

4.4 Aus 40 Jahren – Ein Leben mit und für Keramik: Beispiele zum erfolgreichen Einsatz

- Dr. Hans Hoppert
ETEC Gesellschaft für Technische Keramik mbH
Lohmar

Die Folien finden Sie ab Seite 584.

4.4.1. Keramik – Philosophie oder Wissenschaft

Wissenschaft und Technik stehen in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess. Dabei führt der Weg zu immer anspruchsvolleren, intelligenteren Technologien. Mit derselben Dynamik steigen auch die Ansprüche, die an moderne Werkstoffe gestellt werden. Gefordert werden unter anderem: höhere Festigkeiten für leichte, materialsparende Konstruktionen, höhere Qualität verbunden mit mehr Sicherheit und längere Lebensdauer. Schließlich spielt die Wirtschaftlichkeit eine ganz entscheidende Rolle. Keramische Werkstoffe haben in diesem Innovationsprozess einen wichtigen Beitrag geleistet.

Darum begegnet uns Technische Keramik auf Schritt und Tritt. Ohne keramische Isolierteile würden viele Haushaltsgeräte nicht funktionieren. Ebenso wäre ohne Isolatoren und Sicherungen aus Keramik eine zuverlässige Stromversorgung nicht denkbar. Keramische Substrate und Bauteile bilden die Grundlage in allen Bereichen der Elektronik. Im Kraftfahrzeug regeln sie den Energieverbrauch, bieten Komfort und Sicherheit. Im Anlagen- und Maschinenbau sorgen sie als Gleit- und Regelelemente für verschleiß- und korrosionsfreie Funktion und hohe Standzeiten. Bei Industrieöfen und in der Hochtemperaturtechnik ist Keramik als Konstruktions- und Isolationswerkstoff unverzichtbar.

Die Wissenschaft hat die Keramik erst relativ spät entdeckt. Noch vor ca. 50 Jahren beruhte das keramische Wissen weitgehend auf Erfahrung. Erst die Einführung neuer physikalischer und chemischer Analyseverfahren erlaubte ein tieferes Verständnis der Zusammenhänge zwischen Rohstoffeigenschaften, der Formgebungsprozesse

und der Sintertechnik auf die Eigenschaften der daraus resultierenden Werkstoffe.



Bild 1: Einfluss von Rohstoff und Prozesstechnik auf das Gefüge der Keramik

Das Gefüge bestimmt im Wesentlichen die Eigenschaften eines keramischen Bauteils.

Wichtige Schritte auf dem Weg von der Empirie zu einer wissenschaftlichen Betrachtung waren:

- Modellierung der Sinterprozesse: Nass- und Trockensinterung
- Die Entwicklung und Anwendung der Bruchmechanik
- Anwendung von zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden
- Finite – Elemente – Methoden zur Modellierung von Versagenskriterien
- Einführung der statistischen Qualitätskontrolle
- Die ganzheitliche Prozesskettenbetrachtung

Ganz hat die Keramik den Übergang von der Empirie zur exakten Wissenschaft aber noch nicht geschafft. Das beweist, dass der Sinter-test immer noch die beste Methode ist, um die Eignung der Rohstoffcharge für die Serienfertigung freizugeben.

4.4.2. Keramik – der unbekannte Werkstoff

Keramische Werkstoffe besitzen ein Eigenschaftspotential, das von keiner anderen Werkstoffgruppe in seiner Gesamtheit auch nur annähernd erreicht wird. Woran liegt es nun, dass ihr Anwendungspotential als Konstruktionswerkstoff nur zu einem kleinen Teil ausgeschöpft wird? Dafür gibt es verschiedene Gründe:

- Die Keramik hat bis heute immer noch das Kaffeetassen – Image: „Wenn die Tasse herunterfällt ist sie kaputt“. Und es ist richtig, dass bei der Montage eines Bauteils auch kein Hammer eingesetzt werden kann.
- Einer Anlage sieht man auf den ersten Blick nicht an, dass die für ihre Funktion wichtigsten Bauteile aus Keramik sind.



Bild 2: Steinkohlekraftwerk

Vermischtes



Bild 3: Rohrleitung zum Transport von Nickelerz

- Konstrukteure haben in ihrer Ausbildung wenig über Keramik und ihre Eigenschaften erfahren. Als Werkstoff setzen sie noch immer Stahl und Polymere ein. Beim ersten Einsatz von Keramik haben sie häufig Schiffbruch erlitten. Sicherlich ist die Sprödigkeit der Keramik nicht einfach wegzudiskutieren. Aber es finden sich Wege und Methoden diese Eigenschaft der Keramik zu minimieren oder ganz auszuschalten. Möglichkeiten hierfür sind die Erhöhung der Bruchzähigkeit oder die Anwendung von Verbundkonstruktionen, d. h. Keramik im Verbund mit Metallen bzw. Polymeren einzusetzen. Hierfür einige Beispiele:



Bild 4: Gichteinlauf eines Hochofens



Bild 5: Übergabetrichter



Bild 6 und 7: Anlaufspur einer Skisprungschanze

Vermischtes

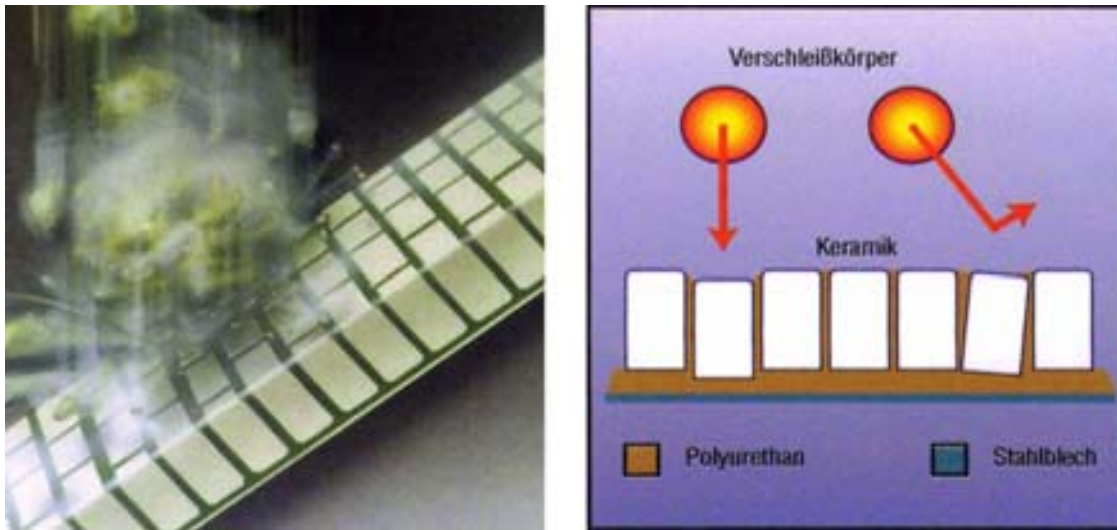


Bild 8 und 9: Impaktpaneele und deren Funktion



Bild 10 bis 12: Kraftfahrzeug nach Minenunfall und Beschuss
(Bild Textron USA)

Um „in Keramik denken“ zu können, - ich vermeide hier bewusst das Wort „konstruieren“, muss der Anwender die Grundzüge der keramischen Fertigungstechnologie kennen, ihre Problematik verstehen und ihr Eigenschaftspotential sinnvoll nutzen.

4.4.2.1. Die keramische Fertigungstechnologie

Die keramische Fertigungstechnologie unterscheidet sich grundsätzlich von der Technologie der Produktion von Metallen und Polymeren.

Der wichtigste Gesichtspunkt ist hier, dass die Formgebung der Bauteile vor dem Sinterprozess stattfindet. Durch den Sinterprozess wird erst der Werkstoff mit seinen spezifischen Eigenschaften erzeugt.

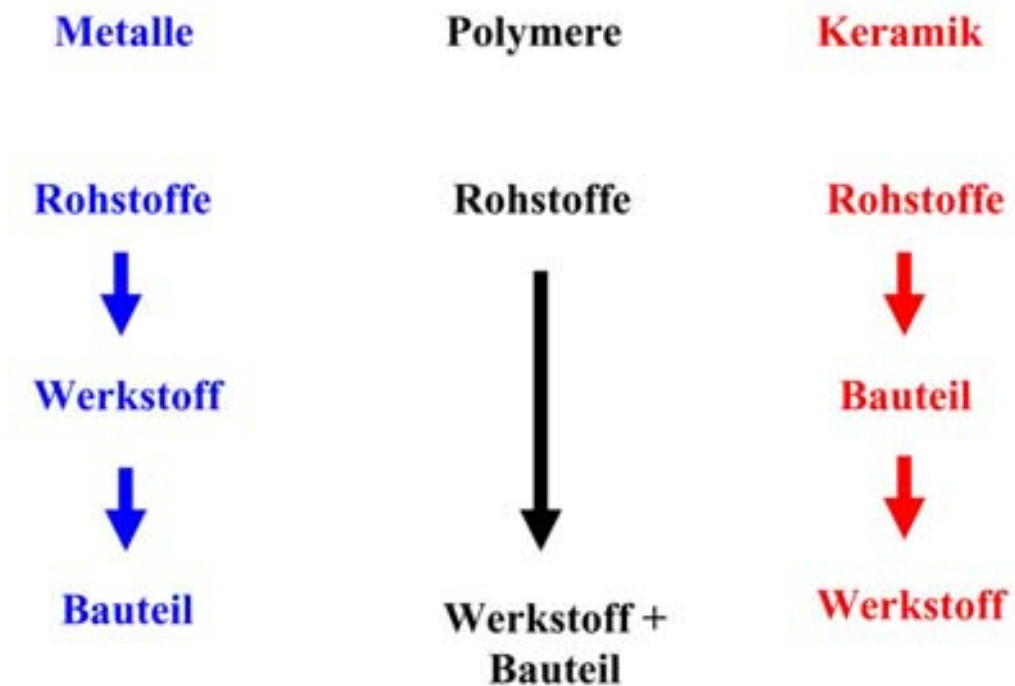


Bild 13: Vergleich der Fertigungstechnologie:
Keramik / Metalle / Polymere

Daraus ergeben sich folgende Konsequenzen:

Schwindung und Toleranzen

Keramische Werkstoffe schwinden beim Brand – je nach Werkstoffart um 15 bis 20%. Rechnet man die Längenschwindung in Volumenschwindung um, sind das nahezu 50%. Das bedeutet, dass mit der keramischen Technologie keine engen Toleranzen – wie sie für metallische Werkstoffe einfach herzustellen sind – erzeugt werden können. Nicht zuletzt gilt deshalb für Keramikbauteile die DIN 40680, die Toleranzen von $\pm 2\%$ erlaubt.

Durch gezielte Rohstoffauswahl, Verbesserung der Arbeitsmassen, optimierte Formgebungs- und Sintertechnik lassen sich heute – je nach Aufwand – Toleranzen von $+0 / - 2\%$, $+0 / - 1\%$ und $+0 / - 0,3\%$ realisieren.

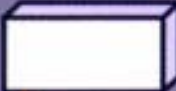
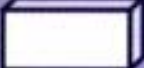

| Abmessungen | Toleranzen | |
|---|--|------------------------|
| | Standard | ETEC |
| Formgebung | | |
| Grünbearbeitung | | |
|  | | |
| ↓ Sintern (as fired) | | |
|  | $\pm 2\%$ | $+0/-2\%$ $+0/-1\%$ |
| ↓ Nachbearbeitung | | |
|  | $\pm 5 \mu\text{m bis}$ $\pm 0,5 \mu\text{m}$ | |

Bild 14: Toleranzen für Keramikbauteile

Grün, Weiß- und Hartbearbeitung

Ein Vorteil der keramischen Technologie ist, dass sich die „grünen“ Bauteile bzw. die „geschrühten“ Bauteile mit konventionellen spanenden Methoden bearbeiten lassen. Engere Toleranzen bzw. bessere Oberflächen lassen sich dadurch allerdings nicht realisieren. Sie lassen sich nur durch aufwendige Hartbearbeitungsprozesse verwirklichen.

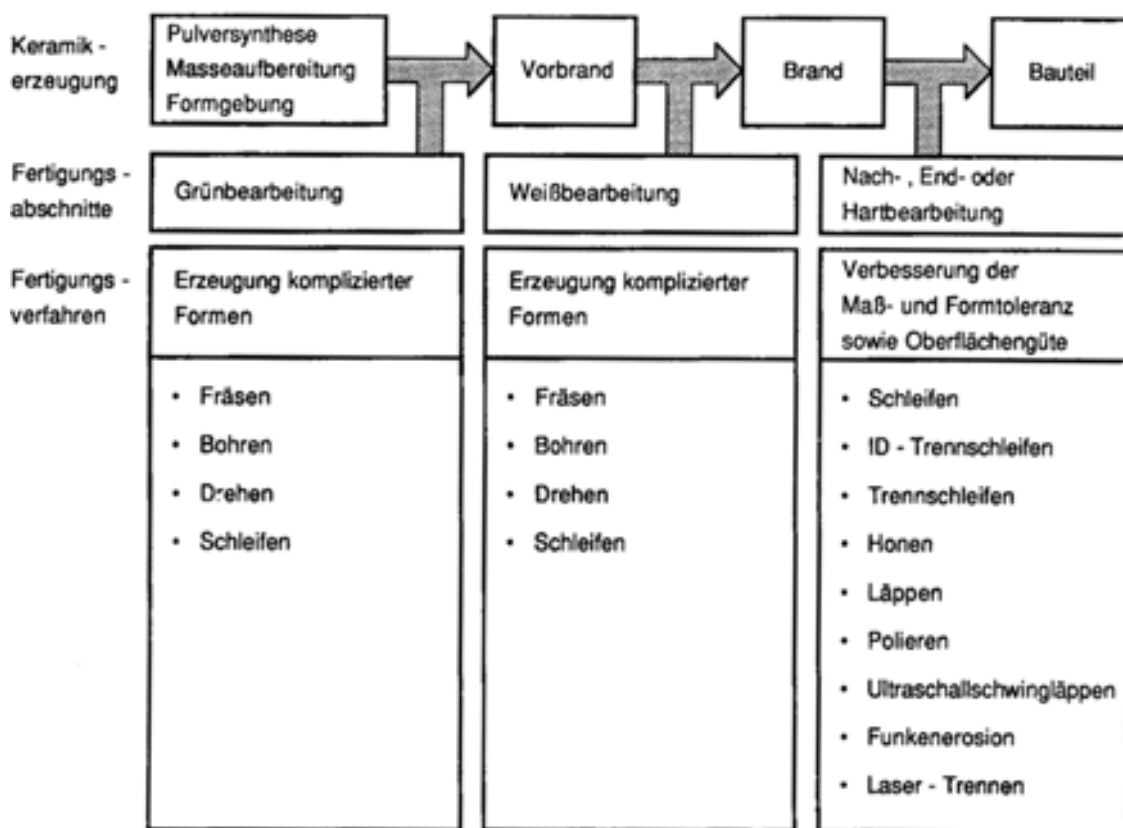


Bild 15: Einordnung der Nachbearbeitung in den Herstellungsprozess

Monolithische Keramik vs. Modultechnik

Ein Nachteil der keramischen Fertigungstechnologie ist, dass großformatige Bauteile nur mit hohem Aufwand gefertigt werden können. Ursache dafür ist die hohe Schwindung beim Brand. Ausnahmen sind Hochspannungsisolatoren und Ofenrollen, die hängend gebrannt werden, sowie Bauteile aus SISIC, die durch die Infiltrationstechnik Schwindungsraten von $< 0,5\%$ besitzen. Als Alternativen werden Füge-techniken verwendet, d. h. Fügen von Keramik / Keramik, Keramik /

Vermischtes

Metall, Keramik / Polymere. Bevorzugte Technologie ist das Kleben, aber auch Einschrupfen, Löten und Schweißen werden u. a. eingesetzt.



Bild 16: Hydrozyklon



Bild 17: Zykloneinlauf

Eigenschaften der Keramik

Die Eigenschaften der Keramik werden durch die Art der atomaren Bindung bestimmt. Ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt ist die Art des im Fertigungsprozess entstandenen Gefüges.

Einfluss des Bindungstyps

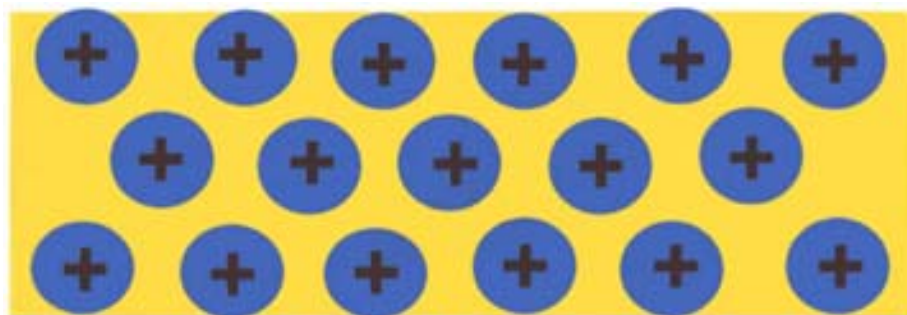


Bild 18: Metallische Bindung
Dichteste Kugelpackung; Bindungskräfte gering;
<H; <E; >WAK; <T_s

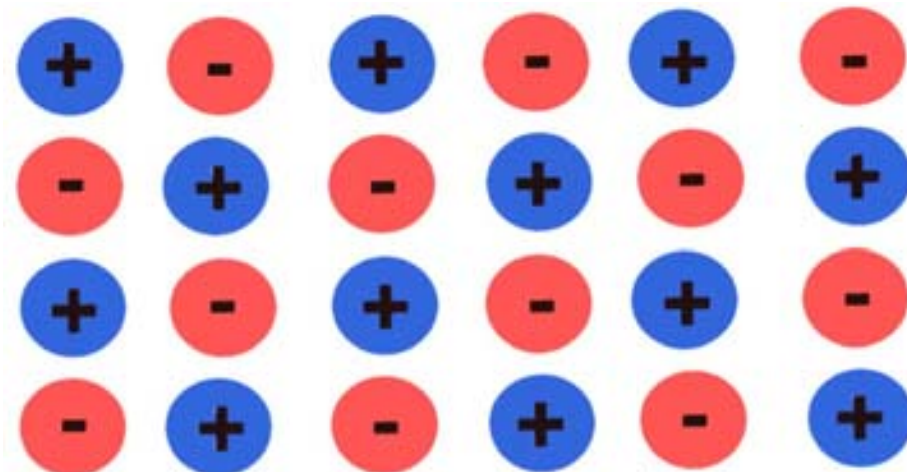


Bild 19: Ionenbindung
Tetraeder-, Oktaederstrukturen; Bindungskräfte hoch;
>H; >E; <WAK; <T_s



Bild 20: Atombindung
Tetraederstrukturen; Bindungskräfte sehr hoch;
>>H; >E; <<WAK; >>T_s

Betrachten wir zuerst die metallische Bindung. Hier liegen die atomaren Bauteile als positiv geladene Ionen vor, deren Größe den Kristallgittertyp – hexagonal dichteste Kugelpackung, kubisch dichteste Kugelpackung und innenzentriertes kubisches Gitter – bestimmt. Die Elektronen sind im Gitter frei beweglich. Das bedeutet u. a., eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit. Ebenfalls lassen sich die Atomrümpfe leicht verschieben. Dadurch ist eine hohe Duktilität und die leichte Verformbarkeit der Metalle bedingt, wie auch die relativ niedrigen Schmelzpunkte.

Bei der Keramik liegen Ionen- und Atombindung vor. Bei den Oxiden überwiegt die Ionen-, bei den Carbiden und Nitriden die Atombindung. Die Ionen bzw. Atome besitzen im Gitter nur eine geringe Beweglichkeit. Die Zahl der Gleitflächen ist begrenzt. Darauf beruht die Sprödigkeit, aber auch hohe Temperaturfestigkeit, Härte und E-Modul. Am deutlichsten wird dies im Spannungs - Dehnungs - Diagramm.

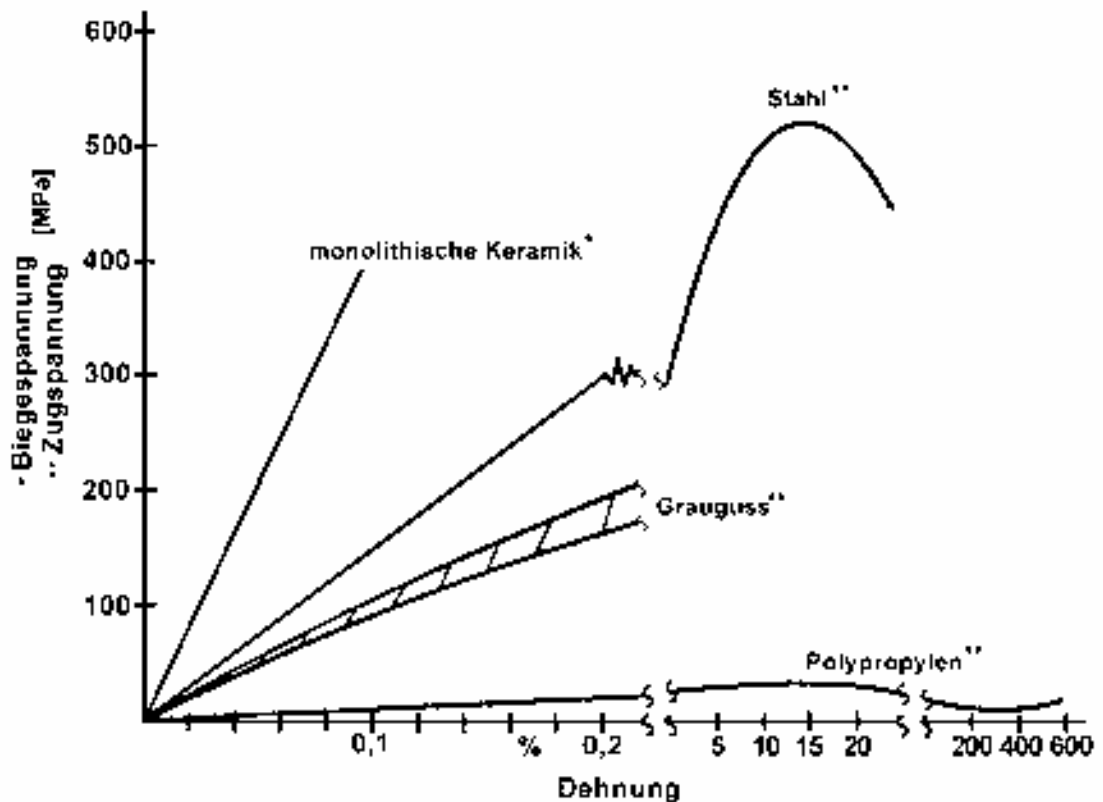


Bild 21: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Der Bindungstyp hat ebenfalls Einfluss auf das Verschleißverhalten. Während bei Metallen – bedingt durch die hohe Duktilität – Mikrospanen, Mikropfugen und Oberflächenermüdung die wesentlichen Verschleißmechanismen sind, liegt bei der Keramik fast ausschließlich Oberflächenzerrüttung vor. Als Gleitpaarungen mit niedrigen Flächendrücken haben sich keramische Hart / Hart – Systeme bewährt, während bei hohen Flächendrücken Hart / Weich – Paarungen (z. B. SiC / C) Stand der Technik sind.

Vermischtes

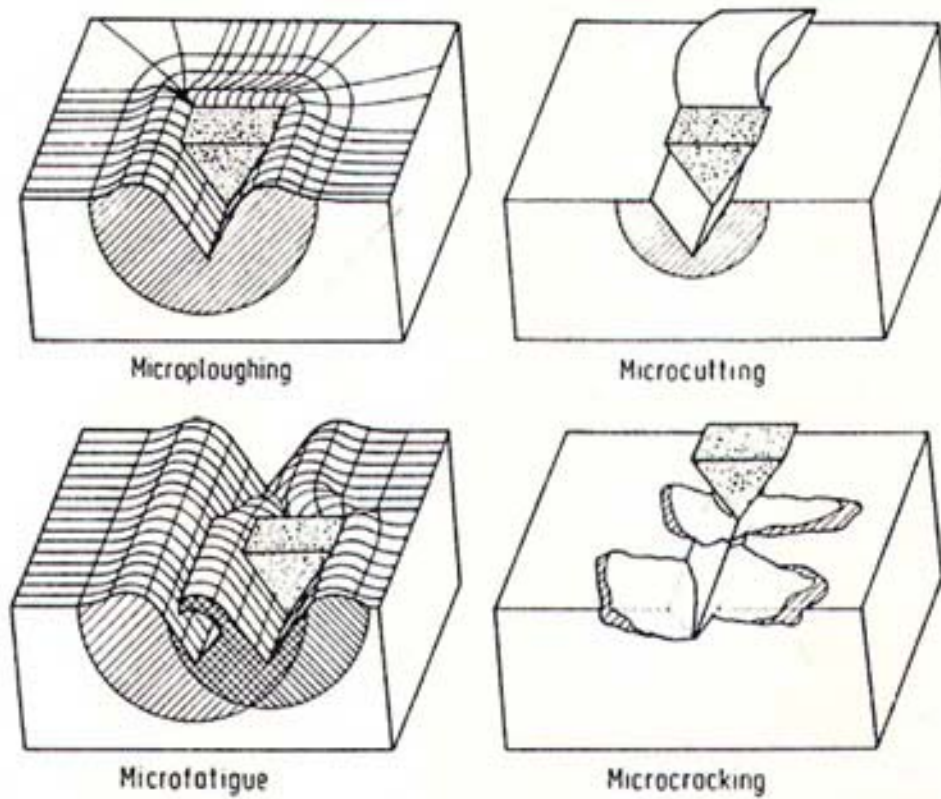


Bild 22: Verschleißmechanismen: Abrasivverschleiß von Werkstoffen

Einfluss des Gefüges

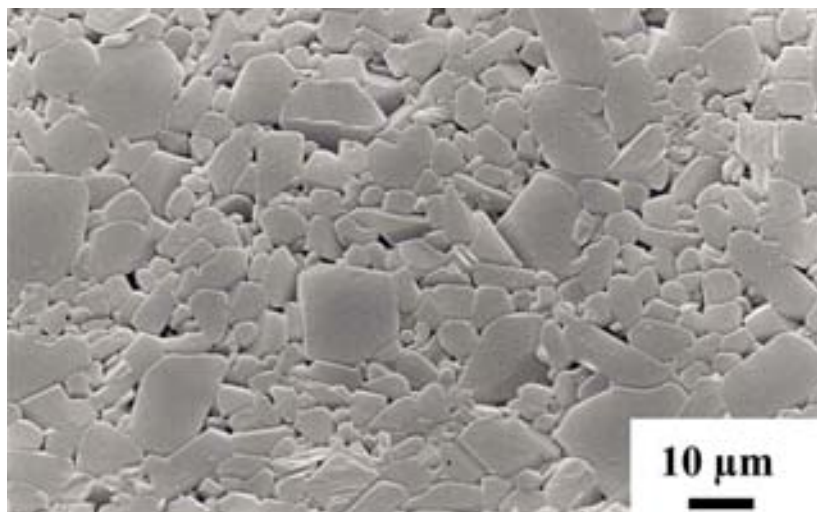


Bild 23: Aluminiumoxid 96%

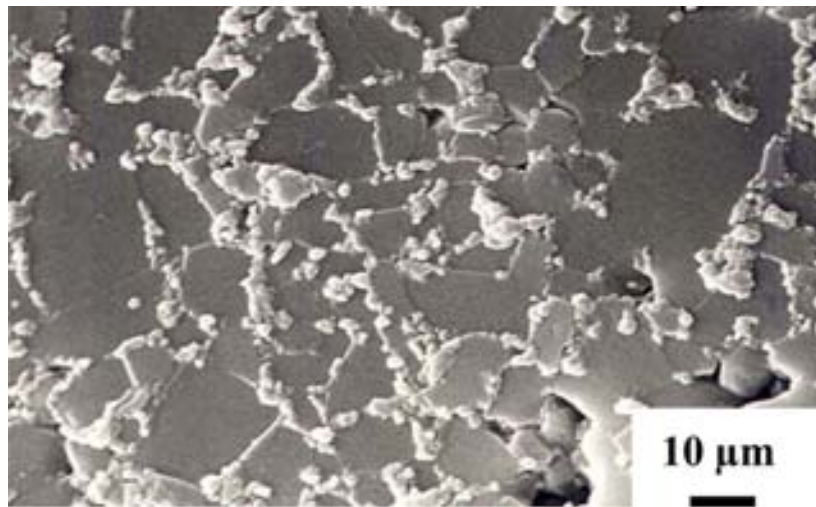


Bild 24: Aluminiumoxid 96%, Variante D



Bild 25: Aluminiumoxid 99%, Variante P

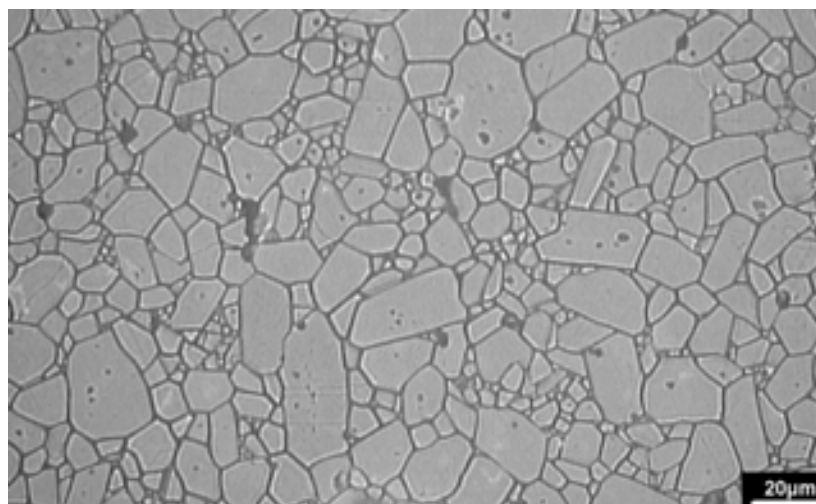


Bild 26: Aluminiumoxid 99%, Variante S

Vermischtes

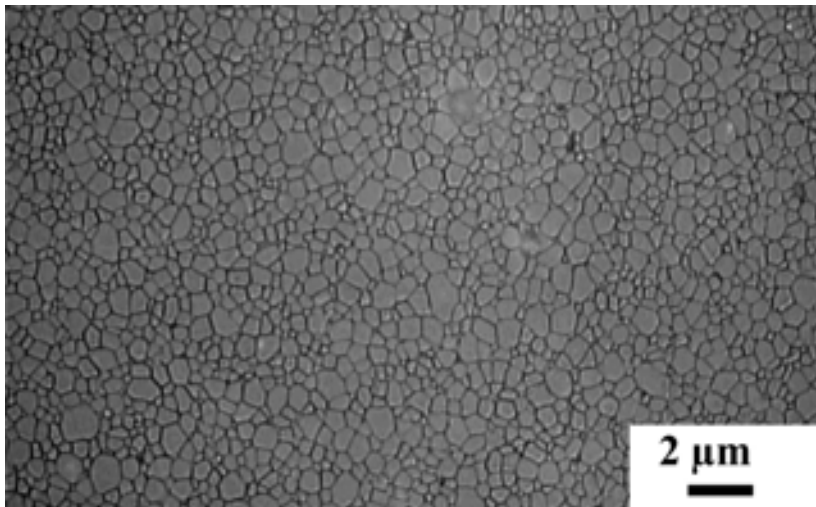


Bild 27: Aluminiumoxid 99%, Variante FKA

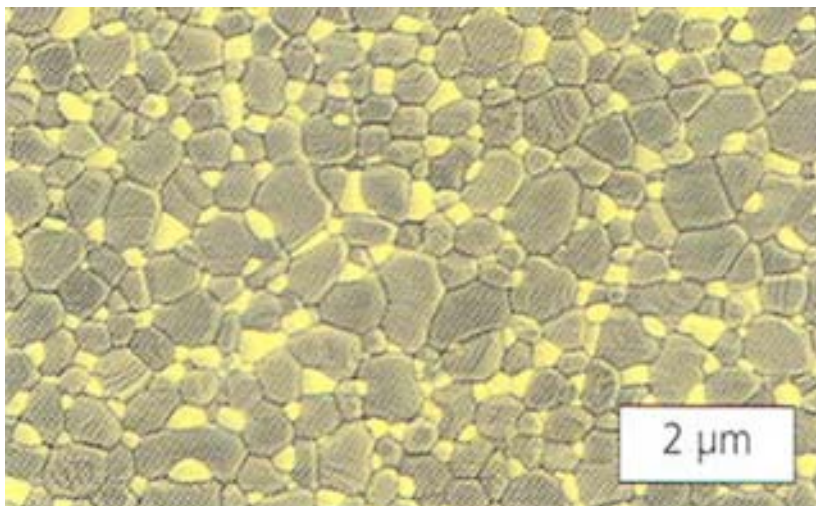


Bild 28: Zirkonoxidverstärktes Aluminiumoxid (ZTA)

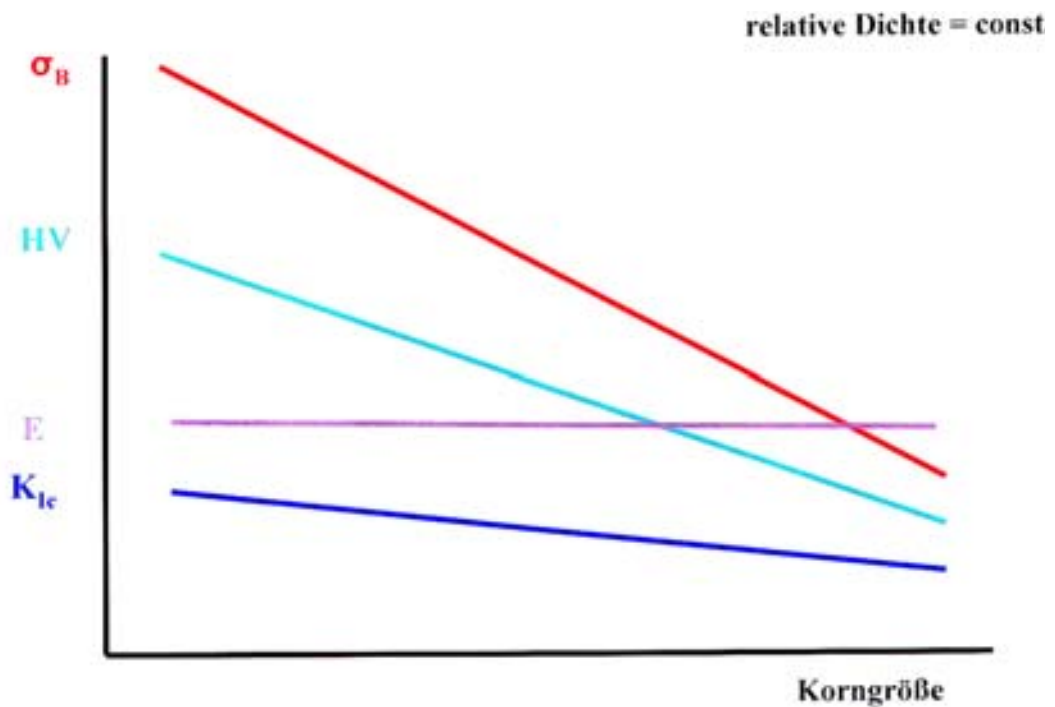


Bild 29: Einfluss der Korngröße auf die Werkstoffeigenschaften

Auswahl der Werkstoffe

| | Keramik | Metalle | Polymere |
|--|---------|---------|----------|
| Thermische Ausdehnung | ▼ | ▲ | ▲ |
| Duktilität | ▼ | ▲ | ▲ |
| Formbeständigkeit | ▲ | ▼ | ▼ |
| Hochtemperaturfestigkeit | ▲ | ▼ | ▼ |
| Korrosionsbeständigkeit | ▲ | ▼ | ▼ |
| Verschleißfestigkeit | ▲ | ▼ | ▼ |
| Härte | ▲ | ▼ | ▼ |
| Wärmeleitfähigkeit | ▼ | ▲ | ▼ |
| Spezifisches Gewicht | ▼ | ▲ | ▼ |
| ▼ Tendenz zu niedrigen Werten ▲ Tendenz zu hohen Werten | | | |

Bild 30: Werkstoffvergleich Keramik / Metalle / Polymere

Vermischtes

Keramische Werkstoffe haben ein Anwendungspotential, das von keiner anderen Werkstoffgruppe auch nur annähernd erreicht wird. Hervorzuheben sind Verschleiß-, Korrosions- und Hochtemperaturfestigkeit sowie im Vergleich zu Metallen ihr deutlich niedrigeres Gewicht. Viele Anwendungen sind ohne Keramik nicht denkbar.

Für die Anwender ist es oft schwer, aus der Vielzahl der auf dem Markt befindlichen Werkstoffe den Richtigen auszuwählen. Die häufig benutzte Einteilung der Keramikwerkstoffe nach ihrer chemischen Zusammensetzung in Silikat-, Oxid- und Nichtoxidkeramik gewährleistet nur bedingt eine sinnvolle Vorauswahl. Für ingenieurtechnische Anwendungen hat die Einordnung nach dem K_{Ic} - Wert (Bruchzähigkeit) höhere Aussagekraft.

| $K_{Ic} < 3$ | $K_{Ic} = 3 - 5$ | $K_{Ic} > 5$ | pseudoduktill |
|-------------------------------|--|------------------|---|
| Glas Porzellan Silikate | Al ₂ O ₃ Spinell SiC BC SN | SN ZTA PSZ | C – SiC MCC Faserverstärkte Werkstoffe |

Bild 31: Einteilung der Keramikwerkstoffe nach K_{Ic}

Leider gibt es bis heute für keramische Hochleistungswerkstoffe noch keine Normung. Die IEC 15C / 509 / CDV erfüllt nur bedingt die Anforderungen für ingenieurtechnische Anwendungen. Sie ist für elektrotechnische Anwendungen konzipiert und entspricht weitgehend der VDE 0335.

Für eine gezielte Auswahl muss man auf Prospekte der unterschiedlichen Hersteller zurückgreifen, dabei helfen Fachbücher (z. B. das vom Verband der keramischen Industrie e.V. herausgegebene Brevier Technische Keramik).

Sehr effizient ist die direkte Kontaktaufnahme mit Herstellern (Bei der Auswahl der Hersteller hilft Ihnen das Informationszentrum Technische Keramik des VKI).

Wichtig ist aus unserer Sicht, bei der Konstruktion einer Anlage bereits am Anfang die eventuell auftretenden Werkstoffprobleme zu berücksichtigen, wenn z. B. Verschleiß-, Korrosions- oder Temperaturprobleme zu erwarten sind. Treffen Sie die richtige Werkstoffauswahl schon während der Designphase. Dazu sind systemanalytische Betrachtungen sehr hilfreich. Die Designphasen beinhalten im Allgemeinen folgende Schritte:

Zieldefinition ► Konzeptdefinition ► Strukturentwurf ► Detailkonstruktion

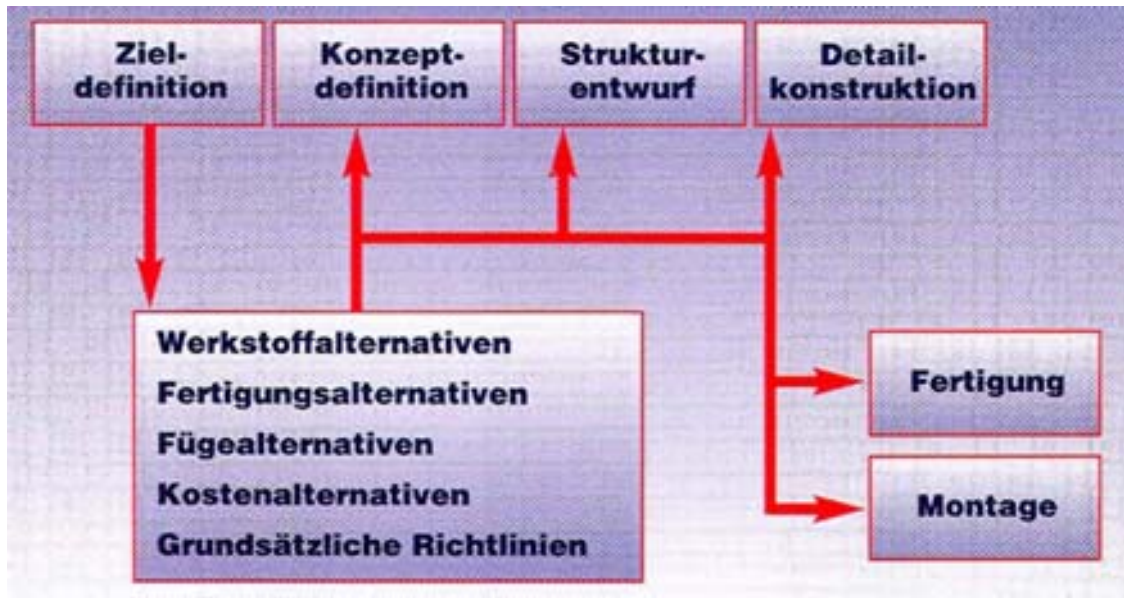


Bild 32: Designphasen

Die Entwicklung eines funktionsfähigen keramischen Bauteils ist immer eng verknüpft mit der Kenntnis seiner mechanischen, thermischen und chemischen Belastung. Die Bauteilauslegung und die Konstruktion müssen daher einerseits auf gesicherten Werkstoffdaten basieren, dürfen aber andererseits auch den Einfluss der Geometrie, Herstellung und Beanspruchung nicht unbetrachtet lassen. Nur so lassen sich die Werkstoffeigenschaften optimal nutzen.

4.4.3. Keramik im Einsatz

Die moderne Fertigungstechnologie erfordert immer höhere Prozessgeschwindigkeiten. Die Wirtschaftlichkeit einer Anlage wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- Leistung, Durchsatz, Standzeit
- Betriebskosten
- Reparatur- und Wartungskosten
- Betriebsstillstandskosten
- Investitionskosten

Vermischtes

Die ersten vier Faktoren bestimmen die Wirtschaftlichkeit einer Anlage und dadurch die Amortisation des eingesetzten Kapitals – eigentlich eine Selbstverständlichkeit!

Man kann aber immer wieder feststellen, dass speziell im Verschleißschutz bei Erstausrüstung von Großprojekten häufig gespart wird. Einer erprobten Keramiklösung wird die billige Stahl- oder Schmelzbasallösung vorgezogen.

Beispiele für erfolgreiche Anwendungen

Wir müssen häufig feststellen, dass Keramikbauteile oft nicht keramikgerecht konstruiert und eingesetzt werden. Häufig fehlen exakte Angaben über das Belastungskollektiv, z. B. max. Anwendungstemperatur oder auftretende Temperaturschockbelastungen. Auch wird der Keramikhersteller selten über die angewendeten Fügetechniken unterrichtet. Durch eine offene Zusammenarbeit Keramikanbieter / Systemanbieter lassen sich diese Probleme leicht beseitigen. Die meisten Keramikanbieter sind auch bereit, komplette leicht einbaufähige Bauteile zu liefern. Ein typisches Beispiel ist die Integration einer Keramikdüse in ein Metallgewinde. Der Trend geht deutlich in die Richtung, den Kunden fertige Module zu liefern, die in die Anlage – vor Ort – leicht integriert werden können. Beispiele sind hier flexible Schlauchkrümmer oder die Lieferung von vollständigen Fördersystemen, einschließlich der Dosierung, dem kompletten Rohrsystem mit Bögen und Rohrweichen und den erforderlichen Absperrorganen.



Bild 33: Flexibler Schlauchkrümmer



Bild 34: Pneumatisches Fördersystem



Bild 35: Zellenradschleuse

Vermischtes



Bild 36: Kugelhahn



Bild 37: Drehrohrweiche

In der Aufbereitungstechnik ist neben dem Transport, Zerkleinern und Mahlen die Klassierung der Rohstoffe nach Kornklassen ein wichtiger

Anwendungsbereich. Beispiele hierfür sind: Hydrozyklone für die Nassklassierung, Aerozyklone und Sichter für die Trockenklassierung.

Bei der **Nassklassierung** beherrschen immer noch Polyurethan – Zyklone den Markt. In den letzten fünf Jahren haben Keramikzyklone ihre Marktanteile erhöht. Der höhere Preis der Keramiklösung wird durch die deutlich höhere Standzeit und ihre konstante Trennleistung mehr als ausgeglichen. Vor allem haben sie sich in der Papierindustrie beim Recycling von Altpapier, aber auch bei der Aufbereitung von Rohkaolin bewährt.

Zur **Trockenklassierung** finden Aerozyklone und Sichter breite Anwendung. Sichter dienen vorzugsweise zur Reduzierung der gröberen Kornfraktionen in Abgasen von Kohlekraftwerken, Müllverbrennungsanlagen und Stahlwerken. Der restliche Feinkornanteil wird problemlos durch Filter absorbiert.

Dagegen werden Sichter wegen ihrer höheren und regelbaren Trennwirkung in Aufbereitungsprozessen der unterschiedlichsten Rohstoffe eingesetzt. Der typische Anwendungsbereich in der Mahltechnik ist die Rückführung des Grobgutes (z. B. $> 200 \mu\text{m}$) in den Mahlprozess.

Wie wichtig der Einbau eines Sichters in die Prozesskette ist, soll am Beispiel eines Kohlekraftwerks gezeigt werden.

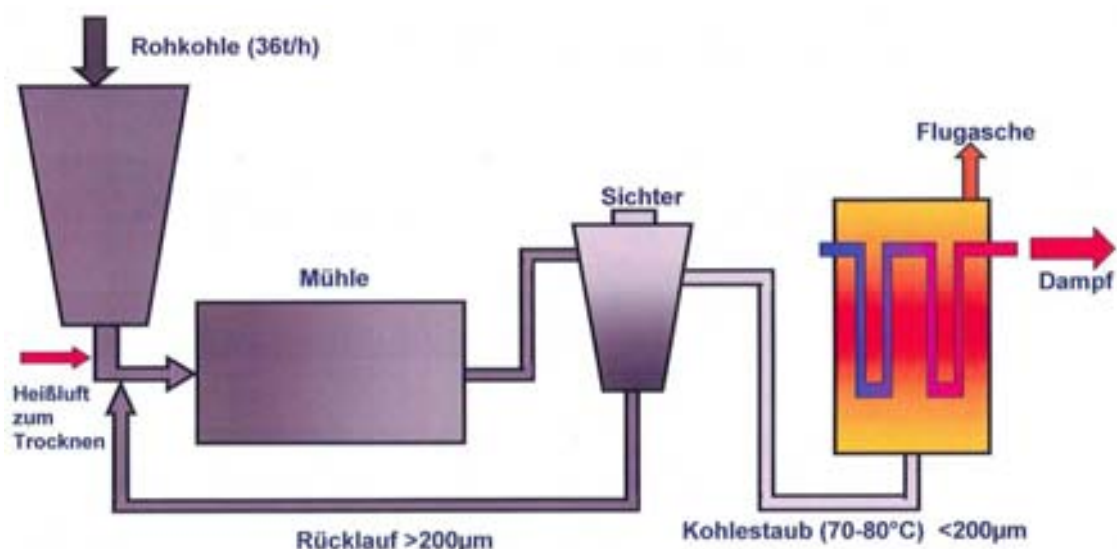


Bild 38: Pneumatisches Fördersystem

Mit der konventionellen Mahltechnik beträgt der Anteil der Kohlepartikel $> 200 \mu\text{m}$ zwischen 5 bis 10%. Mit der heute praktisch in allen Kraftwerken eingesetzten Wirbelschichtverbrennung können Kohle-

Vermischtes

partikel mit Korngrößen $> 200 \mu\text{m}$ nur unvollständig verbrannt werden. Sie fallen in der Flugasche an. Eine vollständige Verbrennung ist nur durch höheren Sauerstoffpartialdruck möglich. Dadurch steigt allerdings der Ausstoß von NO_x deutlich an ($> 600 \text{ mg/kg } 8\% \text{ O}_2$). Durch den Einbau eines Sichters in die Prozesskette Mühle / Brenner wird eine Rückführung der Grobkohle in die Mühle möglich. Eine Partikelgröße von $< 200 \mu\text{m}$ wird eingehalten. Daraus ergeben sich folgende Vorteile:

- Die höhere Verbrennungsrate bringt eine Einsparung bei der Kohle von ca. 5% - 10%.
- Durch Erniedrigung des Sauerstoffpartialdruck in der Wirbelschicht sinkt der NO_x – Wert im Abgas von $600 \text{ mg/kg } (8\% \text{ O}_2)$ auf unter 500 mg/kg .

Damit können die ECPD, die ab dem Jahre 2008 gültig werden, bereits heute schon erfüllt werden.

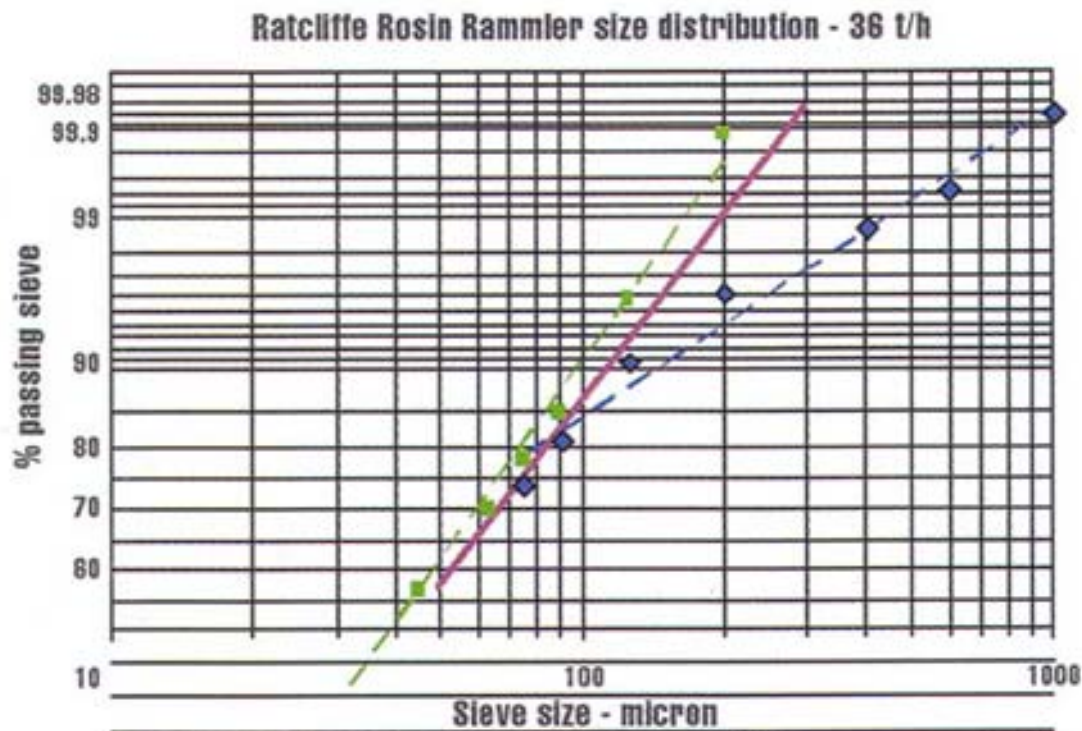


Bild 39: Einfluss der Korngrößenverteilung der Kohle auf den Wirkungsgrad

4.4.4. Zusammenfassung und Ausblick

Keramik besitzt ein breites Anwendungspotential, das allerdings bis heute bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist. Trotz Umsatzsteigerungen von durchschnittlich 10% / Jahr liegt man noch deutlich gegenüber den Prognosen der sechziger und siebziger Jahre zurück. Bei vielen Anwendungen können wir allerdings nicht mit den Metallen und Polymeren konkurrieren. Dafür gibt es folgende Gründe: hohe Rohstoffpreise (besonders bei Hochleistungswerkstoffen), aufwendige Fertigungstechnologie, wenige Großserien. Sieht man einmal von der Elektrotechnik und Elektronik ab, ist Keramik immer noch ein Nischenprodukt. Hier erfüllt sie allerdings ihre Aufgabe.

Unsere Aufgabe muss sein, bekannte erfolgreiche Anwendungen auszubauen und weitere zu erschließen. Dem steht aber entgegen:

- Viele Anwender haben noch keine Beziehung zur Keramik und stehen deshalb der Keramik skeptisch gegenüber!
- Für den Einsatz von Keramik in einem System ist ein spezifisches Know-how erforderlich!
- Eine erfolgreiche Konstruktion für ein Stahlteil lässt sich in den seltensten Fällen direkt auf Keramik übertragen!
- Keramik verzeiht durch ihr spröd-elastisches Verhalten keine Konstruktionsfehler!
- Der Konstrukteur greift erst dann zur Keramik, wenn er keine konventionelle Lösung mehr sieht!
- Keramik verhindert durch ihre langen Standzeiten das lukrative Nachrüstgeschäft für Anlagenbauer!
- Keramik ist als Bauteil teuer!

Dass Keramik bei Großserienfertigung auch preiswert sein kann, beweisen ihre Anwendungen in der Elektrotechnik, z. B. Widerstände, Kondensatoren und Ferrite, die Dichtscheiben für Mischarmaturen, Abgaskatalysatoren für KFZ und auch die viel diskutierte Siliciumnitrid-Ventile, die allerdings nicht zur Anwendung kamen.

Die Herstellung von Keramikbauteilen – von Rohstoff über Formgebung, Sintern und der häufig erforderlichen Hartbearbeitung bis zur Qualitätsprüfung – ist in der derzeit erforderlichen, eher geringen Stückzahl naturgemäß noch recht kostspielig. Aus den bisherigen Entwicklungen und Erfahrungen kann aber für eine Serienfertigung ein beträchtliches Kostensenkungspotential abgeleitet werden.

Vermischtes

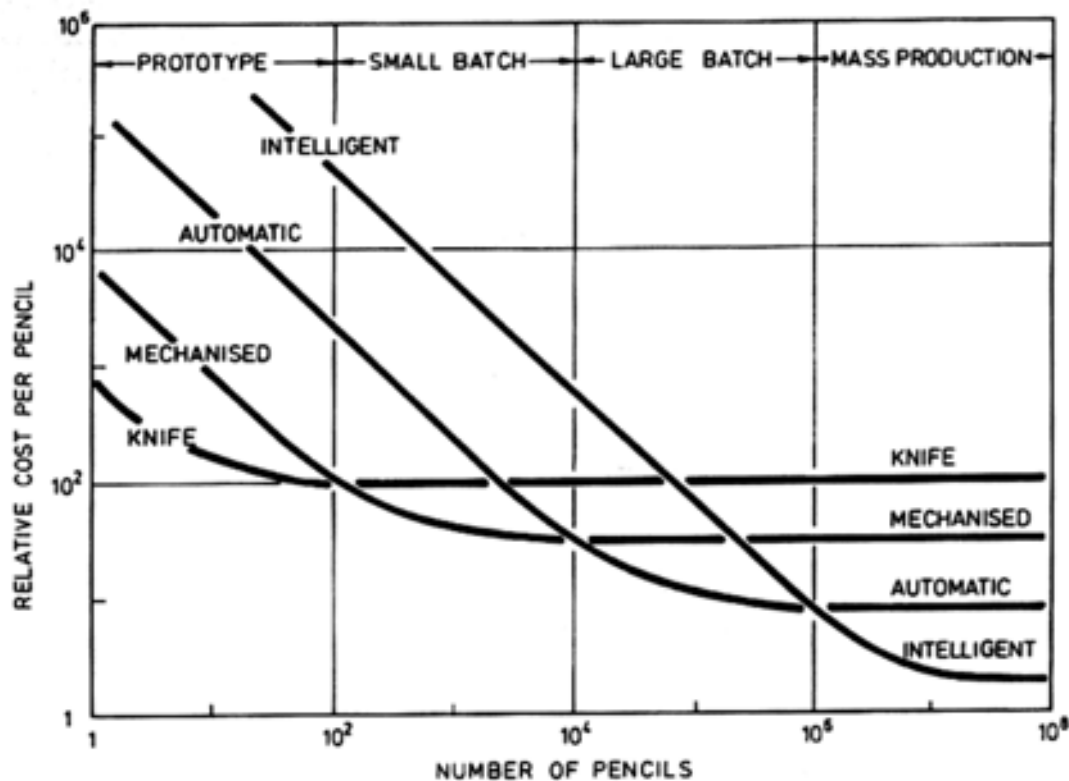


Bild 40: Wirtschaftlichkeit: Prototypen- / Serienfertigung

Schließen wir den Kreis:

Die reproduzierbare Fertigung von Keramischen Bauteilen (mit engen Toleranzen) erfordert eine umfassende Beherrschung der Prozessfolge. Sie reicht von der Pulversynthese über die Pulveraufbereitung bis zur Herstellung der Arbeitsmasse, setzt sich mit der Formgebung fort und endet mit dem kontrollierten Sinterprozess. Die häufig erforderliche Hartbearbeitung ist nicht zu vergessen. Wie komplex diese Prozesse sind geht aus den folgenden Bildern hervor.

Die ganzheitliche Betrachtung ist nur möglich, wenn alle einzelnen Prozessschritte verstanden werden. Damit schafft die Keramik den Sprung von der Empirie zur Wissenschaft.

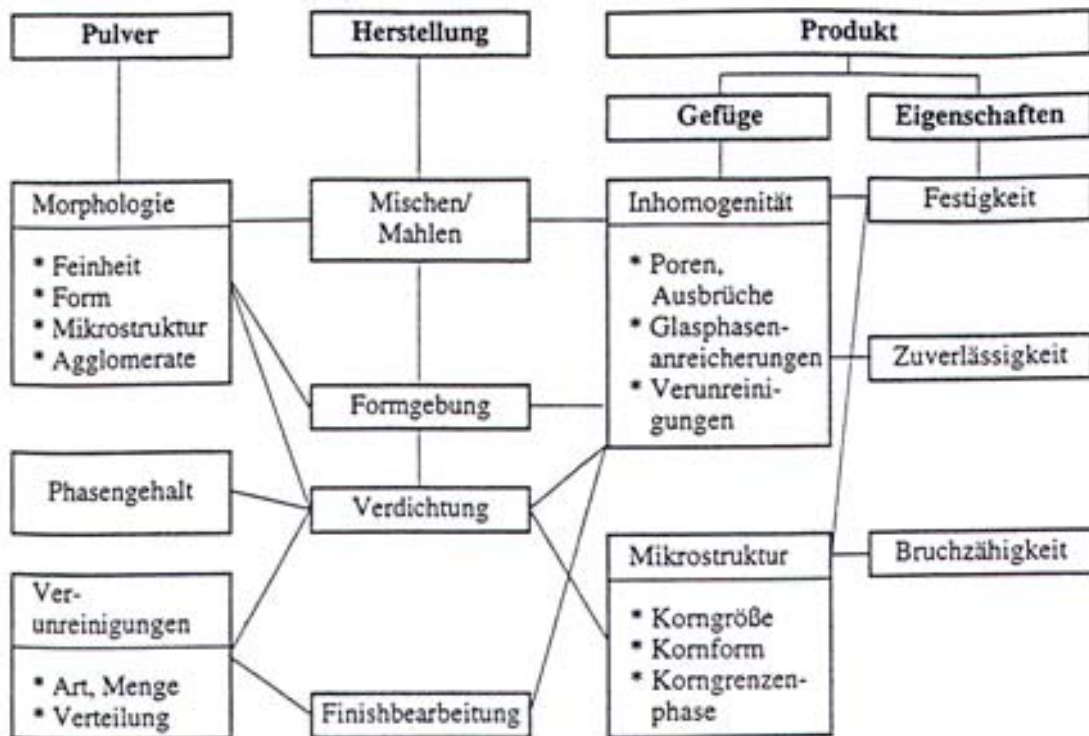


Bild 41: Vom Pulver zum Produkt – eine ganzheitliche Betrachtung

Das Innovationspotential der Keramik ist hoch. Laufend werden mit bekannten Werkstoffen Anwendungsgebiete erschlossen. Zahlreiche Beispiele wurden in diesem Symposium diskutiert. Neue Technologien bringen neue Herausforderungen. Erwähnt sei hier nur die keramische Brennstoffzelle, die keramischen Bremse, bei den oxidischen Faserverbundwerkstoffen (CMC) und die Fortschritte in der Biokeramik mit den Bereichen biofunktionelle Keramik, biomorphe Keramik, biogene Keramik und Biocere.

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 40) finden sich auf den folgenden Seiten.

**Aus 40 Jahren –
Ein Leben mit und für Keramik:
Beispiele zum erfolgreichen
Einsatz**

Dr. Hans Hoppert
ETEC Gesellschaft für Technische Keramik mbH
Lohmar



40 Jahre – Ein Leben mit und für Keramik



Dr. Hans Hoppert
ETEC Gesellschaft für Technische Keramik mbH
Lohmar

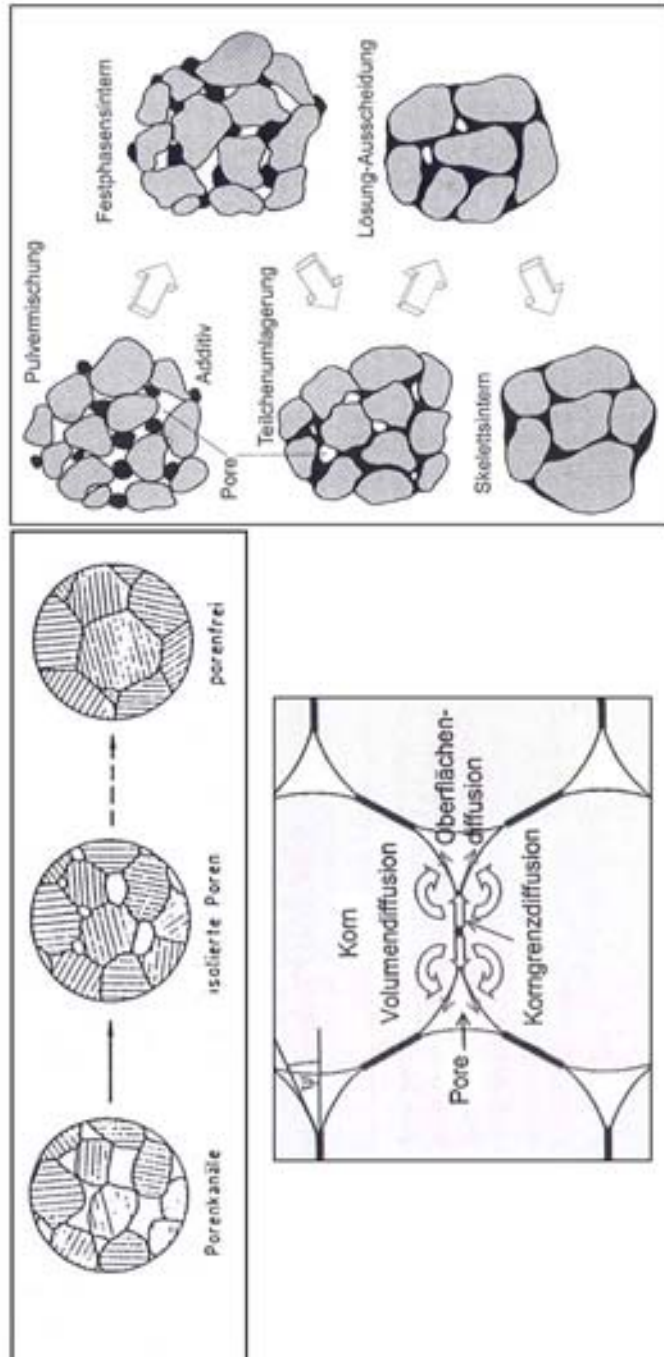
Mikrogefüge

The diagram consists of three overlapping circles. The left circle is light blue and labeled 'Formgebung shaping'. The bottom circle is green and labeled 'Pulver powder'. The right circle is red and labeled 'Sintern sintering'. The central intersection of all three circles is dark brown and labeled 'micro-structure Mikrostruktur'. The intersection of the blue and green circles is yellow, the intersection of the blue and red circles is yellow, and the intersection of the green and red circles is yellow.

Einfluss von Rohstoff und Prozesstechnik auf die Eigenschaften von Keramik

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

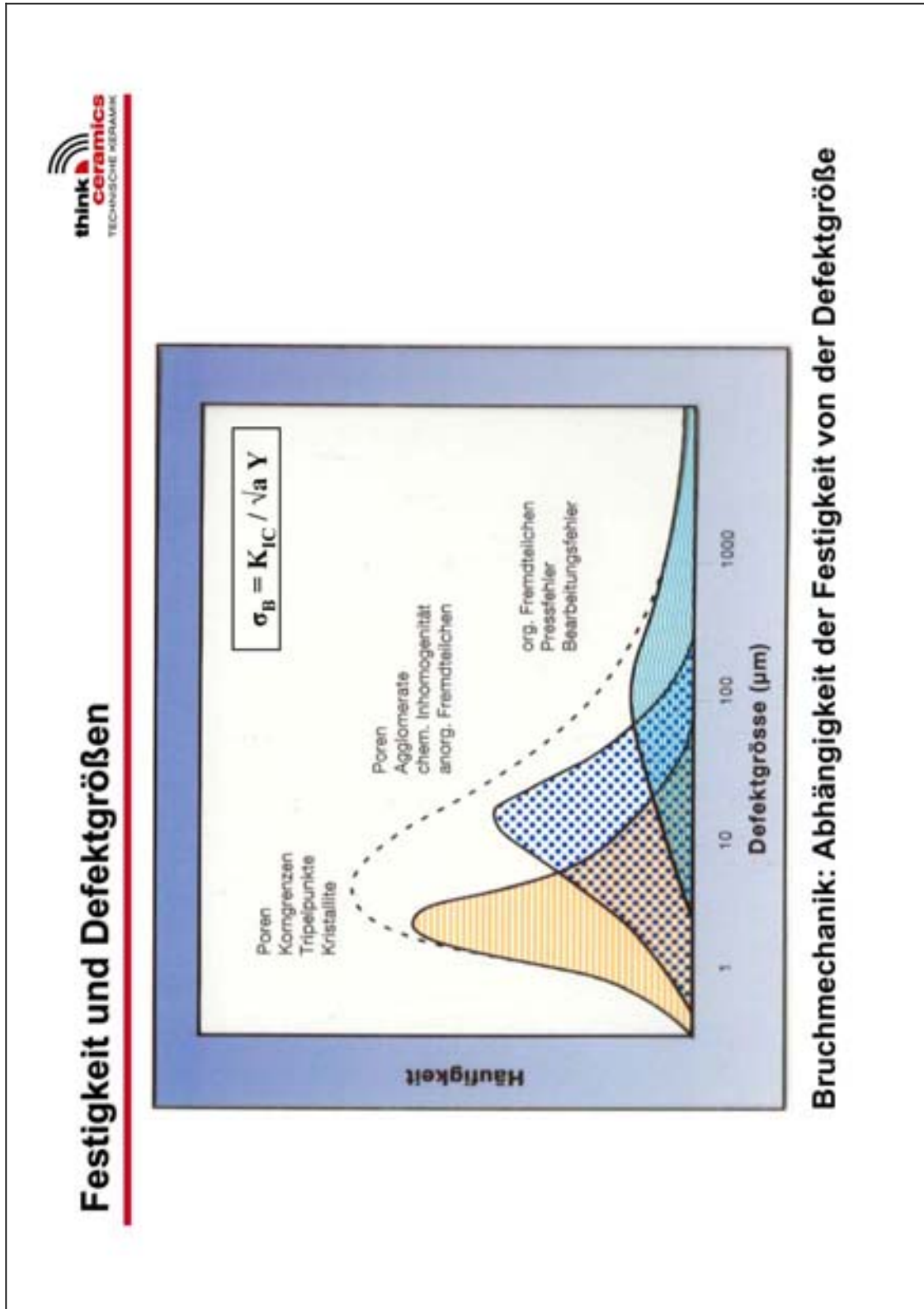
Sinterprozess



Flüssighasensintern

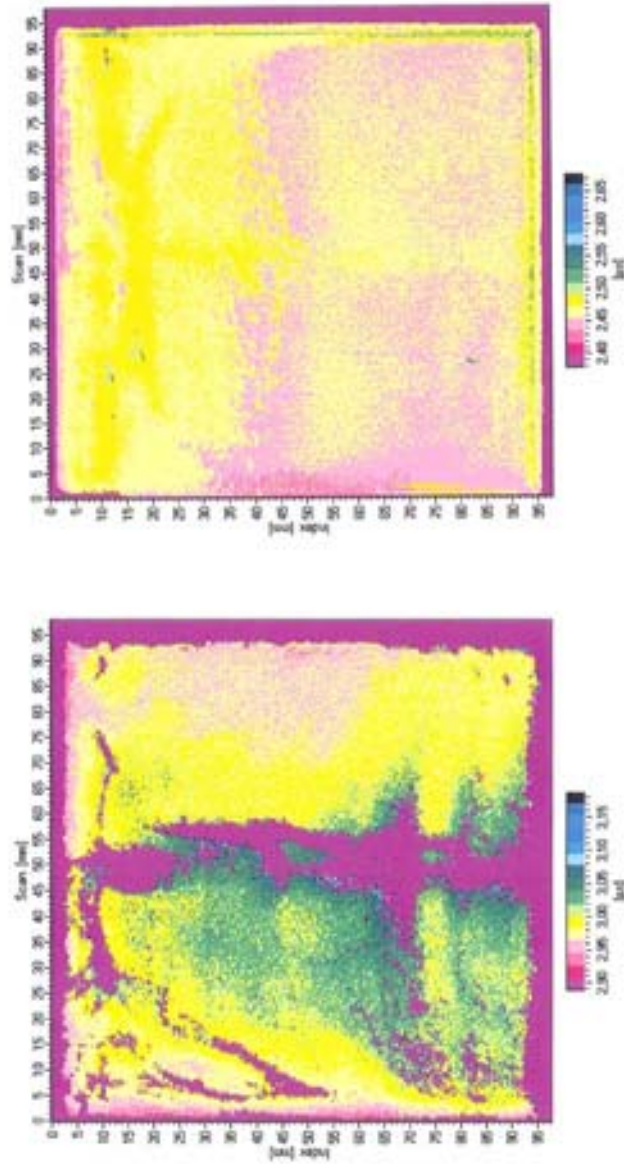
Festphasensintern

Modellierung der Sinterprozesse: Nass- und Trockensintern

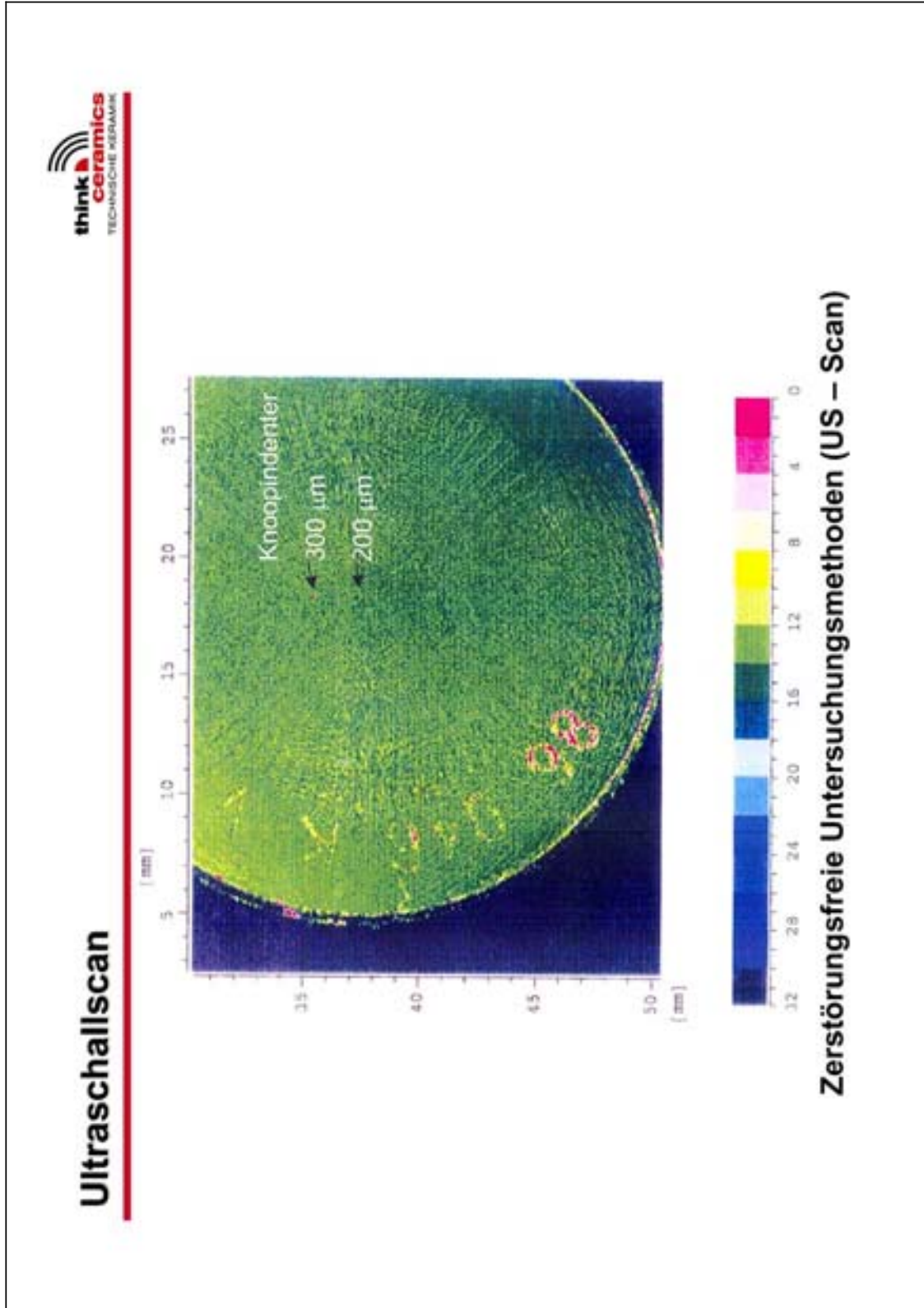


4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 5

Ultraschallscan

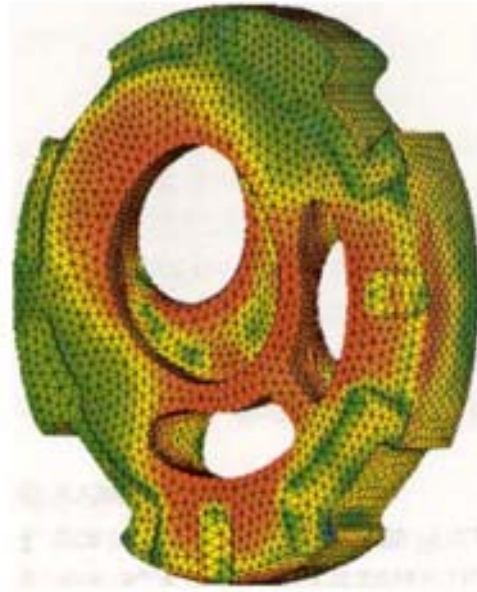
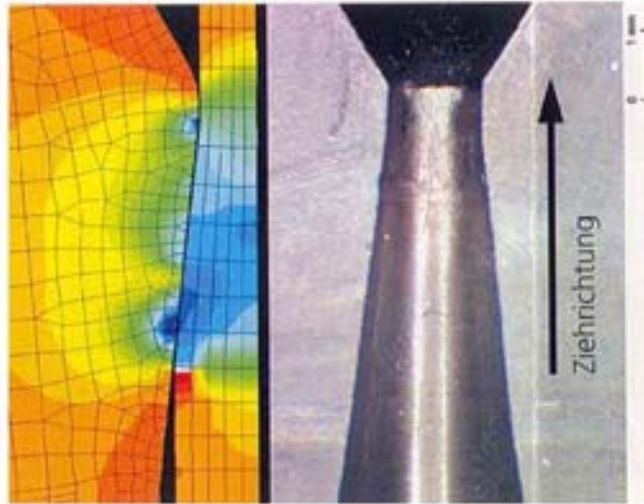


Zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden (US – Scan)

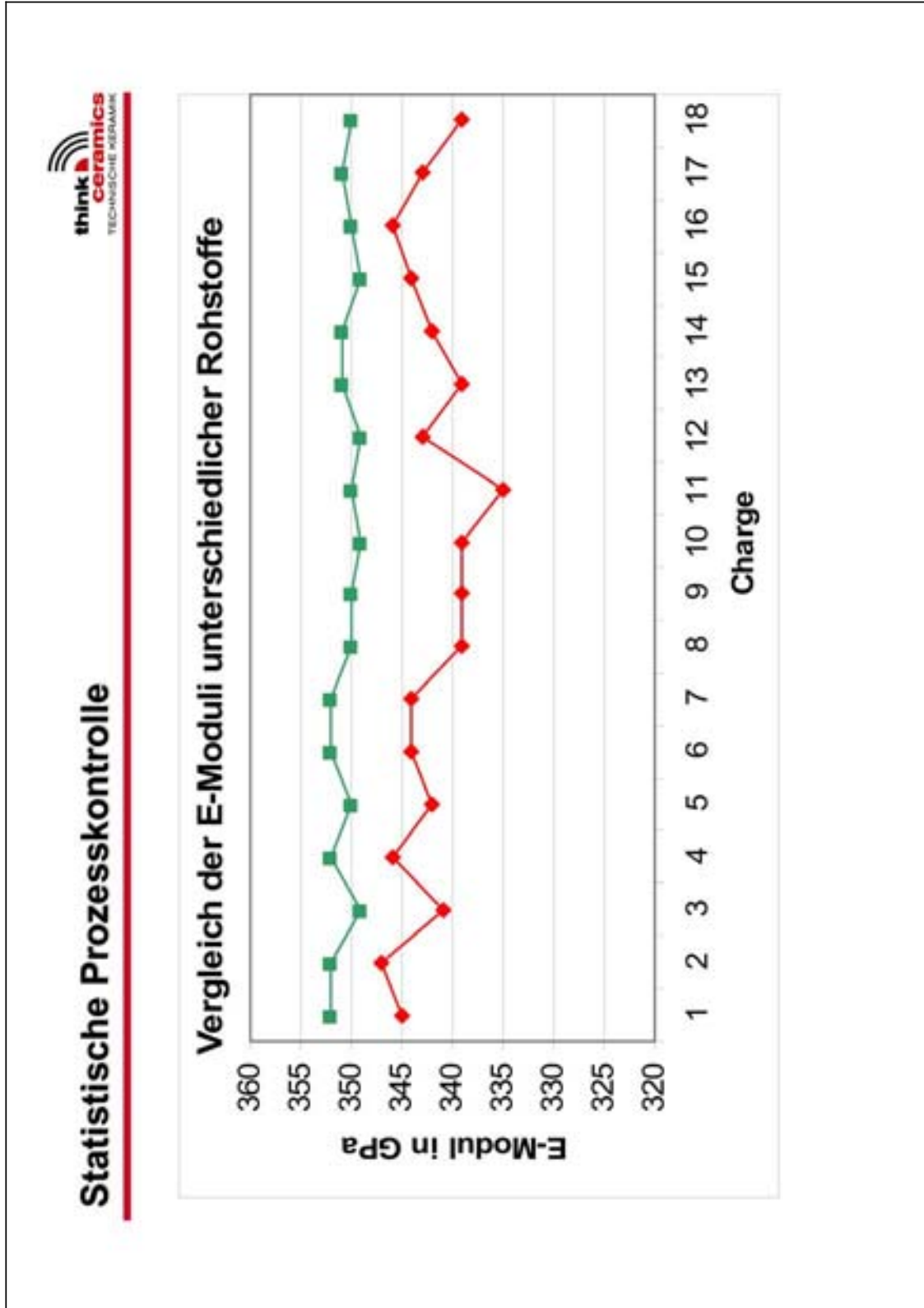


4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 7

Spannungsverteilung



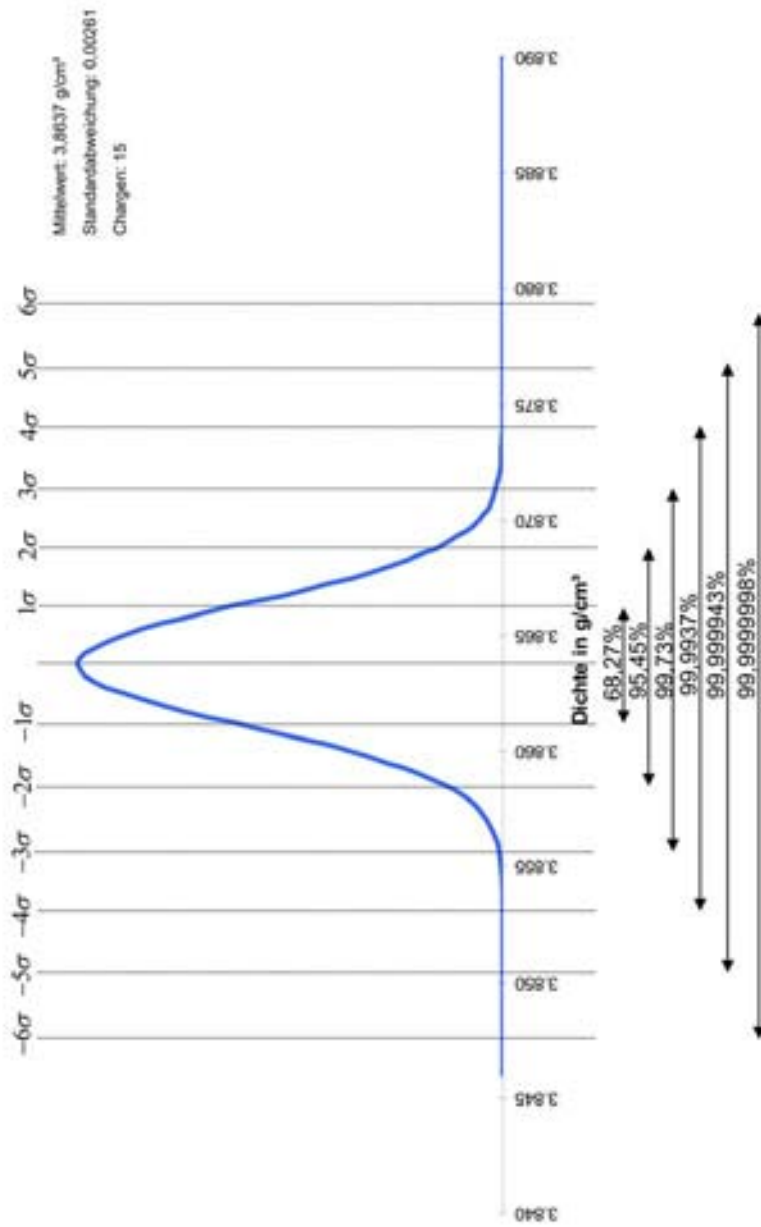
**Finite Elemente Methode: Mechanische Belastung eines Ziehsteins
Spannungsverteilung in einer Dichtscheibe
(as sintered) (FhG – IKTS)**

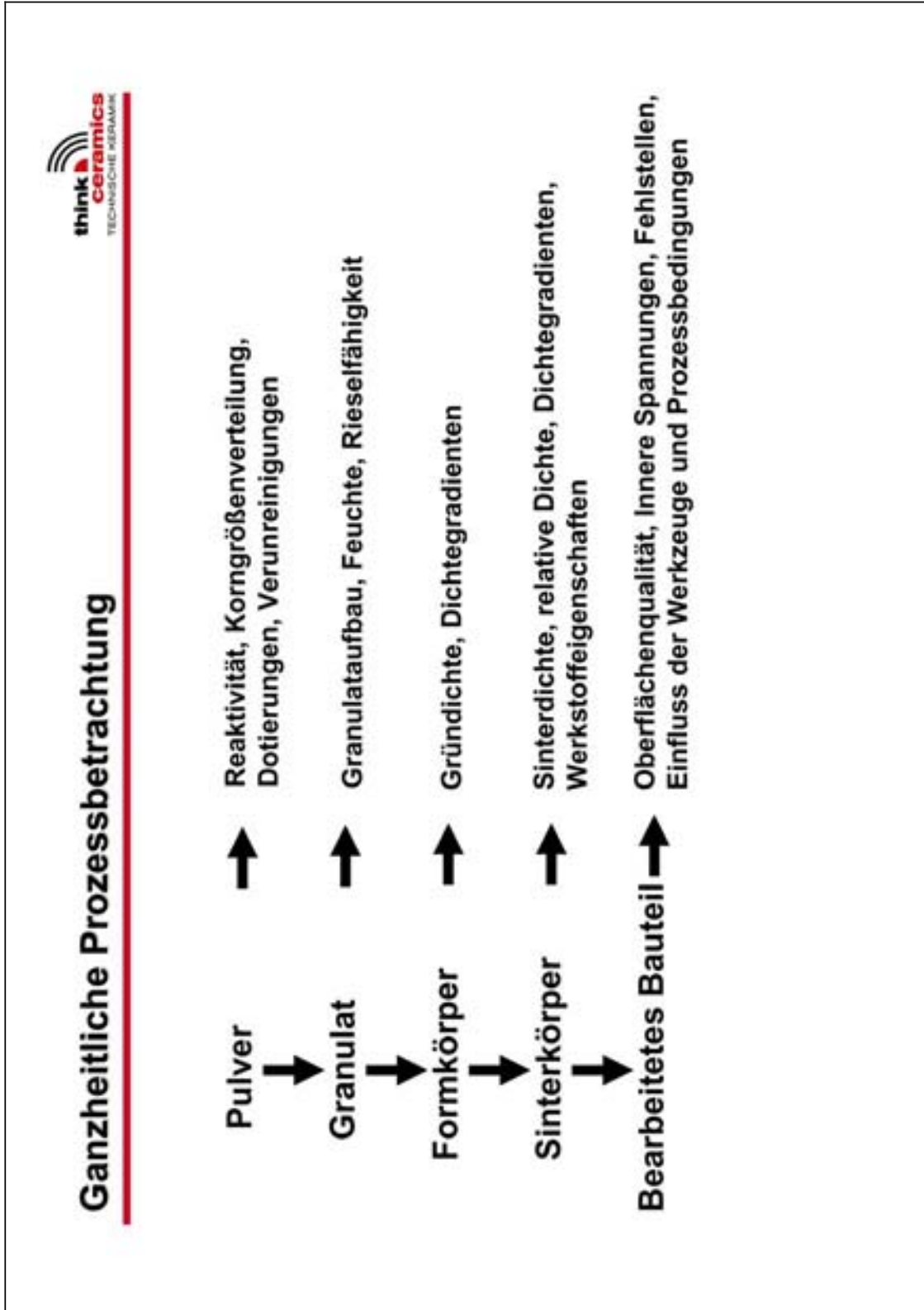


4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 9

Statistische Prozesskontrolle

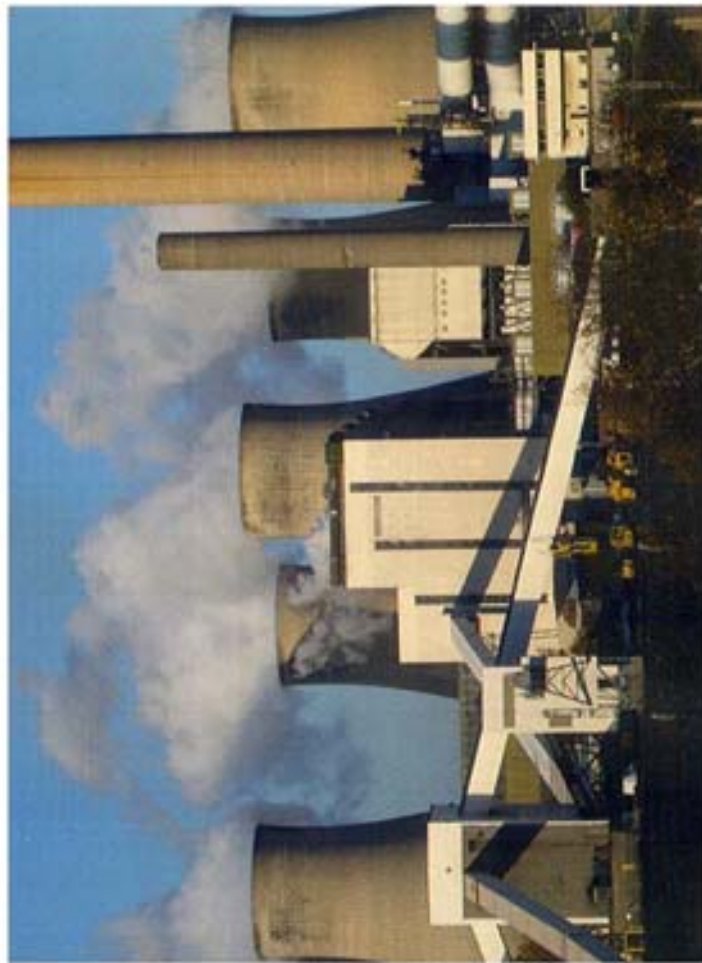
Gaußverteilung Sinterdichte (Werkstoff SB-Z), 15 Chargen in 2004





4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 11

Steinkohlekraftwerk



think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

Rohleitung zum Transport von Nickelierz



4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 13

Aufbau „Composit Armor“: KAT1

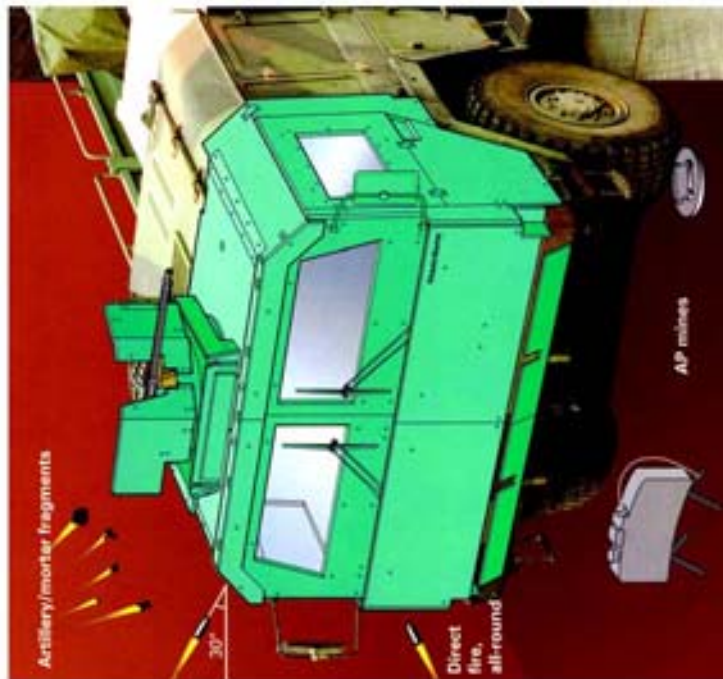


Bild KMW

ASV nach Minenunfall

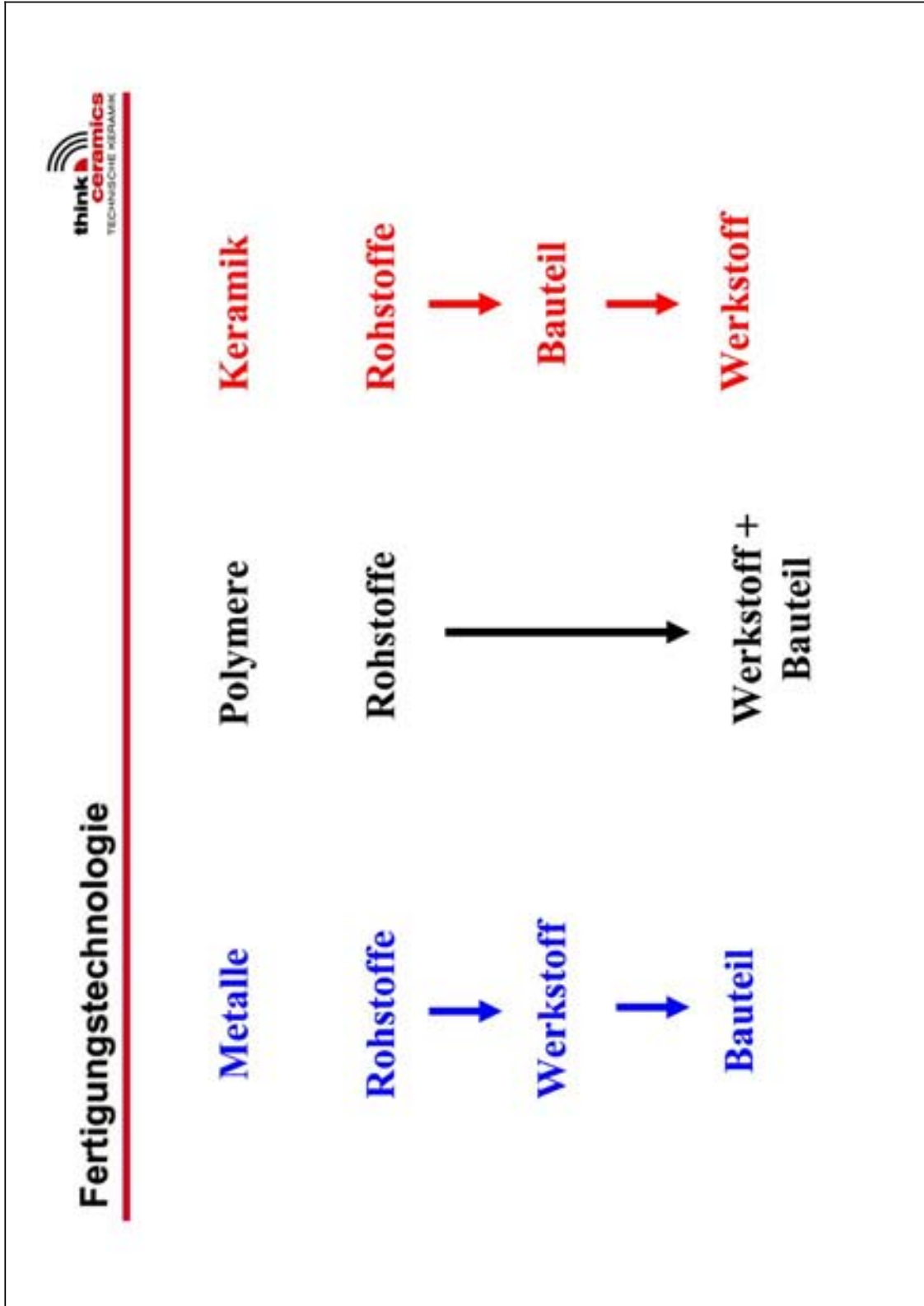


Bild: Textron (USA)

ASV nach Beschuss



Bild Textron (USA)

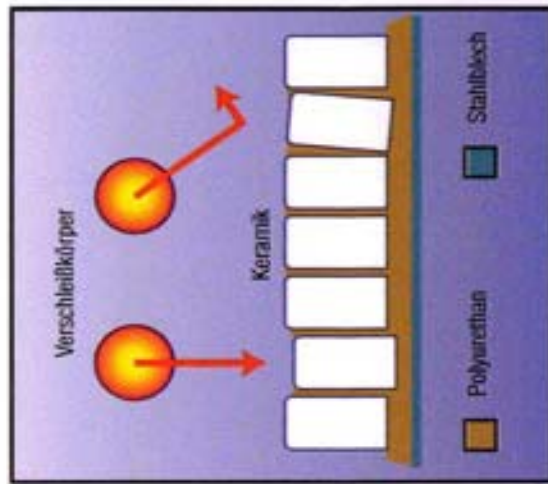
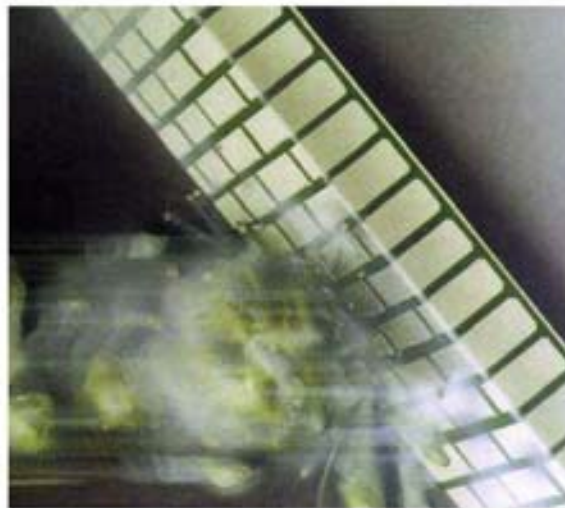


4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 17

Modultechnik: Hydrozyklon und Zykloneinlauf



Impaktpaneele



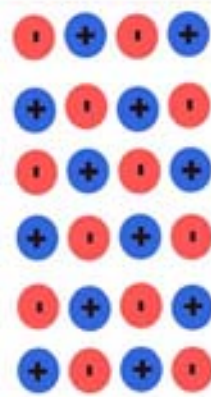
4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 19

Einfluss des Bindungstyps



Metallische Bindung

Dichteste Kugelpackung
Bindungskräfte gering
<H; <E; >WAK; <T_s



Ionenbindung

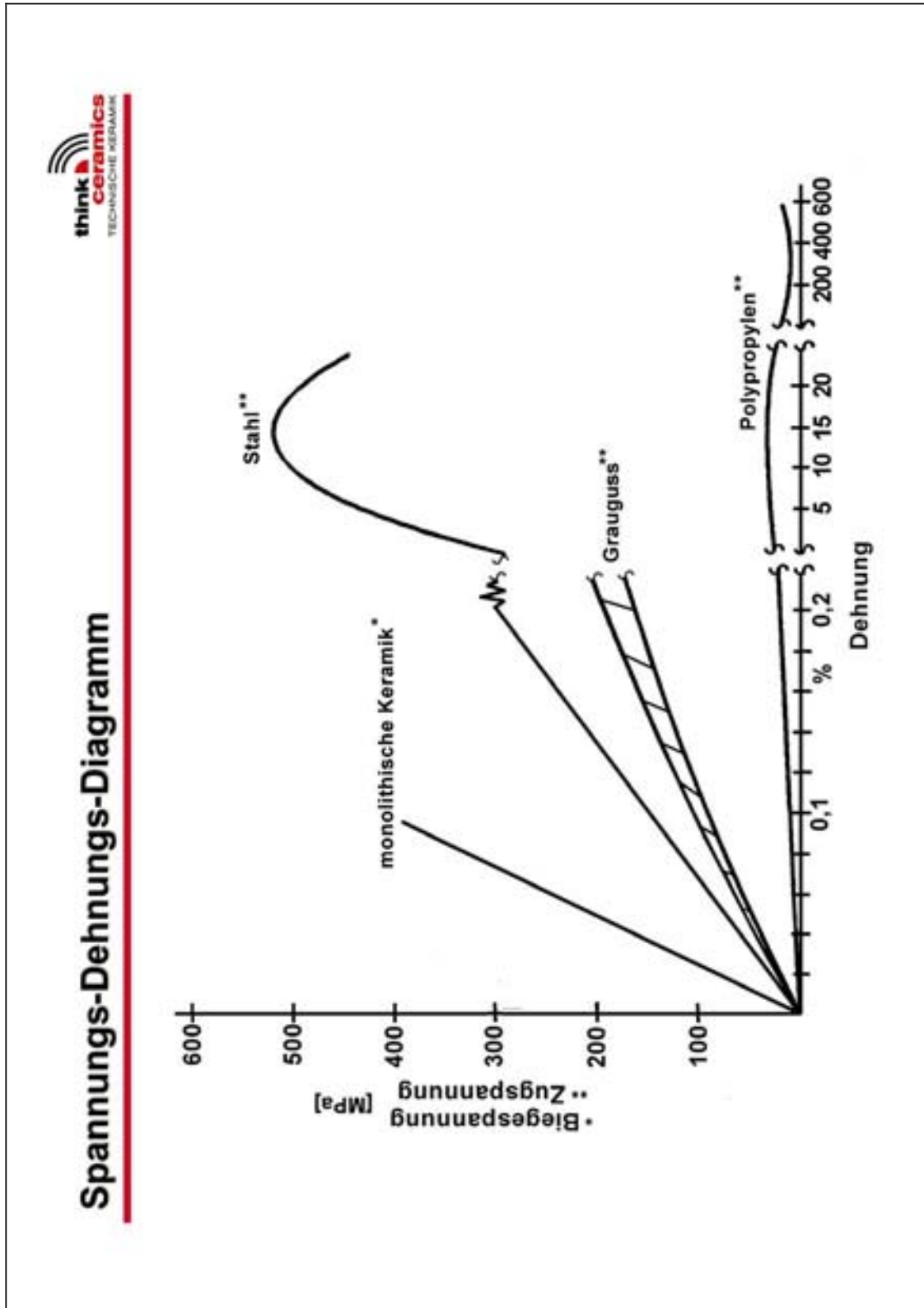
Tetraeder-, Oktaederstrukturen
Bindungskräfte hoch
>H; >E; <WAK; <T_s



Atombindung

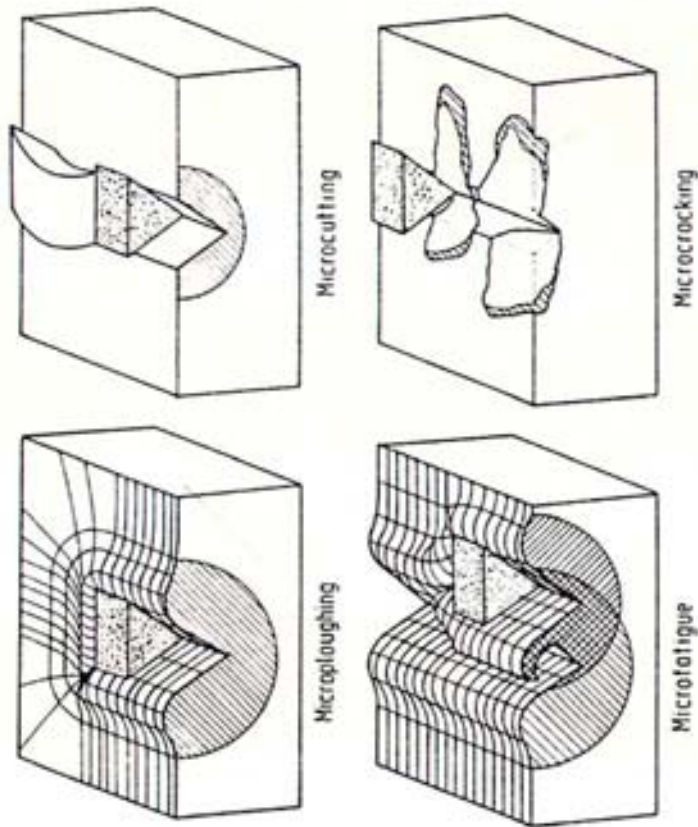
Tetraederstrukturen
Bindungskräfte sehr hoch
>>H; >E; <<WAK; >>T_s

Vermischtes



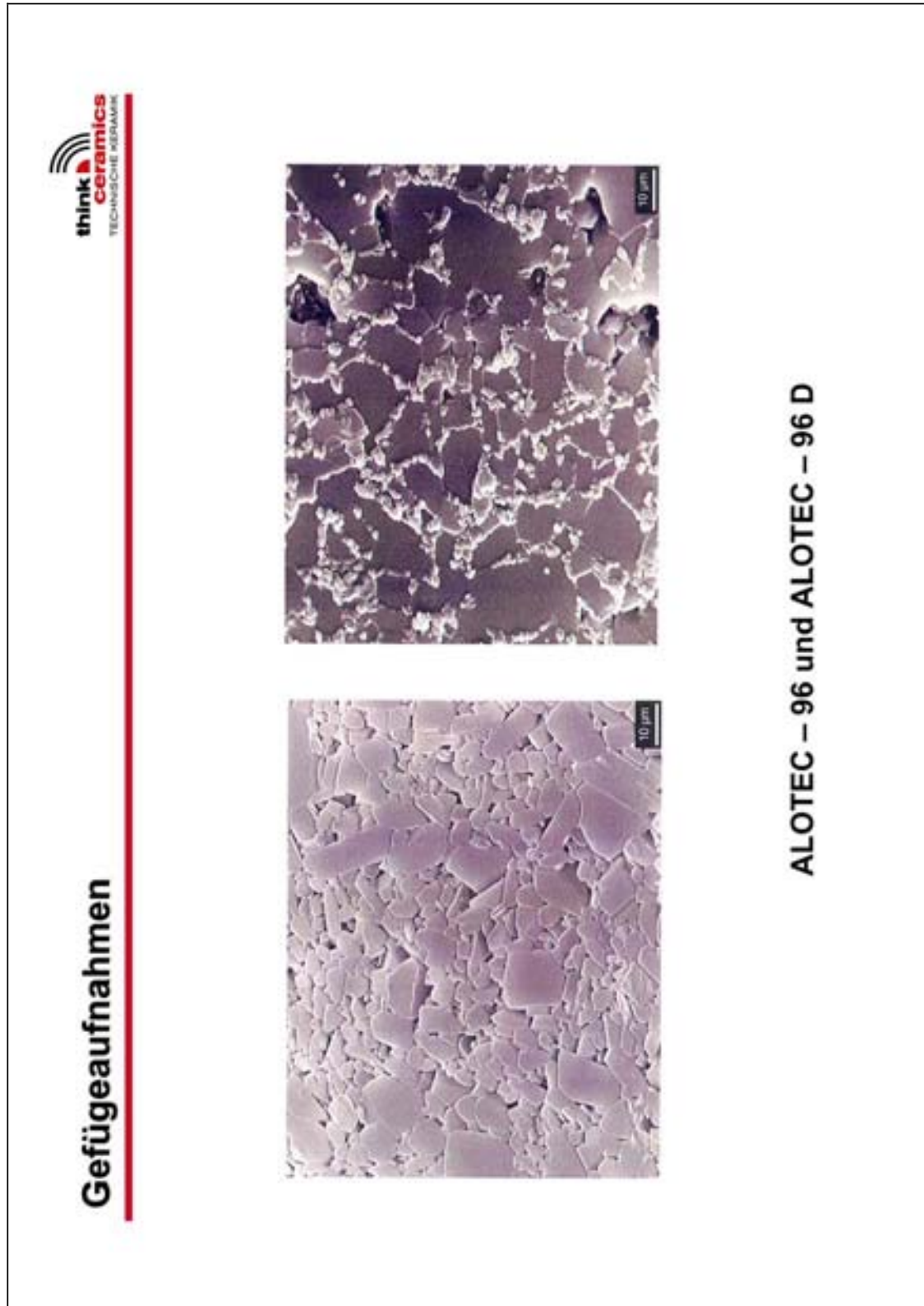
4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 21

Verschleißmechanismen



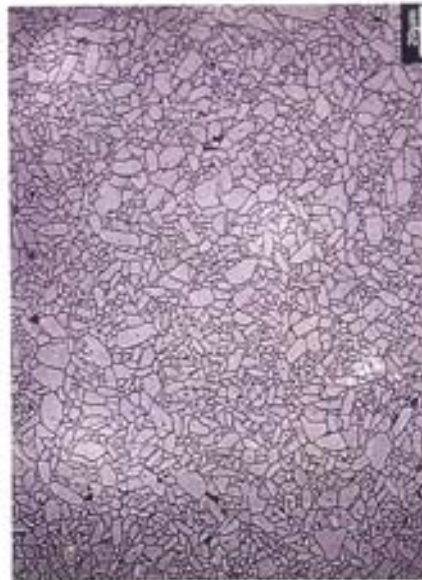
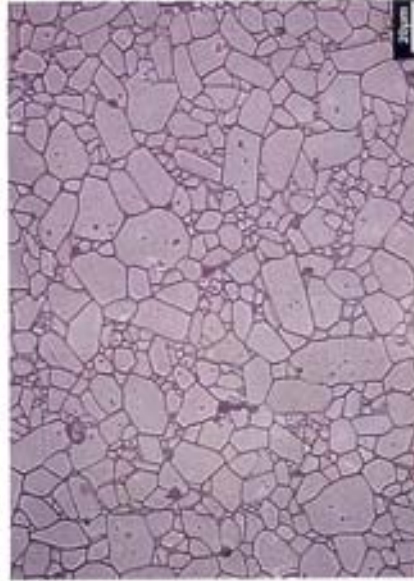
Abrasiveverschleiß von Werkstoffen

Vermischtes



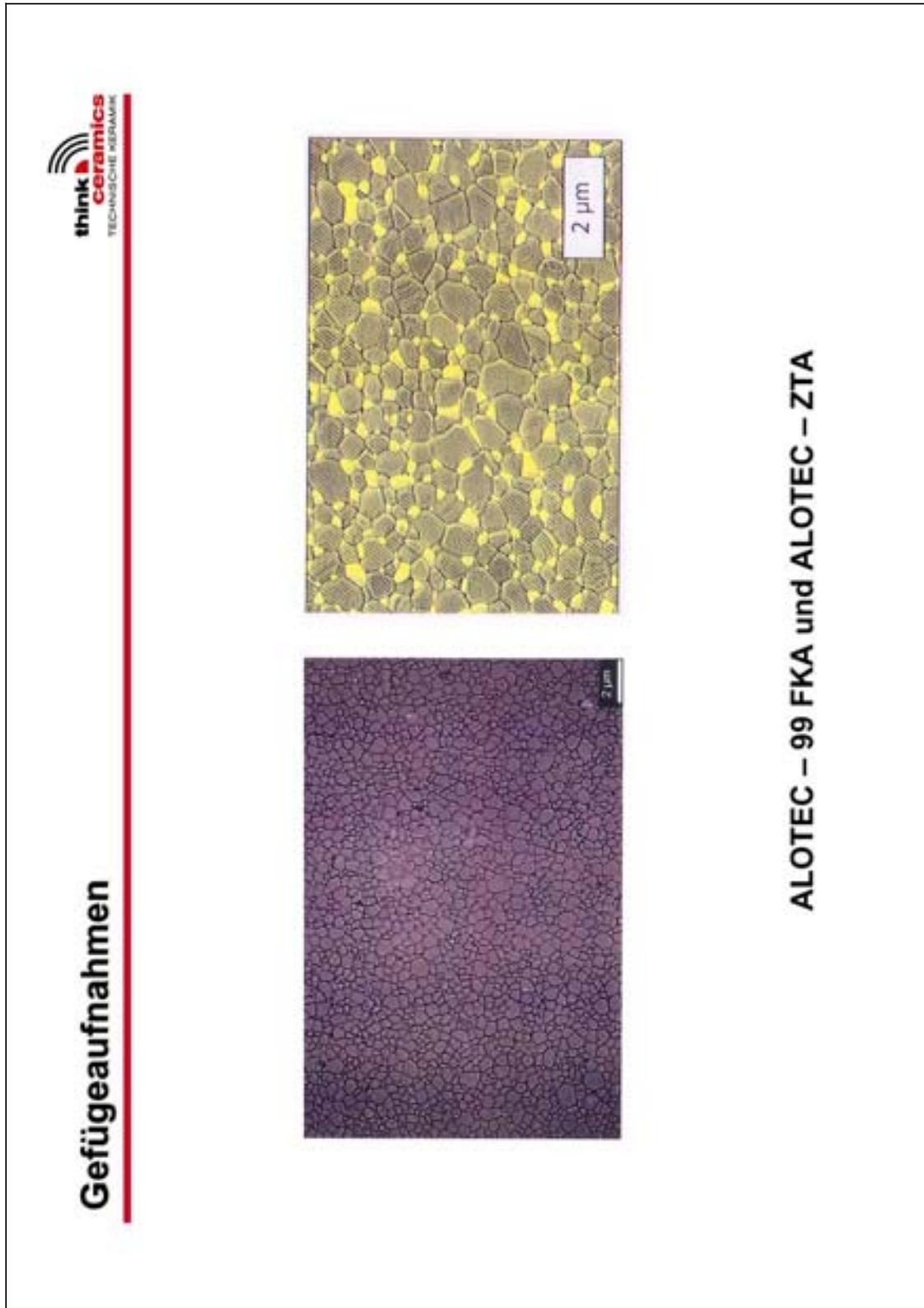
4.4 Ein Leben mit und für Keramik – Folie 23

Gefügebildern



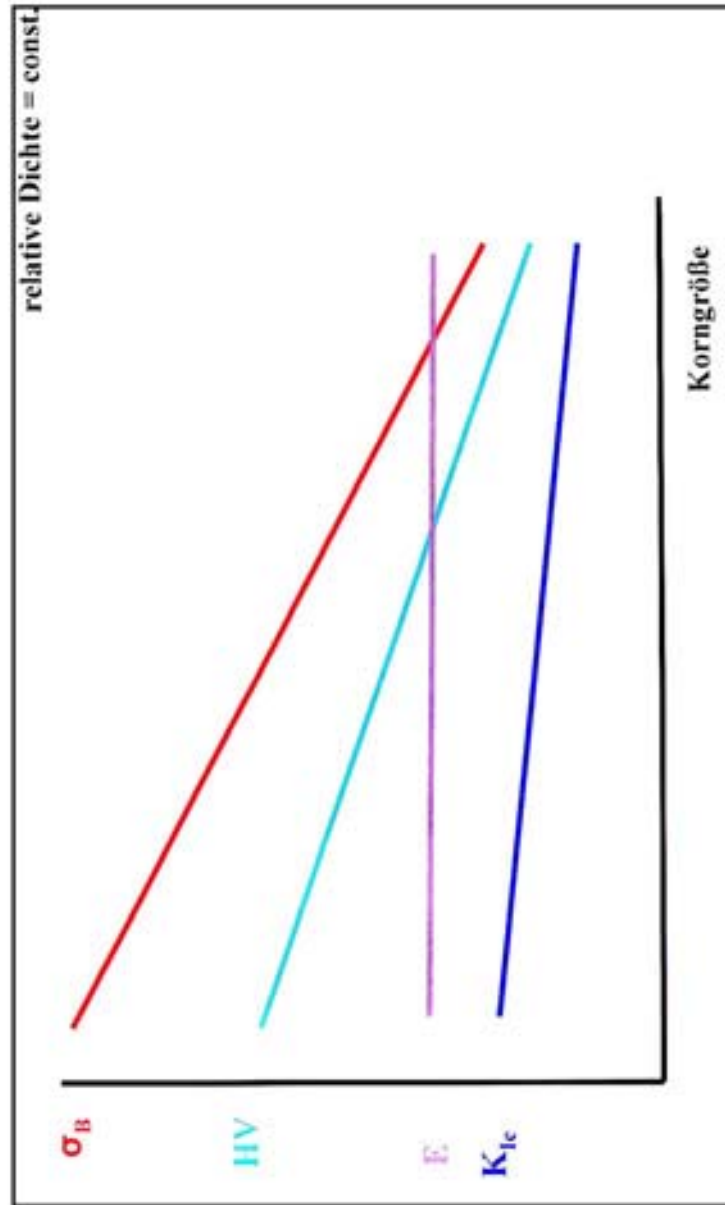
ALOTEC – 99 P und ALOTEC – 99 S

Vermischtes



4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 25

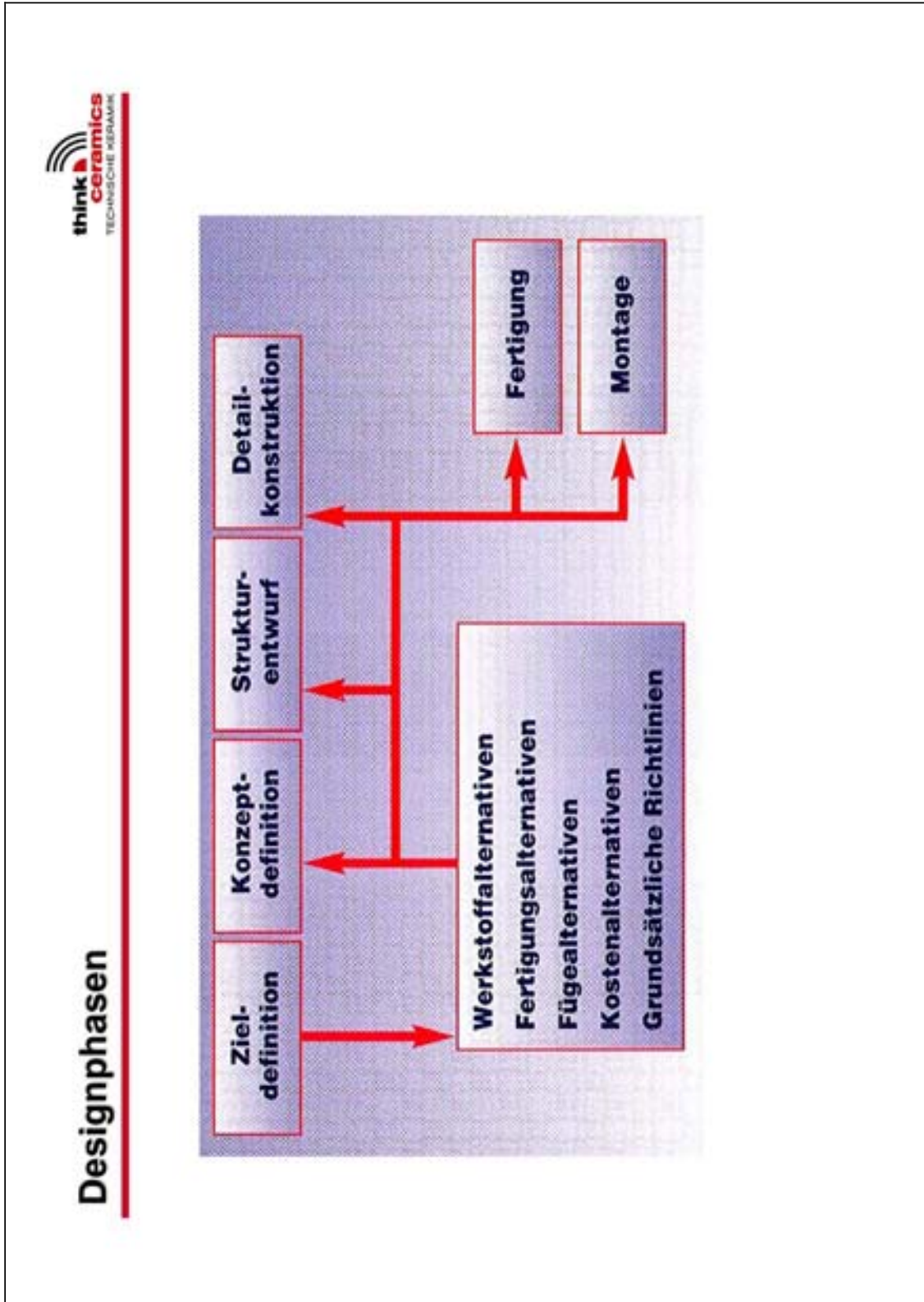
Einfluss der Korngröße



Einfluss der Korngröße auf die Werkstoffeigenschaften

Einteilung der Keramiken nach K_{Ic}

| $K_{Ic} < 3$ | $K_{Ic} = 3 - 5$ | $K_{Ic} > 5$ | pseudoduktill |
|-------------------------------|---|------------------|---|
| Glas Porzellan Silikate | Al_2O_3 Spinell SiC BC SN | SN ZTA PSZ | C - SiC MCC Faserverstärkte Werkstoffe |



4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 28

think Ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

Flexibler Schlauchkrümmer



4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 29

Pneumatisches Fördersystem



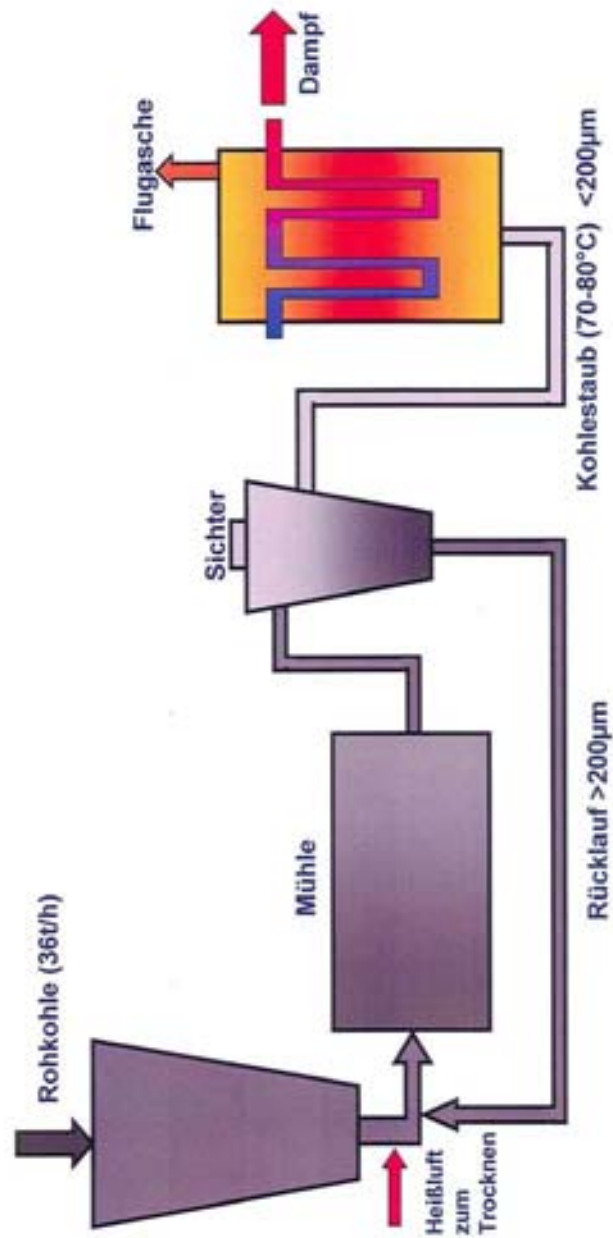
Vermischtes

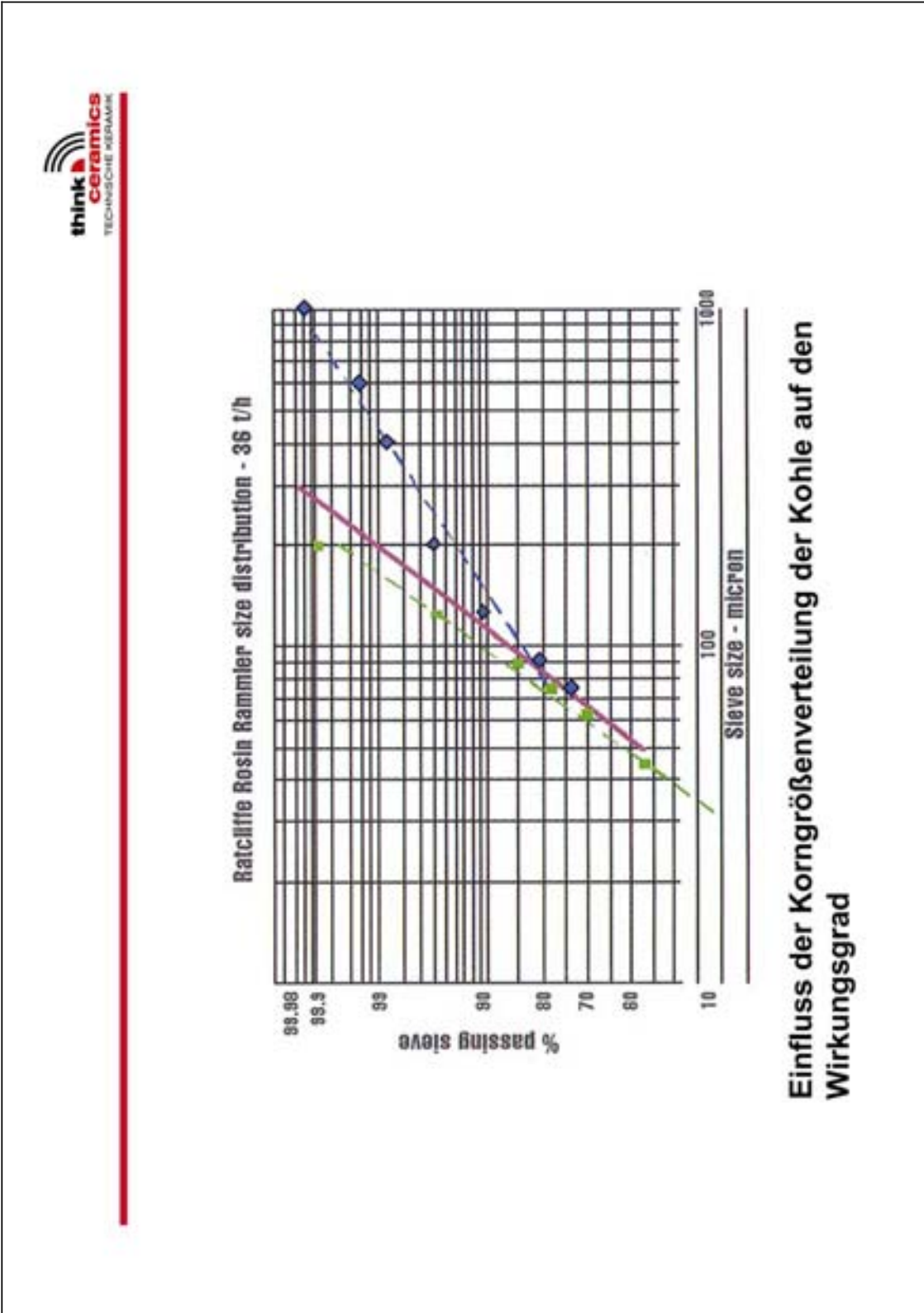
Weitere Anwendungen



Zellenradschleuse (I.o.), Drehrohrweiche (I.u.)
und Kugelhahn

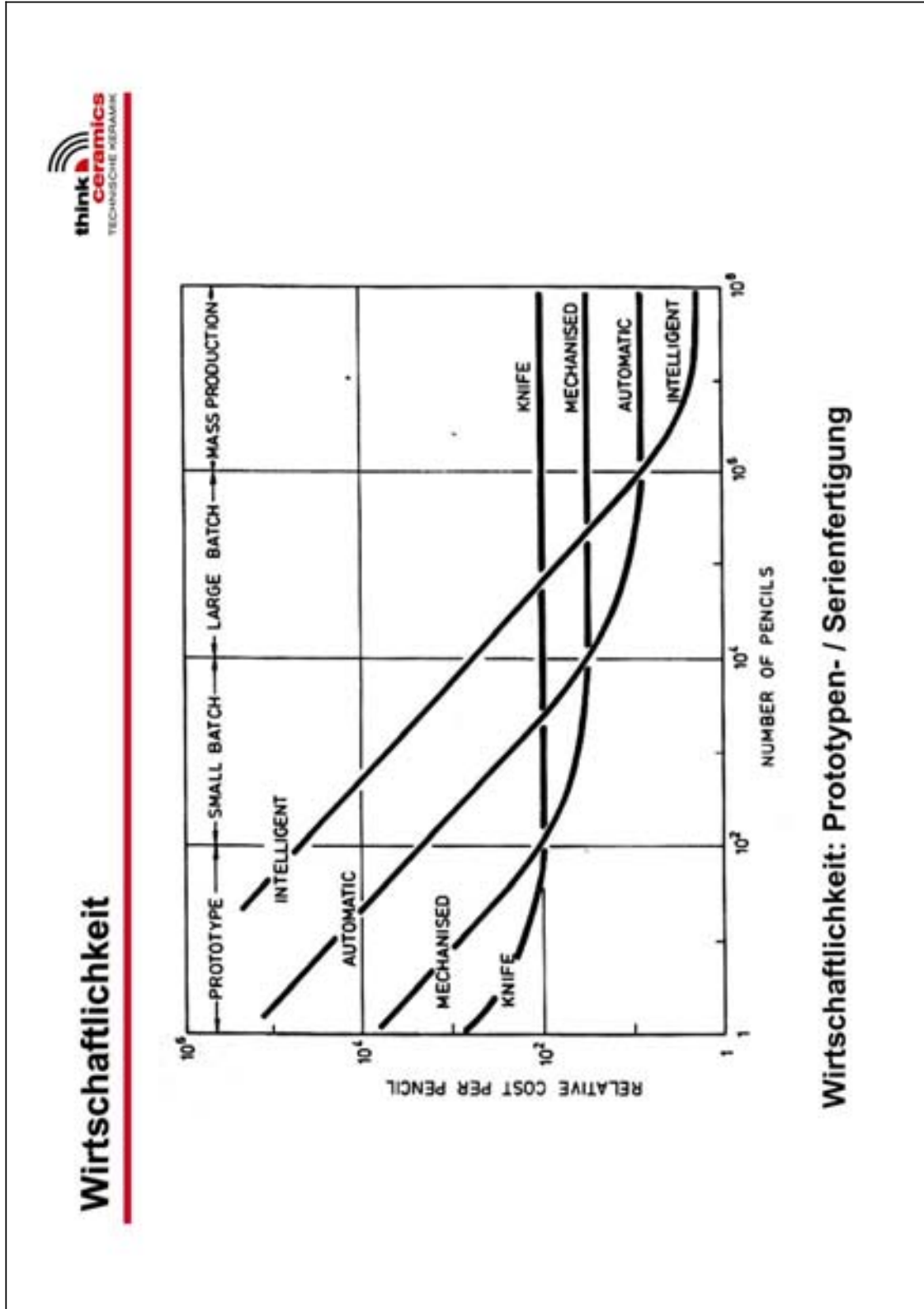
Prinzip eines Kohlekraftwerks





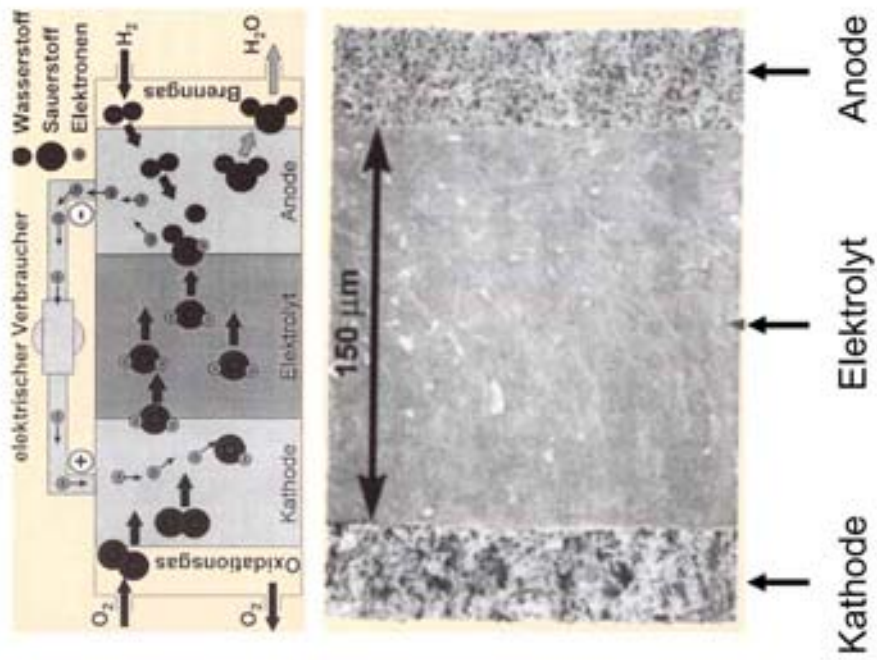
4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 33

- **Viele Anwender haben noch keine Beziehung zur Keramik und stehen deshalb der Keramik skeptisch gegenüber!**
- **Für den Einsatz von Keramik in einem System ist ein spezifisches Know – how erforderlich!**
- **Eine erfolgreiche Konstruktion für ein Stahlteil lässt sich in den seltensten Fällen direkt auf Keramik übertragen!**
- **Keramik verzeiht durch ihr spröd – elastisches Verhalten keine Konstruktionsfehler!**
- **Der Konstrukteur greift erst dann zur Keramik, wenn er keine konventionelle Lösung mehr sieht!**
- **Keramik verhindert durch ihre langen Standzeiten das lukrative Nachrüstgeschäft für Anlagenbauer!**
- **Keramik ist als Bauteil teuer!**



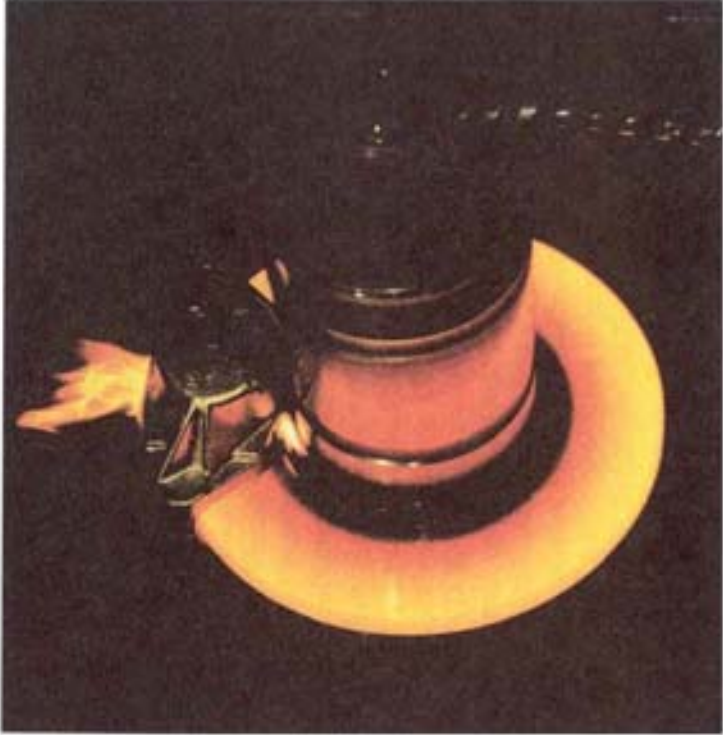
4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 35

Hochtemperatur-Brennstoffzelle



Vermischtes

Keramische Bremse



think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

Bild: SGL Brakes GmbH


4.4 Ein Leben mit und für Keramik - Folie 37

Faserverbundwerkstoffe



Oxidische Faserverbundwerkstoffe CMC (Bild. DLR)

Transparentes Aluminiumoxid



Transparente Al_2O_3 – Keramik (Bild: FhG – IKTS)

think ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

Anlaufspur einer Skisprungschanze

