

1 Grundlagen der Herstellung und des Einsatzes von ZM-Auskleidungen für den Trinkwassertransport

1.1 Chemische und mineralogische Vorgänge beim Brennprozeß des Zementes

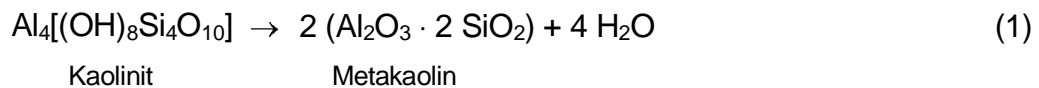
Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das heißt ein anorganischer fein gemahlener Stoff, der, mit Wasser vermischt, Zementleim ergibt, welcher durch Hydratation erst erstarrt und dann erhärtet. Nach dem Erhärten bleibt der Zement auch unter Wasser fest und raumbeständig (DIN 1164-1, 1994). Zur Herstellung des Zementes für die ZM-Auskleidung verwendet die deutsche Zementindustrie überwiegend Kalkgesteine (CaO-Träger) und Tongesteine (SiO₂/Al₂O₃/Fe₂O₃-Träger) als Hauptkomponenten. Je nach lokalem Bedarf und Angebot werden verschiedene Korrekturstoffe, wie z.B. Quarzsand oder Eisenerze hinzugefügt.

Tabelle 1 zeigt die in der Praxis angewendeten Rohstoffzusammensetzungen für die Zementproduktion (LABAHN & KOHLHAAS, 1982).

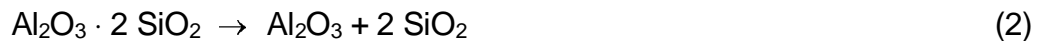
Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung von Zementrohmaterial (glühverlustfrei)

Oxid	minimale und maximale Gehalte [Massen-%]
CaO	60-69
SiO ₂	18-24
Al ₂ O ₃	4-8
Fe ₂ O ₃	1-8
MgO	< 5,0
K ₂ O, Na ₂ O	< 2,0
SO ₃	< 3,0

Um aus dem Rohmaterial den Zementklinker herzustellen, wird das Material auf eine Temperatur von etwa 1450 °C aufgeheizt. Dieser Prozeß wird als Sinterung bezeichnet. Bereits während der Aufheizung bis zur Sintertemperatur laufen wesentliche Reaktionen ab. Bei Temperaturen bis etwa 200 °C entweicht das als ungebundene Feuchtigkeit vorliegende Wasser. Im Temperaturbereich etwa zwischen 100 und 400 °C geben die Tonminerale ihr adsorptiv gebundenes Wasser ab. Je nachdem, welche Tonmineralarten vorliegen, wird dann zwischen 400 und 750 °C auch das chemisch gebundene Wasser ausgetrieben (Dehydratation). Als Beispiel sei hier in Gleichung 1 die Dehydratation von Kaolinit genannt:



Bei weiter ansteigenden Temperaturen bis etwa 900 °C zerfällt der Metakaolin bzw. die entsprechenden Reaktionsprodukte in reaktionsfähige Oxidmischungen. Gleichung 2 zeigt den Zerfall für das Beispiel Metakaolin:



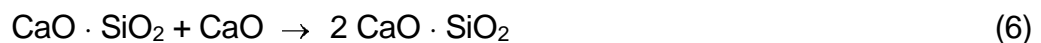
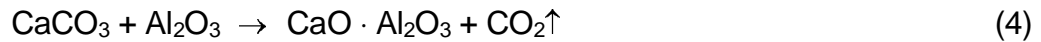
Das im Zementrohmehl enthaltene CaCO_3 zersetzt sich theoretisch bei ≥ 896 °C nach Gleichung 3:



Dieses gilt allerdings nur für reinen Calcit. Mit zunehmenden Anteil an Beimengungen - wie z.B. im Zementrohmehl - wird die thermische Dissoziation zu tieferen Temperaturen verschoben. In der Praxis beginnt sie bereits ab 550 bis 600 °C. Ab etwa diesem Temperaturbereich beginnen Festkörperreaktionen, wobei die Zersetzungsprodukte des CaCO_3 mit denen der Tone zunächst bevorzugt zu kalkärmeren Verbindungen (z.B. Monocalciumaluminat CA^1 [$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$] oder Dicalciumsilicat C_2S^* [$2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$]) reagieren. Die Bildung von Tricalciumaluminat C_3A^* [$3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$] und Calciumaluminatferrit $\text{C}_2(\text{A},\text{F})^*$

* Abkürzungen und Symbole entsprechen den Fachtermina in der Zement- bzw. Wasserchemie

[CaO · Al₂O₃ · Fe₂O₃] beginnt bei etwa 800 °C. Beispielreaktionen sind in den Gleichungen 4 bis 6 dargestellt:



Die erste Schmelzphase und damit der Beginn der Sinterung setzt bei etwa 1260 bis 1310 °C ein. Diese Temperaturen ermöglichen die Bildung von Tricalciumsilicat C₃S, dem Hauptbestandteil des Zementklinkers. In Gegenwart der Schmelze gehen CaO und C₂S in Lösung, wodurch die Diffusion der Reaktionspartner in der Schmelze wesentlich erleichtert wird. Anschließend kristallisiert 3 CaO · SiO₂ (Tricalciumsilicat) aus.

Tricalciumsilicat hat den entscheidenden positiven Einfluß auf die Festigkeitsentwicklung des Zementes.

Um rückläufige Gleichgewichtsreaktionen zu vermeiden, wird die Schmelze schnell abgekühlt (> 40 K/min). Im Gegensatz zu SiO₂-reichen Schmelzen, die meist glasig erstarren, kristallisiert die kalkreiche, aluminatisch-ferritische Schmelze des Portlandzement-Klinkers (PZ-Klinkers) trotz schneller Kühlung vollständig. Der technische PZ-Klinker stellt somit ein bei Sintertemperatur „eingefrorenes Schmelzgleichgewicht“ dar (LABAHN & KOHLHAAS, 1982).

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der im fertigen Portlandzementklinker enthaltenen Phasen.

Tabelle 2: Klinkerphasen des Portlandzement-Klinkers

Phasenbezeichnung	Alit C ₃ S	Belit C ₂ S	Aluminatphase C ₃ A	Ferritphase C ₂ (A,F)
Formel	3 CaO · SiO ₂	2 CaO · SiO ₂	3 CaO · Al ₂ O ₃	2 CaO(Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃)
Farbe der reinen Phase	weiß	weiß	weiß	dunkelbraun

1.2 Herstellung des Zementmörtels

Zur Herstellung der ZM-Auskleidungen wird ein Gemisch aus Hochofenzement und Zuschlägen verwendet. Der Hochofenzement (bisherige Bezeichnung „HOZ“, jetzt „CEM III“ (DIN 1164-1, 1994)) besteht aus Hüttensand (Hochofenschlacke) und Portlandzement (bisherige Bezeichnung „PZ“, jetzt „CEM I“ (DIN 1164-1, 1994)). Hüttensand ist ein „latent hydraulischer“ Stoff, das heißt, er benötigt zu seiner hydraulischen Erhärtung einen Anreger. Als Anreger wird in der Praxis z.B. Calciumhydroxid oder - wie in diesem Fall - PZ-Klinker verwendet. Die chemische Zusammensetzung eines typischen Hochofenzementes, angegeben jeweils als Oxid, zeigt Tabelle 3. Die größere Bandbreite im Massenanteil eines Oxides ist durch die wechselnden Phasenanteile in den Ausgangsmaterialien, deren Zusammensetzung standort-spezifisch ist, bedingt.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung eines in der Bundesrepublik hergestellten Hochofenzementes (WESCHE & SCHUBERT, 1993)

Zementbestandteil	Massen -%
CaO	43 - 66
SiO ₂	21 - 30
Al ₂ O ₃	6 - 14
Fe ₂ O ₃	0,5 - 3,0
Mn ₂ O ₃	0,1 - 2,5
MgO	1,0 - 8,5
SO ₃	1,0 - 4,5

Tabelle 4 zeigt die für die Herstellung des technischen Zementmörtels verwendeten Arten und Ansatzmengen an Zement und Zuschlag.

Tabelle 4: Art und Ansatzmenge an Zement und Zuschlag des zur Ausschleuderung der Gußrohre verwendeten Zementmörtels

technische ZM-Auskleidung	
Zement	Hochofenzement WÜLFRATH
Quarzsand	65 % 0,2 - 1 mm; 35 % H32
Wasser	Trinkwasser
W/Z-Wert	0,5
S/Z-Wert	1,9 - 2,25

Als Zuschlag darf nur sauberer, gebrochener oder ungebrochener Quarzsand nach DIN 4226 Teil 1 verwendet werden (DIN 2880, 1999). Um eine für eine dichte Auskleidung optimale Korngrößenverteilung sicherzustellen, müssen verschiedene Punkte beachtet werden. Der Feinstkornanteil², der durch den Durchgang durch ein Maschensieb nach DIN 4226 Teil 1 mit einer Maschenweite von 0,125 mm definiert ist, soll höchstens 10 Gew.-% betragen. Bei zu hohem Feinstkornanteil besteht die Gefahr des Absandens der Mörtelschicht. Das Größtkorn* darf 50 % der Mindestschichtdicke nicht überschreiten und soll abweichend von DIN 4226 Teil 1 im allgemeinen beim Rotationsschleuderverfahren eine maximale Größe von 3 mm haben.

Als Anmachwasser für den Zementmörtel wird Trinkwasser verwendet. Um den Zementmörtel gut verarbeiten zu können, wird beim Anmachen im allgemeinen mehr Wasser zugegeben, als zur Hydratation (Vorgang während des Erhärtens, siehe auch Kapitel 2.4) des Zementes erforderlich ist. Bei vollständiger Hydratation des Zementes machen chemisch gebundenes Wasser + Gelwasser etwa 38 % der Zementmasse aus, entsprechend also einem W/Z-Wert von 0,38 (WESCHE & SCHUBERT, 1993). In der Praxis wird zur Auskleidung von Gußrohren mit Zementmörtel gearbeitet, der auf einen W/Z-Wert von 0,5 eingestellt worden ist.

² Begriffsdefinition in DIN 2614 (1990)

1.3 Herstellung der Zementmörtelauskleidung auf der Rohrinnenoberfläche

Die Entwicklung des Rotationsschleuderverfahrens, mit dem die Rohrindustrie auch heute noch arbeitet, ermöglicht die Herstellung sehr dichter und fester Auskleidungsschichten (GIBSON, 1926).

Die Auskleidung der Gußrohre erfolgt bei hohen Drehzahlen. Die Rotationsgeschwindigkeit ist dabei abhängig vom Durchmesser der Rohre und von der Art der Schleuderanlage. Während bei der Auskleidung von Stahlrohren die Zentrifugalbeschleunigung je nach Rohrdurchmesser 300 - 500g betragen kann, liegen die Werte bei Gußrohren mit 35 - 40g wesentlich niedriger. Gußrohre haben - bedingt durch das Produktionsverfahren - größere Unwuchten und Ovalitäten als Stahlrohre. Diese Unwuchten führen bei einer längsaxialen Rotation zu erwünschten, verdichtungsfördernden Schwingungen und Vibrationen. Bei Rotationsgeschwindigkeiten über 50g, je nach Grad der Unwucht bzw. Ovalität auch schon bei < 50g, steigen diese Vibrationen dermaßen an, daß die Gußrohre von den Führungsrollen springen. Zum Teil werden die Gußrohre auch zur Auskleidung in Laufbänder gelegt, die einen Teil der Vibrationen abfangen. Während der Rotation der Gußrohre wird über eine gleichmäßig durch das Rohr bewegte Lanze der Zementmörtel auf die Innenoberfläche aufgetragen.

Die beim Rotationsschleuderverfahren auftretenden hohen Verdichtungskräfte treiben das überschüssige Anmachwasser aus. Die W/Z-Werte sinken nach dem Schleudern von 0,50 auf 0,30 - 0,40. Diese niedrigen W/Z-Werte sorgen für die hohe Festigkeit des Zementmörtels. Während des Schleudervorganges findet eine Entmischung statt, vergleichbar einer Filtration. Zementmörtelbestandteile mit größerem Gewicht wandern aufgrund der Zentrifugalkraft durch die Mischung hindurch nach außen. Dementsprechend werden die Bestandteile mit geringerem Gewicht nach innen gedrängt. Dadurch kommt es zur Bildung einer zementreichen Feinschicht auf der wasserzugewandten Seite und zu einer zementarmen Grobschicht an der rohrzugewandten Seite der ZM-Schicht. Häufig bildet sich auf der Feinschicht

noch zusätzlich eine Schlempe-schicht aus $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und/oder CaCO_3 . Bei der werksmäßigen Ausschleuderung von Gußrohren mit Zementmörtel spielt allerdings nicht nur die Rotation, sondern auch die Vibration der Rohre eine Rolle. Aufgrund dieser Vibration unterliegen die Zementmörtelbestandteile einer weiteren Beschleunigung, die dafür sorgt, daß die Zementmörtelbestandteile besser aneinander vorbeiwandern können. BRUNE & BOCKERMANN (1989) geben in ihrer Arbeit einen W/Z-Wert von 0,57 für eine maximale Entmischung an. Diese Entmischung ist in der Praxis eigentlich nicht erwünscht, da jede Schicht unterschiedliche materialtechnische Eigenschaften, wie z.B. Dehnungskoeffizient oder Sprödheit hat. Temperaturschwankungen oder unterschiedliche Druckbe- und -entlastung können dann zum Abplatzen einzelner Bereiche führen. Eine Verringerung des W/Z-Wertes vor dem Schleudern unter 0,40 würde zwar die Schichtenbildung unterbinden, jedoch sind dann die Fließ-eigenschaften des Zementmörtels zu schlecht, um ihn über längere Transporteinrichtungen in die Gußrohre zu transportieren.

Die ZM-Auskleidung ist nach dem Ausschleudern selbsttragend und die Haftung an der Metalloberfläche nur gering. Erst nach einer längeren Betriebszeit bildet sich eine stärkere Haftung durch chemische Reaktionen aus. Zur Beschleunigung der Erhärtung des Zementmörtels wird das ausgeschleuderte Rohr einer Reifezeit von 10-12 Stunden bei 100 % Luftfeuchtigkeit und Normaltemperatur, der sogenannten „Nachbehandlung“, unterzogen. Durch diesen Vorgang wird dem Zement zusätzliches Wasser für den Hydratationsvorgang zur Verfügung gestellt. Der Zementmörtel bekommt eine um so höhere Endfestigkeit, je länger er dieser Nachbehandlung unterzogen wird.

1.4 Chemische und mineralogische Vorgänge beim Erhärtungsprozeß des Zementmörtels

Das Versteifen des Zementleims (Gemisch Anmachwasser/Zement) wird „Erstarren“, die weitere Verfestigung „Erhärten“ genannt, wobei die im wesentlichen gleichartigen Vorgänge ineinander übergehen. Entscheidend für

den Übergang vom „Erstarren“ zum „Erhärten“ ist die Änderung der Faserlänge des Calciumsilicathydrats (CSH) vom langfaserigen zum kurzfasrigen CSH. In Bild 1 ist die zeitliche Änderung der Mengenverhältnisse der auftretenden Phasen von dem Zeitpunkt des Ansetzens bis zur Erhärtung des Zementes schematisch wiedergegeben.

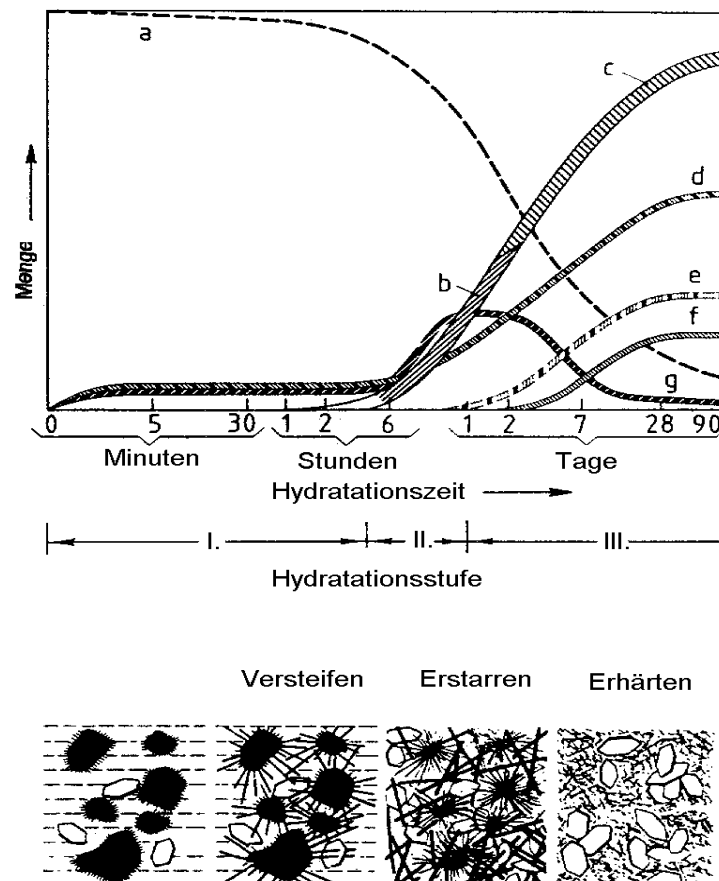
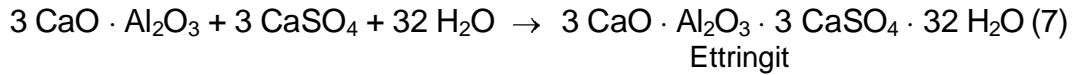


Bild 1: Schematische Darstellung des zeitlichen Hydratationsverlaufs und der Gefügestruktur; a) Porenraum; b) CSH langfaserig; c) CSH kurzfasrig; d) $\text{Ca}(\text{OH})_2$; e) Fe_2O_3 -haltiges Calciumaluminathydrat; f) Monosulfat g) Ettringit (LOCHER & KROPP, 1986)

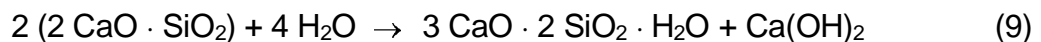
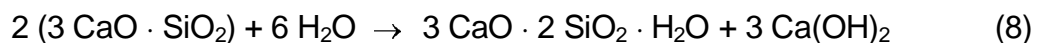
Der werksseitige Zusatz von Gips oder Anhydrit zum Zementklinker verzögert ein zu schnelles Erstarren und ermöglichte so eine sachgerechte Verarbeitung des Zementmörtels. Nach dem Anrühren des Zementes mit Wasser geht ein

Teil des Tricalciumaluminats C_3A und des Anhydrits in Lösung und reagiert zu Ettringit (Gleichung 7).



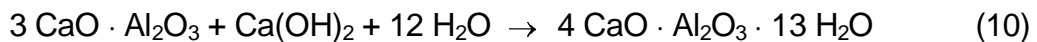
Die Ettringit-Kristalle auf der Oberfläche der Zementkörner sind so fein, daß sie den Zwischenraum zwischen den Zementkörnern nicht überdecken und daher auch kein festes Gefüge ausbilden können. Darauf beruht die erstarrungsverzögernde Wirkung des Anhydritzusatzes im Zement. Ohne Anhydrit würde das C_3A mit Wasser sofort zum Calciumaluminathydrat reagieren, das mit seinen großen Kristallen den Raum zwischen den Zementpartikeln ausfüllen und somit zu einer sehr raschen Verfestigung des Zementes führen würde.

Nach 1 bis 3 h erstarrt der Zement. Die nadelförmigen Ettringit-Kristalle bilden allmählich größere Nadeln, die die Zementpartikel miteinander verbinden und die Ansatzmasse verfestigen. Für die weitere Verfestigung des Zementes ist die Hydratation von Tricalciumsilicat C_3S und Dicalciumsilicat C_2S verantwortlich. Diese Reaktionen beginnen im nennenswerten Umfang nach etwa 4 h. Es bilden sich zunächst längere Nadeln von Calciumsilicathydrat CSH, die die Zementteilchen miteinander verbinden. Später füllen dann kleinere Nadelchen von CSH die Zwischenräume aus. Das reaktionsfähigere C_3S hydratisiert dabei wesentlich schneller als das C_2S (Gleichung 8 und 9).

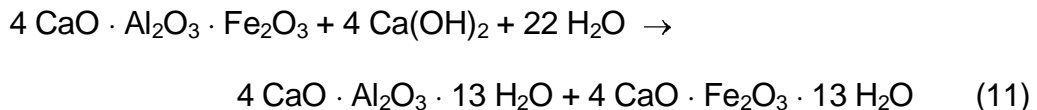


Die große spezifische Oberfläche des Calciumsilicatgels („tobermoritähnliche Phase“), die etwa 1000 mal so groß ist wie die Oberfläche des Zementes, lassen auch Massenanziehungskräfte auf die Festigkeitsentwicklung mitwirken (WESCHE & SCHUBERT, 1993). Dabei handelt es sich um schichtförmig aufgebaute Kristalle, bei denen Wassermoleküle zwischen den Schichten eingelagert werden können.

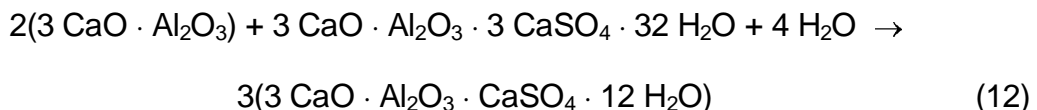
Noch vorhandenes C_3A reagiert nach Gleichung 10 mit dem entstandenen Calciumhydroxid zu tafelförmigen Tetracalciumaluminathydrat.



C₂(A,F) bildet gemäß Gleichung 11 das Fe₂O₃-haltige Calciumaluminathydrat. Es reagiert allerdings langsamer als C₃A, und ein Teil des Aluminiums ist durch Eisen ersetzt.



Der zu Beginn gebildete Ettringit reagiert gemäß Gleichung 12 mit noch vorhandenem C₃A und zwischenzeitlich gebildetem Calciumhydroxid zu „Monosulfat“.



Die Hydratation dringt von der Zementkornoberfläche ins Korninnere vor. Dabei muß das Wasser, um an den unhydratisierten Kern zu kommen, durch immer dichter werdende Gelschichten dringen. Dadurch verlangsamt sich mit der Zeit die Hydratation und damit auch die Festigkeitsentwicklung. Erst wenn bei ausreichendem Wasserangebot der Zement völlig durchhydratisiert ist, was je nach Schichtdicke einige Jahre dauern kann, ist die Endfestigkeit erreicht.

Dadurch, daß mehr Anmachwasser zugesetzt wird, als theoretisch zur Hydratation nötig ist (W/Z-Wert > 0,38), entstehen bei der Erhärtung je nach Lagerung (Wasser-, Feucht-, Luftlagerung) leere oder mehr oder weniger gefüllte Wasserporen verschiedener Größen im Zementstein (Tabelle 5).

Tabelle 5: Größe der im Zementstein vorkommenden Poren

Porenart	Porengröße
Gelporen	1 bis 10 nm
Kapillarporen	20 nm bis 10 µm
Mikroluftporen (durch Zusatzmittel)	0,1 bis 2 mm
Verdichtungsporen	bis mehrere mm

Durch diese Poren können Medien, wie z.B. Wasser, gelöste Ionen oder Luft in den erhärteten Zementmörtel eindringen und dort zu Reaktionen mit den Phasen führen.

1.5 Chemische Vorgänge im Zementmörtel während der Lagerung von zementmörtel ausgekleideten Guß- und Stahlrohren

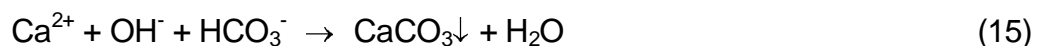
In der Praxis betragen die Lagerungszeiten von zementmörtel ausgekleideten Guß- und Stahlrohren (kurz ZMA) zwischen einer Woche und mehreren Monaten, bis sie zum Einsatz in der Trinkwasserversorgung kommen. Dabei sind sie den natürlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt. Der Kontakt des Zementmörtels mit der Feuchtigkeit der Luft und dem Kohlenstoffdioxid der Luft führt zu einer Carbonatisierung der Oberfläche. Das gemäß den Gleichungen 8 und 9 bei der Hydratation gebildete Ca(OH)_2 löst sich in dem Kapillarwasser des ZM-Porengefüges.



Das CO_2 aus der Luft löst sich in dem aus der Luftfeuchtigkeit stammendem Wasser auf der ZM-Oberfläche.



Die Reaktion der Produkte aus den Gleichungen 13 und 14 führt zur Ausfällung von Calciumcarbonat (Calcit).



Dieser natürliche Carbonatisierungsprozeß der ZM-Oberflächen während der Lagerung dichtet die Poren des Zementmörtels ab und bildet auf diese Weise eine Schutzschicht gegen Korrosion.

1.6 Wirkungsweise des Korrosionsschutzes von Gußrohren durch ZM-Auskleidung

Eine ZM-Auskleidung bietet sowohl einen aktiven als auch einen passiven Korrosionsschutz für das Rohr. Der aktive Korrosionsschutz greift über chemische Reaktionen in den Korrosionsvorgang und führt dazu, dass dieser verzögert oder zum Stillstand gebracht wird. Der aktive Korrosionsschutz erstreckt sich dabei auf den Werkstoff Eisen, auf das angreifende Medium Wasser und auf die Reaktionen, die mit dem Korrosionsvorgang verbunden sind. Der Eisenwerkstoff wird durch die hohe Alkalität des Zementmörtels in einen korrosionschemisch passiven Zustand versetzt, in dem er auch bei Zutritt von Sauerstoff nicht korrodiert. Diese Passivierung erfolgt durch Ausbildung einer submikroskopischen Deckschicht aus Eisenoxiden (STELZEL, 1963). BÄUMEL & ENGEL (1959) zeigten in ihren Untersuchungen durch Aufnahme von Stromdichte-Potential-Kurven an Eisen in Beton und alkalischen Lösungen, daß die Bildung der Passivschicht auf dem Eisen auf die gesättigte Calciumhydroxid-Lösung und nicht auf andere Mörtelbestandteile zurückzuführen ist. Die Versuche zeigten mit steigenden Potentialen einen für passiviertes Eisen typischen Kurvenverlauf, in dem die Stromdichte bis zu einem Potential von etwa 800 mV (bezogen auf die Normalwasserstoffelektrode) konstant blieb. Über 800 mV stieg die Stromdichte rapide an und es begann die Sauerstoffentwicklung. Nicht passiviertes Eisen zeigte einen stetigen, steilen Anstieg der Stromdichte zu sehr hohen Werten schon ab kleinen Potentialen.

Praktische Erfahrungen aus der Bauchemie (BAECKMANN et al., 1989) und Untersuchungen im Labormaßstab (SCHWENK, 1989) zeigten, daß es durchaus zu Korrosionserscheinungen an depassiviertem Eisen kommen kann. Entscheidenden Einfluß auf die Korrosion des depassivierten Eisenwerkstoffs hat die Permeationsgeschwindigkeit von Sauerstoff durch den Zementmörtel (SCHWENK, 1989; HILDEBRAND & SCHULZE, 1986). Eine merkbare Sauerstoffpermeation durch den Zementmörtel findet allerdings im feuchten Zementmörtel nur oberhalb der Wasser-Luft-Linie in nicht oder unvollständig

befüllten Leitungen oder Gefälleleitungen statt und auch nur dort, wenn der ZM nicht mit Wasser gesättigt ist. In befüllten ZMA-Leitungen ist die Permeationsgeschwindigkeit des Sauerstoffs durch den Zementmörtel zu gering, als daß es zu einer Gefährdung des Rohrwerkstoffs kommen könnte (HILDEBRAND & SCHWENK, 1986).

Der passive Korrosionsschutz ist dagegen rein mechanischer Natur. Durch die ZM-Auskleidung wird der zu schützende Werkstoff Eisen vom Medium Wasser getrennt (TESSENDORFF, 1972). Weitere Beispiele für rein passiv wirkende Korrosionsschutzschichten sind die bekannten Auskleidungen auf Bitumen- und Kunststoffbasis.

Die ZM-Auskleidung ist nicht porenfrei, sie weist jedoch keine durchgehenden Poren oder Risse auf. Die Poren füllen sich mit Wasser, das gleichzeitig Calciumhydroxid aus dem Zementstein herauslöst und einen pH-Wert um 12 annimmt. Hier setzt wieder der aktive Korrosionsschutz ein, da sich der Eisenwerkstoff in diesem pH-Bereich gegen eindiffundierenden Sauerstoff elektrochemisch passiv verhält.

Bei jahrzehntelangem Gebrauch der Rohre oder durch die Einwirkung von im Wasser gelöster Kohlensäure kann die hohe Alkalität der Mörtelauskleidung gemindert werden. In diesen Fällen wird die passive Korrosionsschutzwirkung der Mörtelschicht maßgeblich, die sich bei beginnender Rostbildung in zunehmendem Maße selbst abdichtet.

An der Grenzfläche Eisenwerkstoff/Zementmörtel wird das Eisen von dem im Kapillarwasser gelösten Sauerstoff oxidiert und geht in Lösung. Aufgrund der hohen Alkalität des Kapillarwassers fällt das gelöste Eisen als Eisen(III)-Oxidhydrat ($\text{FeO}(\text{OH})$) aus (TESSENDORFF, 1972). Gleichzeitig kann aber durch die im Wasser gelöste Kohlensäure ein Teil des CaO aus der ZM-Schicht langsam herausgelöst werden. Dies ist hauptsächlich bei weichen Wässern mit einem hohen Gehalt an überschüssiger Kohlensäure der Fall. Untersuchungen an 50-60 Jahre alten ZM-Auskleidungen, die extrem aggressiven Bedingungen ausgesetzt waren, zeigten, daß solche chemischen Prozesse tatsächlich stattfinden (CHAPPELL, 1930; KOTTMANN & KRAUT, 1970). Der Kalk innerhalb der Auskleidungsschichten war vollständig gegen Eisen(III)-Oxidhydrat ersetzt. Bei

dem heutigen Stand der Schleudertechnik werden derart dichte Zementmörtelgefüge erreicht, daß ein vollständiger Austausch nicht mehr vorkommt.

Die in der Grenzschicht Zementmörtel/Rohrinnenoberfläche eingebauten Eisen(III)-Oxidhydrate verbessern die Haftung zwischen Auskleidungsschicht und Rohroberfläche, die bei frisch ausgeschleuderten Rohren nur adsorptiv ist (siehe Kapitel 2.2). Diese Eisenoxide sind durch die Auskleidungsschicht vom durchströmenden Wasser getrennt, so daß sie nicht durch mechanische Einwirkung abgetragen werden können. Innerhalb der Mörtelschicht laufen die genannten Lösungs- und Umsetzungsvorgänge außerordentlich langsam ab. Die Ausbildung größerer Mengen an voluminösen Korrosionsprodukten, welche die Zementmörtelschicht abheben und zerstören könnten, findet in der Regel nicht statt. Bei Wässern, die sich im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befinden, erfolgen die oben genannten Austauschvorgänge nur noch kaum.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden als Korrosionsschutzschicht für Guß- und Stahlrohre vorwiegend bituminöse Stoffe, d. h. Bitumen und Steinkohlenteerpech verwendet. Zwar bewährten sich diese Stoffe bei einwandfreier Verarbeitung und sachgemäßer Anwendung, jedoch zeigten sich beim Betrieb einige Probleme, die bei ZM-Auskleidungen vermieden werden können. Tabelle 6 zeigt eine Gegenüberstellung der jeweiligen Eigenschaften der oben genannten Auskleidungen.

Tabelle 6: Gegenüberstellung von Eigenschaften bituminöser und ZM-Auskleidungen

	bituminöse Auskleidung	ZM-Auskleidung
Wechselwirkungen mit den transportierten Medien	Abgabe von organischen Stoffen	Abgabe von anorganischen Stoffen
Umgebungstemperatur	wird spröde bei tiefer Temperatur; wird weich bei hoher Temperatur	keinen Einfluß
Korrosionsschutz	absolute Porenfreiheit der Schicht erforderlich	kleine Risse wachsen während des Betriebes zu
Verteilung von Cl ₂ /ClO ₂ -haltigem Wasser	Bildung von organischen halogenhaltigen Verbindungen	Verminderung der Desinfektionswirkung durch Reduktion

Als Grundlage für Zementmörtel werden rein anorganische Stoffe verwendet. Zement, Anmachwasser und quarzhaltige Zuschläge können ohne Schwierigkeiten einer strengen Qualitätskontrolle unterworfen werden, wohingegen bei bituminösen Auskleidungsschichten die Abgabe von organischen Stoffen an das Trinkwasser berücksichtigt werden muß.

Die Forderung nach absoluter Porenfreiheit der Auskleidungsschichten braucht bei ZM-Auskleidungen nicht erhoben werden. Während der Korrosionsschutz bei bituminösen Auskleidungsschichten nur dadurch gewährleistet werden kann, daß keine Risse oder Löcher in der Auskleidungsschicht auftreten, durch die ein Unterwandern der Auskleidung durch Wasser möglich ist, wachsen bei ZM-Auskleidungen kleine Risse oder Löcher im Laufe der Betriebszeit z. B. durch Bildung von Calcit zu.

Ein weiterer Vorteil von ZM-Auskleidungen ist die Unempfindlichkeit gegenüber Temperaturänderungen, während bituminöse Auskleidungsschichten bei tiefen Temperaturen spröde und bei hohen Temperaturen weich werden (z. B. beim Schweißen von Übergangsstellen). Außerdem ist die Vorbehandlung der Rohrrinnenoberfläche vor dem Aufbringen der Schutzschicht bei ZM-Auskleidungen weniger aufwendig.

Bei der Verteilung von Cl_2/ClO_2 -haltigem Trinkwasser in mit Bitumen ausgekleideten Rohrleitungen kann es zu Überschreitungen der in der Trinkwasserverordnung vorgegebenen Grenzwerte für organische Halogene kommen. Bei ZM-Auskleidungen kann die Wirksamkeit der Desinfektion beeinträchtigt werden, denn die Bestandteile des Zementmörtels können das Chlor reduzieren, wodurch dieses nicht mehr zur Abtötung von Mikroorganismen zur Verfügung steht (VÖLKELE et al., 1993).

Vorteile gegenüber ZM-Auskleidungen bieten einwandfreie bituminöse Schutzschichten allein in den Fällen, in denen extrem weiches Wasser mit einem negativen Sättigungsindex transportiert werden soll.

