

4. Maschinen- und Anlagenbau

4.1. Keramik contra Korrosion

- Dr. Hans Hoppert
ETEC Technische Keramik GmbH
Lohmar

Die Folien finden Sie ab Seite 368.

4.1.1. Was ist Korrosion?

Verschleiß beschreibt den mechanischen Angriff eines Mediums auf einen festen Körper. Dagegen ist die Korrosion eines Festkörpers durch eine chemische Reaktion mit einem Medium gekennzeichnet. Korrosion wurde ursprünglich nur bei Metallen untersucht, heute wird sie jedoch umfassend bei allen Werkstoffen – also auch bei Polymeren, Glas, Bindemitteln und Keramik festgestellt.

Nach DIN 50900 ist Korrosion wie folgt definiert:

Unter Korrosion versteht man die Reaktion eines Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung dieses Werkstoffes bewirkt und zu einem Korrosionsschaden führen kann.

4.1.2. Korrosion von keramischen Werkstoffen

Im Vergleich zu Metallen gelten keramische Werkstoffe als korrosionsbeständig. Ihre Korrosionsraten sind äußerst gering. Allerdings können bei genauer Betrachtung auch bei keramischen Werkstoffen Korrosionsschäden auftreten. Zwischen den einzelnen Werkstoffgruppen – Silicat-, Oxid- und Nichtoxidkeramik bestehen deutliche Unterschiede im Korrosionsverhalten und in der Korrosionsbeständigkeit.

Während bei Metallen der Korrosionsprozess ein elektrochemischer Vorgang ist, bestimmt bei der Keramik die Löslichkeit des Stoffes die Höhe der Korrosion. Entscheidend für die Höhe der Korrosion sind

chemische Zusammensetzung, die Phasenverteilung und die Mikrostruktur.

Für die Charakterisierung von Korrosionsprozessen bei anorganischen, nichtmetallischen Werkstoffen sind folgende Korrosionsformen in Betracht zu ziehen:

Flächenkorrosion	Der korrosive Abtrag erfolgt gleichmäßig, ausgehend von der Oberfläche.
Selektive Korrosion	Es werden leicht lösliche Bestandteile aus dem Werkstoff herausgelöst.
Fehlstellenkorrosion	Angriffspunkte sind hier Fehlstellen an den Oberflächen wie Risse, Poren und Verunreinigungen.
Intergranulare Korrosion	Der korrosive Angriff erfolgt entlang der Korngrenzen.
Abrasions-/ Erosions-Korrosion	Korrosion und Verschleiß gleichzeitig.

4.1.2.1. Flächenkorrosion und selektive Korrosion

Der von der Oberfläche ausgehende Abbau des Materials durch aggressive Medien setzt einen isotropen Aufbau der Werkstoffe – wie er z. B. in Gläsern vorliegt – voraus. Die Geschwindigkeit des Korrosionsprozesses ist dabei vom Löslichkeitsprodukt abhängig:

Flächenkorrosion

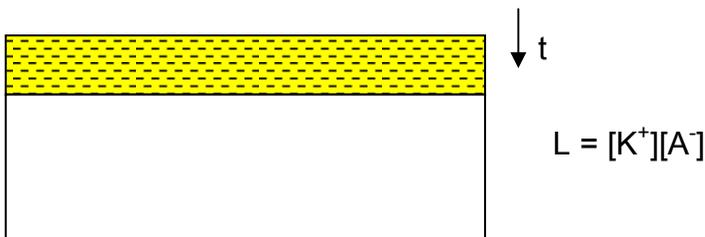


Bild 1: Flächenkorrosion von isotropen Werkstoffen

Gegenüber den Gläsern besitzen keramische Werkstoffe heterogene Gefüge. Bei mehrphasigen Keramiken bestimmen die unterschied-

lichen Löslichkeitsprodukte der Einzelphasen den Korrosionsfortschritt: **Selektive Korrosion**

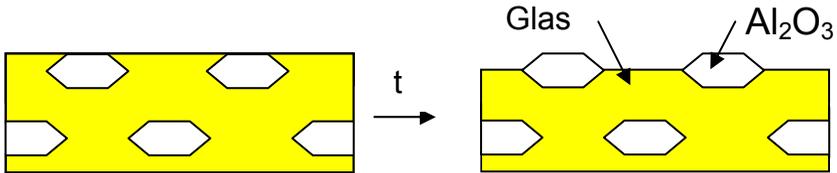


Bild 2: Selektive Korrosion eines Al_2O_3 / Glasverbundes
Abbau der Glasphase: $L_G = \text{hoch}$
Kein Angriff auf den Korund: $L_K = \text{extrem niedrig}$

Ein typischer mehrphasiger Werkstoff ist Porzellan. Neben Quarz, Korund (Al_2O_3) und Mullit als kristalline Phasen liegt Glas als amorphe Phase vor. Dabei kann die Glasphase bis 70% des Volumens betragen.

Durch Anpassung der Glasphase, z. B. durch Variation der chemischen Zusammensetzung, kann ihr Löslichkeitsprodukt drastisch reduziert werden. Deshalb besitzen viele Porzellane wie z. B. Labor-, aber auch Geschirr- und Hartporzellan, eine sehr hohe Korrosionsbeständigkeit. Die gilt auch für spezielle Glasuren und Emailen.

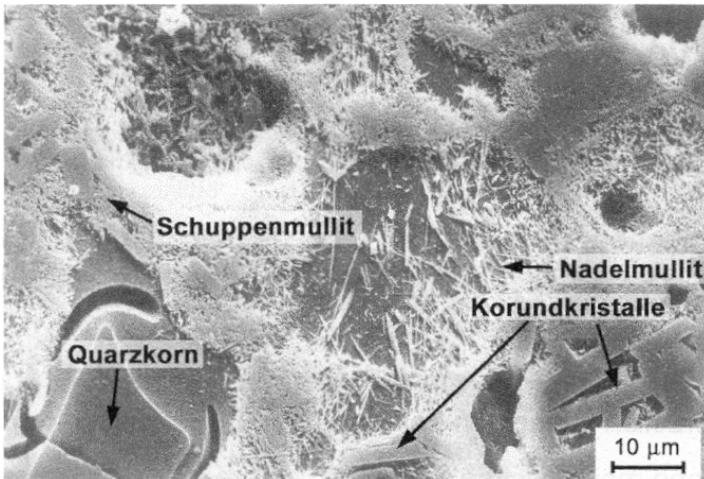


Bild 3: Porzellan als Beispiel für einen mehrphasigen Keramikwerkstoff

4.1.2.2. Fehlstellenkorrosion

Fehlstellenkorrosion kann praktisch bei allen keramischen Werkstoffen auftreten. Handelt es sich um kleine Fehlstellen, sind diese nicht schadensrelevant. Für die Fehlstellen sind in der Regel Verunreinigungen wie Na_2O , CaO , MgO , SiO_2 , Fe_2O_3 u. a. verantwortlich. Sie hängen ab von der Reinheit der Rohstoffe oder sind auf prozesstechnische Fehler zurückzuführen. Beispiele sind u. a. Poren und Kerben.

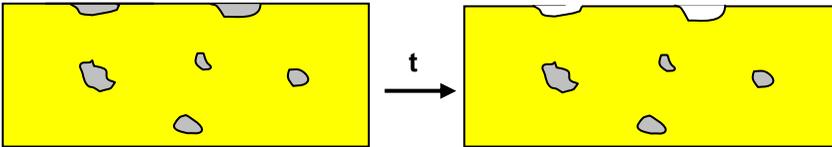


Bild 2: Fehlstellenkorrosion

Ein Korrosionsangriff führt zu Grübchenbildung an der Oberfläche. In den meisten Fällen führt Fehlstellenkorrosion nicht zum Versagen der Bauteile, verschlechtert aber die Oberflächeneigenschaften. Starke Kerben können allerdings bei mechanisch belasteten Bauteilen zum Ausfall führen. Ursache ist in den meisten Fällen unterkritisches Risswachstum.

4.1.2.3. Intergranulare Korrosion

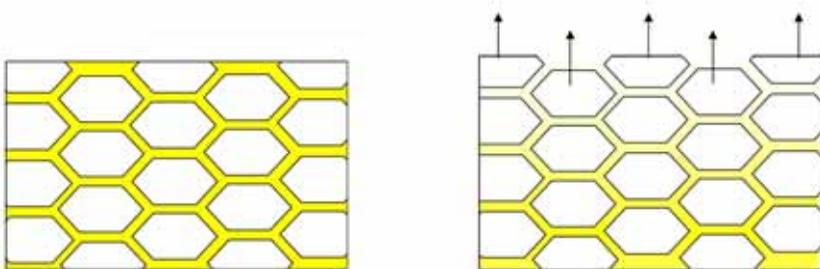


Bild 5: Intergranulare Korrosion von LPS - Werkstoffen

Bei keramischen Hochleistungswerkstoffen ist die **intergranulare Korrosion** der wichtigste Versagensmechanismus. Sie tritt vor allem bei flüssigphasengesinterten, den sogenannten LPS – Werkstoffen, auf. Alle LPS – Werkstoffe besitzen deutlich ausgeprägte Korn-

zwischenphasen, die in der Regel ein höheres Löslichkeitsprodukt als die kristalline Matrix besitzen.

Durch gezielte Variation der Zwischenphase lässt sich das Korrosionsverhalten der Keramik beeinflussen. Möglichkeiten zur Reduzierung der Korrosion sind:

- Änderung der chemischen Zusammensetzung der Glasphase, um ihre Korrosionsfestigkeit zu erhöhen
- Auskristallisierende Gläser durch Bildung von schwerlöslichen kristallinen Phasen, z. B. Mullit, Spinell u. a., um die Diffusionsgeschwindigkeit zu verringern
- Reduzierung der Glasphasen, um die Diffusionskanäle zu verengen
- Einsatz grobkristalliner Werkstoffe

Die Korrosionsgeschwindigkeit ist abhängig vom Löslichkeitsprodukt der Zwischenphase und folgt einem $\sqrt{\text{Zeit}}$ – Gesetz, d. h. das Löslichkeitsprodukt bestimmt die Höhe der Korrosion, die Reaktionsgeschwindigkeit wird durch die Diffusion bestimmt.

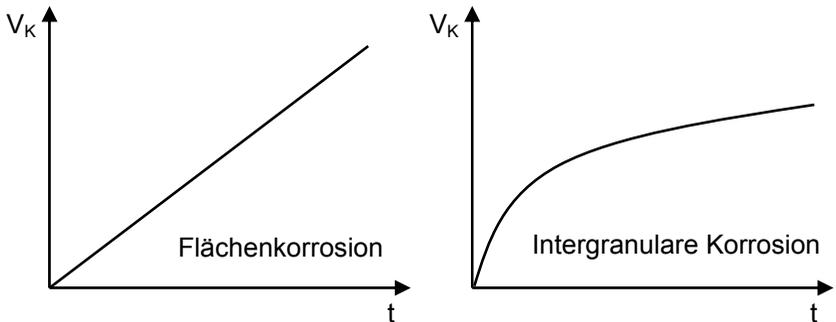


Bild 6: Korrosionsgeschwindigkeit bei Flächen- und Korngrenzendiffusion in Abhängigkeit von der Zeit

Durch den Einsatz von „**trockenphasengesinterten**“ **Werkstoffen** können die Korrosionsraten noch einmal deutlich reduziert werden. Hier liegen praktisch einphasige Werkstoffe vor. Dazu gehören Aluminiumoxidkeramik mit Al_2O_3 – Gehalten $> 99,9\%$ und die SSIC – Werkstoffe (einschließlich der HIP – Qualitäten).

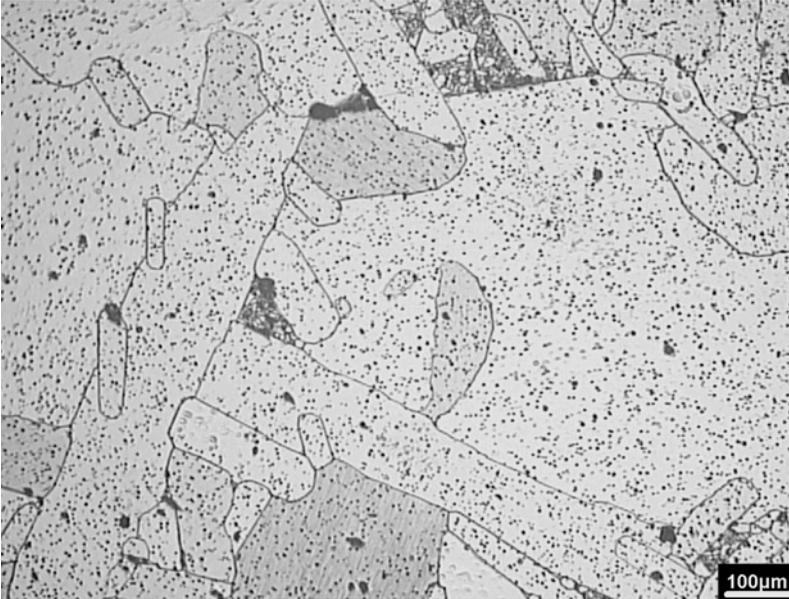


Bild 7: Grobkristalline Tonerde mit Al_2O_3 – Gehalt > 99,9%
Enge Korngrenzen, allerdings zahlreiche intrakristalline Poren

4.1.3. Korrosionsarten

Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen

- **Heißgaskorrosion**
- **Schmelzkorrosion**
- **Korrosion durch Flüssigkeiten**

Bei der **Heißgaskorrosion** ist zu unterscheiden:

- Verhalten der Keramik bei hohen Temperaturen (> 1.000°C) in oxidierender Atmosphäre (Luft)
- Verhalten der Keramik gegen aggressive Gase bzw. Metall-, Metalloxyd- und Salzrelikten aus einem Verbrennungsprozess

Hier ist vor allem das Hochtemperaturverhalten von Keramik in oxidierender Atmosphäre von Bedeutung (siehe Hochtemperaturtechnik).

Heute wird Konstruktionskeramik immer mehr zum Schutz gegen **Schmelzkorrosion** eingesetzt. Vorher war es eine Domäne der Feuerfestkeramik. Schmelzkorrosion ist ein sehr komplexer Prozess, er hängt von einer Vielzahl unterschiedlicher Parameter ab. Die wichtigsten sind:

- Viskosität der Schmelze
- Acidität bzw. Basizität der Schmelze / Chemische Zusammensetzung
- Haupt- und Nebenphasen der Keramik / Chemische Zusammensetzung
- Löslichkeit der Reaktionsprodukte in der Schmelze
- Benetzbarkeit der Keramik durch die Schmelze

Von diesen Parametern ist die Benetzbarkeit von größter Bedeutung. Tritt keine Benetzbarkeit auf, ist auch kein starker Korrosionsangriff zu erwarten. Darum sind Siliciumnitrid-, aber auch Aluminiumtitanat und vor allem Bornitrid gegenüber vielen Metallschmelzen resistent.

Am wichtigsten für Anwendungen im Maschinen- und Anlagenbau ist die **Korrosion in flüssiger Phase**. Hier ist zu unterscheiden zwischen:

- Korrosion in Säuren
- Korrosion in Laugen und geschmolzenen Alkalien
- Hydrothermale Korrosion

Es ist praktisch unmöglich, innerhalb eines Vortrages das komplizierte Thema der Korrosion von Keramik umfassend zu behandeln. Nach diesen relativ theoretischen Ausführungen soll im weiteren noch über Korrosionsmeßmethoden berichtet und Einzelmessungen an definierten Werkstoffen in definierten Medien diskutiert werden.

4.1.4. Messmethoden und Beispiele

Während zahlreiche Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Schmelzkorrosion national und international genormt sind, gibt es für Korrosion in flüssiger Phase keine genormten Prüfverfahren. Das ist umso überraschender, da die hierfür verwendeten Versuchsanordnungen relativ einfach sind. Zur Anwendung kommen:

- Auslagerung von Prüfkörpern bei Zimmertemperatur in korrosiven Medien
- Auslagerung von Prüfkörpern bei höherer Temperatur unter Rückflusskühlung
- Auslagerung von Prüfkörpern im Autoklaven unter Druck und Temperatur

Zur Bestimmung der Korrosionsbeträge werden folgende Bestimmungsmethoden beschrieben:

- Penetrationstest: Bestimmung der Farbeindringtiefe: d (bei Normalatmosphäre oder Druck)
- Bestimmung des Masseverlustes: Δm
- Bestimmung der Abnahme der Verschleißfestigkeit mit dem Ritztest oder dem Strahltest (W_v oder W_m)
- Bestimmung der Biegebruchfestigkeit

Die Bestimmung der Farbeindringtiefe nach dem **Penetrationstest** ist eine schnelle Methode, um die Korngrenzenkorrosion zu bestimmen. Allerdings versagt diese Methode, wenn sich durch den Korrosionsprozess nur enge Korrosionskanäle bilden, die das Eindringen der Farbstofflösung nicht gewährleisten. Angewendet wird die Penetrationmethode vor allem für eine Vorauswahl von unterschiedlichen Werkstoffen. Ein negativer Penetrationstest gibt noch keine umfassende Aussage über die Korrosionsbeständigkeit eines Werkstoffes.

Das am häufigsten angewandte Verfahren zur Beurteilung der Korrosionsbeständigkeit von Keramik ist die Bestimmung des **Masseverlustes** bezogen auf die Oberfläche des Bauteils.

Aus unserer Sicht lässt sich der Korrosionsfortschritt am besten durch die Abnahme der **Biegebruchfestigkeit** oder durch die Abnahme der **Verschleißfestigkeit** beurteilen.

Am Beispiel von unterschiedlichen Aluminiumoxidwerkstoffen wird in den folgenden Diagrammen das Korrosionsverhalten in Abhängigkeit von der Zeit diskutiert und die Ergebnisse bei Verwendung verschiedener Messverfahren gegenübergestellt.

Diagramm 1 zeigt das Korrosionsverhalten von Al_2O_3 gegenüber drei verschiedenen Säuren (HCl , H_2SO_4 , H_3PO_4). Bestimmt wurden die

Korrosionsbeträge durch Messung des Volumenverschleiß als Funktion der Zeit mit dem Strahltest. Die Ausgangstemperatur betrug 20°C. Während bei Schwefelsäure bei den gewählten Konzentrationen (96% und 30% H₂SO₄) die Verschleißbeträge dem erwarteten \sqrt{t} – Gesetz folgen, treten bei der Salz- und Phosphorsäure deutliche Abweichungen auf. Auffallend bei der Phosphorsäure (10%) ist, dass der Korrosionsfortschritt nach ca. 16 Tagen praktisch vollkommen gestoppt wird. Die aus der MgO-, CaO-, Al₂O₃ – Silicatglasphase herausgelösten Aluminiumionen reagieren mit den Phosphationen der Säure bei bestimmten pH-Werten und bilden unlösliches Aluminiumphosphat. Das Aluminiumphosphat verstopft die Diffusionskanäle und verhindert dadurch das Eindringen von frischer Säure. Bei der Salzsäure (5%) ist davon auszugehen, dass sich Kieselsäuresole bzw. – Gele bilden, die den Diffusionsprozess stetig reduzieren.

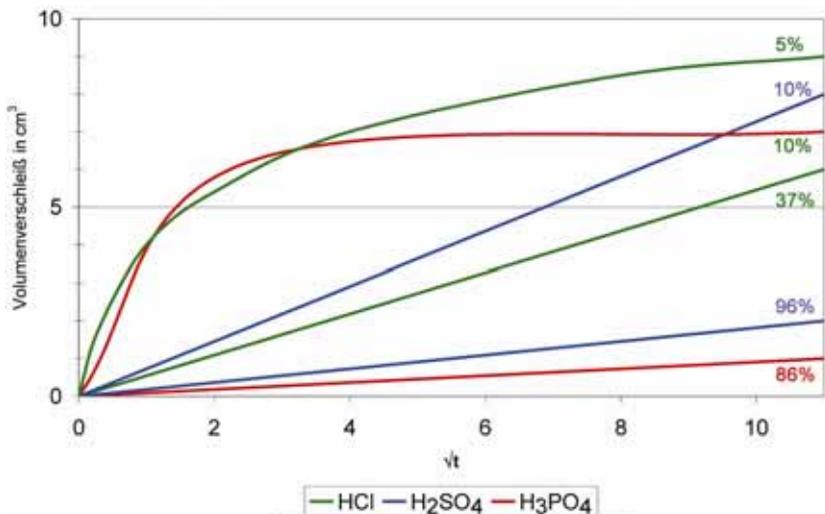


Diagramm 1: Einfluss der Art des Korrosionsmediums an Al₂O₃ - 92

Den Einfluss der Säurekonzentration (**Diagramm 2**) ist am Beispiel der Korrosionspaarung $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{H}_2\text{SO}_4$ dargestellt. Verdünnte Säuren wirken stark korrodierend, während bei konzentrierter Schwefelsäure die Korrosion relativ niedrig liegt.

$\text{Al}_2\text{O}_3 - 92$ ist ein Werkstoff, der sich nicht durch eine hohe Korrosionsfestigkeit auszeichnet. Dieser Werkstoff ist aber gut geeignet, stattfindende Korrosionsprozesse zu beschreiben.

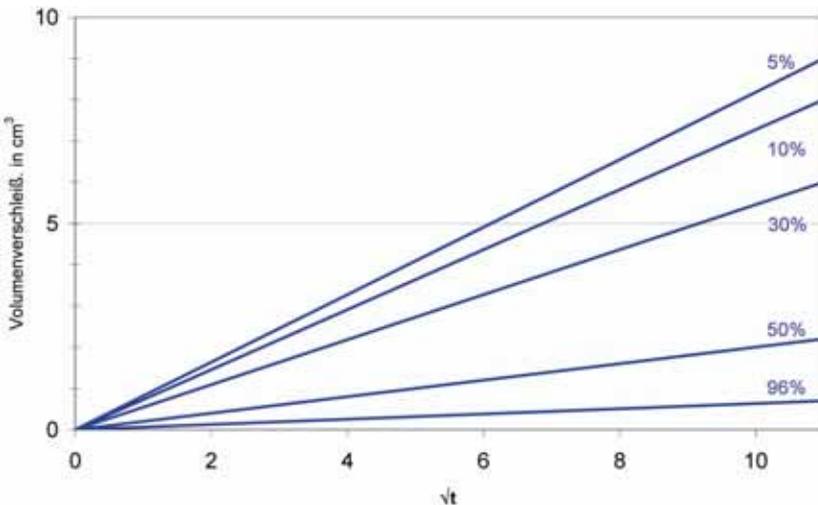


Diagramm 2: Einfluss der Konzentration des Korrosionsmediums am Beispiel von Schwefelsäure

Diagramm 3 zeigt das Korrosionsverhalten von $\text{Al}_2\text{O}_3 - 92$ im Vergleich zu $\text{Al}_2\text{O}_3 - 96$ - Keramik. In Schwefelsäure (10%) ist die Korrosionsbeständigkeit gegenüber $\text{Al}_2\text{O}_3 - 92$ deutlich erhöht. Dieser Werkstoff wurde speziell als Korrosionsschutzwerkstoff gegen Säuren entwickelt.

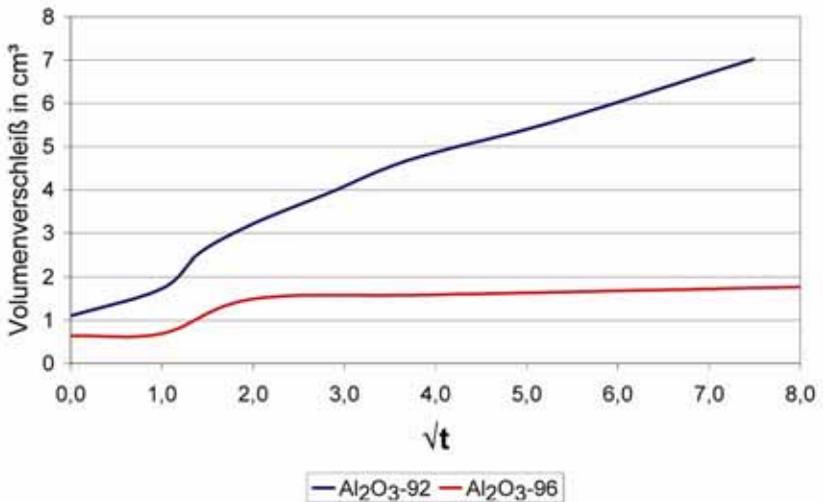


Diagramm 3: Volumenverschleiß nach der Auslagerung in H_2SO_4

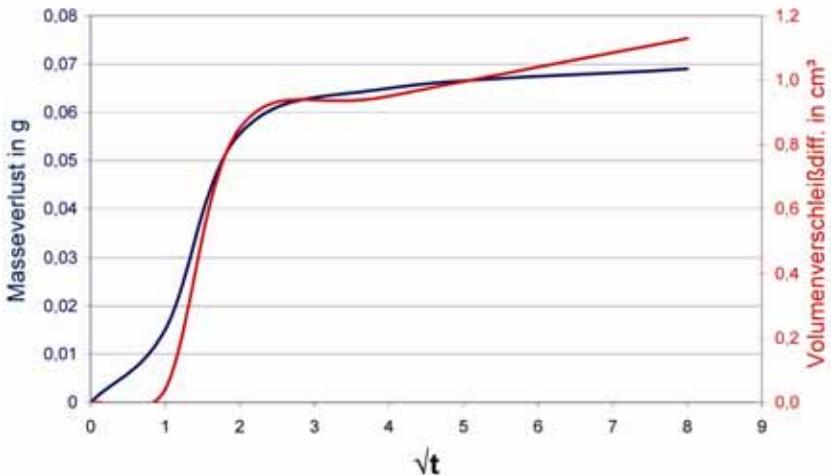


Diagramm 4: Vergleich der Messverfahren bei $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-96}$ nach der Auslagerung in H_2SO_4

Im **Diagramm 4** werden zwei Verfahren zur Messung der Korrosionsfestigkeit am Beispiel $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-96}$ gegenübergestellt. Die Korrosions-

kurven zeigen, dass innerhalb der Messgenauigkeit die Grafen von Masseverlust und Volumenverschleiß praktisch deckungsgleich sind.

Eine wichtige Kennzahl für die Anwendung von Keramik ist der Abfall der Festigkeit durch korrodierende Medien. Während bei $\text{Al}_2\text{O}_3 - 96$ bei Auslagerung in Schwefelsäure (10%) auch nach 100 Tagen bei 20°C kein Abfall der Biegebruchfestigkeit (4-Punkt) feststellbar ist, fällt bei Temperaturen von 80°C die Festigkeit nach 8 Tagen von 310 MPa auf 275 MPa ab, das heißt der Festigkeitsabfall beträgt 11%. Nach 21 Tagen ist kein weiterer Festigkeitsabfall zu erkennen. Die Biegefestigkeiten sind im Weibull-Diagramm praktisch deckungsgleich (Diagramm 5).

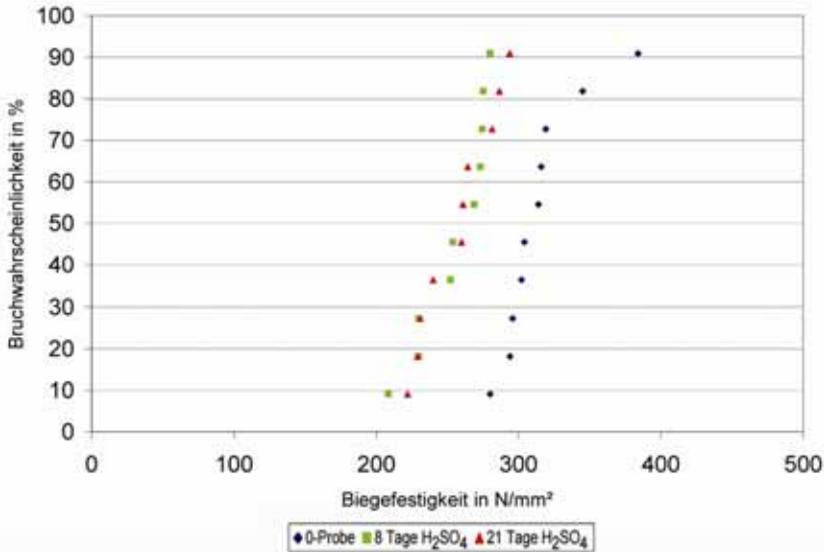


Diagramm 5: $\text{Al}_2\text{O}_3 - 96$ nach der Auslagerung in H_2SO_4 (80°C)

Gegenüber Flusssäure sind alle SiO_2 -haltigen Keramikwerkstoffe nicht resistent. Ausnahmen bilden nur hochreine Aluminiumoxid-Qualitäten und SSIC bzw. HPSIC.

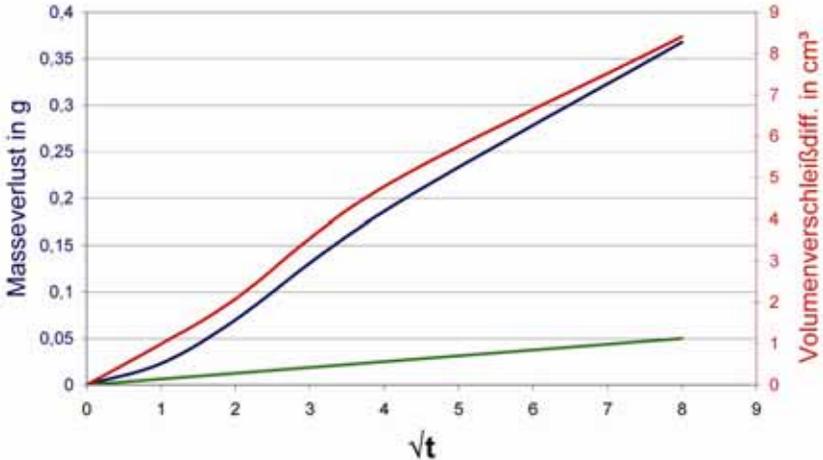
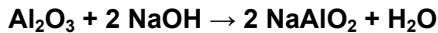


Diagramm 6: Vergleich der Messverfahren bei Al_2O_3 -96 nach der Auslagerung in HF und Masseverlust von GKA ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 99,7\%$) (grüne Linie)

Während der Masseverlust von GKA mit ca. 0,05 f relativ niedrig liegt, fällt die Festigkeit bereits nach einem Tag deutlich ab. Ursache ist die Schwächung der Korngrenzen. Durch Heißpressen lässt sich die Korngrenzenfestigkeit deutlich erhöhen.

Gegen Laugen (z. B. 30% NaOH) ist die Korrosionsbeständigkeit von Al_2O_3 - Werkstoffen relativ hoch. Mit Zunahme der Temperatur bzw. in Alkalischmelzen tritt deutliche Korrosion durch Bildung von Natriumaluminat auf:



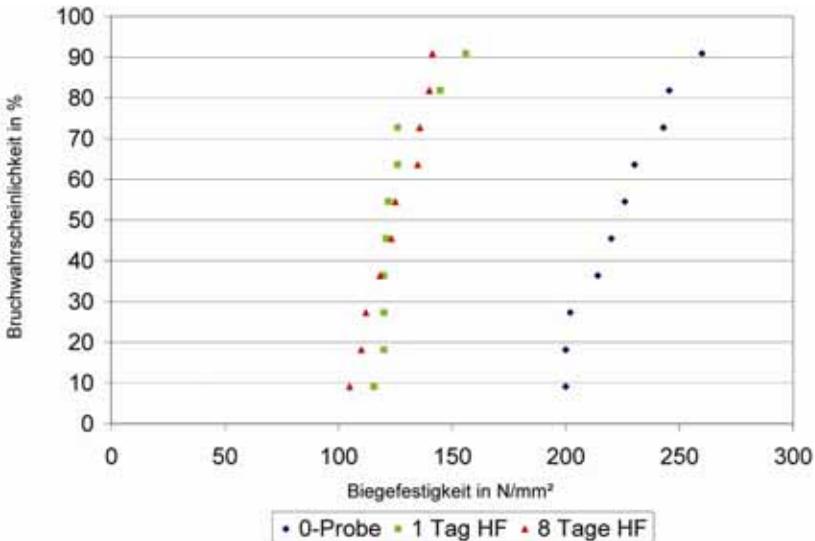


Diagramm 7: Korrosionsverhalten von Aluminiumoxid gegenüber NaOH

4.1.5. Sintertechnik und ihr Einfluss auf das Korrosionsverhalten

Beim Sintern von keramischen Werkstoffen werden im wesentlichen zwei unterschiedliche Techniken angewendet:

- Sintern mit flüssiger Phase (LPS)
- Festphasensintern (S)

Beim Flüssigphasensintern ist während des Sinterprozesses immer eine Schmelzphase vorhanden. Darum sind viskoses Fließen, Lösungs- und Kristallisationsprozesse im System die wesentlichen Mechanismen. Die Sintertemperaturen können bei Vorliegen von flüssigen Phasen gegenüber Festphasensintern gesenkt werden.

Beim Festphasensintern liegt keine Flüssigphase vor. Bestimmende Reaktionsmechanismen sind: Volumendiffusion, Korngrenzendiffusion und in seltenen Fällen (z. B. RSIC) Verdampfungs,- und Kondensationsprozesse.

Die für korrosive Anwendungen wichtigsten Keramikwerkstoffe sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

LPS – Werkstoffe

Al_2O_3 (88 - 99%)

LPSIC

LPSN

LPBC

S- und HP – Werkstoffe

S- Al_2O_3

SSIC

HPDSIC

HPSN

SBC

HPBC

Tabelle 1: Wichtige Werkstoffe für Korrosive Anwendungen

Grundsätzlich sind im Korrosionsverhalten alle Festphasen – Sinterwerkstoffe den LPS – Werkstoffen überlegen. So besitzen speziell die SSIC und die HPSIC – Werkstoffe ausgesprochen hohe Korrosionsfestigkeiten. SSIC und S- Al_2O_3 (> 99,98%) sind die einzigen Werkstoffe, die gegen Flusssäure resistent sind. Die Korrosionsfestigkeit der LPS - Werkstoffe liegt deutlich niedriger. Ihr Korrosionsverhalten wird bestimmt durch das Löslichkeitsprodukt der Sekundärphase.

Grundlegende Untersuchungen zeigen, dass Unterschiede in den Korrosionsmechanismen in Abhängigkeit von der Korngrenzenphase, den Konzentrationen der korrodierenden Medien und der Temperatur auftreten. Durch Optimierung der Werkstoffe können dabei gegenüber herkömmlichen Werkstoffen Verbesserungen um mehrere Größenordnungen erreicht werden. Wege hierfür sind Stabilisierung des Glasnetzwerkes der amorphen Korngrenzenphasen, Bildung von Schutzschichten durch die Reaktionsmedien und Einbau unlöslicher Komponenten.

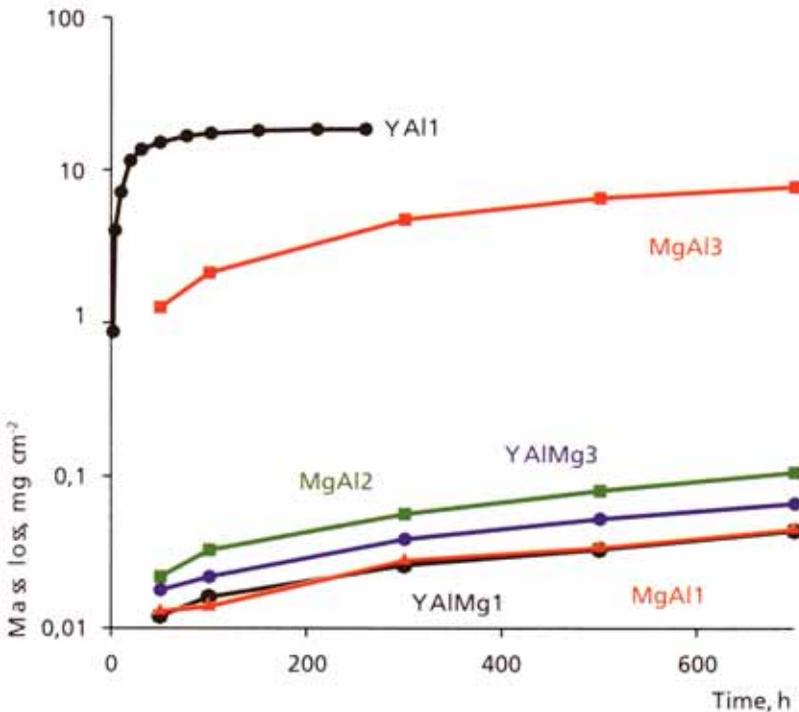


Diagramm 9: Gewichtsverlust von SN - Keramiken mit unterschiedlichen Additiven während der Korrosion in 1n H₂SO₄ bei 90°C (Fraunhofer IKTS Annual Report)

Hier zeigen vor allem Siliciumnitride recht interessante Eigenschaften. Ursache hierfür ist die hohe Stabilität des Si₃N₄ – Gerüsts, das selbst nach Herauslösen der Korngrenzenphase noch Festigkeiten von 400 bis 500 MPa aufweist. In Säuren bilden sich an der Oberfläche der Kristalle zusätzliche Passivierungsschichten, die den Korrosionsangriff deutlich reduzieren.

Außerdem ist noch anzumerken, dass SISiC (siliciuminfiltriertes SiC) praktisch unlöslich in Säuren ist. Ähnlich wie beim metallischen Aluminium wird die Siliciummetallphase durch Passivierung vor einem Säureangriff geschützt.

Hydrothermale Korrosion, d. h. Korrosion in Wasser bzw. Wasserdampf bei Temperaturen > 100°C ist ein Sonderfall der Korrosion. Hydrothermale Korrosion tritt praktisch bei allen Keramikwerkstoffen

(außer SISIC) auf. Allerdings sind die Korrosionsraten bei niedrigen Temperaturraten relativ gering. Sie steigen aber mit höheren Temperaturen stark an. Davon sind vor allem mikrokristalline Werkstoffe betroffen, während sich makrokristalline Gefüge als recht resistent erweisen. Trinkwasser oder Salzlösungen greifen alle Keramiken deutlich weniger an als destilliertes Wasser. Bei Aluminiumoxiden, aber auch bei Siliciumnitriden kommt es bei höheren Temperaturen oberhalb 250°C unter hydrothermalen Bedingungen zum verstärkten Auslösen der Korund- bzw. Siliciumnitridphasen.

Ein spezieller Prozess ist die Korrosion von Zirkonoxid – Keramik (PSZ) in feuchter Atmosphäre. Bereits bei mäßigen Temperaturen (< 300°C) tritt ein deutlicher Festigkeitsverlust auf, verbunden mit der Ausbildung von Mikrorissen. Man kann hier davon ausgehen, dass am Anfang des Korrosionsprozesses eine Auflösung der Korngrenzen erfolgt. Die darauf folgende Phasenumwandlung von tetragonal zu monoklin ist mit einer deutlichen Volumenvergrößerung verbunden und führt dadurch zur Bildung von Mikrorissen. Sie bilden für die Korrosion weitere Ansatzpunkte und führen dadurch relativ kurzfristig zum Totalausfall des Bauteils.

Von Anwendern wird häufig die Frage gestellt: Wie verhält sich Keramik unter hydrothermalen Bedingungen in Verbindung mit aggressiven Gasen wie HCl, SO₂, NO_x, Cl₂ etc? Hierüber gibt es kaum aussagekräftige Werte. Eigene Untersuchungen zeigen, dass unterschiedliche Aluminiumoxidqualitäten in hydrothermalen SO₂ – Atmosphäre ähnliche Korrosionsraten zeigen wie bei der Korrosion mit heißer Schwefelsäure. Auch bei nichtoxidischen Werkstoffen ist eine Oxidation der Carbide und Nitride durch Chlor nicht auszuschließen. In diesem Bereich besteht auch heute noch ein großer Entwicklungsbedarf – auch für die Wissenschaft.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 24) finden sich auf den folgenden Seiten.

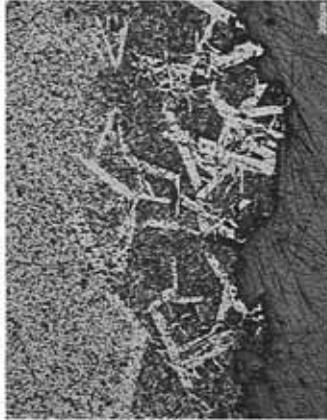
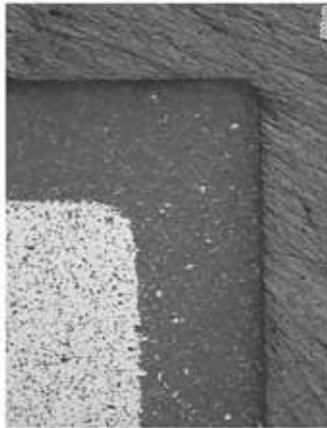
Maschinen- und Anlagenbau

Keramik contra Korrosion

Dr. Hans Hoppert
ETEC Gesellschaft für Technische Keramik mbH
Lohmar



Keramik contra Korrosion



Dr. Hans Hoppert
ETEC Gesellschaft für Technische Keramik mbH
Lohmar

Keramik contra Korrosion



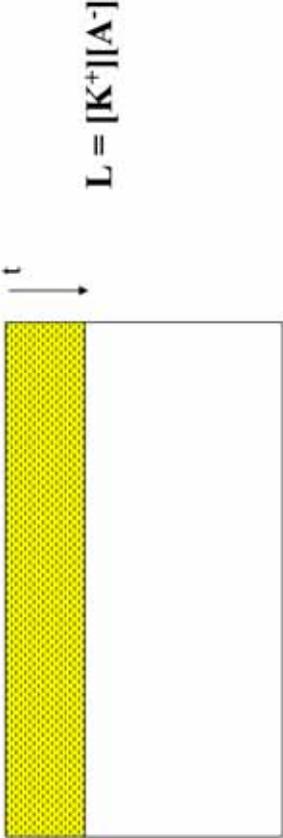
Nach DIN 50900 ist Korrosion wie folgt definiert:

Unter Korrosion versteht man die Reaktion eines Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung dieses Werkstoffes bewirkt und zu einem Korrosionsschaden führen kann.

Korrosionsformen

Flächenkorrosion	Der korrosive Abtrag erfolgt gleichmäßig, ausgehend von der Oberfläche
Selektive Korrosion	Es werden leicht lösliche Bestandteile aus dem Werkstoff herausgelöst
Fehlstellenkorrosion	Angriffspunkte sind hier Fehlstellen an den Oberflächen wie Risse, Poren, Verunreinigungen
Intergranulare Korrosion	Der korrosive Angriff erfolgt entlang der Korngrenzen
Abrasions-/ Erosions-Korrosion	Korrosion + Verschleiß gleichzeitig

Flächenkorrosion von isotropen Werkstoffen

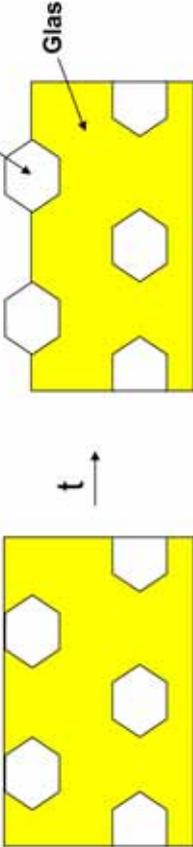


$L = [K^+] [A^-]$

think ceramics
TECHNISCHE WERKSTOFFE

4.1. Korrosion - Folie 5

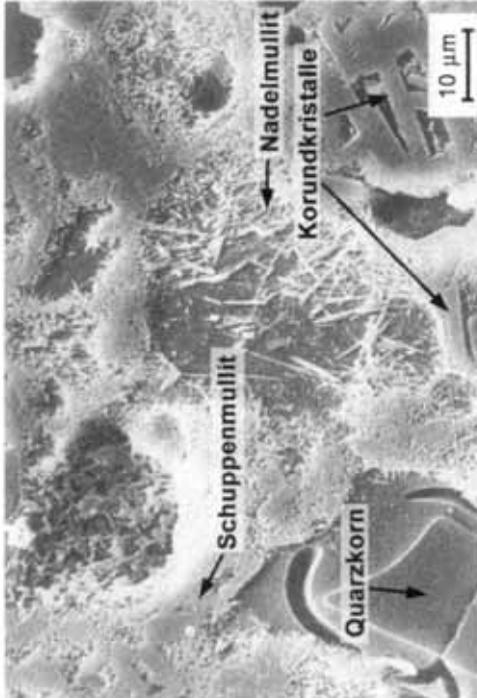
Selektive Korrosion



Selektive Korrosion eines Al_2O_3 / Glasverbundes
Abbau der Glasphase: $L_G = \text{hoch}$
Kein Angriff auf den Korund: $L_K = \text{extrem niedrig}$

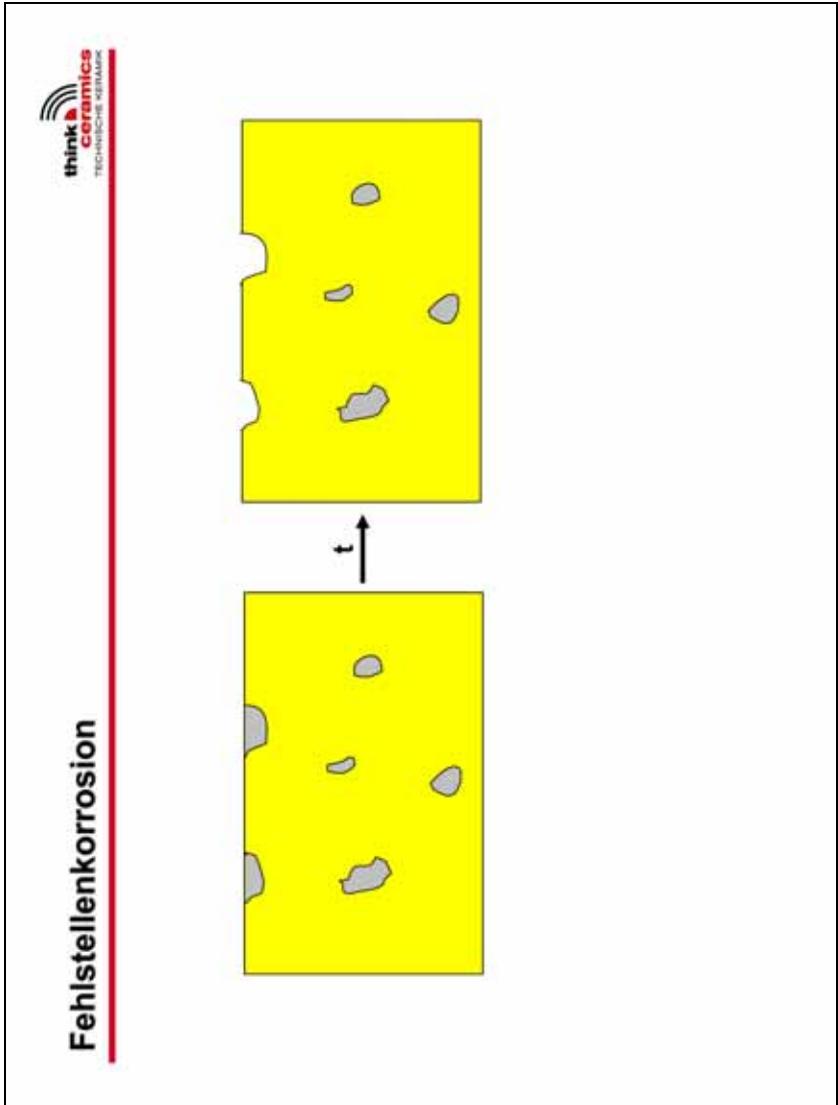
think
ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

Mehrphasiger Keramikwerkstoff

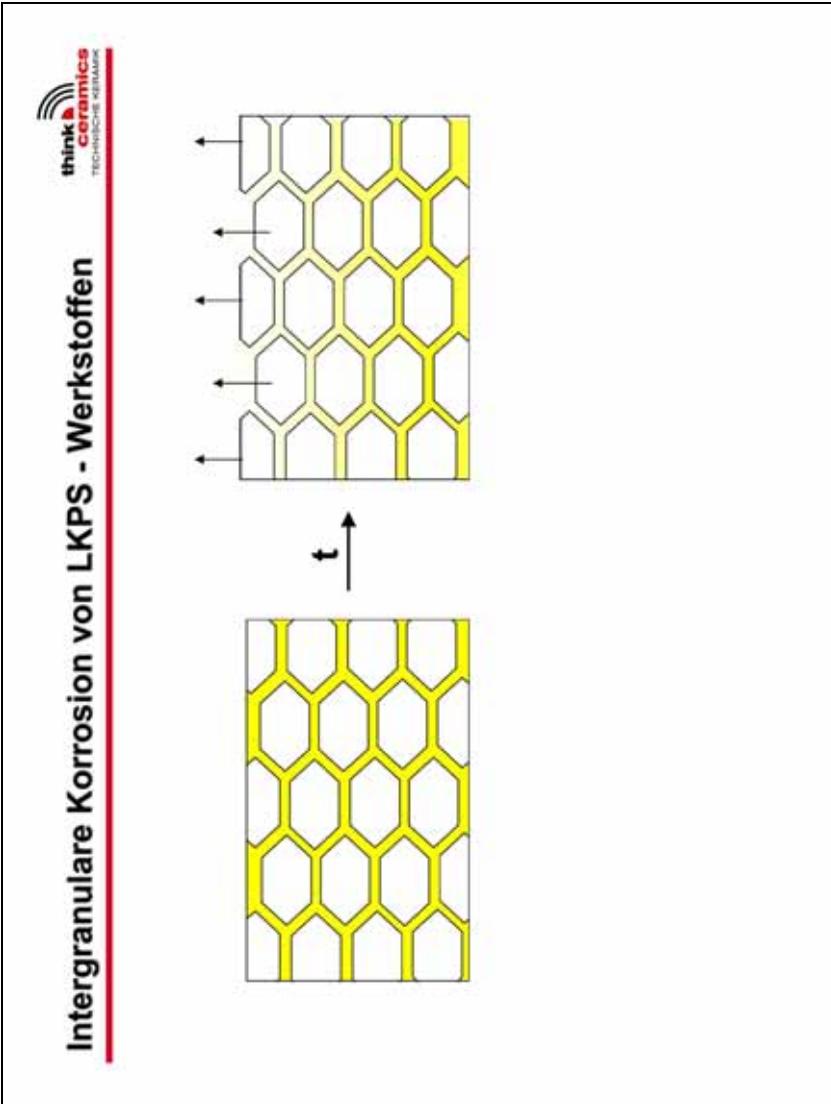


Porzellan als Beispiel für einen mehrphasigen Keramikwerkstoff

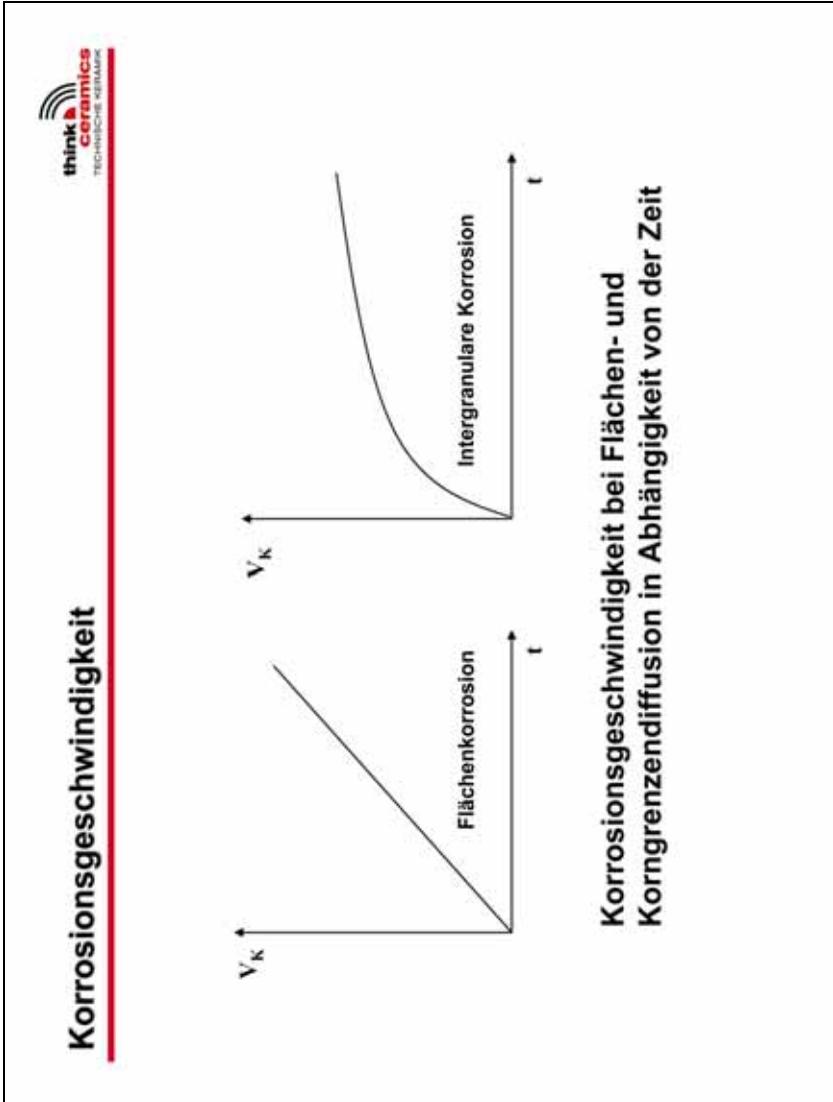
4.1. Korrosion - Folie 7



4.1. Korrosion - Folie 8

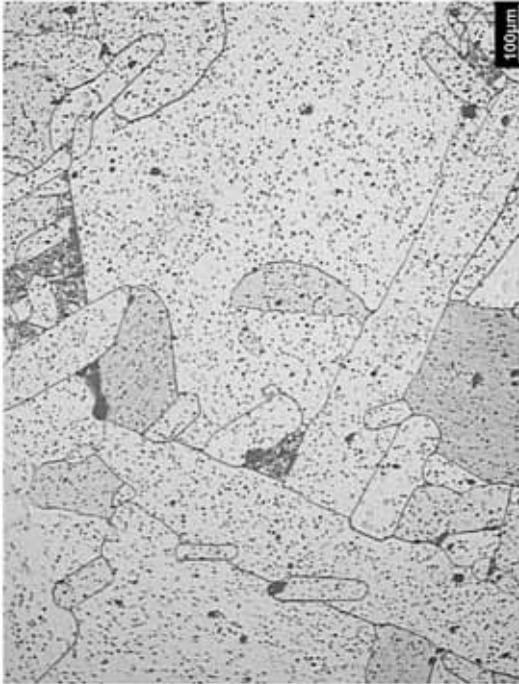


4.1. Korrosion - Folie 9



4.1. Korrosion - Folie 10

Beispiel Aluminiumoxid



Grobkristalline Tonerde mit Al_2O_3 -Gehalt > 99,9%:

Enge Korngrenzen, allerdings zahlreiche intrakristalline Poren

Korrosionsarten

- **Heißgaskorrosion**
- **Schmelzkorrosion**
- **Korrosion durch Flüssigkeiten**

Korrosion in flüssiger Phase

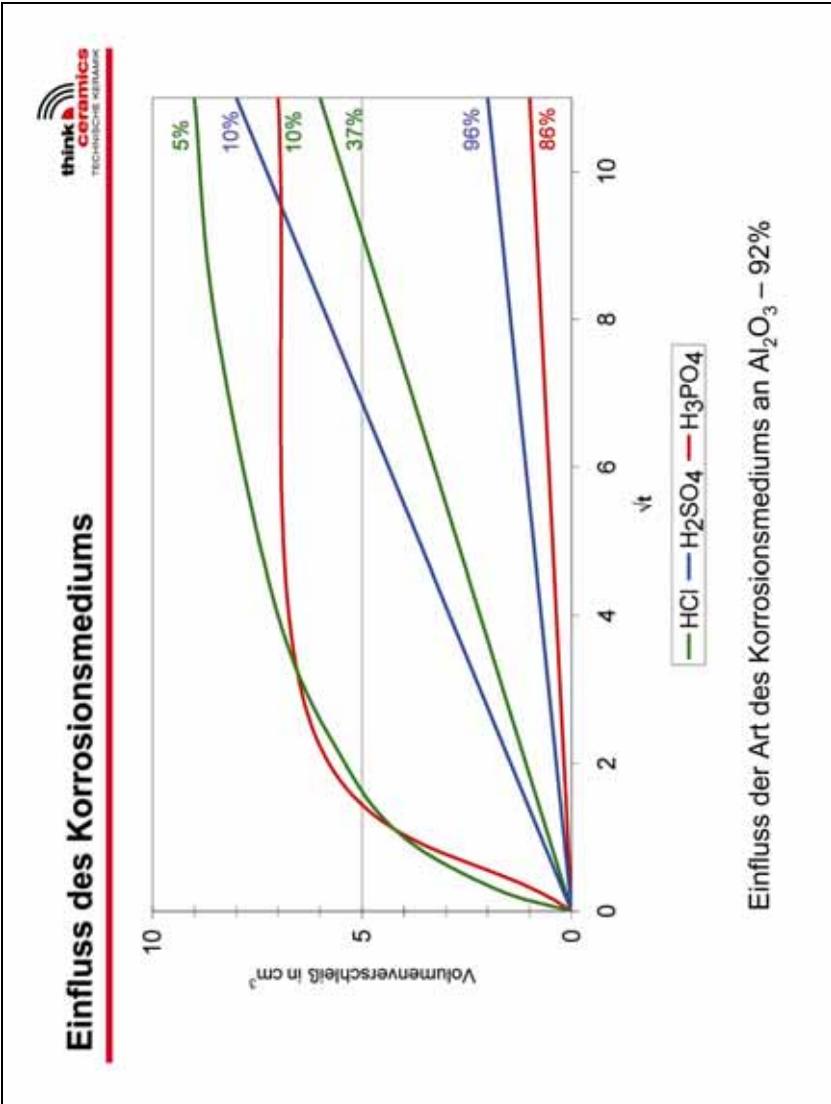


- **Korrosion in Säuren**
- **Korrosion in Laugen und geschmolzenen Alkalien**
- **Hydrothermale Korrosion**

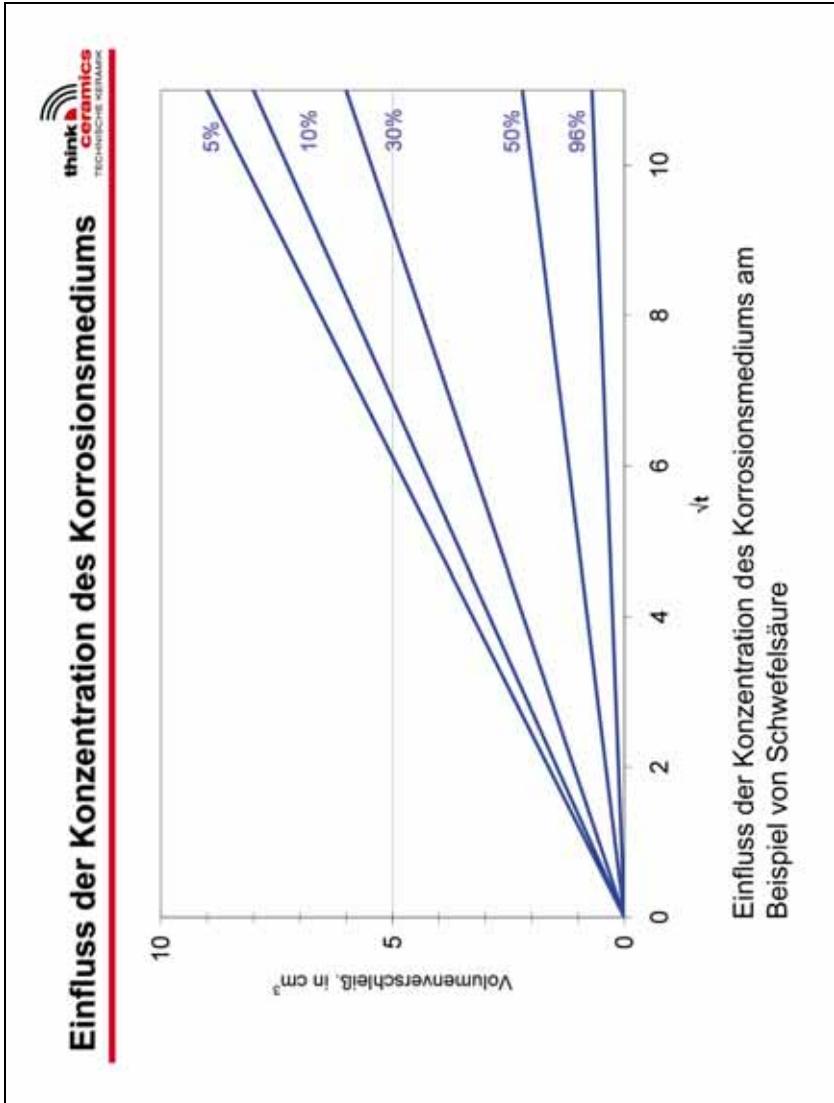
Keramik contra Korrosion

Versuchsanordnungen und Bestimmungsmethoden

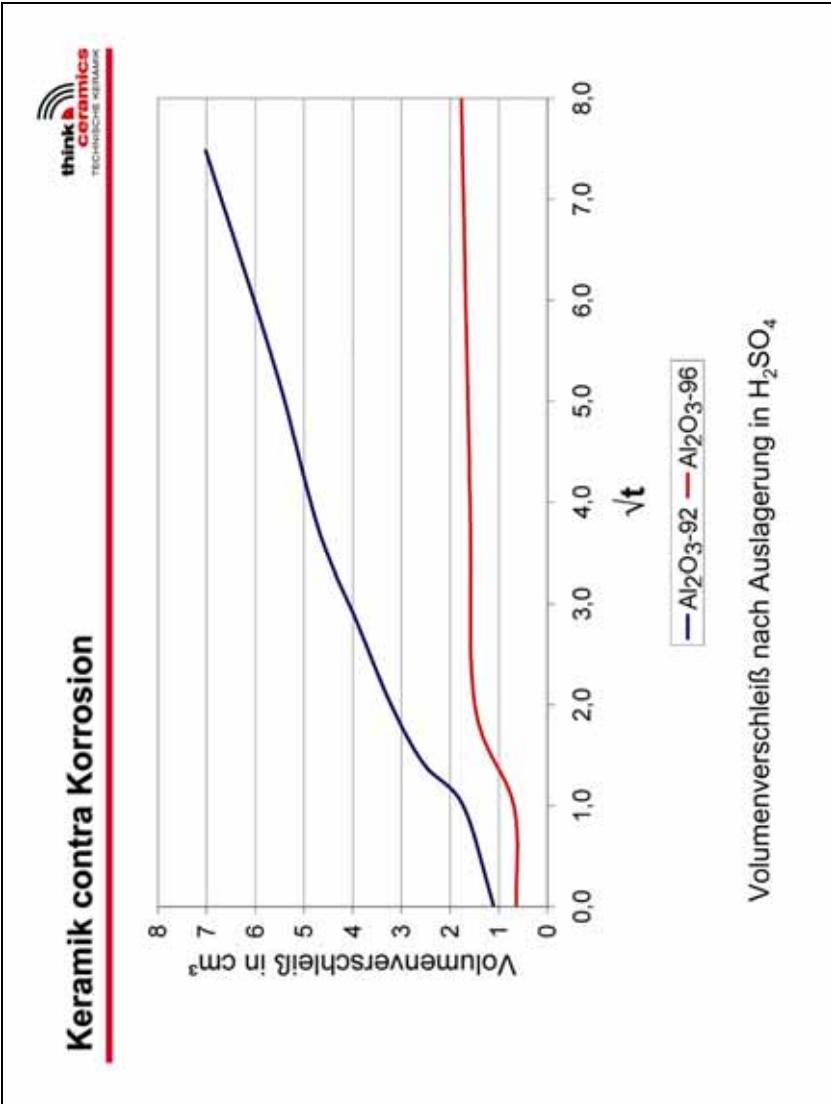
- Auslagerung von Prüfkörpern bei RT in korrosiven Medien
- Auslagerung von Prüfkörpern bei höherer Temperatur unter Rückflusskühlung
- Auslagerung von Prüfkörpern im Autoklaven unter Druck und Temperatur
- Penetrationstest: Bestimmung der Farbeindringtiefe
- Bestimmung des Masseverlustes Δm
- Bestimmung der Abnahme der Verschleißfestigkeit (Ritztest W_v oder Strahltest W_m)
- Bestimmung der Biegebruchfestigkeit



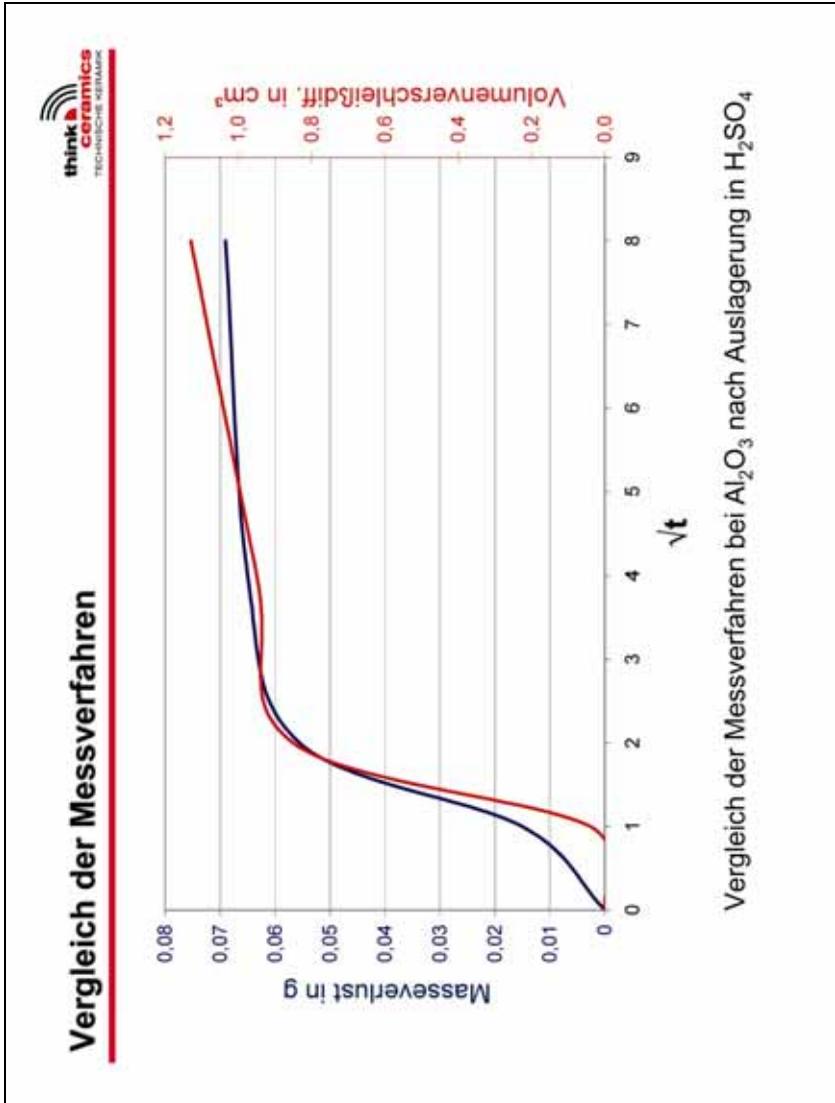
4.1. Korrosion - Folie 15



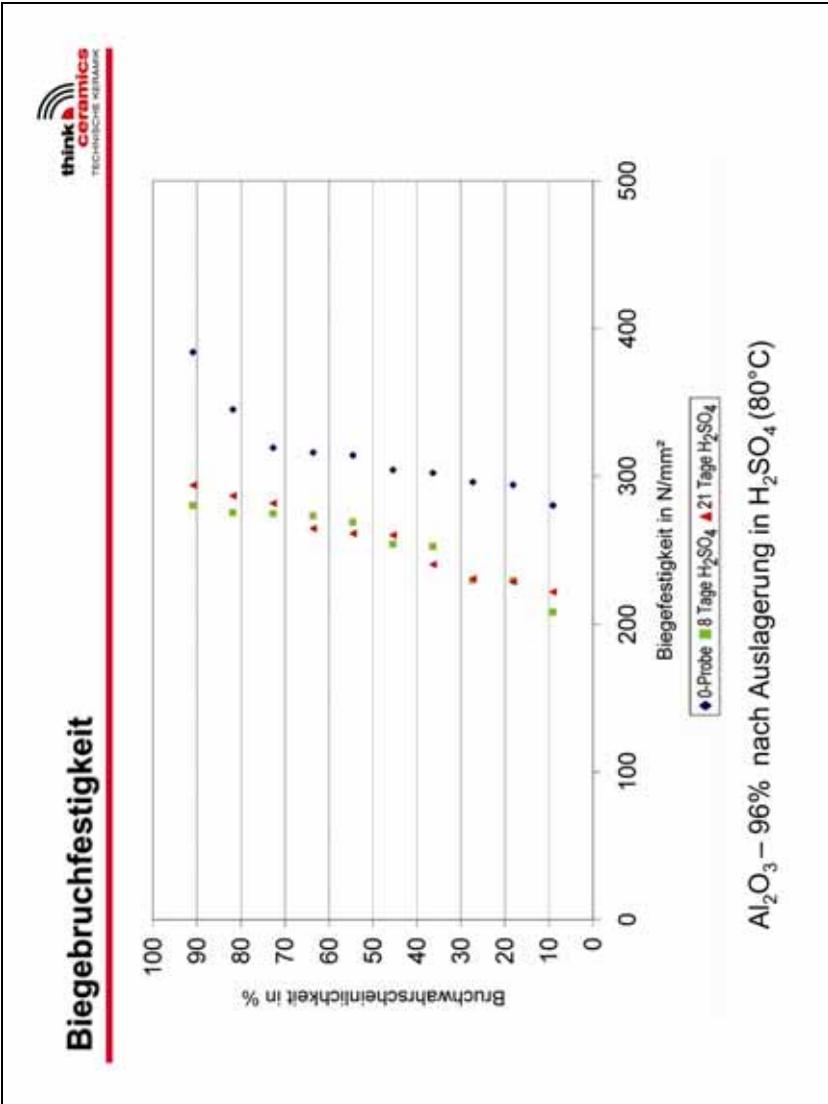
4.1. Korrosion - Folie 16



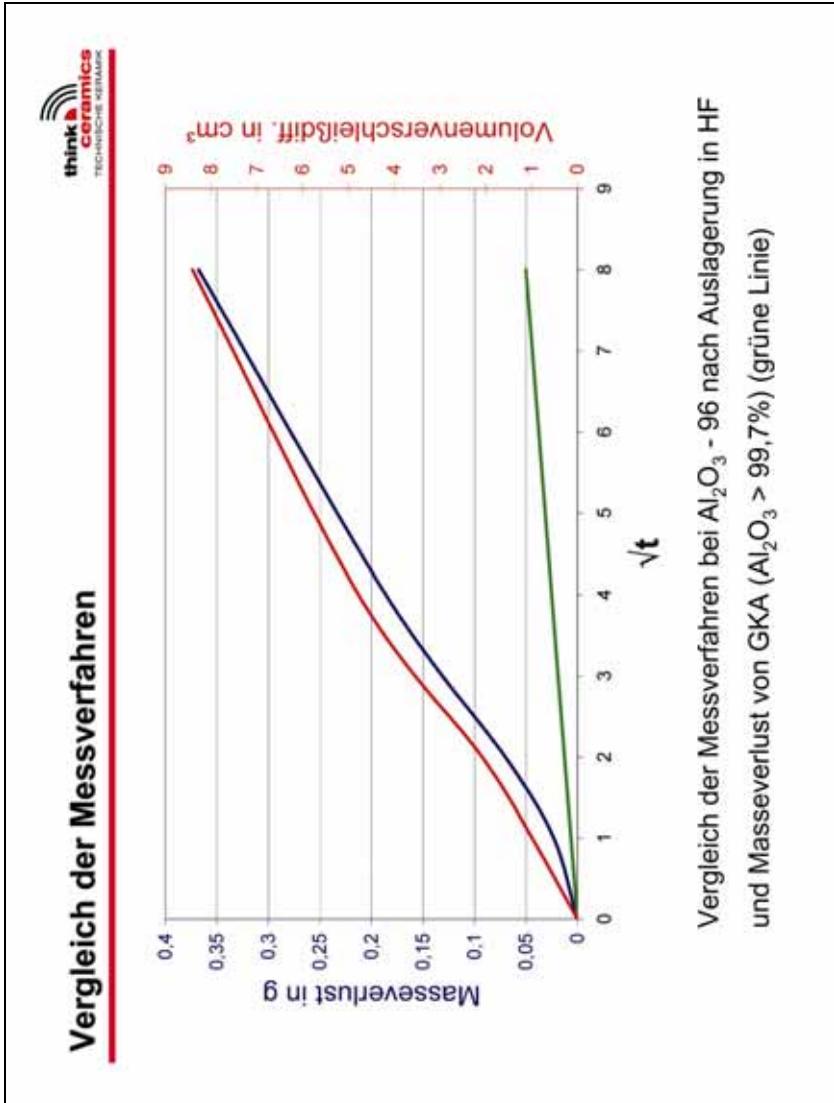
4.1. Korrosion - Folie 17



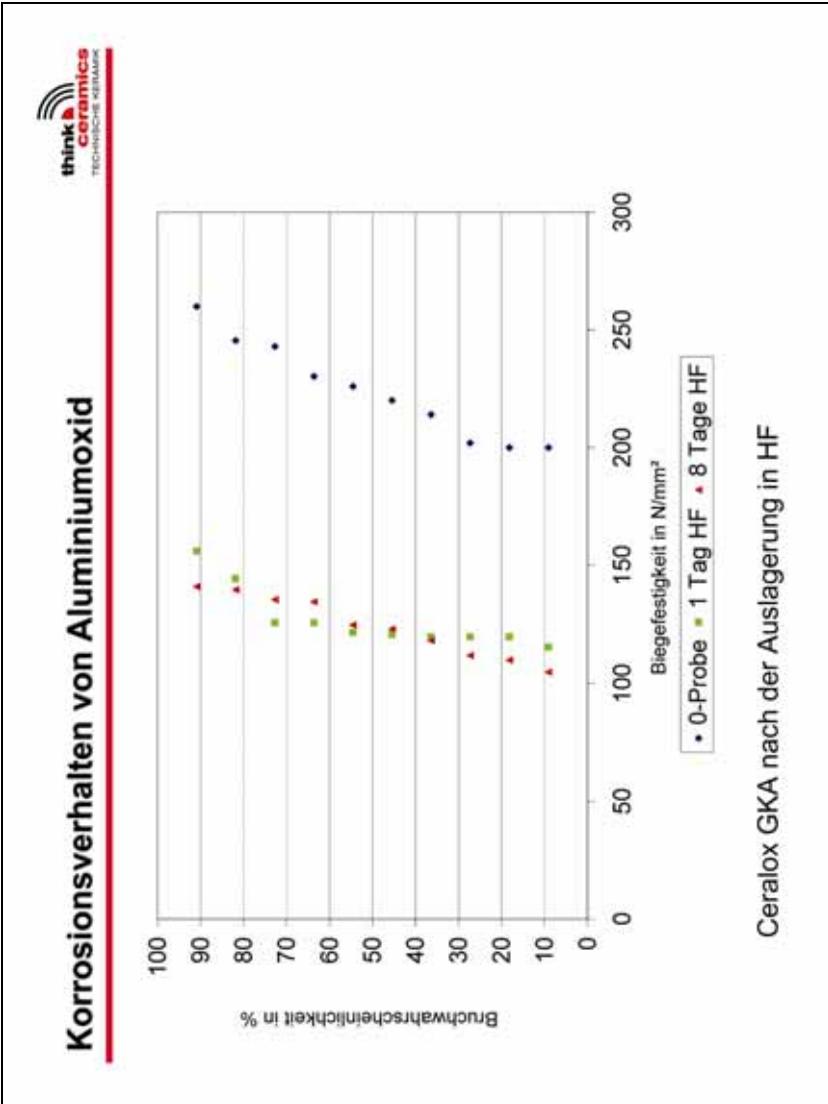
4.1. Korrosion - Folie 18



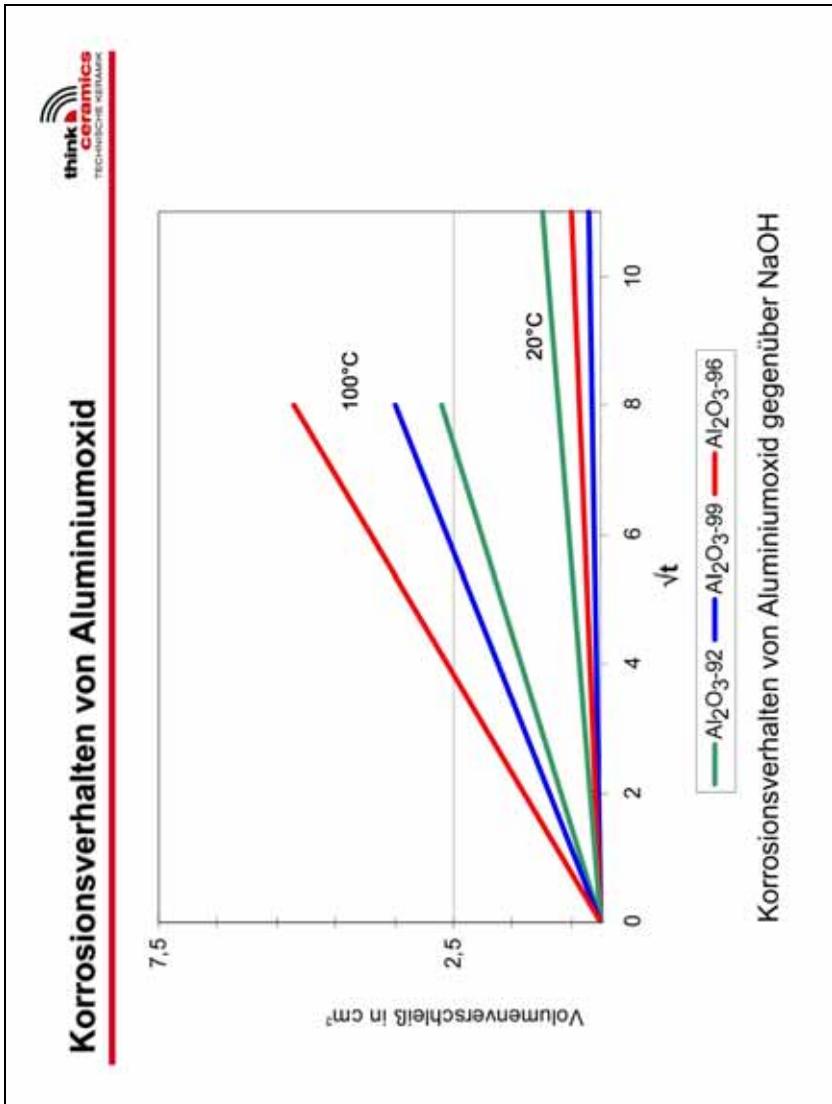
4.1. Korrosion - Folie 19



4.1. Korrosion - Folie 20



4.1. Korrosion - Folie 21



4.1. Korrosion - Folie 22

Keramikwerkstoffe für korrosive Anwendungen



LPS - Werkstoffe S- und HP - Werkstoffe

Al_2O_3 (88 - 99%)

LPSSIC

LPSSN

LPSBC

S - Al_2O_3

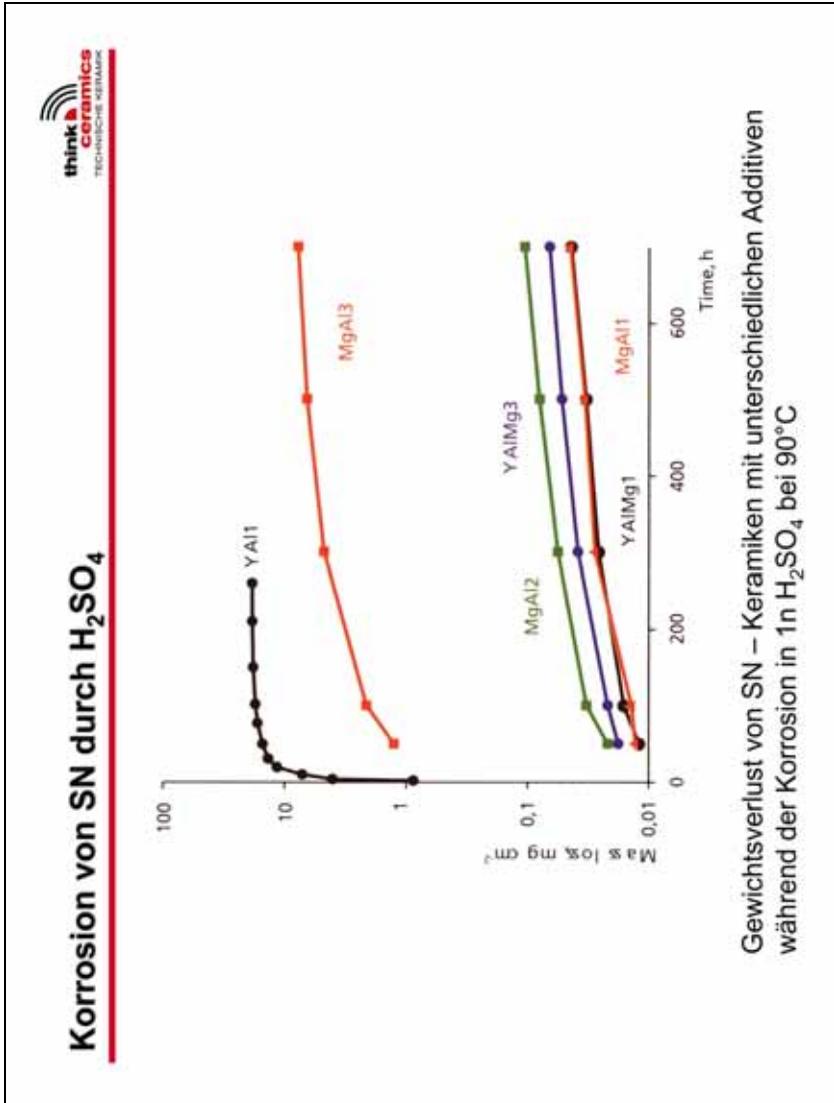
SSIC

HPSIC

HPSN

SBC

HPBC



4.1. Korrosion - Folie 24