

Patentansprüche

1. Verfahren zum Erzeugen und zum Fusionieren von ultradichtem Wasserstoff, bei dem molekularer Wasserstoff in zumindest einem Hohlraum hineingeleitet und katalysiert wird, gekennzeichnet durch die folgenden Schritte:

Einleiten einer Kondensation des molekularen Wasserstoffs an einem Katalysator des Hohlraums zu einem ultradichten Wasserstoff,

Einleiten einer Fusion ~~des ultradichten Wasserstoffs~~ in dem zumindest einem Hohlraum durch energetische Anregung des kondensierten ultradichten Wasserstoffs,

Hinausleiten einer Reaktionswärme aus dem zumindest einem Hohlraum, =

wobei der molekulare Wasserstoff katalytisch in atomaren Wasserstoff gespalten und anschließend in einer Vielzahl an Kavitäten des Katalysators kondensiert.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei molekularer Wasserstoff nach dem Kondensieren zum ultradichten Wasserstoff gebunden wird.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, wobei die Fusion elektrisch, elektromagnetisch oder mechanisch eingeleitet wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die aus dem zumindest einem Hohlraum hinausgeleitete Reaktionswärme zum weiteren Initiieren von Fusionen genutzt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die aus dem zumindest einen Hohlraum hinausgeleitete Reaktionswärme in mechanische, elektrische oder chemische Energie umgewandelt wird.

6. Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 5, mit zumindest einem Hohlraum zum Aufnehmen eines molekularen Wasserstoffs, mit einem Katalysator zum Katalysieren des

molekularen Wasserstoffs und mit einer Initiierungsquelle zum Initiieren einer Fusion, dadurch gekennzeichnet, dass der zumindest eine Hohlraum zumindest eine Pore oder Fehlstelle eines metallischen oder keramischen Schaums ist, die an ihren Oberflächen zumindest bereichsweise von dem Katalysator umgeben ist und eine zumindest teilweise Durchlässigkeit für elektromagnetischen Wellen aufweist.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, wobei der Katalysator die Form einer Katalysatorbeschichtung aufweist.

8. Vorrichtung nach den Ansprüchen 6 oder 7, wobei die Katalysatorbeschichtung eine körnige Struktur aufweist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, wobei der molekulare Wasserstoff an der Katalysatorbeschichtung kondensierbar ist zu ultradichtem Wasserstoff.

10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 8, wobei ultradichter Wasserstoff in der Katalysatorbeschichtung bindbar ist.

11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 9, wobei die Katalysatorbeschichtung ein Titan-Oxid aufweist.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 11, wobei die Oberfläche des zumindest einen Hohlraums durch den kondensierten ultradichten Wasserstoff beschichtbar ist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 12, wobei zur Bildung von ultradichtem Wasserstoff unter hohen Drücken weitere Metalle zum Katalysator hinzugefügt werden.



Elbpatent
Marschall & Partner

Elbpatent | Jessenstraße 4 | D-22767 Hamburg

Europäisches Patentamt
Bob-van-Benthem-Platz 1
80298 München

Elbpatent
Marschall & Partner
Patent- und
Rechtsanwaltskanzlei mbB

21.03.2017 / IB

Titel: Verfahren und Vorrichtung zum Erzeugen und zum
Fusionieren von ultradichtem Wasserstoff

Ihr Zeichen:

Unser Zeichen: 11040EP

Anmelder: Airbus DS GmbH, Taufkirchen

Anmelde-Nr.: 16160302.2

Auf den Bescheid vom 26. September 2016.

Es wird Prüfungsantrag gestellt. Es wird gebeten, die fällige Prüfungsgebühr sowie die Benennungsgebühr vom laufenden Konto 28002242 der Vertreterin abzubuchen.

I. Unterlagen

Hiermit wird ein neuer Satz Patentansprüche eingereicht, der an die Stelle des ursprünglichen Patentanspruchssatzes treten. Es wird gebeten, die Beschreibung zurückzustellen, bis mit der Prüfungsabteilung Einigkeit über eine gewährbare Anspruchsfassung erzielt wurde.

Der neue Satz Patentansprüche umfasst einen unabhängigen neuen Patentanspruch 1. Die übrigen abhängigen neuen Patentansprüche 2 bis 13 sind unverändert gegenüber den ursprünglichen Patentansprüchen 2 bis 13.

Im neuen Patentanspruch 1 ist der Verfahrensschritt des Einleitens einer Fusion „durch energetische Anregung des kondensierten ultradichten

Sitz & Postanschrift
Postal Address
Hamburg
Jessenstraße 4
D-22767 Hamburg

Tel +49 (0) 40 30 60 688 0
Fax +49 (0) 40 30 60 688 10

post@elbpatent.de
www.elbpatent.de

Zweigstelle
Branch Office
München
Bavariaring 26
D-80336 München

Tel +49 (0) 89 32 49 96 87
Fax +49 (0) 89 32 49 96 88

Deutsche Bank
Marschall & Partner
BIC/SWIFT-Code
DEUTDE33HAN
IBAN
DE83 2007 0024
0737 3020 00

USt-IdNr./VAT-No
DE 283142550

PartGmbH
PR 809 AG Hamburg
Sitz: Hamburg

Wasserstoffs“ präzisiert worden. Diese Präzisierung ist durch die Beschreibung, Seite 13, Absatz 2, Zeilen 1 bis 5 gestützt.

Zum anderen wurde der neue Patentanspruch 1 durch das Merkmal, dass „der molekulare Wasserstoff katalytisch in atomaren Wasserstoff gespalten und anschließend in einer Vielzahl an Kavitäten des Katalysators kondensiert“ präzisiert. Die Aufnahme dieses Merkmals ist durch die Beschreibung Seite 13, Absatz 1 gestützt.

II. Artikel 83 – Einwände wegen der Offenbarung

Mit den neuen Unterlagen werden die Einwände bezüglich der Offenbarung gemäß Artikel 83 beseitigt. In dem erweiterten europäischen Recherchenbericht (EERB) vom 25. Juli 2017 werden die beiden angeblichen Probleme erhoben:

1. Es soll keine ausreichenden Beweise in der Wissenschaft geben, dass ultradichter Wasserstoff hergestellt werden kann. Derartige Beweise sind auch nicht notwendig, denn gemäß der Beschreibung, Seite 4, Absatz 2, Zeilen 10 und 11, werden im Sinne der Erfindung unter Wasserstoff „sämtliche Wasserstoffisotope“ verstanden. Deuterium ist nun ein solches Wasserstoffisotop, auch wenn es nicht explizit in der Anmeldung genannt wird. Da die Herstellung von ultradichtem Deuterium durch die D6 und auch durch die D1 nachgewiesen ist, ist im Sinne der Erfindung auch die Herstellung von ultradichtem Wasserstoff per se belegt.

Die D6 ist übrigens nicht als Stand der Technik gelistet. Aufgrund der zur gleichen Familie gehörenden EP-Anmeldung 16160300.6 wird jedoch angenommen, dass es sich bei der D6 um das in deren europäischen Recherchenbericht angegebene Dokument „BADIEI S ET AL: „High-energy Coulomb explosions in ultra-dense deuterium...“ handelt.

2. Materialien, die Temperaturen deutlich über 2000°C standhalten, sollen per se nicht existent sein. Aus der anliegenden und hiermit eingeführten Unterlage D7 (Max Planck-Gesellschaft, Chemie, Materialwissenschaften, eine Keramik, die Hitze kaltlässt, 22. Juli

2010 Wengenmayer, Roland; https://www.mpg.de/778153/Hitzeresistente_Keramik?print=yes, abgerufen am 20. März 2017) sind weit vor dem Prioritätstag Keramiken bekannt, die Temperaturen bis zu 4000°C aushalten. Ein Temperaturproblem per se ist somit nicht zu erkennen.

Eine große Experimentierbelastung für den Fachmann besteht somit nicht.

III. Artikel 84 – Klarheitseinwände

Mit den neuen Unterlagen werden die Klarheitseinwände gemäß Artikel 84 beseitigt. Wie im EERB angeführt soll in den Ansprüchen versucht werden, den Gegenstand durch das zu erreichende Ergebnis zu definieren; und zwar bezüglich der Kondensation des molekularen Wasserstoffs, und bezüglich der Fusion des ultradichten Wasserstoffs.

Mit den Präzisierungen im neuen Patentanspruch 1,

- Spalten des molekularen Wasserstoffs katalytisch in atomaren Wasserstoff und anschließend Kondensieren in einer Vielzahl an Kavitäten des Katalysators,

sowie

- Einleiten einer Fusion durch energetische Anregung des kondensierten ultradichten Wasserstoffs präzisiert worden,

wird diesen Einwänden Rechnung getragen. Das Klarheitserfordernis ist somit erfüllt.

IV. Schutzfähigkeit

Das Verfahren in der Fassung des neuen Patentanspruchs 1 und die Vorrichtung in der Fassung des neuen Patentanspruchs 5 sind neu und erfinderisch gegenüber dem bekannten Stand der Technik.

Die D1 offenbart ein Verfahren zum Einschließen von ultradichtem Deuterium in Fehlstellen von Palladium-Dünnschichten. Dazu wird Deuterium elektrochemisch auf die Palladium-Dünnschicht transportiert. Die Fehlstellen dienen hier als Fallen, in denen Deuterium Atome durch das starke Potential kondensieren. Die D1 nutzt insbesondere Dünnschichten, die mit einer aufgetragenen nanostrukturierten Beschichtung versehen sind.

Durch diese Beschichtung soll die Oberfläche vergrößert werden. Hierzu werden beispielsweise ein Nickelschaum und ein Nickel Mikrofell als Beschichtung genannt (Fig. 3).

In der D2 ist eine Vorrichtung zum Erzeugen von Wärme und Neutronen gezeigt, bei der gasförmiges Deuterium in einem Kristallgitter aus Titan absorbiert wird. Es wird jedoch weder eine Katalysatorbeschichtung noch die Kondensation von Wasserstoff erwähnt.

Die D3 beschreibt eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Erzeugen von Neutronen. Hierzu wird ein Metall mit einem hohen Druck beaufschlagt und anschließend mit einem Wasserstoffisotop zur Bildung eines Metallhydrids in Verbindung gebracht. Daraufhin wird das Metallhydrid einem thermischen Schock unterworfen, wodurch Metallhydridatome mit den noch ungebundenen Wasserstoffisotopen unter Abgabe von Neutronen chemisch reagieren können.

Die D4 offenbart ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Erzeugen thermischer Energie. Es wird ein Reaktor, der ein Metall und ein dielektrisches Material enthält, mit Wasserstoffgas beaufschlagt. Anschließend wird ein elektrisches Feld zum Polarisieren des Dielektrikums angelegt. Durch das elektrische Feld sollen die Wasserstoffatome ionisiert und beschleunigt werden. Hierdurch sollen Fusionsprozesse initiiert sein.

Die D5 zeigt in einer Energieerzeugungsvorrichtung mit einem Reaktionsbehälter eine Aktivierung von Wasserstoffisotopen durch eine Felderzeugungseinrichtung derart, dass ein Fusionsprozess abläuft und thermische Energie erzeugt wird.

Die D6 betrifft die Herstellung von ultradichtem Deuterium.

Keine der Druckschriften zeigt ein Verfahren zur Erzeugung ultradichten Wasserstoffes mit den Merkmalen des neuen Patentanspruchs 1; der bekannte Stand der Technik zeigt weder ein Verfahren, noch legt es in Einzelschau oder in Zusammenschau ein Verfahren zum Erzeugen und zum Fusionieren von ultradichtem Wasserstoff, bei dem molekularer

Wasserstoff in zumindest einem Hohlraum hineingeleitet und katalysiert wird, mit den folgenden Schritten nahe:

- Einleiten einer Kondensation des molekularen Wasserstoffs an einem Katalysator des Hohlraums zu einem ultradichten Wasserstoff,
- Einleiten einer Fusion in dem zumindest einem Hohlraum durch energetische Anregung des kondensierten ultradichten Wasserstoffs,
- Hinausleiten einer Reaktionswärme aus dem zumindest einem Hohlraum,

wobei der molekulare Wasserstoff katalytisch in atomaren Wasserstoff gespalten und anschließend in einer Vielzahl an Kavitäten des Katalysators kondensiert.

Bezüglich der Vorrichtung in der Fassung des ursprünglichen Patentanspruchs 5 wird im EERB die D3 (WO 2014/028361 A1) als neuheitsschädlicher Stand der Technik angeführt (Punkt 3.4). Allerdings lassen sich der im EERB angegebene Paragraph [0148] und die Bezeichnung „Rankine-Zyklus“ nicht in dem Dokument finden. Unter Rankine-Zyklus wird im Allgemeinen ein thermodynamischer Vergleichsprozess für ein Dampfkraftwerk verstanden, benannt nach seinem Erfinder dem schottischen Ingenieur William John Macquorn Rankine.

Aus dem Stand der Technik ist somit weder eine Vorrichtung bekannt, noch wird sie von diesem nahegelegt, mit der das erfindungsgemäße Verfahren durchgeführt werden kann und die zumindest einen Hohlraum zum Aufnehmen eines molekularen Wasserstoffs, einen Katalysator zum Katalysieren des molekularen Wasserstoffs und eine Initiierungsquelle zum Initiieren einer Fusion aufweist, wobei der zumindest eine Hohlraum zumindest eine Pore oder Fehlstelle eines metallischen oder keramischen Schaums ist, die an ihren Oberflächen zumindest bereichsweise von dem Katalysator umgeben ist und eine zumindest teilweise Durchlässigkeit für elektromagnetischen Wellen aufweist.

V. Zusammenfassung

Zusammenfassend sind das Verfahren in der Fassung des neuen Patentanspruchs 1 und die Vorrichtung in der Fassung des neuen Patentanspruchs 5 neu und erfinderisch gegenüber dem Stand der Technik. Somit sind auch die unmittelbar oder mittelbar auf die neuen Patentansprüche 1 und 5 rückbezogenen neuen Patentansprüche 2, 3 und 4 sowie 6 bis 13 schutzfähig.

Sollte die Prüfungsabteilung in dieser oder in einer sonstigen für den Erfolg der Anmeldung wesentlichen Frage anderer Ansicht sein, wird um ein informelles Interview gebeten. Hilfsweise wird eine mündliche Verhandlung beantragt.



Stefan Marschall

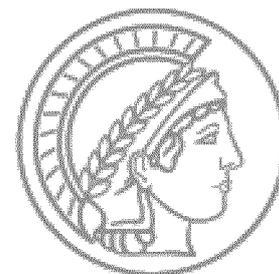
Patentanwalt

Anlage

Neuer Satz Patentansprüche (Reinschrift und Manuskript)

D7

MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



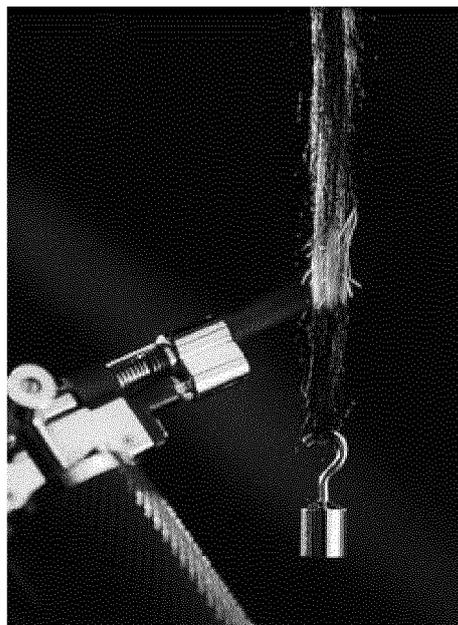
Chemie . Materialwissenschaften

Eine Keramik, die Hitze kaltlässt

22. Juli 2010

Eine Menge Energie ließe sich sparen, wenn Turbinen und Verbrennungsmotoren bei höheren Temperaturen als bislang arbeiteten. Eine besonders hitzeresistente amorphe Keramik macht das möglich. Inzwischen ist der Werkstoff reif für den Markt.

Text: Roland Wengenmayr



Zäh und Stabil, auch wenn es heiß wird:
Die keramischen Fasern aus Silicium, Bor,
Stickstoff und Kohlenstoff halten mehr als
1500 Grad Celsius stand.

© E. Hahn für Fraunhofer ISC

Wer mit Martin Jansen über Hochtemperaturwerkstoffe spricht, sortiert unsere Welt schnell auf einer imaginären Temperaturskala ein. Dort leben wir ganz unten, auf einer kleinen, kühlen Insel, die feste Materie erlaubt. Oberhalb von rund 4000 Grad Celsius schmelzen oder zersetzen sich alle uns bekannten Feststoffe. Im kosmischen Maßstab gesehen ist das nicht besonders heiß, denn schon im Zentrum unserer Sonne herrschen 15 Millionen Grad Celsius.

Jansen zeigt ein Diagramm, das sich als eine Art Schatzkarte für die Suche nach Hochtemperaturwerkstoffen lesen lässt. Ganz oben auf der heißen Hitliste steht mit knapp 4000 Grad Celsius Zersetzungstemperatur eine Verbindung aus Tantal, Zirkonium und Kohlenstoff. Auf Platz zwei bei rund 3800 Grad folgt Kohlenstoff – allerdings nicht an Luft, weil er da mit

Sauerstoff längst verbrannt wäre. „Die Reihenfolge dieser Stoffe ist seit fünfzig Jahren unverändert“, erklärt der Chemiker. Seitdem hat die Wissenschaft keinen hitzbeständigeren Stoff gefunden. Offenbar können auch die stärksten chemischen Bindungskräfte Atome nur bis etwa 4000 Grad Celsius zu fester Materie zusammenhalten.

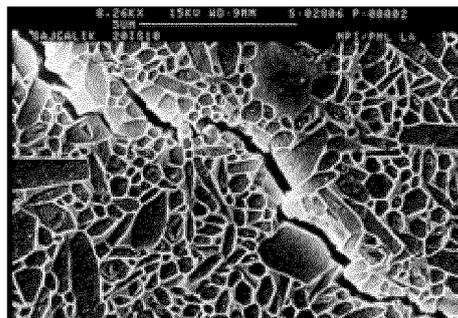
Jansens Forschungsgebiet liegt allerdings zwischen 1000 und 2000 Grad Celsius. Sein Stuttgarter Team und seine Kooperationspartner entwickeln neue Hochtemperaturwerkstoffe, die in Motoren und Turbinen einsetzbar sind. Dafür eignen sich die Gewinner auf der thermischen Hitliste leider nicht, denn Werkstoffe für solche Maschinen müssen nicht allein hohen Temperaturen in Gegenwart von Sauerstoff widerstehen. Sie müssen auch starke mechanische Belastungen verkraften. In den großen Dampfturbinen zum Beispiel, die in Kraftwerken elektrische Energie produzieren, rotieren die äußeren Spitzen der längsten Turbinenschaufeln mit Überschallgeschwindigkeit – weshalb enorme Fliehkräfte an ihnen zerren.

Noch am besten haben bisher metallische Werkstoffe ein solches Anforderungsspektrum erfüllt. Doch selbst die thermisch stabilsten Legierungen „zundern“ in Luft und erweichen oberhalb von 1000 Grad Celsius. Zwar arbeiten moderne Flugzeugturbinen oder Kraftwerks-Gasturbinen mit Verbrennungstemperaturen bis zu 1400 Grad Celsius. Dabei muss aber ein kühlender Luftstrom die Metallteile vor dem heißen Gas schützen. Das kostet Energie und senkt die Effizienz der Turbinen.

Die Effizienz oder den Wirkungsgrad, wie es wissenschaftlich präzise heißt, will Jansen bei Wärmekraftmaschinen steigern. Zu ihnen gehören neben Turbinen alle Verbrennungsmotoren. Nach den Gesetzen der Physik steigt ihr Wirkungsgrad mit der Betriebstemperatur. Das gilt für den Antrieb eines Verkehrsmittels genauso wie für den Turbinengenerator eines Kraftwerks. Ein hoher Wirkungsgrad spart wertvollen fossilen Treibstoff und reduziert den Ausstoß von klimaschädlichem Kohlendioxid. Ungekühlte Brennkammern verringern zudem den Ausstoß von schädlichen Stickoxiden.

Herkömmliche Keramiken sind für viele Anwendungen zu spröde

Wärmekraftmaschinen treiben unsere Kultur buchstäblich an. Angesichts ihrer Relevanz wird klar, wieso Martin Jansen hartnäckig seit über zwanzig Jahren an neuen Hochtemperaturwerkstoffen arbeitet. Natürlich ist es nur eines seiner Forschungsgebiete, doch es liegt ihm sichtlich am Herzen. Die Antwort auf die Frage, welche Werkstoffe die bisher dominierenden Metalle adäquat ersetzen könnten, war dem anorganischen Chemiker schon in den 1980er-Jahren klar: Nur Keramiken konnten eine Lösung bieten.



In einer herkömmlichen Keramik fressen sich Risse schnell durch das atomare Kristallgitter und springen dann zum benachbarten Kristallit über.

© MPI für Festkörperforschung

Mit alltäglichem Porzellan hat der keramische Hightech-Werkstoff, den die Stuttgarter Chemiker seitdem entwickelten, allerdings nichts zu tun. Die Frage, was denn mit der Kaffeetasse auf Jansens Bürotisch bei über tausend Grad passieren würde, lässt ihn schmunzeln. „Porzellan ist

schon ein ziemlich hochtemperaturfestes Material“, erklärt er geduldig, „aber die Tasse würde schon bei relativ niedrigen Temperaturen unter mechanischer Beanspruchung ‚fließen‘.“ Dieses honigzähe Kriechen bei hohen Temperaturen ist der Schwachpunkt oxidischer Keramiken. Schon deshalb schieden Porzellan und Co. aus.

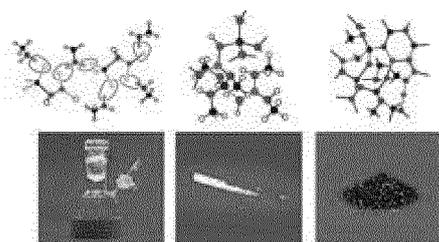
Schlimmer noch ist eine andere Eigenschaft: Fiele die Tasse auf den Boden, dann würde sie zersplittern – ein Metallgefäß nicht. Keramiken sind hart, aber sehr spröde. Metalle dagegen sind zäh und elastisch. Notfalls geben sie durch leichtes Fließen nach. Sie altern auf gut bekannte Weise, was für Ingenieure entscheidend ist. Deshalb kann zum Beispiel ein Flugzeugturbinenhersteller angeben, nach welcher Betriebsdauer ein Teil ausgetauscht werden muss. „So eine herkömmliche Keramik kann dagegen nach einer Stunde versagen“, erläutert Jansen, „oder erst nach hunderttausend Stunden.“

Die Ursache der Sprödigkeit liegt in der Mikrostruktur herkömmlicher Keramiken: Sie bestehen aus winzigen, zusammengebackenen Kristallen. In so einem Kristallit sortieren sich die Atome schön ordentlich zu einem dreidimensionalen Raumgitter. Allerdings wirken seine Ebenen, in denen sich die Atome wie in Stockwerken stapeln, wie Sollbruchstellen. Unter Überlast reißen sie wie die Naht eines Stoffs auf. Erreicht der Riss schließlich den Nachbarkristall, frisst er sich dort schnell weiter. „Er breitet sich mit Schallgeschwindigkeit aus“, erklärt Jansen das schlagartige Versagen von Keramiken.

Metallische Werkstoffe bestehen zwar auch aus kleinen Kristalliten. Doch die chemischen Bindungen zwischen den Metallatomen verhalten sich eher wie ein zäher, starker Leim. So können die Kristallebenen unter Stress aneinandergleiten ohne auseinanderzureißen. Dieses duktile Verhalten lässt sich aber nicht auf Keramiken übertragen, weil dort eine andere Art von chemischer Bindung die Atome zusammenkittet.

Ungeordnetes Netzwerk macht Keramik zäh

Also musste Martin Jansen sich ein neues Konzept ausdenken. Er schrieb es bereits 1989 auf, als er noch Professor an der Universität Bonn war. Ein Schlüssel zum neuen Werkstoff war die radikale Abschaffung der kleinen Kristalle. Stattdessen wollte der Chemiker eine amorphe Keramik entwickeln. Bei amorphen Materialien, etwa Gläsern, bilden die Atome ein ziemlich ungeordnetes räumliches Netzwerk. Wo keine Gitterebene existiert, gibt es auch keine derartige Sollbruchstelle, dachte sich Jansen. Er durfte hoffen, dass eine solche Keramik nicht plötzlich in einem Spröbruch versagen würde – wie Materialwissenschaftler sich ausdrücken –, sondern schlagzäh wäre.



Eine Route zu einem stabilen Netz: Aus den molekularen Bausteinen (links) entsteht in einem der möglichen Synthesewege zunächst ein stark verzweigtes Polymer (Mitte). Daraus bildet sich beim Brennen die Hochtemperaturkeramik (rechts). (Silicium - blau; Bor - grün; Stickstoff - rot; Kohlenstoff - schwarz; Chlor - gelb; Wasserstoff - weiß)

© MPI für Festkörperforschung

Allerdings sortieren Atome sich beim Abkühlen aus der Schmelze gerne zu ordentlichen Kristallen. In dieser höchsten Ordnungsstufe sparen sie nämlich die meiste Energie ein. Nur wenn beim Abkühlen etwas ihre Choreografie massiv stört, bleiben sie in einem amorphen Netzwerk stecken. Der erfahrene Chemiker Jansen wählte schließlich eine Verbindung aus den Elementen Silicium, Bor und Stickstoff. Eine Mischung im Verhältnis 3:3:7 stört den kristallinen Sortiervorgang wie gewünscht.

Die Siliciumatome (Si) wollen ihre Nachbaratome an vier Bindungen, also chemischen „Händen“, festhalten – Bor (B) und Stickstoff (N) spielen dagegen dreihändig. Die krummzahligen Verhältnisse stellen das atomare Ballett vor die unlösbare Aufgabe, mit jeder chemischen Hand eine Partnerhand zu erwischen und zugleich in eine kristalline Ordnung hineinzutanzen. Am Schluss hat zwar nahezu jede Hand eine andere erwischt, aber das atomare Ballett endet unordentlich verknotet im gewünschten Netzwerk. „Die Atome sind nicht intelligent genug, um das Problem zu lösen“, kommentiert Jansen.

Zwei weitere Ideen stecken in der Auswahl der chemischen Bindung: Jedes Atom im neuen $\text{Si}_3\text{B}_3\text{N}_7$ ist über drei – beim Silicium sogar vier – kovalente Bindungen an seine Nachbarn gekettet. Das sorgt dafür, dass die Energie, die das Netzwerk zusammenhält, vor allem in den Bindungen zwischen direkten Nachbaratomen steckt, was jedes Atom zu einem starken Kettenglied macht. Wegen der vielen Bindungen kann ein Atom, so die zweite Idee, zudem kaum aus seiner Lage heraus. Dazu müsste es mindestens zwei seiner Bindungen zu Nachbarn gleichzeitig brechen, was sehr unwahrscheinlich ist.



In diesen Öfen treiben Chemiker des MPI für Festkörperforschung bei rund 600 Grad Celsius organische Substanzen aus dem Polymer, sodass sich die Keramik bildet.

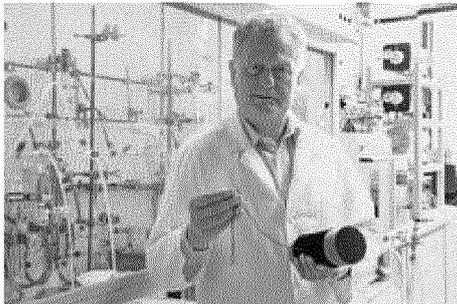
© Thomas Hartmann Fotodesign

Das macht das neue Material widerstandsfähig gegen hohe Temperaturen, obwohl es amorph ist. Amorphe Stoffe gelten nämlich als thermisch instabil, weshalb Jansen bei den Werkstoffwissenschaftlern Überzeugungsarbeit leisten musste. Der Grund ist wieder die Energie. Stellt man sie sich als Berglandschaft vor, dann entsprechen Kristalle Felsen, die in die tiefsten Energietäler gerollt sind. Ein Felsen, der einer amorphen Struktur entspricht, bleibt hingegen beim Sturz ins Energietal unterwegs in einer Energiekuhle am Hang stecken. Rütteln nun steigende Temperaturen wie heftige Erdbeben an der Energielandschaft, dann springen diese

Felsen gerne aus der prekären metastabilen Lage wieder heraus: Sie rollen weiter ins Energietal, und die amorphe Struktur ordnet sich zum Kristall um. Der Werkstoff ändert also radikal seine Eigenschaften, was eine Maschine zerstören würde. Beim Stuttgarter Konzept ist die lokale Energiekuhle jedoch so tief, dass der Felsen drin bleibt, also der keramische Werkstoff sein amorphes Netzwerk beibehält.

Die Keramik lässt sich vielfältig verarbeiten

Dieses Projekt zielte von Anfang an auf die industrielle Anwendung. „Deshalb wurde die Synthese des Vorläufermoleküls so konzipiert, dass sie ökologisch und ökonomisch nachhaltig ist“, sagt Jansen. Alle Zutaten sind günstige Allerweltschemikalien. Als einziges Abfallprodukt entsteht Salzsäure, die sich als Chemikalie weiterverwenden lässt. Die Herstellung der Keramik erforderte einen unkonventionellen Weg. Die in Frage kommenden festen Ausgangsverbindungen zersetzen sich nämlich vor dem Schmelzen, und nach dem Abkühlen bekäme man nicht das erwünschte amorphe Netzwerk. Daher muss das Netzwerk Schritt für Schritt aus molekularen Grundbausteinen aufgebaut werden.



Mit einem neuen Konzept entwickelte Martin Jansen eine besonders hitzeresistente Keramik, die sich zu Fasern ziehen lässt.
© Thomas Hartmann Fotodesign

Im Zentrum dieser Moleküle sitzt ein Stickstoffatom, das je ein Silicium- und ein Boratom an sich bindet. Am Rand befinden sich Gruppen, die wie die Komponenten eines Superklebers wirken. Sie erlauben im zweiten Schritt, der „Polykondensation“, die molekularen Grundbausteine blitzschnell zusammenzufügen. „Das muss wie ein Sekundenkleber funktionieren“, sagt Jansen. Das so geformte polymere Netzwerk entspricht schon weitgehend der amorphen Struktur der Keramik. Allerdings sitzen zwischen den Bor-, Stickstoff- und Siliciumatomen noch die Kleberreste. Um sie auszutreiben, erhitzen die Chemiker im letzten Schritt das Polymer. Ab 600 Grad Celsius flüchten die organischen Substanzen als Pyrolysegas aus dem Netzwerk. Bei der Pyrolyse geht also als einzigem Schritt der Synthesesequenz Substanz verloren.

Jansen zeigt stolz eines der Ergebnisse aus 20 Jahren Forschung: Die pechschwarze Faser hat das Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) in Würzburg als langjähriger Kooperationspartner aus der Stuttgarter Keramik hergestellt. Es verblüfft, dass dieses flauschige Material eine Keramik ist – und dass es Temperaturen jenseits von 1500 Grad Celsius aushält, ohne nennenswert an mechanischer Festigkeit zu verlieren. Die neue Keramik lässt sich vielfältig verarbeiten. Man kann sie etwa zu Pulver mahlen und dieses bei hohen Temperaturen zu Bauteilen sintern.

„Man kann damit auch Beschichtungen herstellen oder Infiltrationen vornehmen“, sagt Jansen, „und diese Fasern hier ziehen.“ Sie sind am weitesten entwickelt. Am ISC kann man bewundern, wie sie hergestellt werden: Die Würzburger haben dazu ein Technikum gebaut, eine Zwischenstufe zwischen Labor und industrieller Produktion. Dort ziehen sie die zunächst farblosen Grünfasern aus dem Polymer und erhitzen sie dann in einem Ofen. Heute liefert die Anlage pro Durchgang bereits 50 Kilogramm Polymer. „Wir haben die Synthese immer weiter verfeinert, die Zutaten verändert und dadurch die Ausbeute und Reinheit der Keramik deutlich erhöht“, sagt

Dieter Sporn, der frühere, langjährige Projektleiter am ISC.

Als besonders hitzebeständig erwies sich eine Variante der Faser, die zusätzlich zu Silicium, Bor und Stickstoff noch Kohlenstoff im Netzwerk enthält. An Luft übersteht diese SiBNC-Faser Temperaturen bis zu 1500 Grad Celsius, ohne sich chemisch zu zersetzen. „In Helium tritt sogar bis an die 2000 Grad kein Masseverlust ein“, erklärt Jansen. Damit ist die neue Faser einer bereits kommerziellen, teuren Keramikfaser aus Siliciumcarbid (SiC) deutlich überlegen. Sie reagiert zwar wie diese in Luft bei 1500 Grad Celsius mit Sauerstoff. Dabei bildet sie jedoch eine Doppelschicht aus, die sie vor dem aggressiven Sauerstoff schützt. „Die kommerzielle SiC-Faser hingegen korrodiert regelrecht durch“, so Jansen.

Ein Verbundwerkstoff für die industrielle Anwendung

Die Wissenschaftler haben gezeigt, dass die keramische Faser den Anforderungen des Turbinenbaus genügt. Sie hält nicht nur höhere Temperaturen aus als jeder metallische Werkstoff, sondern bleibt dabei mechanisch stabil. „Ihre Festigkeit liegt im Vergleich zu anderen Werkstoffen zwar nur im Mittelfeld“, sagt Jansen, „aber sie behält diese auch bei gut 1400 Grad Celsius nahezu bei und ist damit unter diesen Bedingungen besser als alle anderen bekannten Werkstoffe.“ Eine Turbinenschaufel aus einem keramischen Kompositmaterial mit dieser Faser würde auch nur ein Drittel einer heutigen Schaufel aus hochlegiertem Stahl wiegen. Entsprechend geringer wären die Fliehkräfte. Zudem würden leichtere Flugzeugtriebwerke Kerosin einsparen.



Jakob Wilfert und seine Kollegen haben einen Weg gefunden, auch größere Stücke der hitzestabilen, amorphen Keramik weitgehend fehlerfrei herzustellen.

© Thomas Hartmann Fotodesign

Allerdings lässt sich aus der Faser nicht einfach eine Turbinenschaufel „weben“. Deshalb haben die Stuttgarter zusammen mit ihren Kooperationspartnern ein Verbundmaterial entwickelt. Es handelt sich um eine Keramik aus Siliciumcarbid, durch die sich parallel SiBNC-Keramikfasern als Verstärkung ziehen. In der Verwendung keramikfaserverstärkter Keramiken liegt der mit Abstand aussichtsreichste Ansatz, den kritischen Schwachpunkt dieser Werkstoffklasse – die Sprödigkeit – zu überwinden. Die Fasern lassen sich im Prinzip wie Kohlefasern zu Verbundwerkstoffen verarbeiten. Darauf hat sich die Wiesbadener Firma SGL Carbon spezialisiert. Die Fraunhofer-Forscher haben sie mit ins Boot geholt. SGL Carbon will die Fasern industriell für Großkunden produzieren.

Inzwischen wird daran gearbeitet, die neue Keramik in einem wichtigen Punkt zu verbessern. Obwohl das Polymer sich wunderbar per Spritzguss zu größeren Bauteilen formen ließe, gelingen bislang nur die dünnen Keramikfasern fehlerfrei. Weil die organischen Bestandteile sich beim Brennen verflüchtigen, schrumpft dickeres Material stark. Dabei verursacht das austretende Pyrolysegas Risse und Löcher. Jansens Team versucht deshalb, das Polymer chemisch so umzugestalten, dass die organischen Bestandteile beim Brennen im Netzwerk der Atome gefangen bleiben. Erste Erfolge stellen sich ein: Stolz drückt der Doktorand Jakob Wilfert dem Gast im Labor ein kleines Stück Keramik in die Hand. Es ist etwa fingernagelgroß und einige Millimeter dick. Seine schwarz glänzenden Flächen zeigen tatsächlich so gut wie keine Blasen.

„Man kann mit Recht sagen, dass das eine neue Werkstoffklasse ist“, stellt Jansen mit Genugtuung fest. Schließlich musste er mit Industriepartnern auch Enttäuschungen hinnehmen. Der Bayer-Konzern zum Beispiel sprang in den 1990er-Jahren nach jahrelanger Partnerschaft wieder ab. Jansen machte die Erfahrung, dass der Weg von einer wissenschaftlichen Erfindung bis zur technischen Anwendung sehr weit sein kann. Das gilt besonders für neue Hightech-Werkstoffe, die etwa in Flugzeugtriebwerken eingesetzt werden sollen. Dafür müssen sie jahrelang auf sicheres Verhalten getestet werden: Investoren müssen also sehr langfristig denken.

Im Jahr 2004 erhielt Jansen für die Entwicklung der neuen Hochtemperaturkeramik den Wissenschaftspreis des Stifterverbandes der Deutschen Wissenschaft. Letztes Jahr wurden die Stuttgarter und ihre Kooperationspartner sogar für den Deutschen Zukunftspreis des Bundespräsidenten nominiert. „Wir kamen immerhin in die Runde der letzten acht“, bemerkt Jansen, setzt aber bedauernd hinzu: „Es war ein bisschen zu früh, denn wir sind mit der Keramik ja noch nicht so richtig auf dem Markt.“ Jansen ist überzeugt, dass die neue Werkstoffklasse eines Tages ein hohes Marktvolumen erreichen wird. „Im Moment kommen erst einmal nur hochpreisige Bereiche in Frage“, sagt er: „Aber das Material kann im Prinzip ähnlich wie Stahl sehr vielfältigen Verwendungen zugeführt werden.“

GLOSSAR

Oxidische Keramiken

enthalten neben verschiedenen Metallen wie etwa Aluminium oder Zirkonium auch Sauerstoff.

Amorphe Keramiken

bestehen anders als herkömmliche Keramiken nicht aus kleinen, regelmäßig geordneten Kristalliten; vielmehr verbinden sich ihre Atome zu einem ungeordneten räumlichen Netz.

Kovalente Bindung

Eine chemische Bindung zwischen zwei Atomen. Sie wird von mindestens einem Elektronenpaar aufgebaut, zu dem beide Atome je ein Elektron beisteuern.

Polykondensation

Eine chemische Reaktion, bei der sich kleine Moleküle zu einer vielgliedrigen Kette oder einem ausgedehnten dreidimensionalen Netz verbinden. Als Nebenprodukt entstehen einfache chemische Verbindungen wie Salzsäure oder Wasser.

Adresse: <http://www.mpg.de>

© 2003-2017, Max-Planck-Gesellschaft, München