

# Das Ausdehnungsverhalten von Quarziten und Sandsteinen unter dem Einfluß von Wärme

Von K. Kohler, Berlin

*(Die Ursachen für erhöhte Dilatation und Kontraktion bei Wärmezufuhr am Einkristall und polykristallinen Aggregat; Diskussion der mechanisch registrierbaren Volumeffekte im Hinblick auf die Kornverbandseinflüsse; thermische Untersuchungen an dilatometrisch unregulierten Quarziten und Sandsteinen; Einflüsse der Dimensionierung des Prüfkörpers; der funktionelle Zusammenhang von Ausdehnungskoeffizient mit Korngröße und Bindemittel.)*

*(Causes of increased dilation and contraction at continuous heat supply to a single crystal and a polycrystalline aggregate; discussion on the effects of the volume which can be mechanically registered with regard to the influence of the bonding of the grains; thermal investigations on dilatometrically not regulated quartzites and sandstones; influence of the dimensioning of the test piece; functional connexion between dilation coefficient with grain size and bonding medium.)*

*(Les causes des dilatations et des contractions plus élevées à l'admission de chaleur au monocristal et à l'agrégat polycristallin; discussion des effets de volume que l'on peut enregistrer mécaniquement par rapport aux influences de liaison de grains; des examens thermiques sur des quartzites et des grès qui ne sont pas réglés dilatométriquement; les influences du dimensionnement des échantillons; la relation de la fonction du coefficient de dilatation avec la grandeur de grains et des liants.)*

## Allgemeines

Der Ausdehnungskoeffizient eines Einkristalles kann für die gleiche Gitterrichtung unterschiedlich groß gemessen werden, je nach der angewandten Methode. Die aus Röntgenerhitzungskammern (Lonsdale 1959 u. a.) berechneten Daten decken sich selten mit den mechanisch ermittelten Werten. Beide Methoden messen die thermisch bedingte Gitteraufweitung (Debye, Grüneisen, Röntgen, Born, Mie u. a.), die mechanischen Dilatometer (Bollenrath 1933/34, Beats u. Lauchner 1958, u. a.) jedoch noch zusätzliche Faktoren, wie sie für den Realkristall charakteristisch sind. Es können dies z. B. sein:

1. für erhöhte Dilatation: Der Beginn polymorpher Umwandlungen von der Tief- in die Hochtemperaturmodifikation (le Chatelier 1889, Day, Sosman und Hohstetter 1914), Fremdbeeinträchtigungen, Gitterdeformationen, rasche Abgabe leichtflüchtiger Komponenten (Klemm, Tilk u. v. Müllenheim 1928).
2. für Kontraktion (trotz steigender Wärme): Platzwechsel- und Diffusionsvorgänge, Beginn von Sinter- und Schmelzprozessen, Gittereinregelung einer neu gebildeten Hochtemperaturmodifikation (Kohler 1953).

Dehnt man die Untersuchungen auf polykristallines und monomineralisches Material aus (Austin 1952), so werden die Abweichungen vom Dehnungswert des idealen Raumgitters (Rö.-Erhitzungsmethode) noch größer, sofern man regulinische Metalle (Kohler 1956) davon ausnimmt. Derartige Abweichungen der Meßwerte voneinander können auf strenger Einregelung der ausdehnungsanisotropen Einzelkörner beruhen. Weitere Ursachen sind noch: eingeschlossene leichtflüchtige Komponenten, adsorbierte Gase in Poren- und Kapillarräumen, unterschiedliche Korngrößen und -formen, Art und Zustand des Bindemittels.

## Auswahl des Untersuchungsgutes

Zur Klärung des spezifischen Einflusses der zuletzt genannten Faktoren auf das thermisch bedingte Ausdehnungsverhalten wurde eine größere Zahl von Quarziten und Sandsteinen nach folgenden Gesichtspunkten ausgewählt (siehe Tabelle 1).

Von sämtlichen Ursachen, die das Ausdehnungsverhalten noch zusätzlich beeinflussen können, kommen bei quarzitischem Gesteinsmaterial vor allem Korngröße, Bindemittel und Einregelung in Frage. Um nun den Einfluß der Regelung auszuschließen, wurden nur solche Gesteine zum Vergleich der Ausdehnungskoeffizienten ( $AK_{off}$ ) herangezogen, die in allen drei räumlichen Richtungen gleich großes Dilatationsverhalten zeigten. Somit blieben nur noch die Einflüsse von Korngröße und Bindemittel übrig, die naturgemäß dilatometrisch nicht getrennt untersucht werden können. Die Korngrößen wurden aus Dünnschliffen bestimmt (Tab. 1, Spalte 3) und mit ihrem jeweiligen Mittelwert angegeben. Die Werte haben eine Schwankungsbreite von 15—25 %. Art und Zustand des Bindemittels werden in Spalte 4 von Tab. 1 beschrieben und in Form mehrerer Abbildungen\* (Abb. 4—11) wiedergegeben. Der Einfluß des Bindemittels auf das Ausdehnungsverhalten ist recht komplex, da es selbst eine eigene Ausdehnungscharakteristik besitzt, andererseits die Ausdehnung der Einzelkörner überträgt und gleichzeitig für die Wärmeleitfähigkeit verantwortlich ist, wie Torkar und Paulitsch (1955) an Marmoren gezeigt haben.

## Experimenteller Teil

Untersucht man das Ausdehnungsverhalten von einkristallinem Quarz bis nahe 1000 °C, so erhält man stets eine stufenförmige Ausdehnungsanomalie bei 573 °C, hervorgerufen durch die Umwandlung

\*) Verg. 70 x Nicols



von Tief- in Hochquarz (Kohler 1955). Die Größe der Gesamtausdehnung ist abhängig von der Richtung im Kristall, in der sie gemessen wird. Diese Ausdehnungsanisotropie liegt bei Quarz zwischen 1,0 %, gemessen in Richtung der c-Achse und 1,74 %, senkrecht zur c-Achse, ermittelt jeweils im Temperaturintervall von 20 °C bis 700 °C (siehe Abb. 1).

Betrachtet man nun die Ausdehnungskurven von Gesteinen mit Quarz als Hauptgemengteil, so sind sie gleichfalls durch den Umwandlungssprung bei 573 °C charakterisiert. Ihre Ausdehnungsextremwerte müßten theoretisch zwischen 1 % und 1,74 % liegen, insbesondere bei Quarziten und Sandsteinen mit einem Quarzgehalt > 90 %.

Tabelle 1  
Sandsteine

| Nr. | Bezeichnung mit Fundort                                       | mittlere Korngröße in mm | Makroskopischer und mikroskopischer Befund  | Ausdehnung bei 700 °C in Prozent |
|-----|---|--------------------------|---|----------------------------------|
| 2   | Kieseliger Sandstein, Meeressandstein, Miozän, Lonheim/Hessen | 0,25                     | feinkörniges Bindemittel, kein unmittelbarer Kornkontakt  | 1,28                             |
| 27  | Stubensandstein, ob. Abt. Keuper, Tübingen                    | 0,125                    | sehr poröses Agg., viel glimmerartiges Bindemittel, teilweise Kalk und Feldspat als Beimengungen, geringe undulöse Auslöschung  | 1,03                             |
| 37  | Glaukonitischer Sandstein, Gault, Langelsheim/Harz            | 0,25                     | poröses Agg., abgerundete Kornformen, geringer direkter Kornkontakt, dünnes Bindemittel, keine undulöse Auslöschung   | 1,62                             |
| 44  | Buntsandstein, Triersdorf                                     | 0,2                      | sehr homogene Korngrößenverteilung, z. T. direkter Kornkontakt, pflasterartig, feinkörniger Quarzdedritus, wenig Glimmerreste   | 1,475                            |
| 46  | Quarzschiefer, Schlangenbad Nassau                            | 0,35                     | alle Kornindividuen randlich kataklastisch beansprucht, z. T. ausgelenkt, Bindemittel feinkörniger Quarzdedritus, kein unmittelbarer Kornkontakt der größeren Quarzkörner   | 1,655                            |
| 53  | Keupersandstein, obst. Lage, Degernbach/Stuttgart             | 0,6                      | porös, einige Quarzkörner zerbrochen, teilweise undulöse Auslöschung, Bindemittel z. T. glimmerhaltig   | 1,585                            |
| 54  | Buntsandstein, Rohrbach b. Heidelberg                         | 0,3                      | meist direkter Kornkontakt, zerbrochene Quarzkörner und Glimmer als Bindemittel   | 1,51                             |
| 55  | Quarzitischer Sandstein, Alstern b. Naumburg                  | 0,5                      | heterogene Kornverteilung, etwas geschichtet, direkter Kornkontakt und Pflastergefüge   | 1,715                            |
| 57  | Buntsandstein, Heidelberg                                     | 0,4                      | guter Kornkontakt, quarzit. Bindemittel, dünnste Limonitfilme auf den ehemals klastischen Körnern, geringe undulöse Auslöschung   | 1,68                             |
| 62  | Toniger Sandstein, Rotliegendes, Bleichenbach                 | 0,06                     | viel Fremdbeimengungen, auch als Bindemittel, kein direkter Kornkontakt   | 1,11                             |
| 64  | Schilfsandstein, Mühlstein b. Eppingen                        | 0,2                      | poröses Gefüge, geringe undulöse Auslöschung, dichtes Bindemittel aus Karbonaten und Glaukonit  | 1,335                            |
| 65  | Glaukonitischer Sandstein, Turon, Werl/Westfalen              | 0,1                      | wenig porös, kein direkter Kornkontakt, viel Glaukonit und Karbonat beigemengt, kaum undulöse Auslöschung   | 1,285                            |
| 66  | Kristallsandstein, Aukopf bei Heidelberg                      | 0,7                      | sehr guter Kornkontakt, einige Körner in kleinere zerlegt, kaum Bindemittel, geringe undulöse Auslöschung   | 1,71                             |
| 71  | Kristallsandstein, Lammerskopf bei Heidelberg                 | 0,5                      | porös, urspr. abgerundet, später durch Auskristallisation zu polygonal. Pflastergefüge, kein Bindemittel, direkter Kornkontakt, einige Körner aus kleineren Körnern zusammengesetzt, geringe undulöse Auslöschung | 1,61                             |
| 113 | Eisenschüssiger Sandstein, Porta bei Minden, Westfalen        | 0,6                      | geringer Kornkontakt, Bindemittel stark karbonat-, glimmer- und erzhaltig, geringe undulöse Auslöschung   | 1,67                             |



Tabelle 1  
Quarzite

| Nr. | Bezeichnung mit Fundort                                     | mittlere Korngröße in mm | Makroskopische und mikroskopischer Befund   | Ausdehnung bei 700° C in Prozent |
|-----|---|--------------------------|---|----------------------------------|
| 63  | Quarzitischer Sandstein, Tertiär, Fontainebleau, Frankreich | 0,4                      | rel. porös, kaum Beimengungen, Pflastergefüge mit gutem Kornkontakt, kein Bindemittel, wenig undulöse Auslöschung                       | 1,80                             |
| 70  | Sandsteinquarzit, Val de Louron, Hte Pyrenés                | 0,3                      | wenig porös, heterogene Korngrößenverteilung, klastische Formen noch völlig erhalten, undulöse Auslöschung, chlorit. Bindemittel        | 1,575                            |
| 93  | Taunusquarzit, Unterdevon, Schlangenbad/Taunus              | 0,07                     | klastische Quarzkörner durch quarzit. Bindemittel verbunden, starke undulöse Auslöschung durch Pressung, Spuren von Limonit und Serizit | 1,27                             |
| 95  | Quarzit, Devon Rochusberg bei Bingen/Rheinland              | 0,15                     | stark verzahnte Quarzkörner, quarzit. Bindemittel, etwas Serizitzement  | 1,54                             |
| 97  | Quarzit, St. Prie b. Paris, Frankreich                      | 0,3                      | dichtes Agg., geringe undulöse Auslöschung, kein Bindemittel  | 1,70                             |
| 99  | Quarzit, Schemnitz/Ungarn                                   | 0,5                      | dichtes Agg., direkter Kornkontakt, kaum Bindemittel, geringe undulöse Auslöschung  | 1,72                             |
| 104 | Quarzit, Butznickel, Ehlhalten/Taunus                       | 0,25                     | dichtes Agg., Pflastergefüge mit vorw. direktem Kornkontakt, feinkörnige klastische Beimengungen, geringe undulöse Auslöschung          | 1,595                            |
| 105 | Blauquarz, Tursasen-Land, Mittelnorwegen                    | 0,35                     | teilweise verzahnter Kornverband, pflasterartige Struktur, stellenweise dünnes Bindemittel, starke undulöse Auslöschung                 | 1,63                             |
| 107 | Quarzit, Silur, Eckertal/Harz                               | 0,3                      | porenlos, heterogene Körnigkeit, vorw. direkter Kornkontakt, geringe undulöse Auslöschung, vereinzelte Erzeinsprenglinge                | 1,635                            |
| 122 | Quarzit, Unterdevon, Rotenstein/Olpe, Westfalen             | 0,15                     | sehr homogener Kornverband, überwiegend Pflastergefüge, direkter Kornkontakt, Hämatit u. teilweise Serizit als Bindemittel              | 1,57                             |

In der letzten Spalte von Tabelle 1 sind die prozentualen Meßwerte der einzelnen Gesteine aufgetragen. Sie liegen zwar größenmäßig im gleichen Meßbereich, die Streuung ist aber nicht auf Einregelung

zurückzuführen, da ja nur dilatometrisch unregelmäßige Gesteine zum Vergleich herangezogen wurden. Die Ursache für das unterschiedliche Verhalten liegt demnach im Einfluß von Korngröße und Bindemittel.

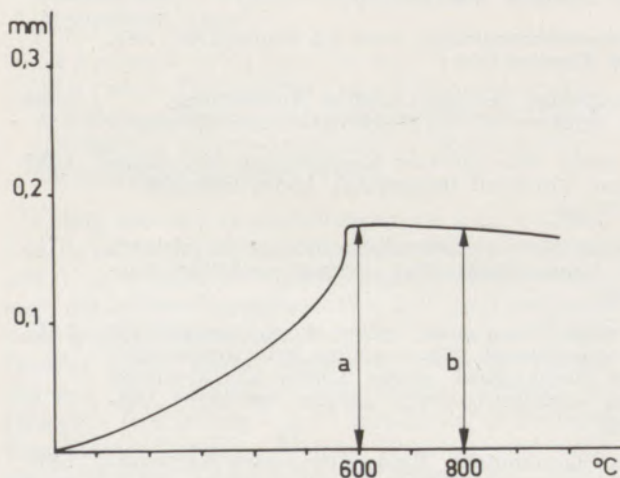


Abb. 1

Schematische Ausdehnungskurve von Quarz, bzw. quarz. Gestein

#### Wärmeleitfähigkeit und Dimensionierung der Prüfkörper

Bevor die weiteren Ergebnisse besprochen werden, sollen noch einige Ausführungen über Abmessungen der Dilatometerprüfkörper eingefügt werden. Alle thermisch ausgelösten Dehnungs- und Umwandlungserscheinungen an quarzitischen Gesteinen gehen von der Oberfläche des Kornes in das Korninnere vor sich. Das bedeutet, daß sich Aggregate mit geringerem Korndurchmesser rascher umwandeln als grobkörnige. Andererseits spielt aber das Wärmeleitvermögen für die im Verband innen liegenden Körper eine wesentliche Rolle. Hier erfolgt der Wärmetransport durch wenige große Einzelkörner besser und schneller als über viele kleine Körner mit der entsprechenden Zahl wärmedämmender Korngrenzen hinweg. Das heißt aber, daß beide Eigenschaften gegenläufig sind und einander in ihrer Wirkung eliminieren können.



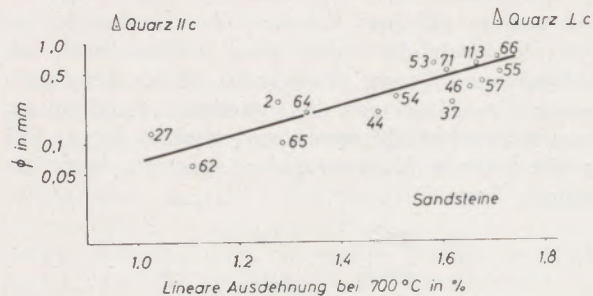


Abb. 2

Lineare Ausdehnung bei 700°C in ‰

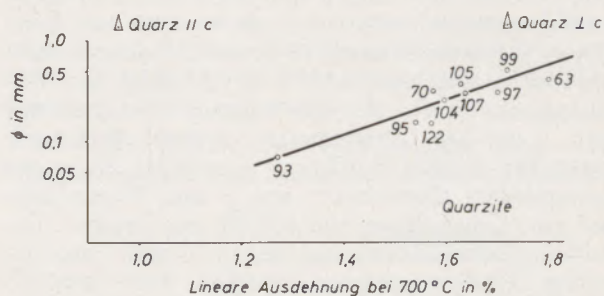


Abb. 3

Lineare Ausdehnung bei 700°C in ‰

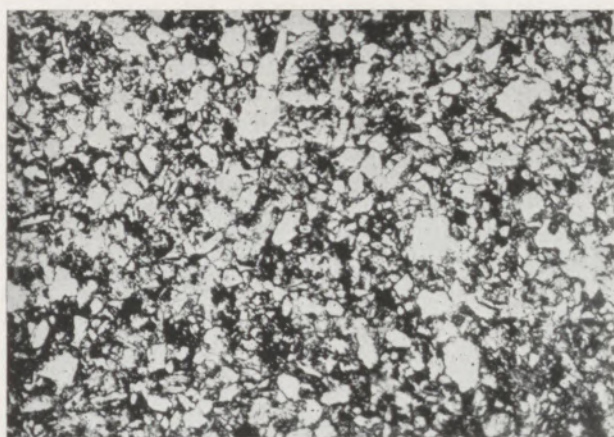


Abb. 4

Schliff-Gestein Nr. 62

Beispiel für Sandstein mit dichtem, nichtquarzitischen Bindemittel ohne direkten Kornkontakt der großen Körner

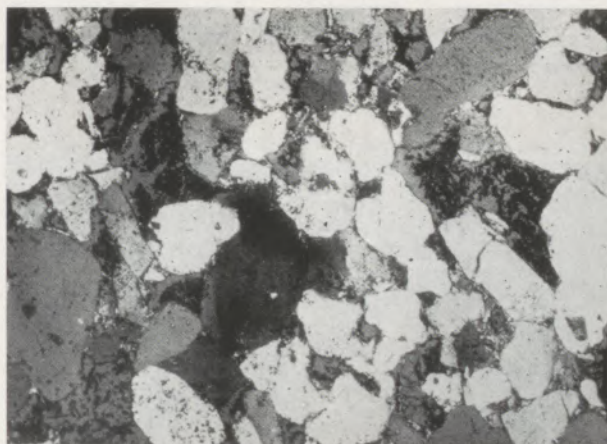


Abb. 5

Schliff-Gestein Nr. 37

Beispiel für wenig Bindemittel, jedoch geringen direkten Kornkontakt

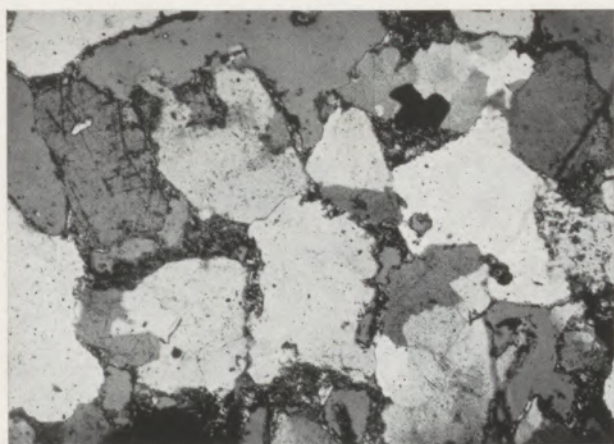


Abb. 6

Schliff-Gestein Nr. 53

Beispiel für wenig, z. T. glimmerhaltiges Bindemittel mit teilweise zerbrochenen Kornindividuen

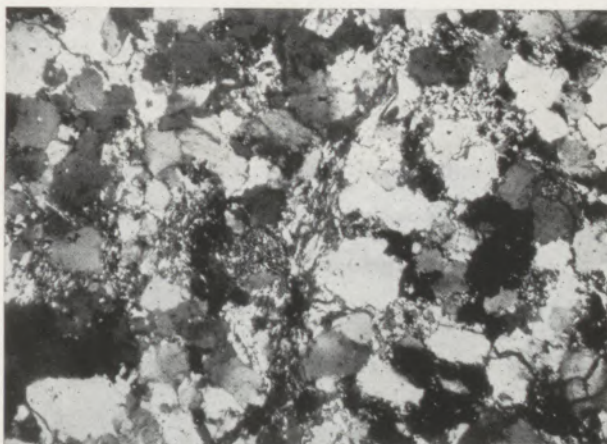


Abb. 7

Schliff-Gestein Nr. 44

Beispiel für wenig nichtquarzitischen Bindemittel bei teilweise gutem Kornkontakt über feinkörnigen Quarzdedritus

Von größerem Einfluß auf das thermische Verhalten ist die Dimensionierung des Prüfkörpers. Dies geht aus den Dehnungskurven von ungebrannten Quarzi-

ten in einer Veröffentlichung von Ernst, Forkel und v. Gehlen (1957) gut hervor. Trotz der von den Autoren eingesetzten geringen Aufheizgeschwindig-



keit von 1 °C/min zeigen, die wohl aus technischen Analogiegründen sehr groß dimensionierten Prüfkörper (100x40x40 mm) in ihrem Dehnungsverhalten erst bei weit über 600 °C den Abschluß des Modifikationswechsels. Bei den eigenen Versuchen mit dem Leitz'schen Dilatometer, System Bollenrath (1933/34), wurden Prüfkörper verwendet, die einen quadratischen Querschnitt von 5 mm Kantenlänge und eine Gesamtlänge von 20—40 mm besaßen. Die Aufheizgeschwindigkeit lag bei 3 °C/min, die jeweilige Höchsttemperatur zwischen 980—1000 °C.

#### Darstellung und Erläuterung der Meßergebnisse

In den Abb. 2 und 3 sind die prozentualen Dehnungswerte der Tabelle 1 in Abhängigkeit vom Korndurchmesser dargestellt. Aus Gründen der besseren Übersicht wurde ein halblogarithmischer Maßstab gewählt.

Die Dehnungswerte der Quarzit- und Sandsteinreihe zeigen, daß mit zunehmender Korngröße in beiden Gruppen die Ausdehnung stärker wird, in der Quarzitreihe sogar etwas mehr als bei den Sandsteinen. Das Ansteigen der mittleren Ausdehnung ist recht beträchtlich, wenn man berücksichtigt, daß den idealisierten Kurvengeraden folgende Funktion zugrunde liegt:

$$\lg K_{\phi} = f(AK_{\text{eff}})$$

$$\lg K_{\phi} = C \cdot AK_{\text{eff}} + B$$

$$\text{und somit } K_{\phi} = B' \cdot e^{C' \cdot AK_{\text{eff}}}$$

$$\text{und } AK_{\text{eff}} = \frac{\lg K_{\phi}}{C} - B$$

wobei  $K_{\phi}$  = Korndurchmesser und  $AK_{\text{eff}}$  = mechanisch gemessener effektiver linearer Ausdehnungs-

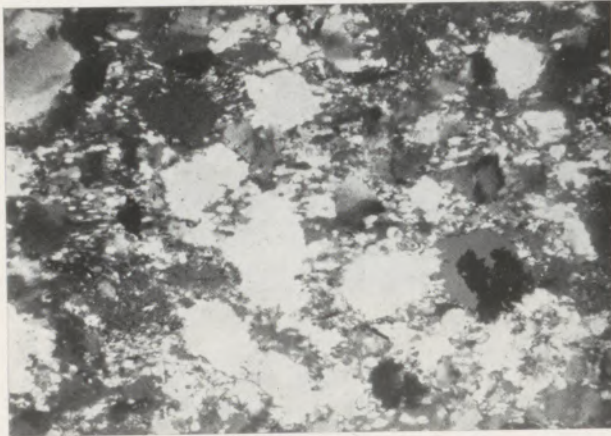


Abb. 8

Schliff-Gestein Nr. 46

Beispiel für randlich kataklastisch beanspruchte Körner mit feinkörnigem Quarzdedritus ohne direkten Kornkontakt der großen Kornindividuen

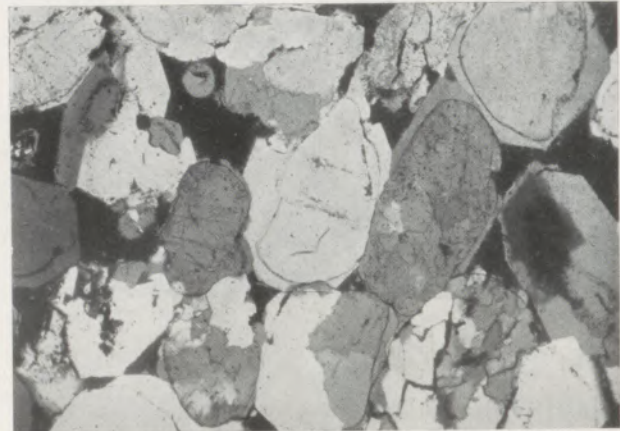


Abb. 9

Schliff-Gestein Nr. 66

Beispiel für einen Kristallsandstein mit sehr gutem Kornkontakt (kaum Bindemittel) und Sekundärwachstum der großen Körner

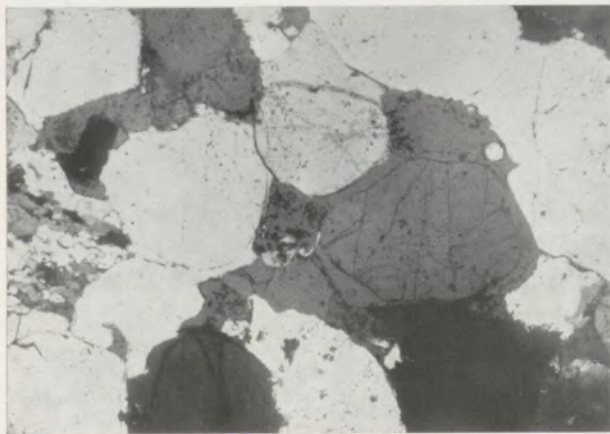


Abb. 10

Schliff-Gestein Nr. 71

Beispiel für einen Kristallsandstein mit polygonalem Pflastergefüge durch spätere Ankrystallisation, kein Bindemittel, direkter Kornkontakt

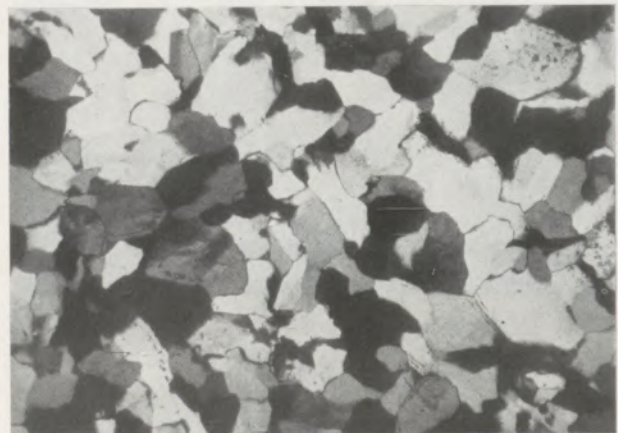


Abb. 11

Schliff-Gestein Nr. 99

Beispiel für sehr engen Kornverband, guten Kornkontakt bei nur spurenhafem Bindemittel



koeffizient in ‰ bedeuten. Für die Quarzitreihe berechnet sich C zu 1,73 und B zu  $4,385 \cdot 10^{-4}$  und für die Sandsteinreihe C zu 1,375 und B zu  $2,307 \cdot 10^{-3}$ .

Es ist einleuchtend, daß die gefundenen Meßwerte um die Kurve verteilt liegen, da der Kurvenzug nur den mittleren Verlauf in Abhängigkeit von der unterschiedlichen Korngröße bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen darstellt. Die Abweichungen beruhen im wesentlichen auf der petrogenetischen Heterogenität und dem noch erheblichen Einfluß des Bindemittels. Bei der Diskussion der Meßergebnisse darf nicht vergessen werden, daß bei den Faktoren, Korngröße und Bindemittel für das Ausdehnungsverhalten und somit für die Lage der Meßpunkte in den Diagrammen gemeinsam verantwortlich sind.

Zieht man die mikroskopischen Beobachtungen (Tab. 1, Spalte 4) noch mit heran, dann läßt sich ganz allgemein sagen, daß ein stark ausgebildetes, nicht-quarzitisches Bindemittel die Ausdehnung wesentlich herabsetzt. Dies beruht darauf, daß die einzelnen Quarzkörner während der Ausdehnung zwischen Zimmertemperatur und nahe  $1000^{\circ}\text{C}$  infolge ihrer mechanischen Stabilität einen derart starken Ausdehnungsdruck auf das allmählich deformierbar gewordene Bindemittel ausüben, daß ein Teil des Ausdehnungseffektes verloren geht und makroskopisch nicht mehr voll in Erscheinung treten kann. Es zeigte sich weiterhin, daß maximale Ausdehnung nur bei sehr reinen und meist grobkörnigen Varietäten mit direktem Kornkontakt auftrat. Das Bindemittel fehlte hier entweder vollständig oder trat nur als Anwachsstreifen zwischen den Porenwickeln in dünnster Lage auf. Dieser Bindemittelleffekt hat besonders in technischer Hinsicht (Kleg 1956) für die Verwendung von quarzitischen Gesteinen als Ausgangsmaterial zur Herstellung von hochfeuerfesten Ofengesteinen (Silikasteine) besondere Bedeutung (l. c. Ernst und Mitarbeiter 1957).

Aus dem Vergleich der beiden Kurvenzüge in Abb. 2 und 3 kann gefolgert werden, daß die grobkörnigen und bindemittelarmen, resp. sekundär verkieselten Sandsteine in ihrem thermisch bedingten Ausdehnungsverhalten von Zimmertemperatur bis  $1000^{\circ}\text{C}$  eine starke Verwandtschaft zu Quarziten entsprechenden Reinheitsgrades aufweisen. Dies bedeutet, daß für das thermisch bedingte Dilatationsverhalten quarzreicher Gesteine ( $\text{SiO}_2 > 95\%$ ) die genetischen Bedingungen von geringerem Einfluß sind als vergleichsweise Korngröße, Kornverband und Bindemittel.

\* \* \*

Für die freundliche Überlassung eines Dilatometers und die Gewährung von Sachmitteln möchte ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft meinen herzlichen Dank aussprechen. Herrn Prof. Dr. K. R. Mehnert bin ich für wertvolle Hinweise und eingehende Diskussion sehr zu Dank verbunden.

#### Zusammenfassung

An dilatometrisch nicht eingeregelter Quarziten und Sandsteinen werden die Einflüsse von Bindemittel und Korngröße auf das Ausdehnungsverhalten

gemessen. Es zeigt sich, daß feinkörnige Quarzite und Sandsteine mit reichlich nichtquarzitischen Bindemittel einen kleinen Ausdehnungskoeffizienten besitzen. Grobkörnige und bindemittelarme Varietäten dehnen sich bedeutend stärker aus.

Die Abhängigkeit des resultierenden  $AK_{\text{eff}}$  vom Korndurchmesser wird durch die Näherungsgleichung

$$AK_{\text{eff}} = \frac{\lg K_{\phi}}{C} - B \text{ beschrieben.}$$

Die gemessenen Extremwerte der Sandsteinreihe liegen bei  $1,03\%$  und  $1,715\%$ . In der Quarzitreihe betragen die Werte  $1,27\%$  und  $1,80\%$ . Die Angaben gelten für den Temperaturbereich von  $20^{\circ}\text{C}$  bis  $700^{\circ}\text{C}$ .

#### Summary

The influence of the bonding medium and the grain size upon their way of acting regarding dilation is investigated for not regulated quartzites and sandstones. It was found that fine-grained quartzites and sandstones with plenty of not quartzified bonding have a low coefficient of dilation. Coarse grained specimen, as well as those poor in bonding dilate considerably stronger.

The interdependence of the resulting  $AK_{\text{eff}}$  upon the diameter of the grain can be expressed by the approximate equation

$$AK_{\text{eff}} = \frac{\lg K_{\phi}}{C} - B.$$

The extreme values measured for the series of sandstone are close to  $1,03\%$  and  $1,715\%$ . In the series of quartzite the values vary from  $1,27\%$  and  $1,80\%$ . These figures are valid for the entire range of temperature from  $20^{\circ}\text{C}$  to  $700^{\circ}\text{C}$ .

#### Résumé

Les influences des liants et des grandeurs de grain sur le comportement de dilatation des quartzites et des grès non réglés dilatométriquement sont mesurées. L'auteur montre que les quartzites et les grès à grain fin aux liants contenant très peu de quartz possèdent un petit coefficient de dilatation. Les variétés à grain gros et pauvres en liants se dilatent considérablement plus fort.

La fonction du  $AK_{\text{eff}}$  (coefficient de dilatation) qui en résulte du diamètre de grain est décrite par l'équation d'approximation:

$$AK_{\text{eff}} = \frac{\lg K_{\phi}}{C} - B.$$

Les valeurs extrêmes mesurées de la série des grès se situent à  $1,03\%$  et  $1,715\%$ . Dans la série de quartzites les valeurs se montent à  $1,27\%$  et  $1,80\%$ . Ces indications valent pour un domaine de température de  $20$  à  $700^{\circ}\text{C}$ .



## Literaturverzeichnis

- Austin, J. B., Journ. Am. Ceram. Soc. 35 (1952), S. 243.  
Beals, R. J., und J. H. Lauchner, Ceram. Bull. 37 (1958), S. 486.  
Beals, R. J., und R. L. Cook, Journ. Am. Ceram. Soc. 40 (1957), S. 279.  
Bollenrath, F., Metallkunde (1933/34).  
Born, M., Atomtheorie des festen Zustandes. B. G. Teubner, Leipzig/Berlin (1923).  
Chatelier, H. le, Compt. rend. 108 (1889), S. 1046.  
Day, A. L., Sosman, R. B. und H. F. Hostetter, Am. Journ. Sci. 37 (1914), S. 1.  
Debye, P., Ann. d. Phys. 39 (1912), S. 789.  
Ernst, Th., Forkel, W. und Gehlen, K. v., Ber. Dtsch. Keram. Ges. 34 (1957), S. 321.  
Forkel, W., Keram. Ztschr. 7 (1955), S. 331.  
Forkel, W., Hdlbg. Beitr. Min. u. Petr. 5 (1955), S. 1.  
Grüneisen, E., Ann. d. Phys. 39 (1912), S. 257.  
Grüneisen, E., Ann. d. Phys. 55 (1918), S. 371.  
Grüneisen, E., Ann. d. Phys. 58 (1919), S. 754.  
Kleg, H., Silikattechnik 10 (1956), S. 419.  
Klemm, W., Tilk, W. u. Müllenheim, S. v., Z. Elektrochemie 34 (1928), S. 523.  
Kohler, K., Diss. Heidelberg (1953).  
Kohler, K., N. Jahrb. Mineral., Mh. (1955), S. 54.  
Kohler, K., Metall 10 (1956), S. 21.  
Lonsdale, Kathleen, Z. Krist. 112 (1959), S. 188.  
Mie, G., Ann. d. Phys. 11 (1903).  
Röntgen, W. C., Münch. Ber. (1912), S. 381.  
Steinwehr, H. E. v., Z. Krist. A 99 (1938), S. 292.  
Torkar, K. und Paulitsch, P., Z. f. phys. Chemie, n. F. 3 (1955), S. 34.