

## Mineralische Rohstoffe in der Ziegelindustrie – Wichtige Parameter in der täglichen Praxis des Geowissenschaftlers (Teil 2)

(erschienen: Ziegelindustrie International ZI – 12/2001)

Dr. Thomas Hatzl, D-München; Dr. Peer-L. Gehlken, D-Ebergötzen

### Einleitung

Aufgrund der steigenden Qualitätsanforderungen in der Ziegelproduktion werden die Anforderungen an die Rohstoffe immer größer. Für eine kontinuierliche und störungsfreie Ziegelproduktion ist eine gleichbleibende Qualität der verwendeten Rohstoffe ein Muss. In der täglichen Routinekontrolle sollten einige, bei jedem Rohstoff individuell bestimmbare, Parameter untersucht werden. Im folgenden werden diese Kontrollparameter, anhand gewonnener Erfahrungen in der Praxis, erläutert. Teil 2 wird anhand zweier Proben die praktische Anwendung darstellen und die generelle Darstellung des Teils 1 (ZI Ziegelindustrie International 11/2001) ergänzen und präzisieren. Einige Analyseverfahren werden zum Vergleich der Rohstoffe für beide Proben und andere nur für jeweils eine der Proben aufgeführt.

### Probenbeschreibung

Als Beispiele typischer Untersuchungen zur Rohstoffkontrolle sollen nachfolgend zwei Proben aufgeführt werden. Bei der **Probe 1** handelt es sich um einen gelbgrauen, karbonatfreien Ton aus den Triasschichten des südwestlichen Harzvorlandes und bei der **Probe 2** um einen stark karbonathaltigen Ton aus Schichten der Oberen Süßwassermolasse des Bayerischen Tertiärhügellandes (Probe 2 wurde von der Firma „Büro für Geotechnik und Umweltfragen GbR“ aus D-85386 Eching zur Verfügung gestellt).

Anhand der Untersuchungsergebnisse sollen wesentliche Parameter für eine Beurteilung dieser Rohstoffe zur Verwendung in der Ziegelindustrie beschrieben werden.

Als erstes bietet bereits die makroskopische Charakterisierung (Farbe, Geruch, Korngröße, Bildsamkeit, Erkennung einzelner Mineralphasenpartikel, Salzsäuretest) erste Hinweise auf die Zusammensetzung der Proben.

Probe 2 zeigt beispielsweise eine Graufärbung mit geringem bräunlichem Einschlag (Eisenoxidgehalte sind kaum zu erwarten), beim Salzsäuretest eine deutliche Reaktion (hohe Karbonatgehalte sind zu erwarten), im bergfeuchten Zustand eine nur mäßige Bildsamkeit und mit bloßem Auge sind Glimmerpartikel zu erkennen (vgl. Tabelle 1a).

Probe 1 deutet mit ihrer intensiven Gelbfärbung hingegen einen höheren Eisenoxidgehalt an und der Salzsäuretest bleibt ohne Reaktion (Karbonate fehlen).

### Analytik

#### Mineralogische Zusammensetzung

Die Erfassung der stofflichen Zusammensetzung (Mineralphasen, amorphe Komponenten und Organik) erfolgt direkt mittels der Methodenkombination aus Röntgenbeugung und Infrarotspektroskopie (vgl. Tabellen 1a und 1b).

In den hier ausgewählten Rohstoffproben 1 und 2 sind dabei folgende Zusammensetzungen erfasst worden (Tabelle 1a und 1b):

**Probe 1:** Illit/dioktaedrischer Glimmer (ca. 40 %) + Kaolinit-D (ca. 19 %) + Quarz (ca. 17 %) + Illit-Smektit-Wechselagerungsminerale (ca. 12 %) + Chlorit-Vermikulit-Wechselagerungsminerale (ca. 7 %) + Goethit (ca. 3 %). Akzessorisch sind Albit und Kalifeldspat enthalten.

Die tonmineralogischen Eigenschaften dieser Probe werden daher in erster Linie von den Illiten/dioktaedrischen Glimmern und den fehlgeordneten Kaoliniten (Kaolinit-D) geprägt.

Bei den Kaoliniten (Kaolinit-D) handelt es sich um innerkristallin nicht quellfähige Zweischichtminerale und bei den Illiten/dioktaedrischen Glimmern um innerkristallin nicht quellfähige Dreischichtminerale.

Darüber hinaus weist die Probe 1 beträchtliche Anteile an unregelmäßigen Wechselagerungsmineralen (Illit-Smektit und Chlorit-Vermikulit) auf. Im Gegensatz zu den Illit-Smektit-Wechselagerungen, die insbesondere in den < 2 µm-Fractionen angereichert sind (s. Tabelle 1b), quellen die Chlorit-Vermikulit-Wechselagerungen nicht durch den Einbau organischer

Moleküle (z.B. Glykol/Glycerin; Solvationstests) auf. Der Gesamttonmineralgehalt (= Tonminerale im engeren Sinne und generell Schichtsilikate) liegt hier bei ca. 78 Prozent.

**Probe 2:** Illit/dioktaedrischer Glimmer/Serizit (ca. 27 %) + dioktaedrischer Smektit (ca. 15 %) + Quarz (12 %) + Calcit (ca. 15 %) + Dolomit (ca. 13 %) + Chlorit (ca. 9 %) + Kaolinit-D (ca. 3 %) + Illit-Smektit-Wechselagerungsminerale (ca. 2 %) + Albit (ca. 2 %). Akzessorisch sind Kalifeldspat und Goethit enthalten.

In der Probe 2 treten als Haupttonminerale dioktaedrische Serizite und dioktaedrische Smektite auf. Bei den Smektiten handelt es sich um innerkristallin quellfähige Dreischichtminerale (Solvationstests mit Glycerin). Die tonmineralogischen Eigenschaften dieser Probe werden daher in erster Linie von den dioktaedrischen Seriziten und den dioktaedrischen Smektiten geprägt.

Als weitere Schichtsilikate liegen in dieser Probe Chlorite (innerkristallin nicht quellfähige Dreischichtminerale mit Hydroxid-Zwischenschicht - sogenannte Vierschichtminerale), geringe Anteile an fehlgeordneten Kaoliniten (Kaolinit-D) und unregelmäßigen Illit-Smektit-Wechselagerungen vor. Der „Gesamttonmineralgehalt“ (= Tonminerale im engeren Sinne und generell Schichtsilikate) liegt hier bei ca. 56 Prozent.

**Tabelle 1a: Mineralbestand der Gesamtproben (Angabe in Gewichtsprozent)**

Probe	Σ TM	Il./Gl.	Illit-Sm.	Smektit	Kaol.-D	Chlorit	Chl.-V.	Quarz	Albit	Kfsp.	Calcit	Dolomit	Goethit
1	78	40	12	n.n.	19	n.n.	7	17	< 1	1	n.n.	n.n.	3
2	56	27	2	15	3	9	n.n.	12	2	1	15	13	1

(Röntgendiffraktometrisch und infrarotspektroskopisch ermittelter Mineralbestand; Σ TM = Summe Tonminerale/Phyllosilikate; Il./Gl. = Illit/dioktaedrischer Glimmer (Probe 1), Illit/dioktaedrischer Glimmer/Serizit (Probe 2); Illit-Sm. = unregelmäßige Illit-Smektit-Wechselagerungen; Kaol.-D = Kaolinit-D; Chl.-V. = unregelmäßige Chlorit-Vermikulit-Wechselagerungen; Kfsp. = Kalifeldspat; n.n. = nicht nachgewiesen; die Analysengenauigkeit liegt bei ca. ± 10 % relativ)

In einigen Untersuchungsabläufen ist es sinnvoll die stoffliche Zusammensetzung unterschiedlicher Korngrößenfraktionen näher zu bestimmen. Für die Probe 1 wurde mittels des kombinierten Zentrifugen/Atterberg-Verfahrens die Fraktion kleiner 2 Mikrometer gewonnen und separat mittels Röntgenbeugung und Infrarotspektroskopie untersucht (Tab. 1b). Es lassen sich in Kombination mit den Ergebnissen an der Gesamtprobe folgende Merkmale herausarbeiten (vgl. auch Tabelle 2):

- Tonminerale sind auch in grobkörnigeren Anteilen enthalten.
- vor allem die Illit-Smektit-Wechselagerungsminerale sind in der Fraktion < 2 µm angereichert.
- Quarz ist in der „Tonfraktion“ < 2 µm erheblich reduziert aber noch enthalten.
- Feldspäte sind in der Fraktion < 2 µm nicht vorhanden.

**Tabelle 1b: Mineralbestand der „Tonfraktion“ < 2 µm (Angabe in Gewichtsprozent)**

Probe:	Σ TM	Illit	Illit-Sm	Kaol.-D	Chl.-V.	Quarz	Albit	Kfsp.	Goethit
1	94	35	30	21	8	3	n.n.	n.n.	3

(Röntgendiffraktometrisch und infrarotspektroskopisch ermittelter Mineralbestand; Σ TM = Summe Tonminerale; Illit-Sm. = unregelmäßige Illit-Smektit-Wechselagerungen; Kaol.-D = Kaolinit-D; Chl.-V. = unregelmäßige Chlorit-Vermikulit-Wechselagerungen; Kfsp. = Kalifeldspat; n.n. = nicht nachgewiesen; relativer Fehler von ca. ± 10 %)

**Tabelle 2: Korngrößenverteilung (Gewichtsprozent)**

Probe	< 2 µm	2 - 20 µm	20 - 63 µm	63 - 2000 µm	> 2000 µm
<b>1</b>	40,0	38,6	15,0	6,0	0,4
<b>2a</b>	7,5	39,9	20,2	32,4	0,0
<b>2b</b>	11,7	34,9	21,9	31,5	0,0

(Die Fraktionen < 63 µm wurden mittels Zentrifugen/Atterberg-Verfahren gewonnen; die Fraktionen > 63 µm wurden abgesiebt. Bei der Probe 2 erfolgte die Korngrößenanalyse zum einen ohne und zum anderen mit Vorbehandlung: 2a zeigt die Analysenergebnisse ohne Weglösen der Karbonate; 2b dagegen nach Behandlung der Probe mit 5%-iger Essigsäure – also nach dem Entfernen der Karbonatanteile; in Anlehnung an Tributh 1991 [12]).

Nach Niesper (1958) [1] und Winkler (1954) [2] würde der Rohstoff der Probe 1 allein aufgrund der Korngrößenverteilung in den Dachziegelbereich mit erhöhter Trockenempfindlichkeit und die Probe 2 gerade noch in den Grenzbereich der Gittervollsteine fallen.

Die Ergebnisse der Probe 2 zeigen zusätzlich ein weiteres Problem - das der Bindemittel im Stoffsystem - auf. Die Korngrößenanalyse erfolgte zuerst ohne Weglösen der Karbonatanteile (Ergebnis 2a der Tabelle 2). Dies bedeutet, dass man davon ausgehen muss, dass der Anteil < 2 Mikrometer zu niedrig ausfällt, da zum Teil die Karbonate im Gesamtsystem zu einem „Zementieren“ der silikatischen Tonmineralanteile zu größeren Aggregaten beitragen. Hier müssen daher im Detail die Verwendung und die Aufbereitungsschritte im Ziegelherstellungsprozess betrachtet werden, um eventuell weitere Untersuchungsschritte dieses Rohstoffs abzuklären. Karbonate können sowohl als diskrete Partikel als auch in Form von zementartiger Ausbildung in Kornzwischenräumen auftreten und daher unterschiedliche Effekte bei der Ziegelherstellung besitzen (z.B. in der Reaktivität beim Ziegelbrand). Nach dem Weglösen der Karbonatanteile (Ergebnis 2b der Tabelle 2) wird diese Annahme bestätigt und ein entsprechender Anstieg des Anteils < 2 Mikrometer ist festzustellen.

### Chemische Zusammensetzung

Als weiterer Untersuchungsschritt erfolgte die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels Röntgenfluoreszenzanalytik (RFA).

Die Ergebnisse der RFA (bezogen auf die bei 105 °C getrockneten Proben) sind mit den bei 1050 °C durchgeführten Glühverlustbestimmungen (GV) in der nachfolgenden Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der Proben 1 und 2 (Angabe in Gewichtsprozent für Elementoxide und µg/g für Elemente)**

Element	Einheit	Probe 1	Probe 2
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Gewichtsprozent	52,2	40,5
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Gewichtsprozent	1,00	0,670
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Gewichtsprozent	24,2	13,5
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Gewichtsprozent	8,48	6,12
<b>MnO</b>	Gewichtsprozent	0,060	0,120
<b>MgO</b>	Gewichtsprozent	1,32	4,90
<b>CaO</b>	Gewichtsprozent	0,77	12,1
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	Gewichtsprozent	0,05	0,28
<b>K<sub>2</sub>O</b>	Gewichtsprozent	2,85	2,45
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	Gewichtsprozent	0,184	0,115
<b>S</b>	µg/g	< 100	< 100
<b>As</b>	µg/g	13	26
<b>Ba</b>	µg/g	245	420
<b>Co</b>	µg/g	30	17

<b>Ni</b>	µg/g	90	45
<b>Cr</b>	µg/g	140	85
<b>V</b>	µg/g	154	115
<b>Cu</b>	µg/g	< 3	30
<b>Pb</b>	µg/g	26	18
<b>Zn</b>	µg/g	67	88
<b>Mo</b>	µg/g	< 2	6
<b>Nb</b>	µg/g	10	32
<b>Rb</b>	µg/g	150	111
<b>Sr</b>	µg/g	108	210
<b>Th</b>	µg/g	30	10
<b>U</b>	µg/g	< 2	3
<b>Y</b>	µg/g	33	23
<b>Zr</b>	µg/g	151	130
<b>GV</b>	Gewichtsprozent	8,6	18,7
<b>Summe</b>	Gewichtsprozent	99,8	99,9

(< = kleiner als die praktische Nachweisgrenze der Röntgenfluoreszenzanalyse; GV = Glühverlust).

Zwischen den mineralogischen Zusammensetzungen (Modalbestand) und dem Chemismus der Proben können entsprechende Abhängigkeiten festgestellt werden.

Die **Probe 1** zeigt im Bereich der für die Ziegelherstellung wichtigsten Element- bzw. Elementoxidanteile folgende Charakteristika:

- eine Vormacht an SiO<sub>2</sub>, die aus den hohen Gehalten an Silikatmineralen (Quarz, Tonminerale, Glimmer, etc.) resultiert.
- hohe Anteile an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, die vor allem aus den beträchtlichen Gehalten an Kaolinit-D herzuleiten sind.
- deutliche Gehalte an Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, die sowohl in Form einer selbständigen mineralischen Phase (Goethit) auftreten, als auch im Kristallgitter der Phyllosilikate Illit/Glimmer und hier besonders der Chlorit-Vermikulit-Wechselagerungsminerale eingebaut sind. Die Goethitanteile spielen hier beim Brand des Ziegels eine große Rolle für die Farbe des Ziegelprodukts.
- Träger des K<sub>2</sub>O sind im wesentlichen die Illite/Glimmer, da der Kalifeldspatgehalt der Probe sehr gering ist. Vor allem der Kaliumoxidgehalt der Illite/Glimmer kann beim Brennvorgang als Flussmittel zur frühen Schmelzbildung beitragen. Das K<sub>2</sub>O des Kalifeldspats hat dagegen bei den üblichen Temperaturen des Ziegelbrands keine Bedeutung.
- der niedrige Na<sub>2</sub>O-Anteil korreliert mit dem nur akzessorisch enthaltenen Albit (Natriumfeldspat).
- unter den Spurenelementen ist der geringe Gehalt an Schwefel und Vanadium hervorzuheben. Ausblühungen von Salzen dieser Elemente sind daher am Produkt nicht zu erwarten.
- der Glühverlust von 8,6 Gew.% steht in gutem Einklang mit den ermittelten Tonmineralegehalten. Für den Glühverlust sind hier vor allem die Hydroxylgruppen der Tonminerale verantwortlich.

Die **Probe 2** zeigt im Bereich der für die Ziegelherstellung wichtigsten Element- bzw. Elementoxidanteile folgende Charakteristika:

- eine Vormacht an SiO<sub>2</sub>, die aus den relativ hohen Gehalten an Silikatmineralen (Quarz, Tonminerale, Glimmer, etc.) resultiert. Im Vergleich zur Probe 1 liegt hier ein geringerer Quarz- und Phyllosilikatgehalt vor.
- moderate Anteile an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, die vor allem aus den relativ hohen Phyllosilikatgehalten abzuleiten sind. Diese sind hier aber wesentlich geringer als in der Probe 1 (nur 3 % Kaolinit-D gegenüber 19 % in der Probe 1).

- deutliche Gehalte an  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , die in erster Linie in den Phyllosilikaten Illit/Glimmer/Serizit und insbesondere im Chlorit eingebaut sind. Goethit als eigenständige Fe-Phase ist hier nur untergeordnet zu finden. Daher spielen die Eisenoxide dieser Probe kaum einen färbenden Einfluss auf das Ziegelprodukt.
- die Elementoxidgehalte MgO (4,90 Gew.-%) und CaO (12,1 Gew.-%) sind hier besonders hervorzuheben. CaO ist sowohl in den Karbonatmineralen Calcit und Dolomit als auch im Smektit gebunden, MgO ist hingegen im Dolomit und Chlorit und darüber hinaus in geringeren Anteilen in den Phyllosilikaten Illit/Glimmer/Serizit und Smektit enthalten.
- Träger des  $\text{K}_2\text{O}$  sind im wesentlichen die Illite/Glimmer/Serizite, da der Kalifeldspatgehalt der Probe sehr gering ist. Vor allem der Kaliumoxidgehalt der Illite/Glimmer/Serizite kann beim Brennvorgang als Flussmittel zur frühen Schmelzbildung beitragen.
- Der  $\text{Na}_2\text{O}$ -Anteil korreliert gut mit den nur geringen Albitgehalten (Natriumfeldspat).
- Unter den Spurenelementen ist der geringe Gehalt an Schwefel und Vanadium hervorzuheben. Ausblühungen von Salzen dieser Elemente sind daher am Produkt kaum zu erwarten. Mit den hohen Gehalten an MgO und CaO (Karbonate) stehen die relativ hohen Spurenelementanteile an Barium und Strontium im Einklang.
- der Glühverlust von 18,7 Gew.-% korreliert gut mit den ermittelten Karbonat- und Tonmineralgehalten. Die  $\text{CO}_2$ -Anteile der Karbonate und die Hydroxylgruppen der Tonminerale sind hier vor allem für den Glühverlust verantwortlich.

### Thermisches Verhalten

Die bisherigen Untersuchungen und die daraus abgeleiteten Ergebnisse lassen sich nun anhand des Verhaltens der Proben mittels Simultanthermoanalytik (STA) und Dilatometrie weiter im Detail beschreiben. Beispielhaft soll hier die STA und Dilatometrie für die **Probe 2** kurz dargestellt und daraus die wichtigsten Charakteristika zum Verhalten des Rohstoffs beim Brand abgeleitet werden.

In der STA (Bild 1) treten bei 100 °C und bei 180 - 200 °C die für tonmineralhaltige Phasengemenge typischen endothermen Reaktionen der Abgabe von adsorptiv gebundenem Wasser und Zwischenschichtwasser auf (2,5 % bis 200 °C). Die STA zeigt, dass es sich bei der Probe um einen Ton mit überwiegendem Anteil an Dreischichtmineralen handelt (geringe Abgabe von OH-Gruppen im Bereich zwischen ca. 450 °C und 570 °C, d.h. eine kleine endotherme Reaktion mit geringem Gewichtsverlust).

Die endotherme Reaktion der Umwandlung des Quarzes von seiner Tief- zur Hochtemperaturform bei 573 °C kann kaum festgestellt werden, da der Quarzanteil dieses Tones relativ gering ausfällt.

Die zwei sehr kleinen endothermen Reaktionen bei ca. 400 °C und bei ca. 850 °C weisen auf Anteile des Tonminerals Chlorit hin.

Ab 750 °C erfolgt in einer deutlichen endothermen Reaktion (Gewichtsverlust von ca. 12 %) die Abspaltung von  $\text{CO}_2$  aus den enthaltenen Erdalkalikarbonaten (Calcit und Dolomit). An der exothermen Reaktion bei ca. 900 °C zeigt sich sehr deutlich die ausgeprägte Bildung neuer Silikate (vgl. auch DSA).

Die Dilatometrie zeigt im Temperaturbereich um 180°C und 220°C kleine Ausdehnungsanomalien, d.h. die normale Wärmedehnung wird deutlich durch Schwindungsvorgänge reduziert. Diese werden hier vermutlich durch Bestandteile von Smektit, Illit und Illit-Smektit-Wechselagerungsmineralen hervorgerufen. Diese Reaktionen sind aber nicht besonders stark ausgeprägt, so dass nicht mit einer erhöhten Trockenempfindlichkeit gerechnet werden muss. Ab ca. 250 °C bis ca. 550°C zeigt sich dann ein recht gleichmäßiges Ausdehnungsverhalten (ca. 0,2 % je ca. 200 °C). Ab ca. 570 °C bis ca. 600 °C belegt die Dilatometerkurve einen beschleunigten Anstieg des Dehnungsverhaltens (ca. 0,2 % je 30-50 °C). Ursache dafür dürfte die Umwandlung des enthaltenen Quarzes (gering ausgeprägt) von seiner Tief- zur Hochtemperaturmodifikation („Quarzsprung“) darstellen. Unter den Dreischichtmineralen überwiegt das Tonmineral Serizit, da die Dehnungskurve nach 600 °C relativ steil bis zu ca. 820 °C ansteigt

und danach - oberhalb von 850 °C - starke Schwindungserscheinungen aufweist. Diese werden durch den Zerfall der Dreischichtminerale und eventuell auftretende erste eutektische Schmelzen hervorgerufen.

Ab ca. 900-950 °C wird diese rapide Schwindung gestoppt und geht in eine geringe Dehnung über. Diese Reaktion ist typisch für Tone mit höheren Anteilen an Erdalkal karbonaten (Calcit und Dolomit) und wird vermutlich durch die Bildung neuer Silikate wie z.B. Gehlenit, Wollastonit und Anorthit hervorgerufen. Die relative Gesamtlängenänderung bis ca. 850 °C beträgt bei dieser Probe ca. 0,85 Prozent.

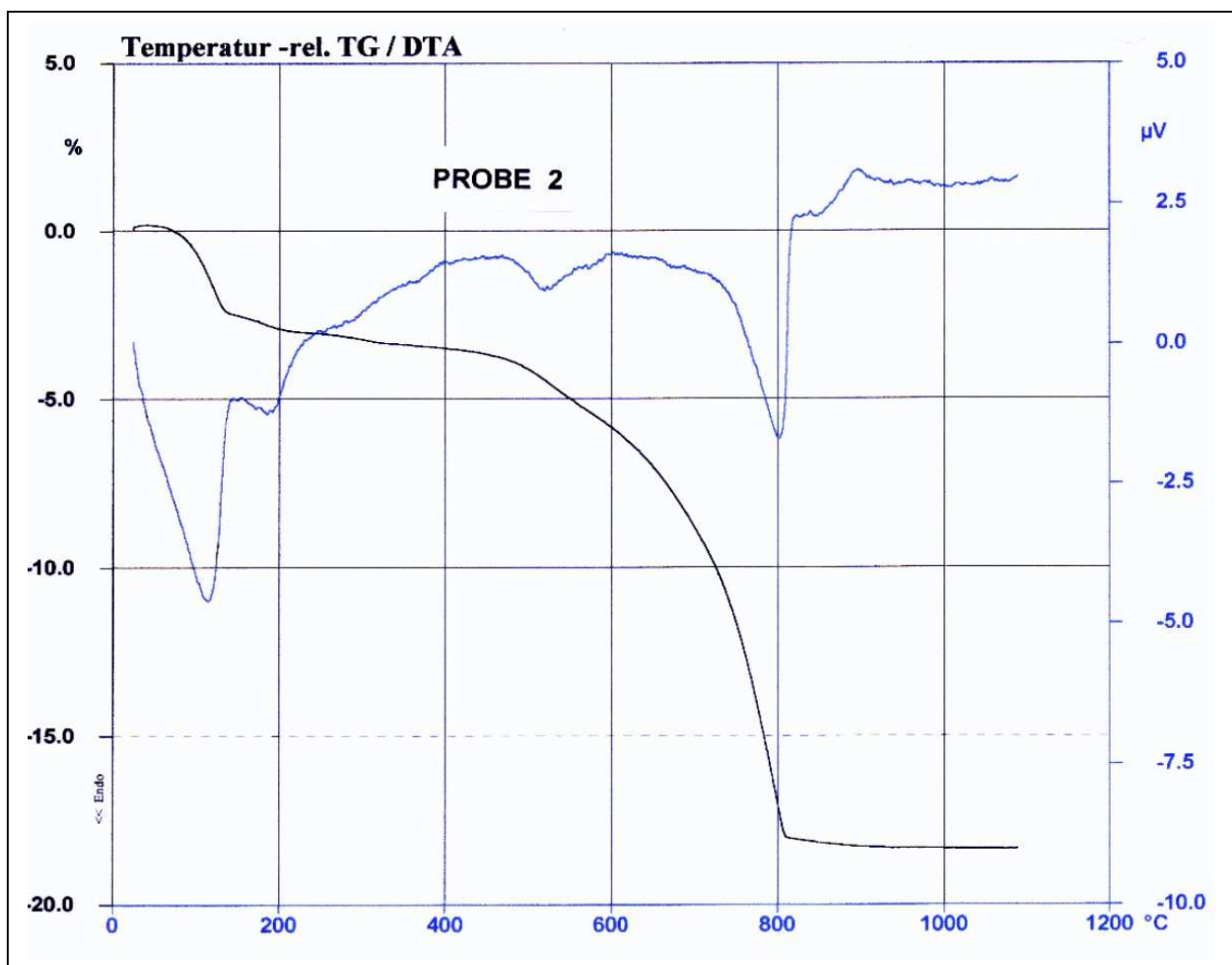


Bild 1: Thermogravimetrie (linke y-Achse, schwarze Kurve) bzw. Differenzthermoanalyse (rechte y-Achse, blaue Kurve) der Probe 2.

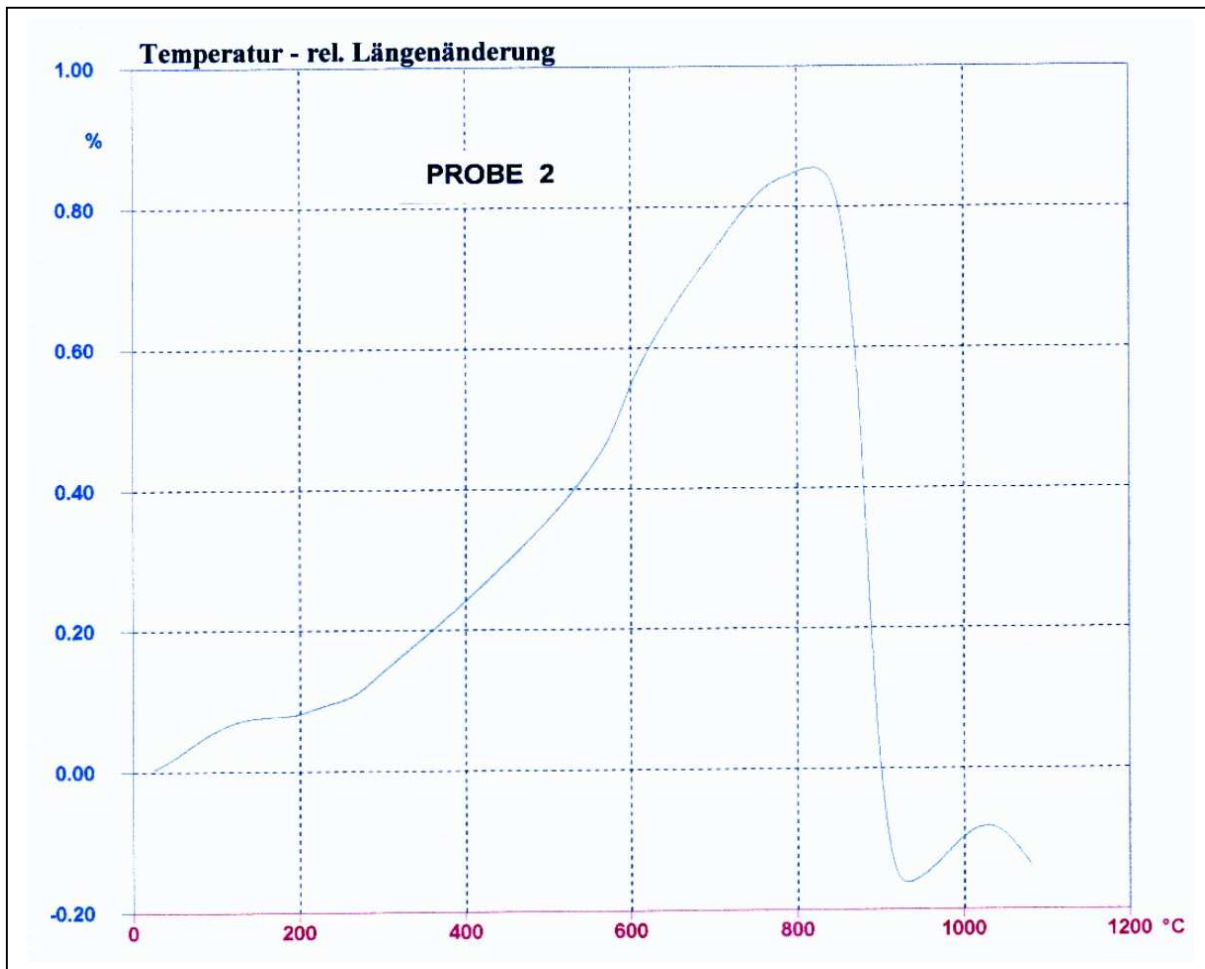


Bild 2: Dilatometeranalyse der Probe 2. Relative Längenänderung in Prozent in Abhängigkeit der Temperatur.

Bei der **Probe 2** handelt sich demnach um einen hellrotbrennenden Ton mit höheren Calcit- und Dolomitanteilen und überwiegendem Anteil an Dreischichtmineralen (hier besonders Serizit). Bedingt durch die innerhalb der Tonminerale recht grobkörnigen Schichtsilikate sowie durch die größere Menge an unbildsamen Erdalkal karbonaten kann man von einer nicht übermäßig hohen Bildsamkeit, einer nicht sehr hohen Trockenbruchfestigkeit, dafür aber auch von einem relativ problemlosen Trockenverhalten ausgehen. In der Aufheizphase und Abkühlphase dürften aufgrund des relativ niedrigen Quarzgehaltes innerhalb der Temperaturspanne der Quarzumwandlung keine Probleme auftreten.

Während des Brandes erfolgen mehrere Gasabgaben ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ), die zum Teil bei höheren Temperaturen stattfinden. Dies ist besonders bei der Herstellung glasierter Produkte in der Brennkurve bzw. der Glasurzusammensetzung zu beachten, da hierdurch Nadelstiche und Glasurblasen entstehen können. Der durch die Mineralzusammensetzung bedingte hohe Gehalt an Flussmitteloxiden (v. a.  $K_2O$ ,  $CaO$  und  $MgO$ ) sorgen für eine frühe (ab ca.  $950\text{ }^\circ\text{C}$ ) Verfestigung des Scherbens durch Silikatbildung (frühe Schmelzphasenbildung bei niedriger Viskosität).

Durch den vorangehenden Gasaustritt und die noch nicht stattfindende nasse Sinterung (mit Schmelzphase) wird der Scherben vermutlich bis ca.  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  eine hohe Wasseraufnahme und eine hohe Porosität (geringe Rohdichte) aufweisen.

Die **Probe 2** müsste demnach ab ca. 1050 °C eine geringe Feuerstandsfestigkeit und ein kleines Brennintervall zeigen (kleine Temperaturdifferenz bewirkt starke Veränderungen in der Wasseraufnahme / Porosität).

Insgesamt lässt sich aus den oben gezeigten Untersuchungsergebnissen ableiten, dass dieser Rohstoff der Probe 2 zur Herstellung dicht gebrannter Produkte wie z.B. Klinker nur bedingt geeignet ist. Für Hintermauerziegel kann das Material dagegen Verwendung finden.

### **Literatur (Teil 1 und Teil 2)**

[1] Niesper, A. A.: „Über das Trocknen von Ziegeltonen“, 153 S., Dissertation – ETH – Zürich, 1958.

[2] Winkler, H. G. F.: „Bedeutung der Korngrößenverteilung und des Mineralbestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse, Ber. Dt. Keram. Ges., 31, 337-343, Bonn, 1954.

[3] Jasmund, K. und Lagally, G. (Hrsg.): „Tonminerale und Tone“, 490 S., Steinkopf-Verlag Darmstadt, 1993.

[4] Hirner, A. V., Rehage, H. und Sulkowski, M.: „Umweltgeochemie“, 836 S., Steinkopf-Verlag Darmstadt, 2000.

[5] Hiltmann, W. und Stribrny, B. (Hrsg.): „Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten“, BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bd. 5, 297 S., Springer-Verlag Heidelberg, 1998.

[6] Köster, H. M.: Kritische Bemerkungen zu Methoden der quantitativen Analyse von Tonmineralen. In: Quantitative Tonmineralanalyse, Beiträge zur Jahrestagung, Trier 18.-21.9.1997, J.-F. Wagner (Hrsg.), Ber. Dt. Ton- und Tonmineralgruppe e.V., 5, 24-30, 1997.

[7] Gehlken, P.-L. und Krakow L.: Schadensanalyse an Ziegelerzeugnissen mit Infrarotspektroskopie (FTIR)“, ZI-Jahrbuch, S. 41-53, Bauverlag, 2000.

[8] Bender, W. und Händle, F. (Hrsg.): „Handbuch für die Ziegelindustrie“, Bauverlag GmbH – Wiesbaden/Berlin, 832 S., 1982.

[9] Schmidt, H.: Neuere Erkenntnisse über den Einfluss des Mineralbestandes auf die stofflichen Eigenschaften von grobkeramischen Massen und Erzeugnissen, Fortschr. Mineral., 59, 227-266, Stuttgart, 1981.

[10] Gehlken, P.-L.: Quantitative Phasenanalyse sedimentärer Minerale unter Berücksichtigung ihrer kristallchemischen Zusammensetzung. In: Quantitative Tonmineralanalyse, Beiträge zur Jahrestagung, Trier 18.-21.9.1997, J.-F. Wagner (Hrsg.), Ber. Dt. Ton- und Tonmineralgruppe e.V., 5, 14-23, 1997.

[11] Hatzl, T. und Gehlken, P.-L.: Mineralische Rohstoffe in der Ziegelindustrie – Wichtige Parameter in der täglichen Praxis des Geowissenschaftlers (Teil 1). ZI, 11, in Druck, 2001.

[12] Tributh, H.: Notwendigkeit und Vorteile der Aufbereitung von Boden- und Lagerstättentonen (Kurzfassung). In: Identifizierung und Charakterisierung von Tonmineralen, Tagung der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe, Gießen und Schloß Rauischholzhausen 10.-12.5.1989, H. Tributh und G. Lagaly (Hrsg.), Ber. Dt. Ton- und Tonmineralgruppe e.V., 1, 29-35, 1991.