

Nye keramiske materialer – avanceret teknisk keramik

JESPER SAND DAMTOFT



Damtoft, J. S.: Nye keramiske materialer – avanceret teknisk keramik. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1986*, side 17–26, København, 1. juni 1987.

Advanced technical ceramics comprises a wide variety of materials which are distinguished from traditional ceramics by improved material characteristics, more complex production processes and higher market values. Intense research and development efforts are being carried out within this field, and large market increases are foreseen. Important applications include wear resistant parts, cutting tools, catalyst carriers, parts for heat engines, capacitors, packages for integrated circuits, magnets, sensors, optical fibres etc. *Geology has many features in common with research in advanced technical ceramics, a fact that is expected to prove beneficial for both fields.*

Jesper Sand Damtoft, Aalborg Portland, P. O. Box 165, DK-9100 Aalborg. 12. december 1986.

Avanceret teknisk keramik er en fællesbetegnelse for en lang række materialer, der har tiltrukket sig stor opmærksomhed. Dette skyldes de mange muligheder, der ligger i anvendelsen af disse materialer og de dermed stærkt stigende salgstal. Avanceret teknisk keramik er af speciel interesse for geologer, idet forskning og udvikling af materialerne har mange lighedspunkter med geologi, hvilket da også har resulteret i, at en række geologer allerede har fundet beskæftigelse inden for feltet.

Ved keramik forstås i denne forbindelse: – *alle kunstigt fremstillede, uorganiske, ikke-metalliske materialer*. Denne definition, der stammer fra de engelsktalende lande, er meget bred og omfatter bl.a. klassiske materialer som tegl, mursten, porcelæn, cement og vinduesglas.

Forskellene mellem traditionel og avanceret teknisk keramik kan illustreres ved fremstillingsprocessen (Fig. 1). Produktionen af alle typer keramik indebærer en formgivning og varmebehandling af et eller flere udgangsmaterialer. Udgangsmaterialerne til den traditionelle tekniske keramik er hovedsageligt naturligt forekommende, som f.eks. ler, sand, kridt eller feldspat. Formgivningsmetoder omfatter gængse former for presning, drejning og støbning, mens kravene til varmebehandling honoreres af en lang række klassiske ovntyper. Den dannede mikrostruktur er heterogen, består som regel af adskillige faser,

og er rig på urenheder og luftporer. De færdige produkter, som f.eks. teglsten, vinduesglas, betonelementer eller el-isolatorer, har begrænsede mekaniske egenskaber, men er billige og produceres i meget store mængder.

Til avanceret teknisk keramik stilles så store krav til udgangsmaterialerne med hensyn til høj renhed og nøje kontrollerede partikkelkarakteristika, at syntetiske udgangspulvere må anvendes. Formgivningen stiller større krav til kvaliteten af de fremstillede legemer og omfatter foruden de metoder, der er kendt fra den traditionelle keramik endvidere isostatisk presning, der er velkendt fra pulvermetallurgi, injektionsstøbning, der er meget anvendt i plastic industrien, plasma sprøjtning m.fl. Store krav stilles til brændingen af avanceret teknisk keramik, hvorfor et nøje kontrolleret temperaturforløb og evt. anvendelse af højt tryk eller specielle gasatmosfærer er påkrævet. Mikrostrukturen af de færdige materialer er homogen og finkornet, og uønskede faser, porer og store korn kan ikke tillades. Den komplicerede fremstillingsproces indebærer høje produktionsomkostninger, men resulterer i materialer, hvis egenskaber gør, at de kan sælges til høje priser.

Avanceret teknisk keramik omfatter et meget bredt spektrum af materialer med vidt forskellige egenskaber. En grov inddeling efter anvendelsesområder anvendes imidlertid ofte:

	TRADITIONEL TEKNISK KERAMIK	AVANCERET TEKNISK KERAMIK
Råmaterialer	Naturlige ler sand kridt feldspat kvarts	Syntetiske Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , ZrO_2 , sialon, mullit $Pb(La,Zr,Ti)O_3$
Formgivning	Traditionel vådstøbning ekstrudering slikkerstøbning presning drejning	Avanceret ekstrudering slikkerstøbning injektionsstøbning isostatisk presning plasma sprøjtning
Varmebehandling	Forbrændingsovn roterovn skaktovn tunnelovn	Elektrisk ovn evt. højt tryk evt. speciel gas- atmosfære
Mikrostruktur	Heterogen porer glasfase urenheder uensartet kornstørrelse	Homogen tæt ingen uønsket glasfase ingen urenheder ensartet kornstørrelse
Produkter	Lav markedsværdi tegl mursten beton vinduesglas ildfaste sten isolator porcelæn	Høj markedsværdi kondensatorer iltsensorer turbineblade optiske fibre skæreværktøj kunstige knogler

Fig. 1. Sammenligning mellem traditionel og avanceret teknisk keramik med eksempler.

Comparison between traditional and advanced technical ceramics with examples.

- materialer til strukturelle anvendelser,
- materialer til anvendelse inden for elektronik eller beslægtet industri.

Fig. 2 viser en af de mange forudsigelser, der har resulteret i den store kommercielle interesse for avanceret teknisk keramik. Disse forudsigelser har alle som fællestræk en markedsvækst i størrelsesordenen 300-1000% inden år 2000. Ud over dette viser forudsigelserne store forskelle, delvis p.gr. af forskellige opfattelser af, hvilke materialer, der tilhører gruppen, delvis fordi det er svært at forudsige udviklingen inden for materialer, der knap nok er udviklede. Undersøgelserne viser

imidlertid samstemmende at markedets sammensætning fremover vil gennemgå en væsentlig ændring. Hvor materialer med anvendelser inden for elektronik el. lign. i dag dominerer markedet, vil markedsandelen for materialer til strukturelle anvendelser fremover stige betydeligt; ifølge en forudsigelse endog til over $\frac{2}{3}$ af verdensmarkedet i år 2000 (Alford et. al., 1986).

Materialer til strukturelle anvendelser

Til strukturelle formål anvendes fortrinsvis materialer der er karakteriseret af følgende egenskaber:

Anvendelsesområder	1985	1990	1995	2000
Elektronik eller lignende anvendelser				
Elektroniske anvendelser	1.708	3.740	6.565	11.360
Integreret optik		1	13	111
Avancerede energisystemer			160	360
	1.708	3.741	6.738	11.831
Strukturelle anvendelser				
Automobil industri	53	634	2.606	5.700
Skæreredskaber	14	92	246	500
Rum- og luftfart	20	30	44	65
Biokeramik		10	20	30
Andre industrielle anvendelser	30	125	310	500
	117	891	3.226	6.795
Total	1.825	4.632	9.964	18.626

Fig. 2. Forventet markedsvækst inden for avanceret teknisk keramik. Værdier i mill. \$ (Anon., 1986).

Predicted market growth of advanced technical ceramics. Values in mill. \$ (Anon., 1986).

- stor styrke,
- stor slidfasthed,
- høj korrosionsbestandighed,
- højt smeltepunkt.

Keramiske materialer med disse egenskaber findes blandt substanser med høj grad af kovalent binding eller forbindelser mellem små, flervalente ioner. Sådanne forbindelser findes indenfor nitrider, carbider, borider og visse oxider. Af fig. 3 fremgår det, at de bedste af disse materialer opnår styrker, der er sammenlignelige med stål.

Keramiske materialer er imidlertid skøre. Dette fundamentale problem gør, trods de høje styrker, at avanceret teknisk keramik har en tilbøjelighed for katastrofale svigt. Årsagen til dette er keramikens ømfindtlighed over for selv mikroskopiske revner. Størrelsen af de defekter, der kan forårsage brud, er nemlig ikke mere end 10–1000 μm , mens den energi, der er nødvendig for at udbrede en revne, er 10^4 gange mindre end i metal (Alford et. al., 1986). For at udnytte materialernes høje styrker er en finkornet og tæt tekstur derfor nødvendig, idet både enkeltkorn og hulrum vil virke som arnesteder for ødelæggende revner. Dette gør endvidere reproducerbarheden

af de keramiske materialer lille, idet ødelæggende defekter kan introduceres på mange trin i fremstillingsprocessen og er umulige at opdage ved de nu kendte ikke-destruktive testmetoder.

Forskellige metoder er under overvejelse i et forsøg på at løse skørhedsproblemet. En række af disse går ud på at udvikle keramik med en fibrøs mikrostruktur. Dette kan gøres ved hjælp af fiberarmring (Fisher, 1984a), der er en lovende, men kompliceret metode, eller ved at anvende udgangsmaterialer, der ved brændingen udvikler en prismatisk krystalform, som det f.eks. er tilfældet for Si_3N_4 (Lange, 1983). En anden gruppe af løsningsmodeller involverer transformationshærdning. Disse metoder udnytter, at fase transformationen fra den tetragonale høj-temperatur form af ZrO_2 , der dannes ved brændingen, til den monokline lav-temperatur modifikation, indebærer en volumenforøgelse. Hvis ZrO_2 -kornene har en passende fin kornstørrelse, vil fase transformationen give en hærdende effekt (Heuer et. al., 1986). Ved at dispergere tetragonale ZrO_2 -korn i forskellige keramiske matricer er væsentlige styrke- og sejhedsforøgelser opnået. De højeste styrker og sejheder, der hidtil er målt for et keramisk materiale, er endvidere opnået for transfor-

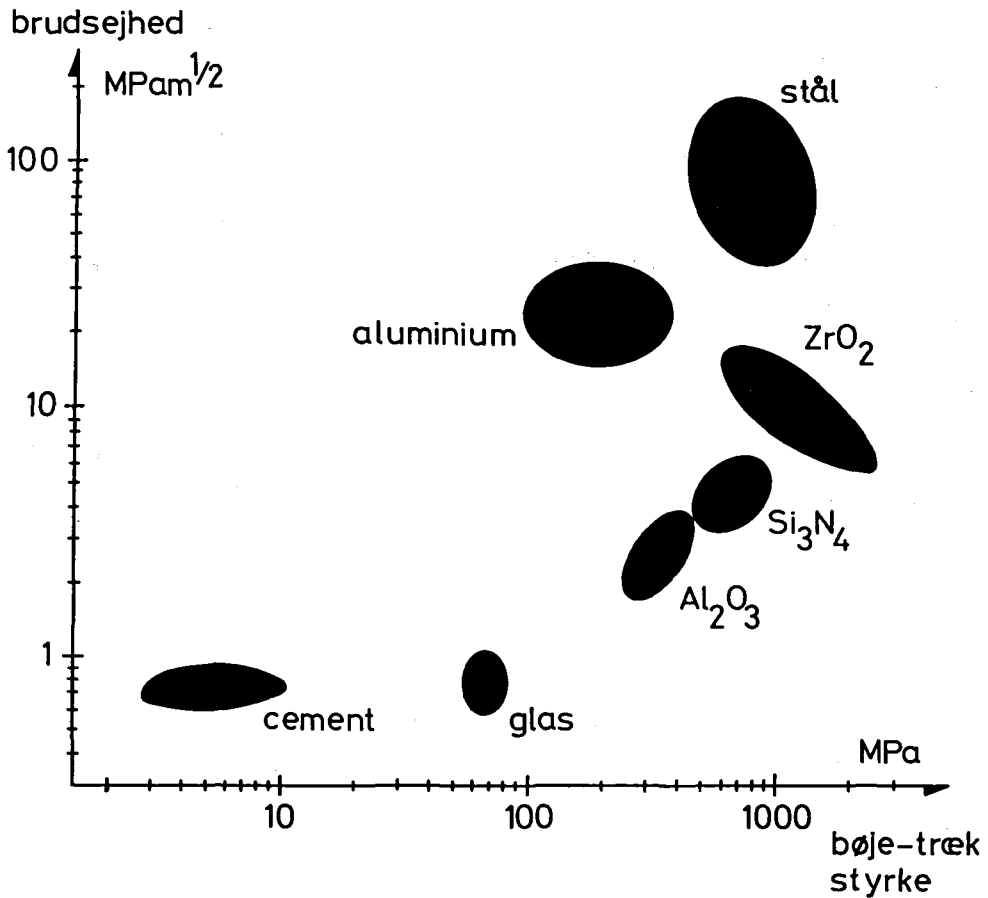


Fig. 3. Typiske mekaniske egenskaber af en række materialer. Bøje-træk styrken er et udtryk for den kraft, der er påkrævet for at forårsage brud, mens brudsejheden er et mål for skørheden (lav brudsejhed = stor skørhed).

Typical mechanical properties of a number of materials. The bending strength (bøje-træk styrken) is an expression of the force necessary to cause breaking, whilst the fracture toughness (brudsejheden) is a measure of the brittleness (low fracture toughness = large brittleness).

mationshærdet ZrO_2 -baseret keramik (Tsukuma et. al., 1985).

De strukturelle anvendelser, der er summeret i fig. 4, er hidtil blevet begrænset af disse teknologiske problemer. Det er da derfor ikke overraskende, at avanceret teknisk keramik inden for området først har vundet indpas, hvor der stilles moderate teknologiske krav. Det drejer sig her om komponenter af simpel form eller begrænset størrelse. De egenskaber der udnyttes kan f.eks. være de nye materials hårdhed, slidfasthed, styrke, ildfasthed eller resistens overfor aggressive omgivelser (Brook & Riley, 1984). Eksempler på disse anvendelser er brænderdyser, lejer, digler, foringer til rør, varmevekslere eller malelegemer. Det mest anvendte materiale til disse

formål er stadig Al_2O_3 (korund), men anvendelsen af ZrO_2 , SiC, Si_3N_4 og sialon (blandingsmaterialer i systemet Al_2O_3 - Si_3N_4 - SiO_2 -AlN) vinder frem inden for dette felt. I kraft af deres store hårdheder er keramiske materialer endvidere velegnede som skæreredskaber til metalforarbejdning. Det drejer sig her om materialer som Al_2O_3 , SiC, TiC, TiN, kubisk BN (der nærmer sig diamant i hårdhed), sialon og Si_3N_4 .

Et andet interessant område er porøse materialer med høj temperatur-chok bestandighed, der kan anvendes som katalysatorbærere, smeltetmetal filtre eller varmevekslere. Foretrukne materialer til denne anvendelse er i dag cordierit og Al_2O_3 (Lachman, 1984).

Indenfor medicinen finder avanceret teknisk

Anvendelse	Egenskab	Materialer	
Skæreværktøj	Hård	Al ₂ O ₃ , WC-Co	1
		Si ₃ N ₄ , SiC, TiC, TiN, c-BN	2
Slibemidler	Hård	SiC, TiC, TiN	1
Foringer, lejer, ventiler, dyser etc.	Slidfast	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂	2
Varmeisolering	Højtemperaturbestandig, fibrøs	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , LAS, Al-B-silikater	2
Katalysatorbærere	Temperaturchok bestandig	Cordierit, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , zeolitter	2
Brænderdyser, digler	Højtemperaturbestandig	SiC, Si ₃ N ₄ , Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , sialon	2
Motordele, varmevekslere	Højtemperaturbestandig, stærk	Al ₂ O ₃ , SiC, Si ₃ N ₄ , ZrO ₂ , sialon, mullit, AlN	3
Korrosionsbeskyttelse	Modstandsdygtig mod kemiske angreb	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , SiC, Si ₃ N ₄ , BN, B ₄ C, TiN	2
Fast smøremiddel	Smørende, smøremiddelbærer	MoSi ₂ , BN, (CF) _n	3
Kunstige knogler etc.	Stærke, udstødes ikke af kroppen	Al ₂ O ₃ , apatit	2

Fig. 4. Eksempler på strukturelle anvendelser af avanceret teknisk keramik. (1): udbredt anvendelse, (2): nogen anvendelse, (3): under udvikling. Kilder: Kenney & Bowen (1983); Roberts (1985).

Examples of structural applications of advanced technical ceramics. (1): widespread application, (2): limited application, (3): being developed. Sources: Kenney & Bowen (1983); Roberts (1985).

keramik indpas i form af implantater (kunstige knogler etc.). Al₂O₃ anvendes ofte til dette formål, da det er biokompatibelt og har en stor kemisk stabilitet, der beskytter materialet mod nedbrydning i kroppen. Andre typer keramik, baseret på apatit, fosfatholdigt glas eller glaskeramik, der er i stand til at vokse sammen med kroppens væv, eller keramik bestående af calcium- eller natrium-fosfater, der går i opløsning efter en passende tid, er under udvikling (Boretos, 1985).

Keramik anvendes endvidere til forskellige formål inden for kernekraft-industrien. Det kan være som brændsel (UO₂, PuO₂, ThO₂) eller til indkapsling af radioaktivt affald. Dette indkorporeres i glas eller i kunstige bjergarter (SYNROC), der indeholder krystalline forbindelser som f.eks. perovskit (CaTiO₃), bariumhollandit (BaAl₂Ti₆O₁₆) eller zirconolit (CaZrTi₂O₇), der er stabile under de forhold, hvor under deponeringen finder sted (Ringwood et. al., 1979).

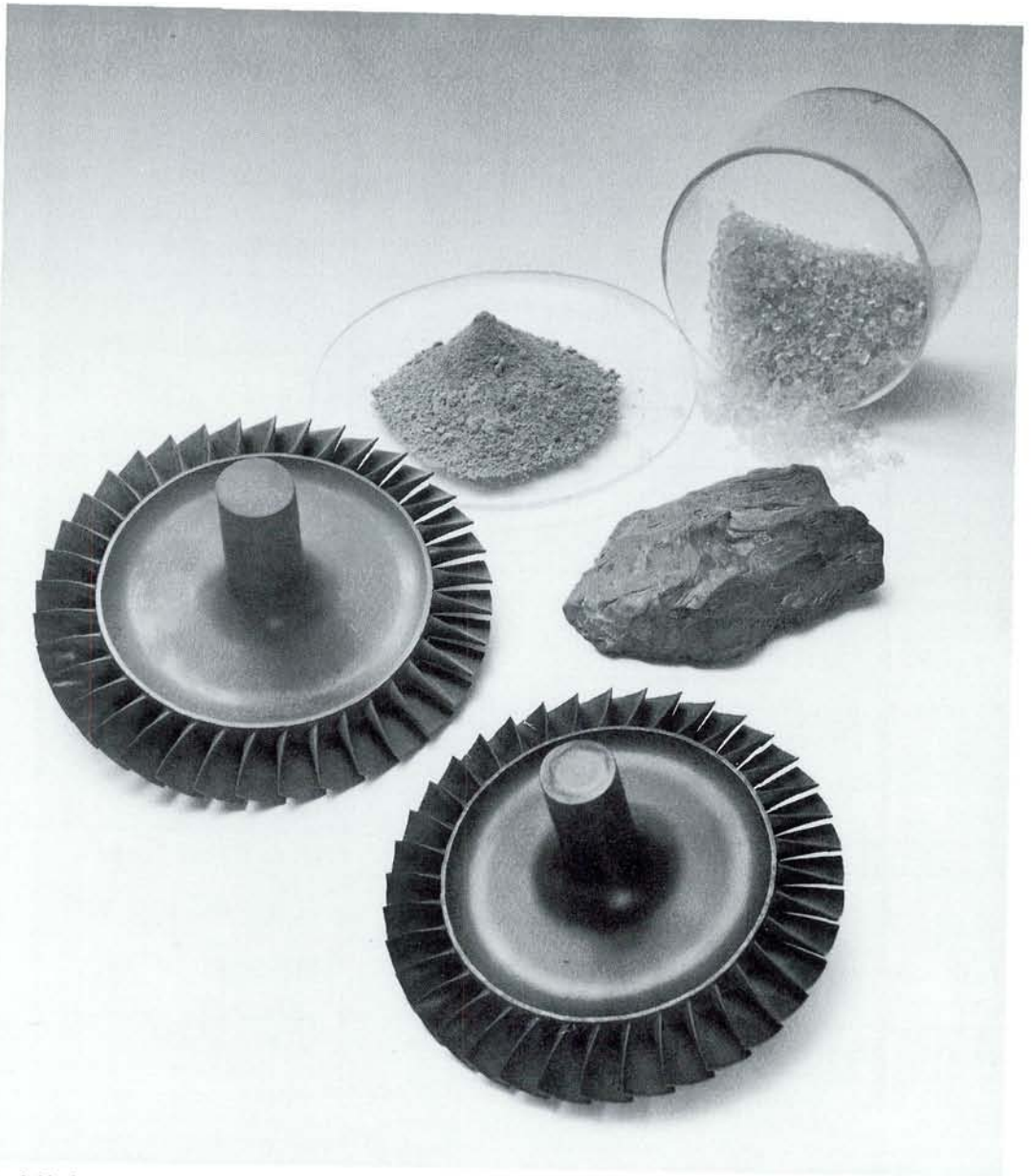


Fig. 5. Nogle procestrin ved fremstillingen af injektionsstøbte og varme-isostatisk pressede turbinerotorer. Fremstillet i Si_3N_4 af ASEA CERAMA AB, Sverige.

Some process steps in the production of injection molded and hot isostatically pressed turbine rotors. Produced in Si_3N_4 by ASEA CERAMA AB, Sweden.

Som det fremgår af fig. 2 forventes den helt store salgsmængde imidlertid inden for bil- og lastvognsindustrien. Dette skyldes først og fremmest muligheden for at anvende keramiske dele i forbrændingsmotorer (Godfrey, 1984). Ved at anvende SiC , sialon eller Si_3N_4 til turbineblade (fig. 5), stempler osv. udnyttes, at disse materialer er lettere og bevarer deres styrker ved højere

temperaturer end tilsvarende metaller. Ved endvidere at belægge de varme dele i motoren med isolerende materialer som ZrO_2 kan denne anvendes ved forhøjede driftstemperaturer samtidigt med at behovet for køling mindskes, med resulterende meget væsentlige brændstofbesparelser til følge. De teknologiske udfordringer ved disse anvendelser er endnu så store, at der trods

Anvendelse	Egenskab	Materialer	
Kondensatorer	Ferroelektrisk, høj dielektrisk konst.	BaTiO ₃ , SrTiO ₃ , Pb(La,Zr,Ti)O ₃	1
Termistorer, varistorer, sensorer	Halvledende, varierer ledningsevne med varierende påvirkninger	BaTiO ₃ , SiC, V ₂ O ₅ , ZnO eller SnO dopet med metaloxider	1
Pakninger til integrerede kredsløb	Elektrisk isolerende, lav dielektrisk konst.	Al ₂ O ₃ , BeO, MgAl ₂ O ₄	1
Vibratorer, summere, transformere, gnistgeneratorer, transducere	Piezoelektrisk	Kvarts, LiNbO ₃ , Pb(Zr,Ti)O ₃	1
Ilt-sensorer, pH-metre	Iltionledende	ZrO ₂	2
Faste elektrolytter til Na-batterier	Na-ion ledende	β-alumina, nasicon	3
Tonehoveder, temperatur-sensorer	Magnetisk	MFe ₂ O ₄ , M=Ni,Mn,Zn, Mg,Co	1
Magneter	Magnetisk	MFe ₁₂ O ₁₃ , M=Ba,Sr	1
Optiske fibre, integreret optik	Gennemsigtig, lavt lystab	SiO ₂ -glas	2
		flourid-glas,	3
		sulfid-glas	
Vinduer til special-lamper o. lign.	Gennemskinnelig	Al ₂ O ₃ , mullit, Beo, AlON, Y ₂ O ₃	2

Fig. 6. Eksempler på elektroniske anvendelser af avanceret teknisk keramik. (1): udbredt anvendelse, (2): nogen anvendelse, (3): under udvikling. Kilder: Kenney & Bowen (1983); Roberts (1985).

Examples of electronic applications of advanced technical ceramics. (1): widespread application, (2): limited application, (3): being developed. Sources: Kenney & Bowen (1983); Roberts (1985).

store investeringer i forskning og udvikling endnu vil gå nogle år, før keramik for alvor vil vinde indpas i motorer.

Materialer til anvendelse inden for elektronik eller beslægtet industri

Avanceret teknisk keramik har hurtigere fundet udstrakt anvendelse (fig. 6) inden for elektronik

eller lignende industri. Dette skyldes, at man til disse formål udnytter keramik med særlige egenskaber i komponenter af begrænset og derfor mekanisk ikke-kritisk størrelse (Alford et. al., 1986). Disse materialer kan have en eller flere af de følgende karakteristika:

- elektrisk halvledende,
- elektrisk ledende,

- høj dielektrisk konstant,
- piezoelektriske,
- ionledende,
- gennemsigtige,
- magnetiske.

Hovedparten udgøres af iltforbindelser, hovedsagelig som oxider, silikater, titanater eller lignende. Mange af materialerne indgår i faste blandingsserier eller består af to eller flere faser, idet blot små ændringer af den kemiske sammensætning kan give store forskelle i egenskaber.

Produktionen af avanceret teknisk keramik domineres for tiden af elektrisk isolerende materialer (Kenney & Bowen, 1983). Isolerende keramik med lave dielektriske konstanter anvendes som pakningsmateriale til integrerede kredsløb. Disse materialer konkurrerer med plastic og porcelænsbelagt metal og dominerer når styrke, temperaturbestandighed, lufttæthed eller særlig pålidelighed er påkrævet. Vigtigste materiale til denne anvendelse er i dag Al_2O_3 , mens BeO til tider foretrækkes p.gr. af den høje varmeledningsevne, der gør det muligt at lede overskudsvarme fra de elektroniske dele væk. Endvidere er materialer med lavere dielektriske konstanter end Al_2O_3 under udvikling. Andre typer elektrisk isolerende keramik har meget høje dielektriske konstanter og anvendes i stor udstrækning som dielektrikum f.eks. i keramiske multi-lags kondensatorer. Vigtigst blandt disse materialer er BaTiO_3 og $\text{Pb}(\text{La},\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PLZT).

Anvendelsen af keramiske halvledere er ligeledes veletableret, men under hurtig udvikling (Fisher, 1984b; Fisher, 1986). Disse har den egenskab, at resistiviteten forandres ved ydre påvirkninger som f.eks. temperaturændringer, stigende elektrisk potentiale, gaskoncentration, fugtighed etc. Endvidere kan indfaldende lys, varme eller mekanisk påvirkning danne en elektrisk ladning i visse af halvlederne. Keramiske halvledere som $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_2$, BaTiO_3 og ZnO eller SnO_2 , dopet med forskellige andre oxider, kan derfor anvendes som mange typer sensorer (gas, fugtighed, temperatur), varistorer, varmelegemer eller solceller. Ved at udnytte at den elektriske ledningsevne af halvledere som SiC stiger med temperaturen, kan sådanne materialer endvidere anvendes til varmeelementer for højtemperaturbrug (Office of Science and Engineering, 1984).

Keramik bestående af Al_2O_3 , mullit, AlN m.fl. kan gøres gennemskinneligt, og anvendes som sådan bl.a. til de meget energibesparende Na-lamper. Den vigtigste gruppe optisk keramik er imidlertid optiske fibre, hvor ekstremt rent SiO_2 -glas anvendes på grund af et meget lavt lystab, mens fluorid- og sulfid-glas er endnu lavere lystab er under udvikling. En voldsom vækst i forbruget af denne gruppe keramik forventes p.gr. af den stærkt stigende anvendelse af lyslederkabler og integrerede optiske kredsløb (Office of Science and Engineering, 1984).

Andre typer avanceret keramik, der i dag finder stor anvendelse, er de magnetiske ferritter $\text{MFe}_{12}\text{O}_{19}$ ($\text{M}=\text{Ba},\text{Sr}$) og MFe_2O_4 ($\text{M}=\text{Ni},\text{Mn},\text{Zn},\text{Mg},\text{Ca}$) (spinel-struktur) samt piezoelektriske materialer som kvarts og $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$, der bruges i ure, summere, tryksensorer og filtre, og kan forventes at afløse mere voluminøse komponenter i radio og fjernsyn (Kenney & Bowen, 1983). Endvidere vil materialer, der som følge af defekter i krystalgitteret er ionledende, finde en større anvendelse som iltensorer, brændselscel-

Udgangspulver	Råmateriale
Al_2O_3	Bauxit
SiO_2	Gangkvarts
SiC^2	Kvartssand
Si_3N_4	Diatome-jord Grafit (SiC) Kvælstof gas (Si_3N_4)
ZrO_2	Zircon-sand Baddeleyit
BN	Borax Colemanit Ulexit etc. Kvælstof gas
BaTiO_3	Baryt Witherit Rutil Ilmenit
BeO	Beryl Bertrandit Phenakit
Sjældne jordarters oxider Y_2O_3	Monazit Bastnaesit Xenotim
ZnO	Sphalerit Smithsonit Willemite etc.

Fig. 7. Råmaterialer til fremstilling af udgangspulvere for avanceret teknisk keramik.

Raw materials for production of starting powders for advanced technical ceramics.

Råmaterialer	- økonomisk geologi
Pulverfremstilling	- udfældning - hydrotermale processer - termodynamik
Formgivning	- sedimentære processer
Brænding	- metamorfe processer - magmatiske processer - termodynamik
Kontrol	- petrografi

Fig. 8. Berøringsflader mellem geologi og avanceret teknisk keramik.

Features shared between geology and advanced technical ceramics.

ler og pH-metre (ZrO_2) eller som faste elektrolytter i saltsmeltebatterier ($\beta-Al_2O_3$ eller nasicon) (Fisher, 1986).

Råmaterialer

En væsentlig forskel på traditionel og avanceret teknisk keramik er den sidstnævnte gruppes brug af syntetiske udgangspulvere. Råmaterialerne til disse pulvere er imidlertid som regel almindeligt forekommende mineraler (fig. 7), en faktor der har spillet en rolle i interessen for avanceret teknisk keramik, idet muligheden for at erstatte en række strategiske råmaterialer hermed er blevet åbnet (Rothman et. al., 1984).

Inden for elektronik eller beslægtede anvendelser er besparelsen dog begrænset. Dette skyldes, at de fremstillede komponenter generelt er meget små. Til trods for at der fremstilles et meget stort antal af disse komponenter, er den anvendte mængde råmateriale derfor begrænset. Blandt eksempler på substitution kan nævnes: $BaTiO_3$ og $SrTiO_3$ for Ta i kondensatorer; ferritkeramik for Co, Sn eller $AlNiCo$ magneter og reduceret forbrug af Pt-gruppe elementer til katalysatorer forårsaget af en forbedret processtyring, der skyldes en øget anvendelse af keramiske gassensorer. Inden for de strukturelle anvendelser kan væsentlige substitutioner for strategiske rå-

materialer imidlertid finde sted. Eksempler omfatter Al_2O_3 , Si_3N_4 og sialon for WC-Co og specialstål i skæreværktøj, Al_2O_3 , sialon, SiC eller ZrO_2 for metallegeringer indeholdende Cr, Co eller Mn til slidfaste, korrosionsbestandige eller varmebestandige formål og SiC eller cordierit for Cr-, Mn- eller Co-legeret stål i varmevekslere.

Avanceret teknisk keramik og geologi

Geologi og avanceret teknisk keramik har gennem hele fremstillingsprocessen utallige berøringspunkter (fig. 8). Prospektering og udvinding af råmaterialer involverer økonomisk geologi. En lang række metoder til pulverfremstilling anvendes eller er under udvikling, blandt disse har f.eks. processer, der indebærer udfældning af salte og hydrothermal behandling geologiske analoger. Ved formgivningen, hvor pulveret ofte bringes i suspension i en vandig fase, anvendes principper, der kendes fra sedimentologien. Under brændingen, hvor pulveret forvandles til et fast legeme, foregår processer, der kendes fra metamorf petrologi (kontaktmetamorfose, til tider også metamorfose under højere tryk) eller magmatisk petrologi (fuldstændig eller partiel opsmeltning, krystallisation osv.). Kendskab til termodynamik og faseagrammer spiller derfor også en stor rolle på dette procestrin. Endelig er de mikrostrukturelle undersøgelser af det færdige produkt analoge til petrografi, idet helt tilsvarende principper anvendes.

Disse mange berøringspunkter gør, at geologer også i fremtiden vil spille en rolle inden for udviklingen af avanceret teknisk keramik. Endvidere må det forventes, at denne forskning fortsat vil producere resultater, der vil være af væsentlige betydning for den geologiske videnskab.

Litteratur

- Anonym (1986): Study identifies new developments and new markets for advanced ceramics. *Advanced Ceramic Materials* 1(2), 124.
- Alford, N. McN., Birchall, J. D. & Kendall, K. (1986): Engineering ceramics - the process problem. *Mater. Sci. and Engineering* 2, 329-336.
- Boretos, J. W. (1985): Ceramics in clinical care. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 64(8), 1098-1100.
- Brook, R. J. & Riley, F. (1984): Engineering ceramics. *Materials and Design* 5, 208-211.

- Fisher, G. (1984a): Composites: Engineering the ultimate material. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 63(3), 360-364.
- Fisher, G. (1984b): Microelectronic devices - courtesy of ceramic capabilities. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 63(6), 780-783.
- Fisher, G. (1986): Ceramic sensors: Providing control through chemical reactions. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 65(4), 622-629.
- Godfrey, D. J. (1984): The use of ceramics for engines. *Sci. Ceram.* 12, 27-38.
- Heuer, A. H., Lange, F. F., Swain, M. V. & Evans, A. G. (1986): Transformation toughening: An overview. *J. Am. Ceram. Soc.* 69(3), i-iv.
- Kenney, G. B. & Bowen, H. K. (1983): High tech ceramics in Japan: Current and future markets. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 62(5), 590-595.
- Lachman, I. M. (1984): Porosity in extruded cellular ceramics. *Advances in ceramics* 9, 201-211.
- Lange, F. F. (1983): Fabrication and properties of dense polyphase silicon nitride. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 62(12), 1369-1374.
- Office of Science and Engineering (1984): *Research on the application of and material resources for fine ceramics* (engelsk overs.). Office of Science and Technology, Institute of Natural Resources, Tokyo. 118 pp.
- Ringwood, A. E., Kesson, S. E., Ware, N. G., Hibberson, W. & Major, A. (1979): The SYNROC process: A geochemical approach to nuclear waste immobilization. *Geochem J.* 13(4), 141-165.
- Roberts, J. P. (1985): Rohstoffquellen und die Zukunft der Keramik in Grossbritannien. *CFI/ber. DKG* 62(4/5), 207-212.
- Rothman, E. L., Kenney, G. B. & Bowen, H. K. (1984): *Potential of ceramic materials to replace cobalt, chromium, manganese, and platinum in critical applications*. Office of Technology Assessment, Congress of the United States, Washington D. C. 283 pp.
- Tsukuma, K., Ueda, K. & Shimada, M. (1985): Strength and fracture toughness of isostatically hot-pressed composites of Al₂O₃ and Y₂O₃-partially stabilized ZrO₂. *J. Am. Ceram. Soc.* 68(1), C-4-C-5.