

# Modellierung des Schadensfortschritts bei der Korrosion von Stahl in Beton

Diplomarbeit im FB III: Bauingenieur- und Geoinformationswesen, Studiengang Bauingenieurwesen, 2006  
 Bearbeitung: Jens Lehmann, Betreuung: Prof. Dipl.-Ing. J. Berger

Ein Teilprojekt zum DFG - Forschungsvorhaben "Modellierung des Schadensfortschritts bei der Korrosion von Stahl in Beton" wird an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin durchgeführt. Ziel dieses Teilprojektes ist die quantitative Beschreibung des Korrosionsfortschritts an depassiviertem Bewehrungsstahl. Dazu werden elektrochemische Systemparameter durch elektrochemische Messungen an speziellen Probekörpern ermittelt und ausgewertet. Die zwei Kernthemen dieser Diplomarbeit beziehen sich auf spezielle Fragestellungen, die im Rahmen dieser Untersuchungen aufgetreten sind.

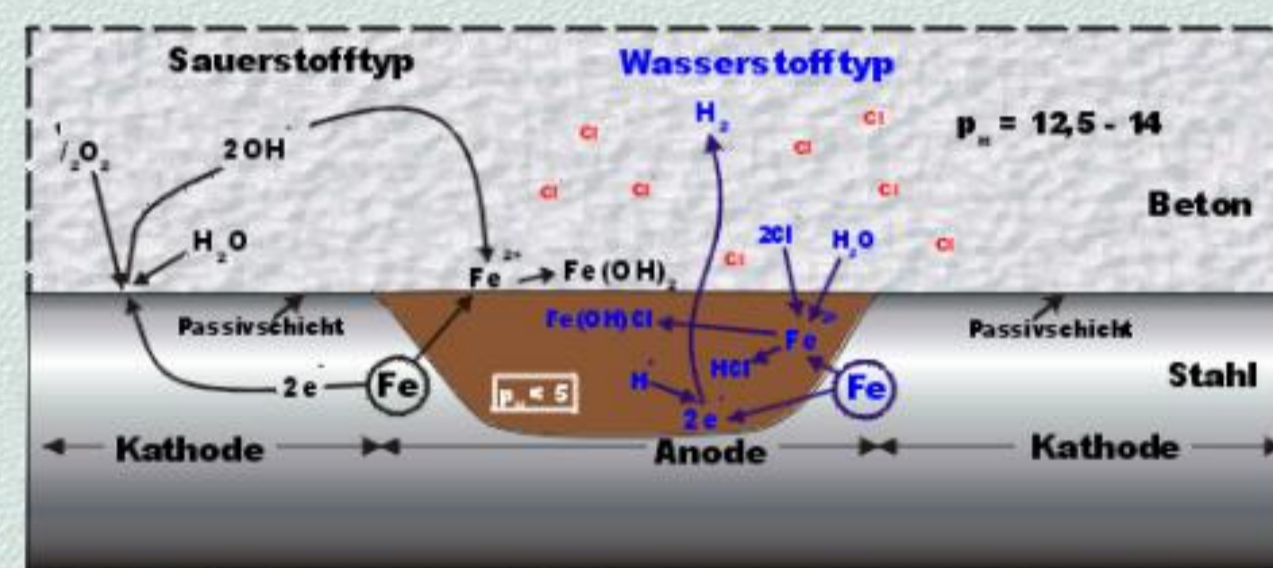
## Elektrochemische Grundlagen der Korrosion von Stahl in Beton

### Korrosionssystem

- Passivschichtbildung an Stahloberfläche infolge des hohen pH-Wertes des Porenwassers
- Passivschicht behindert Eisenauflösung

Depassivierung möglich durch:  
 - Karbonatisierung des Betons (pH-Wert-Absenkung)  
 - Chloridangriff; Folge: Lochkorrosion

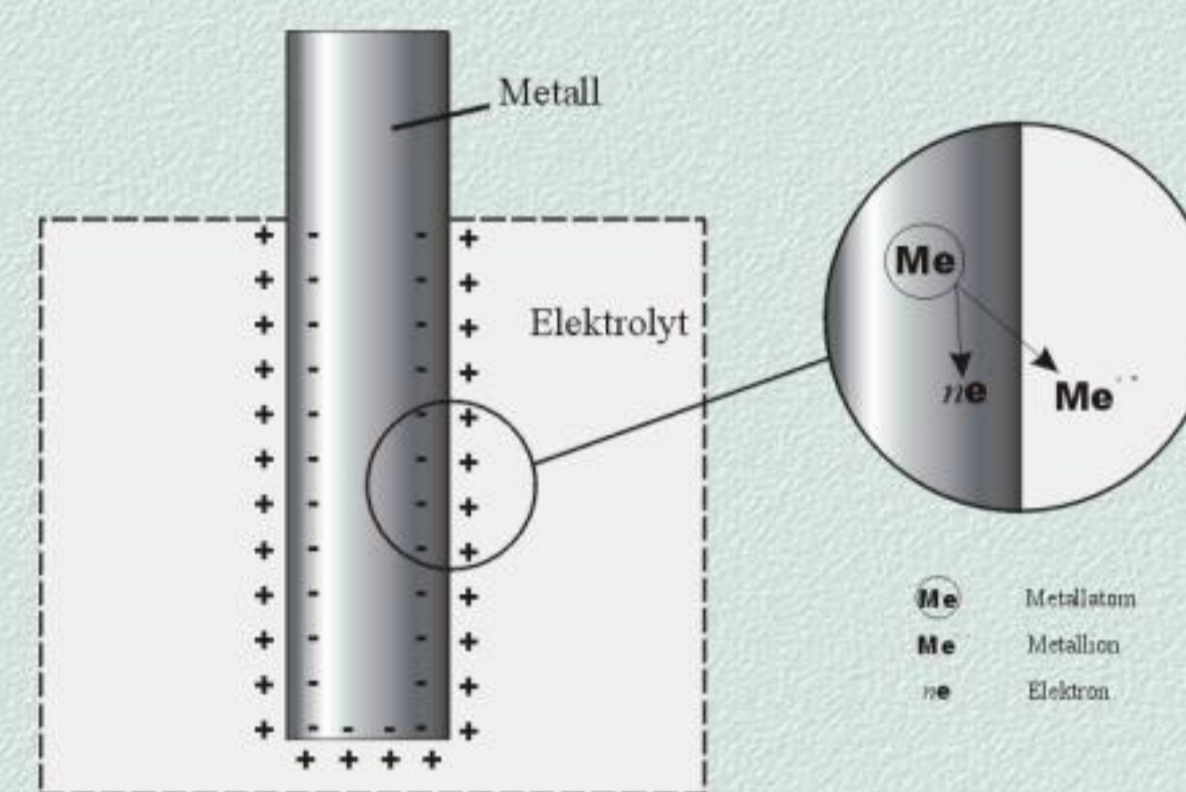
Im Rahmen dieser Diplomarbeit: Betrachtung des Chloridangriffs.  
 - Korrosionsmechanismus nach 2 Typen; Problem: Anteile aus Wasserstofftyp nicht messbar



### Elektrochemisches Potential E

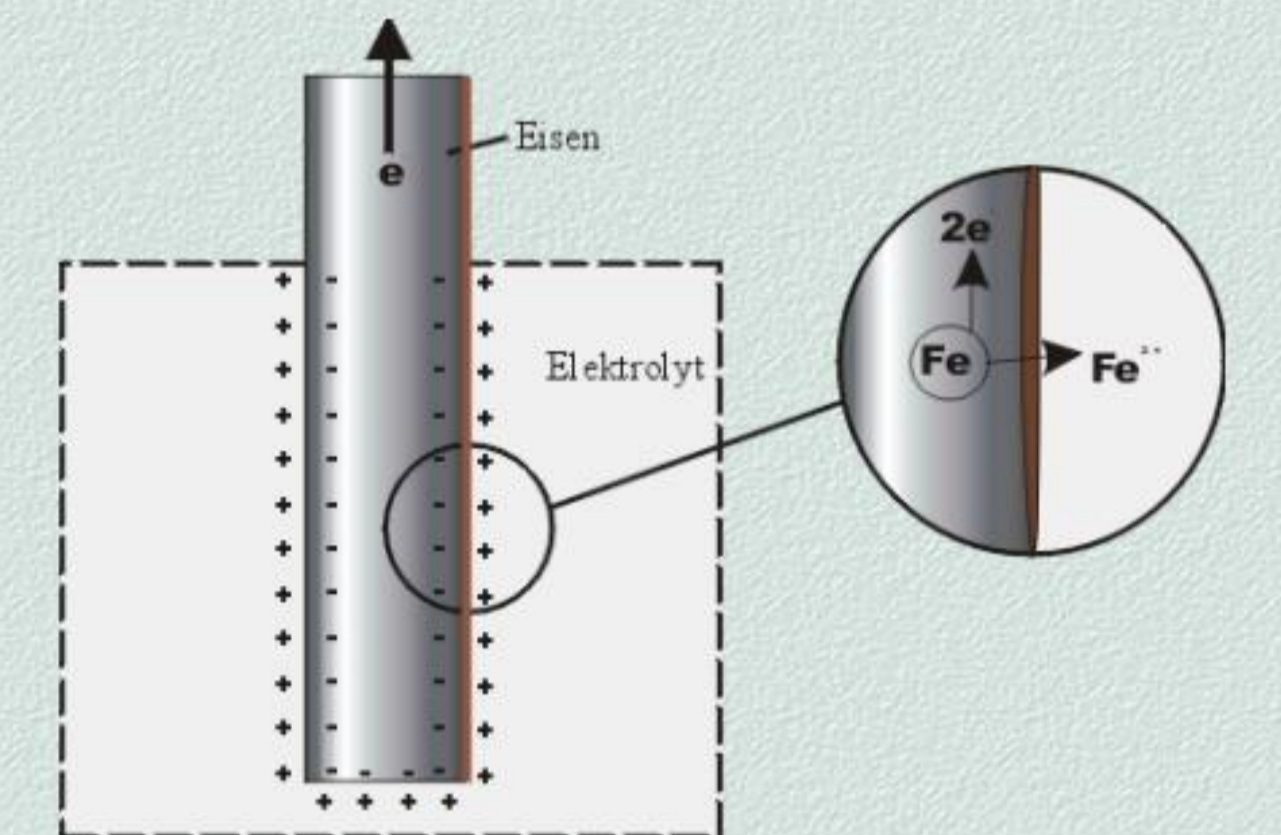
- Metallionen gehen in Lösung; freie Elektronen bleiben im Metall
- Metall lädt sich negativ auf
- Ausbildung einer elektrolytischen Doppelschicht an der Phasengrenze
- Ladungstrennung bewirkt elektrische Spannung
- diese Spannung = elektrochemisches Potential E
- je stärker die Korrosion, desto niedriger E

Aber: Nur bedingt aussagekräftig, da von verschiedenen Parametern abhängig! Betrachtung des Polarisationswiderstandes erforderlich!



### Polarisationswiderstand Rp

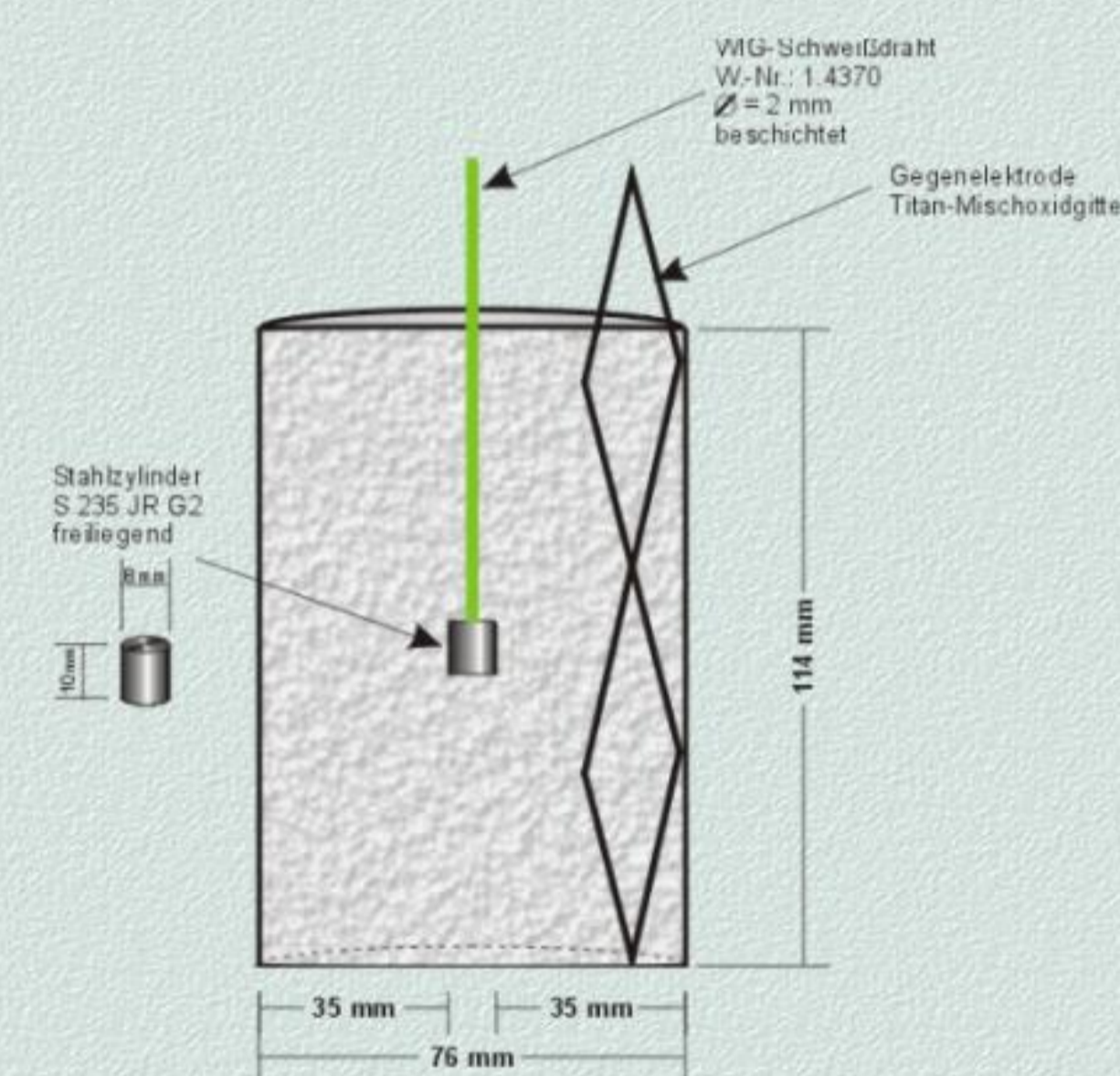
- Elektronenentzug durch Anlegen eines elektr. Stroms
- Potential des Stahls wird positiver
- Reaktion des Stahls: Eisenauflösung; wirkt dem Elektronenentzug entgegen
- je stärker die Korrosion, desto kleiner Rp



## Problemstellung 1: Herstellungseffekte

### Herkömmlicher Probekörperaufbau

- zylinderförmige Stahlprobe A = 4,1 cm<sup>2</sup>
- Gegenelektrode: Titanmischoxidgitter
- Variation verschiedener Chloridgehalte und betontechnologischer Parameter



### Effekt 1: Spaltbildung

- Spaltbildung an der Unterseite der Stahlzylinder; Folge: Spaltkorrosion



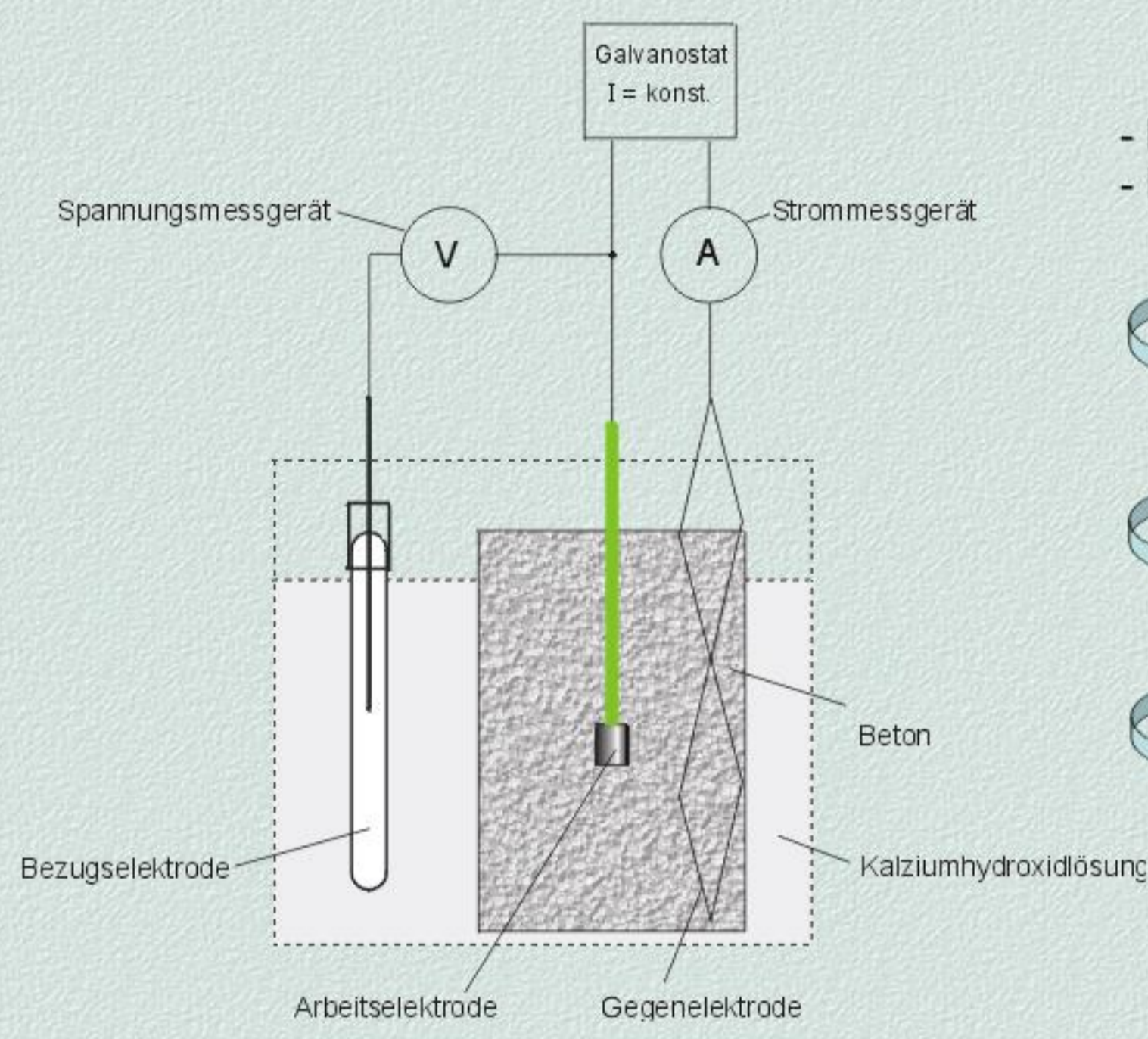
### Effekt 2: Poröse Zementsteinstruktur

- poröse Zementsteinstruktur an der Unterseite der Stahlzylinder



## Problemstellung 2: Messwertdichte

### Galvanostatische Pulsmessung



- konstanter Strom "I" wird auf Stahlprobe aufgebracht
- Potentialverschiebung "ΔE" wird aufgezeichnet

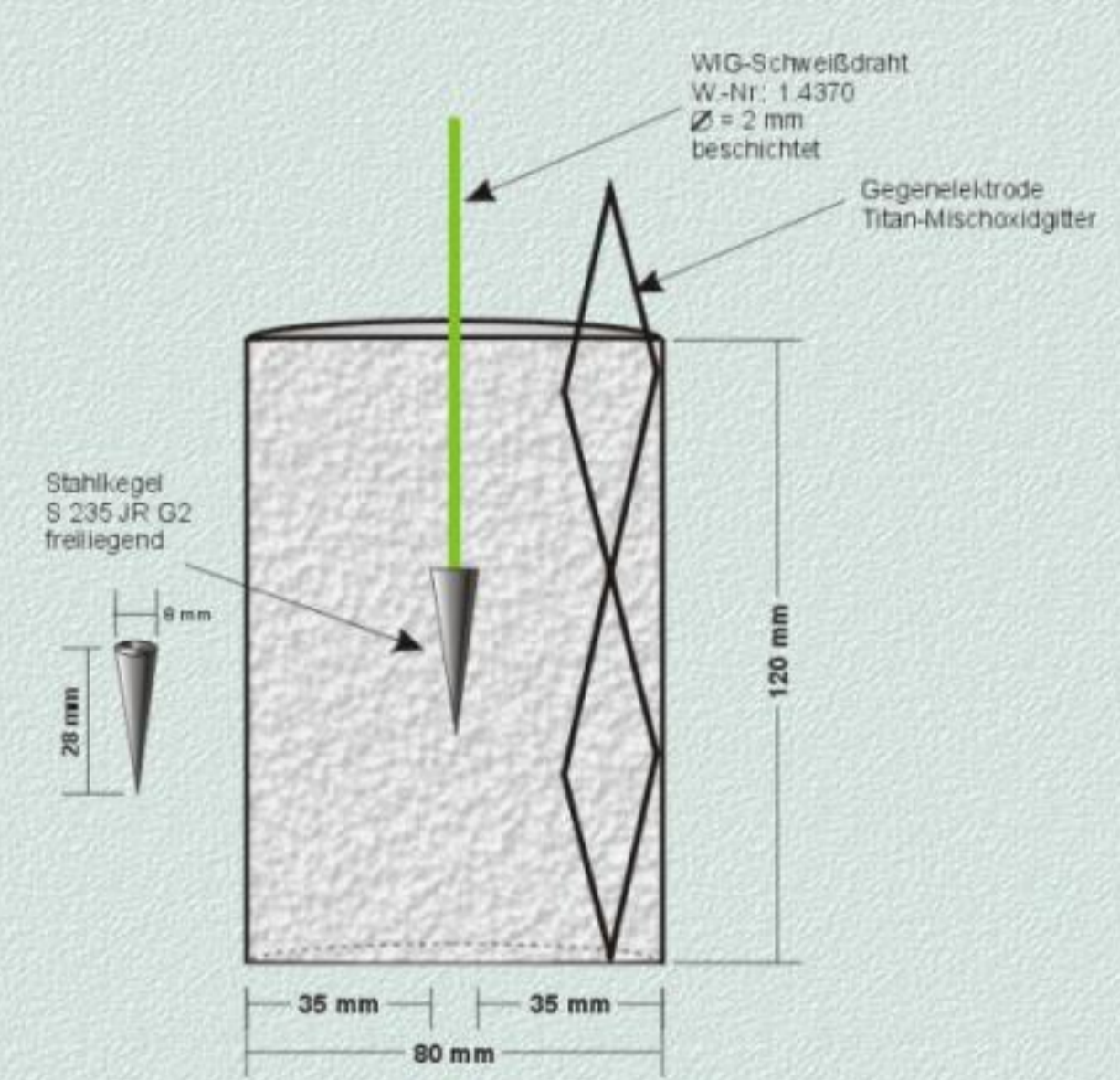
$$\text{Polarisationswiderstand } R_p = \frac{\Delta E}{I}$$

$$\text{Korrosionsstromdichte } i_{cor} = \frac{B}{R_p \cdot A}$$

$$\text{Masseverlust } \Delta m(t) = \frac{1}{40,1} \cdot \int_{t=0}^t i_{cor} \cdot t \cdot dt$$

## 1. Lösungsansatz: Stahlprobenform

- identischer Probekörperaufbau
- kegelförmige Stahlprobe; A = 4,1 cm<sup>2</sup>



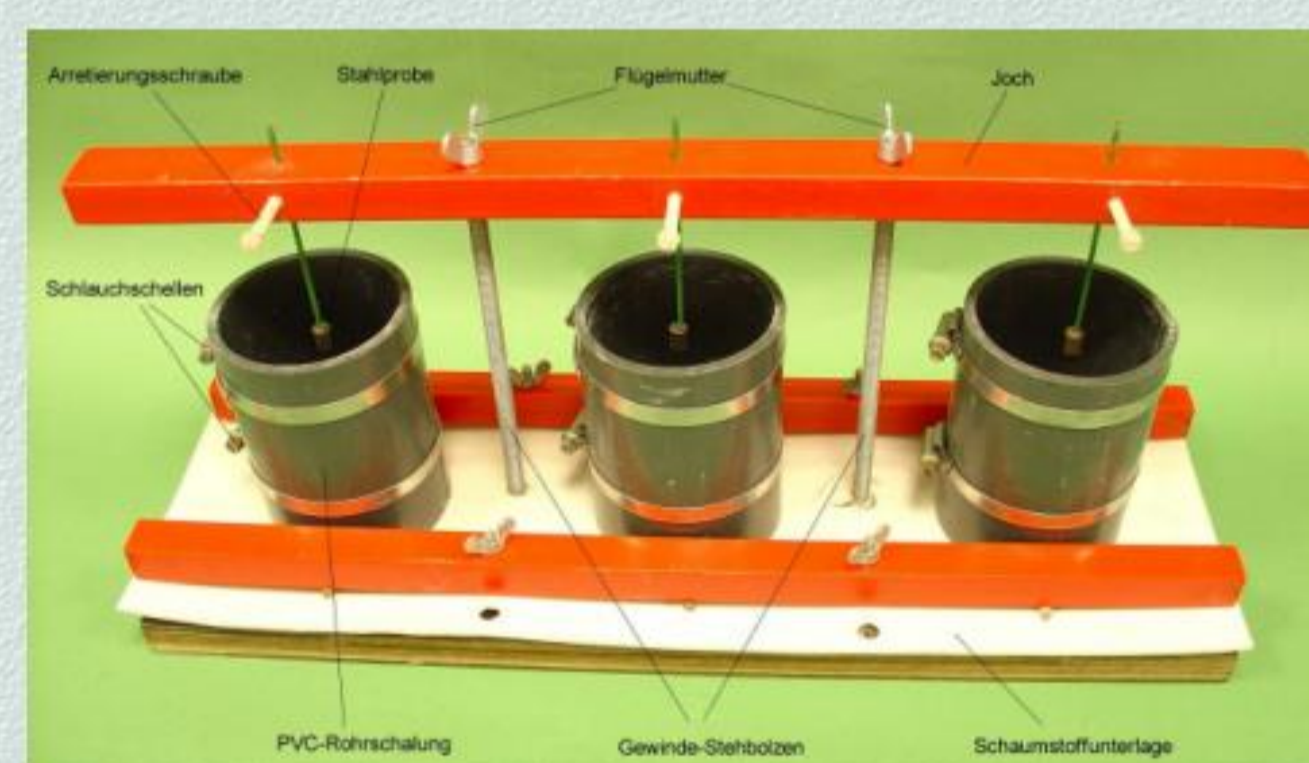
## 2. Lösungsansatz: Herstellung

Herstellungsvariante I (herkömmlich)

- Arretierungsschrauben bis zum Ausschalen fest

Herstellungsvariante II (optimiert)

- Arretierungsschrauben nach dem Verdichten lösen
- Proben weitere 5 mm einsinken lassen



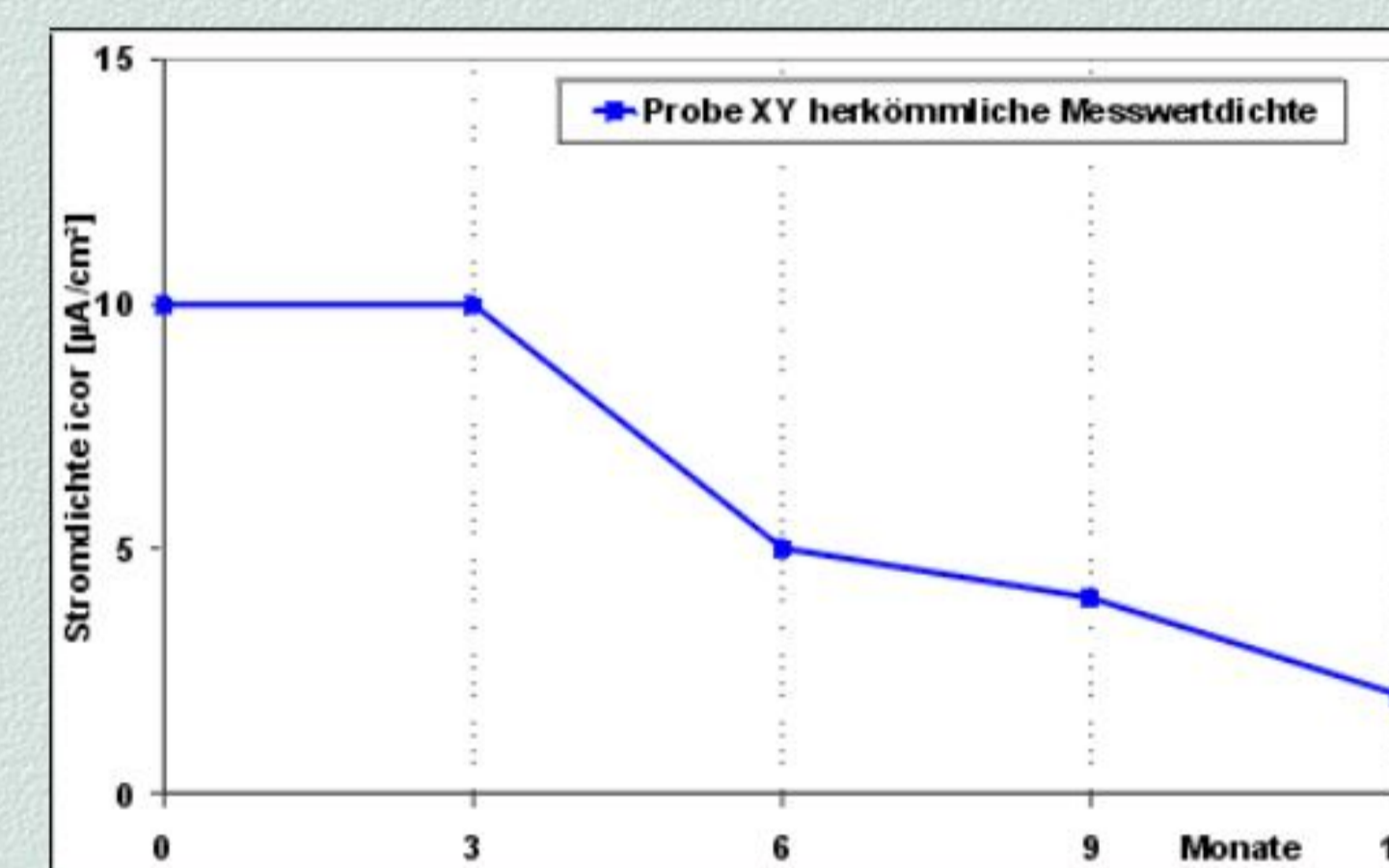
## Herstellung von je 27 Beton- und Mörtelprobekörpern

Beton bzw. Mörtel	Kegel	Kegel	Zylinder	Anzahl insgesamt	
Chloridgehalt [% / z]	Herstellungsvariante I	Herstellungsvariante II	Für Sonderversuche	Herstellungsvariante II	
1,0	3	3		6	
2,5	3	3		6	
4,0	3	3	3	9	
	9	9	3	6	27

Beton- / Mörtelparameter:

- Zement: CEM I 32,5 R; 360 kg/m<sup>3</sup>
- w/z-Wert: 0,5
- Gesteinskörnung: Beton: Sieblinie AB 8
- Mörtel: CEN Normensand GK 2mm
- Chloridgehalte: 1,0 2,5 4,0 [M.-%/z]

## Herkömmliche Messwertdichte

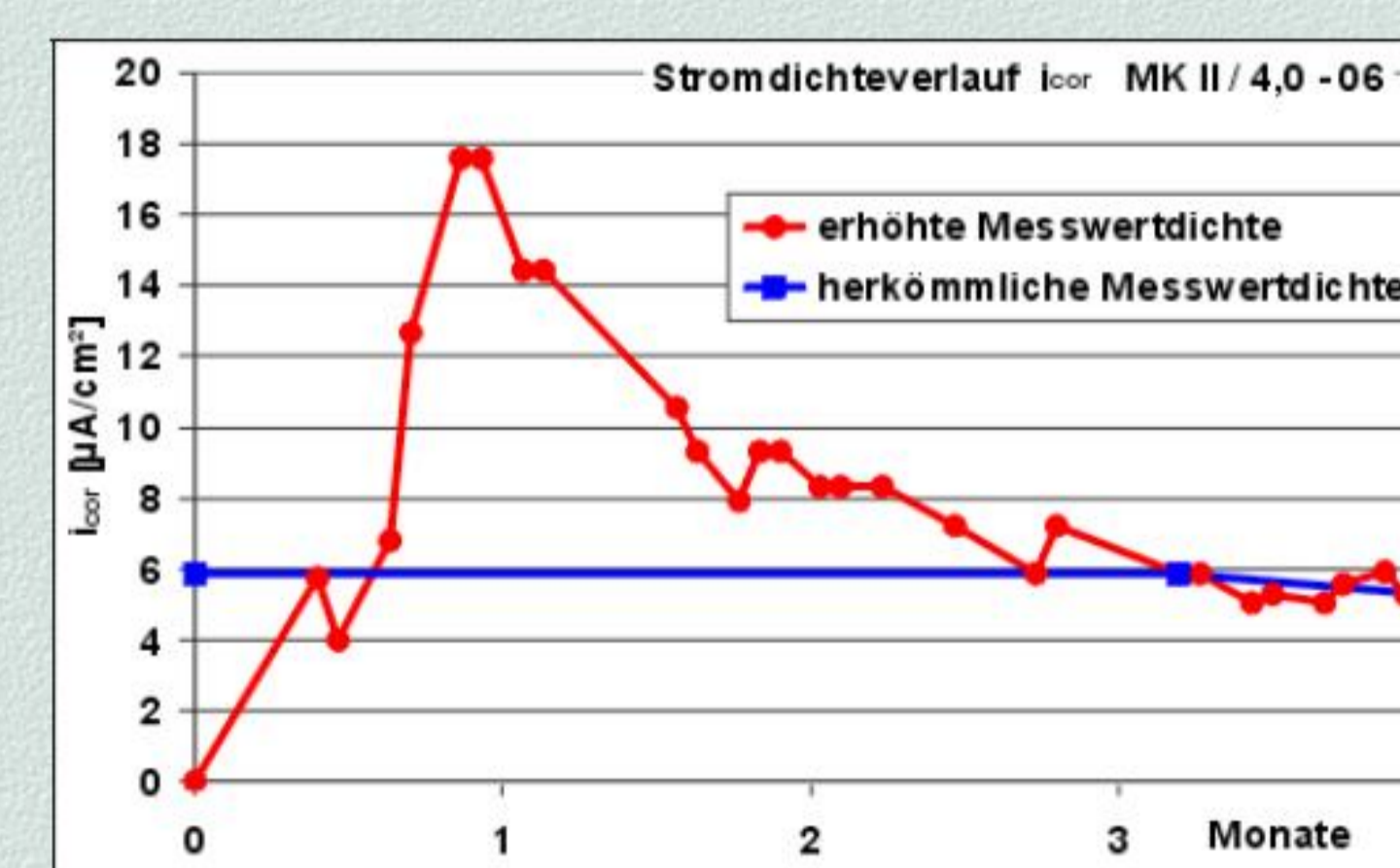


- Messung aller 3 Monate
- Verlauf zwischen den Messwerten linear
- Fläche unter der Kurve entspricht Masseverlust

Problem:  
 - hohe Abweichungen zwischen errechnetem und tatsächlichem Masseverlust

daher Verhalten der Proben zwischen den Messterminen von Interesse

## Erhöhte Messwertdichte



- wöchentliche Messwertnahme
- Verläufe zwischen den Messwerten linear

Vergleich: - Berechnung des Masseverlustes mit herkömmlicher und erhöhter Messwertdichte  
 - Bestimmung des tatsächlichen Masseverlustes durch Wägung der Stahlproben

## Ergebnisse

Probekörperspaltung nach Abschluss der elektrochemischen Untersuchungen nach 4 Monaten; Ergebnisse eindeutig!

Stahlzylinder in Beton; Herstellungsvariante II (optimiert)



- Spaltbildung trotz optimierter Herstellung bei allen zerteilten Beton- / Mörtelprobekörpern

Stahlkegel in Mörtel; Herstellungsvariante I (herkömmlich)



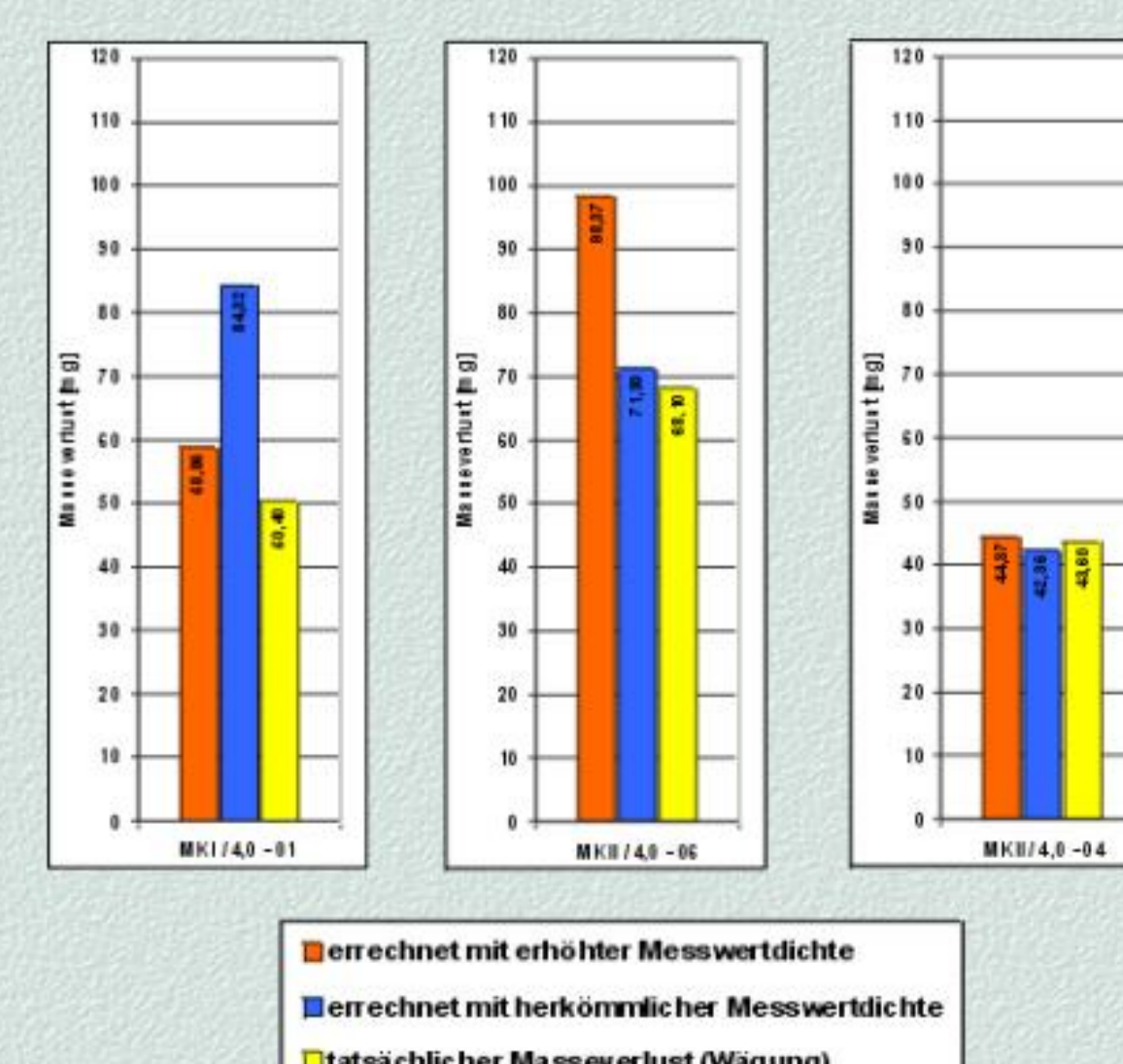
- keine Spaltbildung bei allen zerteilten Beton- / Mörtel-Probekörpern

Stahlkegel in Beton; Herstellungsvariante II (optimiert)



- keine Spaltbildung bei allen zerteilten Beton- / Mörtel-Probekörpern

## Ergebnisse



Kein eindeutiges Ergebnis!

- ca. 50 % der untersuchten Proben mit erhöhter Messwertdichte näher am tatsächlichen Masseverlust. (links)
- restliche ca. 50 % weiter vom tatsächlichen Masseverlust entfernt. (mitte)
- wenige Proben: gute Übereinstimmung beider Messwertdichten mit tatsächlichem Masseverlust. (rechts)

Gründe für die weiterhin hohen Abweichungen: vermutlich Berechnungsansatz der Stromdichte