



ceramic solutions

Keramikindustrie in NRW

Potentiale zur Effizienzsteigerung

Dr. Wolfgang Kollenberg

WZR ceramic solutions GmbH

im Auftrag der
Effizienz-Agentur NRW

2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Rohstoffe	7
2.1	Natürliche Rohstoffe	8
2.1.1	Ton.....	9
2.1.2	Kaolin.....	12
2.1.3	Quarz	13
2.2	Synthetische Rohstoffe	14
2.2.1	Aluminiumoxid	14
2.2.2	Zirconiumoxid.....	15
2.2.3	Siliciumcarbid	16
2.2.4	Siliciumnitrid.....	16
3	Keramikherstellung	17
3.1	Masseaufbereitung	18
3.1.1	Energie.....	20
3.1.2	Wasser	20
3.1.3	Verschleiß.....	21
3.1.4	Organische Additive	21
3.2	Formgebung	22
3.2.1	Energie.....	23
3.2.2	Verschleiß.....	24
3.3	Trocknung.....	24
3.4	Entbinderung.....	24
3.4.1	Energie.....	25
3.4.2	Umweltbelastung	25
3.5	Brand	25
3.5.1	Energie.....	26
3.5.2	Umweltbelastung	28
3.6	Glasieren.....	28
3.7	Nachbearbeitung.....	28
3.7.1	Energie.....	29
3.7.2	Wasser	29
3.7.3	Umweltbelastung	29

4	Möglichkeiten der Wiederverwendung	30
4.1	Rohstoffmischungen vor dem Brand.....	30
4.2	Scherben und Ausschuss nach dem Brand.....	30
4.3	Schleifabfälle	31
4.4	Keramik nach dem Einsatz.....	31
5	Keramikindustrie in NRW	32
5.1	Bau- und Gebrauchskeramik	32
5.1.1	Feinkeramik	33
5.1.1.1	Geschirr- und Gebrauchskeramik.....	33
5.1.1.2	Sanitärkeramik.....	34
5.1.1.3	Fliesen.....	35
5.1.2	Grobkeramik.....	36
5.1.2.1	Ziegel	36
5.1.2.2	Dachziegel.....	39
5.1.2.3	Steinzeugrohre	40
5.2	Feuerfestkeramik	41
5.3	Technische Keramik.....	43
6	Potentiale zur Effizienzsteigerung in der Keramikindustrie	46
6.1	Rohstoffe	47
6.2	Energie.....	48
6.3	Reststoffe	50
7	Ausblick	51

Effizienz beschreibt das Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen.
(ISO 9000:2000)

1 Einleitung

Jede industrielle Produktion ist direkt oder indirekt von natürlichen Ressourcen abhängig. Die Steigerung der Ressourceneffizienz ist sowohl unter Nachhaltigkeits- als auch unter Kosten- und Wettbewerbsgesichtspunkten eine Zukunftsaufgabe. Dies gilt umso mehr für ein rohstoffarmes Land wie Deutschland, das auf den Import vieler Energie- und Materialrohstoffe angewiesen ist. Ein sparsamer Umgang mit Ressourcen trägt dazu bei, die Abhängigkeit von Rohstoffimporten dauerhaft zu verringern, die internationale Wettbewerbsfähigkeit durch Senkung der Energie- und Materialkosten zu verbessern und die Umwelt zu entlasten.¹

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen der vorliegenden Studie die Situation der Keramikindustrie in NRW betrachtet werden. Die wesentliche Fragestellung lautet: Welche Möglichkeiten haben diese Unternehmen, durch effizientere Technologien sowohl Kosten als auch Ressourceneinsatz und Emissionen zu reduzieren?

Abhängig vom individuellen Produktionsprozess, verursachen Hersteller keramischer Produkte Emissionen in Bezug auf Luft, Wasser und Land (Deponien). Zusätzlich kann die Umgebung u. U. auch Lärm und unangenehmen Gerüchen ausgesetzt sein. Im Einzelnen sind zu nennen:

- Emissionen in die Luft: Staub, Ruß, Gase (CO₂, Stickoxide, Schwefel-, Fluor-, Chlorverbindungen, Organische Verbindungen, Schwermetalle)
- Emissionen ins Wasser: Prozesswasser, das unlösliche Mineralkomponenten enthält, geringe Mengen organischer Verbindungen und auch Schwermetalle
- Materialverluste während der Herstellung (Abfälle): Prozessbedingte Rohstoffverluste, Bruch vor und nach dem Brand, Schleifrückstände, Gipsformen, Brennhilfsmittel
- Energieverbrauch und CO₂-Emission: Alle Sektoren der Keramikindustrie sind energieintensiv, da Trocknung und Sinterung bei Temperaturen zwischen 800° und 2.000°C wesentliche Prozessschritte sind.

In Deutschland gibt es, außer den Energieanlagen, 545 emissionshandelspflichtige Industrieanlagen. 134 dieser Anlagen (24,6 %) sind der keramischen Industrie zugeordnet, die jedoch mit 1,3 Mt CO₂/a lediglich 1,36% der gesamten Emission verursachen. Auf NRW bezogen liegt der Anteil bei lediglich 0,1 % (246 der 208.686 kt CO₂/a). Dazu ist anzumerken, dass nach der Verordnung der EU nur keramische Produktionsstätten emissionshandelspflichtig sind, die Produktionskapazitäten von über 75 t pro Tag und/oder Ofenkapazitäten über 4 m³ und eine Dichte des Brenngutes von über 300 kg/m³ haben.²

¹ Perspektive Zukunftsfähigkeit – Steigerung der Rohstoff- und Materialeffizienz. KfW Bankengruppe, 10.08.2009

² Kohlendioxidemissionen der Emissionshandelspflichtigen Stationären Anlagen im Jahr 2010 in Deutschland, Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt), Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt, 15.05.2011

Aktuell sind Anlagen der keramischen Industrie in Deutschland emissionshandelspflichtig, wenn der Schwellenwert von 75 t Produktionsleistung je Tag überschritten wird. Davon betroffen sind insbesondere Anlagen mit Produkten wie Dachziegeln, Fliesen, Steinzeug und Sanitärkeramik sowie Blähton, Blähschiefer und ggf. auch keramische Sprühgranulate.³

Wie aus Tabelle 1 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die verschiedenen Bereiche der Keramikindustrie in Bezug auf den spezifischen Energieverbrauch erheblich voneinander. Der höchste spezifische Energieverbrauch ist im Bereich der Technischen Keramik, gefolgt von Geschirr, zu finden. Als sehr energieeffizient ist dagegen die Herstellung von Ziegeln anzusehen. Grundsätzlich kann man die Tendenz erkennen, dass der spezifische Energieverbrauch in den letzten Jahren rückläufig ist.

Tabelle 1: Spezifischer Energieverbrauch der Keramikindustrie in Europa

Bereich	GJ / t		MWh / t *		Quelle
	(1990)	(2010)	(1990)	(2010)	
Feuerfest	6,3	4,3	1,8	1,2	4
Fliesen	9,7	7,9	2,7	2,2	4
Ziegel	2,3	2,2	0,6	0,6	4
Steinzeugrohre		5,2 **		1,4	5
Sanitär		21,9 **		6,1	5
Geschirr		45,2 **		12,6	5
Technische Keramik		50,4 **		14,0	5
Glas	17,0	12,5	4,7	3,5	4
Zement	3,2	2,9	0,9	0,8	4

* eigene Umrechnung

** Wert für 2003

Die ökonomische Bedeutung der Keramikindustrie bzw. ihrer einzelnen Bereiche ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Ziegel und Fliesen sind - bezogen auf Europa - von der Menge, der Zahl der Mitarbeiter und den Umsätzen die bedeutendsten Bereiche. Die höchsten Umsätze pro Tonne und auch pro Mitarbeiter werden im Bereich Technische Keramik erzielt.

³ Anwendungsbereich des Treibhausgas-Emissionshandelsgesetzes (TEHG) für die Zuteilungsperiode 2013-2020: Hinweise der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt), Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt, 24.10.2011

⁴ Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft – Monitoringbericht 2010, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, September 2011

⁵ Ceramic Manufacturing Industry, August 2007 (http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/cer_bref_0807.pdf)

Tabelle 2: Ökonomische Bedeutung der Keramikindustrie in Europa (Stand 2005) ⁵

Branche	Menge [t]	Umsatz [€]	[€/t]	Mitarbeiter	t/Mitarbeiter [t]	€/Mitarbeiter [€]
Geschirr	500.000	2.000.000.000	4.000	48.000	10	41.667
Sanitär	500.000	1.900.000.000	3.800	25.000	20	76.000
Ziegel	55.000.000	6.800.000.000	124	50.000	1.100	136.000
Fliesen	25.000.000	10.100.000.000	404	69.000	362	146.377
Steinzeugrohre	700.000	300.000.000	429	2.000	350	150.000
Feuerfest	4.500.000	3.100.000.000	689	18.000	250	172.222
Technische Keramik	150.000	2.000.000.000	13.333	9.000	17	222.222

Das Thema „Effizienzsteigerung“ wurde bereits in verschiedenen Projekten auf unterschiedlicher Ebene betrachtet. Beispiele sind:

- Das CERAMIN Projekt (2007 – 2009) wurde ins Leben gerufen, um die europäische Keramikindustrie bei der Verringerung ihres spezifischen Energieverbrauches mittels eines Wettbewerbes zu unterstützen und um mit einer "Anleitung zum Energie sparen" denjenigen, die nicht gewonnen haben, zu helfen. Der Schwerpunkt lag dabei auf Artikeln der Massenproduktion mit einem hohen Energieeinsatz. ⁶ Insgesamt kann man feststellen, dass das Projekt seine Ziele aufgrund der sehr geringen Industriebeteiligung nicht erreichen konnte. Allerdings wurde ein Energiespar-Ratgeber erstellt, der die Möglichkeiten der Energieeinsparung der Keramischen Industrie zusammenfassend darstellt. ⁷
- Das Verbundprojekt ENITEC wurde innerhalb des Rahmenkonzeptes "Forschung für die Produktion von morgen" vom BMBF gefördert. (01.07.2009 bis 30.06.2012) Das gemeinsame Ziel der am Projekt beteiligten Partner (3 Keramikhersteller, 2 Ofenbauer und 2 Fraunhofer-Institute) war es, anhand der ausgewählten Demonstratoren (Zahnimplantat bis Langstabilisator) deutliche Energieeinsparpotentiale bei der Herstellung von Keramik (>40%) zu ermitteln. Diese Einsparung ist möglich durch Prozessentwicklung, neue Ofenkonzepte sowie mit Hilfe von Simulationen und In-Situ-Messmethoden. ⁸
- Das Branchenkonzept zur Verbesserung der Material- und Energieeffizienz in der Keramikindustrie in Rheinland-Pfalz startete als jüngstes Projekt des EffNet im November 2010. ⁹
- Als ein weiterer Forschungsverbund ist FORKERAM zu nennen. Ziel des Forschungsverbunds ist die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der bayerischen keramischen Industrie durch

⁶ <http://www.ie-leipzig.com/Ceramin/Ergebnis.htm>

⁷ <http://www.keramikinstitut.com/service/energiespar-ratgeber/>

⁸ <http://www.enitec.org/projekt/>

⁹ <http://www.ennet.rlp.de/Projekte/broker.jsp?uMen=9ae53189-8f54-e217-e079-7d5defa5a20a>

Prozess- und Produktinnovationen¹⁰. Dieses Ziel soll durch die enge Verzahnung der universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen mit den beteiligten Industriepartnern, welche vorwiegend klein- und mittelständisch strukturiert sind, erreicht werden. Folgende Teilziele stehen dabei im Vordergrund:

- Schnellerer Technologietransfer und gemeinsames Nutzen vorhandener Kompetenzen
- Verzahnung der Bereiche Feinkeramik und technische Keramik und dadurch Erlangung synergetischer Effekte
- Kostensenkung und Beschleunigung der Innovationszyklen

Die finanzielle Unterstützung des Verbundes durch die Bayerische Forschungsstiftung (BFS) belief sich in der ersten Phase auf insgesamt ca. 5,6 Mio. € (11.001.400 DM), worin 235.194 € für die Geschäftsstelle enthalten waren. Die Industriepartner investierten zusätzlich ca. 5,4 Mio. € (10.613.300 DM), so dass sich ein Gesamtvolumen von ca. 11 Mio. € ergab. Die durchgeführten Forschungsprojekte waren grundlagenorientiert, tangierten aber die im Rahmen dieser Studie angesprochenen Fragestellungen, wie die Ressourceneffizienz, beispielsweise durch Untersuchungen zum Einsatz von Recyclingglas als Zuschlagstoff in der Feinkeramik.

2 Rohstoffe

Für die Keramikindustrie sind drei Rohstoffgruppen relevant:

- Natürliche Rohstoffe, wie Tone, können aus deutschen bzw. europäischen Lagerstätten gewonnen werden,
- Synthetische Rohstoffe, wie Aluminiumoxid, müssen überwiegend importiert werden oder sie werden in Europa aus natürlichen Rohstoffen synthetisiert, die allerdings wiederum importiert werden müssen,
- Seltene Erden, wie Yttrium, die zwar in geringen Mengen - aber unvermeidbar - benötigt werden um Hochleistungskeramiken oder Funktionskeramiken herzustellen, müssen importiert werden.

Auf die daraus resultierenden Herausforderungen für die Ressourceneffizienz soll im Rahmen dieser Studie eingegangen werden.

Während für die Bereiche der Silikatkeramik, wie Fliesen, Ziegel, Sanitär, Geschirr und Steinzeugrohre, nahezu ausschließlich natürliche Rohstoffe zum Einsatz kommen, finden im Bereich der Techni-

¹⁰ FORKERAM Statusbericht 1999

schen Keramik fast nur synthetische Rohstoffe Anwendung. Im Bereich Feuerfest werden sowohl natürliche, wie auch synthetische Rohstoffe eingesetzt.

2.1 Natürliche Rohstoffe

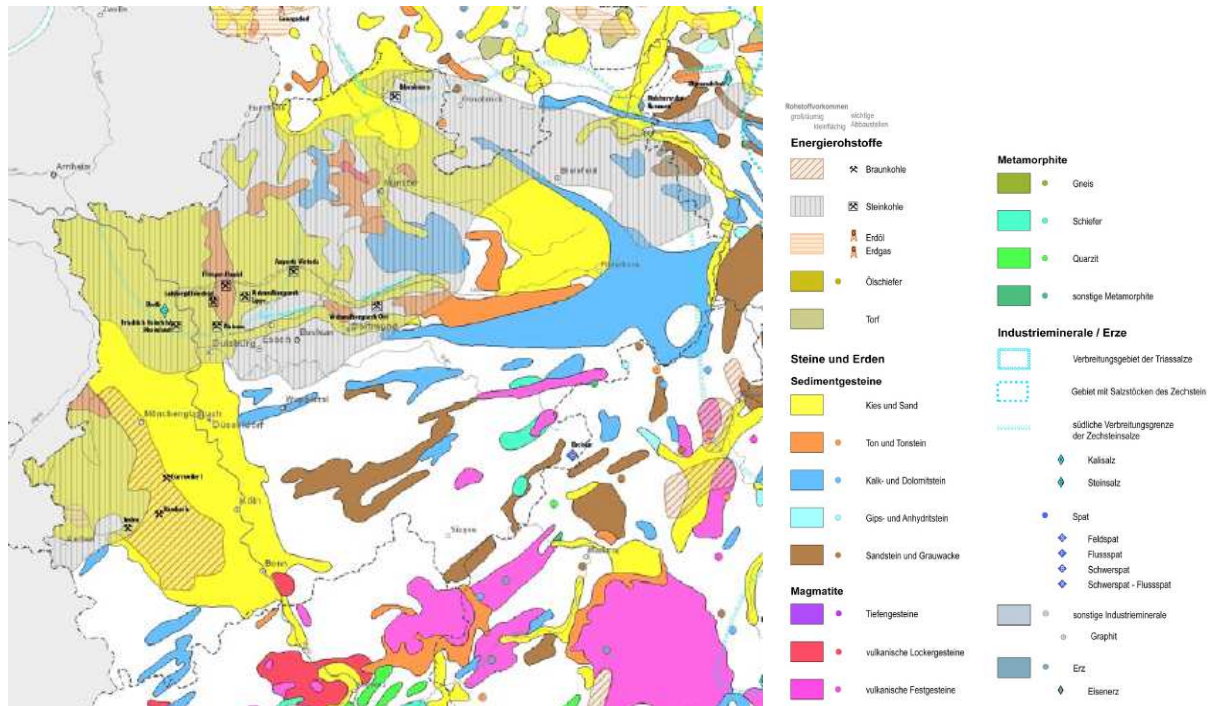


Abbildung 1: Karte der Bodenschätze in NRW ¹¹

Ton (6,4 Mio. t), Feldspat (ca. 3,7 Mio. t), Kaolin (4,5 Mio. t), Bentonit (385.709 t) und andere Rohstoffe gehören zur Gruppe der in Deutschland gewonnenen Industriemineralien. Die Produktion dieser Industriemineralien ist auch im europäischen und weltweiten Maßstab durchaus bedeutend. Bei Kaolin rangiert Deutschland beispielsweise weltweit auf dem 3. Rang. ¹² Die deutsche Produktion von Quarzsanden betrug laut dem Bundesverband der Deutschen Kies- und Sandindustrie e. V. im Jahr 2010 ca. 9,9 Mt. Quarzsande und -kiese werden u. a. zur Glasherstellung, als Gießereisande sowie in der chemischen und der keramischen Industrie verwendet. Quarzmehle sind zudem hochwertige Füllstoffe. Quarzsande sind damit nur einen geringer Teil der 2011 in Deutschland abgebauten 253 Mio.t Sand und Kies dar.

NRW ist das rohstoffreichste Bundesland, es ist (mit Bayern) Produktions- und Verbrauchsschwerpunkt im Bereich der "Steine und Erden" und Standort einer leistungsfähigen Rohstoffindustrie mit

¹¹ Deutschland Rohstoffsituation 2010. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

¹² Vereinigung Rohstoffe und Bergbau e.V. (<http://www.v-r-b.de/pages/layout1sp.php?idpage=15>)

überregionaler Bedeutung. 51 Betriebe in NRW mit 152 Mitarbeitern fördern jährlich 2,5 Mt Lehm und Ton.¹³

Angaben zu Fördermengen in NRW sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Hervorzuheben ist, dass nur ca. 6 % der in Deutschland geförderten Tone aus NRW stammen, bei Kaolin liegt der Anteil sogar unter 1%.

Tabelle 3: Fördermengen keramischer Rohstoffe in NRW (Stand 2010)¹⁴

Keramischer Rohstoff	Rohstoffförderung in NRW [t]
Ton	361.540
Schieferton	39.148
Kaolin	21.137
Quarzit und Quarzsand	13.844.708

Tone werden für die klassischen Keramik-Produkte Fliesen, Sanitär und Ziegel eingesetzt. Kaolin wird nicht nur in der Keramik eingesetzt, sondern auch bei der Papierherstellung und in der chemischen, kosmetischen und pharmazeutischen Industrie.

Auch Feldspat (z.B. für Glasuren), Quarzsand und Quarzit (einsetzbar im Feuerfestbereich) werden den keramischen Rohstoffen zugerechnet. Hochwertige Quarz- und Klebsande benötigt die Gießereiindustrie für den Bau von Gussformen.

Die Bedeutung und die Nachfrage nach diesen Rohstoffen haben in den vergangenen 30 Jahren stark zugenommen, so wurden beispielsweise die Produktionsmengen von Feldspat oder Kaolin gegenüber dem Stand von 1984 in Deutschland etwa verzehnfacht.¹⁵

Der Abbau geschieht fast ausschließlich im Tagebau und steht damit häufig in einem Spannungsfeld mit Fragen des Naturschutzes.

2.1.1 Ton

In Hinblick auf die natürlichen Vorkommen muss man Tonstein und Ton unterscheiden. Beide sollen hier zusammenfassend für NRW dargestellt werden:¹⁶

Schluff- und Tonsteine sind sedimentäre Festgesteine, die aus Mineralkörnern mit einem Durchmesser von 2 – 60 µm (Schluffstein) bzw. < 2 µm (Tonstein) bestehen und die bei CaCO₃-Anteilen von 25 – 50% als Mergelstein bezeichnet werden (Schluffmergelstein, Tonmergelstein). Mit Ausnahme des

¹³ Rohstoffsicherung in Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes NRW, Dezember 2005

¹⁴ Der Bergbau in der Bundesrepublik Deutschland 2010, Bergwirtschaft und Statistik, 62. Jahrgang, 2011.

¹⁵ Vereinigung Rohstoffe und Bergbau e.V.

¹⁶ Rohstoffsicherung in Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes NRW - Anhang A, Dezember 2005

Niederrheingebiets besitzt Nordrhein-Westfalen weiträumige Rohstoffvorkommen an Schluff- und Tonsteinen. Konzentrationsräume bilden das nördliche Weser- und Osnabrücker Bergland, der Raum Paderborn und die Flanken des Kernmünsterlandes. Schluff- und Tonsteine treten – meist in geschieferter und oberflächennah in verwitterter Form – im gesamten Rheinischen Schiefergebirgsraum auf. Diese Vorkommen werden aufgrund ungünstiger Qualitätsmerkmale (Beimengungen von Sand etc.) im Allgemeinen nicht industriell genutzt. Ton- und Tonmergelsteine bilden die wichtigste Grundlage für die Ziegelindustrie (Hintermauersteine, Klinker, Verblender, Drainagerohre usw.) oder werden als Zuschlagstoff für Ziegeleierzeugnisse aus Tonmaterial anderer Herkunft verwandt. Es sind besonders oberflächennahe Vorkommen verwitterter Tonsteine von Interesse, da sie in der Regel keine für die Produktion ungünstigen erhöhten Kalk- und Schwefelgehalte aufweisen. Die weiträumigen Vorkommen an Schluff-, Ton- und Tonmergelsteinen im Bereich des Rheinischen Schiefergebirges sind äußerst inhomogen. Zu den hochreinen Tonsteinen zählen die Tonsteine im Raum Ibbenbüren. In unterschiedlicher Reinheit liegen die Tonsteine des Weserberglandes vor. Rohstoffkonzentrationen ergeben sich für das Lippische Bergland und für den Raum Bielefeld – Wiehengebirge mit den dunkel- bis schwarzgrauen Tonsteinen. Günstige Vorkommen an Ton- und Tonmergelsteinen zeigen sich für das Gebiet um Ochtrup im Nordwesten des Münsterlandes, dem Kernmünsterland (Lüdinghausen, Amelsbüren) sowie im Raum Lippstadt – Paderborn (Emschermergel). Die Abbautiefe der genannten Vorkommen beträgt durchschnittlich etwa 5 – 20 m.

Bei Korngrößen $< 2 \mu\text{m}$ bezeichnet Ton ein erdiges, sehr feinkörniges Mineralgemisch, das durch An- und Einlagerung von Wasser in der Regel überwiegend plastisch reagiert. Abseits einer Einteilung nach den jeweils typischen Tonmineralen (Kaolinit, Montmorillonit, Sepiolith etc.) oder Tonmineralgruppen (z.B. Phyllosilikate, Smektite, Hormite) können Tone unabhängig von ihrem Tonmineralbestand nach ihrem jeweiligen industriellen Endprodukt (z.B. Ziegelton, Keramiktone) oder ihren technischen Eigenschaften (z.B. Feuerfestton, Blähton) definiert werden. In den Flachlandgebieten sind häufig Löss, Lösslehm, Geschiebelehm oder Auenlehm verbreitet. Diese schluffig-sandigen, mehr oder weniger tonhaltigen Lockersedimente eignen sich, teilweise als Mischungsbestandteil, angesichts ihrer Formbarkeit im feuchten Zustand und des Austrocknens zu harten Körpern zur Herstellung von Baustoffen und grobkeramischer Erzeugnisse oder als Zusatzstoff bei der Verarbeitung keramischer Tone.

Schluffige Lockersedimente sind in den Teilräumen Niederrheingebiet, Münsterland sowie im Weser- und Osnabrücker Bergland weit verbreitet. Im Niederrheingebiet konzentrieren sich Vorkommen von Löss und Lösslehm auf den Raum Erkelenz und Rheindahlen. Der gelbgraue Löss enthält neben Schluff als Hauptgemengeteil Ton (10 – 20%) und Feinsand (5 – 15%). Korngröße und mineralische Zusammensetzung variieren in Abhängigkeit von Herkunft und Transportweite des Materials. Durch Witterungseinflüsse entkalkter und verlehmtter Löss wird als Lösslehm bezeichnet. Bei Erkelenz und

Rheindahlen stehen Löss und Lösslehm in Mächtigkeit bis ca. 10 m an, die für die Herstellung von Hartbrandziegeln und Klinkern geeignet sind. Geringere Mächtigkeit bis etwa 6 m weisen holozäne, unter Hochwasserbedingungen abgelagerte Auenlehme im Bereich Kleve – Emmerich auf. Teilweise sandig, häufig kalkig und tonhaltig, lagern diese Ziegellehme unter flachgründigen humosen Auflagen auf den Sanden und Kiesen der Niederterrassen. Je nach Lage des Grundwasserspiegels sind diese Auenlehme nass oder trocken als Ziegelrohstoff gewinnbar. Im Münsterland sind vielfach Geschiebelehme in Grundmoränen verbreitet. In einer Mächtigkeit von etwa 1 m kommen Geschiebelehme im Westen des Münsterlandes zwischen Stadtlohn und Gescher vor, im weiteren Verlauf über Coesfeld und Haltern lagern Geschiebelehme über den tiefer liegenden, noch kalkhaltigen Geschiebemergeln. Unter Beimengung von Tonen in Anteilen von 5 – 30% eignen sich diese Vorkommen für die Herstellung von Vor-, Hintermauer- und Hochlochsteinen. Lösslehm tritt in einer Mächtigkeit von 2 – 3 m im Westen von Münster bei Schapdetten auf. An seinen Rändern weist das Münsterland weitere mit Geschiebelehm vorkommen vorwiegend lokaler Bedeutung im Südwesten Bielefelds, in Lippstadt und in Paderborn auf. Die Mächtigkeit schwankt hierbei zwischen 4 und 6 m.

Die ältesten Tone sind im Norden des Weser- und Osnabrücker Berglandes sowie im nordwestlichen Münsterland verbreitet. Es handelt sich überwiegend um dunkle, graue und graubraune bis schwarze und schwarzgraue Verwitterungstone in einer Mächtigkeit von 5 bis 15 m. Räumliche Konzentrationen ergeben sich im Raum Bielefeld, im Bereich des Wiehengebirges und des Lippischen Berglandes sowie im Norden Tecklenburgs. Einzelne Rohstoffqualitäten besitzen in der Ziegelindustrie und für die Herstellung baukeramischer Erzeugnisse überregionale, z.T. internationale Bedeutung. In der Niederrheinischen Bucht sind vielfach tonige Einschaltungen vorhanden. Für das Niederrheingebiet ergeben sich Vorkommen im Raum Euskirchen, im Bereich Meckenheim (Köln-Schichten) und im Westen Bonns bei Swisttal. Die Köln-Schichten enthalten zwischen Bonn und Brühl Tone, die eine ca. 20 m mächtige Folge von hellgrauen bis braunen Rohstoffvorkommen bilden. Im Pleiser Ländchen zwischen Königswinter und St. Augustin erreichen die Tone eine Mächtigkeit zwischen 7 und 20 m und sind teils für feuerfeste Produkte, teils für die Verwendung in der Keramikindustrie geeignet. Tonvorkommen von wirtschaftlicher Bedeutung treten auch in zwei Bereichen des deutschniederländischen Grenzgebietes auf. Zum einen sind dies die 5 – 15 m mächtigen, grauen Tone innerhalb der Tevener Heide im Westen Geilenkirchens. Zum anderen sind es die Tegelen-Tone und die Reuver-Tone, die im Raum Brüggen, Nettetal, Schwalmtal in einer Mächtigkeit von 2 - 5 m verbreitet sind. Beim Abbau können über- und zwischenlagernde Kiese und Sande mitgewonnen werden. Vor der Weiterverarbeitung zu Ziegel- und Grobkeramikprodukten ist die Entfernung von häufig enthaltenen torfigen und holzreichen Einlagerungen notwendig. Rechtsrheinisch erstreckt sich über eine Länge von etwa 15 km im Norden Düsseldorfs über Breitscheid bis Mühlheim ein Vorkommen von feinsandig-schluffigem Ton der Ratingen-Schichten („Septarienton“) in Mächtigkeiten bis zu 40 m. Der vor-

wiegend für die Herstellung von Ziegeln und baukeramische Erzeugnisse verwendete Ton setzt sich überwiegend zusammen aus Kaolinit (25%), Illit und Serizit (30%) sowie Quarz (25%). Weitere Septarienton-Vorkommen findet man weiter nördlich im Raum Dinslaken, Dorsten und Bocholt. Hier kommt auch vereinzelt, jedoch teilweise in Mächtigkeit von über 50 m, Glimmerton vor, der aufgrund der bestimmenden Korngröße den Übergang zum Schluff markiert.

Die Reinheit des Tons ist nicht nur für die Qualität der keramischen Produkte wichtig, sondern auch für die mögliche Umweltbelastung während des Brandes. Als problematische Bestandteile - deren Gehalte sich regional deutlich unterscheiden - sind Fluor, Schwefel und Chlor zu nennen. Diese Elemente werden während des Brandes an die Atmosphäre abgegeben. Sie belasten nicht nur die Umgebung, sondern führen auch zur Korrosion an Ofenkomponenten. Die Gehalte an Calcium und Natrium sind dagegen für das Brennverhalten, d.h. der Bildung einer Schmelzphase von Bedeutung.

2.1.2 Kaolin

Kaolin-Lagerstätten sind relativ selten. Die bekannten Vorkommen werden meist seit langer Zeit abgebaut und sind Grundlage der weltweiten Porzellanindustrie. Die größten Produzenten sind Brasilien, die USA, Großbritannien, Deutschland und Tschechien. Aus diesen Ländern stammten rund zwei Drittel der Jahresproduktion von rund 45 Mio. Tonnen (Deutschland ca. 4,5 Mio. t). Die weltweit bekannten förderwürdigen Vorräte werden auf rund 14,2 Milliarden Tonnen geschätzt, was bei einer unveränderten Förderung theoretisch für 300 Jahre reichen dürfte.

In Deutschland treten Kaoline vor allem im Vorland der Mittelgebirge auf. Bedeutende Vorkommen liegen in der Oberlausitz, in Nordwestsachsen bei Oschatz, wo Kaolin für das Meißener Porzellan gewonnen wird und im Raum Halle, in Thüringen und im Westerwald. Das Hauptabbaugebiet für Kaolin in Deutschland befindet sich bei Hirschau in der Oberpfalz.

Kaolin ist in Nordrhein-Westfalen kein häufig vorkommender Rohstoff. Abbaue befinden sich lediglich an der Grenze zu Rheinland-Pfalz. Bei Burbach liegt die Grube „Auf dem Kreuz“.¹⁷

Kaoline oder kaolinitische Tone finden Verwendung in der Papier-, Keramik- und Feuerfestindustrie, als Füllstoffe bei der Herstellung von Farben, Lacken, Gummi und Kunststoff, als Keramikträger in Abgaskatalysatoren sowie als Dichtungsmaterial für Deponien.

¹⁷ http://www.gd.nrw.de/w_schgi.htm

2.1.3 Quarz

Reine Quarzsande enthalten über 97%, in vielen Fällen sogar über 99% SiO₂. Von besonderer Bedeutung sind die Fe₂O₃-Gehalte, die für verschiedene industrielle Verwendungen (z.B. Herstellung von Weißgläsern) nur geringste Anteile aufweisen dürfen. Reine Quarzsande, meist zu Quarzmehl vermahlen, finden z.B. als Scheuer-, Schleif- und Poliermittel sowie als Füllstoff für Kunststoffprodukte, sowie in der Metallgießerei, Keramik- und ferner der chemischen Industrie Anwendung. Weiterhin werden diese Sande zur Herstellung verschiedener Glasarten verwendet. Die als Spezialsande geeigneten Meeressande stehen zwischen Düsseldorf und Bergisch Gladbach am östlichen Gebirgsrand der Niederrheinischen Bucht an. Es sind feinkörnige, helle, gelbliche bis bräunliche, glimmerhaltige Sande mit wechselnder Ton- und Glaukonitführung. In den oberen Lagen sind die Glaukonite meist verwittert, so dass dort braunfleckige, eisenschüssige Sande verblieben sind. Der Viersener Höhenzug führt Vorkommen an gelbbraunen, eisenschüssigen und feinkörnigen Quarzsanden mit zur Tiefe hin zunehmender Glaukonitführung. Unter 2 – 6 m starken Kiessanden sind im Raum Bottrop Formsande der Oberkreide verbreitet. Es handelt sich um graubraune bis rostrote, feinkörnige, Glaukonit führende Mergelsande. Im Raum Herzogenrath sind Quarzsande als wichtiger Rohstoff für die Glasindustrie verbreitet. Diese Sande zeichnen mit SiO₂-Anteilen von bis zu 99,8% durch eine sehr hohe Reinheit aus. Bei nutzbarer Mächtigkeit von etwa 30 m enthalten diese „Glassande“ einzelne Feuersteinlagen sowie Gangquarz- oder Quarzitzerölle. Bis zu 70 m mächtige Sande liegen im Bergheimer Raum unter einer 8 – 15 m starken Decke. Dieser „Frechener-Sand“ enthält bei sehr geringen Anteilen von Eisen- und Aluminiumhydroxid bis zu 99,7% Quarz. Die „Halturner Sande“ des Münsterlandes sind im Ostteil ihres Vorkommens in einer etwa 10 km breiten Zone bis maximal 60 m Tiefe zu hellgrauen bis weißen Quarzsanden gebleicht. In ihrer Zusammensetzung mit dem „Frechener-Sand“ vergleichbar, enthalten die Quarzsande im Raum Haltern bis zu 99,8% Quarz. Durch die sehr hohe Reinheit kommt den „Halturner Sanden“ ebenfalls eine starke überregionale Bedeutung zu. Die Klebsande im Südwestbereich der Kölner Bucht bei Euskirchen bewegen sich im Übergangsbereich zwischen den Rohstoffgruppen Kies und Sand einerseits sowie Schluff und Ton andererseits. Neben relativ reinen Quarzsanden wurden in diesem Bereich auch Kaolin führende Sande abgelagert, so dass sich heute eine Verzahnung von Tonen und Klebsanden ergibt. Kaolin- oder Klebsande finden vor allem in der Stahlindustrie und in der Kokereitechnik als Rohstoff für feuerfeste Mörtel und Stampfmassen Verwendung.¹⁸

¹⁸ Rohstoffsicherung in Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes NRW - Anhang A, Dezember 2005

2.2 Synthetische Rohstoffe

Für viele Feuerfest-Keramiken und nahezu alle Technischen Keramiken werden synthetische Rohstoffe eingesetzt. Diese pulverförmigen Stoffe werden entweder unmittelbar aus natürlichen Rohstoffen synthetisch gewonnen (z.B. Aluminiumoxid und Siliciumcarbid) oder über chemische Prozesse erzeugt (z.B. Siliciumnitrid).

Ausgangsstoffe zur Herstellung synthetischer keramischer Rohstoffe sind in NRW nicht vorhanden. Allerdings sind Hersteller synthetischer Rohstoffe in NRW ansässig. Aus diesem Grund, aber auch um die nachfolgenden Ausführungen zur Herstellung und Anwendung keramischer Bauteile besser bewerten zu können, werden die wichtigsten synthetischen Rohstoffe im Folgenden erläutert.

2.2.1 Aluminiumoxid

In der Natur tritt Aluminiumoxid (Al_2O_3) in Form des Minerals Korund auf, das vorwiegend in Südostasien und Australien gefunden und als Schmuckstein verwendet wird. Durch geringe Mengen von Chrom entsteht eine rote (Rubin) und durch Eisen oder Titan eine blaue Färbung (Saphir). Ein besonderes Merkmal ist seine hohe Härte. Korund ist aufgrund seiner geringen Verbreitung als keramischer Rohstoff nicht geeignet.

Vielmehr war die Entwicklung der Elektrolyse von metallischem Aluminium die Grundlage der späteren Herstellung von Aluminiumoxid-Pulvern. Ausgangsstoff für die Herstellung von metallischem Aluminium und nahezu allen anderen Aluminiumverbindungen ist Bauxit, ein Verwitterungsprodukt aus aluminiumreichen Gesteinen unter tropischen Bedingungen. Es besteht aus verschiedenen Aluminiumhydroxid Mineralen, aber auch aus Eisenhydroxiden, Titanoxid, Quarz, Tonmineralien und andern Verbindungen. Durch den Bayer-Prozess (1892 von Karl Josef Bayer erfunden) werden die Aluminiumbestandteile mittels Natronlauge aus dem Bauxit gelöst und schließlich in ein Aluminiumhydroxid überführt. Die unlöslichen Bestandteile werden abfiltriert und als sogenannter Rotschlamm deponiert.

Bis 1994 wurde der Bayer-Prozess von der Firma Martinswerk in Bergheim betrieben und der entstehende Rotschlamm von 1969 bis 1994 im Wald zwischen Horrem und Königsdorf deponiert. Die 270.000m² große Deponie ist inzwischen rekultiviert, an der Oberfläche ist vom Schlamm nichts mehr zu sehen. Heute kauft das Martinswerk Aluminiumhydroxid und verarbeitet es in Bergheim zu unterschiedlichen Produkten, darunter auch synthetische Aluminiumoxid-Pulver für die Keramikindustrie, weiter. Ein großer Teil der Produkte in Form von modifizierten Aluminiumhydroxiden wird Kunststoffen als Flammschutz zugesetzt.

Die thermische Behandlung der gereinigten Hydroxide erfolgt in Drehrohröfen oder in Wirbelschichtöfen. Mit zunehmender Temperatur findet zuerst die Entwässerung statt, anschließend bilden sich

im Temperaturbereich bis 1.000°C metastabile Modifikationen, die sogenannten Übergangstonerden. Ab einer Kalzinationstemperatur von >1.000°C entsteht die stabile Al_2O_3 Modifikation Korund. In weiteren Prozessschritten werden unterschiedliche Korngrößen durch Mahlprozesse hergestellt.¹⁹

Eine minimale Korngröße und damit verbunden eine maximale Spezifische Oberfläche sind für den späteren Sinterprozess von großer Bedeutung. Dazu werden heute Korngrößen $\leq 1\mu\text{m}$ angestrebt. Zu den herausragenden Eigenschaften zählt, neben der hohen Härte und der damit verbundenen sehr guten Verschleißbeständigkeit, der hohe elektrische Widerstand.

Aluminiumoxid kam als erster synthetischer Rohstoff zur Herstellung keramischer Produkte zum Einsatz: In den 1920er Jahren wurden erstmals Zündkerzenisolatoren aus Al_2O_3 hergestellt. Bis heute ist Aluminiumoxid der wichtigste Vertreter der Technischen Keramik.

Aluminiumoxid findet als Pulver bzw. Körnung auch Anwendung als Polier- bzw. Schleifmittel. Schleifkörnungen werden nicht über den Bayer-Prozess, sondern über einen Elektroschmelzprozess bei Temperaturen > 2.050 hergestellt. Dieser sogenannte Schmelzkorund zeigt je nach Reinheit unterschiedliche Farben. Bekannt sind neben den reinen farblosen Körnungen, besonders die durch Chrom rosa gefärbten Körnungen. Grobe Schmelzkorund-Körnungen (1 – 5 mm) werden auch in der Feuerfest-Industrie eingesetzt.

2.2.2 Zirconiumoxid

Zirconiumoxid ZrO_2 kann sowohl aus einem natürlichen Rohstoff (Zirkon ZrSiO_4) als auch über einen chemischen Fällungsprozess erzeugt werden. Nachteilig bei der Gewinnung aus Zirkon ist der verbleibende Anteil an Uran und Thorium, was zu einer geringen Radioaktivität führt. Diese ist bei chemisch gefällten Pulvern – wie sie üblicherweise in der Dentalindustrie eingesetzt werden – nicht vorhanden.

Reines Zirconiumoxid, das in der Natur als Mineral Baddeleyit vorkommt, kann zur Herstellung keramischer Bauteile nicht genutzt werden. Ursache ist eine reversible Phasenumwandlung beim Sintern, die beim Abkühlen zu einer Volumenzunahme um 3-5% führt. Dadurch treten Risse auf, die das Bauteil zerstören.

In den 1970er und 1980er Jahren wurden weltweit zahlreiche Forschungsprojekte zur Stabilisierung von ZrO_2 mit großem Erfolg durchgeführt. Durch Zugabe von stabilisierenden Oxiden gelingt es den Phasenwechsel zu kontrollieren. Besonders häufig wird dazu Y_2O_3 eingesetzt. Durch die damit ermöglichte Gefüge Verstärkung konnte die Risszähigkeit deutlich gesteigert werden, wodurch Zirconiumoxid-Keramik heute außergewöhnliche Eigenschaften bietet. Diese Vorteile sind mit einem hohen

¹⁹ H. Hoppert: Aluminiumoxid-Keramik. in: W. Kollenberg (Hrsg.) Technische Keramik, Vulkan-Verlag (2009)

Rohstoffpreis verknüpft: Während hochwertige Al_2O_3 -Pulver ca. 3,- €/kg kosten, liegt der Preis für ZrO_2 bei ca. 100,- €/kg.

2.2.3 Siliciumcarbid

Siliciumcarbid (SiC) wird großtechnisch durch eine Reaktion von Quarzsand und Kohle bei Temperaturen von 1.700°C bis 2.500°C nach dem Acheson-Verfahren hergestellt. Diese Reaktion setzt Kohlenmonoxid (CO) frei, das heute in modernen Anlagen aufgefangen und zur Stromerzeugung genutzt wird. Der Energiebedarf zur Herstellung von SiC beträgt 7 – 12 MWh/t und die SiC Ausbeute bezogen auf die Einsatzmenge beträgt nur 33%.

Nach der Reaktion liegt das SiC als kompaktes großvolumiges Material vor und muss entsprechend der Anwendung zerkleinert werden. Aufgrund der hohen Härte ist dieser Prozess sehr aufwändig. Der größte Teil der SiC-Produktion wird als Schleifkörnung verarbeitet. Feinkörnige Pulver für die Herstellung keramischer Bauteile müssen entsprechend fein auf gemahlen werden.

Der Acheson-Prozess wird aufgrund der hohen Energiekosten nicht mehr in Deutschland durchgeführt. Die nächste Produktion ist in Delfzijl, Niederlande.

In Frechen befindet sich die Firma ESK-SiC GmbH, die sich mit der Zerkleinerung und Fraktionierung von SiC Körnungen befasst. In den letzten Jahren wurden weitere Investitionen vorgenommen, um feinste Körnungen im Bereich $\leq 1\mu\text{m}$ anbieten zu können.

SiC besitzt eine Reihe von herausragenden Eigenschaften wie geringe Dichte, sehr große Härte und Abriebfestigkeit, hohe Wärmeleitfähigkeit, eine niedrige thermische Dehnung. Neben der Anwendung als Schleifmittel findet sich SiC als Brennhilfsmittel in der Keramik-Fertigung, in Feuerfest-Auskleidungen (Stahlindustrie, Müllverbrennungsanlagen), aber auch als Dichtscheiben, Partikelfilter oder Bremscheiben im Automobil.²⁰

Als Besonderheit muss noch erwähnt werden, dass SiC, ebenso wie das nachfolgend beschriebene Siliciumnitrid nicht in üblichen Brennöfen gesintert werden kann, da alle Nicht-Oxide an Luft zersetzt bzw. umgewandelt werden. In diesen Fällen muss der Sinterprozess unter Schutzgas oder Vakuum durchgeführt werden.

2.2.4 Siliciumnitrid

Siliciumnitrid (Si_3N_4) zählt zu den jüngsten keramischen Werkstoffen und wird erst in den letzten Jahrzehnten verstärkt kommerziell genutzt.

²⁰ D.G. Böcker: Siliciumcarbid. in: W. Kollenberg (Hrsg.) Technische Keramik, Vulkan-Verlag (2009)

Die einfachste Methode Siliciumnitrid herzustellen, ist die direkte Nitridierung von elementarem Silicium. Die dabei entstehenden grobkörnigen Produkte müssen durch Mahlen zusätzlich zerkleinert werden. Der sogenannte Diimid-Prozess führt dagegen direkt zu besonders reinen und feinkörnigen Produkten und wird daher heute zunehmend zur Herstellung von Si_3N_4 -Pulvern industriell eingesetzt. Dieser Prozess beruht auf der Umsetzung von Siliciumtetrachlorid mit Ammoniak zu amorphem Siliciumdiimid $[\text{Si}(\text{NH})_2]_8$, das bei $>1.000^\circ\text{C}$ in Si_3N_4 -Pulver überführt wird. Während des Sinterprozesses wachsen Si_3N_4 Körner extrem anisotrop. Dadurch ist das Gefüge dieser Keramik ein "in-situ" Kurzfaserverstärktes Material mit einer relativ hohen Zähigkeit. In Kombination mit einer sehr hohen Festigkeit und einer geringen thermischen Dehnung gilt diese Keramik als optimale Lösung für viele Anwendungen, kommt jedoch aufgrund des hohen Preises noch vergleichsweise wenig zum Einsatz.

Siliciumnitrid wird in NRW nicht hergestellt. Aufgrund der guten Verfügbarkeit von Silicium und Stickstoff in der Natur sollte dieser Werkstoff aber eine gute Zukunft haben, wenn es gelingt deutlich preiswertere Rohstoffe herzustellen.

3 Keramikherstellung

Auch wenn die Palette der eingesetzten Rohstoffe sehr groß ist und sich die Produkte in vieler Hinsicht unterscheiden, so ist der grundsätzliche Herstellungsprozess doch für alle Bereiche der keramischen Industrie vergleichbar (Abbildung 2): In Abhängigkeit vom jeweiligen Formgebungsverfahren werden die Rohstoffe mit organischen Additiven und ggf. Wasser gemischt. Nach der Formgebung folgt die thermische Behandlung. Diese beginnt in der Regel mit der Trocknung zur Entfernung des Wassers und/oder eine Entbinderung, um organische Bestandteile auszutreiben. Der entscheidende Prozessschritt ist das Sintern, in dem die Rohstoffe miteinander reagieren und zwischen den Rohstoffpartikeln mechanisch stabile Stoffbrücken ausgebildet werden. Dieser Brand kann in periodischen oder kontinuierlichen Öfen erfolgen. Dabei ist eine exakte Temperaturführung von großer Bedeutung, da durch diesen Prozessschritt die Eigenschaften der keramischen Produkte festgelegt werden. Als Energieträger wird überwiegend Gas eingesetzt. Als letzter Prozessschritt kann noch eine Nachbearbeitung erfolgen, insbesondere dann, wenn hohe Anforderung an geometrische Toleranzen und Oberflächenqualität gestellt werden.

Die Zerkleinerung von Rohstoffen geschieht zum überwiegenden Teil beim Lieferanten. Mahlprozesse sind, insbesondere auch aufgrund der Härte vieler keramischer Pulver, energieintensiv. Auf der anderen Seite wird aber die Sinteraktivität erhöht, d.h. feine Pulver können bei niedrigeren Temperaturen gesintert werden. Damit wird der Energieaufwand beim Brand reduziert. Im Bereich der Feuer-

fest- und Silicatkeramik werden auch Natursteine, wie Quarzit oder Bauxit eingesetzt. Hier erfolgt die Zerkleinerung auf die gewünschte Körnung in den produzierenden Unternehmen.

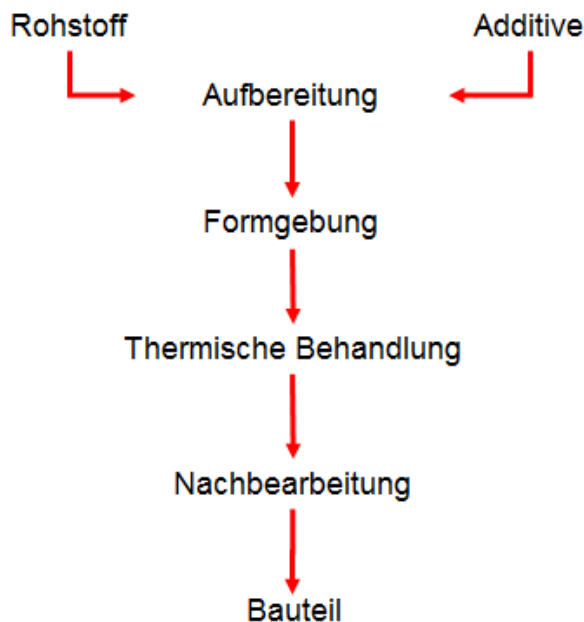


Abbildung 2: Grundsätzlicher Fertigungsprozess keramischer Bauteile

In den folgenden Kapiteln sind die einzelnen Verfahrensschritte näher erläutert. Auf die für einzelne Bereiche der Keramikindustrie geltenden Besonderheiten wird zusätzlich in Kap. 5 eingegangen.

3.1 Masseaufbereitung

Die Masseaufbereitung dient dazu die Verarbeitbarkeit der Rohstoffe mit dem gewählten Formgebungsverfahren zu gewährleisten. Hierbei kann unterschieden werden in:

- Herstellen von Pressmassen, sowohl für trockene als auch für halbtrockene Formgebungsverfahren (Granulieren / Agglomerieren)
- Herstellen von bildsamen Massen für die Extrusion oder das Spritzgießen (Kneten)
- Herstellen von Suspensionen für Gießmassen (Dispergieren)

Insbesondere für feine Pulver kommt die Granulation durch Sprühtrocknung zum Einsatz (Abbildung 3). Dazu wird das keramische Pulver zunächst zu einer Suspension verarbeitet. Der Suspension werden auch Additive – wie temporäre Binder - zugesetzt, die für die spätere Formgebung (Pressen) notwendig sind. Der Sprühtrockner gehört zur Klasse der konvektiven Trockner, bei denen die Energie zur Verdampfung des Lösemittels (meist Wasser) durch Wärmeleitung aus dem Trocknungsgas auf das zu trocknende Gut übertragen wird. Die Trocknung erfolgt durch innige Vermischung der

versprühten Flüssigkeit mit einem Trocknungsgas, dessen geringe relative Feuchte die flüchtige Phase des Flüssigkeitsnebels verdunsten oder verdampfen lässt. Der Sprühtrockner ist ein Kurzeittrockner. Die Trocknung läuft im Sekundenmaßstab ab. Das Ergebnis ist ein gut fließfähiges und staubfreies Granulat (Abbildung 4), das unmittelbar verarbeitet werden kann.

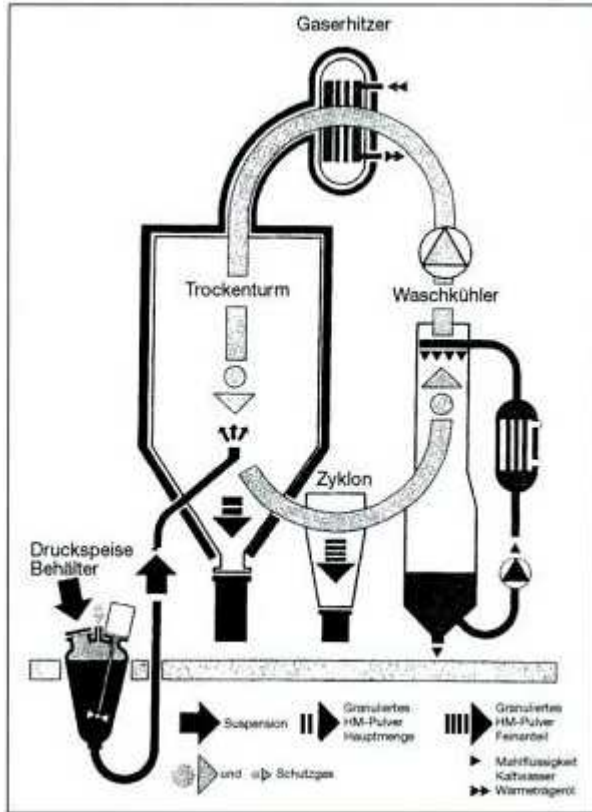


Abbildung 3: Prinzip der Sprühgranulation

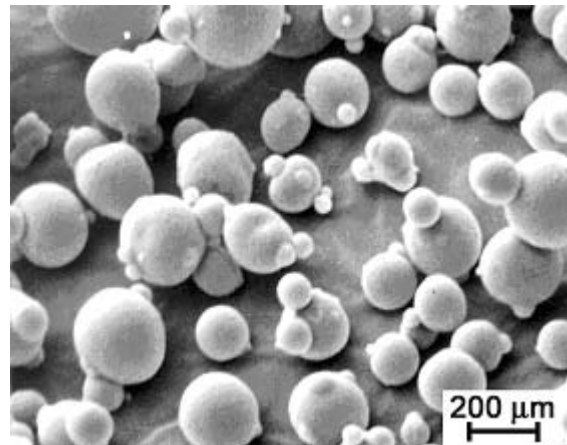


Abbildung 4: Aluminiumoxid-Sprühgranulat²¹

Sprühgranulate kommen aber nicht nur bei feinen synthetischen Pulvern zum Einsatz sondern für das Pressen von Fliesen werden die auf Tonen basierenden Rohstoffe auch in dieser Weise aufbereitet.

Extrusion ist ein verbreitetes Verfahren bei der Formgebung von Ton-basierten Rohstoffen, etwa bei der Herstellung von Ziegeln. Tone können durch Zugabe von Wasser (>30 Vol.-%) zu einer plastischen Masse aufbereitet werden. Bei synthetischen Rohstoffen setzt die plastische Verarbeitung zusätzlich organische Additive voraus. Der Wasseranteil liegt in der Regel auch deutlich höher (>45 Vol.-%).

Für Bauteile mit komplexer Geometrie und in großer Stückzahl hat sich der Spritzguss als Formgebungsverfahren etabliert. Hier geschieht die eigentliche Formgebung durch Thermoplaste, die den keramischen Pulvern zugegeben werden; ihr Anteil beträgt >50 Vol.-%. Die Aufbereitung erfolgt über einen Knetprozess oder besser über einen Scherwalzenextruder.

²¹ http://www.keramverband.de/brevier_dt/4/1/4_1_2.htm

Den höchsten Wasseranteil weisen Suspensionen auf, wie sie für den Schlickerguss eingesetzt werden. Um den Aufwand für die Trocknung so niedrig wie möglich zu halten, wird versucht den Feststoffanteil im Schlicker durch Zugabe von organischen Additiven so hoch wie möglich anzusetzen. Für die Aufbereitung kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz: von einfachen Trommelmühlen bis hin zu Intensivmischern. Je nach Aggregat ändern sich der notwendige Energieeintrag und die erforderliche Zeit.

3.1.1 Energie

Jeder Aufbereitungsprozess ist mit einem Energieeintrag verbunden. Die für einen Mischprozess notwendige Energie hängt von der Konsistenz der Masse ab:

- | | |
|------------------------------|------------|
| ▪ Trockene Massen | 2–15 kW/t |
| ▪ Pressmassen (halb-)trocken | 10–20 kW/t |
| ▪ Bildsame Massen | 20–50 kW/t |
| ▪ Suspensionen | 5–10 kW/t |

Je höher der Energieeintrag ist, desto kürzer kann auch der Mischvorgang sein. So benötigen Intensivmischer zwar über 100 kW/t, aber die Mischzeiten können deutlich reduziert werden. Daher ist bei der Betrachtung des Energieverbrauchs in der Aufbereitung besonderes Augenmerk auf die Mischzeit und deren Optimierung zu richten.

Die Sprühtrocknung ist ein energieintensives Verfahren, da das Lösungsmittel (Wasser) in kürzester Zeit den Tropfen entzogen werden muss.

3.1.2 Wasser

Um aus Tonen eine bildsame Massen zu erzeugen muss den Rohstoffen Wasser zugegeben werden, so dass eine Feuchte von 15 – 25% eingestellt wird. Die Wassermenge erhöht sich, wenn ein Schlicker hergestellt werden muss, wie er beispielsweise für den Druckguss in der Sanitärkeramik notwendig ist. Hier kann man 8 – 10 m³ Wasser pro t annehmen²². In beiden Fällen muss das Wasser nach der Formgebung wieder entfernt werden.

Ebenfalls mit dem Einsatz großer Wassermengen ist die Herstellung von Sprühgranulaten verbunden. Allerdings liegt die Feuchtigkeit der Granulate in der Regel unter 5% und der Trocknungsaufwand nach der Formgebung ist entsprechend gering.

²² R. Knodt, FGK Hör-Grenzhausen, EffNet-Sitzung 2. Mai 2011 Mainz

Je nach Möglichkeit und Anforderung kann das Wasser im Kreislauf geführt, oder es muss Frischwasser genutzt werden. Wobei als Frischwasser hier Leitungswasser, Regenwasser oder aber auch aufbereitetes Wasser (deionisiert oder destilliert) verstanden werden soll.

3.1.3 Verschleiß

Keramische Rohstoffe zeichnen sich – abgesehen von Tonen – durch eine hohe Härte aus. Dies kann auch beim der Aufbereitung, insbesondere bei Mischprozessen zu erhöhtem Abrieb kommen. Abrieb ist aus zwei Gründen von Bedeutung:

1. Wie bei jedem Verschleiß wird die Standzeit reduziert und die Aggregate müssen häufiger überholt werden.
2. Mit dem Abrieb kommen Metallpartikel in die keramische Masse. Das kann sowohl zu Verfärbungen, als auch zu einer Schwächung des Materials führen.

Insbesondere bei Mischern, die trockene Massen aufbereiten, kommen daher keramische Auskleidungen zum Einsatz.

3.1.4 Organische Additive

Ein wichtiger Bestandteil der aufbereiteten Massen sind organische Additive. Diese sind notwendig, um den Massen die für das jeweilige Formgebungsverfahren notwendigen Eigenschaften zu verleihen. Das kann die Gießfähigkeit von Schlickern sein, die Pressfähigkeit von Granulaten, die Möglichkeit Massen zu extrudieren oder mittels Spritzguss in Form zu bringen. Bei Rohstoffen, die nicht auf Tonmineralien basieren ist zusätzlich ein Bindemittel notwendig, das die Partikel nach der Trocknung zusammenhält.

Die Aufbereitung keramischer Massen über eine Dispersion bietet den Vorteil des optimalen Aufschlusses und der guten Homogenisierung der Rohstoffe. Ein weiteres Argument für die Flüssigaufbereitung ist der geringere Energieaufwand für die Nassmahlung im Vergleich zum Trockenmahlen. Um aber die höheren Energiekosten für die zwangsläufig folgende Entwässerung bei der Sprühtrocknung möglichst gering zu halten, müssen hohe Feststoffgehalte realisiert werden. Außerdem sind die gezielten Einstellungen rheologischer Eigenschaften sowie die Gewährleistung der Dispersionsstabilität über die Zeit produktionstechnisch notwendig. In diesen Dispersionen, die in der Keramik auch als Schlicker bezeichnet werden, liegen Feststoffe verteilt in einem flüssigen Medium vor. Feststoffe sind silikatkeramische, oxidkeramische und nichtoxidkeramische Rohstoffe. Durch Schwerkraft und elektrostatische Kräfte neigen die Feststoffpartikel in diesen Systemen zum Agglomerieren und Sedimentieren. Um die Agglomeration zu verhindern, d.h. um den Schlicker zu stabilisieren, muss ein optima-

les Maß abstoßender Kräfte zwischen den Feststoffpartikeln wirken. Hierfür bietet der Einsatz geeigneter Verflüssigungs- und Dispergierhilfsmittel die Möglichkeit der gezielten Einflussnahme.²³ Wird der Schlicker für die Sprühtrocknung hergestellt, werden auch die für die Formgebung (z.B. Pressen) notwendigen Additive – wie temporäre Binder und Presshilfsmittel – zugegeben.

Da in einer Masse stets mehrere organische Additive eingesetzt werden müssen, ist deren Wechselwirkung, insbesondere bei der thermischen Behandlung, von großer Bedeutung. Organische Verbindungen können bei der Verbrennung zu giftigen Gasen und Rückständen führen. Das ist bei der Auswahl frühzeitig zu berücksichtigen, da ansonsten eine Belastung der Umwelt nicht auszuschließen ist.

3.2 Formgebung

Für die Herstellung keramischer Bauteile steht heute eine Palette sehr unterschiedlicher Formgebungsverfahren zur Verfügung. Diese lassen sich unterteilen in:

- Pressen
 - uniaxiales Pressen
 - isostatisches Pressen
 - Vibrationspressen
 - Stampfen
- Bildsame Formgebung
 - Extrudieren
 - Drehen
- Gießen
 - Schlickergießen
 - Druckgießen
 - Spritzgießen
 - Foliengießen

Unter Abwägung aller technischen und ökonomischen Aspekte hat jedes Verfahren Vor- und Nachteile (Tabelle 4). Welches Verfahren zum Einsatz kommt, hängt primär von der Geometrie und der Stückzahl des herzustellenden Bauteils ab.

In welcher Weise die Formgebungsverfahren Fragen der Effizienz berühren, soll in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert werden.

²³ http://www.zschimmer-schwarz.com/usaPDFs/simon/zschimmer-schwarz/media/site/downloads/fachinfo/deu/Fach/D_WirkmechVerfluss.pdf

Tabelle 4: Vor- und Nachteile üblicher Formgebungsverfahren²⁴

Formgebungsverfahren	vorteilhaft ermöglicht	nachteilig verbunden mit
Schlickerguss	<ul style="list-style-type: none"> komplexe Bauteile (dünnwandig, unsymmetrisch) geringen Materialaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> komplizierter Rheologie rauen Oberflächen problematischer Formenherstellung eingeschränkter Formtoleranz hoher Maßtoleranz
Druckguss (im Vergleich zum Schlickerguss)	<ul style="list-style-type: none"> schnelle Scherbenbildung sehr kleine Trockenschwindung gute Maßhaltigkeit Wegfall der Formenrücktrocknung geringen Platzbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> aufwändigen Werkzeugen der Notwendigkeit großer Stückzahlen problematischen organischen Lösungsmitteln
Folienguss	<ul style="list-style-type: none"> kontinuierliche Produktion dünne Schichten gute Maßgenauigkeit hohe Fertigungskapazität 	<ul style="list-style-type: none"> beschränkter Bauteilgeometrie notwendiger Trocknung
Spritzguss	<ul style="list-style-type: none"> komplexe Geometrie kleine Toleranzen gute Reproduzierbarkeit hohe Oberflächengüte Konturschärfe hohe Stückzahlen 	<ul style="list-style-type: none"> aufwändige Werkzeugen hohem Werkzeugverschleiß begrenzter Bauteilgröße aufwändigem Entbindern/Ausbrennen auffälligen Dichtegradienten
Extrudieren	<ul style="list-style-type: none"> kontinuierliche Produktion hohe Fertigungskapazität große Bauteillängen preiswerte Herstellung 	<ul style="list-style-type: none"> deutlichen Texturen notwendiger Trocknung
Trockenpressen	<ul style="list-style-type: none"> automatischen Prozessablauf gute Reproduzierbarkeit gute Maßhaltigkeit eingeschränkte Trocknung preiswerte große Stückzahlen 	<ul style="list-style-type: none"> Beschränkungen bei der Bauteilgeometrie möglichen Dichtegradienten aufwändigen Formwerkzeugen aufwändiger Pulveraufbereitung
Nasspressen/Feuchtpressen (im Vergleich zum Trockenpressen)	<ul style="list-style-type: none"> komplizierte Bauteilgeometrien gleichmäßigere Dichteverteilung 	<ul style="list-style-type: none"> notwendiger Trocknung geringerer Verdichtung größeren Toleranzen
Isostatisches Pressen	<ul style="list-style-type: none"> hohe Dichte ohne Textur keine Dichtegradienten 	<ul style="list-style-type: none"> geringen Taktzeiten

3.2.1 Energie

Im Vergleich zu den anderen Prozessschritten kann der Energieaufwand bei der Formgebung als vergleichsweise gering angesehen werden. Häufig wird Pressluft für formgebende Prozesse eingesetzt. Hier sind entsprechend indirekte Energiekosten zu berücksichtigen.

²⁴ http://www.keramverband.de/brevier_dt/4/1/4_1_3.htm

3.2.2 Verschleiß

Bei den für die Formgebung eingesetzten Werkzeugen spielt der Verschleiß eine große Rolle. Hier ist nicht nur der Abrieb, wie bei der Aufbereitung, ein Thema, sondern auch die mit zunehmendem Verschleiß abnehmende Formtreue des Bauteils.

Neben Stahl und teilweise auch Hartmetall, kommt bei einigen Verfahren auch Gips als Formenwerkstoff zum Einsatz. Dies ist nicht nur beim Schlickerguss der Fall, sondern auch bei der Formgebung von Blumentöpfen und Dachziegeln.

3.3 Trocknung

Die Aufgabe der Trocknung ist es, den für die Formgebung notwendigen Wassergehalt der Masse auf ein Minimum vor dem Brand zu reduzieren. Dazu muss das Wasser erwärmt und schließlich in die Dampfphase überführt werden. Die minimal notwendige Energie wird durch die Verdampfungsenthalpie vorgegeben, die für 1 kg Wasser 2257 kJ ($\approx 0,6$ kWh) bei 100°C beträgt. Dieser theoretische Energieaufwand wird in der Praxis allerdings deutlich übertroffen. Allgemein werden ca. 1,2 kWh pro kg zu verdampfende Wassermenge benötigt²⁵. Für die Trocknung von Sanitärkeramik kann beispielsweise ein Energieaufwand von ca. 100 kWh pro t produzierter Ware angesetzt werden.

Neben der Trocknung bei unterschiedlichen Temperaturen findet auch die Trocknung mittels Mikrowelle statt. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass die Trocknung im Inneren beginnt und nicht wie bei der konventionellen Trocknung von außen. Dadurch können bei großen Bauteilen Trocknungsrisse vermieden werden. Der Einsatz des Mikrowellentrocknens beschränkt sich bisher auf Sonderformate. Ein Nachteil ist auch, dass die Trocknung batchweise erfolgen muss und keine kontinuierliche Fahrweise möglich ist.

3.4 Entbinderung

Werden einer keramischen Masse hohe Anteile organischer Additive zugegeben, müssen diese vor dem eigentlichen Sinterprozess in einer speziellen thermischen Behandlung aus dem Formkörper entfernt werden. Dieser Prozessschritt kommt nur bei Technischer Keramik und insbesondere bei Bauteilen die mittels Spritzguss hergestellt werden zum Einsatz.

²⁵ http://www.ie-leipzig.com/Ceramin/downloads/D7_Tutorial_Energy_saving_DE.pdf

3.4.1 Energie

Die thermische Entbinderung wird bei Temperaturen bis 400°C durchgeführt. Die Behandlungsdauer kann 48 – 72 h betragen. Da die thermische Zersetzung der organischen Bestandteile zu exothermen Reaktionen führt, muss die lokal entstehende erhöhte Temperatur rasch abgeführt werden, damit der Formkörper nicht beschädigt wird. Dazu muss der Entbinderungs-ofen mit vorgewärmter Luft gespült werden.

3.4.2 Umweltbelastung

Bei der thermischen Zersetzung organischer Verbindungen müssen die entstehenden Abgase kritisch bewertet werden. In der Regel muss eine katalytische Nachverbrennung oder eine Abgaswäsche erfolgen.

3.5 Brand

Der Brand ist für die Herstellung keramischer Bauteile von grundlegender Bedeutung. Hierbei laufen die Reaktionen ab, die aus den Rohstoffen den keramischen Werkstoff entstehen lassen. Die notwendigen Temperaturen hängen von den Rohstoffen und den angestrebten Eigenschaften der Produkte ab. Dazu werden die Formkörper (Grünlinge) auf Platten positioniert, die in Form eines Stapelsystems eine optimale Ausnutzung des Ofenraums erlauben. Diese Platten und Stützen werden als „Brennhilfsmittel“ (eng. Kiln Furniture) bezeichnet (Abbildung 5).



Abbildung 5: Blick in einen Ofen mit keramischen Komponenten auf Brennhilfsmitteln²⁶

²⁶ http://www.schmelzfeuer.de/files/denk_schmelzfeuer_herstellung_brennofen.jpg

Grundsätzlich lassen sich zwei Ofentypen unterscheiden:

- Periodische Öfen
 - Kammerofen
 - Ringofen
- Kontinuierliche Öfen
 - Tunnelofen
 - Rollenofen

Periodische Öfen werden im kalten Zustand mit Brenngut bestückt, nach einer vorgegeben Brennkurve aufgeheizt und nach dem Abkühlen wieder ausgeräumt. Kontinuierliche Öfen werden dagegen fortlaufend betrieben. Beim Durchfahren des Ofens wird das Brenngut unterschiedlichen Temperaturzonen entsprechend der Brennkurve ausgesetzt: Einer Aufheizzone folgt die Brennzone und den Abschluss bildet die Kühlzone. Vorteil der periodischen Öfen ist, dass jeder Brand mit einer anderen Brennkurve gefahren werden kann, während man bei einem kontinuierlichen Ofen an das gegebene Profil gebunden ist. Vorteil bei kontinuierlichen Öfen ist, dass die Ofenkammer nur einmal aufgeheizt wird und dann über einen langen Zeitraum (mehrere Monate bis Jahre) bei dieser Temperatur gehalten wird. Wenn es auch noch möglich ist, auf Brennhilfsmittel zu verzichten, wie dies bei Rollenöfen in der Fliesenfertigung der Fall ist, dann könne wesentlich kürzere Brennzeiten realisiert werden, da nur das Brenngut und nicht Ofenkammer und Brennhilfsmittel aufgeheizt werden und abkühlen müssen. Dadurch lassen sich Brennzeiten (kalt – kalt) von ca. 35 Minuten erreichen, während bei anderen keramischen Produkten Brände von mehreren Tagen nicht unüblich sind.

3.5.1 Energie

Der Sinterprozess erfordert in der Keramikfertigung den höchsten Energieeinsatz. Dieser nimmt von Ziegeln über Porzellan zur Technischen Keramik deutlich zu (Abbildung 6). Betrachtet man die Energieverbräuche der verschiedenen Fertigungsstufen, so nimmt die Wärmebehandlung bei Technischer Keramik über 70 % ein. Allerdings wurden in der Vergangenheit überwiegend Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Ziegel- und Porzellanherstellung entwickelt, da bei diesen Produkten die Tonnage um ein vielfaches höher ist.

Kontinuierliche Öfen bieten den Vorteil, dass die Wärme konstant gehalten wird und damit weniger Energie benötigt wird, als beim ständigen Aufheizen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Anteil des Brennguts zu den Brennhilfsmitteln. Dieses Verhältnis hängt von der Größe der Produkte und der Art des Ofens ab. In aller Regel ist jedoch der Masseanteil von Brennhilfsmitteln deutlich höher als der des Brenngutes. Durch den Einsatz leichter und dünner Brennhilfsmittel ergibt sich ein erhebliches Einsparpotential.

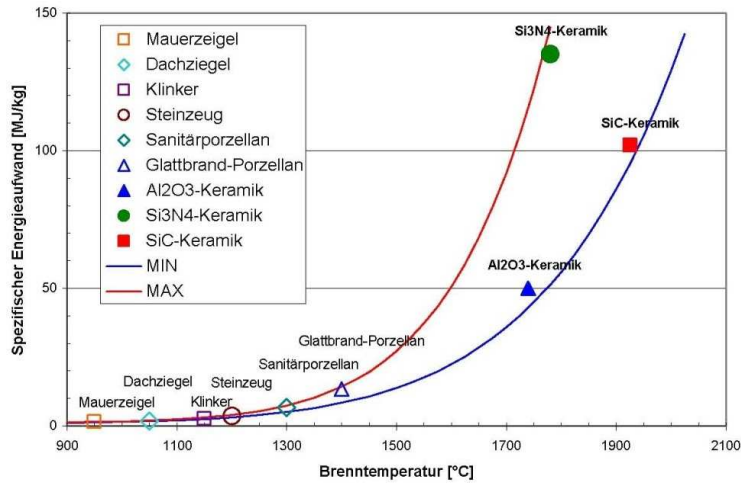


Abbildung 6: Spezifischer Energieaufwand Technischer Keramik im Vergleich zu Silicatkeramik²⁷

Von der beim Sinterprozess eingebrachten Energie gelangt nur ein sehr geringer Anteil (<6%) tatsächlich ins Brenngut. Der überwiegende Anteil sind Verluste durch Energieumwandlung, Wärmeabstrahlung, Kühlung und Ofenabgase (Abbildung 7).

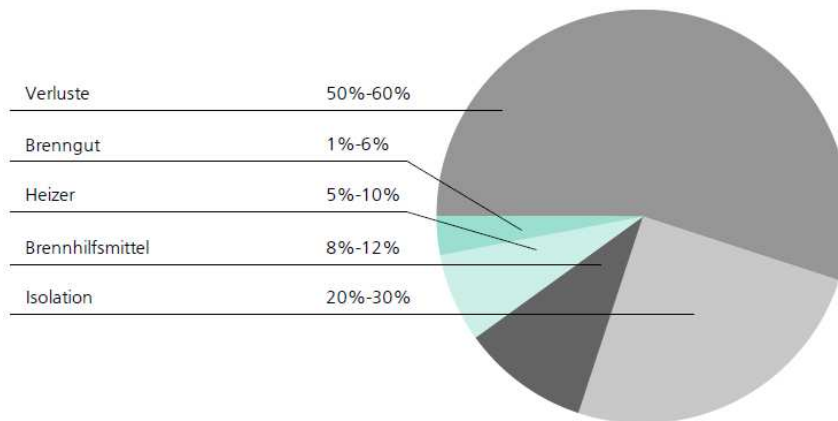


Abbildung 7: Energieanteile beim Sinterprozess²⁷

In der Vergangenheit wurden Konzepte entwickelt, um die Abwärme von Brennöfen für die Trocknung zu nutzen. Dieser gekoppelte Prozess ist aber nur dann von Vorteil, wenn Trocknung und Brand kontinuierlich und mit konstanter Menge betrieben werden. Da die heutige Produktion in allen Bereichen zunehmend flexibel gestaltet werden muss, werden heute Konzepte der thermischen Entkopplung bevorzugt.

Durch die Verkürzung der Brennzeiten ist es grundsätzlich möglich, die Produktionskosten zu senken und die Flexibilität, sowohl hinsichtlich des Sortiments als auch möglicher Produktionsschwankungen und -änderungen, zu erhöhen. Im Bereich dünnwandiger keramischer Erzeugnisse, z. B. Porzellan

²⁷ Neugebauer, R. et al.: Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion. Abschlussbericht BMBF Projekt (2008)

oder Fliesen, hat dies zur Einführung des Schnellbrandes geführt, der durch Brennöfen mit optimalen Wärmeübergangsbedingungen an das Brenngut (Einlagenbrand) und dadurch deutlich kürzere Brennzeiten gekennzeichnet ist. Entscheidend für den Brand ist die Einhaltung der Qualität, gekennzeichnet durch Rissfreiheit, Maß- und Formhaltigkeit sowie Ausbildung des geforderten Gefüges und der hierdurch bedingten Materialeigenschaften. Damit sind der Verkürzung der Brennzeiten jedoch Grenzen gesetzt. Für die Ausbildung des charakteristischen Gefüges eines feuerfesten Werkstoffes ist eine ausreichend hohe Brenntemperatur und Haltezeit bei dieser Temperatur erforderlich. Weiterhin können beim Brand feuerfester Werkstoffe eine ganze Reihe von Vorgängen im Material ablaufen, z. B. Austreiben von Wasser und Bindemitteln, Modifikationswechsel, Bildung neuer mineralogischer Phasen, Zersetzung von Verbindungen und Ausbildung von neuen Bindepheasen, Kristallisation usw. Dabei ändert sich das Gefüge und somit ändern sich auch die Eigenschaften des Materials. Aus der Feinkeramik, der Herstellung von Fliesen oder Hochlochziegeln ist jedoch bekannt und vielfach bewiesen, dass auch der Schnellbrand ausreichend ist für die geforderte qualitätsgerechte Ausbildung des Gefüges. Hier besteht also noch Entwicklungsbedarf, um auch für andere keramische Produkte den Weg zum Schnellbrand zu ebneten.

3.5.2 Umweltbelastung

Die Abgase können in Abhängigkeit vom eingesetzten Rohstoff Fluor, Schwefel und Chlor sowie die Verbrennungsprodukte CO₂, NO_x, etc. enthalten. Ferner können auch Stäube emittiert werden.

3.6 Glasieren

In einigen Bereichen der Keramikindustrie ist eine Glasur der Oberfläche notwendig. Dies gilt beispielsweise für Fliesen, Sanitär, Geschirr und Seinzeugrohre.

3.7 Nachbearbeitung

Insbesondere bei Technischer Keramik ist häufig eine Nachbearbeitung zur Einhaltung der Maßtoleranzen notwendig. Dies geschieht durch Schleifprozesse. Aufgrund der hohen Härte keramischer Werkstoffe ist das nur mit Diamantwerkzeugen möglich. In aller Regel ist man bemüht, dass die Bauteile bereits nach dem Sinterprozess in einer endkonturnahen Geometrie vorliegen. Dadurch wird nicht nur der Bearbeitungsaufwand minimiert. Zusätzlich ist zu bedenken, dass der Schleifabfall bereits den gesamten Fertigungsprozess, inklusive energieintensivem Brennprozess, durchlaufen hat.

Um den hohen Aufwand der Hartbearbeitung zu vermeiden bzw. zu minimieren, erfolgt die Bearbeitung möglichst bereits vor dem Brand (Grünbearbeitung) oder an einer nur teilgesinterten Keramik (Weißbearbeitung).

Für die Grünbearbeitung werden bevorzugt Halbzeuge eingesetzt, die isostatisch gepresst sind. Durch entsprechende organische Bindemittel ist eine hinreichend hohe Festigkeit gewährleistet. Nachteile der Grünbearbeitung sind, dass eine Automatisierung kaum möglich ist und die Teile noch entbindert und gesintert werden müssen. Durch die Schwindung kommt es dann nicht nur zur Verkleinerung der Geometrie - die man zuvor berücksichtigen kann - sondern möglicherweise auch zu Deformationen aufgrund ungleicher Wandstärken.

Zur Weißbearbeitung werden Halbzeuge eingesetzt, die bereits entbindert und teilgesintert sind. Die verbleibende Schwindung wird von den Lieferanten sehr genau angegeben, sodass eine exakte Bearbeitung möglich ist. Als ein Beispiel soll an dieser Stelle auf die Herstellung von vollkeramischem Zahnersatz eingegangen werden. Hier werden aus vorgebrannten ZrO_2 -Halbzeugen mittels CNC-Bearbeitung Restaurationen angefertigt. Für diese Halbzeuge wird die Schwindung angegeben, sodass auf Endmaß gefertigt werden kann. Nach der Bearbeitung erfolgt dann noch der Fertigbrand. Von dem als Halbzeug eingesetzten, hochpreisigen Material wird lediglich ca. 10% tatsächlich als Zahnersatz genutzt, der Rest wird kostenpflichtig entsorgt.

3.7.1 Energie

Der Aufwand für die Bearbeitung ist produktspezifisch und nicht zu verallgemeinern. Ein indirekter Energieverbrauch erfolgt durch die benötigte Pressluft.

3.7.2 Wasser

Während die Grünbearbeitung trocken erfolgt, müssen für die Weiß- und Hartbearbeitung Kühlschmiermittel eingesetzt werden. Diese sind häufig mit Wasser mischbar und werden nach einer Filtration im Kreislaufbetrieb genutzt. Durch längeren Stillstand kann es zur Bildung von Keimen und Pilzen kommen. Die Entsorgung muss fachgerecht durchgeführt werden.

3.7.3 Umweltbelastung

Die bei der Bearbeitung mögliche Umweltbelastung bezieht sich primär auf den Arbeitsplatz. Durch das Kühlschmiermittel kann es zu einer Ölanreicherung in der Atemluft kommen, daher muss eine entsprechende Filterung der Luft an der Bearbeitungsmaschine erfolgen. Bei der Grünbearbeitung entstehender Staub muss abgesaugt werden, damit er nicht in die Atemluft gelangt.

Die Deponierung der Schleifabfälle stellt nach heutigem Kenntnisstand keine Umweltbelastung dar, allerdings werden hier teure Rohstoffe der wirtschaftlichen Nutzung entzogen.

4 Möglichkeiten der Wiederverwendung

Im Gegensatz zu den Metallrohstoffen ist eine echte Kreislafrückführung bei Keramikrohstoffen in den meisten Fällen nicht möglich, weil sich diese im Zuge des Herstellungsprozesses eines Produkts unwiederbringlich verändern. Die Rohstoffe gehen dauerhaft neue chemische Verbindungen ein und bilden neue Minerale und Mineralgemenge, die ganz andere Eigenschaften als der Ursprungsrohstoff aufweisen. Das schränkt ihre Recyclingfähigkeit ein, bzw. macht Recycling gar unmöglich. So wird z. B. Ton zu Ziegeln gebrannt, aus denen jedoch niemals wieder Ton hergestellt werden kann. Weitere Beispiele sind Kaolin, Quarz und Feldspat, die zur Herstellung von Porzellan verwendet wurden. Häufig lassen sich jedoch keramische Produkte als Substitut für primäre Rohstoffe wieder in den Wirtschaftskreislauf einbringen (Sekundärrohstoffe).²⁸ Hier ist insbesondere der Straßenbau angesprochen.

4.1 Rohstoffmischungen vor dem Brand

Während der Formgebung entstehen Reste, die in aller Regel wieder der Masse zugeführt werden können. Dies kann unmittelbar in der Fertigung erfolgen. Beim keramischen Spritzguss werden die Angüsse gesammelt und meist extern wieder aufbereitet. Materialverluste treten in dieser Stufe der Fertigung kaum auf. Allerdings muss die durch die bereits erfolgte Aufbereitung eingebrachte Energie (z.B. Mischen) als Verlust vermerkt werden.

Eine untergeordnete Besonderheit stellen die Schleifstäube der Grünbearbeitung dar, die durch Absaugungsanlagen aufgefangen werden und nicht wieder zurückgeführt, sondern entsorgt werden.

4.2 Scherben und Ausschuss nach dem Brand

Scherben und Ausschuss nach dem Brand stellen hohe Verluste dar. Mängel die vor dem Brand nicht erkannt wurden oder erst durch den Brand verursacht werden gilt es zu vermeiden, da – wie bereits dargestellt – der Sinterprozess der energieintensivste Verfahrensschritt ist. Dennoch lassen sich Abfälle nicht vermeiden. In der Silicatkeramik kann der Bruch meist zerkleinert und der Rohstoffmischung erneut zugeführt werden. Porzellanbruch wird teilweise als Rohstoff für andere Produkte, wie Säurefeste Steine, eingesetzt.

Bei der Technischen Keramik ist die Wiederverwendung von Scherben und Ausschuss nicht möglich.

²⁸ Deutschland Rohstoffsituation 2010. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

4.3 Schleifabfälle

Wie bereits dargestellt werden Schleifabfälle heute entsorgt. Der Anteil von Schleifabfällen bezogen auf die eingesetzten Rohstoffe bzw. die gefertigte Produktmenge kann sehr hoch sein. Bei der Dentalkeramik werden ca. 90% der zu Halbzeugen verarbeiteten Rohstoffe als Schleifabfälle entsorgt. Aber auch bei anderen Produkten liegt der Anteil oft überraschen hoch.

4.4 Keramik nach dem Einsatz

Keramik wird nach der Anwendung dem ursprünglichen Herstellungsprozess nicht wieder zugeführt. Baukeramik und Feuerfestkeramik wird häufig zerkleinert und zum Straßenbau im weitesten Sinne genutzt.

5 Keramikindustrie in NRW

Keramische Werkstoffe lassen sich nach verschiedenen Kriterien unterteilen. Im Rahmen dieser Studie sollen drei Gruppen im Folgenden getrennt betrachtet werden:

- Bau- und Gebrauchskeramik:
 - Produkte werden überwiegend aus natürlichen Rohstoffen hergestellt
 - Es handelt sich meist um großformatige Bauteile
 - Produkte der Grobkeramik bewegen sich im unteren Preissegment und werden primär im Bausektor eingesetzt
 - Produkte der Feinkeramik liegen dagegen im oberen Preissegment und finden Anwendung im Bausektor (Sanitärkeramik) und als Konsumartikel (Geschirr- und Gebrauchskeramik)
- Feuerfestkeramik:
 - Produkte werden aus natürlichen und synthetischen Rohstoffen hergestellt
 - Es handelt sich sowohl um großformatige Bauteile als auch um Massen, die erst beim Anwender verarbeitet werden
 - Produkte bewegen sich eher im unteren Preissegment
 - Anwender sind primär die Stahlindustrie, Gießereien, die Zement- und Glasindustrie sowie Müllverbrennungsanlagen.
- Technische Keramik:
 - Produkte werden überwiegend aus synthetischen Rohstoffen hergestellt
 - Es handelt sich überwiegend um kleinformatige Bauteile
 - Produkte bewegen sich im obersten Preissegment
 - Bauteile sind überwiegend in eine Baugruppe bzw. ein komplexes Produkt integriert
 - Anwendungen finden sich in nahezu allen Bereichen von Maschinenbau, über Mobilität bis zur Medizintechnik.

5.1 Bau- und Gebrauchskeramik

Unter dem Begriff Bau- und Gebrauchskeramik werden die Produkte zusammengefasst, die aus natürlichen Rohstoffen, in erster Linie aus Ton, Kaolin, Feldspat, Quarz und Speckstein hergestellt werden. Basierend auf den Merkmalen des Gefüges und ihren unterschiedlichen Verwendungen spricht man von

- Feinkeramik, dazu zählen Geschirrporzellane, Sanitärkeramik, und
- Grobkeramik, worunter beispielsweise Ziegel, Klinker, Fliesen und Steinzeugrohre fallen.

5.1.1 Feinkeramik

Feinkeramik wird durch die Korngröße der Gefügebestandteile von der Grobkeramik unterschieden. Die Grenze liegt bei einer Korngröße von 0,1 - 0,2 mm. Durch die „feinen“ Bestandteile erhält das Produkt während der Sinterung ein sehr dichtes Gefüge mit einer verhältnismäßig geringen Porosität, was eine niedrige Wasseraufnahmefähigkeit mit sich bringt.

5.1.1.1 Geschirr- und Gebrauchskeramik

Im Rahmen dieser Betrachtung sollen die zahlreichen Töpfereien nicht berücksichtigt werden. Porzellanhersteller sind in NRW nicht ansässig, die Porzellanmanufaktur Fürstenberg befindet sich bei Höxter, aber unmittelbar hinter der Landesgrenze in Niedersachsen.

In NRW finden sich 2 Hersteller von Blumenübertöpfen:

- Majolikafabrik Rheinbach AG, Keramikerstr. 3–15, 53359 Rheinbach
- Soendgen Keramik GmbH, Töpferstr. 1-9, 53343 Wachtberg-Adendorf

Rohstoffe zur Fertigung sind Tone aus der Region und dem Westerwald. Der aufbereitete feuchte Ton wird über eine Strangpresse abschnittsweise in Gipsformen gefüllt. In diesen Gipsformen, die rotieren, dreht sich der sogenannte Rollerkopf (aus Stahl), der die Tonmasse rotierend gegen die Gipsform drückt und so den Blumentopf formt. Der an der oberen Kante der Form übertretende Ton wird abgeschnitten und der Aufbereitung wieder zugeführt. Der Grünling wird zunächst in der Gipsform angetrocknet. Durch die Trockenschwindung ist es möglich den Grünling auch aus einer mit Gipsform mit Relief herauszuheben. Die möglichen Reliefstufen werden durch die Trockenschwindung begrenzt. Die Gipsformen unterliegen durch den Kontakt zum Ton einem starken Verschleiß und müssen häufig ausgetauscht werden.



Abbildung 8: Rollertechnik in der Blumentopf-Fertigung²⁹

Die Produkte der beiden Hersteller unterscheiden sich durch die Art der Farbgebung. Während in der Majolikafabrik die Blumentöpfe glasiert werden, wird die Farbe bei Soendgen mittel Pulverlackieren aufgebracht. Als Besonderheit bei der Formgebung ist hier noch der Einsatz von Gipsformen zu nennen. Da diese nur eine begrenzte Standzeit haben, entstehen hier zusätzliche Potentiale zur Steigerung der Materialeffizienz.

5.1.1.2 Sanitärkeramik

Hersteller von Sanitärkeramik in NRW ist Keramag mit zwei Standorten:

- Keramag AG, Kreuzerkamp 11, 40878 Ratingen
- Keramag Keramische Werke AG, Abelstraße 12, 46483 Wesel

Sanitärkeramik wird aus den Rohstoffen Quarz, Feldspat, Ton und Kaolin hergestellt, daher spricht man auch von Sanitärporzellan. Vorherrschendes Formgebungsverfahren ist der Druckguss. Im Gegensatz zum Schlickerguss werden hier spezielle poröse Kunststoffformen eingesetzt und die Scherbenbildung an der Formenwand durch Druck beschleunigt.

Die Fertigung von Sanitärkeramik ist sehr Material intensiv: 58,1 % der Gesamtkosten entfallen auf Material, nur 20,9% dagegen auf Personal.³⁰

²⁹ http://www.lippert.de/maschinenbau_de__blumentoepfeuebertoepfegebrauchskeramikzierkeramik__rolleranlagentakts-trassen.php

³⁰ <http://www.keramag.de/fileadmin/downloads/Halbjahresbericht2008.pdf>

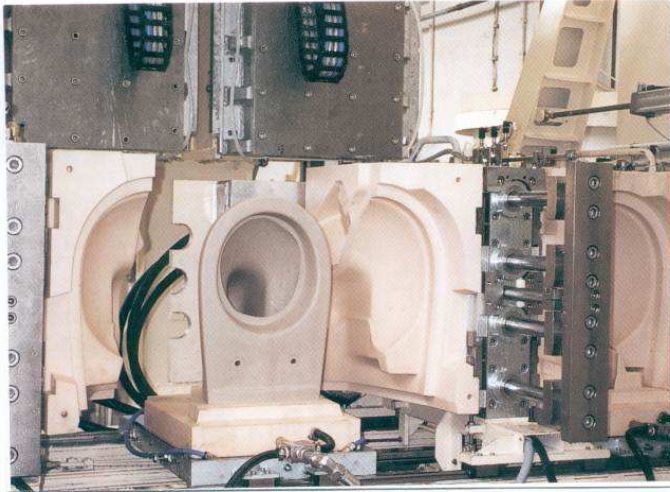


Abbildung 9: Druckgusswerkzeug für die WC-Fertigung.³¹

Um eine glatte, glänzende und leicht zu reinigende Oberfläche zu erhalten werden die Produkte glasiert. Für die Reparatur von Glasurfehlern, die in der Produktion von Sanitärkeramik auftreten können, wird im Rahmen eines vom BMBF geförderten Projektes eine Reparaturmasse entwickelt, die bei deutlich niedrigeren Temperaturen als herkömmliche Glasuren eingebrannt werden kann.³²

5.1.1.3 Fliesen

Fliesen sind teilweise der Fein- und teilweise der Grobkeramik zuzuordnen. Fliesen aus Feinsteinzeug werden der Feinkeramik zugeordnet.

Feinsteinzeugfliesen werden aus einem Gemisch aus Ton, Feldspat und Quarz hergestellt. Die Rohstoffe werden feinvermahlen, zu einem Schlicker aufbereitet und über einen Sprühturm zu einem Press-Granulat verarbeitet. Die Formgebung erfolgt durch Pressen, der Brand bei ca. 1200°C im Schnellbrand-Rollenofen.

Die resultierende Wasseraufnahme liegt unter 0,5%. Durch Zugabe verschiedener Farboxide ist eine Vielzahl von Farben herstellbar. Meist sind die Fliesen vollständig durchgefärbt. Nach dem Brand ist es möglich, die Fliesen bis auf Hochglanz zu schleifen.

Neben dem unglasierten Feinsteinzeug wird in zunehmendem Maße glasiertes und bedrucktes Feinsteinzeug hergestellt. Die neue Technik des digitalen Druckens von Glasur auf Fliesen bietet die Möglichkeit eine enorme Vielfalt an Dekoren zu erzeugen. Beispielsweise werden unterschiedlichste Steine, Hölzer, Stoffe, Kork, Leder etc. optisch nachempfunden.

³¹ G. Klein: Druckgießen. in: W. Kollenberg (Hrsg.) Technische Keramik, Vulkan-Verlag (2009)

³² <http://www.ecorepair.info/>

Hersteller von Fliesen in NRW ist

- AGROB BUCHTAL GmbH, Duisdorfer Str., 53347 Alfter-Witterschlick

Ist ein Unternehmen der Deutsche Steinzeug Cremer & Breuer AG. Im ersten Quartal 2013 betrug der Aufwand für Material 44,7%, bzw. für Personal 34,3% der Gesamtkosten. Daran kann man die Bedeutung der Materialeffizienz für diese Branche auch noch einmal deutlich erkennen.

5.1.2 Grobkeramik

Enthält eine Keramik auch gröbere Körner, so wird sie der Grobkeramik zugeordnet. Hierzu zählen:

- Baukeramik: Dachziegel, Mauerziegel, Vormauerziegel, Klinker, Pflasterklinker und Fußbodenfliesen
- Feuerfestkeramik: Auskleidung für Schmelzaggregate der Stahlindustrie, Auskleidung von Müllverbrennungsanlagen, Ofenisolation, Brennhilfsmittel
- Säurefestkeramik: Auskleidungen und Bodenbeläge für die chemische Industrie und die Lebensmittelindustrie
- Steinzeugrohre für die Kanalisation

5.1.2.1 Ziegel

Die Fertigung von Ziegeln basiert auf plastischen Tonmassen, d.h. während der Aufbereitung wird den Tonen so viel Wasser zugesetzt, dass eine extrudierbare Masse entsteht. Die Masse wird kontinuierlich extrudiert und der entstehende Strang wird so getrennt, dass Ziegel der gewünschten Größe resultieren. Die innere und äußere Geometrie der Ziegel wird durch das Mundstück des Extruders geformt (Abbildung 10).

Ziegel werden heute vorwiegend oxidierend gebrannt. In einer reduzierenden Atmosphäre können aber auch Farben beeinflusst und spezielle Effekte erzielt werden. In manchen Fällen erfolgt daher am Ende des Brennprozesses noch eine kurze reduzierende Phase.

Die Ofen- bzw. Brenntechnik hat sich in den letzten Jahren deutlich weiterentwickelt. Durch Schnellbrandtechnik konnte für viele Produkte die Brenndauer von 10 – 50 h auf 2 - 5 Stunden reduziert werden.

Hersteller von Ziegeln in NRW sind u.a.:

- Wienerberger AG

Der Geschäftsbereich Ziegel umfasst die Produktgruppen Hintermauerziegel, Vormauerziegel und Tondachziegel. Wienerberger ist der weltweit größte Hersteller von Hintermauerziegeln, die Nr. 1 bei Vormauerziegeln in Europa und den USA.

Standorte in NRW sind:

- Wienerberger Ziegelindustrie GmbH, Rödder 59, 48249 Dülmen-Buldern
- Wienerberger Ziegelindustrie GmbH, Osnabrücker Straße 67, 49565 Bramsche
- Wienerberger Ziegelindustrie GmbH & Co., Steinweg 65, 34471 Volkmarsen
- Wienerberger GmbH, Heimkehrerstr. 12, 37133 Friedland
- ABC-Klinkergruppe

ist ein Unternehmensverbund von Ziegeleien, die sich auf die Verarbeitung von regionalem Schieferthon in Norden von NRW bzw. Süden vom angrenzenden Niedersachsen spezialisiert hat. Standorte in NRW sind:

- Recker Ziegelwerk - Berentelg & Hebrok OHG, Mettinger Straße 135, 49509 Recke
- Klinkerwerk Hörstel A. - Berentelg & Co. KG, Dornierstraße 11, D-48477 Hörstel
- ABC-Keramik - H & R Berentelg GmbH & Co. KG, Industriestraße 10, 49492 Westerkappeln



Abbildung 10: Ziegelherstellung – nach der Extrusion wird der Strang getrennt³³

Auf die Herstellung von Pflasterklinkern hat sich die

- KERAWIL Tonwerk Wilhelmshöhe GmbH, Tonwerkstraße 96 ,32584 Löhne spezialisiert. Der verarbeitete Ton stammt aus regionalen Gruben und dem Westerwald. Nach der Aufbereitung erfolgt die Formgebung über Extrusion. Der Tonstrang wird in Batzen von etwa eineinhalb Metern geschnitten; anschließend schneidet die Harfe mit Hilfe feiner Drähte den Batzen millimetergenau in Rohlinge von der gewünschten Stärke - bis zu 10.000 Stück in der Stunde. Gebrannt werden die Klinker in einem 100 m langen Tunnelofen bei >1.000°C in 3-4 Tagen.

Eine besondere Brenntechnik ist der bei der

- Gillrath Ziegel- & Klinkerwerk GmbH & Co. KG, Wockerather Weg 38, 41812 Erkelenz anzutreffende Ringofen. Der von Hoffmann 1858 erfundene Ringofen (Abbildung 11) ermöglichte es zum ersten Mal, größere Mengen von Ziegeln kontinuierlich bei erheblicher Energieersparnis zu

³³ http://www.ziegelwerk-ott.de/M_3.jpg

brennen. Aus heutiger Sicht bietet der Ringofen ein hohes Maß an Flexibilität und bietet sich für die Fertigung von individuellen Ziegeln in geringer Stückzahl an, da in den einzelnen Kammern des Ofens Temperatur und Atmosphäre gezielt modifiziert werden kann.

Knapp 30 % der in Deutschland gefertigten Ziegel stammen aus NRW. Die 42 hier ansässigen Firmen erwirtschafteten 2003 mit knapp 2.000 Beschäftigten einen Umsatz von 247 Mio. €. ³⁴

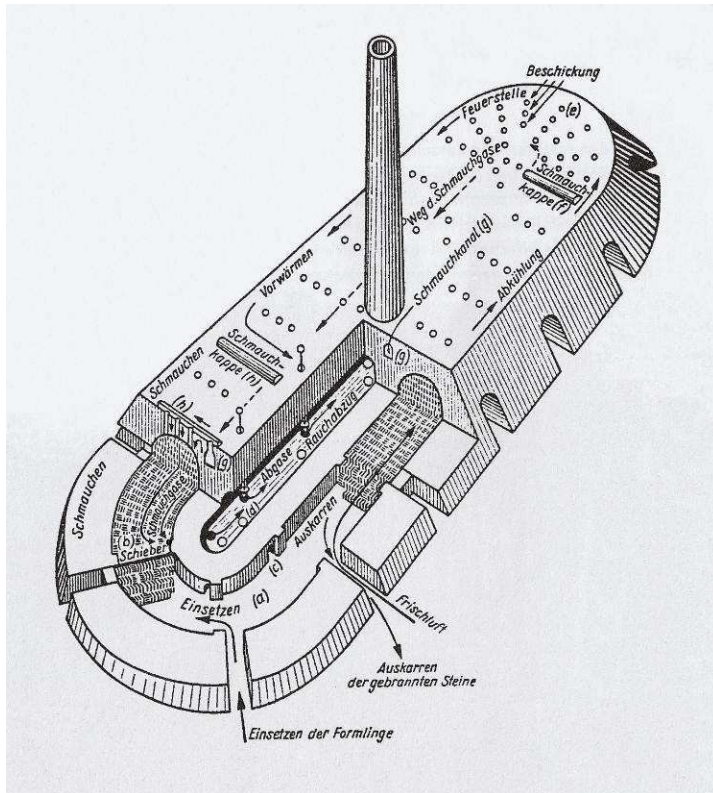


Abbildung 11: Prinzip Darstellung des Ringofens ³⁵

Soll der Klinker zusätzlich glasiert werden, ist in der Regel ein zweiter Brand erforderlich. Von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt wurde in den Jahren 2007 – 2009 ein Projekt zum Glasieren von Klinkerriemchen im Einbrandverfahren bei

- Klinkerriemchenwerk Feldhaus GmbH & Co. KG, 49196 Bad Laer, gefördert. Als Ergebnis ³⁶ des Entwicklungsprojekts entstand eine neue Produktionslinie für die Herstellung glasierter Klinkerriemchen im Einbrandverfahren. Die Energieeinsparung gegenüber der zuvor angewandten Zweibrandglasierung beträgt etwa 74%.

Ein wichtiger Partner der Ziegelindustrie ist das

³⁴ Rohstoffsicherung in Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes NRW, Dezember 2005

³⁵ Schyia, L.: „Gut Brand!“ Der Siegeszug des Ringofens. Friedrich Eduard Hoffmann 1818–1900 – Nestor der Ziegelindustrie. Edition: anderweit Verlag, Suderburg 2000

³⁶ DBU-Abschlussbericht-AZ-26139

- Institut für Ziegelforschung Essen e.V. (IZF), Am Zehnthof 197, 45307 Essen

Das Institut ist eine Gründung der Ziegelindustrie. Seine Träger sind Verbände und andere Organisationen der Ziegelindustrie sowie die in der Ziegelindustrie tätigen Keramikanlagenbauer und eine Vielzahl von Ziegeleien als Direktmitglieder des Institutsvereins. Damit ist das IZF im gesamten Bereich der Baukeramik, namentlich für Dachziegel, Mauerziegel, Vormauerziegel, Klinker und Pflasterklinker sowie verwandte Produkte, tätig. Aufgabe ist die Durchdringung der Fertigungsprozesse, um diese effektiver, energie- und rohstoffsparender und umweltschonender zu gestalten.

5.1.2.2 Dachziegel

Die Formgebung von Dachziegeln erfolgt in 2 Stufen: nach der Extrusion und dem Schneiden der Grünlinge von Strang folgt noch ein Pressvorgang, bei dem die komplexe Geometrie realisiert wird (Abbildung 12). Als Werkstoff für die Formen der Presse hat sich Gips bewährt, obwohl auch Probleme durch den raschen Verschleiß entstehen.

Hersteller von Dachziegeln in NRW sind u.a.:

- Dachziegelwerke Nelskamp GmbH, Waldweg 6, 46514 Schermbeck
das 1926 gegründete Familienunternehmen fertigt in drei Werken Dachziegel, davon liegen 2 in Schermbeck.
- Röben-Tonbaustoffe GmbH Werk Brüggener GmbH, Swalmener Straße 3, 41379 Brüggen
Das Tondachziegelwerk Brüggen gehört seit 1977 zur Röben Gruppe. 2002 wurde das Werk mit neuen Produktionsanlagen erweitert. Das Werk hat eine Jahreskapazität von 20 Mio. Tondachziegeln.

Beim Brennen werden die Grünlinge in der Regel in sogenannte H-Kassetten gelegt (Abbildung 13). Dabei ist offensichtlich, dass sich mehr Brennhilfsmittel als Brenngut auf dem Ofenwagen befinden. Ein deutlich effizienterer Brand ist möglich, wenn die Dachziegel stehend auf Brennhilfsmittelplatten positioniert werden, wie es bei

- Gebr. Laumans GmbH & Co. KG Ziegelwerke, Stiegstraße 88, 41379 Brüggen-Bracht
erfolgt. Das 1896 gegründete Familienunternehmen erweiterte 2004 den Gesellschafterkreis um die dänische Piper-Gruppe. Dadurch bieten sich im europäischen Kontext neue Entwicklungsmöglichkeiten für Gebr. Laumans.



Abbildung 12: Zweistufige Formgebung von Dachziegeln durch Extrusion (links) und Pressen (rechts)³⁷



Abbildung 13: Dachziegel in H-Kassetten auf dem Weg zum Ofen³⁸

5.1.2.3 Steinzeugrohre

Für den Transport von Abwässern in kommunalen Kanalsystemen haben sich Rohre aus Steinzeug bestens bewährt und bieten gegenüber Kunststoff- oder Betonrohren entscheidende Vorteile. Für die Herstellung werden Ton und Schamotte eingesetzt. Die Masse wird über Extruder zu Rohren verarbeitet und glasiert. Die Rohre werden stehend in einem Tunnelofen bei ca. 1200°C gebrannt über bis zu 7 Tage gebrannt (Abbildung 14). Die Rohre können unterschiedliche Durchmesser aufweisen, die größten haben einen Durchmesser von 1,40 m und eine Länge von 2,50 m.

Der Marktführer und Europas größter Hersteller von Steinzeugrohren ist die

- Steinzeug-Keramo GmbH, 50226 Frechen, Alfred-Nobel-Straße 17

ein Unternehmen der Wienerberge AG. Im Werk Frechen werden heute pro Jahr ca. 100.000 t Steinzeug produziert. Das Unternehmen geht auf die 1906 in Frechen gegründete Cremer & Breuer GmbH, die von Beginn an auf die Fertigung von Kanalbauartikeln aus Steinzeug ausgerichtet war.

³⁷ <http://www.creaton.de/de/unternehmen/produktion/produktionsablauf/formgebung/>

³⁸ <http://www.wienerberger.com/de/presse/fotoservice?pn=2&classsite=1014886622587>



Abbildung 14: Steinzeugrohre, gebrannt und glasiert auf einem Herdwagen³⁹

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften verleihen den Steinzeugrohren hohe Festigkeit, Dichte und Härte, verbunden mit hoher Verschleiß- und Korrosionsfestigkeit sowie eine außerordentlich lange Lebensdauer.

5.2 Feuerfestkeramik

Ein Viertel der in Deutschland tätigen Feuerfestindustrie befand sich 2005 in Nordrhein-Westfalen. In den 25 Betrieben wurden insgesamt 2.200 Erwerbstätige beschäftigt.⁴⁰ Es ist anzunehmen, dass diese Zahlen in den letzten Jahren rückläufig sind. Im Bereich der Feuerfestkeramik hat es in den letzten Jahrzehnten eine deutliche Veränderung gegeben. Einerseits ist vor allem in der Stahlindustrie, die mit ca. 90% der Hauptabnehmer der Feuerfestindustrie ist, die Standzeit der Zustellungen deutlich verbessert und damit der Verbrauch von Feuerfestkeramik pro t Stahl von 50 kg 1990 auf 10 kg heute reduziert worden. Andererseits werden zunehmend ungeformte Erzeugnisse eingesetzt. Darunter versteht man Rohstoff- und Additiv-Mischungen, die vom Hersteller anwendungsspezifisch konfektioniert werden und als Sackware bzw. in Bigpacks ausgeliefert werden. Vor Ort beim Kunden erfolgt dann die Aufbereitung und Zustellung, vergleichbar mit Betonierarbeiten. Trocknung und Sinterung erfolgen durch spezielle Brenner in den zugestellten Aggregaten, wie Tiegel, Pfannen, Rinnen etc.

Ein Beispiel ist

- Dörentrup Feuerfestprodukte GmbH & Co. KG, Lemgoer Straße 9, 32694 Dörentrup

³⁹ Kölner Stadt-Anzeiger, 22.10.2008

⁴⁰ Rohstoffsicherung in Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes NRW, Dezember 2005

Dörentrup ist Lieferant von Feuerfesten Massen für Induktionsöfen. In der Produktion bei Dörentrup werden Rohstoffe aus Silos in einem Mischer nach bestimmten Rezepturen aufbereitet und als Masse verkauft. Es ist also kein hoher Energieeinsatz durch Brennen des Produktes erforderlich. Auf der anderen Seite wird zusätzliche Energie beim Anwender aufgebracht, die in der Bilanz für den Bereich Feuerfestkeramik nicht berücksichtigt wird.

Bei der Herstellung feuerfester Steine ist vor allem der Brand sehr kostenintensiv und gehört neben den Rohstoff- und den Personalkosten zu den Hauptkostenfaktoren.

- Diedier, Duisburg
- Promat High Performance Insulation, Ratingen
- Vesuvius, Borken
- Weerulin, Mülheim
- P-D Refractories GmbH (Dr.C.OTTO), Bochum
- P-D Refractories GmbH (DYKO), Düsseldorf

Der Brand feuerfester Steine erfolgt derzeit nahezu ausschließlich als Stapelbrand, überwiegend in gas- und ölbeheizten Tunnelöfen, Herdwagen- und Haubenöfen. Die Prozessführung der Brennöfen richtet sich dabei nach den wärmetechnisch am ungünstigsten im Stapel positionierten Steinen. Die Gesamtbrennzeit feuerfester Steine, die aus Aufheizphase, Haltezeit bei maximaler Brenntemperatur und Abkühlphase besteht, beträgt deshalb, je nach Brenngut, zwischen 3 Tagen und mehreren Wochen.⁴¹ Die Tabelle 5 zeigt die Brenntemperaturen und den Energiebedarf beim Brand einiger feuerfester Steine.

Tabelle 5: Brenntemperaturen feuerfester Steine und Energiebedarf⁴²

Steinsorte	Brenntemperaturen [°C]	Energiebedarf [kJ/kg]
Schamottesteine	1250 – 1500	ca. 3500
Silikasteine	1420 – 1500	ca. 9000
Al ₂ O ₃ -reiche Steine	1500 – 1800	< 1600 °C ca. 6000
MgO-haltige Steine	1500 – 1800	< 1800 °C ca. 10000

Nicht nur die maximale Brenntemperatur, sondern auch die Länge der gesamten Brennzeit ist für den Energieverbrauch relevant. Gerade bei großformatigen Bauteilen, wie Feuerfesten Steinen, entstehen beim Aufheizen und Abkühlen Temperaturdifferenzen in den Komponenten. Aufgrund der dann unterschiedlichen Thermischen Dehnung in den einzelnen Bereichen, entstehen thermomechanische Spannungen im Brenngut. Überschreiten diese Spannungen die Festigkeit, kommt es zur Rissbildung.

⁴¹ G. Routschka: Taschenbuch Feuerfeste Werkstoffe. Vulkanverlag Essen (2007)

Um große Temperaturdifferenzen und daraus resultierende Spannungen innerhalb der Komponente zu vermeiden, werden in der Praxis häufig extrem lange Brennzeiten gewählt. Um kürzere Brennzeiten zu realisieren müssen die auftretenden Spannungen detailliert untersucht werden. Simulationsrechnungen haben ergeben, dass die kritischen Spannungen beim tonerdereichen Schamottestein in der Aufheizphase im Temperaturbereich von ca. 20 °C bis 450 °C und oberhalb 1050 °C liegen. In der Abkühlphase liegen die kritischen Spannungen im Temperaturbereich von ca. 300 °C bis 100 °C. In den kritischen Bereichen dürfen die Aufheiz- bzw. die Abkühlgeschwindigkeit nicht erhöht werden, in den übrigen Temperaturbereichen ist ein schnelleres Brennen möglich. Die Stärke der Brennhilfsmittelplatte hat einen sehr großen Einfluss auf die Lage und Größe der maximalen Zugspannungen im Stein. Die Platte sollte so dünn wie möglich sein.⁴²

Neben den Herstellern von Massen und Steinen gibt es noch zwei weitere Produzenten in NRW:

- Rath GmbH, 41066 Mönchengladbach, Krefelder Straße 680
Hersteller von Hochtemperaturwolle, eine aus mineralischen Rohstoffen synthetisch hergestellte Anhäufung von Fasern mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern. In der Anwendung können damit Temperaturen bis zu 1650°C gedämmt werden. Durch eine gezielte Kombination chemischer und physikalischer Eigenschaften wirkt die Hochtemperaturwolle besonders energiereduzierend und damit in energieintensiven Prozessen kostensparend.
- Gieß-Technische –Sonderkeramik GmbH & Co. KG, 40549 Düsseldorf, Koppersstr. 29
Hersteller von Keramiktiegeln, insbesondere für Metallschmelzen. Dabei handelt es sich um Tiegel bis etwa 200 mm Höhe vorwiegend aus Al₂O₃ und ZrO₂. Die Herstellung erfolgt mittels Schlickerguss in Gipsformen.

5.3 Technische Keramik

Produkte der technischen Keramik im weitesten Sinne stellen von der Tonnage her gesehen nur einen geringen Teil der keramischen Produkte dar. Allerdings sind sie von der Wertschöpfung und den Wachstumsaussichten an erster Stelle zu nennen. Unter dem Begriff Technische Keramik sollen an dieser Stelle Bauteile verstanden werden die in der Technik zum Einsatz kommen. Dabei sind Feuerfest Werkstoffe hier ausgenommen, da sie gesondert betrachtet werden.

Die Einteilung in Funktions- und Strukturkeramiken ist hilfreich, auch wenn sie gelegentlich willkürlich erscheint. Strukturkeramiken werden aufgrund von mechanischen und thermomechanischen Eigenschaften angewandt. Funktionskeramiken reagieren dagegen auf eine äußere Anregung mit

⁴² T. Funke: Temperatur- und Spannungsberechnungen zur Analyse und Optimierung der Aufheiz- und Abkühlphase beim Brand von Schamottesteinen. Dissertation Universität Duisburg-Essen (2007)

einem umgesetzten Signal. Bekanntestes Beispiel sind Piezokeramiken, die eine mechanische Beanspruchung in ein elektrisches Signal umsetzen, oder auch umgekehrt. Aber auch passive Elemente, wie Widerstände oder Kondensatoren zählen zu Funktionskeramiken.

Hersteller von Funktionskeramik sind in NRW nicht ansässig. Aus diesem Grund wird auf diesen Aspekt der Keramik im Rahmen der Studie nicht eingegangen.

Die Grenzen dieser Einteilung werden sichtbar, wenn man elektrisch isolierende Keramik betrachtet. Isolationskörper müssen zusätzlich auch die mechanische Stabilität gewährleisten und ggf. die Prozesswärme abführen. Für diese Studie werden Isolationskörper der Strukturkeramik zugerechnet.

Unter dem Sammelbegriff Strukturkeramik sind diejenigen keramischen Werkstoffe zusammengefasst, welche hauptsächlich für Bauteile verwendet werden, die mechanische Funktionen erfüllen⁴³. Sie werden vornehmlich im Maschinenbau, in der chemischen Verfahrenstechnik und in der Biotechnik eingesetzt. Der Grund, der für den Einsatz von Strukturkeramiken spricht, ist die Kombination der folgenden Eigenschaften:

- ausgezeichnete Hochtemperaturbeständigkeit/Korrosionsbeständigkeit
- hohe Festigkeit bei hohen Temperaturen
- hohe Härte
- geringe Dichte (wichtig für schnell bewegte Bauteile)
- gute Abrasionsbeständigkeit gegen eine Vielzahl von Medien

Diese Vorteile müssen die Nachteile der Keramiken, wie höhere Herstellkosten und der nur statistisch beschreibbaren mechanischen Eigenschaften aufwiegen. Die vier wichtigsten Vertreter der Strukturkeramiken sind:

- Aluminiumoxid
- Zirkoniumoxid
- Siliciumcarbid
- Siliciumnitrid

Neben diesen, auf synthetischen Rohstoffen basierenden Werkstoffen, sind noch Silicatkeramiken zu nennen, die aus natürlichen Rohstoffen hergestellt werden:

- Porzellan (Hochspannungsisolatoren)
- Steatit (Isolatotionskörper in der Elektrotechnik)
- Cordierit (Katalysatorträger)

⁴³ http://www.nonmet.mat.ethz.ch/education/courses/Materialwissenschaft_1/Downloads_HS_2007/manuscript_chap_4.pdf

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind folgende Produzenten in NRW zu nennen, die ein breites Spektrum abdecken:

- CeramTec-ETEC GmbH, 53797 Lohmar, An der Burg Sülz 17
seit November 2008 eine Tochtergesellschaft der CeramTec GmbH,
ist weltweit einer der bedeutendsten Anbieter von Lösungen für den Verschleiß- und Korrosionsschutz bei Industrieanlagen und von Komponenten für den ballistischen Schutz von Personen und Fahrzeugen auf der Basis von Hochleistungskeramiken.
- CEROBEAR GmbH Ceramic Bearing Technology, 52134 Herzogenrath, Kaiserstrasse 100
ist führend in der Herstellung von Keramikwälzlager und beschreitet völlig neue Wege in der Wälzlagertechnik. Keramikwälzlager sind ein Schlüsselprodukt für Industrien und Prozesse mit höchsten Anforderungen wie z. B. die Halbleiter-, Luft- und Raumfahrtindustrie sowie den Motorsport.
- CoorsTek Mönchengladbach, 41189 Mönchengladbach, Nobelstrasse 6
ist Hersteller von Dichtungen für Pumpen aus Siliciumcarbid (SiC).
- DOCERAM GmbH, 44309 Dortmund, Hesslingsweg 65 - 67
ist Hersteller ingenieurkeramischer Bauteile aus Oxid- und Nitridkeramik im Bereich des Automobil-, Textilmaschinen-, Maschinen- sowie Anlagenbaus von der Klein- bis zur Großserie. Im Bereich der Schweißtechnik steht ein in der keramischen Welt einzigartiges Normalienprogramm für Schweißzentrier-, Positionier- und Passstifte zur Verfügung.
- INMATEC Technologies GmbH, 53359 Rheinbach, Heerstraßenbenden 10
ist Hersteller von keramischem Feedstock. Darunter wird die für den keramischen Spritzguss notwendige Masse, bestehend aus keramischen Pulvern und thermoplastischen Polymeren, verstanden. Die Aufbereitung erfolgt durch beheizbare Scherwalzenextruder.
- LWK-PlasmaCeramic GmbH, 51674 Wiehl, Am Verkehrskreuz 6
stellt Rohe, rotationssymmetrische und auch plattenförmige Bauteile mittels eines speziellen Verfahrens, der Wasser-Plasma-Technik: Ein speziell konzipierter, wasserstabilisierter Plasmapbrenner erhitzt Keramikpulver bis zum Schmelzpunkt und beschießt ein Metallwerkzeug mit den geschmolzenen Partikeln. Diese haften aneinander und erstarren auf dem Werkzeug. Ein weiterer Sinterprozess ist nicht erforderlich.
- M.E. SCHUPP INDUSTRIEKERAMIK GmbH & Co. KG, 52078 Aachen, Neuhausstr. 4 -10
ist Hersteller von Komponenten für den Industrie- und Laborofenbau. Zu den Produkten zählen Platten und Formteilen aus polykristalliner Al₂O₃-Wolle sowie Heizelementen aus Molybdändisilid (MoSi₂).
- Schunk Ingenieurkeramik GmbH, 47877 Willich, Hanns-Martin-Schleyer Straße 5
stellt verschleißfeste Auskleidungen für Rohrleitungen, Hydrozyklone, Förder-, Beschickungs-

und Dosieranlagen her. Für flüssige Umgebungen werden Gleitringe und Lager für Wellendichtungen sowie abrasions- und korrosionsbeanspruchte Pumpenteile gefertigt.

- Schwank GmbH, 50735 Köln, Bremerhavener Straße 43

ist weltweit größte Anbieter von Gas-Infrarot-Hallenheizung. Für diese Anwendung werden von Schwank auch Einsätze aus Keramik für den eigenen Bedarf hergestellt. Rohstoffbasis sind primär Tone, die zu einer plastischen Masse aufbereitet werden. Die Formgebung erfolgt zunächst über einen Extruder und anschließend werden in die Platten die Löcher und das Relief der Oberfläche über einen Pressvorgang eingebracht (Abbildung 15). Nach dem Trocknen erfolgt der Brand in einem Durchschubofen bei 1000° - 1200°C. Abschließend werden die Platten von der Unterseite und den Seiten geschliffen. Dadurch fallen jährliche erhebliche Mengen Schleifstaub an.

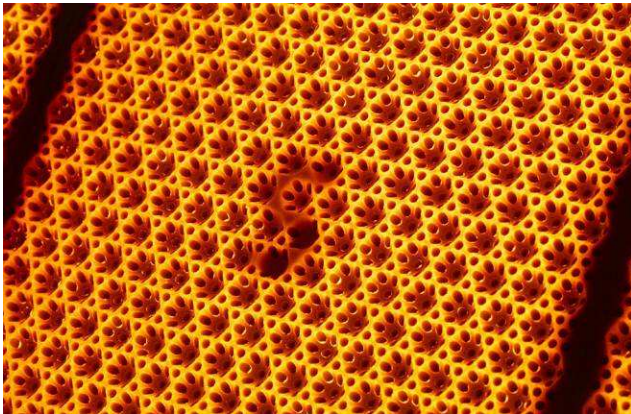


Abbildung 15: Brennerplatte der Schwank GmbH

Diese Auswahl an Firmen zeigt, dass sowohl die Produkte, als auch die Verfahren und die Fertigungstiefe sehr unterschiedlich sind. Dadurch bedingt sind Möglichkeiten der Effizienzsteigerung stets individuell zu betrachten.

6 Potentiale zur Effizienzsteigerung in der Keramikindustrie

In den letzten Jahren wurde zahlreiche Projekte sowohl bei Unternehmen intern, auch im Rahmen öffentlicher Förderung durchgeführt, die zum Ziel hatten Kosten durch Effizienzsteigerung zu reduzieren. Der Fokus lag dabei auf der Reduzierung der Brennkosten. Hier wurde einiges erreicht, aber es besteht noch ein hohes Potential zur Steigerung der Effizienz. Dabei muss die gesamte Prozesskette betrachtet werden: Angefangen bei den Rohstoffen, bis hin zu Reststoffen. Aktuelle Entwicklungsprojekte unterstreichen auch, dass die gesamte Prozesskette optimiert werden muss und nicht nur einzelne Prozessschritte. Hier lassen sich Maßnahmen der prozessbegleitenden Qualitätssicherung gut mit Effizienzmaßnahmen abstimmen.

6.1 Rohstoffe

Wichtige und spezielle Rohstoffe für die Keramikproduktion, angefangen bei Bauxit zur Herstellung von Al_2O_3 , sind in Europa nicht verfügbar. Für Feuerfest und Technische Keramik müssen viele Rohstoffe aus Asien importiert werden. Hier stellen insbesondere steigende Preise für Rohstoffe und Mineralien aus China eine Bedrohung für die Märkte dar.

Das Einsparen von Rohstoffen beginnt bereits bei der Konstruktion. Als Beispiel sei der Hohlziegel genannt. Ein bekanntes Beispiel ist das Produkt POROTON® von Wienerberger (Abbildung 16). Hier stand zwar nicht die Frage der Rohstoffeffizienz im Vordergrund der Entwicklung, sondern die Wärmedämmung des Mauerwerks. Aber dennoch ist der Materialeinsatz nun wesentlich gesenkt worden und das bei einer deutlich verbesserten Produktqualität.

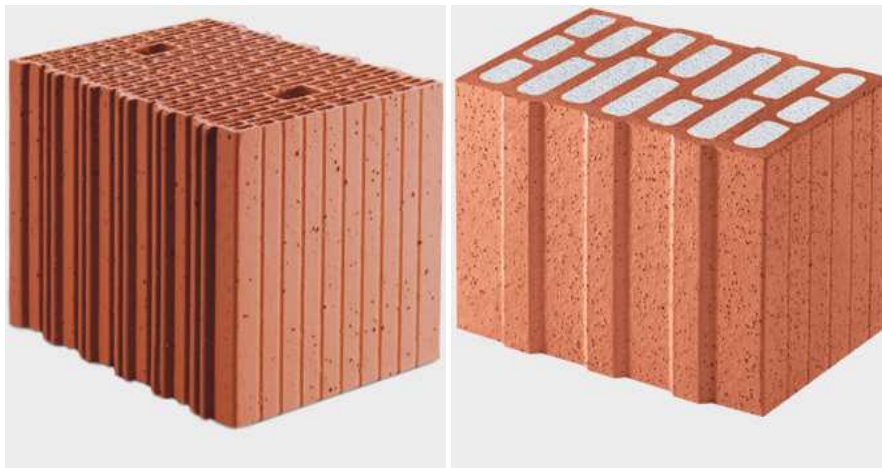


Abbildung 16: Ziegel mit inneren Hohlkammern (links) und mit Isoliermaterial (Perlit oder Mineralwolle) gefüllte Kammern (rechts) ⁴⁴

Aktuelle Entwicklungen in anderen Bereichen der Keramik verfolgen auch bionische Ansätze, das heißt das Bauteil wird ausgehend von der Belastung im Einsatz konstruiert. Dort wo keine hohen Spannungen auftreten wird das Material bis auf Minimum reduziert, wie es auch bei einem Knochen der Fall ist. Dieses Prinzip wurde beispielsweise auf Sinterschalen übertragen (Abbildung 17). Die Formgebung erfolgte hier über den 3D-Druck. Auch in diesem Fall wird das Einsatzverhalten durch die Reduzierung der Masse im Ofen zusätzlich verbessert.

Ein weiterer Aspekt ist die Werkstoffauswahl, da hierdurch wesentliche Kosten des Bauteils bestimmt werden. Es gab in den 1980er Jahren eine sprunghafte Entwicklung der Technischen Keramik, getrieben durch den geplanten Einsatz in der PKW-Gasturbine. Aus dieser Zeit stammen wichtige Forschungsarbeiten zu ZrO_2 und Si_3N_4 . Gleichzeitig gerieten Werkstoffe wie Steatit (Speckstein) „aus der Mode“. Heute wird Steatit wieder sehr häufig für elektrisch isolierende Bauteile, etwa in Haushaltsgeräten, eingesetzt. Durch eine gezielte Weiterentwicklung von Werkstoffen auf Basis natürli-

⁴⁴ <http://www.poroton.org>

cher Rohstoffe, die in Deutschland verfügbar sind, sollte es zukünftig möglich sein, verstärkt auf diese Rohstoffe auch für technische Anwendungen zurückzugreifen. Als Beispiel sei Porzellan genannt. Durch Zugabe von beispielsweise Al_2O_3 konnten die Festigkeiten von ca. 50 MPa auf ca. 200 MPa gesteigert werden.

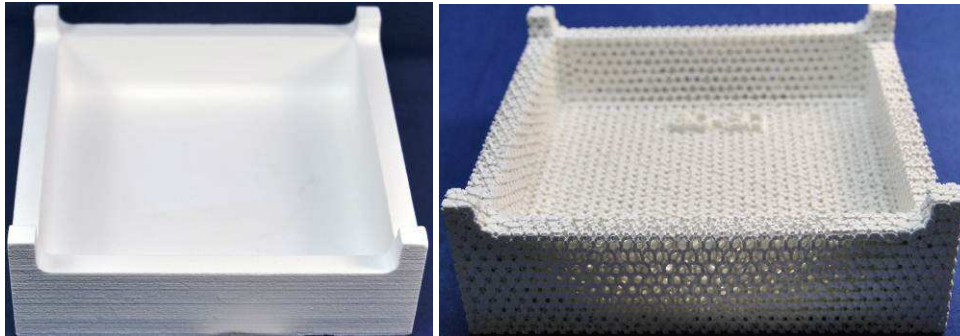


Abbildung 17: Sinterschalen aus Al_2O_3 – konventionelle (links) und optimierte Konstruktion (rechts)⁴⁵

Weitere Möglichkeiten der Reduzierung der Rohstoffkosten sind in der Optimierung der Fertigungsprozesse zu sehen. Jeder Materialverlust muss kritisch überprüft werden. Auch wenn es möglich ist, einiges in die Aufbereitung zurückzuführen, so muss man aber bedenken, dass diese Rohstoffe schon einmal durch die Aufbereitung, evtl. durch die Trocknung oder sogar durch den Brand gegangen sind und damit Energie und Arbeitszeit verbraucht haben. Besonders „teuer“ sind Schleifabfälle aus der Hartbearbeitung. Diese sollten auf ein erforderliches Mindestmaß reduziert werden. Beispielsweise kann durch optimierte Sinterprogramme der Sinterverzug reduziert werden⁴⁶. Dadurch kann die Formgebung näher an der Endkontur erfolgen und der Aufwand der Nachbearbeitung reduziert oder vermieden werden. Auch die Entwicklung generativer Fertigungsverfahren, wie das 3D-Drucken, stellt einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der in der Produktion eingesetzten Rohstoffe dar.

6.2 Energie

Der spezifische Energieverbrauch der Keramikindustrie ist sehr unterschiedlich bei den verschiedenen Produktgruppen. Der niedrigste Verbrauch liegt mit 0,6 MWh/t bei der Ziegelherstellung, das Maximum bei der Herstellung Technischer Keramik mit 14 MWh/t. Damit deckt Keramik das gesamte Spektrum der spezifischen Energieverbräuche zur Werkstoffherstellung ab, das bei 0,6 MWh/t für Elektro-Stahl beginnt und bei >13 MWh/t für Aluminium endet. Das verdeutlicht, dass die Steigerung der Energieeffizienz sehr genau auf die Produktgruppe und den jeweiligen Werkstoff (z.B. Ton oder

⁴⁵ WZR ceramic solutions GmbH

⁴⁶ Abschlussbericht Projekt ENITEC, VDMA Verlag 2003

Si₃N₄) abgestimmt werden muss. Allerdings gibt es zahlreiche Synergieeffekte, die in Zukunft verstärkt genutzt werden sollten.

Tabelle 6: Spezifischer Energieverbrauch für die Herstellung von Werkstoffen, Stand 2008⁴⁷

Werkstoff	Spezifischer Energieverbrauch [MWh/t]
Elektro-Stahl	0,6
Hochofen-Stahl	4,2
Aluminium	> 13
Glas	3,6
Papier	3,2
Zement	1

Nach Angaben des Dachverbands der europäischen Keramikindustrie (Cerame-Unie) sank der Energieaufwand zur Herstellung von Ziegeln für 1 m² Ziegelwand zwischen 1990 und 2007 um 39%. Der Energieverbrauch pro t Fliesen sank um 47% zwischen 1980 und 2003.

Dabei wirken sich hier aber unterschiedliche Ursache aus: Ziegel wurden tendenziell deutlich leichter konstruiert (vergl. Abbildung 16). Durch die Reduzierung der Masse konnte der Energieaufwand bezogen auf die gemauerte Wandfläche reduziert werden. Ob und in welchem Umfang eine Reduzierung bezogen auf die Tonnage erfolgte wird nicht angegeben. Es ist davon auszugehen, dass durch eine Verbesserung der Ofentechnik tatsächlich auch bezogen auf die Masse eine Reduzierung des Energieverbrauchs erfolgte.

Der Energieverbrauch bei der Fliesenherstellung konnte durch Einführung des Schnellbrandes im Rollenofen erreicht werden. Bei dieser Brenntechnik werden die Fliesen ohne Brennunterlagen auf den rotierenden Rollen durch den Ofen gefahren. Es entfällt also auch das Aufheizen von Brennhilfsmitteln.

Der Sinterprozess der Technischen Keramik wird sehr häufig aufgrund der geringen Bauteilgröße in elektrisch beheizten Öfen durchgeführt, während in der übrigen Keramikindustrie vorwiegend mit Gas gebrannt wird, was deutlich wirtschaftlicher ist.

Ansätze zur Reduzierung des Energieverbrauchs sind:

- Verbesserung des Anteils Brenngut zu Brennhilfsmittel, beispielsweise durch leichtere Brennhilfsmittel.
- Kombination von Entbinderung und Sinterung, um das erneute Aufheizen nach dem Entbindern einzusparen.
- Reduzierung der Sintertemperatur durch Werkstoffentwicklung, beispielsweise kann die Sintertemperatur von Al₂O₃ durch Zugabe von nano-Partikeln um 200 K gesenkt werden.

⁴⁷ Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung: Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie in Deutschland. Forschungsprojekt im Auftrag des Verbands der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft (VIK), 2010

- Vermeidung von Ausschuss, durch prozessbegleitende Qualitätssicherung.
- Verkürzung der Brennzeiten, durch bessere Untersuchung des Sinterprozesses. Erste Ansätze dazu wurden im Projekt ENITEC⁴⁸ erarbeitet.

Neben dem Energieverbrauch beim Trocknen, Entbindern und Sintern sind auch die Verbräuche in den übrigen Fertigungsschritten zu optimieren: Mahlen, Mischen, Formgebung, Bearbeitung. Nicht zu vernachlässigen ist auch der Stromverbrauch beim Einsatz von Pressluft.

Investitionen in eine neue, verbesserte Ofentechnik sind mit hohen Kosten verbunden. Aus diesem Grund sind Maßnahmen zu bevorzugen, die zu einer Energieeinsparung mit den vorhandenen Aggregaten führen, oder nur teilweise Veränderungen – wie etwa neue Brenner – erfordern. Eine sehr gute Möglichkeit ist die Einführung leichterer Brennhilfsmittel, die sich unmittelbar als Energieeffizient erweisen, da weniger Masse pro Brand aufgeheizt werden muss, und dadurch eine Energieeinsparung bis >40% möglich ist.

6.3 Reststoffe

In der keramischen Produktion fallen unterschiedliche Reststoffe an, wie z.B.:

- Bruch nach dem Brand
- Schleifabfälle
- Formstoffe (Gips, Stahl)
- Glasurreste

Nach dem Gebrauch können keramische Bauteile nur sehr begrenzt wieder verwendet werden. Während Gläser und Metall durch Einschmelzen erneut in die Produktion zurückgeführt werden können, ist das bei Keramik nicht der Fall. Durch den Sinterprozess werden die Rohstoffe einer nicht reversiblen Veränderung unterworfen, von Kornwachstum bis zur Bildung neuer Phasen reicht. In Grenzen ist es möglich Bruch und Material aus dem Einsatz aufzumahlen und Rohstoffmischungen wieder zu zuführen.

Keramikbruch und Gipsformen werden als sekundärer Zusatzstoff im Straßenbau genutzt. 20% des Ausbruchs Feuerfester Werkstoffe kann zerkleinert und als Grobkorn wiederverwendet werden, 27 % werden z.B. für den Straßenbau genutzt, lediglich 18% bleiben als unbrauchbarer Abfall zurück⁴⁹. Allerdings lösen sich die restlichen 35% der Feuerfest Keramik in der Anwendung auf, d.h. sie wird z.B. als Schlacke ebenfalls entsorgt.

Bei näherer Betrachtung verschiedener Produktionen ist festzustellen, dass erhebliche Mengen Schleifstaub anfallen. Als ein Beispiel sei auf die Fertigung von Zahnersatz aus ZrO₂ mittels Bearbei-

⁴⁸ Abschlussbericht Projekt ENITEC, VDMA Verlag 2003

⁴⁹ Ceram-Unie: Unser Weg ins Jahr 2050 – Fahrplan der Keramikindustrie.

tung hingewiesen. Hierzu werden isostatisch oder uniaxial gepresste und vorgesinterte Halbzeuge eingesetzt, aus denen die Kronen gefräst und abschließend gebrannt werden (Abbildung 18). Auch bei optimaler Nutzung der Halbzeuge, werden lediglich bis zu 10 % des Materials effektiv genutzt. Der Rest wird entsorgt. Nach Angaben der Fa. Metoxit⁵⁰, der in der Schweiz ansässige, führende Lieferant von Halbzeugen, werden heute weltweit etwa 150 bis 200 t ZrO₂ für vorgesinterte Dentale Anwendungen produziert. Hieraus entstehen etwa 10% Produkte, somit fallen 135 bis 180 t hochreines ZrO₂ als Abfall an, bei einem Rohstoffpreis von ca. 100 €/kg. Jährlich werden also hochwertige Rohstoffe im Wert von 13,5 bis 18 Mio. € in der Dentalindustrie weltweit vernichtet. Bisher gibt es keine Bemühungen, diese Schleifabfälle zu sammeln und einer Verwendung zuzuführen.



Abbildung 18: Dentalkeramik Fertigung durch Fräsen⁵¹

7 Ausblick

Obwohl Keramik der älteste Werkstoff der Menschheit ist, hat sich ihre Bedeutung insbesondere für technische Anwendungen in den letzten Jahrzehnten deutlich verändert. Allerdings sind viele Bauteile für den Endverbraucher nicht sichtbar, da sie Bestandteil komplexer Komponenten sind. Dadurch wird der Werkstoff Keramik in der Öffentlichkeit auch heute noch eher mit Ziegel, Fliesen und Sanitär in Verbindung gebracht. Doch während die „traditionellen“ Keramiken in den letzten Jahren einen Anpassungsprozess mit erheblichem Stellenabbau erlebt haben, verzeichnen die „modernen“ Keramiken ein deutliches Wachstum.

Um sowohl in der Produktionstechnik, als auch in der Werkstoffentwicklung weiterhin eine führende Rolle einzunehmen, muss die gesamte Keramikindustrie alle Potentiale der Effizienzsteigerung und die sich bietenden Synergieeffekte zwischen den einzelnen Produktgruppen nutzen. Die Potenziale der Effizienzsteigerung liegen für die keramische Industrie bei weitem nicht nur in der Reduzierung

⁵⁰ Persönliche Mitteilung des CEO der Metoxit AG

⁵¹ <http://www.zahntechnik-blank.de/fraeszentrum.html>

der Energiekosten für den Brand. Entlang der gesamten Prozesskette müssen alle Stufen der Fertigung intensiv bewertet werden. Ziel der optimierten Fertigungsprozesse muss es sein:

- Konstruktive Optimierung von Bauteilen zur Reduzierung der Masse (Leichtbau)
- Verstärkter Einsatz heimischer Rohstoffe auch für technische Anwendungen
- Ausschuss in jedem Prozessschritt noch weiter zu reduzieren
- Verschleißminimierung bei der Formgebung
- Einsatz alternativer Formwerkstoffe
- Verstärkter Einsatz generativer Fertigungsverfahren
- Verkürzung der Trocknungs-, Entbinderungs- und Brennzeiten
- Zusammenführung von einzelnen Thermischen Behandlungen
- Einsatz leichter Brennhilfsmittel
- Nacharbeit zu vermeiden durch endkonturnahe Formgebung und Verzug freies Sintern.

Um diese Maßnahmen einzuleiten ist ein verstärkter und moderierter Dialog der Keramikindustrie über die Grenzen der Produktgruppen hinweg notwendig.

Projekte mit diesem Ziel auf europäischer Ebene können als gescheitert betrachtet werden, da sie von Forschungsinstituten und Verbänden angestoßen wurden, aber keine überzeugende Resonanz in der Industrie gefunden haben. Netzwerke, wie das „Branchenkonzept Keramik“ im Effizienznetz des Landes Rheinland-Pfalz, sind ein vielversprechender Ansatz, wenn es gelingt einen Dialog zwischen den Unternehmen herzustellen. Dazu sind aber eine intensive Moderation und Vernetzung der Betriebe untereinander und das Aufzeigen von Synergieeffekten notwendig. Darüber hinaus sollten die Ergebnisse aus Projekten verbreitet werden, um so zu einer rascheren Umsetzung beizutragen.

Ein wichtiger Schwerpunkt der Vernetzung der Keramischen Industrie in NRW sollte die Steigerung der Materialeffizienz, insbesondere über die einzelnen Betriebe hinaus sein. Beispielsweise könnte die Aufbereitung der Schleifabfälle aus der Dentalkeramik zu einer Verwendung als Rohstoff in anderen Produkten führen. Auch der Einsatz von Gips in der Formgebung bei unterschiedlichen Prozessen (Pressen von Dachziegeln, Rollen von Blumentöpfen, Gießen von Tiegeln) gibt branchenübergreifend Potential für die Entwicklung alternativer Formgebungsverfahren.

Die Erhebung von Zahlen zur Beurteilung der Effizienz in der Fertigung wurde nur von wenigen Firmen unterstützt. Auch hier wird ein Netzwerk die notwendige Vertrauensbasis verbessern und so mehr Firmen für eine offene Diskussion zugänglich machen.