

Dr. Nikolaus Nestle, Universität Leipzig Abteilung GFP
aktuell: TU München, Institut für Wasserchemie

Grenzflächenphysik

Zement

- ein alltäglicher Baustoff als
aktueller Forschungsgegenstand
der Physik und Chemie

hoffentlich auch mit
Anregungen für einen fachübergreifenden Unterricht

Übersicht

Zement als Baustoff

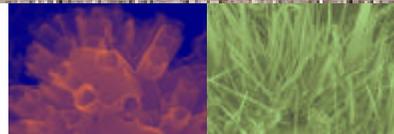
Bauen ohne Zement
Mineralische Bindemittel allgemein
Zement und Beton
Materialwissenschaftliche Herausforderungen
Andere „Zemente“
Fächerübergreifende Bezüge: Geschichte, Geographie, Kunst, Technik

Zement als Nanostrukturmaterial

Was passiert bei der Zementhärtung?
Experimentelle Zugänge
 In der Forschung
 In der Schule?
Gehärteter Zement als nanoporöses Material
Verbundmaterialien: Beton/Faserbeton/Eisenbeton
Fächerübergreifende Bezüge: Technik, Chemie

Chemie im Zement

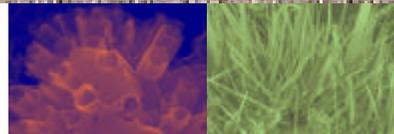
Verhalten organischer Substanzen in Zement
Carbonatisierung und Korrosion
Fächerübergreifende Bezüge: Technik, Chemie



„Natürliche“ Baumaterialien

1. Holz

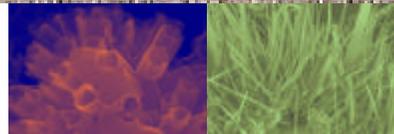
- Nachwachsender Rohstoff
 - Leicht
 - Hohe Biege- und Zugfestigkeit
 - Kurzfristig gute Wasserbeständigkeit
 - Geringe Wärmeleitfähigkeit
-
- Muß sorgfältig abgelagert werden
 - Keine Beständigkeit gegen häufige, starke Durchfeuchtung im Wechsel mit aerob-trockenen Phasen
 - Leichte Entflammbarkeit
 - Stark anisotrope Eigenschaften bei der Bearbeitung
 - Massive Stücke nur bis zu typischen Baumstamm-Abmessungen



„Natürliche“ Baumaterialien

2. Stein

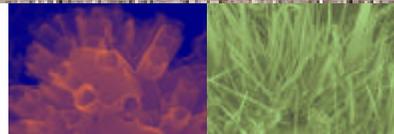
- Sehr gute Beständigkeit gegen Wasser und Frostwechsel
 - Sehr hohe Druckfestigkeiten
 - Hohe Wärmekapazität
 - Sehr gute Feuerbeständigkeit
 - Schlechte Wärmedämmung
-
- Aufwendige Gewinnung im Steinbruch
 - Hohes Gewicht (hohe Auflagelasten, hohes Transportgewicht, ...)
 - Zeitaufwendige Bearbeitung, speziell bei Trockenmauern
 - Teuer



„Natürliche“ Baumaterialien

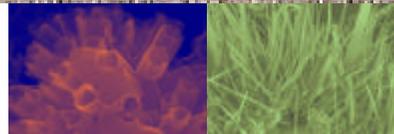
3. Lehm

- Kann mit Wasser beliebig geformt werden
- Keine Notwendigkeit zum Transport massiver Teile zur Baustelle
- Gutes Raumklima durch Feuchtigkeitspufferung
- Geringer Energiebedarf für Herstellung und Bearbeitung
- Weitgehend isotrope Eigenschaften
- Mechanische Festigkeit sehr stark von Durchfeuchtung abhängig; reine Lehmbauten deshalb besonders für Trockengebiete geeignet



Bauen mit Materialkombinationen und künstlich hergestellten Baustoffen

- Lehmziegel mit Stroh- oder sonstigem Faser-Zuschlag
- Ziegelsteine aus gebranntem Ton
 - Leichter als Naturstein
 - Kleine Steingrößen zur Verringerung von Schwindproblemen beim Brand
 - **Mörtel!**
- Fachwerk (früher mit Faschinen)
- Steinsockel mit Überbauten aus Holz oder Fachwerk



Mineralische Binder

Was? - Nach Wasserzugabe breiig-flüssige Masse, die nach Formung zu festem Material aushärtet

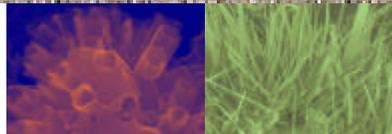
Wozu? - Mörtelmasse für Mauerwerk, Füllspachtel, Massivbauteile

- Hohe mechanische Endfestigkeit
- Geringes Schwinden (lieber leichte Ausdehnung)
- Wasserbeständigkeit
- Gute Verarbeitbarkeit, dann schnelle Erhärtung
- Härtung ohne Luftzutritt
- Chemische Verträglichkeit mit wichtigen Baustoffen

- Lehm als Mörtelgrundlage
- Gips (nicht wasserfest)
- Magnesia-Binder (nur begrenzt wasserfest)

- Luftmörtel (Brantkalk)

- Opus Caementitium: der Zement der Römer
- Portland-Zement, Hüttenzement, ...



Opus caementitium:

Opus: allgemein für Mauerwerk/Bauwerk

Caementitium: Zuschlagsstoffe (Schotter, Kiesel, ...)

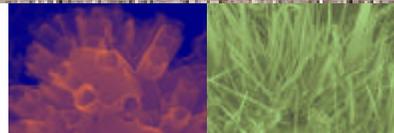
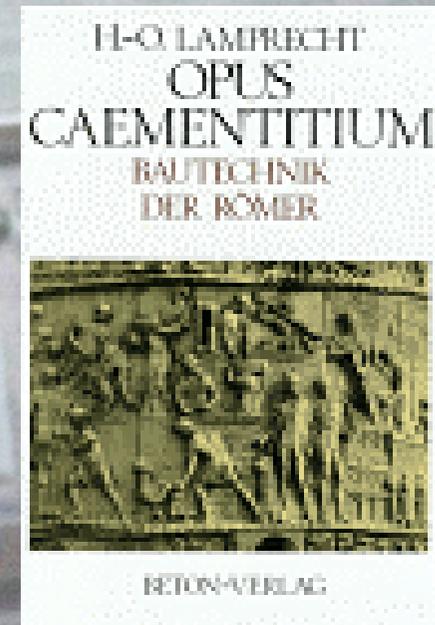
Eigentlicher Binder (also „Zement“ im heutigen Sinne): *materia*

Gelöschter Kalk und Puzzolan-“Erde“

(vulkanische Ablagerungen aus Pozzuoli (NA))

Kulturleistungen des römischen Reichs

- Bindemittel für Wasserbau (Hafenbecken, Aquädukte)
- Hochbauprojekte, die mit Stein nicht zu realisieren gewesen wären

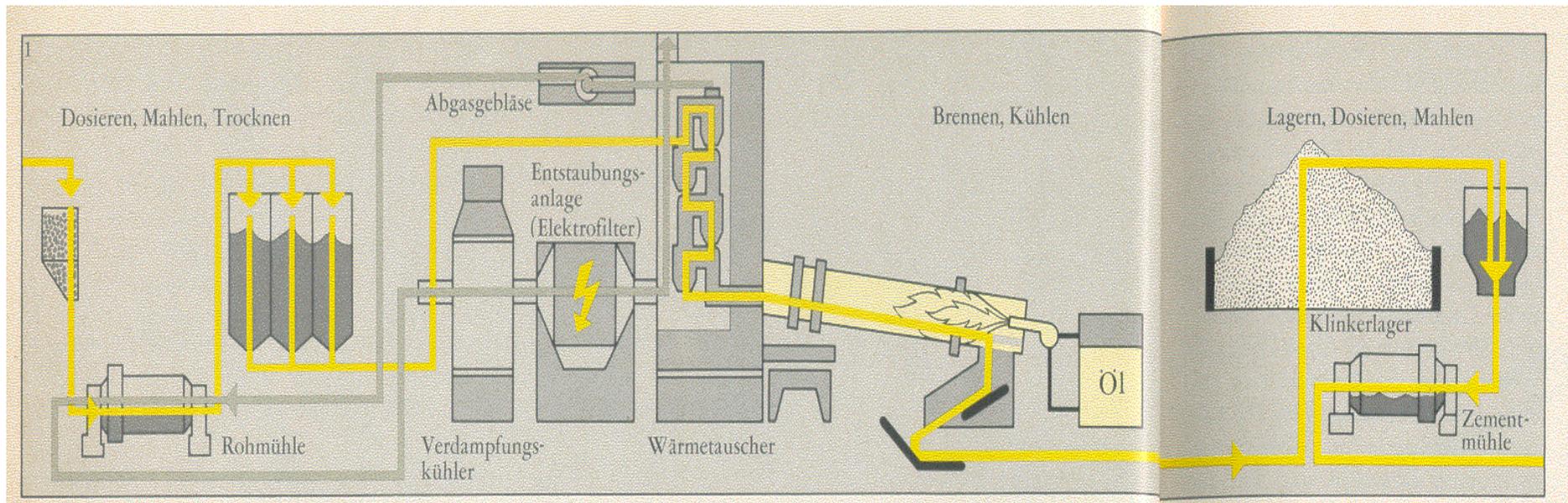


Portlandzement: Sinterprodukt aus Kalk- und Tonmineralien

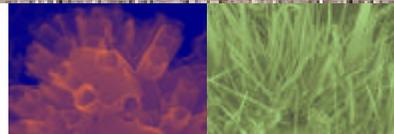
- **Sintertemperatur: bis zu 1450 °C**
- Ausgangsprodukte („Rohmehl“):
 - Mergel (natürliches Gemisch von Kalk und Ton) oder
 - Mischung kalkreicher Gesteine und Ton
- Angestrebte Zusammensetzung nach dem Glühen:
äquivalent zu ca. 65 % CaO, 21 % SiO₂, 6 % Al₂O₃ und 3 % Fe₂O₃
- Zementklinkerphasen: C₃S (Alit), C₂S (Belit), C₃A (Aluminatphase), ...

Geographie:
Zementstandorte
wo und warum?

Zementnotation:
C=CaO
A=Al₂O₃
S=SiO₂
F=Fe₂O₃



Brennprozess setzt CO₂ aus carbonatischem Gestein frei.
6 % der anthropogenen CO₂-Emissionen!



Käuflicher Portlandzement:

Fein aufgemahlener Zementklinker mit Zusatz von ca. 5 % Prozent Gips (als Verzögerer)

Chemische Zusammensetzung nach DIN 1164

(auf Oxide bezogene Elementaranalyse):

61..69% CaO, 18..24 % SiO₂ 4..8 % Al₂O₃,
1..4 Fe₂O₃ , 0.5..4 % MgO, 2.3..3.5 % SO₃, < 0.5% Mn₂O₃

höhere Al-Gehalte:

Spontanbruch durch Granatbildung
in der Wärme

höherer Sulfatgehalt: Festigkeitsverlust,
Ettringit-Treiben

niedrigerer Sulfatgehalt: zu schnelle Erstarrung

weitere nach Festigkeitsklassen und Erstarrungskinetik (R: hohe Frühfestigkeit)

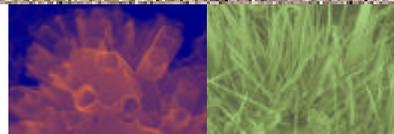
CEM I 32.5/CEM I 32.5 R Minimale 28-Tage Druckfestigkeit 32.5 N/mm²

CEM I 42.5/CEM I 42.5 R Minimale 28-Tage Druckfestigkeit 42.5 N/mm²

CEM I 52.5/CEM I 52.5 R Minimale 28-Tage Druckfestigkeit 52.5 N/mm²

Weitere Normen für Hochofenzement (CEM III) und
Portlandkomposit-Zemente (CEM II)

**Übergreifende
Bezüge: Chemie,
Technik**



Terminologie

Zement Trockenes, ansatzfertig aufgemahlenes Bindemittel

Zementleim Nur aus Zement und Wasser angerührte Paste,
Im Beton: Material zwischen den Zuschlägen (d.h. *materia*)

Zementstein Erhärteter Zementleim (d.h. Zementleim nach Hydratationsreaktion)

Mörtel Mischung aus Zement, Wasser und Feinzuschlägen (Sand)
als Binder für Mauerwerk

Beton Mischung aus Zement, Wasser, Fein- und Grobzuschlägen (Kies,
Splitt, Schotter, ...) zur Herstellung von Massivbauteilen

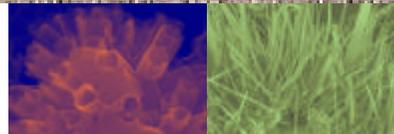
Frischbeton Noch nicht abgebundener Beton

Festbeton Fertig abgebundener Beton

Transportbeton, Ortbeton
Porenbeton, Leichtbeton

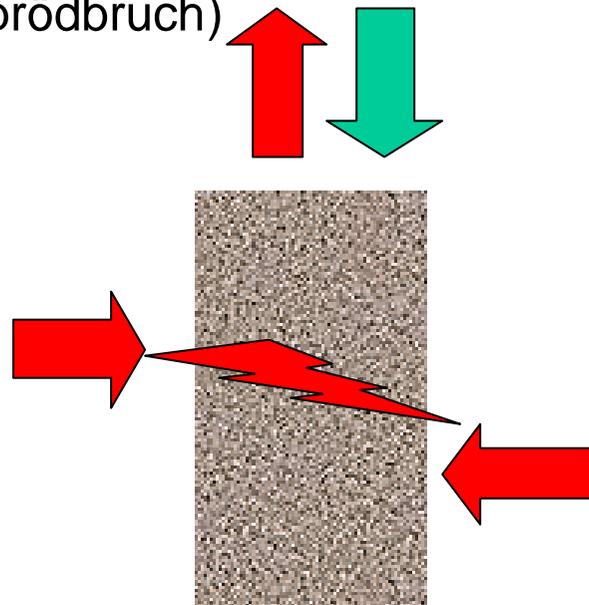
Hochleistungsbeton
Eisenbeton, Faserbeton

...



Exkurs: was tut das Eisen im Beton?

Beton: gute Druckfestigkeit
Geringere Festigkeit bei Zug- und Scher-Beanspruchungen (Sprödbruch)



Warum gerade Eisen?

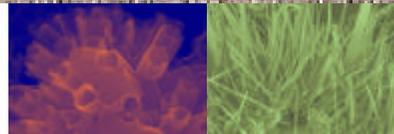
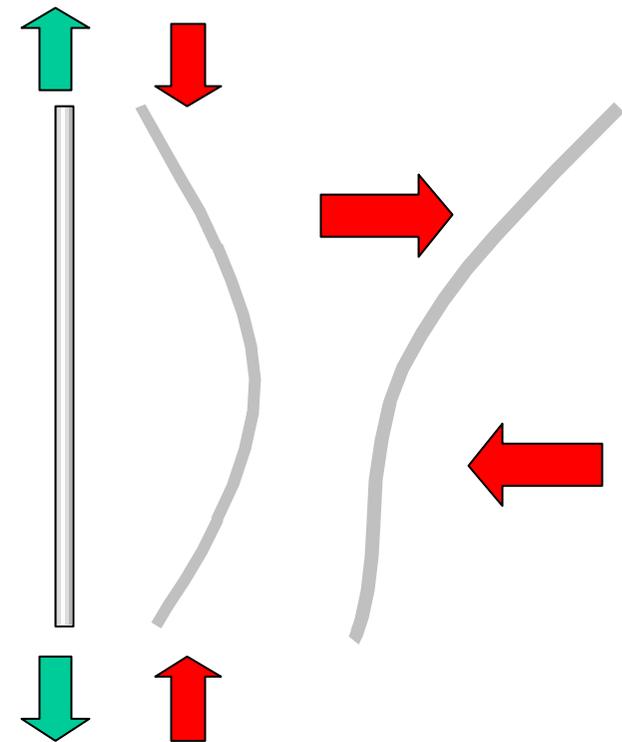
- Ähnliche Wärmeausdehnung wie Zementstein
- Chemische Beständigkeit



- Eisen verhindert Bruch des Betons
- Beton verhindert Verbiegung des Eisens (vor allem durch Raumerfüllung)

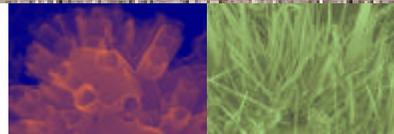
Ähnliche Situation mikroskopisch bei Cellulose und Lignin

Baustahl: gute Zugfestigkeit, gute Scherfestigkeit
Bei Druckbeanspruchung sowie seitlicher Belastung leicht verbiegbar



Materialwissenschaftliche Herausforderungen

- Dauerhaftigkeit (Mechanisch, chemisch, physikalisch (z.B. Frostwechsel), ...)
- Wasserdichtigkeit
- Festigkeit (Hochleistungsbeton für Wolkenkratzer, Brücken, ...)
- Verarbeitbarkeit:
 - Viskosität des Frischbetons (Betonpumpe!)
 - Verarbeitungsdauer
 - Erstarrungszeit
 - Frühfestigkeit (2 d, 7 d)
- Umweltverträglichkeit/Arbeitsschutz:
 - Recycling
 - Materialeinsparung
 - Auslaugung von Schwermetallen oder Zusätzen
 - Gezielter Einsatz in der Umwelttechnologie
 - Solidifikation
 - Barrieren
 - Reduktion gesundheitsschädlicher Anteile im Zement (z.B. Chromat)



Gipsbinder



Chemisch neutral, relativ leicht
Schnelle Erhärtung durch Übersättigung/Verdampfung
Kostengünstig aus REA-Prozess verfügbar
Nicht wasserbeständig,
relativ niedrige Festigkeiten

Magnesiabinder

(Sorel 1867)

MgO + MgCl₂-Lösung
oder MgSO₄-Lösung

Hohe mechanische Festigkeit (vor allem auch Oberflächenabrieb)
Kann mit extrem hohem Zuschlagsanteil verarbeitet werden
Weiß-durchscheinend, marmorartig
Leicht

pH-Wert im sauren Bereich
aggressiv gegenüber vielen Metallen
Nicht vollständig wasserbeständig
(eventuell sogar Autokorrosion bei
Wasserüberschuß)

An Atmosphäre langsame Stabilisierung
durch Carbonatisierung

Industriefußböden, Schleif- und Mahlsteine,
Endlagertechnologie
Heraklith-Platten



Zinkleim

ZnO + ZnCl₂-Lösung

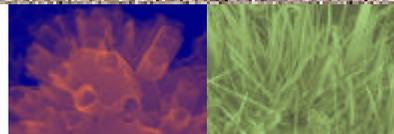
Ähnlich wie Magnesiabinder, aber viel schnellere Härtung (einige min.)
bessere Wasserbeständigkeit

Zu teuer für bautechnische Anwendungen

Künstlerische und medizinische Verwendung (Zahnzement, Schienen)

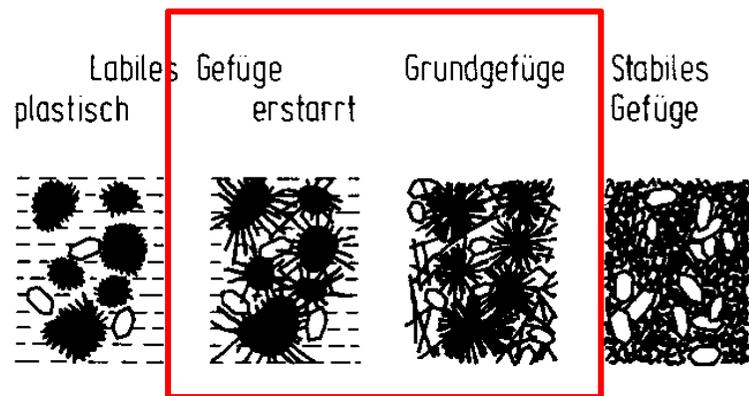
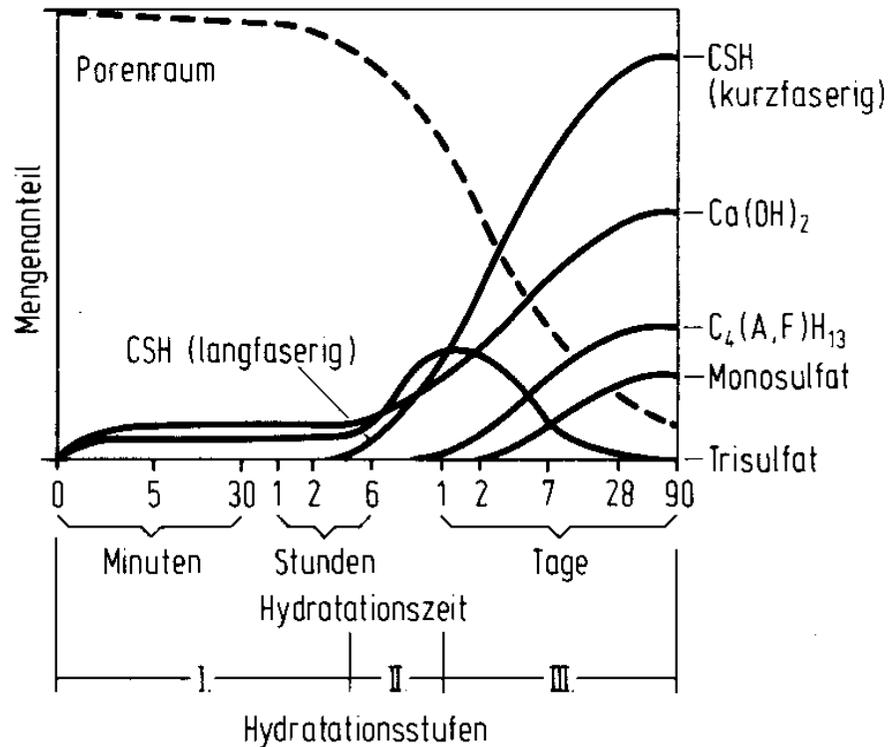
Kunstharze

Andere „Zemente“



Dr. Nikolaus Nestle
Abteilung GFP, Uni Leipzig
Institut für Wasserchemie, TUM

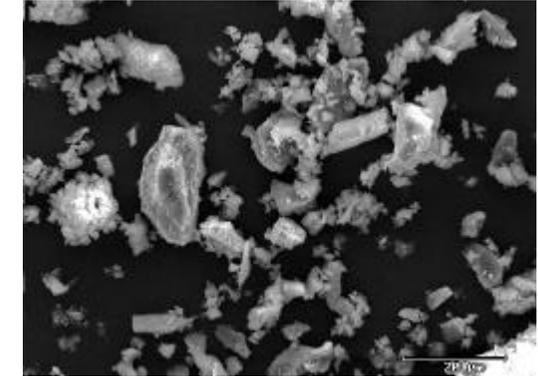
Was passiert bei der Zementhärtung mikroskopisch?



Lehrbuchwissen:

•unmittelbar nach dem Anmischen:

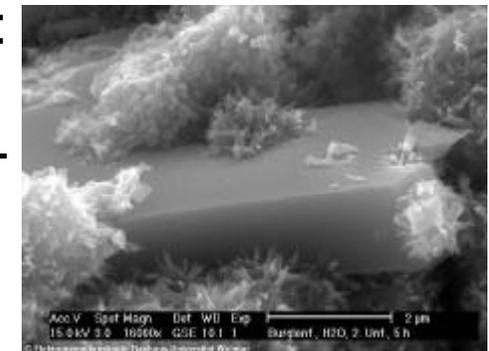
Suspension von Zementkörnern (einige μm) im Anmachwasser



•Anlösen der Zementkörner

•Wachstum nadelförmiger Kristallite von Hydratphasen:

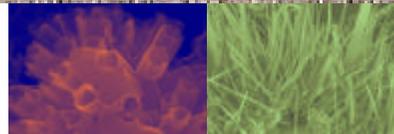
Körnchen deshalb nicht mehr gegeneinander verschiebbar: Erstarrungsbeginn

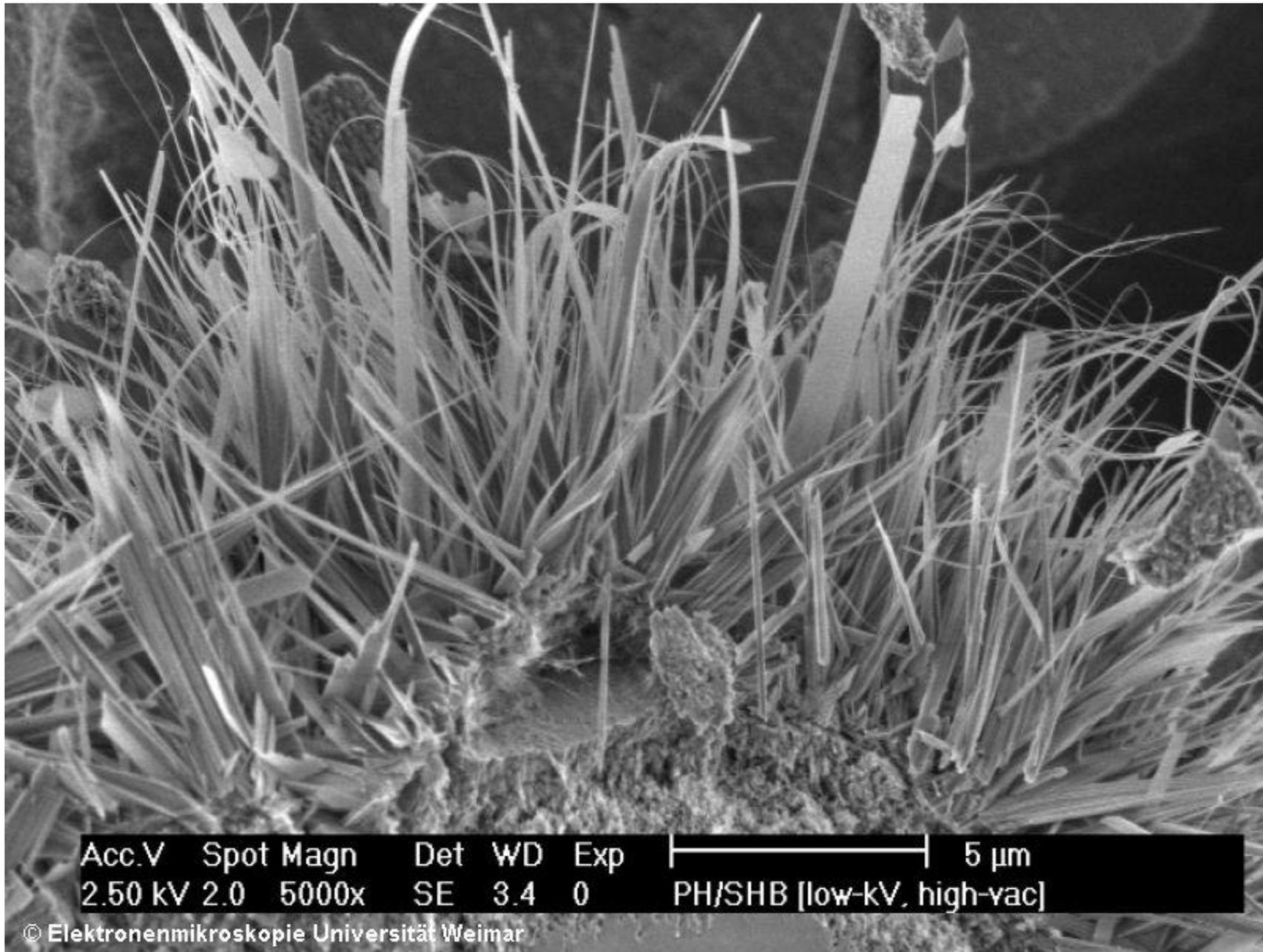


•Grundgefüge

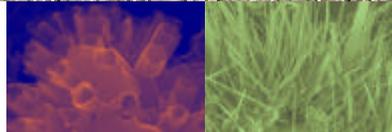
durch ineinander verfilzte Kristallite.

•Später: Zusammenwachsen zu „Gelphasen“





Nanowiese im Zement



Dr. Nikolaus Nestle
Abteilung GFP, Uni Leipzig
Institut für Wasserchemie, TUM

Zement ist ein Nanostrukturmaterial!

Wahrscheinlich das älteste und mengenmäßig wichtigste technisch erzeugte.

1. Schritt: Anlösen der Zementkörnchen. Heterogene μm -Grenzflächen, hoch konzentrierte, teilweise kolloidale Lösung in Porenräumen. Naßchemisch nicht zugänglich.
Grenzflächenchemie in ionischem Lösungsmittel.



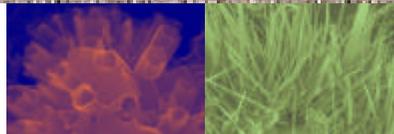
2. Schritt: Ruhephase. Teilweise Selbstpassivierung der Zementkörnchen, teilweise Wartezeit auf chemische Umsetzungen in der Porenlösung.
Grenzflächenchemie in ionischem Lösungsmittel an nanostrukturierter Oberfläche.



4. Schritt: Nachhärtung. Weiterer Materialtransport aus Innerem der Zementkörnchen in Porenlösung (Festkörperdiffusion), chemische Umsetzung zu Hydratphasen.
Selbstorganisiertes Wachstum von Nanostrukturen durch Festkörperdiffusion und anschließende Grenzflächenreaktion.



3. Schritt: Beschleunigungsphase. Keimbildung an Zementkörnchen, massives Kristallwachstum aus übersättigter Lösung.
*Kompetitives Wachstum von Nanokristalliten aus einer übersättigten Lösung komplexer chemischer Zusammensetzung.
Makrofestigkeit durch kollektive Wirkung unregelmäßiger Nanostrukturen*



„Klassische“ Zugänge: Integrale Größen ohne direkten Bezug zur Mikrostruktur

- Mechanische Eigenschaften

- des Festbetons: Druckfestigkeit, Festigkeit unter Wechsellast, typisch 7, 30, 180 Tage

- während der Erstarrung:

- Viskosität der Mischung (nicht-newtonsch, Gedächtnis-Effekte),

- Erstarrungsbeginn durch Viskositätsanstieg,

- Ende der Beschleunigungsphase durch Fallversuche

- Kalorimetrie **Reaktionswärme**

- Chemische/Mineralogische Information:

- Phaseninventar aus Röntgenbeugung

- Fernordnung**

- (Mikrostruktur als „Störeffekt“: Linienverbreiterung durch kleine Kristallite)

- Festkörper-NMR (MAS) an bereits abgeundenem Material:

- Nahordnung**

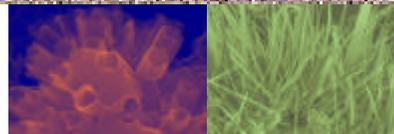
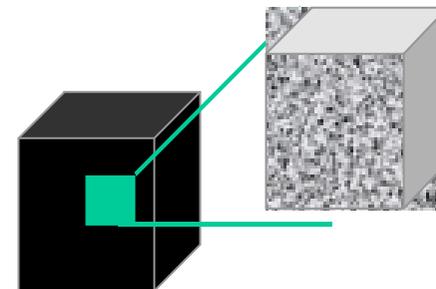
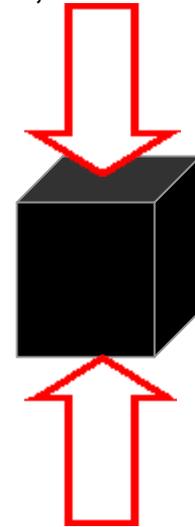
- Auslaugungsversuche (z.B. CDF-Test)

Zunehmend von Interesse:

Informationen über Mikrostruktur

Identifikation von Zwischenzuständen

bei der Hydratation



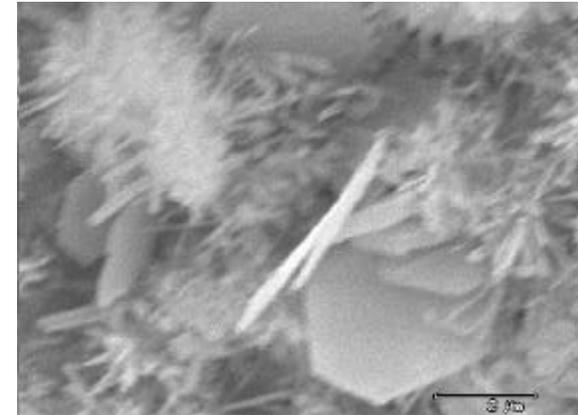
„Momentaufnahmen“ mit zerstörend präparierten Proben

Bereits Routine:

**Mikrostrukturuntersuchungen
an zerstörend präparierten Proben**

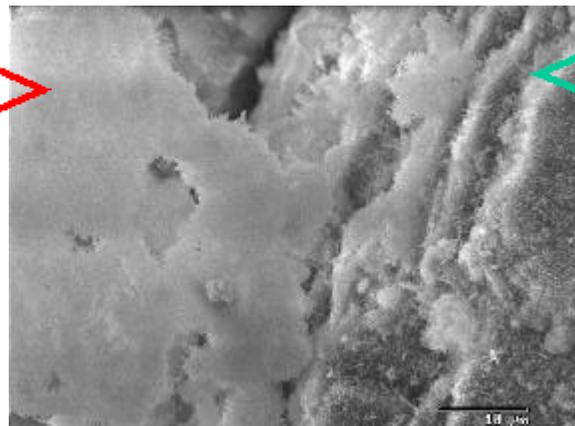
- Polarisationsmikroskopie
(Dünnschliffe) (μm -Auflösung)
- Elektronenmikroskopie (REM)
und andere UHV-Techniken mit geladenen Teilchen: Bruchflächen, Dünnschliffe (TEM)
- Andere Mikroskopien:
Raman, IR, AFM/STM

Zerstört die Probenherstellung nur den Entnahmebereich, oder auch die Mikrostruktur?
Belastungen durch Trocknen (Vakuum-Methoden) bzw. Sägen und Polieren oder glatte Schalung

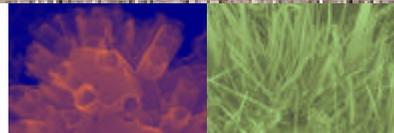


An Grenzfläche gehärtet

Stark verdünnter Zement in
Sandschüttung, 1 d alt



„Frei“ gehärtet



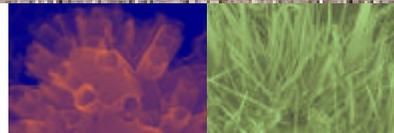
Abbildende Mikroskopien unter Umgebungsbedingungen:

in situ - Mikroskopie

- Environmental scanning Elektronenmikroskopie (ESEM)
Probe in dünnem Kompartiment bei normalem oder reduziertem Druck (mit Wasser)
- Andere Mikroskopien:
Raman, IR,
Auflösung ungenügend für Details
SNOM, AFM/STM
Probleme: Rauigkeit, Korrosion
Synchrotronmikroskopie (Weichröntgen)
Probendicke < 100 μm
- Synchrotron-Tomographie
(Hartröntgen ab ca. 5 keV) Auflösung knapp im sub- μm -Bereich
Probengröße: einige mm

Alternative: indirekte Strukturinformation aus dynamischen NMR-Messungen zur Dynamik des Porenwassers:

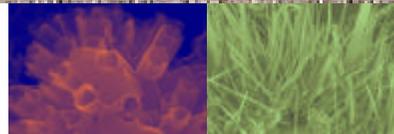
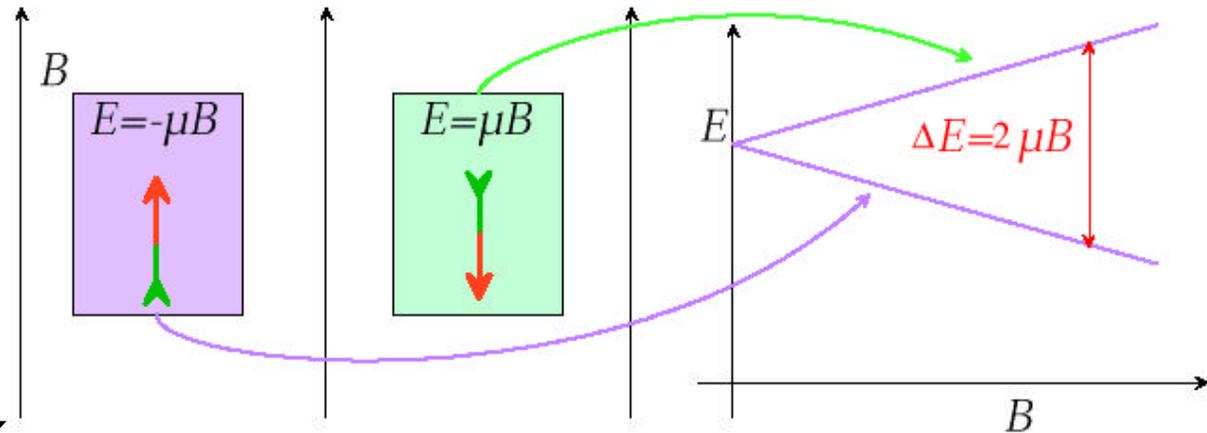
- Probengrößen: mehrere mm oder mehr
Volumenmethode
nur geringe Probleme mit (äußeren) Grenzflächeneffekten
- Streu-Effekte und Absorption vernachlässigbar
- Keine Feinmechanik und keine beweglichen Teile im Probenbereich
- Probe weitgehend frei zugänglich für Manipulationen während der Messung
Mechanische Veränderungen
Temperaturänderungen
...
- „Konkurrenz“:
Kleinwinkelstreuungsmethoden
Elektrische Messungen



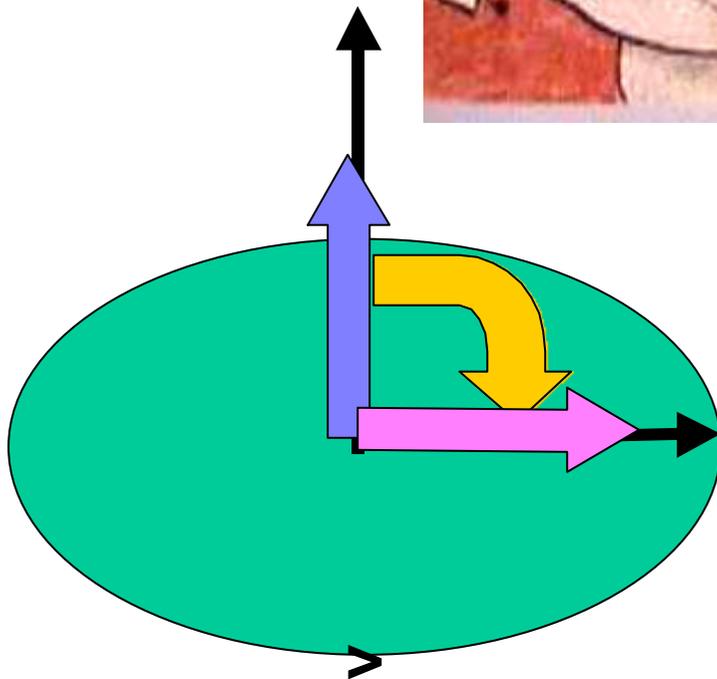
NMR-Grundprinzip

Energieaufspaltung für Kernspins im Magnetfeld

- proportional zum Magnetfeld
- Hochtemperaturnäherung: Überschußpolarisation durch Boltzmann-Faktor bestimmt, typischer Wert (Protonen, 300 K, 1 T): 0.00068%
- Resonanzfrequenzen: im Radiowellenbereich
- Puls-NMR: Manipulation der resultierenden Kernspinmagnetisierung mit kurzen, intensiven Hochfrequenz-Impulsen
 - Magnetisierung verhält sich wie ein magnetischer Kreisel und präzediert.
 - Nachweisbar als Induktionsspannung



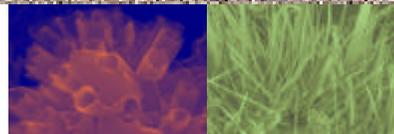
Kernspinrelaxationsphänomene I



Was muß passieren, daß sein Spin wieder ins Gleichgewicht kommt?

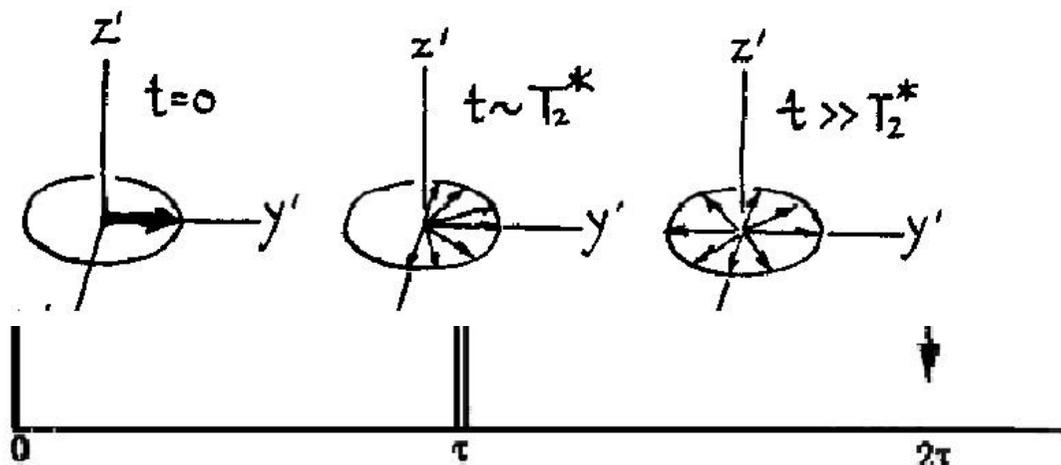
Relaxation

- energetisch: T_1
- Abbau eines nachweisbaren Präzessionssignals oft schneller

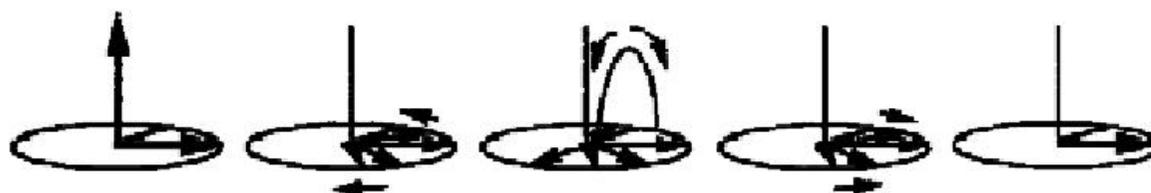


Kernspinrelaxationsphänomene II

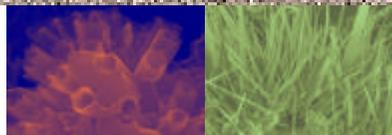
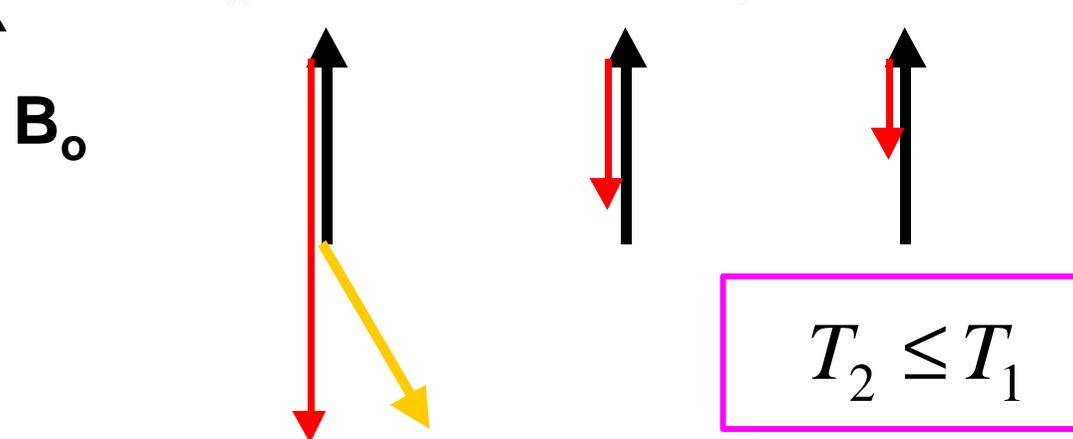
Freier Induktionszerfall (FID):
Verhalten der Spinmagnetisierung nach Auslenkung durch einen 90°-Impuls
Zeitkonstante T_2^*



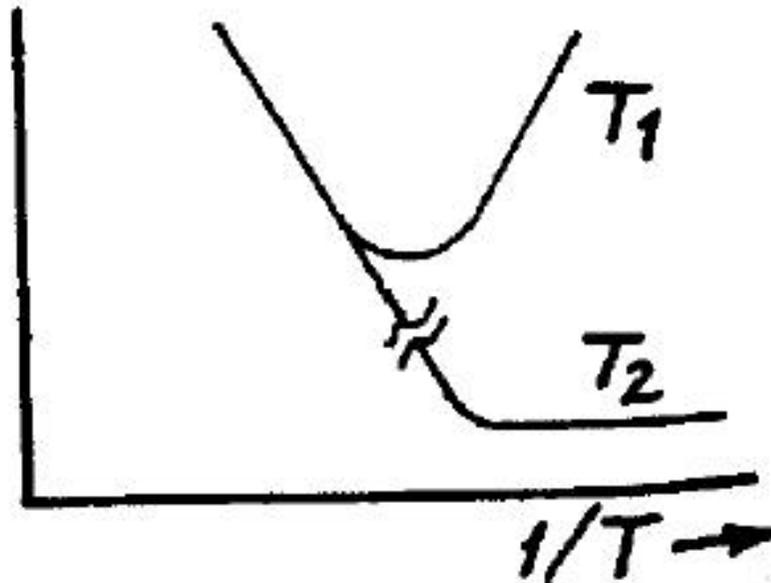
Transversale Magnetisierung kann durch zusätzliche HF-Pulse zu Echo refokussiert werden.
Echoamplitude nimmt mit Zeitkonstante T_2 ab.
•Kein Energieaustausch nötig



Rückkehr der angeregten Kernspinmagnetisierung ins thermodynamische Gleichgewicht:
Longitudinale Relaxation, T_1
•Energieaustausch nötig



Was für Informationen stecken in Relaxationszeiten?



T_1 : Minimum für „mittlere“ Korrelationszeiten

T_2 : Umso kürzer, je „fester“ das Material ist

Exponentielle Autokorrelationsfunktion der molekularen Orientierung (BPP)

$$G(t) = e^{-t/t_c} \Rightarrow I(\omega) = \frac{2t_c}{1 + \omega^2 t_c^2}$$

Führt zu

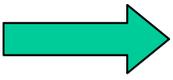
$$\frac{1}{T_1(\omega_o)} = A \left[\frac{t_c}{1 + \omega_o^2 t_c^2} + \frac{4t_c}{1 + 4\omega_o^2 t_c^2} \right]$$

$$\frac{1}{T_2(\omega_o)} = \frac{A}{2} \left[3t_c + \frac{5t_c}{1 + \omega_o^2 t_c^2} + \frac{2t_c}{1 + 4\omega_o^2 t_c^2} \right]$$

mit $A = \left(\frac{m_o}{4p} \right)^2 \frac{3}{10} \frac{g^4 \hbar^2}{r^6}$

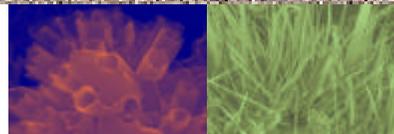
In porösem Material:

- Wandadsorption (-> längere Korrelationszeit),
- Austausch mit Porenvolumen
- Hydratwasser mit extrem kurzem T_2

 Abnahme der Relaxationszeiten bei Härtung

Frequenzunabhängiger Term

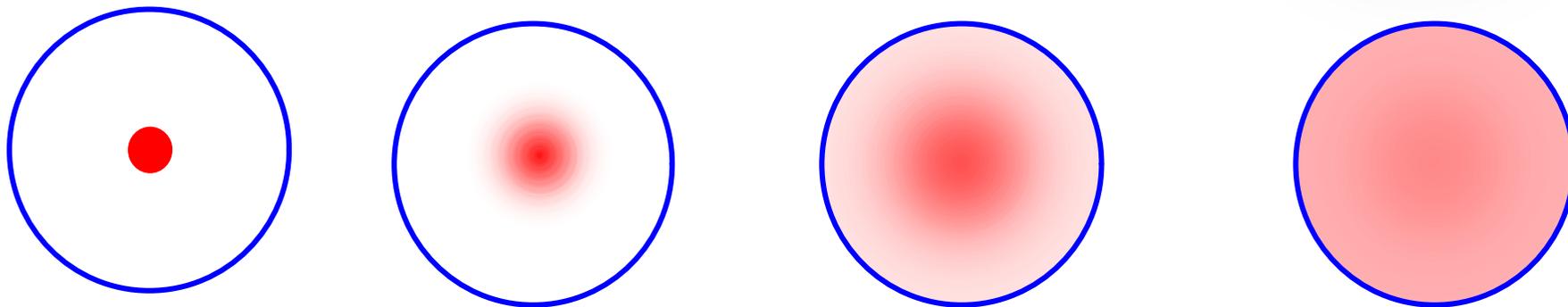
τ_c : Zunahme durch Oberflächenwechselwirkung



Selbstdiffusion von Flüssigkeiten in Porensystemen

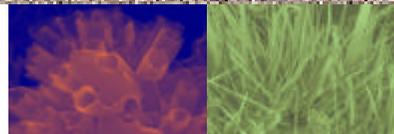
Freie Diffusion: zerfließende Gaußglocke

Selbstdiffusion: Wo sind die zu Beginn im schwarzen Bereich lokalisierten Moleküle zu späteren Zeitpunkten? ●



Selbstdiffusion in Pore: markierte Moleküle werden an Porenwand „reflektiert“ -> Gaußglocke nur für kurze Zeiten.

Diffusionsverhalten in verbundenen Poren: für lange Zeiten wieder gaußförmige Ausbreitung, aber verringerter Diffusionskoeffizient.

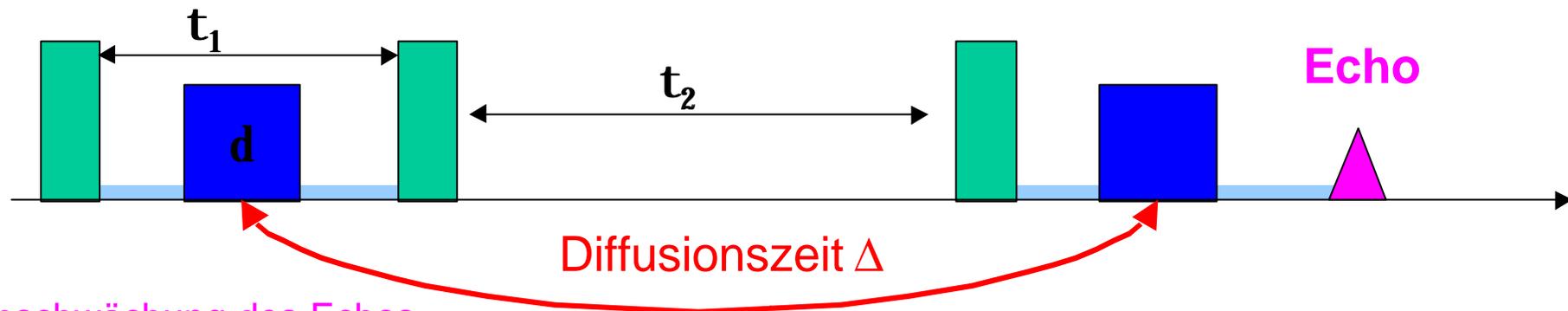


Messung von Selbstdiffusionskoeffizienten

Ununterscheidbare Teilchen unterscheidbar machen

- Isotopentracer
 - Chemische Tracer
- Teilchen nicht wirklich gleich, invasive Einbringung

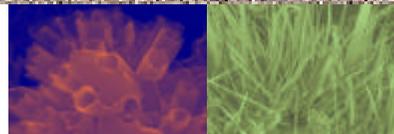
• **NMR:** zeitweilige Unterscheidbarkeit der Teilchen durch aufgeprägtes Phasengedächtnis. Definierte Diffusionszeit beim Pulsed Field Gradient (PFG) NMR:



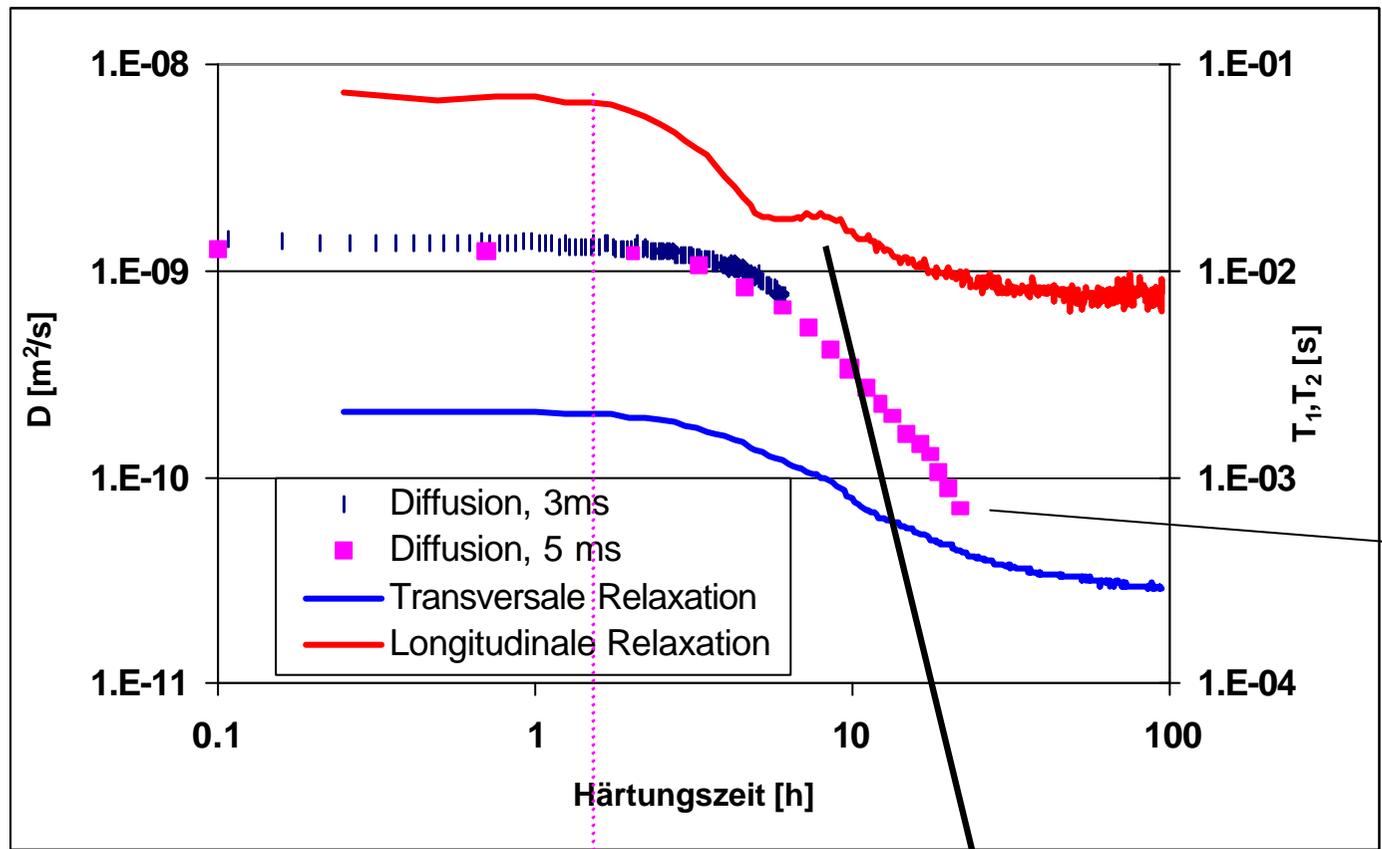
Abschwächung des Echos gegenüber normalem Spinecho als Funktion von Diffusionskoeffizient und Gradienten-Stärke, -Abstand und -Dauer

$$A_{STE,diff}(G) = \exp\left(-g^2 D \left(G^2 d^2 \left(\Delta - \frac{d}{3}\right) + G_o^2 t_1^2 \left(t_2 - \frac{1}{3} t_1\right) - G G_o d \left(t_1^2 + t_2^2 + d(t_1 + t_2) + \frac{2}{3} d^2 - 2t_1 t_2\right)\right)\right)$$

Zusätzliche Effekte und Probleme in Proben mit inneren Magnetfeldgradienten, meßtechnisch aufwendig, aber lösbar.



Wasserdynamik in einer härtenden Zementprobe



Dyckerhoff weiß
 CEM I 42,5 R

 Wasser/Zement-
 Verhältnis 0.33 ml/g

 31 °C

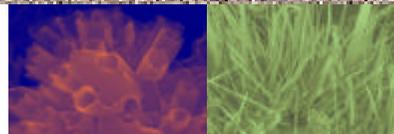
Diffusionsmessungen
 wegen schneller Relaxation
 fast unmöglich

Relaxation
 braucht Ober-
 flächen, Ab-
 nahme der
 Diffusion
 Barrieren

**Relaxationszeitabnahme
 setzt vor der des Diffusions-
 koeffizienten ein.
 (Noch deutlicher bei höherem
 w/z-Verhältnis)**

Reproduzierbarer Kurvenverlauf, kein Artefakt
 • Bildung und Abscheidung von Polyanionen in der Lösung

**Zementhärtung aus
 der Sicht des Wassers**



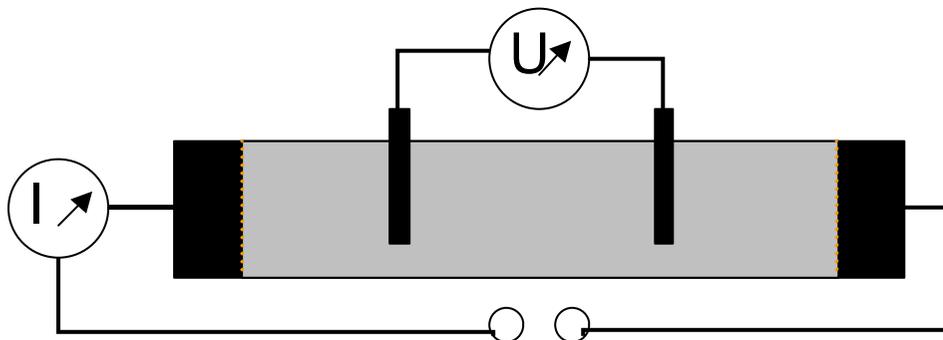
Dr. Nikolaus Nestle
Abteilung GFP, Uni Leipzig
Institut für Wasserchemie, TUM

„Einfacher“ Zugang: Leitfähigkeitsmessungen

- Geometrische Einschränkung des Porenwassers bewirkt Veränderungen in makroskopischer Ionenleitfähigkeit und deren Frequenzabhängigkeit

- Messungen können mit vergleichsweise einfacher Ausrüstung (schultauglich) durchgeführt werden:

- Wechselstromleitfähigkeitsmessungen in Vierpunkt-Methode,
- Frequenzbereich von einigen 100 Hz bis einigen MHz,
- Meßzellen und Abschirmungen können aus kostengünstigen Komponenten selbst erstellt werden.



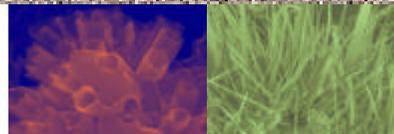
- Vermittlung von Grundwissen über Elektrochemie, elektrische Meßtechnik, Meßdatenerfassung und Auswertung mit dem PC, Wechselstromkreis

Als Schüler(gruppe) an der Front der aktuellen materialwissenschaftlichen Forschung. Wir bieten Ihnen eine aufbauende Herausforderung:
Elektrische Leitfähigkeitsmessungen an härtenden Zementen

Ihr Profil: Interesse an PC-gestützter Meßtechnik, Bastelgeschick für einfache Schaltungen, Zugang zu Meßinterface-Technik (z.B. CASSY).

Unsere Unterstützung: Versorgung mit Fachliteratur und Probenmaterialien, Beratung beim Meßzellenbau und bei elektrochemischen Fragen
Hilfe bei Veröffentlichung der Ergebnisse.

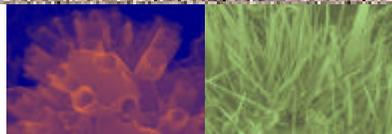
Kontakt: nikolaus.nestle@ch.tum.de



Zementstein ist nanoporös. Merkt man das?

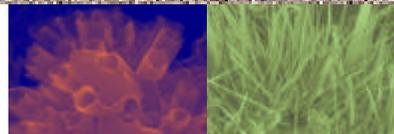
In glatter Schalung (z.B. CD-Hülle) abgebundener Zementstein ist äußerlich glatt und wirkt homogen. Trotzdem gibt er Anlaß zu einigen überraschenden Beobachtungen:

- Aufnahme von Feuchtigkeit:
 - Lufttrockene Probe ist nach Wässern und Trockenwischen der Oberfläche schwerer als vorher, obwohl sich ihr Volumen nicht geändert hat.
 - Langsame Abgabe des aufgenommenen Wassers an trockener Luft
 - Starke Saugwirkung bei Berührung mit der Zunge
- Aufnahme von Farbe: Mit Folienschreiber aufgebracht Strich kann nicht mehr durch oberflächliche Reinigung entfernt werden wie auf anderen glatten Oberflächen
- pH-Wert des Porenwassers: frischer Zementstein ist stark alkalisch (Phenolphthalein-Probe)
 - Alkalisches Milieu stabilisiert Eisenarmierung
 - Langsamer Umbau durch Wirkung von atmosphärischem Kohlendioxid (vor allem bei Fahrbahnbeton): Carbonatisierung
 - Demonstration an frischem Bohrkern aus Betonprüfung



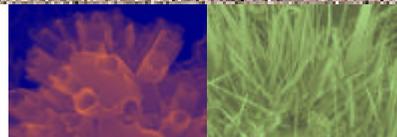
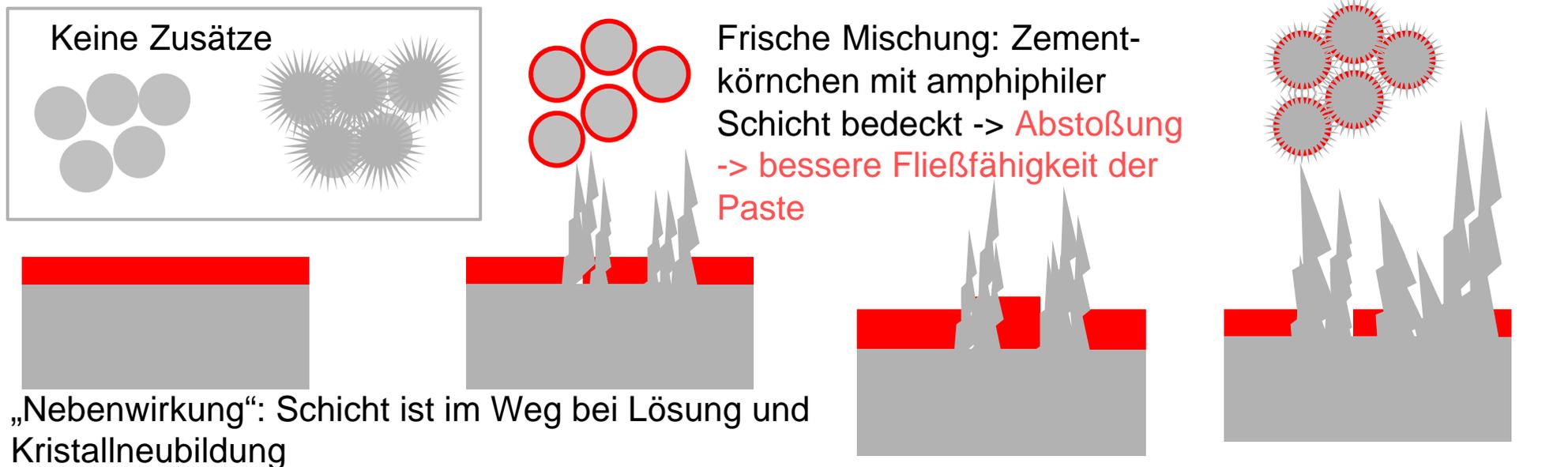
Beton als schulthaugliches Beispiel für Verbundmaterial

- Betonprüfkörper mit verschiedenen Zuschlagsstoffen leicht unter schulischen Bedingungen herstellbar
- Qualitative Prüfung (z.B. durch Bruchbilder bei Hammerschlag) ebenfalls einfach durchführbar.
- Makroskopische Natur von typischen Zuschlägen erlaubt weitgehenden Verzicht auf mikroskopische Analyse der Proben und trotzdem eine Demonstration wesentlicher Grundprinzipien bei der Wirkungsweise von Verbundmaterialien.
 - Thema für Hand-on-Projekt zur Wirkung von Materialverbänden in Projektwoche:
 - Tag 1: gemeinsame Herstellung von Prüfkörpern (Zementstein, Beton mit nur Sandzuschlag, mit nur Grobzuschlag, mit Sand- und Grobzuschlag, mit zu viel Sandzuschlag und Betone mit verschiedenen Mengen Faserzuschlag)
 - Tag 2: qualitative theoretische Beschäftigung mit Verbundmaterialien: Wo? Warum? Auf welchen Längenskalen? Verbundmaterialien in der Natur. Eventuell auch Exkursion zu Großbaustelle
 - Tag 3 (oder Schulfest): gemeinsames Testen der Prüfkörper
Interpretation der Bruchbilder im Lichte der theoretischen Erkenntnisse von Tag 2, fotografische/Web-/Poster-Dokumentation



Organische Substanzen in Zement

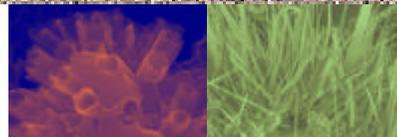
- Teilweise dramatische Veränderungen in Fließeigenschaften und Härungsverhalten bei Zugabe amphiphiler Substanzen zum Zement
 - technisch genutzt als Fließmittel, Beschreibung von Schulversuch:
<http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/papier/index.html> -> Versuch 13b
 - dramatische Verzögerung der Härtung in Gegenwart von höheren Alkoholen o.ä. sowie von Zuckern
 - geringe Verzögerung der Härtung bei unpolaren Lösungsmitteln, die trotz Nichtmischbarkeit mit Wasser in Zementpaste eingemischt werden können (einige Gew.%, umwelttechnisch genutzt für Solidifikation)



Zementstein ist nur metastabil!

- Thermodynamischer Gleichgewichtszustand in Gegenwart von CO_2 : Carbonatische Phasen
- Reaktion nur in feuchtem Milieu möglich
- Besonders schnelle Reaktion: Waagerechte Betonflächen (stehende Nässe), noch schneller bei Fahrbahn beton (zusätzlicher Angriff durch Tausalze)
- Carbonatisierung bewirkt Verschiebung des pH-Werts von stark alkalisch zu neutral: Phenolphthalein-Probe
- Eisen (Armierungen, Rohrleitungen, ...) im neutralen Milieu nicht mehr gegen Korrosion geschützt
- leichte Festigkeitsverluste auch in Zementsteinmatrix

- Anregung für Schulversuch:
 - Phenolphthaleinuntersuchung von Bohrkernen unterschiedlicher, bekannter Herkunft (eventuell Zusammenarbeit mit lokalem Beton-Sachverständigem)



Dank an

- Prof. J. Kärger, Prof. D. Freude
- die Kollegen in der GFP
ganz besonders: P. Galvosas,
O.Geier, F. Stallmach, C. Vogt
- Prof. M. Dakkouri, C. Zimmermann
- Prof. G. König, K. Friedemann,
R. Krumbach, F. Häussler, F. Dehn
- J. Lenzner, B. Möser, C. Sternkopf
- Prof. Schneider
- Sie alle für die Aufmerksamkeit

Ende

Finanzierung durch

- DFG/Freistaat Sachsen (GK, SFB)
- Prof. Niessner, T. Baumann (DFG-Projekt)

