

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
31. März 2011 (31.03.2011)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2011/036246 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
C23C 14/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2010/064136

(22) Internationales Anmeldedatum:
24. September 2010 (24.09.2010)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
61/245,750 25. September 2009 (25.09.2009) US

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **OERLIKON TRADING AG, TRUEBBACH** [CH/CH]; Hauptstrasse, CH-9477 Truebbach (CH).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **RAMM, Jürgen** [DE/CH]; Muehlebuendtestrasse 12, CH-7304 Maienfeld (CH). **WIDRIG, Beno** [CH/CH]; Rheinstrasse 13, CH-7310 Bad Ragaz (CH).

(74) Anwalt: **TROESCH SCHEIDEGGER WERNER AG**; Jacques Troesch, Schwänthenmos 14, CH-8126 Zumikon (CH).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,

AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

(54) Title: METHOD FOR PRODUCING CUBIC ZIRCONIA LAYERS

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON KUBISCHEN ZIRKONOXIDSCHICHTEN

(57) Abstract: In order to produce zirconia-based layers on a deposition substrate, wherein reactive spark deposition using pulsed spark current and/or the application of a magnetic field that is perpendicular to the spark target are employed, a mixed target comprising elemental zirconium and at least one stabilizer is used, or a zirconium target comprising elemental zirconium is used, wherein in addition to oxygen, nitrogen is used as the reactive gas. As an alternative, it is also possible, combined with the use of the mixed target, to use nitrogen as the reactive gas in addition to oxygen.

(57) Zusammenfassung: Zur Herstellung von Zirkonoxid-basierten Schichten auf einem Ablege-Substrat bei welchem reaktives Funkenverdampfen mit gepulstem Funkenstrom und/oder Anlegen eines zum Funkentarget senkrechten Magnetfeldes eingesetzt wird, wird ein ein elementares Zirkon und mindestens einen Stabilisator umfassendes Mischtarget eingesetzt oder ein Zirkoniumtarget aus elementarem Zirkonium wobei dann nebst Sauerstoff, Stickstoff als reaktiv Gas eingesetzt wird. Alternativ kann, kombiniert mit dem Einsatz des Mischtargets, auch, nebst Sauerstoff, Stickstoff als Reaktivgas eingesetzt werden.



WO 2011/036246 A2

Verfahren zur Herstellung von kubischen Zirkonoxidschichten

Die Erfindung bezieht sich auf Verfahren zur Herstellung von Zirkonoxidschichten, sowie auf Schichten und/oder auf Schichtsysteme, die Zirkonoxid beinhalten. Die Erfindung bezieht sich auch auf Produkte mit Zirkonoxidschichten und deren Anwendungen.

Die Zirkonoxid-basierenden Schichten sind vor allem in ihrer kubischen und/oder tertragonalen Ausbildung beispielsweise im Bereich der Anwendung in Festelektrolyt Brennstoffzellen interessant.

Die Ionenleitfähigkeit der Zirkonoxid-basierenden Schichten und deren thermische Beständigkeit erlauben aber auch den Einsatz im Bereich der Sensorik.

Auch hier wird bevorzugt auf die kubische Kristallstruktur gesetzt, wie beispielsweise in US_20040084309 beschreiben: Das Dokument beschreibt einen Sensor, der auf einer Zr-O Schicht basiert, die tetragonal oder kubisch ist und weniger als 5 mol% Beimengungen der monoklinen Phase enthält. Begründet wird die Notwendigkeit der Begrenzung der monoklinen Phase damit, dass so die Rissbildung bei Wechseltemperaturbelastung vermieden werden kann, die durch die Volumenänderungen beim Phasenübergang entsteht. Vermieden wird die monokline Phase mittels Stabilisatoren.

In Abschnitt 101 wird auch beschrieben, dass eine kleine mittlere Korngrösse (kleiner 2.5 μm) in der Schicht von Vorteil ist, da sie sich stabiler gegenüber Phasentransformationen verhält. In Abschnitt 103 sind

bevorzugte Verhältnisse der kubischen zur tetragonale Phase angegeben (400) für kubische Phase und (004) und (220) für tetragonale Phase.

Aufgrund der guten mechanischen Eigenschaften in Verbindung
5 mit den guten thermischen Barriereverhalten könnten die Schichten aber auch auf dem Gebiet der Werkzeugbeschichtung, besonders der Beschichtung von Bauteilen mit Vorteil eingesetzt werden. Dabei steht das Design von tribologischen Systemen im Vordergrund. Die
10 einstellbare Morphologie in Verbindung mit der einstellbaren Härte der Schichten und die einfache Kombination mit anderen Oxidschichten können zu einer Optimierung des Verschleisses von beschichtetem Werkstück/Bauteil und dem Verschleiss des Gegenkörpers
15 benutzt werden.

Eine weitere Anwendung wird in US_20070004589 beschrieben: Dort wird eine Mischung aus tetragonalen und kubischen Zr-O unter Zusatz von Stabilisatoren für die Anwendung in Katalysatoren eingesetzt.

20 Zirkonoxid-basierte Schichten lassen sich bezüglich ihrer Zusammensetzung vor allem als Zr-O, Zr-O-N, Zr-St-O, Zr- St O-N beschreiben, wobei St für Stabilisatorenelemente steht, die zur Stabilisierung der kubischen bzw. tetragonalen Struktur des ZrO₂ beitragen. Bevorzugt wird Y als ein
25 Stabilisator eingesetzt. Im Stand der Technik sind unterschiedliche Verfahren zur Herstellung von Zirkonoxid-basierten Schichten bekannt, die im Folgenden kurz angesprochen werden sollen.

a) Schichten mit Sintern hergestellt:

In US_05709786 bzw. EP_00669901 wird ein Sinterprozess zur Herstellung von Festelektrolyten aus Zr-O beschrieben.

Dabei wird die Beifügung von Stabilisatoren zur Erhöhung
5 der Ionenleitfähigkeit des Zr-O diskutiert, sowie auch das
Co-sintern mit metallischen und keramischen Pulvern zur
Herstellung von Kontakten in Verbindung mit dem
Festelektrolyten. Gemäss diesem Stand der Technik wird als
wesentlich beschrieben, dass Pulver mit Korngrössen im
10 Nanometerbereich die Temperaturabhängigkeit der
Ionenleitfähigkeit reduzieren und dass die kleine Grösse
der Pulver beim Sinterprozess vorteilhaft ist und die
notwendige Temperatur zum Sintern herabsetzt. Das wird vor
allem in dem Zusammenhang diskutiert, dass einige für die
15 Erhöhung der Ionenleitfähigkeit vorteilhafte Stabilisatoren
bei den üblichen Pulvergrössen nur bei sehr hohen
Temperaturen gesintert werden können. Die Schrift
beschreibt die Schwierigkeiten der Schichtherstellung beim
Sinterprozess und zeigt einen Lösungsansatz durch die
20 Herabsetzung der Pulvergrösse. Die Schichten werden
analytisch nicht charakterisiert, aber es wird die
Notwendigkeit demonstriert, dass es für bestimmte
Anwendungen vorteilhaft ist, die Schichthärte und weitere
mechanische Eigenschaften der Zr-O Schicht im
25 tribologischen System anpassbar zu machen.

Die Zr-O Schichten der US 20040084309, die zum Einsatz in
einem Sensor geeignet sind, werden ebenfalls in einem
Sinterprozess hergestellt.

Beim Sinterverfahren führen allerdings die notwendigen hohen Temperaturen zu erheblichen Nachteilen. Um diese herabzusetzen, werden kostspielige Pulver im Nanometerbereich als Ausgangsmaterialien benutzt. Bei

5 hochschmelzenden Materialien müssen die üblichen Sintertemperaturen (um 1500°C) noch weiter erhöht werden, um den Sinterprozess zu ermöglichen. Das ist vor allem dann der Fall, wenn die hochschmelzenden stabilisierenden Elemente beigefügt werden müssen, wie es in US_05709786

10 beschrieben wird. Aus dieser Schrift wird auch klar, dass es wichtig ist, die Festelektrolytschicht mit weiteren Funktionsschichten (z.B. Elektroden) zu kombinieren bzw. mit mechanischen und thermischen Schutzschichten. Das heisst, dass es für die Anwendung notwendig ist, ein ganzes

15 Schichtpaket mit aufeinander abgestimmten Funktionen herzustellen, wobei die Herstellungstemperaturen aufeinander abgestimmt sein müssen um zu einem guten Schichtpaket zu gelangen (z.B. Interfaceproblematik, Schichtstabilität). Aus der Schrift wird auch deutlich,

20 dass hohe Herstelltemperaturen aus Materialsicht vorteilhaft sind für den Einbau von Stabilisatoren, diese aber nicht einfach realisiert werden können und für einen Schichtverbund noch schwieriger zu realisieren sind.

Es kommt hinzu, dass die durch das Sinterverfahren

25 hergestellten Schichten eher als kompakte Materialien anzusehen sind. Sie müssen oft noch stabilisiert (z.B. durch Netze) werden, damit der mechanische Verbund gewährleistet ist. Es hängt von der Sintertemperatur ab, welche Struktur des Zr-O erreicht wird und es sind

30 Stabilisatoren notwendig, um die kubische oder tetragonale

Struktur zu erzielen. Die Phasen, die bei diesem Verfahren entstehen entsprechen im Wesentlichen dem, was man aus dem Phasendiagramm ablesen kann, weil die Prozesse ja im Wesentlichen beim thermischen Gleichgewicht vor sich gehen.

5 Es gibt Stabilisatoren, die nur bei sehr hohen Temperaturen gesintert werden können und damit technisch schwierig oder nicht realisierbar sind. Dadurch wird die mögliche Schichtvielfalt eingeschränkt.

Das „Ankoppeln“ der gesinterten Schicht an andere
10 Materialien ist schwierig, da unterschiedliche Temperaturen notwendig sind, um einen Verbund herzustellen und das zu verbindende Material den Temperaturbereich einschränkt. Die Schichten sind brüchig wie etwa Porzellan und es ist fast unmöglich, Multilagenstrukturen herzustellen. Die
15 Korngrößen der hergestellten Materialien sind durch die der Ausgangspulver und das Sinterverfahren bestimmt. Das einfache Aufbringen von thermischen Schutzschichten oder Metallelektroden kann kaum in einen Prozess erfolgen.

Die Ausgangsmaterialien sind beim Sintern (Korngrösse) von
20 ausschlaggebender Bedeutung um qualitativ hochwertige kubische bzw. tetragonale ZrO_2 Schichten herzustellen. In beiden Fällen muss grosser Aufwand betrieben werden, um die Reproduzierbarkeit im Ausgangsmaterial zu gewährleisten. Eine verbesserte Herstellmethode sollte daher sowohl den
25 Herstellprozess des Ausgangsmaterials (Target) als auch die zeitliche Konstanz der Materialqualität während des Beschichtungsprozesses gewährleisten.

b) Schichten mit Plasmaspritzen hergestellt:

In US 20040022949 wird eine Verschleisschutzschicht für Gasturbinen aus kubischen oder tetragonalen Zr-O offenbart, die durch Plasmaspritzen hergestellt wird. Eine Behandlung
5 im Wasserdampf transformiert diese Schicht in die weichere monokline Struktur, die sich beim Betrieb in einer Gasturbine wieder in eine kubische oder tetragonale Struktur umwandelt. Sinn dieser zusätzlichen Schichtbehandlung ist es, das Einlaufverhalten des Bauteils
10 so zu gestalten, dass der Gegenkörper nicht verschlissen wird und die weiche Schicht angepasst wird. Wieder werden die üblichen Stabilisatoren verwendet, wobei Yttriumoxid (Y-O) im Bereich zwischen 0,3 und 20 mol% angegeben wird.

In US 20050170200 wird eine thermische
15 Barrierschutzschicht beschrieben, die aus einer Haftschrift, einer teilweise stabilisierten Zr-O Schicht und einer weiteren vollständig stabilisierten Zr-O Schicht besteht. Damit werden die guten mechanischen Eigenschaften des teilweise stabilisierten Zr-O mit den guten thermischen
20 Schutzeigenschaften des vollständig stabilisierten Zr-O kombiniert. Die Schichten werden mittels Plasmaspritzens hergestellt.

Die im Zusammenhang mit den Sinterverfahren erwähnte Interfaceproblematik besteht auch bei den thermischen
25 Spritzverfahren. Auch hier ist es schwierig, eine gute Haftung zwischen der abgeschiedenen Schicht und dem zu beschichteten Substrat zu erzielen. Zudem ist es schwierig in diesem Verfahren graduelle Übergänge zwischen verschiedenen Materialien zu realisieren.

Wie beim Sintern sind auch bei der Elektronenstrahlverdampfung (Tiegelmaterial mit Vorbehandlung) die Ausgangsmaterialien von ausschlaggebender Bedeutung um qualitativ hochwertige kubische bzw. tetragonale ZrO_2 Schichten herzustellen. In beiden Fällen muss grosser Aufwand betrieben werden, um die Reproduzierbarkeit im Ausgangsmaterial zu gewährleisten. Eine verbesserte Herstellmethode sollte daher sowohl den Herstellprozess des Ausgangsmaterials (Target) als auch die zeitliche Konstanz der Materialqualität während des Beschichtungsprozesses gewährleisten.

c) Schichten mittels Elektronenstrahlverdampfen hergestellt:

US_20060171813 beschreibt eine Anwendung von Zr-O Schichten auf Turbinenschaufeln. Auf einer inneren dichten Schicht die kubisches Zr-O oder Hf-O enthält wird eine weitere thermische Schutzschicht aufgebracht, die aus einer Multilagenschicht besteht, welche aus Zr-O und einem Metalloxid, beispielsweise Ta-O oder Nb-O besteht. Die Schichten werden mittels Elektronenstrahlverdampfung abgeschieden.

In US 20080090100 A1 wird eine thermische Barrierschicht beschrieben, die mittels Elektronenstrahlverdampfung hergestellt wird.

In US 05418003 wird ein PVD Verfahren (Elektronenstrahlverdampfung) beschrieben, das zur Herstellung von thermischen Barrierschichten auf Zr-O Basis dient. Um das Spritzen beim Verdampfen zu reduzieren,

wird in US 06042878 A eine spezielle Vorbehandlung des Tiegelmaterials (ingot) angegeben.

In US 6586115 werden, ohne näher auf die Prozesse einzugehen, verschiedene PVD und CVD Methoden genannt um
5 thermische Barriereschichten (TBC) aufzubringen. Dabei wird auch das Elektronenstahlverdampfen von Yttrium stabilisiertem Oxid erwähnt.

Die Elektronenstrahlverdampfung ermöglicht prinzipiell eine gute Haftung, da diese unter Vakuum abläuft und die
10 Substratoberflächen durch Plasmabehandlung gereinigt und aktiviert werden können. Allerdings ist der Ionisierungsgrad des verdampften Materials bei der Elektronenstrahlverdampfung klein, was meist nur ein kolumnares Wachstum der Schichten zulässt, das bei
15 thermischen Schutzschichten erwünscht, aber für andere Anwendungen und unter dem Aspekt der Haftung nachteilig ist. Vorteilhaft wäre der höhere Ionisierungsgrad des Dampfes auch unter dem Aspekt, dass er es zuliesse über einen Substratbias höhere Energie in die Schichtsynthese
20 einzubringen und somit bessere Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass man die tetragonalen oder kubischen Strukturen im ZrO_2 erreichen könnte, sogar ohne den Einbau von Stabilisatoren. Das ist aber weder hier noch in anderen PVD Verfahren bisher gelungen. Ein weiterer gewichtiger
25 Nachteil bei diesem Verfahren ist der Aufwand, den man betreiben muss, um eine möglichst spritzerfreie Verdampfung zu erreichen. Um nämlich die abgeschiedenen Schichten durchgehend oxidieren zu können werden dem Tiegelmaterial Oxide beigegeben bzw. es werden nur Oxide benutzt. Da diese

isolierend sind, ist das Einschmelzen bzw. Sublimieren der Oxide mit dem Elektronenstrahl nicht problemlos hinsichtlich Spritzern, aber auch einer Entmischung des Tiegelmaterials. Beides schlägt sich in einer komplizierten Prozessführung nieder. Zudem muss dem Prozess noch zusätzlicher Sauerstoff als Reaktivgas beigegeben werden, um die Schicht mit genügend Sauerstoff zu versehen.

Eine weitere Problematik ist darin zu sehen, dass beim Elektronenstrahlverdampfen das Material schockartig aufgeschmolzen wird. Hierdurch entsteht im Tiegel ein grosser Temperaturgradient, der nicht selten zu einem Tiegelbruch führt und diesen unbrauchbar macht. Diese Problematik wird im Zusammenhang mit Zirkonium in US 06143437 adressiert. Der dort verwendete Tiegel umfasst bereits Zirkonoxid Pulver in kubischer Phase.

Ebenso beschreibt US 20070237971 die Verwendung eines Targets mit spezieller Zusammensetzung eines keramischen Pulvers. für die Elektronenstrahlverdampfung offenbart. Die aufwändige Methode zur Herstellung dieses Targets wird in US 20080088067 beschrieben. Die damit verbundenen Kosten stehen allerdings einer wirtschaftlichen Nutzung des Prozesses erheblich entgegen.

Es sei nochmals betont, dass die Schichten, die mit den Elektronenstrahlverfahren hergestellt werden, meist nur kolumnare Schichtmorphologie zulassen, da der Ionisierungsgrad des Metaldampfes zu gering ist, um die Beweglichkeit an der Substratoberfläche heraufzusetzen. Das schränkt natürlich auch die Einflussnahme auf die Schichtstruktur ein. Die Pflege der Schmelze ist ein

- anderer Schwachpunkt des Verfahrens. Sie muss sehr sorgfältig und aufwendig betrieben werden, damit es zu keinen Entmischungen kommt, die sich dann in der Schichtzusammensetzung wiederfinden. Ein Verdampfen von
- 5 Legierungen ist kaum möglich, d.h. man muss die prozesstechnisch weitaus schwierigere Oxidverdampfung mit Sauerstoffzugabe nutzen, um halbwegs stöchiometrische Schichten zu erreichen.
- 10 d) Schichten mittels Ion Beam Assisted Deposition (IBAD):
- In US 20020031686 wird u.a. ein IBAD Verfahren offengelegt, das die Herstellung stark (biaxial) orientierten YSZ (Yttrium stabilisiertes Zirkonoxid) auf einer SiO₂ Schicht erlaubt. Die Figuren zeigen für das YSZ die (200) und (400)
- 15 Reflexe im XRD-Spektrum. Das YSZ dient in dieser Anwendung als Wachstumsunterlage für die nächstfolgende Schicht, in dieser Anwendung Ce-O, Ru-O und/oder LSCO (Lanthan Strontium Cobalt Oxid). Ziel ist es, leitfähige Oxide aus diesen Materialien herzustellen, wozu es die YSZ Unterlage
- 20 braucht. Es werden in dieser Schrift Beispiele zur Herstellung von YSZ Schichten angegeben, die bei 700°C Substrattemperatur abgeschieden wurden. Ohne weiteren Nachweis wird zusätzlich behauptet, dass der Prozess auf niedrigere Temperaturen zwischen 450°C und 600°C ausgedehnt
- 25 werden kann. Die tiefe Prozesstemperatur ist eine wünschenswerte Eigenschaft oder Bedingung, falls die Schichten auf bereits vorgefabrizierten Substraten, beispielsweise Si-Wafern im Bereich der Halbleiterindustrie, abgeschieden werden sollen. Die

Schrift US_20020031686 offenbart im XRD-Spektrum die (200) und die (400) Reflexe vom YSZ im 2θ Bereich zwischen 20° und 80° . Das IBAD-Verfahren wird in US_05872080 beschrieben.

- 5 Das IBAD Verfahren beruht auf den Beschuss von Oberflächen, einmal zum Abtragen von Material, zum anderen, um eine bestimmte Wachstumsrichtung des im Vakuum abgeschiedenen Materials zu erzwingen. Problematisch dabei ist, dass die Aufwachsraten bei dieser Technik klein sind und sich nicht
10 für Anwendungen eignen, bei denen viel Material grossflächig und kostengünstig abgeschieden werden muss.

- Bemerkenswert scheint, dass die Reflexe in US_20020031686, für die man die höchste Intensität beim tetragonalen bzw. kubischen ZrO_2 erwartet (bei $2\theta=30^\circ$ und 50°) fast nicht
15 nachweisbar sind. Das ist ein Indiz dafür, dass man bei den IBAD Verfahren durch das Ionenbombardement stark texturierte Schichten herstellt und es ist fraglich, wie gross die Anteile des kubischen YSZ wirklich sind. Es ist aber auch ein Indiz dafür, dass bei diesem Prozess schon
20 Substrattemperaturen von immerhin $700^\circ C$ nicht ausreichen, eine deutliche kubische Phase im YSZ zu erzielen. Das ist eine wesentliche Limitation bei den bisherigen PVD Verfahren: die Substrattemperaturen im Bereich zwischen $200^\circ C$ und $600^\circ C$ reichen nicht aus, um die kubische Phase im
25 ZrO_2 zu erreichen.

e) Schichten in kombinierten PVD Verfahren (Sputtern-Funkenverdampfung)

In *J. Cyviene et al., Surface and Coatings Technology*, 180-181 (2004) 53-58 wird eine Kombination von Sputtern und Funkenverdampfung beschrieben. Dabei wird ein Zr Target für den Funkenverdampfer benutzt und ein Y Target für die
5 Sputterquelle. Der Prozess läuft unter einem Prozessdruck von 0.2 Pa ab, wobei dem Argon Sauerstoff bis zu einem maximalen Partialdruck von 0.08 Pa beigegeben wird.

Allerdings beleuchtet das in *Cyviene_Surf.Coat.Tech_180-181_2004* beschriebene kombinierte Verfahren Sputtern-

10 Funkenverdampfung beleuchtet einige Probleme, die sowohl die Herstellmethode wie auch die abgeschiedene Schicht betreffen. Die Schrift geht auf die Problematik der Vergiftung des Sputtertargets ein, d.h. beschreibt, dass beim Betrieb des Sputtertargets an der Kante zum
15 metallischen Mode gearbeitet werden muss, was eine aufwendige Prozesskontrolle bedingt. Sowohl der Sputterbetrieb wie der Funkenbetrieb findet im Argon Arbeitgas statt und es wird lediglich Sauerstoff in kleinen Mengen beigegeben. Der Betrieb in reinem Sauerstoff
20 wird nicht beschrieben, würde aber ohne weitere Massnahmen zu vollständigen Instabilitäten unter den beschriebenen Bedingungen führen: fast keine Rate mehr beim Sputtern, instabile Funkenverdampfung wegen Aufoxidation des Funkentargets und der Funkenanode und schliesslich
25 Unterbruch der DC Funkenentladung.

In Cyviene werden die Probleme auf der Schichtseite beim kombinierten Sputter-Funkenverfahren beschrieben, die durch die vorliegende Erfindung vermieden werden. Es wird beschrieben, dass die Funkenentladung mit dem Zr Target in

Argon mit Sauerstoffzugabe bei der synthetisierten Schicht nicht zu der kubische bzw. tetragonalen Phase führt, sondern lediglich eine monokline Struktur erreicht wird.

Erst durch die Zugabe von Y als Stabilisator über den

5 Sputterprozess kann das YSZ in der kubischen bzw.

tetragonalen Phase nachgewiesen werden. Das geht übrigens auch einher mit den Erfahrungen die Erfinder der

vorliegenden Erfindung, denen, wie es in *US_20080090099_A1* offenbart ist (Tabelle 3, VNr 29), gelungen ist, ebenfalls

10 ZrO₂ in einem stabilen Funkenprozess unter

ausschliesslicher Sauerstoffatmosphäre und bei wesentlich höheren Drucken herzustellen, der aber auch keine kubische bzw. tetragonale Struktur des ZrO₂ nachweisen konnte, ganz im Gegensatz zu den „hochtemperatur“ Korundstrukturen in

15 dem dort beschriebenen Al-Cr-O Materialsystem.

Aus den XRD Spektrum *Cyviene_Surf.Coat.Tech_180-181_2004*

wird noch ein anderer Sachverhalt deutlich. Man sieht die Bragg peaks der hexagonalen Phase des Y-O und des

hexagonalen Zr. Das sind Schichtkomponenten, die wesentlich

20 zu Schichtinstabilitäten beitragen können, falls es zu

thermischen Wechselbelastungen kommt, wie das gewöhnlich bei den Anwendungen als Festelektrolyt oder thermische Barrierschicht der Fall ist.

Diese Probleme decken sich auch teilweise mit denen beim

25 IBAD: Vergiftungserscheinungen des Targets,

Schichtzusammensetzungen, die noch andere

Materialkomponenten enthalten, und eine schwierige

Kontrolle der Kristallstruktur der synthetisierten Schicht

bei den tiefen Substrattemperaturen zwischen 200°C und 600°C zur Folge hat.

Ausserdem, wie bereits oben bemerkt sind die Reflexe in US 20020031686, für die man die höchste Intensität beim tetragonalen bzw. kubischen ZrO₂ erwartet (bei $2\theta=30^\circ$ und 50°) fast nicht nachweisbar. Damit liegt aber sehr wahrscheinlich lediglich ein sehr kleiner Anteil an kubischem YSZ vor.

10 f) Andere Verfahren:

US_20060009344 beschreibt die Herstellung eines Zr-O Substrates, das sowohl Komponenten monokliner wie kubischer Struktur des Zr-O umfasst und das deshalb besonders geeignet ist, eine bessere Haftung zur eigentlichen kubischen Zr-O Schicht herzustellen. Das Verfahren ist ein Aerosol „CVD“-Verfahren. Wieder wird Wert darauf gelegt, dass die Körner Grössen zwischen 5 nm und 1000 nm haben und wieder wird das Zr-O mit Y-O zwischen 4 mol% und 8 mol% stabilisiert.

20

All die beschriebenen Verfahren lassen den Schluss zu, dass es ein grosses Bedürfnis nach gegenüber dem Stand der Technik verbesserten Zirkonoxidschichten gibt, ebenso wie es ein Bedürfnis nach einem wirtschaftlichen und technisch beherrschbaren Verfahren zur Herstellung solcher Schichten gibt.

25

Der vorliegende Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde Verfahren zur Herstellung von Zirkonoxid-Schichten

anzugeben, welche nicht oder in wesentlich geringerem Umfang mit den oben geschilderten Problemen des Stand der Technik behaftet ist.

5 Mit der vorliegenden Erfindung soll auch eine Verfahren zur Herstellung von Zirkonoxidschichten angegeben werden, welches es ermöglicht in weitem Umfang und im Wesentlichen ohne starke Änderung der Schichtzusammensetzung die Morphologie und insbesondere die Grösse der Kristallite zu steuern.

10 Der vorliegenden Erfindung liegt auch die Aufgabe zugrunde Zirkonoxid-Schichten zu offenbaren, die im Wesentlichen in kubischer und/oder tetragonaler Struktur vorliegen und die im Vergleich zum Stand der Technik in wesentlich geringerem Umfang Bestandteile umfassen, die nicht kubisches
15 Zirkonoxid oder nicht tetragonales Zirkonoxid sind. Dies bezieht sich sowohl auf Schichten, die einen oder mehrere klassische Stabilisatoren aufweisen als auch solche ohne klassische Stabilisatoren.

Als klassische Stabilisatoren werden im Rahmen dieser
20 Beschreibung Stabilisatoren bezeichnet, welche in Reinform bei Raumtemperatur und unter Normaldruck als Festkörper vorliegen. Beispiele für solche klassischen Stabilisatoren sind Yttrium, Magnesium, Kalzium, Scandium und/oder der Metalle der seltenen Erden der Gruppe IIIA des
25 Periodensystems. Hier seien noch zusätzlich erwähnt Sr, Ba, Ni, Fe, Co, La, Nd, Gd, Dy, Ce, Al, Bi, Ti, Tb, Eu, Sm. Diese genannten Stabilisatoren finden sich dann als Oxide oder Mischoxide in der synthetisierten Schicht wieder. Unter den Begriff der klassischen Stabilisatoren sollen

auch die Mischungen der oben beispielhaft erwähnten Materialien gelten.

Die Aufgabe wird durch Verfahren gelöst, welche auf reaktiver Funkenverdampfung beruhen, bei dem entweder der Funkenstrom gepulst wird und/oder ein vorzugsweise kleines

senkrechtes Magnetfeld am Funkentarget benutzt wird. Gattungsgemässe Verfahren zur Herstellung von Schichten wurden bereits in den Anmeldungen US 20070000772 A1 und US 20080020138 A1 beschrieben und werden hier als bekannt

vorausgesetzt. Insbesondere die US 20080090099 A1 beschreibt auch die entsprechende Herstellung von ZrO_2 Schichten. Der Prozess ist so stabil ausgelegt, dass die Funkentargets in Reaktivgasdrucken zwischen 0.1 Pa und 10 Pa betrieben werden können.

Im Unterschied zu den dort beschriebenen Verfahren werden nun jedoch erfindungsgemäss zusätzliche Massnahmen ergriffen, um Zirkonoxid in der kubischen und/oder der tetragonalen Kristallstruktur auf Substraten abzuscheiden.

In einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird die Aufgabe gelöst durch ein Verfahren zur Herstellung einer Zirkonoxid-basierten Schicht auf einem Ablege-Substrat, unter Einsatz reaktiven Funkenverdampfens, mit gepulstem Funkenstrom und/oder mit Anlegen eines zum Funkentarget senkrechten Magnetfeldes, wobei ein elementares Zirkon und mindestens einen Stabilisator umfassendes Mischtarget eingesetzt wird.

In einer Variante dieser Ausführungsform wird dabei die Schicht in kubischer und/oder tetragonaler Kristallstruktur hergestellt.

Gemäss der ersten Ausführungsform der vorliegenden
5 Erfindung besteht mithin eine erfinderische Massnahme darin, für das Funkenverdampfen ein Mischtarget zu verwenden, welches elementares Zirkon und einen/oder mehrere klassische Stabilisatoren im in der Schicht gewünschten Konzentrationsverhältnis umfasst. Wie sich
10 erstaunlicherweise herausgestellt hat, lässt sich ein solches Zirkon-Stabilisator Mischtarget mittels gepulster Funkenquelle und/oder mittels geringem senkrechten Magnetfeld problemlos unter Sauerstoffdrücken betreiben, die auch deutlich über 0.1 Pa liegen und sogar bis zu 10 Pa
15 und darüber hinaus gehen können.

In einer Variante dieser Ausführungsform wird mithin der Sauerstoffpartialdruck über 0.1Pa gewählt, vorzugsweise mindestens zu 10Pa.

Die Konzentrationsverhältnisse des Mischtargets
20 reproduzieren sich im Wesentlichen in den Konzentrationsverhältnissen der auf den Substraten aufgetragenen Schichten, und zwar im Wesentlichen unabhängig vom Sauerstoffdruck.

In einer Variante dieser Ausführungsform wird somit das
25 Konzentrationsverhältnis von Zirkonoxid und Stabilisator an der Schicht mindestens im Wesentlichen durch das Konzentrationsverhältnis von elementarem Zirkonium und Stabilisator am Mischtarget vorgegeben.

Bei genügend hoher Stabilisatorkonzentration ist automatisch für das Vorliegen der kubischen und/oder tetragonalen Kristallstruktur gesorgt. Beim Sauerstoffdruck kann es sich um einen Partialdruck oder einen Totaldruck
5 handeln.

In einer Variante dieser Ausführungsform wird mithin, durch Wahl der Konzentration des Stabilisators im Mischtarget, die kubische und/oder tetragonale Kristallstruktur erreicht.

- 10 Damit kann im Verfahren der Sauerstoffdruck als hinsichtlich Schichtzusammensetzung freier Parameter betrachtet und eingestellt werden. Hingegen haben verschiedene Experimente gezeigt, dass der Sauerstoffdruck oder -fluss erstaunlicherweise als massgeblicher
15 Einflussfaktor auf die Schichtmorphologie angesehen werden kann. Somit wurde von den Erfindern ein Verfahren erfunden, welches über die Wahl der Konzentrationsverhältnisse des Mischtargets eine Wahl der Schichtzusammensetzung ermöglicht und im Wesentlichen unabhängig davon, über die
20 Wahl des Sauerstoffpartialdrucks, die Wahl der Schichtmorphologie, wie zum Beispiel die Grösse der Kristallite oder die Frage des kolumnaren Wachstums zulässt. Dabei ist zusätzlich bemerkenswert, dass dies bei relativ moderaten Substrattemperaturen geschehen kann.
- 25 In einer Variante dieser Ausführungsform wird der Sauerstoffpartialdruck, als bezüglich des Erreichens kubischer und/oder tetragonaler Kristallstruktur mindestens im Wesentlichen freier Stellparameter, für die Vorgabe der Schichtmorphologie eingesetzt.

In einer weiteren Variante dieser Ausführungsform, auf die weiter unten vermehrt eingegangen werden soll, umfasst das Reaktivgas, nebst Sauerstoff, Stickstoff.

In einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung
5 wird die erwähnte Aufgabe gelöst durch ein Verfahren zur Herstellung einer Zirkonoxid-basierten Schicht auf einem Ablege-Substrat, unter Einsatz reaktiven Funkenverdampfens mit gepulstem Funkenstrom und/oder mit Anlegen eines zum Funkentarget senkrechten Magnetfeldes, bei welchem ein
10 Zirkoniumtarget aus elementarem Zirkonium eingesetzt wird und, nebst Sauerstoff, Stickstoff als Reaktivgas eingesetzt wird.

In einer Variante dieser Ausführungsform wird dabei die Schicht in kubischer und/oder tetragonaler Kristallstruktur
15 hergestellt.

Gemäss dieser zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann auf die Verwendung von klassischen Stabilisatoren verzichtet werden, wenn als zweite erfinderische Massnahme dem Reaktivgas Stickstoff zugegeben
20 wird. Als Target kann demgemäss ein elementares Zirkoniumtarget verwendet werden. Ohne diese weiteren Massnahmen, d.h. ohne Stickstoff würden nun im Rahmen des Funkenverdampfens monokline Zirkonoxidschichten auf den Substraten abgeschieden. Wie sich erstaunlicherweise
25 gezeigt hat, führt bei bestimmten Druckverhältnissen und Gasflüssen die Verwendung von Stickstoff und Sauerstoff als Reaktivgas zu Zirkon, Sauerstoff und Stickstoff enthaltenden Schichten, welche in kubischer oder tetragonaler Kristallstruktur vorliegen Die

Druckverhältnisse und Gasflussverhältnisse können dabei so gewählt werden, dass Röntgenbeugungsspektren der entsprechenden Schichten deutliche Reflexe des kubisch kristallisierten ZrO_2 aufweisen.

- 5 In einer Variante dieser Ausführungsform wird mithin durch Einstellung der Druckverhältnisse beim Funkenverdampfen eine Schicht erzeugt, die Zirkon, Sauerstoff und Stickstoff enthält, mit kubischer und/oder tetragonaler Kristallstruktur.
- 10 Bei diesem Verfahren wird bevorzugt der Sauerstoffanteil über eine Gasflussregelung eingestellt, während der Stickstoffanteil entsprechend einer Totaldruckregelung gewählt wird. Bei einer Beschichtung gemäss dieser zweiten erfinderischen Ausführungsform hat sich gezeigt, dass,
15 aufbauend auf kubisch auskristallisierten Zirkon, Stickstoff und Sauerstoff enthaltende Schichten reine ZrO_2 Schichten, d.h. ganz ohne Stabilisator, beschichtet werden können, die zwar dünn sind, aber in kubischer Kristallstruktur vorliegen.
- 20 In einer Variante dieser Ausführungsform wird mithin die Zirkonoxid- basierte Schicht als reine ZrO_2 Schicht in kubischer Kristallstruktur, auf einer kubisch auskristallisierten, Zirkon, Stickstoff und Sauerstoff enthaltenden Schicht abgelegt.
- 25 Der Umstand, dass dicke reine ZrO_2 Schichten, d.h. ohne Stickstoffanteil, schliesslich wieder in die weiche monokline Phase umschlagen, kann für manche Anwendungen, die beispielsweise ein reibungsminderndes Einlaufen benötigen, mit Vorteil ausgenutzt werden und soll auch

Bestandteil der vorliegenden Erfindung sein. Somit ist eine Verwendung dieser Variante die Herstellung einer Schicht, die in die monokline Phase umschlagen kann, vorzugsweise für reibungsminderndes Einlaufen.

- 5 Wie oben angetönt wird gemäss einer dritten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung die zweite erfindungsgemässe Ausführungsform, d.h. die Verwendung des Stickstoffs als zusätzliches Reaktivgas und die erste erfindungsgemässe Ausführungsform, d.h. die Verwendung eines einen
- 10 klassischen Stabilisator enthaltenden Zirkoniummischtargets in Kombination ausgeführt. Dies ermöglicht die Herstellung von kubischen und/oder tetragonalen Zirkonoxidschichten mit weniger Stabilisatorkonzentration als sonst üblich. Im Vergleich zur geschilderten zweiten Ausführungsform kann
- 15 durch das Vorhandensein von unter Umständen geringer Konzentration von klassischem Stabilisator in grossem Umfang der Sauerstoffgasfluss und damit mit die Morphologie der aufgetragenen Schicht gezielt eingestellt werden.

Die Erfindung soll nun im Detail und anhand der folgenden

20 Abbildungen Tabellen und Figuren beispielhaft beschrieben werden.

- Es wird nun zunächst eine der möglichen Anwendungen genauer diskutiert um daran fest zu machen, welche Anforderungen ein entsprechendes Verfahren und/oder eine entsprechende
- 25 Schicht vorzugsweise erfüllen sollte. Die Aufzählung der Anforderungen ist dabei im Wesentlichen nicht kumulativ zu verstehen, wobei es natürlich von Vorteil sein kann, wenn gleich mehrere dieser Eigenschaften oder gar erfüllt sind.

Anschliessend wird kurz auf eine Besonderheit der für die Verfahrensbeispiele verwendeten Beschichtungsanlage eingegangen, die vorzugsweise zu realisieren ist und zu besonders stabilen Beschichtungsprozessen führt.

- 5 Anschliessend werden beispielhaft verschiedene Beschichtungsprozesse aufgelistet.

Erst danach werden die damit hergestellten Schichten charakterisiert.

- 10 Nach der Charakterisierung schliesst sich eine Diskussion und Interpretation der gefundenen Charakteristika an.

- Ein Thema im Zusammenhang mit der eventuell auch erfinderischen Verwendung der vorliegenden Erfindung betrifft die Herstellung eines Materials in Schichtform, das hohe Sauerstoffionenleitfähigkeit aufweist und
15 besonders für Festelektrolytbrennstoffzellen geeignet ist.

- Eine typische Festelektrolytbrennstoffzelle ist beispielsweise in S.C.Singhal, Recent Progress in Zirkonia-Based Fuel Cells for Power Generation, Fifth International Conference on Science and Technology of Zirkonia, August
20 16.-22.1992, Melbourne, Australia beschrieben. Daraus geht hervor, dass die eigentliche Festelektrolytschicht beidseitig noch mit porösen Elektroden (Kathode luftseitig, Anode Fuelseitig) versehen werden muss und dass es dann noch zusätzliche „dichte“ Interconnects benötigt, um eine
25 komplette Brennstoffzelle zu fertigen. Das Design der Brennstoffzelle basiert also auf einem kompletten Schichtsystem, dass intensiver thermischer Wechselbelastung ausgesetzt ist. Der Einsatz der Zelle unter diesen Bedingungen stellt enorme Anforderungen an die Stabilität

des gesamten Schichtpaketes hinsichtlich der Vermeidung von Diffusion und Stabilität der Schichtstruktur. Besonders wichtig sind die chemische Stabilität des Festelektrolyten und dessen kristalline Struktur. Diese Temperaturstabilität
5 schliesst im Besonderen ein, dass es zu keinen oder wenigen temperaturbedingten Phasenumwandlungen im Festelektrolyt kommt. Wichtig ist auch die Kontrolle bzw. Vermeidung von Diffusionsvorgängen innerhalb der Zelle, um „Alterungserscheinungen“ oder Performanceverlusten zu
10 begegnen. Von grosser Bedeutung für die Stabilität der Zelle ist die Anpassung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten unter den verschiedenen Schichtmaterialien, die die Zelle ausmachen.

Aus diesen allgemeinen Überlegungen gelangten die Erfinder
15 zu folgenden konkreten Anforderungen an die Festelektrolytschicht und das Gesamtschichtpaket der Brennstoffzelle und es ergibt sich mithin eine erfindungsgemässe Verwendung der bis anhin diskutierten Verfahren für die Herstellung einer Festelektrolytschicht in
20 einer Brennstoffzelle.

Wird eine Zirkonoxid Schicht als Festelektrolytschicht eingesetzt so sollte sie vorzugsweise vorwiegend aus kubischem und/oder tetragonalem ZrO_2 bestehen, um die Phasenumwandlung in eine monokline Struktur zu vermeiden.
25 Bei der Verwendung von klassischen Stabilisatoren sollte vorzugsweise deren Einbau problemlos sein und die freie Auswahl der klassischen Stabilisatoren sollte nicht durch die Herstellmethode eingeschränkt werden.

Somit gilt für eine Variante der erfindungsgemässen Verwendung der genannten Verfahren: Der Stabilsator wird frei gewählt.

- 5 Es sollten sowohl Schichtzusammensetzung als auch Phasenzusammensetzung als auch Schichtmorphologie vorzugsweise weitgehend unabhängig voneinander mittels einfach zu regelnder Parameter der Herstellungsmethode veränderbar sein.

- 10 Somit gilt für eine Variante der erfindungsgemässen Verwendung der genannten Verfahren: Es werden Schichtzusammensetzung, Phasenzusammensetzung und Schichtmorphologie mindestens weitgehend unabhängig voneinander mittels Regelung von Parametern des Verdampfungsprozesses eingestellt.
- 15 Schichtmorphologie und Kristallstruktur der Schicht sollten vorzugsweise in einem Substrattemperaturbereich zwischen 200°C und 700°C herstellbar sein, damit sie einmal kompatibel sind mit gewöhnlichen Substratmaterialien und zum anderen die Substrattemperatur frei so gewählt werden
- 20 kann, dass die Anpassung an die verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten innerhalb des gesamten Schichtpaketes möglich ist, d.h. man sollte vorzugsweise die Substrattemperatur so wählen können, dass sich Zug- und Druckspannung der Einzelschichten zumindest teilweise
- 25 kompensieren, beispielsweise in der Mitte des Betriebsbereiches.

Für die erfindungsgemässen Verfahren erfolgt mithin, in einer Variante, das Ablegen der Schicht bei einer Substrattemperatur zwischen 200°C und 700°C.

In einer weiteren Variante der erfindungsgemässen Verfahren wird die Schicht als Schicht in einem Schichtpaket hergestellt.

Die Schichtmorphologie der Festelektrolyteschicht sollte
5 sich vorzugsweise einstellen lassen von dichter Morphology (glassy) bis zu stark kolumnarem Wachstum.

Somit gilt für eine Variante der erfindungsgemässen Verwendung der genannten Verfahren: Es lässt sich die Schichtmorphologie von glasähnlich bis kolumnar einstellen.

10 Es sollte vorzugsweise die Möglichkeit bestehen, die kubische bzw. tetragonale Phase des ZrO_2 auch ohne klassische Stabilisatoren zu synthetisieren, entweder für die Verwendung als Festelektrolyt oder für die Verwendung als Wachstumsunterlage der kubischen bzw. tetragonalen
15 Phase für ein YSZ mit geringem Anteil an klassischen Stabilisatoren, beispielsweise aus Kostengründen für die klassischen Stabilisatoren.

Somit gilt für eine Variante der erfindungsgemässen Verwendung der genannten Verfahren: Es wird die
20 Festelektrolytschicht ohne Stabilisator hergestellt.

Eine Verwendung der genannten Verfahren ist auf die Herstellung der Schicht als Wachstumsunterlage für ein YSZ gerichtet.

Es sollen vorzugsweise einfache Gradientenschichten
25 zwischen der Festelektrolytschicht und den Elektroden einerseits sowie den Interconnects andererseits möglich sein, ohne dass der Beschichtungsprozess unterbrochen werden muss. Im Besonderen bedeutet das, dass vorzugsweise

Gradienten zwischen Metallen und Metallnitriden, Metallen und Metalloxiden sowie Metallnitriden und Metalloxiden realisiert werden können sollten.

Somit gilt für eine weitere Variante der erfindungsgemässen
5 Verwendung der genannten Verfahren: Die Schicht wird mit einem Gradienten der Schichtmaterialzusammensetzung in Richtung ihrer Dickenausdehnung hergestellt, vorzugsweise ist der Gradient wie folgt: Von Zr zu ZrN, dann zu ZrO dann zu ZrO₂, mit freier Wählbarkeit von Morphologie und Phase.

10 Mehrfachlagenschichten, die durch Variation im Sauerstoff-Stickstoffgehalt hergestellt werden, werden von den Erfindern als von besonderer Bedeutung angesehen.

In einer Variante der erfindungsgemässen Verfahren wird
mithin die Schicht durch Variation des
15 Sauerstoff/Stickstoff -Gehaltes, als Mehrfachlagenschicht hergestellt.

Dabei spielen Übergänge zwischen Metallnitrid und den verschiedenen Metalloxiden eine besondere Rolle, da somit in einem Materialsystem sowohl leitfähige wie isolierende
20 Schichten hergestellt werden können und die Phasen auswählbar sind, was sowohl für die mechanische als auch für die strukturelle Stabilität des Schichtpaketes vorteilhaft ist.

Vorzugsweise sollte eine freie Formierbarkeit des
25 Interfaces/Zwischenschicht zu praktisch allen Materialien möglich sein.

Vorzugsweise sollte, wie erwähnt wurde, die Möglichkeit bestehen sämtliche Schichten in einem Materialsystem zu formieren, welches als metallische Komponente Zirkon umfasst: Zr zu ZrN zu ZrO zu ZrO₂ mit der freien

5 Wählbarkeit von Morphologie und Phase.

Vorzugsweise findet die Formierung der kubischen oder tetragonalen Phase anders als beim Sintern bei tiefer Substrattemperatur weit entfernt vom thermischen Gleichgewichtszustand statt.

10 Es ergibt sich somit die Variante der erfindungsgemässen Verfahren, wonach die Formierung der kubischen oder tetragonalen Phase entfernt vom thermischen Gleichgewichtszustand vorgenommen wird.

Von Vorteil kann es sein wenn es möglich ist, das Zr-O
15 Schichtsystems mit anderen Oxiden, die zum Beispiel substratangepasst sind, zu kombinieren.

Auch kann die Möglichkeit der Beimengung von anderen Metalloxiden und Gemischen vorteilhaft sein, um beispielsweise die Ionenleitfähigkeit heraufzusetzen.

20 Es ergibt sich somit die Variante der erfindungsgemässen Verfahren, wonach Oxyde anderer Metalle als von Zirkonium in das Schichtmaterial eingebaut werden.

Vorzugsweise kann die Kristallitgrösse der Schicht eingestellt werden, insbesondere im Nanometerbereich. Diese
25 geringe Kristallitgrösse erhöht den Ionentransport entlang der Korngrenzen im Vergleich zu Materialien mit grösseren Körnern und resultiert in einer geringeren Abhängigkeit der Ionenleitfähigkeit von der Temperatur.

Somit ergibt sich eine erfindungsgemässe Verwendung der erfindungsgemässen Verfahren für die Erhöhung des Ionentransportes entlang der Korngrenzen wobei die Kristallitgrösse der Schicht vorzugsweise im

5 Nanometerbereich eingestellt wird.

Vorzugsweise sind die Festelektrolyt-Schichtsysteme kombinierbar mit beispielsweise porösen Schutzschichten über der Festelektrolytschicht.

Vorzugsweise gibt es die Möglichkeit zur Erhöhung der
10 mechanischen Stabilität und zum Erzielen einer bestimmten Mikrostruktur durch Beifügen von Al-O, Cr-O, Al-Cr-O, oder weiteren mechanisch stabilen Materialien.

Hinsichtlich dem Herstellungsverfahren sind folgende Anforderungen jeweils vorzugsweise erfüllt:

15 Vorzugsweise steht ein Verfahren zur Verfügung, das die hohen Sintertemperaturen durch einen Prozess ersetzt, bei dem am Substrat lediglich Temperaturen zwischen 200°C und 700°C notwendig sind.

Vorzugsweise steht ein Verfahren zur Verfügung, das ein
20 problemloses Ankoppeln von mehreren Schichten mit unterschiedlicher Funktionalität an die Festelektrolytschicht zulässt.

Vorzugsweise steht ein Verfahren zur Verfügung, das
25 pulvermetallurgische hergestelltes Material in eine intermetallische Verbindung überführt und diese reaktiv verdampft und als Schicht auf dem Substrat kondensiert.

Vorzugsweise steht ein Verfahren zur Verfügung, welches im Wesentlichen Unabhängigkeit von der Grösse der Ausgangspulver mit sich bringt.

5 Vorzugsweise steht ein Verfahren zur Verfügung, welches leicht übertragbar ist auf andere Materialsysteme.

Vorzugsweise steht ein Verfahren zur Verfügung, welches eine bessere Möglichkeit der Interfaceformierung bietet als das beim Plasmaspritzen.

10 Vorzugsweise steht ein Verfahren zur Verfügung, bei dem es nicht zu Regelproblemen kommt wie beim Elektronenstrahlverdampfen.

Vorzugsweise steht ein Verfahren zur Verfügung, welches kostengünstige Technologie anwendet, zu einer Reduktion der Spritzer im Vergleich zum Plasmaspritzen führt und die
15 einfache Prozessausdehnung auf quarternäre Oxide erlaubt.

Vorzugsweise steht ein Verfahren zur Verfügung, welches Targets benutzt, welche mit Standardmethoden beispielsweise im pulvermetallurgischen Verfahren oder Plasmaspritzverfahren in der der für die Schicht
20 gewünschten Zusammensetzungen herstellbar sind.

Es soll nun auf eine Besonderheit der für die folgenden Beispiele verwendeten Beschichtungsanlage eingegangen werden, die zu einem besonders stabilen Beschichtungsprozess führt. Im Unterschied zu den
25 Verfahren, die in den oben genannten Druckschriften beschrieben sind und die vor allem das Problem der Oxidbelegung am Target (Kathode der Funkenentladung) bei Prozessen im reinen Sauerstofffluss betreffen, wurde bei

den unten aufgeführten Beispielen eine Beschichtungsanlage mit speziell ausgeführter Anode verwendet und dadurch ein weiteres Problem der reaktiven Funkenverdampfung gelöst, welches nicht direkt mit der Herstellung von

- 5 Zirkonoxidschichten verknüpft ist. Dem Fachmann ist bekannt, dass sich nicht nur das Target, sondern auch die Anode der Funkenentladung im reinen Sauerstoffreaktivgas mit einer Oxidschicht belegen kann. In WO 2009/056173 A1 wurde deshalb eine spezielle Ausführung der Anode
- 10 (Hohlanode) beschrieben, die die Anodenfläche auch unter der Bedingung des Betriebs der Funkenentladung im reinen Sauerstoffreaktivgas leitfähig hält. Dies führt schon zu recht stabilen Beschichtungsprozessen. Mit dieser Beschreibung soll allerdings ein verbessertes Anodendesign
- 15 offenbart werden, das für viele Anwendungen in der Produktion einfacher zu realisieren ist und weit weniger Wartungsaufwand erfordert. Eine Ausführungsform dieser Anode 101 ist in Figur 19b dargestellt. Figur 19a zeigt die Anode 101 schematisch als Bestandteil einer
- 20 Beschichtungsanlage mit Funkenstromquelle 107 der Beschichtungsanlage und Funkenkathode 111. Die Anode 101 umfasst eine beheizbare, elektrisch von Masse getrennter Heizwendel 103, die durch eine zusätzliche elektrische Versorgung 109 gespiessen wird. Die Heizwendel 103 der
- 25 Anode 101 ist elektrisch isoliert vom Mantel 105 ausgeführt, der entweder auf Massepotential gelegt werden oder floatend betrieben werden kann und zumindest teilweise als Anodenfläche für die Funkenentladung dient.

Unter einem weiteren Aspekt der Erfindung wird somit eine

30 Anode für eine Funkenverdampfungsquelle, insbesondere zur

Ausführung der vorerwähnten Verfahren insbesondere in deren erfindungsgemässen Verwendungen vorgeschlagen, die umfasst:

- Einen Anodenkörper mit einer Anodenfläche,
- 5 • entlang der Anodenfläche eine Heizwendel, die vom Anodenkörper elektrisch isoliert ist,
- vom Anodenkörper elektrisch isolierte Anschlüsse für die Heizwendel.

10 Wie Figur 19b zeigt ist die Anode 101 so ausgestaltet, dass sie sich beim Temperaturwechsel in solchem Umfang verformt, dass die Oxidschichten, die sich auf der Oberfläche der Anode bildenden Mantel 105 beim Beschichtungsbetrieb fortwährend aufbauen, bei einem Temperaturwechsel
15 abplatzen.

In einer Variante der erfindungsgemässen Anode ist der Anodenkörper aus Blechmaterial geformt.

Erfindungsgemäss wird eine Funkenverdampfungsanlage mit einer solchen Anode so betrieben, dass man die
20 Anodenfläche, zur mindestens teilweisen Reinigung von einer Störbeschichtung, einem mittels Aktivierung/Desaktivierung der Heizwendel bewirkten Temperaturwechsel aussetzt, derart sich die Anodenfläche verformt und die Störbeschichtung abplatzt.

25 Durch induzierte Temperaturwechsel kann somit eine ständig frei werdende und leitfähige Anodenfläche garantiert werden. In der Beschichtungsanlage können einige dieser

selbstreinigenden Anoden verteilt werden, um die gleichmässige Beschichtung zu garantieren. In einer bevorzugten Variante können diese Anoden so ausgestaltet sein, dass sie auch gleichzeitig als Substratheizung
5 benutzt werden können. In einer weiteren bevorzugten Variante, können diese Anoden durch Blenden vor der direkten Beschichtung durch die Funkenquellen geschützt werden.

Die sich nun anschliessenden Verfahrensbeispiele, die im
10 Folgenden diskutiert werden, wurden mit dieser neuen Anodenanordnung durchgeführt, wobei deren Einsatz nicht zwingend für die Herstellung der Zirkonoxidschichten ist.

Zuerst werden Beispiele zur Synthese von ZrO_2 -Schichten, die kubische bzw. tetragonale Phasen umfassen angegeben,
15 wobei mit dem Quellenbetrieb analog zu US 20080020138 A1 gearbeitet wurde. Als Funkenquellen wurden für die Haftsichten (SL) ebenso wie für die Funktionsschichten (FL) die Funkenquellen der Firma OC Oerlikon Balzers AG mit Targets, die einen Targetdurchmesser von 160 mm und eine
20 Dicke von 6 mm aufweisen und mit einem Standardmagnetsystem wie beispielsweise in der US_20070000772_A1 beschrieben, verwendet:

Beispiel 1:

25 Schritt (A)

Zuerst erfolgt eine Reinigung der Substrate, auf die die Schicht oder das Schichtsystem aufgebracht werden soll, ausserhalb des Beschichtungssystems. Diese hängt von

Substratmaterial und dessen Herstellmethode ab. Meist werden nasschemische Behandlungen, Ausheizen in bestimmten Gasatmosphären oder andere dem Fachmann bekannte Verfahren durchgeführt. In diesem Fall wurde eine nasschemische
5 Behandlung durchgeführt.

Schritt (B)

Nach Einlegen der Werkstücke in dafür vorgesehenen Halterungen und Einbringen der Halterungen in die
10 Vakuumbehandlungsanlage, wird die Behandlungskammer auf einen Druck von ca. 0.01 Pa abgepumpt.

Schritt (C)

Danach wird in einem ersten Vakuumvorbehandlungsschritt ein
15 durch Strahlungsheizer unterstütztes Niedervoltbogenplasma zwischen einer durch eine Blende abgetrennte Kathodenkammer mit Heisskathode und den anodisch geschalteten Werkstücken in einer Argon-Wasserstoffatmosphäre gezündet, wobei der Prozessschritt durch folgende Parameter charakterisiert
20 ist:

	Strom des Niedervoltbogens	150 A
	Argonfluss	50 sccm
	Wasserstofffluss	300 sccm
	Prozessdruck	1.4 Pa
25	Substrattemperatur	stabilisiert sich bei ca. 500°C

Prozesszeit 45 min

In diesem Prozessschritt werden die Substrate bevorzugt als Anode für den Niedervoltbogen geschaltet.

5 Schritt (D)

In diesem Prozessschritt erfolgt das Ätzen der Substrate, um eine verbesserte Schichthaftung zum Substrat hin zu erzielen. Dafür wird der Niedervoltbogen zwischen dem Filament und einer Hilfsanode betrieben. Bevorzugt werden die Werkstücke mit einer negativen Biasspannung beaufschlagt. Typische Parameter für diesen Schritt sind:

	Argonfluss	60 sccm
	Prozessdruck	2.4 Pa
	Strom des Niedervoltbogens	150 A
15	Substrattemperatur	ca. 500°C
	Prozesszeit	30 min
	Biasspannung	200 V (für intensivere Ätzeffekte bis zu 1200 V)

20 (E1)

Obwohl das Oxid direkt auf dem Substrat abgeschieden werden kann, soll hier eine Schichtfolge geschildert werden, die sich besonders eignet, um Oxide an metallische Unterlagen anzubinden und die zuerst eine Zwischenschicht oder Stützschi-
25 chicht (SL) verwendet, ehe die eigentliche Funktionsschicht (FL) abgeschieden wird. Dies besteht

darin, dass eine erste Schicht aus ZrN auf dem Substrat abgeschieden wird.

Damit ergibt sich eine Variante der erfindungsgemässen Verfahren wobei das Ablegesubstrat eine metallische Oberfläche hat, dahingehend, dass eine Stützschrift auf der metallischen Oberfläche abgelegt wird, dann die Schicht auf die Stützschrift, wobei die Stützschrift vorzugsweise aus einem Metall ausser Zr, einem Nitrid oder einem Oxid besteht, vorzugsweise aus ZrN.

10

Es werden folgende Parameter verwendet:

Betrieb von 4 elementaren Zr-Targets (natürlich nicht auf diese Zahl beschränkt, eine wesentliche Veränderung der benutzten Targetanzahl muss sich natürlich in einer Anpassung des Drucks bzw. der Sauerstoffflüsse widerspiegeln) mit jeweils 200 A Funkenstrom.

15

Totaldruckgeregelt auf 3.5 Pa, d.h. es wird Stickstoff über die Flowmeter so geregelt eingelassen, dass sich immer ein Totaldruck von 3.5 Pa in der Beschichtungskammer einstellt.

20

Substratbias -60 V (wobei Bereiche zwischen -10 V und -1200 V möglich sind), bipolar gepulst mit vorzugsweise 36 μ s negativer und 4 μ s positiver Pulslänge, was einer Frequenz von 25 kHz entspricht.

25

Substrattemperatur ca. 500°C

Prozesszeit ca. 5 min

(F1)

In einem weiteren Schritt erfolgt der Übergang zur eigentlichen Funktionsschicht, indem über die Flowmeter Sauerstoff zugegeben wird, mit folgenden Prozessparametern:

5	Sauerstofffluss	siehe unten
	Prozessdruck	3.5 Pa (weiterhin Totaldruckgeregelt)
	Funkenstrom	je 200 A für die 4 elementaren Zr-Targets
10	Substratbias	-40 V (bipolar)
	Substrattemperatur	ca. 500°C
	Prozesszeit	40 min

Gibt man wie beschrieben 300 sccm Sauerstoff zu, erhält man eine Schicht, deren Bruchquerschnitt aufgenommen im SEM in Abbildung 1a und b wiedergegeben ist (siehe Probe 793).

Es wurden für Sauerstoffflüsse zwischen 0 und 400 sccm Schichten auf diese Art hergestellt, die in Tabelle 1 beschrieben sind. Die SEM Aufnahmen der Bruchquerschnitte wurden ebenfalls gemacht. Die Abbildungen zeigen folgende Proben:

- Abbildung 2: Probe 777 (0 sccm O₂)
- Abbildung 3: Probe 778 (50 sccm O₂)
- Abbildung 4a und b: Probe 779 (200 sccm O₂)
- 25 Abbildung 5a und b: Probe 799 (250 sccm O₂)
- Abbildung 6a und b: Probe 780 (400 sccm O₂).

Der in Beispiel 1 beschriebene Prozess beruht auf der Nutzung von „reinen“, d.h. elementaren Zr-Funkentargets ohne klassischem Stabilisator, die in einer reinen Reaktivgasatmosphäre betrieben wurden, d.h. ohne Argon
5 sondern jeweils entweder mit N₂ zur Zr-N-Herstellung oder mit Sauerstoff zur Zr-O-Herstellung. In den Schichtübergängen wird mit einem Stickstoff-sauerstoffgasgemisch gearbeitet. Der Prozess ist totaldruckgeregelt, d.h. dass Sauerstoffzugabe gleichzeitig
10 Stickstoffrücknahme bedeutet. In der Realität bedeutet das, bei Sauerstoffflüssen bis etwa 1000 sccm immer noch Anteile von Stickstoffatmosphäre in der Prozesskammer sind. Im Beispiel wurde Stickstoff als abnehmender Reaktivgaszusatz eingesetzt. die Verwendung von ausschliesslich Sauerstoff
15 führt ab einer gewissen Schichtdicke nachweisbar zur unerwünschten monoklinen Phase bei ca. 350 sccm Sauerstoffzugabe.

Beispiel 2:

20 In einer weiteren Prozessvariante sollen nun Schichten hergestellt werden, bei denen pulvermetallurgisch hergestellte Legierungstargets (im Beispiel jeweils 2 Stück) mit einer Zusammensetzung von 85 at% Zr und 15 at% Yttrium (Y) als klassischem Stabilisator zur Synthese der
25 Funktionsschicht benutzt werden (siehe auch Tabelle 2). Zur Herstellung der Zwischen- oder Stützsicht wurden aber weiterhin 2 elementare Zr-Targets benutzt:

Zuerst wurden wieder die Teilschritte (A) bis (D) ausgeführt wie sie in Beispiel 1 beschrieben sind.

Zu Vergleichszwecken sollte zunächst wieder eine Schicht ohne Stabilisator erstellt werden (Schritte E1 und F1). Hierzu wurden die zwei Zr(85at%)/Y(15at%)-Targets wieder durch zwei elementare Zr-Targets ersetzt, d.h. es wurden 4
5 Zr-Targets betrieben, um die Zwischenschicht herzustellen.

Schritt (E2a)

Dies erfolgte mit folgenden Parametern:

	Totaldruck (N2) geregelt	3.5 Pa
10	Funkenstrom	200 A je Target
	Substrattemperatur	ca. 500°C
	Prozesszeit	ca. 5 min

Schritt (F2a)

15 Dann wurde als Schicht eine reine Zr-O-Schicht (ohne Y) abgeschieden, für die also keine Zr-Y-Targets benutzt wurden, d.h. es wurden die 4 Zr-Targets weiterhin betrieben und es wurde wie im Beispiel 1 lediglich Sauerstoff mit einem Fluss von 350 sccm zugegeben, also mit folgenden
20 Prozessparametern gearbeitet:

	Sauerstofffluss	350 sccm
	Totaldruck (N2) geregelt	3.5 Pa
	Funkenstrom	je 200 A für die 4 elementaren Zr-Targets
25	Substratbias	-40 V (bipolar)
	Substrattemperatur	ca. 500°C

Prozesszeit 40 min

Der Bruchquerschnitt der so erhaltenen Schicht (Probe 909) ist in den Abbildungen 7a und b dargestellt.

- 5 Nun sollten in weiteren Versuchen Schichtsysteme mit Yttriumstabilisatoren erstellt werden. Für die weiters hergestellten Schichten (910 bis 912) wurden daher die Schritte (E1) und (F1) folgendermassen modifiziert:

Schritt (E2b1)

- 10 Für diesen Schritt werden nur 2 Zr-Targets in der Beschichtungsanlage belassen und betrieben, um die Zwischenschicht herzustellen. Dies erfolgte mit folgenden Parametern:

Totaldruck (N2) geregelt 3.5 Pa

- 15 Funkenstrom 200 A je Target

Substrattemperatur ca. 500°C

Prozesszeit ca. 7 min

Schritt (E2b2)

- 20 In diesem Schritt wird der Übergang zum Zr-O-N hergestellt:

Totaldruck (N2) geregelt 3.5 Pa

Funkenstrom 200 A je Target

Substrattemperatur ca. 500°C

Prozesszeit ca. 3 min

Sauerstofframpe von 50 sccm auf Nominalfluss (200 sccm, 300 sccm oder 350 sccm je nach Probe, siehe Tabelle 2).

5 Schritt (E2b3)

Zuschalten der zwei Zr(85 at%)/Y(15 at%) Targets für 2 min mit einem Funkenstrom von 200 A. Daraufhin unverzügliches Abschalten der elementaren Zr -Targets

10 Schritt (F2)

Abschalten der zwei elementaren Zr-Targets und Durchführung der Beschichtung mit den beiden Zr(85at%)/Y(15at%) Targets für weitere 80 min und dem Nominalsauerstofffluss nach Tabelle 2.

15 Für die mit den Sauerstoffflüssen zwischen 200 sccm und 350 sccm hergestellten Schichten nach Tabelle 2, wurden die Schichtbruchquerschnitte wiederum im SEM analysiert. Die Abbildungen zeigen folgende Proben:

Abbildung 8a und b: Probe 911 (200 sccm O₂)

20 Abbildung 9a und b: Probe 912 (300 sccm O₂)

Abbildung 10a und b: Probe 910 (350 sccm O₂)

In weiteren Experimenten, die als Beispiel 3 bezeichnet werden sollen, wurde untersucht, wie sich eine gut haftende
25 Zwischenschicht zu Schichtsystemen herstellen lässt, die bereits vor der Beschichtung auf das Substrat mit kubischen

oder tetragonalen ZrO_2 -Schichten abgeschieden wurden. Dabei können diese Schichtsysteme sowohl ausserhalb des Beschichtungssystems hergestellt worden sein, beispielsweise in einem anderen Beschichtungsprozess, oder auch vorgängig im gleichen Beschichtungssystem.

Es wurden in diesem Zusammenhang eine Vielzahl Schichten untersucht, die typisch sind für Anwendungen als Metallelektroden, als Thermoschutzschichten, als Verschleisschutzschichten und für Sensoranwendungen.

Beispielhaft sollen hier nur einige genannt werden: Al, Cr, Ti, Ta, Zr, TiN, ZrN, TiCN, TiAlN, die Oxide von Al, Cr, Ti, Ta, Zr, ternäre und quaternäre Oxide.

In diesem Beispiel 3 soll näher aber ohne Einschränkung auf die Zwischenschichtformierung auf einer TiCN-Schicht eingegangen werden mit anschliessender Zr-O-Funktionsschichtabscheidung.

In den Versuchen wurden dieses Mal für die Zr-O-Funktionsschicht zwei Legierungstargets mit der Zusammensetzung von $Zr(92at\%)/Y(8at\%)$ benutzt. Die TiCN-Schicht ist eine dem Fachmann bekannte Schicht auf dem Gebiet der Werkzeug- und Komponentenbeschichtung und es kann deren Herstellung als dem Fachmann bekannt vorausgesetzt werden.

Die Ankopplung an die Zr-Y-O-Schicht erfolgt so, dass kurz vor Schluss der TiCN-Schicht, also in der Phase der Ti-Funkenverdampfung in dem Reaktivgasgemisch aus Stickstoff und Kohlenwasserstoff (beispielsweise C_2H_2) die totaldruckgeregelt verläuft, die beiden $Zr(92at\%)/Y(8at\%)$ -Targets zugeschaltet werden. Nach wenigen Minuten wird dann

das Kohlenwasserstoffgas heruntergerampt und anschliessend die Ti-Targets zur TiCN-Beschichtung abgeschaltet. Schliesslich wird, wieder nach einigen Minuten, Sauerstoff zugegeben und auf den notwendigen Sauerstofffluss gerampt.

- 5 Die auf diese Weise hergestellten Schichten sind in Tabelle 4 beschrieben. Es wurde Schichten hergestellt mit Sauerstoffflüssen zwischen 200 sccm und 400 sccm. Auch von diesen Proben wurden wieder Bruchquerschnitte hergestellt und im SEM untersucht.

10

Die Abbildungen zeigen folgende Proben:

Abbildung 11a und b: Probe 916 (200 sccm O₂)

Abbildung 12a und b: Probe 913 (250 sccm O₂)

Abbildung 13a und b: Probe 914 (350 sccm O₂)

- 15 Abbildung 14a und b: Probe 915 (400 sccm O₂)

- Es sollen nun noch einige weitere Beispiele von Schichten angeführt werden, die auf der Basis der oben erläuterten Beispiele hergestellt wurden, ohne dass allerdings bei
- 20 jeder Schicht auf die detaillierten Prozessparameter eingegangen wird. Die Schichtbeispiele sollen lediglich dokumentieren, dass mit dem Herstellverfahren die Zr-O-Schichten problemlos an andere Schichtmaterialien angekoppelt werden können und die zusätzlich belegen, dass
- 25 sich die Morphologie und Schichtstruktur bzw. deren Phasenzusammensetzung leicht mit dem angegebene Herstellverfahren beeinflussen lässt.

Folgende Abbildungen zeigen von diesen Schichten die Bruchquerschnitte, die im SEM analysiert wurden:

Abbildung 15a und 15b zeigen eine dicke Zr-O-Schicht (Probe 493), die auf einer Chrom-Chromoxid-Zwischenschicht aufgebracht wurde.

Abbildung 16a und 16b zeigen die Mikrostruktur einer Zr-O-Schicht hergestellt mit elementaren Zr-Targets und mit einem hohen Sauerstofffluss von 600 sccm. Als Interface wurde ein dünnes TiCN von ca 500 nm gewählt.

Abbildung 17a und b zeigen den Vergleich von Zr-O-Schichten abgeschieden auf einer dickeren TiCN-Schicht von ca. 3.5 μm , wobei 17a (Probe 767) nach US_20080020138_A1 betrieben wurde, 17b (Probe 769) jedoch gepulst wie es in US_20070000772_A1 beschrieben ist.

Abbildung 18a und b (Probe 995) zeigen eine weitere SEM-Analyse eines Bruches an einer Probe, bei der auf einer dicken CrN-Schicht eine Zr-Y-O-Funktionsschicht mittels Zr(92at%)/Y(8at%)-Targets abgeschieden wurde.

Die mit den oben beschriebenen beispielhaften Verfahren hergestellten Schichten wurden analysiert und sollen nun näher beschrieben werden.

Zuerst werden die Schichten aus Beispiel 1 diskutiert, die in Tabelle 1 beschrieben werden. Zum einen beruht die Auswertung auf XRD-Messungen unter streifendem Strahleinfall von 1° , was bei einer Gesamtschichtdicke der untersuchten Schichten von ca. 5 μm den Einfluss des substratnahen Schichtbereiches und damit des SL nahezu ausschliesst oder stark unterdrückt.

Um die Zusammensetzung der Schicht zu ermitteln wurden andererseits zusätzlich RBS und ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis) Analysen durchgeführt. Auch diese Ergebnisse wurden in Tabelle 1 eingetragen.

- 5 Für die Probe 799 wurde in Abbildung 26a beispielhaft ein RBS-Spektrum dargestellt, das nach der Analyse auf eine Schichtzusammensetzung von $\text{Zr}_1\text{O}_1\text{N}_{0.6}$ hindeutet. Das Verhältnis von Stickstoff und Sauerstoff für diese Probe wurde genauer mittels ERDA ermittelt. Die entsprechende
- 10 Messung ist in Abbildung 26b dargestellt.

- Für die Probe 777 (Abbildung 2) wurden die 4 Zr-Targets in reinem Stickstoff betrieben. Das XRD-Spektrum (Abb. 20) zeigt die Bragg Peaks von ZrN mit kubischer Struktur ($a=4.575 \text{ \AA}$). Die Analyse der Schicht mittels RBS ergab eine
- 15 Zusammensetzung, die durch $\text{Zr}_1\text{N}_{1.1}$ beschrieben werden kann und die auf keine anderen Schichtbestandteile hinweist. Die 10% „Überstöchiometrie“ des Stickstoffs liegen im Fehlerbereich für die leichten Elemente der RBS-Methode. Dieser Fehlerbereich war auch der Grund, dass für eine
- 20 genauere Bestimmung des Sauerstoff-Stickstoff-Verhältnisses (O/N) bzw. (N/O) (Ergebnisse ebenfalls in Tabelle 1) eine ERDA Analyse für O und N an den Proben durchgeführt wurde.

- Mit der Zugabe von Sauerstoff von 50 sccm (Probe 778) und 200 sccm (Probe 779) bleibt im Wesentlichen die kubische
- 25 Struktur nach dem XRD erhalten. Für die Schichtzusammensetzung erhält man ein O/Zr Verhältnis von 0.12 bei 50 sccm (Probe 778), das auf 0.74 bei 200 sccm (Probe 779) steigt, d.h. in beiden Fällen wird Sauerstoff in die Schicht eingebaut zusätzlich zum Stickstoff. Trotz

Beibehaltung der kubischen Struktur kommt es aber für beide Proben zu einer Verbreiterung der Bragg Peaks, die ein Hinweis ist auf die Bildung von kubischem ZrO ($a=4.62$) oder Zr(O,N) oder $\text{ZrO}_2\text{-x}$ oder von Gemischen aus diesen Phasen.

- 5 Bei 200 sccm gibt es Peaks, die auf kleine Anteile orthorombischer Phase des ZrO_2 neben der Existenz der kubischen Phase des ZrO Monoxids hinweisen.

- Ab 250 sccm (Probe 799) kommt es zu einer Formierung der kubischen bzw. tetragonalen Phase, wohl zu einem
10 Phasengemisch, was die (111) und (200) Peaks verdeutlichen, vergrößert dargestellt im XRD-Spektrum in Abb. 21. Diese beiden Phasen lassen sich bei kleineren Kristallitgrößen kaum auf der Basis des XRD-Spektrums trennen.

- Bei 300 sccm erhöht sich die Kristallinität dieser Phase
15 bzw. dieses Phasengemisches, das dann aber bei 400 sccm deutlich in die monokline Phase umschlägt mit Anteilen von kubischen bzw. tetragonalen Phasen. Mit der Erhöhung des Sauerstoffflusses einher geht die Erhöhung des O/Zr Verhältnisses bzw. die Erniedrigung des N/Zr Verhältnisses
20 (Tabelle 1).

- Als ein Ergebnis dieser Messungen kann man zusammenfassend sagen, dass mit dem oben beschriebenen Beschichtungsprozess der reaktiven Funkenverdampfung unter Benutzung von elementaren Zr-Targets ein Übergang vom kubischen ZrN zum
25 Gemisch von kubischem ZrN /kubischen ZrO (Monoxid) und schliesslich zur kubischen bzw. tetragonalen Phase oder des Phasengemisches des kubischen ZrO_2 realisiert werden kann, d.h. dass der Stickstoff oder das kubische ZrN als eine Art

neuer „Stabilisatoren“ wirken, um die kubische bzw. tetragonale Phase des ZrO_2 zu erzielen.

Besonders vorteilhaft ist der Sachverhalt, dass man den gesamten Übergang allein durch die Änderung des Sauerstoffgasflusses bei gleichzeitiger Regelung auf den Totaldruck erreichen kann, also ein sehr einfacher Prozess entwickelt wurde, um ohne die bisher in der Literatur bekannten Stabilisatoren kubisches bzw. tetragonales ZrO_2 herstellen zu können.

10

Als weiteres Ergebnis kann Folgendes festgehalten werden:

Einmal kann man durch das periodische Einlassen geringer Sauerstoffflüsse ein Multilagensystem von $\text{ZrN}/\text{Zr}(\text{O},\text{N})$ aufbauen (analog Probe 777/779), das vollständig kubische Phase aufweist, also immer zwischen kubischen ZrN und kubischen $\text{Zr}(\text{O},\text{N})$ wechselt.

15

Andererseits kann man diese Multilagensysteme auch in dem Bereich des Sauerstoffflusses synthetisieren, wo sich gerade der Übergang zwischen Stickstoffstabilisierung und der Bildung der monoklinen Phase befindet und so eine Multilagenstruktur zwischen kubischer bzw. tetragonaler Phase des ZrO_2 (mit Anteilen von kubischen $\text{Zr}(\text{O},\text{N})$) mit und ohne Stickstoffanteil aufbauen. Bedingung dafür ist allerdings, dass diejenigen Schichten ohne Stickstoff so dünn gehalten werden, dass noch kein Umklappen in die monokline Phase erfolgt. Abbildung 6a (Probe 780) zeigt, obwohl die gesamte Schicht mit einem Sauerstofffluss von 400 sccm hergestellt wurde, einen Morphologiewechsel nach etwa 1.7 μm der FL von einer dichten in eine

20

25

Säulenstruktur. Dieser Wechsel geht einher mit der Phasenänderung der kubischen bzw. tetragonalen Struktur zur monoklinen Struktur. D.h. also, dass man über längere Zeit kubisches bzw. tetragonales Schichtwachstum erzielen kann, ohne Stickstoff in die Schicht einzubauen (Tabelle 1, Probe 780). Oder mit anderen Worten gesagt: die N-Stabilisierung führt dazu, dass die Schicht eine zeitlang noch durch die unterliegende Schicht mit Stickstoffgehalt stabilisiert wird, ohne selbst Stickstoff aufzuweisen.

- 10 Und noch ein weiterer Aspekt dieses Prozessansatz kann für die Anwendung bedeutungsvoll sein: Die Möglichkeit über eine ZrN-Schicht die Zr-O-Schichten an das darunterliegende Substrat oder Schichtsystem gradientenhaft gut anzuschliessen, weil damit eine gute Haftung zu
- 15 metallischen Substraten oder Schichten erreicht werden und ein Schichtwachstum basierend auf nur einem Materialsystem realisiert werden kann.

- Die Abbildungen der Bruchquerschnitte von den SEM Untersuchungen demonstrieren dies. Beispielsweise zeigen
- 20 1b, 4b und 6b den innigen Verbund der ca. 500 nm dicken ZrN-Zwischenschicht (SL) zu der Funktionsschicht (FL), während 18b auf eine deutlich schlechtere Haftung hinweist, da die Rampe in den hohen Sauerstoffgehalt des ZrO₂ nur sehr kurz gehalten wurde.

- 25 Die Analyse an den Schichten aus dem Beispiel 1 zeigt noch ein erstaunliches Ergebnis: Die Schichtmorphologie ändert sich mit dem Sauerstofffluss. Während das ZrN (Abb. 2) sehr kompakt ist, wird die Schicht anfangs mit Sauerstoffzugabe sehr feinkörnig oder amorph (Abb. 3 und 4). Das weitere

Erhöhen des Sauerstoffflusses führt zunehmend zu ausgeprägteren vertikalen Strukturen im Schichtwachstum (Abb. 5 und 1), das schliesslich in Säulenstruktur übergeht (Abb. 6). Diese Resultate erlauben beispielsweise

- 5 Anwendungen, in denen man beispielsweise die härtere kubische Phase mit einer weicheren monoklinen Phase (analog Abb. 6) des ZrO_2 bedeckt, um beispielsweise tribologische Systeme wie Einlaufvorgänge bei Turbinenschaufeln oder bei anderen Komponenten im Bereich der Verbrennungsmotoren mit dem Ziel der Reduzierung des Gegenkörperverschleisses zu
10 optimieren.

- Andererseits wäre es oft auch wünschenswert, dass die Schichtmorphologie geändert werden kann, ohne dass sich dabei die Phasen ändern. Voraussetzung dafür ist es, dass
15 stabile Phasen erzeugt werden, die nicht oder wenigstens in grossen Bereichen unabhängig vom Sauerstofffluss sind.

- Das war eine Motivation für die weiteren Prozessentwicklungen, die nach Beispiel 2 durchgeführt wurden und deren Ergebnisse in Tabelle 2 zusammengefasst
20 sind. Bei der Probe 909 wurde noch einmal mit 4 elementaren Zr-Targets gearbeitet und auf einer Zwischenschicht von wieder ca. 500 nm ZrN eine Zr-O-N-Schicht mit einem Sauerstofffluss von 350 sccm abgeschieden. Das XRD-Spektrum dieser Schicht in Abb. 22 zeigt deutlich die Bragg Peaks
25 der monoklinen Phase des ZrO_2 . Das ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Schichten, die nach dem Beispiel 1 hergestellt wurden und bei denen zwischen einem Sauerstofffluss von 300 sccm und 400 sccm das „Umklappen“ der kubischen bzw. tetragonalen Phase in die monokline

Phase erfolgte. Die Schicht zeigte trotz des Stickstoffhintergrunddrucks (Totaldruckregelung) keinen Stickstoffanteil in der Schicht nach ERDA, d.h. der N-Gehalt ist kleiner 1 at%. Auch das ist etwa konsistent mit
5 den Proben aus Beispiel 1, bei denen bei 400 sccm kein N mehr in der Schicht gefunden wurde. Die Morphologie der Schicht (Abb. 7) ist ebenfalls vergleichbar mit der der Probe 780, zumindest im oberflächennahen Bereich, und zeigt Säulenstruktur.

10 Die weiteren Schichten in Tabelle 2 wurden nun so hergestellt, dass die Zwischenschicht von 2 reinen Zr-Targets synthetisiert wurden, während für die Funktionsschicht (FL) 2 Zr(85 at%)/Y(15at%)-Targets benutzt wurden. Der Sauerstofffluss wurde nun variiert mit dem
15 Ziel, die Schichtmorphologie zu verändern.

Für Probe 911 (200 sccm) sieht man in Abb. 8 eine relativ kompakte Schichtmorphologie. Bei weiterer Erhöhung des Sauerstoffflusses zeigen die Schichten immer deutlicheres Säulenwachstum (Proben 912 und 910 in Abbildungen 9 und
20 10). Die XRD-Spektren der Proben, bei denen die FL mit den Zr/Y-Targets hergestellt wurden, sind in Abb. 23 abgebildet.

Für alle Schichten, unabhängig vom Sauerstofffluss, sieht man die Bragg Peaks der kubischen Struktur des ZrO_2 . Wenige
25 Bragg Peaks mit geringer Intensität stammen vermutlich von der ZrN Zwischenschicht (kubische und hexagonale Phase). Eine detailliertere Analyse der Peaks, die von der kubischen Phase bei $2\theta \approx 30^\circ$ und bei $2\theta \approx 50^\circ$ stammen, ist in Tabelle 3 angefügt. Daraus liest man ab, dass es mit steigendem

Sauerstofffluss zu einer höheren Kristallinität (grössere Kristallite) kommt, da die FWHM kleiner wird (FWHM - Full Width at Half Maximum). Da man in den Spektren auch nirgends die Andeutung eines Peaks bei $2\theta \approx 43^\circ$ erkennen

5 kann und das typisch wäre für die tetragonale Phase des ZrO_2 und welches man bei dieser erhöhten Kristallinität sehen müsste, kann man schliessen, dass im Wesentlichen bei all diesen Proben nur kubische Phasen des ZrO_2 vorliegen und keine tetragonalen. Es sei hier auch erwähnt, dass
10 aufgrund des klassischen Stabilisators auch bei wesentlich höheren Sauerstoffflüssen (z. B bei 1500 sccm Sauerstofffluss) die kubische Phase erhalten bleibt und nicht in die monokline Phase umschlägt.

Damit ergeben sich folgende wichtige Resultate aus den
15 Untersuchungen. Das Einbringen eines klassischen Stabilisators wie er aus den Sinter- und anderen Verfahren her bekannt ist, in das Target, das zur Funkenverdampfung benutzt wird, führt zur Stabilisierung der tetragonalen und kubischen Phase des ZrO_2 . Benutzt man Y als Stabilisator,
20 wird diese kubische Phase bei Y-Targetbestandteilen von mehr als 8 at% deutlich sichtbar im XRD erreicht. Unterhalb dieser Konzentration findet man in der Schicht ein Phasengemisch aus kubischer und tetragonaler Phase (siehe die Untersuchungen weiter unten). Die kubische Phase ändert
25 sich nicht mit einer Erhöhung des Sauerstoffflusses, wie das für die Proben nach Beispiel 1 der Fall war. In den Schichten wird, im Gegensatz zu den Schichten nach Beispiel 1, schon bei 200 sccm Sauerstofffluss kein Stickstoff mehr eingebaut, obwohl auf den Totaldruck von 3.5 Pa geregelt
30 wurde. Unter diesen Bedingungen muss man beispielsweise für

einen Sauerstofffluss von 300 sccm einen Stickstofffluss von etwa 800 sccm annehmen, um den Totaldruck von 3.5 Pa zu erreichen, d.h. man hat wesentlich mehr Stickstoff in der Anlage, baut diesen aber nicht in das ZrO₂ ein.

- 5 In Beispiel 3 wurden nun Zr-Y-O-(N) Schichten hergestellt, die in Tabelle 4 beschrieben sind. Für diese Beispiele wurde eine „materialfremde“ Schicht, nämlich TiCN als Zwischenschicht (SL) gewählt. Der Übergang in die Zr-Y-O-N-Schicht wurde wieder über die Totaldruckregelung gefahren.
- 10 Es wurden aber dieses Mal Zr(92at%)-Y(8at%)-Targets benutzt.

- Die Ergebnisse der XRD-Messungen sind in Abb. 24 dargestellt. Alle Schichten weisen auf eine dominante tetragonale Phase hin, da die Bragg Peaks bei $2\theta = 43^\circ$ und
- 15 das Splitting des Peaks bei etwa $2\theta = 60^\circ$ sichtbar sind, das bei der rein kubischen Phase nicht auftritt. Anteile der kubischen Phase in diesen Schichten können allerdings nicht ausgeschlossen werden. In Tabelle 5 sind die FWHM der Bragg Peaks bei $2\theta = 30^\circ$ und bei $2\theta = 50^\circ$ für die
- 20 verschiedenen Sauerstoffflüsse angegeben. Auch für diese Untersuchungen beobachtet man also eine erhöhte Kristallinität mit steigendem Sauerstofffluss. Auch mit nur 8at% Y in den Targets wurde die Schicht so stabilisiert, dass selbst bei höheren Sauerstoffflüssen keine monokline
- 25 Phase erzeugt wurde, sondern die tetragonale Phase (mit eventuellen kubischen Anteilen) stabil blieb.

Für die Probe 917, deren XRD Spektrum in Abbildung 25 gezeigt ist, und deren Prozessparameter und Analyse teilweise in Tabelle 4 aufgeführt sind wurde eine

ausgeprägte, d.h. dickere kubische Zirkonnitridschicht gefahren. Dies führte zur vorwiegend kubischen Phase von ZrO_2 wie die ausgeprägten Peaks im XRD-Spektrum der Abbildung 25 zeigen. Man beachte, dass das für die tetragonale Phase typische Splitting des Peaks bei 60° nicht vorhanden ist.

Abschliessend sollen noch andere Schichtbeispiele diskutiert werden, die nach den obigen Verfahren hergestellt wurden.

Abbildung 15 zeigt den SEM Bruchquerschnitt einer dicken $\text{Zr}(\text{Y}8\text{at}\%)\text{O}_2$ -Schicht (Probe 493) mit tetragonaler Struktur, aufgebracht auf einer Chrom-Chromoxid-Zwischenschicht. Zur Beschichtung wurden $\text{Zr}(92\text{at}\%)/\text{Y}(8\text{at}\%)$ -Targets benutzt und es wurde mit einem sehr hohen Sauerstofffluss von 1500 sccm beschichtet. In diesem Prozess wurde keine Totaldruckregelung benutzt, sondern bei der Verdampfung von den $\text{Zr}(92\text{at}\%)/\text{Y}(8\text{at}\%)$ -Targets mit konstantem Sauerstofffluss gearbeitet.

Dies illustriert, dass als Zwischenschicht auch ein Oxid benutzt werden kann, hier das Chromoxid, um „verwandte“ Materialien aneinander zu binden. Das kann sinnvoll sein, wo beispielsweise die thermischen Ausdehnungskoeffizienten aneinander angepasst werden müssen, von denen sich viele bei den Oxiden ähnlich sind.

Man sieht aus der Abbildung, dass der hohe Sauerstofffluss die Säulenstruktur in eine noch weniger dichte Morphologie überführt mit hoher Porosität und entsprechend grosser Oberfläche. Eine solche Oberfläche eignet sich besonders

gut für Anwendungen im Sensorbereich, da sie sowohl zur schnelleren Diffusion der zu detektierenden Spezies beiträgt und auch die Empfindlichkeit erhöht. Das XRD Spektrum (nicht abgebildet) zeigt die Bragg peaks der tetragonalen Struktur mit Anteilen der kubischen Phase, und zeigt, dass auch ohne die Totaldruckregelung im Stickstoff die tetragonale bzw. kubische Phase hergestellt werden kann.

Abbildung 16 zeigt die Mikrostruktur einer ZrO₂-Schicht hergestellt von elementaren Zr-Targets und mit einem ebenfalls hohen Sauerstofffluss von 600 sccm. Als interface wurde ein dünnes TiCN von ca 500 nm gewählt. Wieder wurde lediglich auf den Sauerstofffluss geregelt und nicht auf den Totaldruck mit Stickstoffhintergrunddruck. Die Schicht weist die monokline Phase auf. Obwohl sie nicht die bevorzugte tetragonale oder kubische Struktur hat, eignet sie sich zum Schutz von Substraten vor allem in Verbindung als Einlaufschicht bei höheren Temperaturen, um den Gegenkörper nicht zu verschleissen.

Abbildung 17a und b zeigen den Vergleich von ZrO₂-Schichten abgeschieden auf einer dickeren TiCN-Schicht von ca. 3.5 µm, wobei 17a (Probe 767) nach US 20080020138 A1 betrieben wurde, 17b (Probe 769) jedoch gepulst wie es in US 20070000772 A1 beschrieben ist. Es wurden elementare Zr-Targets verwendet. Die Mikrostruktur der Schichten zeigt einen deutlichen Unterschied. Es gibt stärker kristallines Wachstum bei 17b. Für beide Schichten weisen die XRD-Spektren (nicht gezeigt) auf die monokline Phase hin.

Abbildung 18a und b (Probe 995) zeigen eine weitere SEM-Analyse eines Bruches an einer Probe, bei der auf einer dicken CrN-Schicht eine Zr-Y-O-Funktionsschicht mittels Zr(92at%)/Y(8at%)-Targets abgeschieden wurde. Wieder wurde
5 ein Cr-N-Zr-Y-Übergang gewählt und dann bei der Stickstofftotaldruckregelung auf 3.5 Pa, 600 sccm Sauerstoff dazugegeben. Die Morphologie der Schicht ist sehr porös und weist deshalb viel Schichtoberfläche auf. Die tetragonale Phase dominiert im XRD Spektrum, wobei
10 kubische Anteile nicht ausgeschlossen werden können.

Das erfindungsgemäße Verfahren unterscheidet sich besonders deutlich von anderen Methoden der Herstellung von ZrO₂ (kubisch und/oder tetragonal) durch das einfache Ausgangsmaterial und durch die Möglichkeit, über dieses
15 Ausgangsmaterial, die Schichteigenschaften, vor allem die Phasenzusammensetzung der Schicht zu beeinflussen bzw. gezielt herzustellen.

Augenscheinlich ist der Unterschied zum Sinterprozess, bei dem die Materialien in Pulverform vorliegen und unter hohe
20 Temperaturen zusammengefügt werden. Die hohen Temperaturen sind notwendig, um das im Sinterprozess gewünschte Material herzustellen und hängen sehr stark von den Zusätzen an Fremdmaterialien, beispielsweise der Stabilisatorenmaterialien und deren Konzentration ab.
25 Einige Materialien können nicht oder nur in kleinen Mengen hergestellt werden, da sehr hohe Sintertemperaturen notwendig sind. Das schränkt sowohl die Materialvielfalt ein und es begrenzt auch die Wirtschaftlichkeit.

Deutlich ist auch der Unterschied des erfindungsgemässen Verfahrens gegenüber der Elektronenstrahlverdampfung, die sowohl mit den Änderungen in der Zusammensetzung der Schmelze bzw. dem zu sublimierenden oxidhaltigen Material im Tiegel konfrontiert ist, wie auch mit der aufwendigen
5 Regelung des Reaktivgases Sauerstoff.

Ähnlich verhält es sich beim Sputterverfahren, das zwar weniger problematisch als die Elektronenstrahlverdampfung ist, was die Verdampfung von Legierungen betrifft, aber
10 eine komplizierte Regelung des Reaktivgases Sauerstoff erfordert, um eine Targetvergiftung zu vermeiden.
Verfahren, die Funkenverdampfung mit Sputtern kombinieren und elementare Targets benutzen, lösen dieses Problem ebenfalls unbefriedigend. Sie können nicht im reinen
15 Sauerstoffreaktivgas betrieben werden, da dann einerseits das Sputtertarget als auch andererseits das Funkentarget vergiftet und die Anode der Funkenentladung sich mit einer Oxidschicht bedeckt und die Entladung unterbricht. Zwar wird diese Problematik in der Publikation nicht
20 angesprochen, aber es geht aus der Prozessführung hervor, dass man nicht in reiner Sauerstoffatmosphäre arbeitet, sondern nur Sauerstoff dem Argonarbeitgas zusetzt.

Erfindungsgemäss werden, im Unterschied zu dem in der Literatur beschriebenen kombinierten Verfahren,
25 Mischtargets für die Herstellung der Zr-Y-O₂-Schichten benutzt. Diese Targets können in bekannter Technologie, beispielsweise pulvermetallurgisch im HIP Verfahren, hergestellt werden. Mit diesem Verfahren ist es möglich, Materialien sehr unterschiedlicher Schmelzpunkte

miteinander zu verdichten, ohne dass es ein Verschmelzen wie beim Sintern braucht. Die Materialien liegen nach dem Verfahren noch als getrennte Materialien im Target vor.

Ein Vorteil des erfindungsgemässen Verfahrens gemäss einer ausfühungsform ist es, dass diese getrennt vorliegenden Materialien während des Betriebs im Sauerstoff- bzw. im Stickstoff-Sauerstoffgemisch unter der Wirkung des auf dem Target sich bewegenden Funkens miteinander legieren. Da die Temperaturen im Funkenfusspunkt einige 1000°C hoch sein

können, lassen sich somit sowohl hochschmelzende Materialien wie Zr mit verschiedenen Konzentrationen von Stabilisatoren, beispielsweise mit Y zwischen 1at% und 25at% auf der Targetoberfläche unmittelbar vor dem Übergang in die Dampfphase einschmelzen.

Diesen Prozess im Argongas durchzuführen würde zu einer Vielzahl von Spritzern führen. Im Sauerstoff oder Stickstoff-Sauerstoffgemisch als Reaktivgas kann man aber diese vom Schmelzpunkt her unterschiedlichen Materialien gut miteinander verbinden. Der Legierungsvorgang an der Targetoberfläche verschafft eine grosse Freiheit in der Wahl des Ausgangsmaterials für die Targetherstellung, da Pulver mit mittleren Korngrössen zwischen 1 µm oder kleiner und 100 µm und grösser verwendet werden können. Mithin ergibt sich eine Variante der erfindungsgemässen Verfahren darin, dass kein Arbeitsgas, wie Argon, eingesetzt wird.

Das Pulsen der Funkenquellen nach US 20070000772 A1 beschleunigt diesen Legierungsvorgang oder Konditionierungsvorgang an der Targetoberfläche. Die Korngrössen des Targets finden sich nicht in der

abgeschiedenen Schicht wieder, da es erst zur Konditionierung auf der Targetoberfläche kommt und dann erst die Verdampfung stattfindet.

Wie oben diskutiert, lässt sich die Kristallitgrösse über
5 solche einfach zugängliche Prozessparameter wie Sauerstofffluss, Substrattemperatur und durch die Wahl von Zwischenschichten steuern.

Die für das erfindungsgemässe Verfahren zu verwendenden Targets kann man auch durch Plasmaspritzen herstellen,
10 indem man metallorganische Gase als Precursor zur Abscheidung der metallischen Schichtkomponenten auf einer Targetunterlage benutzt. Vorteil dieses Target-Herstellungsverfahrens ist es, dass man über die Konzentration der Precursor nur jeweils eine Legierung
15 abgeschieden wird. Nachteilig dabei ist die höhere Porosität der plasmagespritzten Targets gegenüber denen im HIP Verfahren hergestellten, die aber prinzipiell im erfindungsgemässen Verfahren unter reiner Sauerstoffatmosphäre beherrscht wird.

20 Zusammenfassen kann man sagen, dass im Gegensatz zum bisherigen Stand der Technologie, legierte Funkentargets unübertroffene Reproduzierbarkeit im Ausgangsmaterial liefern und die Kombination des Betriebs der Targets unter Sauerstoffatmosphäre unter der Randbedingung von quasi
25 freier Wählbarkeit des Stickstoff-Sauerstoff-Reaktivgasgemisches sowohl die Anpassung der Schichtmorphologie erlaubt als auch die Vorgabe der Schichtphasen.

Im Folgenden sollen nochmals die wichtigsten Vorteile der vorliegenden Erfindung aufgelistet werden, geordnet nach Verfahren und Schichten

5 Verfahren

Das Verfahren der reaktiven Funkenverdampfung von elementaren Zr oder/und Mischtargets aus Zr gegebenenfalls unter Zugabe von anderen Materialien wie beispielsweise Stabilisatoren St, beispielsweise Y, eignet sich für eine
10 einfache und kostengünstige Synthese von kubischen bzw. tetragonalen ZrO_2 bzw. Zr-St-Oxid.

Das Verfahren erlaubt die Verwendung von Targets mit einem Konzentrationsverhältnis entsprechend der gewünschten Schichtzusammensetzung. Solche Targets können
15 beispielsweise durch heiss-isostatisches Pressen (HIP) oder Plasmaspritzen kostengünstig hergestellt werden. Beim Plasmaspritzen kann bereits die gewünschte metallische Legierung zum Target abgeschieden werden, also beispielsweise im Verhältnis Zr96/Y4 Zr92/Y8, Zr90/Y10,
20 Zr85/Y15.

Das Verfahren erlaubt die Kombination mit der Synthese unterschiedlicher Schichtmaterialien im gleichen Beschichtungssystem und im gleichen Prozessschritt.

Das Verfahren erlaubt gradierte Übergänge zwischen
25 verschiedenen Materialien zum Zwecke der verbesserten Haftung untereinander, der Anpassung der Schichteigenschaften und der gezielten Anpassung der

Schichteigenschaften wie Morphologie, Kristallitgrösse, Kristallstruktur oder Phasenzusammensetzung.

Die Benutzung einer Funkenanode, die durch Temperaturwechselzyklen (Ein- und Ausschalten) in

- 5 Verbindung mit den dadurch hervorgerufenen mechanischen Verformungen, die zum Abplatzen der oxidischen Schichten führen, leitend gehalten wird, trägt mit Vorteil zur Stabilisierung der Funkenverdampfung in Sauerstoffatmosphäre bei.

- 10 Bei Totaldruckregelung auf den Stickstoff können durch die Einstellung der Sauerstoffflüsse die verschiedenen Phasen des ZrO_2 synthetisiert werden. Der Stickstoff scheint in gewissem Sinne eine Stabilisierung der tetragonalen oder kubischen Phase zu ermöglichen.

- 15 Die Zugabe von Stabilisatoren in das Target in einer bestimmten Konzentration, führt im Wesentlichen zu einer synthetisierten Schicht mit gleicher Konzentration, d.h. es ist kein Regelaufwand notwendig wie es bei dem Verdampfen der Materialien von getrennten elementaren Targets der Fall
20 ist. Die Konzentration der Stabilisatoren determiniert im Wesentlichen die Phasen der synthetisierten Schicht bzw. deren Phasenzusammensetzung.

- Falls klassische Stabilisatoren verwendet werden, lassen sich unter Beibehaltung der Phase bzw. des Phasengemisches
25 die Kristallitgrösse und Morphologie der Schicht über den Sauerstofffluss und die Substrattemperatur steuern, d.h. dass die Phasen über einen weiten Bereich unabhängig vom Sauerstofffluss sind.

Die Kombination in der Verwendung von elementaren Zr-Targets und Legierungstargets, die zusätzlich zum Zr feste Stabilisatoren enthalten, ermöglicht auch gradierte Übergänge zwischen Zr-O-Schichten und Zr-Y-O-Schichten, bei denen der Y-Gehalt der Schicht zwischen 0 und dem Y-Gehalt des Legierungstargets variiert werden kann bzw. natürlich auch in umgekehrter Richtung. Beispiel ist die Synthese einer kubischen ZrO₂-Schicht, die Stabilisatoren enthält, und bei der dann ein gradierter Übergang zum Zirkonoxid ohne Stabilisatoren stattfindet, d.h. ab einer gewissen Dicke ohne Stabilisatoren wird die harte kubische Struktur mit der aus der weichen monoklinen Struktur verbunden, die dann beispielsweise als Einlaufschicht dienen kann.

Das Verfahren erlaubt den Einbau von stabilisierenden Materialien über die Gasphase, beispielsweise das ausführlich diskutierte Beispiel des Stickstoffs. Der Einbau von diesen Materialien lässt sich aber auch erweitern, indem zusätzliche Reaktivgase (zu Stickstoff und/oder Sauerstoff) eingelassen werden, die sich dann gleichermassen in die Schicht einbauen. Beispiele dafür sind: Kohlenwasserstoffe, Silane, Wasserstoff, Borane, Cyanoverbindungen. Die Zugabe von solchen weiteren Gasen kann auch zu reinem Sauerstoffreaktivgas erfolgen, falls keine Totaldruckregelung des Stickstoffhintergrunds erfolgt.

Die Möglichkeit, mit diesem Verfahren gradierte Übergänge zwischen verschiedenen Schichtmaterialien herzustellen, ist von besonderer Bedeutung bei der Anpassung der Schichtmaterialien bezüglich der thermischen

Ausdehnungskoeffizienten (gradierte Übergänge zwischen Metallen, Metallnitriden, Metallcarbonitride, Metalloxide). Diese Gradierungsmöglichkeit erlaubt es, das bisher ungelöste Problem der guten Schichthaftung auf metallischen Unterlagen zu lösen.

Die Möglichkeit der Gradierung erlaubt weiterhin auch noch das Anpassen der thermischen Leitfähigkeiten der Schichten. Messungen haben für eine kubisch stabilisierte Zr-Y-O-Schicht thermische Leitfähigkeiten von 1.8 bis 2.5 W/(mK) (morphologieabhängig) ergeben. Diese thermische Leitfähigkeit ist kleiner als die von anderen Oxidschichten, beispielsweise vom Al-Cr-O (3.2....), die ebenfalls mit reaktiver Funkenverdampfung hergestellt wurden. Das erlaubt die Anpassung von Wärmeübergängen in Schichtsystemen.

Die erfindungsgemässen Einflussmöglichkeiten auf die Schichtmorphologie und die Phasenzusammensetzung erlaubt auch die Einstellung von mechanischen Eigenschaften wie Schichthärte und -zähigkeit.

Die Verwendung von Legierungstargets führt im Gegensatz zum Stand der Technik im Wesentlichen zu keiner Entmischung der Targetkomponenten in der Schicht, d.h. die Targetzusammensetzung findet sich im Wesentlichen auch in der Schicht wieder, und liefert Kristallitgrößen in der Schicht, die unabhängig von der Kristallitgrösse im Targetmaterial sind.

Das Verfahren reduziert beträchtlich das Spritzen des Targetmaterials wie es bei anderen Verfahren auftritt dadurch, dass es das Pulver im Ausgangsmaterial (Target)

weitgehend zu intermetallischen Verbindungen an der Targetoberfläche umwandelt.

Das Verfahren vereinfacht und ermöglicht die Einbringung praktisch aller Stabilisatoren und Dotierungen, die zu
5 einer Erhöhung der Ionenleitfähigkeit beitragen, beispielsweise der Stabilisatoren die in US_05709786 offenbart werden. Dies kann auf einfache Art und praktisch ohne Materialeinschränkung geschehen.

Die Kristallitgrösse der Schicht ist unabhängig von der
10 verwendeten Korngrösse des im Target verwendeten Pulvers einstellbar.

Das Vakuumverfahren in Verbindung mit der Verwendung der aus reinen Pulvern hergestellten Targets reduzieren Verunreinigungen der Schicht durch andere Stoffe auf unter
15 1at%.

Der Legierungsvorgang auf dem Target verläuft gewöhnlich rasch und beeinträchtigt die Zwischenschichtqualität i.a. nicht. Er kann aber auch, falls notwendig, von der Schichtabscheidung auf den Substraten durch die Benutzung
20 von Blenden vor dem Target getrennt werden.

Vorteile der erfindungsgemässen Zirkoniumoxidschichten (im folgenden Schichten genannt):

Die Schichten können kubische oder teragonale Phasen
25 aufweisen, obwohl sie keine Anteile an „klassischen Stabilisatoren“, z.B. Y, in der Schicht haben.

Die kubische bzw. tetragonale Phase der Schicht kann auf einer kubischen Unterlagsschicht aufgewachsen werden. Von besonderem Vorteil ist das Wachstum auf Unterlagsschichten kubischer Phase welche im Wesentlichen Zr als metallischen Bestandteil enthalten, z.B. kubisches ZrN, kubisches ZrO
5 oder kubisches bzw. tetragonales ZrO₂.

Die Schichten verschiedener Phase oder Phasenzusammensetzung können einen gradierten Übergang zur Unterlagsschicht aufweisen, der sich in einem N-O-
10 Gradienten widerspiegelt und dessen Tiefenprofil innerhalb der Schicht beispielsweise mittels SIMS nachgewiesen werden kann.

Die Phase der Schicht oder deren Phasenzusammensetzung bleibt im Substrattemperaturbereich zwischen 200°C und
15 700°C im Wesentlichen erhalten. Es ändert sich lediglich die Kristallitgrösse, d.h. bei tiefer Temperatur wird die Schicht feinkristallin bzw. amorph und erhält grössere Kristallite bei höherer Substrattemperatur. Auf diese Art lassen sich Schichten sowohl mit Kristallgrössen im
20 Nanometerbereich herstellen, aber auch Kristallitgrössen bis 100 nm und darüber.

Die synthetisierten ZrO₂-Schichten sind unterstöchiometrisch bezüglich des Sauerstoffs, nachweisbar durch eine RBS-Analyse. Es sei hier angemerkt, dass bei
25 dieser RBS-Analyse auch berücksichtigt wird, dass die Elemente Zr und Y im Spektrum ohne weiteres nicht trennbar sind, dass dies aber bei der Abschätzung berücksichtigt wurde, ebenso wie die unterschiedliche Wertigkeit von Zr (ZrO₂) und Y(Y₂O₃) bei der Oxidbildung, so dass selbst bei

Berücksichtigung dieser Effekte noch Unterstöchiometrie des Sauerstoffs bzgl. Zr vorliegt.

Die Schichten weisen die für das Funkenverdampfen typischen metallische Spritzer auf, die aus dem vorwiegend aus dem
5 hochschmelzenden Zr bestehen und nicht durchoxidiert sind.

Mit den oben beschriebenen Eigenschaften eignen sich die mit dem erfindungsgemässen Verfahren hergestellten Schichten sehr gut für unterschiedlichste Anwendungen.

Gemäss vorliegender Erfindung werden solche mittels
10 Funkenverdampfen hergestellten Schichten vorzugsweise als Festelektrolyten in Brennstoffzellen verwendet.

Aufgrund der guten ionenleitenden Eigenschaften sind die Schichten sehr gut in Sensoren einsetzbar.

Wie oben diskutiert bilden die erfindungsgemäss
15 hergestellten Schichten sehr gute Thermobarriereschichten und können so zum Schutz von Werkzeugen und Komponenten wie zum Beispiel Turbinenschaufeln und Turbolader eingesetzt werden. Ausserdem sind die erfindungsgemässen Zirkonoxidschichten mit Vorteil als Hochtemperatur-
20 Vererschweisschutzschicht für Werkzeuge und insbesondere für Schneidwerkzeuge wie z.B. Wendeschneidplatten und Bohrer einsetzbar.

Umfasst das Schichtsystem eine Zirkonoxidschicht in monokliner Phase, so lässt es sich als reibungsmindernde
25 Schicht in Hochtemperaturanwendungen einsetzen.

Im Rahmen der vorliegenden Anmeldung wurde ein Verfahren zur Herstellung von Zirkonoxidschichten vorgestellt mit dem, wenn die Zirkonoxidschichten als Festelektrolytschicht

eingesetzt werden, diese Festelektrolytschicht mit anderen Unterlagen und/oder Schichten mittels gradierte Übergänge problemlos verbunden werden können.

Mit dem vorgestellten Verfahren sind gezielte Änderungen
5 der Schichtmorphologie ohne Phasenänderungen in einfacher Weise möglich.

Andererseits kann im Rahmen des erfindungsgemässen Verfahrens durch einfache Änderung des Sauerstoffflusses die Phase der Schicht, beispielsweise von kubisch zu
10 monoklin geändert werden.

Es wurde gezeigt, dass im Rahmen des erfindungsgemässen Verfahrens zumindest teilweise, häufig sogar vollständig auf den Einsatz klassischer Stabilisatoren verzichtet werden kann, indem Stickstoff ins System eingebaut wird.
15 Insbesondere lässt sich beim Einsatz von Stickstoff die kubische ZrO_2 Phase ohne klassischen Stabilisator stabilisieren.

Es wurde gezeigt, dass mittels des erfindungsgemässen Verfahrens insbesondere wenn ein klassischer Stabilisator
20 verwendet wird die Kristallitgrösse durch Änderung des Sauerstoffflusses und/oder der Substrattemperatur gezielt geändert werden kann.

Im Rahmen des vorgestellten erfinderischen Verfahrens ist es möglich klassische Stabilisatoren die selbst einen hohen
25 Schmelzpunkt besitzen in die Schicht bei wesentlich geringeren Substrattemperaturen einzubauen.

Es wurde gezeigt, dass im Rahmen des erfinderischen Verfahrens Multilagenstrukturen mit Bilayern im

Nanometerbereich erzeugt werden können. Beispiele solcher Bilayer sind ZrN/ZrOx Übergänge, ZrO/ZrO₂ Übergänge, ZrO₂(trigonal oder cubisch)/ZrO₂(monoklin) Übergänge.

Es wurde gezeigt, dass die für das Verfahren notwendigen Ausgangsmaterialien einfach herzustellen und einfach in der Handhabung sind.

Ausserdem wurde gezeigt, dass mit dem erfindungsgemässen Verfahren Schichten im Wesentlichen ohne unerwünschte Bestandteile realisiert werden können.

Es wurde ausserdem gezeigt, dass im Rahmen des erfindungsgemässen Verfahrens mit Sauerstoffpartialdrücken gearbeitet werden kann, die grösser als 0.1 Pa sind.

Abschliessend sei noch auf die Möglichkeit hingewiesen, mit Hilfe des Verfahrens nicht nur kubische

Zirkonoxidschichten, sondern auch solche Pulver herzustellen. Hierzu kann beispielsweise der Totaldruck in der Funkenverdampfungsanlage so hoch gewählt werden, dass aufgrund der stark reduzierten mittleren freien Weglänge ein Grossteil des Materials nicht auf einem zu beschichtenden Substrat landet, sondern als Pulver in der Kammer bleibt.

Eine andere Möglichkeit wäre es, die Substrate vor der Beschichtung mit einer leicht zu entfernenden Opferschicht zu belegen, so dass diese, zusammen mit der nachgängig aufgetragenen Zirkonoxidschicht entfernt werden kann. Als Opferschicht eignet sich beispielsweise eine dünne Graphitschicht, die einfach aufgesprüht werden kann.

9. Tabellen

Tabelle 1:

Pro be	Schichtsy stem	Sauerstoff fluss [sccm]	Targe ts	Kristallph asen im FL	Zusammenset zung des FL $Zr_xO_yN_z$
777	ZrN	0	SL: 4xZr	ZrN (cubic F)	$x = 0$ $y = 1.1$
778	SL: ZrN FL: Zr-O- N	50	SL: 4xZr FL: 4xZr	ZrN (cubic F) bzw. ZrO (cubic F)	$x = 0.12$ $y = 1.12$ (N/O = 9.3)
779	SL: ZrN FL: Zr-O- N	200	SL: 4xZr FL: 4xZr	ZrN (cubic F) bzw. ZrO (cubic F)	$x = 0.74$ $y = 1.26$ (N/O = 1.7)
799	SL: ZrN FL: Zr-O- N	250	SL: 4xZr FL: 4xZr	ZrO ₂ /Zr-O- N (cubic F)	$x = 1$ $y = 0.61$ (N/O = 0.6)

793	SL: ZrN FL: Zr-O-N	300	SL: 4xZr FL: 4xZr	ZrO ₂ /Zr-O-N (cubic F)	x = 1.19 y = 0.52 (N/O = 0.4)
780	SL: ZrN FL: Zr-O-N	400	SL: 4xZr FL: 4xZr	ZrO ₂ (monoklin) Zr-O-N (cubic)	x = 2.05 y = 0 (N/O = 0)

Legende:

FL ... Funktionsschicht

SL ... Zwischenschicht, Unterlagsschicht

Tabelle 2:

Prob e	Schicht- system	Sauerst off- fluss [sccm]	Targets	Kristallph asen im FL	Zusammen- setzung des FL Zr_1O_x
909	SL: ZrN FL: Zr-O- (N)	350	SL: 4xZr	Zr-O (monoklin)	$x = 1.9$
911	SL: ZrN FL: Zr-Y- O-(N)	200	SL: 2xZr FL: 2xZr(85at%)/Y(15at%)	Zr-Y-O (cubic)	$x = 1.85$
912	SL: ZrN FL: Zr-Y- O-(N)	300	SL: 2xZr FL: 2xZr(85at%)/Y(15at%)	Zr-Y-O (cubic)	$x = 1.80$
910	SL: ZrN FL: Zr-O- (N)	350	SL: 2xZr FL: 2xZr(85at%)/Y(15at%)	Zr-Y-O (cubic)	$x = 1.80$

Tabelle 3:

Prob e	Schicht- system	Sauerst off- fluss [sccm]	FWHM ($2\theta = 30^\circ$)	FWHM ($2\theta = 50^\circ$)	Abschätzun g der Kristallit grösse [nm]
909	SL: ZrN FL: Zr-O- (N)	350	0.34	0.37	60
911	SL: ZrN FL: Zr-Y- O- (N)	200	0.42	0.60	32
912	SL: ZrN FL: Zr-Y- O- (N)	300	0.40	0.49	40
910	SL: ZrN FL: Zr-O- (N)	350	0.36	0.44	50

Tabelle 4:

Pro be	Schichts ystem	Sauerstoff fluss [sccm]	Targets	Kristall phasen im FL	Zusammenset zung des FL $Zr_1O_xN_y$
916	SL: TiCN FL: Zr- Y-O-(N)	200	SL: 4xTi FL: 2xZr(92at%)/ Y(8at%)	ZrO ₂ (tetrago nal, evntuell auch kubische Phase)	$x = 1.1$ $y = 0.4$ (N/O = 0.39)
913	SL: TiCN FL: Zr- Y-O-(N)	250	SL: 4xTi FL: 2xZr(92at%)/ Y(8at%)	ZrO ₂ (tetrago nal, evntuell auch kubische Phase)	$x = 1.80$ $y = 0.07$ (N/O = 0.04)
914	SL: TiCN FL: Zr- Y-O-(N)	350	SL: 4xTi FL: 2xZr(92at%)/ Y(8at%)	ZrO ₂ (tetrago nal, evntuell auch	$x = 1.95$ $y = 0$ (N/O = 0)

				kubische Phase)	
915	SL: TiCN FL: Zr-Y-O-(N)	400	SL: 4xTi FL: 2xZr(92at%)/Y(8at%)	ZrO ₂ (tetragonal, evntuell auch kubische Phase)	$x = 1.80$ $y = 0$ (N/O = 0)
917	SL: ZrN FL: Zr-Y-O-(N) mit ausgeprägtem ZrN-Übergang	250	SL: 4xTi FL: 2xZr(92at%)/Y(8at%)	ZrO ₂ (vorwiegend kubische Phase, eventuel 1 Anteile tetragonaler Phase)	$x = 1.80$ $y = 0.1$ (N/O = 0.06)

Tabelle 5:

Prob e	Schicht- system	Sauerst off- fluss [sccm]	FWHM ($2\theta = 30^\circ$)	FWHM ($2\theta = 50^\circ$)	Abschätzun g der Kristallit grösse [nm]
916	SL: TiCN FL: Zr-Y- O-(N)	200	2.09	2.30	5
913	SL: TiCN FL: Zr-Y- O-(N)	250	0.90	1.09	11
914	SL: TiCN FL: Zr-Y- O-(N)	350	0.44	0.63	30
915	SL: TiCN FL: Zr-Y- O-(N)	400	0.46	0.70	25
917	SL: ZrN FL: Zr-Y- O-(N)	250	1.03	1.21	10

	mit ausgepräg tem ZrN- Übergang				
--	---	--	--	--	--

Patentansprüche

- 1) Verfahren zur Herstellung einer Zirkonoxid-basierten Schicht auf einem Ablege-Substrat, unter Einsatz
5 reaktiven Funkenverdampfens, mit gepulstem Funkenstrom und/oder mit Anlegen eines zum Funkentarget senkrechten Magnetfeldes, dadurch gekennzeichnet, dass ein elementares Zirkon und mindestens einen Stabilisator umfassendes Mischtarget eingesetzt wird.
10
- 2) Verfahren nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, dass die Schicht in kubischer und/oder tetragonalen Kristallstruktur hergestellt wird.
- 15 3) Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 dadurch gekennzeichnet, dass der Sauerstoffpartialdruck über 0.1Pa gewählt wird, vorzugsweise mindestens zu 10Pa.
- 4) Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3 dadurch
20 gekennzeichnet, dass Konzentrationsverhältnis von Zirkonoxid und Stabilisator an der Schicht mindestens im Wesentlichen durch das Konzentrationsverhältnis von elementarem Zirkonium und Stabilisator am Mischtarget vorgegeben wird.
25
- 5) Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4 dadurch gekennzeichnet, dass durch Wahl der Konzentration des

Stabilisators im Mischtarget die kubische und/oder tetragonale Kristallstruktur erreicht wird.

- 5 6) Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 dadurch gekennzeichnet, dass der Sauerstoffpartialdruck, als bezüglich des Erreichens kubischer und/oder tetragonaler Kristallstruktur mindestens im Wesentlichen freier Stellparameter, für die Vorgabe der Schichtmorphologie eingesetzt wird.
- 10 7) Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das Reaktivgas nebst Sauerstoff, Stickstoff umfasst.
- 15 8) Verfahren zur Herstellung einer Zirkonoxid-basierten Schicht auf einem Ablege-Substrat, unter Einsatz reaktiven Funkenverdampfens mit gepulstem Funkenstrom und/oder mit Anlegen eines zum Funkentarget senkrechten Magnetfeldes, dadurch gekennzeichnet, dass ein
- 20 Zirkoniumtarget aus elementarem Zirkonium eingesetzt wird und, nebst Sauerstoff, Stickstoff als Reaktivgas eingesetzt wird.
- 25 9) Verfahren nach Anspruch 8 dadurch gekennzeichnet, dass die Schicht in kubischer und/oder tetragonaler Kristallstruktur hergestellt wird.

- 10) Verfahren nach einem der Ansprüche 8 oder 9 dadurch gekennzeichnet, dass durch Einstellung der Druckverhältnisse beim Funkenverdampfen eine Schicht erzeugt wird, die Zirkon, Sauerstoff und Stickstoff enthält, mit kubischer und/oder tetragonaler Kristallstruktur.
- 11) Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10 dadurch gekennzeichnet, dass der Sauerstoffanteil über eine Gasflussregelung, der Stickstoffanteil mittels Totaldruckregelung gestellt werden.
- 12) Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11 dadurch gekennzeichnet, dass die Zirkonoxid- basierte Schicht als reine ZrO_2 Schicht in kubischer Kristallstruktur, auf einer kubisch auskristallisierten, Zirkon, Stickstoff und Sauerstoff enthaltenden Schicht abgelegt wird.
- 13) Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12 für die Herstellung der Schicht als Schicht in einem Schichtpaket.
- 14) Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13 dadurch gekennzeichnet, dass die Schicht durch Variation des Sauerstoff/Stickstoff -Gehaltes, als Mehrfachlagenschicht hergestellt wird.

15) Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14 dadurch gekennzeichnet, dass das Ablegen der Schicht bei einer Substrattemperatur zwischen 200°C und 700°C erfolgt.

5

16) Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15 dadurch gekennzeichnet, dass die Formierung der kubischen oder tetragonalen Phase entfernt vom thermischen Gleichgewichtszustand vorgenommen wird.

10

17) Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16 dadurch gekennzeichnet, dass Oxyde anderer Metalle als von Zirkonium in das Schichtmaterial eingebaut werden.

15

18) Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei das Ablegesubstrat eine metallische Oberfläche hat, dadurch gekennzeichnet, dass eine Stützschrift auf der metallischen Oberfläche abgelegt wird, dann die Schicht auf die Stützschrift, wobei die Stützschrift vorzugsweise aus einem Metall ausser Zr, einem Nitrid oder einem Oxid besteht, vorzugsweise aus ZrN.

20

19) Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18 dadurch gekennzeichnet, dass kein Arbeitgas, wie Argon, eingesetzt wird.

25

20) Verwendung des Verfahrens nach Anspruch 12 für die Herstellung einer Schicht, die in die monokline Phase umschlagen kann, vorzugsweise für reibungsminderndes Einlaufen.

5

21) Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 19 für die Herstellung einer Festelektrolytschicht in einer Brennstoffzelle.

10 22) Verwendung des Verfahrens nach Anspruch 21, bei der mindestens eines folgender Merkmale gilt:

- der Stabilisator wird frei gewählt;
- es werden Schichtzusammensetzung,
15 Phasenzusammensetzung und Schichtmorphologie
mindestens weitgehend unabhängig voneinander mittels
Regelung von Parametern des Verdampfungsprozesses
eingestellt;
- es lässt sich die Schichtmorphologie von glasähnlich
20 bis kolumnar einstellen;
- es wird die Festelektrolytschicht ohne Stabilisator
hergestellt.
- die Schicht wird mit einem Gradienten der
Schichtmaterialzusammensetzung in Richtung ihrer
25 Dickenausdehnung hergestellt, vorzugsweise ist der
Gradient von Zr zu ZrN, zu ZrO zu ZrO₂, mit freier
Wählbarkeit von Morphologie und Phase.

23) Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 7 , 13 bis 19 für die Herstellung der Schicht als Wachstumsunterlage für ein YSZ.

5

24) Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 19 zur Erhöhung des Ionentransportes entlang der Korngrenzen wobei die Kristallitgrösse der Schicht vorzugsweise im Nanometerbereich eingestellt wird.

10

25) Anode für eine Funkenverdampfungsquelle, insbesondere zur Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 19, insbesondere in dessen Verwendungen nach einem der Ansprüche 20 bis 24, umfassend:

15

- Einen Anodenkörper mit einer Anodenfläche,
- Entlang der Anodenfläche eine Heizwendel, die vom Anodenkörper elektrisch isoliert ist,
- Vom Anodenkörper elektrisch isolierte Anschlüsse für die Heizwendel.

20

26) Anode nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, dass der Anodenkörper aus Blechmaterial geformt ist.

25

27) Verfahren zum Betrieb einer Funkenverdampfungsanlage mit einer Anode nach Anspruch 25 oder 26, dadurch gekennzeichnet, dass man die Anodenfläche, zur

mindestens teilweisen Reinigung von einer
Störbeschichtung, einem mittels
Aktivierung/Desaktivierung der Heizwendel bewirkten
Temperaturwechsel aussetzt, derart sich die
5 Anodenfläche verformt und die Störbeschichtung
abplatzt.

28) Verfahren nach Anspruch 27 dadurch gekennzeichnet, dass
mit der Heizwendel auch ein durch Funkenverdampfen zu
10 beschichtendes Substrat beheizt wird.

Abbildung 1a

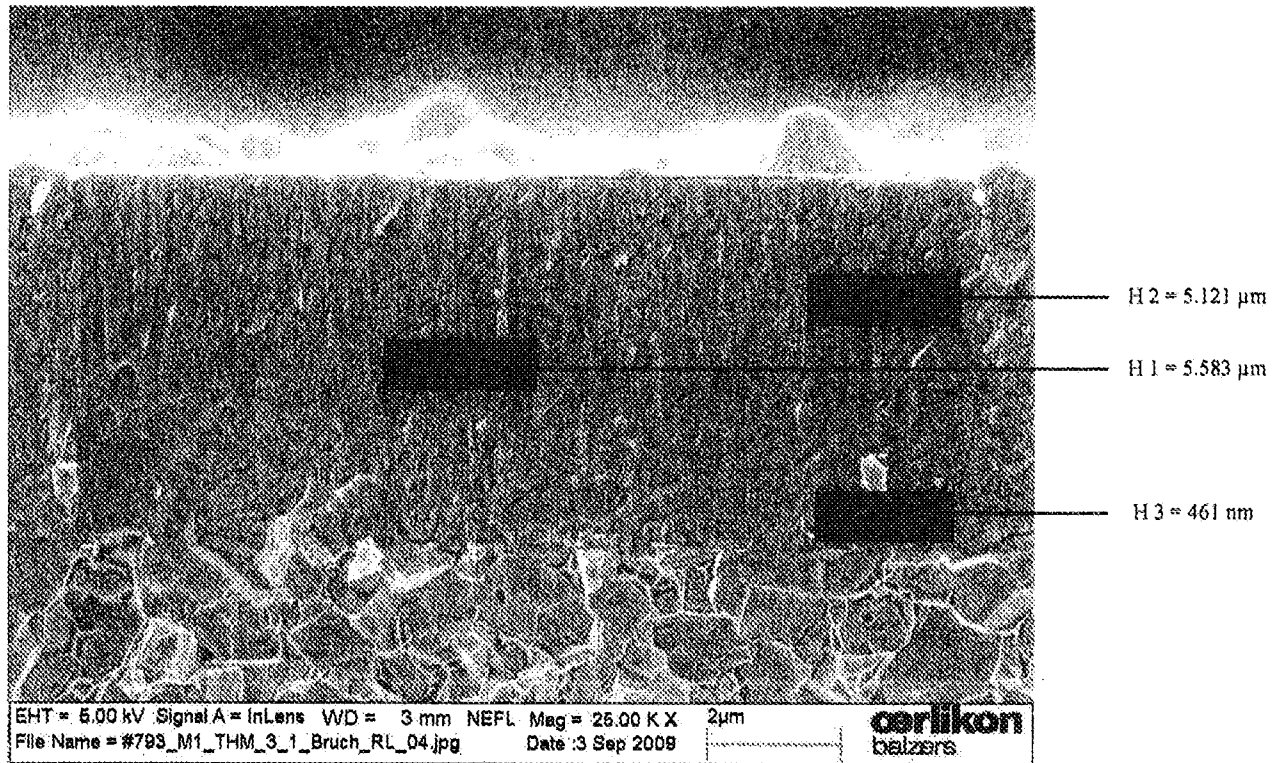


Abbildung 1b

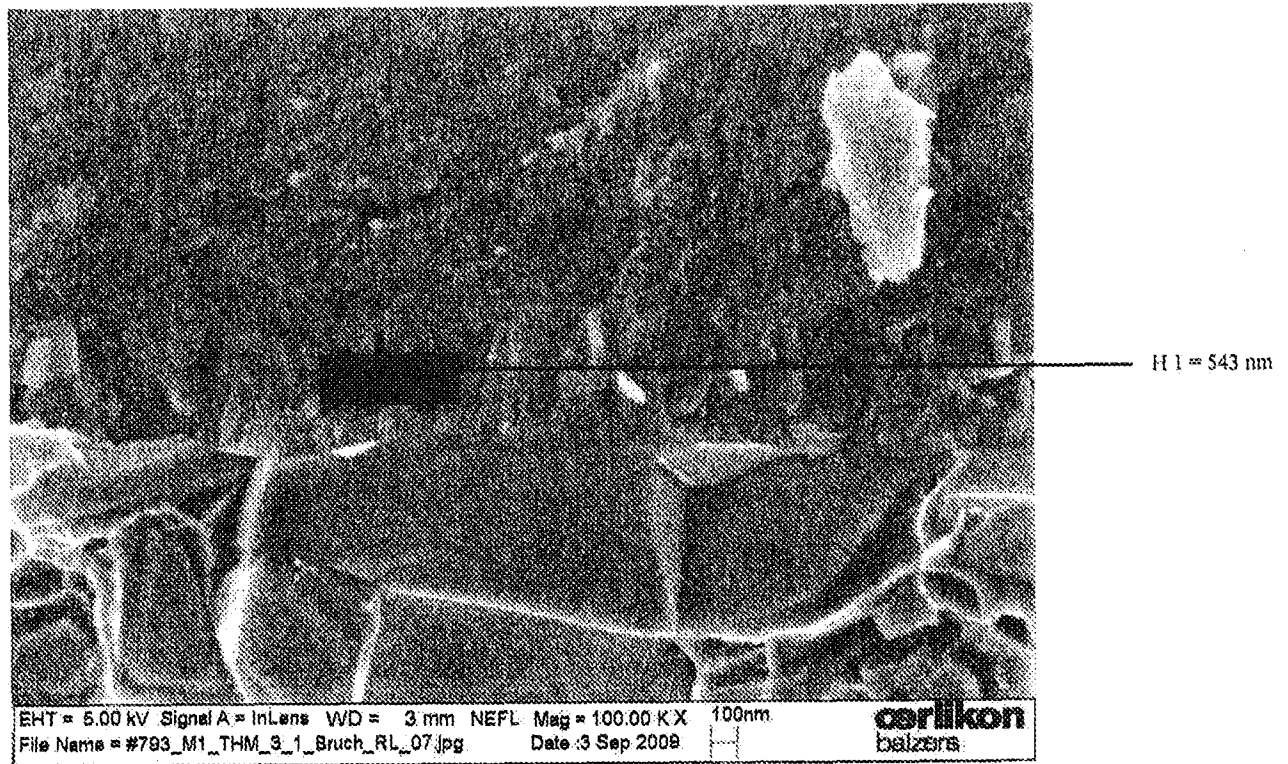


Abbildung 2

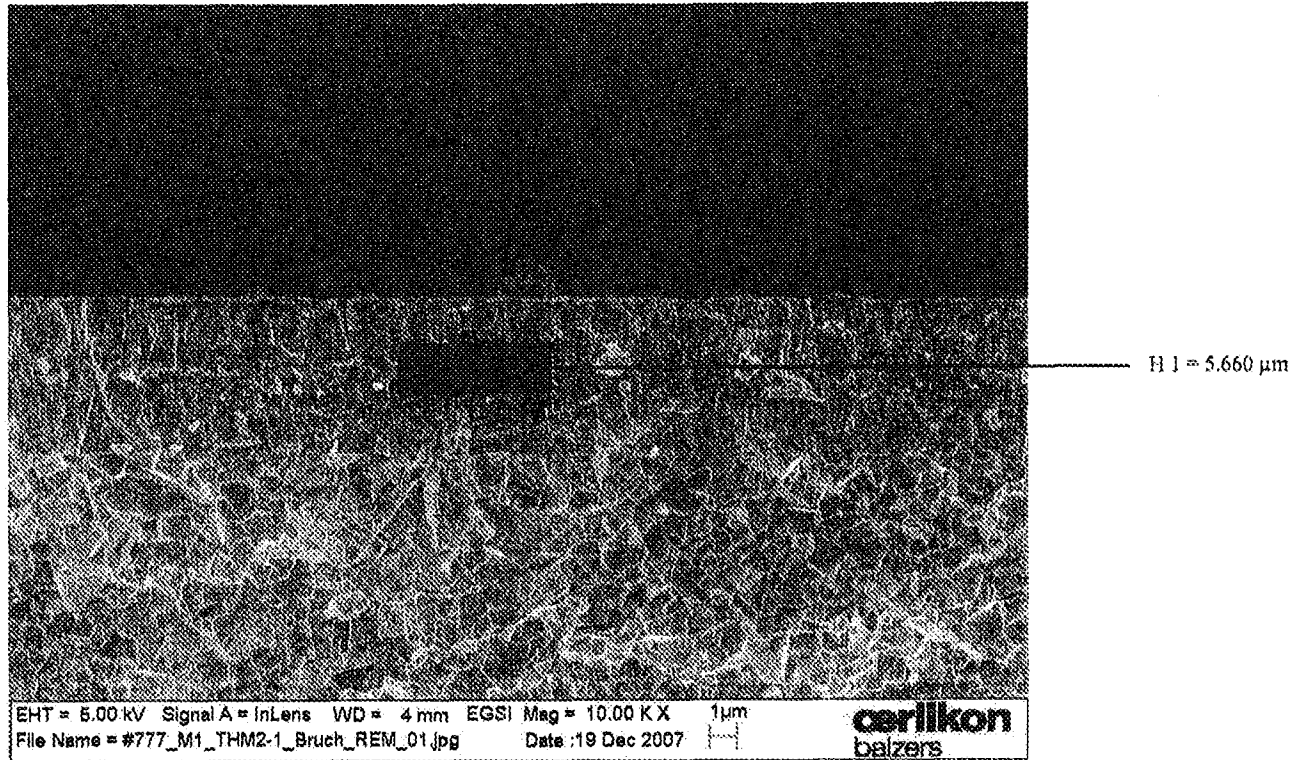


Abbildung 3

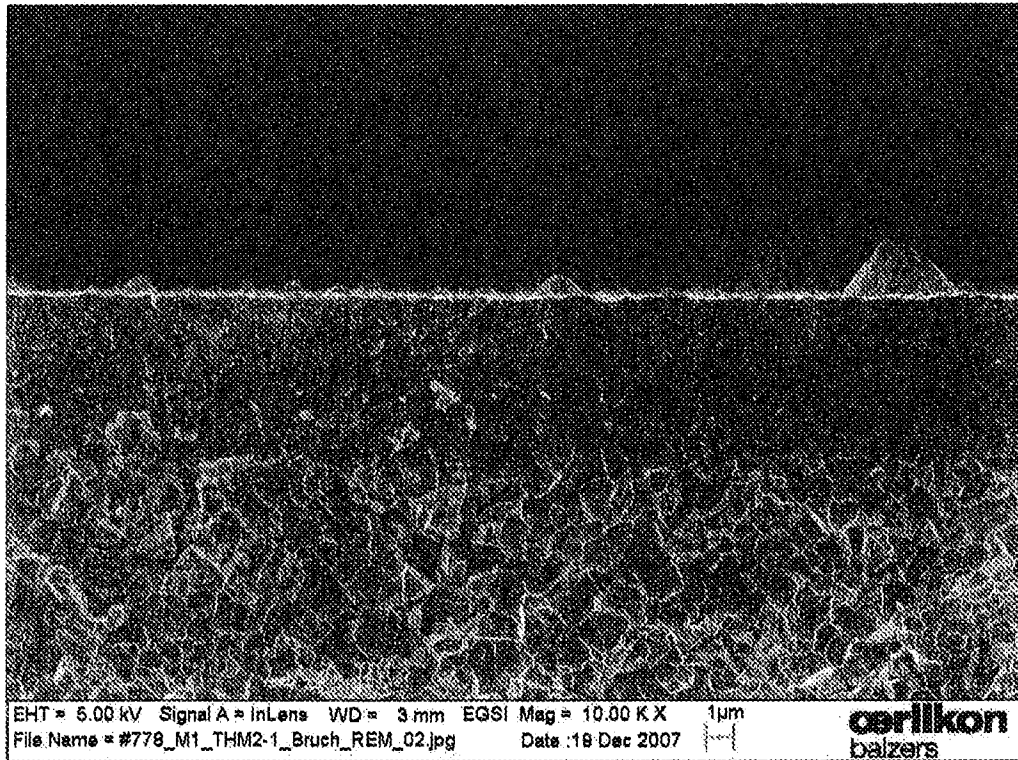


Abbildung 4a

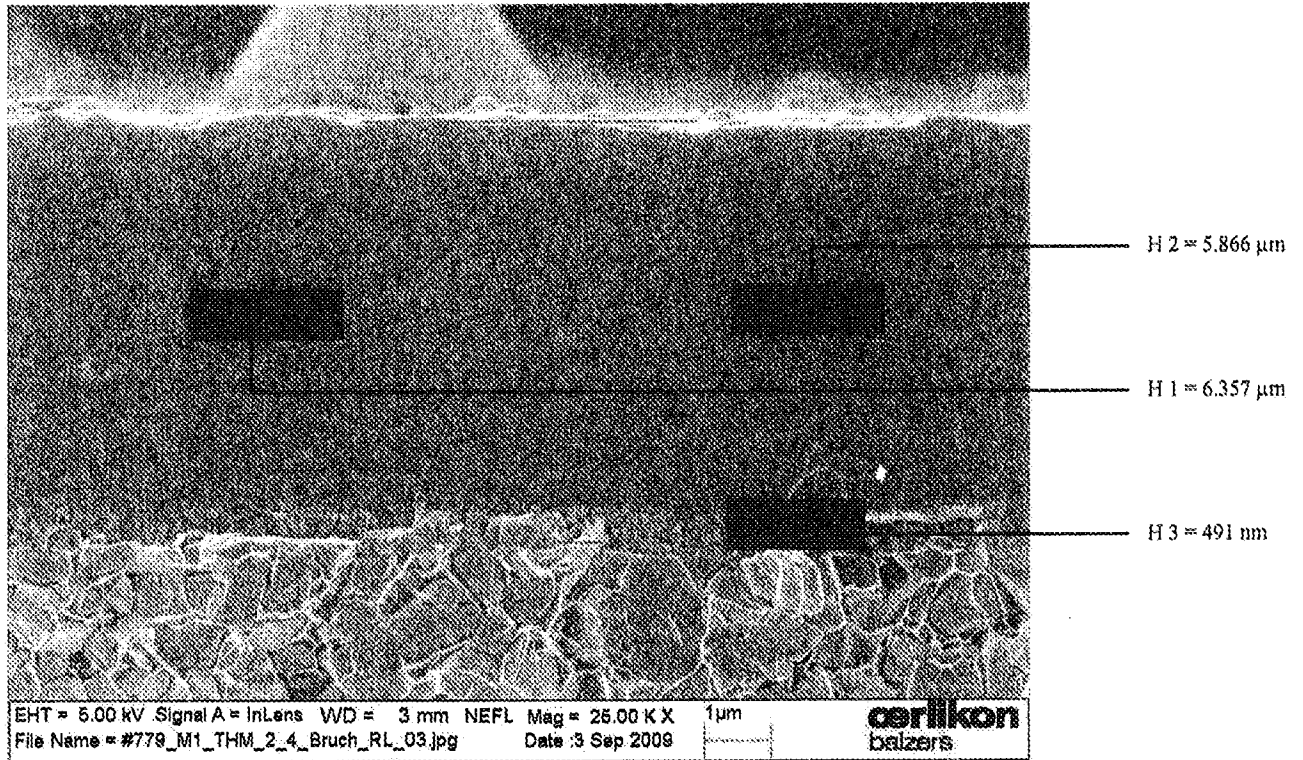


Abbildung 4b



Abbildung 5a

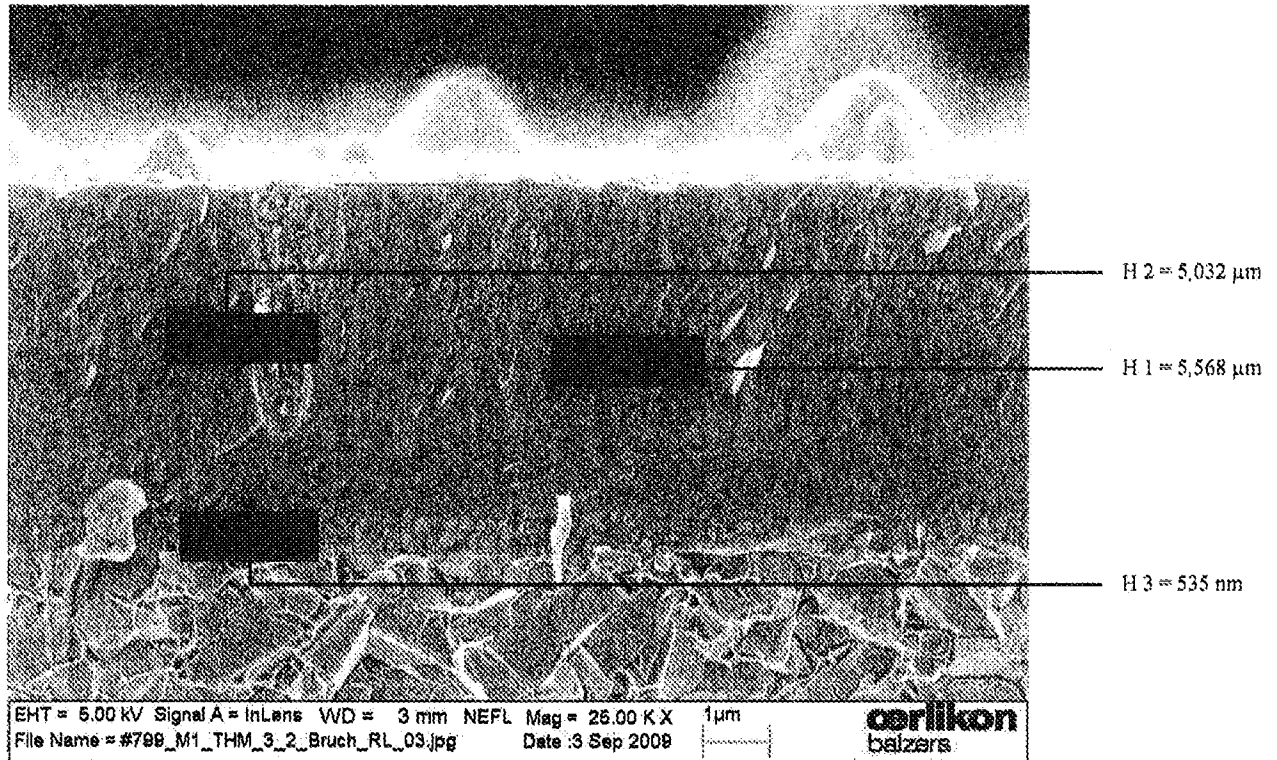


Abbildung 5b



Abbildung 6a

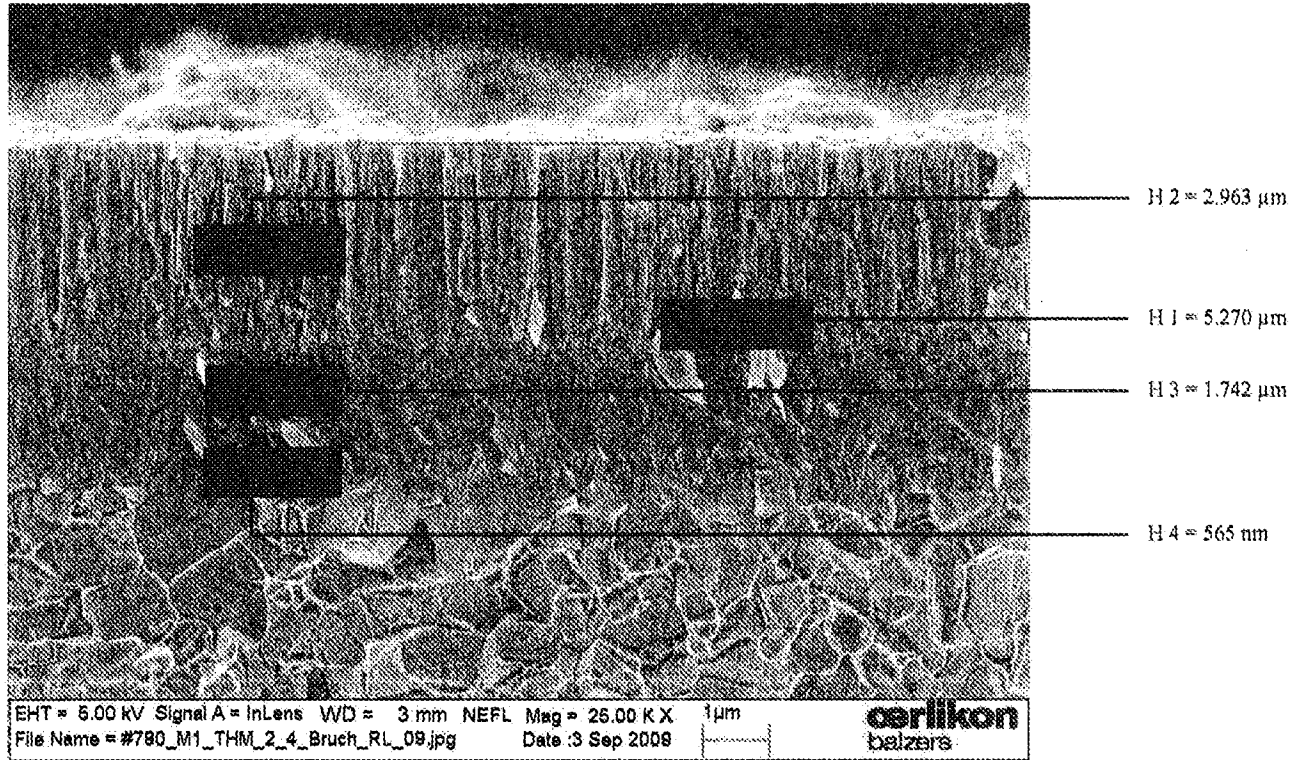


Abbildung 6b

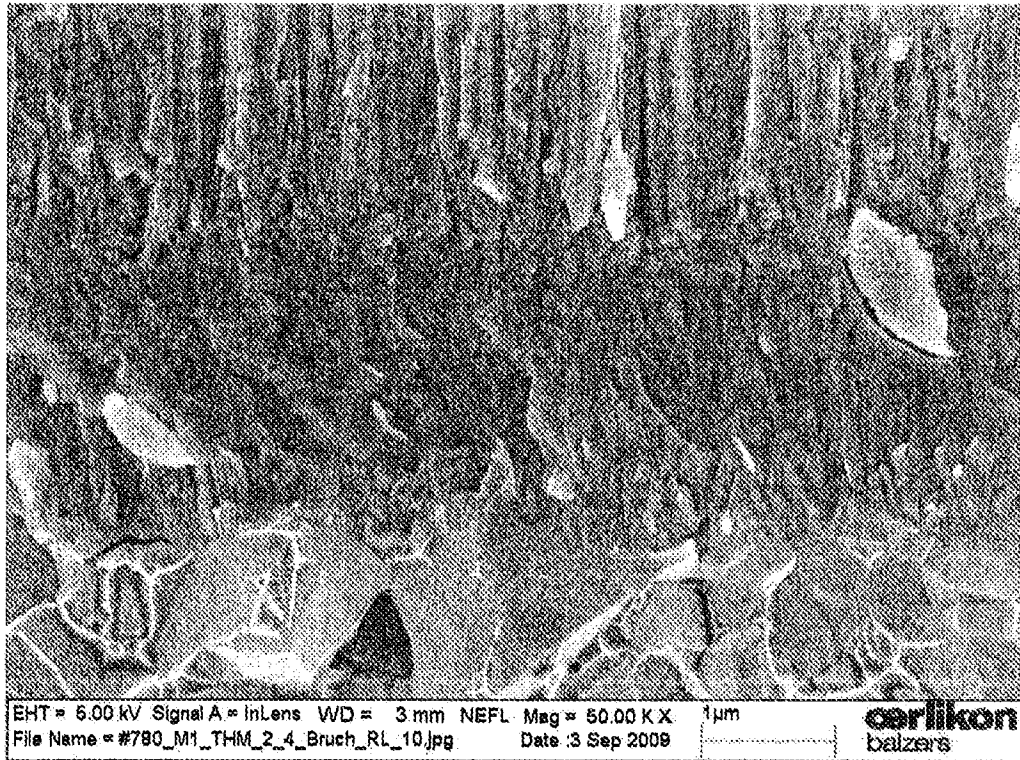


Abbildung 7a

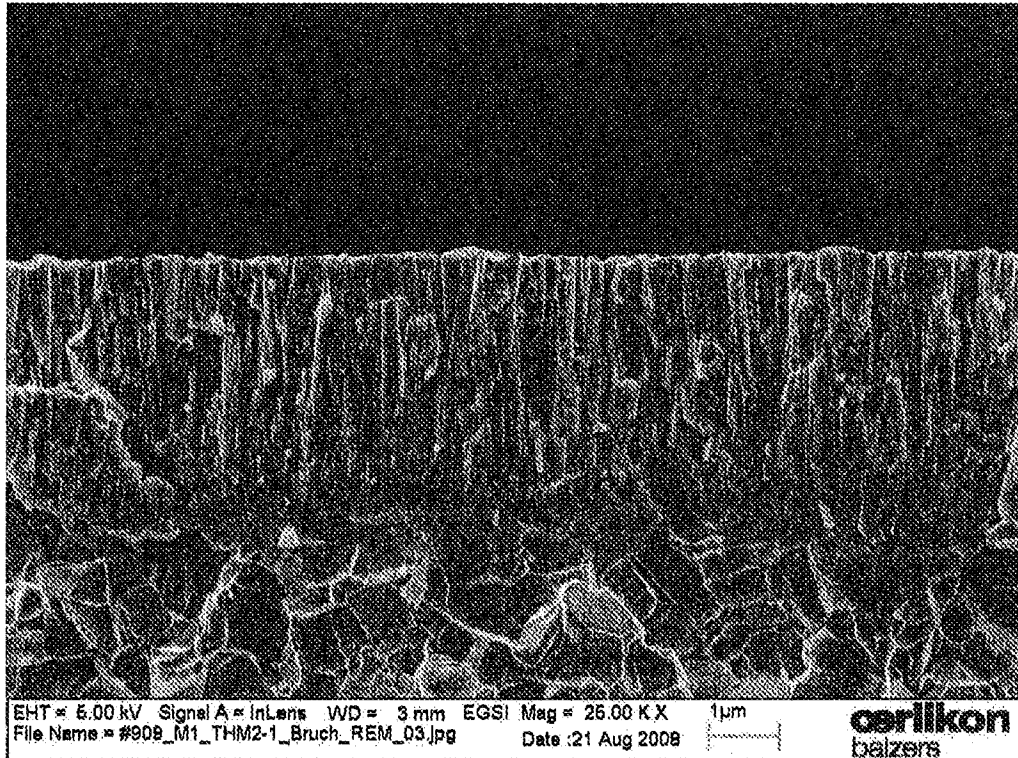


Abbildung 7b

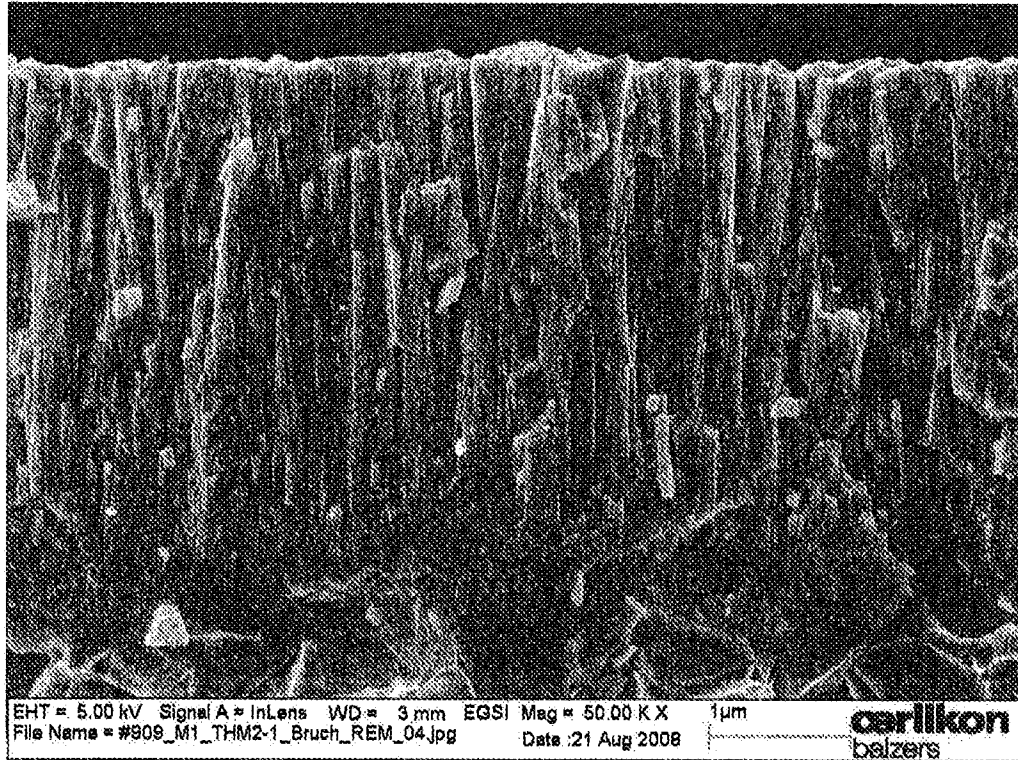


Abbildung 8a

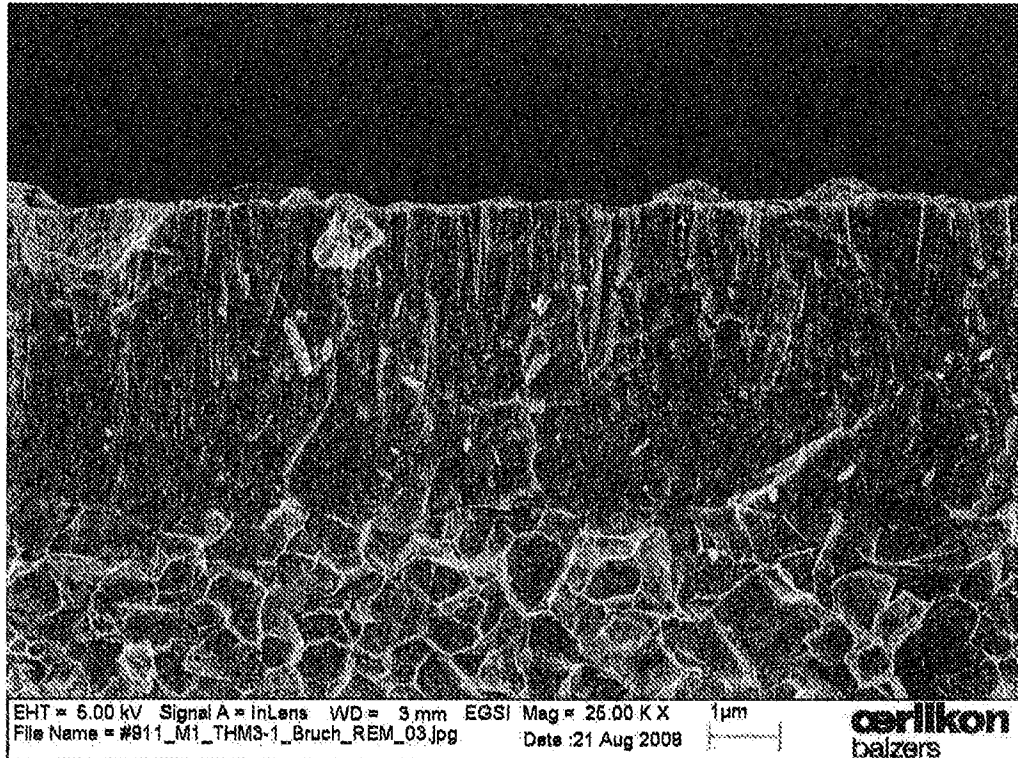


Abbildung 8b

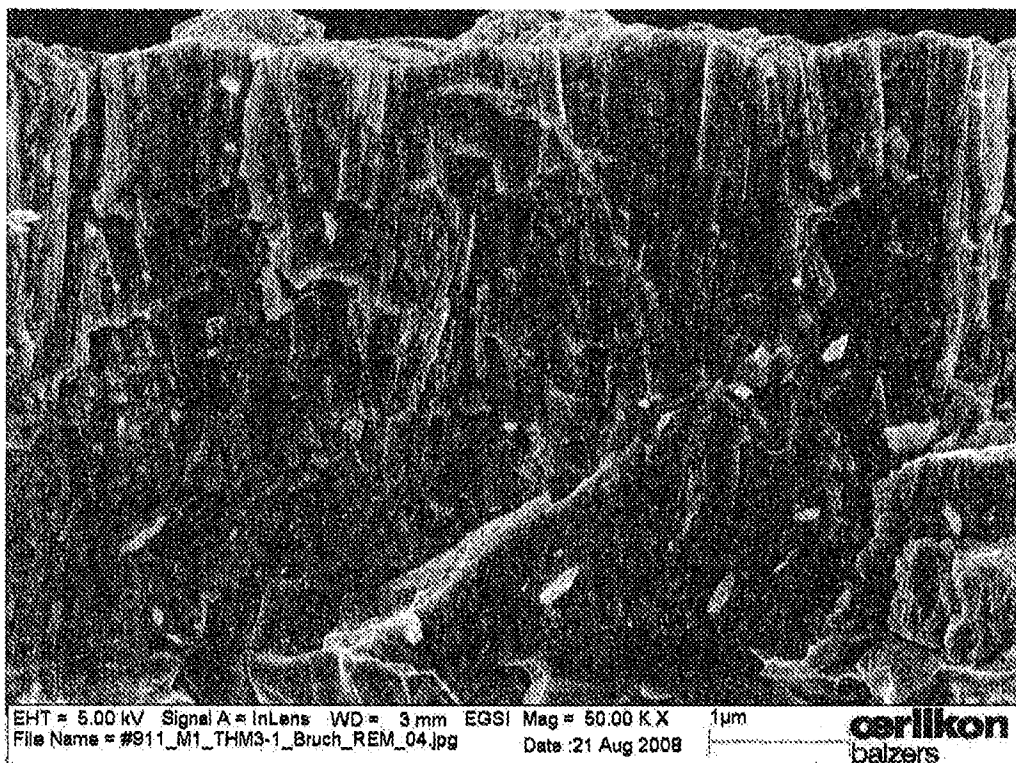


Abbildung 9a

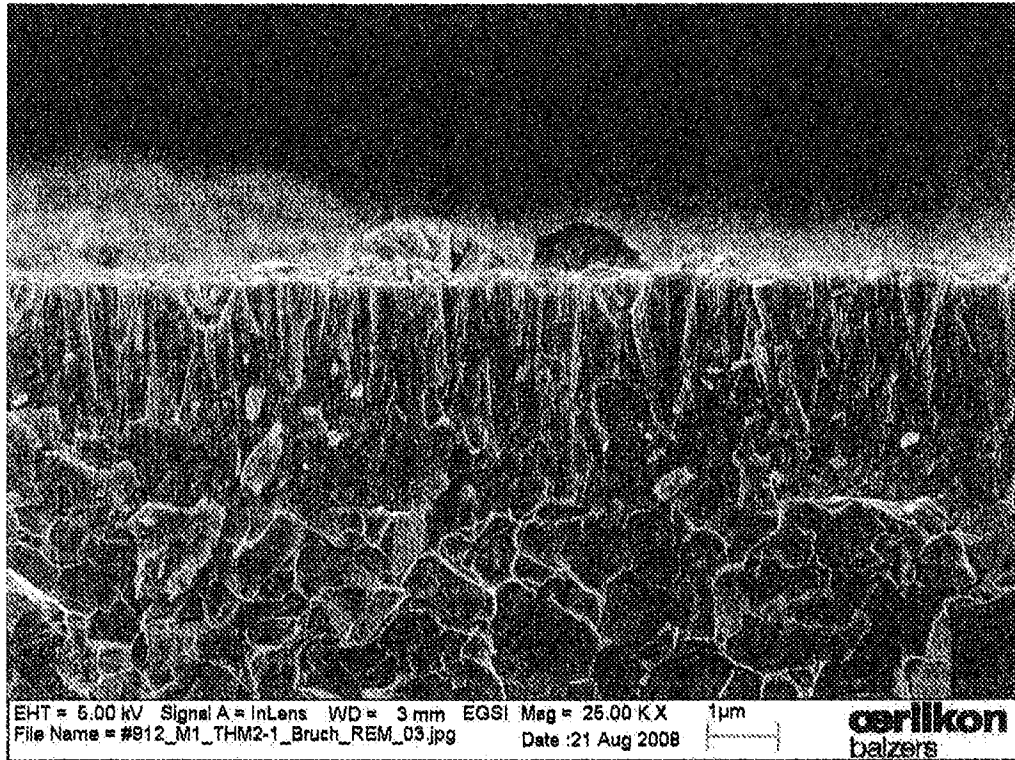


Abbildung 9b

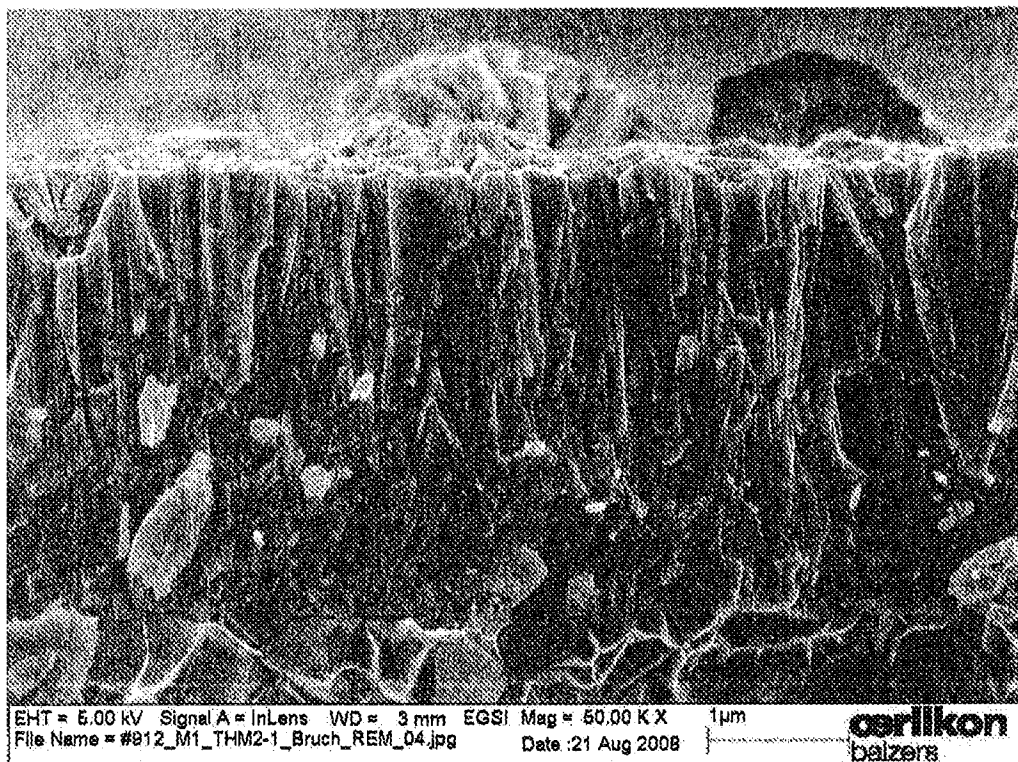


Abbildung 10a

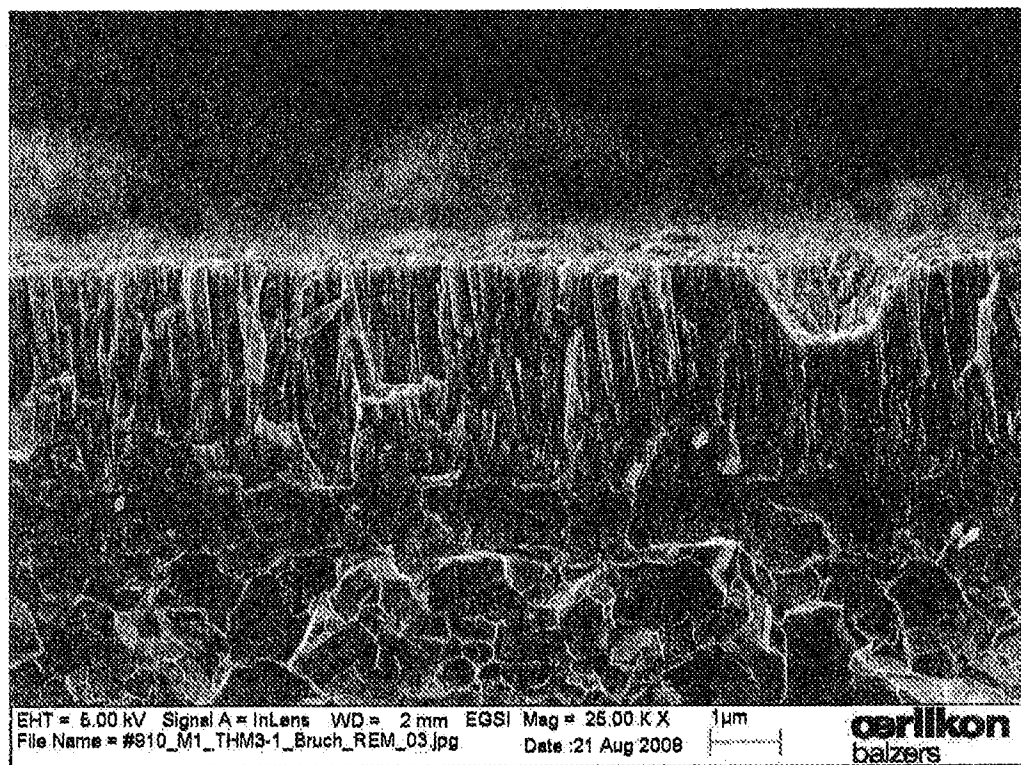


Abbildung 10b

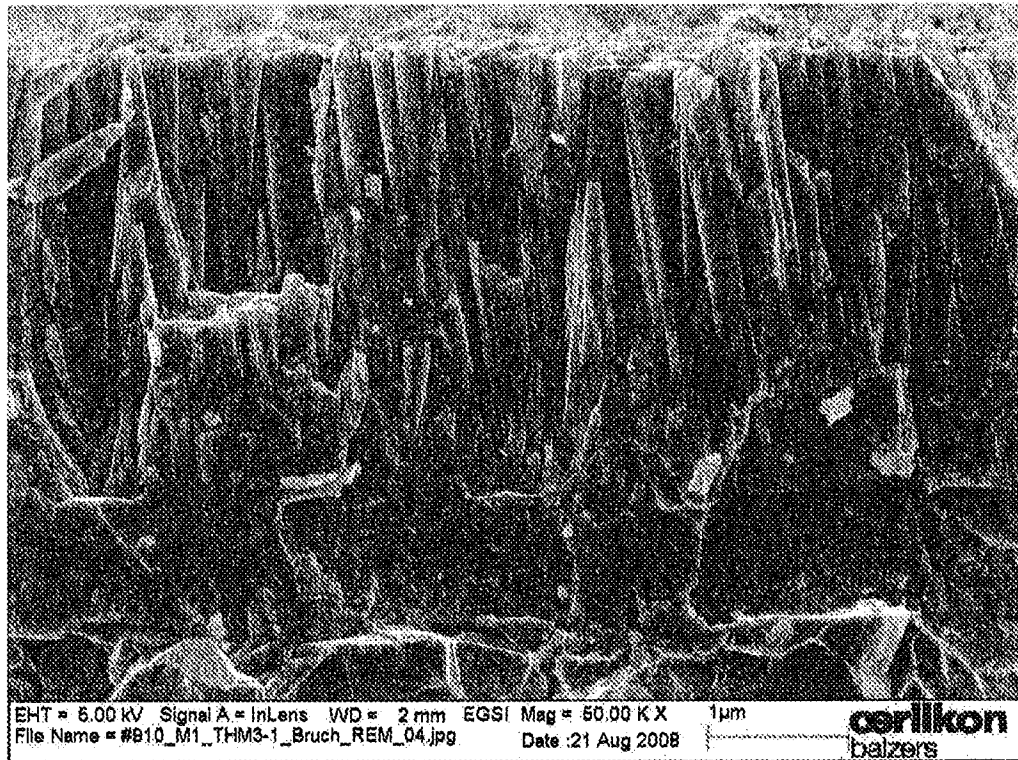


Abbildung 11a

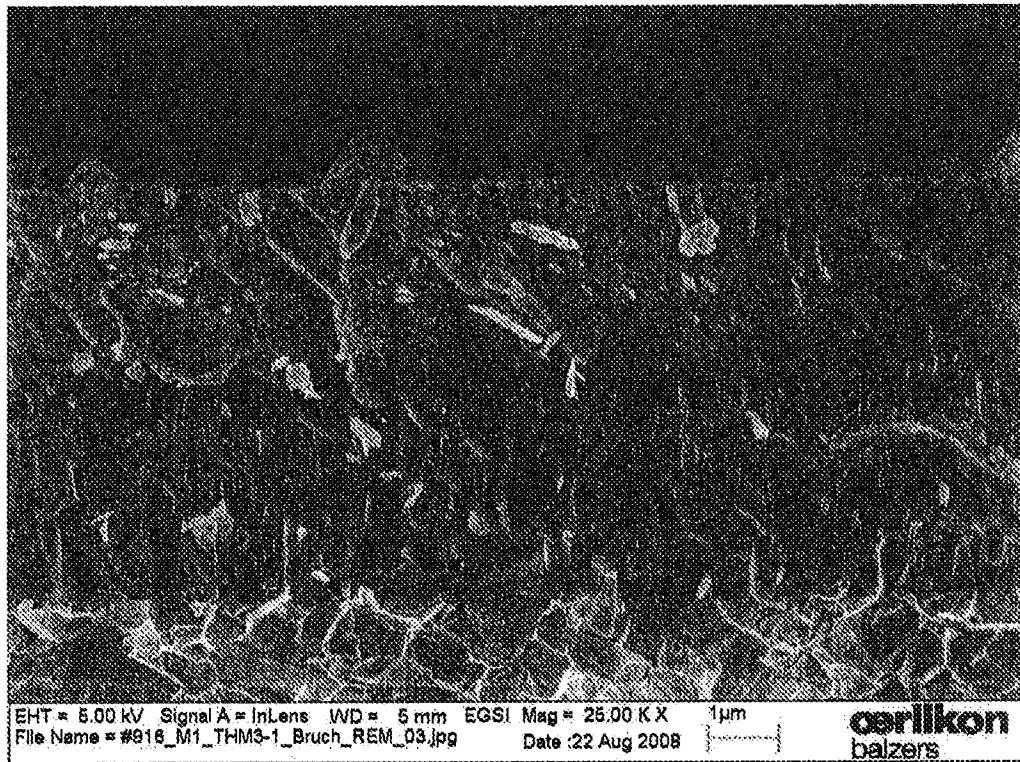


Abbildung 11b



Abbildung 12a

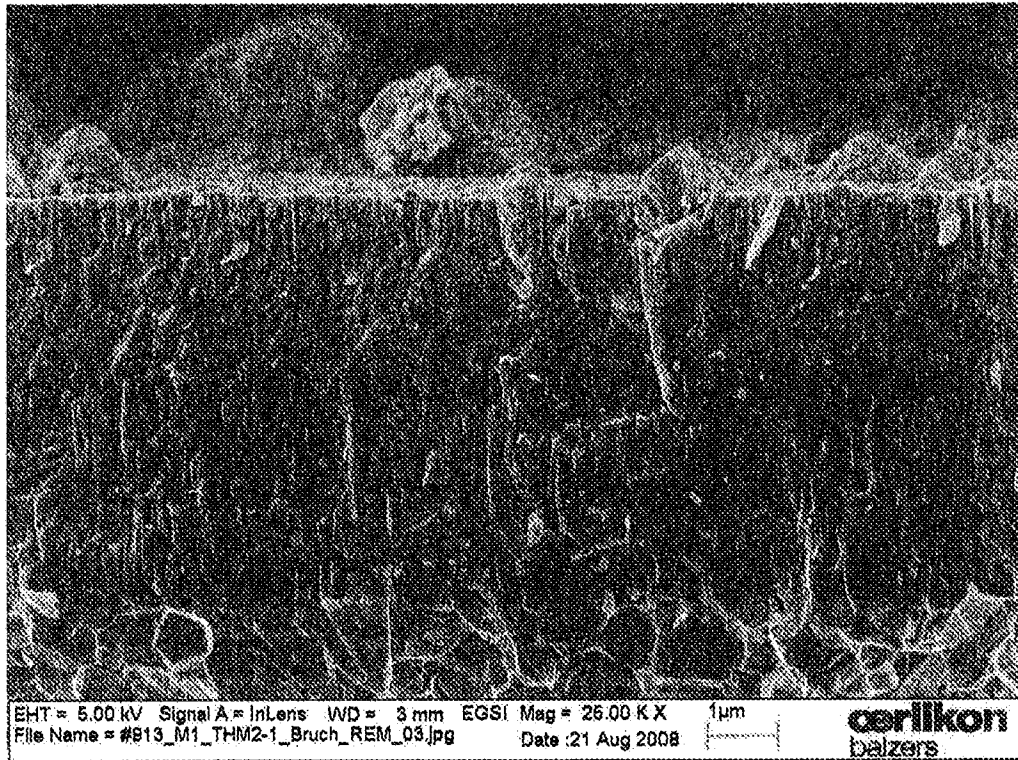


Abbildung 12b



Abbildung 13a

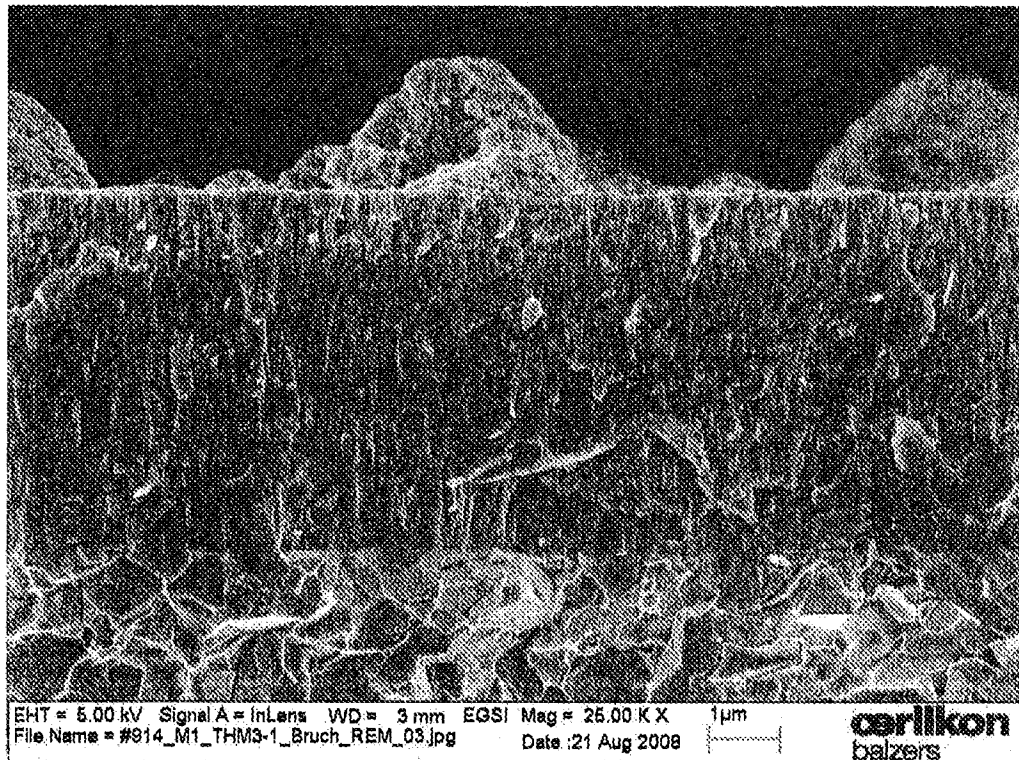


Abbildung 13b



Abbildung 14a

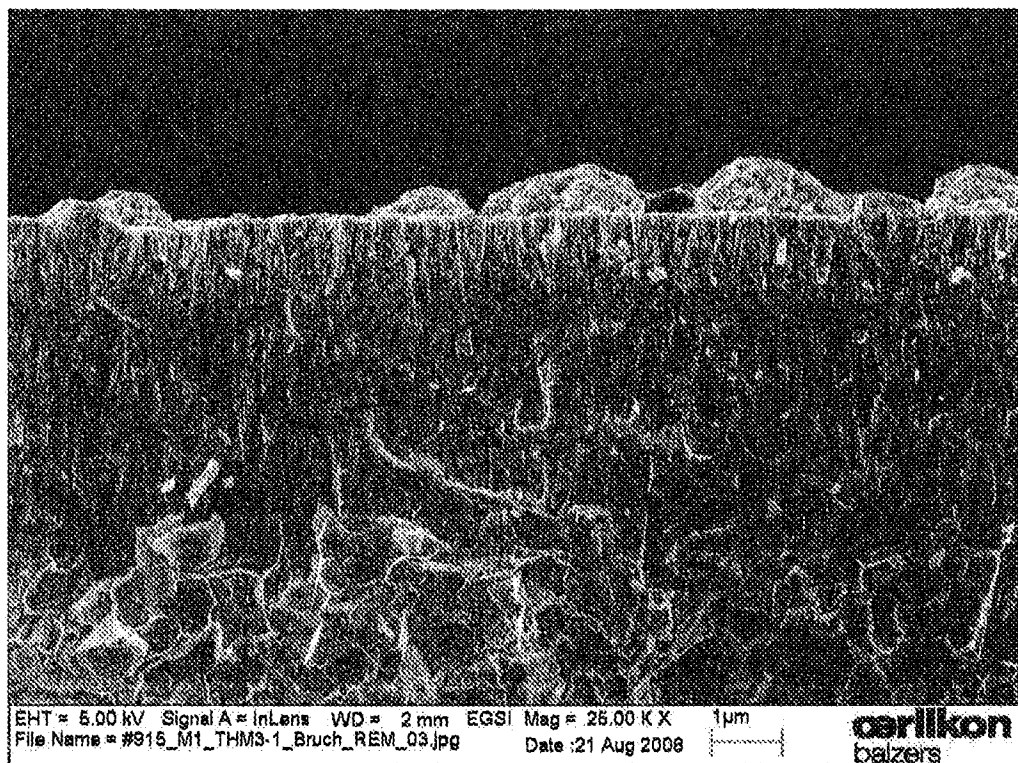


Abbildung 14b



Abbildung 15a



Abbildung 15b

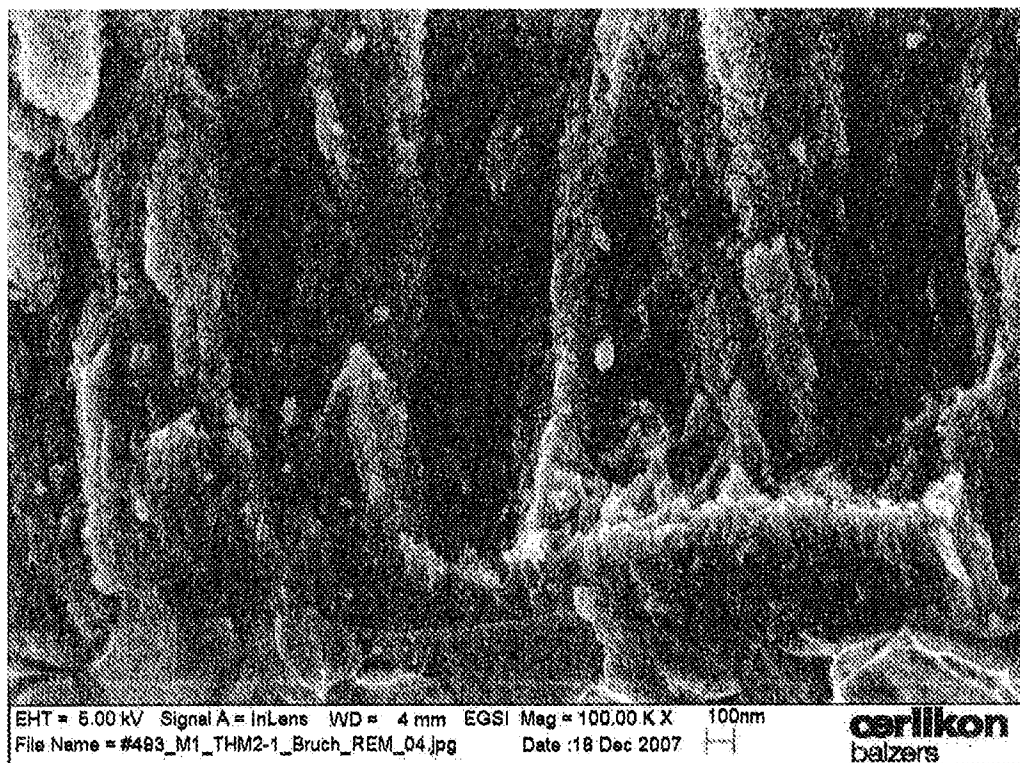


Abbildung 16a

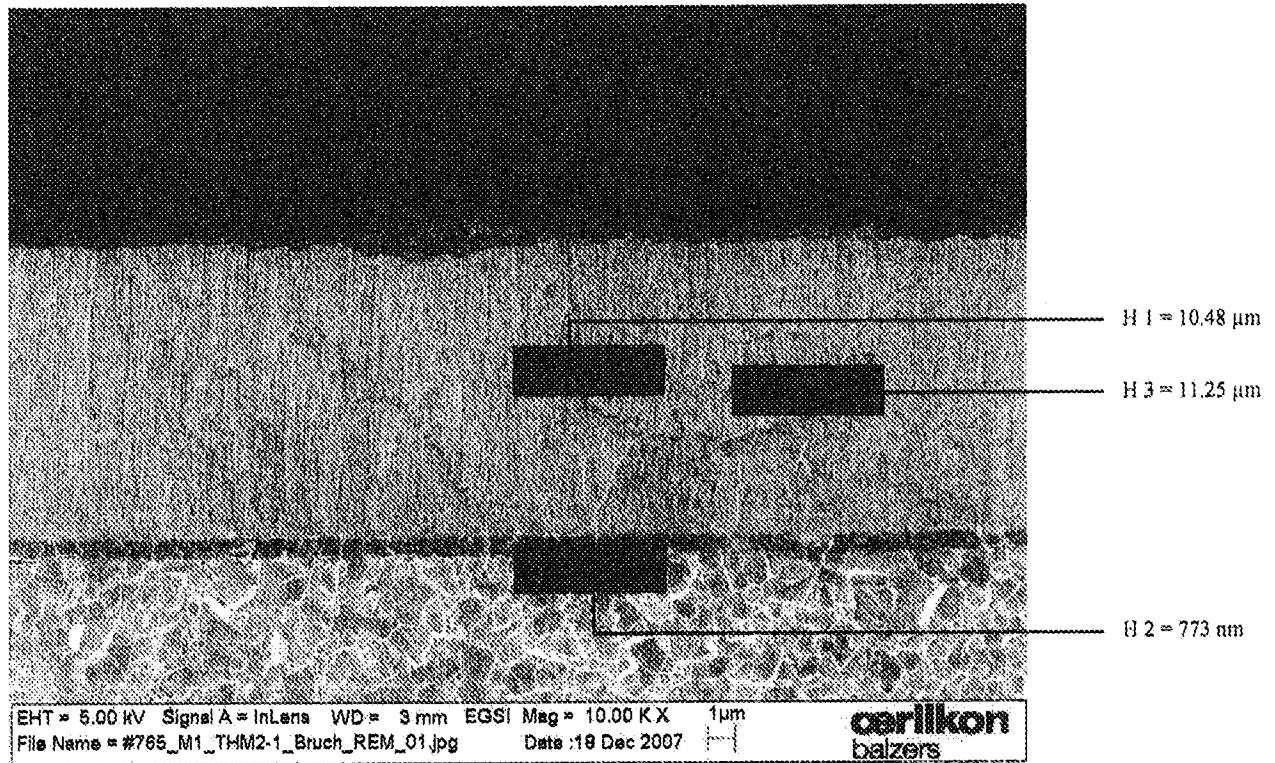


Abbildung 16b



Abbildung 17a

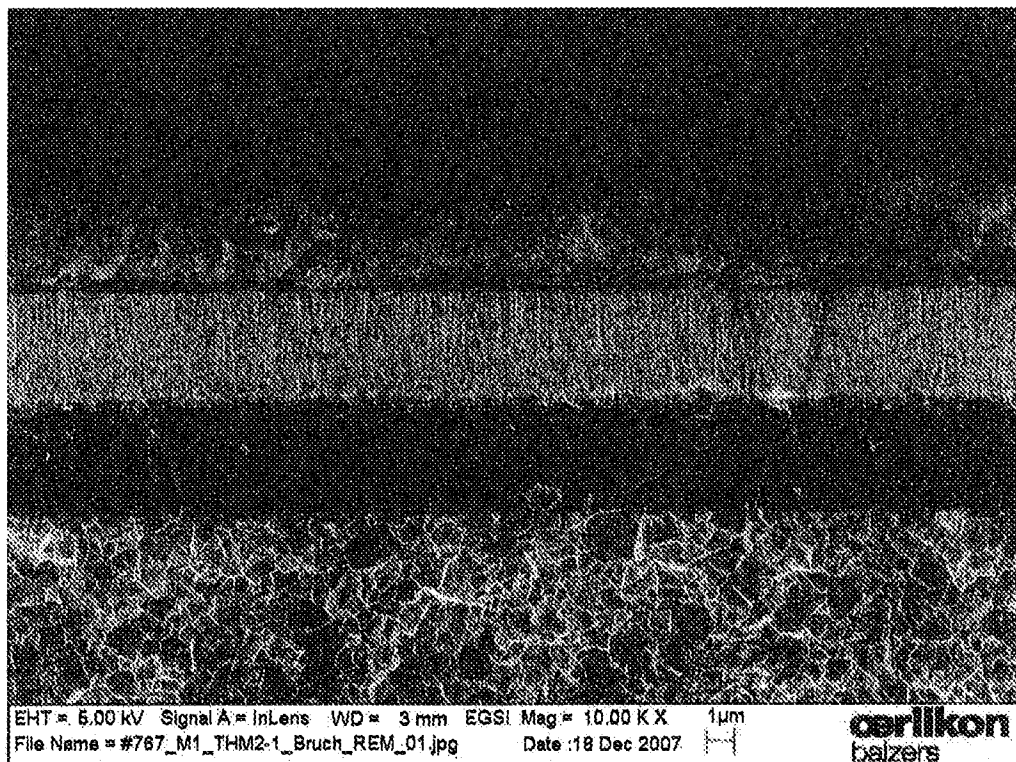


Abbildung 17b

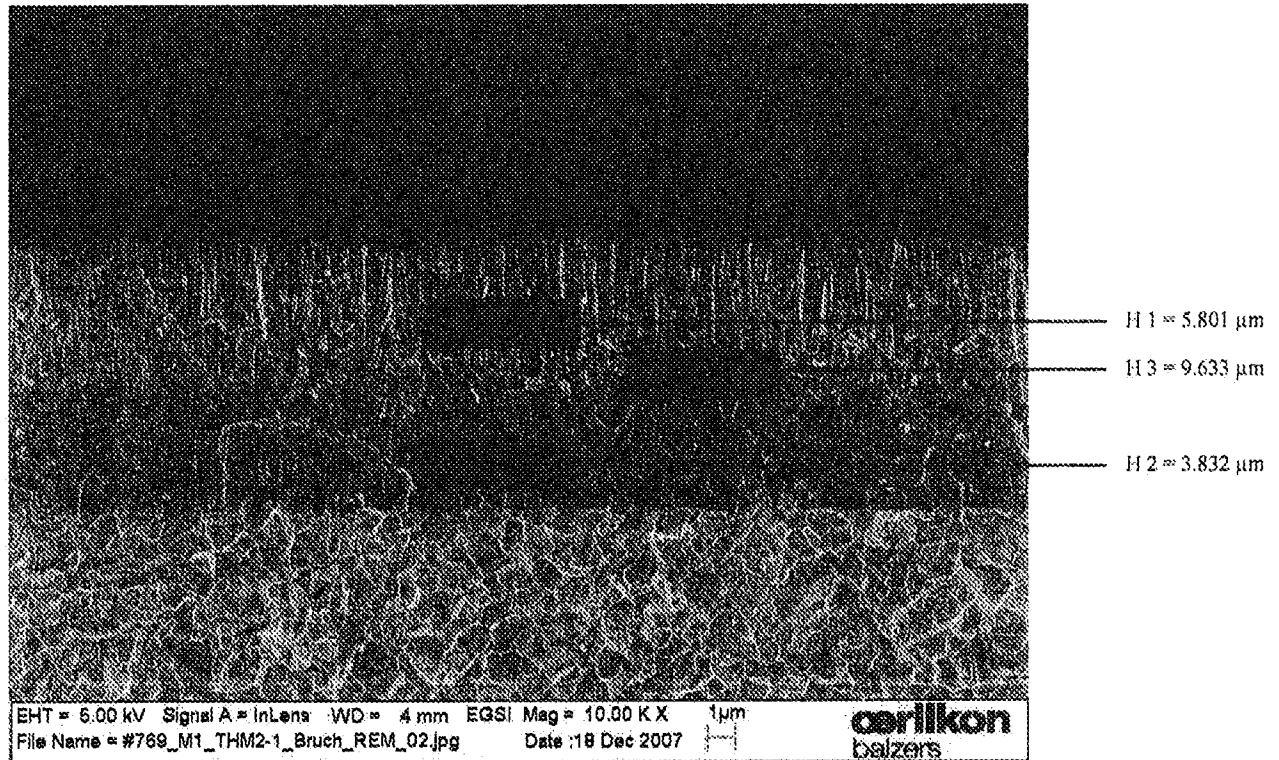


Abbildung 18a

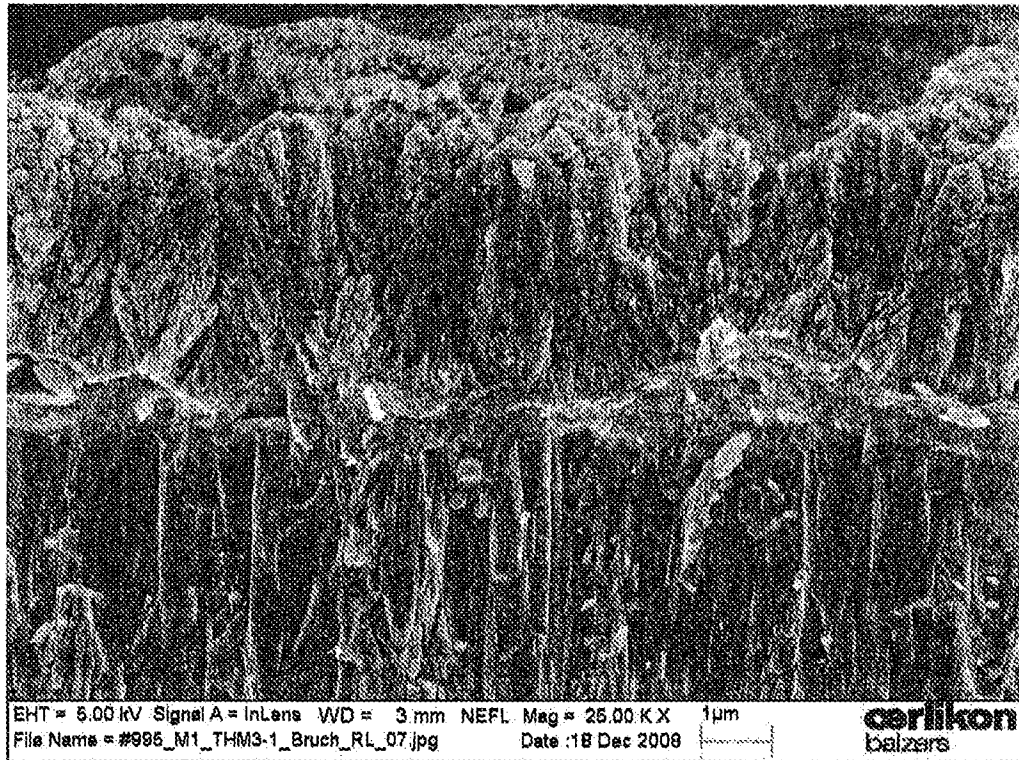


Abbildung 18b

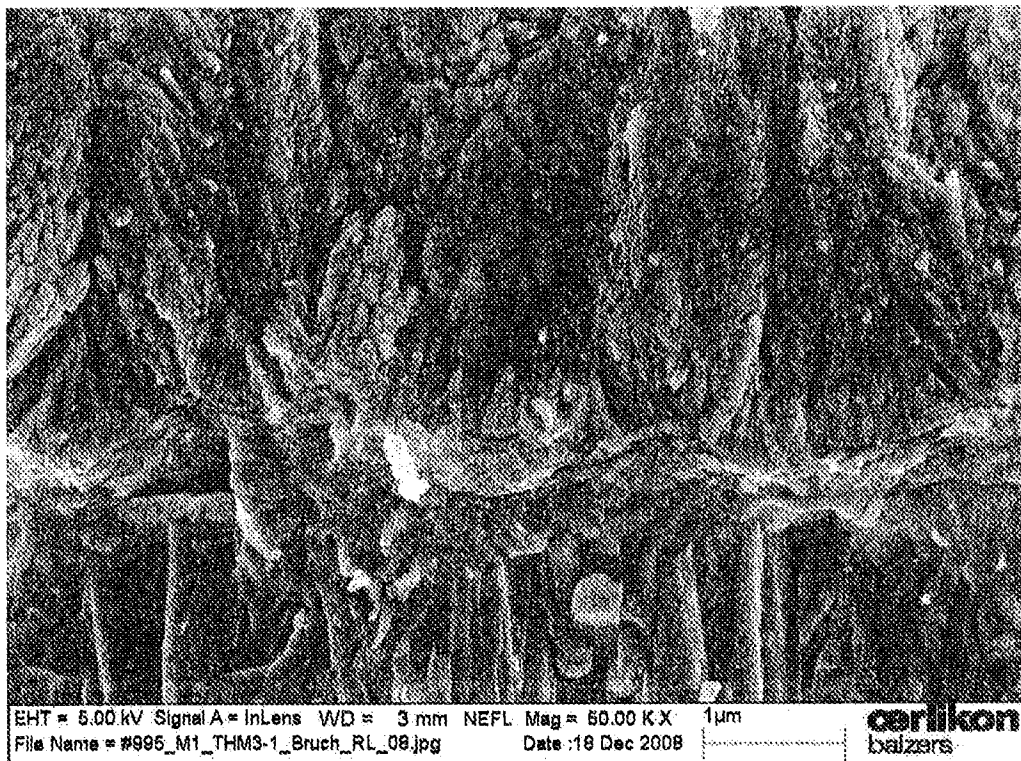
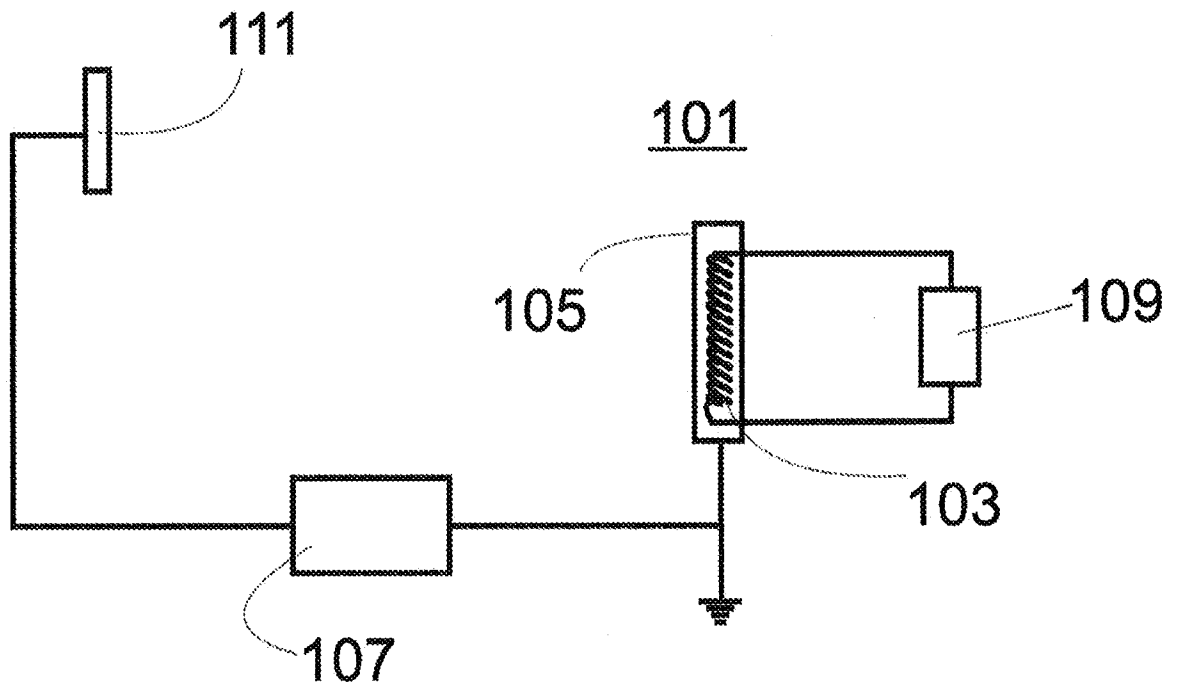


Abbildung 19a



Figur 19b

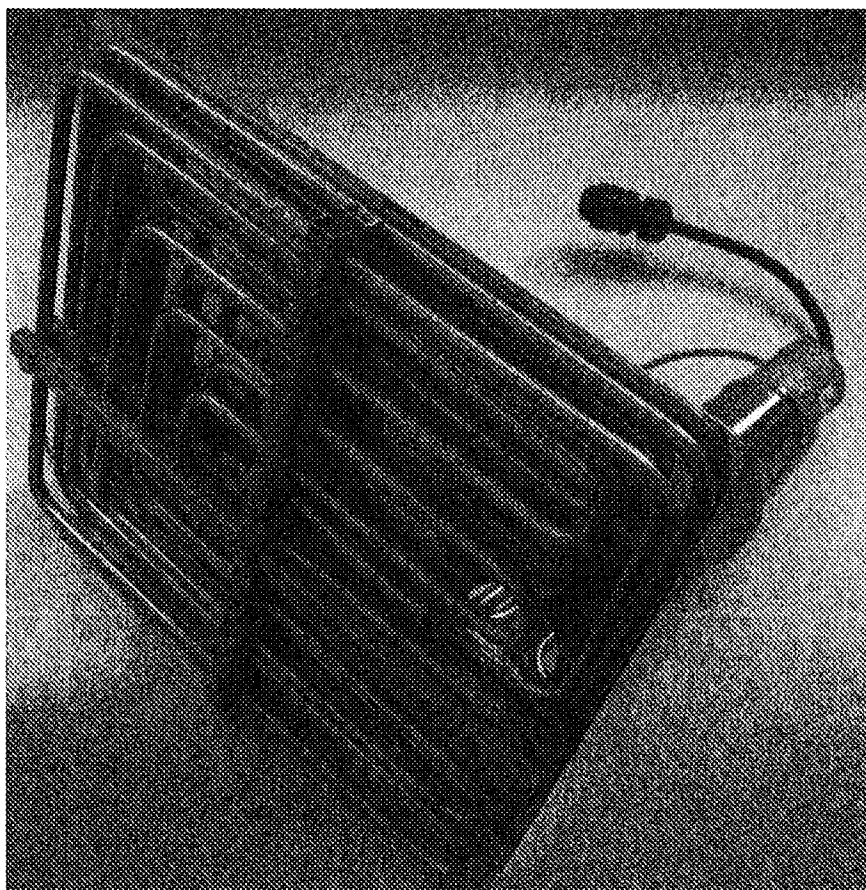
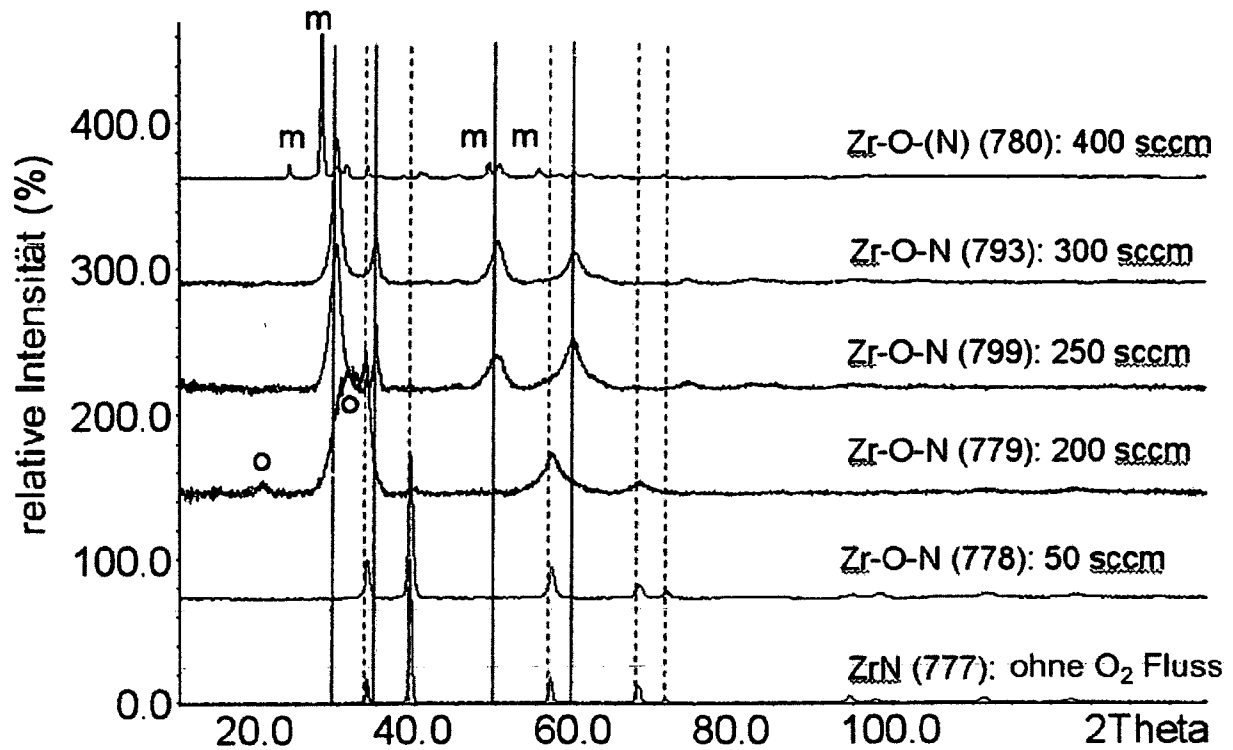


Abbildung 20



Legende zu Abbildung 20:

- ZrN oder ZrO, kubische Phase
- ZrO₂ / Zr(N,O)₂, kubische Phase
- m ZrO₂, monoklinische Phase
- o ZrO₂, orthorhombische Phase

Abbildung 21

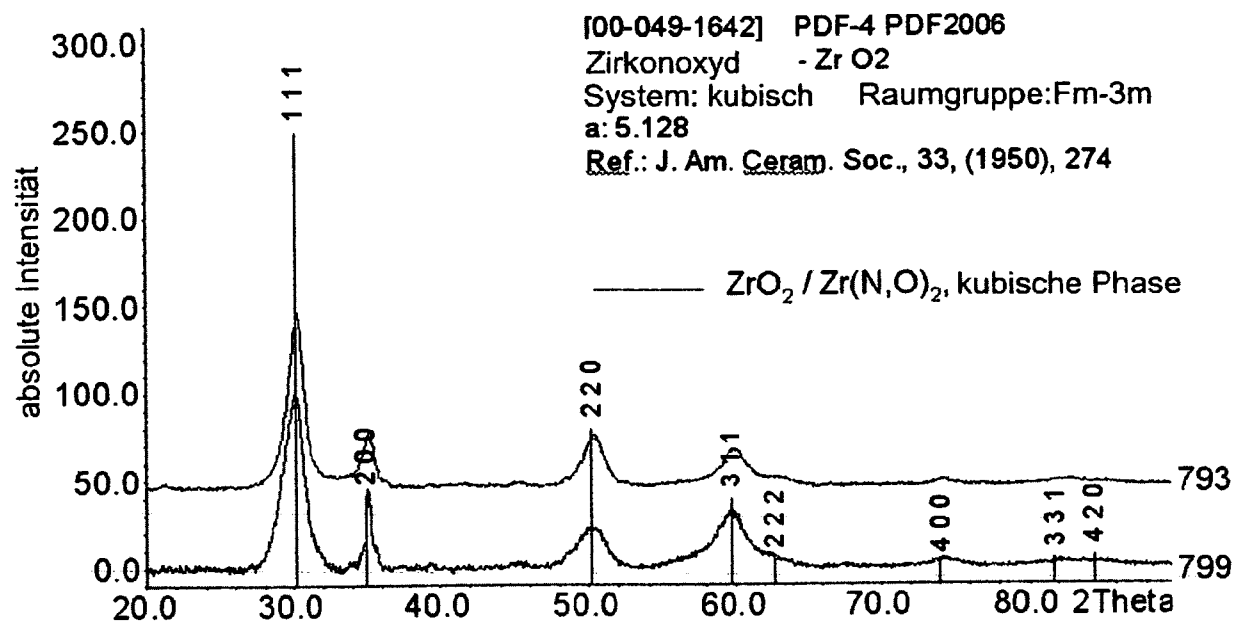


Abbildung 22

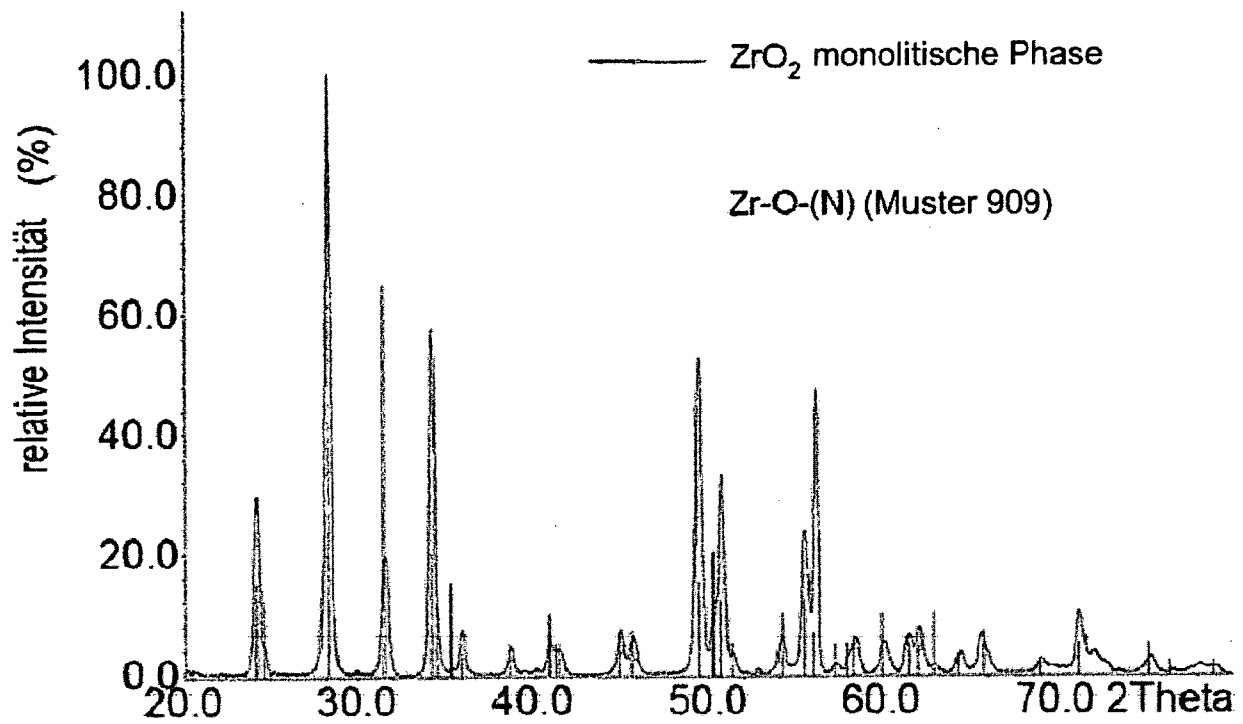
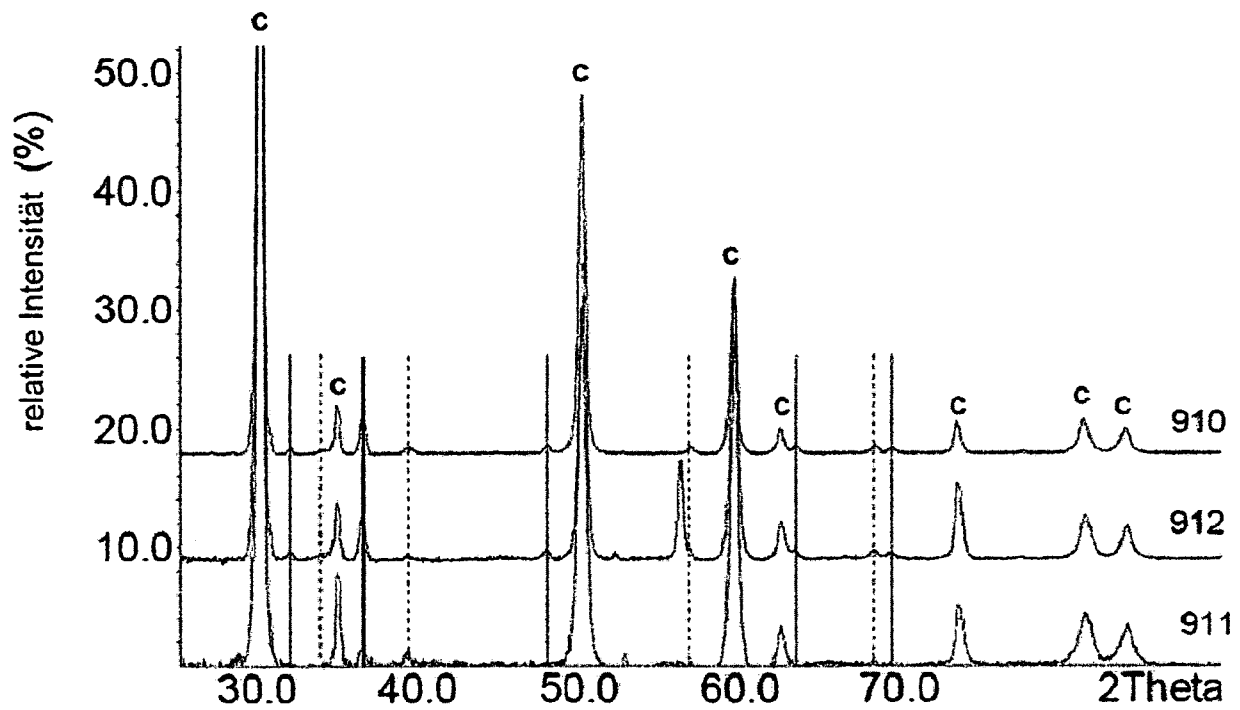


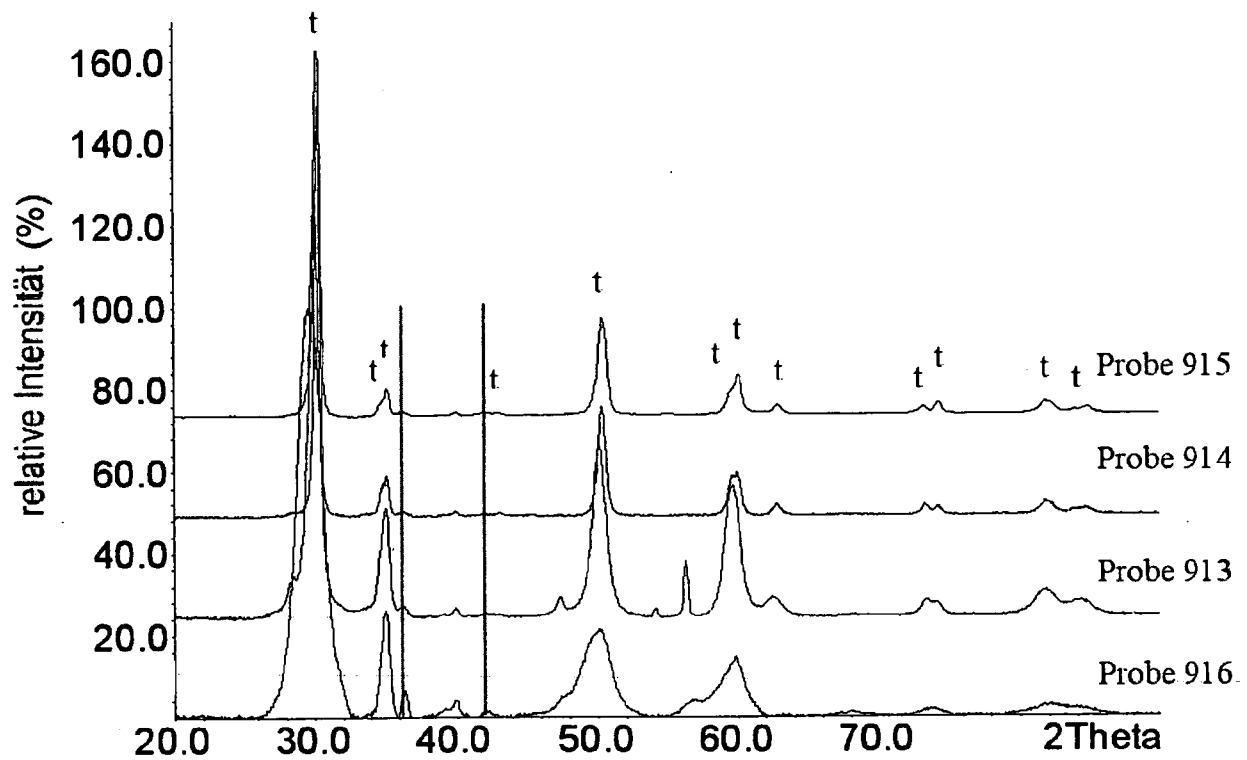
Abbildung 23



Legende zur Abbildung 23:

- c {ZrYO}, kubische Phase
- SL, ZrN, hexagonael Phase
- _____ SL, ZrN, kubische Phase

Abbildung 24



Legende zur Abbildung 24:

t {ZrYO}, tetragonal Phase
 — SL, TiCN, kubische Phase

Abbildung 25

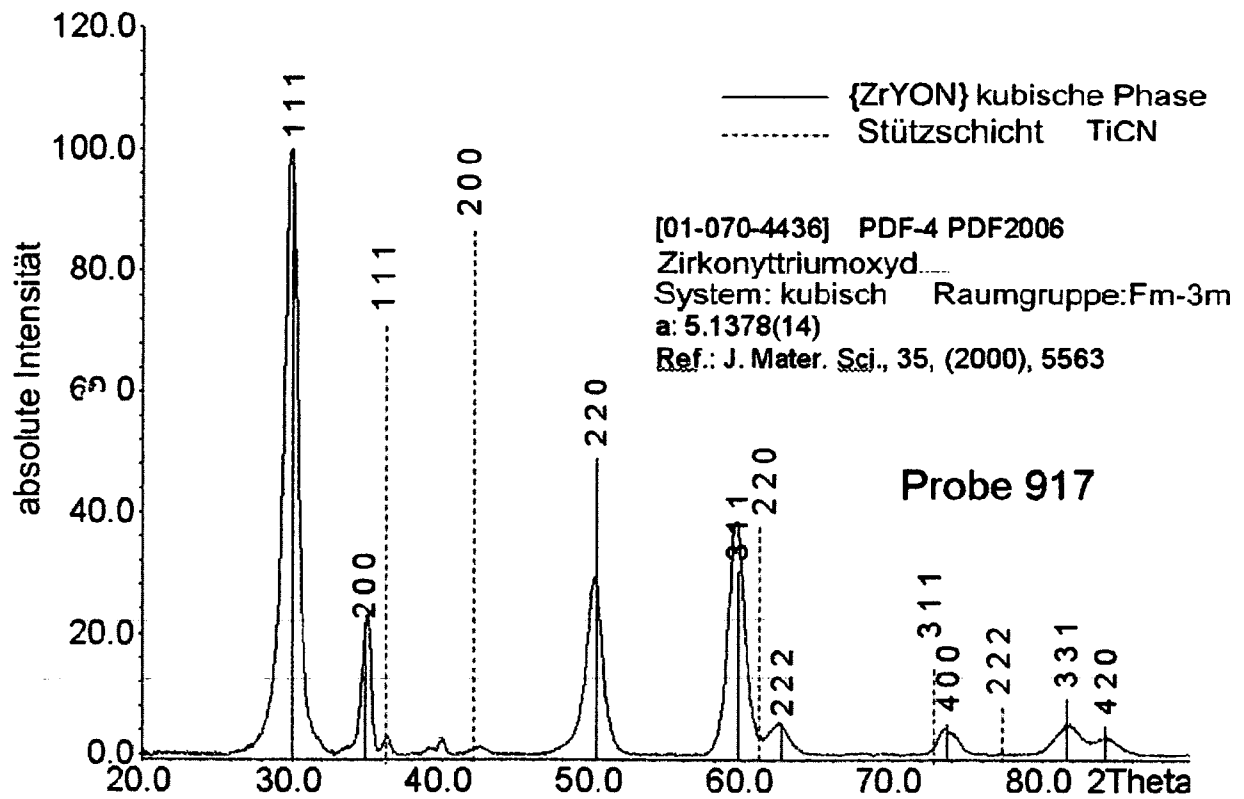


Abbildung 26 a

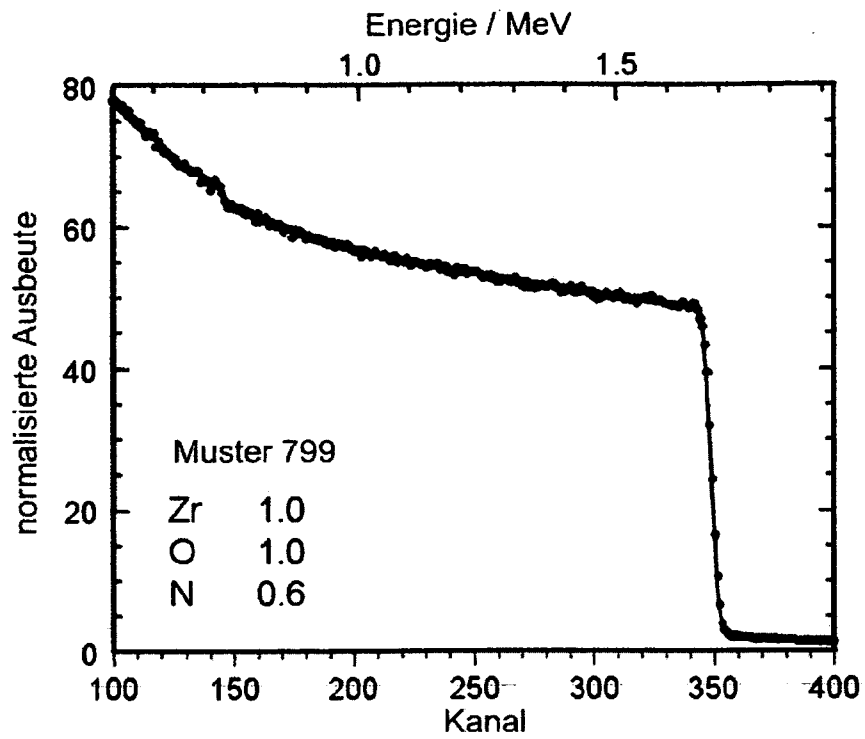


Abbildung 26 b

