

5.2 Keramische Hochtemperatur-Heizelemente - Heizen und Zünden mit Keramik

- Dr. Hannes Kühl
Rauschert Steinbach GmbH
Steinbach

Die Folien finden Sie ab Seite 458.

5.2.1. Einleitung

Keramiken sind im Bereich von Hochtemperaturanwendungen, zu denen Heiz- und Zündprozesse gehören, nicht mehr wegzudenken. Im Bereich des Heizens oberhalb von ca. 1.000 °C werden Keramiken sowohl als Trägermaterialien für Heizleiter/Heizwendel eingesetzt, als auch als aktives Heizermaterial, das heißt als stromführendes und hitzeerzeugendes Material.

Im Bereich des Zündens z.B. von Gas-, Öl- oder Festbrennstoffen müssen prinzipiell zwei Verfahren unterschieden werden. Einerseits die Zündung mittels Funken, der durch den Hochspannungsüberschlag zwischen zwei Metallelektroden erfolgt. Andererseits die Zündung mit Glühzündern, die z.B. im Dieselmotor Anwendung findet.

Der Vortrag gibt einen Überblick über die Vielseitigkeit, die Keramik in diesen Anwendungsgebieten hat, angefangen vom „einfachen“ Isolatorbauteil bis hin zum „komplexen“ Hochtemperatur-Heizelement.

5.2.2. Keramik für Heizanwendungen

Elektrische Heizelemente finden in unzähligen industriellen Prozessen Anwendung. Sie werden in der Kunststofftechnik zur Beheizung von Spritzdüsen, Heißkanälen und zur Werkzeugbeheizung eingesetzt und dienen in der chemischen Technik zum Schmelzen und Verdampfen von Proben. Im Automobil dienen sie u.a. zum Zünden von Kraftstoffgemischen (Glühzündler) und zur Beheizung von Sensoren (z. B. λ -

Sonde). Weitere Einsatzgebiete sind Industrie- und Laboröfen, die Löt- und Schweißtechnik sowie diverse Haushaltsgeräte.

Die Materialien, die für den Einsatz als Heizelemente/Heizleiter („aktive“, stromführende Komponente, die sich erhitzt) in Frage kommen, sind neben speziellen hochtemperatur- und oxidationsbeständigen Metallen (NiCr, FeCrAl, Pt; in inerter Atmosphäre auch W und Mo) auch leitfähige Keramik-Materialien, sog. Ceramic-Matrix-Composits (CMC, z. B. ATN = $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ -Mischkeramik, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MoSi}_2$ -Mischkeramik, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{MoSi}_2$ usw.) und Hybridheizelemente. Abhängig von der maximalen Einsatztemperatur und der Umgebungsumgebung wird für jedes Anwendungsgebiet das geeignete Material gewählt.

5.2.2.1. Cordierit als Heizleiterträger

Trägermaterialien für Heizleiter, sog. Heizleiterträger, haben im Vergleich zu „aktiven“ Heizelementen die Aufgabe die sich erhitzenden Heizwendeln, die über die Heizleiterträger gezogen werden oder daran aufgehängt werden, auch bei sehr hohen Glühtemperaturen dauerhaft zu tragen. Die Voraussetzungen an die Keramiken, die hierfür Einsatz finden, sind:

- Hohe Temperaturbeständigkeit (höher als die maximale Heiztemperatur)
- Elektrische Isolationsfestigkeit auch bei hohen Temperaturen
- Chemische Beständigkeit und Korrosionsbeständigkeit in der geforderten Atmosphäre
- Gute Temperaturwechselbeständigkeit

Als idealer Werkstoff bietet sich hier Cordierit an. Cordierit ist ein Magnesium-Aluminium-Silikatmineral, das sich durch einen sehr niedrigen Längenausdehnungskoeffizienten auszeichnet. Dementsprechend gut ist die Temperaturwechselbeständigkeit bzw. anders ausgedrückt die Beständigkeit gegen Thermoschocks. Cordieritkeramiken gibt es sowohl in poröser als auch in dichter Form (Bild 1 und 2). Poröses Cordierit, nach DIN EN 60 672-3 als C511, C520 und C530

bezeichnet, findet dort Anwendung, wo Poren keinen negativen Einfluss auf die Anwendung haben. Dies kann z.B. eindringende Feuchtigkeit sein, die mit der Zeit zu elektrischen Überschlüssen führen kann. Hier kann dichtes Cordierit (C410) eingesetzt werden. Je nach Typ ist Cordierit bis zu einer maximalen Temperatur von ca. 1.240 °C (C 520) bzw. 1300 °C (C 530) einsetzbar. Spezialitäten mit hohem Aluminiumoxid- bzw. Mullitgehalt können bis 1.700 °C eingesetzt werden. Diese Sondertypen weisen jedoch auch eine geringere Thermoschockbeständigkeit auf.



Bild 1 und 2: Unterschiedliche Cordieritprodukte

Einsatz finden Cordieritkeramiken u.a. als Heizleiterträger in Industrieöfen (Aufhängungen der Heizwicklungen), als Wickel- bzw. Spulenkörper für Heizdrähte sowie als Mehrlochrohre in Heißluftgebläsen.

5.2.2.2. MgO als Füllmaterial für Heizpatronen

Ein weiteres Keramikmaterial, das für Heizanwendungen verwendet wird, ist Magnesiumoxid, das als Füllmaterial für Heizpatronen aller Art Einsatz findet. Bild 3 zeigt den Aufbau einer Heizpatrone bestehend aus dem Heizdraht (meist eine Nickellegierung), der Magnesiumoxidisolation und dem Stahlmantel. Bild 4 zeigt typische MgO-Bauteile.

MgO zeichnet sich neben den guten Isoliereigenschaften und der guten Wärmeleitfähigkeit durch den hohen Ausdehnungskoeffizien-

ten aus, der in etwa dem von Stahl entspricht. Dies hat den Vorteil, dass sich alle Materialien, die sich in einer Heizpatrone befinden, in gleichem Maß ausdehnen und somit keine den Wärmeübergang behindernde Luftspalten entstehen.

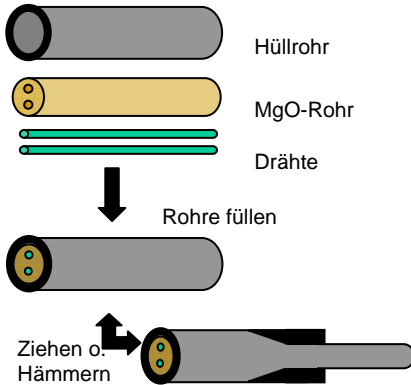


Bild 3: Fertigungsprozess



Bild 4: versch. MgO-Bauteile

5.2.2.3. PTC-Heizelemente

Keramik kann auch als aktives Heizmaterial Anwendung finden. Sogenannte PTC-Heizelemente sind hier als Beispiel genannt. Sie bestehen aus einer Bariumtitanat-Keramik, die auch andere Bestandteile wie Bleititanat oder Strontiumtitanat enthalten kann. Dieses Material zeichnet sich dadurch aus, dass es bis zu einer bestimmten Temperatur, der sog. Curie-Temperatur, elektrisch leitfähig ist (Bild 5). Oberhalb dieser Temperatur steigt der Widerstand des Materials innerhalb weniger Kelvin sprunghaft um mehrere Größenordnungen an, wodurch die Leitfähigkeit des Materials verloren geht. Dieser Effekt wird „PTC-Effekt“ genannt und verursacht eine Selbstbegrenzung des Heizelements gegen Überhitzung. Er wird daher in vielen Anwendungen benutzt. Einsatzgebiete sind u. a. Raumluftheizungen im Kfz, Beheizungen für Haushaltsgeräte oder Schaltschrankheizungen. Bild 6 zeigt unterschiedliche Bauformen von PTC-Heizelementen.

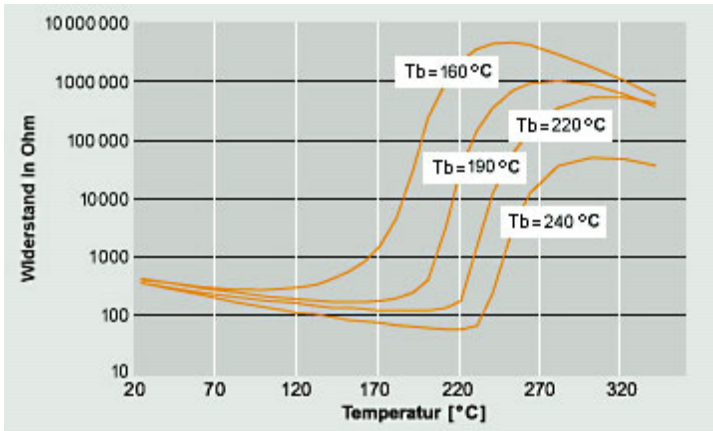


Bild 5: „Widerstandssprung“ bei unterschiedlichen Curie-Temperaturen



Bild 6: Unterschiedliche Bauformen von PTC-Heizelementen

5.2.2.4. Hybridheizelemente

Hybridheizelemente bestehen aus einem metallischen Heizleiter, der in ein keramisches Isolationsmaterial eingesintert ist und somit zur Umgebung vollkommen elektrisch isoliert ist. Als Materialien für Heizleiter kommen u. a. Platin, Wolfram oder Molybdän in Frage. Das keramische Isolationsmaterial ist i.d.R. Aluminiumoxid.

Derartige Heizelemente können eine Temperatur von ca. 1.000 °C im Dauerbetrieb oder bis zu 1.300 °C für kurzzeitige Temperaturspitzen erreichen. Typische Bauformen sind rohrförmige (tubulare) Heizelemente, sog. Rohrheizer, Stabheizer oder Lamellenheizer, oder flache Heizplatten. Die Bilder 7 und 8 zeigen unterschiedliche Bauformen.



Bild 7: Unterschiedliche Bauformen von Hybridheizelementen



Bild 8: Unterschiedliche Bauformen von Hybridheizelementen

Eingesetzt werden diese Heizelemente dort, wo hohe Prozesstemperaturen benötigt werden:

- Glühzünder (z. B. Gas- oder Ölzündung, Pelletzünder)
- Heizer für höchste Prozesstemperaturen ($> 700\text{ °C}$)
- Heißluftherzeugung
- Werkzeugbeheizung
- Schmelzen / Schweißen / Löten (Heizer für Lötkolben)
- Heizer für die chemische Analytik und Prozesstechnik (Miniöfen, Reaktoren)
- u.v.m.

Hybridheizelemente bieten enormes Potential zur

- Miniaturisierung, da sie Hitze genau dort erzeugen, wo sie benötigt wird.
- Energieersparnis, da der Wärmeverlust an unbeteiligte Bauteile minimal ist (Energieeffizienz!).
- Prozesszeitreduzierung, da einerseits durch die geringe thermische Masse der Keramikheizer die Hitze in kürzester Zeit

erzeugt werden kann und andererseits durch höhere Prozesstemperaturen Prozesse, wie Schweißen oder Schmelzen, noch schneller durchgeführt werden können.

Hybridheizelemente sind im gesamten Temperaturbereich stufenlos regelbar. Aufgrund der linearen Temperaturabhängigkeit des Widerstands kann der Platinheizleiter gleichzeitig die Funktion eines Temperatursensors übernehmen und somit die Temperatur des Heizelements messen und regeln (siehe Bild 9). Die Lebensdauer und Belastbarkeit (Temperaturwechselbeständigkeit, ständiges Aufheizen und Abkühlen) ist sehr hoch. So können bei einer Temperatur von 1.000 °C mehrere tausend Betriebsstunden erreicht werden.

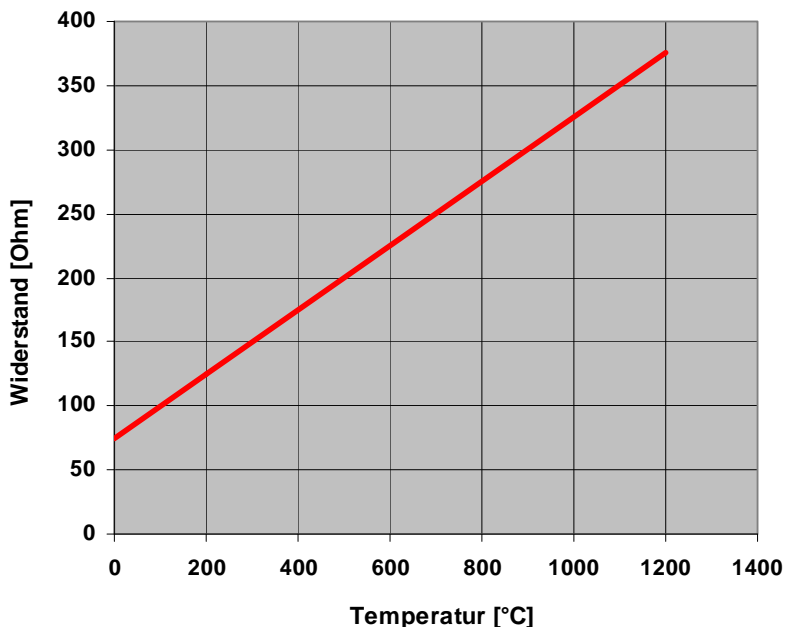


Bild 9: Lineare Temperaturabhängigkeit des Widerstands der Pt-Leiterbahn

Von den Heizelementen werden bei Rauschert verschiedene Bauformen als Standardprodukte in Großserie produziert. Daneben ist es möglich kundenspezifisch „maßgeschneiderte“ Heizelemente zu ent-

wickeln und zu fertigen. Dabei sind die elektrischen Daten (Spannung, Strom), die elektrische Leistung, die Temperatur und die Bauteilabmessungen in weiten Bereichen kundenspezifisch einstellbar.

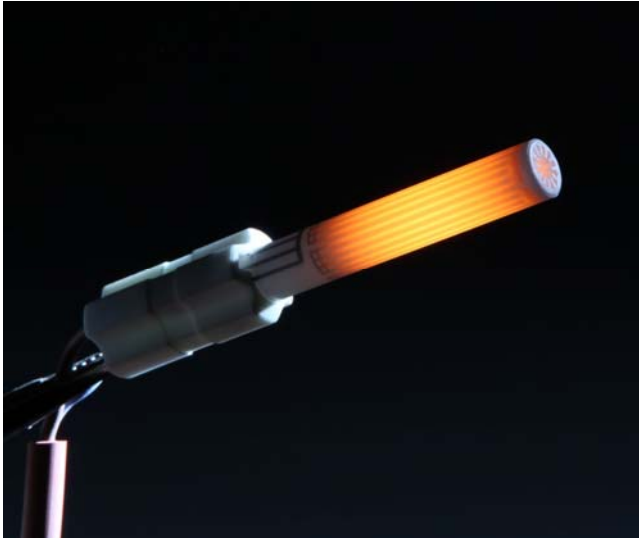


Bild 10: Lamellenheizer zur Erzeugung von Heißluft (> 900 °C)



Bild 11: Lamellenheizer zur Erzeugung von Heißluft (> 900 °C)

Neue Entwicklungen auf diesem Gebiet sind u.a. spezielle Heizelemente zur Luftherhitzung bzw. Gaserwärmung (siehe Bild 10 und 11).

Durch die hohe innere Oberfläche dieser Lamellenheizer wird Luft, die durch das Heizelement geleitet wird, in kürzester Zeit auf extrem hohe Temperaturen erhitzt. So können Lufttemperaturen von über 900 °C mit enormer Energieeffizienz – das heißt sehr niedriger Heizleistung – erzielt werden. Anwendungen sind z. B. das Heißgaslöten oder das Schmelzen von Proben in der chemischen Technik.

5.2.3. Keramik für Zündanwendungen

5.2.3.1. Aluminiumoxid als Hochspannungsisolator



Bild 12: Hochspannungsisolatoren

Aufgrund der hervorragenden elektrischen Isolationseigenschaften von Aluminiumoxid eignet sich dieses Material als Hochspannungsisolator auch bei erhöhten Einsatztemperaturen, wie sie z. B. in Gasbrennern herrschen. Mit einem spezifischen elektrischen Widerstand von $10^{14} \Omega\text{cm}$ bei Raumtemperatur bzw. $10^8 \Omega\text{cm}$ bei 600 °C und einer Durchschlagsfestigkeit von ca. 20 kV/mm wird 95%-iges Alumi-

umoxid (z. B. RAPOX 95) weltweit als Standardmaterial zur Hochspannungsisolation eingesetzt. Bild 12 zeigt verschiedenste Geometrien von Hochspannungsisolatoren. In Bild 13 ist eine Zündelektrode mit Hochspannungsisolator dargestellt.



Bild 13: Zündelektrode

5.2.4. Resümee

Energieeffizientes Heizen und Zünden sind wichtige Ziele für künftige Entwicklungen. Beim Heizen kann dies durch das direkte Beheizen des zu erhitzenden Bauteils erfolgen, ohne dass die Peripherie unnötig mit erwärmt wird („Wärme direkt am gewünschten Bauteil (und nur dort!) erzeugen“). Dies führt zu einem deutlich reduzierten Energiebedarf und zu deutlich verkürzten Prozesszeiten, da eine wesentlich geringere Masse erwärmt wird, die auch entsprechend schneller wieder auskühlt. Dies unterstützt auch den allgemeinen Trend zur Miniaturisierung.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 17) finden sich auf den folgenden Seiten.

Keramische Hochtemperatur- Heizelemente – Heizen und Zünden mit Keramik

Dr. Hannes Kühl
Rauschert GmbH
Steinbach am Wald



5.2 Keramische Hochtemperatur-Heizelemente - Folie 1

Heizen und Zünden mit Keramik

Überblick

- Heizelemente im Überblick
- Keramik für Heizanwendungen
- Keramische Hochtemperatur-Heizelemente
- Keramik für Zündanwendungen

Heizelemente im Überblick



Einsatzgebiete

- Industrie- und Laboröfen
- Vor- und Standheizung
- Chem. Technik
- Löt- und Schweißtechnik
- Sonden- und Sensorbeheizung
- Schmelztechnik (Metallgießerei, Glasöfen...)
- div. Haushaltsgeräte
- Kunststofftechnik (Spritzdüsen, Heißkanal)
- Zündtechnik (Glühzünder)



λ-Sonde von Bosch

Heizelemente im Überblick

Materialien für Heizelemente

- Metalle:
 - NiCr-Legierungen
 - FeCrAl-Legierungen
 - Platin
 - Wolfram, Molybdän usw.
- Graphit
- Keramiken:
 - MoSi₂
 - SiC
 - ZrO₂, dotiert
 - PTC-Keramik
- Mischkeramiken, CMCs
- Dickschichttheizer/Hybridheizer

Keramik für Heizanwendungen



Überblick

- Heizleiterträger aus Cordierit
- Heizpatronen mit MgO
- PTC-Heizelemente
- Hybridheizelemente

Keramik für Heizanwendungen

Anforderungen an Heizleiterträger

- Hohe Temperaturbeständigkeit (hoher Schmelzpunkt)
- Elektrische Isolationsfestigkeit auch bei hohen Temperaturen
- Chemische Beständigkeit in der geforderten Atmosphäre
- Gute Temperaturwechselbeständigkeit



Nur Keramik erfüllt diese Vorgaben!

Heizleiterträger aus Cordierit



Werkstoff

- Dichtes Cordierit C410
- Poröses Cordierit C511, C520, C530

Eigenschaften

- Extrem gute Thermoschockbeständigkeit
- Gute Isoliereigenschaften
- Einsetzbar bis ca. 1300 °C (Spezialitäten bis 1700 °C)



Einsatzgebiete

- Heizleiterträger in Industrieöfen (Aufhängungen)
- Heizelemente (Wickelkörper, Spulenkörper)
- Heißluftgebläse (Mehrlochrohre)
- u.v.m.

Heizpatronen mit MgO

Werkstoff

- Poröses Magnesiumoxid C820



Eigenschaften

- Hoher Ausdehnungskoeffizient ähnlich Stahl!
- Gute Isoliereigenschaften
- Gute Wärmeleitfähigkeit

Einsatzgebiete

Füllmaterial für Heizpatronen aller Art (sog. Brechrohrchen)

→ Isolation des Heizleiters (Ni-Legierung) vom Metallmantel

PTC-Heizelemente



Werkstoff

- Dotiertes Bariumtitanat

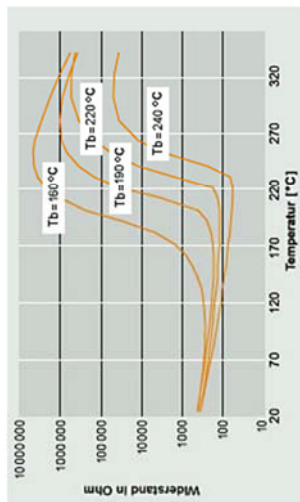
Eigenschaften

- Bis zu einer best. Temperatur (= Curietemperatur) elektrisch leitfähiges Keramikmaterial
- Oberhalb der Curietemperatur elektrisch isolierend

→ somit Selbstbegrenzung auf $T_{\max} =$ Curietemperatur = „PTC-Effekt“

Einsatzgebiete

- Raumluftheizung Kfz
- Haushaltsgeräte
- Schaltschrankheizungen usw.



Hybridheizelemente



Aufbau:

Metallischer Heizleiter ist in Keramik eingesintert

- Metallischer Heizleiter: z.B. Platin, Wolfram, Molybdän
- Keramik: z.B. Al_2O_3

Eigenschaften:

- Elektrische Vollisolation
- 100% Oxidationsschutz + Korrosionsbeständigkeit
- Prozesstemperaturen von 1000 °C (dauerhaft) bzw. 1300 °C (kurzzeitig)



Bauformen:

- Tubular → Rohrheizer, Stabheizer, Wabenheizer
- Flach → Heizplättchen bis 700 °C

Hybridheizelemente

Anwendungen:

Keramikheizer finden dort Anwendung, wo höchste Prozesstemperaturen benötigt werden

- Glühzünder (z.B. Gaszündung, Ölzündung, Pelletzündung)
- Heizer für höchste Prozesstemperaturen (> 700 °C)
- Heißluft erzeugung
- Werkzeugbeheizung
- Schmelzen / Schweißen / Löten (Heizer für LötKolben)
- Heizer für die chemische Analytik und Prozesstechnik (Miniöfen, Reaktoren)
- u.v.m.



Hybridheizelemente



Hybridheizelemente bieten enormes Potential zur:

- **Miniaturisierung**
→ „Hitze direkt am gewünschten Ort erzeugen“
- **Energieersparnis**
→ kaum Wärmeverluste an unbeteiligte Bauteile → **ENERGIEEFFIZIENZ!**
- **Prozesszeitreduzierung**
→ „Hitze in kürzester Zeit erzeugen“ (durch geringe thermische Masse)
→ Durch höhere Temperaturen Prozesse noch schneller ablaufen lassen
(z.B. Schweißen, Schmelzen...)



Hybridheizelemente

Weitere Eigenschaften

- Regelbar im gesamten Temperaturbereich („PTC-Effekt“)
- Sehr hohe Belastbarkeit (Lebensdauer, Temperaturwechselbeständigkeit)
- Heizfläche im Bereich weniger mm² bis ca. 100 cm² einstellbar
- Elektrische Daten (Strom, Widerstand), elektrische Leistung, Temperatur und Bauteilabmessung kundenspezifisch in weiten Bereichen einstellbar
- Übertemperaturstabil

Und der besondere Clou: Sie benötigen keine zusätzlichen Thermosensoren, da das Heizelement gleichzeitig als Temperatursensor dienen kann!



Keramik für Zündanwendungen



Anwendung:

Elektrischer Isolator in Zündsystemen zur Brennstoff- und Kraftstoffzündung, z.B. Zündkerze, Zündelektroden (Gaszündung), Ionisationselektroden, Zündüberwachung



Wesentliche Voraussetzung:

Hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit (ca. 15-20 kV/mm)

Mögliche Materialien:

- Steatit
- Aluminiumoxid

Keramik für Zündanwendungen

Aluminiumoxid RAPOX® 95

Al₂O₃-Gehalt: 95 %

Durchschlagfestigkeit: ≥ 15 kV/mm

Temperaturbeständigkeit: 1700 °C

Hervorragende Isolation des Elektrodrahts vom Halblech auch bei hohen Temperaturen



Resümee

Künftige Trends und Ziele:

- Energieeffizienz:
 - „Wärme direkt am gewünschten Bauteil (und nur dort!) erzeugen!“
 - Leistungseinsparung
 - Prozesszeitenreduzierung
 - Miniaturisierung
- Realisierung durch
- Direktheizsysteme
 - Optimierte Materialien und Materialverbunde = Hybridbauteile