

# Zeitlicher Verlauf von verdeckter Korrosion sichtbar gemacht mit Computertomographie

Dietmar MEINEL, Matthias BECK, Jürgen GOEBBELS, Daniel HANKE  
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Fachgruppe VIII.5  
dietmar.meinel@bam.de

**Kurzfassung.** Die Korrosion von Stahl in Beton ist ein verdeckter Schädigungsmechanismus und hat für die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Bauwerken eine große Bedeutung. Die Detektion und Beschreibung dieser Korrosionsphänomene ist daher ein wichtiger Schritt in Richtung auf die Entwicklung verbesserter Korrosionsschutzsysteme und die Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken.

Der Schädigungsfortschritt der Stahlbetonbewehrung kann nicht direkt beobachtet werden, so dass in der Regel im Labor aber auch in der Praxis mit elektrochemischen Messungen die bei der Korrosion umgesetzte Stoffmenge mittels Faradayschem Gesetz aus der elektrischen Ladung ermittelt wird. Um die tatsächlichen Verhältnisse an der Stahloberfläche (Anodenoberfläche) zu beurteilen, muss der Betonprobekörper anschließend zerstört werden. Der Schädigungsverlauf kann jedoch nicht zeitlich differenziert über mehrere Stadien hin verfolgt werden. Eine aussagekräftige Modellbildung ist somit nur schwer möglich.

Die Mikro-Computertomographie bietet hier die Möglichkeit, die Korrosionsphänomene zerstörungsfrei und kontinuierlich zu verfolgen. So kann die fortlaufende Veränderung an der Anodenfläche nach jeder Schädigungsstufe quantitativ bestimmt werden. Dadurch kann einerseits die Abwanderung der Korrosionsprodukte zeitlich dargestellt werden, andererseits erlaubt das Verfahren auch zwischen linearen (Flächenkorrosion) und nichtlinearen Korrosionsphänomenen (Lochkorrosion) zu unterscheiden.

Die in einem Korrosionsversuch an einer Probe (Anode) mehrfach über die Zeit durch die Bildverarbeitung bestimmten Volumendifferenzen repräsentieren das durch Korrosion abgetragene Materialvolumen. Dieses lässt sich in Beziehung zu dem elektrochemisch prognostizierten und dem gravimetrisch gemessenen Materialabtrag am Versuchsende bringen.

## Einführung

Schäden an Stahlbetonbauwerken ergeben sich häufig durch die Korrosion von im Beton eingebetteten Stahlbauteilen. Über Regelwerke wird die Dauerhaftigkeit dieser Bauwerke gewährleistet. Voraussetzung dazu ist ein umfangreiches Wissen über die Eigenschaften der verwendeten Baustoffe und der im Laufe der Nutzung auftretenden Veränderungen. Für die Erhaltungsmaßnahmen ist daher eine genaue Kenntnis des Schädigungsverlaufes von großer Bedeutung. Traditionell wird dazu im Falle der Korrosion von Stahl in Beton auf

elektrochemische Untersuchungsverfahren, wie z.B. der galvanostatischen Pulsmessung (Laborverfahren), zurückgegriffen [Abb. 1].

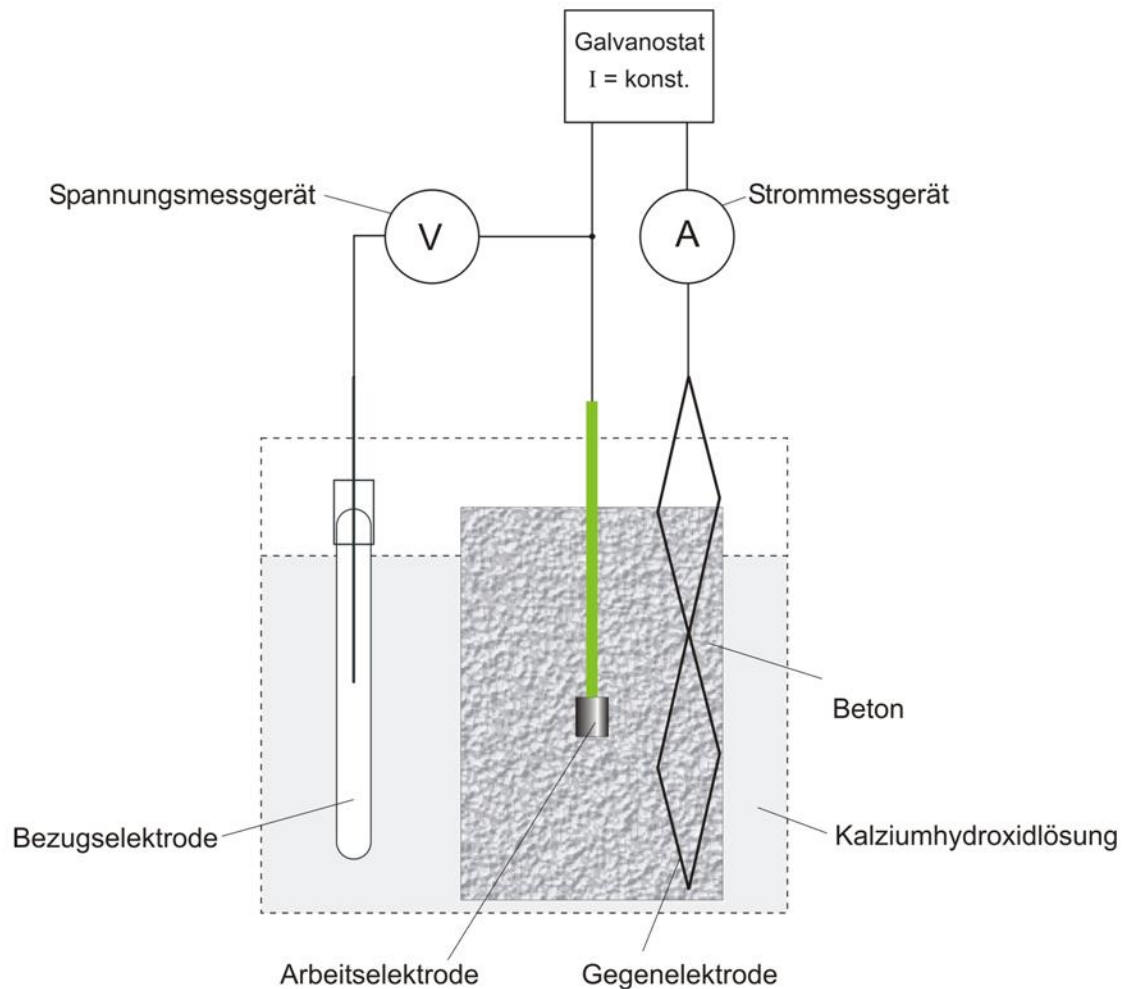


Abb. 1 Versuchsaufbau der galvanostatischen Pulsmessung

Zur genaueren Untersuchung der Korrosionsphänomene können die im Bauwerk vorkommenden Systeme aus Kathode und Anode im Labor mittels Betonprobekörper [Abb.2] nachgestellt und unter kontrollierten Bedingungen erforscht werden. Dazu werden Bewehrungsstäbe in chloridhaltigen als auch in chloridfreiem Beton eingebettet und durch gezieltes Kurzschließen ein Element erzeugt. Aus der Ladungsmenge lässt sich daraus mittels Faradayschem Gesetz die abgetragene Stoffmenge ermitteln. Somit ist eine Prognose über den Korrosionsabtrag an der Anode (Stahl) möglich. Unberücksichtigt bleiben aber die Anteile der Eigenkorrosion, die durch kleine kathodische Flächen auf der Anode ausgelöst werden. Diese Anteile steigen je weiter der Schädigungsprozess fortschreitet. Dabei kann der Anteil der Lochkorrosion gegenüber der Flächenkorrosion signifikant ansteigen. Der Korrosionsmechanismus in den Löchern unterscheidet sich von dem der Flächenkorrosion. In der Folge verschiebt sich das über das Faradaysche Gesetz gut prognostizierbare Korrosionssystem der Flächenkorrosion zu einem schwer einschätzbaren System der Lochkorrosion. Als Folge der zusätzlichen kathodischen Teilreaktionen in den Löchern kommt es zu einer Differenz zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Massenverlust die über die Zeit zunimmt.

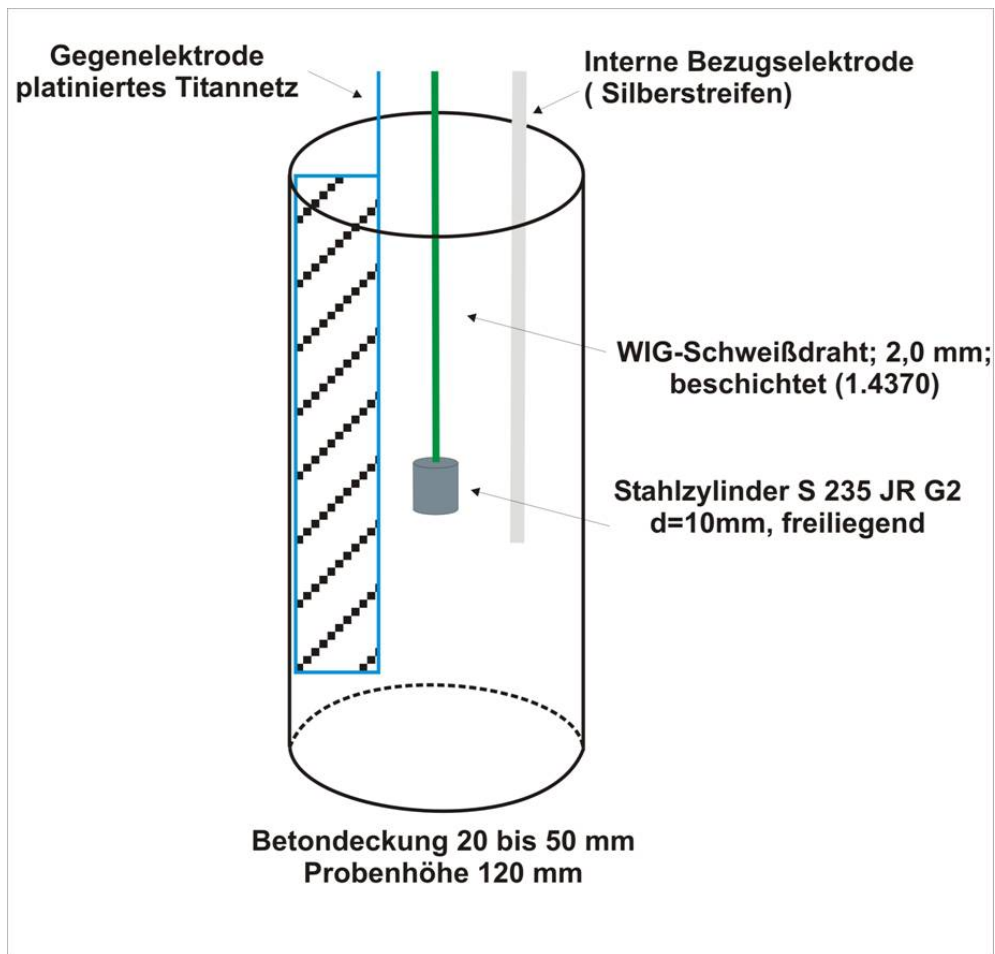


Abb.2 Probekörperaufbau

Die Messwerte aus den Elementstrommessungen lassen sich erst am Ende der Messreihe durch den Ausbau der Anode und der Korrelation mit dem gravimetrisch bestimmten Masseverlust verifizieren. Auch die wahren Verhältnisse an der Anode, wie Inhomogenitäten an der Phasengrenze zwischen Stahl und Beton bleiben unberücksichtigt. Um exakte Prognosen über den Korrosionsfortschritt abgeben zu können muss die aktive Anodenfläche bekannt sein [1].

## Computertomographie

### 1.1 Mikro-CT in der BAM

In Ergänzung zu den elektrochemischen Untersuchungen an ausgewählten Probekörpern erfolgte die zerstörungsfreie Dokumentation mittels 3D-Computertomographie (3D-CT). Hierdurch war es möglich die Veränderungen an der im Beton eingebetteten Elektrodenoberfläche nach jeder Schädigungsstufe zerstörungsfrei sichtbar zu machen. Zum Einsatz kam eine in der Fachgruppe VIII.5 der BAM entwickelte  $\mu$ CT-Anlage mit einer 225kV-Mikrofokusröntgenröhre und einem 2k x 2k Flachdetektor [Abb.3].

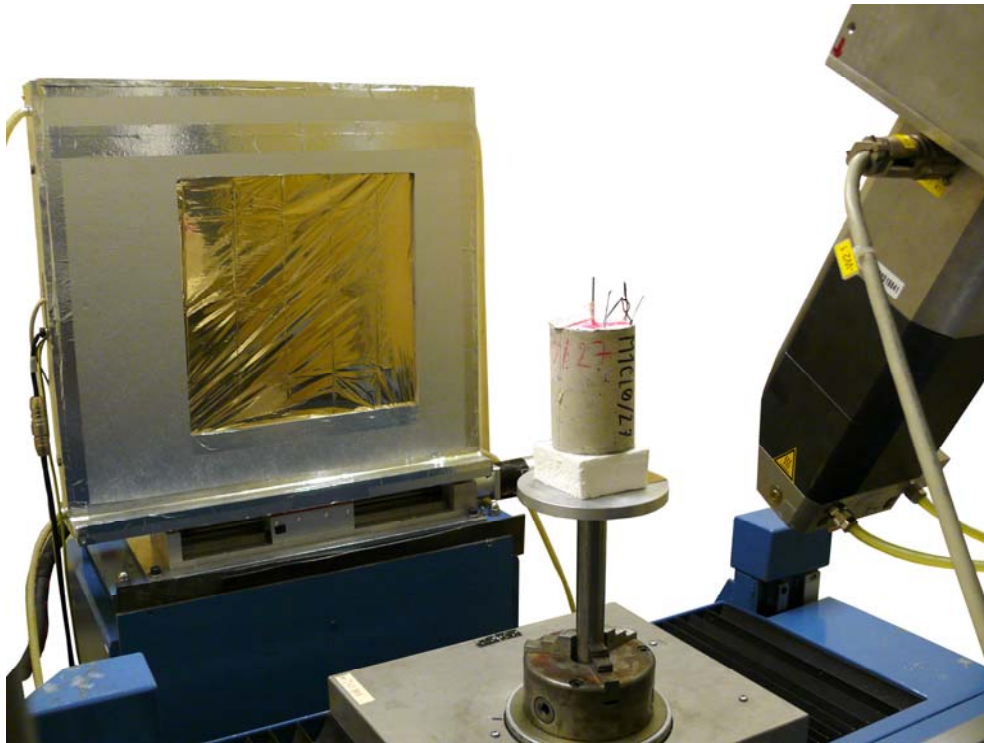


Abb.3 Mikro-CT mit Betonprobekörper

Die untersuchten Probekörper haben einen Durchmesser von 80mm. Sie wurden auf einem Drehteller positioniert und um 360° im Kegelstrahl der Röntgenröhre gedreht. Aus 1800 Durchstrahlungsprojektionen (Schattenbilder) wurde nach der Messdatenerfassung ein 3D-Bilddatensatz rekonstruiert.

**Messparameter:**

Energie:	210kV
Strom:	75 $\mu$ A
Pixel:	2011 x 2011
Winkel:	1800
Messzeit pro Winkel:	20s
Ortsauflösung:	45 $\mu$ m Voxelkantenlänge

*1.2 Bildauswertung*

Die Auswertung der Bilddaten erfolgte mit dem Programm VGStudio MAX 2.0. Um die durch Korrosion an der Anode abgetragene Stoffmenge aus den CT-Bilddaten zu ermitteln muss das Volumen der Anode in den verschiedenen Schädigungsstufen exakt bestimmt werden. Bei einkomponentigen Werkstoffen in einer homogenen Matrix reicht für die Festlegung der Objektgrenze in der Regel der ISO50-Schwellwert aus. In diesem Fall aber liegt die Metalloberfläche der Anode sowohl an der inhomogenen Betonmatrix als auch an Korrosionsprodukten und eventuellen Hohlräumen an. Daher bietet es sich an für die Grenzwertfindung die lokalen Schwellwerte heran zu ziehen. Dazu wird nach Festlegung des globalen ISO-Schwellwertes für Beton und Anode der Anodenkörper per region growing ausgewählt und als Region of Interest (ROI) gespeichert. Störungen wie sie durch die systembedingten Ringartefakte auftreten können hierbei mit Hilfe der Erode/Dilate-Funktion beseitigt werden. Anschließend wird auf dieser so erzeugten Grenzfläche eine automatische Kalibrierung mit adaptiven Schwellwerten gestartet [Abb. 4].

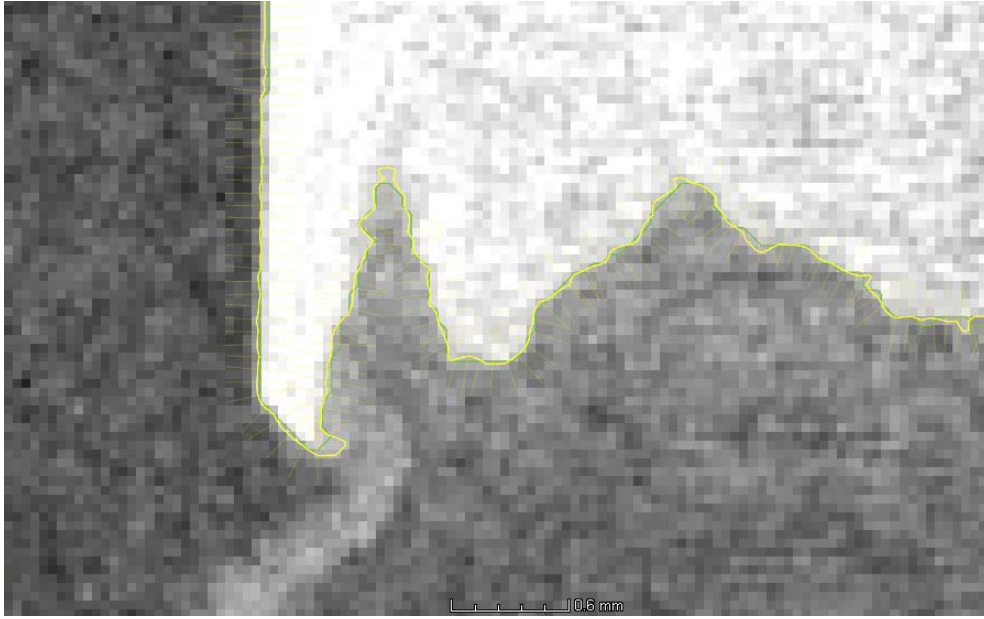


Abb. 4 Lokale Schwellwertfindung mit dem Programm VGStudio MAX

Als Ergebnis erhält man den Wert für das unkorrodierte Stahlvolumen. [Abb. 5] Die Volumendifferenz aus zwei zeitlich auseinander liegenden Messungen entspricht dann dem Stoffabtrag. Um den Materialabtrag zeitlich und örtlich differenziert darzustellen müssen die verschiedenen CT-Messungen einer Probe aufeinander registriert werden. Dies geschah hier über die Best-Fit-Methode, bei der die Oberflächen der Anodenkörper so lange iterativ gegeneinander verschoben und verdreht werden, bis die Summe der Abweichungsquadrate ein Minimum erreicht. Zur Sicherheit befanden sich außen an den Probekörpern fest angebrachte Zirkonkugeln, über die die Datensätze mittels angefitteter Regelgeometrien ausgerichtet werden konnten falls die Ausrichtung der Stahlzylinder keinen Erfolg zeigt.



Abb. 5 Isosurface der korrodierten Anodenunterseite

### 1.3 Ergebnisse

Mit Hilfe der Computertomographie kann die fortlaufende Veränderung an der Anodenfläche nach jeder Schädigungsstufe zerstörungsfrei sichtbar gemacht werden [Abb. 6].

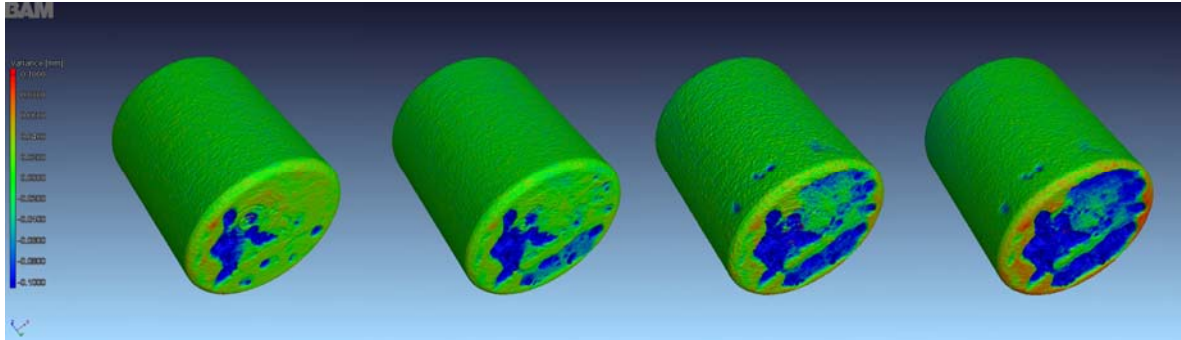


Abb. 6 Farbliche Darstellung der Abweichungen der Stahlzylinderoberfläche nach verschiedenen Schädigungsstufen

Dadurch lässt sich einerseits die Abwanderung der Korrosionsprodukte erstmals zeitlich darstellen, andererseits erlaubt das Verfahren auch zwischen linearen (Flächenkorrosion) und nichtlinearen Korrosionsphänomenen (Lochkorrosion) zu unterscheiden [Abb. 7, 8].

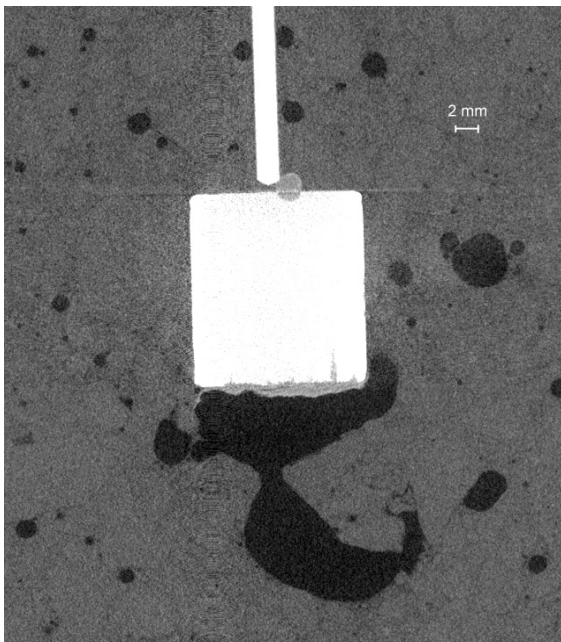


Abb. 7 Senkrechter Schnitt

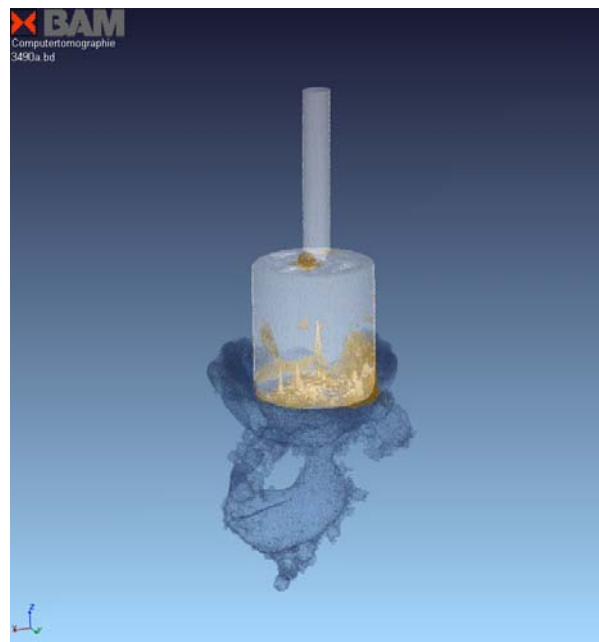
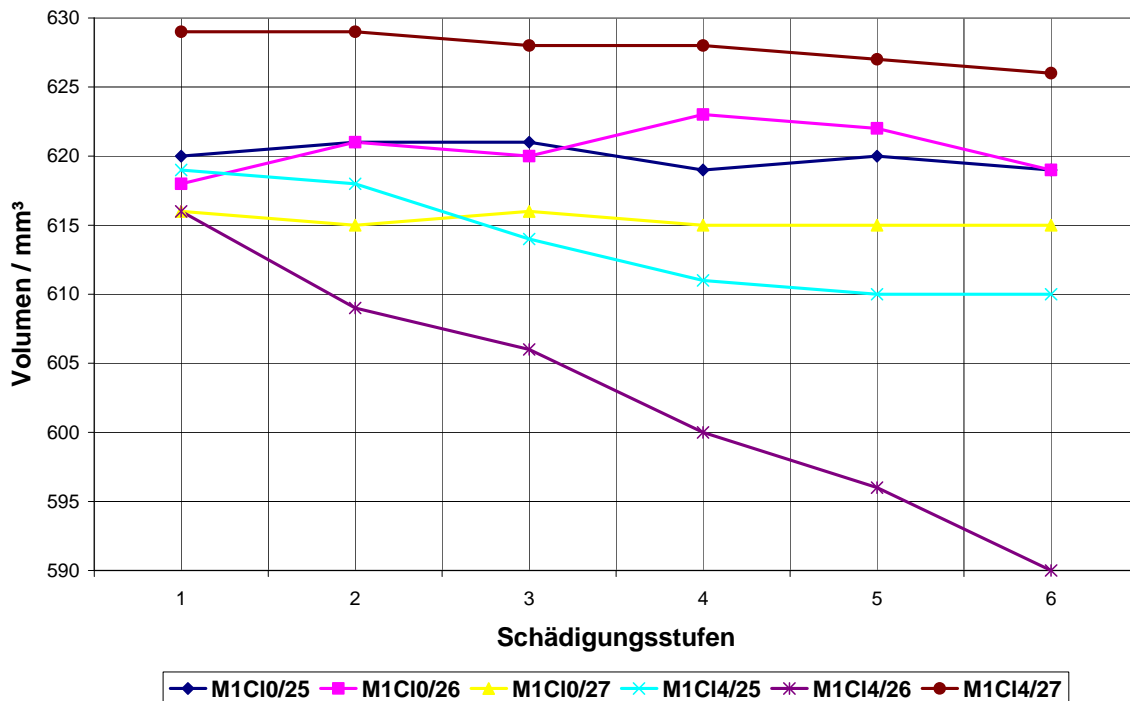


Abb. 8 3D-Visualisierung von Korrosionsprodukten und Porenraum

Abb. 9 Abnahme der Anodenvolumina nach mehreren Schädigungsstufen an unterschiedlichen Betonen



Am Ende der jeweiligen Untersuchungsreihen wurden die Stahlzylinder ausgebaut und gravimetrisch vermessen. Im Vergleich mit den Masseverlusten die aus den elektrochemischen Messwerten errechnet wurden zeigt sich, dass der mit Hilfe der Computertomographie ermittelte Massenverlust näher an dem gravimetrischen Wert liegt. Generell liegen die CT-Werte am Anfang einer Messreihe unterhalb der elektrochemischen Werte, während sie bei fortschreitender Schädigung über diesen und damit näher am gravimetrischen Wert liegen. Grund hierfür könnte die zu Beginn der Untersuchung vermehrte Flächenkorrosion sein, deren dünne Schicht aus Korrosionsprodukten von wenigen  $\mu\text{m}$  unterhalb der Auflösungsgrenze der CT liegen. Mit fortschreitender Korrosion, vornehmlich in den Löchern, ist die CT deutlich besser in der Lage die Massenabträge zu identifizieren, während mit Hilfe der elektrochemischen Messungen der Anteil der Eigenkorrosion in den Löchern nicht mehr erfasst werden kann.

## Fazit

Die Computertomographie bietet für die Untersuchung von Korrosionsphänomenen große Vorteile:

- Nicht zugängliche Bereiche lassen sich kontinuierlich und zerstörungsfrei untersuchen, das bestehende Korrosionssystem muss nicht zerstört werden.
- Inhomogenitäten an der Phasengrenze Stahl/Beton können erkannt und berücksichtigt werden.
- Der gesamte Probekörper wird vollständig erfasst, dadurch fließt auch der Anteil der Lochkorrosion in die Auswertung mit ein.
- Durch Differenzbildung kann der Materialabtrag berechnet und auch örtlich differenziert dargestellt werden.

## **Referenzen**

- [1] Matthias Beck, Zur Entwicklung der Eigenkorrosion von Stahl in Beton; Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2010