

(51) Int Cl.: **F26B 21/06** ^(2006.01) **F26B 25/22** ^(2006.01)

(22) Anmeldetag: 15.10.2009

(74) Vertreter: **Tappe, Hartmut
advotec.
Patent- und Rechtsanwälte
Georg-Schlosser-Strasse 6
35390 Giessen (DE)**

(71) Anmelder: **Innovatherm Prof. Dr. Leisenberg
GmbH & Co. KG
35510 Butzbach (DE)**

tatsächlicher Schwindung des Bauteils und einem vorgegebenen Schwindungssollverlauf erfolgt.

Diesbezüglich umfasst die Vorrichtung (01) mindestens einen Schwindungsmessaufnehmer (07, 08) innerhalb einer Trocknungseinrichtung (02), wobei eine Schwindungsregeldifferenz e_1 (09) zwischen tatsächlichem Bauteilswund y_1 und einem Schwindungssollverlauf w_1 mittels einer Regeleinrichtung (04) und einer Stelleinrichtung (05) ausgeregelt wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Trocknung mindestens eines feuchte und trocknungsschwindungsbehafteten Halb- oder Fertigbauteils nach der Lehre des Anspruchs 1.

[0002] Weiterhin betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens nach der Lehre des Anspruchs 16.

[0003] Aus dem Stand der Technik bekannte Trocknungsverfahren basieren auf einer Wärmeübertragung und Stoffaustausch zwischen einem feuchte- und trocknungsschwindungsbehafteten Halb- oder Fertigbauteils und einem Trocknungsmedium, wobei einem Fertig- oder Halbfertigbauteil eine Stoffkomponente, im Allgemeinen Wasser, durch ein Trockenmedium, meist eine Warmluftströmung, entzogen wird, so dass das zu trocknende Bauteil eine Volumenabnahme erfährt. Wenn die Volumenabnahme nicht im ganzen Körper gleichmäßig verteilt ist, entstehen Schwindungsspannungen. Die absoluten Beträge der Spannungen sind materialspezifisch und formabhängig, wobei das Bauteil nur bestimmte Beträge von Spannungen aufnehmen kann. Bleiben die Spannungen nahe unterhalb einer kritischen Rissfestigkeitsgrenze, können Deformationen entstehen. Bei Überschreiten der Rissfestigkeitsgrenze reißt das Bauteil.

[0004] Gattungsgemäße Trocknungsverfahren werden insbesondere in der Tonproduktion, bei der Herstellung von Dachziegeln, Klinkern, Blumentöpfen, Ziegelsteinplatten, Fliesen, feinkeramischen Produkten etc. eingesetzt. Des Weiteren finden solche Trocknungsverfahren ebenfalls in der Holzverarbeitungsindustrie, insbesondere bei der Holz Trocknung und Herstellung von Furnieren Anwendung. Jedoch können solche Trocknungsverfahren auch in anderen Bereichen der Bauteilproduktion, bei denen feuchte Bauteile zu trocknen sind, eingesetzt werden.

[0005] Die Forderungen an ein wirtschaftlich interessantes Trocknungsverfahren richten sich an die Herstellung von Bauteilen gleich bleibender definierbarer Qualität, die frei von Verkrümmungen und Rissen mit einer definierten Restfeuchte schnell und wirtschaftlich in großen Mengen und bei nacheinander ablaufenden Trocknungsvorgängen reproduzierbar zu trocknen sind.

[0006] Hierzu sind aus dem Stand der Technik "try and error" Trocknungsverfahren bekannt, bei denen ein erfahrener Fachmann versucht, durch manuelle Justierungen optimale Parameter hinsichtlich kurzer Trockenzeit, hoher Produktqualität, geringer Restfeuchte etc. zu ermitteln, um damit Halb- bzw. Fertigbauteile zu trocknen. Nach mehreren solcher "try and error" Trocknungsvorgängen werden dann viele hintereinander ablaufende Trocknungsvorgänge für eine Serienproduktion basierend auf den herausgefundenen Prozessparametern durchgeführt. Dieses Vorgehen erfordert in der Regel eine hohe Anzahl manueller Testläufe mit dementsprechendem Zeit-, Arbeits- und Kostenaufwand, bei der in

den meisten Fällen eine nicht unerhebliche Menge von Halb- oder Fertigbauteilen als Ausschuss anfallen.

[0007] Ziel eines wirtschaftlich interessanten Trocknungsverfahrens ist es daher, Prozessparameter, insbesondere die Parameter relative Feuchte und Temperatur, mittels Stellgliedern, die den Luftdurchsatz und die Wärmeerzeugung regeln, optimal einzustellen, um reproduzierbare Trocknungsergebnisse zu erreichen.

[0008] Die aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren versuchen für jedes neu herzustellende Halb- oder Fertigbauteil passende Sollkurven von relativer Feuchte und Temperatur zu ermitteln. Dies scheitert jedoch oft am Einfluss des Formfaktors des Bauteils und an den nicht vorberechenbaren Ungleichheitsfaktoren der Trockenkammertypen. Vor allem stellt eine Regelung nach relativer Feuchte und/oder Temperatur in Bezug auf das Bauteil in der Trocknungseinrichtung nur ein indirektes Mess- und Regelverfahren dar, das keine Aussage auf das reale Trocknungs- bzw. Schwindungsverhalten des zu trocknenden Bauteils zulässt.

[0009] Somit stellt die bisherige Erstellung von Trocknungskurven, die zur wiederholten Durchführung von Trocknungsvorgängen dienen kann, ein iteratives Verfahren dar, bei dem erst mit vorliegenden Trocknungsergebnissen nach Trockenzeit, Qualität und Restfeuchte wieder ein neuer Trocknungsvorgang unter Berücksichtigung der relativen Feuchte und Temperatur etc. erstellt werden kann, siehe hierzu Fig. 1. Somit hängt die Qualität der Trocknungsvorgänge aus dem Stand der Technik von einer manuellen Erstellung und somit von der Güte der vorgegebenen Sollwerte für Temperatur, relative Feuchte sowie von der Anzahl der Optimierungsschritte ab. In diesem Zusammenhang versteht man unter der relativen Feuchte das prozentuale Verhältnis zwischen dem momentanen Wasserdampfdruck und dem Sättigungswasserdampfdruck über einer reinen und ebenen Wasseroberfläche. Die relative Feuchte lässt daher unmittelbar erkennen, in welchem Grad die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist, bzw. wie viel Wasser von der Luft noch aufgenommen werden kann.

[0010] Zum Stand der Technik wird explizit auf die Dissertation von Uta Telljohann, "Theoretische und experimentelle Untersuchungen der Trocknung plastisch geformter Ziegelrohlinge", Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, vom 4. Juni 2004 verwiesen.

[0011] Ausgehend von dem oben genannten Stand der Technik ergibt sich somit die Aufgabe, ein Trocknungsverfahren und eine dementsprechend vorgesehene Vorrichtung vorzuschlagen, die eine messgrößenbasierte und automatische Ermittlung optimaler Trocknungsparameter für beliebige Halb- oder Fertigbauteile zur Verfügung stellt, wobei bereits nach wenigen Testläufen optimale Parameter vorliegen und eine effiziente Ermittlung von Trocknungsparametern für die reproduzierbare und qualitativ einstellbare Trocknung einer Serie gleichartiger Bauteile ermöglicht wird.

[0012] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren nach

dem Anspruch 1 und einer Vorrichtung nach dem Anspruch 16 gelöst.

[0013] Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

[0014] Das erfindungsgemäße Verfahren dient der Trocknung mindestens eines feuchte- und trocknungsschwindungsbehafteten Halb- oder Fertigbauteils, wobei zumindest ein erster geregelter Trocknungsvorgang durchgeführt wird, bei dem eine Regelung von Trocknungsparametern, wie Temperatur, Luftstrommenge etc. unter Berücksichtigung zumindest einer Regeldifferenz zwischen tatsächlicher Schwindung des Bauteils und einem vorgegebenen bauteilsspezifischen Schwindungssollverlauf ermöglicht wird.

[0015] Nach dieser Lehre wird der maßgebliche Verlauf der Schwindung online geregelt und die sich dabei ergebenden Ist-Werte der Trocknungsparameter wie Luftumwälzung, Trocknungstemperatur etc. können als zukünftige Programmsollwerte für nachfolgende Trocknungsvorgänge gespeichert und zur Verfügung gestellt werden. Durch Berücksichtigung der Schwindung eines Bauteils und dessen Vergleich mit einer bauteilspezifischen Schwindungssollverlaufskurve wird nur eine geringe Anzahl von Trocknungsvorgängen bis zur Ermittlung optimaler Trocknungsparameter erforderlich. Das Verfahren kann zur Sollkurvenfindung bei Einführung neuer Bauteile verwendet werden, aber auch dazu dienen, nach Umrüstung bestehender Anlagen deren optimalen neuen Sollkurven herauszufinden, sowie eine Einsparung von Energie des Trocknungsverfahrens für bestehende Trocknungsanlagen und eine dynamische Laufzeitanpassung zur Minimierung der Trocknungszeiten bei gleichzeitig energieminimalen Trocknungskurven zu ermöglichen.

[0016] Voraussetzung hierzu ist die Vorlage einer bauteilspezifischen Schwindungssollkurve, die zum einen materialabhängig, zum anderen aber auch vom Formfaktor, d.h. der konkreten geometrischen Ausgestaltung des Bauteils abhängt. Zur Auffindung einer solchen Schwindungssollkurve liegen hinreichende Erfahrungswerte vor, die auf der Kenntnis der Gesamtschwindung des Formlings unter Prozessbedingungen basiert. Hierzu zeigt Fig. 2 einen idealisierten Schwindungsverlauf von keramischen Massen mittels eines Bourry-Diagramms. Deutlich ist zu sehen, dass nach Beginn eines Trocknungsvorgangs der Anteil Wasser bis zu einer sog. Knickpunktsfeuchte schwindet, bei der das Bauteil sein Endvolumen, in diesem Fall ca. 80 % des Anfangsvolumens erreicht. Mit fortschreitendem Trocknungsgrad nimmt der Wasseranteil ab, ohne dass das Bauteil in seinem Volumen weiter schwindet. Wie in den Fig. 3a und 3b dargestellt, verändert sich die Schwindungssollkurve, je nach dem, ob ein "dünnes" oder "dickes" Bauteil getrocknet wird.

[0017] Die Festlegung einer Schwindungssollkurve ist von einem einschlägigen Fachmann selbst bei neuen Bauteilgeometrien schnell und einfach durchführbar und garantiert, dass keine Ungleichmäßigkeiten im Trock-

nungsvorgang sowie keine Schwindungsrisse auftreten, sofern die Schwindungssollkurve die kürzest mögliche Trockenzeit nicht unterschreitet, bzw. die material- und produktspezifischen Festigkeitswerte nicht überschritten werden.

[0018] Somit liegt die erfinderische Idee darin, dass im Laufe des Trocknungsvorgangs die Schwindung des Bauteils online gemessen wird und einer Schwindungssollkurve nachgeregelt wird, wobei sichergestellt wird, dass der tatsächliche Volumenschwindungsverlauf die maximalen Schwindungsgradienten, die vom Trocknungsfortschritt abhängen, zu keinem Zeitpunkt überschreitet.

[0019] In einem ausgezeichneten Ausführungsbeispiel werden die Prozessparameter des geregelten Trocknungsvorgangs protokolliert, um Führungs- und/oder Stellgrößen für nachfolgend geregelte oder gesteuerte Trocknungsvorgänge generieren zu können. Somit werden nach Ausführung des schwindungsgeregelten Trocknungsvorgangs dessen Prozessparameter im Laufe des Trocknungsvorgangs protokolliert und stehen für nachfolgend geregelte oder lediglich gesteuerte Trocknungsvorgänge zur Verfügung. In diesem Zusammenhang bedeutet eine Regelung eine Rückführung und Vergleich von Regelgrößen zu Führungsgrößen zur Generierung von Stellgrößen, die das Verhalten einer Regelstrecke beeinflussen. Eine Steuerung weist keine solche Rückführung aus und dient der Beeinflussung einer Vorrichtung nach einem vorgegebenen Plan.

[0020] Des Weiteren ist es vorteilhaft denkbar, dass der Regelkreis eine weitere Regelung als Temperaturregelung mit einer Temperaturregeldifferenz umfasst und/oder eine Feuchteregelung zur Regelung des Wasserdampfaufnahmevermögens des entfeuchtenden Trockenmediums auf Basis von Messsignalen von relativer Feuchte und Temperatur innerhalb der Trocknungskammer. Somit beruht die zweite Regelung entweder auf einer Temperatur- oder eine Feuchte, oder eine Kombination daraus. Darüber hinaus sind weitere Regelparameter für den zweiten Regelkreis denkbar, die einen Aufschluss über den Trocknungsfortschritt des Bauteils geben können. So kann der Wert für das Wasserdampfaufnahmevermögen ($\Delta g_{\text{Wasserdampf}}/\text{kg}_{\text{Luft}}$) oder ein Differenzdruck, z.B. Wasserdampfpartialdruck zu Sättigungspartialdruck eine gute Basis einer Regeldifferenzbildung sein. Hierbei gelte es lediglich zu beachten, dass vormalig zwei Größen, wie beispielsweise Temperatur und relative Feuchte rechnerisch auf eine Größe (wie beispielsweise die Differenztemperatur zwischen Kühlgrenztemperatur und Temperatur der Trocknungseinrichtung) überführbar sind. Eine Feuchteregelung ist insbesondere dann geeignet, wenn in der Trockenkammer eine Zuluftklappe, gegebenenfalls parallel zu einer Abluftklappe und/oder antiparallel als Umluftklappe zur Regelung der Feuchte vorgesehen ist und ein Wärmeerzeuger als Brenner oder Heizregister o.ä. mittels einer Temperaturregelung betätigt werden kann.

[0021] Grundsätzlich, wie Anspruch 1 angibt, umfasst

der Regelkreis eine Schwindungsregelung. Nach dem in Fig. 2 dargestellten Bourry-Diagramm wird im Laufe des Trocknungsvorgangs an der Stelle der sog. Knickpunktsfeuchte ein Schwindungsendmaß des Bauteils erreicht, ab dem der Wassergehalt zwar abnimmt, aber das Bauteil keine Volumenänderung mehr erfährt und somit der Schwindungsgrad keinen Aufschluss mehr über den Trocknungsgrad des Bauteils bieten kann. Somit ist es vorteilhaft denkbar, dass die Regelung weiterhin auch eine Temperaturregelung berücksichtigt, so dass Schwindung und Temperatur zur Auffindung optimaler Trocknungsparameter dienen.

[0022] Eine Weiterentwicklung des oben genannten Ausführungsbeispiels besteht darin, dass während eines Trocknungsvorgangs innerhalb einer ersten Trocknungsphase zumindest teilweise eine Schwindungsregelung und innerhalb einer anschließenden zweiten Trocknungsphase zumindest teilweise eine Temperatur- und/oder eine Feuchterege- lung vorgenommen werden.

[0023] Somit wird, wie im obigen Ausführungsbeispiel am Bourry-Diagramm bereits erläutert, die Volumenabnahme bis zur Erreichung der Knickpunktsfeuchte mittels der Schwindungsregelung geregelt, ab der dann die Trocknungsregelung mittels einer Temperatur- und/oder Feuchterege- lung fortgesetzt wird, bis das Bauteil die gewünschte Endfeuchte erreicht. Somit ist es vorteilhaft denkbar, dass in der ersten Trocknungsphase eine Schwindungsregelung vorgenommen wird und in der zweiten Trocknungsphase eine Temperatur- und/oder Feuchterege- lung einsetzt.

[0024] Des Weiteren ist es vorteilhaft denkbar, dass der Regelkreis zumindest zwei Folgeregler umfasst, wobei der Stellwert u_1 eines ersten Folgereglers K_1 als Führungsgröße w_2 eines zweiten nachgeschalteten Folgereglers K_2 verwendet wird. Durch den Einsatz eines Regelkreises mittels zweier Folgeregler K_1 , K_2 wobei der Ausgang des ersten Folgereglers K_1 als Führungsgröße des zweiten Reglers K_2 dient, können elegant zwei Regelgrößen abgestimmt aufeinander ausgeregelt werden, beispielsweise zum einen der Bauteilschwind als erste Regelgröße und die Temperaturdifferenz oder eine andere zweite Größe als zweite Regelgröße, wobei ein erster Regler K_1 eine Schwindungsregelung vornimmt und ein zweiter Regler K_2 eine Temperatur- und/oder Feuchterege- lung, oder die Ausregelung der zweiten Größe vornimmt.

[0025] Hieraus ergibt sich bereits die vorteilhafte Weitergestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens, wobei ein erster Folgeregler K_1 eine Schwindungsregelung vornimmt, wobei die Regeldifferenz e_1 der Schwindungsregelung eine Schwindungsregeldifferenz zwischen tatsächlicher Bauteilschwindung y_1 und einem Schwindungssollverlauf w_1 ist und dessen Stellwert u_1 als Führungsgröße w_2 für eine Temperaturregelung oder für die Regelung einer zweiten Größe des zweiten Folgereglers K_2 dient, wobei die zweite Regeldifferenz e_2 eine Temperaturregeldifferenz oder eine Regeldifferenz der zweiten Größe ist.

[0026] Während die erste Regeldifferenz als Schwindungsregelung die Differenz zwischen tatsächlicher Bauteilschwindung und einem bauteilspezifischen Schwindungssollverlauf darstellt, ist die zweite Regelgröße der Trocknungswirkung beliebig wählbar. In einem vorteilhaften Ausführungsbeispiel kann die Führungsgröße w_2 und/oder Regelgröße y_2' der Temperaturregelung (Eingangsgrößen des zweiten Reglers K_2) eine aus Temperatur y_{21} und relativer Feuchte y_{22} der Trocknungseinrichtung (02) ableitbare physikalische Differenzgröße, insbesondere Temperaturdifferenz zwischen Feuchtkugeltemperatur und trockener Temperatur sein. Dabei ist die Feuchtkugeltemperatur als Kühlgrenztemperatur definiert, d.h. die tiefste Temperatur, die sich durch Verdunstungskühlung erreichen lässt, bei der die Wasserabgabe einer feuchten Oberfläche mit dem Wasseraufnahmevermögen der umgebenden Atmosphäre im Gleichgewicht steht, so dass das umgebende Gas bzw. die Luft mit Dampf gesättigt ist.

[0027] Jedoch ist ebenfalls vorteilhaft denkbar, dass aus Temperatur und relativer Feuchte eine Druckdifferenz zwischen Wasserdampfpartialdruck und momentanen Wasserdampfpartialdruck (in Bar), eine Massendifferenz zwischen maximalen Wasserdampfaufnahmevermögen im Sättigungszustand zu momentanen Wasserdampfgehalt (in $\text{g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{Luft}}$) oder eine ähnliche Differenzgröße ermittelt werden kann, die als Regelgröße für die nachgeschaltete Trocknungswirkungs-Regelstufe des Folgereglers K_2 heranziehbar ist.

[0028] Die Feuchtkugeltemperatur lässt sich nur schwer messtechnisch direkt bestimmen. Es ist jedoch vorteilhaft und naheliegend, dass statt der Feuchtkugeltemperatur die relative Feuchte und Temperatur einer Trocknungseinrichtung bestimmt wird, aus der die Feuchtkugeltemperatur rechnerisch mit bekannten Umrechnungsformeln ableitbar ist. Somit ist es vorteilhaft, die Temperaturdifferenz y_2' rechnerisch aus gemessener relativer Feuchte y_{22} und Temperatur y_{21} einer Trocknungseinrichtung zu bestimmen.

[0029] Nach dem oben Gesagten liegt es vorteilhaft nahe, dass die Trocknungswirkungs-Regeldifferenz (13) eine Differenz e_2 zwischen einer aus der Schwindungsregelung resultierenden Stellwert u_1 ermittelbaren Führungsgröße w_2 und einer aus relativer Feuchte y_{22} und Temperatur y_{21} der Trocknungskammer (02) bestimm- baren Regelgröße y_2' ist. Insbesondere bietet sich hierzu eine aus der Schwindungsregelung resultierenden Stellwert u_1 ermittelbaren Temperaturdifferenz-Führungsgröße w_2 zwischen Feuchtkugeltemperatur und trockener Temperatur und einer aus relativer Feuchte y_{22} und Temperatur y_{21} der Trocknungskammer bestimm- baren Temperaturdifferenz y_2' zwischen Feuchtkugeltemperatur und trockener Temperatur ist. Mit anderen Worten ergibt sich somit ein vorteilhaftes Ausführungsbeispiel des Trocknungsverfahrens, in dem ein erster Regler eine Schwindungsregelung zwischen einer tatsächlichen Schwindung eines Bauteils im Laufe eines Trocknungsvorgangs und einem Schwindungssollverlauf vornimmt,

wobei die Ausgangsgröße des ersten Reglers als Differenz zwischen tatsächlicher Temperatur und Feuchtkugelttemperatur interpretierbar ist. Dieser Ausgangswert u_1 des ersten Reglers K_1 dient dann als Differenzführungsgröße w_2 des zweiten Reglers K_2 und kann z.B. als Differenztemperatur zwischen Feuchtkugelttemperatur und trockener Temperatur angesehen werden, wobei als Regelgröße y_2 die tatsächliche Temperaturdifferenz zwischen Feuchtkugelttemperatur und trockener Temperatur in den Regler K_2 eingehen, die aus der direkt zu messenden Temperatur y_{21} der Trocknungskammer und der relativen Feuchte y_{22} , die in der Trocknungskammer herrscht, ableitbar ist. Jedoch können für die Differenzwerte in gleicher Weise aus relativer Feuchte und Temperatur ermittelbare Druckdifferenz oder Massendifferenz wie oben vorgeschlagen verwendet werden.

[0030] Grundsätzlich beruht das oben aufgeführte Verfahren auf der Aufnahme der tatsächlichen Schwindung des Bauteils während des Trocknungsvorgangs. Zur Ermittlung der tatsächlichen Schwindung ist es vorteilhaft, wenn mindestens ein Schwindungsmessaufnehmer an mindestens einem Bauteil angeordnet ist, der die tatsächliche Schwindung des Bauteils aufnimmt.

[0031] Des Weiteren ist es vorteilhaft möglich, mindestens zwei Schwindungsmessaufnehmer an zwei Bauteilen anzuordnen, wobei das erste Bauteil das am schnellsten trocknende Bauteil und das zweite Bauteil das am langsamsten trocknende Bauteil ist. Die Auswahl des langsamsten und schnellsten Bauteils beruht auf physikalischen Zusammenhängen und den Erfahrungen des einschlägigen Fachmanns.

[0032] Da die Trocknungsgeschwindigkeit mit steigender Geschwindigkeit des wasseraufnehmenden Mediums, d.h. mit der Luftgeschwindigkeit steigt und mit der steigenden Sättigung des Trockenmittels Luft mit Wasser fällt (Luftsättigung), werden die direkt von einem mit Heißluft versorgendem Luftaggregat angeblasenen Bauteile die am schnellsten trocknenden/schwindenden Bauteile sein. Die am weitest abseits liegenden Bauteile sind wegen der zunehmenden Sättigung des Trockenmediums durch die dazwischen liegenden trocknenden Bauteile und der geringeren Strömungsgeschwindigkeit wegen der größeren Entfernung die am langsamsten trocknenden Bauteile. Des Weiteren kennt der Benutzer der Trocknungseinrichtung in der Regel "feuchte Nester", die auf Sachverhalten beruhen, die nicht auf dem ersten Blick erkennbar sind und z.B. von ungleichmäßiger Heißluftversorgung durch den Lüfter oder Lüftern mit unterschiedlichen Leistungen herrühren. Daher ist es leicht möglich, den Ort der am schnellsten und am langsamsten trocknenden Bauteile zu identifizieren und somit entsprechend der vorteilhaften Weiterentwicklung die Schwindungsmessaufnehmer an diesen Bauteilen anzuordnen.

[0033] Darüber hinaus ist vorteilhaft denkbar, dass in einer ersten Trocknungsphase der Schwindungsregelung zunächst die Schwindung des ersten Bauteils, das am schnellsten schwindet, bei der Regelung berücksich-

tigt wird und bei Ende der Schwindungsphase die Schwindung des zweiten Bauteils, das am langsamsten trocknet, zur Bestimmung der Schwindungsregelungsdifferenz e_1 verwendet wird. Somit wird zur Schwindungsregelung zunächst die Schwindung des am schnellsten trocknenden Bauteils verwendet, wobei am Ende dessen Schwindungsvorgangs dieses Bauteils das am langsamsten trocknende Bauteil weiterhin schwindet. Somit kann nach Beendigung des Schwindungsvorgangs des am schnellsten schwindenden Bauteils die Schwindungsregelung auf das Schwindungsverhalten des am langsamsten schwindenden Bauteils zurückgreifen, so dass sichergestellt wird, dass eine Schwindungsregelung durchgeführt wird, bis der Schwindungsvorgang aller zu trocknender Bauteile abgeschlossen ist.

[0034] Des Weiteren ist in einer vorteilhaften Ausführung des Verfahrens denkbar, mindestens drei Trocknungsvorgänge durchzuführen, wobei ein erster Trocknungsvorgang mit einer vorgegebenen Trocknungszeit durchgeführt wird, ein zweiter anschließender Trocknungsvorgang unter Optimierung der Sollwertkurven durchgeführt wird und ein dritter Trocknungsvorgang zur Verifikation des Trocknungsergebnisses durchgeführt wird. Nach spätestens der Durchführung dieser drei Vorgänge sollten optimale Trocknungsparameter vorliegen, so dass, wie in einer weiteren Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens vorgeschlagen, zumindest ohne eine Schwindungsregelung weitere Trocknungsvorgänge insbesondere als gesteuerte Trocknungsvorgänge auf Basis der protokollierten Trocknungsparameter durchgeführt werden können.

[0035] Des Weiteren betrifft die Erfindung eine Trocknungsvorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorgenannten Verfahrensansprüche. Hierzu umfasst die Trocknungsvorrichtung erfindungsgemäß eine Trocknungseinrichtung zur Trocknung von mindestens einem Bauteil, mindestens eine Stelleinrichtung zur Einstellung von Trocknungsparametern wie Temperatur, Luftstrommenge, Luftumwälzung oder ähnlichem in der Trocknungseinrichtung, eine Regeleinrichtung zur Regelung des Trocknungsvorgangs durch Betätigung der Stelleinrichtung mittels eines Stellwertes u_2 und mindestens einen Messaufnehmer zur Aufnahme einer Regelgröße y_1 . Die Trocknungsvorrichtung ist **dadurch gekennzeichnet, dass** die Regeleinrichtung zumindest eine Schwindungssollkurveneinheit zur Ausgabe einer bauteilspezifischen Schwindungssollkurve mindestens eines Bauteils umfasst und mindestens ein Messaufnehmer als Schwindungsmessaufnehmer ausgebildet ist, der die Schwindung des Bauteils im Laufe eines Trocknungsvorgangs als Regelgröße y_1 aufnehmen kann, wobei die Regeleinrichtung ausgebildet ist, um eine Schwindungsregeldifferenz e_1 zwischen tatsächlichem Bauteilschwind y_1 und dem Schwindungssollverlauf w_1 auszuregeln.

[0036] Mit anderen Worten umfasst die Trocknungsvorrichtung eine Regeleinrichtung mit einem Schwindungsmessaufnehmer und einer Schwindungssollkur-

veneinheit, die eine Schwindungssollkurve als Führungsgröße vorgibt. Der Messaufnehmer nimmt die tatsächliche Schwindung des Bauteils auf, wobei die Regeleinrichtung durch Einflussnahme auf die Regelstrecke, d.h. Stelleinrichtung und Trocknungseinrichtung dafür sorgt, dass sich die Schwindung des Bauteils im Laufe des Trocknungsvorgangs dem Schwindungssollverlauf folgt.

[0037] Grundsätzlich kann die Vorrichtung mit einem Schwindungsmessaufnehmer arbeiten. Vorteilhafter Weise umfasst die Vorrichtung zumindest zwei Schwindungsmessaufnehmer, wobei ein erster Schwindungsmessaufnehmer an einem ersten am schnellsten trocknenden Bauteil und ein zweiter Schwindungsmessaufnehmer an einem zweiten am langsamsten trocknenden Bauteil angeordnet ist.

[0038] Darüber hinaus ist die Vorrichtung mit einem Temperatursensor und einem Sensor zur Erfassung der relativen Feuchte der Luft innerhalb der Trocknungseinrichtung ausgerüstet, um aus Temperatur und relativer Feuchte innerhalb der Trocknungseinrichtung eine zweite Trocknungswirkungs-Regelgröße zur Verfügung zu stellen, beispielsweise eine Differenztemperatur zwischen Feuchtkugeltemperatur und tatsächlicher Temperatur, eine Druckdifferenz zwischen Wasserdampfpartialdruck und momentanem Wasserdampfpartialdruck oder eine Massendifferenz zwischen maximalem Wasserdampfaufnahmevermögen im Sättigungszustand zu momentanem Wasserdampfgehalt ermitteln zu können.

[0039] Es ist vorteilhaft denkbar, dass die Regeleinrichtung mindestens einen ersten Regler K_1 umfasst, der als PID-Regler ausgelegt ist. Ein PID-Regler hat den Vorteil, ohne Überschwingen und ohne verbleibende Regeldifferenz eine gleichmäßige und schnelle Ausregelung der Regeldifferenz e vorzunehmen.

[0040] Des Weiteren ist es vorteilhaft denkbar, dass die Regeleinrichtung mindestens zwei Regler K_1 , K_2 umfasst, die als Folgeregler (Kaskadenregler) verkettet sind, wobei der erste Folgeregler K_1 ausgelegt ist, eine Schwindungsregeldifferenz e_1 auszuregeln und der zweite Folgeregler K_2 ausgelegt ist, eine Temperaturregeldifferenz auszuregeln, wobei die Stellgröße u_1 des ersten Folgereglers K_1 als Führungsgröße w_2 des zweiten Folgereglers K_2 dient. Auch hier ist es vorteilhaft möglich, den zweiten Folgeregler K_2 als PID-Regler auszugestalten.

[0041] Darüber hinaus ist es vorteilhaft denkbar, dass die Regeleinrichtung eine Recheneinheit umfasst, die ausgelegt ist, aus den Messwerten y_{21} , y_{22} des Temperatursensors (10) und des Sensors (11) der relativen Feuchte eine physikalische Trocknungswirkungs-Differenzgröße (13), insbesondere Differenztemperatur zwischen Feuchtkugeltemperatur und trockener Temperatur, Druckdifferenz zwischen Wasserdampfpartialdruck und momentanem Wasserdampfpartialdruck oder Massendifferenz zwischen maximalem Wasserdampfaufnahmevermögen im Sättigungszustand zu

momentanem Wasserdampfgehalt des Bauteils zu bestimmen. Diese abgeleiteten Parameter dienen während des Schwingungsvorgangs in einfacher Weise als Führungsparameter zur Schwindungsregelung.

[0042] In einer weiteren Ausführungsform der Trocknungsvorrichtung umfasst diese eine Protokolleinheit, die ausgelegt ist, zumindest die Ausgangsstellgröße u_2 und/oder u_1 (gegebenenfalls mehrere Ausgangsstellgrößen u_1 oder u_2) der Regeleinrichtung während mindestens eines Trocknungsvorgangs zu protokollieren. Die Ausgangsstellgröße u_2 beeinflusst unmittelbar die Stelleinrichtung, die wiederum direkte Trocknungsparameter, wie Temperatur der Trockenluft innerhalb der Trocknungseinrichtung, Luftumwälzgeschwindigkeit, Lüftungsklappenöffnung etc. steuert. Durch die Protokolleinheit können die während eines ersten oder zweiten Trocknungsvorgangs ausgegebenen Stellgrößen u_2 protokolliert werden und können in einem weiteren Ausführungsbeispiel, in dem die Vorrichtung eine Steuereinrichtung umfasst, auf Basis der von der Protokolleinheit der Regeleinrichtung aufgenommenen Stellgrößen u_2 die Stelleinrichtung der Trocknungseinrichtung zur Durchführung weiterer Trocknungsvorgänge direkt steuern. Somit können nach Durchführung des erfinderischen Trocknungsverfahrens die von der Protokolleinheit aufgenommenen Ausgangsstellgrößen abgerufen werden, um weitere, lediglich gesteuerte Trocknungsvorgänge durchzuführen. Daneben kann auch die Stellgröße u_1 protokolliert werden, so dass aufgrund des von der Protokolleinheit vorgegebenen Verlaufs der Stellgröße u_1 eine einfache Regelung nach der Differenztemperatur durchführbar ist. Des Weiteren ist auch eine einfache Regelung nach Temperatur und/oder relativer Feuchte denkbar.

[0043] Im Folgenden wird die Erfindung anhand lediglich Ausführungsbeispiele zeigender Zeichnungen näher erläutert.

[0044] Es zeigen:

Fig. 1: Ein Verfahrensablauf eines Trocknungsverfahrens nach dem Stand der Technik;

Fig. 2: ein Bourry-Diagramm eines typischen Trocknungsvorgangs;

Fig. 3: schematische Schwingungssollverläufe von Bauteilen, mit Vergleich dickes/dünnes Bauteil und "realer" Schwindungsverlauf;

Fig. 4: Regelkreise nach dem Stand der Technik und nach einem Ausführungsbeispiel;

Fig. 5: ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Regelkreises;

Fig. 6: in schematischer Darstellung ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Trocknungsvorrichtung.

[0045] Fig. 1 zeigt schematisch ein Trocknungsverfahren nach dem Stand der Technik. Dabei werden in einem Trockner 02 keramische Formlinge als Bauteile, in diesem Fall Dachziegel, getrocknet. Hierbei erfolgt eine Schwindung über den Zeitverlauf des Trockenvorgangs, wobei lediglich die Prozessparameter Temperatur und relative Feuchte in der Trocknungseinrichtung 02 gemessen werden. Nach Beendigung des Trocknungsvorgangs wird vom Benutzer eine Bewertung von Schwindung, Temperatur und relativer Feuchte vorgenommen und daraus Sollwerte für Temperatur und relative Feuchte für nachfolgende Trocknungsvorgänge manuell festgelegt. Diese festgelegten Trocknungsparameter werden dazu verwendet, in einem nachfolgenden Trocknungsvorgang wieder Bauteile zu trocknen, um diesen Vorgang mehrmals durchzulaufen, bis optimierte Trocknungsparameter für die Bauteile gefunden werden. Damit ist die Erstellung von optimalen Trocknungsparametern ein iteratives Verfahren, das durch hohe Kosten und einem großen Energie und Zeitaufwand sowie einem hohen Ausschussgrad der zu trocknenden Bauteile gekennzeichnet ist.

[0046] Fig. 2 zeigt schematisch ein Bourry-Diagramm, das den Schwindungsprozess eines aus Ton bestehenden Bauteils darstellt. Zu Beginn des Trocknungsvorgangs beträgt das Volumen 100%, wobei im Beispiel ca. 28 % des Bauteilvolumens aus Wasser besteht. Im Laufe des Trocknungsvorgangs nimmt der Wasseranteil ab, wobei eine Schwindung der Bauteilgröße im Beispiel auf ca. 80 bis 85 % eintritt. Bei Erreichen der sog. Knickpunktsfeuchte, d.h. der Temperatur, bei der die Abnahme des Wassergehaltes zu keiner weiteren nennenswerten Schwindung führt, bilden sich Luftporen aus, so dass das Körpervolumen konstant bleibt.

[0047] In den Fig. 3a und 3b sind Schwindungssollkurvenverläufe dargestellt, wobei in Fig. 3a ein Schwindungssollverlauf eines "dünnen" und eines "dicken" Bauteils dargestellt ist. Beispiel eines dünnen Bauteils kann ein Biber-Dachziegel sein, ein dickes Bauteil kann ein massiver Vormauerklinkerstein sein. Ein dünner Formling kann prinzipiell aufgrund der kürzeren Diffusionswege und einem größeren Oberflächen/Volumenverhältnis schneller als ein dicker, massiver Formling trocknen. Bei einer normierten Trockenzeit ist ferner erkennbar, dass der dünne Formling eine kürzere Phase von Knickpunktsfeuchte bis zur gleichen Restfeuchte benötigt. Die leicht zu klassifizierenden Kurven weisen eine hohe Ähnlichkeit auf, wobei der signifikanteste Unterschied die Formling- oder Bauteilgeometrie darstellt, d.h. das Fläche- oder Kugelmodell des dünnen oder dicken Formlings. Die Schwindungssollverläufe für die Schwindung ergeben sich maßgeblich aus der Bauteilgröße und -geometrie, der Referenzstrecke auf dem Bauteil, der geplanten Trockenzeit, der Rohstoffmischung und dem Wassergehalt.

[0048] Die in Fig. 3b dargestellten Winkel (α_1 , α_2 und α_3) bedeuten den Startwinkel des Schwindungsvorgangs α_1 , den Winkel der Knickpunktsfeuchte α_2 und den

Schwindungsverlaufs-Endwinkel am Ende der Trockenzeit α_3 . Sollten beim Abfahren der Schwindungssollverläufe Risse auftreten, kann über die Art der Risse sehr wohl auf die Ursache als auch auf den Zeitpunkt des Auftretens geschlossen werden, wobei sehr leicht die Schwindungssollverläufe angepasst werden können. Im Verlauf eines Trocknungsvorgangs wird der Schwindungsgradient dem Startwert des Gradienten des Schwindungssollverlaufs angepasst, wobei ein tangentiales Aufsetzen des Schwindungssollverlaufs auf den jeweiligen Trocknungsfall erreicht werden soll. Ist der Ist-Wert der Schwindung von Anfang an trotz geschlossener Zuluft zu groß, kann - sofern dies die Trocknerausrüstung dies zulässt - die Umwälzleistung reduziert und damit die Trockengeschwindigkeit verlangsamt werden, so dass sichergestellt wird, dass die tatsächliche Schwindung dem Schwindungssollverlauf, wie er beispielsweise in Fig. 3b dargestellt ist, nachgeführt werden kann. Spätestens ab dem Zeitpunkt, an dem der langsamste schwindende Formling sein Schwindungsmaß erreicht, der sogenannten Knickpunktsfeuchte (Winkel α_2), ist die Schwindung nicht mehr geeignet, als Maß für den Trocknungsverlauf zu dienen und damit bis zur gewünschten Restfeuchte den Trocknungsvorgang zu regeln.

[0049] Fig. 4a zeigt schematisch einen aus dem Stand der Technik bekannten Regelkreis. Als Eingangsgröße dient die Führungsgröße w , die auch als Sollwert bezeichnet wird. Von ihr wird die Regelgröße y , die auch als Ist-Wert bezeichnet wird und die am Ende der Regelstrecke G ausgegeben wird, abgezogen, so dass sich eine Regeldifferenz e ergibt. Der Regler K versucht den Stellwert u so einzuregeln, dass die Regeldifferenz e verschwindet. Der Stellwert u wird in die Regelstrecke G eingegeben, wobei die Regelstrecke G nach dem Stellwert u eine Regelgröße/Ist-Wert y erzeugt. Diese Regelgröße y unterliegt des Weiteren einer Störgröße d , die durch den Regelkreis kompensiert werden muss.

[0050] Fig. 4b zeigt schematisch ein Ausführungsbeispiel eines Regelkreises mittels einer Folgeregelung der beiden Regler K_1 und K_2 nach einem Ausführungsbeispiel der Erfindung. Anfänglich dient die Führungsgröße w_1 als gewünschter Schwindungssollverlauf, von dem der tatsächliche Schwindungsverlauf y_1 abgezogen wird, so dass sich eine Schwindungsregeldifferenz e_1 ergibt. Der Regler K_1 gibt eine Stellgröße u_1 aus, die als Führungsgröße w_2 in den nachgeschalteten Regler K_2 eingegeben wird. Am Eingang des Reglers K_2 wird die Trocknungswirkungs-Regelgröße e_2 , die sich als Differenz der Führungsgröße w_2 und einer Ist-Größe y_2' , die sich durch Umrechnung mittels der Recheneinheit aus der Ist-Größe y_2 ergibt, berechnet. Der Regler K_2 gibt eine Stellgröße u_2 aus, die in die Regelstrecke G , in diesem Fall in die Trocknungseinrichtung 02 durch Beeinflussung der Stelleinrichtung 03 einfließt. Mittels der Messaufnehmer 05 werden dann die Ausgangsgrößen y_1 als Stellgröße der Schwindungsregelung und y_2 als Stellgröße der Temperaturregelung zugeführt.

[0051] Fig. 5 zeigt ein Ausführungsbeispiel des erfin-

dungsgemäßen Trocknungsverfahrens mittels der in **Fig. 4** schematisch dargestellten Regelkreiskomponenten. In einer Trocknungseinrichtung 02 werden Dachziegel mittels eines Trockners und warmer Ofenabluft sowie einer Umluftumwälzung (nicht dargestellt) getrocknet, wobei die Ausgangsgrößen y messtechnisch mit Hilfe von Messaufnehmern 05 ermittelt werden. Des Weiteren fließt ein Schwindungssollverlauf der Bauteile in die Regelung ein und dient als Sollschwindung w_1 . Die tatsächliche Schwindung y_1 wird mit Hilfe von Schwindungsaufnehmern, beispielsweise Dehnungsmessstreifen, Potentiometern oder optischen Systemen, aufgenommen und mittels des PID-Reglers K_1 12 in einen Stellwert u_1 transformiert. Dieser Stellwert u_1 dient als Führungsgröße w_2 des nachgeschalteten PID-Reglers K_2 14 und wird als Differenztemperatur zwischen aktueller Temperatur und Kühlgrenztemperatur der Trocknungseinrichtung 02 betrachtet. Parallel hierzu werden die tatsächliche Temperatur und die relative Feuchte der Luft innerhalb der Trocknungseinrichtung 02, y_{21} und y_{22} aufgenommen. Aus diesen kann eine Recheneinheit 15 wiederum eine tatsächliche Differenztemperatur zwischen aktueller Temperatur und Feuchtkugelttemperatur der Trocknungseinrichtung 02 ermitteln, die als Regelgröße y_2' ebenfalls in den PID-Regler K_2 14 eingeht. Der PID-Regler K_2 14 ermittelt daraus eine Stellgröße u_2 , die unmittelbar die Klappenstellung 03 des Trockners 02 steuert und damit die Regelstrecke (Trocknungseinrichtung 02) beeinflusst. Parallel hierzu werden die ermittelte Temperatur und relative Feuchte w_{11} , w_{22} protokolliert und stehen mittels der Protokolleinheit 16 für nachfolgende Trocknungsvorgänge zur Verfügung. Durch die Hintereinanderschaltung der beiden Regler K_1 12 und K_2 14 wird zunächst eine Schwindungsregelung vorgenommen, da die Schwindungsabnahme des Bauteils zunächst im Regelkreis dominiert.

[0052] Grundsätzlich kann anstelle der Differenztemperatur zwischen aktueller Temperatur und Kühlgrenztemperatur andere physikalische Größen, die aus relativer Feuchte und aktueller Temperatur der Trocknungsvorrichtung (2) ableitbar sind, als Regelgröße y_2' in den Folgeregler K_2 14 eingehen, um nach beendeter Schwindung eine Resttrocknung des Bauteils zu erreichen. Als Beispiel solcher Differenzgrößen sind unter anderem die Druckdifferenz zwischen Wasserdampf sättigungspartialdruck und momentanen Wasserdampfpartialdruck oder Massendifferenz zwischen maximalen Wasserdampfaufnahmevermögen im Sättigungszustand zu momentanen Wasserdampfgehalt zu nennen.

[0053] Spätestens ab dem Zeitpunkt, ab dem der langsamste Formling sein Schwindungsendmaß fast erreicht hat (Knickpunktsfeuchte) ist die Schwindung jedoch nicht mehr geeignet, um bis zur gewünschten Restfeuchte eine genaue Regelung fortzusetzen. Daher wird durch den zweiten Regler K_2 nach Erreichen des Schwindungsendmaßes, der sich in einem konstanten Wert der Stellgröße u_1 niederschlägt, die Differenztemperatur zwischen Kühlgrenztemperatur und Temperatur der Trocknungs-

einrichtung y_2' als Regelgröße weiter ausgeregelt. Da die Differenztemperatur im allgemeinen bei den Sensorausgängen nicht parallel zu den Signalen Temperatur und relativer Feuchte vorliegt, werden die aktuelle Temperatur y_{21} und die relative Feuchte y_{22} in der Trocknungseinrichtung 02 bestimmt und mittels eines rechnerischen Zusammenhangs auf die tatsächliche Differenztemperatur zwischen Kühlgrenztemperatur und Temperatur in der Trocknungseinrichtung durch eine Recheneinheit 15 umgeformt. Somit dient der Unterschied zwischen der Ausgangsgröße des PID-Reglers K_1 12 als Führungsgröße w_2 und die tatsächliche Differenztemperatur y_2' als Trocknungswirkungs-Regeldifferenz 13 des nachgeschalteten Reglers 14, der eine Temperaturregelung vornimmt.

[0054] Mit der rechnerischen Zusammenführung der beiden physikalischen Größen relative Feuchte und Temperatur y_{21} , y_{22} in der Trockeneinrichtung 01 auf einer Größe der Differenztemperatur zwischen Kühlgrenztemperatur und Temperatur in der Trockeneinrichtung, die einem definierten Trocknungsvermögen der Luft entspricht, wird es ermöglicht, dass die Prozessregelung mit einem Stellglied über die ganze Trocknungsdauer optimal und stabil auch bei schwankender Zulufttemperatur geführt werden kann.

[0055] Die Schwindungssollverläufe ergeben sich aus der Wahl der Referenzstrecke, der Rohstoffmischung, der Formlingsgröße und -geometrie und der geplanten Trockenzeit. Diese leicht zu klassifizierenden Kurven weisen eine hohe Ähnlichkeit auf, wobei der signifikanteste Unterschied die Bauteils- oder Formlingsgeometrie (Flächen- oder Kugelmodell) ist. Wie in **Fig. 2** dargestellt, bestimmt die Knickpunktsfeuchte den Zeitpunkt, in dem die Schwindung des Bauteils nicht mehr geeignet ist, als Führungsgröße für die Regelung des Trocknungsvorgangs zu dienen. Optisch ist die Knickpunktsfeuchte erkennbar, wenn der Formling seine Farbe ändert, weil der Feuchtespiegel unter die Formlingsoberfläche sinkt.

[0056] Da im Rahmen einer gleich bleibenden Produktionsqualität die Größen der Rohstoffzusammensetzung und der Wassergehalt der Bauteile konstant gehalten werden, ist die Knickpunktsfeuchte stets reproduzierbar. Deshalb ist eine Vordefinition des Wertes der Knickpunktsfeuchte, an der von der Schwindungsregelung auf die Temperaturregelung umgeschaltet wird, möglich und vorteilhaft. Jedoch leistet die in **Fig. 5** dargestellte Kaskadenregelung eine automatische Umschaltung, denn nachdem die Bauteile ihr Schwindungsmaß entsprechend der Knickpunktsfeuchte erreicht haben, wird vom Schwindungsregler 12 auf einen Parametersatz zur Vorgabe des Stellgrößenverlaufs u_2 umgeschaltet, so dass lediglich die vorgegebene Änderung der Differenztemperatur der Trocknungseinrichtung 02 als Regelgröße das Verhalten des Temperaturreglers 14 bestimmt. Eine Vordefinition des Knickpunktwertes beispielsweise bei ca. 5 % des Schwindungsendmaßes kann sicherstellen, dass zuverlässig zwischen Schwindungsregelung und Temperaturregelung umgeschaltet wird.

[0057] Die Ausgangsgröße u_1 des Schwindungsreglers 12 weist einen Stellwert von 0 bis 100 % auf, der jedoch auch in einer Größe von 0 bis 100 Kelvin ausgegeben werden kann und damit als Differenztemperatur von Lufttemperatur zur Kühlgrenztemperatur (Feuchtkugeltemperatur) definiert werden kann. Eine geringere Schwindung als durch den Sollwert vorgegeben erhöht den Stellwert (Differenztemperatur von Lufttemperatur zur Kühlgrenztemperatur), und eine zu hohe Schwindung verringert den Stellwert. Je größer nun die Differenztemperatur von Lufttemperatur zur Kühlgrenztemperatur ist, desto stärker ist die Trocknungswirkung der Luft. Für ein nicht schwingendes Verhalten der Regelung muss nur der Regler entsprechend parametrisiert werden.

[0058] Bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit des Trocknungsmediums über dem Bauteil und vorliegender zu geringer Schwindungsgeschwindigkeit ist die Sättigung des Trocknungsmediums zu hoch. Folglich ist die Sättigung der Luft abzusenken, wobei diese von den beiden Größen Temperatur und relativer Feuchte abhängt. Eine Veränderung sowohl jeder einzelnen Größe, als auch beider Größen (Anhebung der Temperatur und/oder Absenkung der relativen Feuchte) hat eine Veränderung (Absenkung) der Sättigung und damit eine erhöhte Feuchtaufnahmefähigkeit zur Folge, welche wiederum den Formling schneller trocknen und damit auch schneller schwinden lässt. Als Maß für die Aufnahmefähigkeit des Trockenmediums können daher beispielsweise die Differenz zwischen dem gemessenen Luftpartialdruck und dem Sättigungspartialdruck in Pascal, das Wasserdampfaufnahmevermögen in Kilogramm Dampf pro Kilogramm trockener Luft oder das Wasseraufnahmevermögen in Kilogramm Wasser pro Kilogramm trockener Luft oder eben die Differenztemperatur von Lufttemperatur zur Kühlgrenztemperatur herangezogen werden, wobei sich die vorgenannten Größen beispielsweise für das Baumaterial Keramik in üblichen Temperaturbereichen hinreichend linear verhält und sich somit vorzüglich als Regelgröße anbietet. Alle vier vorgenannt aufgeführten Größen können aus der gemessenen Temperatur und der relativen Feuchte berechnet werden, wobei diese Umrechnung die Recheneinheit 15 vornimmt.

[0059] Wenn die tatsächliche Schwindung y_1 kleiner oder gleich der geometrie- und materialabhängigen Knickpunkts-Sollschwindung $w_{\text{Knickpunkt}}$ ist (siehe Fig 2 und 3), erfolgt keine weitere Schwindung des Bauteils mehr, so dass eine Regelung des Trocknungsvorgangs nicht mehr auf Basis der Bauteilschwindung erfolgen kann. An diesem Zeitpunkt wird eine Vorgabe des Sollwertes w_2 des nachfolgenden Reglers K_2 14 auf Basis vorprotokollierter Werte $u_n - u_k$, die als Parametersollwerte für die Trockenzeit nach Erreichen der Knickpunktsfeuchte des Formlings abgelegt sind, getroffen, die dem Protokoll der Parametersollwerte 16 entnommen werden können.

[0060] Fig. 6 zeigt schematisch ein Ausführungsbei-

spiel einer Trocknungsvorrichtung 01, mit deren Hilfe ein erfinderisches Trocknungsverfahren ausgeführt werden kann. Die Trocknungsvorrichtung 01 umfasst eine Trocknungseinrichtung 02, in dem Bauteile, in diesem Fall Dachziegel, mittels trockener, warmer Luft (Bsp. Ofenabwärme) getrocknet werden. Hierzu kann die trockene, warme Luft, insbesondere die Ofenabwärme von außerhalb der Trocknungsvorrichtung 01 kommen, d.h. der Ofen muss nicht Bestandteil der Trocknungsvorrichtung sein. Hierzu kann die Zuluftmenge sowie eine Luftumwälzung mittels einer Stelleinrichtung 03 betätigt werden. Innerhalb der Trocknungseinrichtung 02 sind Messaufnehmer 05 angeordnet. Diese Messaufnehmer 05 umfassen einen ersten Schwindungsmessaufnehmer 07 und einen zweiten Schwindungsmessaufnehmer 08, wobei der erste Schwindungsmessaufnehmer 07 an dem Formling, der erfahrungsgemäß am schnellsten trocknet, angeordnet ist. Der zweite Schwindungsmessaufnehmer 08 ist an denjenigen Formling angeordnet, der aus Experimenten oder erfahrungsgemäß bekannt am langsamsten trocknet. Des Weiteren umfassen die Messaufnehmer 05 einen Temperatursensor 10 sowie einen Sensor der relativen Feuchte 11. Die Messgrößen der Schwindungsmessaufnehmer 07, 08 werden als Regelgrößen y_1 sowie die Temperatur des Temperatursensors 10 und die relative Feuchte der Luft innerhalb der Trocknungseinrichtung 02 mittels des relativen Feuchtesensors 11 als Regelgröße y_2 in eine Regeleinrichtung 04 eingegeben.

[0061] Die Regeleinrichtung 04 umfasst eine Schwindungssollverlaufseinheit 06, die einen Schwindungssollverlauf, der bauteilspezifisch ist und von Material, Form und weiteren Parametern des oder der Bauteile abhängt, ausgibt. Des Weiteren umfasst die Regeleinrichtung 04 zwei Folgeglieder K_1 12 und K_2 14, die in einer Regelkaskade geschaltet sind. Außerdem ist eine Recheneinheit 15 vorgesehen, die aus den Regelgrößen y_2 mittels arithmetischen Berechnungen eine abgeleitete Regelgröße y_2' generiert. Schließlich umfasst die Regeleinrichtung 04 eine Protokolleinheit 16, die neben den beiden Regelgrößen y_1 und y_2 die Ausgangsstellgröße u_2 der Regeleinrichtung 04 protokollieren kann. Diese Protokolleinheit 16 ist wiederum an eine Steuereinrichtung 17 angeschlossen und ermöglicht nach mehrmaligem wiederholten Durchführen eines Trocknungsvorgangs und Auffinden optimierter Trocknungsparameter eine reine Steuerung der Trocknungseinrichtung 02 mittels der Steuereinrichtung 17 und der Stelleinrichtung 03.

[0062] Während des gesamten Trocknungsverfahrens erfolgt die Regelung zum einen mit den durch die Schwindungsaufnehmer 07, 08 aufgenommenen Schwindungsgradienten sowie mit den gemessenen Größen Temperaturen und relative Feuchte aus denen die Größe der Differenztemperatur zwischen Kühlgrenztemperatur und trockener Temperatur mittels einer Recheneinheit 15 bestimmt werden kann. Bis zum Erreichen der Knickpunktsfeuchte des Formlings oder genauer bis zum Umschaltzeitpunkt zwischen der Schwindungs-

regelung wird eine Schwindungsregelung anhand der Messwerte y_1 der ersten und zweiten Messwertaufnehmer 07, 08 und dem Schwindungssollverlauf 06, die als Schwindungsregeldifferenz 09 Eingang in den Regler K_1 12 finden, durchgeführt. Ist die Knickpunktsfeuchte des am langsamsten trocknenden Bauteils (Schwindungsmessaufnehmer 08) erreicht, wird vom Schwindungsregler 12 auf einen Parametersatz zur Vorgabe des Stellgrößenverlaufs u_2 umgeschaltet.

[0063] Die im Laufe eines ersten Trocknungsvorgangs durch die Protokolleinheit 16 protokollierten Werte können in einem zweiten Trocknungsvorgang optimiert werden, wobei in einem dritten nachgeschalteten Trocknungsvorgang die Qualität der getrockneten Bauteile nochmals verifiziert werden kann. Spätestens nach Abschluss von drei Trocknungsvorgängen sollten in der Protokolleinheit 16 optimierte Werte gespeichert sein, so dass mittels der Steuereinrichtung 17 und der Steuereinrichtung 03 nachfolgende Trocknungsvorgänge lediglich gesteuert mit optimalen Steuerungsparametern mit einer gleich bleibenden Qualität durchgeführt werden können.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Trocknung mindestens eines feuchte- und trocknungsschwindungsbehafteten Halb- oder Fertigbauteils, wobei zumindest ein erster geregelter Trocknungsvorgang durchgeführt wird, bei dem eine Regelung von Trocknungsparametern wie Temperatur, Luftstrommenge etc. unter Berücksichtigung zumindest einer Regeldifferenz (09) zwischen tatsächlicher Schwindung des Bauteils und einem vorgegebenen bauteilspezifischen Schwindungssollverlauf erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1
dadurch gekennzeichnet,
dass Prozessparameter des geregelten Trocknungsvorgangs protokolliert werden, um Führungs- und/oder Stellgrößen für nachfolgende geregelte oder gesteuerte Trocknungsvorgänge generieren zu können.
3. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche
dadurch gekennzeichnet,
dass der Regelkreis (19) eine weitere Regelung basierend auf den Messsignalen von relativer Feuchte und/oder Temperatur umfasst.
4. Verfahren nach Anspruch 3
dadurch gekennzeichnet,
dass während eines Trocknungsvorgangs innerhalb einer ersten Trocknungsphase zumindest teilweise eine Schwindungsregelung und innerhalb einer anschließenden zweiten Trocknungsphase zumindest teilweise eine Temperaturregelung und/oder eine

Feuchterege lung vorgenommen wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4
dadurch gekennzeichnet,
dass in der ersten Trocknungsphase die Schwindungsregelung vorgenommen wird, und in der zweiten Trocknungsphase die Temperaturregelung und/oder die Feuchterege lung vorgenommen wird.
6. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche
dadurch gekennzeichnet,
dass der Regelkreis (19) zumindest zwei Folgeregler (12, 14) umfasst, wobei der Stellwert u_1 eines ersten Folgereglers K_1 als Führungsgröße w_2 eines zweiten nachgeschalteten Folgereglers K_2 dient.
7. Verfahren nach Anspruch 6
dadurch gekennzeichnet,
dass der erste Folgeregler K_1 eine Schwindungsregelung vornimmt, wobei die Regeldifferenz e_1 der Schwindungsregelung eine Schwindungsregeldifferenz (09) zwischen tatsächlicher Bauteilschwindung y_1 und einem Schwindungssollverlauf w_1 ist, und dessen Stellwert u_1 als Führungsgröße w_2 für eine Temperatur- und/oder Feuchterege lung des zweiten Folgereglers K_2 dient, wobei die zweite Regeldifferenz e_2 eine Temperatur- und/oder Feuchterege ldifferenz (13) ist.
8. Verfahren nach Anspruch 7
dadurch gekennzeichnet,
dass die Führungsgröße w_2 und/oder Regelgröße y_2 der Temperaturregelung des Folgereglers K_2 eine aus Temperatur y_{21} und relativer Feuchte y_{22} der Trocknungseinrichtung (02) ableitbare physikalische Differenzgröße, insbesondere Temperaturdifferenz zwischen Feuchtkugeltemperatur und trockener Temperatur, Druckdifferenz zwischen Wasserdampfsättigungspartialdruck und momentanem Wasserdampfpartialdruck oder Massendifferenz zwischen maximalem Wasserdampfaufnahmevermögen im Sättigungszustand zu momentanem Wasserdampfgehalt ist.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 oder 8
dadurch gekennzeichnet,
dass die Trocknungswirkungs-Regeldifferenz (13) eine Differenz e_2 zwischen einer aus der Schwindungsregelung resultierenden Stellwert u_1 ermittelbaren Führungsgröße w_2 und einer aus relativer Feuchte y_{22} und Temperatur y_{21} der Trocknungskammer (02) bestimmbaren Regelgröße y_2 ist.
10. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche
dadurch gekennzeichnet,
dass zur Ermittlung der tatsächlichen Schwindung

mindestens ein Schwindungsmessaufnehmer (07) an mindestens einem Bauteil angeordnet ist, das die tatsächliche Schwindung des Bauteils aufnimmt.

11. Verfahren nach Anspruch 10
dadurch gekennzeichnet,
dass mindestens zwei Schwindungsmessaufnehmer (07, 08) an zwei Bauteilen angeordnet sind, wobei das erste Bauteil das am schnellsten trocknende Bauteil und das zweite Bauteil das am langsamsten trocknende Bauteil ist. 5 10
12. Verfahren nach Anspruch 11
dadurch gekennzeichnet,
dass in der ersten Trocknungsphase der Schwindungsregelung zunächst die Schwindung des ersten Bauteils und bei Ende der Schwindungsphase die Schwindung des zweiten Bauteils zur Bestimmung der Schwindungsregeldifferenz e_1 (09) verwendet wird. 15 20
13. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche
dadurch gekennzeichnet,
dass im Rahmen des Verfahren mindestens drei Trocknungsvorgänge durchgeführt werden, wobei ein erster Trocknungsvorgang mit einer vorgegebenen Trockenzeit durchgeführt wird, der zweite Trocknungsvorgang unter Optimierung der Sollwertkurven durchgeführt wird und ein dritter Trocknungsvorgang zur Verifikation des Trocknungsergebnisses durchgeführt wird. 25 30
14. Verfahren nach Anspruch 2
dadurch gekennzeichnet,
dass weitere Trocknungsvorgänge zumindest ohne eine Schwindungsregelung, insbesondere als gesteuerte Trocknungsvorgänge auf Basis der protokollierten Trocknungsparameter durchgeführt werden. 35 40
15. Trocknungsvorrichtung (01) zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorangegangenen Verfahrensansprüche umfassend eine Trocknungseinrichtung (02) zur Trocknung von mindestens einem Bauteil, mindestens eine Stalleinrichtung (03) zur Einstellung von Trocknungsparametern wie Temperatur, Luftstrommenge, Luftumwälzung oder ähnlichem in der Trocknungseinrichtung (02), eine Regeleinrichtung (04) zur Regelung des Trocknungsvorgangs durch Betätigung der Stalleinrichtung (03) mittels eines Stellwerts u_2 und mindestens einen Messaufnehmer (05) zur Aufnahme einer Regelgröße y_1
dadurch gekennzeichnet,
dass die Regeleinrichtung (04) zumindest eine Schwindungssollkurveneinheit (06) zur Ausgabe einer bauteilspezifischen Schwindungssollkurve min- 45 50 55

destens eines Bauteils umfasst, und mindestens ein Messaufnehmer (05) als Schwindungsmessaufnehmer (07, 08) ausgebildet ist, der die Schwindung des Bauteils im Laufe eines Trocknungsvorgangs als Regelgröße y_1 aufnehmen kann, wobei die Regeleinrichtung (04) ausgebildet ist, um eine Schwindungsregeldifferenz e_1 (09) zwischen tatsächlichem Bauteilschwind y_1 und dem Schwindungssollverlauf w_1 auszuregeln.

16. Vorrichtung (01) nach Anspruch 15,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Vorrichtung (01) zumindest zwei Schwindungsmessaufnehmer (07, 08) umfasst, wobei ein erster Schwindungsmessaufnehmer (07) an einem ersten am schnellsten trocknende Bauteil und ein zweiter Schwindungsmessaufnehmer (08) an einem zweiten am langsamsten trocknende Bauteil angeordnet ist.
17. Vorrichtung (01) nach einem der vorangegangenen Vorrichtungsansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Vorrichtung mindestens einen Temperatursensor (10) und einen Sensor (11) der relativen Feuchte der Luft innerhalb der Trocknungseinrichtung (02) umfasst.
18. Vorrichtung (01) nach einem der vorangegangenen Vorrichtungsansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Regeleinrichtung (04) mindestens einen ersten Regler K_1 (12) umfasst, der als PID-Regler ausgelegt ist.
19. Vorrichtung (01) nach einem der vorangegangenen Vorrichtungsansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Regeleinrichtung (04) mindestens zwei Regler K_1 , K_2 (12, 14) umfasst, die als Folgeregler verkettet sind, wobei der erste Folgeregler K_1 (12) ausgelegt ist, eine Schwindungsregeldifferenz (09) auszuregeln, und der zweite Folgeregler K_2 (14) ausgelegt ist, eine Temperatur- und/oder Feuchteregeldifferenz (13) auszuregeln, wobei die Stellgröße u_1 des ersten Folgereglers K_1 (12) als Führungsgröße w_2 des zweiten Folgereglers K_2 (14) dient.
20. Vorrichtung (01) nach Anspruch 17
dadurch gekennzeichnet,
dass die Regeleinrichtung (04) eine Recheneinheit (15) umfasst, die ausgelegt ist, aus den Messwerten y_{21} , y_{22} des Temperatursensors (10) und des Sensors (11) der relativen Feuchte eine physikalische Trocknungswirkungs-Differenzgröße (13), insbesondere Differenztemperatur zwischen Feuchtkugeltertemperatur und trockener Temperatur, Druckdifferenz zwischen Wasserdampfsättigungspartial-

druck und momentanem Wasserdampfpartialdruck oder Massendifferenz zwischen maximalem Wasserdampfaufnahmevermögen im Sättigungszustand zu momentanem Wasserdampfgehalt des Bauteils zu bestimmen.

5

21. Vorrichtung (01) nach einem der vorangegangenen Vorrichtungsansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Regeleinrichtung (04) eine Protokolleinheit (16) umfasst, die ausgelegt ist, zumindest die Ausgangsstellgröße u_2 der Regeleinrichtung (04) während mindestens eines Trocknungsvorgangs zu protokollieren.

10

15

22. Vorrichtung (01) nach Anspruch 21,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Vorrichtung (01) des weiteren eine Steuereinrichtung (17) umfasst, die ausgelegt ist, auf Basis der von der Protokolleinheit (16) der Regeleinrichtung (04) aufgenommen Stellgrößen u_1 und/oder u_2 die Stelleinrichtung (03) der Trocknungseinrichtung (02) zur Durchführung weiterer Trocknungsvorgänge zu steuern.

20

25

30

35

40

45

50

55

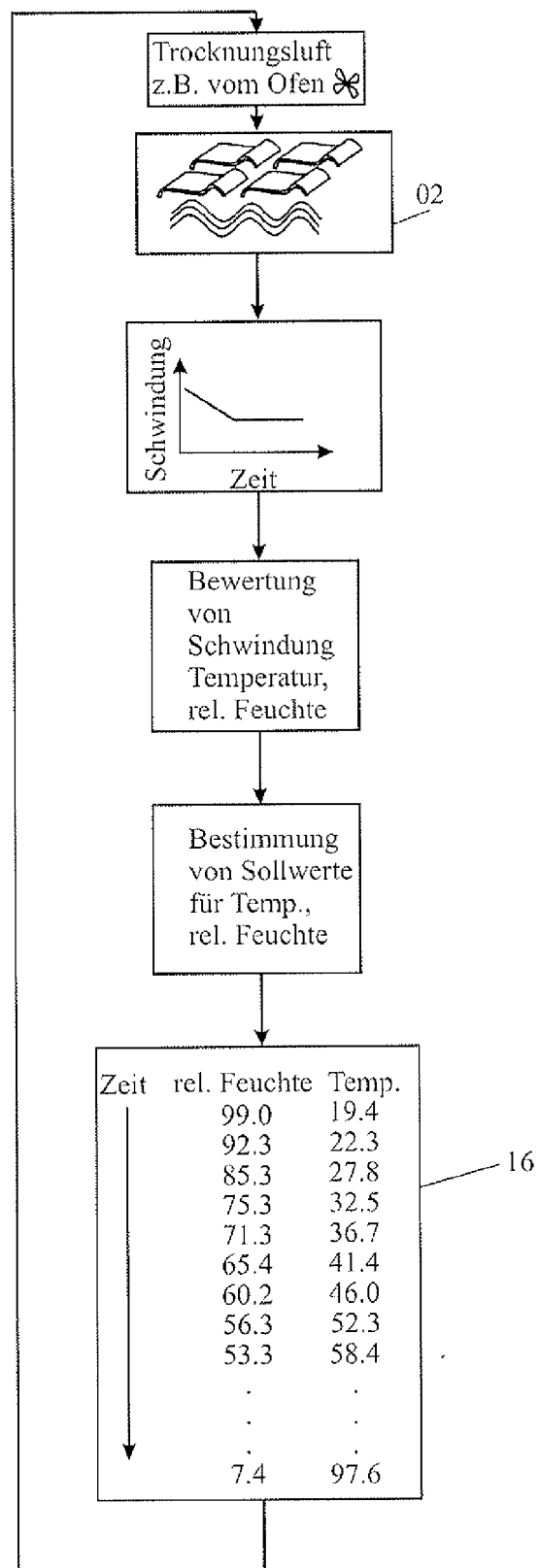
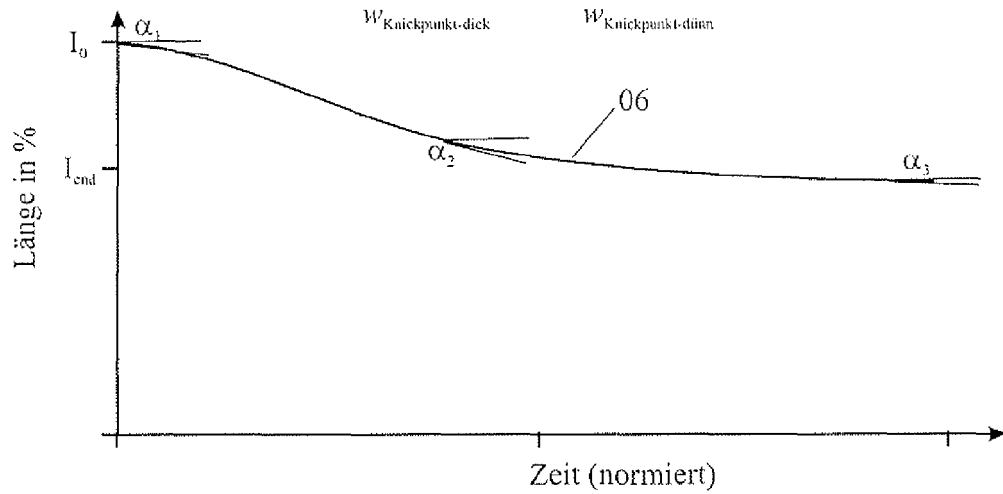
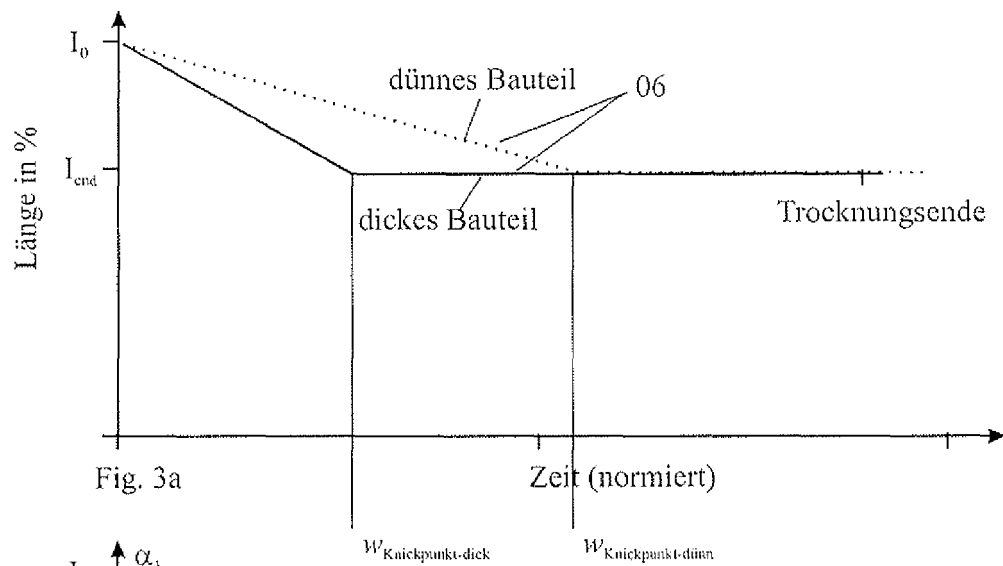
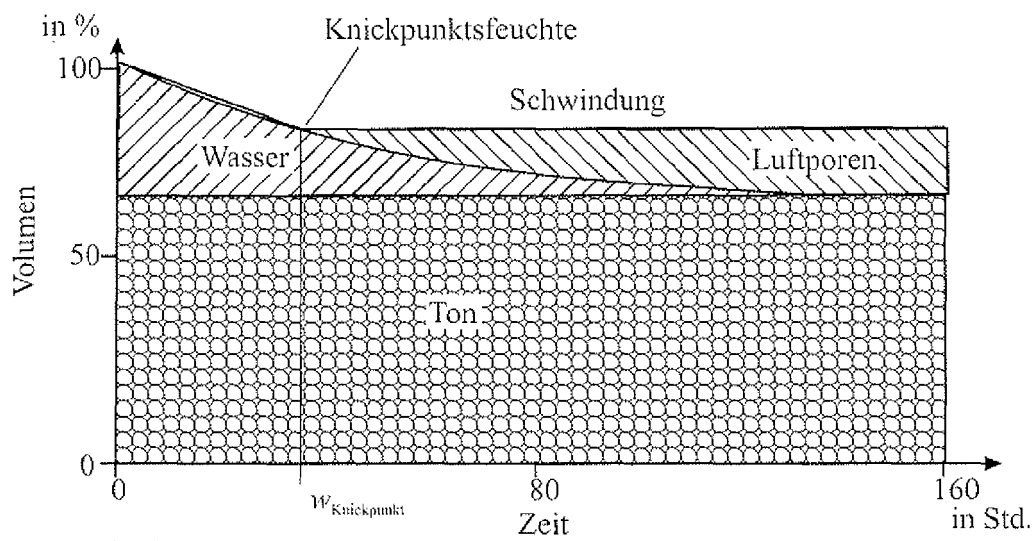


Fig. 1

Stand der Technik



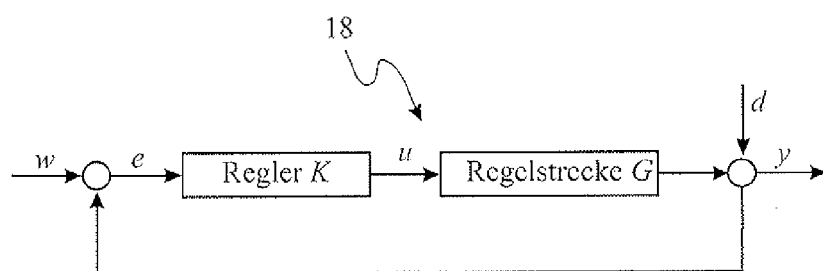


Fig. 4a Stand der Technik

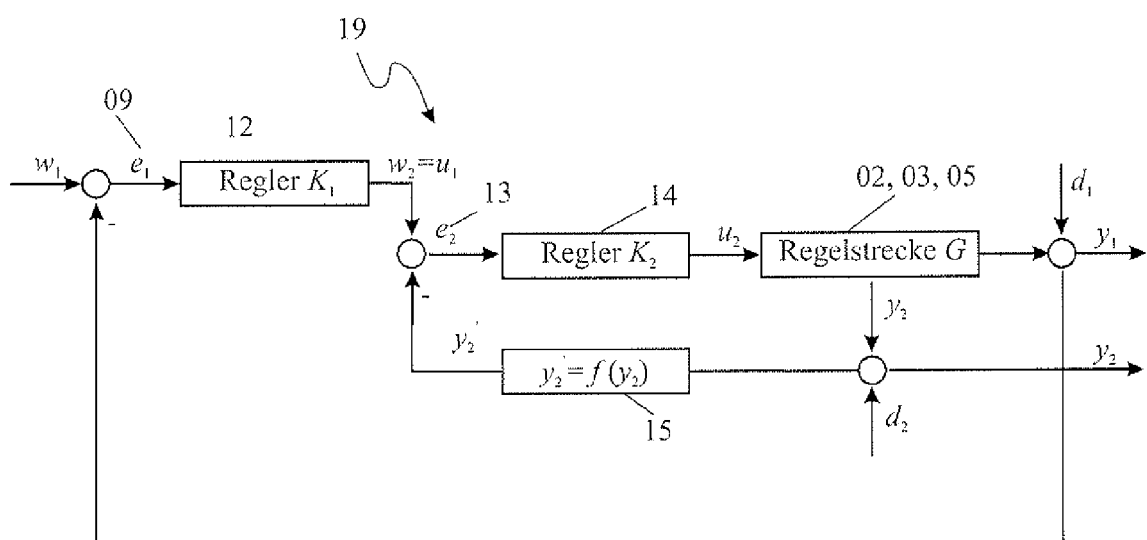


Fig. 4b

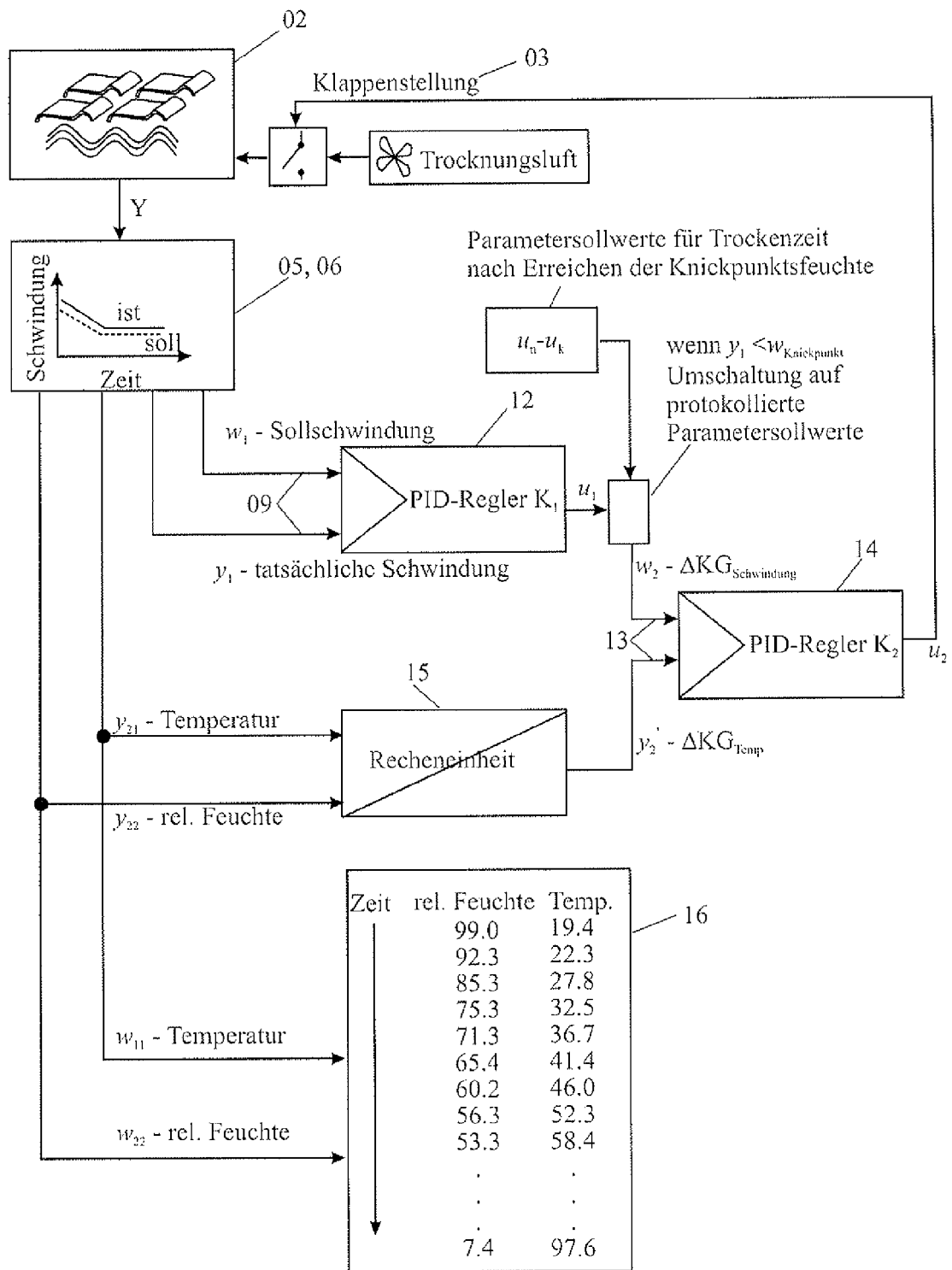


Fig. 5

Protokoll von Parametersollwerten
für nachfolgende Trocknungsvorgänge

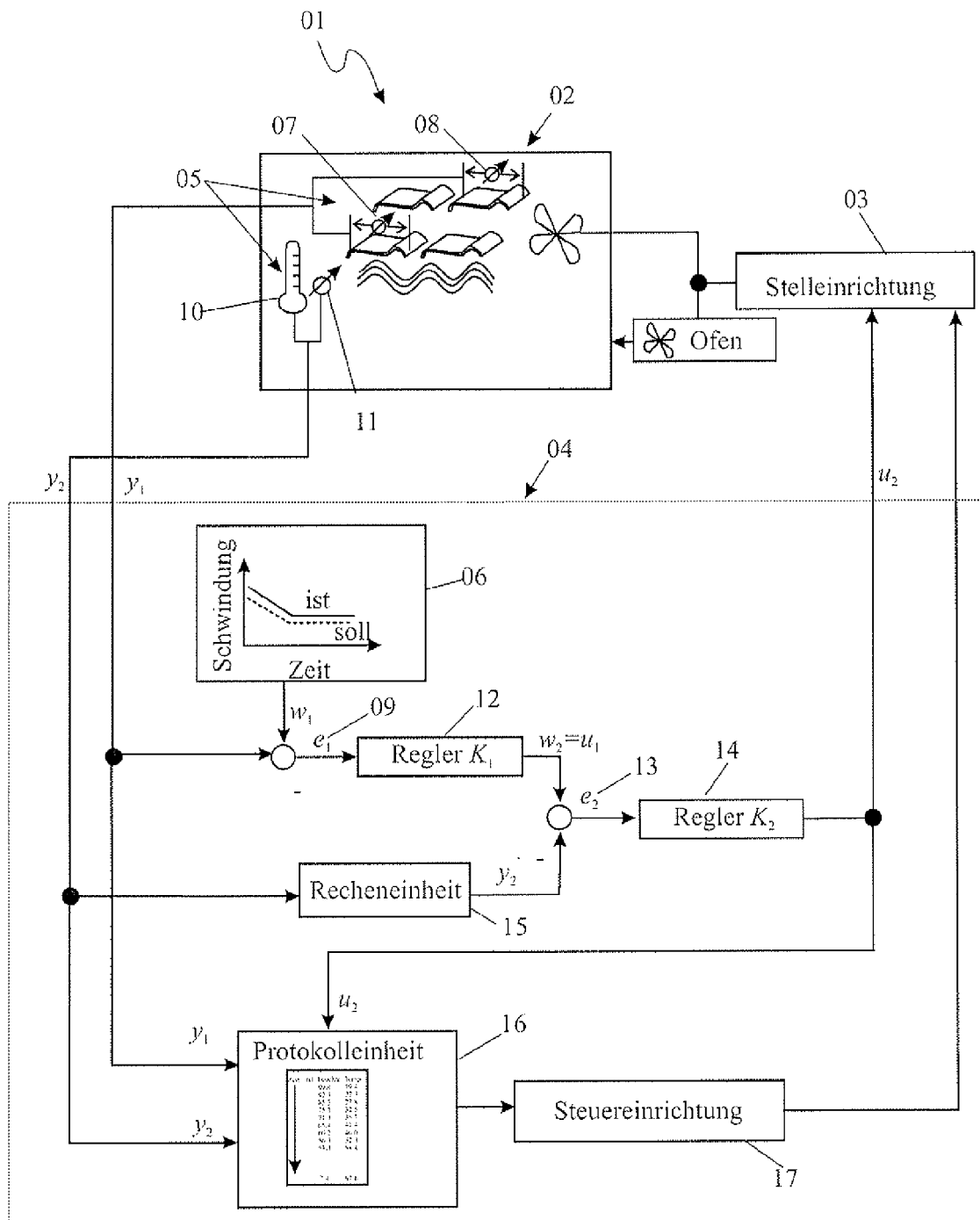


Fig. 6

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 Nicht-Patentliteratur

- **von Uta Telljohann.** Theoretische und experimentelle Untersuchungen der Trocknung plastisch geformter Ziegelrohlinge. *Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik*, 04. Juni 2004 **[0010]**