

5.2. Keramik-Metall-Verbunde und schnelle elektrische Heizer

Keramik-Metall-Verbunde und schnelle elektrische Heizer

am Beispiel der E.G.O. HiSpeed - Keramik Kochplatte

Dr. Lutz Ose

E.G.O. Elektro – Gerätebau GmbH

Oberderdingen

Dipl. Ing. Friedrich Möller

Rauschert GmbH & Co. KG

Pressig

Dipl.- Ing. (FH) Josef Lichtscheindl

Sildurit GmbH & Co. KG

Heinersdorf

1. Einleitung

Im Folgenden wird eine Neuentwicklung auf dem Gebiet direkt beheizbarer Keramik vorgestellt. Ursprung des Projekts ist eine neuartige Keramik Kochplatte aus Siliziumnitrid (Si_3N_4) für Haushaltskochsysteme. Die wesentlichen Eigenschaften und Vor- und Nachteile werden am Beispiel dieser Anwendung erläutert. Viele der genannten Eigenschaften lassen erkennen, daß das System auch für technisch industrielle Zwecke einsetzbar ist. Ziel des Vortrags ist es, potentiellen Anwendern die technischen Möglichkeiten und Vorteile nahezubringen, aber auch technische Grenzen aufzuzeigen.

2. Handelsübliche elektrische Kochsysteme

2.1 Gußkochplatte

Basis der Gußkochplatte ist ein massiver Gußkörper mit plangedrehter Oberfläche. Der Heizwiderstand ist in einer keramischen Isoliermasse auf der Unterseite in den Gußkörper eingebettet. Die Heizleitertemperatur erreicht etwa 750°C , die Oberfläche etwa 550°C im Leerlauf.

2.2 Strahlungsheizkörper (Glaskeramik - Kochfeld)

Ein Strahlungsheizkörper besteht im wesentlichen aus einer Heizwendel bzw. einem Heizband welches auf einer Wärmedämmplatte aufgebracht ist. Die Wärmedämmplatte dient als Träger und zur thermischen und elektrischen Isolation. Als Randisolierung und Abstandhalter zwischen Heizelement und Glaskeramik dient ein Isoliering. Als mechanisches Rückgrat für diese Komponenten dient ein Halteblech. Die Heizleitertemperatur beträgt etwa 1050°C, die Leerlaufemperatur der darüberliegenden Glaskeramik etwa 550 – 600°C

2.3 Induktionsbeheizung

Eine Induktionskochstelle besteht aus einer Induktionsspule unterhalb einer Glaskeramik, die von einem Frequenzumrichter gespeist wird, der die Netzenergie in hochfrequenten Wechselstrom umwandelt. Das durch die Spule entstehende elektromagnetische Wechselfeld erzeugt im Topfboden Wirbelströme welche diesen erwärmen. Voraussetzung hierfür ist ein magnetisierbarer (ferromagnetischer) Topfboden. Die Spule erwärmt sich nur unwesentlich, die Glaskeramik wird nur vom Topfboden durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung erwärmt.

2.4 Vor – und Nachteile der verschiedenen elektrischen Kochsysteme

Kochmulden	Vorteile	Nachteile
1. Gußkochplatten	<ul style="list-style-type: none"> • Robust, preiswert 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Oberflächentemperaturen • Thermisch träge • Schlecht zu reinigen • Korrosion kann auftreten • Latente Brand- und Verbrennungsgefahr
2. Glaskeramik mit Strahlungsheizkörpern	<ul style="list-style-type: none"> • Leicht zu reinigen • Ebene Fläche • Schönes Design • Gute optische Reaktion durch schnelles Glühen bei Halogenheizkörpern und Bandstrahlungsheizkörpern (HiLight) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Oberflächentemperatur • Thermisch träge • Rückstrahlung bei blanken Edelstahltopfen • Teurer als Gußplatten • Einbrennen von übergekochten Speisen • Latente Brand- und Verbrennungsgefahr
3. Induktion	<ul style="list-style-type: none"> • Schnell, gute Regelbarkeit • Niedrige Oberflächentemperaturen • Hoher Ankochwirkungsgrad • Leicht zu reinigen • Schönes Design • Praktisch keine Brand- und Verbrennungsgefahr 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur magnetisierbare Topfböden funktionieren • Schlechte Wärmeverteilung • Schlechter Teillastwirkungsgrad • Teuer • EMV-Diskussion • Geräusche

3. HiSpeed Keramik Kochplatte aus Siliziumnitrid (Si₃N₄)

3.1 Anforderungsprofil

Auf dem Markt besteht generell der Bedarf nach einem schnellen, effizienten, gut regelbaren und sicheren elektrischen Kochsystem, welches zudem eine Automatisierung verschiedener Kochprozesse zuläßt. Kochen wird zwar prinzipiell als kreativer Prozeß angesehen, jedoch gibt es einige Vorgänge, bei denen eine Automatisierung im Sinne von Entlastung des Koches wünschenswert ist:

„Langweilige„ Prozesse: z.B. Kochen von Kartoffeln, Nudeln, Reis, Fleischbrühe, Suppen, Eier,
 Streßbehafte Prozesse: z.B. Erhitzen von Milch (auch Milchreis, Pudding) und Würstchen,
 Braten von Spiegeleiern.

Um hier eine Unterstützung seitens der Steuer- und Regelungstechnik beim Kochen zu erreichen, benötigt man ein schnell reagierendes Heizsystem und eigentlich die Temperatur des Kochgutes, um eine sinnvolle Regelung zu ermöglichen. Mit Hilfe geeigneter mathematischer Verfahren genügt jedoch die Kenntnis der Topfbodentemperatur anstelle der Kochguttemperatur. Bei Gußkochplatten und Strahlungsheizkörpern ist eine Regelung aufgrund deren thermischer Trägheit kaum möglich. Dies gilt beim Induktionskochen nicht. Allerdings scheidet hier eine Temperaturmessung des Topfbodens unterhalb der Glaskeramik (intern) aufgrund von zu hohen Totzeiten und eine externe Temperaturmessung aus Kostengründen und wegen mangelnder Gebrauchstauglichkeit aus.

Folgende Voraussetzungen müssen erfüllt sein, um eine Regelung (Automatisierung) zu ermöglichen:

- niedrige Temperaturdifferenz zwischen Topfboden und Kochplatte,
- möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung und
- geringe Wärmekapazität von Kochplatte und Geschirr

3.2 Entwicklungsergebnis

Basis der neuen HiSpeed Kochplatte ist eine 3 mm dicke (dünne) Platte aus Siliziumnitrid (Si_3N_4). Direkt auf die Platte ist z.B. eine Dickschicht - Heizung mittels Siebdruck aufgebracht. Direkt auf oder neben den Widerstandsbahnen sind Temperatursensoren angeordnet. Dadurch ist ein nahezu trägheitsloser Wärmeübergang ohne nennenswerte Totzeiten als Voraussetzung für eine schnell ansprechende Temperaturregelung möglich. Der Temperaturgradient zwischen Heizung und Plattenoberseite beträgt max. 4 K, die Maximaltemperatur der Platte ist auf 350°C begrenzt.

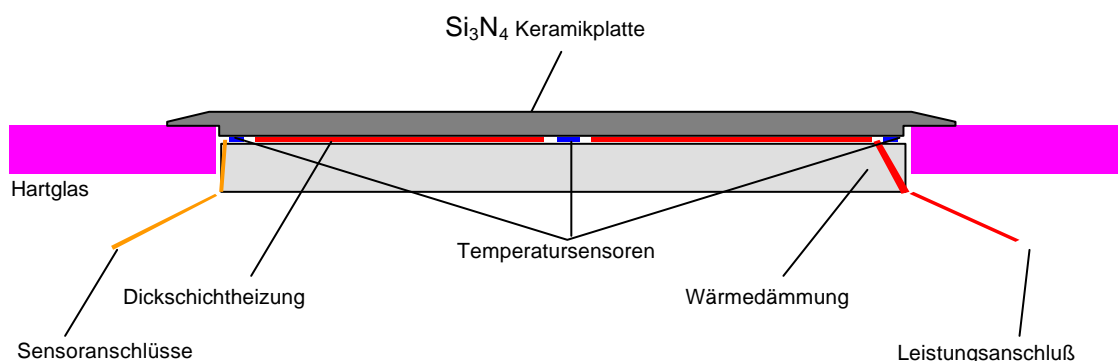


Abbildung 1 Prinzipskizze der HiSpeed - Kochplatte
Vor- und Nachteile (siehe auch 2.4)

	Vorteile	Nachteile
HiSpeed Keramik- kochplatte	<ul style="list-style-type: none"> • Schnell, Booststufe möglich • Gute Regelbarkeit • Automatik möglich • Relativ niedrige Oberflächentemperaturen • Hoher Ankochwirkungsgrad • Niedrigster Gesamtenergieverbrauch • Leicht zu reinigen • Schönes Design • Niedrige Einbauhöhe • Praktisch keine Brandgefahr • Geringe Verbrennungsgefahr 	<ul style="list-style-type: none"> • Neues Geschirr erforderlich (Topfbodenebenheit) • Teurer als Glaskeramik • Keine vollständig ebene Fläche

Bisher wurde eine Vielzahl von Parametern für die verschiedensten Kochgerichte ermittelt und in die Steuersoftware integriert. Dabei ist das System in der Lage, den Einfluß variierender Wärmeübergangsbedingungen durch verschiedene Kochgeschirr - Qualitäten und –Füllgrade zu berücksichtigen. Die Bedienung reduziert sich für den Anwender auf die Wahl der Kochgut - Gruppe innerhalb weniger Grundprogramme.

4. Eigenschaften des Basiswerkstoffs Siliziumnitrid

4.1 Mechanische Eigenschaften

Siliziumnitrid hat neben Zirkonoxid (ZrO_2) von allen keramischen Werkstoffen die höchste Biegefestigkeit von 800 bis über 1000 MPa. Ein Maß für die Reißanfälligkeit bzw. Sprödigkeit (Bruchzähigkeit) ist der kritische Spannungsintensitätsfaktor K_{IC} . Siliziumnitrid hat mit 5 – 8 MPa $m^{1/2}$ nach Zirkonoxid den zweithöchsten K_{IC} aller keramischen Werkstoffe.

Die Härte von Siliziumnitrid ist mit 13 - 20 GPa um ein vielfaches höher als die von Stahl (zum Vergleich: ST-37 ca. 2 – 4 GPa, Grauguß ca. 2 – 3 GPa). Hieraus resultiert eine extrem hohe Abrieb- und Kratzfestigkeit.

Die Dichte von Siliziumnitrid beträgt etwa 3,2 g/cm³. Dadurch sind die Platten leicht und haben eine niedrige Wärmekapazität (siehe 4.3).

4.2 Elektrische Eigenschaften

Siliziumnitrid ist ein Nichtleiter mit einem spez. Widerstand von $10^{14} \Omega\text{cm}$ und 20 kVmm^{-1} Durchschlagfestigkeit. Daher kann eine Leiterbahn problemlos direkt auf die Keramik aufgedruckt werden. Die Annäherungsgrenze der Leiterbahnen ist hier der Luftspalt zwischen den Leiterbahnen bzw. die Durchschlagfestigkeit des Abdeckmaterials. Es entfallen zusätzliche Bauteile wie Heizleiterträger oder elektrische Isolation des Heizleiters gegen die Heizplatte.

4.3 Thermische Eigenschaften

Durch den sehr niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten von $3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ verformt sich die Siliziumnitridplatte bei eingeschalteter Heizung nur minimal, so daß der mechanische Kontakt und somit der Wärmestrom zum Topfboden in jedem Schaltzustand erhalten bleibt.

Die spezifische Wärmekapazität von Siliziumnitrid ist mit $0,5 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ etwa gleich groß wie von Stahl, da jedoch die Dichte nur etwa 40% der Dichte von Stahl beträgt ist die Wärmekapazität pro Volumeneinheit ebenfalls nur etwa 40% der von Stahl.

Die Wärmeleitfähigkeit von Siliziumnitrid kann durch die Auswahl der Additivkombination zwischen 15 und über $70 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ eingestellt werden. Man möchte einerseits die Wärme möglichst gut durch den Werkstoff hindurch transportieren, was eine hohe Wärmeleitfähigkeit verlangt, andererseits sollte jedoch möglichst wenig Wärme radial über den Rand zur Auflage bzw. Einfassung abgeleitet werden. Eine eher niedrige Wärmeleitfähigkeit von etwa $20 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ hat sich als optimaler Wert für die vorliegende Anwendung herausgestellt. Die maximale gemessene Temperaturdifferenz zwischen Heizleiter und Plattenoberseite beträgt 4 K.

4.4 Chemische Beständigkeit

Siliziumnitrid ist gegen fast alle Säuren und Laugen mit Ausnahme von Flußsäure beständig (siehe Chemischer Angriff).

4.5 Vergleich der physikalischen Eigenschaften

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von Siliziumnitrid anderen ausgewählten keramischen und metallischen Werkstoffen gegenübergestellt.

Werte, die eine Eignung des Werkstoffs für die beschriebene Anwendung als günstig auszeichnen sind **fett** gedruckt, Werte die für die Anwendung ungünstig sind, bzw. als KO – Kriterium gelten, sind grau unterlegt.

	Einheit	Si_3N_4	ZrO_2	Al_2O_3	ST-37	GG 20
--	---------	-------------------------	----------------	-------------------------	-------	-------

Festigkeit	MPa	800 - 1000	800 - 1000	300 – 550	300 - 450	95 – 170
Bruchzähigkeit	MPa m ^½	5 - 8	7 - 12	3 – 5	140	
Härte	GPa	13 - 18	12 - 15	15 – 25	2 - 4	2 – 3
Dichte	g cm ⁻³	3,2	5,9	3,9	7,9	7,3
Wärmeausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	2,8 - 3,5	7 - 11	7 – 9	10	12
spez. Wärmekapazität	J g ⁻¹ K ⁻¹	0,5	0,5	0,7 - 0,8	0,5	0,5
Wärmeleitfähigkeit	W m ⁻¹ K ⁻¹	15 - 70	1,5 - 3	15 – 30	~50	58
spez. elektrischer Widerstand	Ω cm	10¹² - 10¹⁵	10⁸ - 10¹³	10¹² – 10¹⁵	(el. Leiter)	(el. Leiter)

5. Anwendungsgrenzen und Nachteile des Systems

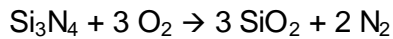
Bei allen Vorteilen ist Siliziumnitrid wie alle anderen keramischen Werkstoffe kein Zaubermittel, um alle Probleme, die durch den Einsatz von Metallen oder Kunststoffen entstehen, zu lösen. Hier sei auf andere Vorträge verwiesen, die sich z.B. auf das Konstruieren mit Keramik beziehen (Stichwort: keramikgerechte Konstruktion).

5.1 Mechanisches Versagen von Bauteilen

Die hohe Härte und Sprödigkeit aller keramischen Werkstoffe führt dazu, daß ein mechanisches Versagen von Bauteilen bei Überbelastung grundsätzlich ohne Vorwarnung mit katastrophalem Bruch erfolgt. Dieser Tatsache muß in Qualitätssicherungssystemen Rechnung getragen werden. Es stehen eine Reihe zerstörungsfreier Materialprüfungsverfahren zur Verfügung. Je nach Anwendungsfall kann auch eine Einzelstückprüfung als Prooftest mit ggf. zerstörender Wirkung im Negativfall erforderlich sein.

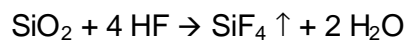
5.2 Chemischer Angriff

Siliziumnitrid ist naturgemäß nicht beständig gegen Sauerstoff. An Luft reagiert eine ungeschützte Si_3N_4 – Oberfläche mit Sauerstoff zu SiO_2 nach folgender Gleichung:



Das gebildete SiO_2 ergibt eine wenige nm bis einige μm dicke Schicht, die eine weitere Oxidation verhindert (Passivierung), ähnlich einer Al_2O_3 – Schicht auf metallischem Aluminium. Daher sind Bauteile aus Siliziumnitrid an Luft absolut stabil bis zu hohen Temperaturen (siehe 5.3).

Wie bereits in 4.4 erwähnt, ist Siliziumnitrid nicht gegen Flußsäure beständig. Der Angriffsmechanismus ist die Reaktion von HF mit der oben beschriebenen SiO_2 – Hülle des Siliziumnitrids nach folgender Gleichung:



Abhängig von der Additivkombination kann in anderen Säuren ein Angriff der Korngrenzphase (siehe 5.3) erfolgen.

5.3 Temperaturbeständigkeit

Das Gefüge von Siliziumnitrid ist gekennzeichnet durch polykristallinen Aufbau von wenigen μm Primärkorngroße mit einer interkristallinen, glasartigen Korngrenzphase. Diese Korngrenzphase erweicht bei Temperaturen von 1000 – 1200°C. Oberhalb der Erweichungstemperatur tritt ein Festigkeitsabfall auf. Bis zu dieser Temperatur hat Siliziumnitrid keinen Festigkeitsabfall gegenüber Raumtemperatur.

Der o.g. Dickschicht-Heizleiter ist durch eine künstlich aufgebrachte Schutzschicht gegen Oxidation geschützt. Die Einsatztemperatur des Heizleiters ist daher abhängig von der Temperaturstabilität der Schutzschicht. Der Entwicklungsstand der oben beschriebenen Anwendung läßt z. Zt. Temperaturen von maximal etwa 600 – 700°C zu.

Keramik-Metall-Verbunde und schnelle elektrische Heizer

Teil 2: weitere Heizsysteme

Dipl. Ing. Friedrich Möller

Rauschert GmbH & Co. KG

Pressig

Zum Thema des Vortrages über die schnelle Direktheizung auf der Basis eines Werkstoffverbundes Metall/Keramik gehören insbesondere für industrielle Anwendungen die Erzeugung von Wärmeenergie durch die chemische Verbrennung von Erdgas und Flüssiggas.

Gasstrahlerplatten

Ein Beispiel für ein Keramiksyste sind die Infrarotstrahlerplatten aus Cordierit C520. Diese keramischen Lochplatte werden als Trägermedium für Strahlungsheizungen verwendet. Ein Gas-Luftgemisch wird bei diesen Geräten über einen Injektor nach dem Prinzip des Bunsenbrenners durch die perforierte Keramikplatte geleitet und an der Oberfläche restlos verbrannt. Die von der glühenden Platte ausgesandte Strahlung liegt zumeist im Wellenlängenbereich von 0,8 μm und 4 μm . Die Leistung liegt je nach Gerätekonstruktion zwischen 10 kW/m^2 und 50 kW/m^2 .

Diese Technik wird auch in Niedertemperatur- oder Brennwertheizthermen mit Erfolg eingesetzt. Da die Keramikplatte als Brenner eingesetzt ist, sind die Leistungsbereiche in diesem Fall viel höher. Sie liegen zwischen 200 kW/m^2 und 1.200 kW/m^2 .



Bild 1: Prinzip eines Gasinfrarotstrahlers mit Zuführung des Gas-Luft-Gemisches

$$t_R = t_L + t_S \quad (t_R \text{ Raumtemperatur, } t_L \text{ Raumlufitemperatur, } t_S \text{ Strahlungstemperatur})$$

Die hohe Porosität des Werkstoffs ermöglicht es, die Lochplatten innerhalb von Sekunden auf mit hohen Temperaturen an der Brenneroberseite (typ. 1.000°C) zu belasten. Wegen der niedrigen Wärmeleitfähigkeit der Keramik und Kühlung des durchströmenden Gasluftgemisches wird die Rückseite dabei kaum erwärmt. Wärmespannungen in der Platte werden durch den niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten gering gehalten und letztlich durch die vorhandenen Poren kompensiert.

Eine andere Variante ist der Volumenbrenner auf der Basis von Schaumkeramik.

Rekuperatoren

Im Gegensatz zu den Energieverlusten, die bei der elektrischen Beheizung auftreten, und die in erster Linie durch den bei 35 - 40 % liegenden Kraftwerkswirkungsgrad festgelegt sind, steigen die Abgasverluste bei Brennstoffbeheizung aufgrund des sinkenden, feuerungstechnischen Wirkungsgrades mit der Abgastemperatur an. Vor allem für hohe Prozeß- und damit Abgastemperaturen sind deshalb erhebliche Energieeinsparungen möglich, wenn die Abgaswärme genutzt werden kann. Durch einen Wärmetauscher läßt sich Energie wieder in den Hochtemperaturprozeß zurückführen.

In dem Rekuperator des dargestellten Brennersystems (Bild 2) wird im Gegenstromprinzip dem Abgas Wärme entzogen und auf die Verbrennungsluft übertragen. So kann z.B. bei einer Abgastemperatur von 1200°C und einer Verbrennungsluftvorwärmung von 800°C eine Brennstoffeinsparung von 42 % und ein Wirkungsgrad von 75 % erreicht werden. Neben der Hochtemperaturfestigkeit wird bei dieser Anwendung die gute thermische Leitfähigkeit des SiSiC genutzt, die fast doppelt so hoch ist wie die von NiCr-Legierungen.

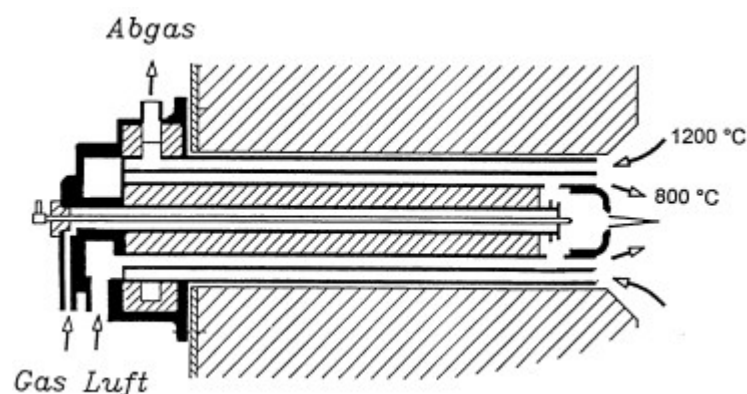


Bild 2: Rekuperator eines Brennersystems

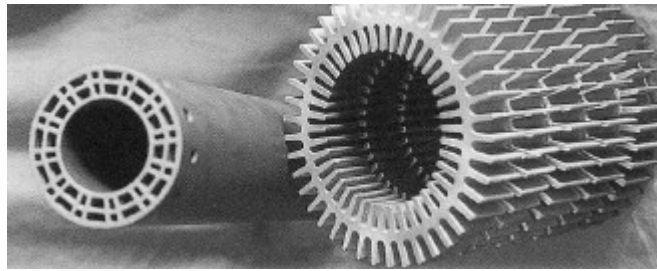


Bild 3: Wärmetauscher

Im Bereich der direkten Beheizung werden für gas- oder ölbefeuerte Industrieöfen sowie für Haushaltsbrenner seit Jahren erfolgreich SiSiC-Brennerdüsen eingesetzt.

Viele Prozesse, bei denen das zu behandelnde Gut nicht mit den Verbrennungsgasen in Berührung kommen darf, beispielsweise das Glühen von Blechen unter Schutzgas, werden elektrisch beheizt. Eine Alternative stellt die Kapselung der Verbrennung und Wärmeübertragung mittels Strahlrohr aus SiSiC dar (Bild 3).

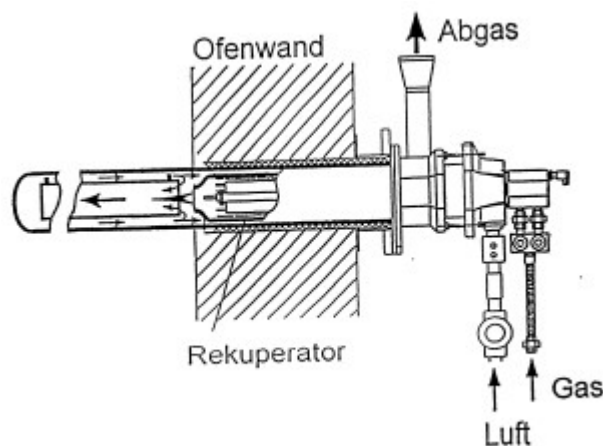


Bild 4: Kapselung der Verbrennung und Wärmeübertragung mittels Strahlrohr

Elektrische Heizer mit traditioneller Isolation

Bei der Direktheizung wird die benötigte Wärme über einen elektrischen Widerstandsdraht erzeugt. Zur Isolation von Heizleitern werden Isolierperlen und Heileiterträgern z.B. in Form von Rohren wegen der guten elektrischen Isolation verwendet. Daneben muß die Keramik eine gute Temperaturwechselbeständigkeit aufweisen und darf nicht mit dem Metall reagieren. Diese Anforderung erfüllt u.a. Cordierit.

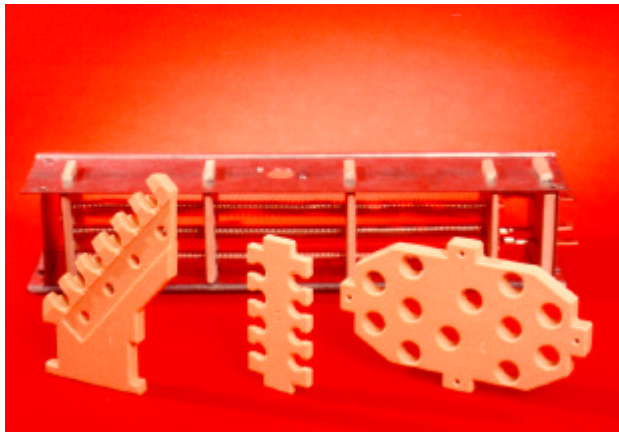


Bild 5: Beispiele für Heizleiterträger

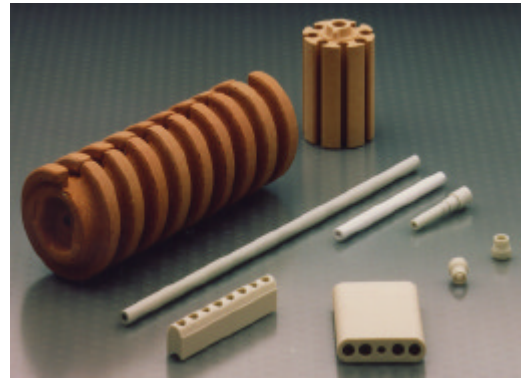


Bild 6: Weitere Isolierteile



Bild 7: „Innenleben“ eines Tauchheizers



Bild 8: Mehrlochrohre

Für die elektrische Trennung wird auch die Hochtemperaturkeramik MgO verwendet.

Aus diesem Werkstoff werden für die Wärmetechnik, mineralisierten Thermoelementen, Meßleitungen und Heizleitern vorwiegend Röhrchen mit definierter Festigkeit gefertigt. Der MgO-Gehalt liegt hier in der Wärmetechnik oft bei 85%, bei den mineralisierten Leitungen zumeist bei 97 bis 99,8%.

Die Keramikröhrchen werden über die Widerstandsdrähte gezogen und in Metallrohre eingeführt. Durch Ziehen, Hämmern oder Walzen verlängert man die Ausgangslänge. Hierbei kommt es zu einer Querschnittsverkleinerung, wobei die Keramik zerdrückt wird. Es gelingt bei diesem Arbeitsgang ohne Zerstörung des Innenleiters die Ausgangslänge des Kabels enorm zu vervielfachen. Hierbei spielt die eingesetzte Korngröße des Rohstoffes eine entscheidende Rolle, da zu große Kristallite den Innenleiter durchschneiden und somit die Kabelnutzlänge

gravierend verkürzen würden. Die MgO-Kristallite sollten hier nicht größer als $70\mu\text{m}$ sein. Für besonders kritische Anwendungen sind auch kleinere Kristallitgrößen ($<40\mu\text{m}$) möglich. Somit ist gewährleistet, daß ein oder mehrere drahtförmige Leiter allseitig von gut isolierenden MgO - Pulver umgeben sind. Die Verdichtung hierbei ist sehr hoch, so daß man nahezu 85% der theoretischen Dichte von MgO erreicht.

Die angewandten Geometrien sind sehr unterschiedlich. Allgemein werden Rohre (Einloch- und Mehrlochrohre) \varnothing_A 2mm - 25mm, Bohrungen \varnothing_I 0,5mm - 15mm eingesetzt. Es ist jederzeit auch eine Vielfalt von Flach- oder Ovalenrohren denkbar. Die Mindestwandstärke ist abhängig von der Größe der Rohre, sollte aber 0,2mm nicht unterschreiten.

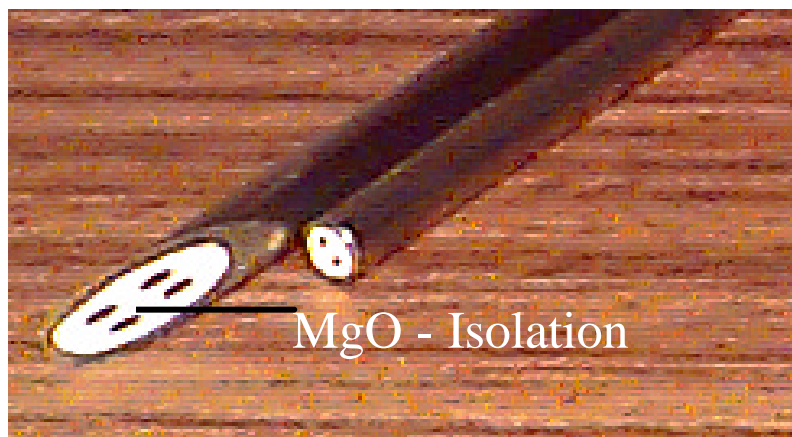


Bild 9: MgO - Isolation

Beispiel der Vielfalt der MgO - Rohre



Bild 10: MgO - Rohre

Elektrische Heizer mit keramischer Schicht-Isolation

Ein interessantes Konstruktionsprinzip mit neuer konstruktiver Freiheit ist die keramische Beschichtung auf metallischen Heizleiterlegierungen. Heizleiter können z.B. in Form von Stäben oder Rohren gestaltet werden. Durch die keramische Beschichtung kommt es kaum zu Einschränkungen der Form des Trägers.

Die Keramiksicht hat eine Dicke von ca. 200µm. Damit wird Platz und Gewicht gespart. Die typische Spezifikation des Werkstoffverbundes Metall/Keramik für das Schnellheizsystem ist in Bild 11 dargestellt.

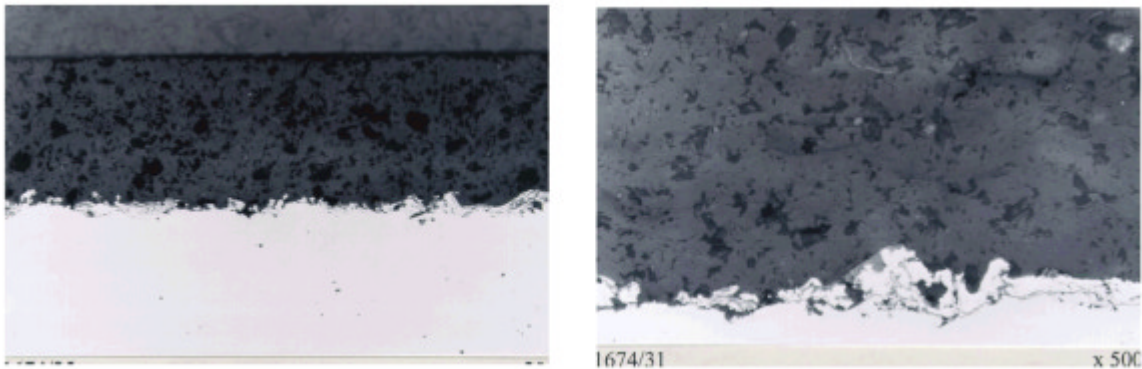


Bild 11: Aufbau einer keramischen Beschichtung

Die Spannungsfestigkeit liegt in der Praxis bei bis 500V.

Die CrNi-Schicht dient als Haftschicht, die auch die Unterschiede in den Wärmeausdehnungskoeffizienten ausgleicht. Die Keramiksicht hat technologiebedingt eine Porosität von ca. 5% und eine Schichtstruktur, die Wärmedehnungen aufnehmen kann im Temperaturbereich bis 600°C. Die enormen mechanischen Beanspruchungen bei thermischen Lastwechseln im 3 h-Betrieb über mehrere Jahre dürfen nicht unterschätzt werden. Zusätzlich zu den keramischen Eigenschaften können aber noch die mechanischen Eigenschaften, wie Härte und Verschleißfestigkeit, für die Anwendung genutzt werden.



Bild 12: verschiedene Beschichtete Teile

Das Verfahren der keramischen Beschichtung ist für Klein-, aber auch für Großserien geeignet und hat großes Entwicklungspotential für die Zukunft.



Bild 13: Bauformen von Mehrlochrohren