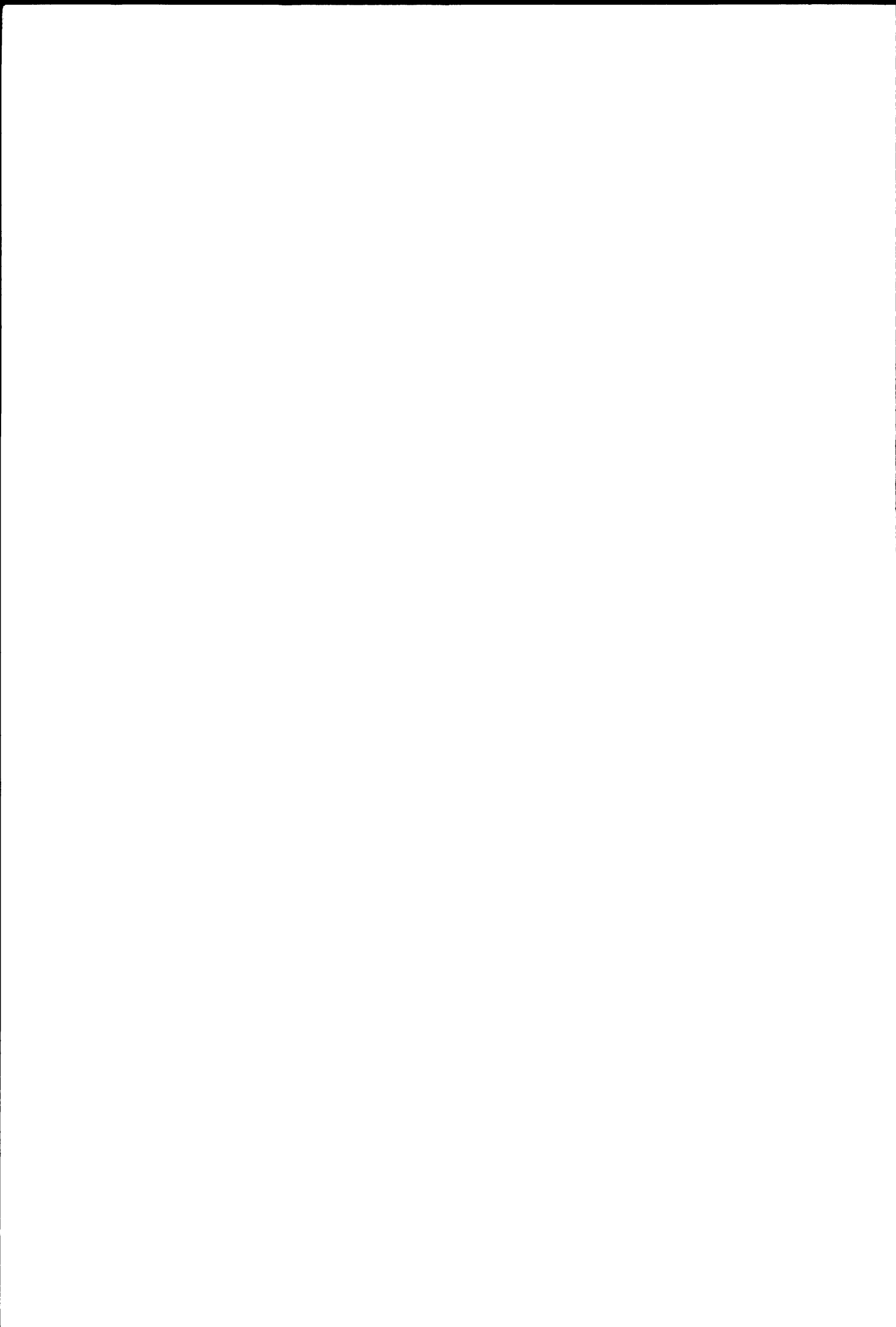


EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT
FÜR KOHLE UND STAHL

HOHE BEHÖRDE

Untersuchung an Silikasteinen
für Siemens-Martin-Ofengewölbe

Luxemburg, November 1958



SOEBEN ERSCHIENEN:

**UNTERSUCHUNGEN AN SILIKASTEINEN
FÜR SIEMENS-MARTIN-OFENGEWÖLBE**

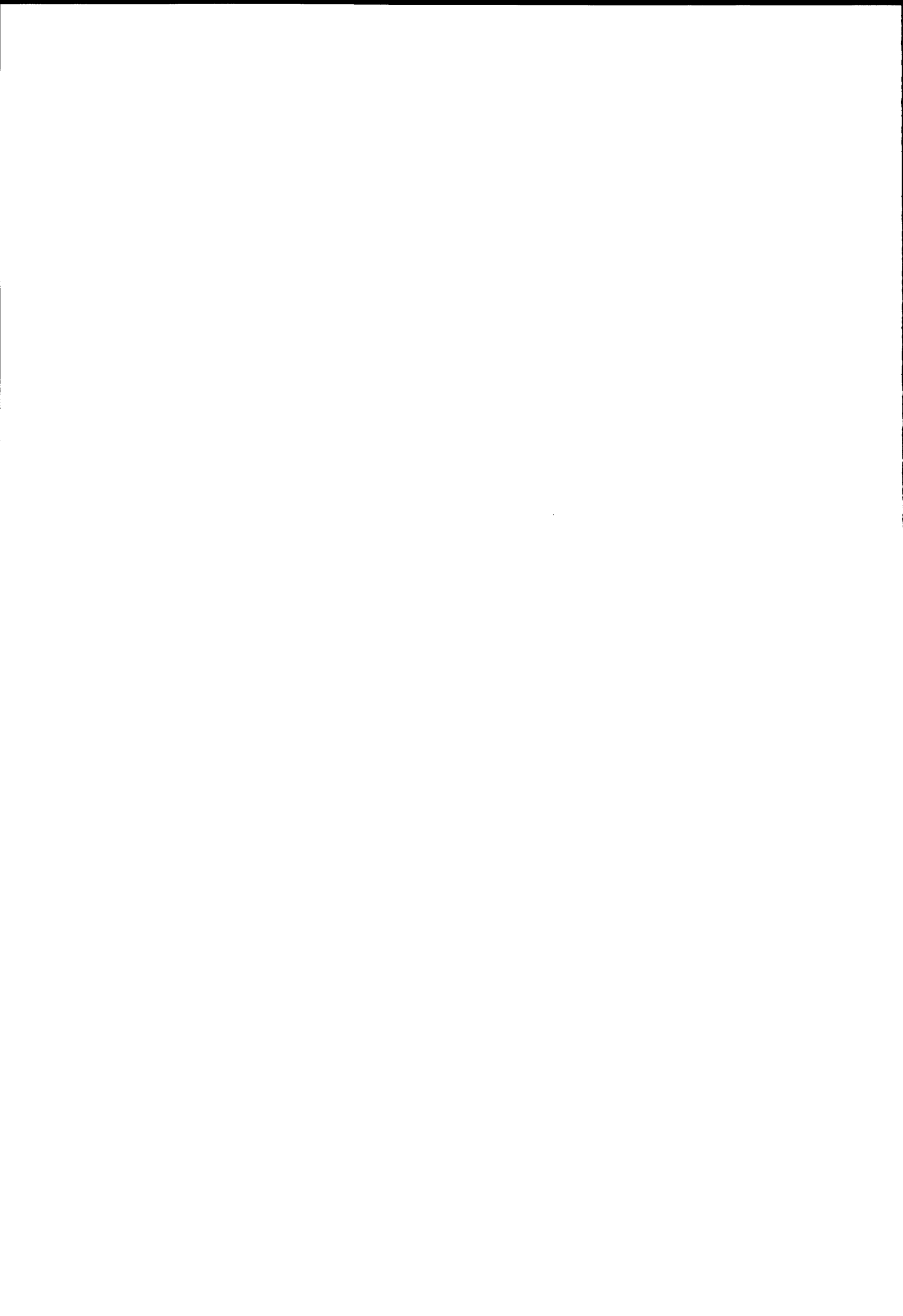
In dieser Broschüre werden die Ergebnisse internationaler Untersuchungen erläutert, die an vier Arten von Silikasteinen in dreizehn SM-Öfen in verschiedenen Stahlwerken der EGKS-Länder vorgenommen wurden. Es handelt sich um die ersten Forschungen, die mit finanzieller Beihilfe der Hohen Behörde auf der Ebene der sechs Länder der Gemeinschaft durchgeführt wurden.

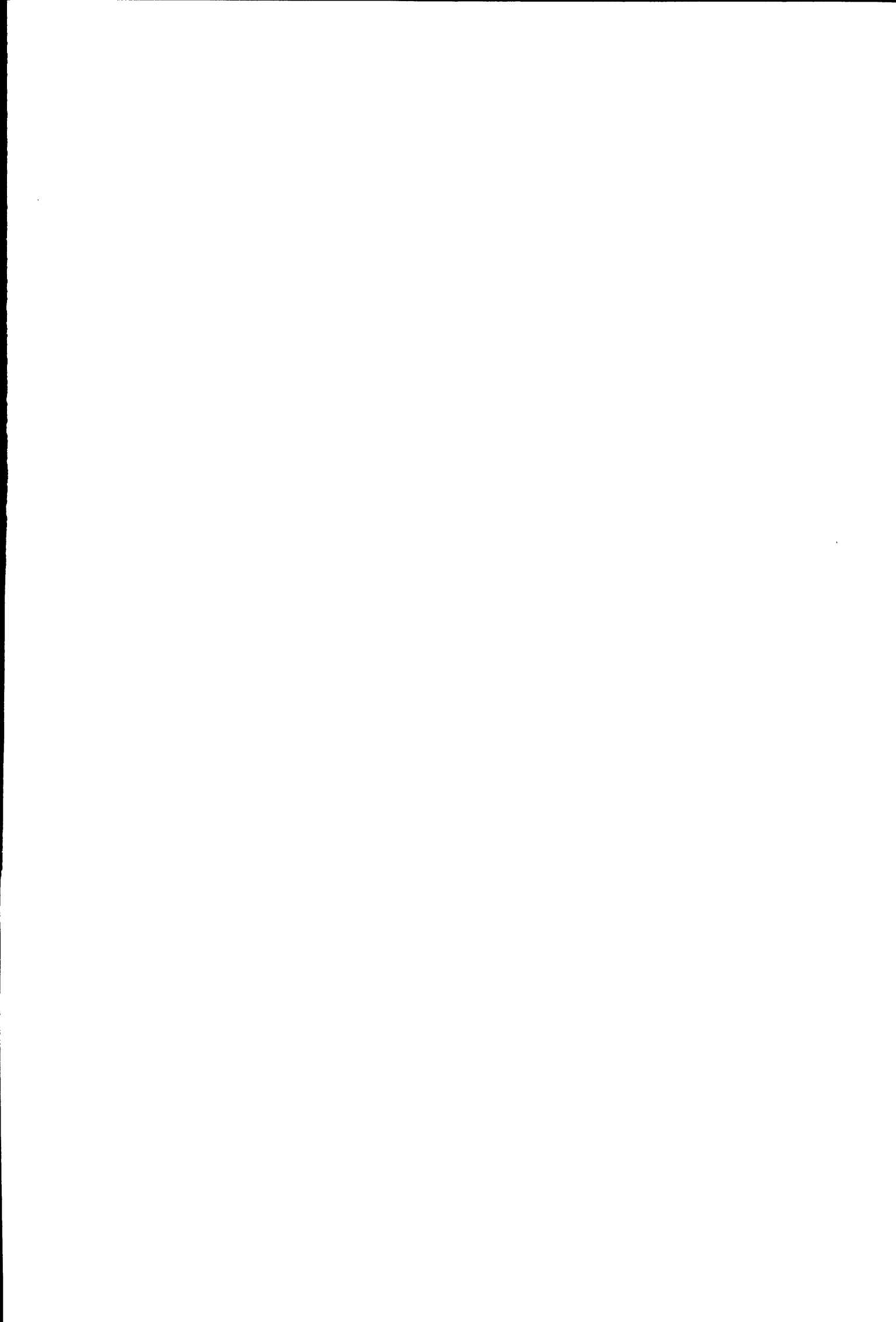
Diese Veröffentlichung enthält unter anderem einen Bericht über die Ofenreisen der Versuchsanlagen, eine Studie über den Verschleißvorgang und die Einflußgrößen dieses Verschleißes sowie einen Beitrag zur Frage eines Qualitätsindex.

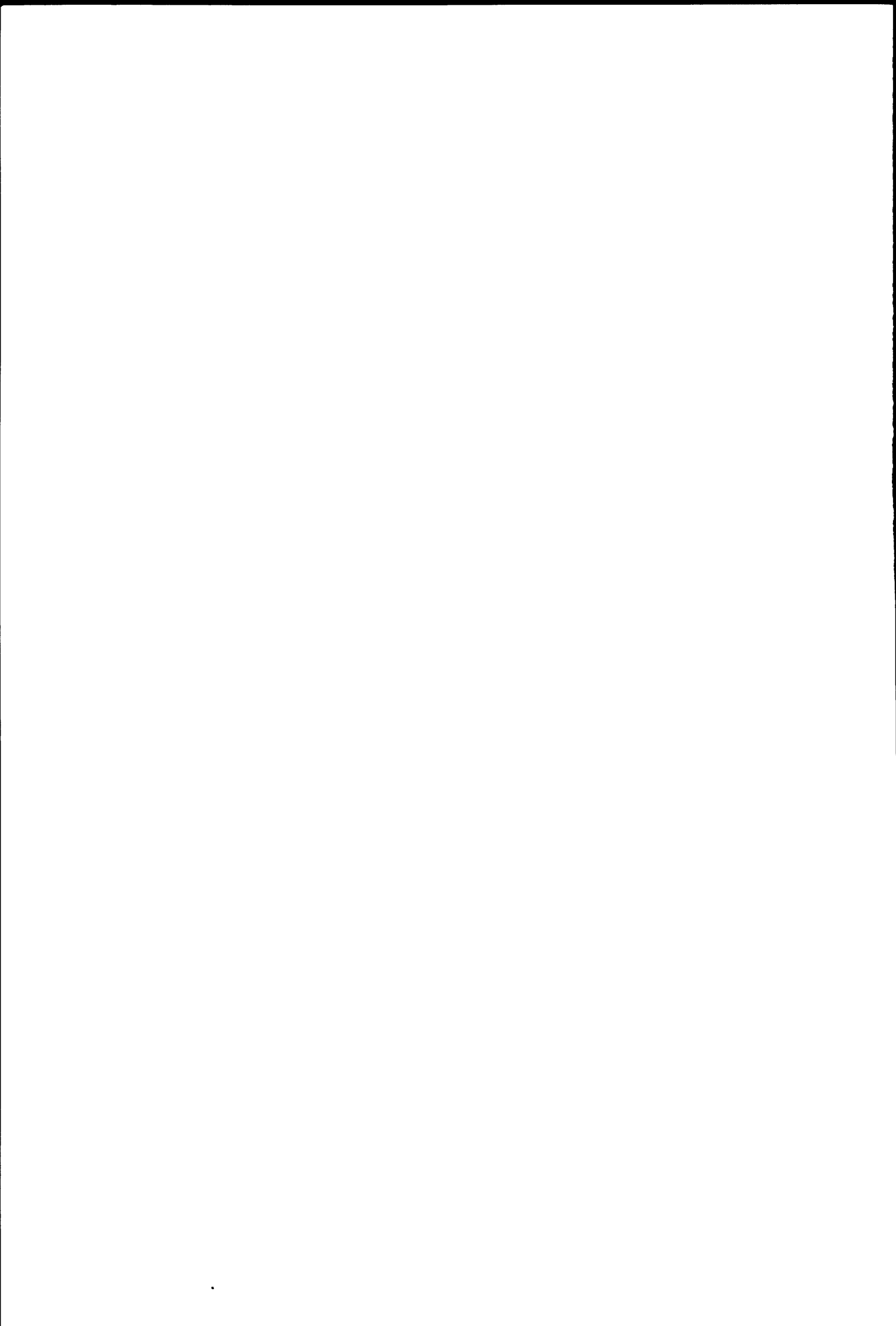
Die Broschüre behandelt den Einfluß der chemischen Bestandteile und der physikalischen Eigenschaften, welche die Steine während ihrer Herstellung erhalten, auf ihr späteres Verhalten im Ofen.

Mit Rücksicht auf ihren ausgesprochen technischen Charakter wurde die Broschüre im Einvernehmen mit dem Lenkungsausschuß der Versuche nur in Deutsch und Französisch veröffentlicht.

Sie ist erhältlich bei der Abteilung Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, Vertriebsbüro Luxemburg, Metzger Platz 2, zum Preise von bfrs 120,— (DM 10,—).







EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT
FÜR KOHLE UND STAHL

HOHE BEHÖRDE

Untersuchung an Silikasteinen
für Siemens-Martin-Ofengewölbe

Luxemburg, November 1958

Dieser Bericht enthält nur einige Literaturhinweise
auf wichtige, spezielle Veröffentlichungen.

Inhalt

	Seite
Vorwort	7
<i>Kapitel I</i> — Einleitung und Zweck der Versuche	9
<i>Kapitel II</i> — Problemstellung — Auswahl der Silikasteine	17
<i>Kapitel III</i> — Versuchsplan	19
<i>Kapitel IV</i> — Ergebnisse der Laborversuche an ungebrauchten Steinen .	27
<i>Kapitel V</i> — Programm und Meßmethoden in den Stahlwerken . . .	35
<i>Kapitel VI</i> — Bericht zu den Ofenreisen	45
<i>Kapitel VII</i> — Statistische Untersuchung der Ergebnisse	55
<i>Kapitel VIII</i> — Beitrag zur Frage eines Qualitätsindex	63
<i>Kapitel IX</i> — Untersuchung an gebrauchten Steinen	67
Schlußfolgerungen	89
Anschriften der Autoren	91



Vorwort

Gemeinschaftsarbeit zur Verbesserung der hüttenmännischen Praxis ist seit langem zur guten Tradition der Hüttenleute geworden. Zumeist machte sie bisher aber an den Ländergrenzen halt, und es war schon ein Zeichen besonderer Aufgeschlossenheit, wenn sich Fachleute aus zwei miteinander im Wettbewerb stehenden Ländern zur Lösung gemeinsamer Aufgaben zusammenfanden.

Bei der hier vorgelegten Arbeit, die Wege zur Verbesserung der Haltbarkeit von Siemens-Martin-Ofengewölben aufzufinden zum Ziel hat, konnte der Rahmen der Zusammenarbeit dank der Förderung durch die Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl insofern wesentlich weiter gefaßt werden, als Fachleute aus *allen* in der Gemeinschaft zusammengeschlossenen Ländern an der Planung oder Durchführung mitgewirkt haben.

Allen Beteiligten ist deshalb an dieser Stelle besonderer Dank zu sagen:

der *Hohen Behörde*, die diese Arbeiten gemäß § 55 des EGKS-Vertrages tatkräftig förderte,

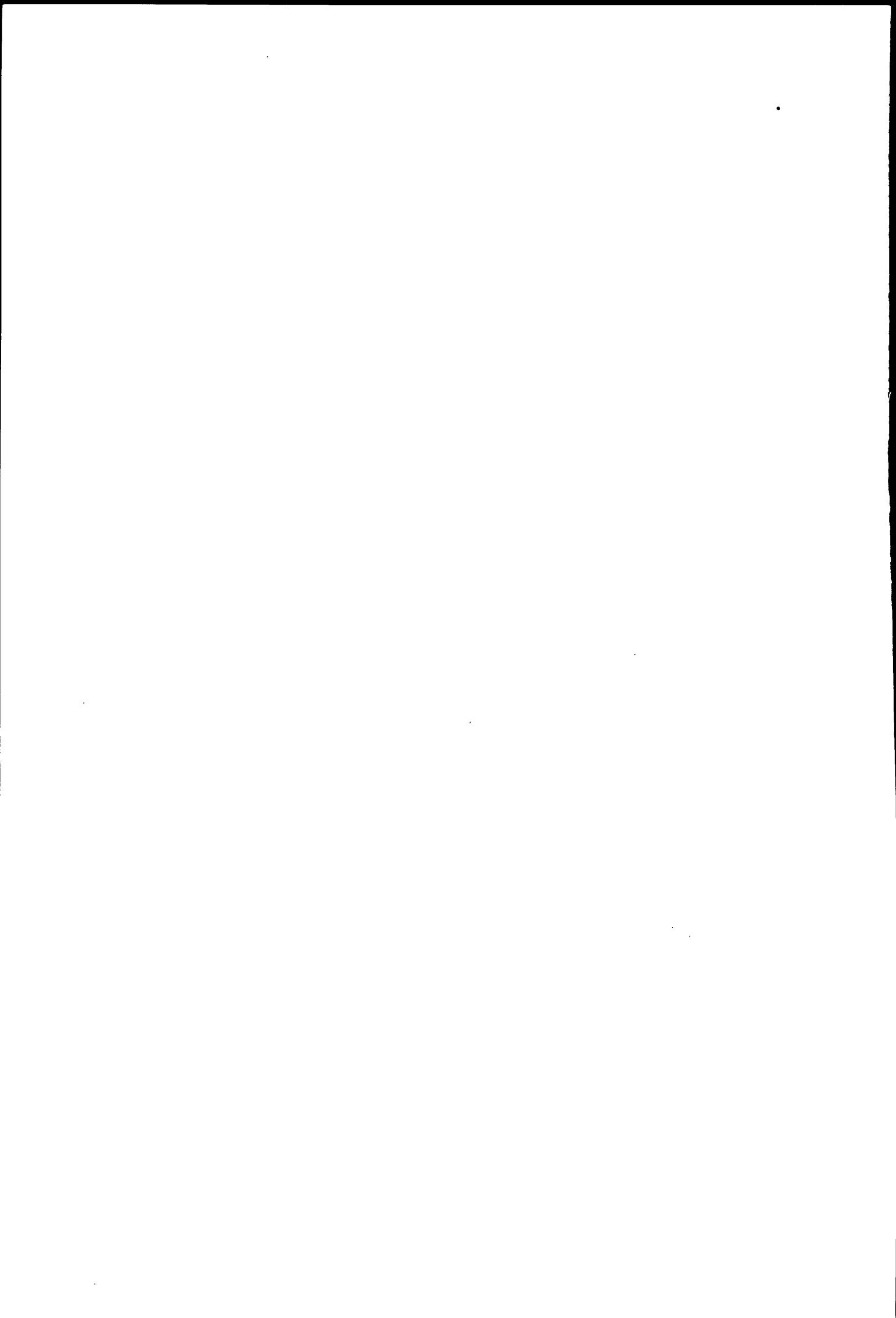
den *beteiligten Werken*, die in großer Aufgeschlossenheit ihre Anlagen für die geplanten Untersuchungen zur Verfügung stellten,

vor allem aber den *Ingenieuren*, die die Arbeiten trotz mancher Schwierigkeiten in vorbildlicher Zusammenarbeit durchgeführt haben.

So hat denn auch die Arbeit nicht nur fachlichen Nutzen gebracht, sondern auch zu einem engeren und besseren Zusammenarbeiten der Fachleute über die Ländergrenzen hinweg beigetragen.

K. Thomas

Präsident des Lenkungsausschusses der Versuche



KAPITEL I

Einleitung und Zweck der Versuche

Von A. RISTOW

ZUSAMMENFASSUNG

Neuentwicklungen im Siemens-Martin-Ofenbau. Starkes Vordringen der basischen Gewölbe und Oberöfen auf dem Kontinent. Der Zwang zur Verbesserung der Silikasteinqualität für Siemens-Martin-Ofengewölbe war Veranlassung zu diesem Vergleichsversuch. — Organisation der Versuche und Organisationsschema über die beteiligten Länder, Werke und Herren. Stand der Ofenleistung und Herdflächenleistung neuzeitlicher Siemens-Martin-Öfen als Kriterium für scharfen Ofengang. — Haltbarkeit der Ofengewölbe in Abhängigkeit von der Ofengröße bei saurer und basischer Zustellung.

Trotz zahlreicher neuer Stahlerzeugungsverfahren und der von den Erfindern daran geknüpften Hoffnungen wird das Siemens-Martin-Verfahren auch in den Ländern, die, gestützt auf ihre Ergrundlage, überwiegend Thomasstahl herstellen, nicht aufgegeben werden. Bei der Abwandlung und bei Neuentwicklungen der Siemens-Martin-Öfen geht man allerdings in verschiedenen Ländern zu neuen Ofenkonstruktionen⁽¹⁾ und immer mehr zur Verwendung basischer Steine in Gewölben, Köpfen, senkrechten Zügen und sogar in den obersten Kamergitterlagen über.

In Nordamerika und Großbritannien hält sich aber überwiegend noch der mit Silikagewölbe zugestellte Ofen, besonders bei den Öfen mit großem Fassungsvermögen. Hierfür ist vor allem der sehr hohe Preis der Chromerz-Magnesit-Steine, der auch in jüngster Zeit wiederum erheblich erhöht wurde, verantwortlich zu machen. Deshalb besteht für die Stahlwerke der Montanunionländer nach wie vor größtes Interesse daran, die Haltbarkeit der Silikagewölbe zu verbessern, nicht zuletzt im Hinblick auf die wesentlich breitere Rohstofflage für Quarzite.

Abgesehen von Österreich, wo sich die besten Magnesitlager befinden, haben die anderen Länder nach wie vor alle Veranlassung, der Haltbarkeit ihrer Silikagewölbe von Siemens-Martin-Öfen die größte

Aufmerksamkeit zu schenken, besonders nachdem in zunehmendem Maße schärfere, die Gewölbe stärker angreifende Beheizungsmitel, wie Öl, Teer und Erdgas, auch in Europa verwendet werden, während umgekehrt die milde Generatorgasheizung immer mehr zurücktritt. Die Gewölbehaltbarkeiten sind infolgedessen trotz der anerkanntswerten Bemühungen der Silikasteinhersteller im Vergleich zu den vergangenen Jahrzehnten immer mehr zurückgegangen, und zwar durch verstärkte Betriebsbeanspruchungen und erhöhte Schmelzleistungen, verbunden mit den höheren Temperaturen der genannten neuzeitlichen Beheizungsmitel.

Aus diesen Gründen war in Deutschland schon vor etwa zehn Jahren eine Gemeinschaftsarbeit zwischen Silikaerzeugern und einigen Siemens-Martin-Stahlwerken mit verschiedenen Silikasteinen unterschiedlicher Eigenschaften durchgeführt worden. Die damaligen Versuche gaben dem VDEh vor drei Jahren Veranlassung dazu, im Rahmen der Montanunion eine ähnliche Untersuchung unter den verschiedensten Betriebsbedingungen anzuregen. Die Versuche sollten diesmal auf eine möglichst breite Basis bei verschiedenen Ländern gestellt werden.

Der Ausschuß für technische Forschung bei der Hohen Behörde stimmte der Anregung zu, und die Hohe Behörde ermöglichte diese als notwendig und

⁽¹⁾ *Bartu, F., und Boelens, E.: Stahl und Eisen, 76 (1956), S. 152—158. Goebel, E., und Leopold, H.: Stahl und Eisen, 77 (1957), S. 1733—1739.*

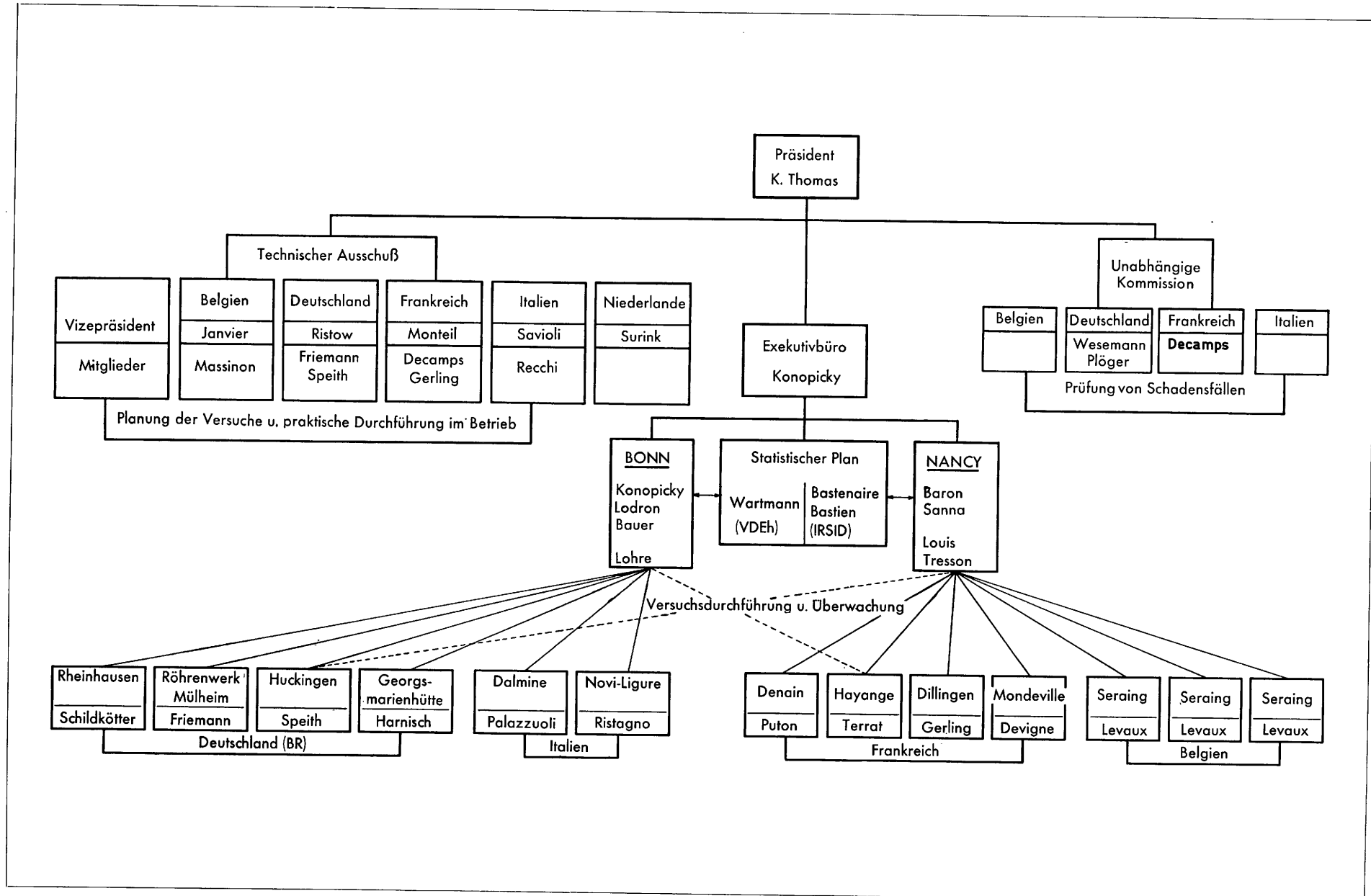


Bild 1: Organisationsschaubild

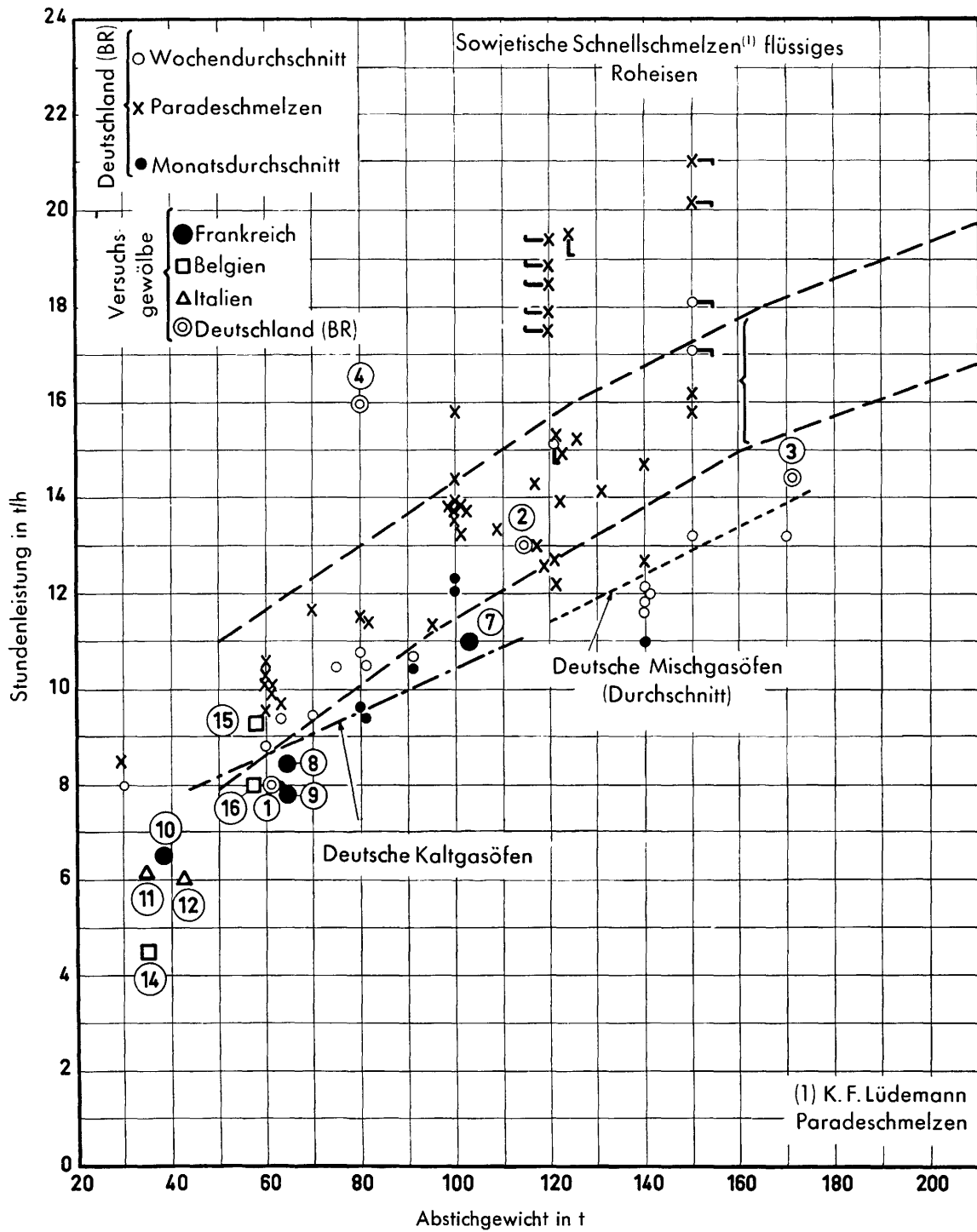


Bild 2: Stundenleistung und Abstichgewichte deutscher SM-Öfen [vgl. Stahl und Eisen, 74 (1954), Bild 1, S. 1734]

aussichtsreich anerkannten Arbeiten durch Bereitstellung entsprechender Geldmittel. Zur Durchführung der Arbeiten wurde ein Ausschuß aus Vertretern belgischer, deutscher, französischer und italienischer Werke gebildet, dessen Leitung K. Thomas übertragen wurde, Vertreter Ristow, Janvier, Monteil, Savioli (Organisationsschema in Bild 1). Von den beteiligten Ländern stellten dankenswerterweise vier 13 Versuchsofen in Ofengrößen von 35 bis 175 t Abstichgewicht mit den verschiedenartigsten Beheizungsmiteln und Ofenkonstruktionen zur Verfügung.

Für die später zu behandelnde *Gewölbehaltbarkeit* und die Rückschlüsse auf die Qualität der untersuchten Versuchssteine ist es unerlässlich, sich zuvor darüber klar zu werden, ob man einen scharf- oder mattgehenden Siemens-Martin-Ofen vor sich hat. Bei den geringen Unterschieden in den Temperaturspitzen einerseits und der Unsicherheit aller Temperaturmessungen im praktischen Betrieb andererseits ist die *Ofenleistung* nach Ansicht vieler Betriebsleute immer noch das sicherste Kriterium für die Höhe der Ofenbeanspruchung.

Es waren ursprünglich 16 Versuchsofen vorgesehen. Während der Durchführung der Versuche sind aber drei Öfen wegen Änderung der Beheizung und aus ähnlichen Gründen aus, so daß nur 13 Öfen verblieben. (Es fehlen also die Nummern 5, 6 und 13.)

Deshalb seien die Daten der 13 Versuchsofen mit den aus dem Schrifttum bekanntgewordenen

Daten ⁽¹⁾ der letzten Jahre und mit den veröffentlichten besten internationalen Ofenleistungen verglichen (Bild 2 und 4). In den folgenden Bildern 2 bis 5 sind Ofendaten aus der Bundesrepublik Deutschland ⁽¹⁾ aus den Jahren 1953 und 1954 mit den 13 Versuchsofen verglichen, wobei die Versuchswerke mit eingetragen sind. Bild 2 zeigt die Stundenleistung in t/h bei den Versuchsofen, verglichen mit deutschen und russischen Monats- bzw. Wochenbestzahlen ⁽¹⁾. Die viel Duplexmaterial und flüssiges Roheisen einsetzenden Werke liegen begreiflicherweise am höchsten (z. B. Ofen 4 mit 16 t/h bei 70 % flüssigem Einsatz, vorwiegend Duplexmaterial). Auch Ofen 2 liegt mit 13 t/h bei 22 % Duplexvormetall-Einsatz hoch. Die übrigen 11 Werke, die nicht duplizieren, gruppieren sich sehr gut um die Kurve der deutschen Durchschnittswerte herum, wobei der große Ofen 15 und der Ofen 7 etwas oberhalb der Durchschnittskurve liegen.

Da für die Ofenleistung die *Herdfläche* von ausschlaggebender Bedeutung ist, ist in Bild 3 die Herdfläche (Länge \times Breite) der *Schmelzleistung* in t/h gegenübergestellt. In diesem Bild sind die deutschen Durchschnittskurven für festen Einsatz und für flüssiges Roheisen eingetragen. Oberhalb dieser Durchschnittswerte liegen wieder Werk 4 und 2 (Thomasvormetall-Einsatz), ferner die beiden 60-t-Öfen 15 und 16, Ofen 1, Ofen 10 und Ofen 11, während die übrigen Versuchsofen, beurteilt nach der Herdfläche, weniger scharf getrieben worden

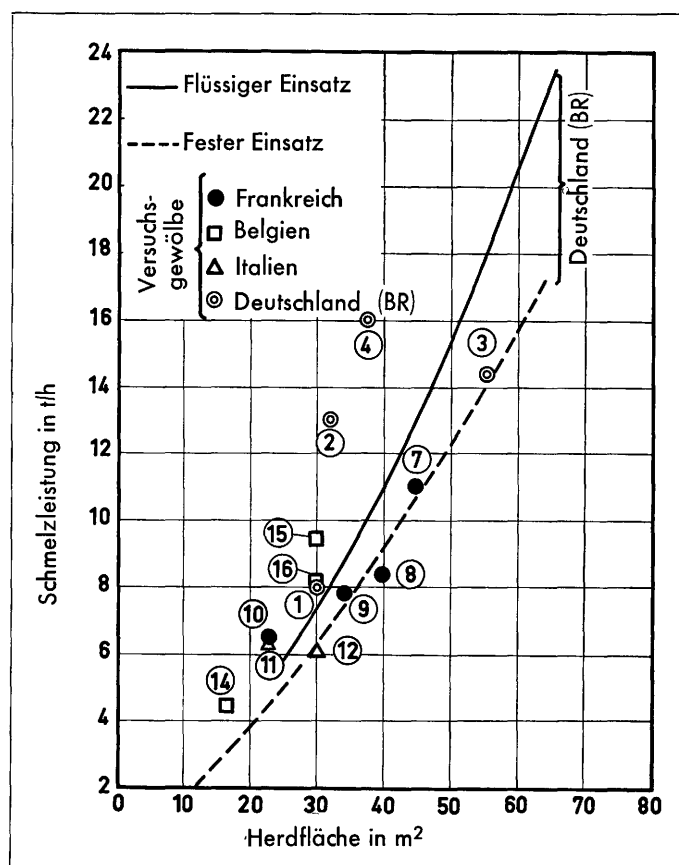


Bild 3: Herdfläche und Stundenleistung

⁽¹⁾ Stahl und Eisen, 74 (1954), S. 1734—1735.

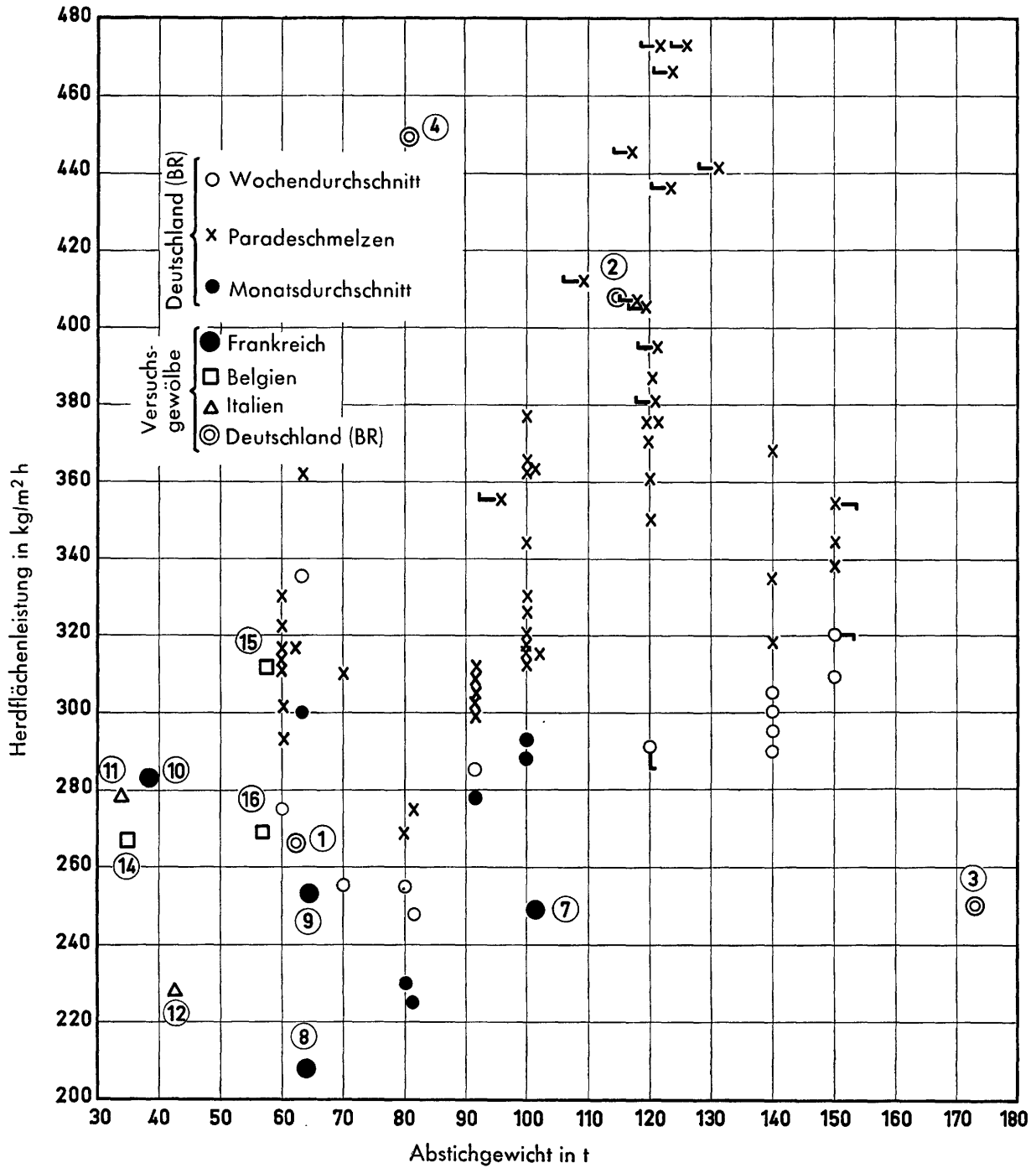


Bild 4: Herdflächenleistung und Abstichgewicht deutscher SM-Öfen [vgl. Stahl und Eisen, 74 (1954), Bild 2, S. 1735]

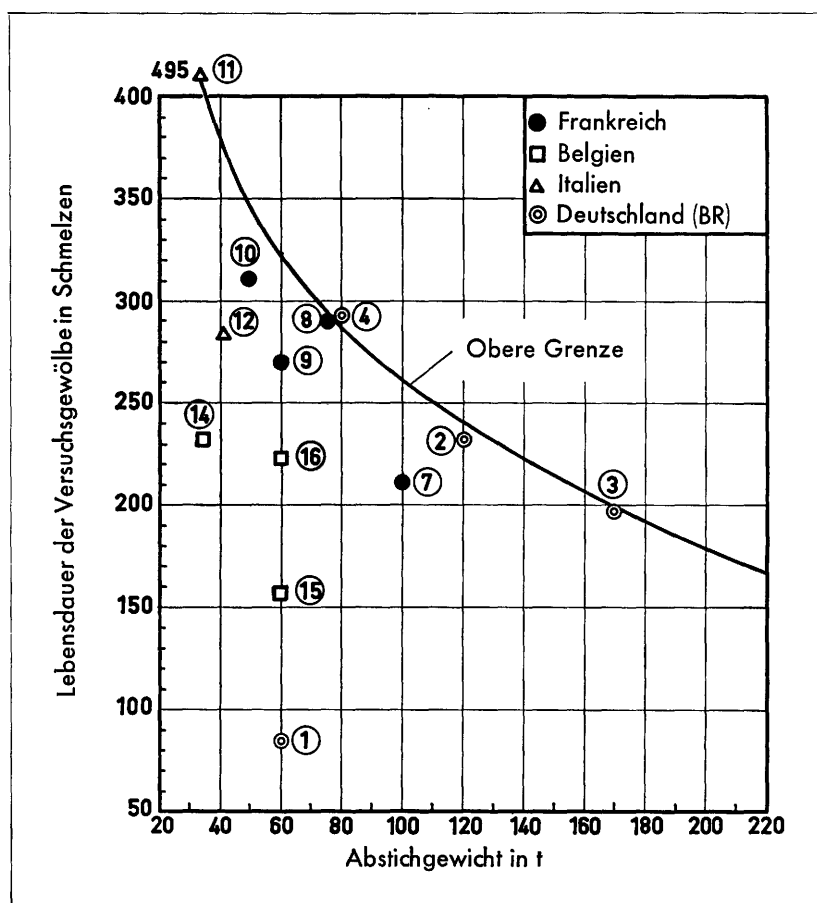


Bild 5: Lebensdauer von Silika-Gewölben

sind, was sich letzten Endes auf die Gewölbehaltbarkeit auswirken muß.

Da sich in einigen Ländern in jüngster Zeit die *Herdflächenleistung*, ausgedrückt in $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$ (oder in einem ähnlichen Kennwert), als Kriterium immer mehr durchsetzt, wird in Bild 4 auch diese Beziehung zur Beurteilung herangezogen. Unterhalb dieser Grenze liegen Ofen 7, 9, 8, 3 und 12, während die übrigen Versuchsofen sehr gute Herdflächenleistungen haben. Die beiden duplizierenden Ofen (Ofen 4 und 2) fallen — wie auch bei den anderen Bildern — vollkommen aus dem Rahmen heraus.

Die *Haltbarkeit* von Silikagewölben schwankte schon bei älteren Untersuchungen sehr stark. Trotzdem ist in Bild 5 der Versuch gemacht worden, wenigstens eine obere Begrenzungslinie für die Lebensdauer der Versuchsgewölbe in Abhängigkeit vom Abstichgewicht zu ermitteln. Bekanntlich kommen amerikanische große feststehende Ofen von rd. 250 t Abstichgewicht im Durchschnitt selten über 145 Schmelzen, während kleinere europäische Ofen unter 30 t Fassung bei Silikazustellung häufig 500 Schmelzen unter günstigen Einsatzbedingungen, insbesondere bei gutem Schrott und einem gleichmäßigen, den Ofen nicht sehr beanspruchenden Qualitätsprogramm (keine sehr weichen Schmelzen), erreichen. Bild 5 zeigt weiter, daß vor allem der Ofen des Werkes 1 und die beiden Ofen 14 und 15 weniger gute Gewölbehaltbarkeiten erzielt haben, weil sie nach Bild 3 sehr scharf getrieben wurden.

Die gleiche Beobachtung (1) über den starken Einfluß der Ofengröße auf die Gewölbehaltbarkeit wurde auch bei *ganzbasischen* Öfen gemacht, die bei kleineren Öfen von 30 t oft 2000 bis 2500 Schmelzen Lebensdauer erreichen, während man bei ganzbasischen 100-t-Öfen neuerdings schon mit 900 Schmelzen zufrieden sein muß und bei noch größeren neuzeitlichen Öfen von 180 t selten über 500 Schmelzen/Gewölbe erreicht werden (Bild 6).

Aus naheliegenden Gründen wurde versucht, eine Auswertung der Gewölbehaltbarkeit nach der Zahl der *Betriebsstunden* je Versuchsgewölbe in Abhängigkeit vom Abstichgewicht und der Herdfläche der Öfen durchzuführen. Es ergab sich aber so gut wie gar keine Abhängigkeit. Dies kann dahin gedeutet werden, daß der Verschleiß der Silikagewölbe hauptsächlich in den letzten zwei Stunden der höchsten Beanspruchung stattfindet, wenn die Gewölbeninnentemperatur nahe an den Tropfpunkt der Silikasteine herankommt. Die Betriebsstunden je Ofen geben wohl deshalb keine klare Abhängigkeit, weil bei den längeren Chargierzeiten besonders bei den großen Öfen die Silikasteingewölbe wieder Zeit haben, sich abzukühlen. Es genügt also vollkommen, entsprechend dem Bild 5 die *Chargenzahl* der Silikagewölbe zum *Abstichgewicht* in Beziehung zu bringen. Die statistische Auswertung hat aber trotz der geringen Zahl der Versuchsofen gezeigt, daß die Ofengröße tatsächlich einen wesentlichen Einfluß auf die Gewölbehaltbarkeit hat.

(1) Hütter, L.: Stahl und Eisen, 72 (1952), S. 1286.

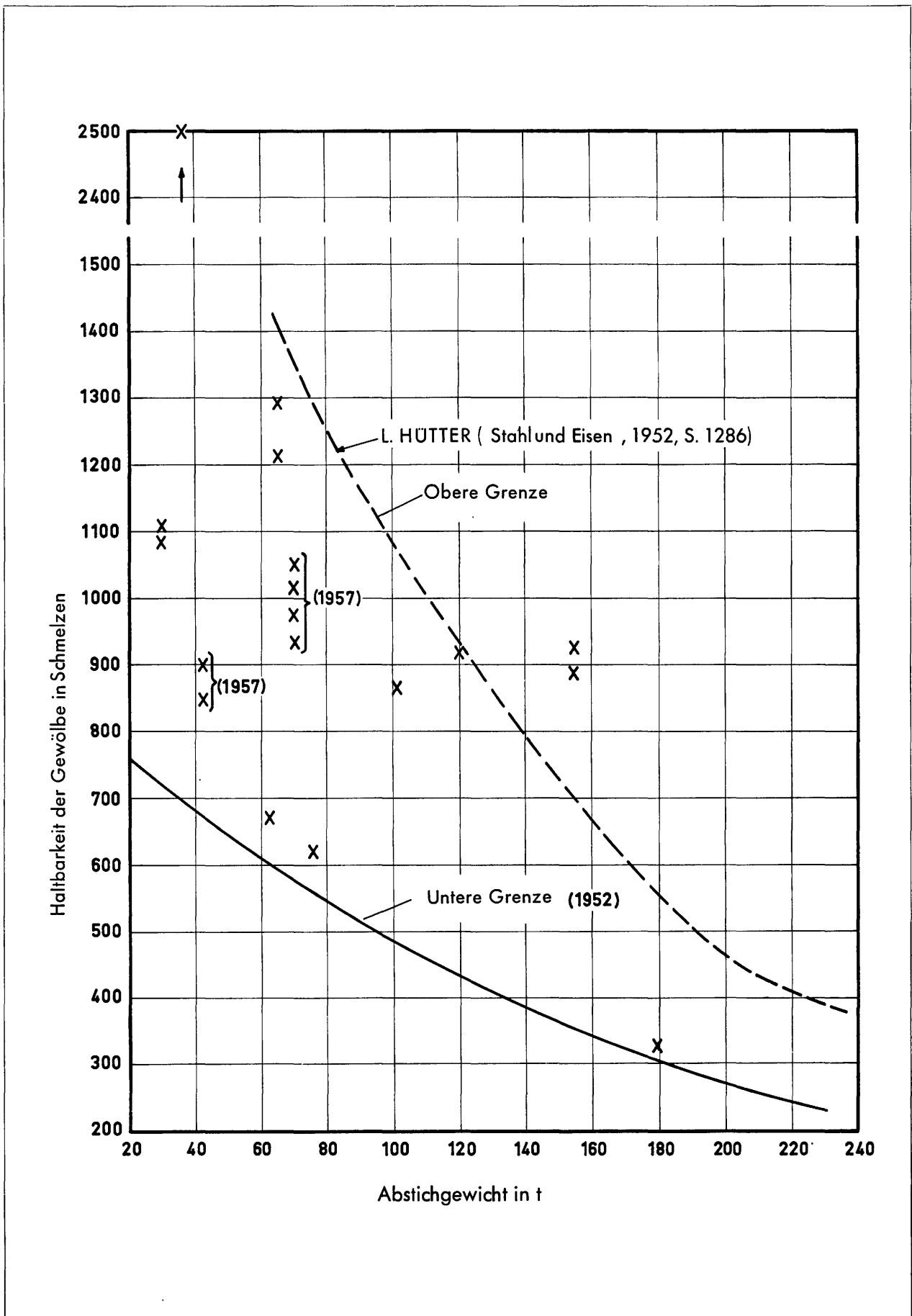
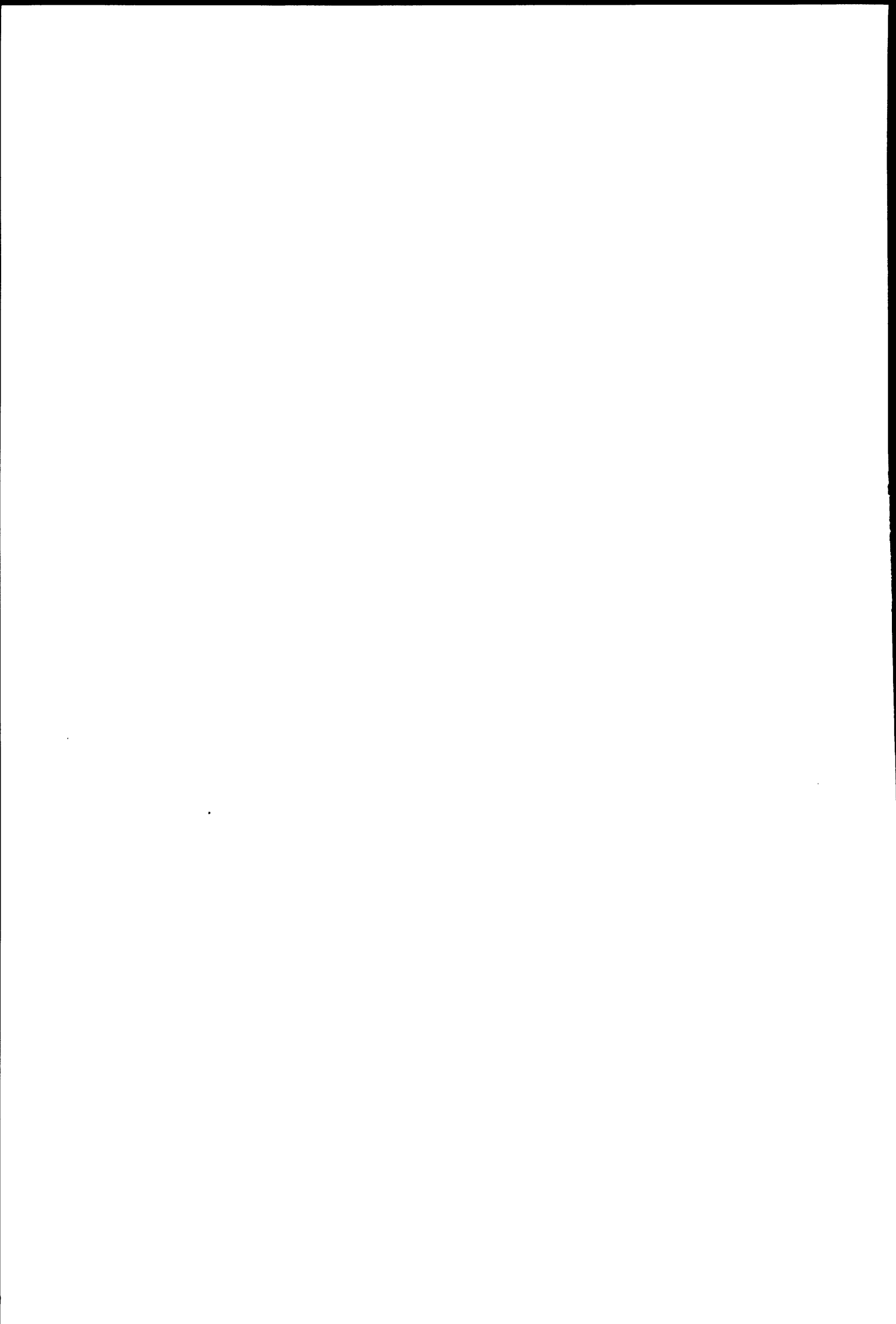


Bild 6: Gewölbehaltbarkeit aus den drei letzten Ofenreisen (1957) der neuzeitlichen ganzbasischen ölbeheizten SM-Öfen in Deutschland



KAPITEL II

Problemstellung – Auswahl der Silikasteine

Von K. KONOPICKY

Die vorliegenden Untersuchungen hatten den Zweck, die grundlegend kennzeichnenden Eigenschaften der Silikagewölbesteine zu ermitteln. Obwohl in der Stahlindustrie zur Zeit die Tendenz besteht, Chromerz-Magnesit-Gewölbe aus Gründen der forcierten Produktion zu verwenden, ist doch darauf hinzuweisen, daß bei größeren Öfen nach den vorliegenden deutschen⁽¹⁾ und ausländischen Erfahrungen Silikasteine wirtschaftlicher sind als basische Steine. Die von der Hohen Behörde der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl gestellte Aufgabe hat also durch die Entwicklung nicht an Aktualität verloren.

Beim Aufbau der Arbeit und bei der Auswahl der Versuchssteine wurden auch bisher vorliegende Erfahrungen⁽²⁾ verwertet; es ergaben sich somit noch vier Grundfragen, die einer Beantwortung bedurften:

a) Sind Silikasteine mittlerer Umwandlung, wie sie in Europa bevorzugt werden, nachteilig im Vergleich zu Steinen vollständiger Umwandlung?

b) In welchem Maße beeinflussen Tonerdegehalt und Porosität die Haltbarkeit der Silikasteine (der ungünstige Einfluß höherer Al_2O_3 -Gehalte im Silikastein ist durch die bisherigen Untersuchungen gesichert)? Wie erklären sich die unterschiedlichen Auffassungen⁽³⁾ ⁽⁴⁾ hierüber?

c) Ist TiO_2 als Flußmittel anzusehen bzw. innerhalb welcher Grenzen? Unterschiedliche Meinungen hierüber⁽²⁾ ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾ sollten erklärt werden.

d) Welche Prüfmethode bzw. Prüfziffern geben eindeutige Hinweise auf die Qualität der Silikasteine?

Gewählt wurden die folgenden vier Steintypen, wobei die Kombination von je zwei oder mehreren Steintypen je eine der gestellten Fragen beantwortet werden sollte:

TAFEL I

Steine	Al_2O_3	TiO_2	Porosität	Spezifisches Gewicht
A	m	h	n	n
B	m	m	n	h
C	n	m	m	h
D	n	0	m	n

0 = praktisch nichts	m = mittelmäßig
n = niedrig	h = hoch

Die Frage a sollte durch Vergleich der Ergebnisse an den B- und C-Steinen einerseits (mittlere Umwandlung) und an den A- und D-Steinen andererseits (vollständige Umwandlung) geklärt werden.

Die Frage b sollte durch Vergleich der Ergebnisse an den B- und A-Steinen einerseits (niedrige Porosität) und an den C- und D-Steinen andererseits (mittlere Porosität) geklärt werden.

Die Frage c sollte durch Vergleich der D-Steine (kein TiO_2) mit den B- und C-Steinen (mittlerer TiO_2 -Gehalt) und dem A-Stein (hoher TiO_2 -Gehalt) erläutert werden.

Die Untersuchung der gelieferten Steine ergab, daß nach diesem Schema gewisse Abweichungen von den Angaben in Prospekten und Angeboten

⁽¹⁾ Spetzler, E.: Stahl und Eisen, 76 (1956), S. 1734—1740 (Stahlwerksaussch. 614).

⁽²⁾ Konopicky, K.: Stahl und Eisen, 74 (1954), S. 1402—1413.

⁽³⁾ Rigby, G. R.: Iron Coal Trades Rev., 166 (1953), S. 77.

⁽⁴⁾ Birch, R. E.: Proc. nat. Open-Hearth Comm., Amer. Inst. Min. Metallurg. Eng., 27 (1944), S. 310—313.

⁽⁵⁾ Lynam, T. R., Nicholson, A., und Young, P. F.: „Low Alumina Silica Bricks, IV, Manufacture“, Trans. Brit. Ceram. Soc., 51 (1952), S. 113—135.

sowie auch von den Werten von vorab durchgeführten Kontrolluntersuchungen früherer Lieferungen bestanden. So wurde es z. B. als ungünstig angesehen, daß die A-Steine entgegen früheren Angaben und Lieferungen einen höheren Tonerdegehalt und eine etwas höhere Porosität aufwiesen und andererseits die B-Steine im spezifischen Gewicht etwas niedriger lagen als die C-Steine. Es sei jedoch vorweg bemerkt, daß die Aussagen der Ver-

suche trotzdem zu den gewünschten Zielen geführt haben.

Zur Ergänzung sollten auch die gebrauchten Steine der einzelnen Typen aus den verschiedenen Öfen systematisch untersucht werden, um — wenn möglich — weitere Aufklärungen zum Verschlackungsvorgang zu gewinnen und die Bedeutung der Prüfwerte an den Steinen im Anlieferungszustand abzugrenzen.

KAPITEL III

Versuchsplan

Von F. BASTENAIRE und M. BASTIEN

(Übersetzt aus dem Französischen)

ZUSAMMENFASSUNG

Das Hauptziel der Werksversuche war, die Haltbarkeiten der vier untersuchten Steinqualitäten zu vergleichen.

Um die Ergebnisse nachher zweckmäßig auswerten zu können, wurden die Versuche nach einem vorher festgelegten Plan ausgeführt. In jedes der 13 untersuchten Gewölbe wurden daher je zwei Paar Versuchsstreifen — symmetrisch zur kleinen Ofenachse — eingebaut.

Um die spezifischen Eigenschaften der Versuchsstreifen herausstellen zu können, wurden die Öfen einmal nach dem Abstichgewicht, zum anderen nach ihrem Beheizungsmittel klassiert. Den so klassierten Öfen wurden die Versuchsstreifen nach einem Schema zugeordnet, welches einem griechisch-lateinischen Quadrat entspricht. Die wesentlichen Faktoren, deren Einfluß auf die Haltbarkeit die Versuche abgrenzen sollte, waren:

Qualität der untersuchten Steine,
Position der Versuchsstreifen,
Beheizungsmittel,
Größe (Abstichgewicht) des Ofens.

1. Einleitung

Die Haltbarkeit des Gewölbes eines Siemens-Martin-Ofens hängt von zahlreichen Faktoren ab. Man weiß zum Beispiel, daß sie eine Funktion der erzeugten Stahlqualität, der geforderten Produktivität des Ofens, seiner Kapazität, des verwendeten Brennstoffs und sogar des Ofenganges ist.

Eine Veränderung dieser Faktoren, deren Einfluß an und für sich bekannt ist, genügt hingegen nicht, um die Unterschiede in den verschiedenen Gewölbehaltbarkeiten erklären zu können. Die Haltbarkeit unterliegt — und die Versuchsergebnisse bestätigen dies — einer beträchtlichen Streuung.

Um das Verhalten zweier verschiedener feuerfester Erzeugnisse verläßlich vergleichen zu können, muß man für beide Sorten über eine ziemlich große Anzahl von Ergebnissen verfügen. Diese Versuche

können hingegen nur mit beträchtlichen Mitteln unter der Voraussetzung einigermaßen gleicher Versuchsbedingungen in den zur Verfügung stehenden Siemens-Martin-Öfen wiederholt werden.

Bei einem Gemeinschaftsversuch ist es möglich, das Risiko einer Produktionsstörung auf eine größere Anzahl von Werken zu verteilen; zu gleicher Zeit werden jedoch die Versuchsbedingungen mit steigender Anzahl der am Versuch Beteiligten ungleicher. Man muß die Versuchsofen deshalb so einteilen, daß auch bei mehr oder weniger veränderten Bedingungen noch eine korrekte Auslegung der Ergebnisse möglich ist, was man dadurch erzielen kann, daß man einem gut gewählten Versuchsplan folgt.

Wenn Versuche unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt werden, muß man sich von vornherein darüber im klaren sein, daß keines der Meßergeb-

nisse des Verschleißes als absolut betrachtet werden kann, selbst wenn man einen Streubereich zuläßt. Da die unterschiedlichen Haltbarkeiten zum größten Teil durch Unterschiede in der Charakteristik der Öfen selbst sowie in ihrer Betriebsweise bedingt sind, werden die verschiedenen Steintypen am einfachsten und wirtschaftlichsten verglichen, indem man im gleichen Ofen Steine verschiedener Herkunft einsetzt.

Es war eine Reihe von technischen Schwierigkeiten zu überwinden, die sich aus der Verwendung verschiedener Steintypen in ein und demselben Gewölbe ergaben. Man mußte deshalb bemüht sein, ihre Anzahl möglichst gering zu halten. Auf Grund der allgemeinen Überlegungen für einen Plan nach den Regeln der Statistik können nur jeweils zwei Steinsorten im selben Ofen verwendet oder drei Sorten in vier Gewölbestreifen aufgeteilt werden. Für die Versuche wurde der zweite Vorschlag aufgegriffen.

Die Erfahrung zeigt, daß trotz der symmetrischen Konstruktion der Öfen der Verschleiß eines Gewölbes während einer Ofenreise meist asymmetrisch und in jeder Hälfte von der Mitte zu den Köpfen hin unterschiedlich ist. Es wurde deshalb vorsorglich so verfahren, daß es möglich war, die Positionen der Gewölbestreifen bei der Auswertung der Ergebnisse in Rechnung zu stellen.

Schließlich muß man ebenfalls die Streuungen berechnen, mit denen die Meßergebnisse behaftet sind, weil ja ein Unterschied zwischen zwei Haltbarkeiten nur unter Berücksichtigung dieser Streuungen als gesichert betrachtet werden kann.

2. Allgemeines über den Versuchsplan

Dieser Plan erlaubt es, die Verschleißfestigkeit von vier verschiedenen feuerfesten Steinen zu vergleichen, wenn man die folgenden Faktoren als systematische Faktoren für den Verschleiß in Betracht zieht:

a) Der Ofen mit allen seinen Eigenarten der Konstruktion und der Betriebsweise während der Ofenreise.

b) Der Ofenteil, in dem sich ein Streifen von Versuchssteinen befand (linke oder rechte Hälfte sowie Zentrum oder Seite).

Dieser Versuchsplan erlaubt es auch, den Einfluß zweier Charakteristiken des Ofens auf den Gewölbeverschleiß zu untersuchen. Die übrigen Einflußfaktoren waren praktisch durch die Wahl der Öfen gegeben, eine Wahl, die vor der Aufstellung des Versuchsplans erfolgte. Eine Untersuchung der Ofencharakteristik gestattete, sich nach Ablauf der Versuche davon zu überzeugen, ob die Öfen nach ihrem Abstichgewicht und dem verwendeten Brennstoff klassiert werden konnten, um den Einfluß dieser beiden Faktoren auf den Verschleiß zu untersuchen. Ausgehend von diesen beiden Charakteristiken, bildeten die so aufgestellten Klassen ziemlich homogene Gruppen, so daß es erlaubt war, die manchmal sehr unterschiedlichen Öfen als zu ein und derselben Klasse gehörend zu betrachten.

3. Aufbau des Plans

Das Ziel des Versuches war, das Verhalten von vier feuerfesten Steintypen zu vergleichen; es wurden hierfür 16 verschiedene Siemens-Martin-Öfen vorgesehen.

Man mußte die Steinqualitäten paarweise auf jeden Ofen verteilen und so versuchen, verschiedene Kombinationen aufzustellen. Die Gesamtzahl der verschiedenen paarweisen Kombinationen von vier Steinen ist gleich sechs, und da 16 nicht durch 6 teilbar ist, war es nicht möglich, den Versuch an jedem Steinpaar in gleicher Anzahl zu wiederholen, so daß man einen ausgeglichenen Plan nach unvollständigen Blöcken erhalten hätte.

Andererseits hat eine statistische Vor-Auswertung der Ergebnisse eines Gewölbes gezeigt, daß der Verschleiß dort von einer Stelle zur anderen sehr unterschiedlich sein kann. Man erachtete es deswegen als notwendig, die Position der Streifen in Rechnung zu ziehen. Geeignet hierfür wäre ein Versuchsplan vom faktoriellen Typus gewesen, bei dem jeder Stein in jeder Position jedem der vier Steine in einer anderen Position zugeordnet wird. Dieser Plan bestünde demnach aus einem Versuch von 16 Streifenpaaren, also einer Anzahl, die vollkommen mit der zur Verfügung stehenden Öfen übereinstimmte. Man wünschte hingegen, daß es möglich sein müßte, ohne technische Schwierigkeiten vier Versuchsstreifen in jedem Gewölbe unterzubringen. Weil dieser Plan weiterhin nichts anderes forderte als acht Öfen, wäre es also möglich gewesen, ihn zweimal auszuführen (Tafel II).

TAFEL II

		Position 1			
		A	B	C	D
Position 2	A	AA	BA	CA	DA
	B	AB	BB	CB	DB
	C	AC	BC	CC	DC
	D	AD	BD	CD	DD

Da sich aber die Anzahl der zur Verfügung stehenden Öfen bis zum Beginn der Versuche auf 13 verringert hatte, mußte man, um noch beiden Plänen gerecht zu werden, es so einrichten, daß man verschiedene Ergebnisse gleichzeitig beiden Versuchsplänen zuordnete. Die Pläne selbst blieben in ihrem Prinzip dieselben, und auch ihre Auswertungsmethode änderte sich dadurch nicht.

Um zu zeigen, in welcher Art diese Pläne es erlauben, gleichzeitig die Wirkung zweier zusätzlicher Faktoren (Ofengröße und Brennstoff) auf den Verschleiß der Gewölbe zu studieren, ist es angebracht, die Qualität eines feuerfesten Erzeugnisses eines Streifens entweder mit einem großen lateinischen Buchstaben oder mit einem kleinen griechischen Buchstaben korrespondierend mit der Position der Steine anzuschreiben.

Die Elemente der Tafel II korrespondieren somit mit denen der Tafel III wie folgt:

TAFEL III

		Stein in Position 1			
		A	B	C	D
Stein in Position 2	a	Aa	Ba	Ca	Da
	β	Aβ	Bβ	Cβ	Dβ
	γ	Aγ	Bγ	Cγ	Dγ
	δ	Aδ	Bδ	Cδ	Dδ

Man findet hier ohne jegliche Auslassung oder Wiederholung die Elemente eines lateinisch-griechischen Quadrats 4×4, die ebenso in der folgenden Ordnung angeschrieben werden können:

TAFEL IV

Aa	Bγ	Cδ	Dβ
Bβ	Aδ	Dγ	Ca
Cγ	Da	Aβ	Bδ
Dδ	Cβ	Ba	Aγ

In dieser neuen Tafel erscheint jeder lateinische und jeder griechische Buchstabe nur einmal, und zwar einmal in jeder Zeile und einmal in jeder Spalte. Wäre es möglich gewesen, daß alle Versuche,

ihnen noch die Öfen 8 und 7 (oder 3) und 9 und 4 zuteilte. Die Verteilung der Gewölbestreifen zeigt Tafel VI.

Die mittleren Gewichte der im Laufe der Versuche erzeugten Schmelzen — obgleich unterschiedlich von den vorausgesagten — gruppierten sich in jeder dieser Klassen um ziemlich verschiedene Mittelwerte. Das mittlere Abstichgewicht der Öfen der ersten Spalte der Tafel V betrug zwischen 32 und 39 t. In der zweiten Spalte der gleichen Tafel waren drei Abstichgewichte nahe bei 60 t, der vierte betrug 114 t (gegenüber gemeldeten 80 t).

4. Praktische Verteilung der Gewölbestreifen in den Öfen

Weil die Öfen von vornherein nicht so ausgesucht werden konnten, daß sie den aufgestellten Bedingungen genügten, mußte man versuchen, eine oder mehrere Aufteilungen der Gewölbestreifen so durchzuführen, daß die Ergebnisse nach der weiter vorn gezeigten Methode es erlaubten, den Einfluß des Brennstoffs und der Ofengröße aufzuzeigen.

Eine Gesamtuntersuchung der Ofentafel, welche die Öfen nach diesen beiden Kriterien einordnet, erlaubte es, zwei Gruppen von Öfen aufzustellen, in denen es möglich war, die Versuchsstreifen so zu verteilen, daß den Zeilen und Spalten des griechisch-lateinischen Quadrats die Klassen Brennstoff und Ofengröße korrespondieren.

Eine erste Gruppe umfaßte die Öfen 14, 15; 10, 2; 11, 1; 12, 16, in denen die Versuchsstreifen aufgeteilt wurden, wie es Tafel V zeigt:

TAFEL V
Öfen der Gruppe I

Brennstoff	Abstichgewicht					
	< 60 t			> 60 t		
	Nr. des Ofens	linke Hälfte	rechte Hälfte	Nr. des Ofens	linke Hälfte	rechte Hälfte
Koksofengas	14	Aa	Bγ	15	Cδ	Dβ
Mischgas	10	Bβ	Aδ	2	Dγ	Ca
Naturgas + Öl	11	Cγ	Da	1	Aβ	Bδ
Heizöl	12	Dδ	Cβ	16	Ba	Aγ

die den Elementen einer Zeile entsprochen hätten, in Öfen mit demselben Brennstoff hätten ausgeführt werden können, so hätte man nach der Theorie des griechisch-lateinischen Quadrats den Einfluß des Brennstoffs untersuchen können, weil hierfür die Quadratsummen der Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Zeilen herangezogen werden. Wäre es ebenso möglich gewesen, daß die Kolonnen mit der Klasse der Ofengröße korrespondiert hätten, so hätte man ebenso den Einfluß der Ofengröße auf den Gewölbeverschleiß untersuchen können.

Eine zweite Gruppe wurde derart aufgestellt, daß man die Öfen 10, 2; 11, 1 wiederum heranzog und

In der Gruppe II haben sich die wirklichen Abstichgewichte der beiden Spalten gegenseitig leicht überschritten; das geringste Abstichgewicht der rechten Spalte war geringer als das höchste der linken Spalte.

Wir haben bereits erklärt, daß man sich, vor allem bezüglich des Abstichgewichtes, mit einer größeren Einordnung zufriedengeben mußte, besonders auch weil die gemeldeten Abstichgewichte nicht mit den wirklichen Abstichgewichten übereinstimmten. So waren denn die wirklichen mittleren Abstichgewichte der Öfen der ersten Spalte der Tafel VI etwa 40 t und betrug 89 bzw. 106 t für die der zweiten Spalte, je nachdem ob man den Ofen 7 oder

TAFEL VI
Öfen der Gruppe II

Brennstoff	Abstichgewicht					
	< 80 t			> 80 t		
	Nr. des Ofens	linke Hälfte	rechte Hälfte	Nr. des Ofens	linke Hälfte	rechte Hälfte
Generatorgas	8	A α	B γ	7 oder 3	C δ	D β
Mischgas	10	B β	A δ	2	D γ	C α
Naturgas + Öl	11	C γ	Da	1	A β	B δ
Mischgas + Öl	9	D δ	C β	4	B α	A γ

den Ofen 3 in Betracht zog. Es existierte somit eine starke Differenz zwischen den mittleren Abstichgewichten dieser Klasse.

Parallel hierzu änderten mehrere Werke ihre Beheizungsart zu einem Zeitpunkt, als der Versuchs-

5. Auswertung der Ergebnisse

a) Allgemeine Methode

Die Ergebnisse dieses Versuchsplans können nach der unter dem Namen „Varianzanalyse“ bekannten statistischen Methode ausgewertet werden.

TAFEL VII

Tatsächlich verwendeter Brennstoff in den Öfen der Gruppe I während der Versuche (1)

Nr. des Ofens	Brennstoff	Nr. des Ofens	Brennstoff
14	Koksofengas	15	Koksofengas + Heizöl
10	Hochofengas + Koksofengas	2	66 % Koksofengas + 33 % Generatorgas
11	75 % Methan + 25 % Heizöl	1	70 % Naturgas (zu 76 % Methan) + 30 % Heizöl
12	Heizöl	16	Koksofengas + Heizöl

(1) Die angegebenen Prozentwerte entsprechen dem Kalorienanteil.

TAFEL VIII

Tatsächlich verwendeter Brennstoff in den Öfen der Gruppe II während der Versuche

Nr. des Ofens	Brennstoff	Nr. des Ofens	Brennstoff
8	Generatorgas	7 und 3	3) 78 % Generatorgas + 22 % Heizöl
10	Koksofengas + Hochofengas	2	7) Generatorgas 66 % Koksofengas + 33 % Generatorgas
11	75 % Methan + 25 % Heizöl	1	70 % Naturgas (zu 76 % Methan) + 30 % Heizöl
9	Mischgas + Generatorgas	4	Generatorgas + Heizöl

plan bereits festlag und die Versuche bereits begonnen hatten. Insgesamt waren jedoch die wirklich verwendeten Brennstoffe von je zwei Öfen, die in den Tafeln V und VI in der gleichen Zeile standen, ähnlich. Sie sind in den Tafeln VII und VIII zusammengestellt.

Mit jeder systematischen Wirkung einer Einflußgröße korrespondiert bei der Varianzanalyse eine Rechengröße, die man mit Varianz dieses Faktors bezeichnet. Diese wird selbstverständlich beeinflusst durch die zufälligen Fehler, die jedem der Rechnung zugrunde gelegten Ergebnis anhaften; es ist somit

nicht nur nach dem numerischen Wert möglich, eine Abschätzung des korrespondierenden Faktors vorzunehmen, sondern ebenso, indem man eine weitere Rechengröße, die man Restvarianz nennt, zum Vergleich heranzieht, und die eine Abschätzung des mittleren Fehlerquadrats darstellt.

Weiterhin ist der mathematische Ausdruck der Varianz eines beliebigen Faktors derart, daß, wenn kein Einfluß besteht, die Varianz eine Abschätzung der Fehlervarianz darstellt, die unabhängig von der Abschätzung der Restvarianz ist. Da das Wahrscheinlichkeitsgesetz des Verhältnisses zweier Varianzen bekannt ist, kann man feststellen, ob die aus den Ergebnissen wirklich gefundenen Größen mit der folgenden Hypothese vereinbar sind oder nicht, nämlich ob der untersuchte Faktor eine Wirkung hat oder nicht. Wenn dieses Verhältnis größer ist als dasjenige, was man als Sicherheitsgrad definiert, so kann man daraus schließen, daß der Faktor eine reelle Wirkung auf die zu untersuchende abhängige Variable hat. Im entgegengesetzten Falle sagt man, daß die erzielte Wirkung nicht kennzeichnend ist.

Es ist uns unmöglich, im Rahmen des vorliegenden Berichtes eine Ableitung für sämtliche verwendeten Formeln zu geben. Es werden daher nur die theoretischen Ausdrücke sowie die Tafel der Varianzanalyse gebracht.

b) Verminderung der gegebenen Werte

Wie wir noch weiter im Kapitel, welches die Auswertung der Ergebnisse betrifft, sehen werden, ist der Verschleiß eines jeden Gewölbestreifens durch einen Parameter charakterisiert worden, den man dadurch erhält, daß zu verschiedenen Zeitpunkten der Ofenreise Messungen an verschiedenen Stellen des Gewölbestreifens ausgeführt werden. Das Problem stellt somit nur eine einzige abhängige Variable heraus, bei der jeweils ein gegebener Wert einem Versuchsstreifen zugeordnet wird.

c) Bemerkungen

1. Indizes

Es genügt, sich auf die Tafel III zu beziehen, um festzustellen, daß jedes Streifenpaar durch die Steintypen gekennzeichnet werden kann, die in der Position 1 bzw. 2 verwendet wurden, das heißt durch ein System zweier Indizes j, k , wobei j der Index derjenigen Steintypen ist, die in der Position 1 steht, und k der Index derjenigen Steinqualität, die in der Position 2 steht.

Die Werte dieser beiden Indizes j und k bestimmen somit die Nr. 1 der Zeile und die Nr. c der Spalte in dem Schnittpunkt, in dem das betrachtete Kombinationspaar j, k sich im griechisch-lateinischen Quadrat befindet (Tafel IV).

Wenn man schließlich noch die vier Spalten des griechisch-lateinischen Quadrats zu je 2 und 2 einander zuordnet (Tafel V und VI), muß man noch

einen letzten Index t einführen, der die Ofengröße charakterisiert ($t = 1$ oder 2).

2. In der Varianzanalyse verwendete Summen und Differenzen

Die verschiedenen Quadratsummen der Varianzanalyse werden vollständig durch die folgenden Ausdrücke definiert:

D_{jk} : Unterschied zwischen dem spezifischen Verschleiß des Streifens der Qualität j in der Position 1 und dem spezifischen Verschleiß des Streifens der Qualität k in der Position 2 in dem durch j, k definierten Paar.

S_{jk} : Summe der gleichen Verschleißzahlen.

Bei der Ausführung der Berechnung treten auf:

1. Die Summen von D_{jk} für einen gegebenen Wert von j (Summe der Unterschiede des Verschleißes zwischen den beiden Streifen jedes Paares für jede Spalte der Tafel III):

$$D_{.j} = \sum_k D_{jk}$$

2. Die Summen der Unterschiede des Verschleißes D_{jk} für einen gegebenen Wert von k (Summe der Unterschiede, die den Zeilen der Tafel III entsprechen):

$$D_{.k} = \sum_j D_{jk}$$

3. Die Gesamtsumme der Differenzen:

$$D = \sum_{j,k} D_{jk}$$

4. In ähnlicher Art die Summen des Verschleißes in den Paaren, wo der Stein j in der Position 1 ist:

$$S_{.j} = \sum_k S_{jk}$$

5. Die Summen des Verschleißes für einen gegebenen Wert von k :

$$S_{.k} = \sum_j S_{jk}$$

6. Die Summen des Verschleißes, die mit einem gegebenen Brennstoff korrespondieren (d. h. entsprechend einer Zeile der Tafel IV):

$$S_{.l} = \sum S_{jk} \text{ entlang der Zeile } l.$$

7. Die entsprechenden Summen für die Spalten:

$$S_{.c} = \sum S_{jk} \text{ entlang der Spalte } c.$$

8. Die Summe nach dem Abstichgewicht:

$$S_t = \sum S_{jk} \text{ für alle halben Öfen desselben Abstichgewichtes.}$$

9. Die Gesamtsumme:

$$S = \sum_{j,k} S_{jk}$$

d) Ausdrücke der Varianzanalyse

Die Ausdrücke der den Faktoren entsprechenden Quadratsummen werden in der Tafel der Varianzanalyse (Tafel IX) aufgezeigt.

Die Varianz (oder das mittlere Quadrat) eines jeden Faktors erhält man, indem man die betreffende Quadratsumme durch die Anzahl der Freiheitsgrade dividiert.

Die hier zur Anwendung kommende Varianzanalyse ist nicht vom einfachen klassischen Typ, weil drei Arten von verschiedenen zufälligen Fehlern auftreten, die die Quadratsummen beeinflussen.

Diese sind:

1. Die Fehler, die die Differenzen D_{jk} des spezifischen Verschleißes zweier Streifen aus derselben Ofenhälfte beeinflussen. Außer den systematischen Wirkungen und den Meßfehlern sind diese Differenzen im wesentlichen bedingt durch die zufälligen Eigenheiten der Öfen (Strömungsverhältnisse, Ausbildung der Flamme usw.). Sie sind nur sekundär durch die Gesamtcharakteristik der Öfen beeinflusst, auf die unter 3 noch näher eingegangen wird.

2. Die Fehler, die sich aus dem unterschiedlichen Verschleiß zweier Ofenhälften des gleichen Ofens ergeben.

3. Die Fehler, die den unterschiedlichen Gesamtverschleiß verschiedener Gewölbe bedingen. Sie

werden hervorgerufen durch unterschiedliche Konstruktion und Betriebsweise der Öfen (Ofenbauweise, Produktionsart, Beheizungsart, Ofenbetrieb usw.).

Man erkennt sofort, daß der Schätzwert der Wirkung, die durch die Position der Streifen in jeder Ofenhälfte bedingt ist, nur durch die unter 1 erwähnten Fehler beeinflusst sein kann; dahingegen ist der Schätzwert der systematischen Wirkungen des Brennstoffs beeinflusst durch die unter 3 erwähnten Fehler, weil zum eigentlichen Vergleich nach Brennstoffen noch die verschiedenen Öfen (als Einflußfaktor) hinzukommen.

Man hatte von vornherein schon daran gedacht, daß diese drei Fehler von verschiedenem Gewicht wären und wahrscheinlich der Reihenfolge $\sigma^1 < \sigma^2 < \sigma^3$ entsprächen. Dies ist der Grund, weshalb man sich bemüht hat, einen Versuchsplan zu benutzen, der diesen Fehlern Rechnung trägt, obwohl diese Annahme nur eine Hypothese darstellt. Wir werden jedoch später sehen, daß diese durch die Ergebnisse vollkommen bestätigt wird.

In der vorliegenden Varianzanalyse kann man die Quadratsummen in drei Gruppen einteilen:

a) diejenigen, die nur mit Fehlern der Gruppe 1 behaftet sind;

b) diejenigen, die nur mit Fehlern der Gruppen 1 und 2 behaftet sind;

TAFEL IX

Gruppe	Varianzfaktor	Quadratsumme	Freiheitsgrad	Bezeichnung der Varianz
a	Position	$D^2/16$	1	$S^2_{a,p}$
	Steinqualität	$\frac{1}{8} \sum_j (D_{j.} - D_{.j})^2$	3	$S^2_{a,q}$
	Wechselwirkung „Steine \times Position“	$\frac{1}{8} \sum_j (D_{j.} + D_{.j})^2 - D^2/8$	3	$S^2_{a,pq}$
	Rest	$\sum_{j,k} D^2_{jk} - [\text{Andere Quadratsummen (a)}]$	9	S^2_a
b	Ofenhälften	$\frac{1}{4} \sum_c S^2_c - \frac{1}{8} \sum_t S^2_t$	2	S^2_b
	Mittlerer Gewölbeverschleiß	$S^2/16$	1	$S^2_{c,m}$
c	Steinqualität	$\frac{1}{8} \sum_j (S_{j.} + S_{.j})^2 - S^2/8$	3	$S^2_{c,q}$
	Wechselwirkung „Steine \times Position“	$\frac{1}{8} \sum_j (S_{j.} - S_{.j})^2$	3	$S^2_{c,qp}$
	Brennstoff	$\frac{1}{4} \sum_l S^2_l - S^2/16$	3	$S^2_{c,l}$
	Abstichgewichte der Öfen	$\frac{1}{8} \sum_t S^2_t - S^2/16$	1	$S^2_{c,t}$
	Rest	$\sum_{j,k} S^2_{jk} - [\text{Andere Quadratsummen (c) und (b)}]$	3	S^2_c
Gesamt		$\sum_{j,k} D^2_{jk} + \sum_{j,k} S^2_{jk} = 4\text{mal Quadratsumme der 32 Einzelbeobachtungen}$	32	

c) diejenigen, die mit Fehlern der Gruppen 1, 2 und 3 behaftet sind.

Die Ausdrücke der verschiedenen Quadratsummen der Varianzanalyse — gruppiert nach den oben definierten Kategorien a, b, c, — sind in der Tafel IX zusammengestellt.

Jede einzelne Wirkung muß bestätigt werden durch Vergleich der Varianz mit der Restvarianz, die zur selben Gruppe gehört. Die Fehlervarianzen s_a^2, s_b^2, s_c^2 können untereinander verglichen werden.

Man kann feststellen, daß die Wirkungen „Steinqualität“ und „Wechselwirkung Steine \times Position“ zweimal auftreten, in einem Fall mit den unter a definierten Fehlern, zum andern mit den Fehlern nach c behaftet.

Weil die Restvarianz s_a^2 sehr viel kleiner ist als s_c^2 , ist es vorteilhaft, diese Wirkungen mittels der Verhältnisse s_{aq}^2/s_a^2 und s_{apq}^2/s_a^2 zu überprüfen, weil diese Untersuchungen sehr viel empfindlicher sind.

Bemerkung

Die Summe $\sum_{j,k} D_{jk}^2 + \sum_{j,k} S_{jk}^2$ ist gleich dem Vierfachen der Quadratsummen der 32 Einzelbeobachtungen, weil eine orthogonale Zerlegung noch die Halbsummen und die Halbdifferenzen der Beobachtungen, die ein und demselben Kombinationspaar zukommen, in Rechnung stellen müßte. Die praktischen Untersuchungsergebnisse vom Sicherheitsgrad werden hingegen nicht geändert, wenn man die Summen und Differenzen direkt einsetzt, weil man hierdurch nur die Maßeinheiten der spezifischen Verschleiß ändert.

e) Schätzwert des spezifischen Verschleißes

In Abschnitt 5d ist ausgeführt worden, daß die Wirkungen der Steinqualitäten auf zwei Arten abgeschätzt werden können, und zwar aus den Unterschieden der Logarithmen der spezifischen Verschleiß zweier Versuchsstreifen der gleichen Ofenhälfte oder aus ihren Summen.

Man muß hierbei die Tatsache beachten, daß die Restvarianz in diesen beiden Fällen unterschiedlich ist, weil die Auswertung der Ergebnisse auch gezeigt hat, daß, wie wir erwarteten, s_a^2 viel kleiner war als s_c^2 .

Um die Steinqualitäten gegenseitig vergleichen zu können, ist es besser, sich auf die D_{jk} zu beziehen als auf die S_{jk} . Die so erhaltenen Aussagen sind weitaus gesicherter und die Schätzwerte genauer. Zwar kann man mittels der Differenzen D_{jk} keine Schätzwerte der Logarithmen der absoluten spezifischen Verschleiß angeben, wohingegen dies möglich ist, wenn man die Summen S_{jk} heranzieht.

Indessen zeigen die Versuchsergebnisse, daß der Verschleiß stark vom Ofen abhängt. Dies drückt sich auch in der Varianz $s_{c,t}^2$ aus, die die Wirkung der Ofengröße beschreibt, sowie in der Varianz $s_{c'}^2$, welche zusammenfassend die Wirkungen der anderen Ofencharakteristiken bezeichnet. Der spezifische Verschleiß ist somit kein absolutes Ergebnis, und

man schätzt mittels S_{jk} nur die mittleren spezifischen Verschleiß für die verschiedenen Bedingungen ab, die während der Versuche verwirklicht werden konnten. Wie wir weiter sehen werden, sind die verschiedenen Steinqualitäten nicht mit Sicherheit voneinander zu unterscheiden, wenn man sich nur auf s_c^2 bezieht; es ist also völlig unnütz, die mittleren spezifischen Verschleiß der einzelnen Steinqualitäten zu berechnen.

Demgegenüber erlauben die Werte für D_{jk} , die Größe der Differenzen zwischen den Steinqualitäten abzuschätzen; auch besteht eher die Möglichkeit, daß diese Differenzen gesichert sind.

Interessiert man sich nur für die Unterschiede zwischen den einzelnen Steinqualitäten, so kann man die Haltbarkeit durch vier Werte b_j darstellen:

$$\sum_{j=1}^4 b_j = 0.$$

Unter Benutzung der folgenden Größen:

- p_i ($i = 1, 2$): Wirkung der Position in einer Ofenhälfte,
 - b_j : Wirkung des Steins j ,
 - c_{ij} : Wechselwirkung der Wirkungen „Steine“ und „Positionen“,
 - e_{jk} : Zufallswert, der D_{jk} beeinflusst,
- kann man D_{jk} durch die folgende Gleichung beschreiben:

$$D_{jk} = p_1 - p_2 + b_j - b_k + c_{1j} - c_{2k} + e_{jk}$$

mit den Bedingungen:

$$\begin{aligned} p_1 + p_2 &= 0 \\ \sum_j c_{ij} &= \sum_i c_{ij} = 0 \end{aligned}$$

Unter Verwendung allgemeiner Methoden findet man als Schätzwert für b_j den Ausdruck

$$\hat{b}_j = \frac{D_{j.} - D_{.j}}{8}$$

Aus der Beziehung für $D_{j,k}$ kann man dann folgern:

$$\begin{aligned} D_{j.} - D_{.j} &= 8 b_j + e_{j.} - e_{.j} \\ &= 8 b_j + \sum_i e_{ji} - \sum_m e_{mj} \end{aligned}$$

Bezeichnet man mit σ^2 die Fehlervarianz e_{jk} , so findet man als Varianz für den Schätzwert \hat{b}_j :

$$V(\hat{b}_j) = \frac{3\sigma^2}{32}$$

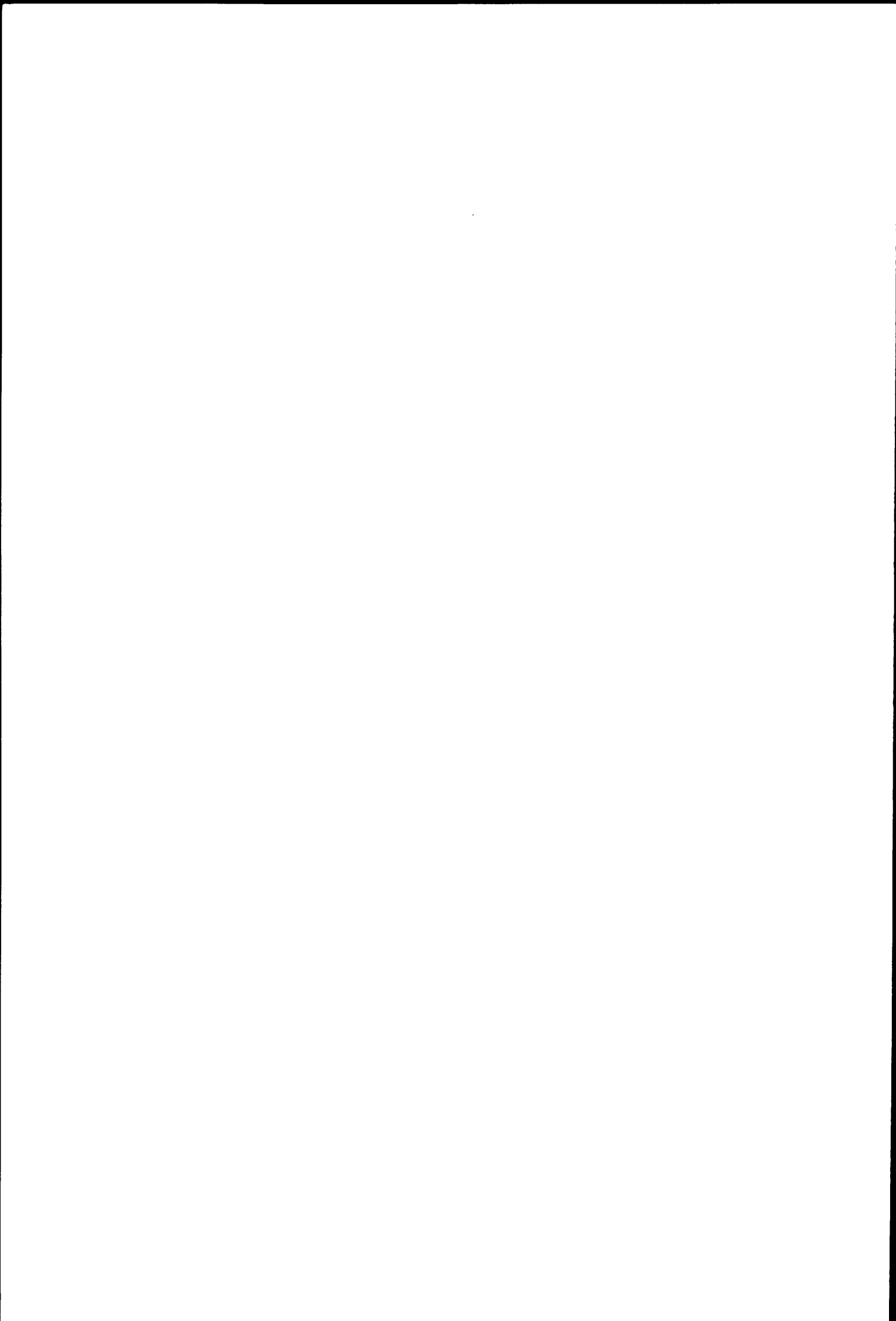
Weil die Werte \hat{b}_j unabhängig vom Rest s_a^2 sind, wird das Verhältnis

$$\frac{\hat{b}_j - b_j}{\sqrt{\frac{3}{32} s^2}} = 4 \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{\hat{b}_j - b_j}{s} \right)$$

als Variable t nach Student-Fisher angesprochen. Die Beziehung

$$|\hat{b}_j - b_j| < s \cdot t_p \sqrt{\frac{3}{32}}$$

definiert für b_j ein Vertrauensintervall mit dem Schwellenwert p .



KAPITEL IV

Ergebnisse der Laborversuche an ungebrauchten Steinen

Von J. BARON

(Übersetzt aus dem Französischen)

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden Proben der vier Versuchssteintypen A, B, C und D und der Hausmarkesteine genommen und an diesen die folgenden Bestimmungen durchgeführt:

1. Druckfeuerbeständigkeit,
2. Bestimmung des spezifischen Gewichtes und der Porosität,
3. Bestimmung der Gasdurchlässigkeit,
4. Bestimmung der thermischen Ausdehnung,
5. Kaltdruckfestigkeit,
6. Chemische Analyse.

Zusätzliche Versuche wurden im Labor in Bonn ausgeführt, und zwar betrafen diese:

1. Porengrößenverteilung,
2. Druckfeuerbeständigkeit mit 2 und 4,5 kg/cm² Belastung sowie Fließverhalten,
3. Örtliche Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Versuchssteine.

Die Ergebnisse der vorgenannten Bestimmungen an 27 A-Steinen, 36 B-Steinen, 34 C-Steinen und 31 D-Steinen haben gezeigt, daß die Streuung aller Versuchsergebnisse bei den A-, B- und C-Steinen ziemlich groß und beim D-Stein am kleinsten ist.

Die hauptsächlichsten gemittelten Eigenschaftswerte der vier Versuchssteine sind in der folgenden Tafel X zusammengestellt:

TAFEL X

Stein	Al ₂ O ₃ - Gehalt %	TiO ₂ - Gehalt %	Porosität %	Spezifisches Gew. g/cm ³	Bruchtemperatur (DFB) (1) °C
A	0,57	1,41	19,1	2,32	1 637
B	0,46	0,82	16,5	2,35	1 654
C	0,26	0,81	22,7	2,39	1 656
D	0,17	0,03	20,8	2,32	1 689

(1) DFB = Druckfeuerbeständigkeit; nach französischer Norm.

Die Anzahl der Versuche, die an den Hausmarkesteinen ausgeführt wurden, war nicht ausreichend, um verlässliche Mittelwerte angeben zu können. Leider muß man darauf hinweisen, daß die Werte in ziemlich weiten Grenzen schwankten.

Diese Untersuchungen ergaben, daß die Bestimmung der Druckfeuerbeständigkeit keine ausreichende Qualitätskennzeichnung erlaubt. Es wurde ein Qualitätsindex aus den Werten für Al_2O_3 , Porosität und spezifisches Gewicht abgeleitet (siehe Kap. VIII).

ÜBERSICHT

1. Probenahme

- 1.1 Versuchssteine
- 1.2 Hausmarkesteine

2. Versuchsprogramm

3. Ausgeführte Versuche

- 3.1 Druckfeuerbeständigkeit
- 3.2 Bestimmung des spezifischen Gewichtes und der Porosität
- 3.3 Bestimmung der Gasdurchlässigkeit
- 3.4 Bestimmung der thermischen Ausdehnung
- 3.5 Bestimmung der Kaltdruckfestigkeit
- 3.6 Chemische Analyse

4. Ergebnisse an den Versuchssteinen

5. Ergebnisse an den Hausmarkesteinen

- 5.1 Hausmarkesteine der deutschen, italienischen, französischen und belgischen Öfen (Nancy)
- 5.2 Hausmarkesteine der deutschen Öfen (Bonn).

6. Schlußfolgerungen

7. Ergänzende, in Bonn durchgeführte Versuche:

- Anhang I — Porengrößenverteilung der Versuchssteine
- Anhang II — Prüfung der Druckfeuerbeständigkeit
- Anhang III — Örtliche Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Versuchssteine.

1. Probenahme

1.1 Versuchssteine

Die beiden Exekutivbüros von Bonn und Nancy haben die benötigten Versuchssteine an den vier Ankunftsarten aus den Lieferungen gezogen: Duisburg, Genua, Lüttich, Straßburg.

Die Probenahme geschah nach zufälliger Wahl, und zwar getrennt nach Ofen und Format proportional der Gesamtzahl der jeweils gelieferten Steine; von den jeweils zur Verfügung stehenden Mengen wurde jeder vierte Stein herausgenommen, an dem die Versuche dann durchgeführt wurden. Untersucht

wurden 27 A-, 36 B-, 34 C- und 31 D-Steine. Jeder Stein, der geprüft werden sollte, wurde in zwei Hälften geteilt und jede Hälfte einem der beiden Labors zur Verfügung gestellt.

1.2 Hausmarkesteine

Während der Zustellung der Gewölbe wurde in den Werken eine gewisse Anzahl Hausmarkesteine als Probe gezogen. Jeder dieser Steine wurde ebenso in zwei Hälften geteilt. Alle Untersuchungen an diesen Steinen (physikalische und chemische) wurden in Nancy ausgeführt.

2. Versuchsprogramm

Die chemischen Analysen der C- und D-Proben wurden in Bonn ausgeführt, während die A- und B-Proben in Nancy untersucht wurden. Darüber hinaus wurde eine Anzahl von Kontrollanalysen in beiden Labors durchgeführt. Was die physikalischen Versuche anbetrifft, so wurde der Großteil in Nancy ausgeführt; die Ergebnisse, die diesem Bericht zugrunde liegen, sind ausschließlich in Nancy gefunden worden.

3. Ausgeführte Versuche

3.1 Druckfeuerbeständigkeit

Dieser Versuch wurde gemäß den Vorschriften der französischen Norm NF B. 49-105 ausgeführt, d. h. an Probekörpern mit 50 mm Höhe und 34 mm Durchmesser und einer Aufheizgeschwindigkeit von 1000° in der ersten Stunde und von $250^\circ/h$ ab 1000° .

Im Gegensatz zu den Vorschriften der französischen Norm wurde die Temperatur des Prüfkörpers in der Mitte der oberen Fläche des Prüfkörpers gemessen, weil es auf Grund des vorhandenen Ofens unmöglich war, die Temperatur korrekt seitlich in mittlerer Höhe des Prüfkörpers zu bestimmen; es wurden jedoch nur die Erweichungstemperaturen in Betracht gezogen.

3.2 Bestimmung des spezifischen Gewichtes und der Porosität

Dieser Versuch wurde nach der französischen Norm NF B. 49-104 ausgeführt. Bei der Bestimmung des spezifischen Gewichtes wurde ein Volumenometer verwandt, welches in der Zeitschrift *Chimie analytique*, Bd. 33, Heft 10 (Okt. 1951), Seite 295, beschrieben ist.

3.3 Bestimmung der Gasdurchlässigkeit

Die Gasdurchlässigkeit wurde an einem kubischen Prüfkörper in allen drei Richtungen bestimmt. Über den verwendeten Apparat wurde auf dem 27. Internationalen Kongreß der Industriellen Chemie in Brüssel (Compte rendu, Bd. III, S. 133) berichtet. In allen Fällen — bedingt dadurch, daß die Silika-Steine oft innere Risse aufwiesen — ist jeweils nur die kleinste Ziffer der Gasdurchlässigkeit in Betracht gezogen worden, d. h. die Ziffer, die in einer der drei Richtungen als kleinste erhalten wurde.

3.4 Bestimmung der thermischen Ausdehnung

Dieser Versuch wurde an zylindrischen Proben von 100 mm Länge und 16 mm Durchmesser bestimmt; der verwendete Apparat ist beschrieben im Bulletin der Société Française de Céramique, Nr. 18, Januar bis März 1953.

3.5 Bestimmung der Kaltdruckfestigkeit

Dieser Versuch wurde nach den Vorschriften der französischen Norm NF B.49-103 bestimmt, mit der Ausnahme, daß die Belastungsgeschwindigkeit statt 15 kg/cm²/s in diesem Falle 2 kg/cm²/s betrug. Der Versuch wurde nach Möglichkeit an 3 bis 5 Zylindern ausgeführt, und es ist jeweils nur der Mittelwert dieser Ziffern in Betracht gezogen.

3.6 Chemische Analyse

Wie bereits weiter vorn ausgeführt, wurden die chemischen Analysen der C- und D-Proben in Bonn und die der A- und B-Proben in Nancy gemacht; beide Labors hatten sich vorher über die Analysenmethode, die zur Anwendung kommen sollte, geeinigt, und trotz einiger geringfügig auftretender Streuungen kann man doch sagen, daß die Ergebnisse zufriedenstellend übereinstimmen. Die angewandte Analysenmethode stellt einen Kompromiß zwischen den verschiedenen Normvorschriften der USA, Großbritanniens, Italiens und Frankreichs dar.

4. Ergebnisse an den Versuchssteinen

Die Versuchsergebnisse sowohl für die Versuchssteine als auch für die Hausmarkesteine wurden in verschiedenen Tafeln zusammengestellt; aus diesen Tafeln wurden einige Verteilungsdiagramme entwickelt, von denen bezüglich der Versuchssteine die interessantesten wie folgt zusammengestellt sind:

Bild 7: Tonerdegehalt

- „ 8: Gesamtporosität
- „ 9: Spezifisches Gewicht
- „ 10: Titandioxydgehalt
- „ 11: Erweichungstemperatur

5. Ergebnisse an den Hausmarkesteinen

Die beiliegenden Tafeln zeigen die wichtigsten Eigenschaften der Hausmarkesteine.

Tafel XI : Hauptsächliche Eigenschaften der Hausmarkesteine der deutschen Öfen (Werte vom Labor Bonn)

- „ XII : Hauptsächliche Eigenschaften der Hausmarkesteine der deutschen Öfen (Werte vom Labor Nancy)
- „ XIII: Hauptsächliche Eigenschaften der Hausmarkesteine der französischen Öfen
- „ XIV: Hauptsächliche Eigenschaften der Hausmarkesteine der belgischen Öfen
- „ XV : Hauptsächliche Eigenschaften der Hausmarkesteine der italienischen Öfen.

Es ist dabei interessant festzustellen, daß die Hausmarkesteine E — in völliger Übereinstimmung mit deren gutem Verhalten während der Versuche — Eigenschaften aufweisen, die einem sehr niedrigen Qualitätsindex entsprechen.

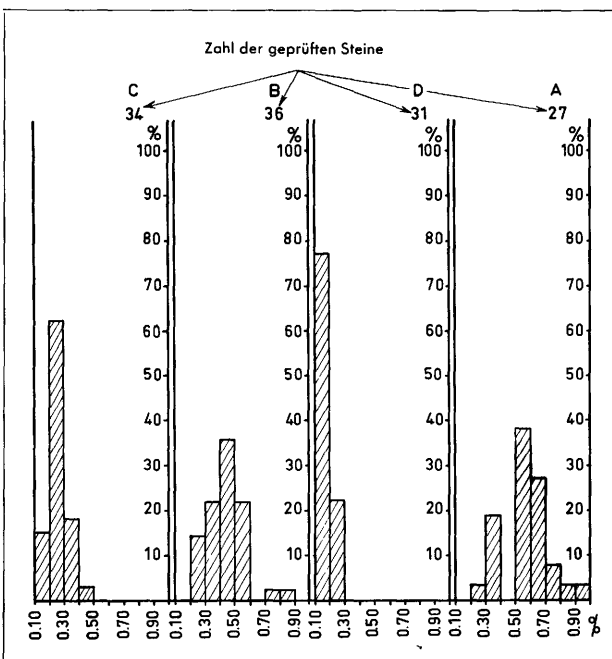


Bild 7: Tonerdegehalt

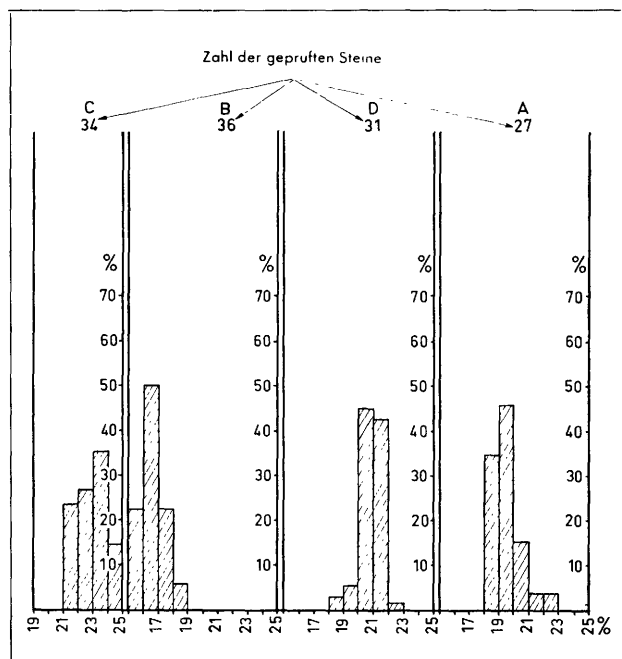


Bild 8: Gesamtporosität

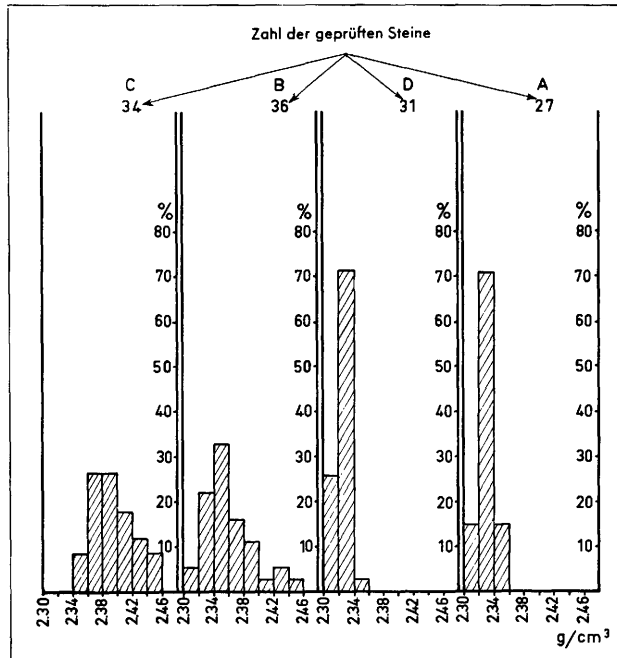


Bild 9: Spezifisches Gewicht

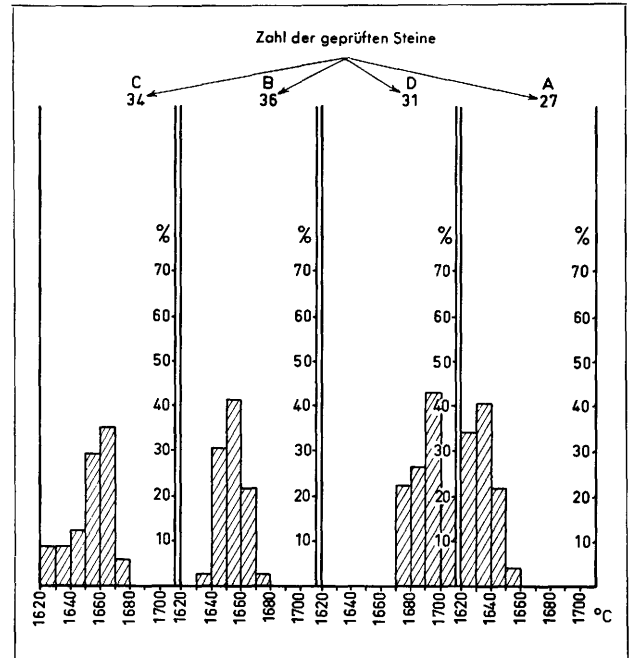


Bild 11: Bruchtemperatur (Druckfeuerbeständigkeit)

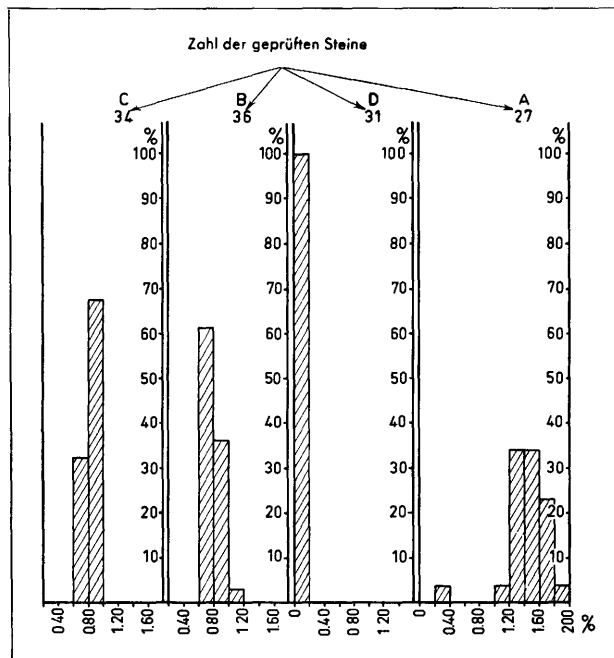


Bild 10: Titandioxydgehalt

6. Schlußfolgerungen

Die Hauptschlußfolgerung, die sich aus diesen Laborversuchen ergibt, ist augenscheinlich die Suche nach einer Beziehung zwischen den Charakteristiken der Steine und ihrer Haltbarkeit; mit anderen Worten der Wunsch, einen Qualitätsindex der Silikasteine für Siemens-Martin-Öfen vorher bestimmen zu können (siehe Kap. VIII: Beitrag zur Frage eines Qualitätsindex).

Eine weitere nicht zu vernachlässigende Schlußfolgerung betrifft die Laboratorien. Weil der Einfluß

des Tonerdegehaltes so stark in Erscheinung tritt, ist es an der Zeit, der Tonerdebestimmung eine genaue Beachtung zu schenken und zu versuchen, die Analysemethoden noch zu verbessern. Ohne hier ins Detail zu gehen, wissen wir, daß dieses Problem in der Bundesrepublik Deutschland und in Frankreich behandelt wurde, und es scheint, daß man jetzt eine zufriedenstellende Lösung gefunden hat (1).

7. Ergänzende, in Bonn durchgeführte Untersuchungen

Anhang I — Porengrößenverteilung der Versuchssteine

Das Labor Bonn hat die Porengrößenverteilung der Versuchssteine nach der Quecksilber-Einpreßmethode untersucht. Das Bild 12 zeigt die erhaltenen Werte. Auffallend ist eine große Streuung im Bereich der großen Poren, insbesondere beim D-Stein. Die B- und C-Steine weisen geringere Mengen großer Poren auf, während der A-Stein eine mittlere Stellung einnimmt.

Diese Ergebnisse gehen parallel mit der Gasdurchlässigkeit, welche ja in erster Linie auf die großen Poren anspricht.

Anhang II — Prüfung der Druckfeuerbeständigkeit

Das Labor Bonn hat auch Versuche zur Druckfeuerbeständigkeit durchgeführt. Dabei wurden eine Aufheizgeschwindigkeit von 1°/min und Belastungen von 2 und 4,5 kg/cm² gewählt. Das Bild 13 zeigt die erzielten Ergebnisse. Daraus geht hervor, daß sich der D-Stein am günstigsten verhält, während die drei anderen Steine in der Reihenfolge C, B, A schlechtere Prüfwerte erzielten. Für den

(1) Thiéry, P., und Baron, J.: „Chemische Analyse der Silikasteine für Siemens-Martin-Ofengewölbe“, Veröffentlichung vom 30. Internationalen Kongreß der Industriellen Chemie, Athen.

TAFEL XI

Wichtigste Daten der deutschen Hausmarkesteine (1)

Ofen	Stein	Spezifisches Gewicht g/cm ³	Gesamtporosität %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %
1	J	2,36	19,8	0,84	1,16
		2,40	25,0	0,72	1,04
		2,34	22,2	0,69	1,28
2	H	2,37	18,6	0,43	0,90
		2,38	18,9	0,37	0,66
		2,33	17,1	0,52	0,82
		2,42	19,8	0,45	0,58
3	H	2,37	19,8	0,41	0,69
		2,44	22,1	0,41	0,72
		2,36	19,5	0,67	0,80
		2,38	19,8	0,39	0,66
4	H	2,34	21,3	0,30	0,61
		2,40	18,8	0,30	0,76

(1) Die hier angeführten Daten wurden im Labor Bonn bestimmt.

TAFEL XII

Wichtigste Daten der deutschen Hausmarkesteine (1)

Ofen	Stein	Spezifisches Gewicht g/cm ³	Gesamtporosität %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %
1	J	2,35	22,9	1,04	0,99
		2,39	23,4	0,88	0,90
		2,33	24,2	0,91	1,09
2	H	2,36	17,9	0,67	0,80
		2,37	19,7	0,55	0,60
		2,33	15,9	0,53	0,88
		2,42	20,7	0,56	0,58
3	H	2,36	21,0	0,49	0,64
		2,41	20,7	0,77	0,66
		2,34	19,0	0,75	0,85
		2,41	20,6	0,49	0,59
4	H	2,33	21,8	0,28	0,58
		2,37	20,0	0,49	0,62

(1) Die hier angeführten Daten wurden im Labor Nancy bestimmt.

Seegerkegelfallpunkt gilt die gleiche Reihenfolge wie für die Druckfeuerbeständigkeit. Zum besseren Vergleich der Druckfeuerbeständigkeit wurde die Fließgeschwindigkeit bei verschiedenen Temperaturen herangezogen, wobei sich eine deutliche Unterscheidung zwischen den D-Steinen einerseits sowie den B-, C- und A-Steinen andererseits ergab (Bild 14). Bei Temperaturen unter 1630 ° ist die Fließgeschwindigkeit so gering, daß der Versuch zu ungenau wird. Der sehr flußmittelarme D-Stein ergibt hier besonders günstige Werte.

TAFEL XIII

Wichtigste Daten der französischen Hausmarkesteine

Ofen	Stein	Spezifisches Gewicht g/cm ³	Gesamtporosität %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %
7	F	2,46	21,9	0,58	0,16
8	G	2,35	24,1	0,58	0,96
9	H	2,34	16,6	0,29	0,86
		2,34	21,0	0,29	0,66
10	G	2,37	21,2	0,22	0,86

TAFEL XIV

Wichtigste Daten der belgischen Hausmarkesteine

Ofen	Stein	Spezifisches Gewicht g/cm ³	Gesamtporosität %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %
14	E	2,39	20,3	0,51	0,28
		2,40	17,8	0,37	0,31
		2,39	17,0	0,37	0,32
16	E	2,44	18,7	0,19	0,31
		2,33	16,4	0,31	0,30
		2,35	17,1	0,31	0,30

TAFEL XV

Wichtigste Daten der italienischen Hausmarkesteine

Ofen	Stein	Spezifisches Gewicht g/cm ³	Gesamtporosität %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %
12	K	2,33	20,2	0,51	0,19
		2,32	22,4	0,55	0,22
		2,33	25,6	0,51	0,19

Ein Vergleich der DFB-Versuche in oxydierender Atmosphäre (Luft) bei Verwendung von einem Kohlerohren mit schützendem Sintertonerderohr und Sintertondestempel und in stark reduzierender Atmosphäre (Kohlegrießofen, Kohlestempel) zeigt eine wachsende Differenz mit zunehmendem TiO₂-Gehalt (Tafel XVI). Man könnte hieraus den Schluß ziehen, daß durch stark reduzierende Bedingungen das Fließverhalten wieder günstiger werden kann, z. B. durch die Bildung von Titanoxyden niedriger Oxydationsstufe. Für die Empfindlichkeit des TiO₂ auf die Ofenatmosphäre sprechen auch gewisse Farberscheinungen, die man an Silikastäben bei Abschmelzen in Luft beobachten kann: Bei fehlendem Titandioxydgehalt ist die Farbe des Tropfens weiß und nimmt mit zunehmendem Titan-dioxydgehalt eine blaugraue Färbung an.

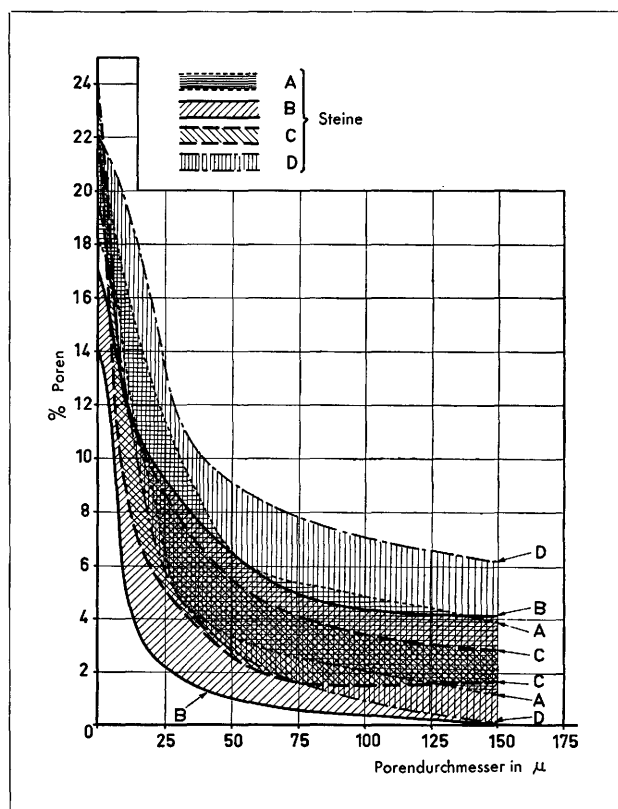
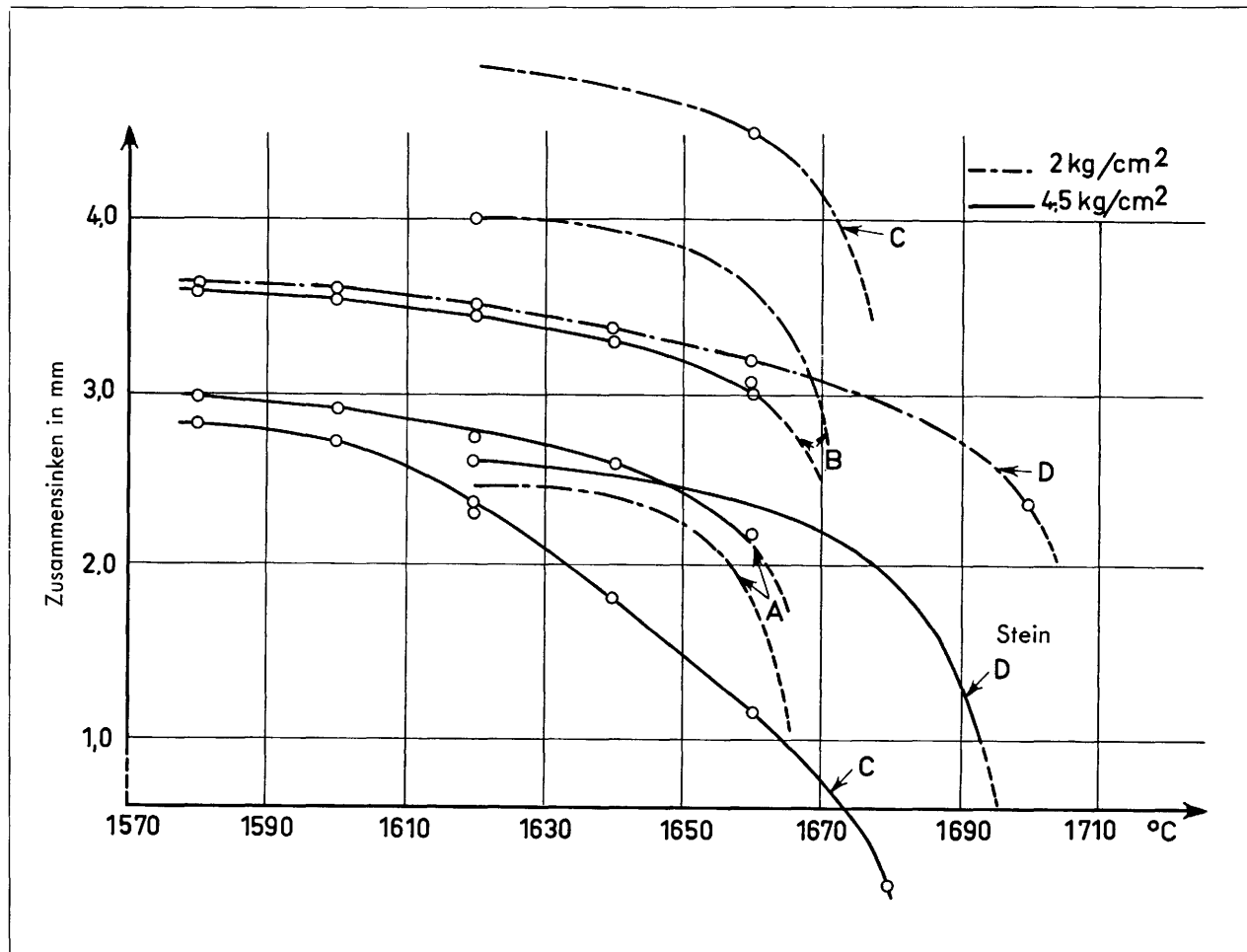


Bild 12: Streubereich der Porengrößenverteilungen

Bei den Untersuchungen zur Feuerfestigkeit und den verschiedenen Methoden zur Prüfung der Druckfeuerbeständigkeit verhält sich der D-Stein wesentlich günstiger als die drei übrigen D-Steine. Nimmt man jedoch die vergleichenden Betriebsergebnisse vorweg, so ist darauf hinzuweisen, daß der D-Stein in seinem Verhalten keine charakteristischen Unterschiede zum B- und C-Stein erkennen ließ; hingegen war der A-Stein in vielen Fällen bedeutend schlechter als die drei anderen angeführten Steinqualitäten. Man muß daher den Schluß ziehen, daß die alleinige Angabe der Feuerfestigkeit und des Erweichungsverhaltens zur Kennzeichnung der Qualität hochwertiger Silikasteine nicht mehr ausreicht.

Anhang III — Örtliche Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Versuchssteine

Je ein halber Stein der Qualitäten A, B, C, D wurde in 75 gleichgroße Würfel zerschnitten (ungefähr 4 cm^3), und jeder dritte Würfel wurde untersucht. Die Analysenergebnisse wurden zusammengestellt und die Grenzwerte der hauptsächlich vorkommenden Verbindungen bestimmt (Tafel XVII). Die Zusammensetzung innerhalb eines Steins ist in einigen Fällen überraschend unterschiedlich.

Bild 13: Druckerweichung der Silikasteine — Erhitzungsgeschwindigkeit $1^\circ \text{C}/\text{min}$

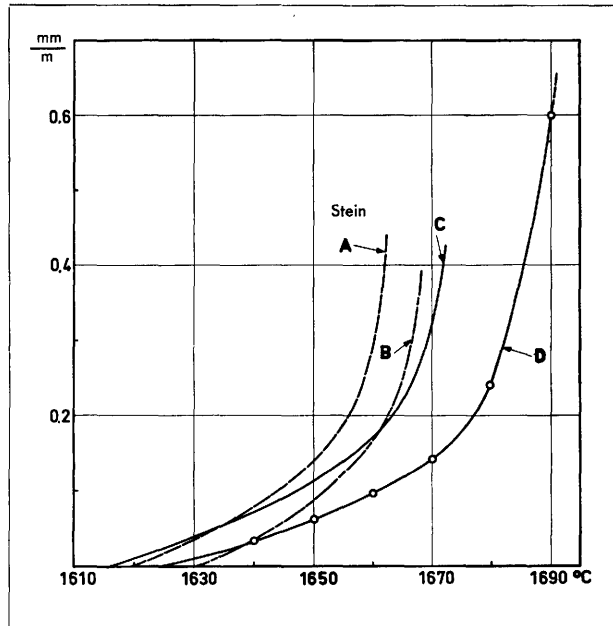


Bild 14: Fließgeschwindigkeit in mm/m. min

TAFEL XVI
Vergleichsergebnisse zur Druckfeuerbeständigkeit Nancy — Bonn

		A	B	D
Nancy	— 0,5 ‰	1 615—1 650 ° C	1 630—1 665 ° C	1 670—1 700 ° C
Bonn	t _a (— 0,6 ‰)	1 650 ° C	1 675—1 680 ° C	1 680—1 690 ° C
Nancy	Erweichungs- temperatur	1 625—1 660 ° C	1 645—1 675 ° C	1 675—1 710 ° C
Bonn	Erweichungs- temperatur	1 660 ° C	1 685—1 690 ° C	1 690—1 700 ° C

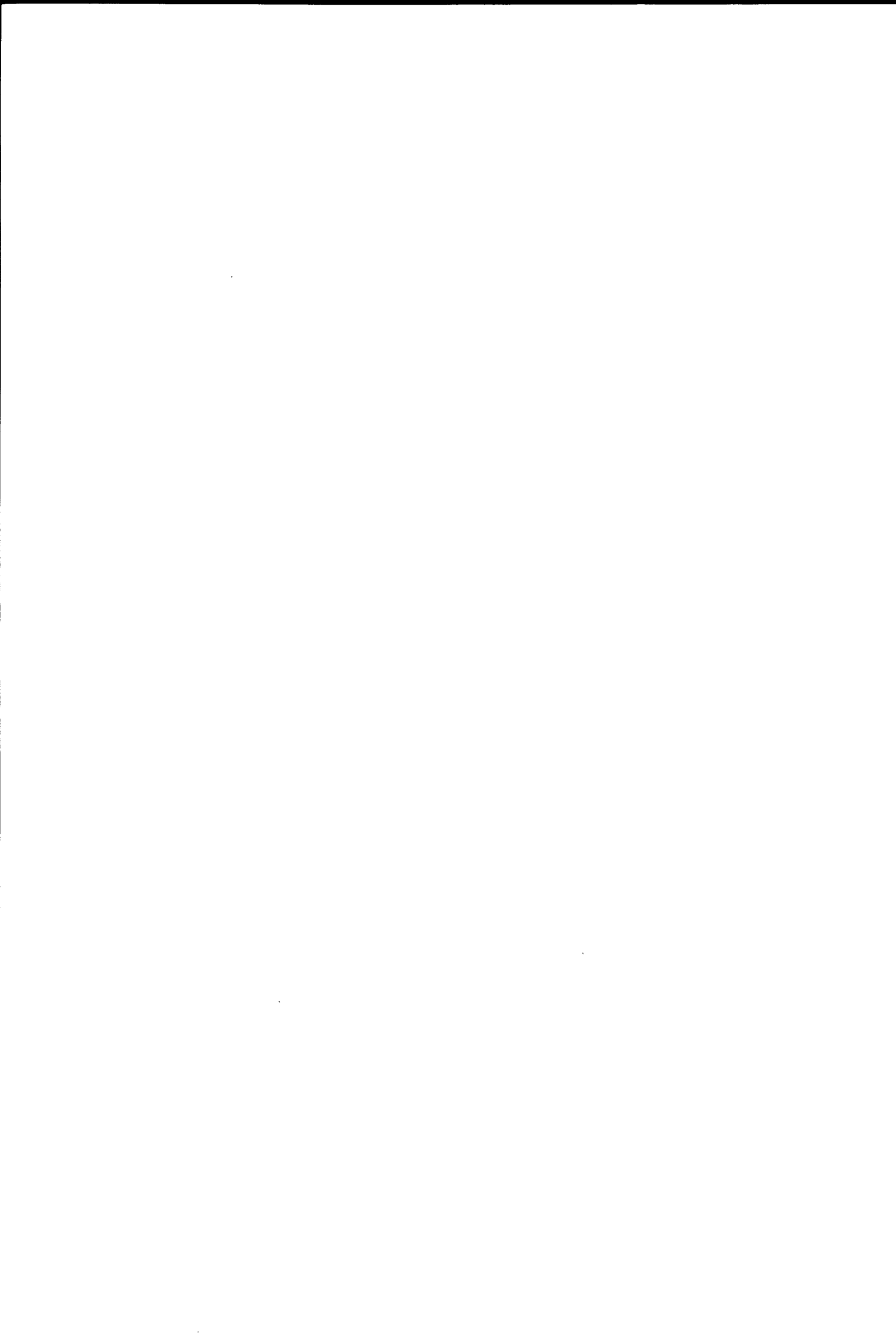
Prüfkörper: Durchmesser 35 mm
Höhe 50 mm

Anheizgeschwindigkeit: 4 ° C/min

TAFEL XVII
Streuungen in der chemischen Zusammensetzung der Versuchssteine

(Werte in ‰)

	A	B	C	D
R ₂ O ₃	2,40 bis 2,70	1,64 bis 2,14	1,30 bis 1,70	0,23 bis 0,52
Al ₂ O ₃	0,35 bis 0,79	0,23 bis 0,70	0,10 bis 0,53	0,00 bis 0,27
Fe ₂ O ₃	0,46 bis 0,67	0,38 bis 0,67	0,29 bis 0,36	0,17 bis 0,27
TiO ₂	1,36 bis 1,48	0,88 bis 0,97	0,78 bis 0,95	0,00 bis 0,04
CaO	1,66 bis 2,06	1,48 bis 1,94	1,66 bis 2,14	2,54 bis 3,22
Na ₂ O + K ₂ O	0,13 bis 0,16	0,16 bis 0,22	0,08 bis 0,16	0,14 bis 0,21



KAPITEL V

Programm und Meßmethoden in den Stahlwerken

Von U. PLÖGER und D. SANNA

ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchung über das Verhalten der feuerfesten Steine in den Stahlwerken erstreckte sich auf folgende Punkte:

1. *Überwachung der Gewölbezustellung*

Die verwendeten Steintypen konnten ohne Schwierigkeiten sowohl mit als auch ohne Mörtel verwendet werden. Eine leicht abgeschrägte Kante erleichterte die Zustellungsarbeit.

2. *Kontrolle der Aufheizgeschwindigkeit*

3. *Messung des Gewölbeanstiegs während der Aufheizperiode*

Bei unterschiedlichen spezifischen Gewichten bzw. der unterschiedlichen Nachdehnung ergaben sich keine Schwierigkeiten, auch nicht bei nebeneinanderliegenden Streifen. Trotzdem scheint es angebracht zu sein, geeignete Dehnungsfugen vorzusehen.

4. *Messen des Fortschreitens des Verschleißes der verschiedenen Versuchsstreifen*

Eine Bohrung geringen Durchmessers wurde in einer bestimmten Zahl von Steinen über deren ganze Länge angebracht (50 bis 75 je Ofen in Frankreich/Belgien, 25 bis 32 in der Bundesrepublik Deutschland/Italien); diese durchbohrten Steine wurden beim Aufbau der Gewölbe verteilt eingebaut. Die Dicke wurde mit einer Meßstange gemessen, welche vom Gewölberücken aus eingeführt und deren Durchgang vom Gewölbeinnern aus beobachtet wurde.

5. *Ermittlung der Temperaturen im Gewölbeinnern mit den Pyrometern „Leeds“ und „Tricolor“*

Feststellung der Gleichmäßigkeit der Gewölbetemperaturen. Untersuchung über das Verhalten der vier Versuchssteine bei einer Temperatur nahe dem Tropfpunkt.

6. *Temperaturmessungen am Gewölberücken mit den Pyrometern „Land“ und „Ardonox“*

Berechnung der Wärmeverluste in Abhängigkeit von der jeweiligen Gewölbeaußentemperatur.

7. *Messung der Temperaturen im Innern der Steine mit Pt-PtRh-Thermoelementen, welche vor dem Einbau der Steine in ihnen verschieden tief angebracht wurden*

Die Verbindung der Temperaturmessungen am Gewölberücken, im Gewölbeinnern und innerhalb der Steine selbst mit den mechanischen Dickenmessungen der Steine ermöglichte es, die Änderung der Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Steine im Zuge der Ofenreise zu bestimmen. Die Infiltrationen der Steine erhöhten dabei merklich die Wärmeleitfähigkeit.

8. Infrarot-Aufnahmen

Diese wurden vorzugsweise gegen Ende der Ofenreise gemacht. Die heißesten Teile am Gewölberücken entsprachen der geringsten Restdicke. Durch eine fotometrische Auswertung war es möglich, die relativen Stein Stärken zu ermitteln und damit ein Gewölbeprofil darzustellen.

9. Gewöhnliche Aufnahmen vom Gewölbeinnern im Zuge der Dickenmessungen

10. Entnahme gebrauchter Steine am Ende der Ofenreise

Die Untersuchung über das Verhalten der feuerfesten Steine in den Stahlwerken erstreckte sich auf folgende Punkte:

1. Überwachung der Gewölbezustellung

Die verwendeten Steintypen konnten ohne Schwierigkeiten sowohl mit als auch ohne Mörtel verwendet werden. Eine leicht abgeschrägte Kante erleichterte die Zustellungsarbeit.

2. Kontrolle der Aufheizgeschwindigkeit

Im allgemeinen war die Aufheizkurve, welche angewandt wurde, der in den Stahlwerken üblichen gleich. Die Aufheizzeiten bewegten sich zwischen 56 und 110 h bei den französischen und belgischen, 90 bis 130 h bei den deutschen und 65 h bei den italienischen Öfen.

3. Messungen des Gewölbeanstiegs während der Aufheizperiode

Das Steigen des Gewölbes wurde mit einer Vorrichtung gemessen, welche über jedem Gewölbeversuchsstreifen befestigt war. Dabei konnte entsprechend Bild 15 festgestellt werden:

Das größte Ausmaß des Gewölbeanstiegs (etwa 100 mm) deckt sich mit der Ausdehnung des Cristobalits (bei 220 °C im Labor gemessen).

Diese Ausdehnung erfolgt, während die Temperatur im Gewölbeinnern von 180 auf 500 °C ansteigt.

Die Ausdehnung ist praktisch für alle Versuchssteine dieselbe. Die Ausdehnung der Steine mit mittlerer Umwandlung bei hoher Temperatur (1400 °C), hervorgerufen durch die Umwandlung von restlichem Quarz, konnte nicht genau bestimmt werden.

Trotz des Vorhandenseins von Silikasteinen mit mittlerer und vollständiger Umwandlung im gleichen Gewölbe ergaben sich keine Schwierigkeiten.

Bei unterschiedlichen spezifischen Gewichten bzw. der unterschiedlichen Nachdehnung ergaben sich keine Schwierigkeiten, auch nicht bei nebeneinanderliegenden Streifen. Trotzdem scheint es angebracht zu sein, geeignete Dehnungsfugen vorzusehen.

4. Messen des Fortschreitens des Verschleißes der verschiedenen Versuchsstreifen

a) Methode

Eine Bohrung von 8 mm Durchmesser wurde durch die ganze Länge einzelner feuerfester Steine angebracht, welche an verschiedenen Stellen des Gewölbes bei der Gewölbekonstruktion eingebaut wurden. Die Dicke wurde mit einem Stab gemessen, der vom Gewölberücken aus eingeführt und dessen Eintritt in das Gewölbeinnere beobachtet wurde. Um die Messung bei vollem Ofengang durchführen zu können, wurde ein mit Preßluft gekühltes Ni-Cr-Stahlrohr verwendet.

b) Häufigkeit der Messungen

Die Dicke des Gewölbes wurde an 10 bis 15 verschiedenen Stellen jedes Versuchsstreifens, d. h. an 50 bis 75 Stellen, in Frankreich und Belgien, an 5 bis 6 Stellen je Streifen — inkl. Hausmarke —, d. h. an 25 bis 32 Stellen, in der Bundesrepublik Deutschland und in Italien gemessen; im ersten Fall alle 2 bis 3 Wochen, im zweiten Fall wöchentlich, im dritten Fall (Italien) alle 4 Wochen.

5. Ermittlung der Temperatur im Gewölbeinnern

Diese Messungen wurden mit den Pyrometern „Leeds“ und „Tricolor“ durchgeführt und hatten ein doppeltes Ziel: die Gleichmäßigkeit der Gewölbetemperatur festzustellen sowie eventuell vorkommende Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Versuchsstreifen und weiterhin das Verhalten der vier untersuchten Qualitäten, insbesondere in der Nähe des Tropfpunktes, zu untersuchen. Es

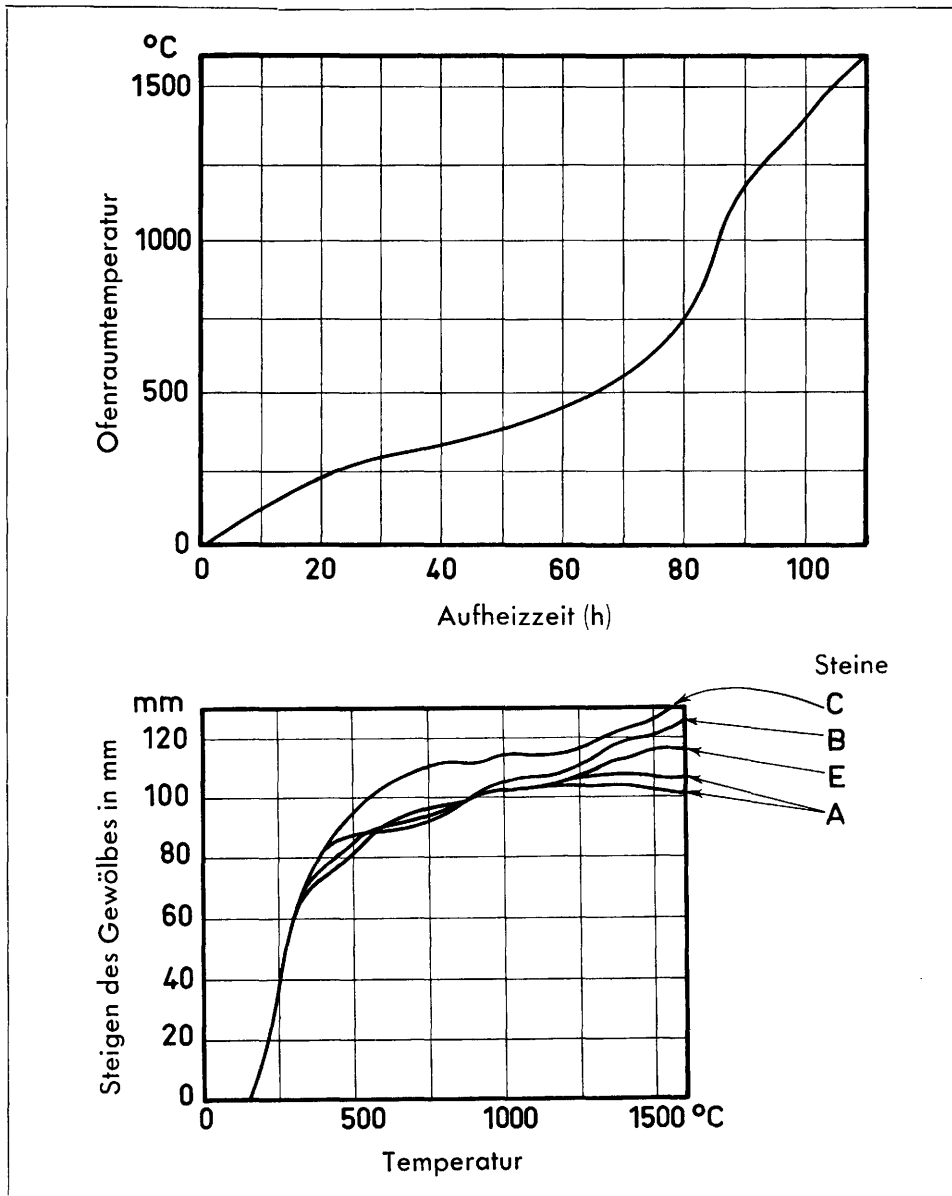


Bild 15: Aufheizen des Gewölbes/Steigen des Gewölbes

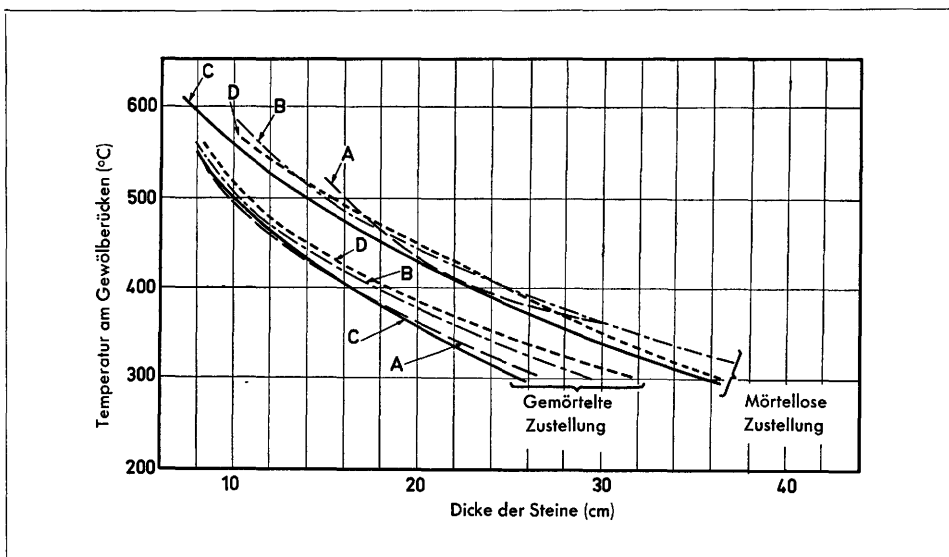


Bild 16: Beziehung zwischen Temperatur am Gewölberücken und Steindicke bei mörtelloser und gemörtelter Zustellung

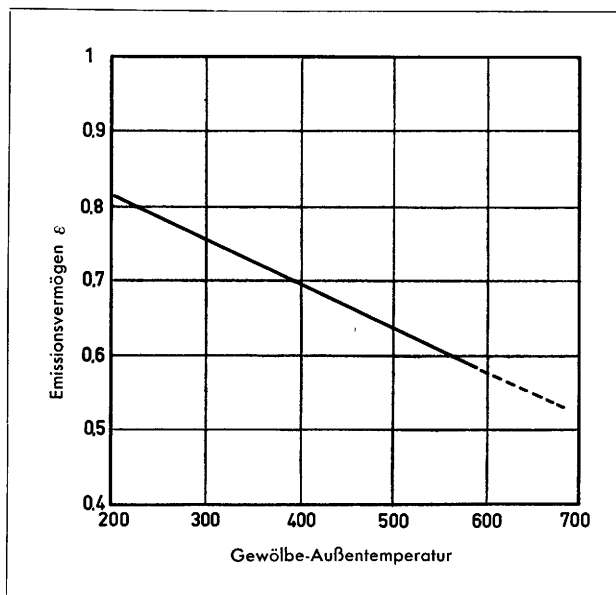


Bild 17: Gewölbe-Außentemperatur und Emissionsvermögen der Steine

wurde festgestellt, daß der Tropfpunkt der B-, C- und D-Steine der gleiche war, aber um etwa 30° höher lag als beim A-Stein.

des Steins, der Umgebungstemperatur und der Gewölbeaußentemperatur, wobei der Einfluß der Umgebungstemperatur am ehesten vernachlässigt werden kann. Unter vereinfachenden Annahmen wurden die in Bild 16 dargestellten Relationen zwischen Gewölbeaußentemperatur und Steindicke ermittelt. Es fällt hierbei auf, daß bei mörtelloser Zustellung eine erhebliche Abweichung im Vergleich zur gemörtelten Zustellung besteht. Diese Abweichung bezieht sich fast ausschließlich auf eine Parallelverschiebung der Kurven, während der Trend gut übereinstimmt.

Bild 17 zeigt den Zusammenhang zwischen der Gewölbeaußentemperatur und dem Emissionsvermögen. Wie durch umfangreiche Messungen festgestellt wurde, bestehen hierbei von Stein zu Stein keine Abweichungen. Die Anwendung der Formeln über die freie Konvektion und über die Wärmestrahlung läßt nunmehr die Berechnung der Wärmeverluste nach Bild 18 zu. Erwartungsgemäß sind die Wärmeverluste bei fehlender Mörtelfuge größer. Bei Kenntnis der Gewölbestärke ist außerdem die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit möglich.

Bild 19 zeigt für die einzelnen Steinqualitäten den Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Temperatur. Der angewendete Streubereich war erforderlich, um die erwartungsgemäß vorhandenen Abweichungen zu erfassen.

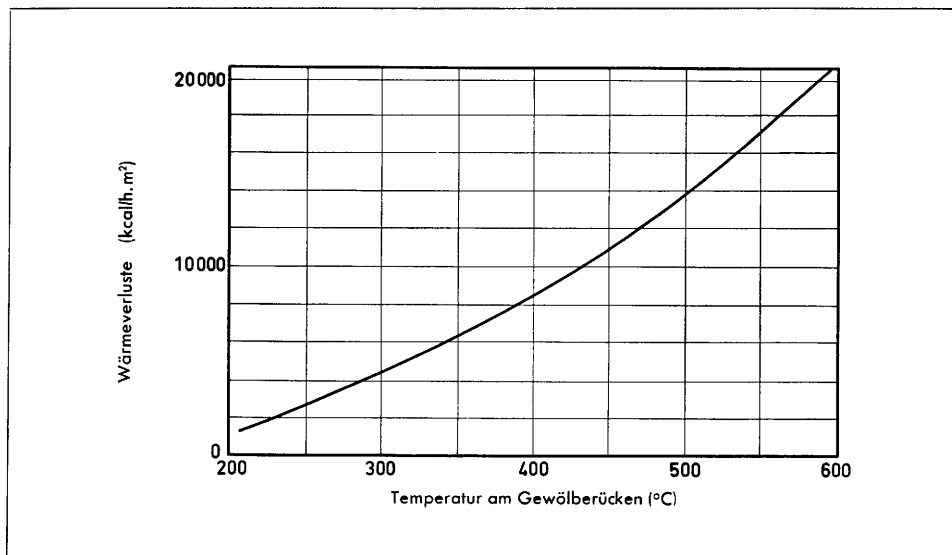


Bild 18: Beziehung zwischen der Temperatur am Gewölberücken und den Wärmeverlusten

6. Temperaturmessungen am Gewölberücken mit den Pyrometern „Land“ und „Ardonox“

Die Verwendung dieser Pyrometer gestattet die Messung

- der wahren Temperatur an der Steinoberfläche,
- des Emissionskoeffizienten der Steinoberfläche,
- der Strahlungstemperatur.

Es bestehen gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen der Gewölbeinnentemperatur, dem Emissionsvermögen, der Steindicke, der Wärmeleitfähigkeit

Da sich die Steine während der Gewölbereise in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften immer weiter vom ungebrauchten Zustand entfernen, erschien eine zonenweise durchgeführte Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit im Innern der Steine zweckmäßig.

7. Messung der Temperatur im Innern der Steine

Es wurde die Temperatur im Innern eines B- und eines C-Steins an gleich weit entfernten Stellen zwischen dem Gewölbeinnern und dem Gewölberücken mit drei Pt-PtRh-Elementen gemessen.

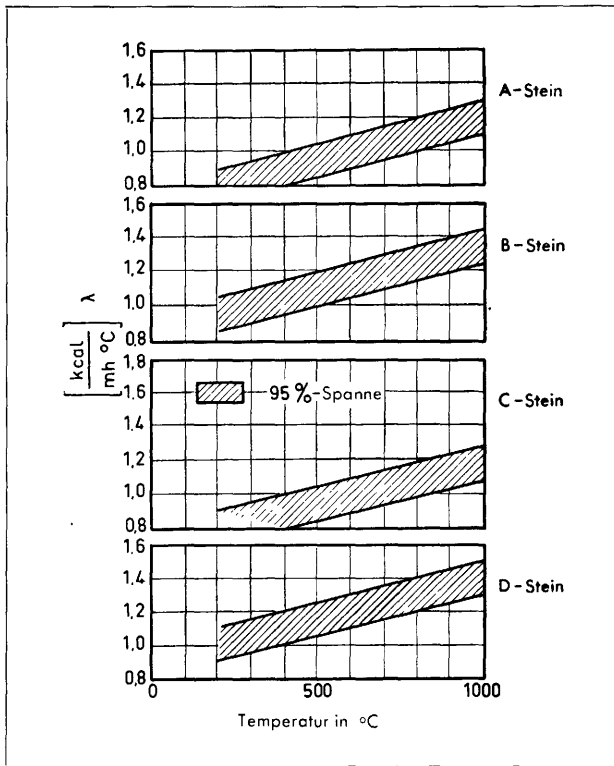


Bild 19: Wärmeleitfähigkeit ungebrauchter Silikagewölbesteine

Anbringung der Pt-PtRh-Elemente (dargestellt in Bild 20)

Der Stein mit einer Länge von 300 mm wurde in vier gleiche Teile von je 75 mm durch drei Elemente unterteilt. Diese Elemente befanden sich in der Nähe des Steinrandes und waren horizontal in diesem gelagert, um den Wärmestrom im Stein

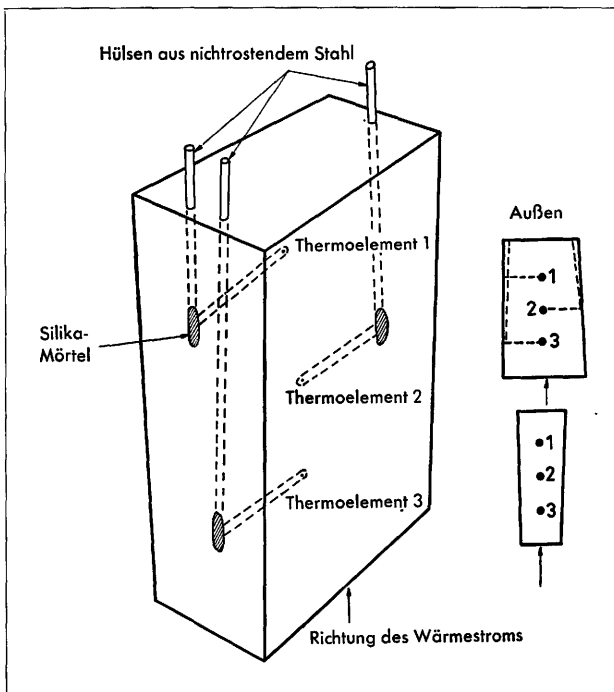


Bild 20: Anbringung der Thermoelemente in den Steinen

durch das Vorhandensein der Elemente und der notwendigen Bohrungen nicht zu stören.

Es besteht daher eine gewisse Garantie für die Genauigkeit der derartig gemessenen Temperaturen (Bild 21).

Ansicht eines gebrauchten Steins

Bei Ende der Ofenreise hatte der B-Stein, in welchem diese Elemente eingebaut waren, das in Bild 22 gezeigte Aussehen. An der Einwanderungsgrenze der Flußmittel wurde durch Interpolation der von den Thermoelementen 2 und 3 gemessenen Temperaturen eine Temperatur von 1160°C geschätzt.

Wärmeleitfähigkeit im Innern des Versuchssteins

Bei Kenntnis der Temperatur am Gewölberücken und damit des Wärmestroms kann man folgende Werte errechnen (für den B-Stein):

- graue Zone (cristobalitisch) ca. $1,7 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}$
- schwarze und braune Zone (Tridymit und Flußmittel) ca. $3,0 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}$
- unveränderte Zone ca. $1,6 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}$

Diese Werte sind für den C-Stein etwas geringer.

Wärmeleitfähigkeit im Verlauf der Ofenreise

Es wurde festgestellt, wie sich die Wärmeleitfähigkeit während der Ofenreise verändert, und zwar in jedem der vier durch Thermoelemente unterteilten Abschnitte des Steins (Tafel XVIII).

Die Untersuchung eines B-Steins zeigte:

- Die Wärmeleitfähigkeit der Zone 1 (unverändert) wechselte sehr wenig im Verlauf der Ofenreise.
- In Zone 2 wurde keine Veränderung bis zur 123. Charge festgestellt; dann zeigte sich aber, nach-

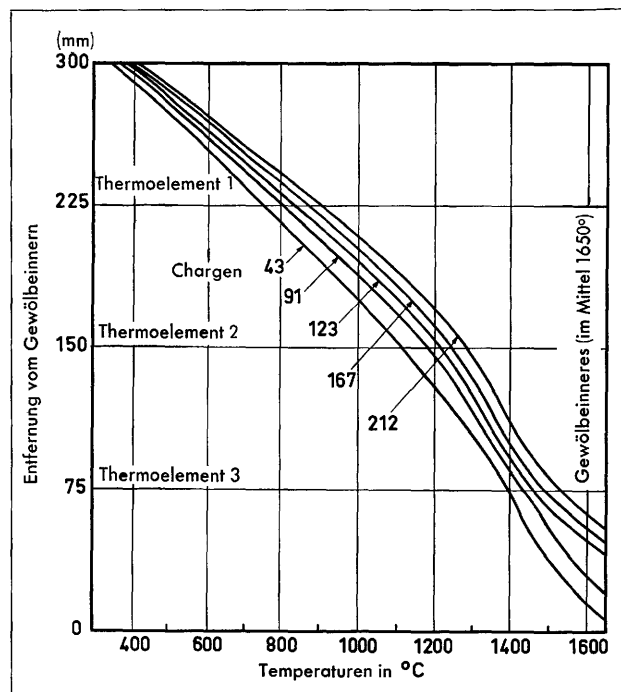


Bild 21: Temperaturverteilung im B-Stein/Gewölberücken (Messung mit Pyrometer „Land“)

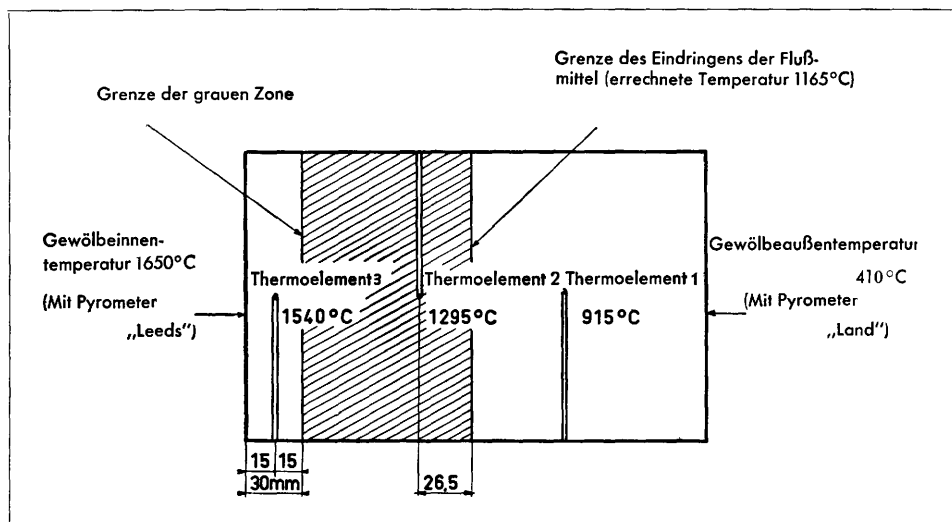


Bild 22: Schematischer Schnitt durch einen gebrauchten B-Stein

dem die Flußmittel diese Zone erreicht hatten, ein starker Anstieg.

- Die Wärmeleitfähigkeit der Zone 3 stieg ständig wegen Einwanderung der Flußmittel und Infiltration mit Metalloxyden.
- Aus gleichen Gründen stieg die Wärmeleitfähigkeit der Zone 4 zunächst an, fiel aber bei Abnutzung des Steins wieder ab, weil dann die Zone 4 vollständig durch die graue Zone ausgefüllt wurde.

Analoge Ergebnisse wurden beim C-Stein beobachtet:

- Die Wärmeleitfähigkeit in Zone 1 veränderte sich ebenfalls wenig und erreichte im Mittel einen Wert von 1,35 kcal/mh °C.
- In Zone 2 stieg die Wärmeleitfähigkeit von 1,4 bis auf 1,8 kcal/mh °C an.
- In Zone 3 stieg sie von 1,7 auf 3,25 kcal/mh °C.
- Zone 4 zeigte das gleiche Verhalten wie beim B-Stein.

TAFEL XVIII

Veränderung der Wärmeleitfähigkeit während der Ofenreise

	Gewölbe- außenfläche	Thermoelement 1		Thermoelement 2		Thermoelement 3		Gewölbe- innenfläche
		Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV			
(in kcal/mh °C)								
	Zone Char- genzahl	I	II	III	IV			
B-Stein	43	1,53	1,74	2,21	2,30			
	91	1,57	1,86	2,76	2,45			
	123	1,60	1,87	3,06	1,67			
	167	1,62	2,10	3,12	1,85			
	213	1,65	2,12	3,73	1,45			
C-Stein	43	1,32	1,56	1,88	2,04			
	91	1,35	1,54	2,31	2,56			
	123	1,42	1,64	2,62	2,06			
	167	1,47	1,65	2,49	1,30			
	213	1,46	1,80	3,27	1,10			

Es muß festgestellt werden, daß diese Angaben nur relative Bedeutung haben. Trotzdem erscheint eine Gegenüberstellung der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit einigen physikalischen Werten (z. B. Porosität, Infiltration) lohnend.

8. Infrarot-Aufnahmen

Hierbei handelt es sich um die Sichtbarmachung der auf der Wellenlänge 830 m μ emittierten Strahlung des Gewölbes. Diese Wellenlänge war durch Verwendung einer Infrarotplatte, die an dieser

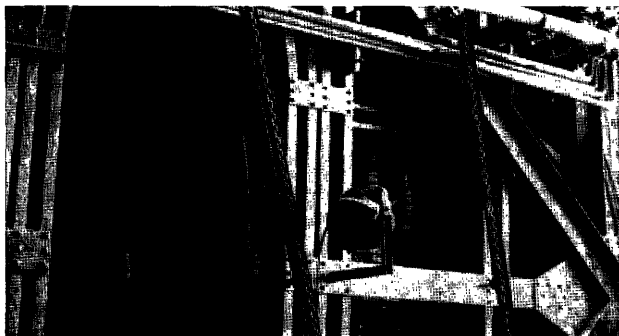


Bild 23: Infrarot- und Vergleichsaufnahme einer schadhaften Gewölbestelle

Stelle ihr Sensibilisationsmaximum hatte, gegeben. Für die Aufnahmen wurde das Objektiv Plaubel-Anticomar, $f = 10 \text{ cm}$, $1 : 2,9$, verwendet. Bei genügend langen Belichtungszeiten, die normalerweise 10 Sekunden, 100 Sekunden und 1000 Sekunden betragen, war die Ermittlung des gesamten Temperaturfeldes des Gewölbes möglich. Die Stellen, an denen ein stärkerer Verschleiß eingetreten war, strahlten entsprechend ihrer höheren Temperatur mit größerer Intensität und führten damit zu stärkerer Schwärzung der Infrarotplatte. Die untere Temperaturgrenze, bei der eine noch auswertbare Schwärzung eintritt, liegt jedoch bei 380°C . Aus diesem Grunde wurden die Infrarot-Aufnahmen meist erst gegen Ende der Ofenreise angefertigt. Die Platten ergaben damit zu diesem Zeitpunkt Auskunft über den relativen Verschleiß der Steine.

Bild 23 zeigt die Gegenüberstellung einer normalen Gewölbeaufnahme mit einer Infrarot-Aufnahme. Deutlich zeigt sich bei der letzteren eine Zone, in der der Verschleiß stärker fortgeschritten ist.

Bild 24, das bei drei verschiedenen Belichtungszeiten auf einer Infrarotplatte aufgenommen wurde, zeigt zusätzlich den Einfluß der Belichtungszeit bei diesem Verfahren. Darüber hinaus zeigt dieses Bild sehr deutlich die zonenweise Ausbreitung der Schwärzung beim Übergang von einer Belichtungszeit zur folgenden.

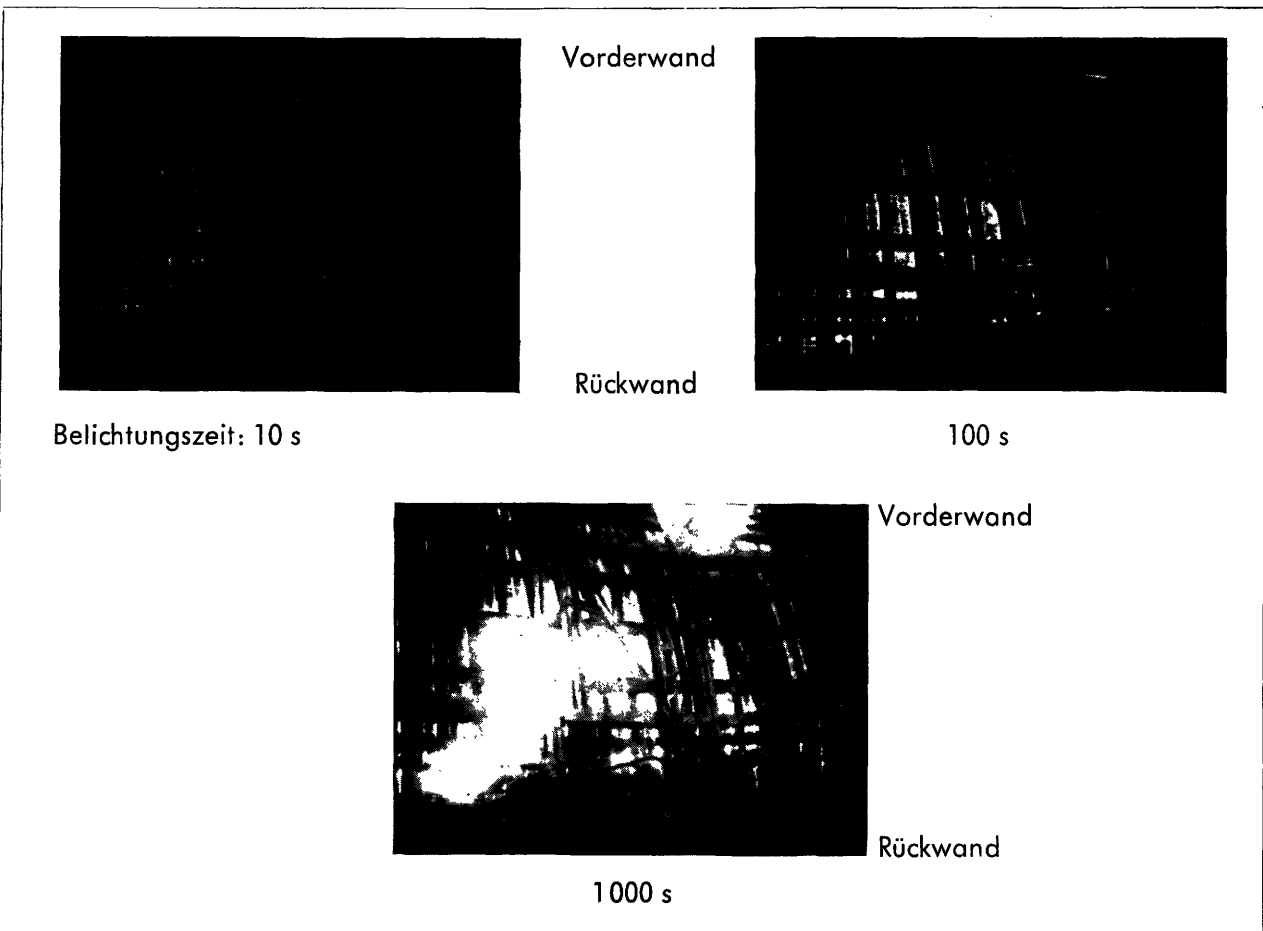


Bild 24: Infrarot-Aufnahmen eines SM-Gewölbes bei verschiedenen Belichtungszeiten nach 112 Schmelzen

Während das bisher beschriebene Verfahren bereits Aufschluß über den relativen Steinverschleiß bei bloßer Betrachtung der Aufnahmen ergibt, besteht durch eine fotometrische Auswertung noch zusätzlich eine bessere quantitative Aussagemöglichkeit. Hierzu wird zweckmäßigerweise die Infrarotplatte durch einen Raster unterteilt, so daß die Rasterlinien durch ein registrierendes Fotometer ausgemessen werden können. Man erhält auf diese Weise ein recht gutes Temperaturprofil des Gesamtgewölbes. Bestimmte Einflüsse, die von der Qualität des Aufnahmematerials herrühren, sind hierbei jedoch zu berücksichtigen⁽¹⁾.

Bild 25 zeigt, wie die Rastereinteilung bei einer normalen Infrarot-Aufnahme eines im Mittelteil stark verschlissenen Gewölberückens vorgenommen wird. In diesem Falle wurde durch einen Linienraster die Gewölbebreite in elf gleiche Teile unterteilt, so daß die später ermittelten Fotometerkurven ein wirklichkeitsgetreues Bild der Gewölbeaußentemperatur ergeben (Bild 26). Für die Auswertung muß man jedoch stets die Original-Infrarotaufnahmen und die Fotometerkurven gleichzeitig verwenden. So zeigt Bild 25 auf der Infrarotschicht verschiedene Schattenwürfe, die von der Gewölbearmierung sowie von einem Kühlgebläse herrühren. Aus den Fotometerkurven in Bild 26 ist dies jedoch nicht ohne weiteres ersichtlich. Unter Berücksichtigung

der Schattenbildung gibt Bild 26 ein naturgetreues Temperaturprofil des Gewölberückens wieder, das auf Grund der in Bild 16 dargestellten Beziehungen zwischen Gewölbeaußentemperatur und Verschleiß gleichzeitig als Verschleißprofil anzusehen ist. Durch Verwendung eines engeren Rasters — gegebenenfalls auch durch Querraster — läßt sich die Genauigkeit dieses Verfahrens noch beliebig steigern.

9. Gewöhnliche Aufnahmen vom Gewölbeinnern

Bei jeder Dickenmessung wurde das Gewölbeinnere fotografiert. Die Farbfotos auf den Seiten 49 und 51 zeigen die Kontraste zwischen einem Versuchsstreifen und einem anderen, wenn sich feuerfeste Steine verschiedener Qualitäten nebeneinander befanden. Dagegen sind bei Steinen gleicher Qualität keine Unterschiede sichtbar.

10. Entnahme gebrauchter Steine am Ende der Ofenreise

Zu Beginn des Aufheizens des Gewölbes wurden die feuerfesten Steine der einzelnen Versuchsstreifen mit einer hitzebeständigen Farbe bestrichen. Beim Gewölbeabbruch wurden diese Steine entnommen, um mit ihnen später Laborversuche durchzuführen.

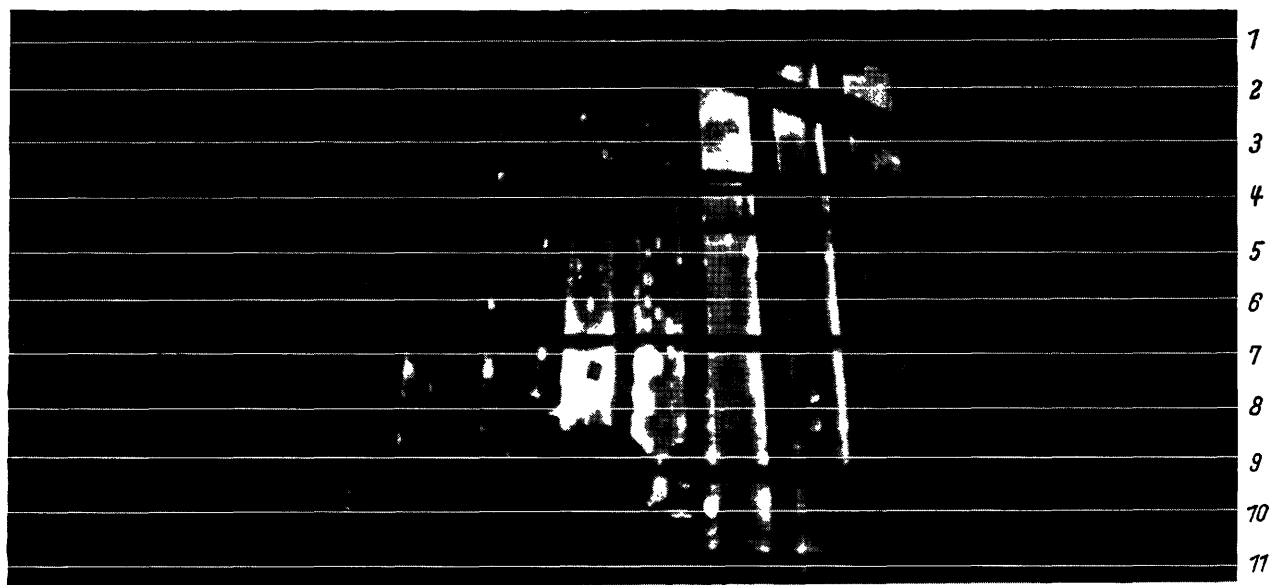


Bild 25: Infrarot-Aufnahme eines Versuchsgewölbes mit 11zeiligem Raster

⁽¹⁾ Plöger, U.: „Temperaturmeßverfahren zur Ermittlung des Steinverschleißes bei Silikagewölben von Siemens-Martin-Öfen“, Arch. Eisenhüttenwes., demnächst.

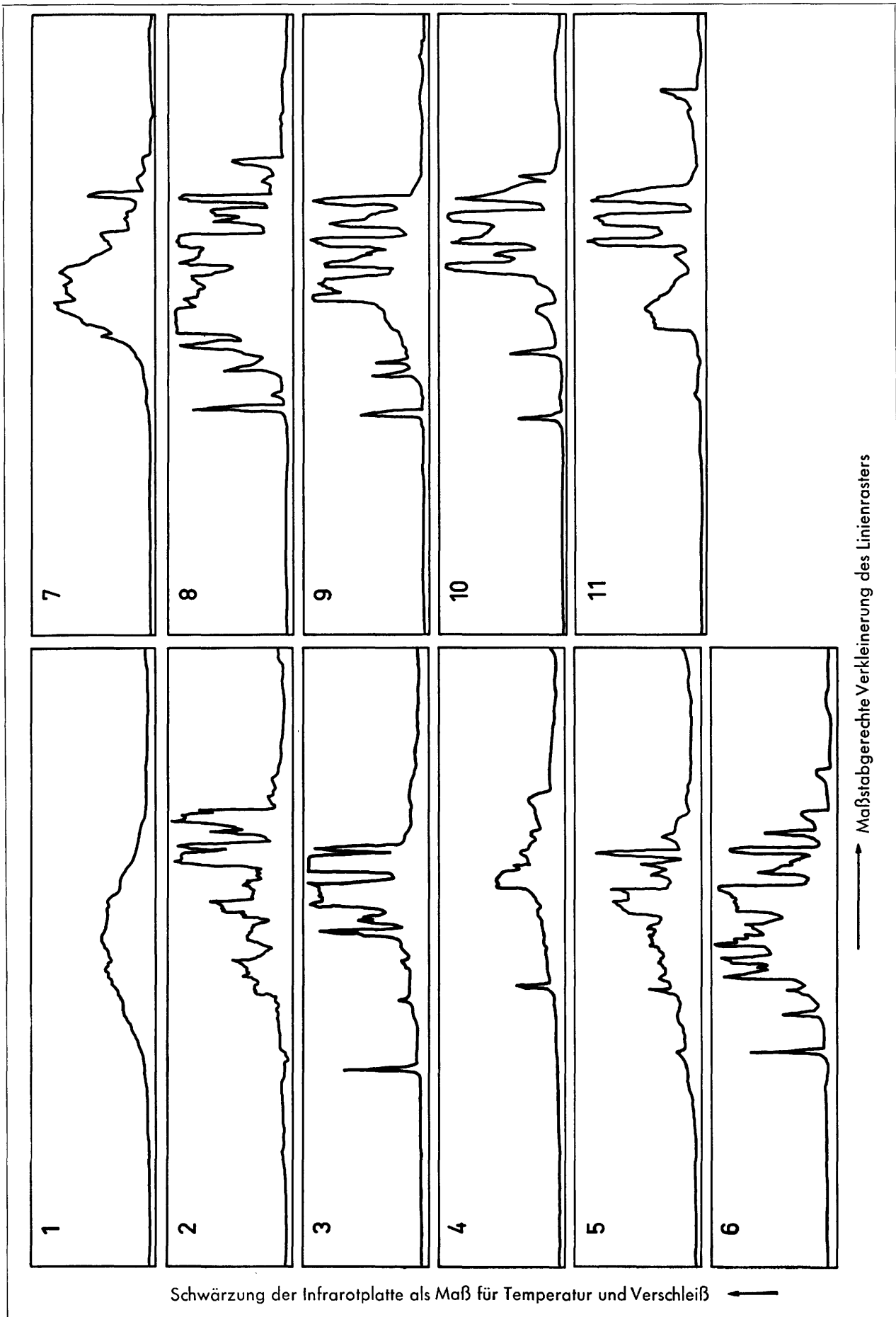
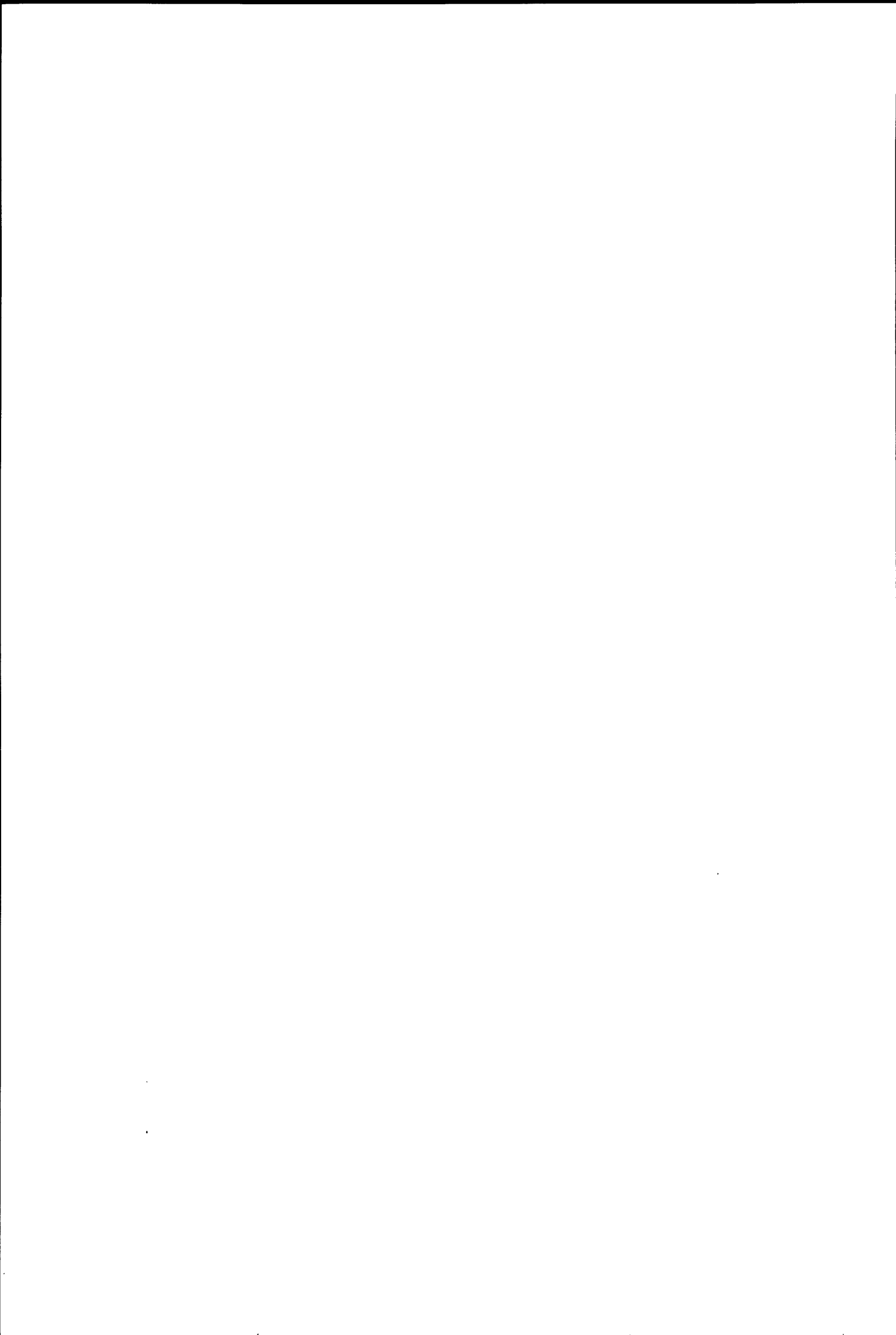


Bild 26: Fotometrierte Infrarot-Aufnahme nach Bild 25



KAPITEL VI

Bericht zu den Ofenreisen

Von U. PLÖGER und D. SANNA

ZUSAMMENFASSUNG

Im allgemeinen gestattet die Betriebsweise der 13 Versuchsofen folgende Feststellung:

Zwischen Herdflächenleistung und maximaler Gewölbetemperatur besteht kein Zusammenhang. Die Stelle der maximalen Temperatur im Gewölbe verschiebt sich manchmal im Laufe der Ofenreise. Örtliche Wirbelbildungen der Flamme können zu örtlich begrenzten stärkeren Zerstörungen führen. Die Kühlung durch Gebläse hat einen starken Einfluß auf den Temperaturgradienten innerhalb des Gewölbemauerwerks und damit auch auf Verschleiß und Haltbarkeit. Im Interesse eines größeren Temperaturgradienten ist eine höhere Wärmeleitfähigkeit bei vorgesehener Kühlung des Gewölbes wünschenswert. Im allgemeinen haben Steine mit niedrigerer Porosität eine höhere Wärmeleitfähigkeit, welche sich bei der Kühlung insbesondere während der zweiten Hälfte der Gewölbereise günstig bemerkbar macht.

Das Verhalten der Steine, das in verschiedenen Gewölben untersucht wurde, ist kurz in der nachfolgenden Tafel XIX beschrieben. Die C-, B- und D-Steine schienen auf Grund der subjektiven Beurteilung durch die Stahlwerker von gleicher Qualität zu sein. Der A-Stein war ihnen unterlegen und wies eine Tropfpunkttemperatur auf, die um 30° C niedriger war als die der drei anderen Steinsorten.

Hier folgen nun einige zusätzliche Angaben über den Versuchsablauf in jedem Siemens-Martin-Ofen:

Ofen 1 (60 t)

Verteilung der Versuchsstreifen von links nach rechts: B — A — B — D.

Hausmarke (Mitte): J.

Beheizung: Erdgas und Öl.

Die drei Versuchssteine verhielten sich folgendermaßen: Zu Beginn der Ofenreise zeigte sich ein stärkeres „Ziehen“ im Streifen A und J. Dabei war die verschiedene Art des Ziehens auffallend. Im erste-

ren Fall zeigten sich dicke lange Fäden, beim D- und B-Stein aber nur ein „Tröpfeln“.

B- und D-Stein zeigten sich etwa gleichwertig, während der A-Stein wesentlich schlechter war und auch der J-Stein nicht befriedigte. Doch schien es, als ob dieser durch die Mittellage des Streifens A in Mitleidenschaft gezogen wurde, da die darauffolgende Ofenreise — gänzlich mit J-Stein zugestellt — wesentlich bessere Resultate ergab und statt 85 Schmelzen (bei der Versuchsofenreise) 155 Schmelzen ergab. Das Gewölbe wurde während der ganzen Ofenreise mit Ventilatoren gekühlt, deren Anzahl von 3 auf 7 Stück gesteigert wurde.

Ofen 2 (120 t)

Von links nach rechts Versuchsstreifen:

C — D — C — A.

Hausmarke (Mitte): H.

Beheizung: Koksgas + Generatorgas.

Faden- oder Tropfenbildung: Zu Anfang — nach 16 Schmelzen — wurde beobachtet, daß der Streifen A lange Fäden zog.

Nach 44 Schmelzen wurden erst 2, nach 64 noch 2 weitere Ventilatoren am hinteren Gewölbeteil, Mitte und rechts, angesetzt.

Nach 118 Schmelzen wurden — von rechts ausgehend — 10 Felder über die Streifen A — C und H sowie 2 Felder D zugelegt, nach 152 Schmelzen der übrige Teil des Gewölbes. Das Gewölbe hielt 232 Schmelzen. Der A-Stein zeigte, im Vergleich zu den drei anderen Sorten, den weitaus stärksten Verschleiß. Vielleicht links Kühlung durch Roheisen-einguß.

Ofen 3 (200 t)

Von links nach rechts Versuchsstreifen:

D — C — D — B.

Hausmarke: H.

Beheizung: Generatorgas mit 22% Öl.

Nach 69 Schmelzen zusätzliche Kühlung des Gewölbes mit Gebläsen durch Kühlrohre. Nach 110 Schmelzen wurde ein etwa 2600 mm breiter Streifen entlang der Rückwand erneuert.

Im allgemeinen wurde bei Werk 3 mehr oder weniger starkes „Treiben“ der Versuchsstreifen festgestellt, welches aber dort allgemein vorkommt, auch bei den normalen Gewölben. Der Ofen ging während der ersten 14 Tage links etwas stärker als rechts, was sich in einem stärkeren Verschleiß des Streifens D zeigte.

Nach Behebung des ungleichen Ganges verlagerte sich die Abnahme der Gewölbestärke entsprechend dem normalen Verschleiß nach rechts über die Mitte hinaus. Der Verschleiß war über dem Abstich am stärksten. Das Gewölbe hielt 197 Schmelzen. Das Werk gibt als Qualitätsbezeichnung an: 1. B-Stein, 2. C-Stein, 3. D-Stein. Möglicherweise ist dieses Ergebnis aber noch durch Nachwirkung des anfänglichen ungleichmäßigen Ofenganges beeinträchtigt.

Ofen 4 (80 t)

Von links nach rechts Versuchsstreifen:

A — B — A — C.

Hausmarke: H.

Beheizung: vorwiegend Generatorgas + Öl, fallweise — siehe Tafel XIX — andere Beheizung.

Nach 98 Schmelzen wurde der Streifen A über der Rückwand angeblasen, erst mit einem Ventilator,

14 Tage später mit zwei Ventilatoren, der Streifen C zum selben Zeitpunkt mit einem Ventilator.

Der Verschleiß über der Rückwand war stärker als an den anderen Stellen. Die Streifen A verschlissen merklich schneller als C und B, C jedoch eindeutig schneller als B. Nach 178 Schmelzen wurde der halbe linke Streifen A, der rechte Streifen A ganz und der Streifen C zur Hälfte erneuert. Das Gewölbe hielt 291 Schmelzen. Das Werk gibt als Klassifizierung an: 1. B-Stein, 2. C-Stein, 3. A-Stein.

Die C-Steine scheinen schlechter als die B-Steine gewesen zu sein, da diese keinerlei Reparatur im Zuge der Versuchsofenreise notwendig hatten und bei den normalen Ofenreisen (mit B-Steinen) für gewöhnlich nach 230 bis 280 Schmelzen eine Reparatur notwendig wird. Dies zeigt, daß der Ofen vorsichtiger gefahren wurde.

Ofen 7 (100 t)

Das Gewölbe bestand (von links nach rechts) aus den folgenden Qualitäten: D — C — D — B.

Hausmarke: F.

Beheizung: Generatorgas.

Das Verhalten der drei Versuchssteine hat sich als vergleichbar und sehr gut herausgestellt. Das Gewölbe hielt 213 Schmelzen ohne jede Reparatur. Im weiteren befand sich das Gewölbe am Ende der Ofenreise noch in gutem Zustand, doch wurde der Ofen wegen des schlechten Zustands der Brennerköpfe abgestellt.

Das Verhalten der F-Steine war nahezu gleichwertig dem der drei Versuchssteine. Immerhin wurde eine etwas stärkere Abnutzung in der Mitte an der Vorderwand festgestellt, wobei sich die F-Steine dort infolge ihres sehr geringen Umwandlungsgrades aufblähten. Dies hat sich jedoch erst gegen Ende der Ofenreise, von ungefähr der 200. Schmelze an, herausgestellt. Abgesehen von der Qualität der Steine scheint das günstige Resultat in Werk 7 auf die folgenden Faktoren zurückzuführen zu sein: vollständiger Neuaufbau des Ofens für diese Ofenreise; Temperaturkontrolle auf der Gewölbeinnenseite an zwei Stellen nahe der Hinterwand, wodurch man „Feuerzungen“ verhindert hat; ständiges Überwachen des Gewölbes durch die Schmelzer.

Ofen 8 (75 t) (siehe Farbfotos auf S. 51)

Von links nach rechts: A — A — C — B.

Hausmarke: G.

Beheizung: Generatorgas.

Schon nach den ersten Schmelzen zeigte sich ein starker Verschleiß der A-Steine. Allerdings wurde der Verschleiß dadurch begünstigt, daß die Flammenrichtung hauptsächlich gegen diesen Teil des Gewölbes gerichtet war. Bei einem Maerz-Ofen, der mit Schwachgas beheizt wird, ist der Flammenaustritt aus den Brennern oft „zungenförmig“, wobei ein Teil der Zunge entlang der Hinterwand an das Gewölbe streift und dieses zerstört.

Nach 40 Schmelzen waren die beiden Streifen A merklich stärker abgenutzt als der Rest des Gewölbes. Der Mittelstreifen mit G oberhalb des Abstiches war gleichfalls angegriffen, jedoch schwächer, während die Versuchsstreifen C und B völlig intakt waren. Wie aus den Fotos ersichtlich, war der Unterschied zwischen den Zonen deutlich erkennbar, und es muß daraus geschlossen werden, daß man qualitativ den Einfluß der Flammeneinwirkung ausscheiden sollte.

Nach 173 Schmelzen mußten 6 m² der A-Steine und einige G-Steine ausgewechselt werden.

Nach 190 Schmelzen mußten sämtliche A- und G-Steine ausgewechselt werden. Hingegen befanden sich die B- und C-Versuchssteine in gutem Zustand und waren es auch noch, als der Ofen wegen anderer Reparaturen nach 290 Schmelzen abgebrochen wurde.

Ofen 9 (60 t) (siehe Farbfotos auf S. 49)

Die Versuchsstreifen waren in Werk 9:

D — D — C — B.

Hausmarke: H.

Beheizung: Mischung von Generatorgas und Mischgas.

Die drei Versuchssteine (B, C und D) schienen ein vergleichbares Verhalten aufzuweisen. Dies wurde durch die Feststellung des Tropfpunktes dieser drei Qualitäten bestätigt.

Der Tropfpunkt wurde bei etwa 1670 °C erreicht; das Abtropfen begann um 1680 °C; bei etwa 1690 °C trat starkes Tropfen auf, wobei sich teils kurze Tropfen und teils Stalaktiten ausbildeten; um 1700 °C wurde das Tropfen schließlich sehr stark. Im Hinblick auf die Schwierigkeiten der Messungen im Gewölbeinnern haben die angeführten Temperaturen nur relativen Wert.

Während der ersten Hälfte der Ofenreise war die Temperatur auf der rechten Gewölbeinnenseite höher. Daher rührte eine größere Abnutzung der B-Steine auf der äußersten rechten Gewölbeite sowie der C-Steine gegen deren Hinterwand. Nach der ersten Hälfte der Ofenreise war der Ofen thermisch ausbalanciert, doch herrschte dann die höchste Temperatur am Mittelstreifen H. Dort wurde auch die erste Zwischenreparatur an der Hinterwand durchgeführt. Später wurden weitere Reparaturen wieder an der Hinterwand der Streifen D, H und C durchgeführt. Der Ofen hielt 270 Schmelzen.

Ofen 10 (50 t)

In Werk 10 war die Aufteilung der Versuchssteine von links nach rechts wie folgt: B — B — A — D.

Hausmarke: G.

Beheizung: Mischgas.

Unglücklicherweise wurde das Gewölbe zu Beginn der Ofenreise durch das Chargieren zweier scharfer Granaten unter den Streifen D und A beschädigt. Immerhin konnte man schon bei Beginn feststellen,

daß die A-Steine eine größere Abnutzung als die angrenzenden D- und G-Steine aufwiesen. Dennoch wurde die Beobachtung des linken Teils des Gewölbes, wo sich der Doppelstreifen B befand, fortgesetzt. Diese Steine haben sich ebenso wie der Mittelstreifen G sehr gut verhalten. Das Gewölbe hielt 312 Schmelzen.

Ofen 11 (35 t)

Von links nach rechts: C — C — D — A.

Hausmarke: H.

Beheizung: Erdgas (überwiegend Methan)
+ 24 % Öl.

Es sei hier vorweggenommen, daß die Versuchsofenreise in Werk 11 die höchste Schmelzzahl aller Versuchsofenreisen erreichte, nämlich 495 Schmelzen. Dabei war das Versuchsgewölbe nur mit Normalsteinen — also ohne Rippensteine, wie in Werk 11 üblich — ausgeführt. Schließlich ergaben die mit dem „Tricolor“ vorgenommenen Temperaturmessungen im Gewölbeinnern die niedrigsten aller bei den Versuchsofenreisen gemessenen Temperaturen, nämlich eine Höchsttemperatur von nur 1610 °C. Die durchschnittliche Gewölbehaltbarkeit in Werk 11 beträgt 400 Schmelzen mit dem H-Stein. Trotzdem ist die Herdbelastung und die t/h-Leistung dieses Ofens unter den ersten 6 Versuchsofen zu finden. Eine Erklärung hierfür gibt nur die hervorragend gute Flammenführung. Die Beobachtung zeigte, daß die Flammen ganz tief am Bade liegen und keinerlei Emporsteigen gegen das Gewölbe feststellbar ist. Demgemäß wurde der Tropfpunkt keines der Versuchssteine auch nur annähernd im Gewölbe erreicht und daher auch ein gutes Verhalten des sonst überall vorzeitig verschleißenden A-Steins beobachtet.

Nach dem 370. Abstich wurde die Vorderwand wegen lokaler roter Flecke angeblasen. Nach dem 420. Abstich erfolgte eine Ausbesserung an der Vorderwand von 3 m Länge und etwa 1 m Breite, ausgehend vom Mittelstreifen über den Abstich und sich auf den Streifen D nach rechts und den Streifen C hinein erstreckend. Die nach dem Abbruch erfolgten Messungen der Steine ergaben: Der Verschleiß der den Brennern benachbarten Versuchsstreifen (links D-Stein, rechts A-Stein) war am geringsten. Der Verschleiß des Streifens C (anschließend links gegen Mitte), des Mittelstreifens H und des rechts davon liegenden Streifens D war mit ganz geringem Unterschied der gleiche und in keinem Fall mehr als 50 % der ursprünglichen Steinstärke. Der B-Versuchsstein war nicht eingebaut. Die drei verwendeten Versuchssteine haben sich ungefähr gleichwertig gezeigt, der A-Stein war dort nicht unterlegen.

Ofen 12 (42 t)

Von links: D — D — C — B.

Hausmarke: K.

Beheizung: ausschließlich Öl.

Die Versuchssteine haben sich annähernd gleichartig verhalten. Die Tropfenbildung war sehr

geringfügig. Tropfpunktmessungen wurden nicht durchgeführt. Nach dem 230. Abstich wurde eine geringfügige Reparatur im Streifen K am breitesten sowie etwas weniger breit in den anschließenden Zonen D und C durchgeführt.

Das Gewölbe hielt 284 Abstiche und damit 10% länger als der normale Werkdurchschnitt. Aus den beim Abbruch entnommenen Steinen wurde folgender Verschleiß festgestellt: K₁₂ bis zu 50%, D 35 bis 45%, C bis zu 52%, B bis zu 36%.

Der Stahlwerkschef hielt den D-Stein für den besten, anschließend den B-Stein und dann den C-Stein.

Öfen 14, 15, 16 (Ofen 14: 35 t, Ofen 15 und 16: 60 t)

Es wurden drei Versuchsgewölbe aufgebaut:

- a) ein Gewölbe A — A — B — C,
- b) ein Gewölbe D — C — D — B,
- c) ein Gewölbe A — B — A — C,

Die beiden Gewölbe b und c wurden nacheinander auf den gleichen Ofen aufgebaut.

In allen drei Fällen war die Hausmarke der E-Stein.

Beheizung: Koksofengas mit Ölzusatz, zeitweise wegen Versorgungsschwierigkeiten ausschließlich Koksofengas.

Auch hier konnte man feststellen, daß die A-Steine ein merklich schlechteres Verhalten als die drei anderen Qualitäten aufwiesen. Bei den zwei Gewölben, in denen der A-Stein verwendet wurde, mußte man die Streifen A nach etwa 100 Schmelzen durch den E-Stein ersetzen, um die Versuche mit den anderen Qualitäten fortsetzen zu können.

Beobachtungen, welche mit dem Pyrometer „Leeds“ durchgeführt wurden, zeigten, daß der Tropfpunkt der A-Steine um ungefähr 30 ° C tiefer lag als der der übrigen Steine.

Wieder einmal mehr zeigte sich, daß die Marken B, C und D gleichwertig erscheinen. Schließlich ergab sich noch, daß der E-Stein den drei besten Versuchsqualitäten gleichwertig war.

Die Stahlwerker von Werk 14, 15 und 16 bemerkten zu den Versuchen folgendes:

Im Falle von Werk 14, 15 und 16 verhindert die Verwendung von Silikagewölben die Möglichkeit eines schärferen Ofenganges in einem Ausmaß, wie dies bei basischen Gewölben nicht zutrifft. Dies fällt dann um so mehr ins Gewicht, wenn es sich um die Herstellung von Qualitätsstählen handelt, welche auf hohe Temperaturen gebracht werden müssen, sei es bei der Verarbeitung von Chrom-Nickel-Stahl, sei es beim Abgießen großer Stahlblöcke für Schmiedestücke. Bei der Herstellung normaler handelsüblicher Stähle ist die Zustellungsfrage von geringerer Bedeutung.



Bild A



Bild B

Ofen Nr. 9

Bild A

Der linke Teil des Gewölbes besteht aus den C-Steinen und der rechte aus den B-Steinen. Man kann an der Grenze zwischen den beiden Streifen keinen Unterschied sehen, und die beiden Steine scheinen von gleicher Qualität zu sein. Auf der äußersten rechten Seite der Fotografie hat die Flamme beim Berühren des Gewölbes einen stärkeren Verschleiß hervorgerufen.

Bild B

Die sieben Reihen, die in der Mitte der Fotografie erscheinen, bestehen aus der Hausmarke des Werkes, es sind Steine guter Qualität. Zu ihrer Linken sind die D-Steine und zu ihrer Rechten die C-Steine eingebaut, die unter sich einen Vergleich zulassen: Diese Steine sind auch von vergleichbarer Qualität.

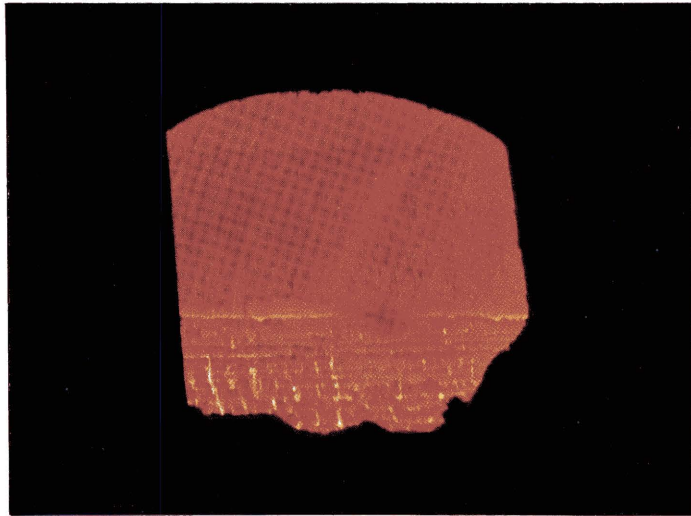


Bild C

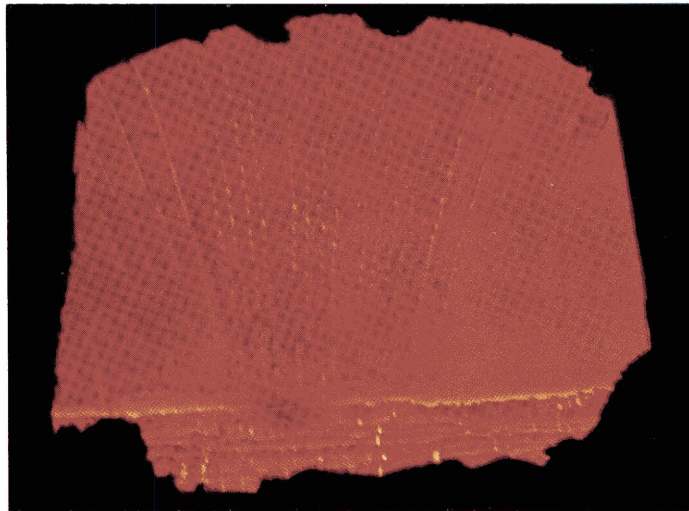


Bild D

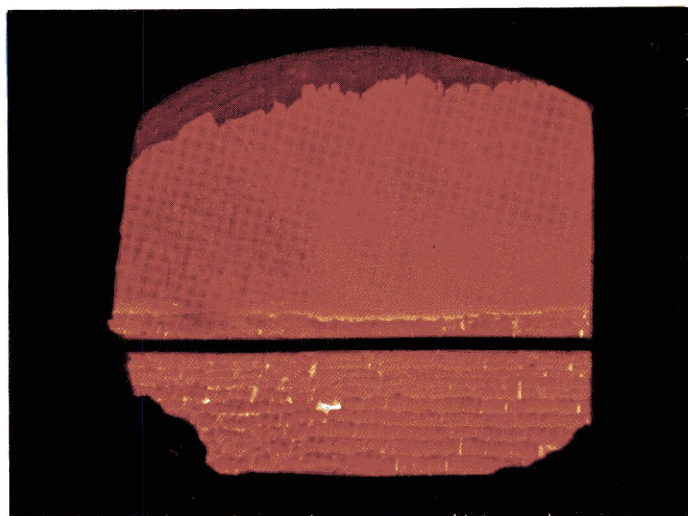


Bild E

Ofen Nr. 8

Bild C

In einem anderen Ofen hat man die A-Steine eingebaut. Man sieht auf dieser Fotografie, daß die Grenzreihe zwischen den A-Steinen auf der linken Seite und der Hausmarke des Werkes auf der rechten Seite sehr deutlich gekennzeichnet ist. Es besteht dort ein Vorsprung von 15 cm Höhe. Der A-Stein scheint von minderer Qualität als die Hausmarke des Werkes zu sein.

Bild D

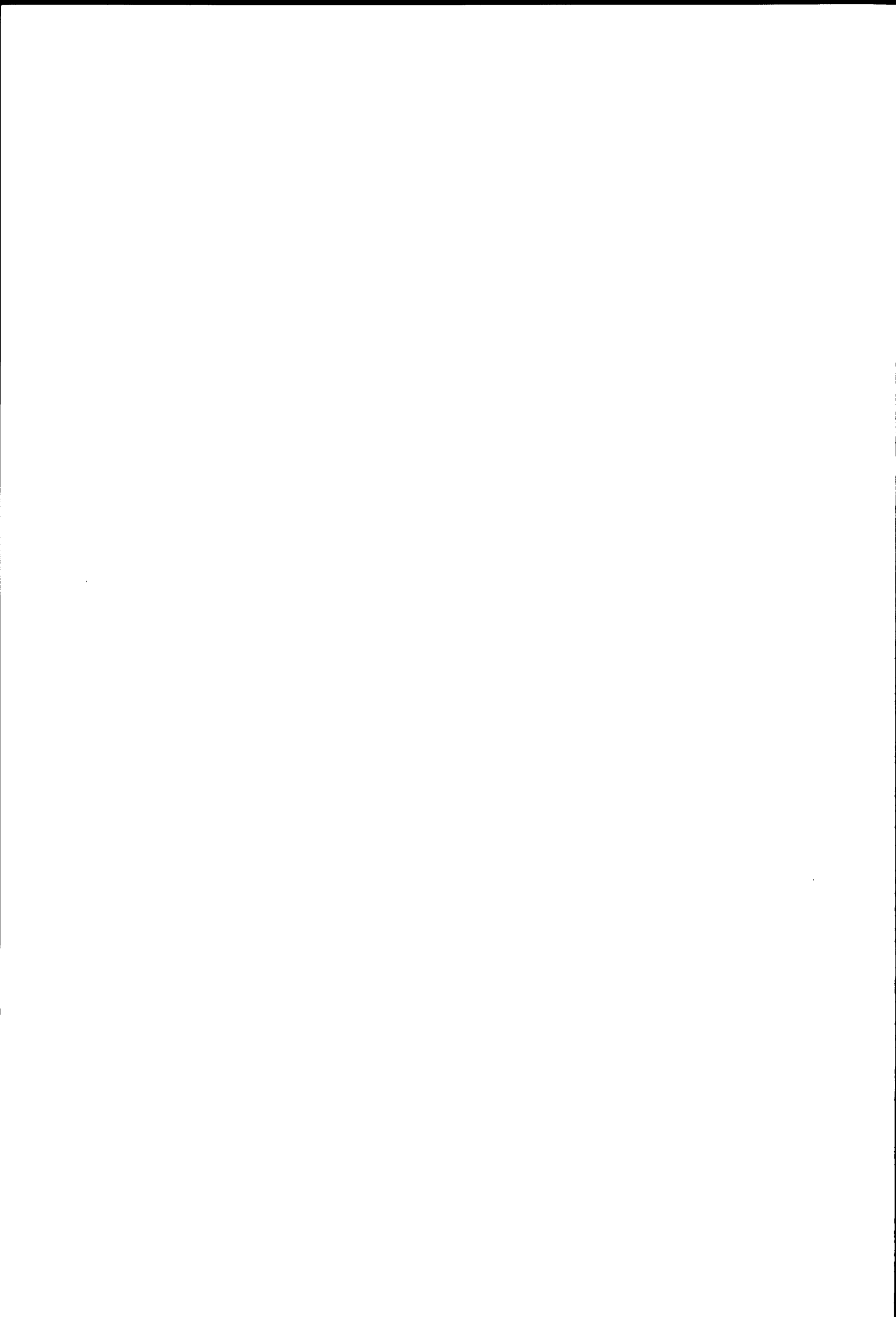
Man erkennt auf dieser Fotografie auf der linken Seite den sehr starken Verschleiß der A-Steine und in der Mitte die Hausmarke des Werkes, die schon auf dem vorigen Foto beobachtet wurde. Auf der rechten Seite befinden sich die B-Steine, die keine Änderung erkennen lassen. Diese Fotografie zeigt die Reaktion verschiedener Steinqualitäten auf die Bedingungen, denen sie im Siemens-Martin-Gewölbe ausgesetzt sind. Trotz des engen Intervalls von Tropfpunkten (30 ° C) wurde der Unterschied zwischen drei Steinen verschiedener Qualität, deren Verhalten mäßig, mittel und gut war, herausgestellt.

Bild E

Es handelt sich auch hier um das gleiche Gewölbe des Werkes. Man findet in dem linken Teil der Fotografie die Hausmarke des Werkes wieder, auf der rechten Seite die B-Steine und an der Seite von ihnen die C-Steine. In ihrem Aussehen zeigen sie keinen Unterschied, und die Qualität ist auch hier gleichwertig.

TAFEL XIX
Zusammenfassung des Verhaltens der feuerfesten Steine

Siemens-Martin-Ofen	Ofenkapazität t	Brennstoff	Zahl der Schmelzen	Verteilung und Verhalten der ff. Steine			Bemerkungen		
				links	Mitte Hausmarke	rechts			
1	60	etwa 70% Erdgas + 30% Öl	85	B gut	A schlecht	J mittel	B gut	D	35% Flüssigeinsatz — keine Reparaturen, von Anfang an Gewölbe angeblasen
2	120	Generatorgas + Koksofengas	232	C	D mittel	H mittel	C mittel	A schlecht	20% Flüssigeinsatz und 25% Duplex, ab 44. Schmelze geblasen, nach 118. Schmelze vom rechten Gewölbeende aus beginnend zehn Felder über die Streifen A, C und H sowie zwei Felder über den Streifen D nachgelegt, nach 152. Schmelze Rest nachgelegt. RE-Loch in der linken Rückwand.
3	200	Generatorgas + 22% Öl	197	D mittel	C gut	H sehr gut	D mittel	B sehr gut	Ab 69. Schmelze geblasen, nach 110. Schmelze Reparatur entlang der Rückwand. Während der ersten 14 Tage ging der Ofen links stärker.
4	80	normal: Generatorgas + Öl oder Generatorgas + Koksofengas + Öl oder nur fallweise Koksofengas allein	291	A schlecht	B sehr gut	H gut	A schlecht	C mittel	23% Flüssigeinsatz oder 70% Duplex, Rückwand stärker verschlissen als Vorderwand. Nach 178. Schmelze auf der linken Seite Streifen A zur Hälfte, auf der rechten Seite Streifen A ganz, Streifen C zur Hälfte nachgelegt.
7	100	Generatorgas	213	D	C sehr gut	F gut	D	B sehr gut	Symmetrischer Ofengang. Stärkere Abnutzung bei Vorderwandmitte.
8	75	Generatorgas	290	A	A schlecht	G mittel	B	C sehr gut	Links stärkerer Ofengang, nach 190. Schmelze Streifen A nachgelegt.
9	60	Mischgas + Generatorgas	270	D	D sehr gut	H gut	C	B sehr gut	Im ersten Teil der Gewölbbereiche rechts stärkerer Ofengang, stärkerer Verschleiß über Rückwandmitte.
10	50	Mischgas	312	B	B sehr gut	G sehr gut	A	D schlecht ?	Symmetrischer Ofengang, rechte Seite (A- und D-Steine) durch Granatexplosion vorzeitig zerstört.
11	35	Erdgas + 24% Öl	495	C	C gut mittel	H mittel	D	A gut	Rippenfreies Gewölbe, ab 370. Schmelze geblasen, nach 420. Schmelze Streifen D, H und C auf einer Länge von 3 m über der Vorderwand nachgelegt.
12	42	Öl	284	D	D gut sehr gut	K mittel	C	B mittel gut	Sauerstofffrischen mit der Lanze (3,7 Nm ³ O ₂ /t Stahl), nach 230. Schmelze Reparaturen an den Streifen C und D über der Vorderwand von Mitte K ausgehend je 1,5 m nach beiden Seiten und 30 bis 70 cm tief.
14	35	Koksofengas	233	A	A schlecht	E sehr gut	B	C sehr gut	Symmetrischer Ofengang, nach 119. Schmelze Streifen A nachgelegt.
15	60	80% Koksofengas + 20% Öl	159	D	C sehr gut	E sehr gut	D	B sehr gut	Symmetrischer Ofengang.
16	60	60% Koksofengas + 40% Öl	224	A	B schlecht sehr gut	E sehr gut	A	C schlecht sehr gut	Symmetrischer Ofengang, nach 76. Schmelze Streifen A nachgelegt.



KAPITEL VII

Statistische Untersuchung der Ergebnisse

Von F. BASTENAIRE und M. BASTIEN

(Übersetzt aus dem Französischen)

ZUSAMMENFASSUNG

Eine Auswertung der Steindickenmessungen der Versuchsstreifen zeigte, daß der Steinverschleiß linear von der Anzahl erzeugter Schmelzen abhängig ist. Die Haltbarkeit der einzelnen Steinqualitäten ließ sich also durch den Anstieg dieser Geraden charakterisieren.

Weil sich die Wirkungen der einzelnen Einflußgrößen auf den spezifischen Verschleiß nicht in Form einer additiven Funktion darstellen ließen, sondern durch multiplikative Faktoren, wurde eine Varianzanalyse der Logarithmen des spezifischen Verschleißes durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigten, daß die Steinqualität und der Versuchsofen einen gesicherten Einfluß auf den Steinverschleiß haben. Lediglich zwei der Ofencharakteristiken konnten als die Gewölbehaltbarkeit maßgeblich beeinflussend betrachtet werden: das Abstichgewicht des Ofens und das Beheizungsmittel. Der Einfluß der Ofengröße wurde gesichert festgestellt.

1. Betrachtung der Ergebnisse

Als Berechnungsgrundlage diente eine bestimmte Anzahl von Ergebnissen der Gewölbedickenmessungen. Es waren hierfür Löcher in den Gewölben vorgesehen. Die praktische Durchführung war derart, daß man verschiedene Steine der Länge nach durchbohrte bzw. die zusammenstoßenden Kanten von vier Steinen abschliff. Die Dicke wurde auf verschiedene Art gemessen, z. B. indem man einen Stahldraht oder ein Stahlrohr so lange in das betreffende Loch schob, bis das Rohr im Innern des Ofens sichtbar wurde. Betrachtet man die Unterschiede der Dickenmessungen verschiedener benachbarter Löcher zum gleichen Zeitpunkt der Ofenreise, so stellt man fest, daß die Ergebnisse sehr schwanken; dies zeigt wiederum, daß die verschiedenen verwendeten Methoden nicht die gleiche Genauigkeit haben.

Es war vom Standpunkt der leichteren Auswertbarkeit der Ergebnisse aus sehr nachteilig, daß sich die Löcher in den Gewölben an sehr verschiedenen Stellen befanden und daß ihre Anzahl sehr unter-

schiedlich war; diese schwankte sogar in ein und demselben Gewölbe von Streifen zu Streifen. Ebenso war auch die Anzahl der Dickenmessungen sehr unterschiedlich. Schließlich wurde die Auswertung noch dadurch erschwert, daß einige Messungen fehlten.

Die Tafel XX zeigt, getrennt nach jedem Ofen, die Anzahl der Löcher in jedem Streifen, getrennt nach den drei Partien Rückwand, Gewölbescheitel, Vorderwand.

Die Tafel XXI zeigt die gesamte Anzahl der während der Ofenreise in den drei Partien der vier (mit I bis IV bezifferten) Versuchsstreifen ausgeführten Messungen. Man stellt fest, daß diese Anzahl äußerst unterschiedlich, oft sogar recht gering ist.

2. Verminderung der Meßwerte

Man muß sich vergegenwärtigen, daß der Versuchsplan derart aufgestellt war, daß er es nur erlaubte, den Verschleiß jedes Gewölbestreifens durch eine einzige Meßgröße charakterisieren zu können. In Wirklichkeit jedoch variiert der Verschleiß mit

der Zeit, und die an ein und demselben Streifen an verschiedenen Punkten gemessenen Dicken sind sehr unterschiedlich.

Es war angenommen worden, daß die beiden Hauptfaktoren, die systematisch die Dicke jedes Gewölbestreifens bestimmten, die folgenden waren:

1. die Anzahl der Schmelzen, die bis zum Zeitpunkt der Messungen erzielt waren,
2. der Abstand des Meßpunktes eines Gewölbestreifens bestimmter Position von der großen Achse des Ofens.

die Anzahl der Messungen nahe der Vorder- und Rückwand war aber so gering und meist zu unregelmäßig, um eine statistische Auswertung zu erlauben. Es werden deshalb nur die Ergebnisse herangezogen, die man am Gewölbescheitel erzielte. In der so begrenzten Partie kann man annehmen, daß der Verschleiß nur in zufälliger Art als Funktion der Meßstelle wechselt.

Darüber hinaus ist die Gewölbedicke eine Funktion der Zeit. Bei den Messungen, die ein gesamtes Gewölbe umfassen, könnte man auf eine Zeitskalen-

TAFEL XX

Ofen Nr.	Anzahl der Löcher pro Streifen			Ofen Nr.	Anzahl der Löcher pro Streifen		
	Rückwand	Scheitel	Vorderw.		Rückwand	Scheitel	Vorderw.
1	1	2	1	9	4	5	4
2	1	2	1	10	3	6	3
3	1 bis 2	1 bis 3	0 bis 2	11	2	2 bis 3	1
4	1	2	1	12	2	1	1
7	4	6	4	14	2	6	2
8	4	6 bis 7	4	15	3	9	3
				16	3	9	3

TAFEL XXI

Ofen Nr.	Versuchsstreifen												(1)
	I			II			III			IV			
	R	S	V	R	S	V	R	S	V	R	S	V	
1	6	12	6	5	11	6	6	12	6	6	12	6	
2	8	16	8	6	7	5	6	11	5	6	12	6	
3	12	17	10	12	12	0	12	17	5	6	6	5	
4	4	12	1	6	10	7	3	8	4	2	10	7	
7	19	27	19	18	25	18	19	24	19	13	26	20	
8	9	16	9	10	12	9	15	21	13	12	27	14	
9	13	24	17	14	22	13	16	20	15	19	14	15	
10	12	22	10	12	24	12	0	0	12	8	13	12	
11	8	8	4	8	12	4	8	12	4	8	12	14	
12	10	4	3	10	4	3	9	4	2	4	1	2	
14	8	20	7	5	23	8	5	30	10	8	30	10	
15	5	14	6	4	17	16	6	17	6	6	18	6	
16	5	17	6	8	24	8	6	18	6	8	24	8	

(1) R = Rückwand
S = Scheitel
V = Vorderwand

In Übereinstimmung mit der Erfahrung der Stahlwerker zeigten die Ergebnisse, daß der Verschleiß allgemein in den beiden Zonen nahe der Vorderwand und der Rückwand stärker ist. Sie zeigten weiterhin, daß die Ausdehnung dieser Zonen relativ klein war, so daß man mit Gewölbescheitel einen ziemlich großen Teil des Gewölbes bezeichnen konnte.

Vor der Ausführung der Versuche war man übereingekommen, getrennt voneinander das Verhalten der Steine in diesen drei Partien zu untersuchen;

definition verzichten, wenn man nur den Verschleiß einzelner Streifen des gleichen Gewölbes zu vergleichen hätte. Demgegenüber sollten jedoch, was auch viel naheliegender war, die Steine in verschiedenen Öfen untereinander verglichen werden; zum anderen sollte der Versuchsplan auch erlauben, die Einflüsse verschiedener Ofencharakteristiken auf den Verschleiß zu untersuchen. Unter diesen Voraussetzungen mußte eine mit der Zeit korrespondierende Meßziffer geschaffen werden. Die Einheit, auf die wir zurückgriffen, war die Schmelze.

a) Veränderung der Dicke mit der Anzahl der Schmelzen

Da entsprechende Werte fehlten, konnte man den Verschleißfortschritt mit der Anzahl der Schmelzen nicht in jedem Punkt des Gewölbes verfolgen. Weil die Streuung der einzelnen Messungen zu groß war, war es nicht möglich, genügende Auskunft über die Art der darstellenden Kurve zu erhalten; man konnte jedoch in den Gewölben, in denen zahlreiche Löcher vorhanden waren, verschiedene Zonen feststellen, innerhalb deren der Verschleiß sich nicht systematisch zu ändern schien; es wurde daher die Streuung der Ergebnisse dadurch vermindert, daß ein mittlerer Verschleiß allgemein mittels 4 bis 6 Meßpunkten berechnet wurde.

Mit dieser Methode wurden 65 Diagramme „Gewölbeverschleiß: Anzahl der Schmelzen“ gezeichnet und das Verhalten der vier feuerfesten Steintypen in den drei weiter vorn erwähnten Gewölbepartien und in verschiedenen Öfen untersucht. (Es hätten sich $32 \times 3 = 96$ Diagramme ergeben, wenn alle Fälle in Betracht gezogen worden wären). Es hat sich gezeigt, daß sich mit Ausnahme von vier oder fünf zweifelhaften Fällen die Punkte nur zufällig von einer Geraden entfernen, die durch den Koordinatenursprung geht.

In den Bildern 27 und 28 sind zwei Beispiele für den Verschleißfortschritt in Abhängigkeit von der Anzahl der Schmelzen gegeben. (Jeder eingetragene

lag. Sie kann bestimmt werden durch die Ergebnisse der Dickenmessungen, die während der Ofenreise zu beliebigen Zeitpunkten gemacht wurden.

Es erschien uns angeraten, die Verschleißfestigkeit durch diesen Parameter (die oben erwähnte Neigung), den wir den „spezifischen Verschleiß“ genannt haben, zu charakterisieren. Wäre es nicht möglich gewesen, eine Meßgröße dieser Art zu definieren, so hätte man nur die verschiedenen Gewölbedicken bei einer gleichen Anzahl von Schmelzen vergleichen können; dies konnte man jedoch mit dem vorhandenen Zahlenmaterial nicht verwirklichen. Vom Standpunkt des Statistikers aus gesehen, hat der spezifische Verschleiß den Vorteil, aus der Gesamtanzahl der während der Ofenreise erhaltenen Ergebnisse berechnet werden zu können, so daß man demzufolge das gesamte vorliegende Informationsmaterial benutzen konnte.

b) Schätzwert des spezifischen Verschleißes

Um die beste Methode einer statistischen Abschätzung des spezifischen Verschleißes zu finden, muß man theoretisch die Art des Wahrscheinlichkeitsgesetzes aller Meßergebnisse zu verschiedenen Zeiten der Ofenreise kennen. Man kann annehmen, daß jedes einzelne Ergebnis, getrennt genommen, einem Laplace-Gaußschen Gesetz folgt; logischerweise ist jedoch der Verschleiß ein irreversibler Vorgang, so daß die Messungen in der Wahrchein-

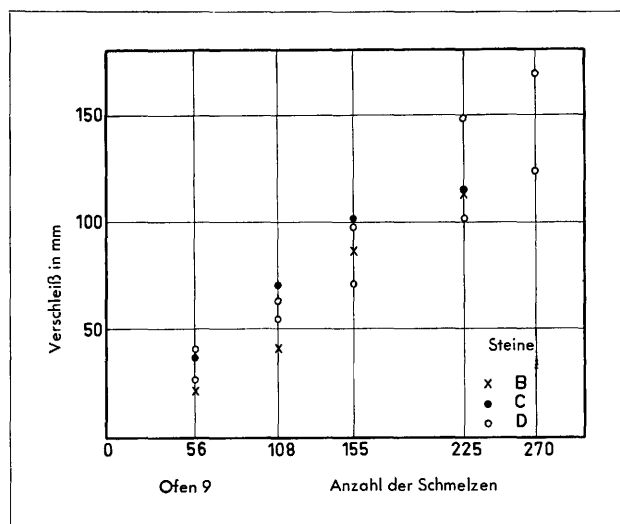


Bild 27: Mittelwerte der Messungen an 4 Stellen (Ofen Nr. 9)

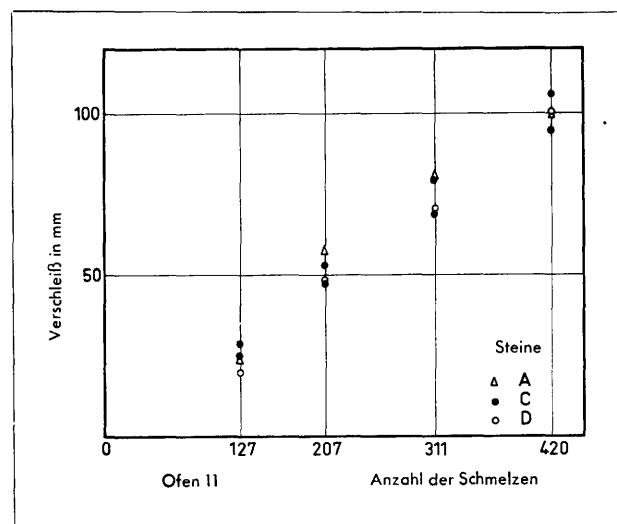


Bild 28: Mittelwerte der Messungen an 2 oder 3 Stellen (Ofen Nr. 11)

Wert entspricht dem mittleren Verschleiß eines Versuchsstreifens im Bereich des Gewölbescheitels.)

Es wird deshalb angenommen, daß diese Art der Veränderung allgemeingültig ist und sich ebenso auf die Fälle anwenden läßt, wo sie im Hinblick auf die mangelnde Anzahl von Messungen und die Schwankungen der Ergebnisse nicht direkt bestätigt werden konnte. Die Neigung der Geraden, ausgedrückt zum Beispiel in mm/10 Schmelzen, bestimmt natürlich die Verschleißfestigkeit der feuerfesten Steintype unter den speziellen Versuchsbedingungen, denen das feuerfeste Erzeugnis unter-

lichkeit nicht unabhängig voneinander sein können. Tatsächlich jedoch stellte man oft, vielleicht auf Grund von Meßfehlern, Zunahmen der Gewölbedicken fest.

Es wäre aber mit dem jetzt vorliegenden Zahlenmaterial ziemlich bedenklich, eine Gesetzmäßigkeit zu finden, die der angenommenen Irreversibilität Rechnung trägt. Der konkrete Vorteil, den man aus einer Schätzwertmethode ziehen kann, die dem Wahrscheinlichkeitsgesetz der Messungen einer Partie eines Gewölbestreifens Rechnung trägt, ist ziemlich gering, weil bei der Varianz des Schätzwertes

des spezifischen Verschleißes nur der Fehler verringert wird, der sich aus der Streuung der Meßergebnisse untereinander ergibt. Hingegen schwanken die spezifischen Verschleiße ebenso untereinander als Folge derjenigen Faktoren, die im größten Maßstab betrachtet werden müssen, wie zum Beispiel Raum oder Zeit (z. B. Flammenrichtung).

Um die Wirkung der im Versuchsplan festgelegten Einflußgrößen zu untersuchen, ist es also nicht unumgänglich, die besten Schätzwertmethoden des

TAFEL XXII

Spezifischer Verschleiß in mm/10 Schmelzen ⁽¹⁾ ⁽²⁾

Ofen Nr.	Linke Hälfte		Rechte Hälfte	
	Position		Position	
	2	1	1	2
1	B 19,35	A 36,51	B 24,27	D 16,29
2	C 6,42	D 8,87	C 6,51	A 17,44
3	D 16,75	C 13,41	D 12,69	B 9,16
4	A 9,95	B 2,25	A 9,71	C 3,54
7	D 2,17	D 2,31	D 2,28	B 2,05
8	A 6,10	A 11,14	B 1,49	C 1,56
9	D 4,45	D 3,94	C 4,04	B 4,62
10 ⁽³⁾	B 3,31	B 3,97	A 3,64	D 4,65
11 ⁽⁴⁾	C 2,51	C 3,07	D 3,03	A 2,73
12 ⁽⁴⁾	D 4,37	D 4,93	C 5,42	B 3,77
14	A 24,48	A 21,49	B 3,39	C 6,13
15	D 12,19	C 8,93	D 6,21	B 9,20
16	A 38,86	B 5,73	A 15,65	C 9,42

⁽¹⁾ Die Ziffern hinter dem Komma haben keinen reellen Wert; sie sind jedoch für die statistischen Berechnungen notwendig, um Fehleranhäufungen zu vermeiden.

⁽²⁾ A: Stein vollkommen umgewandelt; niedrige Porosität;

B: Stein mittelmäßig umgewandelt; niedrige Porosität;

C: Stein mittelmäßig umgewandelt; mittelhohe Porosität;

D: Stein vollkommen umgewandelt; mittelhohe Porosität und geringer Tonerdegehalt.

⁽³⁾ Ausnahmsweise wurden die spezifischen Verschleißes des Ofens 10 an der Vorderwand gemessen.

⁽⁴⁾ Bei den Öfen 11 und 12 hat man die Dickenmessungen auch noch nach Abbruch des Gewölbes überprüft.

spezifischen Verschleißes zu kennen. Eine mehr empirische Methode — vorausgesetzt, daß sie nicht von subjektiven Einflußgrößen abhängt — ist hierfür ausreichend.

Wir verwendeten die Methode der kleinsten Quadrate, indem wir sie nur als solche betrachteten. Sie hat den Vorteil, wohlbekannt zu sein, und erfordert nur ziemlich einfache Berechnungen.

Wir haben bereits weiter vorn erklärt, weshalb diese spezifischen Verschleißes nur für den Gewölbscheitel berechnet werden konnten. Ihre Zahlenwerte, ausgedrückt in mm/10 Schmelzen, sind in der Tafel XXII zusammengestellt, die auch sämtliche Hinweise auf die entsprechenden Gewölbestreifen enthält.

3. Umrechnung der Meßwerte

Es ist uns nicht möglich, näher auf die Gründe einzugehen, die uns veranlaßten, die gegebenen Werte mittels einer ausgewählten Funktion umzurechnen. Diese Fragen werden ausführlicher in statistischen Veröffentlichungen behandelt ⁽¹⁾. Er-

TAFEL XXIII

Logarithmus des spezifischen Verschleißes (vgl. Tafel XXII)

Ofen Nr.	Linke Hälfte		Rechte Hälfte	
	Position		Position	
	2	1	1	2
1	B 1,287	A 1,562	B 1,385	D 1,212
2	C 0,807	D 0,948	C 0,814	A 1,242
3	D 1,224	C 1,127	D 1,103	B 0,962
4	A 0,998	B 0,353	A 0,987	C 0,549
7	D 0,334	C 0,363	D 0,359	B 0,312
8	A 0,785	A 1,047	B 0,172	C 0,194
9	D 0,648	D 0,596	C 0,606	B 0,665
10	B 0,510	B 0,599	A 0,561	D 0,668
11	C 0,399	C 0,487	D 0,481	A 0,436
12	D 0,640	D 0,693	C 0,734	B 0,576
14	A 1,389	A 1,332	B 0,530	C 0,787
15	D 1,086	C 0,951	D 0,793	B 0,964
16	A 1,589	B 0,758	A 1,195	C 0,974

⁽¹⁾ Vgl. z. B. Kempthorne, O.: „The design and analysis of experiments“.

innert man sich daran, daß die Ergebnisse der Methode der größten Ungleichmäßigkeit um so besser werden, je geringer die Wechselwirkungen werden, die mit dem Fehler behaftet sind, so erscheint es interessant, eine Funktion von gegebenen Werten anzuwenden, mit der sich diese Fehler vermindern lassen.

Bereits vor den Versuchen nahmen wir an, daß der Unterschied des spezifischen Verschleißes zweier Gewölbestreifen vorgegebener Steintypen und vorher bestimmter Stellen nicht unabhängig sein könne von den Versuchsbedingungen, vor allem vom Ofen.

Man muß sich vorstellen, daß mit abnehmender Beanspruchung ein Punkt erreicht wird — vor allem bei weniger getriebenen Öfen —, in dem der Verschleiß des widerstandsfähigsten Gewölbestreifens praktisch Null ist. Da aber der Verschleiß des am wenigsten beständigen Streifens mit geringerer Beanspruchung auch abnimmt, kann der Unterschied des spezifischen Verschleißes nicht konstant sein. Somit erscheint die Hypothese, daß das Verhältnis zweier spezifischer Verschleißes vorgegebener Gewölbestreifen unabhängig vom Ofen ist, in dem sie sich befinden, vernünftiger als die vorhergehende Hypothese.

Man kann verallgemeinern und annehmen, daß jede der Versuchsbedingungen als multiplikative Konstante den spezifischen Verschleiß beeinflusst. Bei Annahme dieser Hypothese ist somit der Logarithmus dieses spezifischen Verschleißes eine addi-

tive Funktion derjenigen Ausdrücke, die die Wirkungen der verschiedenen Einflußgrößen darstellen.

Die Versuchsergebnisse scheinen zu zeigen, daß die Unterschiede der Logarithmen des spezifischen Verschleißes zweier feuerfester Erzeugnisse in Öfen größerer Kapazität höher sind als in kleinen Öfen. Obgleich diese Abhängigkeit nicht gesichert ist⁽¹⁾, erlauben es die vorliegenden numerischen Ergebnisse nicht, eine andere Funktion aufzustellen, die den Logarithmus ersetzen könnte.

Weil diese Umrechnung in genügendem Maße den Einfluß der störenden Wechselwirkungen vermindert, wurde die vorliegende Untersuchung der Ergebnisse mittels der Logarithmen des spezifischen Verschleißes durchgeführt.

4. Deutung der Ergebnisse

Die Logarithmen der spezifischen Verschleißes sind in der Tafel XXIII zusammengestellt, deren Anordnung die gleiche wie die der Tafel XXII ist. Diese Ergebnisse wurden nach den Methoden ermittelt, wie sie im Kapitel III, „Versuchsplan“, beschrieben worden sind.

a) Öfen der Gruppe I

Die Varianzanalyse ist ausführlich in der Tafel XXIV dargestellt. In der Gruppe a können die Quadratsummen der Wirkung „Position“ und der Wechselwirkung „Steine \times Position“, weil diese Wirkungen nicht kennzeichnend sind, zur Restvarianz zugruppiert werden. In der Gruppe c kann

TAFEL XXIV
Öfen der Gruppe I

Gruppe	Varianzfaktor	Quadratsumme	Freiheitsgrad	Varianz oder mittleres Quadrat
a	Position	0,034 503	1	0,034 503
	Steinqualität	0,527 762	3	0,175 921
	Wechselwirkung „Steine \times Position“	0,071 672	3	0,023 891
	Rest	0,587 760	9	0,065 307
b	Ofenhälften	0,224 432	2	0,112 216
	Mittlerer Gewölbeverschleiß	50,370 958	1	
c	Steinqualität	1,581 701	3	0,527 234
	Wechselwirkung „Steine \times Position“	0,382 619	3	0,127 540
	Brennstoff	0,366 469	3	0,122 156
	Abstichgewicht des Ofens	2,843 439	1	2,843 439
	Rest	0,845 667	3	0,281 889

⁽¹⁾ Es wird später gezeigt werden, daß die B-, C- und D-Steine als gleichwertig betrachtet werden können. Wenn man sie zusammen gruppiert und den Unterschied zwischen den Logarithmen der spezifischen Verschleißes von A und von B, C, D in Abhängigkeit der Produktion pro Schmelze und pro m² Badoberfläche eines jeden Ofens untersucht, so findet man, daß der Rang-Korrelationskoeffizient dieser zwei Größen fast zu 90% gesichert ist.

TAFEL XXV
Öfen der Gruppe I

Gruppe	Varianzfaktor	Quadratsumme	Freiheitsgrad	Verhältnis der Varianzen	NS ⁽¹⁾	S ₁₀ ⁽²⁾	S ₀₅ ⁽³⁾
a	Steinqualität	0,527 762	3	3,296		×	
	Rest	0,693 935	13				
b	Ofenhälften	0,224 432	2				
	Mittlerer Verschleiß	50,370 958	1				
c	Steinqualität	1,581 701	3	2,975		×	
	Abstichgewicht des Ofens	2,843 439	1				
	Rest	1,594 755	9				

(¹) NS = nicht gesichert.
(²) S₁₀ = 90 % gesichert.
(³) S₀₅ = 95 % gesichert.

TAFEL XXVI
Öfen der Gruppe II (mit Ofen 7)

Gruppe	Varianzfaktor	Quadratsumme	Freiheitsgrad	Varianz, mittl. Quadrat	NS ⁽¹⁾	S ₁₀ ⁽²⁾	S ₀₅ ⁽³⁾
a	Position	0,004 692	1	0,004 692	×	×	
	Steinqualität	0,536 534	3	0,178 845			
	Wechselwirkung „Steine × Position“	0,007 992	3	0,002 664	×		
	Rest	0,474 771	9	0,052 752			
b	Ofenhälften	0,212 776	2	0,106 388			
	Mittlerer Gewölbeverschleiß	31,264 872	1				
c	Steinqualität	1,193 913	3	0,397 971	×		×
	Wechselwirkung „Steine × Position“	0,427 340	3	0,142 447	×		
	Brennstoff	1,799 168	3	0,599 723	×		
	Abstichgewicht des Ofens	1,356 060	1	1,356 060	×		
	Rest	2,054 153	3	0,684 718			

(¹) NS = nicht gesichert.
(²) S₁₀ = 90 % gesichert.
(³) S₀₅ = 95 % gesichert.

man in gleicher Art die Quadratsummen der Wechselwirkungen „Steine × Position“ und der Wirkung „Brennstoff“ dem Rest zuordnen.

Nach diesen Umgruppierungen stellt sich die Varianzanalyse in der Form dar, wie sie in der Tafel XXV dargestellt ist. (Wie schon im Kapitel III, „Versuchsplan“, hervorgehoben wurde, muß die zu einem Faktor gehörige Varianz durch die derselben Gruppe angehörende Restvarianz dividiert werden.) Die erzielten Sicherheitsgrade sind in den drei letzten Spalten angedeutet. Es soll bemerkt werden, daß das erste Verhältnis (3,296), welches einer 90prozentigen Wahrscheinlichkeit entspricht, sehr nahe der 95prozentigen Wahrscheinlichkeit ist. Man erreicht

nämlich mit 3 und 13 Freiheitsgraden den Wert $F_{0,05} = 3,41$.

b) Öfen der Gruppe II (mit dem Ofen 7)

Die Varianzanalyse ist in der Tafel XXVI ausführlich dargestellt. Bei den Quadratsummen der Gruppe a ist die Wirkung „Steine“, welche direkt mit dem Rest verglichen wird, zu 90 % gesichert, wohingegen die Wirkung „Position“ und die Wechselwirkung „Steine × Position“ nicht gesichert sind. Wenn man ihre Quadratsummen derjenigen des Restes zuordnet, so erreicht die Wirkung „Steine“ 95 % Sicherheit.

TAFEL XXVII
Öfen der Gruppe II (mit Ofen 3)

Gruppe	Varianzfaktor	Quadratsumme	Freiheitsgrad	Varianz, mittl. Quadrat	NS ⁽¹⁾	S ₁₀ ⁽²⁾	S ₀₅ ⁽³⁾
a	Position	0,003 660	1	0,003 660	×		
	Steinqualität	0,603 025	3	0,201 008			×
	Wechselwirkung „Steine × Position“	0,001 573	3	0,000 524	×		
	Rest	0,441 971	9	0,049 108			
b	Ofenhälften	0,214 096	2	0,107 048			
	Mittlerer Gewölbeverschleiß	40,940 802	1				
c	Steinqualität	0,443 844	3	0,147 948	×		
	Wechselwirkung „Steine × Position“	1,579 193	3	0,526 398	×		
	Brennstoff	0,483 758	3	0,161 253	×		
	Abstichgewicht des Ofens	3,886 812	1	3,886 812			×
	Rest	0,493 913	3	0,164 638			

(¹) NS = nicht gesichert.
(²) S₁₀ = 90 % gesichert.
(³) S₀₅ = 95 % gesichert.

Bei den Quadratsummen der Gruppe c ist keine Wirkung gesichert. Dies erklärt sich aus der Größe der Restvarianz, die 13mal so groß ist wie die Restvarianz der Gruppe a.

c) Öfen der Gruppe II (mit dem Ofen 3)

Die Tafel XXVII zeigt die ausführliche Varianzanalyse. Bei den Quadratsummen der Gruppe a sind jeweils die Wirkung „Position“ und die Wechselwirkung „Steine × Position“ nicht gesichert. Ohne ihre Quadratsummen dem Rest zuzuordnen, stellt man fest, daß die Wirkung „Steine“ hingegen zu 95 % gesichert ist. In der Gruppe c ist nur die Wirkung „Ofengröße“ gesichert.

d) Unterschiede zwischen den Steinqualitäten

Die drei obigen Varianzanalysen zeigen, daß die vier untersuchten feuerfesten Steintypen gesicherte, unterschiedliche Verschleißfestigkeiten haben. Nachdem der A-Stein sich wesentlich von den drei anderen unterscheidet, war die Frage zu untersuchen, ob sich die Qualitäten B, C und D ebenso untereinander unterschieden. Bezüglich der Bedeutung der Buchstaben A, B, C, D siehe Fußnote (²) der Tafel XXII.

Weil der Versuchsplan alle Streifenpaare enthielt, wobei jede Qualität in der Position 1 mit jeder Qualität in der Position 2 kombiniert wird, war es möglich, hieraus ein griechisch-lateinisches Quadrat 3×3 zu bilden, welches nur die Qualitäten B, C und D nach bekannter Art zugeordnet enthielt. Dieses Unterquadrat von gegebenen Werten konnte in einer Varianzanalyse untersucht werden. Ohne ins Detail dieser Untersuchung zu gehen, sollen nur die Schlußfolgerungen daraus gegeben werden; diese zeigen, daß sich, abgesehen von A, die anderen

Qualitäten nicht mit Sicherheit untereinander unterscheiden lassen.

e) Gesamtbetrachtung der Ergebnisse der Varianzanalyse

1. Die Einflußgröße „Position des Versuchsstreifens“ hat keine gesicherte Wirkung.

2. Die Wechselwirkung der Einflußgrößen „Position“ und „Qualität der Steine“ hat keine gesicherte Wirkung.

3. Die Verschleißfestigkeiten der vier feuerfesten Erzeugnisse unterscheiden sich untereinander kennzeichnend im Verhältnis zum Rest a. Wenn man ihre Unterschiede mit dem Rest c vergleicht, so sind diese nur in einem Fall kennzeichnend, was nicht weiter verwundert, wenn man den großen Unterschied zwischen den Restvarianzen a und c betrachtet.

Dieses Versuchsergebnis bestätigt das, was im Kapitel III, „Versuchsplan“, bereits angedeutet war: Die Vergleiche, die die Varianz zwischen Öfen mit einbeziehen, sind unempfindlicher als diejenigen, die die Varianz zwischen Gewölbestreifen ein und desselben Ofens mit einbeziehen. Man kann ohne Zweifel bestätigen, daß man, wenn man die 13 Gewölbe jeweils ganz mit den vier feuerfesten Steintypen zugestellt hätte, wahrscheinlich überhaupt keine kennzeichnenden Unterschiede zwischen ihren Verschleißfestigkeiten hätte finden können.

Um die Wirkungen des Brennstoffs und der Ofengröße zu vergleichen, ist es augenscheinlich nur möglich, einen Rest des Typs c zu benutzen. Die Wirkung des Brennstoffs ist in keinem Fall gesichert. Die Wirkung der Ofengröße ist in zwei von drei Fällen gesichert. Dieses erklärt sich vielleicht durch die Unterschiede in den Abstichgewichten, die

in der Gruppe I und der Gruppe II mit dem Ofen 3 deutlicher sind als in der Gruppe II mit dem Ofen 7 (wo die Wirkung der Ofengröße nicht gesichert ist). Man kann ersehen, daß die Klassen „Ofengröße“ der Gruppe I sehr wohl unterschieden sind und daß das Abstichgewicht des Ofens 3 wesentlich größer ist als das des Ofens 7.

TAFEL XXVIII

Schätzwert der Wirkung der Steinqualität auf den Logarithmus des spezifischen Verschleißes (Ursprung = die mittlere Qualität der vier Versuchssteine)

	Ofengruppe		
	I	II (m. Ofen 7)	II (m. Ofen 3)
Vertrauenshalbintervall	0,177	0,159	0,153
A-Stein	0,200	0,204	0,204
B-Stein	-0,147	-0,095	-0,106
C-Stein	-0,064	-0,127	-0,143
D-Stein	0,011	0,017	0,045

Bemerkung

Obgleich zwei gesicherte Wirkungen (Art des feuerfesten Baustoffs, Ofengröße) bestehen, stellt doch die Restvarianz c einen beträchtlich großen Teil der Gesamtvarianz dar. Die Unterschiede zwischen den in verschiedenen Öfen festgestellten spezifischen Verschleißes scheinen dadurch, daß weitere Einflußgrößen hinzugezogen werden, nicht besser erklärt werden zu können. Der Index „Produktion je Schmelze/m² Badoberfläche“ korrespondiert in keinem Fall besser mit dem Verschleiß als das Abstichgewicht des Ofens.

5. Schätzwert der Logarithmen des spezifischen Verschleißes

Die Logarithmen des spezifischen Verschleißes können direkt geschätzt werden, wie in Abschnitt 5d des Kapitels III, „Versuchsplan“, gezeigt wurde. Der Schätzwert der Wirkung b_j des Versuchssteins j wird gegeben durch:

$$\hat{b}_j = \frac{D_{j.} - D_{.j}}{8}$$

Für diesen Schätzwert kann noch der Vertrauensbereich angegeben werden:

$$|\hat{b}_j - b_j| < s \cdot t_p \sqrt{\frac{3}{32}}$$

worin t_p die Vertrauensgrenze (Schwellenwert) der Variablen t von Student-Fisher bedeutet.

Die Ergebnisse jeder der drei Ofengruppen erlauben es, die entsprechenden b_j abzuschätzen und einen Vertrauensbereich zu berechnen. Die Länge dieses Halbintervalls ist in der ersten Zeile der Tafel XXVIII eingetragen, die Schätzwerte für b_j in den darunter folgenden Zeilen. Diese Ergebnisse sind graphisch in Bild 29 dargestellt.

Ohne außer acht zu lassen, daß die erhaltenen Schätzwerte für jede der drei Ofengruppen nicht unabhängig sind, kann man doch feststellen, daß die gefundenen Werte gegenseitig in gutem Einklang stehen.

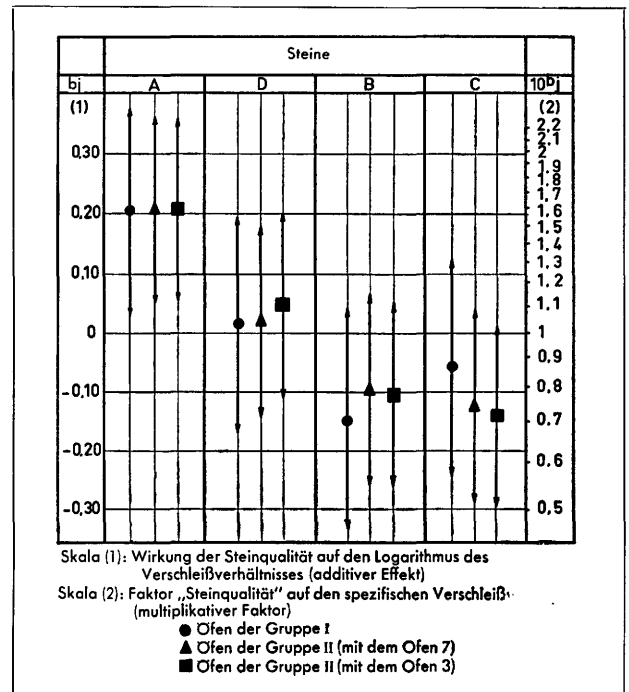


Bild 29

Allgemeine Schlußfolgerungen

Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt, daß der spezifische Verschleiß des A-Steins gesichert höher ist als derjenige der B-, C- und D-Steine, welche keine gesicherten Unterschiede untereinander aufweisen.

Die einzige andere Einflußgröße, welche eine kennzeichnende Wirkung auf den spezifischen Verschleiß hat, ist das Abstichgewicht des Ofens. Im Hinblick auf eventuelle zukünftige Versuche wird auf Grund der Erfahrung noch folgendes bemerkt:

1. Die Anzahl der Dickenmeßstellen muß genügend groß sein.

2. Die Verteilung dieser Meßstellen muß so gleichmäßig wie möglich erfolgen.

3. Die Genauigkeit der Dickenmessungen darf keineswegs vernachlässigt werden.

4. Es sollte zunächst der Versuchsplan in Abhängigkeit von dem zu untersuchenden Problem aufgestellt werden; darauf sollten die für die Durchführung dieses Plans geeigneten Öfen ausgesucht werden. Wenn man verschiedene feuerfeste Steintypen in mehreren Ofentypen zu vergleichen wünscht, so muß man hierfür getrennt-unterschiedliche Gruppen bilden, die jede so gleichartig wie möglich sein soll. Weil schließlich die Ergebnisse eines einzelnen Ofens nicht beweiskräftig sind, ist es wichtig, daß jede Gruppe mehrere Öfen umfaßt.

Wenn man verschiedene feuerfeste Steintypen für Gewölbe von Siemens-Martin-Öfen vergleichen will, ist es überflüssig, eine sehr große Genauigkeit in den Ergebnissen zu erzielen; man darf nicht vergessen, daß die Verschleißmessung eines Gewölbes zahlreichen und großen Fehlern unterworfen ist, die leicht ein falsches Urteil aufkommen lassen können. Die Voraussetzungen, auf die hingewiesen wurde, erscheinen uns empfehlenswert, um derartige Fehlermöglichkeiten zu vermeiden.

KAPITEL VIII

Beitrag zur Frage eines Qualitätsindex

Von J. BARON und D. SANNA
(Übersetzt aus dem Französischen)

ZUSAMMENFASSUNG

Bereits veröffentlichte Arbeiten, die speziell den Einfluß der Tonerde und der Porosität auf das Betriebsverhalten der Silika-SM-Ofensteine beschreiben, wurden herangezogen, wodurch es möglich war, einen Qualitätsindex für Silikasteine aufzustellen, indem man einen weiteren Faktor hinzufügte, der bisher noch wenig beachtet worden war. Der Qualitätsindex beruht auf der Vorstellung einer „Äquivalentporosität“, welche durch die folgende Formel beschrieben wird:

$$\begin{aligned} \text{Äquivalentporosität} &= \text{wahre Porosität} + 20 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \\ &- 50 \cdot (\text{spezifisches Gewicht} - 2,30) \end{aligned}$$

Dieser Index fällt mit zunehmender Steinqualität, er schwankt innerhalb geringer Grenzen (15 bis 40), und es sei vorausgeschickt, daß ein Stein guter Qualität einen Index von < 25 haben sollte. Die Berechnung des Qualitätsindex der Versuchssteine aus den ermittelten Eigenschaftswerten ergibt die folgenden Werte:

- A: 29,5
- B: 23,2
- C: 23,4
- D: 23,2

Der Einfluß des TiO_2 wurde bei der Aufstellung des Qualitätsindex nicht in Betracht gezogen, jedoch scheinen Arbeiten, welche im Labor in Bonn ausgeführt wurden, zu zeigen, daß TiO_2 ohne Einfluß auf die Qualität ist, solange es 1 % nicht überschreitet.

Die Aufstellung eines Qualitätsindex ist, allgemein gesprochen, ein sehr schwierig zu lösendes Problem. Im vorliegenden Fall bestand die Methode darin, das Verhalten der Steine im Betrieb zu beobachten, wobei jede einzelne Qualität durch eine sorgfältige Untersuchung der Proben charakterisiert war. Die Anzahl der untersuchten Steine mußte genügend groß sein, so daß man zwischen ihrem beobachteten Verhalten und den im Labor gemessenen Eigenschaftswerten eine statistische Beziehung verläßlich aufstellen konnte.

Im Hinblick auf eine erfolgreiche Durchführung dieser Untersuchungen wurden zunächst die Einflüsse verschiedener Eigenschaftswerte auf die Haltbarkeit herausgestellt und abgeschätzt, so z. B. die Bestimmung der Tropfunkttemperatur der Steine. Wenn man von vornherein annimmt, daß diese Beziehung besteht, so gibt es beim gegenwärtigen Stand der Dinge keine andere Lösung, als die Betriebsergebnisse der vier Steinqualitäten heranzuziehen. Die Folgerungen zog man nach der Vergleichbarkeit der Versuche in den Siemens-Martin-

Öfen, was aus der Art des Versuchsplans, nach der Reproduzierbarkeit der 13 Versuchsofen und dem relativen Verhalten der vier Steine hervorgeht, welche, da sie in so großer Zahl im Labor untersucht wurden, gut bekannt waren.

Die statistische Auswertung der in den Werken erzielten Ergebnisse zeigt, daß der A-Stein gesichert geringer zu bewerten war als die B-, C- und D-Steine und daß diese drei letzteren keine kennzeichnenden Unterschiede in ihrem Verhalten aufwiesen. Wenn man diese Beobachtungen bezüglich der vier Steine vergleicht (Bild 30), stellt man fest, daß ein einziger Eigenschaftswert (entweder Tonerdegehalt oder Porosität oder Umwandlungsgrad) nicht die gleiche beobachtete Haltbarkeit der B-, C- und D-Steine im Betrieb erklären kann. Es wurden deshalb gleichzeitig die drei Eigenschaftswerte nach der folgenden Art eingebaut.

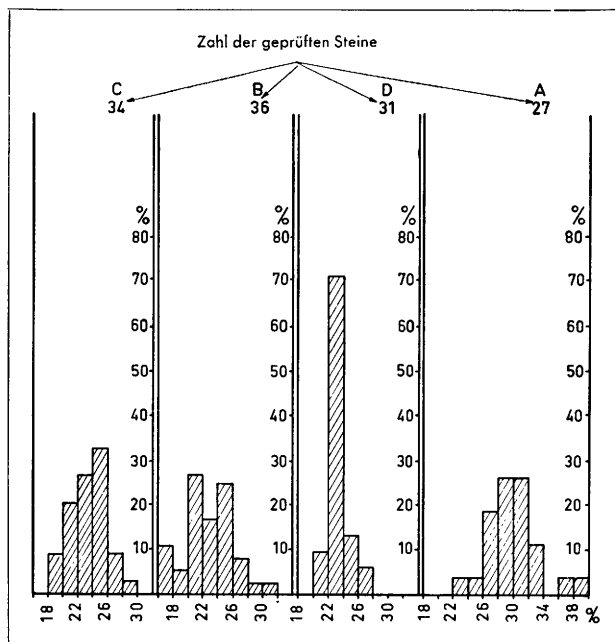


Bild 30: Äquivalentporositäten der Versuchssteine

Man stellt fest, daß die B- und C-Steine gegenüber dem D-Stein, welcher als Bezugsstein gewählt wurde, keine Qualitätsunterschiede aufwiesen und daß der A-Stein eine um 30 ° C niedrigere Tropfpunkttemperatur hatte, welche experimentell gefunden werden konnte.

Die zu bestimmenden Einflußgrößen waren dann:
 a Tonerdegehalt mit 0,01 % Genauigkeit,
 p Porosität mit 0,1 % Genauigkeit,
 d spezifisches Gewicht mit 0,01 g/cm³ Genauigkeit.

Führt man diese Bedingungen ein, so ergeben sich die mittleren Eigenschaftswerte nach dem folgenden Gleichungssystem:

$$A \quad 40 a - 17 p + 30 d = 0$$

$$B \quad 29 a - 43 p + 3 d = 0$$

$$C \quad 9 a + 19 p + 7 d = 0$$

Die Lösung dieses Systems ergibt:

$$a = - 0,95$$

$$p = - 0,47$$

$$d = 2,5$$

was annähernd bedeutet:

$$0,1 \% \text{ Tonerde mehr} = 10 \text{ Punkte weniger,}$$

$$1,0 \% \text{ Porosität mehr} = 5 \text{ Punkte weniger,}$$

$$0,01 \text{ g/cm}^3 \text{ spezifisches Gewicht mehr}$$

$$= 2,5 \text{ Punkte mehr.}$$

Dies bedeutet, daß eine Vermehrung um 0,1 % Tonerde einer Vermehrung von 2 % Porosität und einer Verminderung im spezifischen Gewicht von 0,04 g/cm³ gleichkommt. Ebenso kommt 1 % Porositätsvermehrung einer Verminderung des spezifischen Gewichtes um 0,02 g/cm³ gleich.

Aus diesen Beziehungen kann man eine Äquivalentporosität berechnen:

$$\text{Äquivalentporosität} = \text{wahre Porosität} + 20 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \cdot (\text{spezifisches Gewicht} - 2,30)$$

Dieses kann man als Qualitätsindex ansehen: Die Qualität eines Steins ist um so besser, je geringer seine Äquivalentporosität ist. So wurden z. B. die Äquivalentporositäten der vier Versuchssteine wie folgt gefunden:

$$A = 29,5 \quad B = 23,2 \quad C = 23,4 \quad D = 23,2$$

Die Aufstellung dieses Qualitätsindex erfordert jedoch noch einige Bemerkungen:

Neben diesen hauptsächlichlichen Einflußgrößen, die in Betracht gezogen wurden, ist es wahrscheinlich, daß andere, womöglich merklich, auf die Qualität der Siemens-Martin-Gewölbesteine einen Einfluß haben, so z. B. die Gasdurchlässigkeit, die verwendete Körnung (man hat festgestellt, daß Steine mit grobem Korn eine gute Haltbarkeit ergeben) usw.

Obwohl dieser Qualitätsindex nur auf den Untersuchungsergebnissen der vier Steine beruht, besteht doch ein ziemliches Vertrauen hierzu, weil diese Steine sehr sorgfältig sowohl in den Labors als auch in den Stahlwerken untersucht bzw. beobachtet wurden und der Qualitätsindex der in den verschiedenen Werken verwendeten Hausmarkesteine (15 bis 40) sehr genau mit der Klassierung der Versuchssteine übereinstimmt, wenn man diese Klassierung nach der Formel durchführt. So konnte man z. B. feststellen, daß ein Hausmarkestein mit dem Qualitätsindex 38 sehr viel schlechter war als der A-Stein mit dem Index 30.

Es wird notwendig sein, diesen Qualitätsindex in naher Zukunft einer weiteren Kritik zu unterwerfen, indem man jeweils in gleichen Gewölben eines Siemens-Martin-Ofens das Verhalten der verschiedensten Steine mit den im Labor bestimmten Größen vergleicht.

Ebenso sei bemerkt, daß dieser Qualitätsindex innerhalb eines bestimmten begrenzten Intervalls, etwa von 15 bis 40, Gültigkeit hat; aber man muß ebenso bemerken, daß die Temperatur des Tropfpunktes in diese Bestimmung eingeht, wobei es sich,

praktisch gesprochen, jeweils nur darum handelt, einige Temperaturgrade bei diesem Tropfpunkt zu gewinnen. Um diesen Qualitätsindex mit größter Genauigkeit bestimmen zu können, ist es also wesentlich, daß die herangezogenen Eigenschaftswerte mit höchster Genauigkeit bestimmt werden. Eine Unsicherheit, die noch verbleibt, ergibt sich aus der naturgemäßen Streuung der in den Betrieben erzielten Ergebnisse an Steinen gleicher Qualität, einer Streuung, die durch die Heterogenität der Steine und die Ofenbedingungen hervorgerufen wird; ebenso haben systematische Fehler, die von den Versuchsmethoden herrühren, auch einen gewissen Einfluß. Die Untersuchung einer großen Anzahl von Steinen erlaubt es, die Größe der Fehler zu verringern. Aber die Auswirkungen dieser systematischen Fehler sind nur dann be-

Dieser Qualitätsindex zieht nicht den Einfluß des Titandioxyds heran. Verschiedene Überlegungen, die hier nicht behandelt werden sollen, lassen jedoch vermuten, daß der Einfluß des Titandioxyds gering ist. Wenn man lediglich die Schmelzpunkte in Betracht zieht, d. h. die Diagramme $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ sowie $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, so stellt man fest, daß 1% Tonerde im Mittel den Schmelzpunkt des SiO_2 um 33° senkt, wohingegen 1% Titandioxyd im Mittel diesen um 16° senkt; der Einfluß des Titandioxyds wäre somit nur halb so groß wie der der Tonerde. Jedoch übt nach K. Konopicky (1) das Titandioxyd einen günstigen Einfluß aus, indem es die Eindringmöglichkeit für Schlacken in den Stein herabsetzt, und es ist möglich, daß die Resultierende der beiden Einflüsse sich als geringfügig ungünstiger Einfluß des TiO_2 darstellt.

TAFEL XXIX

Stein	Gehalt an Al_2O_3 %	Porosität %	Spezifisches Gewicht g/cm^3	Erweichungstemperatur $^\circ\text{C}$
C	0,26	22,7	2,39	1656
B	0,46	16,5	2,35	1654
D	0,17	20,8	2,32	1689
A	0,57	19,1	2,32	1637

grenzt, wenn sie klein und — wenigstens annäherungsweise — bekannt sind.

Die vorstehenden Betrachtungen lassen vermuten, daß ein und dasselbe Labor bei einer genügenden Anzahl von Bestimmungen die Qualität zweier unbekannter Steine — zueinander — unterscheiden kann, daß es jedoch sehr viel schwieriger sein wird, diese Qualitäten absolut festzusetzen. Bezüglich des Qualitätsindex zeigen die Streuungen der vier untersuchten Steine Unterschiede von nahezu 2 Punkten für die A-, B- und C-Steine (dieser Unterschied ist ein wenig geringer als ein Punkt für den D-Stein), aber das Intervall der Qualitätsziffern für alle Steine ein und derselben Qualität erstreckt sich oft auf etwa 12 Punkte (Tafel XXIX).

Um die Qualität einer Lieferung abschätzen zu können, darf man sich nicht damit begnügen, die Bestimmungen an einem einzigen Stein durchzuführen, sondern muß hierfür eine größtmögliche Anzahl Steine heranziehen, die um so größer sein muß, als die Gleichmäßigkeit des Erzeugnisses schwankt. Wenn z. B. die systematischen Fehler mit $0,01 \text{ g/cm}^3$ für das spezifische Gewicht, mit $0,5\%$ für die Porosität und mit $0,1\%$ für den Tonerdegehalt angenommen werden müssen, so beträgt der Fehler im Qualitätsindex entsprechend den obigen Werten bereits 3 Punkte.

Es wurde bis jetzt noch nicht der Einfluß der Alkalien besprochen, weil alle bei unseren Versuchen verwendeten Steine nur Alkaligehalte von etwa $0,1\%$ aufwiesen; jedoch weiß jeder um den schädlichen Einfluß dieser Bestandteile.

Betrachtet wurde lediglich die Gesamtporosität, weil bei allen untersuchten Steinen die geschlossene Porosität sehr niedrig ist und daher die Gesamtporosität mit der offenen Porosität fast übereinstimmt.

Was den Einfluß des spezifischen Gewichtes anlangt, so sieht man, daß der Qualitätsindex um so geringer wird, je größer das spezifische Gewicht ist, jedoch muß man einer oberen Grenze des spezifischen Gewichtes Rechnung tragen. Diese Grenze läßt sich noch nicht festlegen; jedoch kann man einfach sagen, daß Steine mit einem spezifischen Gewicht von $2,42 \text{ g/cm}^3$ sich sehr gut verhalten haben. Es scheint andererseits, daß Steine mit einem spezifischen Gewicht oberhalb $2,44 \text{ g/cm}^3$ das Risiko von Abplatzungen beträchtlich vergrößern. Beim gegenwärtigen Stand der Dinge scheint es angebracht, das spezifische Gewicht mit $2,43 \text{ g/cm}^3$ nach oben hin zu begrenzen.

Andererseits muß man dem Vorteil eines höheren spezifischen Gewichtes den Nachteil der größeren Schwankungen in den Abmessungen der Steine ent-

(1) Konopicky, K.: Stahl und Eisen, 74 (1954), S. 1402—1413.

gegenhalten. Eine weitere Untersuchung hat nämlich gezeigt, daß die Streuung in den Abmessungen der Steine um so geringer wird, je stärker sie umgewandelt sind (1).

Aus der Art des entwickelten Qualitätsindex läßt sich ersehen, daß ein Stein mit einem geringeren Tonerdegehalt, streng genommen, eine größere Porosität aufweisen kann; umgekehrt muß ein Stein mit einem höheren Tonerdegehalt eine geringstmögliche Porosität aufweisen.

Es ist hierzu interessant, sich an die Arbeiten zu erinnern, die im Ausland durchgeführt wurden; zunächst die schon zitierte Arbeit von K. Konopicky. Der Autor bemerkt, daß Steine mittlerer Umwandlung mit einem spezifischen Gewicht von 2,40 bis 2,44 g/cm³ sich in keinem Fall schlechter, manchmal sogar besser bewährt haben als Steine mit einer vollkommenen Umwandlung. Die Versuche haben bestätigt, daß der Tonerdegehalt und der Alkaligehalt einen sehr ungünstigen Einfluß auf die Haltbarkeit der Steine ausüben. Ein regelmäßig verteilter Titandioxydgehalt ist augenscheinlich günstig, wohingegen eine Porosität größer als 25% sehr ungünstig ist; ihr Einfluß macht sich bereits bei Werten der Größenordnung von 20 bis 22% bemerkbar, wenn der Ofen stark getrieben wird. Bei gleicher Steinzusammensetzung und gleicher Porosität ist die Haltbarkeit weniger gut, wenn die Gasdurchlässigkeit $100 \cdot 10^{-3}$ cgs überschreitet. Der Autor — der nur die Porosität und den Tonerdegehalt betrachtet — wies darauf hin, daß die Summe aus der Porosität und dem Zwölffachen des Tonerdegehaltes kleiner sein muß als 40. Es ist interessant, zu bemerken, daß dieser von K. Konopicky aufgestellte Qualitätsindex:

$$\text{Porosität} + 12 \text{ Al}_2\text{O}_3 \leq 40$$

fast die gleiche Form wie der vorliegende Qualitätsindex hat, wenn man in etwa ähnliche spezifische Gewichte annimmt.

In einem Vortrag auf dem Herbsttreffen der British Ceramic Society in London im November 1956 stellten Lahr und Hardy (2) die tragende Rolle

des Tonerdegehaltes auf die Qualität der Silikasteine heraus, jedoch erwähnten die Autoren, daß sie die Versuche an fast vollständig umgewandelten Steinen der gleichen Porosität und des gleichen Titandioxydgehaltes angestellt haben. Unter diesen Voraussetzungen bleibt als einziger bestimmender Faktor der Tonerdegehalt, der mit der Temperatur der Druckerweichung durch die folgende Beziehung verbunden ist:

$$\begin{aligned} T^\circ \text{C (Druckerweichungstemperatur)} \\ = 1726^\circ \text{C} - 108 \text{ Al}_2\text{O}_3. \end{aligned}$$

Diese Formel unterscheidet sich wenig von der von Cross gegebenen:

$$\begin{aligned} T^\circ \text{C (Druckerweichungstemperatur)} \\ = 1708^\circ \text{C} - 72 \text{ Al}_2\text{O}_3. \end{aligned}$$

Im März 1957 berichtete Fern (3) über Versuche, die einige Jahre lang an Gewölben von Siemens-Martin-Öfen durchgeführt wurden, und wies darauf hin, daß man durch die Verminderung des Tonerdegehaltes von 1% auf weniger als 0,2% fast eine Verdoppelung in der Haltbarkeit erzielen kann, obgleich die spezifische Produktion zuletzt sehr hoch war. Eine statistische Auswertung ergab, daß die Verminderung des Tonerdegehaltes um jeweils 0,1% fast äquivalent war einer Verminderung der offenen Porosität um 1%. Die beste Qualität der Silikasteine entspräche nach diesem Autor somit einer Zusammensetzung von

0,2% Tonerde,
0,1% Alkalien und
weniger als 20% Porosität.

Einige der wenigen Mittel, die bestehende Qualität noch zu verbessern, besteht darin, die Porosität der Silikasteine weiter zu vermindern. Es ist hier interessant, zu bemerken, daß Fern eine Verminderung um 0,1% im Tonerdegehalt gleichsetzt einer Verminderung von 1% in der Porosität, wohingegen man eine Beziehung von 0,1% Tonerde entsprechend 2% Porosität nach der vorliegenden Formel findet.

(1) Matraski, A., Sanna, D., und Baron, J.: Techn.-Keram. Kongr., Paris 1958.

(2) Lahr, H. R., und Hardy, C. W.: „Refractoriness-under-Load Properties of Silica Bricks“, Trans. Brit. Ceram. Soc., 56 (1957), S. 369—388.

(3) Fern, W. M.: „Improvements in the Quality of Silica Roof-Bricks“, Trans. Brit. Ceram. Soc., 56 (1957), S. 110 bis 132.

KAPITEL IX

Untersuchung an gebrauchten Steinen

Von K. KONOPICKY

ZUSAMMENFASSUNG

a) Die Dicke der Cristobalitschicht im Verhältnis zur gesamten Tränkungszone wächst mit zunehmender Gewölbetemperatur.

b) Bei kaltgehenden Öfen kommt es zu einer ausgeprägten Trennung in Zonen, während bei sehr heißgehenden Öfen die sichtbare Zonenbildung und die Flußmittelwanderung kaum zu beobachten ist. Im Falle der heißgehenden Öfen erfolgt das Abschmelzen der Steine rascher als das Wandern der Flußmittel.

c) Die Schmelzen im Silikastein wandern erst mit genügender Geschwindigkeit, wenn sie einen merklichen Anteil an Eisenoxyd enthalten.

d) Der maximale Fe_2O_3 -Gehalt sinkt (in der heißen Zone) mit höherer Ofenraumtemperatur. Charakteristisch ist allerdings nicht der Fe_2O_3 -Gehalt allein, sondern der CaO- und Fe_2O_3 -Gehalt, d. h. bei starker Beaufschlagung der Steine durch CaO wird die Zusammensetzung der heißesten Schicht verschoben und der Angriff verstärkt.

e) Durch den TiO_2 -Gehalt wird der maximale Wert für Fe_2O_3 herabgesetzt, d. h. TiO_2 hemmt die Aufnahme von Fe_2O_3 .

f) Bei synthetischen Mischungen (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO) wird bei eisenarmen — im Gegensatz zu eisenreichen — Mischungen durch einen TiO_2 -Gehalt bis zu etwa 1 % die Kegelfalltemperatur nicht herabgesetzt, d. h. ein TiO_2 -Gehalt bis zu etwa 1 % — vielleicht mit Ausnahme von sehr heißgehenden Öfen — ist vorteilhaft.

g) An der kalten Zone sammelt sich eine Schmelze, welche bei etwa 160° erstarrt. Der SiO_2 -Gehalt dieser Schmelze liegt zwischen 55 und 70 %, während sich in den Rest die Flußmittel aufteilen. Bei TiO_2 -armen Steinen ist daher die CaO-Anreicherung an der kalten Front größer als bei TiO_2 -reichen Steinen.

h) Außer dem Verschleiß an der heißen Zone, der durch Fe_2O_3 und CaO bzw. die Ofentemperatur bestimmt wird, erfolgt auch ein Angriff in der Nähe der beginnenden Tridymitzone durch Ausfließen von Schmelze. In dieser Zone ist auch der Al_2O_3 -Gehalt angereichert und maßgeblich für das Abfließen von Schmelze.

i) Der Verschleiß wird daher je nach Ofentemperatur und Temperaturzyklus sowohl von der heißesten Zone (Fe_2O_3 und CaO) als auch von der mittleren Zone (Al_2O_3) gesteuert. Durch den längeren Temperaturzyklus bei großen Öfen, welcher damit die mittlere Zone stärker oder überhaupt erst erfaßt, ist es verständlich, daß die großen Öfen eine geringere Anzahl von Betriebswochen aufweisen.

Das Verhalten der verschiedenen Steintypen in den Siemens-Martin-Öfen ist für die vier untersuchten Steinqualitäten im vorhergehenden ausgewertet worden. Es erscheint aber wünschenswert, diese Erkenntnisse durch ein genaueres Studium der verschlackten Steine zu vertiefen. Bei einer systematischen Erkenntnis zu den Zerstörungsvorgängen erübrigt es sich dann, weitere Versuchsreihen anzusetzen, um die Schlüsse fester zu untermauern. Aus diesem Grunde wurden von allen untersuchten Öfen die gebrauchten Steine gegenübergestellt und mehrere Steine je Qualität und Ofen auf alle chemischen (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , Alkalien), physikalischen (spezifisches Gewicht, Raumbgewicht, gesamte Porosität, offene Poren, Porengrößenverteilung) und mineralogischen (Dünnschliff, Röntgenanalyse von Cristobalit, Tridymit, Quarz usw.) Werte untersucht, da es von vornherein nicht zu übersehen war, welche Unterlagen und Ergebnisse für die Schlußfolgerungen benötigt wurden.

Es wurden etwa 80 Steine zonenweise (etwa 550 einzelne Zonen) untersucht und alle Ergebnisse ausgewertet, doch werden in diesem Bericht nur charakteristische Beispiele gebracht.

Durchführung der Versuche

Bei der chemischen Analyse wurden die Bestimmungen nach den genormten Verfahren durchgeführt; nur bei der Ermittlung des Al_2O_3 -Wertes war es notwendig, die direkte Bestimmung aus dem alkalischen Aufschluß mit Oxichinolin heranzuziehen⁽¹⁾⁽²⁾, da die Genauigkeit der Bestimmung als Differenz zu gering ist und die eingedrungenen Mengen fremder Oxyde (wie Mn, Cr) üblicherweise nicht erfaßt und damit wesentlich zu hohe Al_2O_3 -Werte vorgetäuscht werden. Über Erfahrungen zu dieser Methodik wird getrennt berichtet⁽³⁾.

Bei den physikalischen Bestimmungen wurde die Porengrößenverteilung nach der Quecksilber-Einpreß-Methode bestimmt; die Durchführung aller anderen Methoden erfolgte entsprechend den genormten Verfahren.

Besondere Schwierigkeiten ergaben sich bei der Röntgenanalyse. In erster Linie mußten alle Werte wegen des hohen Massenschwächungskoeffizienten für Eisenoxyde, in manchen Fällen aber auch für Wollastonit, korrigiert werden. Als Eichsubstanz wurde reiner Bergkristall, aus Quarzglas durch Entglasen hergestellter Cristobalit und ein Tridymit verwendet, welcher sich durch 20jähriges Erhitzen eines Silikasteins in einem Brennofen bei Temperaturen um 1400°C gebildet hatte. Diese zwar sorgfältig ausgewählten und untersuchten Eichsubstanzen müssen in ihrem kristallinen Ordnungszustand nicht ganz den im Stein vorhandenen Mineralkomponenten entsprechen, was zu einer begrenzten Un-

sicherheit bei der quantitativen Auswertung führt. Die festgestellten Unterschiede im Ordnungszustand des Cristobalits und des Tridymits der einzelnen Steine waren nicht so erheblich, daß nachträglich eine Korrektur gemäß der Veröffentlichung Flörke⁽⁴⁾ notwendig war. Bei höheren Gehalten an Fe_2O_3 , CaO und TiO_2 konnten röntgenographisch auch Magnetit, Wollastonit und Sphen nachgewiesen werden. Über Einzelheiten zur röntgenographischen Untersuchungsmethodik wird noch an anderen Stellen berichtet werden⁽⁵⁾.

Ob die Flußmittel beim Erkalten vollständig oder nur teilweise auskristallisieren, d. h. ob im abgekühlten Stein noch Restschmelze vorhanden war, konnte nicht geklärt werden, ist aber für die weiteren Überlegungen nicht von Bedeutung.

Temperaturverteilung im Stein

Bei den meisten gebrauchten Silikasteinen läßt sich die Grenzfläche zwischen Cristobalit und Tridymit recht gut beobachten. Die Fläche der Wanderungsfront der Flußmittel auf der kalten Seite entspricht einer Temperatur von etwa 1160° . Diese Temperaturen werden außer bei den Messungen im Stein auch bei Beobachtung im Erhitzungsmikroskop bestätigt. Bei dieser Temperatur kann man eine deutliche Flüssigkeitsbewegung im schräg angestrahnten Anschliff erkennen. Da auch die Innentemperatur des Ofengewölbes bekannt ist, läßt sich

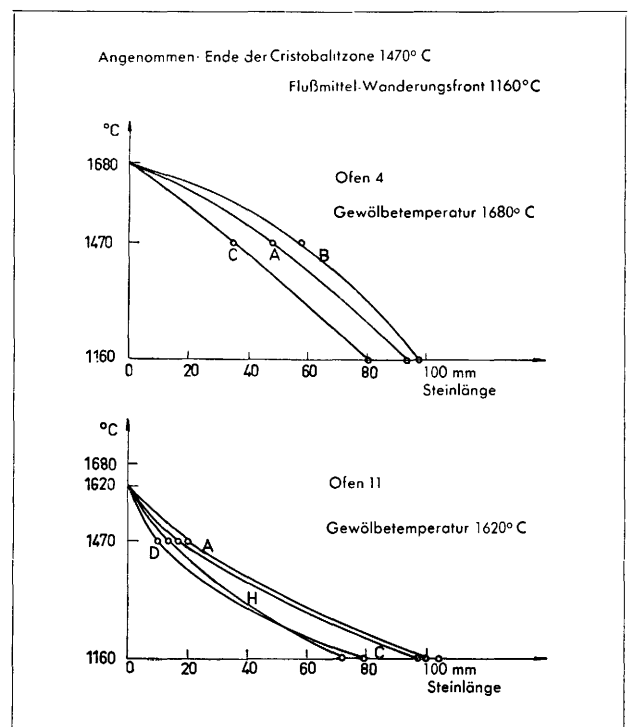


Bild 31: Temperaturverlauf in den gebrauchten Silikasteinen

⁽¹⁾ Pranter, H., und Konopicky, K.: Radex-Rdsch. (1948), S. 61—63.

⁽²⁾ British Provisional Specification.

⁽³⁾ Konopicky, K., und Stumpf: „Die direkte Al_2O_3 -Bestimmung in Silikasteinen“, Tonind.-Ztg., demnächst.

⁽⁴⁾ Flörke, O. W.: Ber. Deutsch. Keram. Ges., 34 (1957), Heft 11, S. 343—390.

⁽⁵⁾ Konopicky, K., und Patzak, I.: „Beitrag zur Röntgenanalyse von Silikasteinen“, Ber. Deutsch. Keram. Ges., demnächst.

somit die Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Steinstärke in etwa festlegen. In Bild 31 ist die Temperaturverteilung für verschiedene Steine jeweils bei einem heißgehenden und einem kaltgehenden Ofen eingetragen; die meisten Fälle entsprechen dem Ofen 4. Merkwürdigerweise ist das Temperaturgefälle über die Steindicke bei kaltgehenden Öfen steiler abfallend, was dafür spricht, daß die stark eisenhaltige Cristobalitschicht den Einfluß der Strahlung, welche bei den hohen Temperaturen den Hauptfaktor der Wärmeübertragung ausmacht, erheblich vermindert.

Rein qualitativ konnte schon durch Beobachtung erkannt werden, daß bei den heißeren Öfen die Cristobalitschicht im Verhältnis zur gesamten veränderten Schicht stärker war. Allerdings konnte bei sehr heißgehenden Öfen die Grenze der Cristobalitschicht gegenüber der Tridymitschicht verlässlich nur mit der Röntgenanalyse festgestellt werden. In Bild 32 ist dieses Verhältnis in Abhängigkeit von der Gewölbetemperatur aufgetragen. Man erkennt, daß sich bis etwa 1660 ° ein konstanter Wert von etwa 0,22 ergibt, dann aber sehr rasch Werte von etwa 0,55 bei Temperaturen von 1690 ° erreicht werden.

Wenn man sich die Vorgänge beim Verschleiß vorstellt, so hat man grundsätzlich zwischen einem Verschleiß zu unterscheiden, der von den Betriebsbedingungen im Ofen als auch von den Eigenschaften des Steins gesteuert wird. Vom Ofen her sind in erster

Linie die maximale Temperatur, teils auch die Temperaturverteilung im Stein, möglicherweise auch der Temperaturzyklus, Flugstaub und Strömungen von Bedeutung. So ist das Profil des Gewölbes immer zwischen dem Scheitel und der Rückwand am stärksten verschlissen, entsprechend den auftretenden Strömungen und der Flugstaubmenge. Vom Stein her kann der Verschleiß nach den bisherigen Erfahrungen und Ausführungen durch den Al_2O_3 -, Alkali-, TiO_2 -Gehalt, die Porosität, die Porengrößenverteilung (gewählte Körnung) und den Umwandlungsgrad beeinflusst werden.

Tropfpunkt — Tropfenanalyse

Während der Versuchsreihe war beobachtet worden, daß der Tropfpunkt der untersuchten vier Steintypen bei den B-, C- und D-Steinen etwa 1680 °, beim A-Stein aber nur 1650 ° betrug. Zur Erklärung wurden in einem Segerkegelofen Stäbe der zu untersuchenden Steine erhitzt, auf bestimmten Temperaturen gehalten und die Zeit bis zum Abreißen eines Tropfens in Abhängigkeit von der Ofentemperatur bestimmt (Bild 33 und 34). Auch bei dieser Prüfung zeigte der D-Stein die günstigsten Werte, was aber nicht mit dem praktischen Betriebsverhalten in Übereinstimmung war.

Ein gänzlich anderes Bild erhielt man bei dem gleichen Versuch, wenn gebrauchte Steine verwendet wurden und das Abtropfen in der heißesten Zone geprüft wurde. Die Versuche sind recht schwierig durchzuführen, da unter Umständen die Wanderungsfront zu hoch erhitzt wird und der Stein an dieser Stelle abreißt. Überraschenderweise wurde gefunden, daß sich die gebrauchten B-, C- und D-Steine etwa gleich verhielten, während für den A-Stein die Werte deutlich ungünstiger lagen.

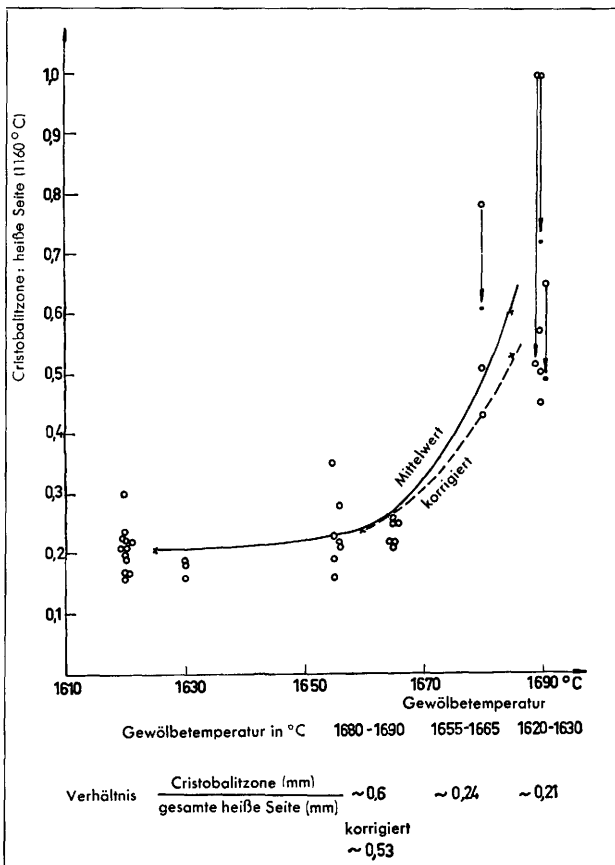


Bild 32: Gewölbetemperatur und Verhältnis Cristobalitzone : gesamte heiße Zone

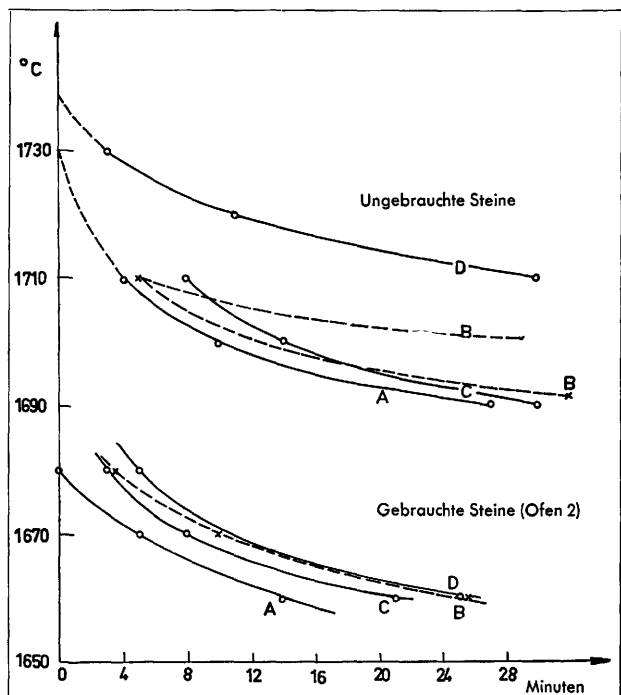


Bild 33: Tropfpunkte an gebrauchten und ungebrauchten Silikasteinen

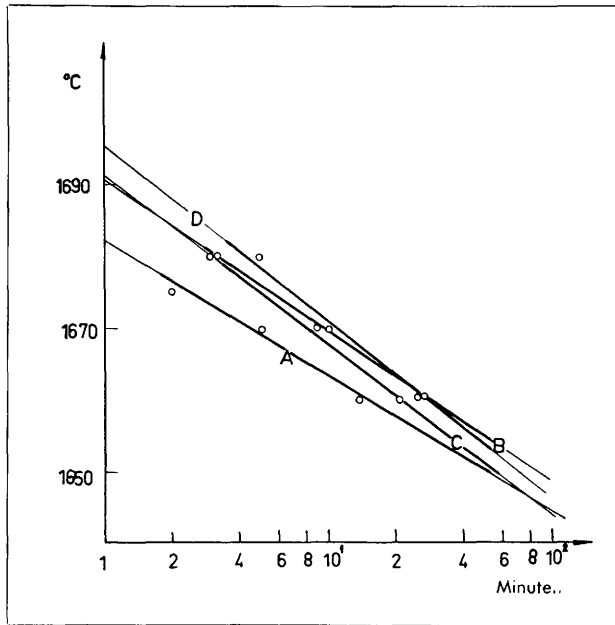


Bild 34: Tropfpunkte an gebrauchten Steinen (Ofen Nr. 2)

Da der Tropfpunkt nach Speith⁽¹⁾ eine Materialeigenschaft ist und parallel zur Haltbarkeit geht, muß man aus den obigen Ergebnissen den Schluß ziehen, daß durch die Aufnahme der Fremdstoffe, in erster Linie des Eisenoxys, die Faktoren zur Bildung und zum Abreißen des Tropfens abgeändert werden. Durch Aufnahme von Eisenoxyd wird beim D-Stein vermutlich die Viskosität der Schmelze wesentlich stärker herabgesetzt als bei den B- und C-Steinen, während andererseits beim A-Stein die Viskosität der Schmelze unter jene für die B- und C-Steine herabgedrückt wird.

Bei einem Vergleich dieses Verhaltens mit der durchschnittlichen Zusammensetzung der Versuchsteine wird man zu dem Schluß geführt, daß bei mittlerem TiO_2 -Gehalt ein etwas erhöhter Al_2O_3 -Gehalt kompensiert werden kann; bei zu hohem Al_2O_3 - oder TiO_2 -Gehalt sinkt dann die Temperatur des Tropfpunktes merklich ab.

Trägt man die Analyse der Tropfen im Diagramm SiO_2 - CaO - Fe_2O_3 auf, so gruppieren sich die einzelnen Punkte mit der Gewölbetemperatur (Bild 35). Der CaO -Gehalt im Tropfen ist in etwa gleich groß, während der Fe_2O_3 -Gehalt mit abnehmender Ofentemperatur wesentlich zunimmt. Zur Bestätigung wurden die entsprechenden Mischungen aus feingepulvertem Quarz, CaO und Fe_2O_3 vorgebrannt, Kegel geformt und der Kegelfallpunkt bestimmt (Bild 36). Mit steigendem CaO -Gehalt, aber insbesondere mit steigendem Fe_2O_3 -Gehalt, nimmt der Kegelfallpunkt im untersuchten Gebiet kontinuierlich ab. Die Parallelität zur Einordnung der Zusammensetzung der Tropfen mit der Ofentemperatur ist augenfällig. Man muß sich daher vorstellen, daß an der Innenfläche des Silikasteins eine sehr CaO - und Fe_2O_3 -haltige Schmelze abtropft bzw. abrinnt, wobei sich ein Gleichgewicht zwischen dem CaO - und Fe_2O_3 -Gehalt mit der maximalen Ofentemperatur einstellt. Je niedriger die Gewölbetemperatur ist, eine desto eisenoxydreichere Schmelze fließt ab.

Es war daher auch die Frage zu prüfen, ob sich der Einfluß des TiO_2 in synthetischen Mischungen aus CaO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 und SiO_2 im Sinne der oben geäußerten Vermutungen auswirkt. Da in einem fünfstoffsystem die Ergebnisse nicht übersichtlich dargestellt werden können, wurden für diese Versuchsreihe nur charakteristische Gehalte an CaO und Fe_2O_3 herangezogen und der Al_2O_3 -

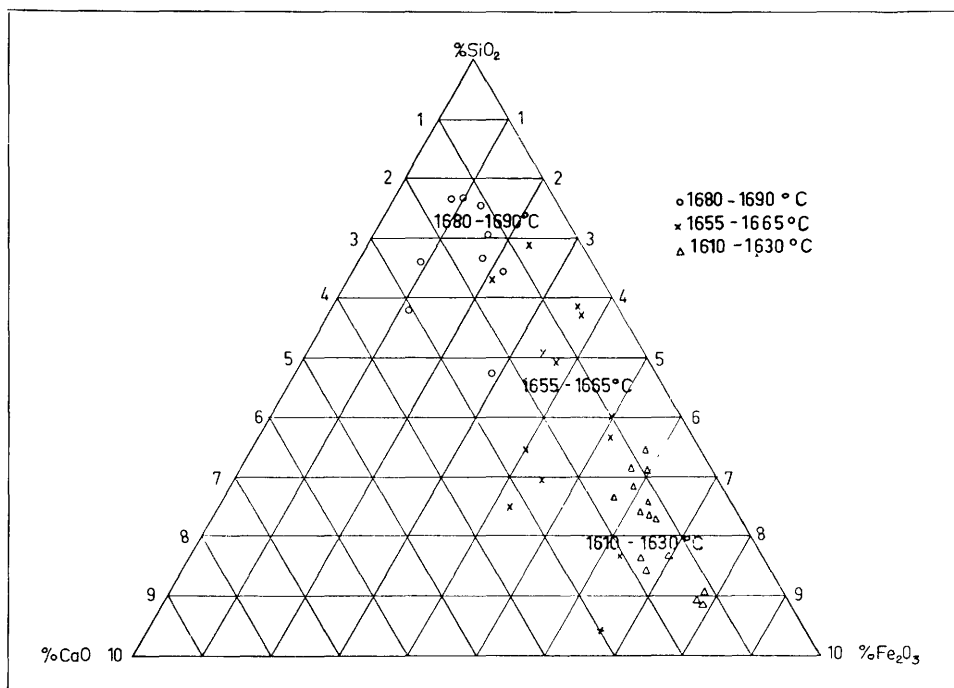


Bild 35: Tropfenanalyse und Gewölbetemperatur

(¹) Speith, K. G., und Engels, G.: Stahl und Eisen, 70 (1950), S. 861—867.

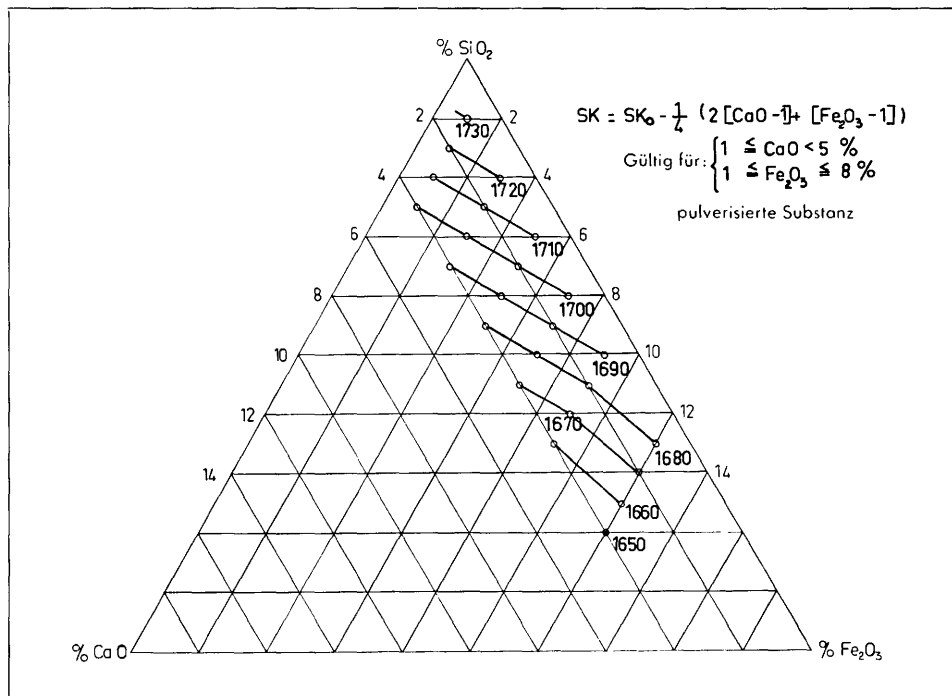


Bild 36: Segerkegel-Mischungen (nur CaO + Fe₂O₃ + SiO₂)

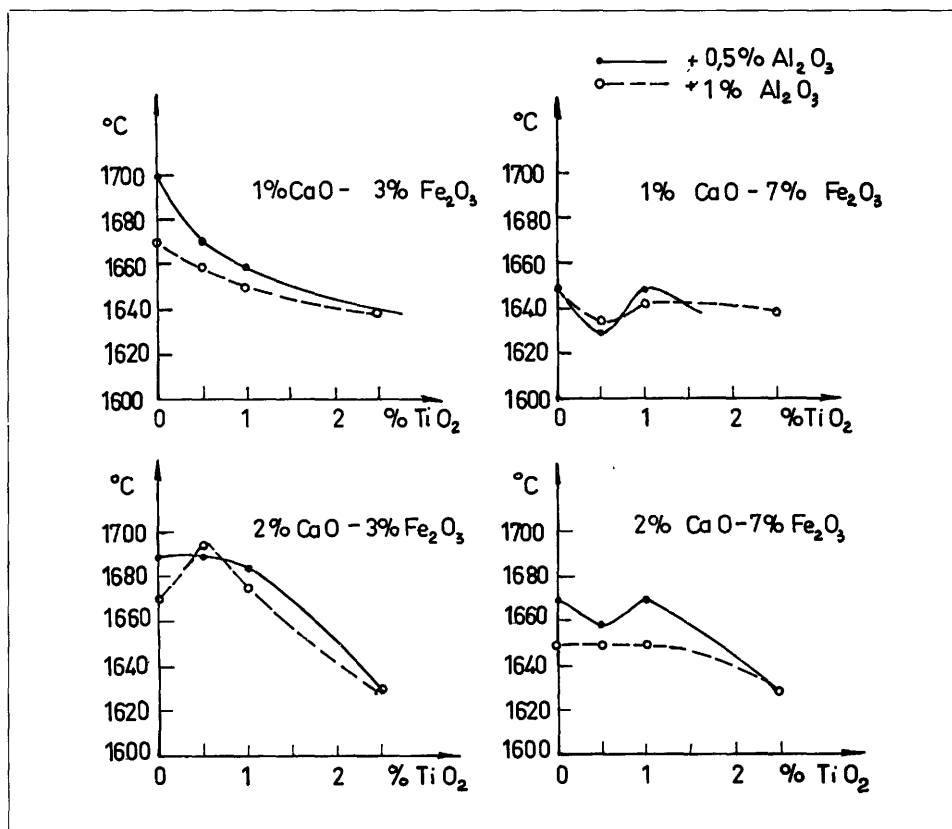


Bild 37: Synthetische Segerkegel-Mischungen

Gehalt zwischen 0% und 1% sowie der TiO₂-Gehalt zwischen 0% und 3% verändert (Bild 37). Selbst durch geringe Mengen an Al₂O₃ wird der Kegelfallpunkt deutlich gedrückt; doch ist diese Wirkung des Al₂O₃ schwächer, wenn ein mittlerer Gehalt an TiO₂ vorhanden ist.

Zonenaufbau der Steine

Von allen gebrauchten Steinen wurde eine systematische Zonenanalyse durchgeführt, wobei in den meisten Fällen die Farb- oder Texturunterschiede zur Trennung nach Zonen herangezogen wurden.

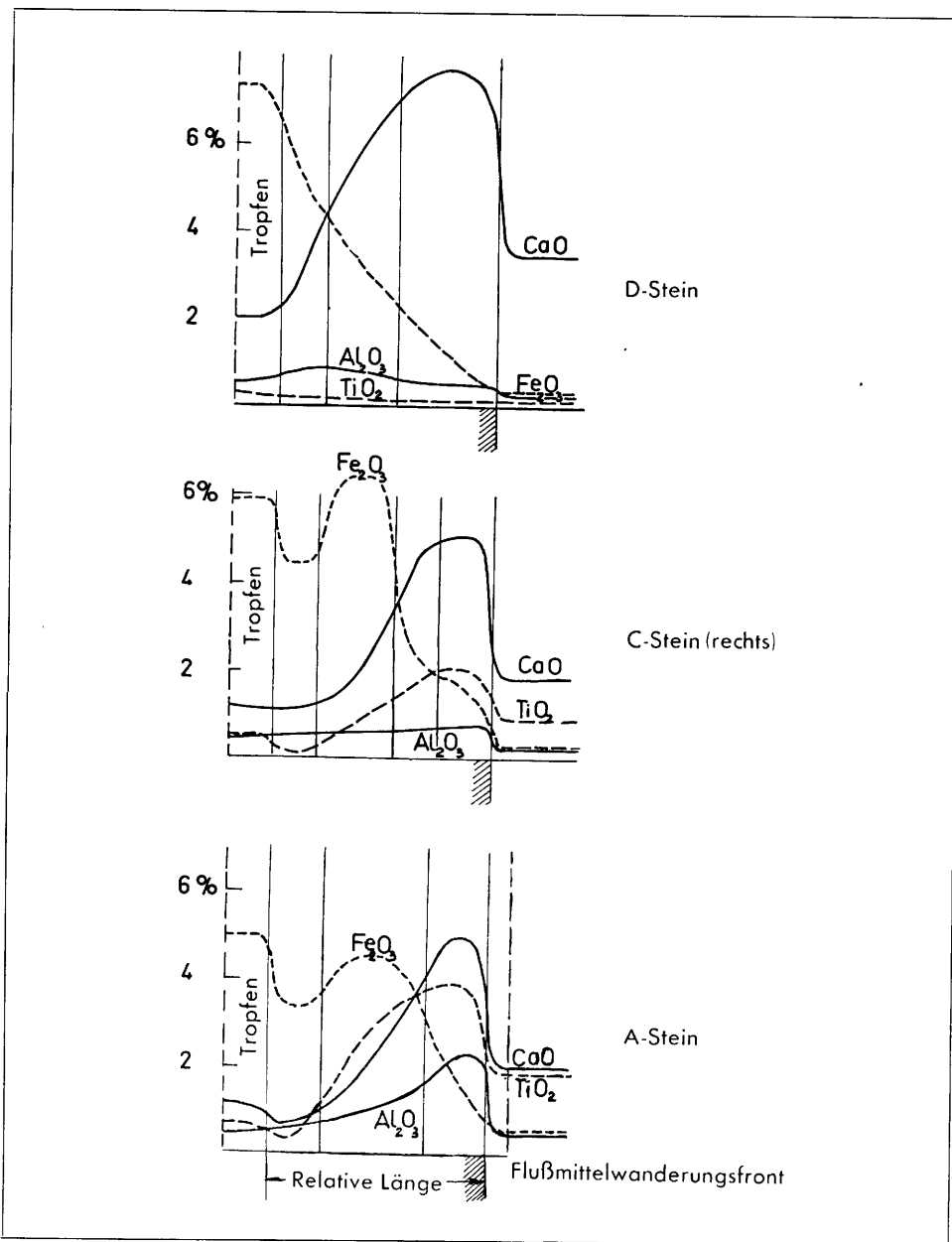


Bild 38: Charakteristische Zonenanalysen einiger Versuchssteine (Ofen Nr. 2)

Da sich die Zonen mit dem Verschleiß der Steine verschieben, aber der Unterschied zwischen der Innentemperatur und der Front der Erstarrung der Flußmittel praktisch konstant ist, wurde zumeist für Vergleichszwecke die Stärke der heißen Steinseite bis zum Ende der Wanderungsfront auf gleiche Länge umgerechnet („Relative Länge“). Die Steintypen mit fehlendem, mittlerem oder hohem TiO₂-Gehalt unterscheiden sich im Verschleißbild beträchtlich (Bild 38). Besonders auffällig ist hierbei, daß der CaO-Gehalt im D-Stein im Vergleich zu den anderen Steinen wesentlich höher liegt und gegen die heiße Seite zu eine viel breitere Verteilung aufweist, während der CaO-Gehalt beim TiO₂-reichsten Stein niedriger ist und eine geringere Verteilungsbreite besteht. Man erkennt ferner, daß bei den Steinen mit mittlerem TiO₂-Gehalt der TiO₂-Gehalt parallel dem CaO-Gehalt geht, während bei hohem Gehalt an TiO₂ dieses anscheinend auch zum Teil

mit dem Fe₂O₃ zur kälteren Seite wandert. Der Al₂O₃-Gehalt reichert sich im allgemeinen mit dem CaO-Gehalt an der kalten Seite an, wenn nicht, wie in manchen Fällen, Al₂O₃ aus der Ofenatmosphäre (z. B. bei aluminiumhaltigem Schrott) an den Stein gelangt und die Unterschiede verwischt.

Es wurde versucht, diese Wanderung durch langdauerndes Erhitzen der Steine (als Mauerwerk) auf 1600° im Temperaturgefälle in einem gasgefeuerten Ofen nachzuahmen. Durch das Fehlen der Eisenoxydatmosphäre konnte auch nach einer Woche keine merkliche Flußmittelwanderung beobachtet werden. Das auftretende Eisenoxyd bildet die Voraussetzung für eine merkliche Wanderungsgeschwindigkeit der Flußmittel, was durch das starke Herabsetzen der Viskosität von Kalksilikatschmelzen durch Eisenoxyde verständlich ist.

In den folgenden Bildern 39, 40, 41 und 42 sind weitere Beispiele aus einem mittelgehenden und

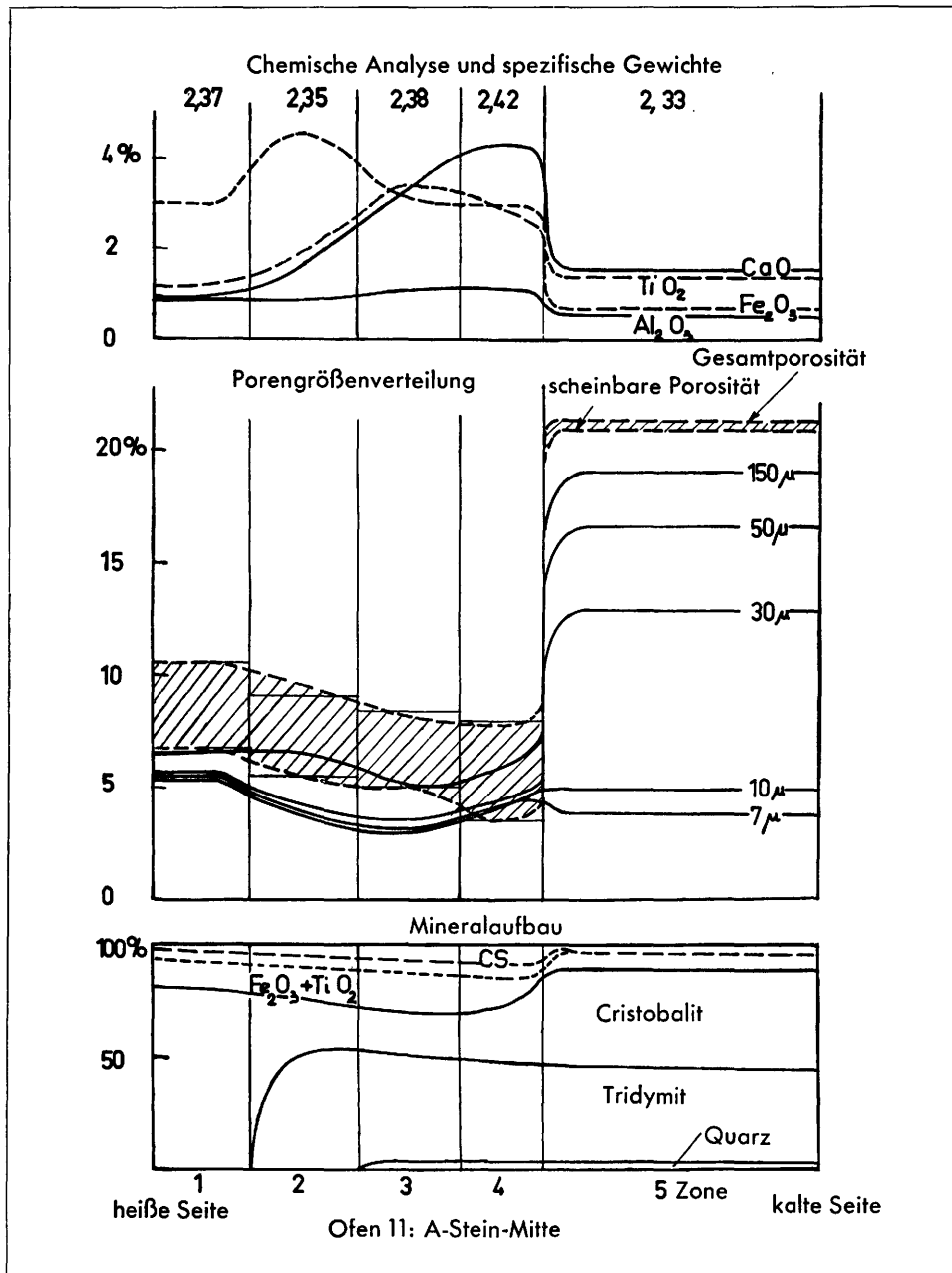


Bild 39: Zonenaufbau verschlackter Silikasteine

einem scharfgehenden Ofen gewählt und außer der zonenweisen Veränderung auch die entsprechenden physikalischen Werte, wie spezifisches Gewicht und Porengrößenverteilung sowie der röntgenographisch ermittelte Gehalt an Quarz, Cristobalit und Tridymit, eingetragen. Man erkennt bei dem Ofen mittlerer Beanspruchung, daß in allen Zonen die Gesamtporosität durch die Bildung und Wanderung der Schmelzen wesentlich herabgesetzt wird. Die Unterschiede in der Bestimmung der Porengrößenverteilung zu den Ergebnissen der Ermittlung der geschlossenen Poren durch Tränken mit Wasser sind vermutlich darauf zurückzuführen, daß durch die kleinen Probestücke die Bestimmung der Porengrößenverteilung nicht nur auf zufällige Inhomogenitäten in den Zonen des Steins empfindlich ist, sondern daß auch durch die Probenherstellung verschiedene Poren und Kanäle geöffnet werden. Der

Vergleich der Bilder 39 und 40 zeigt, da die übrigen Bedingungen weitgehend gleich sind, daß durch die Umwandlung, welche durch die Wanderungsfront anscheinend begünstigt wird, der Anteil an mittleren und groben Poren stärker zurückgedrängt wird. Es ist dies ein Hinweis darauf, daß sich bei den untersuchten europäischen Steinen eine mittlere Umwandlung ähnlich auswirkt wie eine ursprünglich vorhandene niedrige Steinporosität.

Der röntgenographisch ermittelte Cristobalitgehalt liegt im unveränderten Steinende bei etwa 40%, sinkt an der Wanderungsfront deutlich ab, bleibt aber in der Tridymitzone weitgehend konstant, um dann auf der heißen Seite, der sogenannten Cristobalitzone, rasch auf Werte von etwa 90% anzusteigen. Der Tridymitgehalt ist weitgehend konstant, er nimmt nur in der sogenannten Tridy-

mitzone etwas zu und sinkt dann an der Fläche der Cristobalitzone rasch auf Null ab. Der Quarzgehalt, welcher meistens auf einzelne gröbere Quarzkörner zurückzuführen ist, bleibt oft überraschend weit in der Tridymitzone erhalten, was auch durch Dünnschliffaufnahmen bestätigt wurde. Man hat sich daher vorzustellen, daß der Cristobalitanteil in der Tridymitzone dem körnigen Quarzanteil entspricht und von den Flußmitteln kaum erfaßt wird. Es wäre noch darauf hinzuweisen, daß die Differenz zwischen der Summe der röntgenographisch ermittelten kristallinen Substanzen und dem aus der chemischen Zusammensetzung berechneten

Gehalt an Oxyden und Wollastonit häufig zu einer Lücke führt, welche durch Fehlorderungen im Cristobalit und Tridymit zu erklären ist. Auf der kalten Seite wäre es auch nicht ausgeschlossen, daß die Röntgenauswertung zu einem zu geringen Gehalt an Tridymit führt, da die Schmelze etwa dem dreifachen Gehalt an Flußmitteloxyden entspricht und die Tridymitkristalle sich beim Abkühlen vielleicht unvollständig oder so fein abgeschieden haben, daß sie bei der quantitativen Auswertung ungenügend erfaßt wurden.

Im Vergleich zu den anderen Öfen zeigen die heißgehenden Öfen ein wesentlich anderes Ver-

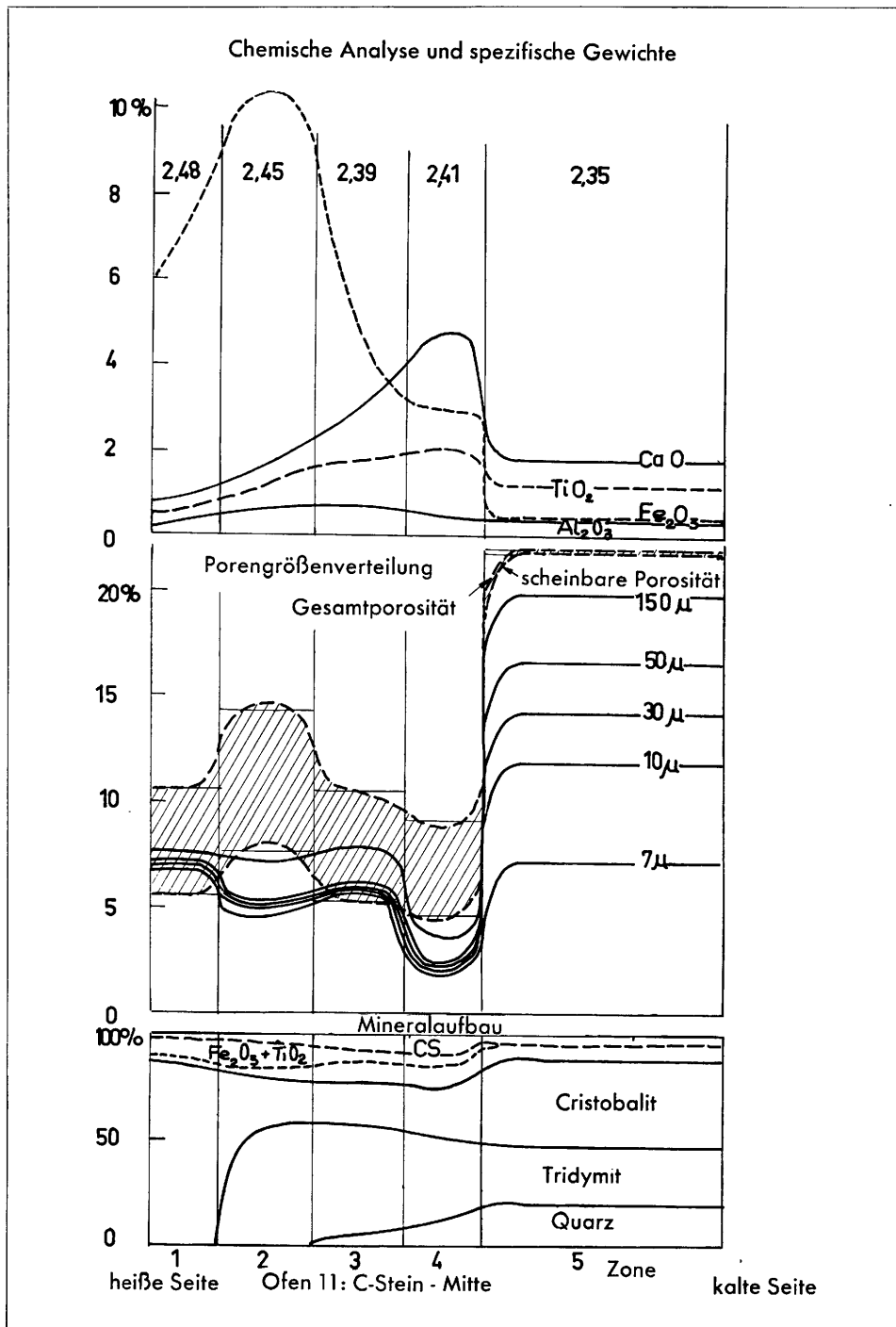


Bild 40: Zonenaufbau verschlackter Silikasteine

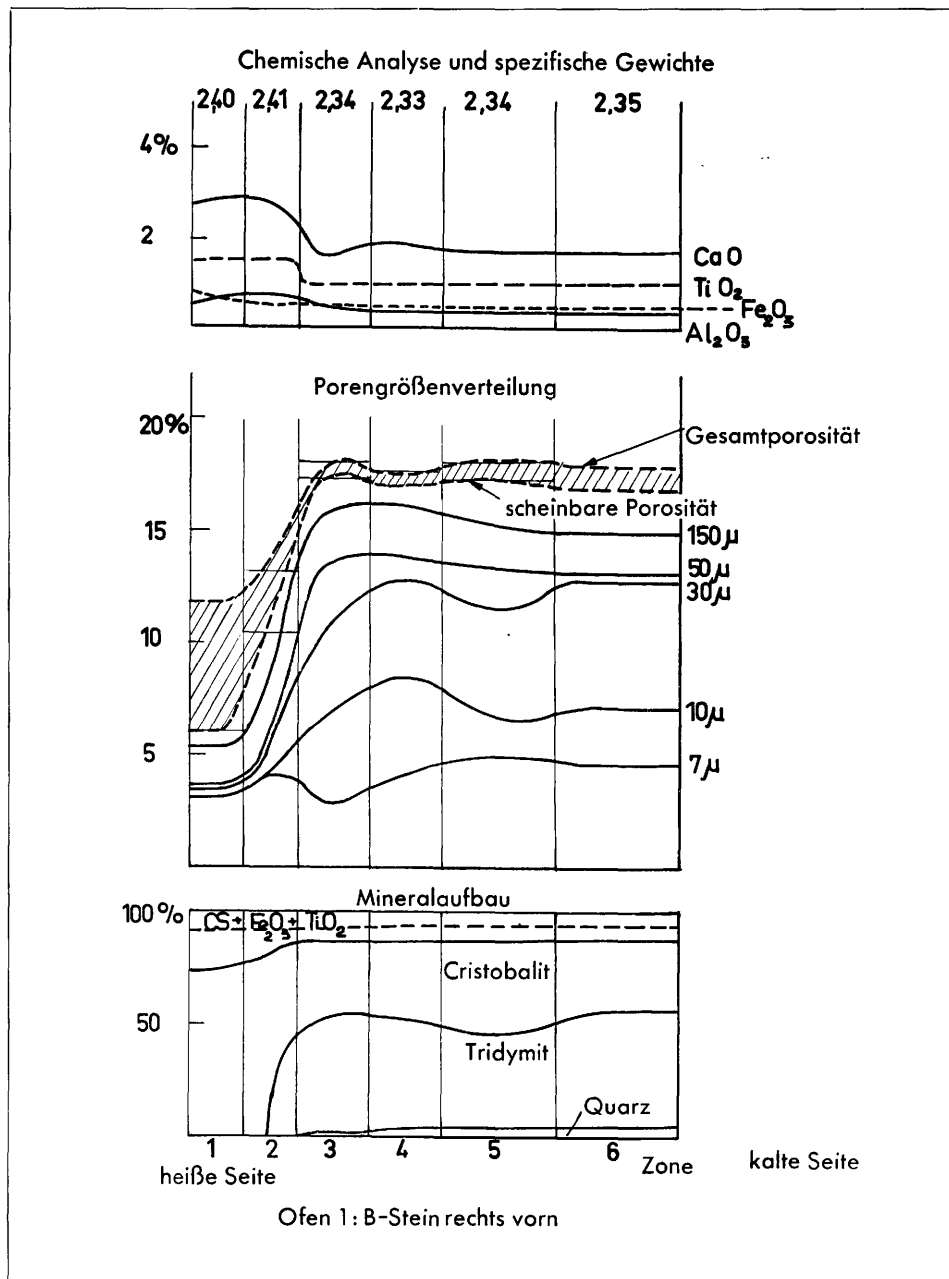


Bild 41: Zonenaufbau verschlackter Silikasteine

schleißbild (Bild 41 und 42). An den Kurven dieser Steine erkennt man, daß der Eisenoxydgehalt an der heißen Seite niedrig ist und daß in vielen Fällen nur eine unvollständige Wanderung der Flußmittel zu beobachten ist. Die Zonen sind entweder überhaupt nicht zu unterscheiden, oder die Farbe ist für eine Einteilung irreführend. Die Trennung in Cristobalite-Tridymite-Zone ist am verlässlichsten durch die Röntgenaufnahmen durchzuführen. Der Bezugspunkt der kalten Wanderungsfront fällt vollständig oder weitgehend weg. Im allgemeinen gibt nach den Erfahrungen an den übrigen Öfen der restliche Quarzgehalt eine Andeutung zur Temperaturverteilung auf der kalten Seite, da der Quarz bei etwa 1300° durch Umwandlung verschwindet. Die Porosität wird in erster Linie durch die bei

den hohen Temperaturen bestehenden Schmelzen verändert. Beim B-Stein kann man erkennen, daß die Porosität durch die Herabsetzung des spezifischen Gewichtes von $2,35$ auf $2,33$ g/cm³ etwas abnimmt und insbesondere die groben Poren vermindert werden. Sehr merkwürdig ist die immer wieder zu beobachtende Erscheinung, daß auch bei gut umgewandelten Steinen das spezifische Gewicht gegen die heiße Seite zu ansteigt, ohne daß dieses Ansteigen durch Zunahme an Flußmitteln, insbesondere an Eisenoxyd, erklärt werden kann. Die gleiche Erscheinung wurde auch an den einseitig auf 1600° erhitzten Silikasteinen aller Typen festgestellt. Es wird an anderer Stelle über die wissenschaftliche Erklärung dieses Phänomens noch berichtet werden ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Konopický, K., und Patzak, I.: „Das Phänomen der Zunahme des spezifischen Gewichtes beim Erhitzen von Silikasteinen“, Ber. Deutsch. Keram. Ges., demnächst.

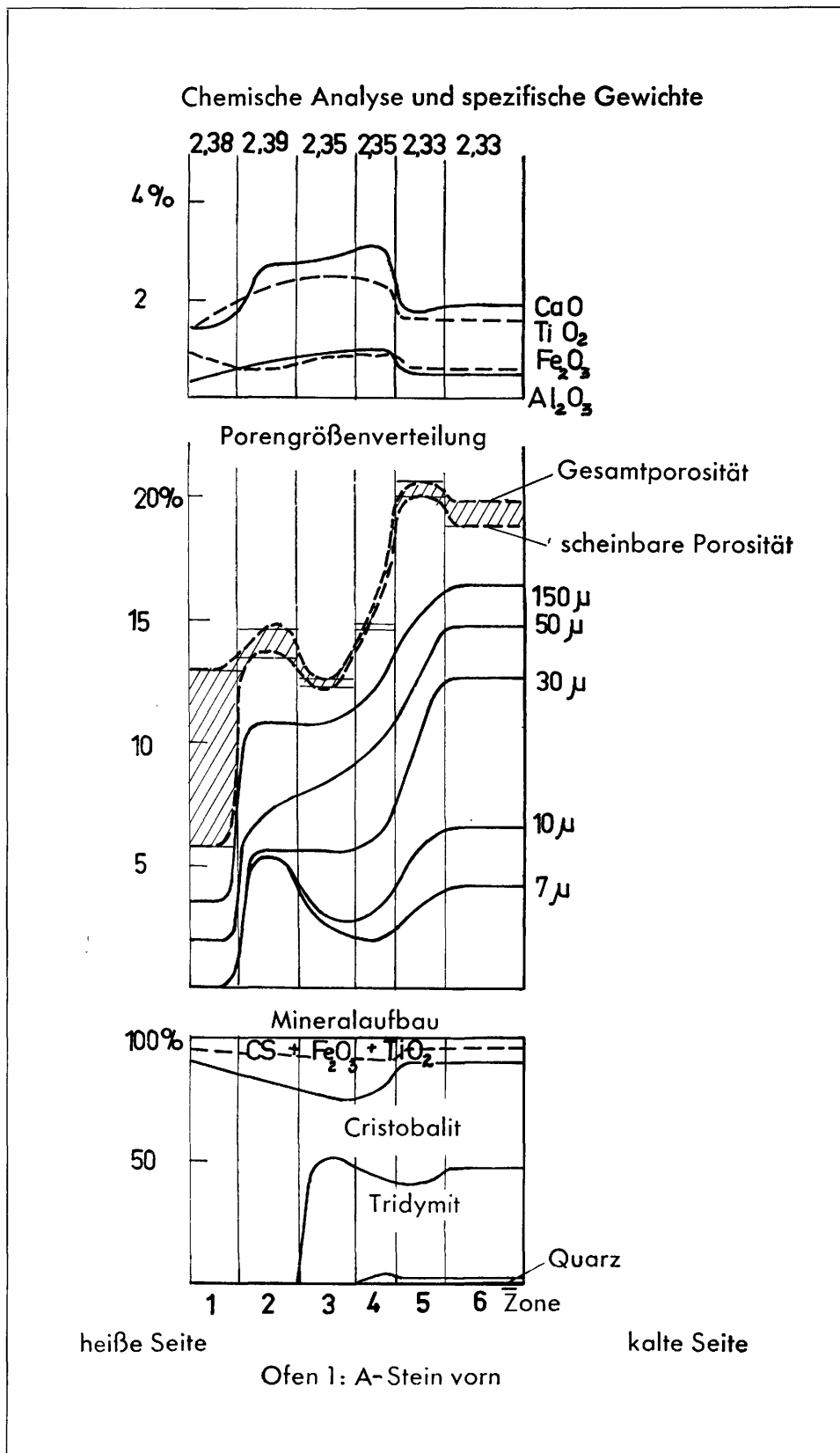


Bild 42: Zonenaufbau verschlackter Silikasteine

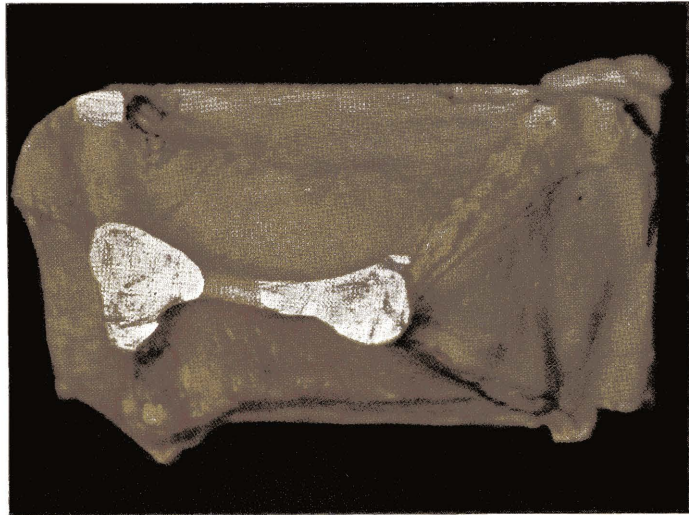


Bild F

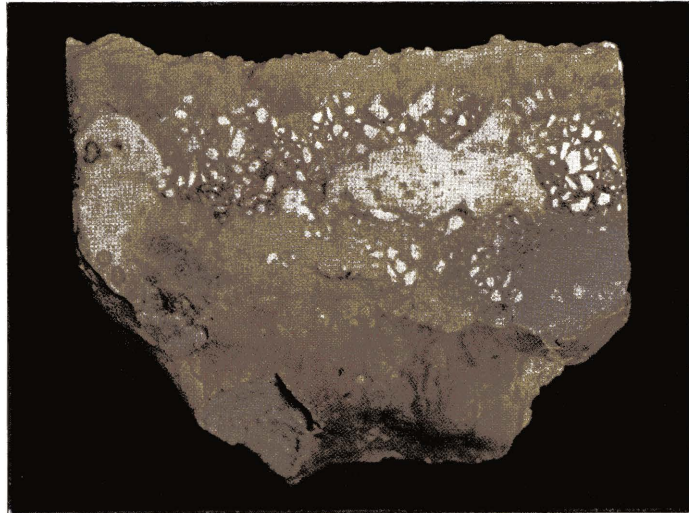


Bild G

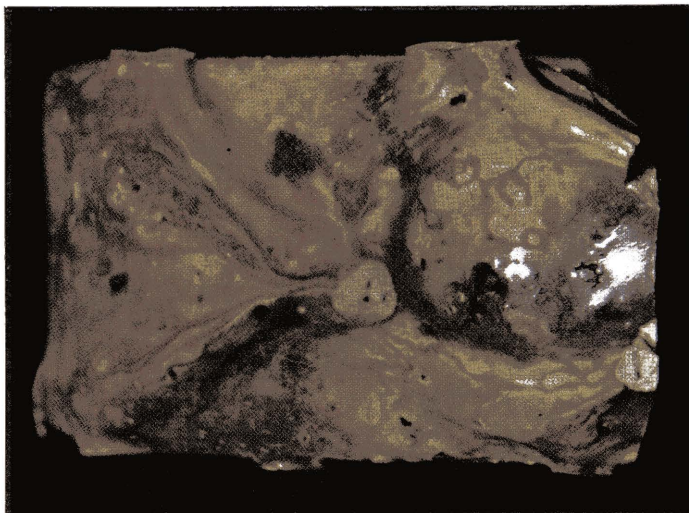


Bild H

Beim Ofenabbruch ausgebaute Silikasteine

Bild F: von unten gesehen.

Bild G: von der Seite gesehen.

Bild H: von unten gesehen.

TAFEL XXX

Al_2O_3 -, Fe_2O_3 -, TiO_2 -, CaO -Zunahme oder -Abnahme durch den Abbrand, bezogen auf die Ausgangslänge und Analyse des ungebrauchten Steins

Ofen 11						
Stein	Abbrand %	Heiße Seite bis FWF ⁽¹⁾ cm	Al_2O_3 %	TiO_2 %	CaO %	Fe_2O_3 %
D hinten	64	7,9	-42	—	-47	+ 490
A vorne	62	8,8	-60	-49	-37	+ 140
C hinten	77	4	-55	-75	-66	+ 65
C vorne	60	8,5	-5	-42	-37	+ 390
Ofen 12						
D vorne	58	7,8	-31	—	-46	+ ~700
B vorne	62	5,3	-28	-50	-32	+ 225
Ofen 2						
D	70	6,2	-32	—	-52	+ 110
A	57	8,6	-55	-42	-53	+ 130
C links	55	8,7	(+ 95)	-41	-27	+ 282
B	63	8,3	(+ 10)	-50	-32	+ 53
Ofen 4						
C	43	8,1	-42	-36	-28	+ 130
Ofen 1						
D	56	5,5	-21	—	-42	+ 110
A vorne	71	5,5	-61	-63	-69	— 69
B rechts vorne	55	3,0	-62	-75	-75	— 77

(¹) FWF = Flußmittel-Wanderungsfront.

Bei den heißgehenden Öfen ist sehr deutlich zu erkennen, daß der Stein rascher abschmilzt, als die Flußmittelfront in den Stein wandern kann. Bei einem Durchrechnen kommt man in den meisten Fällen auf eine Wanderungsgeschwindigkeit von etwa 3 mm/Tag. Es erschien daher wichtig, zu prüfen, welcher Anteil an Fremdstoffen, wie CaO , TiO_2 usw., in den Steinen mit der Schlacke abgeht und welcher gegen die kalte Front zu wandern kann. Die systematische Zonenanalyse im Vergleich zum Abbrand und der ursprünglichen Zusammensetzung des Steins muß erkennen lassen, ob der eine oder andere Vorgang überwiegt: Wenn die im Stein vorhandenen Flußmittel vollständig zur kalten Front abwandern, so müßte die auf die ursprüngliche Länge bezogene Menge dieser Flußmittel nach dem Versuch unverändert sein. Wenn Flußmittel, und als solche kommen nur Eisenoxyd und CaO in Frage, vom Stein aufgenommen und ebenfalls zur kalten Front abgewandert sind, so muß sich der Gehalt an diesen Flußmitteln erhöhen. Der andere Extremfall ist die Annahme, daß kein Anteil der Flußmittel

im Stein oder der aufgenommenen Flußmittel Gelegenheit hat, zur kalten Front abzuwandern. In diesem Falle muß der Gesamtgehalt der Fremdstoffe um den Anteil des verbrauchten Steins geringer sein. Die meisten praktischen Fälle liegen selbstverständlich zwischen den beiden Extremen, und es wurde für zwei kaltgehende und drei heißgehende Öfen durchgerechnet, wie für die einzelnen Komponenten die Abnahme bzw. Zunahme im Verhältnis zum Abbrand steht (Tafel XXX). In allen Fällen ist eine deutliche Zunahme des Gehaltes an Eisenoxyd zu erkennen. Sie ist im allgemeinen bei den heißgehenden Öfen geringer, in einzelnen Fällen ist sogar eine Abnahme zu beobachten. Der CaO -Gehalt liegt bei sehr heißgehenden Öfen in der Größenordnung des Abbrandes; doch ist auch bei ausgesprochen kaltgehenden Öfen zu beobachten, daß, insgesamt gesehen, ein Teil des vorhandenen und aufgenommenen CaO abschmilzt. Beim Al_2O_3 -Gehalt ist sehr deutlich der Unterschied zu den kaltgehenden Öfen festzustellen, welche im Gegensatz zu den sehr heißgehenden Öfen erkennen lassen, daß ein Teil des Al_2O_3 abwandern konnte. Die Ergebnisse beim TiO_2 -Gehalt lassen erkennen, daß ein erheblicher Teil des TiO_2 abschmilzt, d. h. daß das TiO_2 verhältnismäßig langsam zur kalten Front wandert oder daß ein Teil des TiO_2 , wie schon früher angenommen, im Quarzitkorn von der Wanderung nicht erfaßt wird.

Schmelzmenge — Zusammensetzung der Schmelze

Es wurde versucht, die Tränkung durch Schmelzen sowohl für die kalte Wanderungsfront als auch für den heißen Teil in Abhängigkeit von der Beanspruchung im Ofen festzustellen. In Bild 43 sind die Werte für die verschiedenen Steintypen zusammengefaßt und auch das dazugehörige Mittel gezogen. Für die heißgehenden Öfen konnte die Veränderung an der Flußmittelfront nicht aufgetragen werden, da für die Steine in den heißgehenden Öfen die Flußmittelfront nicht den ihr zugehörigen Grenzwert der Temperatur von etwa 1160° erreicht. Der Porenverlust ist an der Flußmittelfront deutlich höher als an der heißen Seite und begreiflicherweise unabhängig von der Ofentemperatur. Hingegen ist der Porenverlust an der heißesten Zone bei scharfgehenden Öfen geringer.

Es ist auch möglich, aus Analyse, Raumgewicht und spezifischem Gewicht den Porenverlust der zugewanderten Schmelzmenge gegenüberzustellen (Bild 44). Bei der Durchrechnung muß man berücksichtigen, daß dem mittleren spezifischen Gewicht der SiO_2 -Modifikationen das spezifische Gewicht der Schmelze gegenüberzustellen ist, welches in erster Annäherung mit 2,2 eingesetzt wurde. Der Zusammenhang ist innerhalb der vielfachen Fehlermöglichkeiten durchaus befriedigend, wenn auch zu erkennen ist, daß der D-Stein systematisch etwas anders liegt, was vielleicht auf den fehlenden TiO_2 -Gehalt oder aber auf eine falsche Annahme zum spezifischen Gewicht wegen des höheren CaO -Gehaltes zurückzuführen ist.

Aus allen untersuchten Steinen wurde die Zusammensetzung der Schmelze an der Wanderungsfront

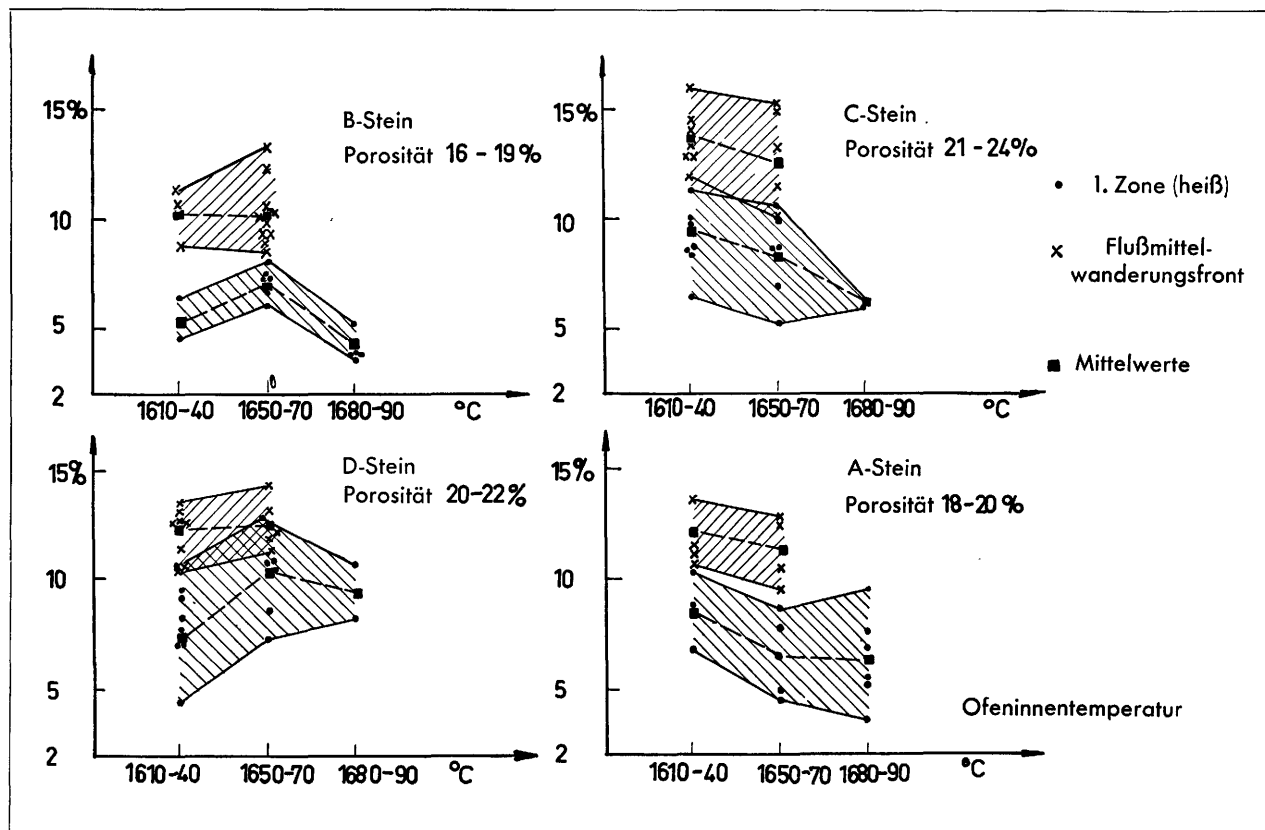


Bild 43: Porenverlust an der heißen und kalten Seite der Wanderung

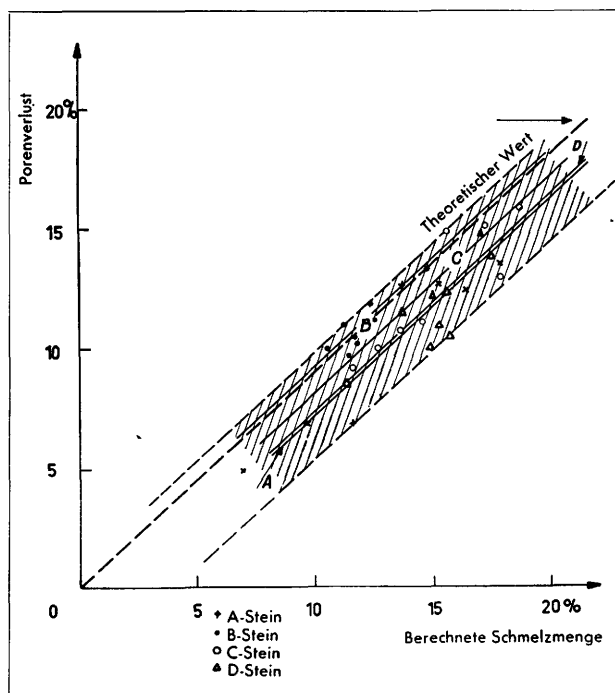


Bild 44: Porenverlust : Berechnete Schmelzmenge in der Wanderungsfront

aus den unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen, dem Raumgewicht und dem spezifischen Gewicht berechnet. In der Tafel XXXI sind die Werte für die verschiedenen Steintypen und für

verschiedene Ofentypen gegenübergestellt. Man kann hieraus die folgenden Schlüsse ziehen:

Bei den heißgehenden Öfen erreicht ein geringerer Anteil an Schmelze die Wanderungsfront als bei den kaltgehenden Öfen, wobei allerdings der Unterschied zwischen den mittleren und den kaltgehenden Öfen nicht sehr deutlich ist. Die Schmelze hat im allgemeinen einen SiO_2 -Gehalt um 60%, wodurch die Formel von Rigby (1), daß die Schmelzmenge etwa der dreifachen Menge an Oxyden und Fremdoxyden entspricht, ihre Bestätigung findet (d. h. der SiO_2 -Gehalt ist $\frac{2}{3} = 66\%$). Auffällig ist, daß die Schmelzen im Stein bei heißen Öfen SiO_2 -reicher sind als jene bei mittleren oder kalten Öfen. Ferner liegen die Werte für den SiO_2 -Gehalt der Schmelze beim A-Stein um 50%. Der CaO -Gehalt liegt im allgemeinen um 20%, beim D-Stein deutlich höher; einen niedrigeren Anteil findet man meist bei Schmelzen im Stein bei heißgehenden Öfen, korrespondierend zu deren höherem SiO_2 -Gehalt. Der TiO_2 -Gehalt in der Schmelze liegt bei 7%, nur im A-Stein bei etwa 9%; selbstverständlich enthält die Schmelze im D-Stein kein TiO_2 , weil kein TiO_2 im Stein vorhanden war. Der Fe_2O_3 -Gehalt liegt bei den Schmelzen im Stein bei heißgehenden Öfen deutlich niedriger als bei Schmelzen im Stein bei mittleren oder kaltgehenden Öfen. Er ist merkwürdigerweise beim C-Stein am höchsten und beim B-Stein am niedrigsten, ohne daß hierfür eine Erklärung gefunden werden konnte. Der Al_2O_3 -Gehalt wird anscheinend von zu vielen Faktoren beeinflusst. Vielleicht drücken sich in den stärkeren Streuungen

(1) Rigby, G. R., White, R. P., Booth, H., und Green, A. T.: Trans. Brit. Ceram. Soc., 45 (1946), S. 69-109.

TAFEL XXXI
Zusammensetzung der Schmelze an der Wanderungsfront (Mittelwerte)

Stein	Gewölbetemperatur °C	Glas %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	CaO %
B	1685	6,8	70,2	7,0	3,2	7,2	12,4
	1650	12,0	54,9	3,3	9,9	7,4	24,5
	1625	12,1	61,3	1,7	9,8	6,6	20,6
C	1685	12,4	68,3	1,8	4,2	6,5	19,2
	1650	14,3	65,3	2,4	15,6	6,2	22,6
	1625	17,0	54,3	2,5	17,2	7,4	20,6
D	1685	13,4	69,4	1,4	3,2	—	26,0
	1650	13,6	60,0	1,2	11,0	—	27,8
	1625	16,0	63,2	2,0	12,0	—	22,8
A	1685	8,7	69,0	3,4	4,1	9,4	14,1
	1650	15,8	47,5	7,8	10,0	11,4	23,3
	1625	15,8	50,1	5,0	13,4	8,0	23,6

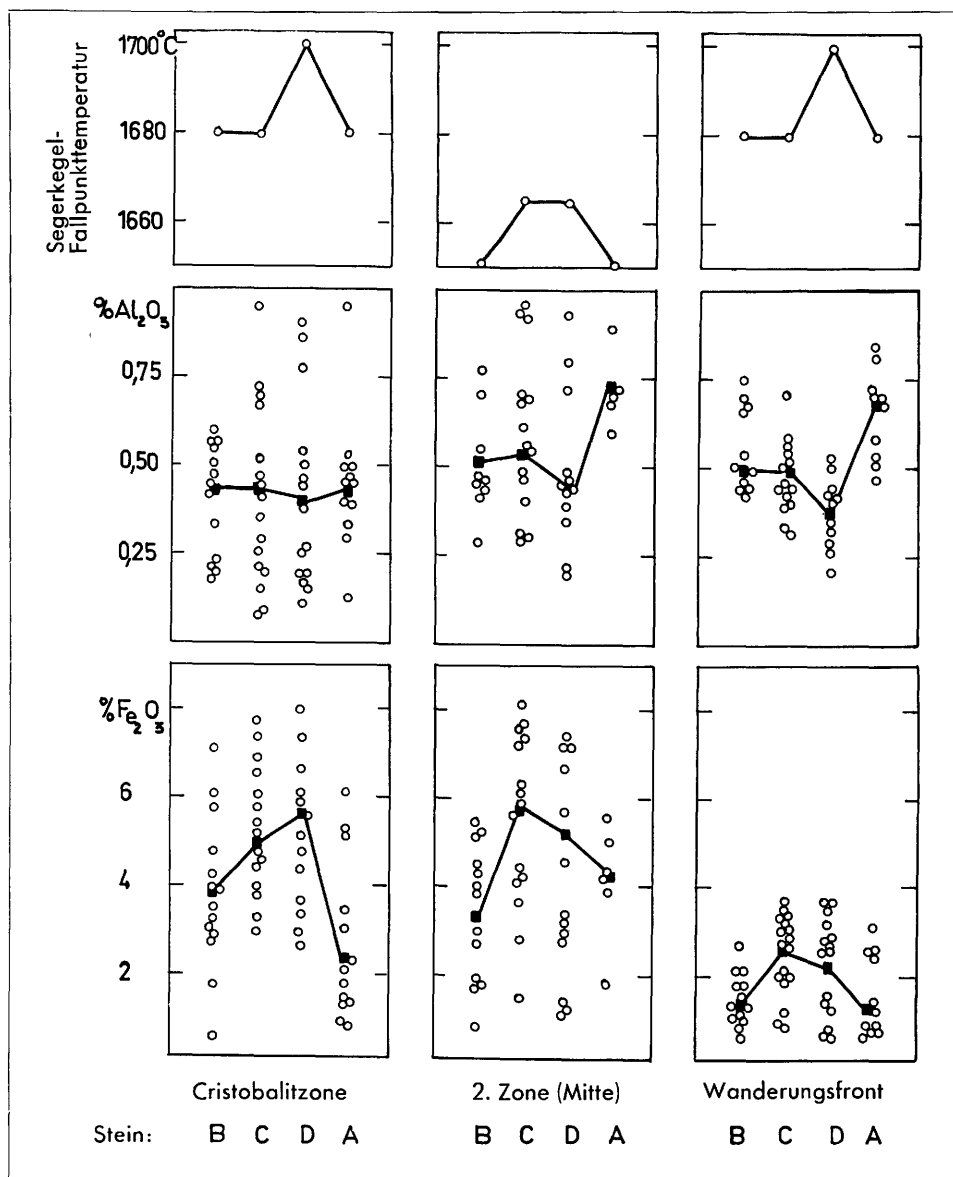


Bild 45: Chemische Zusammensetzung und Segerkegel-Werte der einzelnen Zonen. Mittelwerte aus den häufigsten Werten (80%)

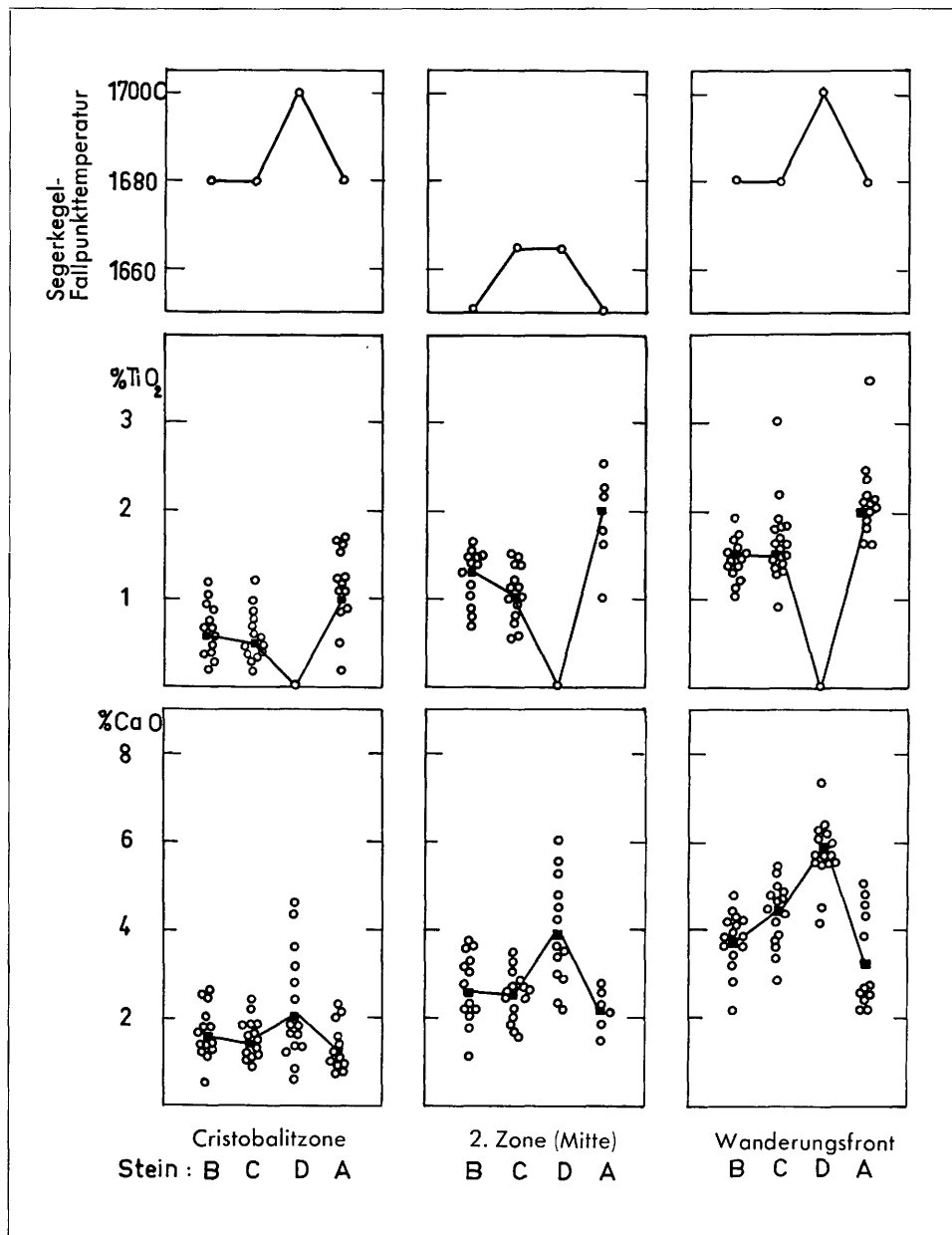


Bild 46: Chemische Zusammensetzung und Segerkegel-Werte der einzelnen Zonen. Mittelwerte aus den häufigsten Werten (80%)

auch Fehler in der Bestimmung des Al_2O_3 -Gehaltes aus, da es sich ja um eine Differenzberechnung handelt.

Die unterschiedlichen Zonenbilder der verschiedenen Steintypen dürfen aber nicht ohne kritische Stellungnahme mit der Haltbarkeit verbunden werden, da eine Reihe von Erscheinungen höchstens indirekt mit der Ausbildung und chemischen Zusammensetzung der einzelnen Zonen verknüpft sein kann.

Zonen-Verschleißvorgang

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, daß die folgenden chemischen und physikalischen Werte des ungebrauchten Steins den Verschleißvorgang beeinflussen: der Gehalt an Tonerde, die Porosität, das spezifische Gewicht und der Gehalt an TiO_2 . Es wurde versucht, diese vier Faktoren in den einzel-

nen Zonen zu verfolgen, um deren Einfluß auf die Verschleißvorgänge abzugrenzen. In den beiden Bildern 45 und 46 ist die chemische Zusammensetzung der Cristobalitzone (1. Zone), der heißen Tridymitzone (2. Zone) und der kalten Zone (Wanderungsfront) gegenübergestellt. Die Mittelwerte für den Al_2O_3 -Gehalt der Cristobalitzone lassen keinen Unterschied zwischen den drei Steinen der guten Gruppe und dem ungünstigen A-Stein erkennen. Das gleiche gilt für den CaO-Gehalt, während der TiO_2 -Gehalt in der heißen Zone eindeutig vom ursprünglichen TiO_2 -Gehalt abhängt. Der Fe_2O_3 -Gehalt der Cristobalitzone ist beim A-Stein deutlich niedriger, worauf noch zurückgekommen wird. Bei der an der Cristobalitzone angrenzenden Tridymitzone, welche vielfach erkennen läßt, daß in ihr Ausschmelzungen beginnen, die nach der heißen Seite hin zu einer Art Lochfraß führen, unterscheidet sich der A-Stein im Mittel durch seinen höheren Al_2O_3 -

Gehalt, während der CaO-Gehalt und der Fe_2O_3 -Gehalt nicht charakteristisch sein können und der TiO_2 -Gehalt mit der ursprünglichen Zusammensetzung des Steins parallel geht. Die gleichen Zusammenhänge, allerdings etwas schwächer, erhält man bei Vergleich der Zusammensetzung an der Wanderungsfront, mit Ausnahme der Werte für den CaO-Gehalt, die beim D-Stein deutlich am höchsten und beim A-Stein deutlich am niedrigsten sind. Da die Temperatur in dieser Zone im Mittel etwa 1200° ist, kann sie für den Verschleißvorgang direkt nicht entscheidend sein.

Im vorhergehenden wurde schon ausgeführt, daß die Menge des Eisenoxys und des CaO an der Oberfläche des Steins im Zusammenhang mit dessen Verschleiß steht und daß, je höher die Ofentemperatur, desto geringer der Gehalt an Eisenoxyd in der heißesten Zone ist, da bei höheren Temperaturen die eisenoxydreichen Silikatschmelzen zu dünnflüssig werden. Bestätigt wird diese Auffassung durch das weitgehend einheitliche Bild, das man im abgestellten Ofen beobachten kann. Die Steine haben je

Man muß sich demnach den Verschleißvorgang zweistufig vorstellen: Der Verschleiß wird an der heißen Zone durch das auftreffende Eisenoxyd und den Kalk sowie die maximale Ofentemperatur bestimmt. Darüber hinaus ist durch das Ansammeln des Al_2O_3 in der anschließenden Zone die Möglichkeit gegeben, daß bei fortschreitendem Verschleiß diese Zone zum Ausschmelzen kommt und damit zusätzlich und in vielen Fällen entscheidend zum Verschleiß beiträgt. Es ist allerdings zu bedenken, daß mehrere Faktoren diesen Vorgang beeinflussen, wodurch auch die große Streuung der Einzelwerte eine Erklärung findet. So kommt es bei sehr heißgehenden Öfen, wie oben ausgeführt, nur zu einer geringfügigen Wanderung und daher auch nur zu einer geringfügigen Anreicherung des Al_2O_3 -Gehaltes in der zweiten Zone. In diesen Fällen muß die Feuerfestigkeit, d. h. der Al_2O_3 -Gehalt als solcher, für die Haltbarkeit entscheidend sein. Bei sehr kaltgehenden Öfen und selbstverständlich bei nicht zu hohem Gehalt an Al_2O_3 sammelt sich dieses fast

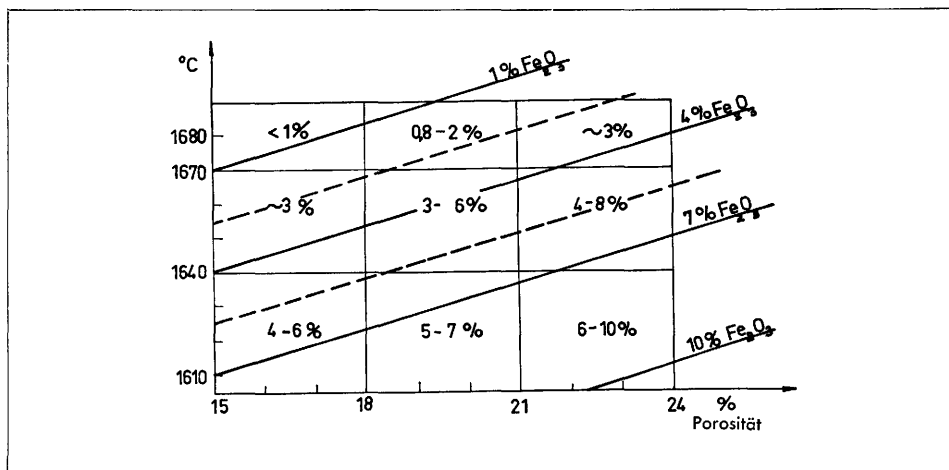


Bild 47: Maximaler Gehalt an Fe_2O_3 : Porosität : Ofeninnentemperatur

nach Ofenatmosphäre und Ofentemperatur sowie anscheinend auch in Abhängigkeit von der Kalkstaubkonzentration eine verschiedene Farbe von Hellgelb bis fast Schwarz (s. Farbfotos auf S. 77); in einigen Fällen konnte beobachtet werden, daß der Hauptteil des Gewölbesteins mit brauner Glasur versehen war, daß sich die Farbe aber an den kalten Teilen vertiefte, in Übereinstimmung mit den verschiedenen Einzelanalysen für das Eisenoxyd der gebrauchten Steine.

In dieser Vorstellung des Verschleißvorgangs durch Eisenoxyd und Kalk bei hohen Temperaturen spielt die Tonerde keine Rolle. Da die statistischen Untersuchungen der verschiedenen Zonen zeigen, daß sich die Unterschiede im Tonerdegehalt nicht in der heißesten Zone, sondern in der zweiten Zone ausdrücken, wurde auch der Kegelfallpunkt an gepulverter Substanz dieser Zone untersucht und bestätigend gefunden, daß er um 1 bis $1\frac{1}{2}$ Kegelergebnisse niedriger liegt als die heißeste Zone und etwa 2 Kegelergebnisse niedriger als die kalte Zone.

vollständig an der kalten Seite an, und es ist nur eine geringfügige Anreicherung in der gefährdeten zweiten Zone zu beobachten. Außer diesen beiden extremen Vorgängen müssen das Temperaturgefälle im Stein und der Ofenzyklus eine Rolle spielen, da die Temperaturwelle in den Stein um so tiefer eindringt, je länger die Chargendauer ist, d. h. es wird bei großen Öfen die kritische Temperatur des Ausfließens der zweiten Schicht länger einwirken und damit einen höheren Verschleiß als bei Steinen in kleineren Öfen hervorrufen.

Einflußgrößen auf die Steinhaltbarkeit

Da für die Beurteilung und die Weiterentwicklung des Silikasteins die Prüfdaten im Anlieferungszustand herangezogen werden müssen, ist im folgenden der Versuch gemacht worden, die charakteristischen Einflußgrößen der einzelnen Zonen mit den ursprünglichen Daten des Steins in Korrelation zu setzen.

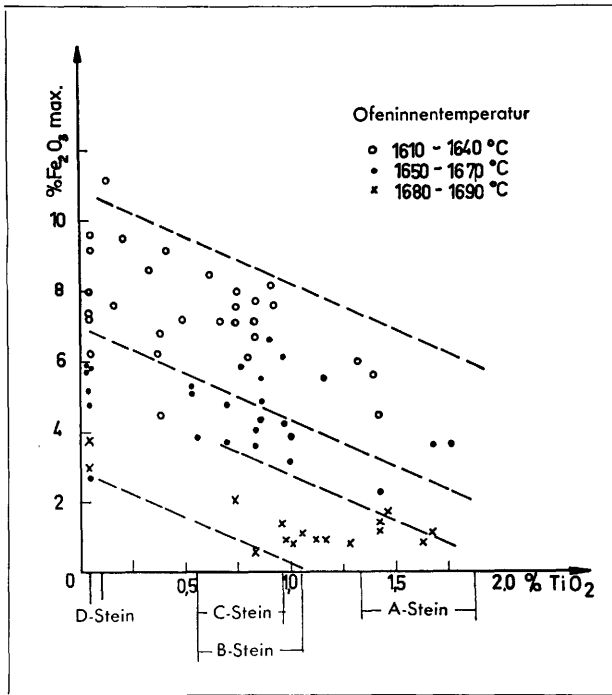


Bild 48: Maximale Fe_2O_3 -Gehalte in Abhängigkeit vom TiO_2 -Gehalt

1. Einfluß der Porosität

Um den Einfluß der Porosität zu erfassen, wurde der maximale Fe_2O_3 -Gehalt (welcher sich nicht immer an der heißesten Stelle befindet) in Abhängigkeit von der ursprünglichen Porosität des Steins und von der Ofentemperatur aufgetragen (Bild 47). Dieses Schaubild bringt deutlich zum Ausdruck, daß bei gleicher Porosität der maximale Gehalt an Eisenoxyd mit sinkender Ofentemperatur zunimmt; andererseits steigt aber bei gleicher Ofentemperatur der maximale Gehalt an Eisenoxyd mit zunehmender Porosität an. Eine höhere Porosität bedingt daher eine stärkere Aufnahme an Eisenoxyd und somit ein rascheres Abschmelzen.

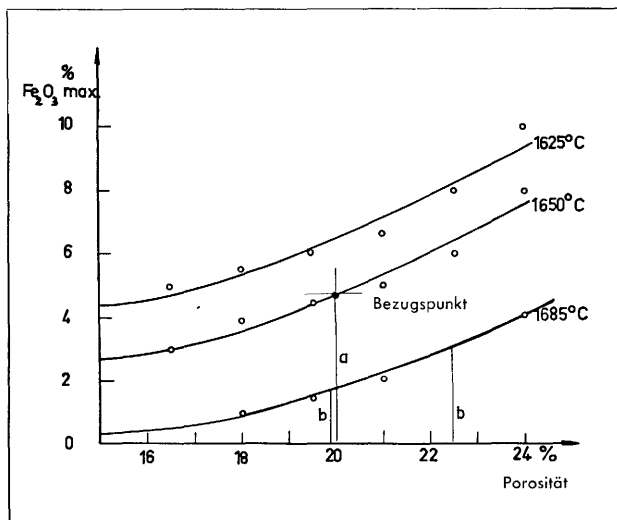


Bild 49: Ofentemperatur : Maximaler Fe_2O_3 -Gehalt : Porosität

2. Einfluß des TiO_2 -Gehaltes

Auch der TiO_2 -Gehalt beeinflusst den maximalen Fe_2O_3 -Gehalt (Bild 48). In Abhängigkeit von der Ofenführung wird der Fe_2O_3 -Gehalt durch TiO_2 herabgesetzt. Dieses Bremsen des Eindringens von Eisenoxyd wurde schon früher beobachtet⁽¹⁾ und ist wahrscheinlich auf eine Veränderung der Oberflächenspannung des Cristobalits, welcher etwas TiO_2 in feste Lösung nehmen kann, zurückzuführen.

3. Einfluß des Umwandlungsgrades

Sehr schwierig ist die Frage zu klären, ob eine unvollständige Umwandlung des Silikasteins zur Verbesserung seiner Haltbarkeit führen kann. Die früheren Versuche bei den deutschen Stahlwerken sprachen dafür, daß die mittlere Umwandlung keinesfalls schädlich, vielleicht sogar vorteilhaft ist, weil durch die Volumenvermehrung beim Anheizen ein Teil der Umwandlung von den Poren aufgenommen wird. Um die Vielzahl der verschiedenen Öfen und Ofenbedingungen miteinander vergleichen zu können, wurde das Bild 47 umgestellt und die Abhängigkeit des maximalen Fe_2O_3 -Gehaltes von der Porosität für heiße, mittlere und kalte Öfen aufgetragen (Bild 49). Um den Einfluß der Ofentemperatur und der Steinporosität zu eliminieren, wurden alle Werte über einen Bezugspunkt (20% Porosität, 4,5% Fe_2O_3 -Gehalt) auf einen relativen Fe_2O_3 -Gehalt umgerechnet, so z. B. der maximale Fe_2O_3 -Gehalt (2%) eines Steins mit 20% Porosität in einem heißgehenden Ofen im Verhältnis $4,5 : 1,6 = 2,81$, so daß man $2\% \cdot 2,81 = 5,62\%$ relativen Fe_2O_3 -Gehalt erhält. Die berechneten Werte müßten gleich sein, wenn außer der Ofentemperatur und der Steinporosität kein weiterer Einfluß vorhanden wäre. In Bild 50 sind die berechneten Werte in Abhängigkeit vom ursprünglichen spezifischen Gewicht eingetragen und einer angenommenen Geraden gegenübergestellt, welche die Zunahme des zu erwartenden Eisenoxydgehaltes durch die Vermehrung der Porosität beim Nachwachsen des Steins wiedergibt. Die

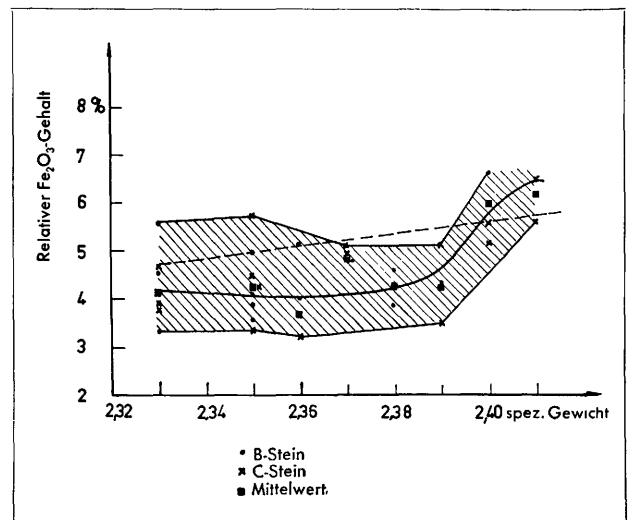


Bild 50: Umrechnung des maximalen Fe_2O_3 -Gehaltes auf 1650°C und 20% Porosität

⁽¹⁾ Konopicky, K.: Stahl und Eisen, 74 (1954), S. 1402—1413.

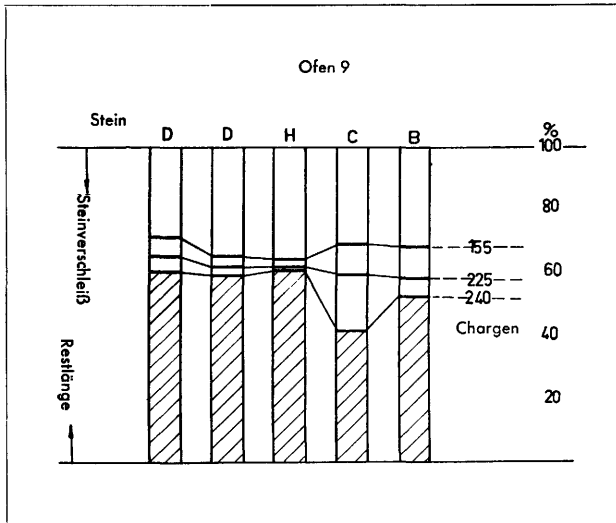


Bild 58

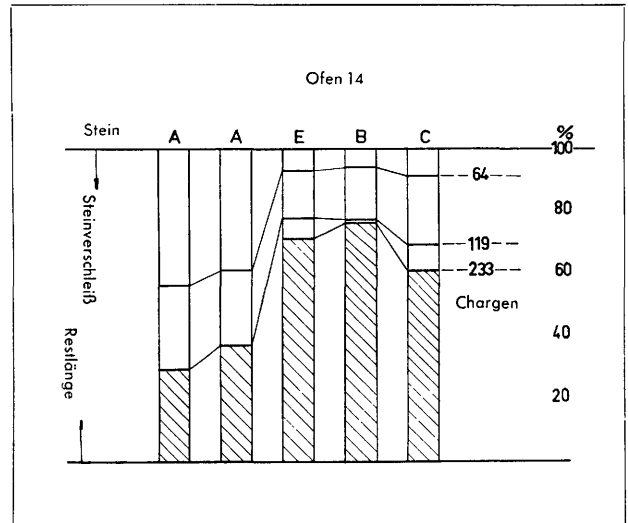


Bild 60

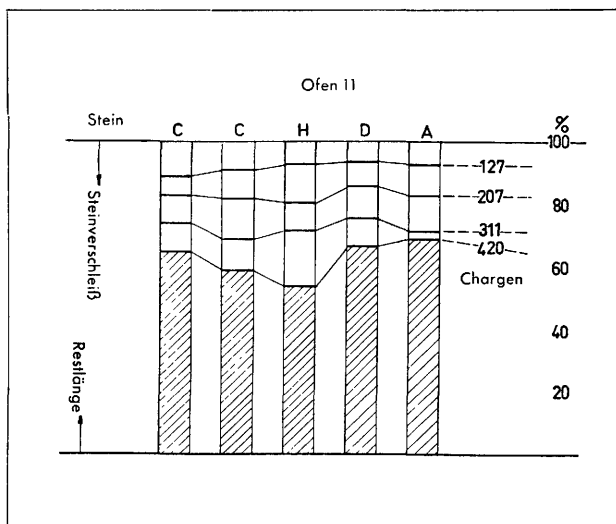


Bild 59

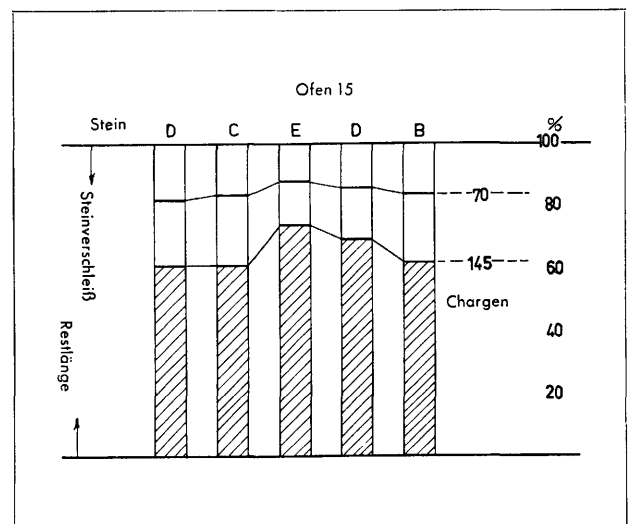


Bild 61

nach der Gewölbeinnentemperatur war naheliegend, doch war über eine grobe Einteilung hinaus eine genaue Gruppierung nicht möglich. Deshalb wurden die Öfen nach dem maximalen Fe_2O_3 -Gehalt der gebrauchten Steine geordnet, da dieser nach den obigen Ausführungen kennzeichnend für die Beanspruchung im Ofen ist.

In der folgenden Tafel XXXII ist die relative Haltbarkeit der Steine (gemittelt) aufgetragen, in der Reihenfolge milderer Ofenbedingungen. Man sieht, daß schwachgehende Öfen keine Differenzierung der verschiedenen Steinqualitäten ergeben; scharfgehende Öfen hingegen differenzieren die Steinqualitäten deutlich. Bei diesen Öfen sind der Tonergehalt und die Porosität entscheidend. So zeigen Steine mit einem Al_2O_3 -Gehalt von 0,6% und mehr eine auffallend schlechte Haltbarkeit; demgegenüber ist bei Steinen guter Haltbarkeit (Tonergehalt unter 0,6%) ein relativ höherer Al_2O_3 -Gehalt durch eine relativ niedrigere Porosität wahrscheinlich auszugleichen (Bild 63).

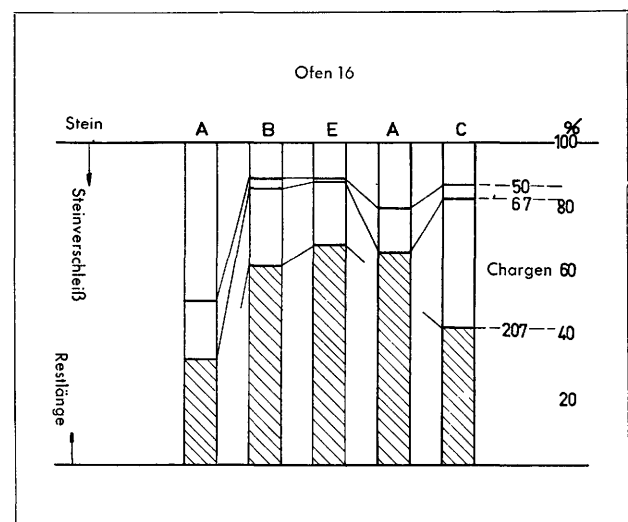


Bild 62

Bilder 58 bis 62: Verschleißbild der Versuchssteine in den Öfen Nr. 9, 11, 14, 15 und 16

TAFEL XXXII
Relativer Vergleich der Steinhaltbarkeit

Ofen Nr.	Maximaler Fe_2O_3 -Gehalt der Steine in %	Vergleich der Haltbarkeit
4	1	$B > C \gg A$
1	1 bis 3	$D = B \gg A$
16	1 bis 5	$B > C \gg A$
14	3 bis 5	$B > C \gg A$
8	3 bis 5	$B = C \gg A$
2	4	$D = C > A$
3	5	$B > D > C$
9	5 bis 7	$D = B > C$
7	5 bis 7	$D = C = B$
15	6	$D = C > B$
11	6 bis 10	$D = C = A$

Eine zusätzliche Auswertung erhält man bei einem Vergleich der „Hausmarkesteine“ in der Abstichzone. An dieser Stelle ist allgemein die Beanspruchung am höchsten. Trotzdem verhielt sich der

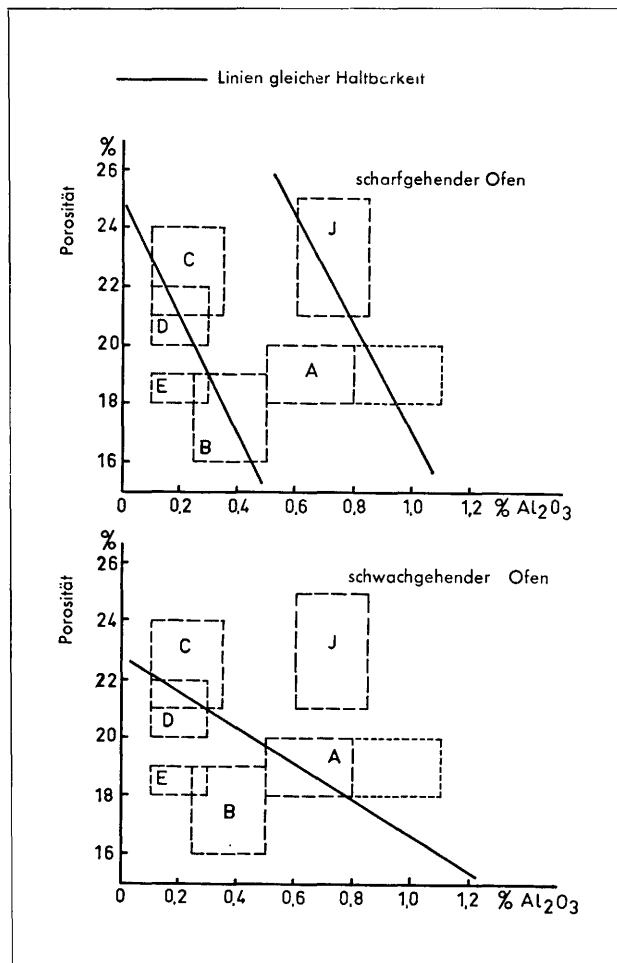


Bild 63: Haltbarkeitsvergleich der Versuchssteine

E-Stein bei den drei Öfen 14, 15 und 16 am besten. Andererseits konnte der Hausmarkestein J im Ofen 1 zwischen A- und B-Stein eingestuft werden.

In Bild 63 sind die Felder der verschiedenen Steinqualitäten für Tonerde und Porosität eingetragen. Bei scharfgehenden Öfen wird das ungefähr gleiche Verhalten der B-, C- und D-Steine durch eine verbindende Gerade gekennzeichnet, welche weitgehend dem im Mittelteil erwähnten Qualitätsindex entspricht. Bei kaltgehenden Öfen hingegen liegt die verbindende Gerade viel flacher, d. h. der schädliche Einfluß der Tonerde wird in diesem Fall stärker durch die Porosität ausgeglichen. Damit ist auch eine Erklärung gegeben für die in der Literatur (insbesondere der jüngeren Zeit) gebrachten unterschiedlichen Auffassungen über die Zusammenhänge zwischen Al_2O_3 -Gehalt und Porosität.

Nach diesen Diagrammen scheint ein TiO_2 -Gehalt über etwa 1% ähnlich ungünstig wie Al_2O_3 zu wirken, was sich wieder bei heißgehenden Öfen stärker auswirkt.

Bei den heißgehenden Öfen konnte öfter beobachtet werden, daß anfänglich der B-Stein einen größeren, gegen Ende der Ofenreise aber einen kleineren Verschleiß hatte als der C-Stein. Da die meisten heißgehenden Öfen gekühlt wurden (teils von Anfang an, teils nach Auftreten von roten Stellen), kann diese Erscheinung auf die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit zurückgeführt werden, welche das Ausmaß der Kühlwirkung an der heißen Innenseite beeinflusst. Versuche, welche die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Zonen der Steine während der Ofenreise zum Ziel hatten, führten zu den folgenden Werten:

TAFEL XXXIII
Wärmeleitfähigkeit der Zonen gebrauchter Silikasteine

Steintype	Wärmeleitfähigkeit (kcal/mh° C)		
	unveränderte Zone	schwarze und braune Tridymitzone	graue Cristobalitzone
B-Stein	1,6	3,0	1,7
C-Stein	1,35	3,25	nach weiterem Anstieg Abfall auf 1,7

Es zeigt sich bei den Überlegungen ein sekundärer Einfluß der Porosität: Bis 1200° haben dichtere Steine im allgemeinen eine bessere Wärmeleitfähigkeit, während sie darüber die Temperatur mehr dämmen als porösere Steine. Man wird daher bei beabsichtigter Kühlung unter sonst gleichen Voraussetzungen den Steinen mit niedrigerer Porosität den Vorzug geben.

Schlußfolgerungen

Es wurden Silikasteine für Gewölbe von SM-Öfen von unterschiedlicher Zusammensetzung (Mittelwerte für das spezifische Gewicht von 2,32 bis 2,39 g/cm³, für Al₂O₃ von 0,17 bis 0,57%, für TiO₂ von 0,03 bis 1,41%, für die Porosität von 16,5 bis 22,7%) in 13 verschiedenen SM-Öfen geprüft. Obwohl es sich um Silikasteine handelte, welche regelmäßig und z. T. in sehr erheblichen Mengen für diesen Zweck verwendet werden, zeigten sich Unterschiede in der relativen Haltbarkeit. Diese Unterschiede waren um so stärker, je heißgehender der Ofen war, während sie bei Öfen mit niedriger Gewölbe-Innentemperatur praktisch verschwanden.

Die Herdflächenleistung und die maximale Gewölbetemperatur gingen nicht parallel. Die Stelle der Maximaltemperatur im Gewölbe verschob sich manchmal im Verlauf der Ofenreise; trotzdem sind die Ergebnisse, die man erzielt hat, durchaus kennzeichnend. Örtliche Wirbelbildungen in der Flamme führen zu örtlichen stärkeren Zerstörungen.

I a) Die verwendeten Steintypen konnten ohne Schwierigkeiten sowohl mit als auch ohne Mörtel vermauert werden. Bei fehlender Mörtelfuge waren die Abstrahlverluste größer. Eine leicht abgeschrägte Kante (die oft zum leichteren Erkennen der Keiligkeit angebracht wird) erleichterte die Zustellungsarbeit.

Trotz des unterschiedlichen spezifischen Gewichtes bzw. der unterschiedlichen Nachdehnung ergaben sich keine Schwierigkeiten auch bei nebeneinanderliegenden Streifen. Praktisch hat man bezüglich der Nachdehnung keine größeren Unterschiede gefunden. Es scheint aber eine Dehnfuge von 0,75% bei gut umgewandelten Steinen und von 1,1% bei mittelmäßig umgewandelten Steinen notwendig zu sein.

I b) Silikasteine mit einem spezifischen Gewicht bis zu 2,40 sind, soweit es sich um die Verwendung von kontinental-europäischen Rohstoffen handelt, in ihrer Haltbarkeit keinesfalls schlechter als Steine vollständiger Umwandlung (spezifisches Gewicht 2,33), in den meisten Fällen sogar erkennbar besser als diese.

II a) Die Kühlung durch Gebläse greift sehr energisch in die Temperaturverteilung innerhalb des Gewölbemauerwerks und damit auch in Verschleiß und Haltbarkeit ein.

Eine höhere Wärmeleitfähigkeit ist im Interesse eines größeren Temperaturgradienten innerhalb des Gewölbemauerwerks bei vorgesehener Kühlung des Gewölbes wünschenswert. Im allgemeinen haben Steine mit niedriger Porosität eine höhere Wärmeleitfähigkeit, welche sich bei Kühlung insbesondere in der zweiten Hälfte der Ofenreise günstig bemerkbar macht.

II b) Eine niedrige Porosität ist erwünscht, doch tritt der Einfluß der Porosität bei sehr scharfgehenden Öfen im Vergleich zu den übrigen kennzeichnenden Daten der Silikasteine zurück. Es ist anzustreben, daß eine Porosität von unter 20% erreicht wird, was trotz entsprechender Körnungsauswahl für eine Reihe von Rohstoffen, insbesondere die flußmittelarmen, nicht leicht ist.

III a) Ein niedriger Al_2O_3 -Gehalt ist erwünscht. Er soll für hochbeanspruchte Öfen unter 0,5 %, möglichst aber unter 0,3 % liegen. Bei geringerer Beanspruchung verwischen sich die Unterschiede bei einem Al_2O_3 -Gehalt bis zu etwa 0,7 %; es kann jedoch auf jeden Fall eine niedrige Porosität den schädlichen Einfluß eines höheren Al_2O_3 -Gehaltes wettmachen. Der Al_2O_3 -Gehalt darf nicht im Feinanteil angereichert vorliegen. Es wird damit auch erklärt, warum die in der Zwischenzeit aufgestellten Güteformeln, welche den Al_2O_3 -Gehalt durch die Porosität verbinden, unterschiedliche Verhältniszahlen haben. Bei einer eingehenden Berücksichtigung aller Faktoren ist in solchen Güteformeln (Qualitätsindex) auch der positive Einfluß einer nicht vollständigen Umwandlung (Differenz zwischen dem gefundenen spezifischen Gewicht und dem Wert von 2,32) einzusetzen.

III b) Ein TiO_2 -Gehalt bis zu etwa 1 % (Verteilung auch im Korn) ist vorteilhaft. Höhere TiO_2 -Gehalte sind nachteilig.

IV a) Bei hochwertigen Steinen kennzeichnet die Druckfeuerbeständigkeit allein nicht mehr die Qualität. Das gleiche gilt für Feuerfestigkeit oder Tropfpunkt an ungebrauchten Steinen.

IV b) Der während des Betriebes feststellbare Tropfpunkt ist ein Qualitätshinweis, entspricht aber nicht dem Tropfpunkt am ungebrauchten Stein. Geringe Unterschiede in der Temperatur des Tropfpunktes (10—30 °) ergeben erhebliche Unterschiede in der Haltbarkeit.

Anschriften der Autoren

- | | |
|-------------------------------------|--|
| K. THOMAS
A. RISTOW
U. PLÖGER | Verein Deutscher Eisenhüttenleute,
Düsseldorf, Breite Straße 27 |
| K. KONOPICKY | Forschungsinstitut der Feuerfest-Industrie,
Bonn, Helmholtzstraße 27 |
| F. BASTENAIRE
M. BASTIEN | Institut de recherches de la sidérurgie,
185, rue Président-Roosevelt, St.-Germain-en-Laye
(Seine-et-Oise) |
| J. BARON | Laboratoire de contrôle des produits réfractaires,
15, place Carnot, Nancy (Meurthe-et-Moselle) |
| D. SANNA | Station d'essais de l'Institut de recherche de la sidérurgie,
Maizières-lez-Metz (Moselle) |

HERAUSGEGEBEN VON DER ABTEILUNG VERÖFFENTLICHUNGEN
DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN

2057/1/58/1