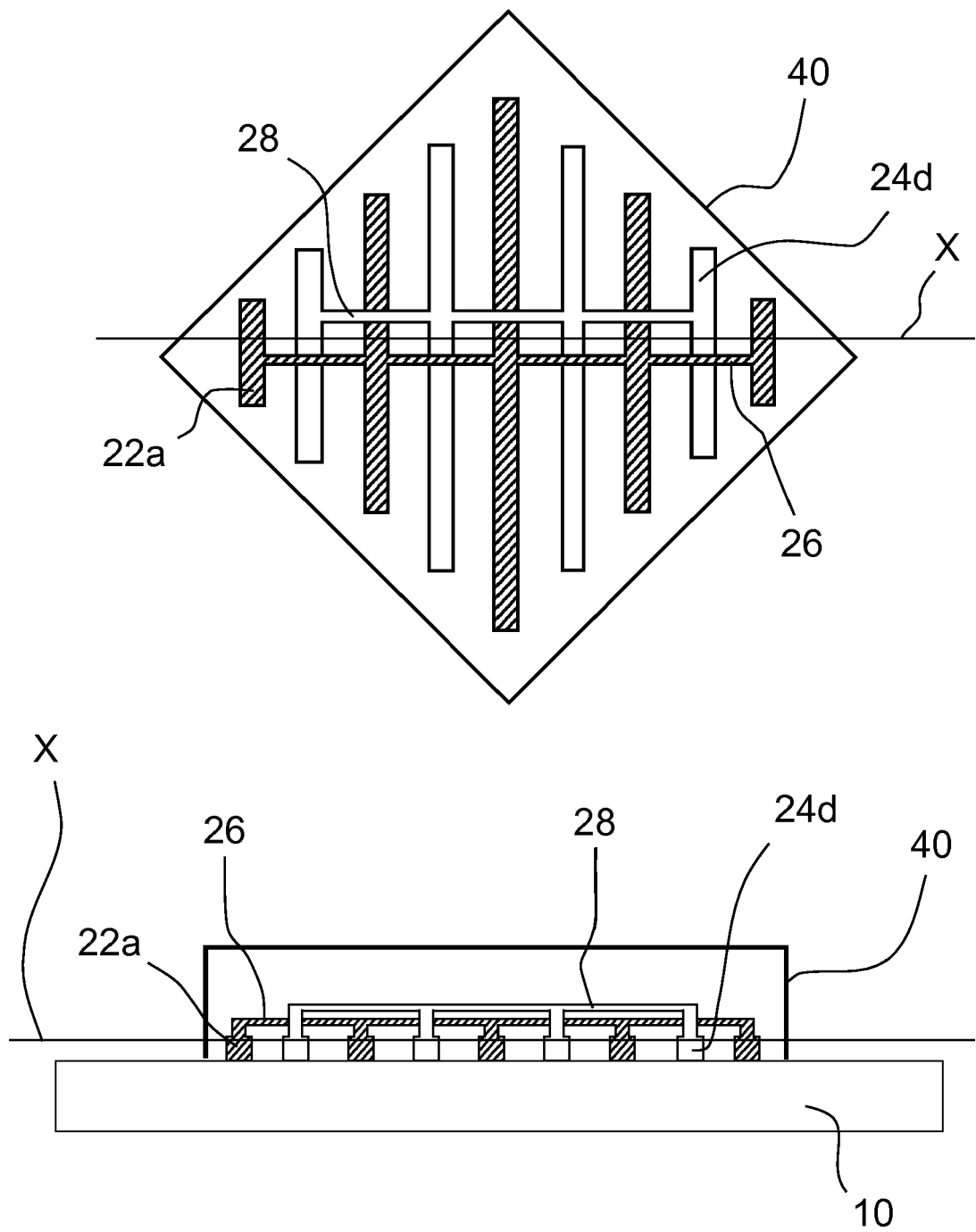


Fig. 3

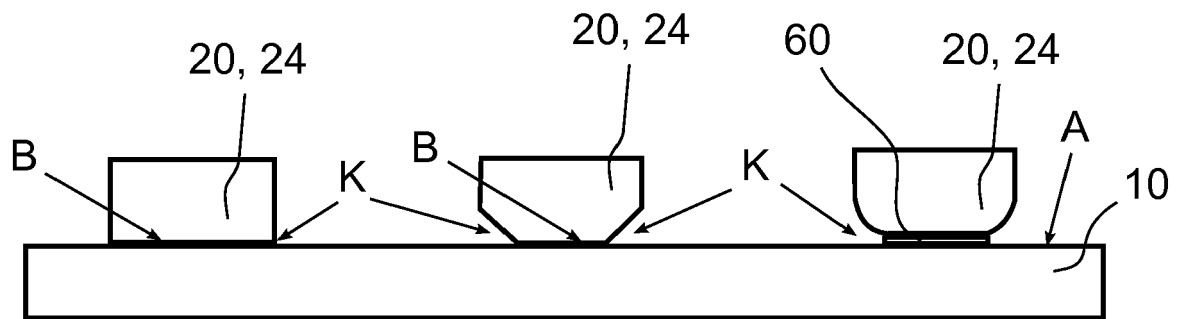


Fig. 4

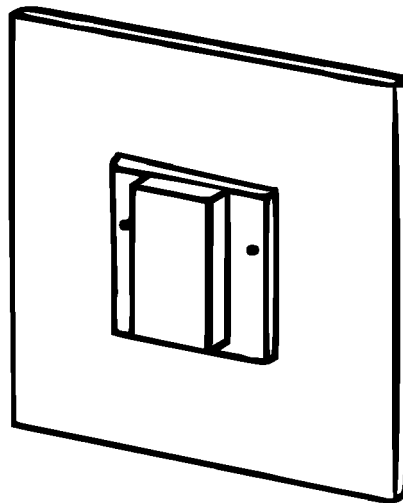


Fig. 5a

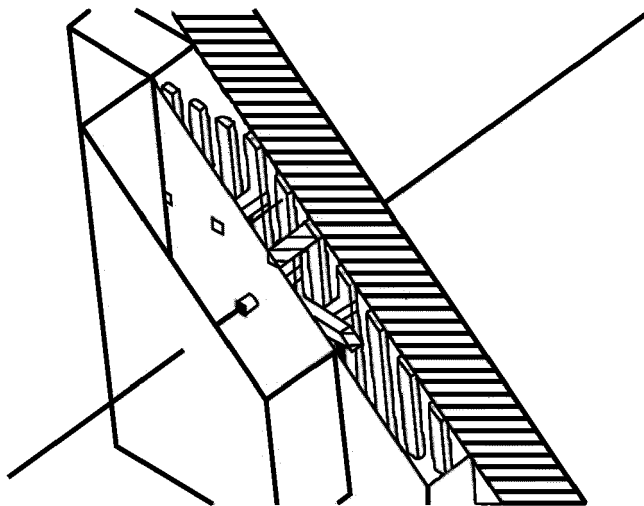


Fig. 5b

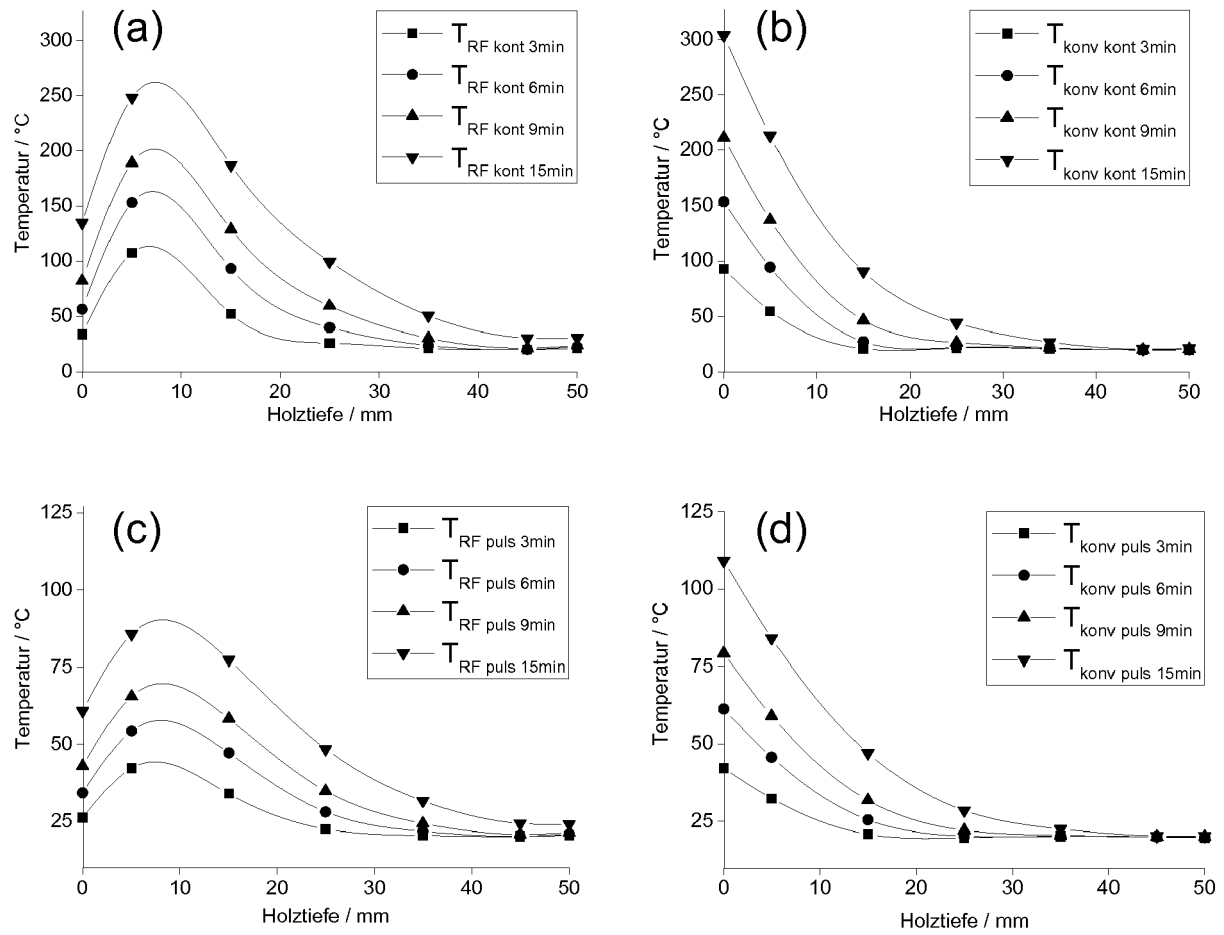


Fig. 6

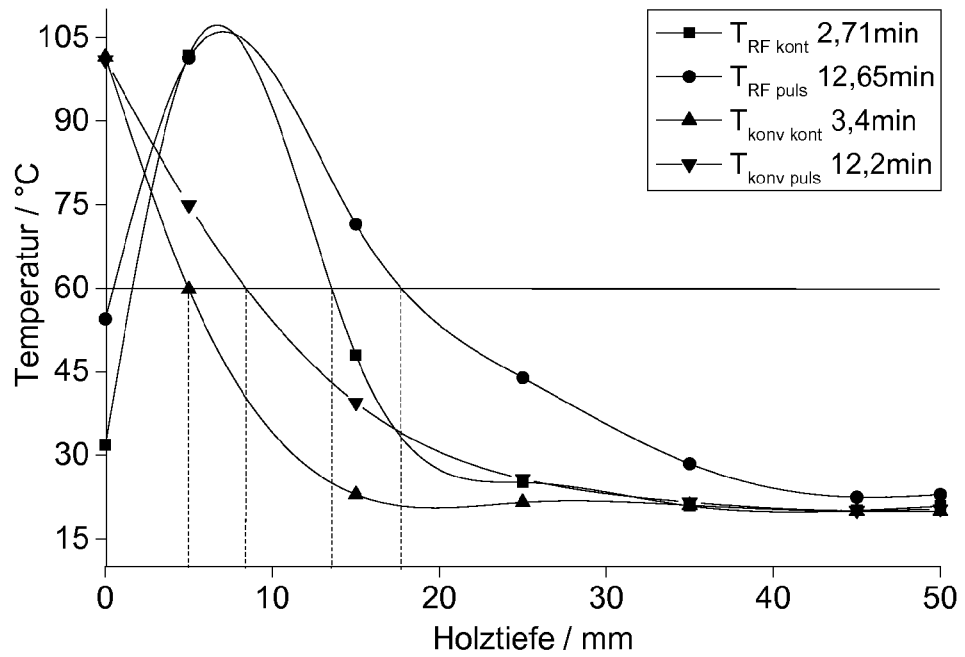


Fig. 7

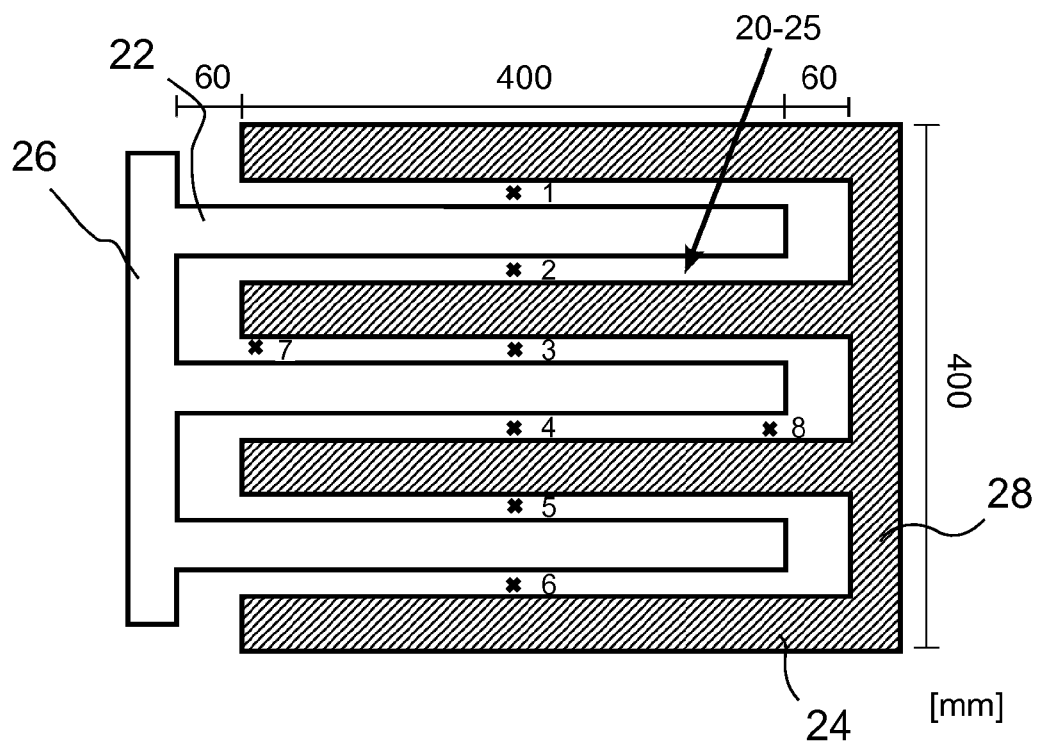


Fig. 8

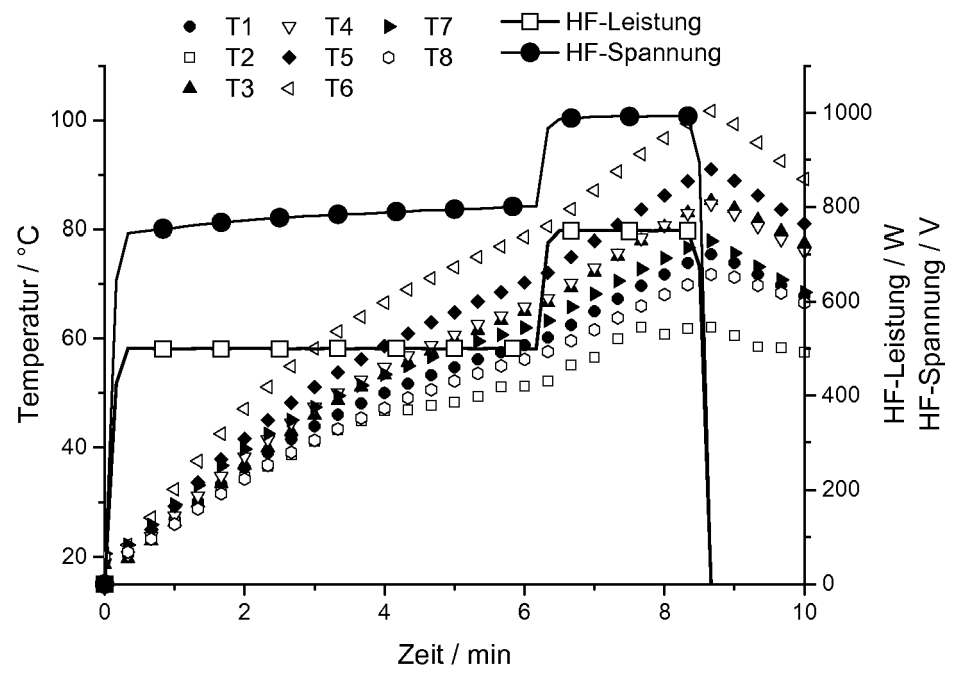


Fig. 9



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 17 16 7431

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

1

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X,P	WO 2016/102972 A2 (JEMELLA LTD [GB]; MOORE TIMOTHY DAVID [GB]; WILLIAMSON ROGER JAMES [GB]) 30. Juni 2016 (2016-06-30) * Abbildung 3 * * Seite 5, Absatz 5 * * Seite 2, Zeilen 10-11 *	1,6,10, 11	INV. H05B6/54 H05B6/60 H05B6/62
A	DE 691 038 C (SIEMENS AG) 15. Mai 1940 (1940-05-15) * Seite 1, Spalte 1, Zeilen 6-8 * * Seite 2, Spalte 1, Zeilen 33,55; Abbildungen 6,7 *	1-15	
A	US 2015/089829 A1 (HERMAN MARK L [US] ET AL) 2. April 2015 (2015-04-02) * Abbildungen 1-9 *	1-15	
A,D	DE 20 2010 001410 U1 (HELMHOLTZ ZENT UMWELTFORSCHUNG [DE]) 27. Mai 2010 (2010-05-27) * Abbildungen 1-2 *	1-15	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			H05B
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 6. September 2017	Prüfer Pierron, Christophe
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	

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

EP 17 16 7431

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.

06-09-2017

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2016102972 A2	30-06-2016	AU 2015370686 A1	22-06-2017
		CN 107105850 A	29-08-2017
		GB 2533602 A	29-06-2016
		WO 2016102972 A2	30-06-2016
DE 691038 C	15-05-1940	KEINE	
US 2015089829 A1	02-04-2015	US 2015089829 A1	02-04-2015
		US 2016281290 A1	29-09-2016
		US 2017089639 A1	30-03-2017
DE 202010001410 U1	27-05-2010	AT 12590 U1	15-08-2012
		DE 202010001410 U1	27-05-2010
		EP 2354349 A2	10-08-2011
		FR 2955506 A3	29-07-2011

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

- EP 1374676 B1 [0005]
- DE 202010001410 U1 [0005]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **C. HOYER et al.** *Chem. Ing. Technik*, 2014, vol. 86, 1187 [0002]