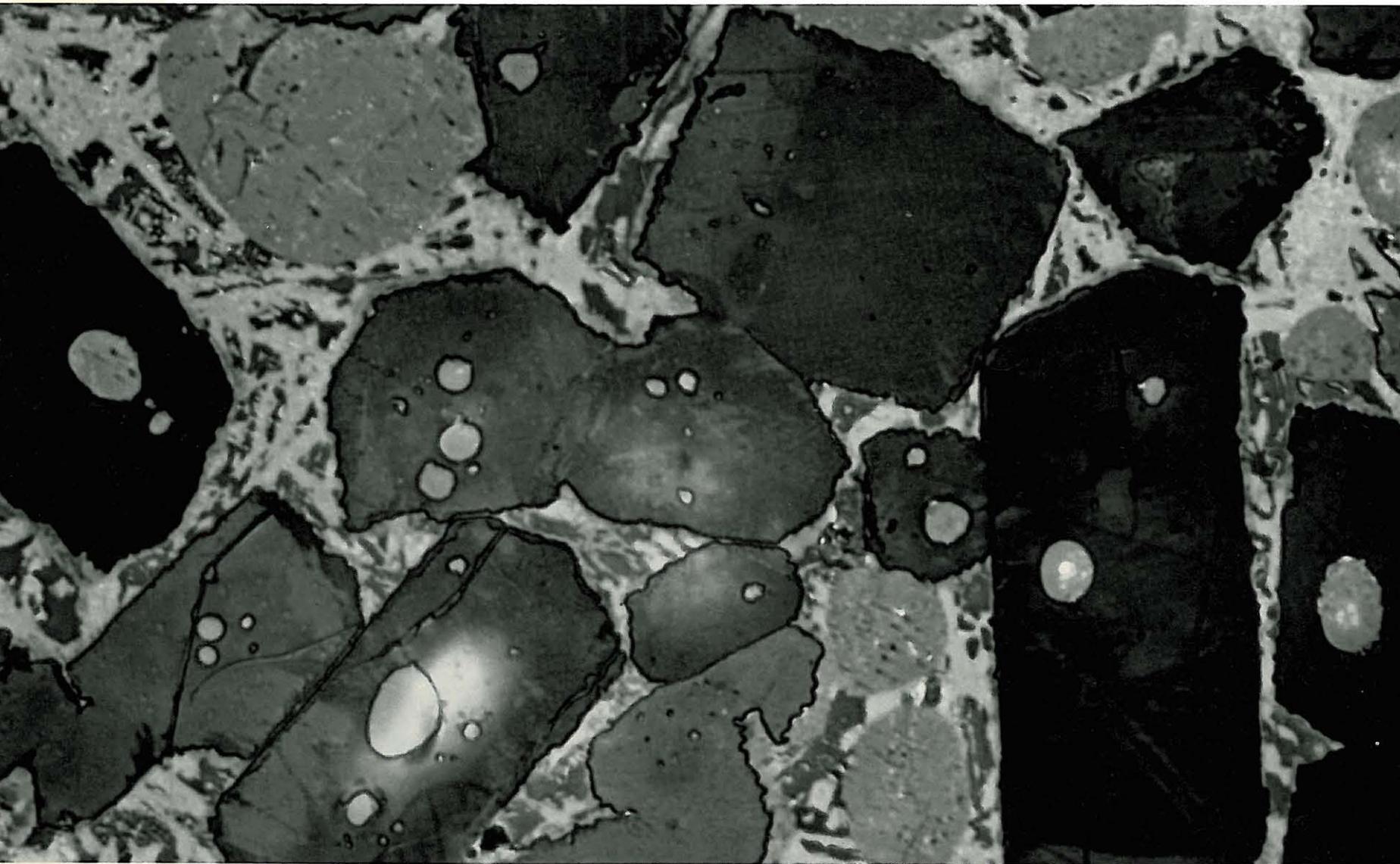


# Mikroskopie des Zementklinkers

## Bilderatlas



Dok-Nr. 64377

# **Mikroskopie des Zementklinkers Bilderatlas**



---

# Mikroskopie des Zementklinkers

## Bilderatlas

---

Herausgegeben vom  
Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Bearbeitet vom Arbeitskreis Mikroskopie im VDZ

Fritz Gille  
Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf

Ingo Dreizler  
Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf

Karl Grade  
Forschungsinstitut für Hochofenschlacke, Rheinhausen/Ndrh.

Hubertus Krämer  
Dyckerhoff Zementwerke AG, Wiesbaden-Amöneburg

Eduard Woermann  
Portland-Zementwerke Heidelberg AG, Leimen/Heidelberg

Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf



Copyright 1965 by Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf  
Druck: Dr. Friedrich Middelhaue GmbH, Opladen  
Klischees: Loose Durach, Remscheid

## Vorwort

Schon in der Mitte des 17. Jahrhunderts wurde mit der Entdeckung der Lichtbrechung und der Doppelbrechung der Kristalle die theoretische Grundlage für die mikroskopische Mineralogie und Petrographie geschaffen. Aber erst in der Mitte des 19. Jahrhunderts lernte man, Dünnschliffe herzustellen und loses Gesteinspulver als Streupräparat im durchfallenden Licht unter dem Mikroskop zu untersuchen. Das Mikroskopieren von polierten Erz- und Metallanschliffen im auffallenden Licht begann erst um die Jahrhundertwende. Die ersten Anfänge gehen auf Beobachtungen von H. C. Sorby um das Jahr 1865 zurück, wurden aber erst durch die Untersuchungen von A. Martens 1875 bekannt.

Diese Entwicklung spiegelt sich in der Klinker- und Zementmikroskopie wider. Als erster erkannte im Jahre 1882 H. Le Chatelier im Dünnschliff unter dem Polarisationsmikroskop das Tricalciumsilicat, A. E. Törnebohm gab im Jahre 1897 den vier Hauptbestandteilen des Klinkers die Namen Alit, Belit, Celit und Felit.

Mit der Untersuchung polierter Klinkeranschliffe im Auflicht begann E. Stern im Jahre 1908; durch Ätzen konnte er die einzelnen Klinkerphasen erkennbar machen. Die gleichzeitige Untersuchung desselben Präparates im Durchlicht und Auflicht führten H. Insley und H. F. McMurdie zum ersten Male im Jahre 1938 durch. Aber erst im Jahre 1952 hat F. Gille ein verhältnismäßig einfaches Verfahren zur Herstellung von Andünnschliffen in die Klinkermikroskopie eingeführt.

Innerhalb des Arbeitsausschusses „Zementchemie“, des früheren Laborausschusses, hat sich im Jahre 1960 eine Gruppe von Mineralogen die Aufgabe gestellt, eine Vorschrift für mikroskopische Untersuchungen von Klinker auszuarbeiten. Dabei sind so viele anschauliche Bilder von Klinkerschliffen gesammelt worden, daß der Arbeitskreis den Gedanken lebhaft begrüßt und in die Tat umgesetzt hat, die wichtigsten Aufnahmen zu einem Bilderatlas zusammenzustellen.

Die Anregung ging von dem Vorsitzenden des Vereins Deutscher Zementwerke e.V.

Dr.-Ing. E. h. Dipl.-Ing. Erich Plassmann

aus, der die Verwirklichung seines Gedankens leider nicht mehr erlebt hat. Bearbeiter und Herausgeber gedenken seiner mit dankbarer Verehrung.

Der Bilderatlas will den Kollegen und Freunden auf den verschiedenen Gebieten der Wissenschaft und Technik einen Überblick über den Stand der Klinkermikroskopie geben und ihnen als Grundlage und Wegweiser für die eigene Arbeit dienen.

VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E. V.

# Inhaltsverzeichnis

1. Wesen der Klinkermikroskopie .....	9	7. Fehlermöglichkeiten .....	50
1. Aufgabe .....	9	1. Poren .....	50
2. Anwendung bei der Zementherstellung .....	9	2. Innenreflexe .....	50
2. Vorbereitung der Proben .....	9	3. Newtonsche Ringe (Interferenzstreifen) .....	50
1. Untersuchungsverfahren .....	9	4. Schleifkratzer .....	50
2. Probenahme .....	11	5. Klinkerabrieb .....	51
3. Herstellung mikroskopischer Präparate .....	12	6. Schleifmittelkörner .....	51
1. Anschliffe .....	12	7. Bleiabrieb .....	51
1. Allgemeine Hinweise .....	12	4. Klinkergefüge .....	51
2. Einbettungsmittel .....	12	1. Überblick .....	51
3. Schleifen und Polieren .....	13	2. Makroskopische Merkmale .....	51
2. Dünnschliffe .....	13	3. Mikroskopische Merkmale .....	52
3. Pulverpräparate .....	13	1. Porosität .....	52
4. Ätzen .....	14	2. Homogenität .....	54
1. Allgemeine Hinweise .....	14	1. Schwankungen in der Zusammensetzung .....	55
2. Verfahren .....	14	2. Fleckige Verteilung .....	55
Übersicht über die Ätzverfahren .....	15	3. Nester .....	57
3. Klinkerphasen .....	19	4. Schlieren .....	59
1. Überblick .....	19	5. Schwankungen der Kristallgröße .....	60
2. Alit .....	19	6. Differentiation der Schmelze .....	60
3. Belit .....	29	7. Reaktionssäume an Poren .....	61
4. Grundmasse .....	36	3. Gefüge der Grundmasse .....	62
1. Glas .....	37	5. Quantitative Bestimmungen .....	65
2. Aluminat .....	37	1. Längenmessung .....	65
3. Alkalialuminat .....	39	2. Flächenmessung .....	65
4. Ferrit .....	40	3. Korngrößenbestimmung .....	65
5. Weitere Bestandteile .....	41	4. Quantitative Phasenbestimmung .....	65
5. Nebengemengteile .....	42	6. Bestimmung des Klinker- und Hüttensandgehaltes ....	66
1. Freikalk .....	42	1. Allgemeine Hinweise .....	66
2. Periklas .....	42	2. Mikroskopische Kennzeichen .....	67
6. Übergemengteile .....	43	1. Klinker .....	67
1. Alkaliphasen .....	44	2. Hüttensand .....	67
2. Phasen in reduzierend gebranntem Klinker .....	45	7. Mineralogische Fachausdrücke .....	69
1. Wüstit .....	45	Literatur .....	71
2. Metallisches Eisen .....	46	Stichwortverzeichnis .....	72
3. Calciumsulfid .....	46		
4. Eisensulfid .....	47		
5. Koks und Graphit .....	47		
3. CaO-arme Phasen .....	48		
4. Phasen ungeklärter Zusammensetzung .....	48		

# 1. Wesen der Klinkermikroskopie

## 1.1 Aufgabe

Mikroskopische Untersuchungen sind in der Zementforschung seit langem unentbehrlich. Sie dienen in zunehmendem Maße auch zur Betriebsüberwachung von Zementwerken und liefern neben der üblichen chemischen und mechanisch-technischen Überwachung in vielen Fällen wichtige Hinweise auf die Ursache von Störungen, wie sie bei der Herstellung von Klinker und bei der Verarbeitung von Zement eintreten.

Der Atlas gibt einen Überblick über die Mikroskopie des Portlandzementklinkers, die des erhärtenden und erhärteten Zements wird nicht behandelt.

Er ist in erster Linie für Mineralogen und Chemiker und deren Mitarbeiter bestimmt. Er geht von der speziellen Technik der Klinkermikroskopie aus und zeigt dann 151 Bilder, die kurz beschrieben und gedeutet werden.

Dem mit den Grundlagen der Kristallographie und den mikroskopischen Arbeitsverfahren weniger vertrauten Leser gibt die Übersicht auf Seite 69 die Erklärungen einiger wichtiger Fachausdrücke sowie einen Hinweis auf die Lehrbücher, die für ein eingehendes Studium empfohlen werden können.

Alle Mikrophotographien besitzen ein einheitliches Format von 70×99 mm. Um im Text erwähnte Stellen des Bildes genau bezeichnen zu können, sind in der Beschreibung jeweils zwei Zahlen in Klammern angegeben, die, als Abschnitte eines rechtwinkligen Koordinatensystems, die Entfernung von der linken unteren Bildecke in mm angeben. Unter jedem Bild ist links die Vergrößerung, rechts das Ätzmittel angegeben, mit dem der Schliff geätzt wurde.

## 1.2 Anwendung bei der Zementherstellung

Die mikroskopische Untersuchung des Zementklinkers liefert Angaben über Art, Ausbildung und Verteilung der Klinkerphasen. Durch Ausmessen oder Auszählen kann außerdem der Anteil der einzelnen Phasen quantitativ bestimmt werden.

Während der Phasenbestand in erster Linie von der chemischen Zusammensetzung des Rohgutes abhängt, gibt das Gefüge des Klinkers, d. h. die Ausbildung und Verteilung der Klinkerphasen und ihre Verwachsung, einen Einblick in die Besonderheiten des Herstellungsverfahrens. So sind z. B. Anreicherungen von Freikalk (Bild 121), Periklas (Bild 122) oder Belit in Nestern (Bild 123) Hinweise auf grobe Kalkstein-, Dolomit- oder Quarzkörner und dementsprechend meistens auf eine ungenügende Feinmahlung der Rohstoffe zurückzuführen. Freikalknester in

der Nähe von Belitanreicherungen (Bild 117) sowie viele kleine Poren deuten auf zu geringen Brenngrad hin, während reduzierendes Brennen am Alitzerfall (Bild 39 bis 41) und zerrieselnden Belit (Bild 64, 65), in besonders krassen Fällen auch am Auftreten von typischen Reduktionsphasen (Abschnitt 3.6.2), erkannt werden kann. Belitschlieren, meist auf der Oberfläche der Granalien, können auf eine Anreicherung von saurer Kohlenasche hinweisen (Bild 131). Der Zustand der Grundmasse (Abschnitt 4.3.3) sowie die Ausbildung des Belits erlauben Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit der Kühlung und infolgedessen auf die Wirksamkeit des Kühlers.

Nicht nur bei der Klinkeruntersuchung, sondern auch bei der Zementprüfung läßt sich das Mikroskop verwenden. Häufig ist es nur auf mikroskopischem Wege möglich, den Zusatz an hydraulischen Stoffen, wie z. B. Hüttensand (Kapitel 6) oder Trass, zu bestimmen. Auch die Art des Klinkers läßt sich noch am Zement beurteilen, wenn man eine ausreichend grobkörnige Siebfraction in Kunststoff einbettet und dann entsprechend präpariert.

Der Gang der mikroskopischen Untersuchung ist jeweils der besonderen Problemstellung anzupassen. Für die Betriebsüberwachung wird es in den meisten Fällen ausreichen, Anschnitte von Durchschnittsproben zu untersuchen. Das Präparieren und Ätzen sowie das Deuten des mikroskopischen Befundes erfordern einige Erfahrungen, die man nur durch häufiges Mikroskopieren erlangen kann.

# 2. Vorbereitung der Proben

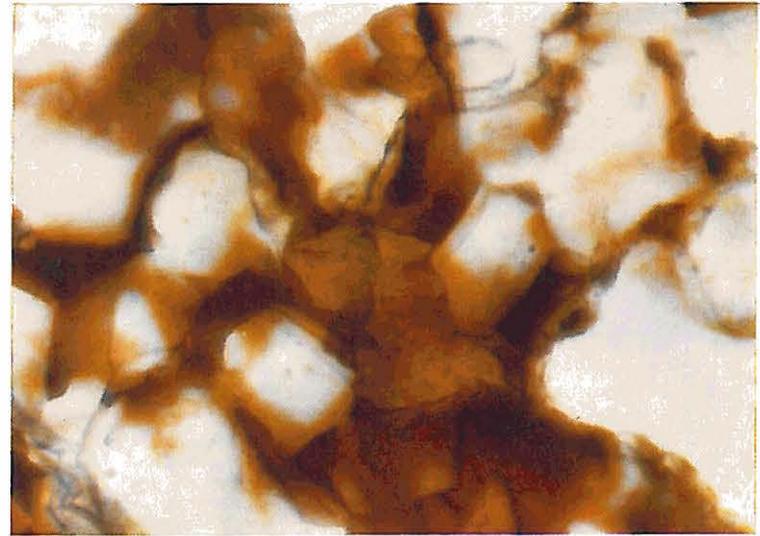
## 2.1 Untersuchungsverfahren

Die Untersuchung eines Zementklinkers geschieht fast ausschließlich an *polierten* und *geätzten* *Anschnitten* im senkrecht auffallenden Licht (Auflicht). Man unterscheidet die einzelnen Klinkerphasen im wesentlichen an der Stärke der Reflexion, an der Härte und an den unterschiedlichen Ätzeigenschaften. In einigen Fällen können auch Reflexionsfarbe und Reflexionspleochroismus (Bireflexion) zur Bestimmung herangezogen werden.

Lichtbrechung, Doppelbrechung, Charakter der Doppelbrechung, Pleochroismus, Achsenwinkel und Farbe müssen an *Dünnschliffen* bzw. *Pulverpräparaten* im durchfallenden, polarisierten Licht (Durchlicht) bestimmt werden. Diese Untersuchungen werden allerdings häufig durch die geringe Korngröße der

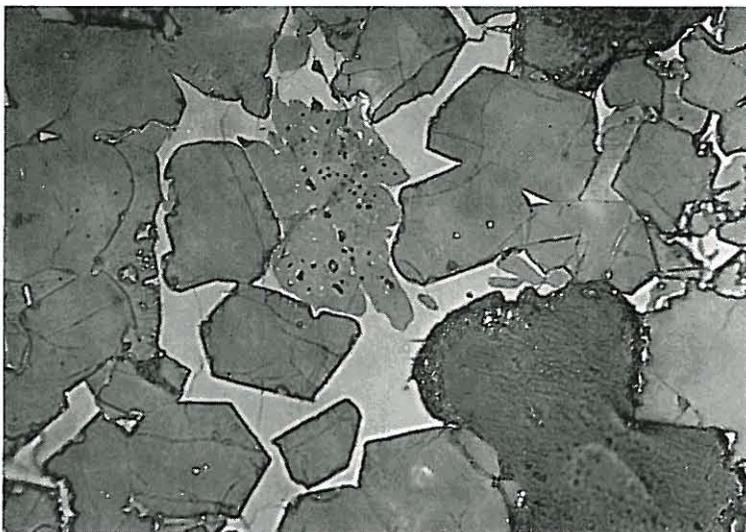
Klinkerphasen gestört. Es kommt dabei fast immer zur Überdeckung mehrerer Phasen, so daß die Proben sehr dünn geschliffen werden müssen, was viel Erfahrung und Geschick verlangt. In dünnen Schnitten ist die geringe Doppelbrechung des Alits nur noch schlecht erkennbar, und die Untersuchung schwach doppelbrechender Kristallarten im konvergenten Licht auf Charakter der Doppelbrechung und Achsenwinkel wird sehr erschwert oder sogar unmöglich.

*Andünnschliffe* können sowohl im Durchlicht als auch im Auflicht untersucht werden. Die Bilder 1 bis 6 zeigen Aufnahmen von Andünnschliffen, bei denen die gleiche Stelle im Auflicht und anschließend im Durchlicht fotografiert wurde.



620×

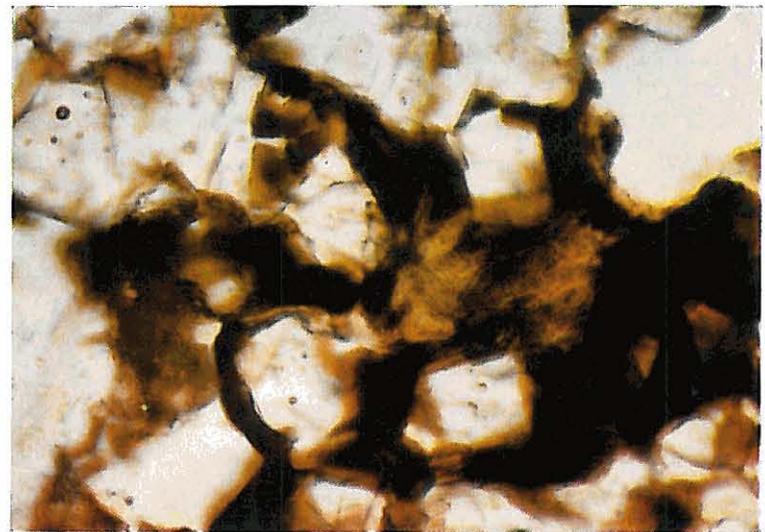
Bild 2 (Durchlicht)  
Gleiche Stelle wie Bild 1. Im Durchlicht erkennt man die braune Eigenfarbe der Ferritphase.  
Alit (65/35), Belit (50/30), Pore (90/20).



620×

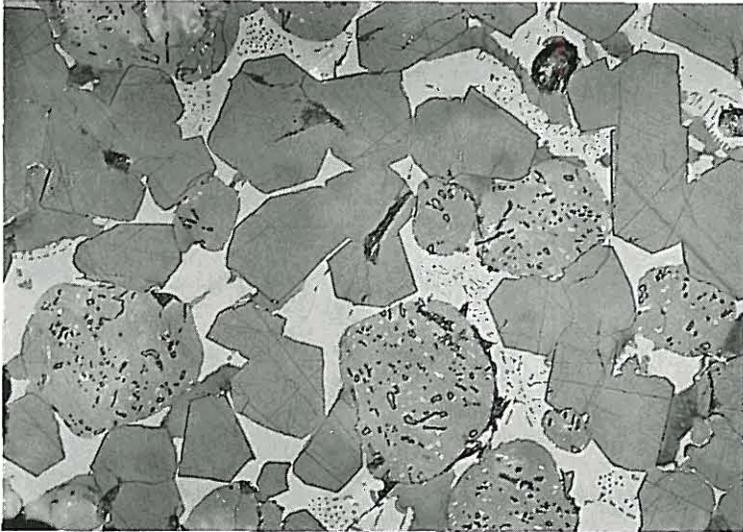
H<sub>2</sub>O und DAC

Bild 1 (Auflicht)  
Aluminatfreie Stelle eines im Laborofen gebrannten Klinkers mit 5% MgO.  
Alit (70/50), Belit (40/40), Pore (80/20).



620×

Bild 3 (Durchlicht)  
Gleiche Stelle wie Bild 1. Der Andünnschliff wurde gegenüber Bild 2 um 90° gedreht. Zu beachten ist hier die starke Farbänderung der Ferritphase nach Braunschwarz (Pleochroismus).  
Alit (50/60), Belit (60/35), Pore (80/60).

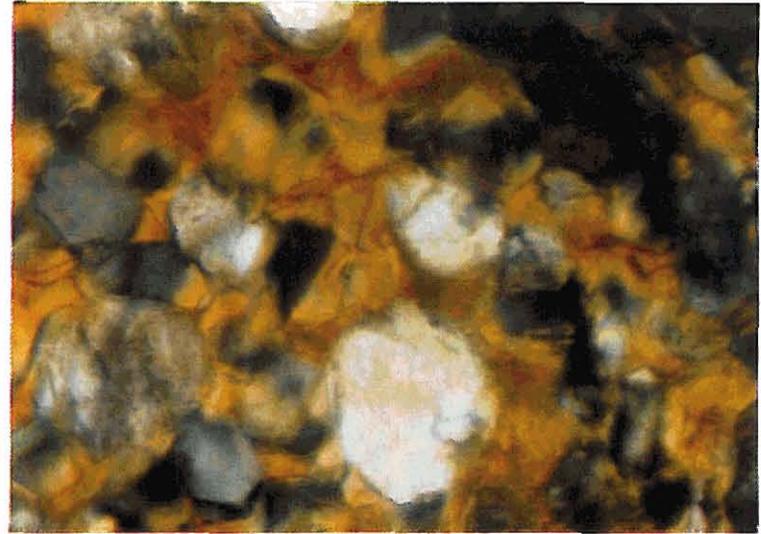


540×

H<sub>2</sub>O und DAC

Bild 4 (Auflicht)

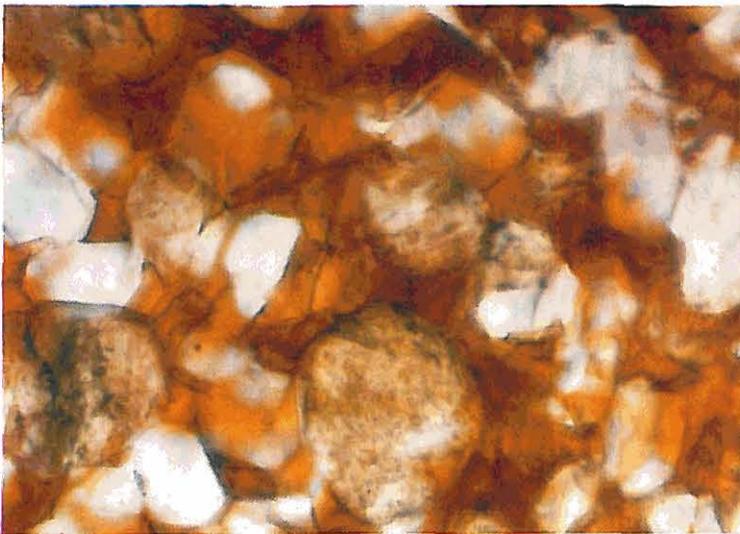
Aluminatarmer Stelle eines im Laborofen gebrannten Klinkers ohne MgO.  
Alit (35/20), Belit (55/20).



540×

Bild 6 (Durchlicht, + Nicols)

Gleiche Stelle wie Bild 4.  
Alit (35/20), Belit (50/20).



540×

Bild 5 (Durchlicht)

Gleiche Stelle wie Bild 4. Zu beachten ist hier die braune Eigenfarbe des Ferrits.  
Alit (35/20), Belit (50/20).

## 2.2 Probenahme

Die Probenahme geschieht im allgemeinen in der gleichen Weise, wie sie für eine chemische Analyse vorgeschrieben ist. Nur bei Sonderfragen wird sie der besonderen Aufgabe angepaßt.

Um Gesamtaussagen machen zu können, muß in Anlehnung an die DIN 53711 eine *Durchschnittsprobe* entnommen, besonders aufbereitet und zerteilt werden. Dazu wird der Klinker durch Siebung in einzelne Fraktionen zerlegt. Die Anteile kleiner als 4 mm können unmittelbar für die mikroskopische Untersuchung vorbereitet werden. Die Fraktionen größer als 4 mm werden auf 4 bis 5 mm große Körner zerkleinert. Dabei soll möglichst wenig Feinanteil kleiner als 4 mm entstehen.

Neben der Durchschnittsuntersuchung können als Sonderfragen betrachtet werden:

1. *Ermittlung der Unterschiede* zwischen einzelnen Klinkerfraktionen oder einzelnen Klinkern. Hierbei werden die Anteile aus der Produktion abgetrennt und ihr Klinkerbild beurteilt.
2. Die Untersuchung ganzer Granalien erlaubt Aussagen über Porosität und Homogenität, z. B. Schalenbau und Schlierenbildung. Sie ist für die Produktion nur dann aussagekräftig, wenn alle Granaliengrößen erfaßt und anteilmäßig ausgewertet werden.

## 2.3 Herstellung mikroskopischer Präparate

### 2.3.1 Anschliffe

#### 2.3.1.1 Allgemeine Hinweise

Zur Herstellung von Anschliffen müssen die Klinker durch Einbetten zu einem porenfreien, handlichen Präparat hergerichtet werden.

Für das Einbetten der Proben gibt es, je nach dem Einbettungsmittel, verschiedene Möglichkeiten, die auch der Art und Größe der Probe angepaßt werden müssen:

*Staubförmige Proben* erfordern eine besondere Vorbehandlung und müssen mit einem sehr dünnflüssigen Einbettungsmittel agglomeriert werden (z. B. Bakelitpulver in Alkohol gelöst, Fa. Bakelit AG, Letmathe, Westfalen, oder Palatal mit Styrolverdünnung). Man verrührt das Pulver in dem Einbettungsmittel und läßt es absitzen. Nach dem Erhärten wird die Probe in kleinere Stücke zerschlagen und nochmals eingebettet. Dadurch schließt man eine Entmischung nach der Korngröße aus, die durch Sedimentation beim Einbetten entstehen kann, und erhält ein Präparat, das alle Korngrößen entsprechend ihren Mengenanteilen erfaßt.

*Pulverartige, körnige Proben*, die größer als 30 µm sind, können direkt mit dem Einbettungsmittel innig vermischt werden. Die Mischung wird dann zur Weiterverarbeitung in eine Form gegeben und entsprechend dem Einbettungsmittel gehärtet.

*Stückige, körnige Proben* werden direkt in eine Form eingefüllt und mit Kunststoff übergossen. Größere Körner und ganze Klinker werden vorher mit einer groben Schmirgelscheibe auf einer Seite plangeschliffen, um bei der späteren Verarbeitung eine größere Fläche der Probe und mit Einbettungsmasse gefüllte Poren zu erhalten. Die weitere Behandlung richtet sich nach der Art der Einbettungsmittel.

*Lockere Proben* müssen vor der eigentlichen Verarbeitung durch ein geeignetes Einbettungsmittel verfestigt werden. Dazu dienen die gleichen Lösungen, die für die staubförmigen Proben angegeben wurden. Die Proben werden mit diesen Lösungen getränkt – wenn nötig im Vakuum – und müssen dann aushärten. Je nach dem Problem können sie dann zu körnigem Gut zerschlagen oder in orientierte Präparate zersägt werden.

*Große Proben* können in einer passenden Form direkt eingebettet, getränkt und verfestigt werden, so daß sie als Ganzes weiterverarbeitet werden können.

#### 2.3.1.2 Einbettungsmittel

*Schwefel*: Die Probe wird zur Reinigung erst in Alkohol, dann in Nylol gekocht, anschließend noch heiß und xylolfeucht in einem

Tiegel mit gemahlenem Schwefel umgeben und in einem evakuierbaren Gefäß auf 120 bis 130°C erwärmt. Sobald der Schwefel geschmolzen ist, wird so lange evakuiert, bis keine Luftblasen mehr aufsteigen. Dann wird wieder belüftet und die Probe auf Zimmertemperatur abgekühlt. Nach dem Erkalten wird sie aus dem Tiegel entfernt und möglichst unmittelbar durch Schleifen und Polieren weiter verarbeitet, da durch längeres Liegenlassen die Schwefelmasse spröde wird\*.

*Plexiglas* (M 330, gemahlen, Fa. Röhm u. Haas, Darmstadt): Plexiglas wird warm gepreßt und eignet sich deshalb besonders zur schnellen Einbettung von körnigem oder festem, wenig porösem Gut. Die Probe wird etwa 1:5 mit Plexiglas gemischt und in eine Preßform eingefüllt. Es ist zweckmäßig, anschließend mit reinem Plexiglas aufzufüllen, so daß ein 2 bis 3 cm dickes Paket entsteht. Die Presse wird auf 170 bis 180°C erwärmt und der Preßdruck so lange gesteigert, bis die Probe nicht mehr nachgibt. Dann kann sofort abgekühlt und die Probe weiter bearbeitet werden.

*Warmhärtender Kunststoff* (z. B. Araldit Giessharz B der Fa. Ciba AG., Wehr/Baden): Die Probe aus stückigem Gut wird in Formen, am besten Kunststoffringe (Fa. Dürener Maschinenfabrik, Düren), die dicht schließend auf einer Unterlage sitzen, gleichmäßig eingefüllt und auf ungefähr 130°C erwärmt. In die warme Form wird das ebenfalls bei 130°C verflüssigte und mit Härter versetzte Kunstharz eingegossen (10 g Kunstharz + 3 g Härter 901). Die Probe wird so lange evakuiert, bis die Luft aus den Poren entwichen ist. (Achtung! Auch Kunststoff kann verdampfen.) Anschließend muß die Probe etwa 12 Stunden bei 100 bis 110°C aushärten, bevor sie weiter verarbeitet werden kann.

*Kalthärtender Kunststoff* (z. B. Palatal P4 der Fa. BASF, Ludwigshafen): Die Vorbereitung und Verarbeitung ist ähnlich wie beim warmhärtenden Kunststoff, nur sind die Härtungstemperaturen niedriger. Sie richten sich nach dem Anteil von Härter und Beschleuniger.

Zum Einbetten von Klinkern hat sich auch folgende Mischung bewährt:

- $\frac{1}{6}$  Palatal 5007 (Fa. Wirtz, Düsseldorf)
- $\frac{1}{6}$  Leguval N 50S (Fa. Bayer, Leverkusen)
- $\frac{2}{6}$  Styrol, rein, stabilisiert mit 0,0012% Hydrochinon (Fa. Chem. Werke Hüls, Köln)
- $\frac{2}{6}$  Pleximon 808 (Fa. K. Roth, Karlsruhe)

Auf rund 100 ml obiger Mischung werden je 15 Tropfen Härter Butanox (Fa. Oxydo GmbH, Emmerich) und Beschleuniger

\* F. Gille: N. Jhb. Min., Mon. Hefte 10 (1952), S. 277 bis 287; Schriftenreihe Zementindustrie, Heft 10 (1952).

Kobaltnaphthenat mit Styrol verdünnt (Fa. Wirtz, Düsseldorf) zugegeben. Das Präparat wird im Vakuum bei Zimmertemperatur eingebettet. Die Härtung erfolgt in etwa 12 Stunden, ebenfalls bei Zimmertemperatur, im Ölbad unter einem Druck von mindestens 10 atü\*.

### 2.3.1.3 Schleifen und Polieren

Die mikroskopische Untersuchung von Klinkern erfordert meist starke Vergrößerungen. Aus diesem Grunde muß der Schliff sehr *sauber* und *eben* sein und *reliefarm* *poliert* werden. Der Vorgang des Schleifens und Polierens sowie die notwendige Zeit für die einzelnen Arbeitsgänge richten sich ebenso nach dem Material wie auch nach der vorhandenen Einrichtung. Sowohl bei maschineller Bearbeitung als auch bei Fertigung von Hand muß das Präparat in unterteilten Schritten weiterverarbeitet werden.

Zunächst wird die Probe auf Eisen- und Glasplatten mit Schmirgel geschliffen, bis schließlich die Fläche eben und kratzerfrei ist. Als Schleifflüssigkeit wird bei wasserempfindlichen Proben 1,4-Butan-diol empfohlen, das z. B. von der BASF in Ludwigs-hafen unter der Bezeichnung Diol 14B vertrieben wird.

Geschliffen wird mit abgestuften Körnungen in der Reihenfolge:

250 bis 300 $\mu\text{m}$	auf einer Eisenplatte
125 bis 150 $\mu\text{m}$	
50 bis 60 $\mu\text{m}$	
20 bis 25 $\mu\text{m}$	auf einer Glasplatte
13 bis 16 $\mu\text{m}$	
3 bis 7 $\mu\text{m}$	
0 bis 4 $\mu\text{m}$	

Bei jedem Wechsel zwischen den Körnungen wird die Probe sehr sorgfältig gereinigt, damit keine Schmirgelkörner und kein Schleifschlamm mehr an ihr haften, die beim weiteren Schleifen mit feinerer Körnung Kratzer verursachen. Zum Schluß muß der Schliff vollkommen kratzerfrei sein.

Anschließend wird die fein geschliffene Probe auf einer mit hartem Tuch (Perlon) bespannten Scheibe oder auf einer Lindenholzscheibe poliert. Als Poliermittel haben sich Chromoxydgrün, Poliertonerde oder Magnesia, in Alkohol oder 1,4-Butan-diol aufgeschlämmt, bewährt.

Das Schleifen und Polieren mehrerer Proben kann auch maschinell durchgeführt werden. Die Schleifscheiben und Körnungen müssen dann nach den Vorschlägen der Herstellerfirmen

\* Literatur: Druckschriften der Lieferfirmen für Kunststoffe, in denen spezielle Mischungen, Temperaturen und Variationen angegeben sind.

in entsprechender Weise abgestuft werden. Gerade hierbei sind die Proben besonders sorgfältig zu reinigen, da sonst alle Proben gleichzeitig durch Kratzer unbrauchbar werden können.

### 2.3.2 Dünnschliffe

Dünnschliffe werden für die Durchlichtuntersuchung benötigt. Zu ihrer Herstellung wird die möglichst dünne Probe auf einer Seite ebengeschliffen und auf einen Objektträger aufgekittet. Als Kittmittel dient Kanadabalsam (glashart) oder ein ähnliches Material (z. B. Araldit), das auf dem Objektträger geschmolzen wird. Kanadabalsam schmilzt bei ungefähr 80°C. Die etwas angewärmte Probe wird dann mit der feingeschliffenen Fläche gleichmäßig aufgedrückt.

Nach dem Erkalten wird die andere Seite der Probe mit abgestufter Körnung gleichmäßig abgeschliffen, bis eine Dicke von 0,02 bis 0,03 mm erreicht ist. Die Probe wird nach gründlicher Reinigung mit einem Deckglas abgedeckt, das ebenfalls mit Kanadabalsam (in Xylol gelöst) oder Araldit aufgekittet wird.

Der Herstellungsvorgang setzt einige Übung voraus, da die Dünnschliffe leicht ungleichmäßig werden oder beim Abdecken zerspringen.

*Andünnschliffe* ermöglichen die Beobachtung derselben Probe im Durchlicht und im Auflicht. Nach ihrer Herstellung kann man zwei Arten unterscheiden:

#### a) *Polierter Dünnschliff:*

Die freie Oberfläche des fertigen Dünnschliffs wird nicht abgedeckt, sondern poliert.

#### b) *Dünngeschliffener Anschliff:*

Der fertige Anschliff (siehe 2.3.1) wird von der Einbettungsmasse befreit und die polierte Fläche auf eine Platte aufgekittet. Von der Rückseite wird die Probe nun dünn geschliffen. Der fertige „Dünnschliff“ wird auf einen Objektträger umgekittet und die Trägerplatte von der polierten Fläche entfernt. Eine kurze Nachpolitur genügt, um den Schliff beobachten zu können.

Dieses Verfahren setzt besonders große Handfertigkeit und Übung voraus\*.

### 2.3.3 Pulverpräparate

Pulverpräparate werden für Untersuchungen im Durchlicht verwendet. Zunächst wird durch Sieben eine der Untersuchung angepasste Fraktion des Kornbereiches größer 30  $\mu\text{m}$  aus der Gesamtprobe abgetrennt. Anschließend wird diese Probe kurz mit

\* F. Gille: N. Jhb. Min., Mon. Hefte 10 (1952), S. 277 bis 287.

Alkohol gewaschen, um die Körner von anhaftenden feinsten Staubpartikeln zu befreien, die eine Bestimmung unnötig erschweren und bei der mikroskopischen Untersuchung Fehler verursachen können. Das Waschen kann entfallen, wenn die Abtrennung mit einem Luftstrahlsieb vorgenommen wird.

Für ein Präparat benötigt man ungefähr 10 mg, das entspricht etwa einer kleinen Spatelspitze Substanz, die durch Viertelung des Siebgutes gewonnen werden muß. Für die Herstellung der Präparate wird ein Einbettungsmittel auf einen Objektträger gegeben und durch leichtes Kippen des Trägers verteilt. Die Probe wird dann aus geringer Höhe gleichmäßig über das Einbettungsmittel gestreut und anschließend durch ein Deckglas abgedeckt. Die Menge des Einbettungsmittels soll so bemessen sein, daß beim Auflegen des Deckglases kein Material an den Seiten herausquillt, damit nicht Körner einer bestimmten Kornform vorzugsweise herausgeschwemmt werden. In solchen Fällen entspricht der unter dem Deckglas verbleibende Probenrest nicht mehr dem Durchschnitt.

Als Einbettungsmedien werden gelöster Kanadabalsam ( $n \approx 1,54$ ), Zedernholzöl ( $n \approx 1,515$ ), Zimtöl ( $n \approx 1,602$ ) und andere verwendet. Sollen die eingebetteten Proben längere Zeit aufbewahrt werden, empfiehlt sich die Verwendung von festem Kanadabalsam; die Präparatherstellung muß dann allerdings auf einer Heizplatte vorgenommen werden. Dieses Verfahren hat aber den großen Vorteil, daß die Präparate aufgehoben werden können und sich die Körner beim Ausmessen nicht verschieben. Man kann auch in Kunststofflösungen, z. B. Clearax\*, einbetten, die wie Kanadabalsamlösung erhitzt werden und dann erhärten.

## 2.4 Ätzen

### 2.4.1 Allgemeine Hinweise

Die Phasen- sowie Gefüge- und Strukturuntersuchungen werden durch Ätzen der polierten Anschliffe wesentlich erleichtert.

Nach der Ätzwirkung unterscheiden wir zwischen Anlaufätzung, bei der die Oberfläche der Kristalle angefärbt, und Lösungsätzung, bei der die Oberfläche der Kristalle angelöst wird. Wesentlich ist, daß die Kristalle ein charakteristisches Verhalten gegenüber einem bestimmten Ätzmittel besitzen.

---

\* Clearax ist ein neutrales, hoch lichtbrechendes Einbettungsmittel ( $n_D = 1,666$ ).  
Hersteller: George T. Gurr, London SW 6, zu beziehen durch Fa. Merck, Darmstadt.

Im ungeätzten Anschliff kann man nur zwischen schwach reflektierendem Alkalisulfat (Bild 87, 88), mittel reflektierendem Alit, Belit und Aluminat (Bild 7, 11), mäßig stark reflektierendem CaO und MgO (Bild 7, 11, 83, 84, 85) sowie stark reflektierendem CaS (Bild 94, 95), Graphit (Bild 97, 98, 99), Ferrit (Bild 7, 11) und metallischem Eisen (Bild 93) unterscheiden.

Eine Unterscheidung der Hauptbestandteile des Klinkers, Alit, Belit und Aluminat, ist nur mit Hilfe eines oder mehrerer Ätzmittel möglich. Nach stärkerem Ätzen sind einige Neben- und Übergangsteile oft schwierig zu bestimmen.

Vor dem Ätzen des Anschliffes müssen die letzten Ölschichten, die noch vom Polieren herrühren, beseitigt werden. Das geschieht am besten durch eine kurze Nachpolitur (etwa 1 min) mit in absolutem Alkohol aufgeschlämmtem MgO oder  $Al_2O_3$  auf einer rotierenden Scheibe, die mit einem weichen Tuch gespannt ist. Anschließend muß der Anschliff gründlich mit absolutem Alkohol gereinigt werden.

Das Ätzen selbst erfolgt, je nach Ätzmittel, entweder durch Eintauchen des Anschliffes in das Ätzmittel, durch Aufsprühen oder durch Einreiben des Anschliffes mit einem Stück Zellstoff, das vorher mit dem Ätzmittel getränkt wurde. Die Einwirkungs-dauer richtet sich nach Art und Konzentration des Ätzmittels und dem Zweck, den man verfolgt. Meist ist es bei Strukturätzung empfehlenswert, zunächst nur kurz zu ätzen und nach mikroskopischer Überprüfung des Anschliffes die Ätzung unter Umständen zu wiederholen. Der Anschliff wird nach jeder Ätzung mit absolutem Alkohol abgespült. Dieser wird anschließend mit Druckluft, Fön, durch Trockenreiben oder Abtupfen mit Zellstoff entfernt.

### 2.4.2 Verfahren

Für allgemeine Untersuchungen eignen sich am besten die Ätzmittel Wasser, Salpetersäure sowie Wasser und Dimethylammoniumcitrat. Diese Verfahren werden nachstehend beschrieben. Die übrigen Ätzverfahren, die nur für Sonderfragen Bedeutung haben, sind in der nebenstehenden Tafel zusammengestellt.

*Wasserätzung*: Geätzt werden in abnehmender Reihenfolge Freikalk, Aluminat, Alit, Belit; nicht geätzt werden Ferrit und Periklas.

Die Wasserätzung erfolgt am besten stufenweise mit kurzen Ätzzeiten von 5 bis 10 s. Sie bewirkt bei kurzer Ätzdauer von etwa 5 s eine starke blaubraune Anfärbung des Aluminats. Alit und Belit werden dabei nur wenig geätzt. Bei längerer Ätzdauer von 10 bis 20 s wird auch der Alit angefärbt. Die Farbtiefe ist von der Schnittlage des Kristalles abhängig (Ätzanisotropie). Der Belit bleibt ungefärbt, es tritt nur eine schwache Strukturätzung auf.

## Übersicht über die Ätzverfahren

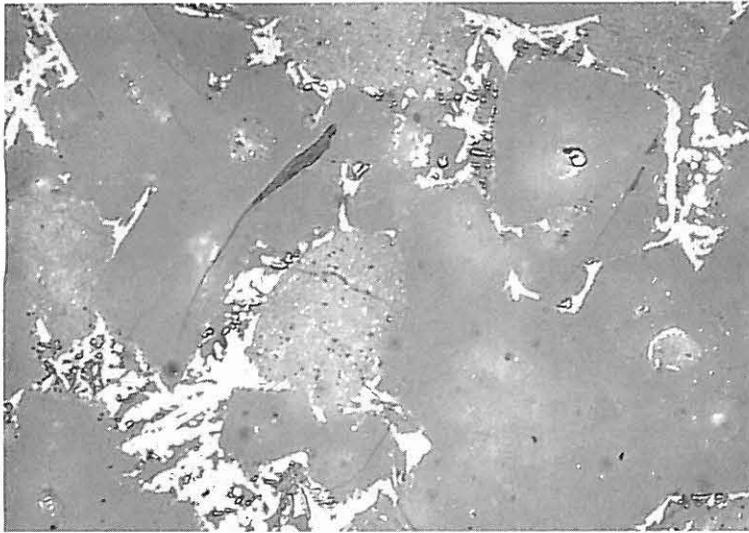
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Ätzmittel	dest. Wasser	Salpetersäure	Wasser + DAC	Ammonium-polysulfid	Flußsäure	Kalilauge	Natronlauge	Oxalsäure	alkohol. Borax-lösung	Eisessig
Konzentration		HNO <sub>3</sub> in Äthyl- oder Amylalkohol 1:100/1:1000	s. Text	gelbe, konz. (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Si <sub>1+x</sub> -Lösung (1:10)	(a) konz. HF (b) verd. HF (c) HF-Dampf	10% KOH in Wasser	8 cm <sup>3</sup> 10% NaOH und 2 cm <sup>3</sup> 10% Na <sub>2</sub> HPO <sub>3</sub>	10% Oxalsäure	1 % 0,4%	Eisessig in Äthylalkohol 1:100
Ätzdauer	5–15 s oder 10 s	2–15 s	5–10 s	15–30 s	(a) 2– 3 s (b) 5–10 s 30–60 s (c) 10–20 s	15 s	60 s	5–15 s	10 min	2–5 s
Ätztemperatur	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	30°C	50–55°C	20°C	20°C	20°C
Beschrieben bei:	Tavasci Trojer	Stern* Tavasci Insley McMurdie Trojer	Gille	Trojer	Wetzel Tavasci Trojer Parker Heilmann**	Insley	Tavasci	Tavasci	Tavasci	Stern* Gille
Alit	A	A S	S	A	(A)	–	A	–	A	S
Belit	S	A S	S	(A)	A	–	–	–	–	(S)
Aluminat	A	–	A	–	–	A	A	A	–	–
Ferrit	–	S	–	A	–	–	A	–	–	–
Freikalk	A	A	A	A	–	–	A	–	A	S
Periklas	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

A = Anlaufätzung  
 (A) = schwache Anlaufätzung  
 S = Strukturätzung  
 (S) = schwache Strukturätzung

Die gebräuchlichen Ätzmittel mit ausführlichen Literaturangaben sind bei H. zur Strassen im Handbuch der Werkstoffprüfung, 3. Band: Prüfung nichtmetallischer Baustoffe, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1957, auf Seite 337 aufgeführt.

\* E. Stern: Über mikrographische Zementuntersuchung. Stahl und Eisen, 28 (1908) Nr. 43, S. 1542 bis 1546.

\*\* T. Heilmann: Reactions of Coal Ash with Portland Cement Clinker During the Burning Process. Proceedings of the Fourth International Symposium Washington 1960, S. 87. U. S. Department of Commerce. National Bureau of Standards Monograph 43 – Volume I.

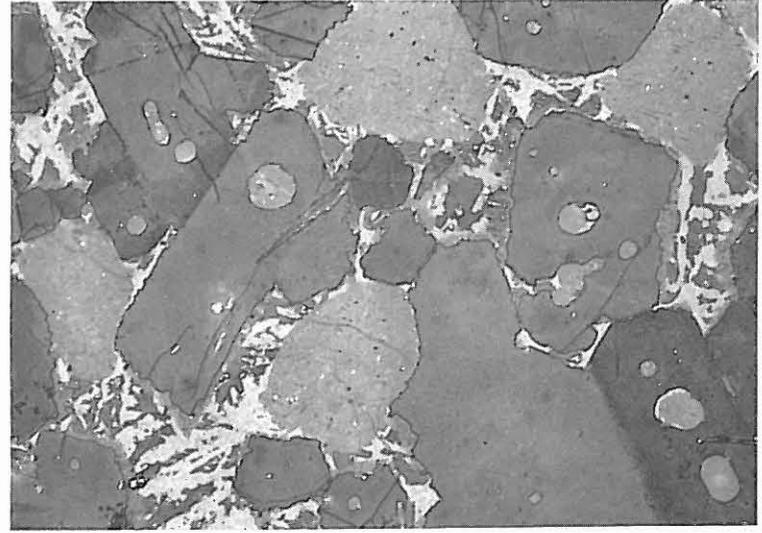


650×

ungeätzt

#### Bild 7

In der Zwischenmasse befinden sich neben feinen, z. T. dendritischen Periklas-kriställchen mit positivem Relief stark reflektierender Ferrit und Aluminat, das etwa das gleiche Reflexionsvermögen wie der Alit zeigt. Der Belit enthält fein verteilte Einlagerungen mit höherem Reflexionsvermögen.  
Alit (70/50), Belit (40/30), Aluminat (60/50), Ferrit (30/20), Periklas (40/5).  
Mit Kunstharz gefüllter Riß bei (40/50).

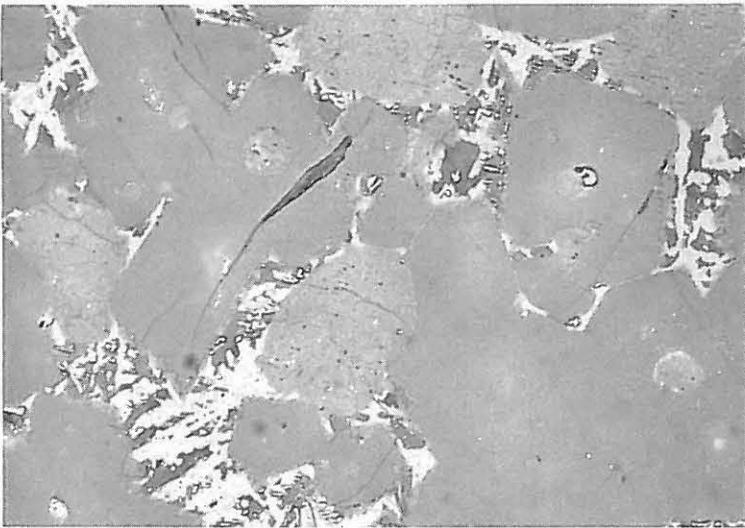


650×

30 s H<sub>2</sub>O

#### Bild 9

Nach längerer Ätzdauer wird auch der Alit angefärbt. Zu beachten ist die unterschiedlich starke Anfärbung der einzelnen Kristalle je nach ihrer Schnittlage (Ätzanisotropie des Alits, siehe Bild 23, 24, 25).

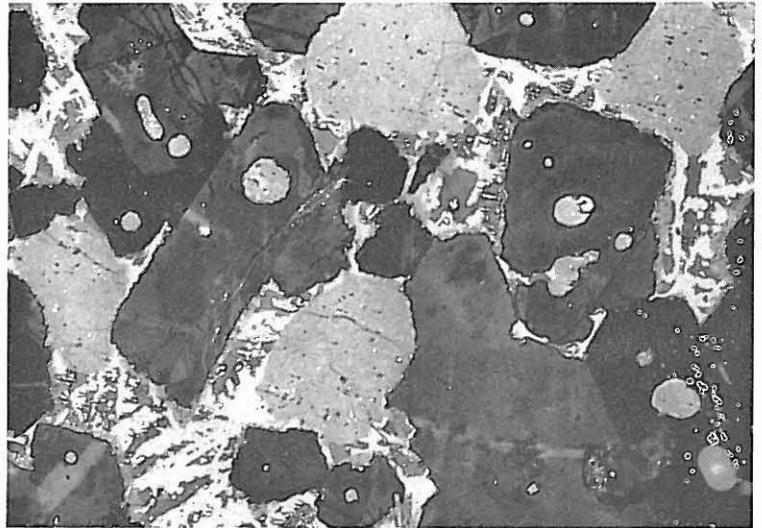


650×

5 s H<sub>2</sub>O

#### Bild 8

Nach kurzer Ätzung mit Wasser wird das Aluminat in der Zwischenmasse angefärbt.



650×

50 s H<sub>2</sub>O

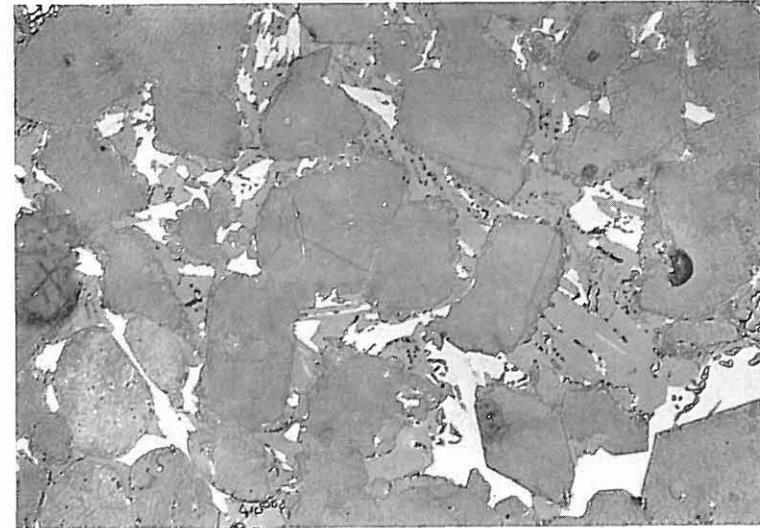
#### Bild 10

Die Anfärbung des Alits verstärkt sich, der Belit ist ungeätzt geblieben.

*Salpetersäureätzung*: Man verwendet meist alkoholische Salpetersäure 100:1 oder 1000:1. Das Ätzmittel muß mindestens 14 Tage vor dem Gebrauch angesetzt werden. Geätzt werden in abnehmender Reihenfolge Freikalk, Alit, Belit. Nicht oder weniger geätzt werden Aluminat, Ferrit und Periklas.

Auch hier kann zunächst das Ätzen kurzzeitig ausgeführt und nach Bedarf mehrfach wiederholt werden. Die Salpetersäure wirkt färbend und lösend. Wird der Anschliff nach dem Ätzen durch Trockenreiben mit Zellstoff gereinigt, entsteht eine Strukturätzung, die Anlauffarben werden dabei beseitigt. Beim Abtupfen des Anschliffes nach dem Ätzen bleibt die Anlaufätzung erhalten.

Bei der Strukturätzung wird die Grundmasse nur schwach oder gar nicht, der Belit schwach und der Alit stark geätzt.

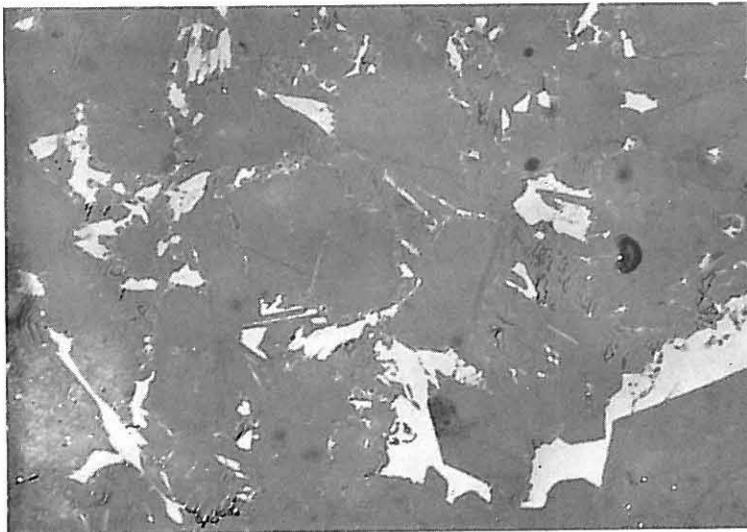


650×

6 s alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 12

Alit und Belit erscheinen geätzt, Aluminat und Ferrit bleiben ungeätzt.

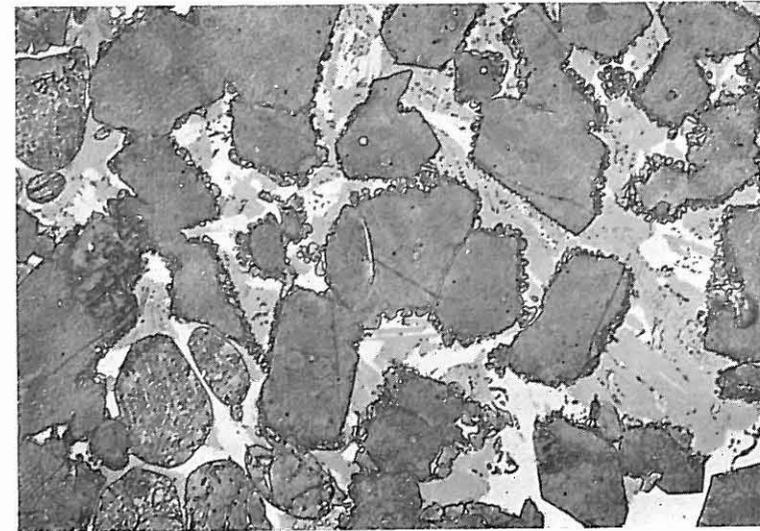


650×

ungeätzt

Bild 11

In der Zwischenmasse befinden sich neben feinen Periklaskriställchen mit positivem Relief stark reflektierender Ferrit und außerdem Aluminat, das vom Alit nicht zu unterscheiden ist. In der linken unteren Ecke des Bildes befinden sich Belitkristalle mit stark reflektierenden Einlagerungen. Alit (90/10), Belit (10/15), Aluminat (71/32), Ferrit (90/20), Periklas (77/25).



650×

16 s alkoh. HNO<sub>3</sub>

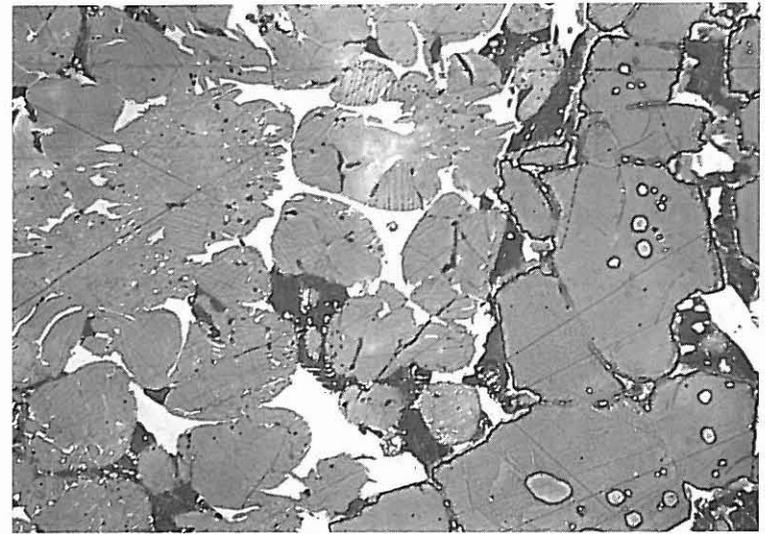
Bild 13

Verstärkte Ätzung des Alits und Belits.

*Ätzung mit Wasser und Dimethylammoniumcitrat (DAC):* 192,6 g Zitronensäure werden in 1 l Wasser gelöst, unter Köhlen langsam mit 891 cm<sup>3</sup> wäßriger Dimethylammoniumlösung (33%) versetzt und auf 3 l aufgefüllt.

Freikalk und Aluminat werden durch Wasser angefärbt; Alit und Belit werden durch Dimethylammoniumcitrat strukturgeätzt. Nicht oder sehr schwach geätzt werden Ferrit und Periklas.

Im ersten Arbeitsgang wird mit Wasser geätzt und das Aluminat angefärbt. Im zweiten Arbeitsgang wird bei einer Ätzdauer von 5 bis 10 s mit Dimethylammoniumcitrat der Alit stark und der Belit schwach strukturgeätzt.

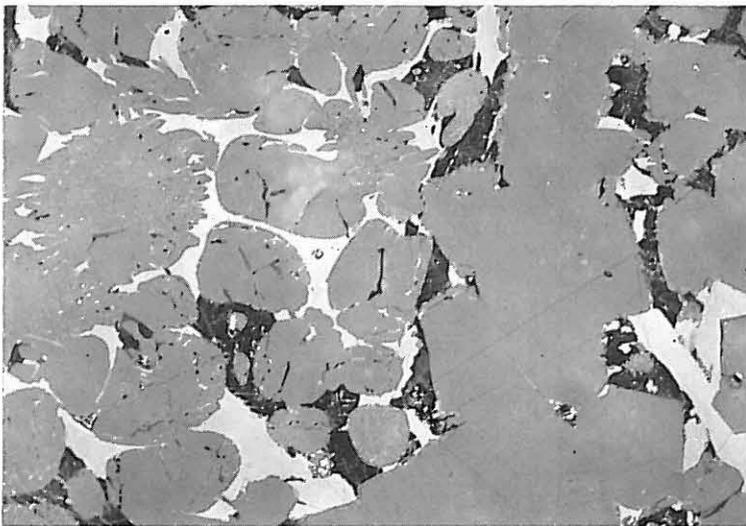


540×

5 s H<sub>2</sub>O  
10 s DAC

Bild 15

Durch Ätzung mit Dimethylammoniumcitrat wurde der Alit stark, der Belit schwach geätzt. Im Alit sind Beliteinschlüsse zu sehen. Der Belit zeigt Parallelstreifung.

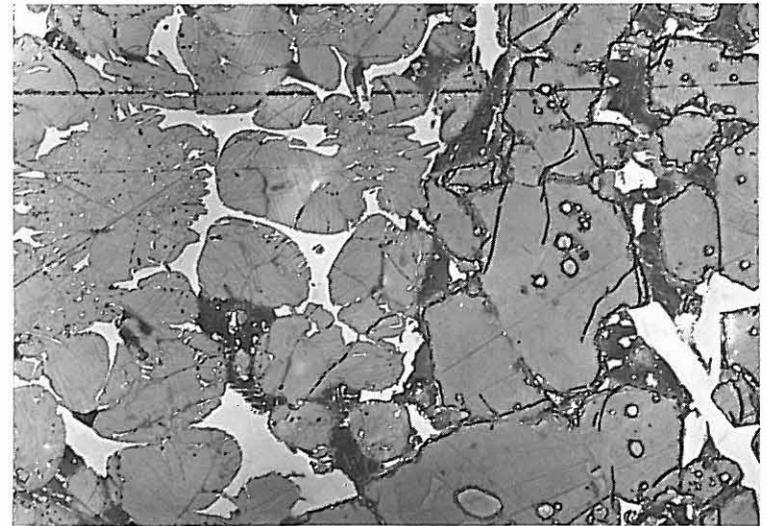


540×

5 s H<sub>2</sub>O

Bild 14

Durch Ätzung mit Wasser wurde in der Zwischenmasse das Aluminat angefärbt. Belit und Alit zeigen etwa gleiches Reflexionsvermögen. Alit (70/40), Belit (20/40), Aluminat (30/25), Ferrit (30/15).



540×

5 s H<sub>2</sub>O  
20 s DAC

Bild 16

Die Oberflächenstrukturen des Alits und Belits werden durch längeres Ätzen noch deutlicher sichtbar.

### 3. Klinkerphasen

#### 3.1 Überblick

Alit, Belit, Aluminat und Ferrit sind die *Hauptgemengteile* eines normalen Portlandzementklinkers. Während Alit und Belit im wesentlichen durch Festkörperreaktionen entstehen und bei Sinter-temperaturen im festen Zustand vorliegen, ist die Grundmasse geschmolzen und kristallisiert beim Abkühlen hauptsächlich als Aluminat und Ferrit aus. Der Mengenanteil dieser vier Hauptphasen kann in weiten Bereichen schwanken. In Spezialklinkern kann die eine oder andere der Hauptphasen fehlen; so enthält z. B. der Weißklinker kein Ferrit und ein Spezialklinker für Zemente mit erhöhtem Sulfatwiderstand sehr wenig oder kein Aluminat.

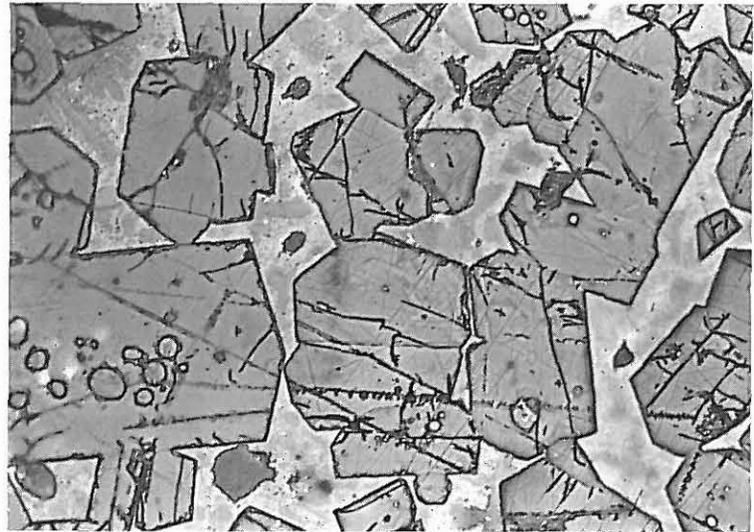
Neben diesen Hauptgemengteilen enthält ein Klinker normalerweise sogenannte *Nebengemengteile*. Hierzu zählen Freikalk und Periklas. Die Menge des Freikalkes kann ein Maßstab für die Vollständigkeit des Reaktionsablaufs im Klinker sein. Sie kann mit chemisch-analytischen Verfahren quantitativ bestimmt werden, doch nur eine mikroskopische Untersuchung vermag auch die Ursachen für eventuell unvollkommene Reaktionen nachzuweisen. Periklas tritt normalerweise nur in Klinkern mit MgO-Gehalten über 1,5 bis 2,0% auf, da die meisten Klinkerphasen mehr oder weniger große Mengen MgO einbauen können. Nach oben ist der Periklasgehalt begrenzt, da ein Klinker nach den deutschen Normen nicht mehr als 5% MgO enthalten darf.

Unter ungewöhnlichen Brennbedingungen kann es zur Bildung weiterer Phasen kommen, die für einen normalen Klinker untypisch sind. Zu diesen *Übergemengteilen* zählen vor allem Verbindungen in hoch alkalihaltigem Klinker, wie z. B. Kaliumsulfat, oder solche, die während eines reduzierenden Brandes entstehen, wie z. B. Calciumsulfid und andere.

#### 3.2 Alit

Mit „Alit“ werden die im technischen Klinker durch Mischkristallbildung stabilisierten Modifikationen des Tricalciumsilicats bezeichnet. Eine Unterscheidung der einzelnen Tricalciumsilicatmodifikationen durch mikroskopische Untersuchung im Auflicht ist noch nicht möglich. Röntgenographisch hat man bisher eine rhomboedrische, zwei monokline und drei trikline Modifikationen feststellen können.

Der Alit entspricht dem  $C_3S$  der Berechnungsverfahren. Er steht unter den Phasen eines normalen Portlandzementklinkers mengenmäßig mit 40 bis 70% an erster Stelle.

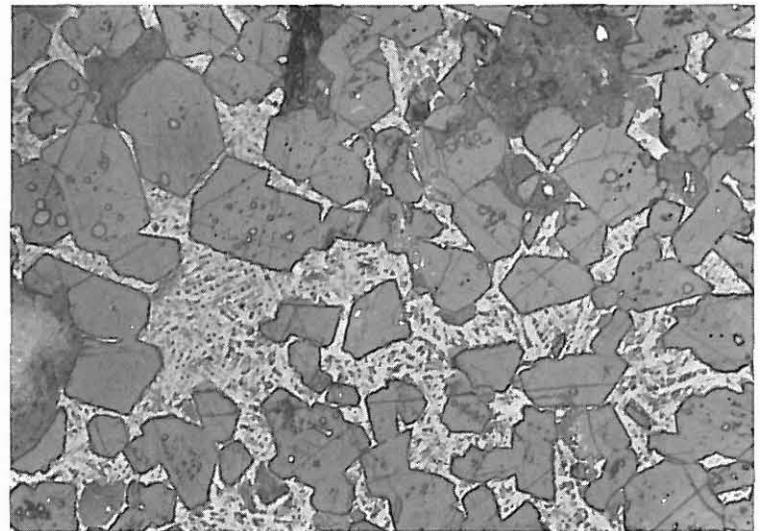


540 ×

DAC

Bild 17

Verhältnismäßig schnell gekühlter Klinker mit großen, idiomorphen Alitkristallen (z. B. 20/30) mit meist sechsseitigem Querschnitt. Die Grundmasse, in der die Alitkristalle „schwimmen“, ist wenig differenziert. (Siehe auch Bild 18, 23, 31, 42, 46, 78)



350 ×

H<sub>2</sub>O

Bild 18

Idiomorphe Alitkristalle (z. B. 35/45) mit vorwiegend sechsseitigem Querschnitt in einer feinkristallinen Grundmasse (30/30) eines relativ schnell gekühlten Klinkers (weiß = Ferrit; dunkelgrau = Aluminat). Poren (5/25, 80/60).

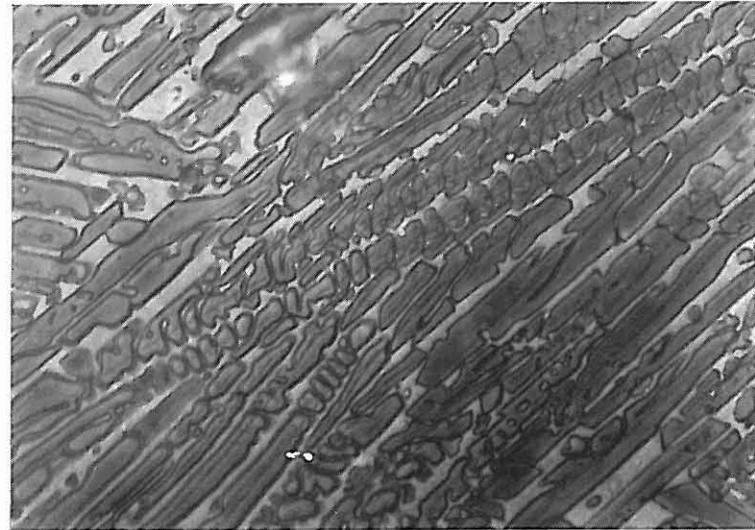
Er hat folgende optische Eigenschaften:

Lichtbrechung:  $n_x = 1,716$  bis  $1,720$ ;  
 $n_z = 1,722$  bis  $1,724$   
Doppelbrechung:  $n_z - n_x = 0,005$   
(Schwankung etwa  $0,002$  bis  $0,005$ , gemessen  
an einem zonargebauten Alit)  
Achsenwinkel:  $(-)$   $2V =$  sehr klein  
Farbe: farblos bis schwach gefärbt

Im Auflicht reflektiert Alit grau. Ungeätzt ist er nicht von Belit und Aluminat zu unterscheiden. Alit wird von allen gebräuchlichen Ätzmitteln angegriffen. (Siehe auch 2.4 Ätzen.)

Alit bildet im allgemeinen *idiomorphe, gedrungene tafelige Kristalle* mit meist *sechseckigem Querschnitt*. Das Bild der Alitkristalle im Anschliff ist natürlich jeweils von deren Tracht und Habitus und vor allem von der zufälligen Schnittlage abhängig.

Die hier wiedergegebene Ausbildung des Alits wiederholt sich in zahlreichen weiteren Bildern. Sie ist kennzeichnend für solchen Alit, der, wie es im technischen Portlandzementklinker die Regel ist, durch Festkörperreaktionen bei Sintertemperatur gebildet wurde.



700 $\times$

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 20

Leistenförmige Alitkristalle in einem vollständig geschmolzenen Laboratoriumsklinker.



500 $\times$

H<sub>2</sub>O

Bild 19

Lange, schmale Alitleisten (z. B. 40/25) in einer an Grundmasse besonders reichen Partie eines Klinkers. Am Rande normale, gedrungene Alitkristalle (70/50).

(Siehe auch Bild 20, 21, 22)



875 $\times$

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 21

Lange, schmale Alitleisten (50/50) in einer eisenreichen Grundmasse. Die dunkelgrauen, rundlichen Kristalle bestehen aus Belit (35/40).

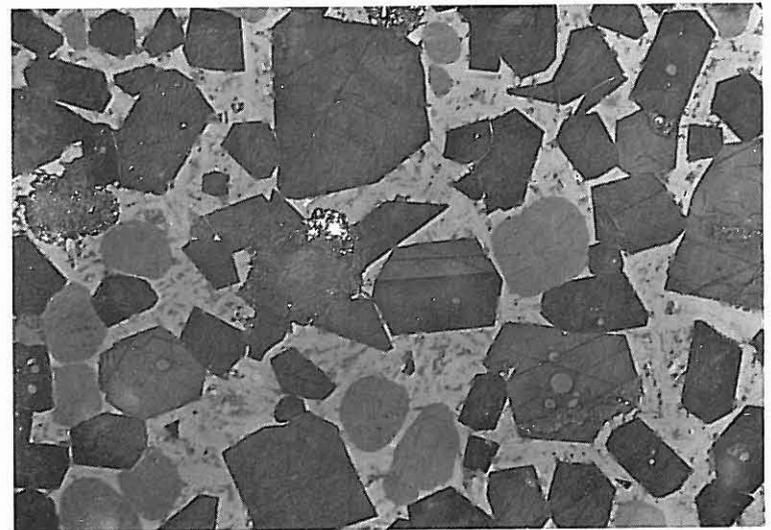


500 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 22

Verwachsung von gedrunenem mit feinlamellarem, skelettartigem Alit. Poren (30/0 und 80/10).



500 ×

H<sub>2</sub>O

Bild 23

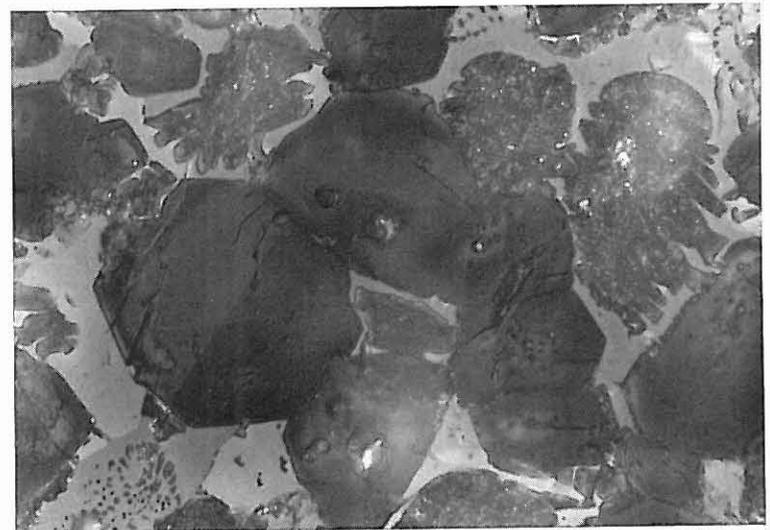
In der Bildmitte ein Alitzwilling (60/30). Die Teilindividuen des Zwillings sind durch unterschiedlich starke Graufärbung, bedingt durch Ätzanisotropie des Alits, voneinander abgehoben. Auch die anderen Alitkristalle zeigen hier deutlich unterschiedliche Grautönungen. Heller graue, rundliche Körner bestehen aus Belit (70/40). Dunkelgraue, rauhe Flecken sind Poren (40/30).

(Siehe auch Bild 24, 44)

Andererseits werden gelegentlich auch im technischen Klinker einmal größere Mengen von SiO<sub>2</sub> in die Schmelze aufgenommen. Voraussetzung hierfür sind ein erhöhter Mengenanteil einer – meist eisenreichen – Schmelze, eine Anreicherung von Flußmitteln oder sehr hohe Brenntemperaturen. Beim Erstarren kristallisiert dann Alit mit vollkommen anderem Habitus aus dieser Schmelze aus. Er bildet *dünntafelige Kristalle*, die im Schnitt als *schmale, lange Leisten* erscheinen (Bild 19 bis 22).

In ein und demselben Klinkerkorn können gelegentlich auch beide Ausbildungsformen nebeneinander vorkommen; meist ist dann der feinlamellare Typ orientiert auf die gedrunenen Kristalle aufgewachsen und oft noch skelettartig über die alten Kristallgrenzen hinausgewachsen. Die dünntafeligen Kristalle werden von Ätzmitteln meist stärker angegriffen als gedrunene.

Alit neigt zuweilen zur Bildung *einfacher Zwillinge*. Zwillingsbildung ist im Anschliff nur nach Ätzung an Hand der Ätzanisotropie zu erkennen. Sie beruht darauf, daß je nach der kristallographischen Orientierung die Schnittflächen unterschiedlich stark von den Ätzmitteln angegriffen werden.



800 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 24

Großer verzwilligter Alitkristall (30/30) neben anderen, nicht verzwilligten. Dunkelgraue, gelappte Partien bestehen aus Belit (80/40), daneben hellgraues Aluminat (20/10) und weißlicher Ferrit (30/5).

Wie bereits erwähnt, ist Alit ein Tricalciumsilicat mit eingebauten fremden Ionen. Dieser Einbau – und damit die chemische Zusammensetzung des Alits – ist natürlich weitgehend abhängig sowohl vom Angebot an Fremdkomponenten als auch von den jeweiligen Brennbedingungen. Veränderungen dieser Voraussetzungen bilden sich im Chemismus des Alits ab. Entsprechende Schwankungen während der Wachstumsdauer eines Alitkristalls können zur Ausbildung von Zonen *unterschiedlicher Zusammensetzung* führen, die sich nach dem Ätzen in einem *Zonarbau* des Kristalls abbilden.

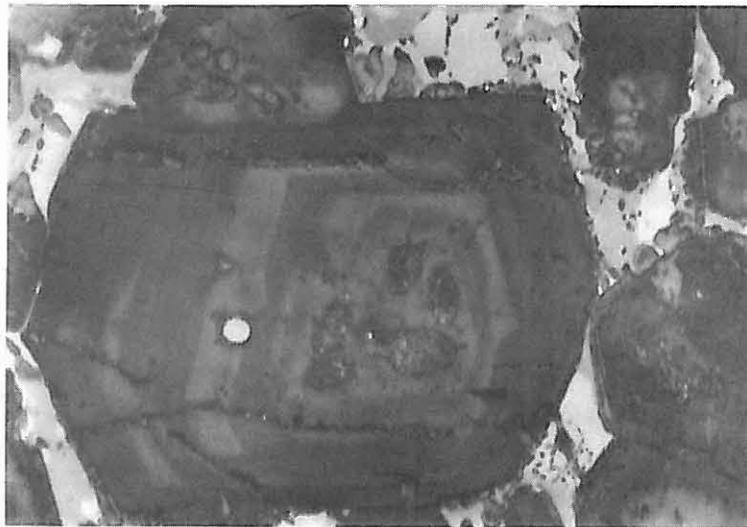


785×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 26

Rhythmischer Zonarbau des Alits. Derartige Bilder sind recht selten. Sie können bei flüchtigem Hinschauen zu Verwechslungen mit gestreiftem Belit führen (Bild 56).



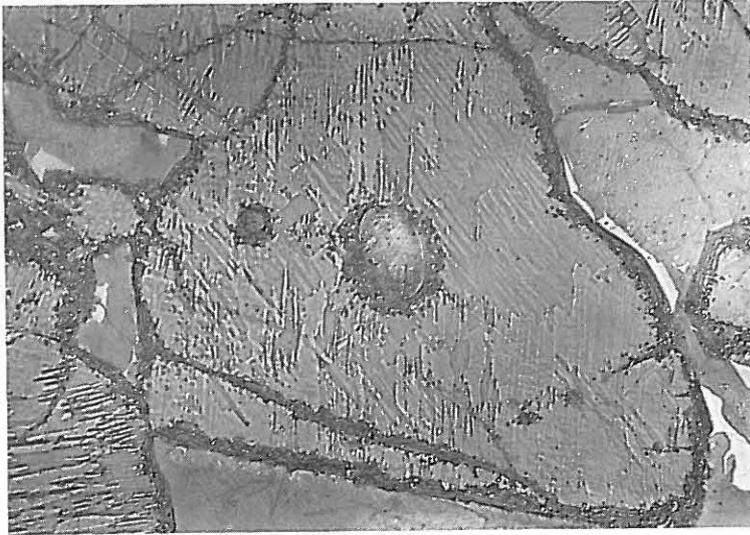
785×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 25

Alit mit Zonarbau (50/40). Die einzelnen Zonen zeichnen sich durch unterschiedliche Ätzeigenschaften aus. (Siehe auch Bild 26, 46, 79, 81, 86)

Bei Sintertemperatur des Klinkers wird Alit stets in seiner höchstsymmetrischen Modifikation gebildet. Während des Abkühlens durchläuft er mehrere polymorphe Umwandlungen. Bei Zimmertemperatur liegt technischer Alit, von wenigen Ausnahmen abgesehen, in monokliner oder auch trikliner Form vor. Unter dem Mikroskop ist zuweilen eine typische *Umwandlungslamellierung* als Folge dieser Transformation zu erkennen. Nach dem Ätzen zeigt der Alit dann *spindel- oder lanzettartige Streifung*. Diese Streifung tritt nur in triklinen Alitkristallen auf. Sie ist also auf die Umwandlung von den monoklinen in die trikline Modifikation zurückzuführen.

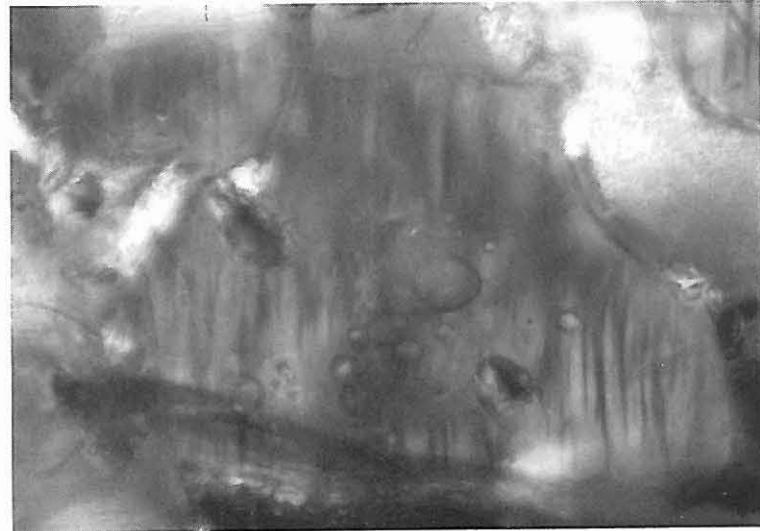


530×

H<sub>2</sub>O und DAC

**Bild 27 (Auflicht)**

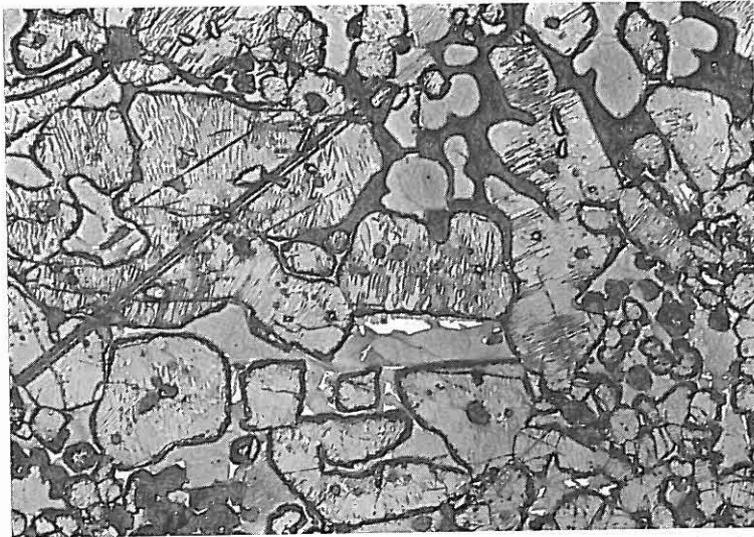
Aufnahme der gleichen Stelle eines Andünnschliffes im Auf- und Durchlicht. Lanzettartige Streifen im Auflicht entsprechen verschiedenem Auslöschungsverhalten im Durchlicht. Es handelt sich also um mehrere, sich gegenseitig durchdringende Kristalle verschiedener Orientierung.  
(Siehe auch Bild 29, 50)



530×

**Bild 28 (Durchlicht, + Nicols)**

Lanzettartige Streifung im Alit, zurückzuführen auf polymorphe Umwandlungen. Die Streifen im Auflicht entsprechen verschiedenem Auslöschungsverhalten im Durchlicht. Es handelt sich also um mehrere, sich gegenseitig durchdringende Kristalle verschiedener Orientierung.



120×

H<sub>2</sub>O und DAC

**Bild 29**

Lanzettartige Streifung der Alitkristalle (55/35). Vorsicht vor Verwechslung mit Belitstreifung! Gleiche Probe wie Bild 27 und 28.  
(Siehe auch Bild 30)



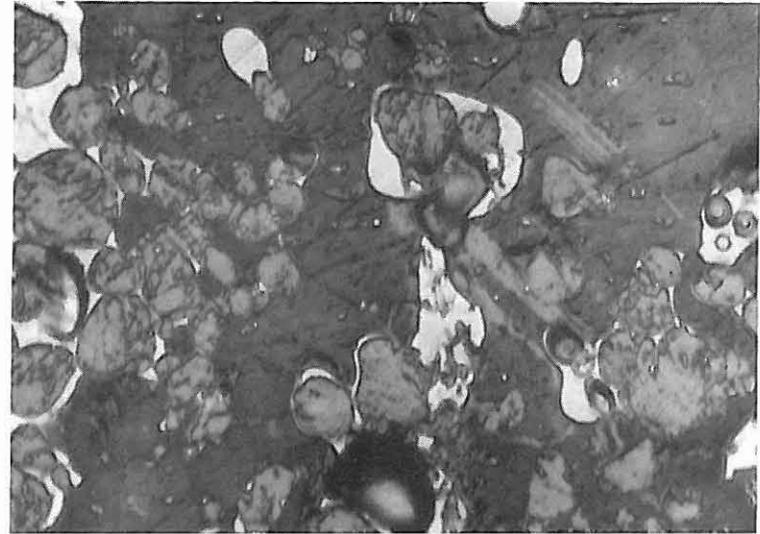
1300×

(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>1+x</sub>

**Bild 30 (Dr. F. Trojer, Wien)**

Typische Umwandlungslamellierung in einem Alitkristall mit sehr starker Ätzanisotropie. Der ursprünglich durch Festkörperreaktion entstandene Kristall ist noch während des Erstarrens der Schmelze weitergewachsen. Dadurch entstand ein Saum mit deutlich anderen Ätzeigenschaften.

Das erste Produkt der Reaktion zwischen  $\text{SiO}_2$  und  $\text{CaO}$  während des Brennprozesses ist stets Dicalciumsilicat. Erst bei Temperaturen über  $1200^\circ\text{C}$  bildet sich Alit durch Reaktion im festen Zustand zwischen dem erstgebildeten Dicalciumsilicat und  $\text{CaO}$ . Bei der Sprossung der Alitkristalle werden oft Relikte von Dicalciumsilicat poikiloblastisch eingeschlossen. Im Anschliff sind diese Einschlüsse als *Belitknoten* zu erkennen. Wenn die Belitknoten vollkommen von Alit umwachsen sind, haben sie kaum noch Gelegenheit, mit weiterem  $\text{CaO}$  zu reagieren, d. h. sie sind „gepanzert“. Alite technischer Klinker enthalten fast ausnahmslos solche Knoten in sehr unterschiedlichen Mengen und Größen. Wie Belit können auch alle anderen Klinkerphasen im Alit eingeschlossen werden.

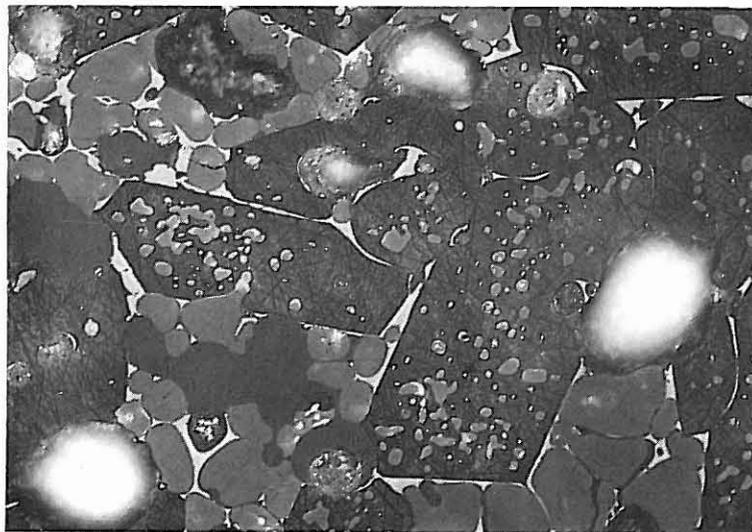


785×

alkoh.  $\text{HNO}_3$

Bild 32

Großer dunkelgrauer Alitkristall mit poikiloblastischen Einschlüssen von hellgrauem Belit und weißlichem Ferrit. Er füllt nahezu das ganze Gesichtsfeld aus.



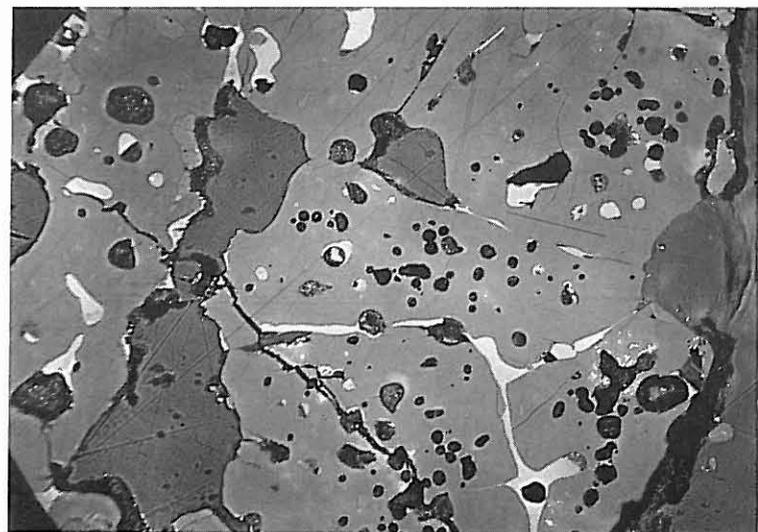
800×

$\text{H}_2\text{O}$

Bild 31

Alitkristalle (60/20) mit zahlreichen Belitknoten. Daneben runde Belite (80/10) in einer Grundmasse aus weißlichem Ferrit. Dunkelgraue, glatte Partien sind harzgefüllte Poren (35/20); helle, diffus reflektierende Flecken sind offene Poren (15/10), in die während des Polierens Polierpaste eingedrungen ist.

(Siehe Bild 10, 16, 32, 47, 73)

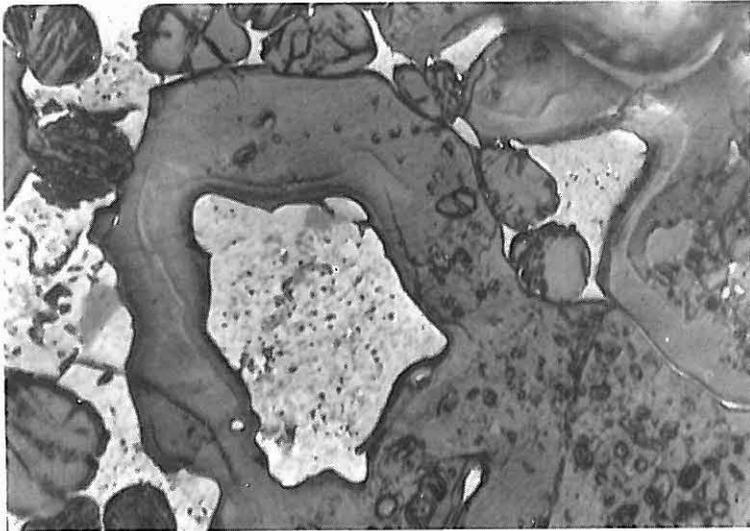


500×

$\text{H}_2\text{O}$

Bild 33

Hellgrauer Alit mit schwarzen Freikalkknoten und weißlichem Ferrit. Die Grundmasse besteht aus Ferrit. Mittelgraue Partien sind harzgefüllte Poren (20/10).

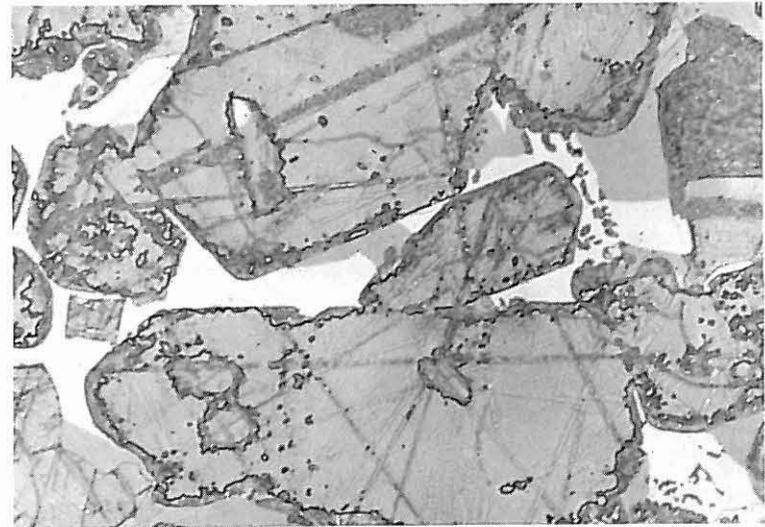


785×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 34

Mittelgraue, atollartiger Alit in untypischer Ausbildung mit kleinen Belitknoten und einem sehr großen Einschuß von Grundmasse.



700×

1% Borsäure

Bild 35

Alitkristalle (z. B. 50/10) mit typischen Korrosionserscheinungen. Die ehemaligen Umrisse der Kristalle sind noch deutlich zu erkennen, doch ist deren Rand mehr oder weniger stark angefressen. (Siehe auch Bild 50, 60, 72)

Die Schmelzphase im normalen Portlandzementklinker ist bei Sinteremperatur, verglichen mit den mit ihr im Gleichgewicht stehenden festen Phasen, CaO-arm, und zwar um so ausgeprägter, je tonereicher und eisenärmer der Klinker ist. (Für eisenreiche Ferrariklinker gilt diese Regel nicht mehr; bei einem Tonerdemodul kleiner 0,6 kehrt sie sich sogar um!) Beim Abkühlen kristallisieren Aluminat, Ferrit und untergeordnet auch Belit aus. Das dazu notwendige, der Schmelze selber fehlende CaO wird dabei durch Resorption von freiem CaO oder von Alit gewonnen. Unter dem Mikroskop kann man diesen Prozeß an Hand der *Korrosion der Alitkristalle* erkennen. Zu einer derartigen Resorption des Alits ist jedoch Zeit nötig, so daß korrodierte Alite normalerweise nur in langsam gekühlten Klinkern zu finden sind.



785×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

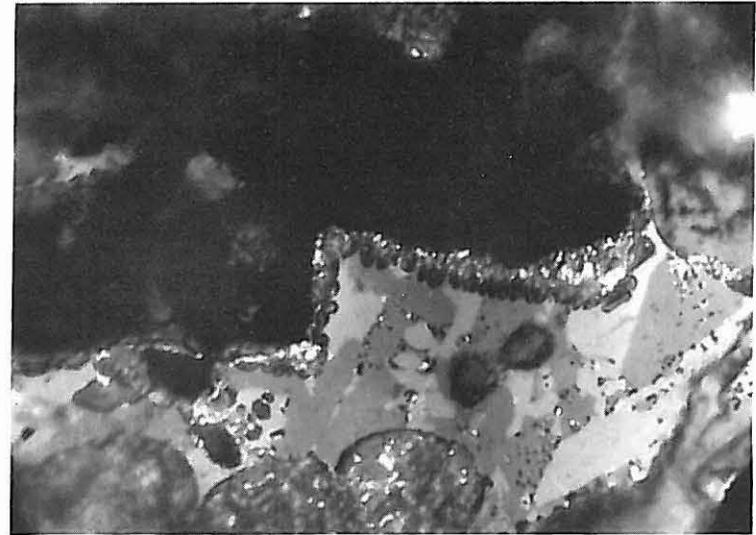
Bild 36

Die Alitkristalle sind hier zum Teil so stark korrodiert, daß die alten Kristallflächen kaum zu erkennen sind.

Große dunkelgraue Alitpartien (50/40), kleine runde, ebenfalls dunkelgraue Belitkristalle (85/30), weißlicher Ferrit. Die feinen Pünktchen (50/65) in den Ferritpartien sind sekundäre Belit-Entmischungskörper.

(Siehe auch Bild 37, 70, 77, 80)

*Belitmäntel* um Alitkristalle entstehen durch Resorption des Alits durch die kalkarme Schmelze. Der Alit wird pseudomorph von Belit verdrängt, d. h., die äußere Form des ursprünglichen Alitkristalls bleibt erhalten. Besonders anschaulich ist das in Bild 35 wiedergegeben. Eine allgemeine Neigung zur Sammelkristallisation führt weiterhin dazu, daß sich der aus der Schmelze selbst ausscheidende Belit bevorzugt auf der schon bestehenden Belitschicht um die Alitkristalle abscheidet und sie entsprechend anwachsen läßt. Das führt zu einer Ummantelung der Alitkristalle, die auch nur dort typisch erfolgen kann, wo eine gewisse Zeit zur Verfügung steht. Sie ist im Normalfall in relativ langsam gekühlten Klinkern zu erwarten.



1600 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 38

Regelmäßiger Saum von grauen Belitkristallchen mit Innenreflexen um schwarzen Alit. In der Grundmasse hellgraues Aluminat, weißlicher Ferrit und sekundärer Belit in kleinsten Einschlüssen. (Siehe auch Bild 13)



500 ×

H<sub>2</sub>O

Bild 37

Mittelgrauer Alit (50/20) mit hellgrauem Belitmantel (50/28). Die Grundmasse besteht aus weißlichem Ferrit und dunkelgrauem Aluminat (60/40). Die Einschlüsse in der Grundmasse, insbesondere im Aluminat, bestehen aus sekundärem Belit. Der Alit zeigt zahlreiche Schleifkratzer. (Siehe auch Bild 76, 137, 140)

Alit ist nur oberhalb etwa 1200 °C stabil. Demzufolge müßte ein bei Sintertemperatur gebildeter Alit beim Abkühlen wieder in Belit und Freikalk zerfallen. Diese Zerfallsreaktion verläuft gewöhnlich aber sehr langsam. Ein Betriebsklinker wird normalerweise schnell genug gekühlt, um den darin enthaltenen Alit in metastabilem Zustand einzufrieren. Es gibt jedoch Ausnahmen: Durch Einbau von fremden Ionen in den Alit kann sein Zerfall derart beschleunigt werden, daß auch normale Kühlgeschwindigkeiten nicht ausreichen, ihn einzufrieren. Man erkennt unter dem Mikroskop myrmekitische Verwachsungen von Belit und Freikalk pseudomorph nach Alit, zuweilen auch mit Relikten von unzersetztem Alit.

Dieser *Alitzerfall* kann einerseits durch höhere Alkaligehalte hervorgerufen sein, andererseits wird er aber auch durch Einbau von Fe<sup>2+</sup> in das Gitter des Alits stark beschleunigt. Tatsächlich konnte bisher in vielen Fällen die Ursache des Alitzerfalls in technischen Klinkern auf mäßig reduzierende Brennbedingungen in Gegenwart von Eisen und damit auf Anwesenheit von Fe<sup>2+</sup> zurückgeführt werden.

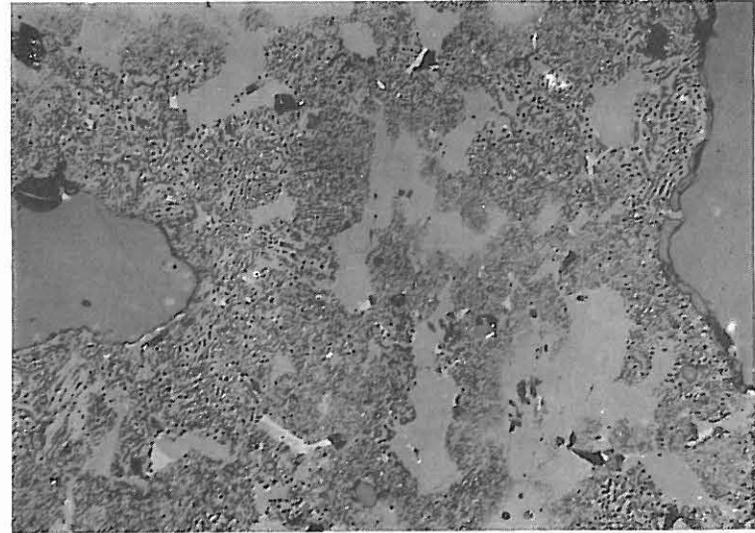


785 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

**Bild 39**

Bildung von feinverwachsenem Belit und Freikalk aus Alit (40/45). Die Zerfallsprodukte sind optisch praktisch nicht mehr aufzulösen. Der Zerfall setzt an einer Stelle ein und breitet sich von dort wie eine „Infektion“ über die Kristalle aus. Im Kern enthalten sie zum Teil noch unzersetzten Alit (40/30). Daneben graues Aluminat und weißlicher Ferrit. (Siehe auch Bild 40, 41, 64)



500 ×

Lufttätung

**Bild 41**

Der Schliß war einige Stunden der normalen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt, die den Freikalk farblich bis schwarz anlaufen ließ. Die Alitkristalle im Klinker sind weitgehend zerfallen. Die myrmekitischen Strukturen des schwarzen Zerfallsfreikalks lassen die Umrisse der ursprünglichen Alitkristalle erkennen. Ebenso sieht man, daß in den ursprünglichen Zentren des Zerfalls grobe Strukturen vorliegen, die nach außen immer feiner werden, bis der Zerfall eingefroren ist. Poren (95/40 und 10/40).

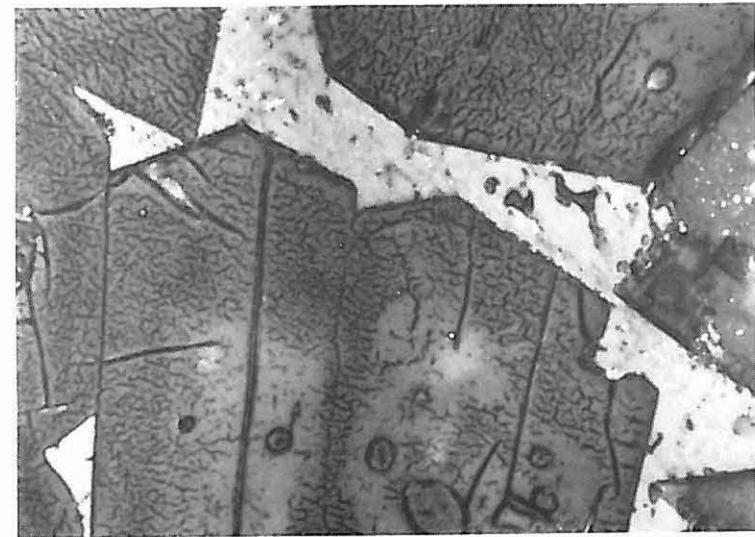


500 ×

H<sub>2</sub>O

**Bild 40**

Ein einzelner Alitkristall (70/60) ist teilweise zu hellgrauem Belit (60/40) und Freikalk (50/42) zerfallen. Als drittes Zerfallsprodukt entstand weißlicher Ferrit (42/40). An der oberen Bildseite ist noch ein Alitrelikt mit schwarzen Schleifkratzern zu erkennen. Die Umgebung besteht im wesentlichen aus grau reflektierendem Einbettungsmittel (20/50 und 80/15).



1400 ×

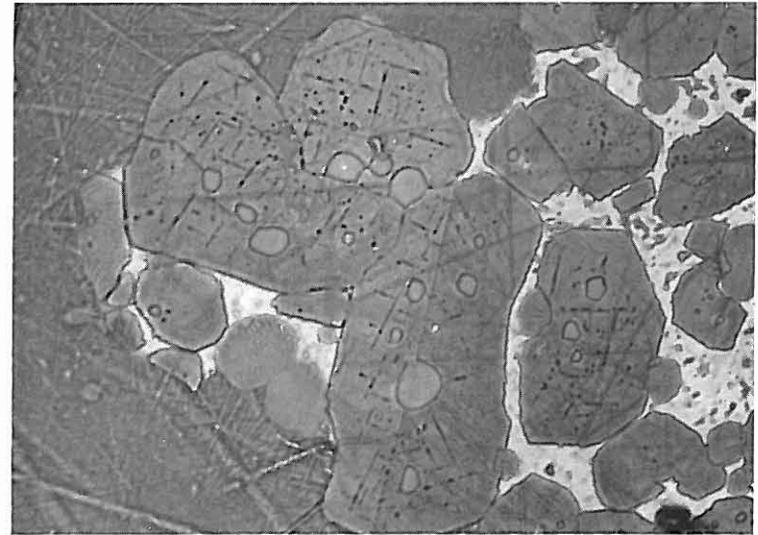
alkoh. HNO<sub>3</sub>

**Bild 42**

Große, idiomorphe Alitkristalle mit feinen Haarrissen und Sprungen. Im Inneren der Kristalle befinden sich Belitknoten (z. B. 55/5). Hier liegt kein Alit zerfallen vor! Vorsicht vor Verwechslungen! (Siehe auch Bild 1, 50, 58)

Gelangt jedoch ein solcher Alit, der gewisse Mengen  $\text{Fe}^{2+}$  aufgenommen hat, oberhalb der Zerfallsgrenze in oxydierende Atmosphäre, so wird das  $\text{Fe}^{2+}$  zu  $\text{Fe}^{3+}$  oxydiert. Da das  $\text{Fe}^{2+}$  substituierend für  $\text{Ca}^{2+}$  eingebaut war, fehlt nun dem Kristall eine bestimmte Menge Ca (bzw. zweiwertige, substituierende Ionen). Um wieder ein Gleichgewicht herzustellen, wird vom Alitkristall Belit ausgeschieden. Geschieht das noch bei Sinter-temperatur, so läßt sich der Prozeß mikroskopisch nicht mehr verfolgen. Bei niedrigeren Temperaturen, die immer über  $1200^\circ\text{C}$  liegen müssen, kann jedoch eine vollständige Ausscheidung des Belits nicht mehr stattfinden. Der Belit wird dann in schmalen Lamellen innerhalb des Alitkristalls auf kristallographisch orientierten Flächen (Rhomboiderflächen) ausgeschieden. Man erkennt meist drei in sich streng parallele Scharen von *Belitlamellen*, die sich kreuzen. (Die Winkel, unter denen sich die Lamellenscharen schneiden, sind von der jeweiligen Schnittlage abhängig. Es ist auch möglich, daß eine Schar überhaupt nicht erscheint.)

Diese Belitlamellen weisen in der Regel auf reduzierende Bedingungen in der Sinterzone hin. Der Klinker wurde erst später (etwa am Ofenauslauf) wieder voll oxydiert.



800×

$\text{H}_2\text{O}$

Bild 44

Belitlamellen in Alitkristallen. Der größte Alitkristall (55/30) ist außerdem verzwilligt. Die verschiedenartige Orientierung der Lamellenscharen in beiden Teilindividuen des Zwillings zeigt gleichzeitig auch die unterschiedliche Orientierung der letzteren. Daneben zahlreiche Belitknoten (55/20).

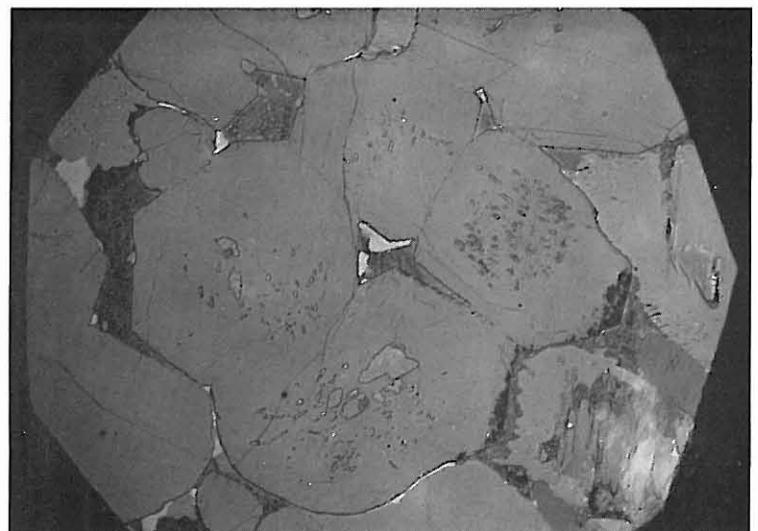


1500×

$\text{H}_2\text{O}$

Bild 43

Drei Scharen von Belitlamellen in einem Alitkristall. Wo die Lamellen mit Belitknoten zusammenlaufen, besteht eine Möglichkeit, die stoffliche Identität nachzuweisen. (Siehe auch Bild 44, 45)



500×

$\text{H}_2\text{O}$

Bild 45

Kleine Beliteinschlüsse als Andeutung von Belitlamellen im Alit weisen meist auf Luftmangel in der Sinterzone hin. Daneben auch größere Belitknoten (50/23) in denselben Alitkristallen.

### 3.3 Belit

Dicalciumsilicat wird im technischen Klinker als „Belit“ bezeichnet. Es enthält geringe Mengen fremder Komponenten in fester Lösung. Je nach Art und Menge der eingebauten Fremdionen ändern sich bestimmte physikalische Eigenschaften, z. B. die Farbe. Insgesamt sind vier verschiedene Modifikationen ( $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta$  und  $\gamma$ ) des Dicalciumsilicats bekannt. Im Klinker liegt in der Regel stabilisiertes  $\alpha'$ - oder  $\beta$ -C<sub>2</sub>S vor. Unter außergewöhnlichen Bedingungen können auch die anderen Modifikationen vorkommen. Mit Ausnahme der  $\gamma$ -Phase können sie jedoch im Auflicht nicht unterschieden werden. Den oft recht komplexen Phasenumwandlungen entsprechen ebenfalls komplexe Umwandlungsstrukturen. Es ist noch nicht möglich, die vielfältigen Erscheinungsformen des Belits bestimmten Phasen und Phasenumwandlungen eindeutig zuzuordnen.

Im folgenden werden daher die Strukturen ohne weitere Deutung lediglich beschrieben.

Belit entspricht dem C<sub>2</sub>S der Berechnung. Ein normaler Klinker enthält zwischen 10 und 30% Belit; doch werden diese Grenzwerte gelegentlich erheblich überschritten.

Im Durchlicht ist Belit farblos bis schwarz-bräunlich, manchmal aber auch gelblich oder grünlich gefärbt.

Die Dicalciumsilicat-Modifikationen haben folgende optische Eigenschaften:

Modifikation	Kristallsystem	Lichtbrechung	Doppelbrechung $n_z - n_x$	Achsenwinkel
$\alpha$ -C <sub>2</sub> S*	trigonal	$n_x = 1,702$ $n_z = 1,712$	0,010	(+) 2 V = 0°
$\alpha'$ -C <sub>2</sub> S (Bredigit)	rhombisch	$n_x = 1,713$ $n_y = 1,717$ $n_z = 1,732$	0,019	(+) 2 V = 30°**
$\beta$ -C <sub>2</sub> S (Larnit)	monoklin	$n_x = 1,717$ $n_y = 1,722$ $n_z = 1,736$	0,019	(+) 2 V = 64 bis 69°**
$\gamma$ -C <sub>2</sub> S (Shannonit)	rhombisch	$n_x = 1,642$ $n_y = 1,645$ $n_z = 1,654$	0,012	(-) 2 V = 60°

\* stabilisiert mit Na<sub>2</sub>O und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; \*\* gemessene Werte

Die Neigung des Belits zur Mischkristallbildung läßt teilweise erhebliche Abweichungen von diesen Werten zu.

Bei höheren Alkalikonzentrationen bildet sich Alkalibelit mit der Formel K<sub>2</sub>O · 23 CaO · 12 SiO<sub>2</sub>, der im Auflicht von Belit nicht zu unterscheiden ist. Die Lichtbrechung beträgt  $n_x = 1,694$ ;  $n_z = 1,702$ ; die Doppelbrechung  $n_z - n_x = 0,008$ ; 2 V = 20°.

Im Auflicht reflektiert Belit grau, wie Alit und Aluminat. Ungeätzt ist er von beiden nicht zu unterscheiden. Belit wird von allen üblichen Ätzmitteln angegriffen, jedoch weniger stark als Alit (siehe auch 2.4 Ätzen).

Belitkristalle sind fast immer idiomorph. Sie sind meist *kugelig* ausgebildet; dadurch unterscheiden sie sich typisch vom Alit.

Nach der Strukturätzung zeigen sich, je nach der Bildungsgeschichte, sehr *unterschiedliche Belittypen*. Nur in seltenen Fällen, meist in besonders schnell gekühlten Klinkern, z. B. in Laborpräparaten, weisen die Kristalle auch nach der Ätzung keinerlei Struktur auf (Bild 47).

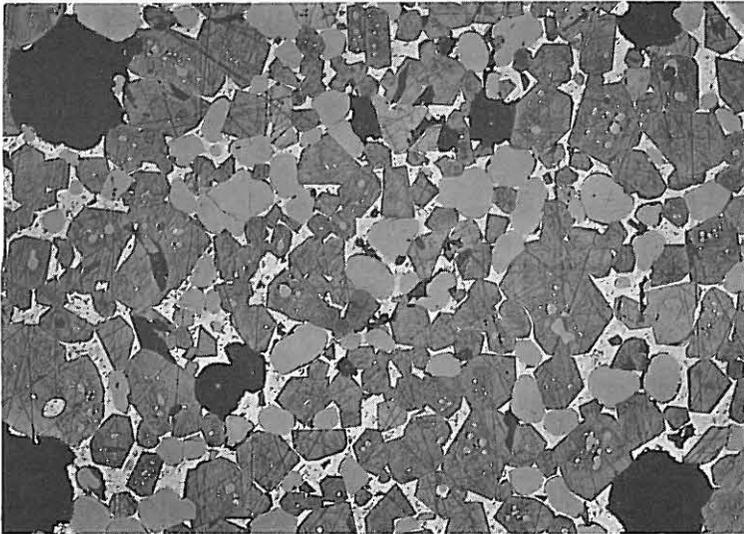


800×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 46

Rundliche Belitkristalle (z. B. 20/10) neben Alit (z. B. 55/50) mit typisch sechseckigem oder rechteckigem Querschnitt und Zonarbau. (Siehe auch Bild 10, 21)



200 ×

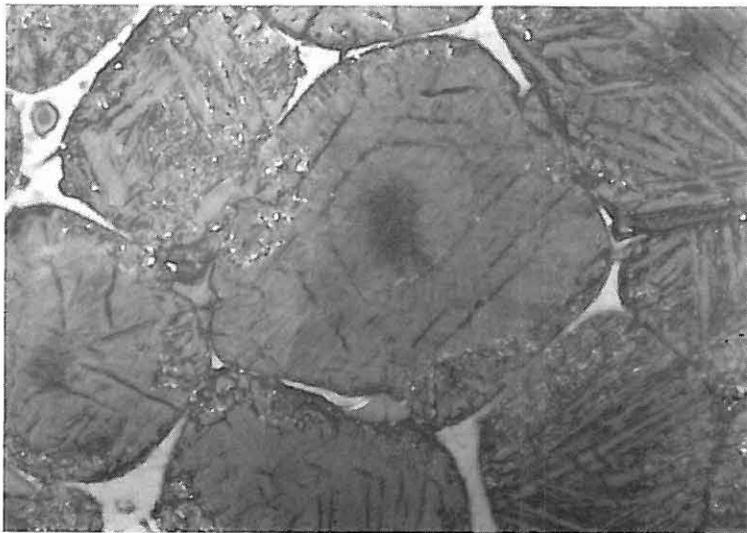
H<sub>2</sub>O

Bild 47

Glatte, runde Belitkristalle (40/25) ohne Streifung neben Alit mit Schleifkratzern. Fein verwachsene Grundmasse eines schnell gekühlten Klinkers. (Siehe auch Bild 31)

Die *ungestreifte Form*, die während der Abkühlung offensichtlich keinerlei Phasenumwandlungen mitgemacht hat, neigt dazu, Risse und Sprünge zu bilden, die anscheinend auf Spannungszustände während des schnellen Abkühlens zurückzuführen sind.

Typisch ist vor allem eine *Kreuzstreifung* der Kristalle. Sie besteht aus mehreren Scharen sich kreuzender Lamellen. Im Schnitt vermitteln sie den Eindruck einer lanzett-, spindel- oder nadelförmigen Streifung.

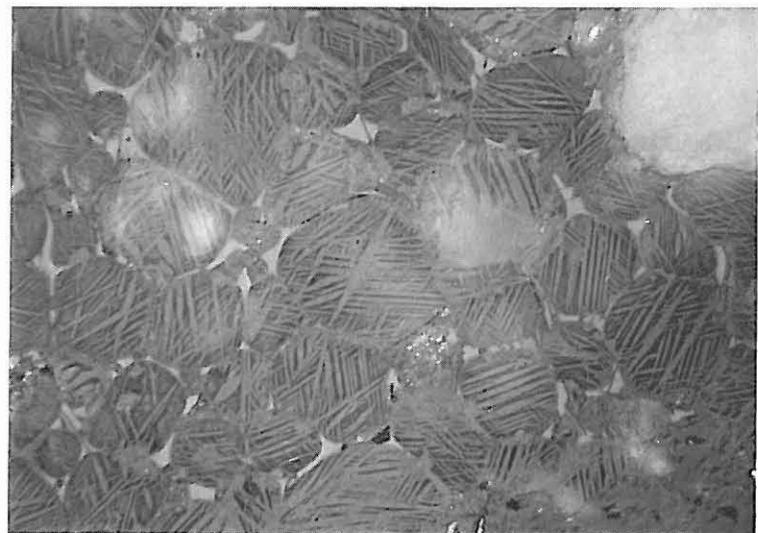


1320 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 48

Unverzwilligter Belit (50/40) mit konzentrischen und radialen Rissen. Daneben Belit (80/10) mit Kreuzlamellierung. (Siehe auch Bild 49, 52)



800 ×

H<sub>2</sub>O

Bild 49

Typische Kreuzstreifung der Belitkristalle. Diese Form verdrängt die ursprünglich ungestreifte, glatte, die im Kern des einen Kristalls (65/40) noch als Relikt erhalten blieb.



540 ×

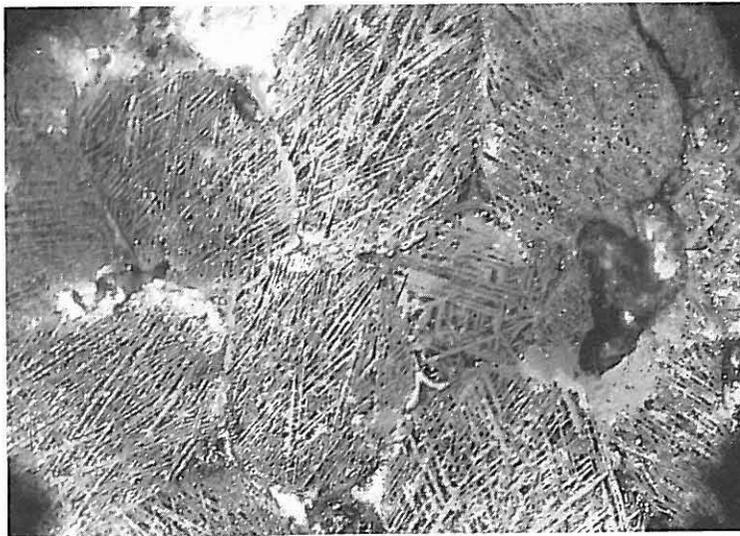
H<sub>2</sub>O und DAC

Bild 50

Alkalihaltiger Versuchsklinker: Belit mit sehr breiten Lamellen, daneben stark korrodierter Alit (80/60 und 15/45), zum Teil mit Kühlrissen und lanzettartiger Streifung, und dunkelgraues, lamellares Aluminat (20/30). Poren (40/15 und 96/30).

Die Neigung des Belits zur Sammelkristallisation führt dazu, daß bestimmte Lamellen der oben beschriebenen kreuzlamellierten Formen auf Kosten von anderen wachsen und dabei auch über die ursprünglichen Begrenzungen des rundlichen Ausgangskristalls hinauswachsen können. Auch dadurch entstehen *gelappte Belite*. Da solche Umkristallisation eine gewisse Zeit beansprucht, kann diese Erscheinung nur in relativ langsam gekühlten Klinkern beobachtet werden.

Wesentlich seltener als die oben beschriebene Kreuzstreifung ist eine *polysynthetische Verzwilligung* mit einer typischen *Parallelstreifung der Belitkristalle* (Bild 55 bis 57).

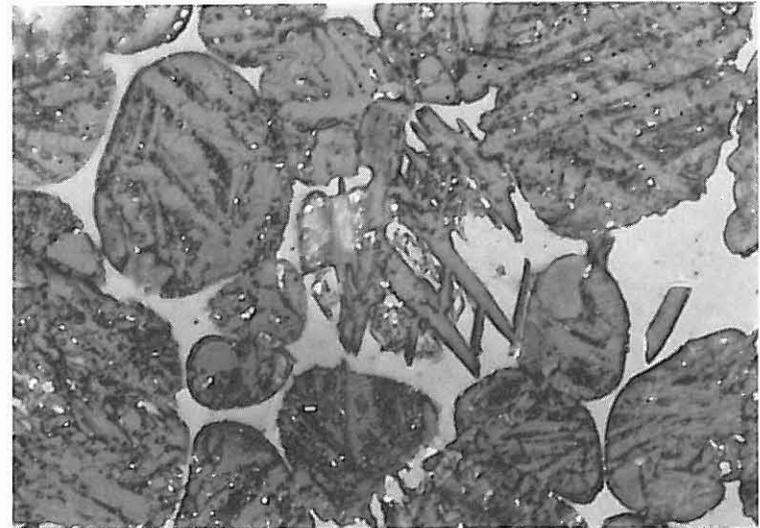


600 ×

DAC

Bild 51

Belit mit feinsten Kreuzstreifung, in jedem Kristall mehrere sich kreuzende Lamellenscharen.  
(Siehe auch Bild 71, 123)



1850 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 52

Einzelne Lamellenscharen eines Belits mit Kreuzstreifung wachsen auf Kosten anderer. Das Ergebnis ist schließlich eine vollständige Aufgliederung des ursprünglichen Kristalls in einzelne Belitlamellen mit spindelförmigem Querschnitt.

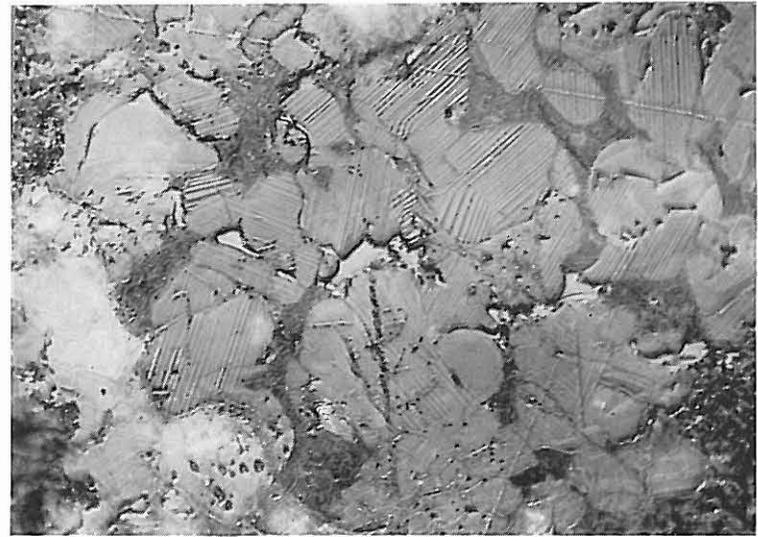


800×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 53

Auflösung des ursprünglichen Belitkristalls in gelappten Belit. Die Grundmasse besteht aus hellgrauem Ferrit und mittelgrauem Aluminat. (Siehe auch Bild 16, 54, 62)



750×

DAC (sehr stark)

Bild 55

Parallelstreifung des Belits. (Siehe auch Bild 16, 56, 63)

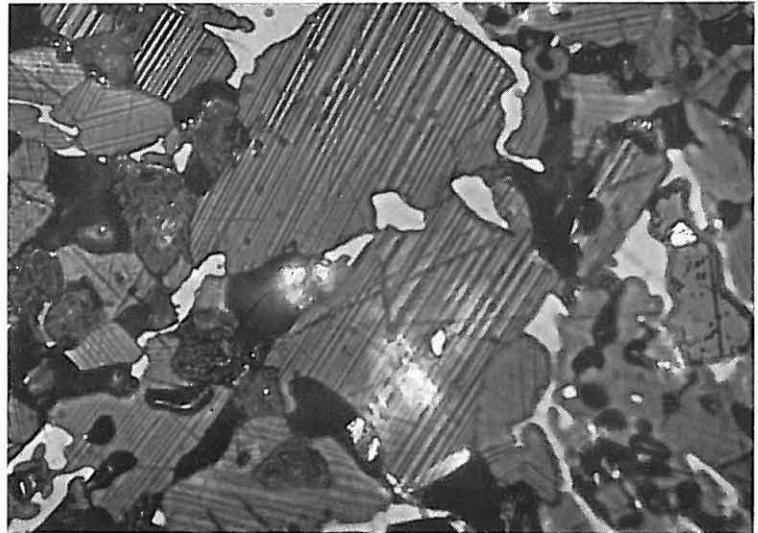


460×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 54

Gelappter Belit. Nahezu vollständiger Auflösungsprozeß.

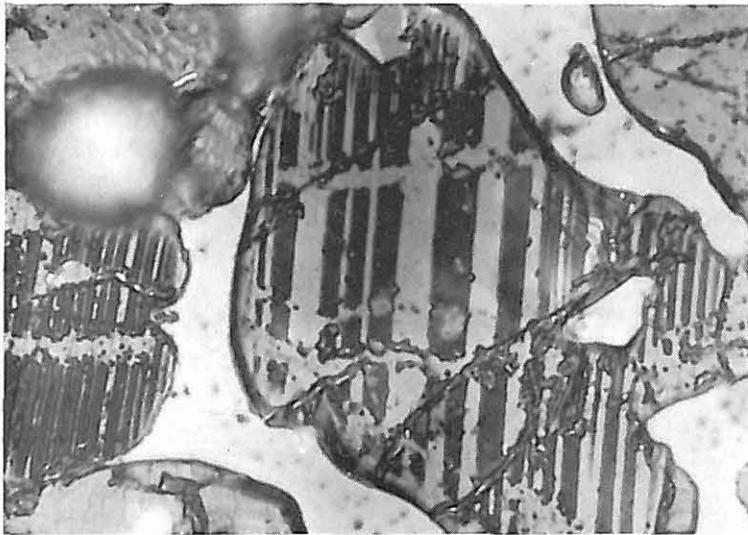


1600×

DAC

Bild 56

Belitkristalle mit untypischen Umrissen und ausgeprägter Parallelstreifung. Hier ist Vorsicht geboten, um eine Verwechslung mit Alit zu vermeiden.

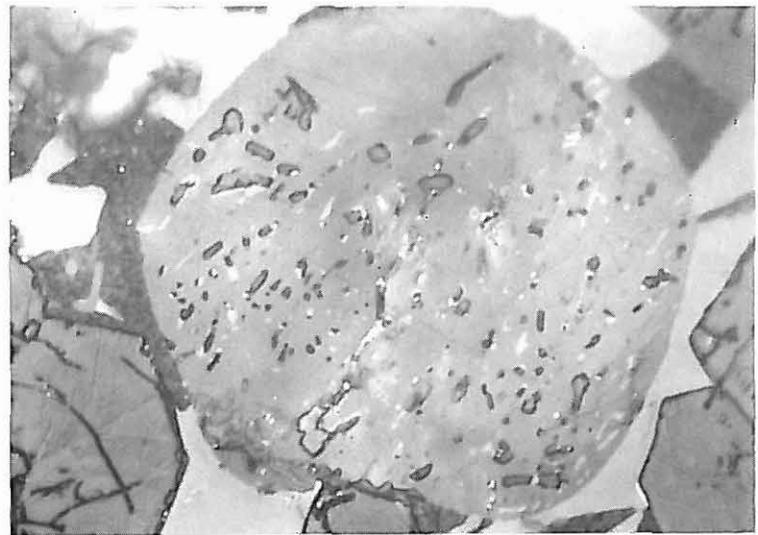


1500 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 57  
Parallelstreifung des Belits.  
(Siehe auch Bild 65)

Alle bisher genannten Formen des Belits können von einem weiteren Typ verdrängt werden, der offensichtlich nicht in der Lage ist, dieselbe Menge fremder Komponenten einzubauen wie die Kristalle, aus denen er hervorging. Ein vorhandener Überschuß an Fremdkomponenten wird also ausgeschieden. Infolgedessen erscheinen neue Phasen als *Fremdeinschlüsse* innerhalb des Belitkristalls. Mit Ausnahme von Freikalk können alle Klinkerphasen als *Fremdeinschlüsse* vorkommen. Mengenmäßig steht Alit immer an erster Stelle. Das bedeutet, daß Belit bei höheren Temperaturen in der Lage ist, neben anderen Komponenten vor allem einen Überschuß an CaO zu binden. An zweiter Stelle folgt Ferrit. Aluminat scheint selten zu sein und ist noch nicht mit Sicherheit nachgewiesen. Die Einschlüsse sind oft so klein, daß sie optisch nicht mehr auflösbar sind. Der an sich strukturlose, neugebildete Kristall fällt dann durch Innenreflexe und eine diffuse Reflexion auf. Strukturen, die auf eine abermalige Umwandlung dieses Belittyps hindeuten, sind nicht bekannt.

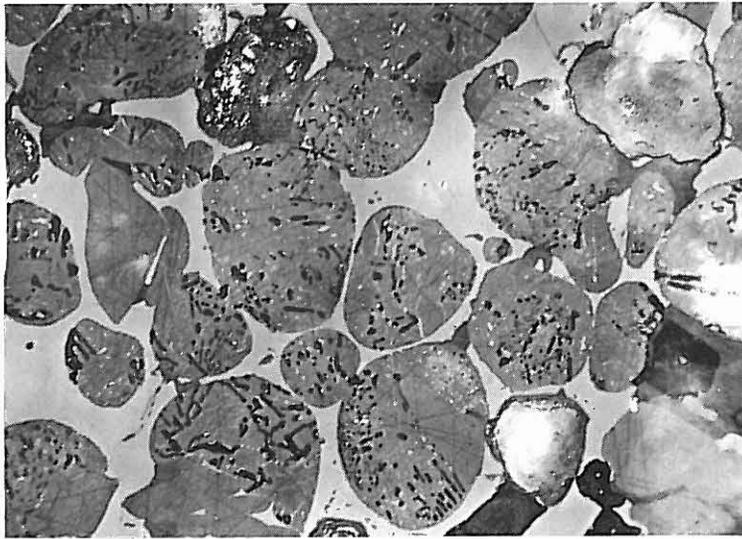


1300 ×

DAC

Bild 58  
Belit (50/40) mit Fremdeinschlüssen. Am Rande sechsseitige Alitkristalle (z.B. 10/10), in der Grundmasse weißlicher Ferrit (30/5) und dunkelgraues Aluminat (15/40). Auf Grund des Ätzverhaltens lassen sich die größeren Einschlüsse im Belit als Alit bestimmen; daneben feinere Ferriteinschlüsse. (Siehe auch Bild 10, 59, 60, 63)

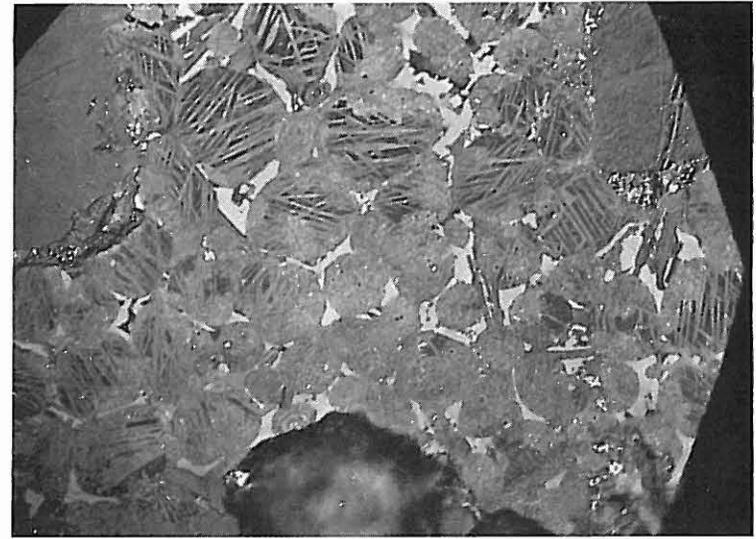
Die Tatsache, daß im Verlaufe der hier beschriebenen Umkristallisation Alit als Fremdeinschluß im neugebildeten Belit entsteht, läßt darauf schließen, daß dieser Prozeß selber im Stabilitätsbereich des Alits, also über 1200°C, abgelaufen sein muß. Eine Umwandlung des  $\alpha'$ -C<sub>2</sub>S in  $\beta$ -C<sub>2</sub>S, die bei 670°C erfolgen müßte, läßt sich an Hand der Belitstrukturen nicht nachweisen.



500 ×

H<sub>2</sub>O

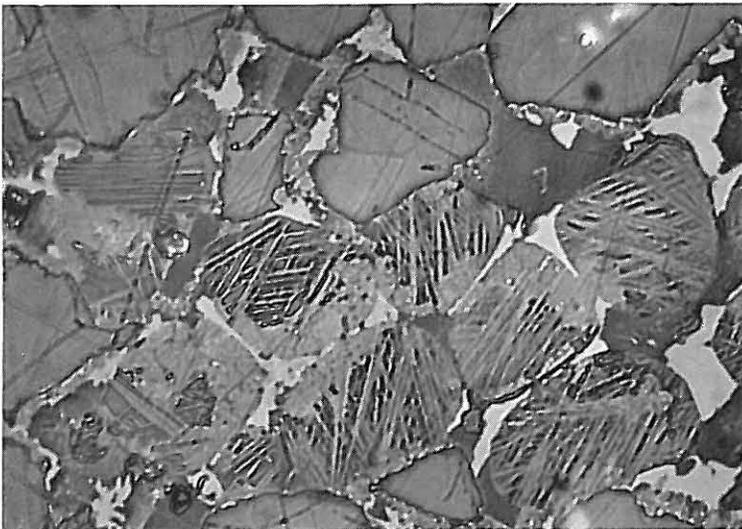
Bild 59  
Belit mit Alit- und Ferriteinschlüssen verdrängt einen älteren Typ, der hier noch teilweise in Form ungestreifter Relikte erhalten ist (55/15).



500 ×

H<sub>2</sub>O

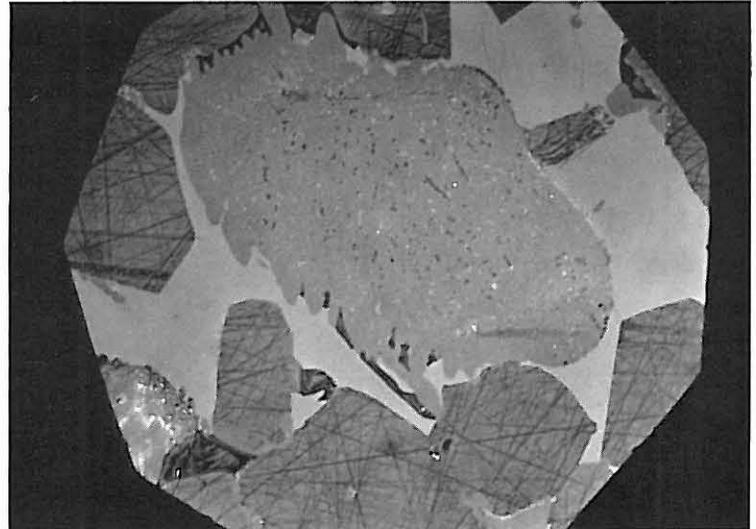
Bild 61  
Belit mit Kreuzlamellierung (30/55) wird von diffus reflektierendem Belit (50/25) verdrängt. Die einzelnen Einschlüsse sind so klein, daß sie optisch nicht mehr aufgelöst werden können. Poren (50/10, 10/50, 85/60).



1080 ×

H<sub>2</sub>O und DAC

Bild 60  
Belitkristalle mit Kreuzstreifung werden vom Rande her von einem anderen Belittyp verdrängt. Am Bildrand Alitkristalle. Die Grundmasse besteht aus weißlichem Ferrit und dunkelgrauem Aluminat. (Siehe auch Bild 61)



1000 ×

H<sub>2</sub>O

Bild 62  
Gelappter Belit, vollkommen verdrängt von einem neuen Typ unter gleichzeitiger Ausscheidung von Fremdphasen, die hier, abgesehen vom Ferrit, nicht mit Sicherheit bestimmt werden können. Daneben Alit mit zahlreichen Schleifkratzern, Ferrit und Aluminat.

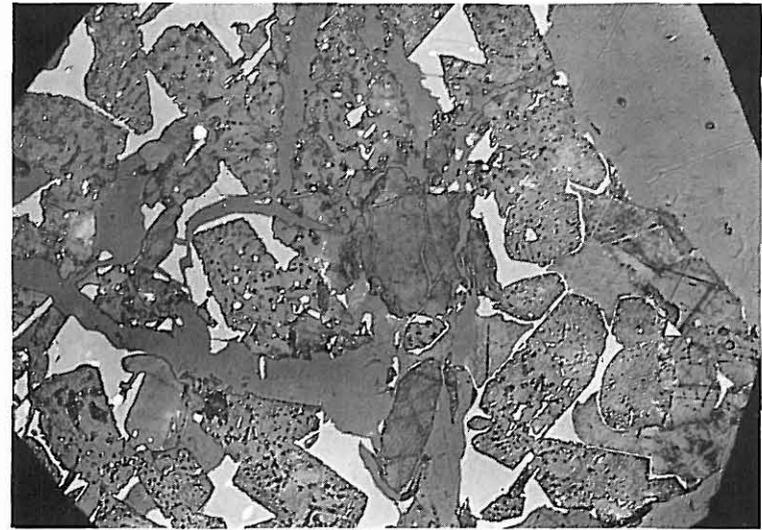


500×

H<sub>2</sub>O

Bild 63

Belit mit Parallelstreifung ist hier nahezu völlig von diffus reflektierendem Belit mit Einschlüssen verdrängt. Nur in der Bildmitte, bei (50/30), ist ein Relikt erhalten geblieben. Poren (60/20, 80/20).



500×

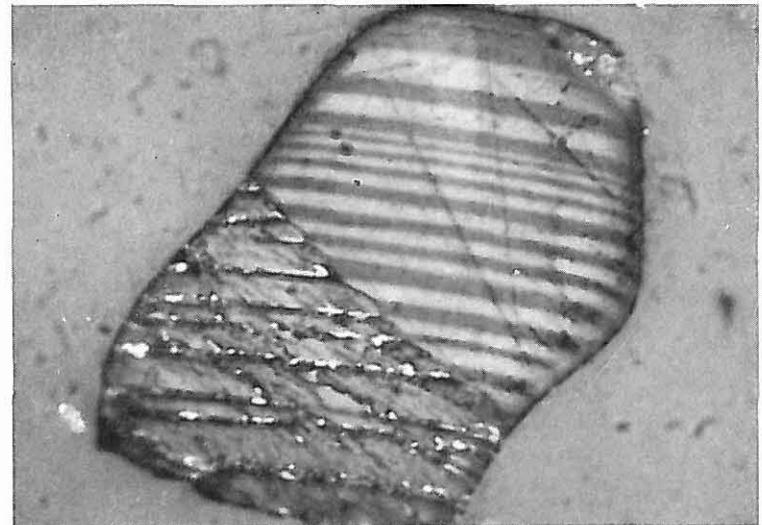
alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 64

In der Bildmitte, bei (50/35) und (53/15), zwei dunkelgraue  $\gamma$ -Belitkristalle mit mehreren Rissen und Sprüngen, die hier, wie auch in der Umgebung, mit dunkelgrauem, glattem Harz (60/25 und 35/45) ausgefüllt sind. Ausgehend von diesem Kristall ist der ganze Klinker gesprengt. Daneben zerfallener Alit (z. B. 85/20). Nur der primäre Belit ist hier zerrieselt, nicht der durch Alitzerfall entstandene „Zerfallsbelit“. (Siehe auch Bild 65)

Die Bilder 58 bis 63 zeigen, daß in einem Klinker *mehrere Belit-typen nebeneinander* vorkommen können. Das gilt nicht nur für unvollkommene Verdrängung einer Belitform durch eine andere, sondern auch ganz allgemein. So kann man gelegentlich in einem einzelnen Klinkerstück dicht nebeneinander kreuzlamellierten und gelappten Belit beobachten.

Nur der  $\gamma$ -Belit kann auflichtmikroskopisch von den anderen Modifikationen sicher unterschieden werden. Da mit der Umwandlung zum  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S eine Volumenzunahme verbunden ist, wird der Klinker, der  $\gamma$ -Belit enthält, gesprengt. Das „Zerrieseln“ ist eine außerordentlich typische Erscheinung, die damit schon den Verdacht auf  $\gamma$ -Belit nahelegt. In dem zerrieselten Klinker weisen auch die Belitkristalle selber Risse und Sprengerscheinungen auf, die nicht zu übersehen sind.  $\gamma$ -Belit reflektiert deutlich schwächer als die anderen Silicatphasen des Klinkers. Die normalerweise eingefrorene Umwandlung zum  $\gamma$ -Belit wird durch Fe<sup>2+</sup> stark beschleunigt. Sie läßt auf reduzierende Brennbedingungen im Klinker schließen. (Im Ofenansatz dagegen liegen andere Verhältnisse vor: Hier führt das lang andauernde Tempern des Klinkers zum Zerrieseln.)



1620×

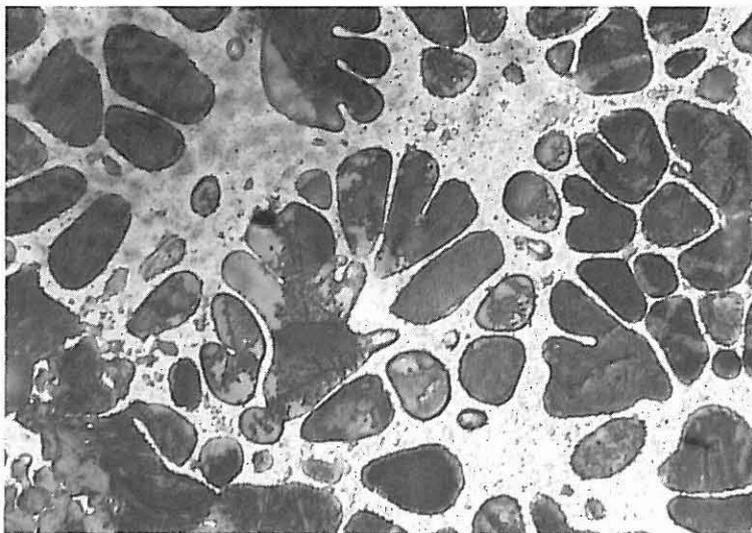
(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> x

Bild 65 (Dr. E. Bartosch, Gartenau/Salzburg)

Ein einzelner, parallelgestreifter Belitkristall ist teilweise umgewandelt in  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S unter gleichzeitigem „Zerrieseln“. Dabei wird der Kristall parallel zu der Zwillingsstreifung aufgesprengt.

Wird Belit in größeren Mengen aus der Schmelzphase ausgeschieden, so entstehen recht typische, stark zergliederte, *dendritische Belitkristalle*. Die dendritische Struktur ist meistens sehr fein, doch finden sich auch Übergänge zu grobem Wachstum.

Die Zusammensetzung des *Alkalibelits* entspricht nach W. C. Taylor der Formel  $K_2O \cdot 23 CaO \cdot 12 SiO_2$ . Er ist im Auflicht nicht vom Belit zu unterscheiden, da er dasselbe Ätzverhalten und dieselben Wachstumsformen aufweist. Allerdings zeigt er selten die für normalen Belit so typischen Umwandlungslamellierungen, sondern bevorzugt die ungestreifte, glatte Form. In Bild 66 handelt es sich wahrscheinlich um Alkalibelit, hier allerdings zum Teil mit feiner, polysynthetischer Streifung. Alkalibelit reagiert im Unterschied zu Belit auch bei normalen Sinter-temperaturen nicht mehr mit Freikalk zu Alit. Das Vorkommen von Freikalk neben Belit in einem normal gebrannten Klinker ist das einzige sichere mikroskopische Kennzeichen zur Bestimmung von Alkalibelit (siehe Bild 67, 88, 89).

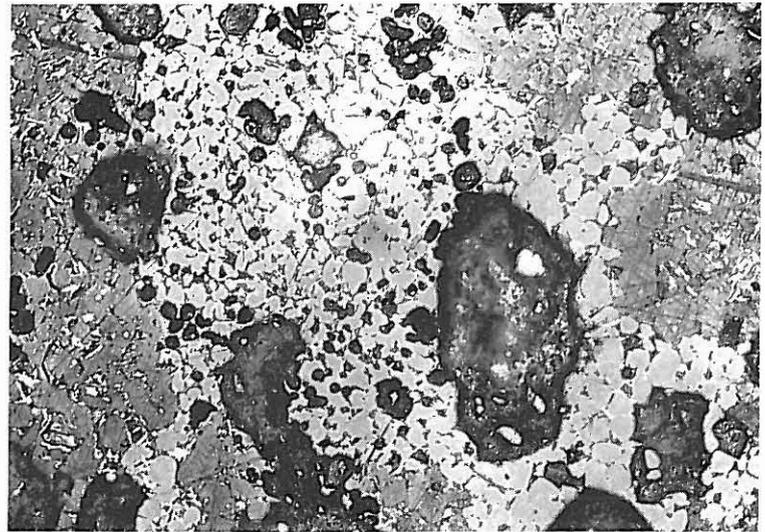


500 ×

alkoh.  $HNO_3$

Bild 66

Dendritischer Belit in ungewöhnlich grober Wachstumsstruktur. Der Belitkristall in der Bildmitte zeigt deutliche Parallelstreifung. Der Klinker wurde aus feldspathaltigen Rohstoffen erbrannt und ist infolgedessen alkalireich.



100 ×

$H_2O$

Bild 67

Rechts und links im Bild Alitpartien mit Schleifkratzern. In der Mitte dagegen ein Ausschnitt aus einer alkalireicheren Schliere mit mittelgrauem Belit und schwarzem Freikalk. Die Partie ist arm an Grundmasse; weißlicher Ferrit und dunkelgraues Aluminat. Die großen, rauhen, dunkelgrauen Partien sind Poren (z. B. 65/30).

### 3.4 Grundmasse

Ein normaler Klinker enthält bei  $1450^\circ C$  neben den bei Sinter-temperatur durch Festkörperreaktionen gebildeten *primären Phasen* etwa 30% Schmelzphase. Beim Erkalten kristallisieren aus dieser Schmelze die sogenannten *sekundären Phasen* aus. Hierzu gehören in erster Linie *Aluminat* und *Ferrit*, daneben aber auch noch andere Verbindungen.

Unter letzteren ist die weitaus häufigste Belit, doch können hier nach den jeweils gegebenen Voraussetzungen auch alle anderen Klinkerphasen erscheinen. Um diese Ausscheidungen von den gleichartigen, schon bei Sintertemperatur gebildeten primären Phasen zu unterscheiden, nennt man sie auch Bildungen der *zweiten Generation*. Die Gesamtheit der aus der Schmelze auskristallisierenden Verbindungen wird in dem Begriff *Grundmasse* zusammengefaßt.

Die Zusammensetzung der Grundmasse wird durch den Chemismus des Klinkers, und zwar vor allem durch den Tonerdemodul  $Al_2O_3 : Fe_2O_3$  bestimmt: Klinker mit hohem Tonerdemodul sind aluminatreich, Klinker mit niedrigem Tonerdemodul dagegen aluminatarm, aber reich an Ferrit. Bei einem Tonerdemodul kleiner als 0,7 kann Aluminat vollkommen verschwinden.

Auch die Ausscheidungsfolge wird von der Zusammensetzung bestimmt. Bei hohem Tonerdemodul kristallisiert zunächst Aluminat aus. Dadurch wird in der Restschmelze Eisenoxyd angereichert. Erst wenn die Zusammensetzung der Restschmelze einen Tonerdemodul von etwa 1,5 erreicht, kristallisieren Aluminat und Ferrit gemeinsam aus. Dieser Ablauf läßt sich mikroskopisch verfolgen: Das zuerst ausgeschiedene Aluminat bildet große, idiomorphe Kristalle, die ihrerseits von jüngerem feinkristallinem Aluminat und Ferrit in inniger Verwachsung umgeben sind (vgl. Bild 71 und 72). Analog wird bei niedrigem Tonerdemodul zuerst idiomorpher Ferrit ausgeschieden. Ist dadurch die Restschmelze so weit an Eisen verarmt, daß ihr  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Verhältnis den Wert 1,5 erreicht, so kristallisieren auch hier weiterhin Aluminat und Ferrit nebeneinander aus (Bild 78). Die hier geschilderten Verhältnisse gelten strenggenommen nur, solange die Kristallisation unter Gleichgewichtsbedingungen erfolgt. Das ist im technischen Klinker nur selten der Fall. Durch rasches Abschrecken des Klinkers wird die Schmelze unterkühlt. Infolgedessen kann der wesentlich kristallisationsfreudigere Ferrit oft auch in Klinkern mit recht hohem Tonerdemodul noch als Erstausscheidung vorkommen (z. B. Bild 137).

### 3.4.1 Glas

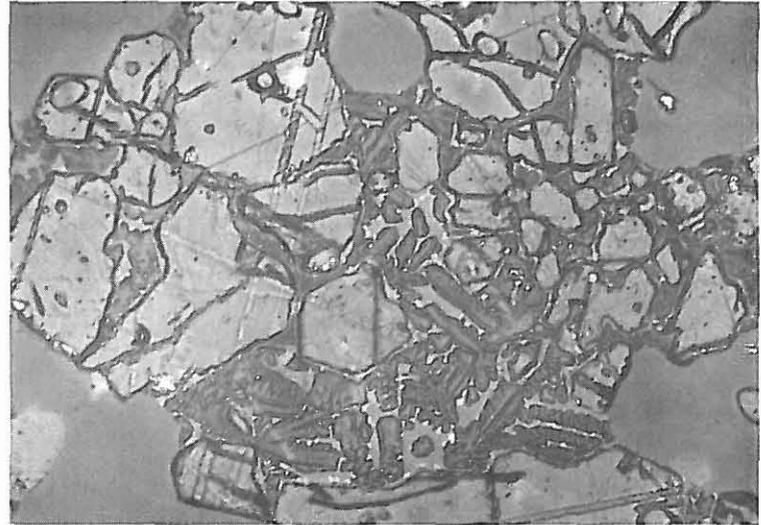
In sehr schnell abgeschrecktem Klinker kann die Schmelze, welche die Zwickel zwischen anderen Phasen ausfüllt, *glasig* erstarren. Die Zusammensetzung des Glases entspricht der Zusammensetzung der Schmelze, aus der es hervorgeht, sie kann also in weiten Grenzen schwanken. Dementsprechend ändern sich auch seine Eigenschaften, wie z.B. Reflexions- und Ätzverhalten.

Die Schmelzphase eines Portlandzementes ist jedoch außerordentlich kristallisationsfreudig, um so mehr, je höher ihr Eisengehalt liegt. Unter normalen Betriebsbedingungen dürfte es kaum möglich sein, die Schmelze zum Glas einzufrieren.

### 3.4.2 Aluminat

Das Aluminat des Portlandzementklinkers entspricht im wesentlichen der Verbindung Tricalciumaluminat ( $\text{C}_3\text{A}$ ), deren Eigenschaften jedoch durch Mischkristallbildung mehr oder weniger modifiziert sind.

In alkaliarmen bzw. alkalifreien Klinkern kristallisiert ein kubisches Aluminat. Im Durchlicht erscheint es farblos, durch Fremdbeimengungen wird es leicht gefärbt. Der Brechungsindex beträgt  $n = 1,710$ . Im Auflicht reflektiert Aluminat grau. Es läßt sich erst nach entsprechendem Ätzen von Alit und Belit unterscheiden. Aluminat reagiert besonders stark auf Wasser,



500×

H<sub>2</sub>O und DAC

Bild 68

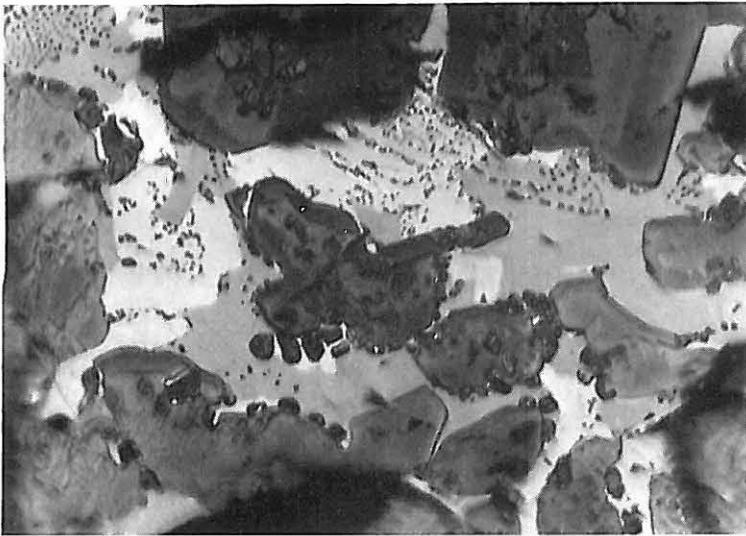
Sehr schnell gekühlter Weißklinker:

Große Alitkristalle (z. B. 40/25) zwischen einer Grundmasse aus dunkelgrauen Aluminatendriten (60/30) in noch nicht kristallisiertem, mittelgrau reflektierendem Glas. Die großen, glatten, mittelgrauen Flächen an den Bildrändern sind harzgefüllte Poren. Ein paar helle Pünktchen in der Grundmasse sind Innenreflexe. Ferrit konnte sich im eisenfreien Präparat nicht bilden.

wobei schnell eine sattblaue bis blaubraune Färbung entsteht. KOH wirkt ähnlich, greift aber nicht wie Wasser die Silicate und den Freikalk an. (Vergleiche auch 2.4 Ätzen.)

Das Aluminat eines alkaliarmen Klinkers ist fast ausnahmslos xenomorph, d. h. ohne eigene, typische Kristallflächen. Es füllt die im Klinkergefüge verbliebenen Zwischenräume und zeigt auch im Schnitt nur unregelmäßige Umrisse. Nur in seltenen Ausnahmefällen kommen auch idiomorphe Aluminatkristalle vor.

Obwohl Aluminat nur selten in größeren, zusammenhängenden Partien auftritt, sind die Kristalle unter dem Mikroskop oft über relativ weite Bereiche einheitlich orientiert. Leider ist diese Eigenschaft beim optisch isotropen Aluminat wesentlich schlechter zu verfolgen als beim Ferrit (siehe Bild 6), dessen einheitliche Orientierung im Dünnschliff an Hand der Auslöschung zwischen gekreuzten Nicols und am Pleochroismus zu beobachten ist.



785 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

**Bild 69**

Typischer Ausschnitt aus einem alkaliarmen Klinker. Idiomorphe, dunkelgraue Alitkristalle (80/60) in einer Grundmasse von xenomorphem, mittelgrauem Aluminat (70/35) und weißlichgrauem Ferrit (20/30). In der Grundmasse feinste Entmischungskörper von sekundärem Belit (70/45). (Siehe auch Bild 24, 29, 35, 39, 53, 70)

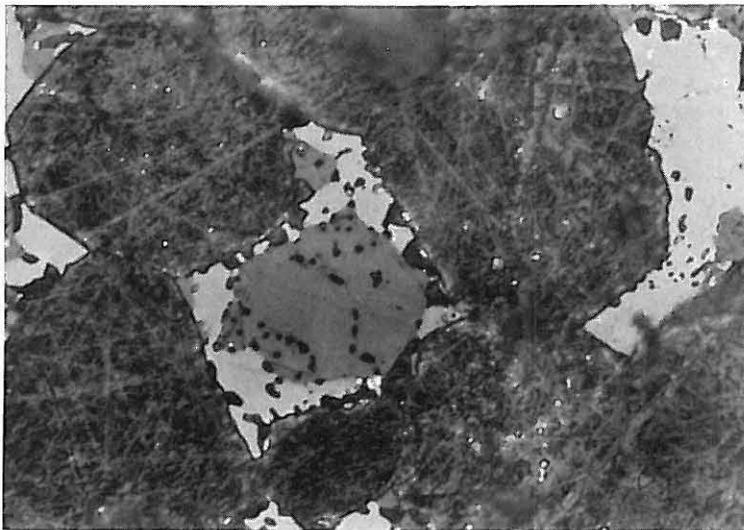


540 ×

DAC

**Bild 71**

Mittelgraues Aluminat (35/50) mit deutlicher Kristallflächenbegrenzung als Primärausscheidung aus der Schmelze. Daneben feinkristalline Verwachsungen von weißlichem Ferrit, dunklem Aluminat und kleinen Einschlüssen von sekundärem Periklas (30/40) mit deutlichem Relief. In der ferritreichen Stelle (20/63) mehrere kleine, aus der Schmelze ausgeschiedene Belite mit Streifung. Im rechten Bildteil sind große Belitkristalle mit Kreuzstreifung zu erkennen.

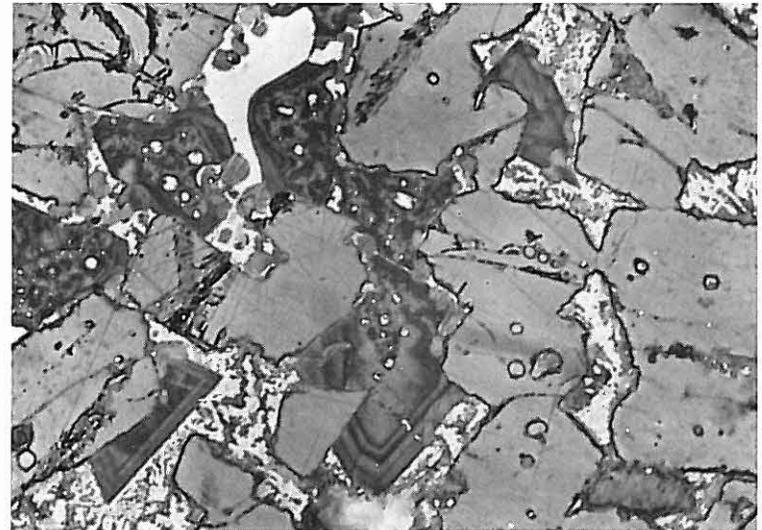


1400 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

**Bild 70**

Dunkelgraue Alitkristalle (70/40) in einer Grundmasse von weißlichem Ferrit und glattem, mittelgrauem Aluminat (45/30). Die schwarzen Punkte sind feine Belit-Entmischungskörper in der Grundmasse.

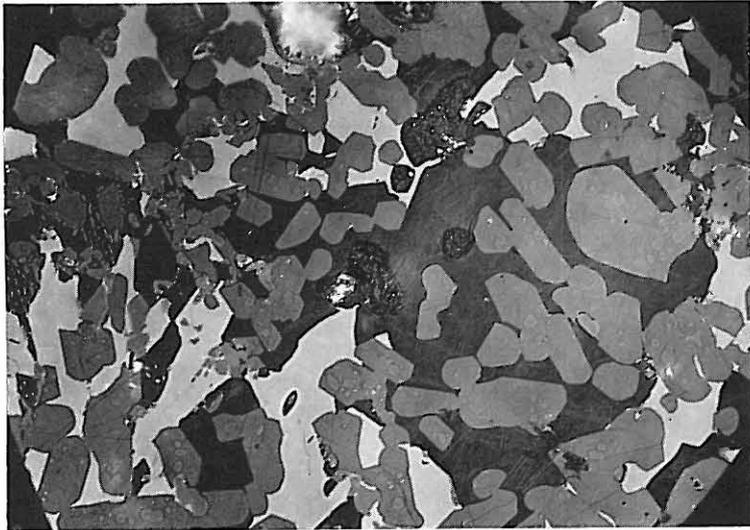


1080 ×

H<sub>2</sub>O und DAC

**Bild 72**

Idiomorphe, dunkelgraue Aluminatkristalle neben weißlichem Ferrit und korrodierten Alitkristallen. Der Zonarbau der Aluminatkristalle ist auf wechselnde Zusammensetzung der einzelnen Schichten zurückzuführen (s. S. 22). In den Aluminatkristallen liegen Ferriteinschlüsse. Aluminat mit Zonarbau ist außerordentlich selten.



500×

H<sub>2</sub>O

Bild 73

Im Bild ist der Anteil an Grundmasse besonders hoch. Dunkelgraue Aluminatkristalle (55/40) sind zu großen Individuen angewachsen und schließen dabei typische, hellgraue Alitkristalle (70/18) ein. Dasselbe gilt für den umgebenden weißlichen Ferrit (40/20). Schwarzgraue, rundliche, rauhe Flecken sind Freikalk (50/30). Aluminat- und Ferritkristalle sind auch dann in der Lage, die Silicate zu umwachsen, wenn der Anteil an Grundmasse geringer ist.

### 3.4.3 Alkalialuminat

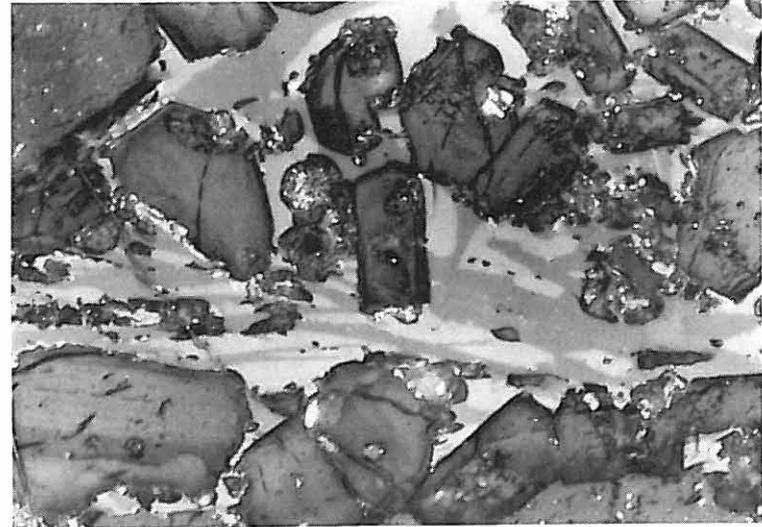
In Gegenwart von Alkalien entsteht im Klinker statt des reinen Tricalciumaluminats ein Alkalialuminat, das im Gegensatz zum ersteren dazu neigt, idiomorphe Kristalle zu bilden. Dabei entstehen Lamellen bzw. dünn tafelige Kristalle, die deshalb im Schnitt meist als lange Leisten erscheinen. Diese Leisten führten vielfach zu der irrigen Bezeichnung „prismatisches“ Aluminat.

Das Alkalialuminat hat folgende optische Eigenschaften:

Lichtbrechung:  $n_x = 1,702$ ;  $n_z = 1,710$   
 Doppelbrechung:  $n_z - n_x = 0,008$   
 Achsenwinkel:  $(-)$  2 V  
 Farbe: farblos

Diese Kristalle gehören nicht mehr dem kubischen System an, sondern sind niedriger symmetrisch.

Im Auflicht verhält sich Alkalialuminat analog dem Aluminat in alkalifreien Klinkern, ebenso im Ätzverhalten.

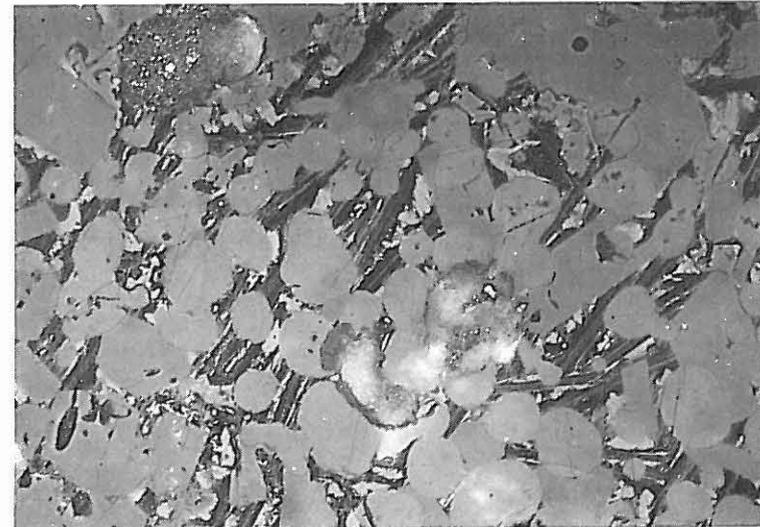


1800×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 74

Langgestreckte Leisten von mittelgrauem Alkalialuminat (70/25) neben weißlichem Ferrit (60/25) in der Grundmasse eines Klinkers. Daneben dunkelgraue Alitkristalle (20/15) und rundliche Belite (40/45). Die rauen Partien sind harzgefüllte Poren (80/0 und 10/60).



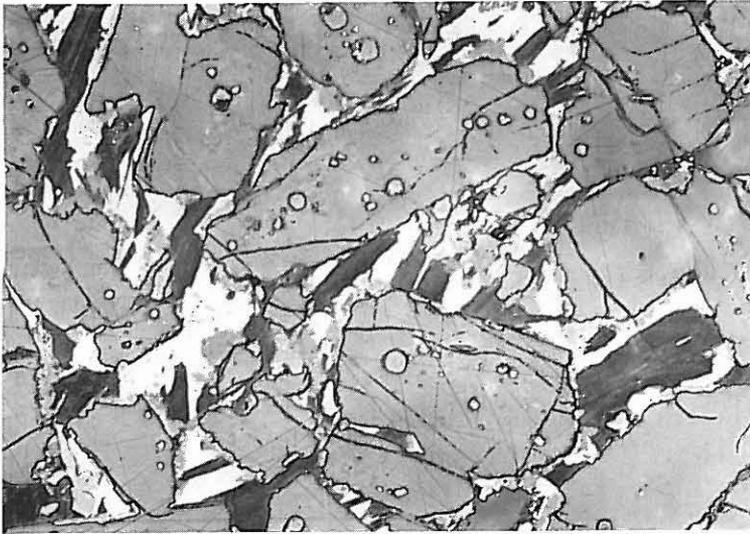
500×

20% KOH

Bild 75

Idiomorphe Lamellen von dunkelgrauem Alkalialuminat neben rundlichem Freikalk (65/5), Alit (20/20), der etwas dunkler als Freikalk ist, und weißlichem Ferrit. Zugleich Beispiel für die Ätzwirkung von KOH: Aluminat ist satt gefärbt, Ferrit wird schwach angelöst, die anderen Phasen reagieren nicht.

(Siehe auch Bild 139, 140)



650× H<sub>2</sub>O und DAC

Bild 76

Lamellares Aluminat mit unterschiedlicher Anfärbung in einem langsam gekühlten Klinker. Daneben Ferrit und korrodierte Alitkristalle mit Belitknötchen. Die hellgrauen Anteile in der Grundmasse sind Belit (30/25), der teilweise den Alit umsäumt.

#### 3.4.4 Ferrit

Das Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> des Zementklinkers ist, von geringfügiger Mischkristallbildung mit allen anderen Phasen abgesehen, im Ferrit, einem Glied der lückenlosen Mischkristallreihe zwischen den Endgliedern C<sub>2</sub>F und C<sub>6</sub>A<sub>2</sub>F, gebunden. In der Phasenberechnung nach Bogue wird das Glied C<sub>4</sub>AF als Berechnungsgrundlage gewählt, und tatsächlich weist der Ferrit im normalen Klinker mit Tonerdemodul ≈ 2 etwa diese Zusammensetzung auf. In besonders eisenreichen Klinkern mit einem Tonerdemodul unter 0,6 bildet sich ein entsprechend eisenreicherer Ferrit.

Im normalen Klinker ist die Ferritphase im Durchlicht dunkelbraun bis gelb und unterschiedlich stark pleochroitisch. Der Einbau von Magnesium beeinflusst die Farbe und den Pleochroismus. Mit zunehmendem Magnesiumgehalt ändert sich die Farbe von grünbraun nach grüngelb. Damit ändert sich auch die Zementfarbe von braun nach grüngrau. Das reine Mischkristallglied C<sub>4</sub>AF hat folgende optische Eigenschaften:

Lichtbrechung:	$n_x = 1,98;$
	$n_y = 2,05;$
	$n_z = 2,08$
Doppelbrechung:	$n_z - n_x = 0,10$
Achsenwinkel:	(—) 2 V = mittel
Pleochroismus:	$n_z =$ stärkste Absorption

Im Auflicht reflektiert Ferrit neben Alit, Aluminat und Belit weißlich mit einem ganz leichten Blaustich. Er ist also ohne jede Anätzung zu erkennen. Das Reflexionsvermögen steigt mit dem Eisenoxydgehalt und nimmt bei reduzierendem Brennen ab. Die üblichen Ätzmittel greifen den Ferrit nicht nennenswert an. Ferrit erscheint zusammen mit Aluminat zwickelfüllend zwischen den Silicaten, gegenüber dem Aluminat jedoch manchmal idiomorph, manchmal auch hier zwickelfüllend. Ferrit ist in der Grundmasse nahezu auf jedem Bild zu sehen.

Ein Riesenwachstum der Ferritkristalle ähnlich wie beim Aluminat (Bild 73) läßt sich im Dünnschliff häufig an Hand der einheitlichen Auslöschung des Ferrits über größere Flächen nachweisen (Bild 6).



785×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 77

Weißlicher Ferrit (z. B. 50/20) in idiomorphen Prismen. Der Querschnitt der Prismen ist meistens rhombisch, nur in Sonderfällen langgestreckt. Daneben enthält die Grundmasse zwickelfüllendes Aluminat und schwarze Punkte sekundären Belits. Als Primärgeneration Alit, teilweise mit skelettartigem oder lamellarem Wachstum.



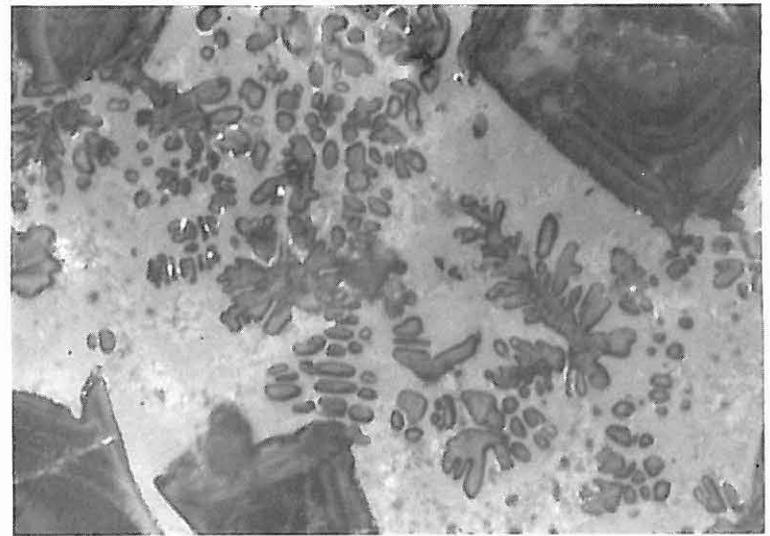
785×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

#### Bild 78

Idiomorphe Prismen von weißlichem Ferrit (z. B. 85/10) neben hellgrauem Aluminat in der Grundmasse. Daneben kreuzlamellierter Belit (65/5) und idiomorphe Alitkristalle (20/50) mit Zonarbau. Man beachte das unterschiedliche Ätzverhalten des Alits, auch innerhalb ein und desselben Kristalls.

(Siehe auch Bild 42)



1400×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

#### Bild 79

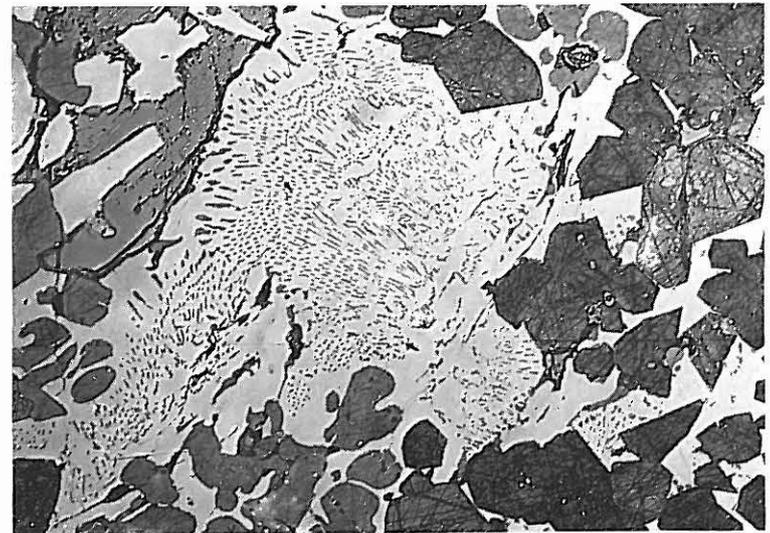
Dendritischer Belit (75/30) als sekundäre Ausscheidung aus der Schmelze. Daneben Alitkristalle mit Zonarbau (80/50). In der Grundmasse neben größeren ungeätzten Aluminatkristallen (60/30) feinverwachsene Kristallaggregate von Aluminat und Ferrit.

(Siehe auch Bild 66)

### 3.4.5 Weitere Bestandteile

Die Schmelze enthält Anteile aller im Klinker vorkommenden Komponenten, im wesentlichen CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, aber auch SiO<sub>2</sub>, MgO und andere. Dementsprechend kristallisieren beim Abkühlen neben Aluminat und Ferrit in untergeordneten Mengen Silicate, Periklas und gegebenenfalls auch Freikalk aus.

Daneben können sich nach vollständigem Erstarren des gesamten Klinkers, aber noch während des Abkühlens, zusätzlich Phasen durch Entmischen im festen Zustand bilden, z. B. wenn ein Kristall eine bei hoher Temperatur zunächst aufgenommene Komponente beim Abkühlen wieder ausscheidet. Man erkennt die *Entmischung* an der oft strengen, auf den Wirtkristall bezogenen Orientierung der Einschlüsse (Beispiel: Belitlamellen im Alit, Bild 43 bis 45 und Entmischungskörper von Belit und Periklas im Aluminat, Bild 147).



800×

H<sub>2</sub>O

#### Bild 80

In der Bildmitte sind feinste Sekundärausscheidungen von Belit aus der Schmelze im Ferrit eingelagert. Daneben sind Alit (70/10) und primärer Belit (45/15) erkennbar. Die genaue Bestimmung so kleiner Einschlüsse kann oft Schwierigkeiten bereiten. Man hilft sich am besten, wenn man, von bekannten größeren Einschlüssen ausgehend, die Identität zu immer kleineren nachzuweisen versucht (vgl. auch Bild 43). Oft werden ein Nachpolieren und erneutes, stufenweises Ätzen unvermeidbar sein. Poren (20/45). (Siehe auch Bild 36, 69, 70)

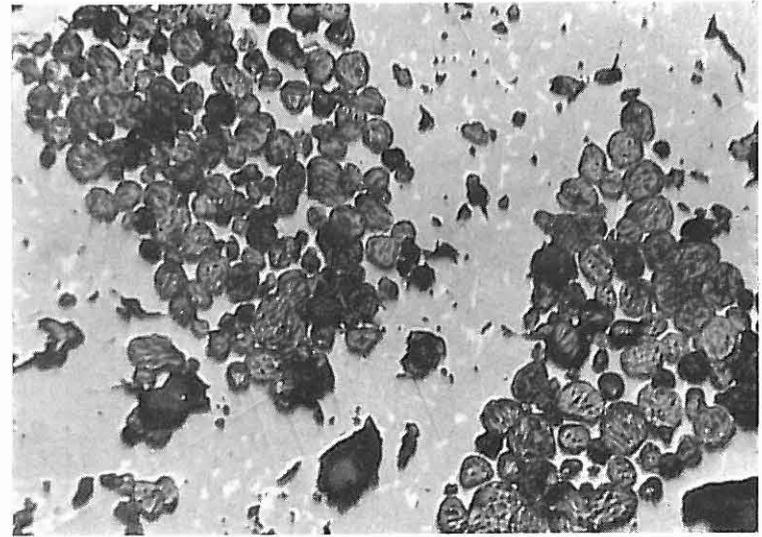


2000 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 81

In der Bildmitte Freikalk als Sekundärausscheidung aus einer eisenreichen Schmelze. Daneben Alit (25/50) und Belit (60/20).



275 ×

Luftätzung

Bild 82

Typische, stets rundliche Freikalkkristalle, hier durch „Luftätzung“ von einer stumpfgrauen Ca(OH)<sub>2</sub>-Schicht überzogen. Die anderen Phasen sind, mit Ausnahme der Ferritphase, im ungeätzten Zustand nicht zu bestimmen. (Siehe auch Bild 88, 110, 117, 118, 120, 121)

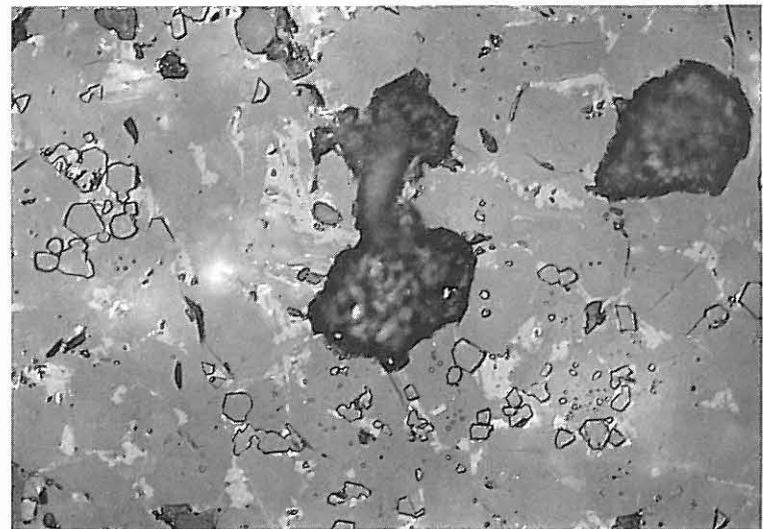
### 3.5 Nebengemengteile

#### 3.5.1 Freikalk

Freikalk ist CaO, das chemisch nicht gebunden ist. Er ist im Durchlicht farblos bis leicht bräunlich gefärbt und isotrop. Seine Lichtbrechung liegt bei  $n = 1,83$ . Im Auflicht reflektiert Freikalk in einem frisch polierten Anschliff etwas heller als die Silicate mit einem Stich ins Gelbliche, jedoch wesentlich geringer als Ferrit (Bild 75). Freikalk läuft schon bei normal feuchter Zimmerluft schnell an und überzieht sich mit einer bunt schillernden Haut von Ca(OH)<sub>2</sub>, die schließlich stumpfgrau und uneben wird. Alle herkömmlichen Ätzmittel greifen den Freikalk an.

#### 3.5.2 Periklas

Periklas ist MgO, das durch geringfügige Mischkristallbildung modifiziert sein kann. In einem normalen Klinker können bis zu 1,5 bis 2,0% MgO in Silicate oder Aluminate eingebaut werden. Periklas kann also nur dort erscheinen, wo die MgO-Konzentration den Grenzwert von etwa 2% überschreitet – sei es ganz allgemein im Gesamtklinker, sei es auch nur lokal infolge von Inhomogenitäten (vgl. Bild 122).

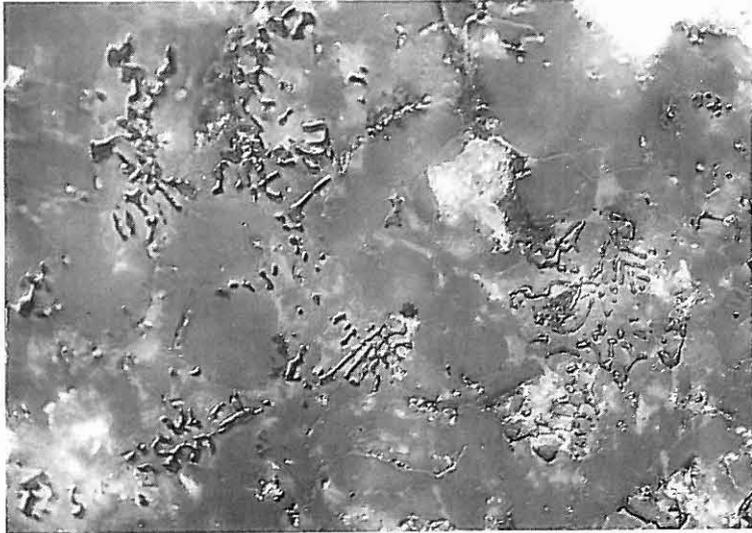


500 ×

ungeätzt

Bild 83

Periklaskristalle mit scharfer schwarzer Umrandung, die durch das positive Relief hervorgerufen wird. Die großen schwarzen Partien sind unausgefüllte Poren (50/30, 90/50). Ferrit ist weißlich. Alit, Belit und Aluminat können im ungeätzten Schliff nicht bestimmt werden. (Siehe auch Bild 122)



485 ×

reliefpoliert, ungeätzt

Bild 84

Periklasdendriten in der Grundmasse eines Klinkers. Die dendritische Ausbildung ist typisch für Sekundärausscheidungen. Helle Stellen sind mit Schwefel gefüllte Poren (z. B. 60/45). (Siehe auch Bild 7, 91)

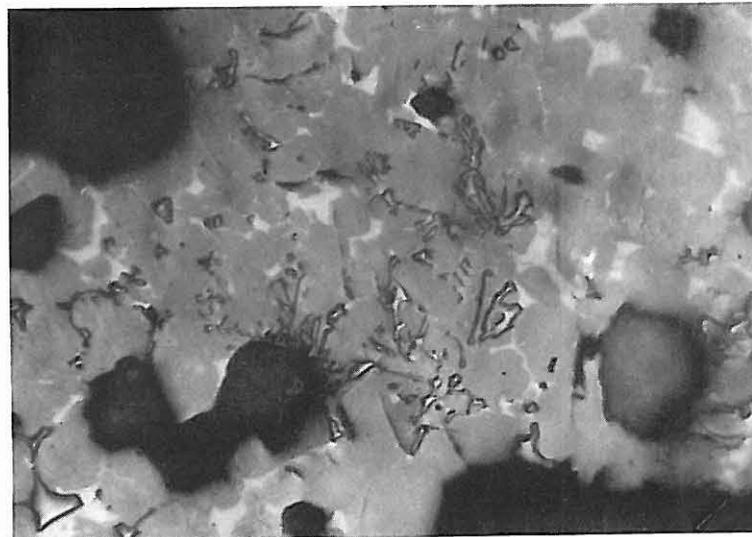


275 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 86

Unter den wechselnden Bedingungen eines Klinkerbrandes kann es auch einmal zur Resorption von bereits gebildetem Periklas kommen. Korrodierte Periklaskristalle (60/35) in einem Alitkristall mit betontem Zonarbau, der selber ebenfalls ein Beweis stark wechselnder Bildungsbedingungen ist. Poren (z. B. 90/45).



500 ×

reliefpoliert, ungeätzt

Bild 85

Dendritische Periklaskristalle. Die schwarzen Partien sind offene Poren.

Im Dünnschliff ist Periklas, soweit an den meist kleinen Kristallen erkennbar, farblos oder schwach gelblich bis grünlich gefärbt. Die Kristalle sind isotrop mit  $n = 1,736$  im reinen Zustand. Bei Aufnahme von Fe oder Mn steigt die Lichtbrechung.

Im Anschliff reflektiert Periklas grau, meist etwas heller als die Silicate. Durch seine große Härte entsteht bei weicher Politur schnell ein ausgeprägtes Relief, das eine einwandfreie Bestimmung ermöglicht. Periklas wird von den üblichen Ätzmitteln nicht angegriffen.

### 3.6 Übergengenteile

Zu den sogenannten Übergengenteilen gehören die Phasen, die nur unter ungewöhnlichen Brennbedingungen auftreten. Zur systematischen Erfassung können sie unterteilt werden in:

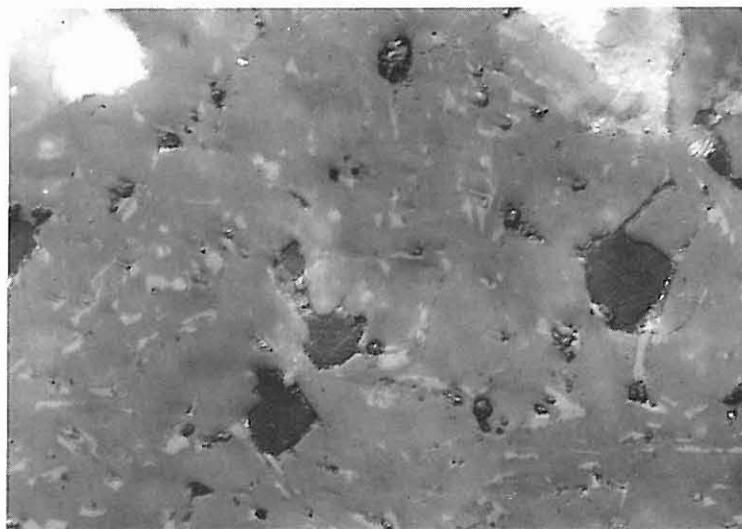
1. Alkaliphasen
2. Phasen in reduzierend gebranntem Klinker
3. CaO-arme Phasen
4. Phasen ungeklärter Zusammensetzung

### 3.6.1 Alkaliphasen

Alkalihaltige Verbindungen wurden schon in den Abschnitten über Alkalibelit (S. 29, 36) und Alkalialuminat (S. 39) erwähnt. Es handelt sich hierbei um Silicate und Aluminate mit einem geringen Gehalt an Alkalien. Als echte Alkaliverbindung kann dagegen im Zementklinker bei relativ hohen Kalium- und Sulfatkonzentrationen *Kaliumsulfat* vorkommen.

*Kaliumsulfat* reflektiert im Auflicht schwächer als die Silicate, somit auch schwächer als irgendeine andere Klinkerphase. Alle Ätzmittel lösen es auf. Aus diesem Grund ist es oft schon bei normaler Ätzdauer vollständig ausgelaugt. Deshalb muß schon der ungeätzte Anschliff sorgfältig auf Kaliumsulfat untersucht werden.

Alkalisulfat hat einen niedrigen Schmelzpunkt. Es kristallisiert dementsprechend immer mit den letzten Phasen aus; meist zwickelfüllend, seltener auch dendritisch.

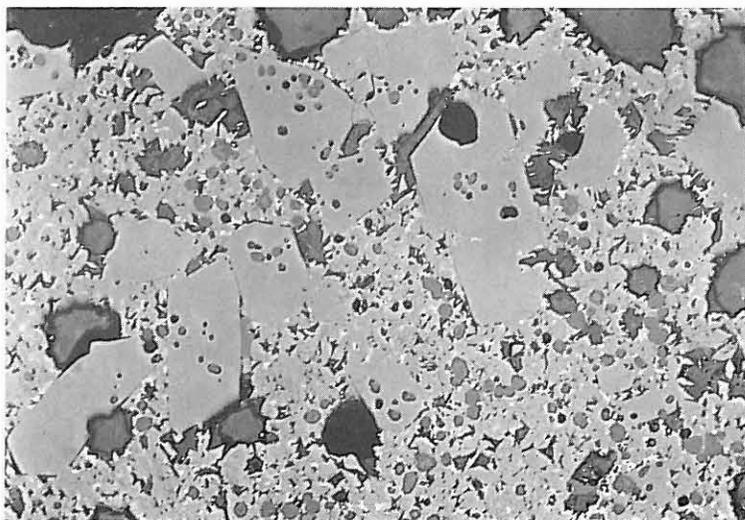


590 ×

reliefpoliert, ungeätzt

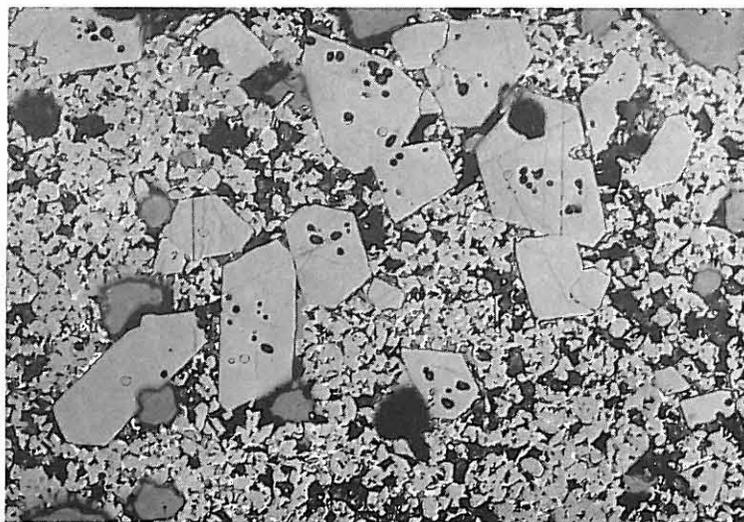
Bild 87

Alkalisulfat (z. B. 35/15) in größeren, schwach dunkelgrau reflektierenden Kristallen. Grauweiß reflektierende Stellen sind Ferrit; außerdem kleine, rundliche, erhabene Periklaskörner. Silicate und Aluminat sind im ungeätzten Anschliff nicht unterscheidbar. Die weißen, größeren Flecken (z. B. 15/65) sind mit Schwefel gefüllte Poren. (Siehe auch Bild 88, 89, 90, 91)



150 ×

Luftätzung



150 ×

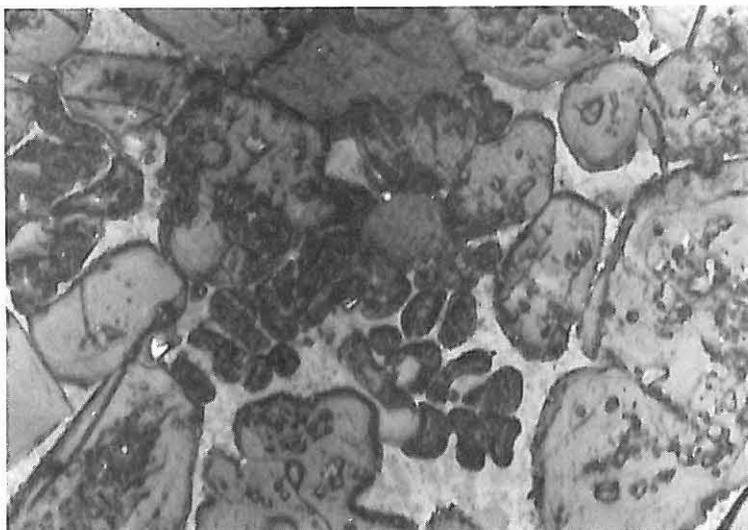
DAC

Bild 88

Laborversuchsklinker mit Alit, Alkalibelit, Freikalk und Alkalisulfat.

Die großen, idiomorphen Alitkristalle führen Freikalk- und Beliteinschlüsse, die nach dem Ätzen schwarz bzw. grau, mit deutlichem Relief, aussehen. Die vielen kleinen Alkalibelite, vermutlich  $KC_{23}S_{12}$ , zeigen etwa das gleiche Reflexionsvermögen wie der Alit. Die runden Freikalkkristalle reflektieren dagegen dunkelgrau und das Alkalisulfat mit ausgezackten Umrissen schwarzgrau. Nach dem Ätzen sind Alkalisulfat und Freikalk vollständig herausgelöst. Trotz Brenntemperaturen von  $1450^{\circ}C$  kommt hier Freikalk unmittelbar neben Belit vor. In Bild 88 oben liegen mehrere mit Kunstharz gefüllte Poren, offene Poren bei (5/65, 45/13, 60/55).

Bild 89 (gleiche Stelle wie Bild 88)

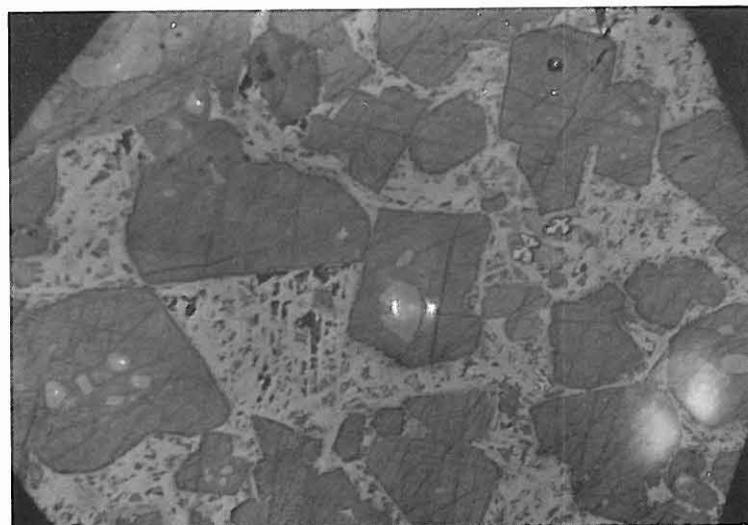


785×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 90

Schwarzgrau reflektierendes, dendritisches Alkalisulfat (40/30) in der Grundmasse, daneben große Alitkristalle.



500×

H<sub>2</sub>O

Bild 91

Schwarzes Kaliumsulfat (40/29) in Zwickeln einer feinkristallinen Grundmasse aus hellgrauem Ferrit und mittelgrauem Aluminat. Dazwischen Einschlüsse von dendritischem Periklas (73/41).

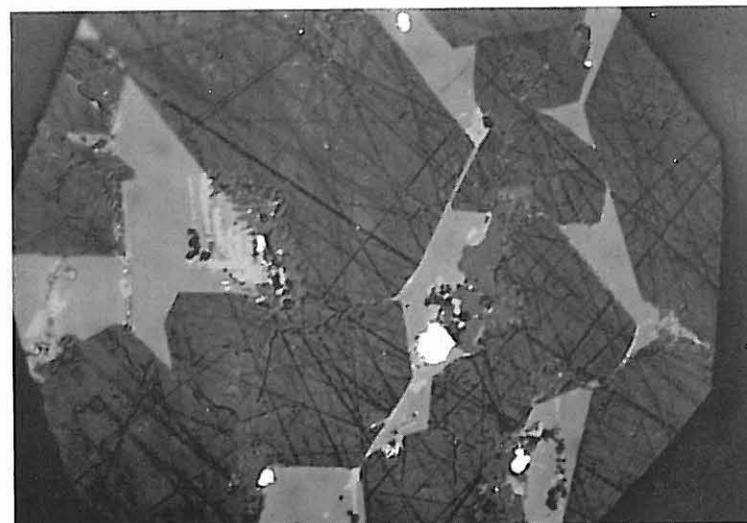
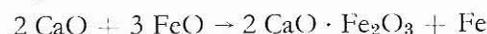
### 3.6.2 Phasen in reduzierend gebranntem Klinker

Luftmangel während des Brennens führt zu reduzierend gebranntem Klinker. Reduzierbar ist normalerweise nur das dreiwertige Eisen, das bei mäßiger Reduktion zu zweiwertigem, bei starker Reduktion zu metallischem Eisen reduziert wird. Auch können die in jedem natürlichen Rohmaterial vorliegenden geringen Mengen an Sulfat unter reduzierenden Bedingungen Sulfide bilden. Darüber hinaus kann unverbrannter Brennstoff im Klinker eingebettet werden.

Wo sich unter mäßig reduzierenden Bedingungen zweiwertiges Eisen im Klinker bildet, wird es überwiegend unter Mischkristallbildung in andere Klinkerphasen eingebaut, wobei gleichzeitig deren Eigenschaften verändert werden. So wird z. B. der Zerfall des Alits zu Belit und Freikalk beschleunigt (s. S. 26), die Neigung des Belits zum Zerrieseln verstärkt (s. S. 35) und das Reflexionsvermögen des Ferrits vermindert (s. S. 40).

#### 3.6.2.1 Wüstit (FeO)

Nur sehr selten kann FeO als selbständige Phase beobachtet werden. Voraussetzung dazu ist ein eisenreicher Klinker und außerdem eine sehr schnelle Kühlung, denn bei langsamer Kühlung läuft folgende Reaktion ab:



500×

H<sub>2</sub>O

Bild 92

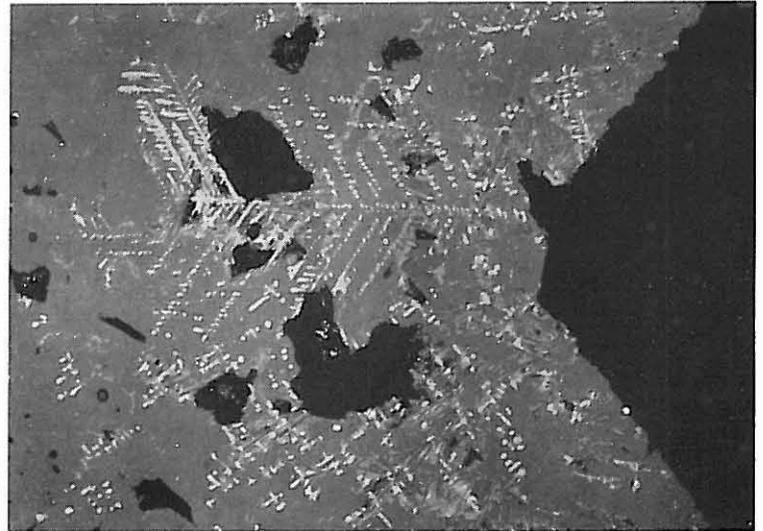
Hell reflektierende Wüstitdendriten (30/35) neben mittelgrauem Ferrit, schwarzem Freikalk und weißem metallischem Eisen. Daneben idiomorphe Alitkristalle mit Schleifkratzern. Wüstit erscheint neben Ferrit heller und mit einem deutlichen Stich nach Orange, der Ferrit neben Wüstit dunkelblaugrau. Auch hier ist die entsprechende Umwandlung zum Gleichgewicht Ferrit und Metall schon weit vorangeschritten.

### 3.6.2.2 Metallisches Eisen

Bei starker Reduktion werden die Eisenverbindungen zu Metall reduziert. Da solche Klinker kein Eisenoxyd mehr enthalten, sind sie weiß oder hellgrau. Unter dem Mikroskop erkennt man das metallische Eisen an der Tröpfchenform und an dem sehr hohen Reflexionsvermögen, das eine Verwechslung mit anderen Klinkerphasen ausschließt.

### 3.6.2.3 Calciumsulfid

Schon bei schwächerer Reduktion kann Calciumsulfid erscheinen. Das Reflexionsvermögen ist dem des Ferrits sehr ähnlich. Beide Phasen sind deshalb leicht zu verwechseln. Ein sicheres Unterscheidungsmerkmal sind die rundlichen und meist dendritisch angeordneten Calciumsulfidkristalle und ihre leichte Ätzbarkeit mit DAC. Ferrit dagegen erscheint entweder in idiomorphen Prismen mit ebenflächiger Kristallbegrenzung oder xenomorph.

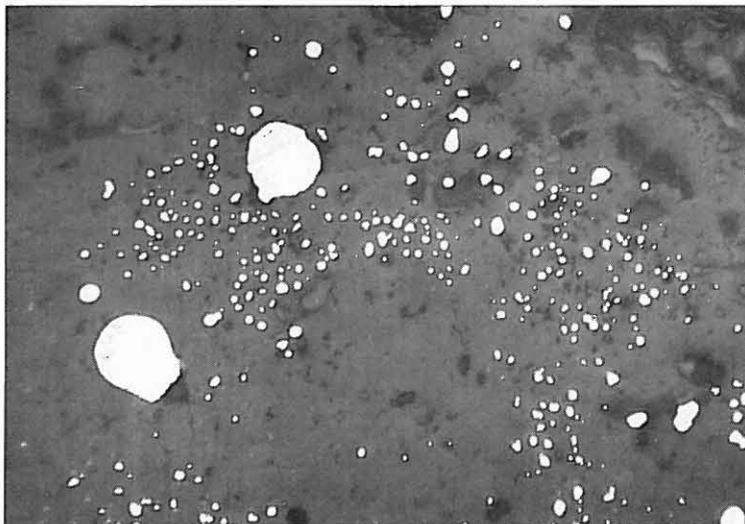


200 ×

ungeätzt

Bild 94

Weißliche Calciumsulfiddendriten in reduzierend gebranntem Klinker. Poren sind schwarz, die restlichen Klinkerphasen sind hier nicht zu unterscheiden. Die gleichmäßige Orientierung der Dendriten erstreckt sich über sehr große Gebiete, unabhängig von den dazwischenliegenden Silicaten. (Siehe auch Bild 95)

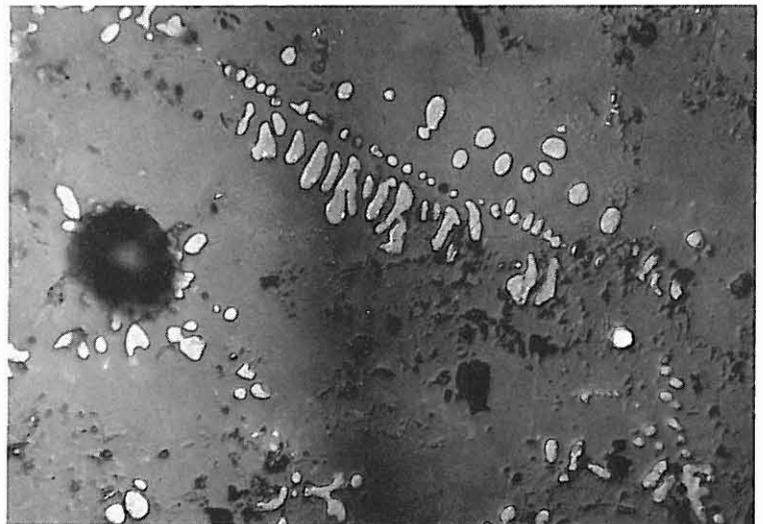


200 ×

ungeätzt

Bild 93

Weißer Tropfen von metallischem Eisen in stark reduzierend gebranntem Klinker. Da der Klinker ungeätzt ist, lassen sich Alit, Belit und Aluminat nicht unterscheiden. (Siehe auch Bild 92, 97)



400 ×

ungeätzt

Bild 95

Weißliche Calciumsulfiddendriten mit heller reflektierenden Saumen.

### 3.6.2.4 Eisensulfid

Häufig kann in reduzierend gebrannten Klinkern eine weitere Phase beobachtet werden, bei der es sich auf Grund der Paragenese nur um ein komplexes Eisensulfid handeln kann. ( $\text{FeS}$  und  $\text{FeS}_2$  müssen wegen der optischen Eigenschaften ausgeschlossen werden.) Nach F. Trojer hat diese Phase die Zusammensetzung  $\text{KFeS}_2$ .

Das Kaliumeisensulfid ist sehr weich. Daher ist beim Polieren darauf zu achten, daß das Relief nicht zu stark wird. An Hand seines sehr hohen Reflexionspleochroismus ist es eindeutig zu bestimmen. Es reflektiert heller als der begleitende Ferrit, und zwar graugelb – grünlichgrau – kupferrot.



600×

ungeätzt

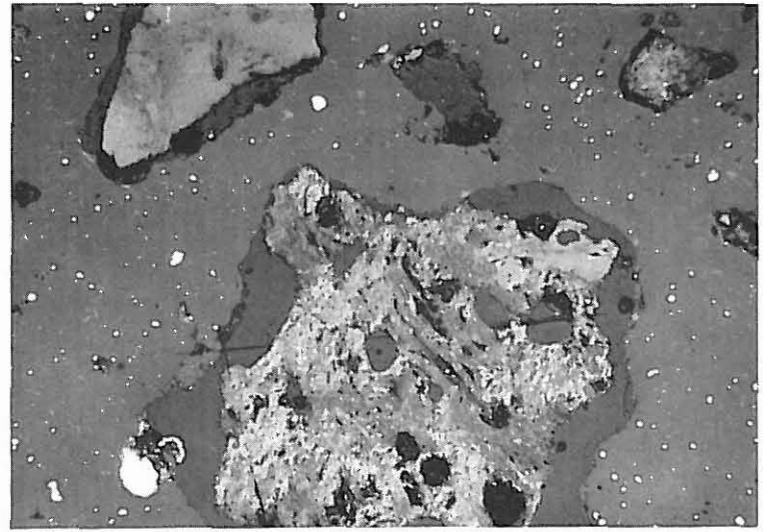
Bild 96

Eisensulfid. Aufnahme in Ölimmersion bei gekreuzten Nicols. Unter diesen Bedingungen sind Silicate und Aluminat schwarz. Nur die Kristalle des Eisensulfids sind zu sehen, gleichzeitig auch ihr ungewöhnlich hoher Reflexionspleochroismus, der bei Beobachtung im polarisierten Licht an der unterschiedlichen Grautönung der verschieden orientierten Kristalle zu erkennen ist.

### 3.6.2.5 Koks und Graphit

Bei akutem Luftmangel kann der feste Brennstoff nicht vollständig verbrennen. Infolgedessen bleiben Koks- und Graphitpartikeln übrig, die zum Teil in die Klinkersubstanz eingeschlossen werden. Ihre direkte Umgebung ist immer stark reduziert.

Die innere Struktur der Kokspartikeln ist durch die Struktur der verwendeten Kohle bestimmt und damit außerordentlich variabel. Charakteristisch sind immer ein mäßig hohes Reflexionsvermögen, ein heller, gelblicher Farbstich und ein ausgeprägter Reflexionspleochroismus von Gelbweiß nach Dunkelgrau.



200×

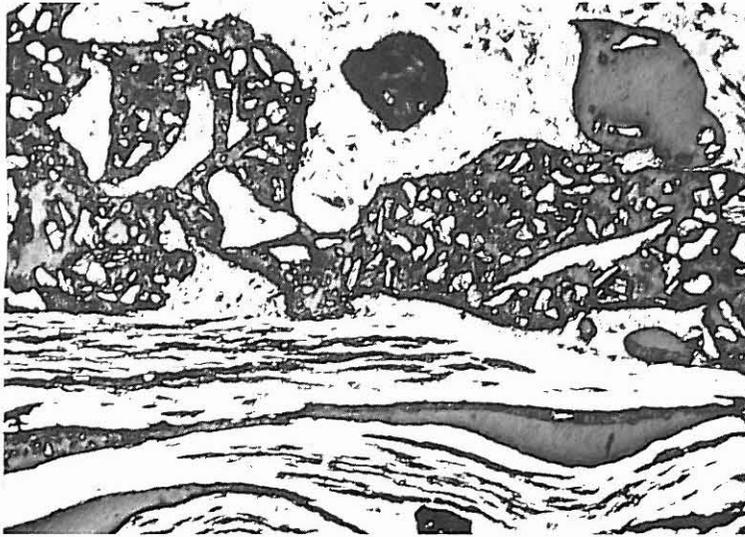
ungeätzt

Bild 97 (polarisiertes Auflicht)

Koksrelikt in einem Schachtofenklinker. Typisch das mittelhohe Reflexionsvermögen und der undulöse Reflexionspleochroismus, hervorgerufen durch die unterschiedliche Orientierung der einzelnen Partikeln im Koksstück. Am Rande (20/55) ein weiteres Koksstück mit „glatter“ Oberfläche und völlig anderer Struktur.

Die brennenden Koksstücke wurden langsam aufgezehrt. Durch die damit verbundene Schwindung entstand rundherum ein Spalt, der mit Einbettungsmittel (Harz) gefüllt ist. Die fein eingestreuten Sterne von metallischem Eisen in der Umgebung der Koksstücke weisen auf reduzierende Bedingungen hin, dementsprechend fehlt der Ferrit.

(Siehe auch Bild 98, 99, 101, 102)



150 ×

ungeätzt

Bild 98 (polarisiertes Auflicht)

Kokseinschlüsse in einem Klinker. Die ehemals zellige Struktur ist teilweise noch zu erkennen. Die Bilder sind um 90° gegeneinander verdreht und zeigen den Reflexionspleochroismus des Kokses. (Siehe auch Bild 97, 101, 102)



150 ×

ungeätzt

Bild 99 (polarisiertes Auflicht)

Die Bilder sind um 90° gegeneinander verdreht und zeigen

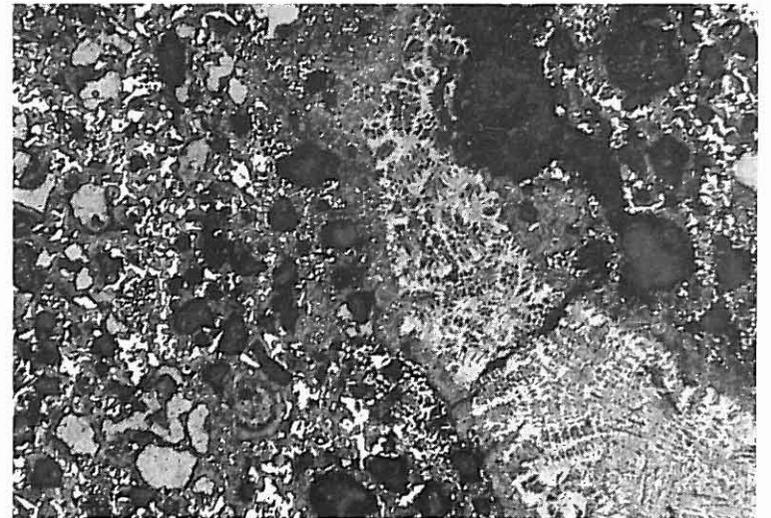
### 3.6.3 CaO-arme Phasen

Infolge krasser Inhomogenitäten kann der CaO-Gehalt zuweilen lokal so weit absinken, daß die Bildung der normalen Klinkerparagenese verhindert wird. Typisch ist hier vor allem Gehlenitglas, das als dunkelgraue, einheitliche Grundmasse zwischen großen, typischen Belitkristallen auftritt (Bild 100).

### 3.6.4 Phasen ungeklärter Zusammensetzung

Auch in dem gut erforschten Zementklinker gibt es immer wieder Erscheinungen, die nicht erklärt und Phasen, die nicht bestimmt werden können. Für die Praxis ist das kaum wichtig; denn bei diesen Phasen handelt es sich oft nur um Einzelbeobachtungen. Dennoch können auch diese seltenen Randscheinungen Bedeutung erlangen und sollten also verfolgt werden. Hier können nur einzelne Beispiele wiedergegeben werden.

Zu den „unbekannten Phasen“ zählt unter anderem auch eine Reihe von hygroskopischen Verbindungen, die sich bevorzugt in reduzierend gebranntem Klinker bilden können. (Da sich diese Partien unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit sofort mit einer Wasserhaut überziehen, gelingt es nur unter Anwendung besonderer Maßnahmen, sie überhaupt direkt zu beobachten.)



75 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

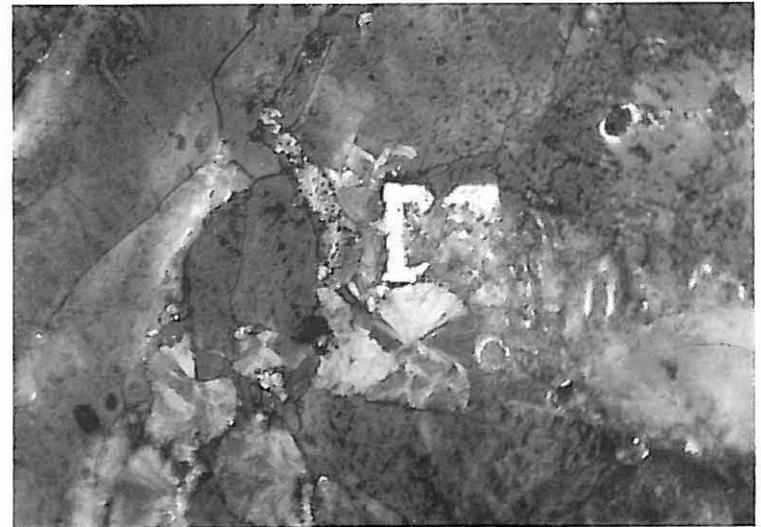
Bild 100

Schliere aus saurer Kohlenasche zwischen zwei Klinkerstücken. In der Schliere haben sich Melilith und dendritischer Belit ausgeschieden. Am Rande der Schliere tritt ein Belitsaum als Kontaktzone auf.



650×

Luftätzung



650×

Luftätzung

Bild 101 (polarisiertes Auflicht)

Ausschnitt aus einem reduzierend gebrannten Schachtofenklinker. Bild 102 ist um 90° im Uhrzeigersinn gedreht worden.

Der stark reflektierende Teil (40/42) in Form eines „J“ in Bild 101 und (51/40) in Bild 102 ist vermutlich Titancarbid bzw. Titanitridcarbid  $Ti(C, N)$ . Es ist in Hüttenprodukten nicht selten, doch normalerweise im Zementklinker nicht zu erwarten, da es ungewöhnliche Titangehalte voraussetzt. Daneben Graphit, hier in typischen Sphärolithen, besonders deutlich in direkter Nachbarschaft des  $TiC$ -Kristalls. Man beachte den Reflexionspleochroismus und das Wandern der dunklen und hellen Felder des Sphäroliths mit der Änderung der Schwingungsrichtung des einfallenden Strahls. In der Umgebung Alit und Grundmasse.

Bild 102 (polarisiertes Auflicht)

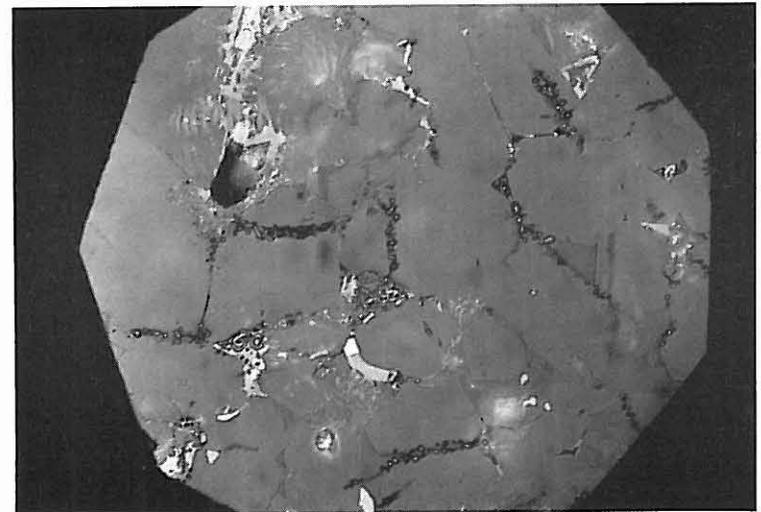


200×

alkoh.  $HNO_3$

Bild 103

Tropfenbildung (50/30) auf der Schliffoberfläche durch eine unbekannte, hygroskopische Komponente.



500×

schwach mit  $H_2O$

Bild 104

Hygroskopische Bestandteile führen zu Tropfenbildung in Form schwarzer Perlen auf der Schliffoberfläche, hier auf Korngrenzen des Alits, also in der Grundmasse, die hier vorwiegend aus Aluminat besteht und dunkler als Alit ist. Daneben weißes, metallisches Eisen und grauweißes Calciumsulfid.

### 3.7 Fehlermöglichkeiten

Neben den bisher beschriebenen Klinkerphasen sieht man unter dem Mikroskop oft Bilder, deren Deutung einem Anfänger Schwierigkeiten bereiten mag, die aber zum großen Teil auf anomale optische Effekte oder auch Präparationsfehler zurückzuführen sind. Im folgenden soll auf einige dieser Erscheinungen eingegangen werden.

#### 3.7.1 Poren

Jeder normale Zementklinker enthält zahlreiche Poren. Während der Einbettung strebt man an, diese Poren mit Einbettungsmasse (Kunstharz, Schwefel) auszufüllen. Je nach dem Reflexionsvermögen der Einbettungsmasse erscheinen die Poren später heller oder dunkler reflektierend, meist aber mit glatter, strukturloser Oberfläche (Bild 1, 33, 41, 64, 68, 135). Es gelingt meist nicht, alle Poren vollständig mit Kunstharz auszufüllen. Offene Poren erscheinen unter dem Mikroskop schwarz. Die Porenränder sind dabei typisch abgerundet und deshalb nicht scharf einzustellen (Bild 47, 61, 116, 133, 145).

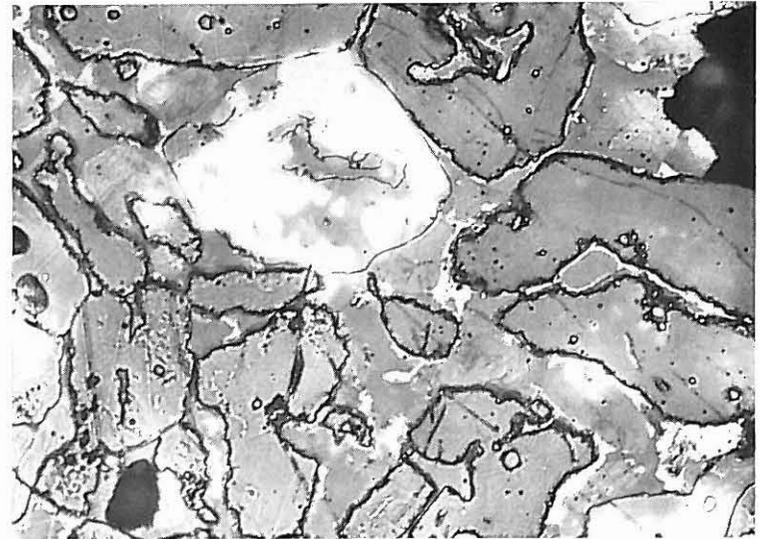
Andere Poren können auch nur teilweise mit Einbettungsmasse ausgefüllt sein, oder diese kann Luftblasen enthalten, die dann als rundliche, schwarze Flecken erscheinen (Bild 117, 120).

Offene Poren werden während des Polierprozesses gelegentlich mit Poliermasse zugeschmiert. Unter dem Mikroskop reflektieren sie dann diffus, und zwar in der Farbe des Poliermittels: Magnesia und Tonerde weiß, Chromoxyd grün (Bild 31).

#### 3.7.2 Innenreflexe

Alle normalen Klinkerphasen sind in dünnen Schnitten durchsichtig. Nur ein geringer Anteil des Lichtes wird reflektiert, ein weitaus größerer jedoch absorbiert bzw. durch die durchsichtigen Phasen hindurchgelassen. Es kann vorkommen, daß ein solcher Lichtstrahl im Inneren des Präparates an einer Kristall- oder Spaltfläche derart reflektiert wird, daß er wieder in den Strahlengang des Mikroskops gerät. Der Kristall leuchtet dann hell auf. Dabei gibt dieser sogenannte „Innenreflex“ die Farbe des jeweiligen Kristalls so wieder, wie sie auch in feinsten Spaltstückchen erscheinen würde. Abgesehen von dieser Möglichkeit zur Farbbestimmung sind Innenreflexe diagnostisch bedeutungslos.

Es mag gelegentlich schwierig zu beurteilen sein, ob es sich bei einer hell reflektierenden Partie um einen Innenreflex handelt oder ob eine andere Phase vorliegt. Am besten läßt sich das entscheiden, indem man etwas an der Feineinstellung „spielt“: Innenreflexe werden nicht unscharf, sondern „flattern“ unruhig.



660x

H<sub>2</sub>O und DAC

Bild 105

Großer Innenreflex in einem Alitkristall (40/40).  
(Siehe auch Bild 46, 49, 59, 71, 123, 140)

#### 3.7.3 Newtonsche Ringe (Interferenzstreifen)

Wird ein Kristall unter ganz flachem Winkel zu seiner Oberfläche angeschnitten, so können sich an seiner Grenze zum Nachbarkristall sogenannte Newtonsche Ringe zeigen. Sie beruhen auf einer Interferenz zwischen dem an der Schliifoberfläche und dem an der darunter liegenden Kristallfläche reflektierten Lichtstrahl. Die Newtonschen Ringe können gelegentlich mit Zonarbau eines Kristalls verwechselt werden (Bild 7, 15, 52, 140).

#### 3.7.4 Schleifkratzer

Nahezu jeder routinemäßig hergestellte Anschliff zeigt noch Schleifkratzer. Vor allem nach dem Ätzen werden Kratzer deutlich sichtbar.

Es kann manchmal schwierig werden, zwischen Schleifkratzern und strukturellen Merkmalen – beispielsweise Kreuzstreifung des Belits – zu unterscheiden. Grundsätzlich verlaufen Schleifkratzer als gerade Striche über größere Teile des Blickfeldes und damit über alle in diesem Blickfeld liegenden Kristalle hinweg. Kreuzlamellen des Belits sind dagegen streng an die Orientierung eines einzelnen Kristalls gebunden. Sie können sich nicht in einem kristallographisch anders orientierten Nachbarkristall fortsetzen. Beispiele von Schleifkratzern finden sich in zahlreichen Bildern (z. B. Bild 15, 16, 19, 29, 35, 37, 40, 60).

### 3.7.5 Klinkerabrieb

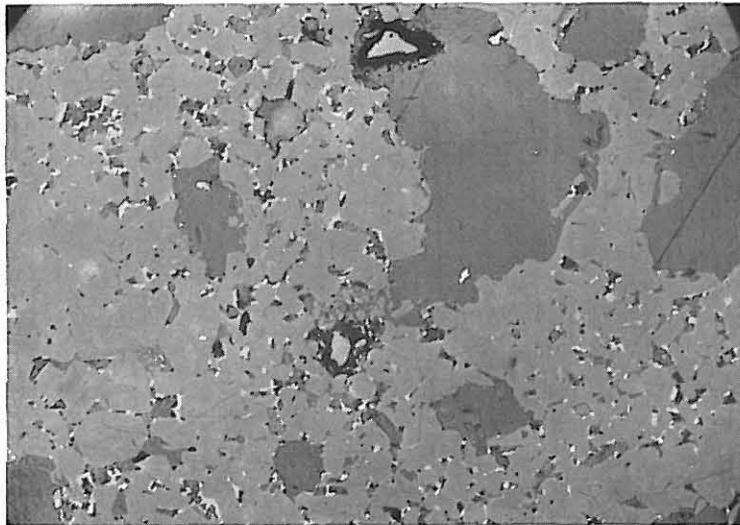
Wenn ein Klinkerstück nach dem Vorschleifen nicht gründlich gereinigt wird, kann in seinen Poren Schleifabrieb zurückbleiben und dort durch Kunstharz mit eingebettet werden. Im fertigen Präparat sieht man dann feine Splitter von Klinkersubstanz, die die Poren teilweise ausfüllen (Bild 106).

### 3.7.6 Schleifmittelkörner

Gelegentlich können sich Schleifmittelkörner (z. B. Karborundum oder Korund) beim Schleifprozeß in die Einbettungsmasse einarbeiten. Nach dem Polieren kann man sie vor allem an Hand ihres ungewöhnlich starken Reliefs erkennen. Eine Verwechslung wäre lediglich mit Periklas möglich, doch werden Periklaskristalle des Klinkers nicht lose im Harz eingebettet sein (Bild 106).

### 3.7.7 Bleiabrieb

Werden die Anschliffe auf mechanischen Schleifmaschinen mit Blei-Polierscheiben hergestellt, so arbeitet sich häufig Blei in die Poren ein. Man erkennt es an seinem recht hohen Reflexionsvermögen, vor allem jedoch an der immer ungleichmäßigen, rauhen, oft bunt schillernden Oberfläche.

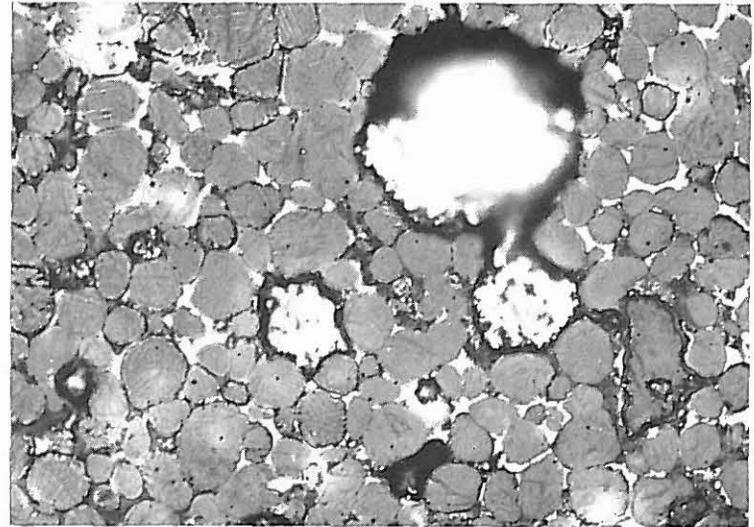


200 ×

schwach mit H<sub>2</sub>O

Bild 106

Zwei Korundkörner (45/25 und 50/65) in Harz eingebettet. Man beachte den dicken schwarzen Rand, der durch das positive Relief der Korundkörner bedingt ist. Neben dem Korund sind auch Abriebsplitter (50/30) eingebettet, sie bestehen vorwiegend aus Alit.



660 ×

H<sub>2</sub>O und DAC

Bild 107

Bleiabrieb (40/30) in Klinkerporen.

## 4. Klinkergefüge

### 4.1 Überblick

Als Gefüge eines Klinkers bezeichnet man die Art seines Aufbaus aus den verschiedenen Gemengteilen, ihre Zusammensetzung, Größe, Verwachsung und Verteilung. Das Gefüge wird durch die jeweilige Vorgeschichte des Klinkers bestimmt. Eine kritische Beurteilung seiner Verwachsungsstrukturen kann also Rückschlüsse auf Chemismus und Aufbereitung des Rohmaterials und auf den Verlauf des Brenn- und Kühlprozesses ermöglichen.

### 4.2 Makroskopische Merkmale

Vor der eigentlichen Untersuchung im Dünn- oder Anschliff sollte zunächst makroskopisch, mit Binokular oder Lupe, auf allgemeine äußere Erscheinungen des Klinkers geachtet werden. Es handelt sich hier um:

1. einzelne Klinker „granalien“,
2. Granalien, die zu „Trauben“ zusammengesintert sind,
3. größere, dichte „blockige“ Klinkerstücke,

4. teilweise geschmolzene, meist blank glänzende Stücke, sog. „Schmolz“, oder um
5. unregelmäßige Klinkeraggregate. Hierzu gehören in erster Linie Bruchstücke der oben angegebenen Typen, meist ein splittiger „Grus“, der durch Zerspringen von Klinkergranalien beim plötzlichen Abkühlen entsteht.

In welcher *Form* die Klinkeraggregate anfallen, ist weitgehend vom *Ofensystem* abhängig: Einzelne Klinkergranalien sind typisch für Drehofenklinker. Hier weisen Lepolofenklinker normalerweise eine wesentlich gleichmäßigere Granaliengröße auf als Klinker aus anderen Trocken- oder auch Naßdrehöfen. Blockiger Klinker und Schmolz kommen dagegen in normalen Drehofenbetrieben nur recht selten vor, viel häufiger aber zusammen mit Klinkertrauben in Schachtofenwerken.

Neben der Klinkerform sollte auch die *Oberfläche* der einzelnen Klinkergranalien beachtet werden. Sie kann

1. glatt,
2. rau, mehr oder weniger leicht abreibbar,
3. stumpf,
4. glitzernd, durch ungestörtes Wachstum kleiner Kristalle an der Oberfläche, oder
5. rundlich bis höckerig sein.

Die *Farbe* des Klinkers kann ein sehr empfindlicher Indikator für die Brennbedingungen sein.

Die Beurteilung der Farbe wird an einem Querschnitt durchgeführt, der angefeuchtet sein sollte. Da Wasser den Klinker selber stark anätzt, ist eine Anfeuchtung mit Glyzerin oder noch besser mit 1,4-Butan-diol vorzuziehen.

Das Rohmaterial durchläuft während des Brennens alle Farbstufen von Erdbraun – Hellbraungelb – Sattbraun – Dunkelbraun und wird schließlich im normal gesinterten Klinker schwärzlich mit einem grünbraunen Stich. Schwachbrand kann also schon an der Farbe des Klinkers erkannt werden.

Jeder eisenoxydhaltige Zement ist mehr oder weniger intensiv gefärbt. Alle Hauptgemengteile des Klinkers sind dabei, bedingt durch meist sehr beschränkte Mischkristallbildung mit  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , braun gefärbt.

Der färbende Hauptbestandteil des Klinkers ist der Ferrit. Während reiner Ferrit sattbraun mit leicht rötlichem Stich ist, lassen schon geringe Beimengungen von Magnesium die Farbe nach Braungrün umschlagen. Da alle Zementrohstoffe Magnesium enthalten, ist braungrüner Ferrit für normale, technische Klinker typisch und verleiht dem Zement seine typische, schiefergraue Farbe. Durch Spuren von  $\text{Fe}^{2+}$  verschwindet aber die braungüne Farbe des Ferrits, er wird wieder rotbraun wie in

magnesiumfreiem Klinker (vgl. Farbaufnahme 2, 3, 5). Wenn im Klinker das Eisen zum Teil durch Mangan ersetzt wird, färbt er sich dunkelgrau mit einem Stich ins Rötliche. Der Mn-haltige Ferrit sieht auch bei Anwesenheit von Mg rötlichbraun aus.

Ein Klinker kann einheitlich gefärbt sein, ist aber manchmal auch unregelmäßig fleckig. Häufig beobachtet man regelmäßige, konzentrische Farbzonen. Diese Farbunterschiede zeigen chemische Unterschiede oder wechselnde Brennbedingungen an.

Jeder normale Portlandzementklinker enthält Löcher und Poren, deren Ausbildung und Anordnung innerhalb des Klinkers sehr wichtige Hinweise für seine Beurteilung geben (s. 4.3.1). Schon am Klinkerstück können wichtige Einzelheiten über die relative Porengröße sowie die Porenverteilung über den Querschnitt des Klinkers festgestellt werden. In den meisten Fällen ist die Verteilung ungleichmäßig schlierig oder in Schalen angereichert.

## 4.3 Mikroskopische Merkmale

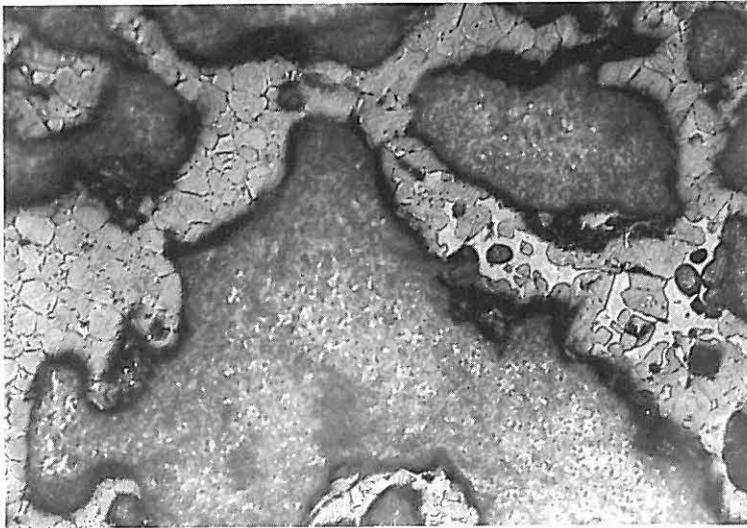
### 4.3.1 Porosität

In weiterem Sinne können die Poren eines Klinkers als eine zusätzliche, gasförmige Klinkerphase aufgefaßt werden. Während in den festen und flüssigen Phasen bei Sintertemperatur ein Stoffaustausch stattfindet, der zur Bildung der Klinkerphasen führt, verhalten sich Poren in dieser Hinsicht inert. Unter normalen Brennbedingungen ist eine Diffusion von beispielsweise Ca oder Si durch den Porenraum, also über die Gasphase, nicht möglich (siehe jedoch Bild 135). Häufig findet man unter dem Mikroskop Belit- und Freikalkpartien, die durch eine Pore voneinander getrennt sind, sich aber sicher zusammen in Alit umgewandelt hätten, wenn ein Kontakt zwischen ihnen bestanden hätte (Bild 108, 109).

Die Größe und Verteilung der Poren lassen sich am besten bei schwacher Vergrößerung beobachten (Bild 110 bis 114).

Ausbildung und Verteilung der Poren hängen im wesentlichen von der Brenntemperatur, vom Chemismus des Klinkers, von der Kornverteilung des Rohmaterials und vom Ofensystem ab. Rückschlüsse von der Porenverteilung auf Brennbedingungen sind nur bei Klinkern desselben Ofensystems, genau jedoch nur bei Klinkern desselben Werks und Ofens statthaft.

In der Praxis hat sich die Bestimmung des Klinkerlitergewichts als schnelles und brauchbares Verfahren zur Beurteilung des Brenngrades eingeführt. Es stellt ein Vergleichsmaß für den Gesamtporenraum einer bestimmten Fraktion eines Klinkers dar.

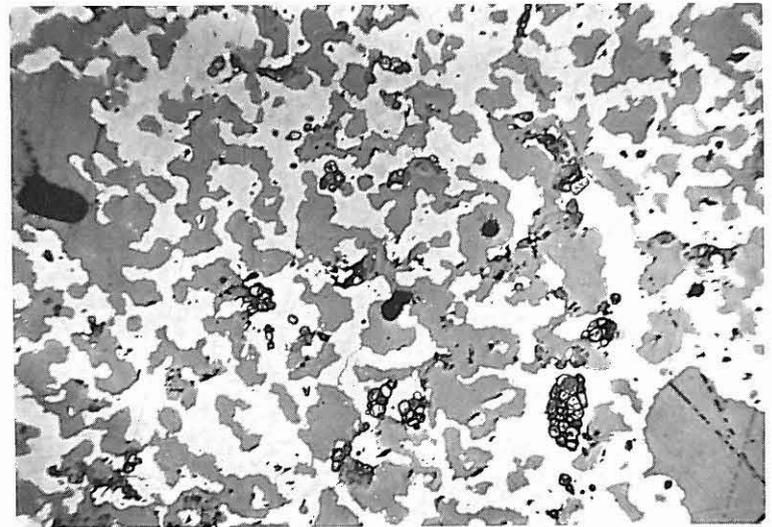


175×

DAC

Bild 108

Partie eines sehr porösen Klinkers. Der Stoffaustausch kann nur unvollkommen über schmale „Stege“ erfolgen. (Siehe auch Bild 109)

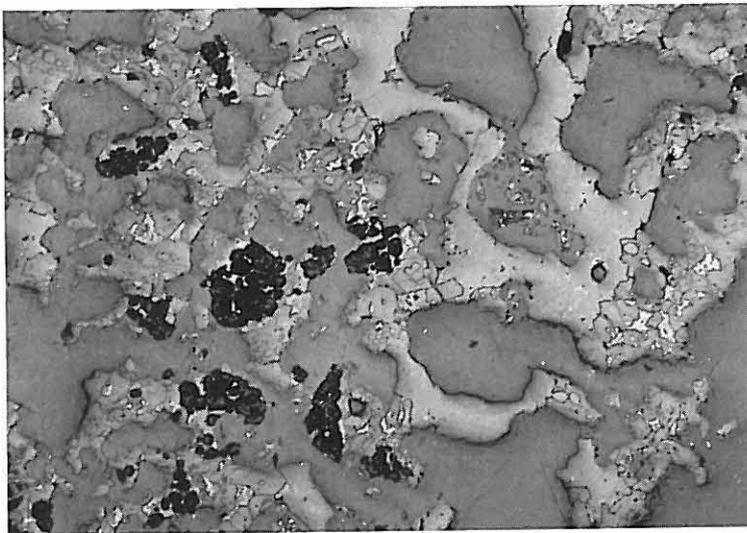


50×

Luftätzung

Bild 110

Porenreicher Klinker. Die Poren sind mit mittelgrau reflektierendem Harz gefüllt. Daneben mehr oder weniger dunkelgefärbte Freikalknester (73/15) mit starkem Relief.

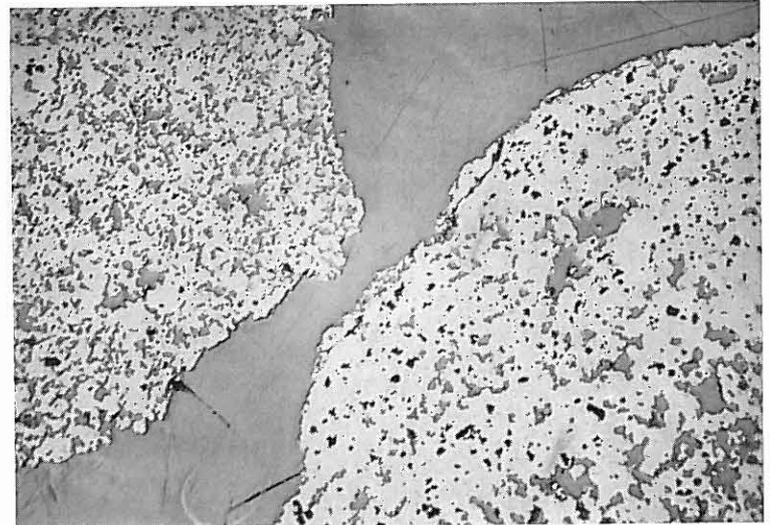


100×

H<sub>2</sub>O

Bild 109

Klinker mit ungewöhnlich vielen Poren und infolgedessen unvollkommener Reaktion. Zahlreiche schwarze Freikalknester (35/35), neben hellgrauen Belitpartien (65/35) und geätztem Alit. Die Poren sind mit mittelgrau reflektierendem Kunstharz ausgefüllt.

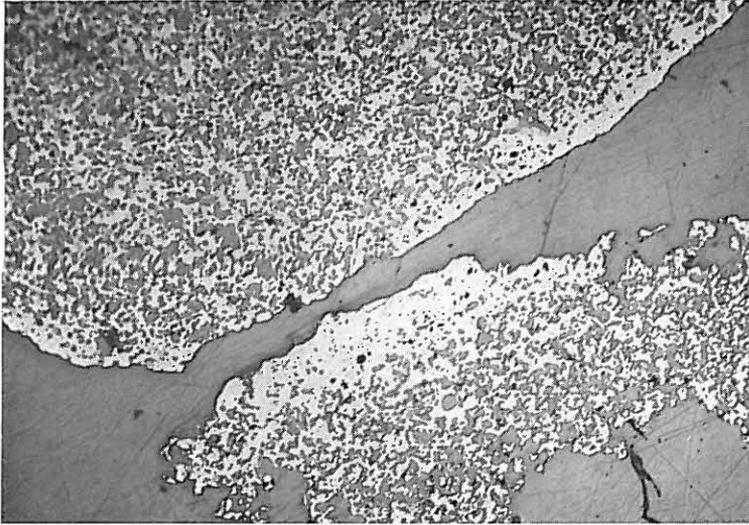


20×

ungeätzt

Bild 111

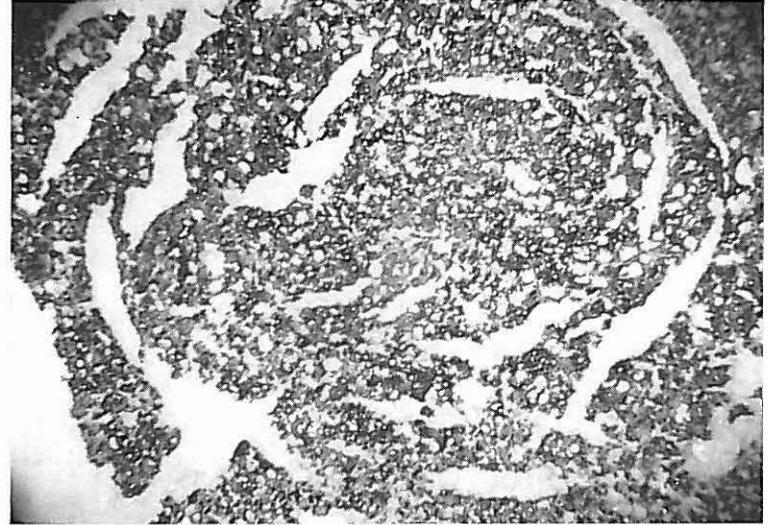
Porenarmer Drehofenklinker.



20×

ungeätzt

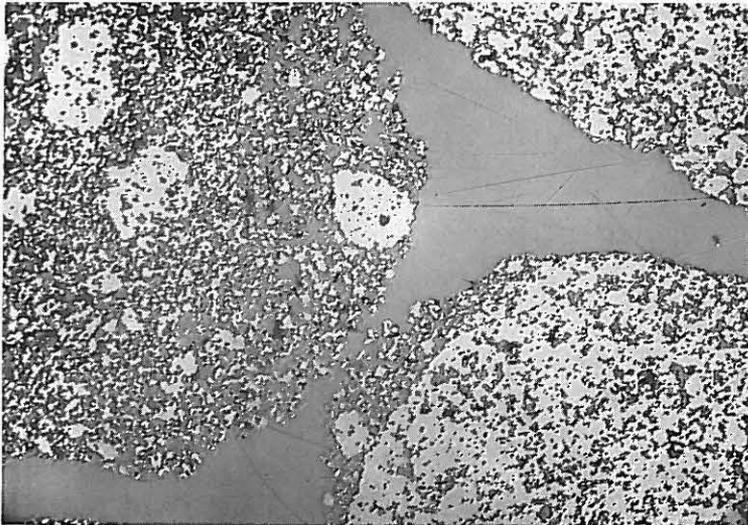
Bild 112  
Porenreicher Drehofenklinker.



15×

ungeätzt

Bild 114  
Poren und konzentrische Schwindrisse. Die Kontraste lassen sich steigern, wenn das Einbettungsharz mit  $\text{TiO}_2$  weiß eingefärbt wird. Schräglichtbeleuchtung!



20×

ungeätzt

Bild 113  
Drehofenklinker aus nicht granuliertem Rohmehl. Entstehung einer größeren Granalie durch Einwickeln kleinerer Granalien. Anlagerung von feineren Klinkerkörnern an ein größeres Korn.

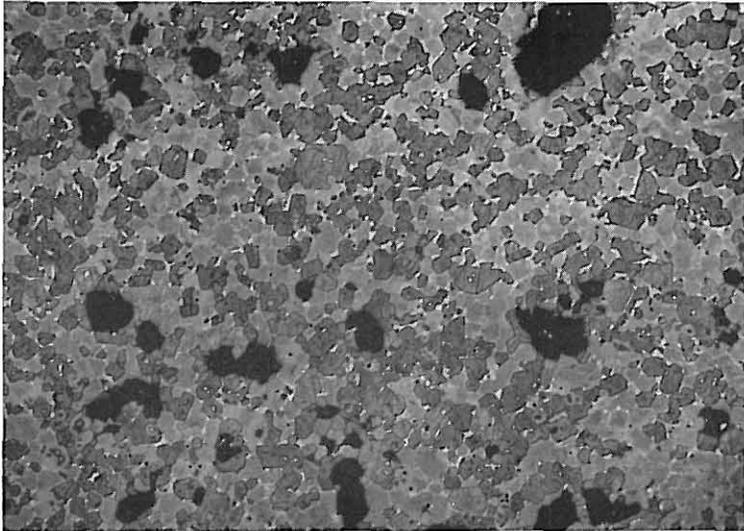
Allerdings sind die Litergewichtswerte von einem Ofensystem auf das andere nicht übertragbar. Das wird verständlich, wenn man berücksichtigt, daß die entscheidende Größe hier nicht das Porenvolumen, sondern die Form und Verteilung der Poren ist, die zwei an sich reaktionsfähige Klinkerpartien voneinander trennen.

#### 4.3.2 Homogenität

In einem homogenen Klinker würde die Verteilung der Poren und Feststoffanteile weitgehend statistisch sein. Innerhalb der Feststoffanteile wäre die Verteilung der Klinkerphasen sowie ihre Ausbildung ebenfalls gleichmäßig. Dieser Idealfall kann jedoch nur bei aufwendiger Aufbereitung und beim Brand des Rohmaterials im Laboratorium erreicht werden (Bild 127).

Technische Klinker sind dagegen sowohl in der Ausbildung als auch in der Verteilung der Klinkerphasen nur selten homogen.

Im folgenden werden Inhomogenitäten im Klinker beschrieben und ihre möglichen Ursachen aufgeführt.

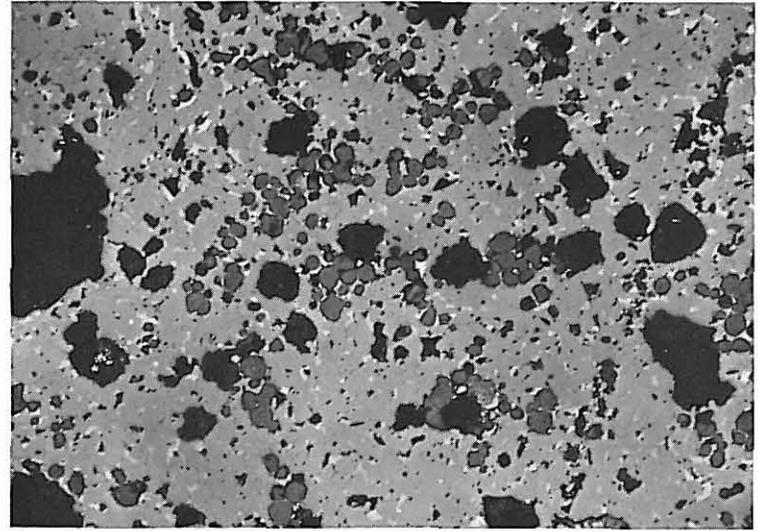


220×

H<sub>2</sub>O

Bild 115

Gleichmäßige Verteilung der Klinkerphasen. Angätzter, mittelgrauer Alit und hellgrauer Belit. In der Grundmasse weißlicher Ferrit. Die schwarzen Flecken sind Poren.



200×

H<sub>2</sub>O

Bild 116

Freikalk, gleichmäßig im Klinker eingestreut.

#### 4.3.2.1 Schwankungen in der Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung eines Klinkers kann sowohl zeitlich, wie auch lokal, um einen gewissen Sollwert schwanken. Hierher gehören einerseits Schwankungen in der Zusammensetzung des Rohmehls am Ofeneinlauf, zum anderen aber auch Inhomogenitäten, die auf Überkorn, Entmischungen und andere Erscheinungen zurückzuführen sind und sich in dem Klinker als Flecken und Schlieren abbilden.

Eine gleichmäßige Verteilung von Freikalk z. B. läßt auf einen zu hohen CaO-Gehalt im Klinker schließen. Jedoch nur eine Kontrolle mehrerer Klinkerproben über längere Zeitabschnitte hinweg kann entscheiden, ob der CaO-Gehalt allgemein zu hoch eingestellt oder ob eine kurzzeitige Schwankung in der Rohmaterialzusammensetzung die Ursache war. Durch chemische Analysen kann diese Frage nur selten entschieden werden.

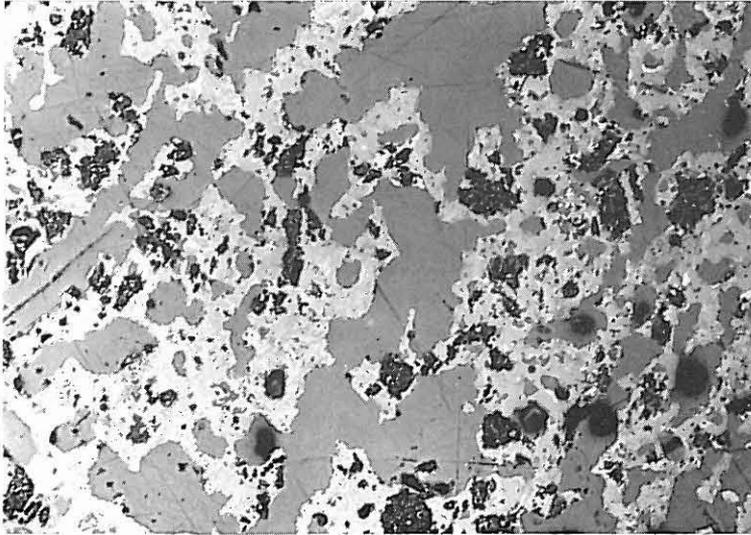
#### 4.3.2.2 Fleckige Verteilung

„Flecken“ im Klinker sind die Folge von eng begrenzten, örtlichen Anreicherungen einzelner Komponenten des Rohmaterials, die während des Brennvorganges nicht zu Ende rea-

gierten oder vom Klinker nicht in homogener Verteilung aufgenommen wurden. Sie schließen als besonderen Fall die Nester (4.3.2.3) ein. Eine „fleckige“ Verteilung der Klinkerphasen, vor allem von Belit und Freikalk, kann dementsprechend auf sehr verschiedene Ursachen zurückzuführen sein.

Fleckige Texturen können durch zu niedrigen *Brenngrad* entstehen. Dieser wird entweder durch zu niedrige *Brenntemperaturen* oder durch zu kurze *Verweilzeit* des Klinkers im Ofen hervorgerufen. Beide Ursachen führen zu schmalen Reaktionsräumen zwischen Belit- und Freikalkpartien: Sie sind durch geringe „Reaktionstiefe“ gekennzeichnet. Niedrigere Brenntemperaturen zeichnen sich zusätzlich durch einen hohen Porositätsgrad aus.

Eine fleckige Ausbildung des Klinkers kann auch durch *mangelnde Homogenität* des Rohmaterials hervorgerufen werden. Um das entscheiden zu können, muß zunächst geprüft werden, ob die Gesamtzusammensetzung der beobachteten Klinkerpartie „richtig“ ist oder ob Freikalkflecken auf einen Kalküberschuß bzw. Belitflecken auf einen Kalkunterschluß zurückzuführen sind. Bei normalem Brenngrad ist jedoch stets mit einer angemessenen Reaktionstiefe zu rechnen.

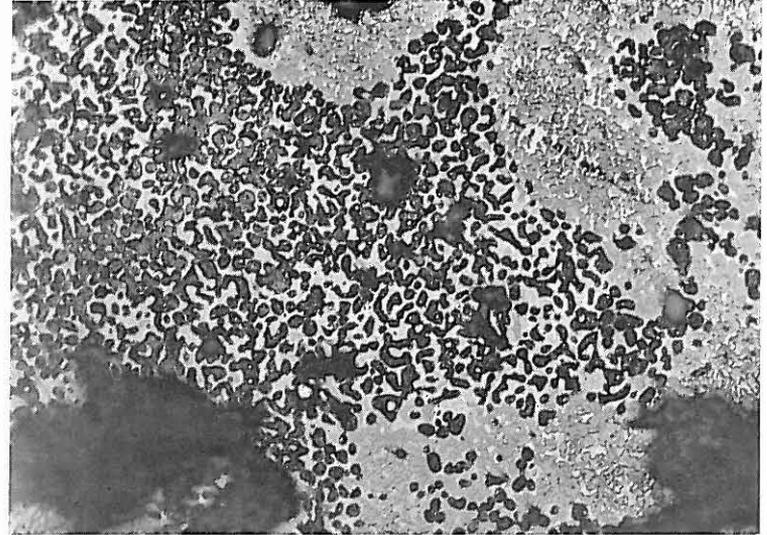


100 ×

H<sub>2</sub>O

Bild 117

Fleckige Verteilung von schwarzem Freikalk (z. B. 65/45) in einem sehr porösen Klinker, zurückzuführen auf zu niedrige Brenntemperatur. Daneben Silicate und Grundmasse. Man erkennt auch hier eine fleckige Verteilung des hellgrauen Aluminats und weißlichen Ferrits. Die Poren sind mit Harz gefüllt, zum Teil zeigen sie Kratzer. Die dunklen Flecken im Harz sind Luftblasen.

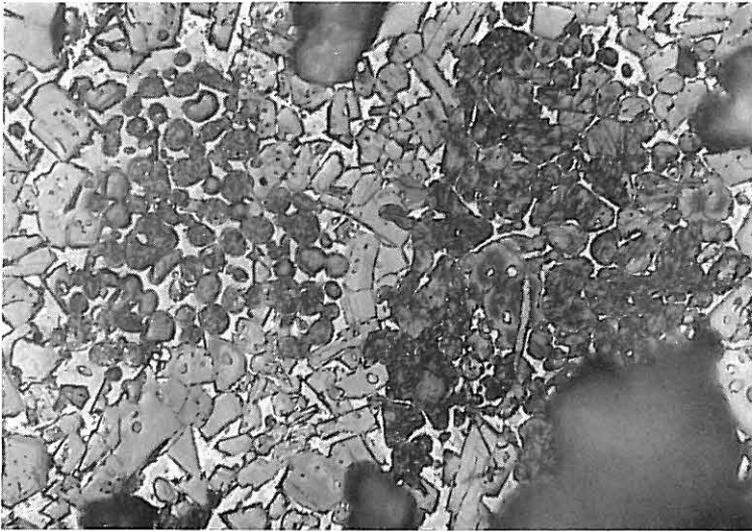


300 ×

H<sub>2</sub>O und DAC

Bild 119

Schwarze und dunkelgraue Freikalkflecken. Daneben alitreiche Partien mit ferritreicher Grundmasse. Große, dunkle Flecken sind Poren (20/15 und 90/10).

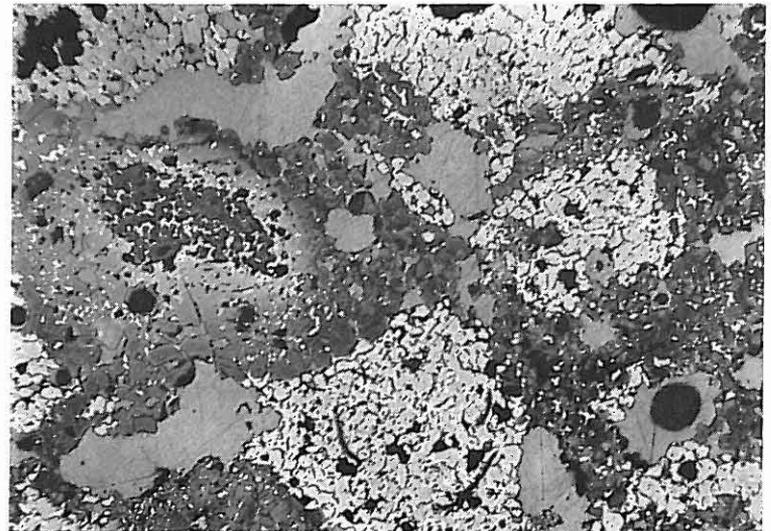


710 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 118

Fleckige Verteilung der Klinkerphasen. Schmalen Alitsaum zwischen Belit- (70/40) und Freikalkpartien (25/40), zurückzuführen auf zu kurze Verweilzeit im Ofen.



100 ×

alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 120

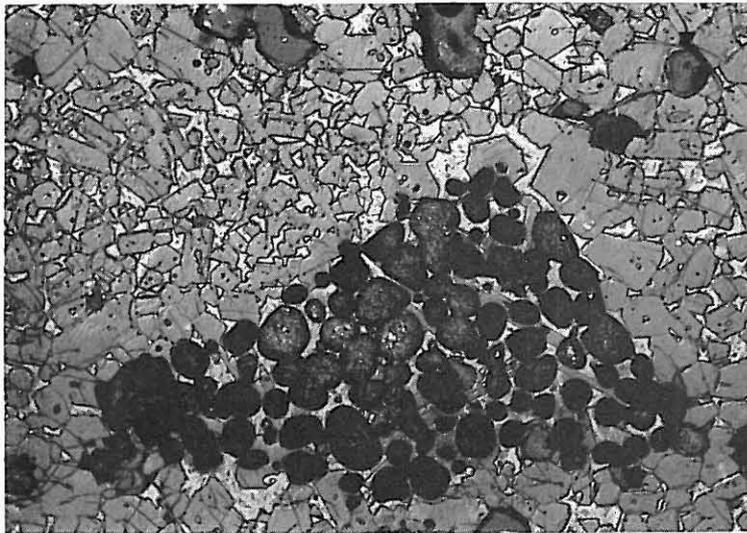
Fleckige Verteilung der Klinkerphasen mit Übergängen zur Nesterbildung. Hellgrauer Belit (z. B. 50/15) und dunkelgrauer Alit (45/30). In der Nähe eines Freikalknestes (20/40) ist der Alit weniger intensiv angeätzt, weil hier die Säure des Ätzmittels durch CaO neutralisiert wurde.

#### 4.3.2.3 Nester

Nester sind scharf begrenzte, unregelmäßige Anreicherungen eines Minerals im Klinker. Sie entstehen aus größerem Korn (Überkorn) im Rohmehl, das während des nachfolgenden Brandes oft nicht vollständig „verdaut“ werden kann. Unter normalen Bedingungen kann man nicht damit rechnen, daß Körner über 0,1 mm noch vollständig resorbiert werden. Die Umrisse der so entstandenen Nester bilden weitgehend die Grenzen der ehemaligen Körner nach. Die Zusammensetzung des Nestes hängt von der Natur des Ausgangskorns ab.

Belitnester sind Zeugen von kalkarmen Einschlüssen im Rohmaterial. In erster Linie kommen hier Quarzsplinter in Betracht sowie auch Aschetropfen, die sich in der Ofenflamme bilden können und später ins Ofenmehl gelangen.

Im normalen Klinker reagiert Quarz immer mit CaO zu Belit. Kalkärmere Silicate oder gar Quarz- oder Cristobalitrelikte kommen normalerweise nicht vor. Das  $\text{SiO}_2$  wandert auf Grund seiner hohen Beweglichkeit bei Sintertemperatur in die kalkreichere Umgebung. Dadurch entsteht häufig an dem Ort des ehemaligen Quarzkorns eine typische Pore, die von einem mächtigen Belitkranz umgeben ist (Bild 125). Da nicht bekannt ist, wie weit die „Wanderung“ ging, kann man nicht von den Umrissen eines Belitnestes auf die ursprüngliche Gestalt des Quarzkorns oder  $\text{SiO}_2$ -Trägers schließen.

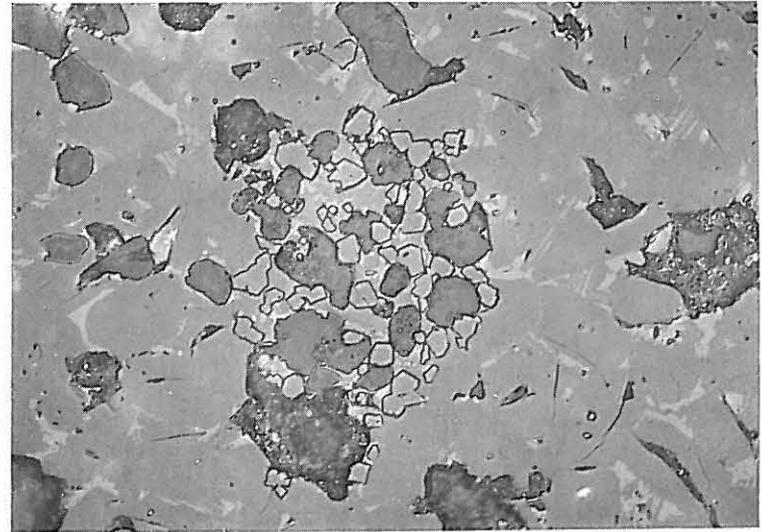


220 ×

H<sub>2</sub>O

Bild 121

Freikalknest (60/25), ein typischer Zeuge eines ehemaligen Kalksteinsplitters im Rohmehl.

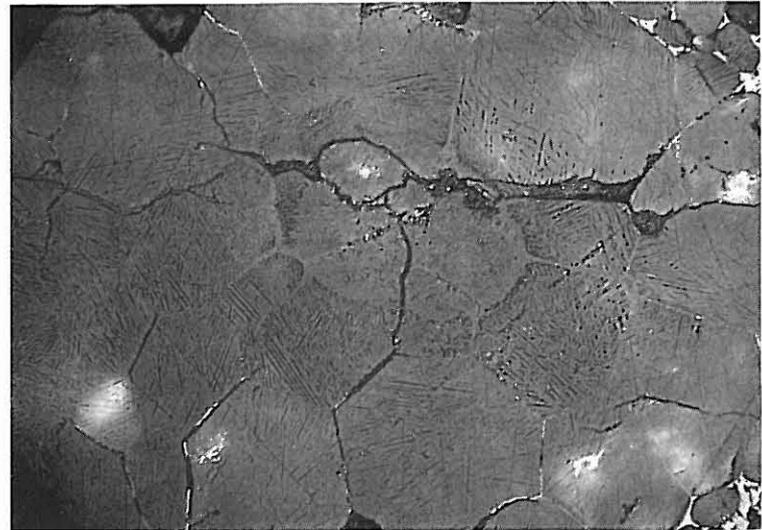


500 ×

Luftätzung

Bild 122

Nest aus dunkelgrauem Freikalk (50/40) und mittelgrauem Periklas mit Relief, zurückzuführen auf Dolomitüberkorn.

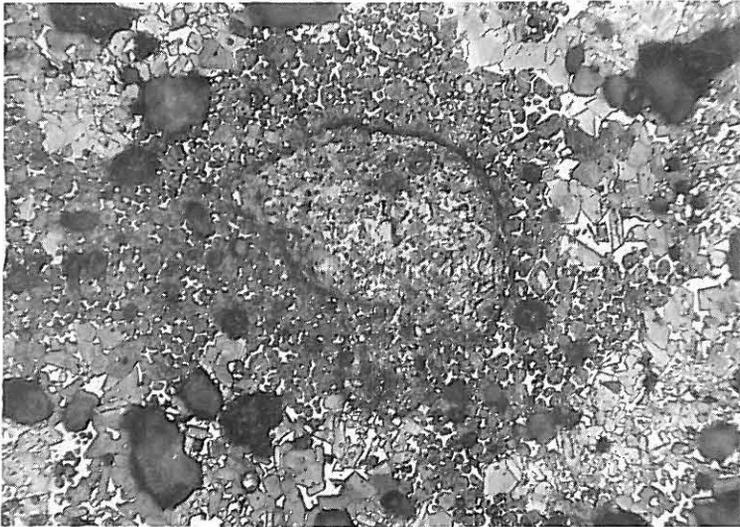


500 ×

H<sub>2</sub>O

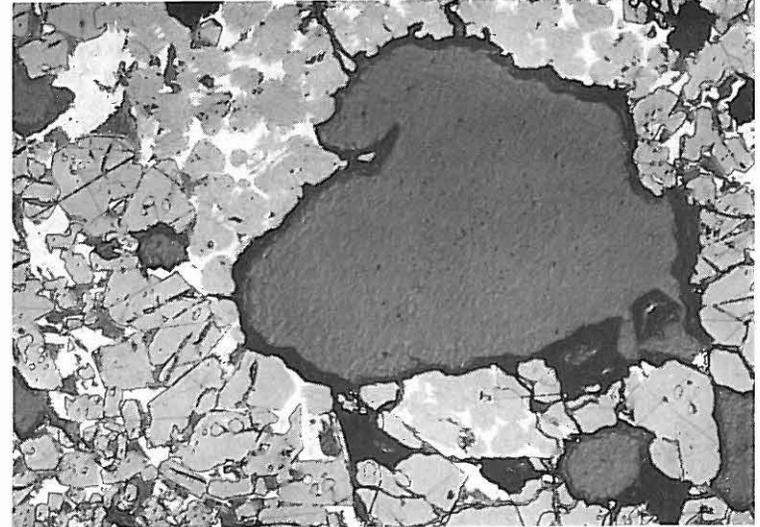
Bild 123

Belitnest mit kreuzlamelliertem Belit ohne Grundmasse im Klinker an der Stelle eines ehemaligen Quarzkorns im Rohmaterial.



280 × alkoh. HNO<sub>3</sub>

Bild 124  
Belitnest, zurückzuführen auf ein Korn aus Hochofenschlacke, das sich im Kern erhalten hat (50/40).



200 × H<sub>2</sub>O und DAC

Bild 125  
Klinker aus normal aufbereitetem Rohmehl, im Laborofen 20 min bei 1450 °C gebrannt. Bezeichnend sind unterschiedlich große Alite und eine Anhäufung von Beliten um eine größere Pore.

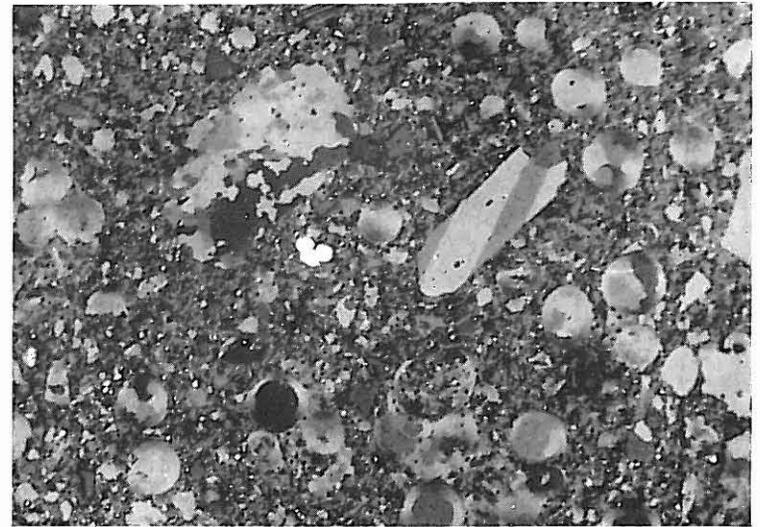
Ein Belitnest mit viel Grundmasse ist meist Zeuge eines Ascheinschlusses, während ein grundmassearmes Belitnest meist auf Quarzüberkorn zurückzuführen ist. Eine eindeutige Unterscheidung dieser beiden Arten von Belitnestern ist zumeist schwierig, da außer Quarz und Asche auch noch andere Komponenten wie z. B. Feldspat und Hochofenschlacke als Urheber für Belitnester in Frage kommen können.

Freikalknester (Bild 121) entstehen, wenn ein grobkörniges Kalksteinkorn während des Reaktionsablaufes nicht vollständig aufgezehrt wird. Verschiedentlich bilden diese Freikalknester sogar die Form des ehemaligen Kornes nach.

Waren Dolomitmörner die Ursache des Nestes, so entstehen hier Nester, die neben dem freien CaO auch Periklaskristalle enthalten. Die Abgrenzung zwischen Schwankungen der Zusammensetzung, fleckiger und nestartiger Verteilung ist oft schwierig.

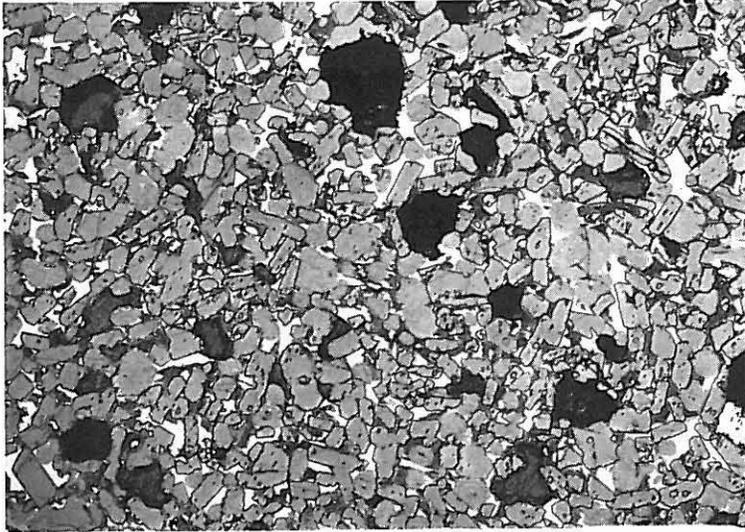
Die besondere Erscheinungsform sowie die Entstehung der Nester sind aus der Gegenüberstellung der folgenden Klinkerbilder und der zugehörigen Rohmehle (Bild 125 bis 128) zu erkennen.

Aus Wirtschaftlichkeitsgründen kann ein technisches Rohmehl nie so fein aufbereitet werden, daß eine ideale Homogenität gewährleistet ist. Die Ansprüche an die Homogenität sind um so größer, je kalkreicher man einen Klinker einstellt und je geringer der Freikalkgehalt sein soll.



180 × ungeätzt

Bild 126 (polarisiertes Auflicht)  
Normal aufbereitetes Rohmehl mit größeren Kalksteinstücken und runden Kalkorganismenresten. Durch den starken Reflexionspleochroismus des Calcits (35/55) wird der Kornaufbau der Bruchstücke deutlich sichtbar.

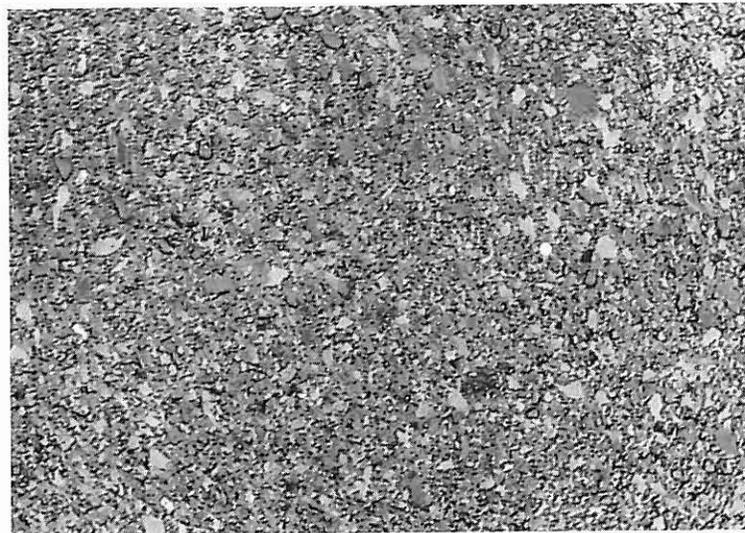


200 ×

H<sub>2</sub>O und DAC

Bild 127

Klinker aus demselben Rohmehl wie Bild 125, in einer Kolloidmühle nachgemahlen und im Laborofen 20 min bei 1450 °C gebrannt. Alite von etwa gleicher Größe, dazwischen gleichmäßig eingestreuter Belit. Die Verteilung aller Bestandteile ist gleichmäßiger geworden.



180 ×

ungeätzt

Bild 128 (polarisiertes Auflicht)

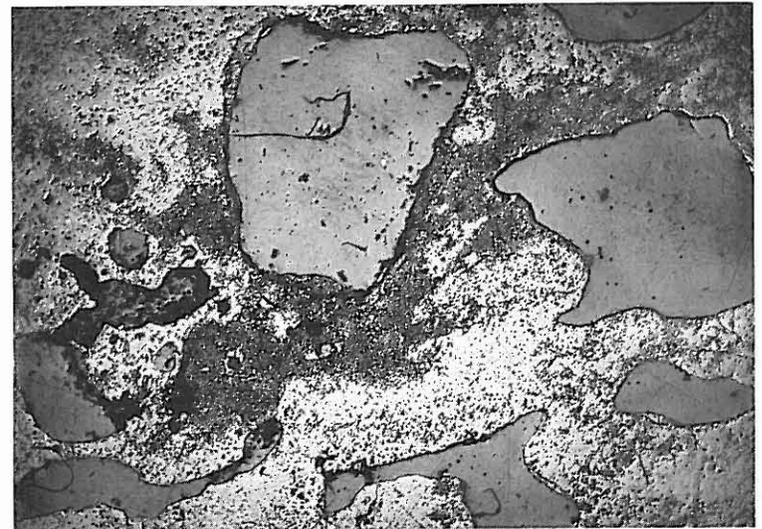
Dasselbe Rohmehl wie bei Bild 126, 5 1/2 h in der Kolloidmühle naß gemahlen.

#### 4.3.2.4 Schlieren

Schlieren sind Anhäufungen einer Phase, die auf Grund unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung innerhalb eines Klinkerkornes entstehen. Sie können auf ungenügende Homogenität des Rohmaterials zurückgeführt werden, entstehen aber auch, wenn sich bereits gut homogenisiertes Rohmehl später, z. B. durch Staubbildung in Luftförderrinnen oder beim Abwurf in Silos, wieder entmischt. Eine Unterscheidung dieser Ursachen der Schlierenbildung ist aber aus dem Klinkerbild allein nicht immer möglich, zumal auch Entmischungen im Ofen auftreten können.

Häufig bilden sich an der Peripherie von Klinkergranalien, die aus granuliertem Rohmehl mit aschereicher Kohle gebrannt wurden, typische Belitschlieren. Die Asche fällt auf die Oberfläche der bereits vorgeformten Granalien und bildet hier eine kalkarme Zone, in der beim nachfolgenden Brennen Belit entsteht. Ähnliche Belitschlieren bilden sich auch, wenn der Ofenstaub stark differenziert und kalkarm ist und sich auf den Granalien niederschlägt.

Zwischen Belitschlieren und Granalienoberfläche folgt in den meisten Fällen noch ein Außensaum „normaler“ Klinkerzusammensetzung. Er wurde im Ofen aus Abriebmaterial auf die Belitschlieren aufgewickelt.



30 ×

H<sub>2</sub>O

Bild 129

Ausgedehnte Freikalkschlieren (30/20), zurückzuführen auf Entmischung des Rohmehls.



15×

H<sub>2</sub>O

Bild 130  
Typische Belitschlieren (15/20) an der Peripherie einer Lepolofen-Klinkergranalie.

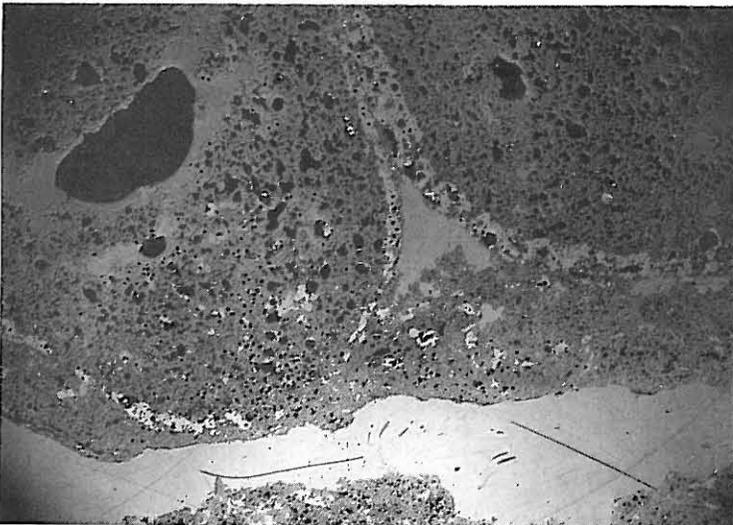
#### 4.3.2.5 Schwankungen der Kristallgröße

Die Größe der einzelnen Kristalle kann im Klinker in weiten Grenzen schwanken. Da das Kristallwachstum von der Temperatur, der Zeit und der chemischen Zusammensetzung der Umgebung abhängt, können Änderungen dieser Einflußgrößen unterschiedliche Größen der Klinkerphasen hervorrufen. So kennzeichnen die Größenunterschiede der Alite in *einem* Klinker aufgezehrte Nester oder ehemalige Inhomogenitäten.

Bei höheren Temperaturen oder längerer Brenndauer bilden sich normalerweise größere Kristalle. In kalkarmer Umgebung, also in der Nachbarschaft von Belit, neigt der Alit zur Bildung größerer Kristalle. Auf Bild 132 ist die Ursache des unterschiedlichen Größenwachstums nicht zu erkennen.

#### 4.3.2.6 Differentiation der Schmelze

Eine Differentiation kann nur in der schmelzflüssigen Grundmasse erfolgen. So kann zum Beispiel die Schmelze aus einzelnen Bereichen des Klinkers in die Randzone abwandern und sich dort anreichern, oder es können sich auch einzelne Bestandteile der Schmelze von anderen trennen.



50×

H<sub>2</sub>O

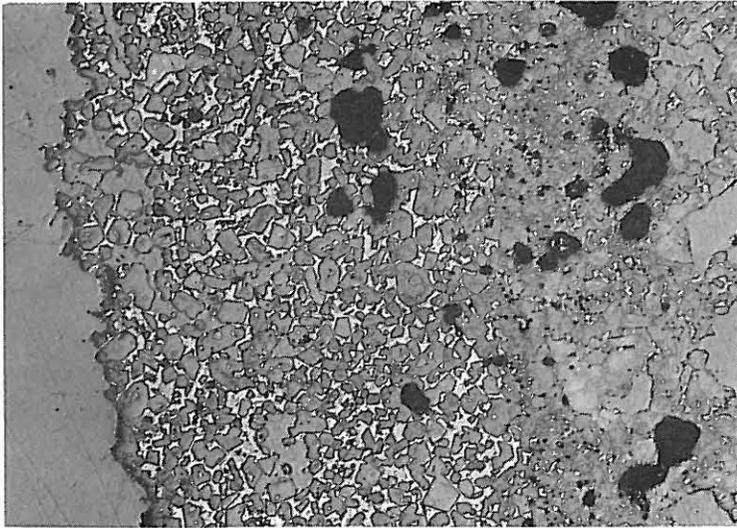
Bild 131  
Auf der Oberfläche von zwei Lepolofen-Klinkergranalien wurde Asche niedergeschlagen, die zur Bildung eines Belitsaumes (53/50) führte. In der Sinterzone klebten die beiden Granalien zusammen und wickelten dann gemeinsam eine Abriebschicht als Außenzone auf.



100×

H<sub>2</sub>O

Bild 132  
Ungleichmäßige Ausbildung der Alitkristalle.  
(Siehe auch Bild 125)

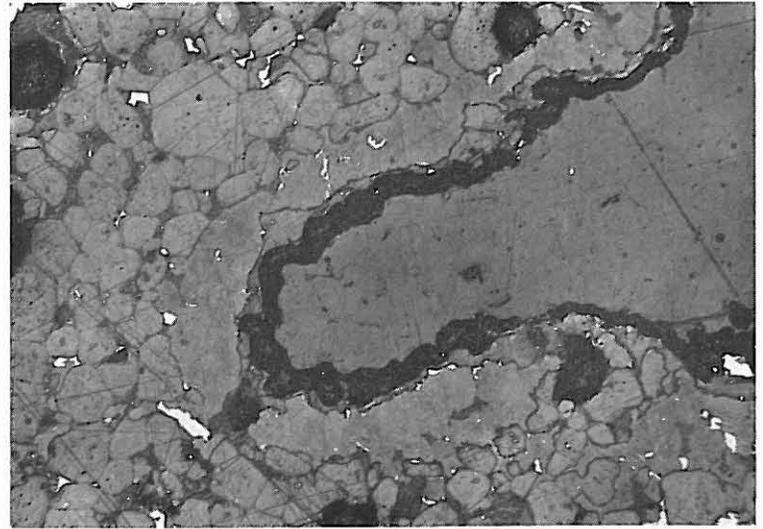


100×

H<sub>2</sub>O

Bild 133

Anreicherung der Grundmasse in der Randzone einer Klinkergranalie (40/40).



200×

H<sub>2</sub>O

Bild 134

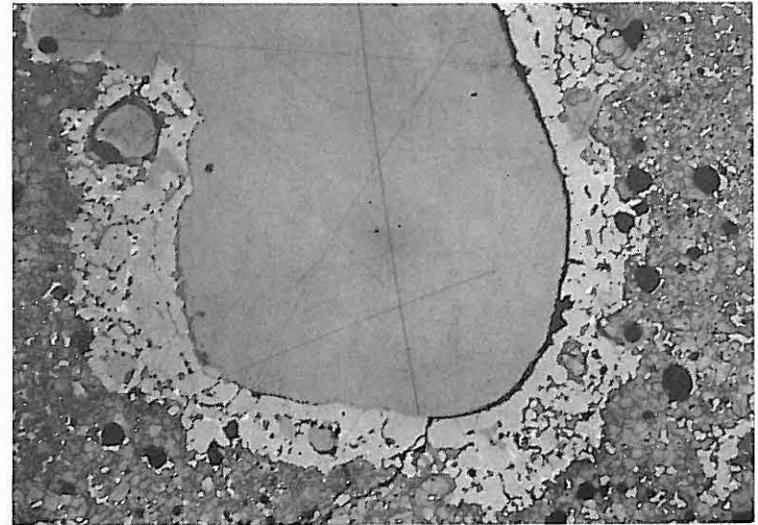
Schwarze Freikalkschliere an einer Porenoberfläche (35/30). (Eine Mobilisierung des Si kann dazu führen, daß letzteres in die Klinkersubstanz eindringt.) Unmittelbar an die Freikalkschliere schließt sich ein schmaler angeätzter Alitsaum (35/40) an. Darauf folgen eine ungeätzte Belitzone und schließlich die normale Klinkersubstanz. In der Grundmasse weißlicher Ferrit und dunkelgraues Aluminat.

#### 4.3.2.7 Reaktionssäume an Poren

Gelegentlich kann man an Porenoberflächen Belit- oder Freikalkanreicherungen feststellen. Die Ursachen für eine Anreicherung oder Verarmung an SiO<sub>2</sub> (evtl. auch Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) können recht vielfältig sein. Sie sind noch keineswegs befriedigend geklärt.

Auf die Entstehung eines Belitkranzes in der Umgebung ehemaliger Quarzkörner und gleichzeitige Bildung eines Porenraumes im Zentrum wurde bereits oben hingewiesen.

Daneben können sich aber auch völlig andersgeartete Reaktionen abspielen. Die Bildung von Freikalksäumen an Porenoberflächen tritt vorwiegend in reduzierend gebrannten Klinkern auf. Vermutlich können Reaktionen wie beispielsweise die Verflüchtigung von Si als SiO, also Reaktionen über die Gasphase, hier eine Rolle spielen. Bei oxydierendem Brennen ist eine Verflüchtigung von Si nicht möglich.



100×

H<sub>2</sub>O

Bild 135

Anreicherung von hellgrauem Belit an einer Porenoberfläche. Daneben normale Klinkersubstanz mit mittelgrauem Alit und nicht differenzierter Grundmasse.

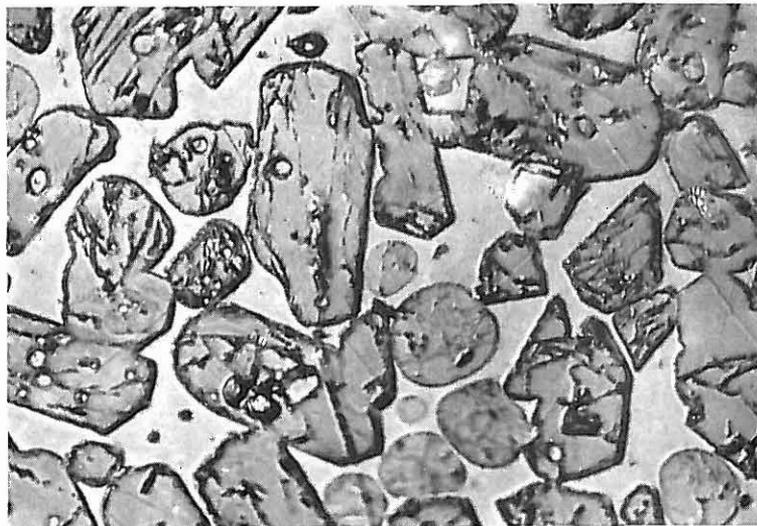
### 4.3.3 Gefüge der Grundmasse

Bei Sintertemperatur ist die Grundmasse eine weitgehend homogene, flüssige Phase. Während des Abkühlens kristallisieren aus dieser Schmelze verschiedene Phasen, nämlich Aluminat, Ferrit und untergeordnet Belit, manchmal auch Alit oder Freikalk und Periklas aus.

Wenn diesen Phasen bei ihrer Bildung genügend Zeit zur Verfügung steht, wachsen große Einzelkristalle. Der Klinker wird aber im Kühler abgeschreckt, so daß das Kristallwachstum gestört wird; statt großer Einzelindividuen entsteht eine innig verzahnte, „sperrige“ Verwachsungsstruktur kleiner Kristalle.

Die folgenden Bilder sollen einen Eindruck von der Vielfalt der Gefügeausbildung vermitteln. Sie sind im wesentlichen in einer Reihenfolge von schneller zu langsamer Kühlung geordnet. Das Gefüge wird entscheidend von der Zusammensetzung der Schmelzphase, vor allem vom Tonerdemodul, beeinflusst. Aber auch andere Komponenten, wie z. B. Alkalien, wirken sich aus. Man sollte stets zur Beurteilung der Kühlungsgeschwindigkeit versuchen, weitere Merkmale, wie z. B. Belitmäntel um Alit, Korrosion von Alit, Sekundärausscheidungen aus der Grundmasse und andere, zu berücksichtigen.

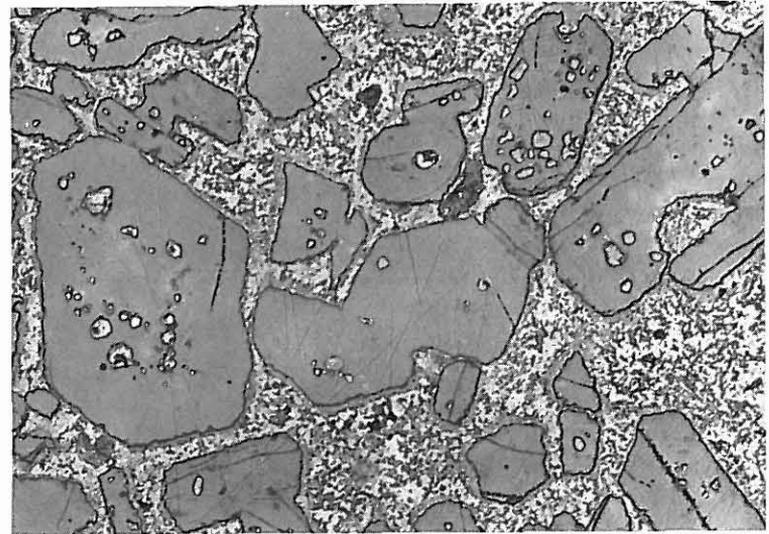
Ausscheidungen von sekundärem Belit, Freikalk oder Periklas aus der Schmelze und Entmischung aus kristallinen Phasen sind stets untrügliche Hinweise auf langsame Abkühlung (Bild 144 bis 147).



860 ×

DAC

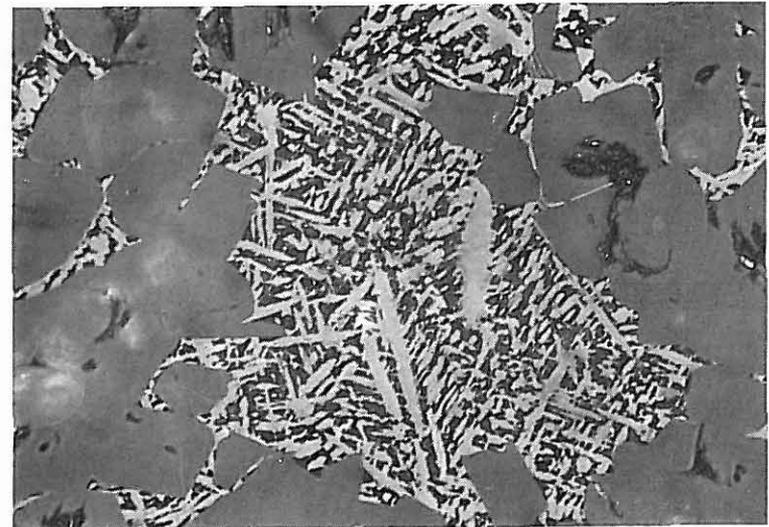
Bild 136  
Stark abgeschreckter Klinker eines Naßdrehofens mit Tonerdemodul 2,0. Neben Alit runde Belitkörner. Die Grundmasse ist kaum differenziert.



650 ×

H<sub>2</sub>O und DAC

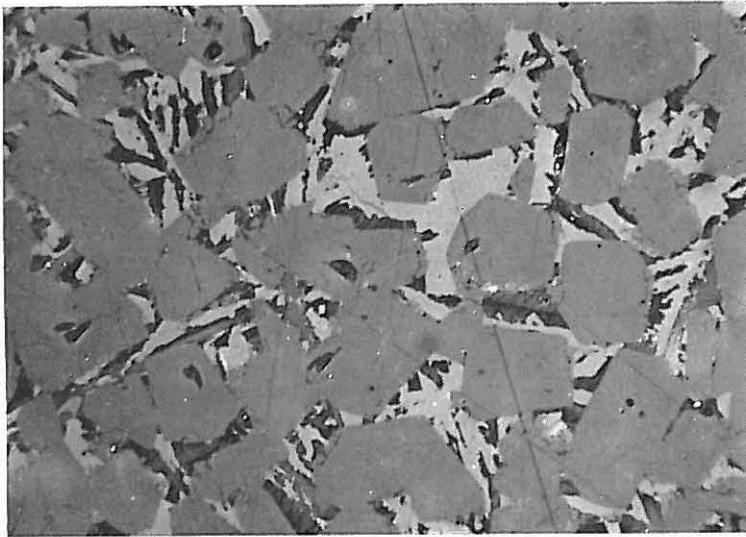
Bild 137  
Verhältnismaßig schnell gekühlter Klinker. Die Grundmasse ist deutlich differenziert, die Kristalle sind aber noch sehr klein. Stellenweise Belit-säume um Alit.



800 ×

H<sub>2</sub>O

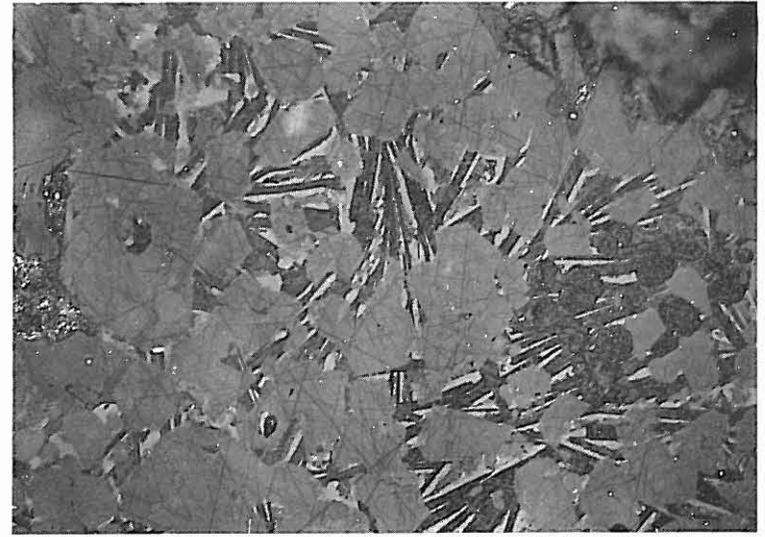
Bild 138  
Relativ schnell gekühlter Klinker mit typisch sperriger Verwachsungsstruktur der Grundmasse.



800×

H<sub>2</sub>O

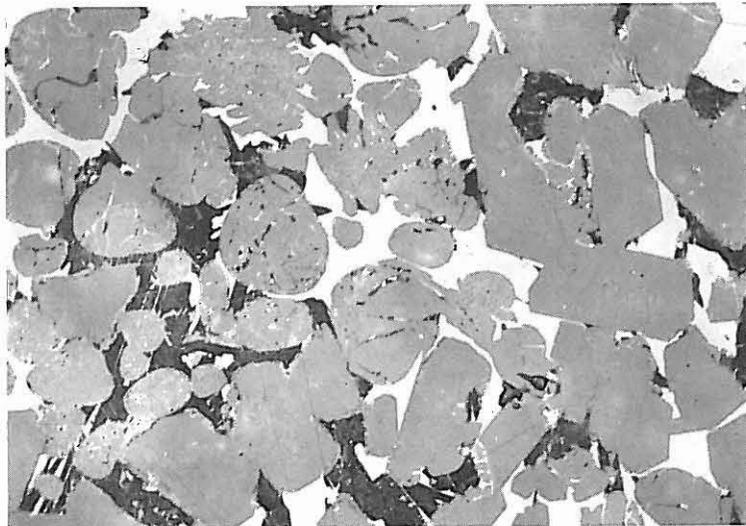
Bild 139  
Normal gekühlter Klinker mit schon deutlich differenziertem Aluminat und Ferrit.



500×

H<sub>2</sub>O

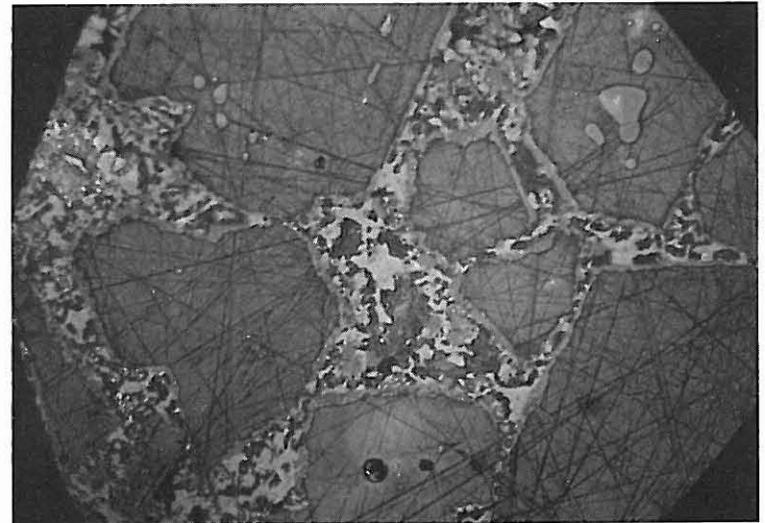
Bild 141  
Langsam gekühlter, alkalihaltiger Klinker. Lamellares, idiomorphes, dunkelgraues Alkalialuminat. Alit mit Schleifkratzern und weißlicher Ferrit. Daneben dunkelgraue, rundliche Freikalkkörner.



540×

H<sub>2</sub>O

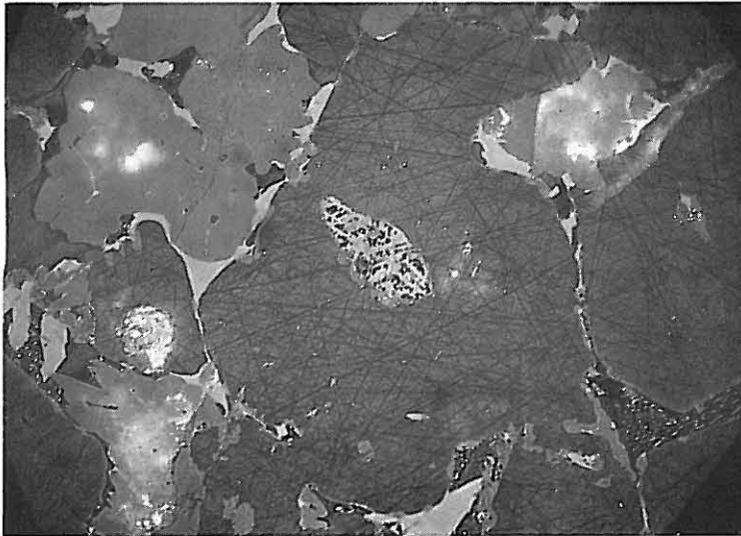
Bild 140  
Langsam gekühlter Klinker. Deutliche Differenzierung von Aluminat und Ferrit. Belitmäntel um Alit und sekundär gebildeter Belit in der Grundmasse.  
(Siehe auch Bild 15)



500×

H<sub>2</sub>O

Bild 142  
Dieses Gefüge der Grundmasse kann noch nicht befriedigend gedeutet werden.

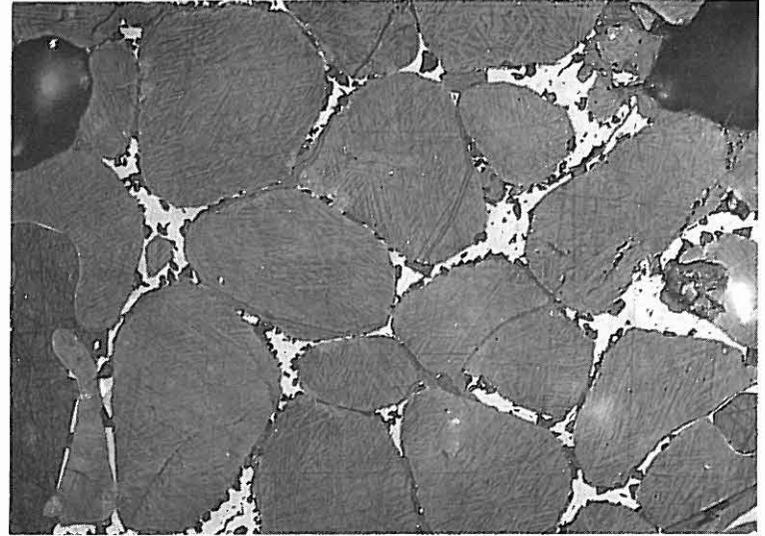


500×

H<sub>2</sub>O

Bild 143

Unterschiedliches Gefüge der Grundmasse. Zwischen Alit und Belit Aluminat und Ferrit mit feiner Sekundärausscheidung von Belit (z. B. 85/15), mit allen Anzeichen langsamer Kühlung. Ein Einschluß im Alit (50/35) enthält dagegen feinverwachsene Grundmasse, die hier nicht schneller abgekühlt sein kann als außerhalb des Alitkristalls. Offensichtlich ist im Einschluß das Verhältnis Ferrit : Aluminat : Belit wesentlich anders als in der normalen Grundmasse. Das Bild zeigt, daß die Kühlgeschwindigkeit allein aus dem Gefüge von isolierten Teilen der Grundmasse nicht abgeleitet werden kann.



800×

H<sub>2</sub>O

Bild 145

Kleine, dunkle, sekundäre Alitkristalle in einer ferritischen Grundmasse.

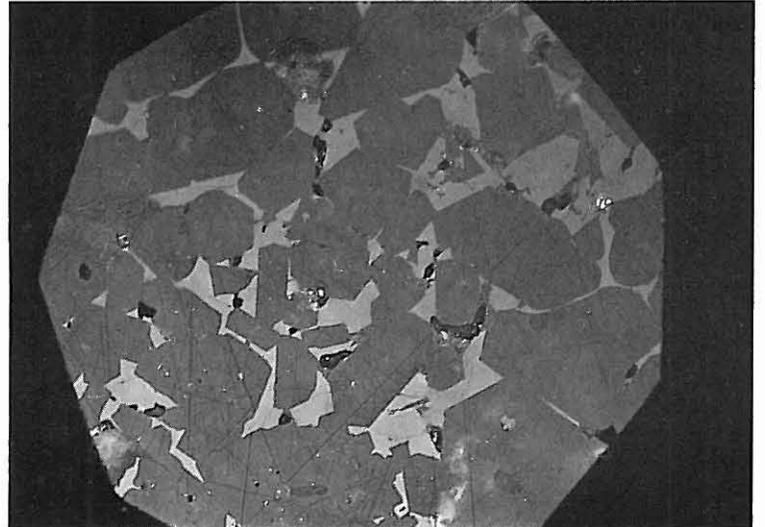


500×

H<sub>2</sub>O

Bild 144

Sekundärer Belit in feinsten Einschlüssen, besonders im Aluminat (40/20), weniger im Ferrit (65/42). Belitsäume um Alit.

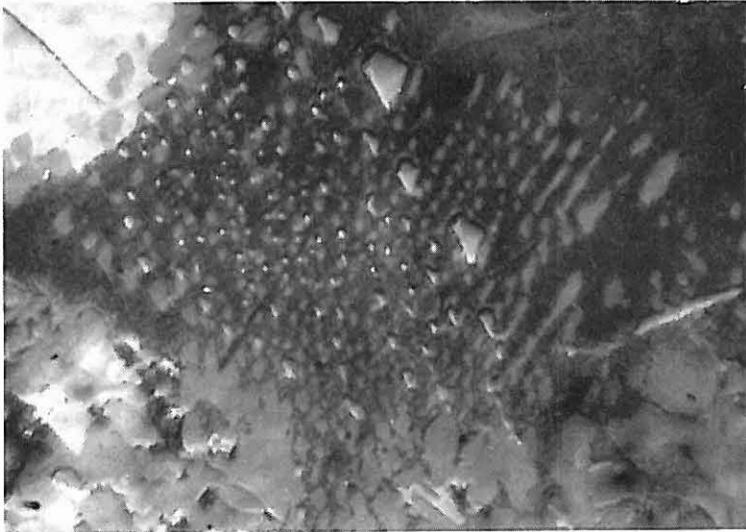


500×

H<sub>2</sub>O

Bild 146

Freikalk (60/26) als Sekundärausscheidung aus der Grundmasse eines eisenreichen Klinkers.



1000×

H<sub>2</sub>O

Bild 147

Entmischungskörper von Belit (87/25) und Periklas (50/60) im Aluminat (80/35). Die Kristallkanten aller hellgrauen Periklaseinschlüsse verlaufen untereinander und zu den gleichzeitig entmischten mittelgrauen Belitkörpern parallel. Sie beziehen sich auf die kristallographische Orientierung des Wirtkristalls. Es handelt sich hier um Entmischungen aus Aluminat in festem Zustand und nicht um Sekundärausscheidungen aus einer Schmelze.

## 5. Quantitative Bestimmungen

### 5.1 Längenmessung

Zur mikroskopischen Längenmessung wird ein *Okular-Mikrometer* verwendet, das einen Längenmaßstab enthält, der vorher mit einem *Objekt-Mikrometer* für die jeweilige Vergrößerung und mikroskopische Kombination geeicht werden muß.

Die Bestimmung wird an mikroskopischen Präparaten (S. 12ff.) vorgenommen. Die zu messenden Anteile werden mit dem Maßstab im Okular-Mikrometer zur Deckung gebracht und die von ihnen überdeckten Abschnitte ausgezählt. Durch Multiplikation mit dem Eichfaktor erhält man die Größe in Millimeter.

Längenmessungen an verschiedenen Komponenten nebeneinander können mit einem *Integrationstisch* oder *Integrationsokular* vorgenommen werden. Über die Handhabung dieser Zusatzgeräte unterrichten Bedienungsanleitungen und Lehrbücher der Kristalloptik.

### 5.2 Flächenmessung

Die Flächenmessung wird in ähnlicher Weise wie die Längenmessung durchgeführt. Nur werden an Stelle der Okulare mit Längenmaßstäben solche mit Quadraten oder Kreisen benutzt. Mit diesen geeichten Flächen wird das Objekt zur Deckung gebracht und die zugehörige Fläche registriert.

Bei genaueren Flächenbestimmungen werden von dem Präparat Mikroaufnahmen angefertigt und in den Bildern mit gleicher Vergrößerung die Komponenten planimetriert.

### 5.3 Korngrößenbestimmung

Die Korngrößenbestimmung wird entweder als Längen- oder als Flächenmessung durchgeführt. Hierzu müssen Streupräparate benutzt werden, bei denen die Korngrenzen genau bestimmbar sind.

Anschliffe zeigen meist nur Bruchteile der wirklichen Korngrößen, weil die Komponenten nur angeschnitten werden. Da nicht immer die optimalen Schnittgrößen erfaßt werden, entsteht ein Fehler, durch den die gemessene Korngröße kleiner ist, als sie in Wirklichkeit vorliegt. Nur bei unregelmäßigen und richtungslos körnigen Präparaten kann man in diesem Fall ein angenähert richtiges Ergebnis erwarten\*.

### 5.4 Quantitative Phasenbestimmung

Bei der quantitativen Bestimmung werden die Flächenanteile der einzelnen Phasen ermittelt, die dem Volumenanteil entsprechen. Dazu müssen die Korngrenzen klar erfaßt werden können, was bei einem Klinker oder Zement nur im Anschliff möglich ist. Es ist zu beachten, daß in einer Fläche gemessen wird, die für das gesamte Volumen charakteristisch sein muß. Diese Voraussetzung trifft normalerweise nur für richtungslos körnige Strukturen zu. Bei Klinkern mit Nesterbildung und zonarer Verteilung der Mineralphasen muß eine ausreichend große Probe vorbereitet werden.

Die Messung kann in dem vorbereiteten Anschliff auf verschiedene Weise durchgeführt werden:

#### 1. durch *Planimetrieren* :

Dazu wird das Präparat fotografiert, und die Phasen auf den Bildern werden planimetriert. Dieses Verfahren ist zeitraubend und durch die große Zahl von Aufnahmen sehr aufwendig. Es hat deshalb keine praktische Bedeutung.

\* Die Bestimmung der wahren Kornverteilung aus beliebigen Ausschnitten wird bei H. Münzner: „Zur Ermittlung der Kornverteilung von An- und Dünnschliffen“, Mitteilungsblatt für math. Statistik, 5 (1953), S. 167 bis 176, beschrieben.

2. durch *Streckenmessung* :

Dazu legt man über die Bildfläche in gleichen Abständen „Leitgeraden“ und mißt die den einzelnen Phasen zugehörigen Abschnittslängen. Die Summe aller Abschnitte (A) einer Phase, dividiert durch die insgesamt vermessene Strecke, ergibt den Streckeninhalte in Prozent, der dem Rauminhalt proportional ist,

$$\text{Vol.-% M}_1 = \frac{\sum A_{M1} \cdot 100}{\sum (A_{M1} + A_{M2} + \dots + A_{Mx})}$$

wobei x = 1, 2 ... n die jeweilige Mineralart bedeutet.

3. durch *Punktzählung* :

Hierzu wird das Bild mit einem regelmäßigen Netz von Punkten überzogen, die in statistischer Zufälligkeit auf die einzelnen Mineralphasen auftreffen. Diese Treffer werden für jede Mineralart gezählt und aus dem Verhältnis der Treffer die Volumenprozent wie bei der Streckenmessung errechnet.

Zur Durchführung der Punktzählung ist jedes *Netzokular* geeignet. Das Netz wird in das bereits vom Objektiv vergrößerte Zwischenbild des Schliffes projiziert. Es kann mit sehr starker Vergrößerung gezählt werden, so daß auch feinere Einschlüsse der Phasen, z. B. Belit im Alit mitberücksichtigt, sowie die Zwischenmasse eindeutig aufgelöst und CaO und MgO erfaßt werden können.

*Auswertung der Messung* : Bei allen mikroskopischen Mengenbestimmungen erhält man Volumenprozent. Die Gewichtsprozent erhält man durch Umrechnung mit den Dichten, die im folgenden angegeben sind. Jedes einzelne Volumen wird mit der zugehörigen Dichte multipliziert und das Produkt durch die Summe aller Volumengewichte dividiert.

Dichte der Klinkerphasen in g/cm<sup>3</sup>

Alit	3,20
α-Belit	3,07*
α'-Belit	3,31**
β-Belit	3,28
γ-Belit	2,97
Aluminat	3,04
Ferrit: C <sub>1</sub> AF	3,76
C <sub>2</sub> F	4,01
C <sub>6</sub> A <sub>2</sub> F	3,71
Freikalk	3,35
Periklas	3,58

\* bei 1500° C; \*\* bei 700° C

Bei dieser Rechnung können kleine Unstimmigkeiten übernommen werden, da die hier angegebenen Dichten für die reinen Phasen gelten und die Dichten der tatsächlich vorliegenden Klinkerphasen davon abweichen können.

## 6. Bestimmung des Klinker- und Hüttensandgehaltes von Zementen

### 6.1 Allgemeine Hinweise

Unter dem Begriff Hüttenzemente werden hier die Normenzemente verstanden, die aus Zementklinker, granulierter basischer Hochofenschlacke – im folgenden als Hüttensand bezeichnet – und einem Sulfatträger bestehen und in den Deutschen Zementnormen DIN 1164 und DIN 4210 hinsichtlich ihrer Zusammensetzung definiert sind:

*Eisenportlandzement,*  
*Hochofenzement,*  
*Sulfathüttenzement*

Die Bestimmung des Klinker- bzw. des Hüttensandgehaltes dieser Zemente dient der betrieblichen Selbstkontrolle, der Normenüberwachung oder der schnellen Baustellenprüfung im Falle ihrer Verwendung für die Herstellung von Betonen mit besonderen Eigenschaften\*.

Im folgenden sollen lediglich allgemeine Hinweise für eine derartige Bestimmung und mikroskopisch feststellbare Kennzeichen von Portlandzementklinker und Hüttensand gegeben werden.

Der Klinker- und Hüttensandgehalt kann sowohl im Durchlicht als auch im Auflicht bestimmt werden. Für die Untersuchung im Durchlicht wird ein Polarisationsmikroskop benutzt, da nur mit ihm neben den äußeren Kennzeichen der Zementkörner, wie z. B. Kornform, Transparenz, Ausbildung von Einzelkristallen und Lichtbrechung, auch die für jede Mineralbestimmung sehr wichtige optische Eigenschaft der Doppelbrechung beobachtet werden kann.

Bei nichtglasier Hochofenschlacke hat sich die Auszählung im Auflicht besonders bewährt.

Die Zementzusammensetzung wird an Körnerpräparaten bestimmt. Für die Herstellung dieser Präparate muß der zu prüfende Zement erst aufbereitet werden, da im Anlieferungszustand eine mikroskopische Untersuchung aus folgenden Gründen nicht möglich ist: Das Nebeneinander von Körnern verschiedener Größe von unter 1 µm bis über 100 µm erschwert die Beobachtung sehr stark. Außerdem enthält jeder Zement einen großen Anteil an Feinstpartikeln mit Korngrößen kleiner als 10 µm,

\* Eine ausführliche Übersicht über die verschiedenen bisher in der Literatur vorgeschlagenen Bestimmungsmethoden und ihre Anwendungsgrenzen enthält K. Grade: „Die Bestimmung des Hüttensandgehaltes in Hüttenzementen“. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 29, S. 113 bis 140.

die sich mikroskopisch nicht mehr sicher bestimmen lassen und häufig zur Agglomeratbildung neigen. Die quantitative Bestimmung der Komponenten endlich ist in Präparaten mit unterschiedlichen Korngrößen mittels einfacher Kornzählung unmöglich. Bei der Untersuchung solcher Präparate liefern auch die anderen Methoden der quantitativen Phasenbestimmung, wie Planimetrieren, Streckenmessung oder Punktzählung (vgl. Kapitel 5), ungenaue Ergebnisse, da sich der Feinstanteil nicht erfassen läßt.

Aus diesem Grunde hat es sich als vorteilhaft erwiesen, eng begrenzte Kornfraktionen zu untersuchen. Für ihre Auswahl sind vor allem zwei Gesichtspunkte maßgebend:

- a) die Einzelpartikel müssen mikroskopisch sicher zu bestimmen sein;
- b) die Fraktion muß in ihrer Zusammensetzung möglichst weitgehend der Zusammensetzung des Originalzementes entsprechen.

Diesen Bedingungen wird in den weitaus meisten Fällen die Korngrößenfraktion 30 bis 40  $\mu\text{m}$  gerecht. Die in früherer Zeit für die Bestimmung des Klinkergehaltes verwendete Fraktion 60 bis 90  $\mu\text{m}$  hat wegen der heute höheren Mahlfineinheit meistens nicht mehr die gleiche Zusammensetzung wie der Originalzement.

## 6.2 Mikroskopische Kennzeichen

### 6.2.1 Klinker

Die Klinkerkörner zeigen in den für die mikroskopische Untersuchung im Durchlicht verwendeten Kornfraktionen meist rundliche Umrisse. Sie bestehen fast stets aus mehreren Einzelkristallen. Durch den Ferrit sind die Klinkerkörner im Durchlicht vorzugsweise mehr oder weniger braun gefärbt, gelegentlich sind auch grüne Farbtöne festzustellen. Die Brechungsindices der Hauptklinkerminerale Alit und Belit liegen etwa zwischen 1,69 und 1,72, also weit über der Lichtbrechung der gebräuchlichen Einbettungsmittel. Als Folge dieses großen Unterschiedes zwischen den Lichtbrechungsindices von Einbettungsmittel und Klinkerphasen ergibt sich ein sehr starkes Relief, das auch schwächer gefärbte Klinkerkörner oder kleinere Bruchstücke nicht gefärbter Einzelkristalle im Durchlicht relativ dunkel erscheinen läßt.

Im polarisierten Licht zwischen gekreuzten Nicols leuchten die Alit- und Belitkriställchen beim Drehen des Mikroskoptisches viermal mehr oder weniger stark in hellgrauen bis weißgelben Farbtönen auf.

Die Unterscheidung von Klinker- und Hüttensandkörnern ist im Anschliff nach Ätzung mit einem der in Abschnitt 2.4 ge-

nannten Ätzmittel eindeutig möglich. So ätzt z. B. 0,001% alkoh.  $\text{HNO}_3$  die Hauptbestandteile Alit und Belit des Zementklinkers mehr oder weniger stark an. In den Hüttensandkörnern werden dagegen von den Hauptschlackenmineralen lediglich das Dicalciumsilicat und der Merwinit, die beide nur in untergeordneten Mengen auftreten, geätzt. Der für die Hüttensande charakteristische hohe Glasanteil und auch das vorherrschende Schlackenmineral Melilith weisen keine Ätzwirkung auf (Bild 148 bis 151).

### 6.2.2 Hüttensand

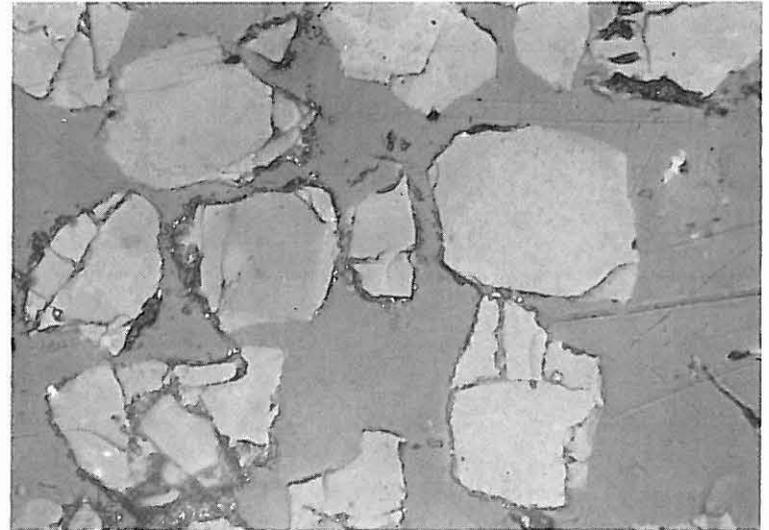
Der weitaus überwiegende Teil der Hüttensandkomponente ist infolge der intensiven Abschreckung der flüssigen Schlacke bei der Granulation glasig ausgebildet. Die Körner haben scharfe, splittrige Umrisse und muscheligen Bruch. Sie sind zumeist farblos und im Durchlicht klar durchsichtig. Die Lichtbrechung des Hüttensandglases liegt zwischen 1,62 und 1,67. Zwischen gekreuzten Nicols bleiben diese Körner infolge der optischen Isotropie des Glases auch bei Drehung des Präparates stets dunkel. Gelegentlich, bei hoch basischen Hüttensanden etwas häufiger, enthält die glasige Grundmasse kleine Einschlüsse von Melilith, Dicalciumsilicat, Merwinit und anderen Schlackenmineralen. Während das Dicalciumsilicat fast stets rundliche Formen zeigt, sind die anderen Schlackenminerale sehr oft skelettartig ausgebildet. Bei gekreuzten Nicols und Drehung des Mikroskoptisches leuchten diese kristallinen Bestandteile des Hüttensandes mehr oder weniger hell in weißen, grauen oder gelblichen Farbtönen auf.

Im Anschliff werden die Schlackengläser lediglich von HF-Lösungen mehr oder weniger stark angegriffen. Nach Behandlung mit HF-Dampf sind Anlauffarben zu beobachten.

Vollkristalline Hüttensandkörner kommen bei den üblichen Hüttenzementen nur selten vor. Sie bestehen dann aus den oben angeführten Schlackenmineralen. Die Lichtbrechung der meisten Schlackenminerale liegt größenordnungsmäßig etwa in der Höhe der Lichtbrechung des Schlackenglases, zwischen  $n = 1,61$  und  $1,67$ . Sie ist damit bedeutend kleiner als die der Hauptklinkerminerale. Hüttensandkörner, ob glasig oder kristallin, heben sich im Durchlicht darum weniger stark aus dem Einbettungsmittel heraus als die Klinkerkörner. Neben der Kornform ist somit das schwächere Relief ein weiteres charakteristisches Kennzeichen der Hüttensandkörner. Ferner ist die schon bei den Kristalleinschlüssen im Glas erwähnte Ausbildung von Kristallskeletten auch bei den kristallinen Hüttensandkörnern häufig zu beobachten. Sie bietet ein weiteres Merkmal für Hüttensand, da die Bestandteile des Klinkers meist gut kristallisiert sind.

In Fällen, in denen die Körner sehr feinkristallin sind und infolgedessen im Durchlicht die Feststellung der Höhe der Licht- oder

Doppelbrechung als Kriterium nicht möglich ist und auch Anschliffe nicht angefertigt werden können, ist zur Unterscheidung der Zementkomponenten die Untersuchung der Kornfraktion im *ultravioletten Licht* zweckmäßig. Im Gegensatz zum Klinker besitzen die Hüttensandkörner die Eigenschaft, bei Bestrahlung mit sehr kurzwelligem, ultraviolettem Auflicht, wie es etwa eine Quarzlampe aussendet, in verschiedenen Farbtönen zu fluoreszieren. Während die glasigen Hüttensandkörner rosa, rote oder braune, die kristallinen Hüttensandkörner blaue oder violette Leuchtfarben ausstrahlen, leuchten die Klinkerkörner nicht. Mit Hilfe dieser Fluoreszenz ist somit auch bei Proben mit feinkristallinem Hüttensandanteil und feinkristallinem Klinker, also in Fällen, in denen im Durchlicht die Unterscheidung oft sehr schwierig ist, eine sichere Unterscheidung der einzelnen Zementteilchen noch möglich. Im Gegensatz zu der sonst üblichen Untersuchung im eingebetteten Zustand muß dabei jedoch mit einem nicht eingebetteten Streupräparat gearbeitet werden, da fast alle gebräuchlichen Einbettungsmittel selbst intensiv in weißen bis gelblichen Farbtönen fluoreszieren und die Leuchtfarben der Hüttensandkomponente einer eingebetteten Zementprobe überstrahlen.

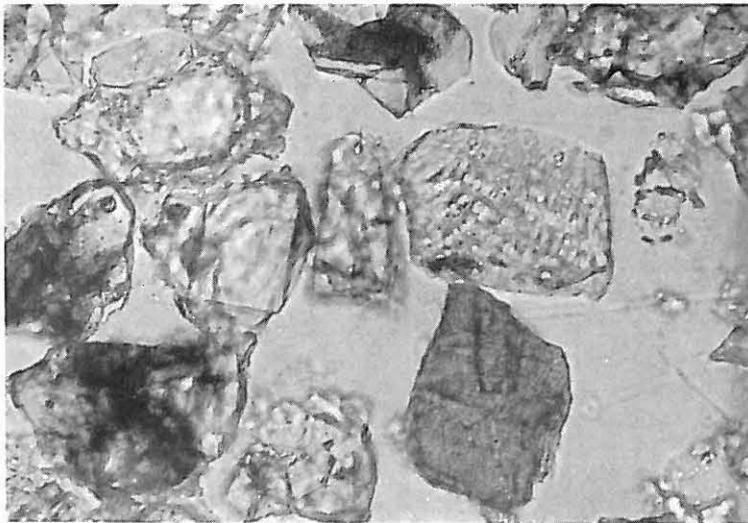


500×

ungeätzt

Bild 149 (Auflicht)

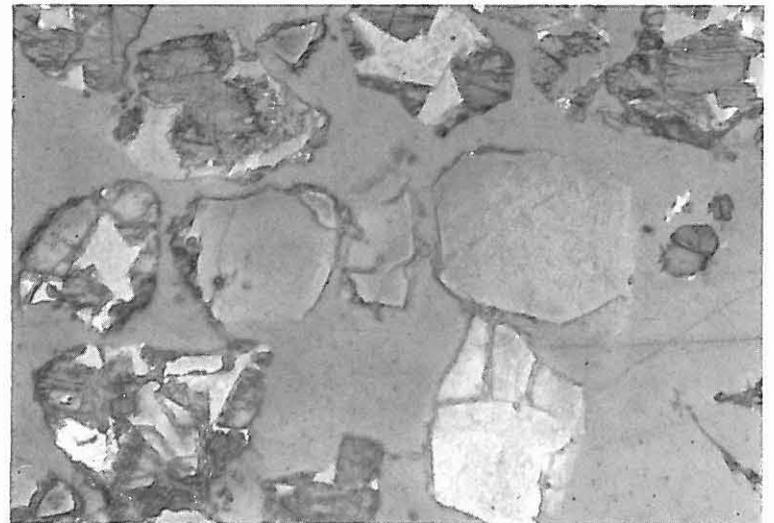
Andünnschliff eines Hüttenzementes, Fraktion 40 bis 60  $\mu\text{m}$ , gleiche Stelle wie Bild 148.



500×

Bild 148 (Durchlicht)

Andünnschliff eines Hüttenzementes, Fraktion 40 bis 60  $\mu\text{m}$ .  
Schlacke (65/15, 70/40, 50/40, 35/40, 30/55, 20/0).  
Alle übrigen Körner sind Klinkerkörner.

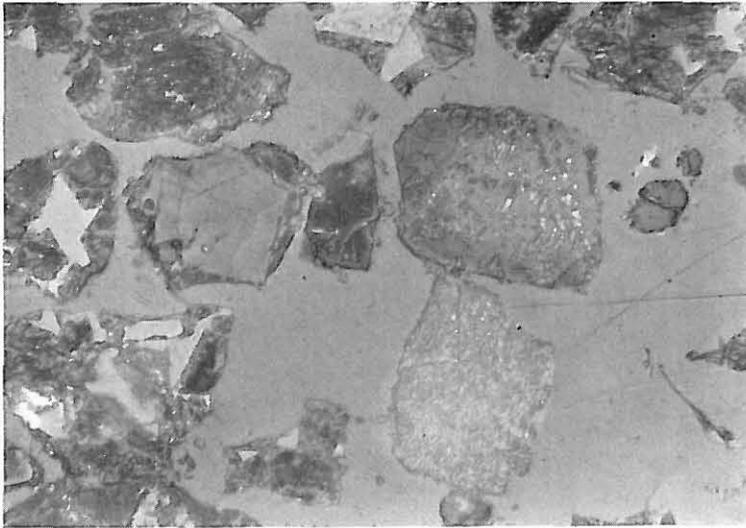


500×

alkoh.  $\text{HNO}_3$

Bild 150 (Auflicht)

Andünnschliff eines Hüttenzementes, Fraktion 40 bis 60  $\mu\text{m}$ , gleiche Stelle wie Bild 148.



500×

alkoh. HNO<sub>3</sub> und HF-Dampf

Bild 151 (Auflicht)  
 Andünnschliff eines Hüttenzementes, Fraktion 40 bis 60 µm, gleiche Stelle wie Bild 148.

## 7. Mineralogische Fachausdrücke

### *Anisotropie :*

Verschiedenartiges Verhalten eines Körpers (z. B. eines Kristalls) in verschiedenen Raumrichtungen. Die Doppelbrechung nicht-kubischer Kristalle ist beispielsweise auf unterschiedliche Lichtbrechung in verschiedenen kristallographischen Richtungen zurückzuführen.

### *Dendriten :*

Zweig-, farnkraut- oder baumartig gewachsene Kristall, „skelette“. Sie sind meist auf schnelles Wachstum zurückzuführen. Typische Beispiele sind Schneekristalle oder – im Portlandzementklinker – Calciumsulfid (Bild 94, 95) und sekundärer Periklas (Bild 84, 85).

### *Habitus :*

Gesamtgestalt eines Kristalls, bedingt durch die Größenverhältnisse der einzelnen Formen. Durch Festkörperreaktionen bilden sich beispielsweise gedrungene Alitkristalle, dagegen werden aus einer Schmelze dünntafelige Alitkristalle ausgeschieden (Bild 17, 19).

### *Idiomorph :*

Kristalle, die während der Entstehung ihre Eigengestalt voll entwickeln konnten, werden als idiomorph bezeichnet. Beispiel: Alit (Bild 17, 23) oder, sehr selten, Aluminat (Bild 71, 72, 73).

### *Isotropie :*

Gleichartiges Verhalten eines Körpers in allen Richtungen. Glas ist meist isotrop. Ebenso sind Kristalle des kubischen Systems optisch isotrop. In anderen Eigenschaften (z. B. Spaltbarkeit, Wachstum, Ätzverhalten und andere) können aber auch sie deutlich anisotrop sein.

### *Modifikation :*

Verschiedene Kristallstrukturen ein und derselben chemischen Verbindung. Siehe auch unter „Polymorphie“.

### *Myrmekit :*

Innige, „wurmgangartige“ Verwachsung von zwei oder mehr Kristallen verschiedener Zusammensetzung. Ein typisches Beispiel dieser Verwachsungsstruktur ist Bild 41.

### *Paragenese :*

Von einer bestimmten Bildungsgeschichte abhängige Vergesellschaftung von Mineralen. Für normale Portlandzementklinker z. B. ist die Paragenese Alit, Belit, Aluminat und Ferrit typisch.

### *Pleochroismus :*

Anisotropie der Lichtabsorption. Sie bewirkt, daß ein doppelbrechender, gefärbter Kristall bei Beobachtung in polarisiertem Licht (nur Polarisator) in Abhängigkeit von seiner Orientierung zur Schwingungsrichtung des Lichts unterschiedliche Farbintensitäten und Farbtöne zeigt. Turmalin absorbiert beispielsweise in Richtung parallel zu seiner Längsachse (kristallographische c-Achse) nur schwach, senkrecht dazu aber stark – bis zur vollständigen Undurchsichtigkeit. Analog kann ein dünnes Ferritplättchen im Dünnschliff je nach seiner kristallographischen Orientierung zu einem polarisierten Lichtstrahl Farben von hellbernsteingelb bis dunkelrotbraun aufweisen (Bild 2, 3).

### *Poikiloblastisch :*

Jüngere, stark wachsende Neubildungen schließen oft ältere Bestandteile ein. Dabei entsteht ein sogenanntes poikiloblastisches Gefüge. Beispiel: Einschließen von Belit in später gebildeten, stark sprossenden Alit (Bild 32).

#### *Polarisiertes Licht :*

Während normales Licht in allen Ebenen um die Fortpflanzungsrichtung des Lichtes als Achse schwingt, liegen im geradlinig polarisierten Licht alle Schwingungen nur in einer einzigen Ebene (Schwingungsebene).

#### *Polymorphie :*

Eine Reihe chemischer Verbindungen hat die Eigenschaft, unter bestimmten Bedingungen (Temperatur, Druck, Fremdkomponenten) verschiedene Kristallarten zu bilden. Beispielsweise kann Dicalciumsilicat in vier verschiedenen Modifikationen,  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta$  und  $\gamma$ , vorkommen.

#### *Pseudomorphose :*

Verdrängung einer chemischen Verbindung durch eine andere unter Beibehaltung der äußeren Form der ursprünglichen Verbindung.

#### *Reflexionspleochroismus (Bireflexion):*

Änderung von Reflexionsvermögen und/oder -farbe beim Drehen eines anisotropen Kristalls unter polarisiertem Auflicht. Siehe auch „Pleochroismus“ (Bild 98, 99, 101, 102).

#### *Sphärolith :*

Kugeliges, radialstrahlig kristallisiertes Aggregat (Bild 101, 102).

#### *Struktur :*

1. Kristallstruktur: Räumliche Anordnung der Atome oder Atomgruppen im Kristallgitter.
2. Gesteinsstruktur: Die Art des Aufbaus eines Gesteins aus den einzelnen Bestandteilen. Hierbei werden vor allem Form, Größe und Verwachsung der Gemengteile berücksichtigt. Zum Beispiel grobkörnige, feinkörnige, dendritische Strukturen.

#### *Textur :*

Räumliche Anordnung der einzelnen Bestandteile im Gestein, z. B. richtungslose oder schlierige Textur usw.

#### *Tracht :*

Kombination aller an einem Kristall vorhandenen Flächen. Tracht und Habitus gemeinsam beschreiben die Kristallgestalt.

#### *Undulöse Auslöschung :*

Ungleichmäßige Auslöschung der Interferenzfarben bei Beobachtung eines Kristalls im Durchlicht mit gekreuzten Nicols. Sie ist entweder auf wechselnde chemische Zusammensetzung innerhalb des Kristalls oder auf Störungen (z. B. Druckbeanspruchung) zurückzuführen.

#### *Xenomorph :*

Xenomorphe Kristalle können während der Entstehung infolge Behinderung beim Wachstum nicht die ihnen zukommende Eigengestalt entwickeln. Gegensatz: idiomorph.

#### *Zwillinge :*

Symmetrische, gesetzmäßige Verwachsungen zweier Kristalle ein und derselben Art (ebenso: Drillinge, Viellinge). Bei polysynthetischer Verzwillingung sind mehrere Kristallindividuen so miteinander verwachsen, daß jeder dritte, fünfte, siebte usw. Kristall wie der erste, und jeder vierte, sechste, achte usw. wie der zweite orientiert ist.

## Literatur

- [1] Murawski, H.:  
Geologisches Wörterbuch.  
5. Aufl. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1963.
- [2] Bogue, R. H.:  
The Chemistry of Portland Cement.  
2. Aufl. Reinhold Publishing Corporation, New York 1955.
- [3] Buchwald, E.:  
Einführung in die Kristalloptik.  
Sammlung Göschen, Band 619, Verlag Walter de Gruyter & Co.,  
Berlin 1952.
- [4] Burri, C.:  
Das Polarisationsmikroskop.  
Verlag Birkhäuser, Basel 1950.
- [5] Correns, C. W.:  
Einführung in die Mineralogie.  
Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1949.
- [6] Freund, H.:  
Handbuch der Mikroskopie in der Technik.  
Band I, Teil 1: Allgemeines Instrumentarium der Durchlichtmikroskopie. 1957.  
Band I, Teil 2: Allgemeines Instrumentarium der Auflichtmikroskopie. 1960.  
Band IV, Teil 1: Mikroskopie der Gesteine. 1955.  
Umschau Verlag, Frankfurt am Main.
- [7] Insley, H., und D. v. Frechette:  
Microscopy of Ceramics and Cement.  
Academic Press, New York 1955.
- [8] Kleber, W.:  
Einführung in die Kristallographie.  
7. Aufl. VEB Verlag Technik, Berlin 1964.
- [9] Klockmann-Ramdohr:  
Lehrbuch der Mineralogie.  
14. Aufl. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1963.
- [10] Kordes, E.:  
Optische Daten zur Bestimmung anorganischer Substanzen mit dem Polarisationsmikroskop.  
Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr. 1961.
- [11] Kühl, H.:  
Zement-Chemie  
Band I: Die physikalisch-chemischen Grundlagen der Zementchemie. 3. Aufl. 1956.  
Band II: Das Wesen und die Herstellung der hydraulischen Bindemittel. 3. Aufl. 1958.  
Band III: Die Erhärtung und die Verarbeitung der hydraulischen Bindemittel. 3. Aufl. 1961.  
VEB Verlag Technik, Berlin.
- [12] Larsen, E. S., und H. Berman:  
The Microscopic Determination of the Nonopaque Minerals.  
2. Aufl. United States Government Printing Office, Washington 1934.
- [13] Rinne-Berek:  
Anleitung zu optischen Untersuchungen mit dem Polarisationsmikroskop.  
2. Aufl. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1953.
- [14] Schneiderhöhn, H.:  
Erzmikroskopisches Praktikum.  
E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1952.
- [15] Taylor, H. F. W.:  
The Chemistry of Cements.  
Academic Press, London-New York 1964.
- [16] Trojer, F.:  
Die oxydischen Kristallphasen der anorganischen Industrieprodukte.  
E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1963.
- [17] Winchell, A. N.:  
Elements of Optical Mineralogy.  
Part I: Principles and Methods. 5. Aufl. 1961.  
Part II: Descriptions of Minerals. 4. Aufl. 1961.  
Part III: Determinative Tables. 6. Aufl. 1957.  
John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [18] Winchell, A. N. und H. Winchell:  
The Microscopical Characters of Artificial Inorganic Solid Substances.  
Academic Press, New York-London 1964.

## Stichwortverzeichnis

Abriebschicht auf Klinkergranalien	60	Andunnschliff	9, 10, 11, 23, 68, 69
Alit	19	- , Herstellung	13
- , Ätzanisotropie	14, 16, 21, 23	Anisotropie	69
- , Ätzverhalten	14, 15, 16, 17, 18, 20	Anlaufätzung	14
- , idiomorpher	19, 20, 38, 44, 45	Anschliff	9, 65
- -Leisten	20	- , Herstellung	12
- mit Beliteinschlüssen	18, 24, 28, 40	- , polieren	13
- mit Belitlamellen	28	Ätzanisotropie des Alits	14, 16, 21, 23, 41
- mit Belitmantel	26, 62, 63	Ätzen	14
- mit Belitsaumen	62, 64	- mit Salpetersäure	14, 15, 17
- mit Belit- und Freikalkkeinschlüssen	44	- mit Wasser	14, 15, 16
- mit Freikalkknoten	24	- mit Wasser und Dimethylammoniumcitrat	14, 15, 18
- mit Haarrissen	27	Ätzmittel, Übersicht	15
- mit lanzettartiger Streifung	22, 23, 31	Ätzverhalten von Alit	14, 15, 17, 18
- mit Korrosionsrändern	25	- von Aluminat	14, 15, 17, 18
- mit Kühlrissen	31	- von Belit	14, 15, 17, 18
- mit poikiloblastischen Einschlüssen	24	- von Ferrit	14, 15, 17, 18
- mit polymorpher Umwandlung	22, 23	- von Freikalk	14, 15, 17, 18
- mit Resorptionserscheinungen	26	- von Periklas	14, 15, 17, 18
- mit Sprüngen	27	Aufflicht	9
- mit Zonarbau	22, 29, 41, 43	Ausbildung des Alits	20
- , optische Eigenschaften	20		
- -Saum	61	<b>Belit</b>	29
- , sekundärer	64	- als Sekundärausscheidung	41
- -Zerfall	26, 35	- an Porenoberflächen	58, 61
- -Zwillinge	21, 28	- , Ätzverhalten	14, 15, 17, 18
Alkalialuminat	39, 44, 63	- , dendritischer	36, 41, 48
- , idiomorphes	39, 63	- -Einschlüsse im Alit	18, 24, 28, 40
- , optische Eigenschaften	39	- -Entmischungskörper	24
Alkalibelit	29, 36, 44	- , gelappter	31, 32, 34
Alkalien im Klinker	62	- , idiomorpher	29
Alkalihaltiger Klinker	44, 63	Belitkranz	61
Alkaliphasen	44	- -Lamellen im Alit	28
Alkalisulfat	44	- -Mantel um Alit	26, 62
- , dendritisches	45	Belit mit Alit- und Ferriteinschlüssen	34
Aluminat	36, 37	- mit Fremdeinschlüssen	33
- , Ätzverhalten	14, 15, 17, 18	- mit Innenreflexen	33
- , dendritisches	37	- mit konzentrischen und radialen Rissen	30
- , idiomorphes	38	- mit Kreuzlamellierung	41
- , kubisches	37	- mit Kreuzstreifung	30, 31, 34, 38
- , mit Zonarbau	38	- mit Parallelstreifung	18, 31, 32, 33, 35, 36
- , optische Eigenschaften	37	- mit spindelförmigem Querschnitt	31
- , xenomorphes	37, 38	- mit Umwandlungsstrukturen	29

– mit untypischen Umrissen	32	Eisenportlandzement	66
– -Nester	57, 58	Eisensulfid	47
–, optische Eigenschaften	29	Entmischung des Rohmehles	59
– -Säume um Alit	62, 64	Entmischungskörper von Belit und Periklas im Aluminat	65
– -Saum um Kohlenascheschlieren	48	Entmischung von Belit im Alit	41
– -Schlieren	59, 60		
–, sekundärer	26, 38, 40, 63, 64	<b>Farbe des Klinkers</b>	52
– -Typen	29	Fehlermöglichkeiten bei der Klinkermikroskopie	50
–, ungestreift	30	Ferrariklinker	25
–, $\gamma$ -Belit	35	Ferrit	36, 40
<i>Bestimmung des Klinker- und Hüttensandgehaltes von Zementen</i>	66	–, idiomorpher	40, 41
Bireflexion s. Reflexionspleochroismus		–, optische Eigenschaften	40
Bleiabrieb beim Schleifen und Polieren	51	Flächenmessung	65
<i>Brenngrad des Klinkers</i>	55	Fleckige Verteilung der Klinkerphasen	55, 56
Brenntemperatur des Klinkers	55	Fluoreszenz von Hüttensand	68
		Form des Klinkers	52
<b>Calciumsulfid</b>	46, 49	Freikalk	42
CaO-arme Phasen	48	– als Sekundärausscheidung	42, 64
		–, Ätzverhalten	14, 15, 17, 18
<b>Dendriten</b>	69	– -Flecken	56
dendritisches Alkalisulfat	45	– -Knoten im Alit	24, 44
– Aluminat	37	– -Nester	57, 58
– Belit	36	–, optische Eigenschaften	42
– Calciumsulfid	46	–, Säume an Porenoberflächen	61
– Periklas	43, 45	– -Schlieren	59
– Wüstit	45	– -Schlieren an Porenoberflächen	61
Dicalciumsilicat s. Belit		– und Periklasnester	57
<i>Dichte der Klinkerphasen</i>	66	Fremdeinschlüsse im Belit	33
Differentiation der Schmelze	60		
Dolomitüberkorn	57	<b>Gefüge der Grundmasse</b>	62
Drehofenklinker	52, 53	– des Klinkers	51
Dünnschliffe	9	<i>Gehlenitglas</i>	48
–, Herstellung	13	Gelappter Belit	31, 32, 34
Dünn geschliffener Anschlag	13	Glas	37
Durchlicht	9	Graphit	47, 49
Durchschnittsprobe	11	Grundmasse	36
<b>Eichfaktor</b>	65	<b>Haarrisse im Alit</b>	27
Einbetten von Proben, große Proben	12	<i>Habitus</i>	69
–, lockere Proben	12	–, Alit	20, 21
–, pulverartige, körnige Proben	12	Hauptgemengteile des Klinkers	19
–, staubförmige Proben	12	Hochofenschlacke	66
–, stückige, körnige Proben	12	Hochofenzement	66
Einbettungsmittel	12, 14, 50	Homogenität des Klinkers	54

–, Rohmaterial	58	– Merkmale des Gefüges	52
Hüttsand	66	– Untersuchungsverfahren	9
Hüttenzement	66, 68, 69	Modifikation	69
Hygroskopische Verbindungen	48, 49	–, Alit	19, 22
Idiomorph	69	–, Belit	29
– Alit	19, 20, 38, 44, 45	–, Tricalciumsilicat	19
– Alkalialuminat	39, 63	Myrmekitisch	26, 27, 69
– Aluminat	37, 38	<b>Naßdrehofen</b>	52
– Belit	29	Nebengemengteile des Klinkers	42
– Ferrit	37, 40, 41	Nesterbildung im Klinker	57
Innenreflexe	26, 33, 37, 50	Netzokular	66
Integrationsokular	65	Newtonsche Ringe	50
Integrationsstisch	65	<b>Oberfläche des Klinkers</b>	52
Interferenzstreifen s. Newtonsche Ringe		Objekt-Mikrometer	65
Isotropie	69	Ofenansatz	35
<b>Kaliumsulfat</b>	44, 45	Okular-Mikrometer	65
Kalksteinbruchstücke im Rohmehl	58	Optische Eigenschaften, Alit	20
Kittmittel für Dünnschliffe	13	–, Alkalialuminat	39
Klinkerabrieb im Präparat	51	–, Aluminat	37
Klinkergefüge	51	–, Belit	29
Klinkerlitergewicht	52, 54	–, Ferrit	40
Klinkerphasen	19	–, Freikalk	42
Koks	47, 48	–, Periklas	43
Korngrößenbestimmung	65	<b>Paragenese</b>	47, 69
Korrodiertes Periklas	43	Parallelstreifung des Belits	18, 31, 32, 33, 35, 36
Korrosion, Alit	25, 38, 40, 62	Periklas	42
Kreuzstreifung des Belits	30, 31, 34, 38	–, Ätzverhalten	14, 15, 17, 18
Kühler	62	–, dendritisch	43, 45
Kühlung des Klinkers	62	–, optische Eigenschaften	43
<b>Längenmessung</b>	65	Phasen in reduzierend gebranntem Klinker	45
Lanzettartige Streifung des Alits	22, 23	Phasen ungeklärter Zusammensetzung	48
Leistenförmiger Alit	20	Planimetrieren	65, 67
Lepolofenklinker	52	Pleochroismus	9, 69
Litergewicht	52, 54	–, Ferrit	10
Lösungsätzung	14	Poikiloblastisch	24, 69
Luftätzung	42, 44, 49, 53	–, Einschlüsse im Alit	24
<b>Mahlfeinheit des Zementes</b>	67	Polarisiertes Licht	70
Makroskopische Merkmale des Klinkers	51	Polieren von Anschliffen	13
Melilith	48, 67	Poliermittel	13
Metallisches Eisen	45, 46, 47, 49	Polierpaste in Poren	25
Mikroskopische Kennzeichen von Hüttsand	67	Polierter Dünnschliff	13
– von Klinker	67	Polymorphic	70
		Polymorphe Umwandlung des Alits	22, 23

Polysynthetische Verzwilligung	70	Spindelförmiger Belit	31
–, Belit	31, 32, 33, 36	Sprünge im Alit	27
Poren im Klinker	50, 52, 53	Streckenmessung	66, 67
Porengröße des Klinkers	52	Streupräparate s. Pulverpräparate	65
– -reicher Drehofenklinker	54	Struktur	70
– -Verteilung des Klinkers	52	Sulfatträger	66
Porosität des Klinkers	52	Sulfathüttenzement	66
Primäre Phasen	36		
Prismatisches Aluminat	39	Tetracalciumaluminatferrit s. Ferrit	
Probenahme	11	Textur	70
Pseudomorph	26	Titancarbid	49
Pseudomorphose	70	Titannitridcarbid	49
Pulverpräparate	9, 13	Tonerdemodul	25, 36, 37, 40, 62
Punktzählung	66, 67	Tracht	70
		–, Alit	20
Quantitative Phasenbestimmungen	65	Tricalciumaluminat s. Aluminat	
		Tricalciumsilicat s. Alit	
Reaktionssäume an Poren	61	Trockendrehofen	52
Reduzierende Brennbedingungen	26, 28, 35, 45		
Reflexion der Klinkerphasen	14	Übergemengteile	19, 43
Reflexionspleochroismus	9, 70	Ultraviolettes Licht	68
–, Calcit	58	Ummantelung der Alitkristalle	26
–, Eisensulfid	47	Umwandlungslamellierung des Alits	22, 23
–, Graphit	49	Umwandlungsrelikte im Belit	30, 34, 35
–, Koks	47, 48	Umwandlungsstrukturen des Belits	29
Resorption, Alit	26	Undulöse Auslöschung	70
–, Periklas	43	Ungestreifter Belit	30
Rohmehl	58, 59		
		Verweilzeit des Klinkers im Ofen	55
Schachtofenklinker	52		
Schleifflüssigkeit	13	Weißklinker	19
Schleifkratzer	13, 26, 36, 45, 50	Wickeltexturen im Klinker	54
Schleifmittelkörner	51	Wustit	45
Schlieren	59		
– aus saurer Kohlenasche	48	Xenomorph	70
Schwankungen der Kristallgröße	60	–, Aluminat	37, 38
– in der Zusammensetzung	55		
Sekundärausscheidungen	42, 43, 62, 64, 65	Zerfall von Alit	26, 35
Sekundärer Alit	64	Zerrieseln von Klinker	35
– Belit	26, 38, 40, 63, 64	Zonarbau, Alit	22, 29, 41, 43
– Phasen	36	–, Aluminat	38
Skelettartiger Alit	21, 40	Zwilling	70
Sperrige Verwachsungsstruktur	62	–, Alit	21, 28
Spezialklinker	19		
Sphärolith	49, 70		