

13 Ziegel

13.1 Allgemein

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über Herstellung und Eigenschaften von Ziegeln geben, die für einen Einsatz bei Backöfen in Frage kommen, d.h. von Vollziegeln bzw. Platten in handelsüblichen Abmessungen.

Von der Verwendung gebrauchter oder längere Zeit der Witterung ausgesetzter Ziegel wird abgeraten; Ziegel altern nicht nur durch thermische Beanspruchung, vor allem durch Feuchte und Frost; so verloren laut (17.58) Silicasteine innerhalb eines Jahres bei Außenlagerung 39 % ihrer Festigkeit, bei Schamotte-Steinen betrug die Minderung *nur* 28%.

Vollziegel, handgeschlagen, gibt es sprichwörtlich seit Ur-Zeiten. Man betrachte hier die schönen Ziegel mit Herstellerkennzeichnung im Deutschen Museum aus der Stadt Ur im alten Mesopotamien ca. 2400 Jahre vor unserer Zeitrechnung.

Die dortige relativ gut erhaltene Tempelanlage Zikkurat des Mondgottes Nanna wurde bereits vor 6000 Jahren begonnen und stetig erweitert. Während für den inneren Teil ungebrannte Ziegel als Füllmaterial verwendet wurden, besteht die Stützmauer, also die äußere Wand, aus gebrannten Ziegeln.

Dass aber handgeschlagene Ziegel in ihrer Qualität hochwertiger seien als maschinell hergestellte, kann aus der Literatur nicht herausgelesen werden, eher ist das Gegenteil der Fall. Plausibel erscheint mir, dass die manuelle Herstellung mit einer entsprechend einfachen Vorbereitung der Rohmasse einhergeht. Voraussetzung für einen spannungsarmen und festen Ziegel ist aber die Herstellung eines homogenen und veredelten Vorproduktes, was sich von Hand nur mit äußerstem Kraftaufwand bewerkstelligen lässt. Ferner bedarf es einer genauen Temperaturführung während des Brennvorgangs.

Vollziegel können in einer Streichmaschine hergestellt werden, was technisch weniger aufwendig ist. In der Quelle (17.61) ist eine Angabe aus dem Jahre 1948 zu finden, nach der eine Maschine bis zu 15.000 Ziegel pro Stunde herstellen konnte - den dazugehörigen aufwendigen Aufbereitungspark für den Rohstoff und die Brennerei vorausgesetzt.

13.2 Rohstoff

Als Rohstoff für Ziegel aller Art dient Ton - ein Mineralgemisch, welches aus Feldspat-haltigem Gestein über Jahrmillionen unter besonderen Verwitterungsbedingungen (Temperatur, Druck und Feuchtigkeit) entstanden ist. 60 % der Minerale in der Erdkruste bestehen aus Feldspaten, so z.B. Granit und Gneis aus Feldspat, Quarz und Glimmer.

Feldspat, das ist eine Verbindung von Kalium oder Natrium mit natürlichen Silikaten, den Verbindungen des Siliciumdioxids.

Das Siliciumdioxid SiO_2 , kommt in kristalliner Form vor, z.B. als Quarz oder Sand, sowie in amorpher Form, z.B. als Kieselgur. In kristalliner Form ist Siliciumdioxid reaktionsträge, amorph aber reagiert es leichter, z.B. mit der Tonerde, dem wichtigen Partner Aluminiumoxid, Al_2O_3 , den wir schon aus dem vorigen Kapitel kennen. Die chemische Bezeichnung der reinen Form des Kali-Feldspates lautet: $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$.

Die Verwitterung erfolgt unter Wasseraufnahme. Während jedoch die Kaliverbindungen vom Wasser gelöst und weggeschwemmt werden, lagern sich die anderen Stoffe in Sedimenten ab; es entstehen abbauwürdige Ton-Lagerstätten. Besonders reiner Ton ist das Kaolin, auch *Porzellanerde* genannt, dessen Hauptbestandteil das Kaolinit ist: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Dieses edle Material ist aber eher selten.

Ton-Lagerstätten, meist oberirdisch abgebaut, unterscheiden sich erheblich in der

Zusammensetzung des Rohstoffs wie aber auch in der Reinheit und in Bezug auf Einschlüsse von Steinen, was mitbestimmend ist für die Wahl der Verarbeitungsmaschinen.

Calcium- und Magnesium-haltige Tone bezeichnet man als Tonmergel, stark durch Eisenoxid und (feinen) Sand verunreinigte, *abgemagerte* Tone, als Lehm. So spricht man in (17.62) eher von Lehm für die Erzeugung von Mauerziegeln als von Ton.

13.3 Herstellung des Rohprodukts

Ton, jeder hat ihn wohl schon einmal in der Hand gehabt, ein *wohligweiches* Material, das sich leicht formen und durch Brennen erhärten lässt. Dabei handelt es sich aber meist um das aufbereitete Rohprodukt.

Die Herstellung dieses Rohprodukts beginnt bereits beim sorgfältigen Abbau unter den Gesichtspunkten Reinheit des Rohstoffs und Lagerung der zu mischenden Teil-Abbaumassen. Grundsätzlich besteht die Herstellung aus:

- Aufschließen
- Zerkleinern
- Mischen und Kneten des Rohstoffs

Der Prozess ist sehr komplex; er soll hier in aller Kürze als Auszug aus (17.61) wiedergegeben werden.

Unter dem Aufschließen des Tons versteht man, dass ein der Witterung, insbesondere dem Frost, ausgesetzter Rohstoff weiter aufgeschlossen d.h. gespalten wird, wodurch sich die für die Verarbeitung und für die Qualität der Ziegel erforderliche Plastizität ebenso erhöht wie die Bindekraft. Eine Verbesserung kann schon bei einer einmalig *gewinterten* Masse festgestellt werden. An diesen Prozess schließt sich ein Sumpfen an; darunter versteht man das Lagern des gut durchfeuchteten und gemischten Tons, sowie ein *Mauken*, das Kneten und Lagern von vorgefertigten Tonbatzen.

Während beim Vorgang des Aufschließens Maschinen nur für den Transport benötigt werden, erfolgt die Tonzerkleinerung in Kollergängen und Feinwalzwerken, das Mischen und Kneten in Mauk-Mischern, bestehend aus Drehtellern und Schnecken, Paddeln und Walzen, die alle unter dem Gesichtspunkt des geringsten Energieaufwands bei optimaler Qualität, d.h. Homogenität und Aufschluss des Rohmaterials, konstruiert sind.

13.4 Herstellung der Ziegel

Formgebung

Hinsichtlich der Formgebung bei Voll-Ziegeln unterscheidet man *Streichen*, *Schlagen* und *Pressen*.

Die hergebrachte Formgebung ist sowohl das Streichen von Hand, d.h. das Füllen einer rechteckigen Form mit weichem, feuchtem Ton und Abstreichen der Oberfläche. Als Trennmittel dienen Öl, Sand u.ä..

Auch das so genannte Ziegelschlagen ist eine überlieferte Herstellungsform; der Unterschied besteht im Rohmaterial, das hier viel fester ist und mittels eines Holzhammers in die Ecken der Form getrieben werden muss.

Maschinell werden die Ziegel aber heute mittels Streichmaschinen für weiche Tone und Strangpressmaschinen für *normale* Tone hergestellt.

Beim Strangpressen ist ein wichtiger Umstand aufzuzeigen. Luftporen bewirken eine durchgängige Inhomogenität, soll heißen, es entstehen nicht nur Lunker, also runde Hohlräume, sondern auch eine möglicherweise über den gesamten Querschnitt verteilte

Schichtblase, die beim Brennen zu einem Riss des Ziegels führen kann. Um dem abzuwehren saugt man während des Misch-, Füll- und Pressvorgangs die Luft im Formgebungsbereich der Maschine ab - ein Vakuumpreßvorgang also, der da abläuft. Nebeneffekte sind bessere *Bildsamkeit*, was wohl mit Formtreue zu übersetzen wäre. Des Weiteren wird durch diesen Vorgang das Rohmaterial dichter, d.h. der Ziegel schwerer, ferner erhöht sich die Frostbeständigkeit aufgrund fehlender großer Wasserräume, die für die Sprengung des Steins durch sich ausdehnendes Eis verantwortlich sind.

Trocknung

Der aus der Presse kommende Rohling ist zu weich und zu feucht zum Brennen, das verdampfende Wasser würde den Stein sprengen.

Deshalb muss das Wasser aus dem Formling möglichst langsam, d. h. durch Verdunsten bei niedriger Temperatur, entfernt werden. Bei diesem Vorgang erfährt der Körper eine Schwindung, die zu Spannungsbildung führen kann, wenn der Rohling ungleich oder doch zu schnell erwärmt wird oder in seiner Zusammensetzung inhomogen ist. Die Spannungen werden um so geringer, je mehr Bindungskraft das Material besitzt. Günstige Umgebungsbedingungen tragen dazu bei wie Temperatur, Luftwechsel, oder gar eine vorherige Erwärmung mittels feuchter Luft, um den natürlichen Vorgängen der *Wasserwanderung* innerhalb des Steins Rechnung zu tragen.

Diese *Trocknungsempfindlichkeit* ist abhängig von den Eigenschaften des vorgefundenen Tons und kann auch durch den Vorbereitungsprozess nur bedingt beeinflusst werden - wie z.B. durch Entzug des Anmachwassers unter Vakuum-Bedingungen. Eine andere Möglichkeit zur Verbesserung der Aus- und Durchtrocknung ist die Zugabe von organischen Materialien wie Strohhäcksel u.ä., die seit alters her bekannt ist - bei Einbuße der vorgenannten Unempfindlichkeit gegenüber Frost.

Brennen

Beim Glüh- oder Brennvorgang wird das in der Al-/Si-H₂O-Verbindung des Roh-Tons vorhandene Kristallwasser ausgetrieben und es entsteht eine feste Aluminiumsilikat-Verbindung der Formel Al₂O₃*2SiO₂. Diese gebrannte Masse, fachlich auch *Scherben* genannt, erhält seine rote Farbe durch das vorhandene Eisenoxid, Fe₂O₃, das sich unter Sauerstoffabspaltung beim Erhitzen zu Fe₂O₃*FeO verändert (ein nicht zu beschreibender sehr komplexer chemischer Prozess). Seine gelbe Farbe erhält der Ton durch seinen Kalkgehalt in Form von Kalziumkarbonat, CaCO₃.

Durch das *Brennen*, es wird auch von *Glühen* gesprochen, erhält der keramische Formling seine Festigkeit, die ihn beständig macht gegen mechanische Belastung, Witterung und ggf. gegen Säuren u.ä.. Althergebracht konnten Ziegel nur bis zu einer Temperatur von 600 oder später 900°C gebrannt werden. Dieses als Irdengut oder Tongut bezeichnete Material ist porös und nur bedingt hart und widerstandsfähig. Ein typischer Vertreter ist der Blumentopf. Dieses Material hat aber interessante Eigenschaften, die bei höherer Brenntemperatur verloren gehen: Zwischen Tongut und Kalkmörtel kann es zu einer chemischen Bindungskraft kommen. Ziegel dieser Kategorie sind heute nicht mehr erhältlich, was für den Backofenbau nach alter Tradition natürlich bedauerlich ist.

Normale Mauerziegel oder auch Dachziegel werden heute bei einer Temperatur zwischen 900 und 1200 bzw. 1300 °C gebrannt.

Da der Trocknungsprozess nicht das gesamte Wasser austreiben kann, muss der Brennvorgang entsprechend vorsichtig starten, damit Wasser aus dem Inneren den Formling verlassen kann, ohne einen nennenswerten Dampfdruck zu erzeugen. Die Ofenführung muss schließlich noch darauf Rücksicht nehmen, dass bei der weiteren Erwärmung des entstehenden Ziegels zuerst Gase frei werden und schließlich noch das chemisch gebundene

Kristallwasser. Beide wollen langsam ausgetrieben werden. Schließlich kommt es aufgrund von Kristallumwandlungen des Quarzanteils im Ton zu einer plötzlichen Ausdehnung, so dass eine Reihe von Temperatur-Schonzonen eingehalten werden müssen.

Die maximale Brenn-Temperatur bei konventionellen Öfen lag früher, wie bereits erwähnt, bei ca. 600°C. Ein solcher Ofen ist bei der Briquetterie Mercier et Fils, siehe (Kap. 3) zu besichtigen. 14 Tage, erklärt dort der Chef, seien für das Anheizen des Ofens mit einem Durchmesser von ca. 5 m samt Inhalt notwendig gewesen, sowie 14 Tage für das Abkühlen.

Ein so genannter Ringofen, der in einer Art halbindustriellem Prozess ein ständiges Beschicken und Brennen bei 900°C erlaubte, ist im Deutschen Museum in München als funktionstüchtiges Modell zu besichtigen.

Einige Angaben über einige Mauerziegel aus dem Jahr 1948 lauten (17.61):

Typ MZ150

Druckfestigkeit: >150 kg/cm² (15 N/mm²)
 Wasseraufnahme: >8 Gew.-%
 Frostbeständigkeit: >25 mal gefordert

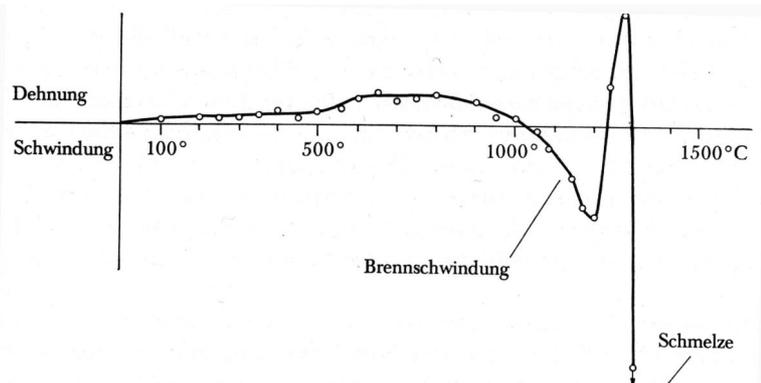
Abmessungen:

Normalformat: 25x12x6,5 cm
 Oldenburger Format: 22x10,5x5 cm
 Kieler Format: 23x11x5,5 cm
 Ostmärk. Format: 29x14x6,5 cm

13.5 Feuerfestigkeit von Ton-Ziegeln

Bei all' den Bemühungen, eine Aussage darüber zu finden, inwieweit normale Tonziegel, seien sie handgeschlagen oder maschinell gefertigt, für den Einsatz bei Temperaturen bis 350 oder 400°C verwendet werden können, konnte nur eine Quelle entdeckt werden.

In einem Forschungsbericht (17.59) ist die Wärmedehnungskurve eines Ziegels zu finden, wie er für den normalen Hausbau verwendet wird. Der bei ca. 1300°C gebrannte Ziegel weist eine Wärmedehnungskurve auf, wie sie in Abbildung 13-1 dargestellt ist. Der Verlauf ist bis zum Erreichen der kritischen Temperatur ca. 550°C relativ ausgewogen; erst danach steigt die Dehnungskurve plötzlich stark an. Es handelt sich hierbei um die gefürchtete Änderung der Quarz-Kristallstruktur. Oberhalb dieser Umwandlungs-Temperatur passiert erst wieder etwas bei ca. 800°C: Das Material schwindet plötzlich sehr stark, um sich dann wieder stark auszudehnen, bevor es je nach Beschaffenheit des Rohmaterials und Herstellungsart bei ca. 1300°C zu schmelzen beginnt.



Dehnungs-Schwindungskurve eines Ziegelrohstoffes bei Aufheizung

Abb. 13-1 Wärmedehnung eines Normal-Ziegels (Verlauf bis zur Schmelze) (17.59)

Daraus kann man m. E. schließen, dass bis Erreichen der o.g. 500°C-Grenze ein Mauerwerk aus ganz normalen Ziegeln, ich denke ausschließlich an Vollziegel, kein Problem mit der Temperatur als solche hat, und lediglich die Temperatur-Gradienten im instationären Zustand, sprich Aufheizungs- und Abkühlungs-Geschwindigkeit des Systems, von Bedeutung

sind.

Nicht zu vernachlässigen sind jedoch die wärmetechnischen Nachteile der Ziegelform gegenüber den Platten, was sowohl den einzelnen Ziegel als auch das Gewölbe als Ganzes betrifft.

13.6 Feuerfestes Material

13.6.1 Allgemein

Siehe auch DIN 51060, 1081, 1082.

Unter *feuerfestem Material* versteht man solche Produkte, die Dauertemperaturen oberhalb 1000 °C standhalten müssen.

Laut internationaler Vereinbarung (17.54) bezieht sich die Bezeichnung *feuerfest* auf eine Erweichungstemperatur oberhalb von 1520°C und *hochfeuerfest* von oberhalb 1780°C.

Nun liegen diese Temperaturen weit oberhalb der Temperaturen in einem Brot-Backofen, dennoch findet man diese Materialien, vor allem Schamotte, in professionellen Backöfen bzw. auch bei im Handel erhältlichen Hausbacköfen.

Wie oben bereits angedeutet, gibt es - abgesehen von den Bodenplatten - keine Notwendigkeit, feuerfeste Ziegel für den Brotbackofen einzusetzen, wenn nur *genügend langsam* angeheizt wird. Der Begriff *genügend langsam* kann nur ungenügend definiert werden. Angaben über einen maximalen Temperaturanstieg pro Zeiteinheit finden sich für feuerfeste Steine bestimmter Materialien unter Laborbedingungen in (17.53), was auf ein Gewölbe wie das des Backofens nur bedingt übertragbar ist.

Dass auch die Betreiber von bäuerlichen Backöfen die Grenzen ihres Ofens nicht genau kannten, sieht man an den vielen kaputten Ziegeln, vornehmlich in der Mitte des Gewölbes, d.h. an der Stelle der größten Hitzeentwicklung; dort sind die Ziegel genau so gesprungen, wie dies in (17.53 und 17.54) beschrieben bzw. in der Abbildung 13-15 dargestellt wird.

13.6.2 Eigenschaften und Grundstoffe

Ein feuerfester Ziegel und das daraus erstellte Mauerwerk hat nicht nur dem Feuer zu widerstehen, sondern auch einem ganzen Komplex von Anforderungen gerecht zu werden:

- chemische Beständigkeit
- Formtreue
- Austrocknung bei der Erstinbetriebnahme
- mechanische Festigkeitseigenschaften
- Temperatur-Wechselfestigkeit
- Temperatur-Gradienten innerhalb des Ziegels
- Temperatur-Gradienten innerhalb des Ofens
- Ofenführung beim Erstanfahren
- Ofenführung beim Erhitzen und Abkühlen

Diese Bedingungen werden von den Oxiden der 2./4./6. Gruppe des periodischen Systems erfüllt, z.B. SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO .

Da feuerfeste Baustoffe Massenprodukte darstellen, werden Materialien verwendet, die in entsprechender Menge einfach zu bergen sind, dazu gehören Si, Al, Ca, Mg bzw. deren Verbindungen. In den Lagerstätten treten die Rohstoffe als einfache Oxide bzw. deren Mischungen oder als chemische Verbindung mit leichtflüchtigen Stoffen wie Wasser und Kohlensäure u.ä. in Form von plastischen Erden, Sanden oder Felsgestein auf.

Beim Erhitzen erfahren sie eine physikalisch/chemische Umwandlung, die vielfach mit einer plötzlichen Volumenänderung verbunden ist. Aus diesen Gründen ist es nur ausnahmsweise möglich, die Rohstoffe ohne geeignete Vorbehandlung zu verwenden.

Im allgemeinen müssen sie zerkleinert, gekörnt und ganz oder teilweise durch vorheriges Brennen oder Schmelzen den bei hohen Temperaturen herrschenden physikalischen Bedingungen angepasst werden.

13.6.3 Geschichtliche Entwicklung des Herstellungsverfahrens

Eine uralte Erkenntnis lautet:

Plastischer Ton schwindet zwar beim Brennen, wird aber gleichzeitig dicht, fest und hart, so dass die Fixierung vorgegebener Formen möglich wird.

Die ersten feuerfesten Baustoffe wurden aus Ton hergestellt und waren möglichst frei von Verunreinigungen wie Eisenoxiden, Alkalien u.a.. Sie enthielten einen hohen Anteil unplastischer Stoffe wie Sand als so genanntes Magerungsmittel, um die Schwindungen in Grenzen zu halten.

Da sich die Feuerfestigkeit dieser Baustoffe in vielen Fällen als gering erwies, wurde später als Magerung ein zuvor dicht gebrannter und anschließend gemahlener Ton, die so genannte Schamotte, verwendet.

Die so hergestellten Schamotte-Steine bilden seit mehr als 100 Jahren die Standardqualität der Feuerfest-Industrie.

Alle feuerfesten Baustoffe besitzen einen charakteristischen Kornaufbau aus Grob-, Mittel- und Feinkornanteil; wobei der erste ein tragendes Gerüst bildet, während das Feinkorn die Rolle des Füllmittels übernimmt. Es soll einerseits eine dichte Packung und andererseits bei optimaler Festigkeit die Möglichkeit eines elastischen Ausgleichs von Spannungen entstehen.

13.6.4 Spannungsverlauf innerhalb der Ziegel

13.6.4.1 Allgemein

Wenngleich die folgende Abhandlung nicht nur theoretisch sondern für den Bau eines Bauern-Brotbackofens auch etwas akademisch ist, so soll sie beim Konstrukteur - und das *Heizpersonal* - doch ein besseres Verständnis für die thermischen Abläufe und den mechanischen Beanspruchungen innerhalb eines Ziegels oder des Gewölbes entwickeln. Die folgenden Ausführungen sind der Quelle (17.53) entnommen, die so umfangreich wie kompliziert ist und hier nur bedingt interpretiert wird.

In dieser Quelle wird die theoretische Ermittlung von Spannungen innerhalb von feuerfesten Steinen zweier Produkte beschrieben, Magnesit und Korund. Bei den Werkstoffen handelt es sich um Produkte für höchste Anforderungen, anhand deren man aber etwas allgemeines lernen kann.

Materialwerte bei 20°C:	Korund	Magnesit	
Wärmeleitfähigkeit, W/mK	5,7	11	
spezif. Wärme, kJ/kgK	1,08	1,38	
Rohdichte, kg/dm ³	3,2	3,0	
E-Modul, N/mm ²	9,5	7,2	
Wärmeausdehnung, 1/K 10 ⁻⁶	5,0	16	
Veränderungen bei 1000°C in %:			
Wärmeleitfähigkeit	-26	-58	linear
E-Modul	-8	-24	exponentiell

Es handelt sich um handelsübliche Steine der Abmessungen 6,2x12,4x25 cm.

Den Berechnungen liegt der folgende Ansatz zu Grunde:

Ein feuerfester Stein wird an der Stirnfläche im stationären Zustand (konstanter Wärmefluss ohne weitere Veränderung) der Temperatur von 1000°C ausgesetzt; der Wärmeübergang wird dabei mit 60 kJ/m²hK (im Original auch alternativ mit 200 kJ/m²hK) angenommen.

Aufheiz- und Abkühlvorgänge werden unter Temperaturänderungs-Bedingungen von 500 K/h durchgeführt. Die Abbildungen betreffend: die Heizseite befindet sich im allgemeinen links.

13.6.4.2 Temperaturverläufe

Die Abbildung 13-2 zeigt den statischen Temperatur-Verlauf über die Länge eines Steins in Abhängigkeit unterschiedlicher temperaturabhängiger Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmaterials bei Magnesit (oberes Diagramm) und Korund (unteres Diagramm). Die Kurvenschar zeigt deutlich die Verringerung des Temperaturgradienten innerhalb des Steins bei einer Erhöhung der Leitfähigkeit um z.B. 100 %, wie hier dargestellt.

Abbildung 13-3 beschreibt den dynamischen Temperatur-Verlauf über die Steinlänge bei Korund während einer Aufheizphase (links) und der Abkühlphase (rechts). Veränderungen der Leitfähigkeit spielen hier keine Rolle.

Deutlich zu erkennen ist der geringe Temperaturanstieg auf der Rückseite gegenüber dem auf der Vorderseite. Innerhalb der ersten beiden Stunden tut sich dort praktisch nichts. Dieser Effekt ist auch beim Betrieb des Backofens an dem Thermometer zu beobachten, dessen Sensor sich in der Mitte der Gewölbedecke befindet.

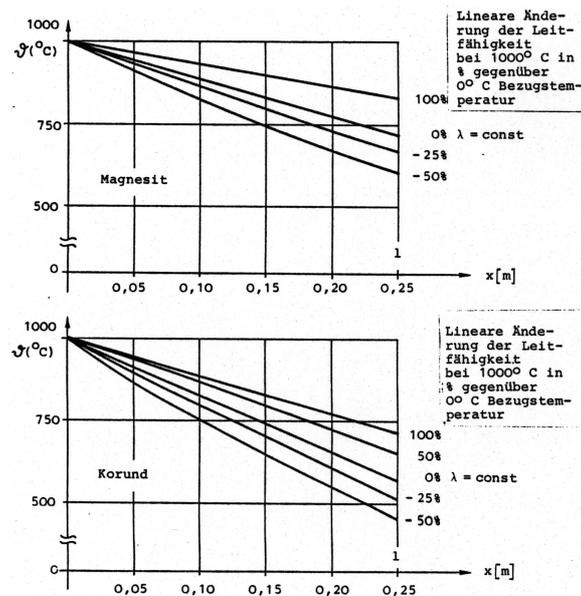


Abb. 2.5. Stationärer Temperaturverlauf beim Magnesitstein

Abb. 2.6. Stationärer Temperaturverlauf beim Korundstein

Parameter: Änderung der Leitfähigkeit
Wärmeübergangszahl $\alpha_0 = 60 \text{ kJ/m}^2\text{K}$

Abb. 13-2 Stationärer Temperatur-Verlauf bei Magnesit (oben) und Korund (unten) (17.53)

Die gerade Linie, die den stationären Zustand repräsentiert, ist eine rein theoretische Kurve, an die die Temperaturkurven sich asymptotisch annähern.

Interessant ist auch die Abkühlkurve. Wenngleich aufgrund der erzwungenen Abkühlung sehr theoretisch; liefert sie uns doch einen Eindruck, wie träge die Energie aus dem Innern des Steins - einer extrem langsamen Woge gleich - nachgeliefert wird.

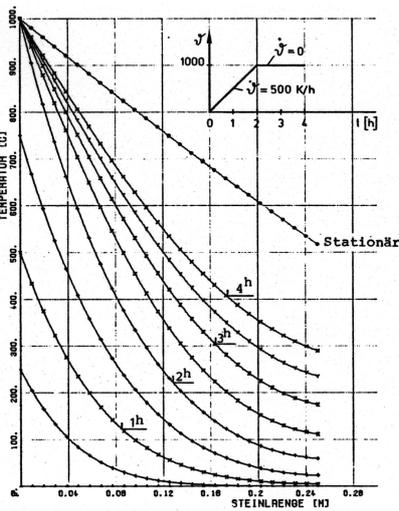
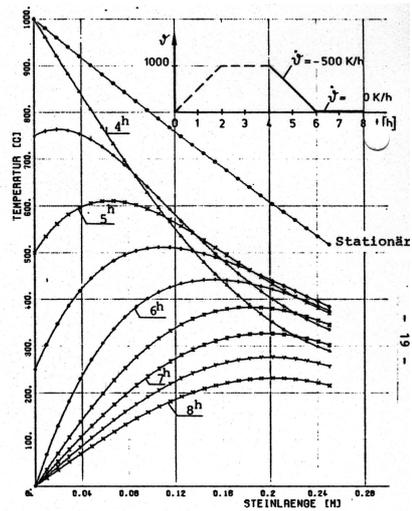


Abb. 2.9. Temperaturverlauf Korund 0 - 4 h
Zeitschrittweite $\Delta t = 0:30$ h
Aufheizgeschwindigkeit $\dot{\gamma} = 500$ K/h



4 - 8 h
Abkühlgeschwindigkeit $\dot{\gamma} = -500$ K/h

Abb. 13-3 Dynamischer Temperaturverlauf beim Aufheizen und Abkühlen von Korundsteinen (17.53)

Der Vorgang zwischen der vierten und der fünften Stunde - wenngleich auf einem ganz anderen Niveau - ist gemeint, wenn in Kapitel 8 und 14. von der *Abstehzeit* die Rede ist, d.h. das Abklingen der Temperaturmaxima im Innern des Gewölbes zur Erlangung eines niedrigeren aber ausgewogeneren Temperaturverlaufs innerhalb des Gewölbes.

13.6.4.3 Spannungsverläufe

In Anlehnung an das Vorgenannte zeigen die nächsten beiden Abbildungen entsprechende Belastungsfunktionen, sprich Spannungszustände.

Im statischen Temperaturfeld in Abbildung 13-4 ist wiederum der Einfluss der sich verändernden Wärmeleitfähigkeit dargestellt.

Deutlich zu erkennen: während eine Erhöhung der Leitfähigkeit um 100 % praktisch keinen Einfluss hat, bewirkt die Verringerung derselben eine exponentielle Erhöhung der Spannung, insbesondere auf der Heizseite.

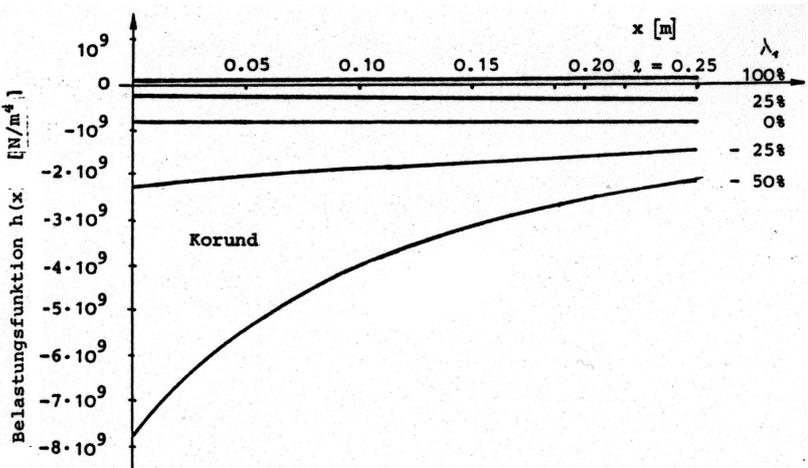


Abb. 13-4 Belastungsfunktion bei statischem Temperaturfeld für Korund in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit (17.53)

Soweit der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit, der laut Tabelle für Korund etwas günstiger ist als für Magnesit (im Original).

Wer sich für mehr Details interessiert: im Ordner „Bilder“ auf der CD ist unter „bild13-4a“ ein Schaubild über den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit von Schamotte- und Silika-Material in Abhängigkeit der Temperatur zu finden.

Abbildung 13-5 zeigt den Einfluss der Veränderung des Wärme-Dehnungskoeffizienten auf die (Spannungs-) Belastung des Ziegels anhand zweier dynamischer Temperaturfelder.

In der oberen Kurvenschar verändert sich der Dehnungskoeffizient mit der Temperatur, in der unteren bleibt der Koeffizient konstant.

Deutlich zu erkennen ist die wesentlich höhere Belastung - insbesondere auf der Heizseite - bei dem Ziegel mit dem temperaturabhängigen Dehnungskoeffizienten (oben). Aber auch die hohe Belastung während der Heizphase und die geringere Belastung während der Kühlphase.

Im stationären Zustand treten bei Materialien ohne temperaturabhängigen Dehnungskoeffizienten keine Spannungen auf; und auch bei Stoffen mit veränderlichem Koeffizienten sind sie sehr gering, wie im oberen Schaubild zu erkennen ist.

In Abbildung 13-6 sind die Belastungen aus Abbildung 13-5 in Form von Kurven konstanter Spannung am Ziegel selbst dargestellt. Den Aufzeichnungen liegt eine Aufheizzeit von 2 Stunden zugrunde, d.h. bei maximaler Belastung. Es ist jedoch jeweils nur eine halbe Ziegelbreite dargestellt.

Deutlich zu erkennen sind ihre Spannungs-Maxima im vorderen Bereich seitlich wie in der Mitte, während sich dazwischen ein spannungsfreier Bereich befindet.

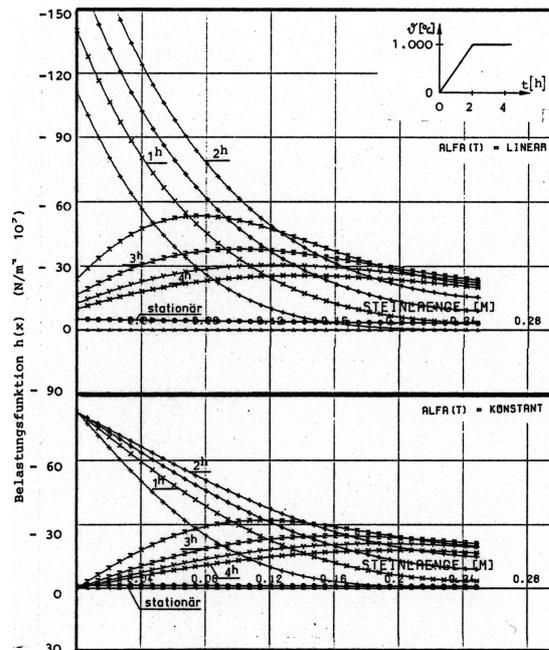


Abb. 3.5. Belastungsfunktion $h(x)$
 Korund oben: Wärmeausdehnungskoeff. $\alpha = \alpha(\vartheta)$
 unten: Wärmeausdehnungskoeff. $\alpha = \text{const.}$
 0 - 4 h
 Aufheizgeschwindigkeit 500 K/h
 Zeitschrittweite $\Delta t = 0:30$ h

Abb. 13-5 Belastungsfunktion für Korund beim Aufheizen und Abkühlen. Oben mit temperaturabhängiger Änderung des Wärmedehnungskoeffizienten, unten ohne Änderung (17.53)

Druckspannungen sind mit einem negativen Vorzeichen gekennzeichnet.

Bedenkt man, daß das Material gegen Zugspannungen 10 bis 40 mal empfindlicher ist als gegen Druckspannungen, dann sollte man sich deren Einfluss - auch auf die Lebensdauer - doch einigermaßen vorstellen können.

In Abbildung 13-7 sind darüber hinaus noch Schub- und Zug-Spannungen aufgetragen, um uns endgültig zu verwirren.

Wer sich für mehr Details interessiert: im Anhang auf der CD sind im „bild-7a“ die Verschiebungen (Dehnungen) dargestellt, die sich bei dem hier genannten Temperatur-Profil einstellen.

Für uns dient der gesamte Aufwand aus dieser Untersuchung der einfachen Erkenntnis:

- je höher die Wärmeleitung (Magnesit)
- je geringer die negative Veränderung der Wärmeleitung (Korund)
- je geringer die temperaturabhängige Veränderung des Wärmeausdehnungs-Koeffizienten (Magnesit)
- je geringer die thermische Belastung beim Aufheizen,

desto geringer sind die mechanischen Belastungen des Ziegels.

Eine Aussage, die man sicherlich auf das gesamte Gewölbe übertragen kann.

Es liegt somit allein an der Aufheizgeschwindigkeit, ob ein System thermisch überlastet ist oder nicht!

Wer sich für mehr Details interessiert, im Ordner „Bilder“ im Anhang auf der CD ist der Vollständigkeit halber in dem Schaubild „bild13-7a“ die so genannte Verschiebung des Ziegels unter Warmbedingung dargestellt.

Abschließend ein Zitat des Autors von (17.53):

Ein thermisch beanspruchter Körper kann sich verformen, ohne daß Spannungen auftreten. Daher muss unterschieden werden zwischen thermischer Ausdehnung infolge des Temperaturfeldes und mechanischer Ausdehnung infolge von Wärmespannungen.

Abb. 4.4. Normalspannung σ_x Korund $\alpha = \alpha(\vartheta)$ $t_b = 2$ h $\dot{\vartheta} = 500$ K/h Dimension: N/mm²

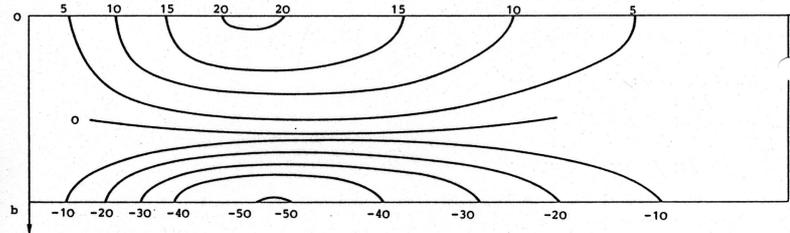


Abb. 4.5. Normalspannung σ_x Korund $\alpha = \text{const.}$ $t_b = 2$ h $\dot{\vartheta} = 500$ K/h Dimension: N/mm²

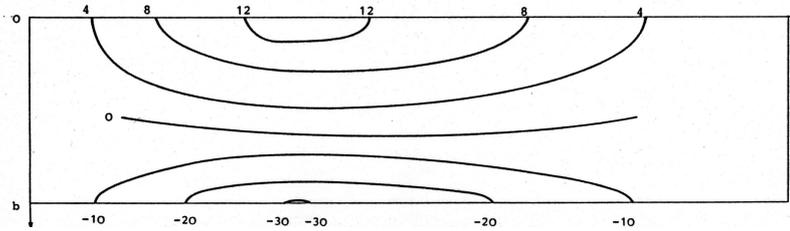


Abb. 13-6 Linien konstanter Druck- und Zug-Spannungen. Oben: bei Temperatur abhängiger Änderung des Wärmedehnungs-Koeffizienten; unten: bei konstantem Dehnungskoeffizienten (17.53)

Abb. 4.6. Schubspannung τ_{xy} Korund $t_b = 2$ h $\dot{\vartheta} = 500$ K/h Dimension: N/mm²

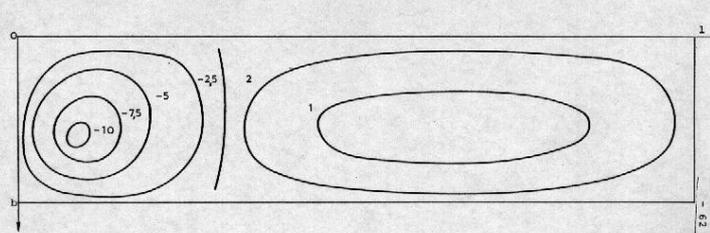


Abb. 4.7. Normalspannung σ_y Korund $t_b = 2$ h $\dot{\vartheta} = 500$ K/h Dimension: N/mm²

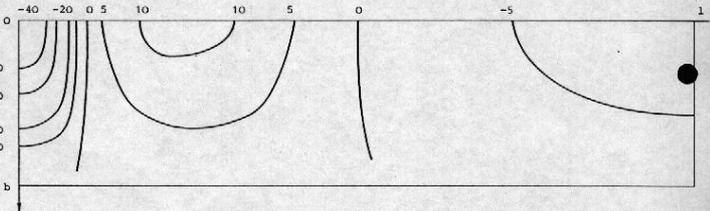


Abb. 13-7 Linien konstanter Schub- und Zug-Spannungen (17.53)

Eine rein thermische Ausdehnung tritt in temperaturbelasteten Steinen bei konstanter Leitfähigkeit, stationärem Temperaturfeld und konstantem Ausdehnungskoeffizienten auf. Der Körper ist dann bei spannungsfreien Rändern spannungsfrei.... Die mechanischen Verschiebungen infolge auftretender Wärmespannungen, die den thermischen Verschiebungen überlagert sind, verwölben dagegen die Querschnitte, und es entstehen Ausbuchtungen...

13.6.5 Eigenschaften von Feuerfest-Material

13.6.5.1 Allgemein

Für den Backofen geeignet sind sicherlich eine ganze Reihe von Materialien für feuerfeste, aber auch normale Ziegel. Um aber regional angebotene Steine auch nur halbwegs beurteilen zu können, sollte man sich über ihre Eigenschaften sowie deren Vor- und Nachteile schon etwas im klaren sein. Nachfolgend soll versucht werden, anhand einer kleinen Übersicht über die wichtigsten Materialien ein Gefühl für deren Eigenschaften und Eignung zu vermitteln.

Einteilung und Aufbau der wichtigsten feuerfesten Erzeugnisse:

Sauer:

- Silika-Steine 95% SiO₂, Rest Al₂O₃ und CaO
- Tonerdesilikatsteine 50-85% SiO₂, Rest Al₂O₃
(Schamotte) ohne Korund
- Tonerdesilikatsteine 5 bis 40% SiO₂, Rest Al₂O₃
mit Korund

Neutral:

Forsterit 33% SiO₂, 58% MgO

Basisch:

Magnesiastein 85% MgO, 5% CaO, 5% Fe₂O₃
Dolomitstein 32% MgO, 60% CaO

13.6.5.2 Raumbeständigkeit

Beim Erhitzen erfahren feuerfeste Baustoffe reversible, irreversible und sprunghafte Längenänderung (ΔL) bzw. Volumenänderungen (ΔV), die nicht nur den Stein selbst, sondern das gesamte Mauerwerk-Gefüge be- bzw. überlasten können.

Die lineare reversible Ausdehnung wird bestimmt durch den Ausdehnungskoeffizienten α $\alpha = 1/L \cdot dL/dT$ für die Länge bzw. $\beta = 1/V \cdot dV/dT$ für den Raum.

Die Werte können auch in %-Angaben ausgedrückt werden, um einen direkten Begriff von der absoluten Ausdehnung zu geben, so ist z.B der Wert $\alpha = 7 \cdot 10^{-6} 1/K$ gleichbedeutend mit 7 mm/m oder 0,7 % bei 1000 K).

(K steht hier für die Temperatur-**Differenz** in Kelvin)

Der Ausdehnungskoeffizient kann über den Temperaturverlauf konstant oder von der Temperatur abhängig sein, d.h. sich mit der Temperatur ändern, oder aber auch bei bestimmten Temperaturen sprunghaft ansteigen, so daß ein von einer Geraden abweichender Ausdehnungsverlauf entsteht.

Die Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Baustoffe sind recht unterschiedlich; die Schwankungsbreite beträgt zwischen $\alpha = 4$ und $14 \cdot 10^{-6} 1/K$ bzw. zwischen 0,4 und 1,4%. bei 1000°C.

Quarzite weisen starke und plötzliche Volumenänderungen bei ca. 600°C auf, so daß dieser Temperaturbereich insbesondere bei Öfen aus Silika-Steinen mit äußerster Vorsicht

durchfahren werden muss, damit beim Aufheizen wie beim Abkühlen keine Risse entstehen. So gilt:

Der „Silikaofen“ muss folglich viel langsamer und vorsichtiger angeheizt und abgekühlt werden als der aus Schamotte hergestellte (siehe Bestandteile in der obigen Tabelle).

Die niedrigsten und linearsten Werten besitzen Siliciumkarbid-, Mullit- bzw. Sillimanitsteine. Interessant ist die Kurve für quarzreiche Schamotte; sie weist regelrechte Sprünge bei Temperaturen von ca. 150°C und 500°C auf; die Ausdehnung stagniert aber nahezu oberhalb 600°C, während der tonerdereiche Schamotte-Stein einen flacheren Dehnungsverlauf hat, welcher in sich wesentlich ausgeglichener ist.

Abbildung 13-8 zeigt den Dehnungs-Verlauf verschiedener Schamotte-Materialien, zum einen als durchgezogene Linie in Prozentangabe als Darstellung des absoluten Verlaufs, zum anderen als unterbrochene Linie zur Darstellung der Temperatur-bezogenen momentanen α -Werte.

Abbildung 13-9 zeigt eine ganze Reihe von gut verwendbaren Materialien für den hier in Frage kommenden Temperaturbereich bis ca. 400°C; sie zeigt aber auch die erheblichen Nachteile der quarzreichen Schamotte- und der Silika-Steine.

Abbildungen 13-10 bis -13 zeigen einige typische Eigenschaften von Silika- und Schamotte-Steinen einschließlich deren Dehnungskurven.

Eindeutig zeigt der Schamotte-Stein mit 0,3 % bei 400 °C verträglichere Dehnungs-Eigenschaften als der Silika-Stein mit 1,2 %, der sich nicht nur stärker dehnt sondern auch ein sprunghaftes Verhalten aufweist.

Normale Mauer-Vollziegel liegen mit einem Ausdehnungswert $\alpha=8 \cdot 10^6$ 1/K etwas höher als die Kurve in Abbildung 13-12 - den Temperatur-Bereich bis 500°C betreffend.

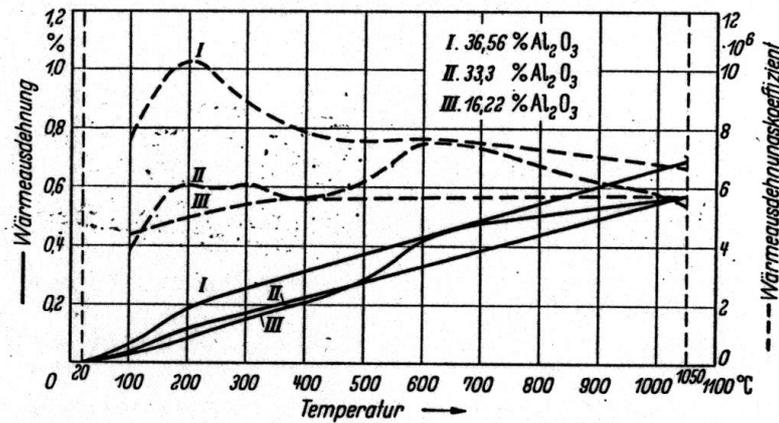


Abb. 408. Wärmeausdehnung von drei verschiedenen Schamottesteinen (nach A. KANZ)

Abb. 13-8 Wärmeausdehnung verschiedener Schamottesteine. (17.54)

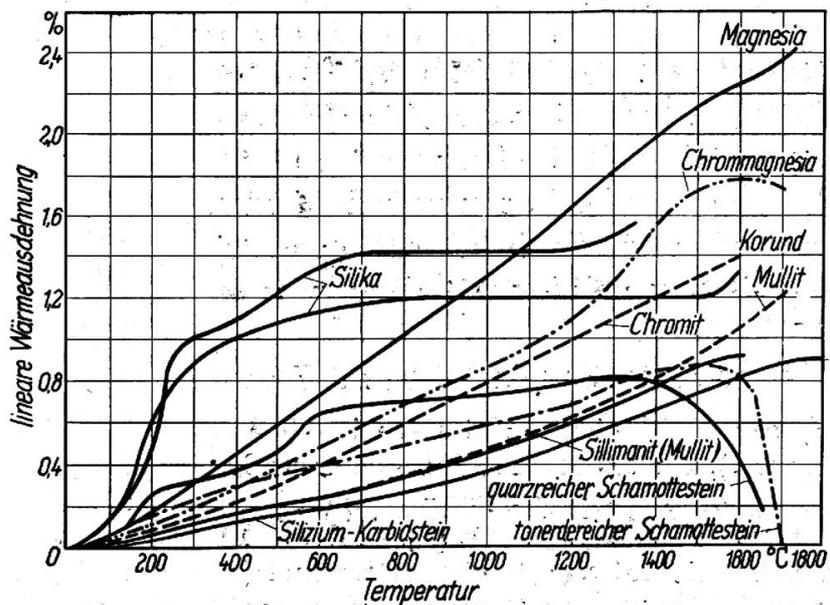


Abb. 58. Lineare Wärmeausdehnung feuerfester Baustoffe (nach A. DIETZEL u. KOPPERS Handbuch)

Abb. 13-9 Lineare Wärmedehnung feuerfester Baustoffe in %-Angabe (17.54)

Allgemeine Eigenschaften der untersuchten Silikasteine.												
Art der Steine und Bezeichnung	Chemische Zusammensetzung									Spezi- fisches Gericht	Raum- gericht	Poro- sität %
	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	MnO %	TiO ₂ %	Al- kalien %	Glüh- verlust %			
Silikastein Ia Nr. 17, Mitte	0,91	95,22	0,81	1,70	0,04	Spur	1,10	Rest	0,16	2,354	1,889	19,8
" " " 17, Ecke	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2,346	1,879	19,9
" " " 26, Mitte	—	etwa 96,0								2,332	1,815	22,2
" " " 26, Ecke	—	"								2,326	1,830	21,3
" " " 27, Mitte	—	"								2,381	1,795	24,6
" " " 27, Ecke	—	"								2,376	1,711	28,0

Abb. 13-10 Chemische Analyse verschiedener Silika-Steinen (17.55)

Zahlentafel 3. Allgemeine Eigenschaften der untersuchten Schamottesteine.												
Art der Steine und Bezeichnung	Chemische Zusammensetzung									Spezi- fisches Gericht	Raum- gericht	Poro- sität %
	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	MnO %	TiO ₂ %	Al- kalien %	Glüh- verlust %			
Schamottestein 12, Mitte	36,56	55,50	2,26	0,45	0,34	Spur	0,82	Rest	0,14	2,705	1,862	31,2
" " " 12, Ecke	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2,689	1,882	30,0
Schweißofenstein 15, Mitte	33,30	58,52	2,10	0,57	0,93	"	1,92	"	0,12	2,617	1,924	26,5
" " " 15, Ecke	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2,626	1,919	26,9
" " " 16, Mitte	20,57	73,32	1,40	0,79	0,83	"	1,01	"	0,08	2,581	2,029	21,4
" " " 16, Ecke	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2,579	2,018	21,8
Quarzschamottest. 13, Mitte	16,22	76,10	1,72	0,68	0,58	"	0,85	"	0,24	2,592	1,937	25,3
" " " 13, Ecke	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2,600	1,915	26,3
" " " 14, Mitte	16,52	75,98	1,64	0,57	0,49	"	0,80	"	0,46	2,630	1,886	28,3
" " " 14, Ecke	"	"	"	"	"	"	"	"	"	2,633	1,889	28,2

Abb. 13-11 Chemische Analyse verschiedener Schamottesteinen (17.55)

13.6.5.3

Bleibende Wärmedehnung

Bei neuen Silika-Steinen kann es zum Nachwachsen von Kristallen kommen bzw. bei Schamotte-Steinen zu örtlichem Schmelzen und dadurch zu Schwindungen. Das *Nachwachsen* bewirkt ein Herausdrücken oder ein Zermürben des Mörtels und damit ein Krümmbiegen der Wände. Das *Schwinden* bewirkt ein Lockern des Verbandes. Im allgemeinen bleiben die bleibenden Längenänderungen im Bereich von wenigen Zentelprozenten.

13.6.5.4 Wärmeleitung

Unter Wärmeleitung versteht man den Energietransport oder den Wärmestrom durch das Material in Richtung abnehmender Temperatur.

Die Wärmeleitfähigkeit λ , *lambda*, ist definiert als:

$$\lambda = Q \cdot (L/A) \cdot (1/\Delta T) \text{ W/mK, mit}$$

Q=Wärmestrom in W (korrekt mit einem Punkt oberhalb des Q's, hier leider nicht darstellbar)

L=Weglänge in m

A=Querschnitt in m²

ΔT = Temperaturdifferenz in K

Hier eine Tabelle mit den Wärmeleitfähigkeiten λ einiger Materialien:

Temperaturbereich	20°C	1000°C
• Schamotte-Steine	1,2	1,2
• Silika-Steine	1,4	2,3
• Magnesiasteine	5,8	3,5
• Siliciumkarbid 50%	4,8	5

- dito 70%
- Korund

7,2 8
2,4 2,2

Die Leitfähigkeit ist abhängig von der Dichte eines Steins und damit von der Porosität, welche bei der Herstellung beeinflusst werden kann.

Wie im vorhergehenden Kapitel bereits angedeutet, bestimmen die Eigenschaften der Wärmeleitung auch die Verträglichkeit der Aufheiz-Geschwindigkeit für den Ofen. Obwohl in unserem Fall die Heizkraft in einem manuell betriebenen Backofen nicht so hoch ist wie in einem industrie betriebenen, sind diese Eigenschaften doch nicht ohne Bedeutung, wie bei den stark beschädigten alten Backöfen zu beobachten ist; denn - der Amateur-Bäcker akzeptiert nicht immer die Grenzen der Vernunft.

13.6.5.5 Wärmeübertragung durch Strahlung

Der Vollständigkeit halber sei hier noch die Wärmeübertragung durch Strahlung von einem festen Körper auf einen anderen aufgeführt - hier vom Gewölbe auf das Brot; sie wird mit dem Gesetz von Stefan-Boltzmann beschrieben. Eine Betrachtung der Strahlungswärme ist interessant, wenn konstruktive Details zur Diskussion stehen; denn die Material-Werte unterscheiden sich nur geringfügig.

In (17.43) z.B. können die detaillierten Zusammenhänge eines Wärmeaustausches zwischen zwei Flächen nachgelesen werden.

13.6.5.6 Spezifische Wärmekapazität

Für den Temperaturverlauf beim Aufheizen und Abkühlen ist neben der Wärmeleitfähigkeit die Wärme-Speicherkapazität von Bedeutung, die durch die spezifische Wärmekapazität des Materials beschrieben wird.

Die Wärmekapazität Q, der Wärmeinhalt eines Stoffes, ist definiert als

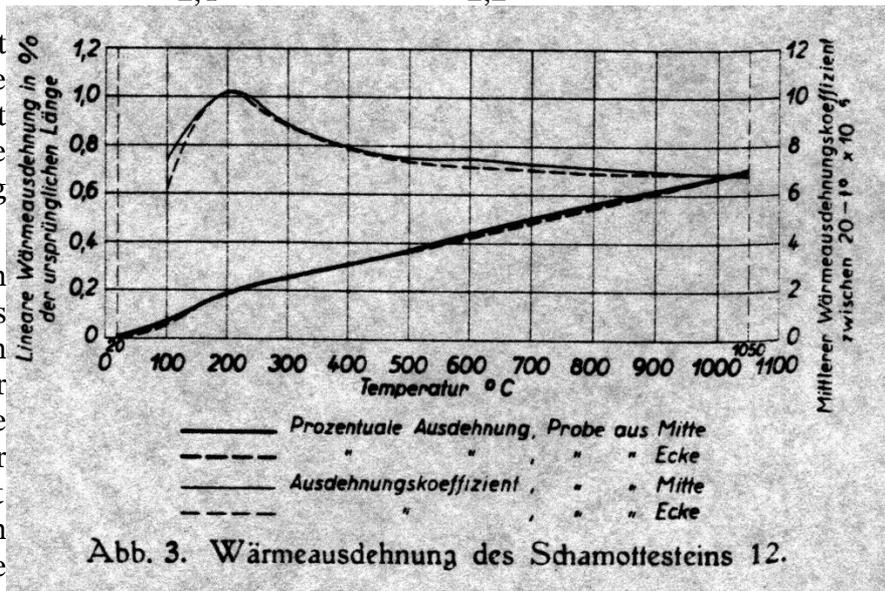


Abb. 3. Wärmeausdehnung des Schamottesteins 12.

Abb. 13-12 Wärmedehung %-ual und per Koeffizient für einen Schamotte-Stein: 36,5% Al_2O_3 , 55,5% SiO_2 , 2% Fe_2O_3 , Rest CaO, MgO u.a.. (17.55)

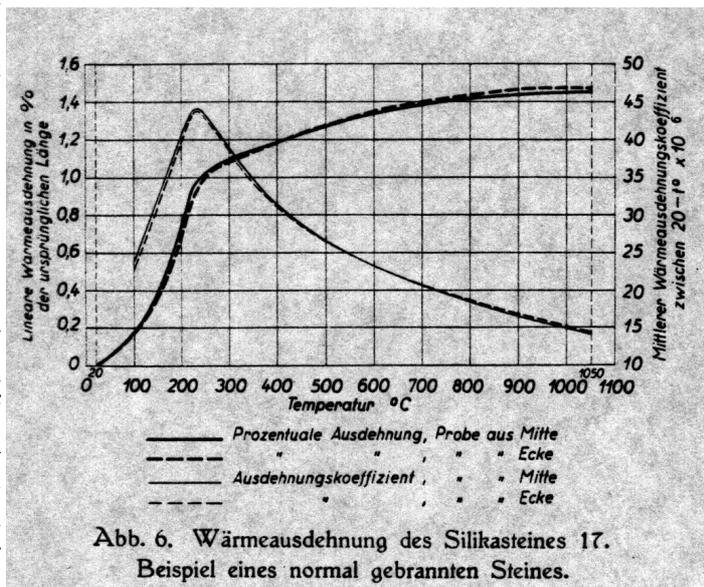


Abb. 6. Wärmeausdehnung des Silikasteines 17. Beispiel eines normal gebrannten Steines.

Abb. 13-13 Wärmeausdehnung %-ual und Koeffizient für ein Silika-Stein: 1% Al_2O_3 , 95% SiO_2 , 1% Fe_2O_3 , 2% CaO u.a. (17.55)

$Q=c*m*\Delta T$ in kJ , mit:

ΔCT =Temperaturdifferenz in K

m = Masse in kg

c = spezifische Wärmekapazität in kJ/kgK

Die Wärmekapazität des Ofens ist, wie aus der Formel hervorgeht, von der Dichte des Baustoffes abhängig; sie bestimmt bei vorgegebener Aufheiz-Temperatur die Heizdauer, die Abstezeit des Ofens, die Abkühlzeit usw. aber auch die Menge Brötchen, die insgesamt gebacken werden können.

Die spezifischen Werte sind über den gesamten normalen Temperaturbereich recht konstant, sie ändern sich im Bereich 20-1000°C nur geringfügig:

- Schamotte von 0,88 auf 1,2 kJ/kgK
- Magnesit von 1,05 auf 1,35 kJ/kgK

13.6.5.7 *Gasdurchlässigkeit*

Die Gasdurchlässigkeit, ausgedrückt durch die Porosität (vorausgesetzt, es handelt sich tatsächlich um offene Poren), ist wichtig für den Verlust an Gas und Wärme, aber auch für den Transport des Gasstroms und der Feuchtigkeit durch die Ziegel. Nicht gefunden habe ich in der Literatur den mir persönlich als plausibel erscheinenden Effekt, wonach eine höhere Porosität, sprich Durchtrag eines heißen Gasstroms durch den Ziegel, zur Erhöhung der Wärmeleitung der Steine und dadurch zum Abbau thermischer Spannungen, insbesondere beim Aufheizen, beitragen kann.

Porosität ist also erwünscht, sie hilft außerdem bei der Aufnahme des für die Erhärtung des Mörtels benötigten Wassers und dient der besseren mechanischen Verbindung von Mörtel und Stein (anders als bei einer geschlossenen glasartigen Oberfläche).

Die porösen Eigenschaften sind bei feuerfesten Materialien nicht sehr unterschiedlich; sie können bei der Herstellung des Baustoffs durch Additive wie z.B. Sägemehl (das beim Brennen ausgast) eingestellt werden.

Hier eine Übersicht über die Porosität in Vol.-% verschiedener Materialien aus verschiedenen Quellen:

- Schamotte 25 bis 30
- Hartschamotte 18
- Quarzstein 42,9
- Silika-Stein 20 bis 28
- Magnesiastein 18

13.6.5.8 *Elastizitäts-Modul*

Der so genannte E-Modul ist definiert als das Verhältnis aus Spannung und Längenänderung:

$E=\sigma/(\Delta L/L)$ in N/mm² , mit:

σ =(sigma) Spannung in N/mm²

L = Länge in m bzw. ΔL als Längenänderung

Der E-Modul gibt Aufschluss über die entstehenden Spannungen z.B. aus Temperatur-Gradienten im nichtstationären Zustand, d. h. je kleiner der E-Modul, desto geringer sind die Spannungen bei gleicher Temperatur-Differenz innerhalb eines Ziegels.

Die E-Module der einzelnen Baustoffe sind sehr unterschiedlich, sie bleiben aber jeweils bis zu einer Temperatur von ca. 600°C ziemlich konstant, während sie danach stark abfallen können; der Stein wird dann *weich*.

Hier eine kleine Übersicht über E-Module verschiedener Materialien aus verschiedenen Quellen:

- Magnesia-Stein 2,7 bis $10 \cdot 10^4$ N/mm²
- Schamotte-Stein 2,7 bis $4,2 \cdot 10^4$ N/mm²
- Silika-Stein $0,95 \cdot 10^4$ N/mm²

(17.54) liefert weitere detaillierte Angaben über E-Module, auf die hier verzichtet werden soll.

13.6.5.9 Druckfestigkeit

Angaben über Druckfestigkeiten von Ziegelmaterial sind im Ofenbau insofern von untergeordneter Bedeutung, als daß sie weniger der Berechnung als der Beurteilung der Material-Qualität dienen. So liegt die (Kalt-) Druckfestigkeit eines normalen Mauer-Vollziegels bei etwa 12 N/mm², die Werte für Schamotte-Materialien aber je nach Qualität zwischen 12 und 25 N/mm². Top-Produkte kommen gar auf 40 N/mm².

Mit einer höheren Druckfestigkeit verbunden ist eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen Spannungsbelastungen aufgrund von Temperatur-Gradienten beim Aufheizen oder Abkühlen. Werte über Warm-Druckfestigkeiten von Mauerziegeln konnte ich nirgendwo finden; aber schließlich sind sie dafür auch nicht vorgesehen. Die vorgenannte Warm-Druckfestigkeit der Feuerfest-Materialien jedenfalls bleibt bis zu Temperaturen von 900 oder gar 1300 °C relativ unverändert; darüber hinaus fällt sie jedoch steil bis zum Erweichungspunkt bei 1400 oder auch 1700°C ab.

13.6.5.10 TemperaturWechselBeständigkeit TWB

Unter den Eigenschaften feuerfester Baustoffe ist die Widerstandsfähigkeit gegen schroffen Temperaturwechsel von besonderer Bedeutung.

Temperaturunterschiede innerhalb eines Ziegels - insbesondere beim Aufheizen und Abkühlen, sowie Belastungen durch lokale Einflüsse wie Verschiebung der Glut, Öffnen der Türe u.ä. - unterwerfen das Material schroffen Spannungsänderungen.

Überschreiten die Spannungen die Festigkeitsgrenze der Steine, insbesondere aber des Mörtels, so lockern oder zerstören sie das Steingefüge. Es können sich Risse bilden oder ganze Stücke abplatzen (siehe Abbildung 13-15). Die Temperaturempfindlichkeit ist somit die Hauptursache für die Zerstörung feuerfester Ausmauerungen, so denn eine entsprechende Belastung überhaupt vorhanden ist. Im vorliegenden Fall dürfte die TWB von geringer Bedeutung sein, da dem Ofen der Gasabzug im hinteren Bereich fehlt; die im Ofen herrschende Konvektion bewirkt nur einen langsamen Gasstrom durch den Ofen: Die bei offenem Tor im oberen Bereich aus dem Ofentor austretende heiße Luft (nach dem Heizvorgang) hat zur Folge, daß kalte Luft in den unteren Bereich einströmt, langsamer, da die Luft dichter ist.

Angegeben wird die TWB als Zahl der Abschreckungen, die ein erhitzter Baustoff auszuhalten vermag. Die Durchführung der Versuche erfolgt nach DIN1068.

Die folgenden Werte sind der Quelle (17.54) entnommen:

- Steinart Durchschnittliche Abschreckzahl für Wasserabschreckung
- Silika 2
- Schamotte, handelsüblich. 20
- Hartschamotte >50
- Silimanit >50

Deutlich zu erkennen ist die wesentlich größere Unempfindlichkeit der Schamotte-Steine gegenüber dem Silika-Material.

13.6.5.11 Spannungen bei Temperaturwechsel

Zur Bestimmung der Spannungen durch Temperaturunterschiede dienen u.a. spannungsoptische Modellversuche.

Diese Kurven gleicher Spannung in Abbildung 13-14 ähneln sehr den in 13-7 ersichtlichen, mit dem Unterschied, daß hier die Spannungen wesentlich höher sind.

Beim plötzlichen Erhitzen eines Ziegels an der Stirnseite zeigt dieser in der Mitte des erhitzten Endes starke Maxima von Schub- und Druckspannungen und längs den Seitenrändern kleine Maxima, während in der Probemitte Zugspannungen auftreten.

Beim Abkühlen treten - in etwas verkleinertem Maßstab - umgekehrte Verhältnisse auf.

In der Praxis entstehen beim Aufheizen und Abkühlen meist Risse parallel und schräg zur erhitzten Oberfläche, wie dies in Abbildung 13-15 zu sehen ist und auch in vielen alten Backöfen beobachtet werden kann (siehe Foto-Sammlung im Anhang auf der CD).

13.6.5.12 Äußere Form von Ziegeln

Gegenüber der Verwendung von Ziegeln mit Normalmaß haben Maß-gefertigte Formziegel, z.B. für Gewölbe, wesentliche Vorteile: In den so entstehenden gleichförmigen Fugen wird der Mörtel geringer belastet, so daß eine höhere Standzeit für das gesamte Mauerwerk erreicht werden kann. Ferner können für diese Art Fugen moderne warmfeste Kleber anstelle von Mörtel eingesetzt werden, was insbesondere für Gewölbe mit hoher Wärmebelastung von Bedeutung ist.

Die hierfür aufzubringenden höheren Fertigungskosten zahlen sich für den Investor von professionellen Öfen aber allemal aus.

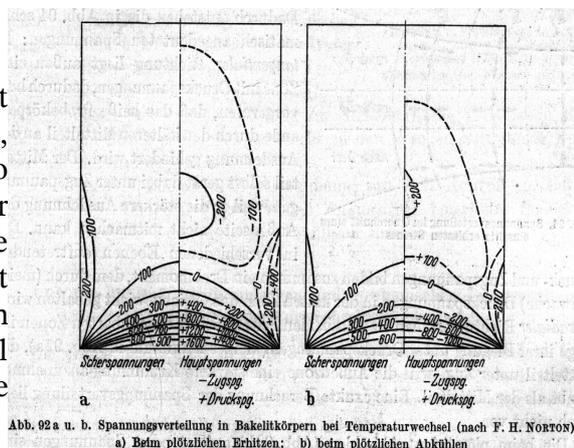


Abb. 92 a u. b. Spannungsverteilung in Bakelitkörpern bei Temperaturwechsel (nach F. H. NORTON)

a) Beim plötzlichen Erhitzen; b) beim plötzlichen Abkühlen

Abb. 13-14 Spannungsverteilung in einem Bakelitkörper bei Temperaturwechsel, links plötzliches Erhitzen, rechts plötzliches Abkühlen (17.54)

Bei der Verwendung von Normalsteinen treten beim Erwärmen die relativ breiten äußeren Fugen auseinander, so daß die inneren die ganze Last tragen müssen, und daher abplatzen können.

Dabei verschieben sich die Steine gegeneinander. Das Gewölbe wird eckig, wie es in der Fachsprache heißt, und die Gefahr eines Einsturzes nimmt zu. Darüber hinaus sind große Steine wegen der nicht zu vermeidenden inhomogenen Mischung der Rohmasse und der inhomogenen Brennung ungünstig.

Für einen Backofen mit seiner eigenwilligen Form sind Formsteine jedoch nur schwer vorstellbar, weshalb hier ein Mauerwerk aus flachen Ziegeln bzw. Platten zu empfehlen ist. Flache Ziegel führen bei Gewölben zu mehr, aber auch flacheren Fugen und damit zu einem elastischen und thermisch ausgewogenen Mauerwerk, das insbesondere wechselnde

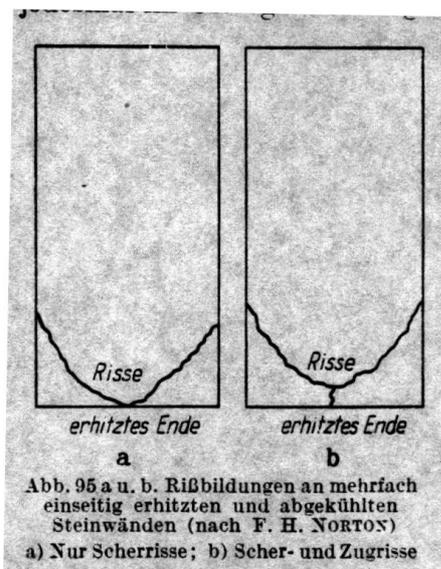


Abb. 95 a u. b. Rißbildungen an mehrfach einseitig erhitzten und abgekühlten Steinwänden (nach F. H. NORTON)

a) Nur Scherrisse; b) Scher- und Zugrisse

Abb. 13-15 Rißbildung an mehrfach einseitig erhitzten und abgekühlten Steinwänden (17.54)

Temperaturen und große Temperaturgradienten auszugleichen vermag.