

Christoph Gehlen  
Ulf Nürnberger  
Bernd Neubert

# Stahlrost in Beton





Wer hat es nicht selber schon mit eigenen Augen gesehen? Unsere Bauwerke kommen in die Jahre. Das macht sich in den meisten Fällen auch äußerlich bemerkbar. Die in Beton eingebettete Stahlbewehrung fängt an zu rosten, der Überdeckungs- beton reißt auf und platzt ab. In unserer unmittelbaren Umgebung fällt uns das zum Beispiel an Hochbauten, Parkbauten und Brückenbauwerken auf (Abb. 1).

---

Auf welche Ursachen aber kann dieses Phänomen zurückgeführt werden? Vor dreißig, vierzig Jahren, also in einer Zeit, in der viele unserer heute noch genutzten Bauwerke hergestellt wurden, nahm man vor dem Hintergrund des damaligen Kenntnisstandes an, dass ein Stahl, der in Beton eingebettet wird, optimal vor Korrosion geschützt ist, also praktisch nicht rosten kann. Ganz anders als bei reinen Stahlbauten, wo man, da der Stahl hier direkt der Atmosphäre ausgesetzt ist, sich mit der Korrosionsproblematik schon seit längerer Zeit stellen musste. Nicht zuletzt deshalb hat die Stahlbetonbauweise in dieser Zeit so viele Freunde gewonnen.

Nun, Beton kann den Stahl in der Tat auch in doppelter Hinsicht schützen. Zum einen ist das aufgrund der Hydratationsreaktion von Zement alkalische Porenwasser in der Lage, den eingebetteten Bewehrungsstahl zu passivieren, das heißt chemisch zu schützen. Zum anderen stellt die Betondeckung eine Barriere für alle Stoffe dar, die aus der Umgebung an die Stahloberfläche herantreten kön-

nen, um Korrosionsprozesse direkt oder indirekt zu fördern; so etwa Chloridsalze, Sauerstoff und Wasser beziehungsweise das Kohlendioxid hinsichtlich Carbonatisierung.

Warum Betonstähle dennoch rosten können, wird nachfolgend beschrieben.

### **Warum korrodiert Stahl, obwohl er in Beton eingebettet ist?**

Um die Zusammenhänge besser verstehen zu können, ist es zweckmäßig, die einzelnen Vorgänge, die während eines Korrosionsprozesses ablaufen, getrennt voneinander zu betrachten.

---

Christoph Gehlen / Ulf Nürnberger ■  
Bernd Neubert ■  
Stahlrost in Beton ■

zeichnen. Diese Verbindungen sind in der Regel voluminöser als der nicht durch Korrosion belastete Stahl. Insofern baut die korrodierende Bewehrung allmählich einen Sprengdruck auf den umgebenden Beton auf. Wird die ohnehin geringe Zugfestigkeit des Betons überschritten, reißt die Betondeckung auf, im späteren Verlauf platzt sie ab.

Doch nun wieder zurück zu der Ausgangsfrage. Warum rostet der Stahl, wie kommt es zur Bildung von Anoden und Kathoden?

Anodenbildung an der Betonstahlbewehrung ist immer dann möglich, wenn von der Betonaußenseite her Kohlendioxid in den Beton eindringt und alkalische Bestandteile der Betondeckung in Carbonate umwandelt. Bei diesem auch Carbonatisierung genannten Vorgang geht die schützende Wirkung des Betons durch pH-Absenkung verloren. Alternativ kann auch eine Depassivierung der Stahloberfläche durch hinzutretende Chloride stattfinden, wenn Chloridsalze gelöst in Wasser durch die Betondeckung zum Stahl vordringen und bei ausreichender Konzentration freier Chloride die Passivschichten auf der Stahloberfläche zerstören. In Parkbauten oder an Brückenbauwerken dominiert die Erscheinung der chloridinduzierten Korrosion, nutzungsbedingt liegen hier besonders günstige Voraussetzungen für Korrosion vor (Wasser, Sauerstoff, Chlorid).

Insbesondere Parkdecks, aufsteigende Betonflächen und zusammengesetzte Konstruktionen mit gelegentlichen Durchfeuchtungen zählen zu den besonders gefährdeten Bauteilen. Abtropfendes, in den Wintermonaten häufig tausalzhaltiges Wasser kann in ein unbeschichtetes

Deck eindringen. Infolge einer wechselnden Benetzung des Decks mit chloridionhaltigem Wasser konzentriert sich der Salzgehalt im Beton ständig auf. In trockenen Phasen kann Sauerstoff in den Beton eindringen. Wasser ist in mehrfacher Hinsicht erforderlich, damit eine Bewehrungsstahlkorrosion stattfinden kann. Es transportiert die Chloride durch die Betondeckung zur Stahloberfläche, die Sauerstoffreduktion an der Kathode erfordert neben Sauerstoff auch Wasser und die Folgereaktion der Rostbildung setzt eine ausreichende elektrolytische Leitfähigkeit des Betons voraus, also ausreichende Gehalte freien Wassers in den Kapillarporen des Zementsteins.

Nun weist jeder Beton einen anderen Widerstand gegenüber den beschriebenen Einwirkungen auf. Der eine ist dichter, das heißt, alle Transportvorgänge nehmen längere Zeiträume in Anspruch, weil größere Transportwiderstände überwunden werden müssen, der andere weniger dicht. Das eine Bauteil verfügt über eine größere Betondeckung, die Transportwege zur Bewehrung werden dadurch verlängert, das andere Bauteil hat nur eine geringe Betonüberdeckung. Auch können die Einwirkungen stark variieren. Trifft eine besonders aggressive Einwirkung (häufige Feucht-Trockenwechsel, hohe Salzfracht) auf ein Bauteil mit geringer Betondeckung, die überdies nur eine relativ geringe Dichtigkeit aufweist, sind Korrosionsschäden vorprogrammiert und bereits nach kurzer Zeit zu erwarten. Trifft dieser Angriff ein Bauteil darüber hinaus noch örtlich konzentriert, verschärft sich die Situation zusätzlich, wie nachfolgend unter dem Schlagwort Makrokorrosionselementbildung berichtet wird.



Abb. 1: Korrodierender Stützenfuß mit Betonabplatzung.

Wenn Stahl im Beton rostet, fließen im Bewehrungsstahl messbare elektrische Ströme, ähnlich wie sie von einer Batterie oder von einem Akkumulator bereitgestellt werden könnten. Die Ladungsträger, in diesem Fall die Elektronen, fließen von der Anode zur Kathode (Abb. 2).

An der Anode beginnt das Eisen mit der Auflösung. Das metallische Eisen Fe wird also aus dem Metallgitter herausgelöst. Das zweifach positiv geladene  $Fe^{2+}$ -Ion wird von dem umgebenden Beton aufgenommen. Genauer gesprochen befindet sich das  $Fe^{2+}$ -Ion dann in der Porenlösung des Zementsteins. Die zurückgebliebenen zwei Elektronen ( $2e^-$ ) wandern von der Anode zur Kathode. Dieser elektrische Strom kann bei entsprechender Anordnung gemessen werden. An der Kathode werden diese Elektronen benötigt, um Wasser ( $H_2O$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) zu reduzieren. Bei diesem Vorgang werden  $OH^-$ -Ionen gebildet, die wiederum über das Porensystem des Zementsteins zur Anode transportiert werden. Die dort befindlichen  $Fe^{2+}$ -Ionen bilden mit den  $OH^-$ -Ionen, wieder unter Einbindung von Sauerstoff ( $O_2$ ), Verbindungen, die wir im Volksmund als Rost be-

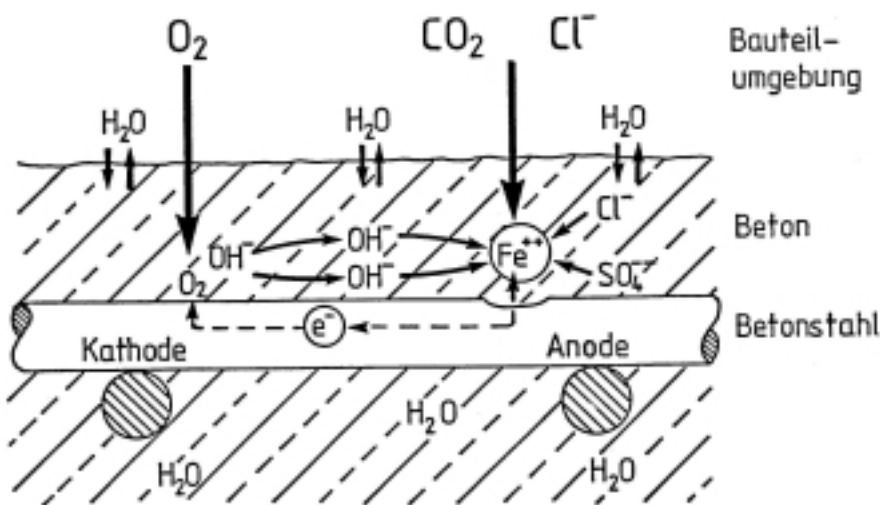


Abb. 2: Korrosionselement.

## Makrokorrosionselement

Korrosion infolge Makroelementbildung mit lokaler starker Querschnittsschwächung der Bewehrungsstähle (Abb. 3) tritt bei örtlichen Durchfeuchtungen des Betons mit chloridhaltigem Wasser auf, beispielsweise bei undichten Fugen oder bei Rissen. Abbildung 4 verdeutlicht die dabei auftretenden Verhältnisse am Beispiel einer tausalzbehandelten Treppenkonstruktion. Es bilden sich im Bereich örtlicher Durchfeuchtungen des Betons mit chloridhaltigem Wasser als Anode wirkende Stahloberflächen aus, denen relativ größere Kathoden im trockeneren, chloridfreien und somit noch passivierenden Beton gegenüberstehen. Die gleichen Verhältnisse liegen in Parkhäusern bei fehlerhafter Ableitung von Oberflächenwasser und bei den genannten mehrschichtigen Deckaufbauten vor (Kombination aus Ortbeton und Fertigteil) vor, wenn chloridionenhaltige Wässer von oberen Etagen durch undichte Fugen sickern und an Unterzügen ablaufen. Die Folge ist Bewehrungsstahlkorrosion im Bereich der Unterkanten von Bauteilen, an denen sich die Chloridsalze nach Verdunstung von Wasser aufkonzentrieren.

Bei der Makroelementbildung finden die anodischen und kathodischen Teilvorgänge der Korrosion an örtlich getrennten Stellen der Bewehrung statt. Voraussetzung für die Wirksamkeit des Elements ist jedoch, dass die Anoden und Kathoden elektrisch (über den Stahl) und elektrolytisch (über den ausreichend feuchten Beton) leitend miteinander verbunden sind. Korrosionselemente in dem hier zu betrachtenden Zusammenhang sind Aktiv/Passiv-Elemente. Aufgrund von örtlicher Chloridbelastung der Betondeckung verhält sich die Bewehrung an diesen Stellen aktiver als benachbarte Bereiche und bildet Anoden; weniger aktive und/oder passive Bereiche der Bewehrung können die Funktion einer „Sauerstoffeffangfläche“ ausüben und bilden dann die Kathode des Elements.

Die Korrosionsgeschwindigkeit nimmt im Allgemeinen bei Elementbildung mit steigender Potentialdifferenz zwischen den anodischen und kathodischen Bereichen, mit steigendem Kathoden/Anoden-Verhältnis und fallender Summe aus den Polarisationswiderständen und dem elektrolytischen Widerstand zu.

Hohe Potentialdifferenzen werden durch Bedingungen gefördert, welche an

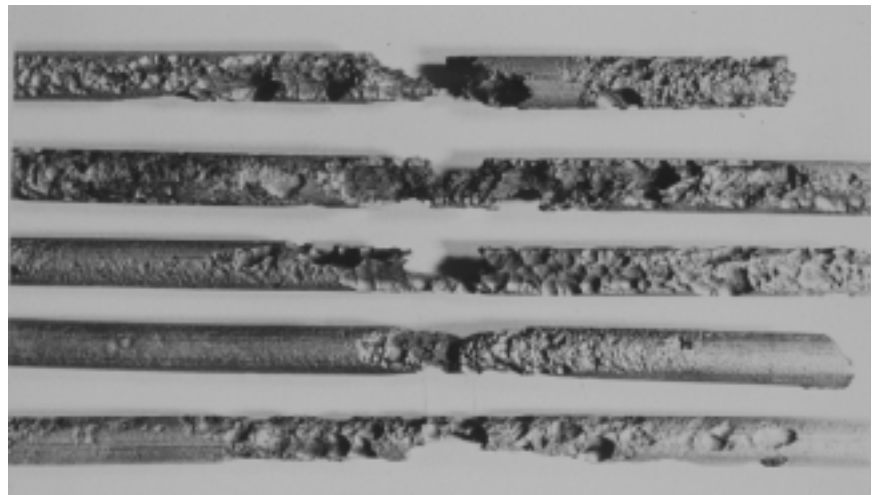


Abb. 3: Chloridinduzierte Bewehrungsstahlkorrosion durch Makrokorrosionselemente.

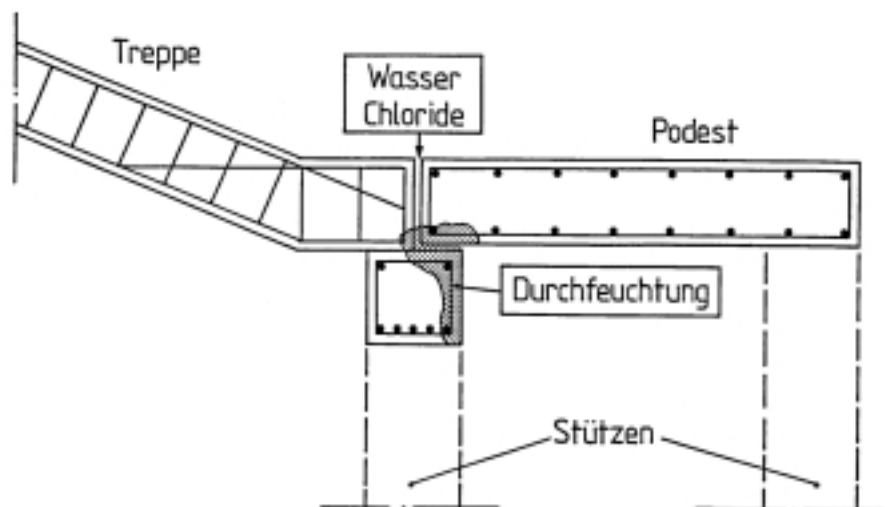


Abb. 4: Chloridkorrosion in einer Treppenkonstruktion infolge mangelhafter Abdichtung.

örtlich unterschiedlichen Stellen sowohl die anodischen als auch die kathodischen Teilvorgänge ermöglichen. Dies wird in Abbildung 5 am Beispiel von Stromdichte-Potentialkurven verdeutlicht. Die Potentialunterschiede entstehen durch aktives Verhalten des Stahls in chloridhaltigem Beton (Kurve A 1) und passives Verhalten in chloridfreiem Beton (Kurve A 2). Die Unterschiede  $U_K - U_A$  zwischen passiven und aktiven Bereichen nehmen bei steigendem Belüftungsunterschied  $K_1$  und  $K_2$  zwischen Anode und Kathode noch zu. Der Sauerstofftransport von der Betonaußenseite zur Oberfläche der Bewehrung ist von der Betongüte, der Betondeckung und dem Wassergehalt abhängig. Hohe Potentialunterschiede kommen somit durch Überlagerung von Aktiv/Passiv-Elementen mit Belüftungselementen zustande. Bei Betonkonstruktionen können zwischen Stahl in alkalischem relativ trockenem Be-

ton und Stahl in einem mit chloridhaltigem Wasser durchfeuchteten Beton Potentialunterschiede von bis zu 0,6 Volt (V) auftreten. Dies ergibt sich aus der Abhängigkeit des Korrosionspotentials vom Chlorid- und Feuchtegehalt des Betons: Bei Zunahme dieser Größen wird das Potential negativer.

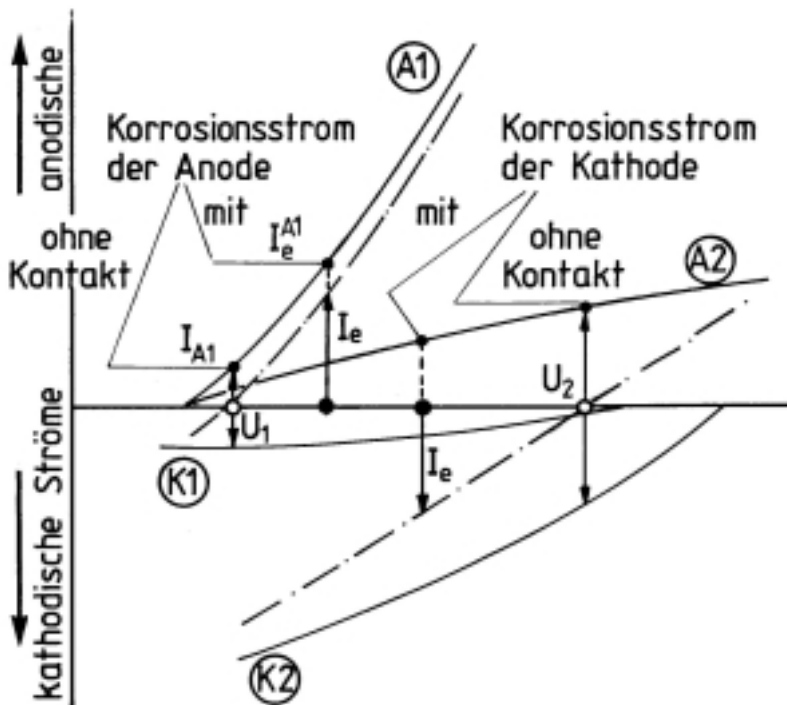


## Wie verhindert man Korrosion?

Das Fernhalten von Wasser vom bewehrten Beton ist eine der wirksamsten Korrosionsschutzmaßnahmen. Die damit wichtigste Maßnahme, die man zum Schutz von Stahlbetonbauten, zum Beispiel Parkbauten, ergreifen kann, ist demnach die konstruktionsgerechte Abführung des durch die Fahrzeuge eingeschleppten Wassers mit den darin gelösten Schadstoffen. Darüber hinaus sind hohe Anforderungen an die Baustoffe Beton und Stahl und deren Verarbeitung zu stellen.

Die nutzungsgerechte Entwässerung von Parkdecks erreicht man beispielsweise dadurch, dass man die befahrenden Oberflächen mit Gefälle ausführt. Aufgrund des Gefälles kann das Wasser gezielt geführt und abgeleitet werden.

Unter korrosionsfördernden Verhältnissen steigt die Korrosionsrate mit zunehmendem Flächenverhältnis von Kathode zu Anode  $F_K - F_A$  an. Hohe Korrosionsgeschwindigkeiten an der Anode können daher auch nur bei stark bewehrten Betonkonstruktionen erwartet werden. Dabei müssen die Kathoden im Sinne der Elementbildung jedoch auch wirksam sein, was bei großen Entfernungen der als Kathode wirksamen Bewehrung von den anodischen Bereichen nicht immer vorausgesetzt werden kann.



$$I_e = \frac{U_2 - U_1}{R_A + R_K + W}$$

wegen  $r = R \cdot F$   
 $R_K \gg R_A, W$   
 $i_e = I_e / F$

$$i_e(A1) \approx \frac{U_2 - U_1}{r_K} \cdot \frac{F_K}{F_A}$$

Anode: Stahl in alkal., Cl-haltigem (A1), feuchtem Beton (K1)

Kathode: Stahl in alkal. (A2), trockenerem Beton (K2)

Abb. 5: Stromdichte-Potentialkurven für Elementbildung in chloridhaltigem Beton.

Wichtig ist, dass das Wasser mit dem Gefälle nicht auf Stützen, Wände und Fugen geleitet wird, also dorthin, wo es am Stützen- und/oder Wandfuß oder an einer gegebenenfalls undichten Fugenkonstruktion Schaden anrichten kann (Abb. 1).

Nicht zuletzt die in Parkhäusern häufig zu beobachtenden Korrosionsschäden haben gezeigt, dass über konstruktive Maßnahmen hinausgehend zusätzliche, besondere Schutzmaßnahmen, die eine Chlorideindringung in den Beton ausschließen, empfehlenswert sind. So werden beispielsweise bei Parkbauten für die Verkehrsflächen und bodennahen vertikalen Oberflächen (Stützen, Wände) abdichtende, das heißt filmbildende Beschichtungen empfohlen. Bei der Auswahl der Beschichtungen ist es wichtig, den richtigen Kompromiss zwischen Elastizität (Rissüberbrückungsfähigkeit) einerseits und (Verschleiß-)festigkeit andererseits zu finden. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Beschichtungen dauerhaft ihre Funktionstüchtigkeit bewahren.

Als Alternative zur Betonbeschichtung bietet sich als vorbeugender Korrosionsschutz in der oberen, tausalzgefährdeten Bewehrungslage der Einbau korrosionsbeständiger Betonstähle an. In Betracht kommen hier der ferritisch-austenitische Betonstahl 1.4462 und der austenitische Betonstahl 1.4571. Diese Stähle sind auch im geschweißten Zustand und auch bei höchstmöglichem Chloridgehalt des Betons korrosionssicher. Da der Preis für besonders korrosionsbeständige Baustähle zur Zeit um rund das zehnfache im Vergleich zum normalen Betonstahl höher liegt und eine Beschichtung im Hinblick auf das optische Erscheinungsbild gegenüber einer unbeschichteten Oberfläche Vorteile bietet, ist die Verwendung von korrosionsbeständigem Stahl im Stahlbetonbau auf wenige Einzelfälle bisher beschränkt geblieben.

## Wie kann man bereits korrodierte Bauteile wieder instand setzen?

Auf den befahrenen Flächen und in den bodennahen Zonen von Wänden und Stützen kann die Korrosionsbelastung durch das von Fahrzeugen eingeschleppte Regenwasser oder durch tausalzhaltigen Schneematsch vergleichsweise sehr hoch sein. Besonders die obere Bewehrungslage ist davon betroffen. Abbildung 6 zeigt den Bohrkern aus einer befahre-

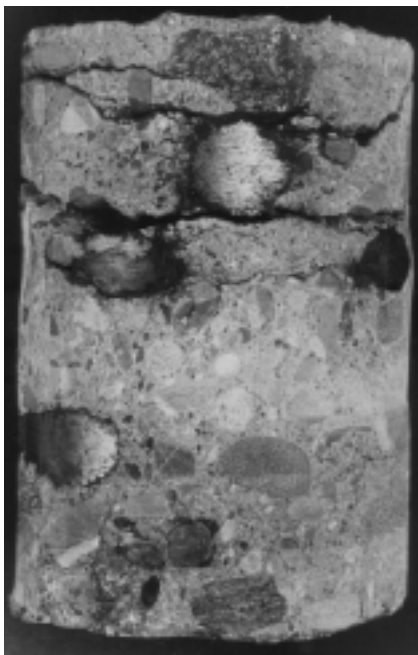


Abb. 6: Bohrkern durch die Ortbetondecke eines Parkhauses; Rissbildungen (Abplatzungen) parallel zur befahrenen Oberseite infolge Bewehrungsstahlkorrosion.



Abb. 7: Potentialfeldmessung, Radelektroden.

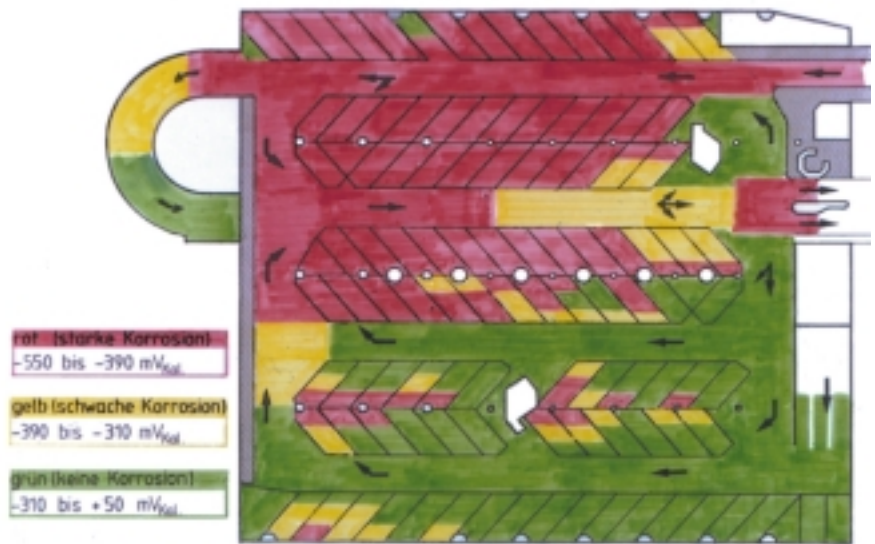


Abb. 8: Potentialfeldmessung auf dem obersten Parkdeck einer Tiefgarage [1].

nen Betondecke mit erheblicher Betonstahlkorrosion der oberen Bewehrung.

Um eine Instandsetzung eines von Korrosion betroffenen Bauteiles planen und anschließend durchführen zu können, muss man sich im Vorfeld einen genauen Eindruck über das instandzusetzende Objekt machen. Was ist die Ursache der Schäden, wie ist der Umfang, welche Konstruktionsdetails sind betroffen, wie ist die Zugänglichkeit?

Die folgenden Darstellungen vermitteln einen Eindruck von der Belastung eines Parkdecks durch Wasser und Chlorid. Um ein Parkdeck flächendeckend und zerstörungsfrei hinsichtlich des Korrosionszustandes seiner Bewehrung zu erfassen, bedient man sich der Potentialfeldmessung, [1]. Hieraus wird der Instandsetzungsumfang in etwa deutlich. Bei dieser elektrochemischen Prüfmethode werden Bezugselektroden (Stab- und/oder Radelektroden), die mit dem Bewehrungsstahl über eine Bohrung im Beton elektrisch leitend verbunden sind, auf eine angefeuchtete Betonoberfläche aufgesetzt. Dabei wird das so genannte Korrosionspotential als elektrische Spannung zwischen dem Betonstahl und der Bezugselektrode gemessen. Abbildung 7 zeigt eine solche Messung mit mehreren Radelektroden, die über die Parkdeckoberfläche gefahren werden und ortsabhängig die Korrosionspotentiale messen.

Sehr negative Potentiale deuten auf aktuelle Korrosionsaktivität hin.

Abbildung 8 zeigt die Potentialverteilung auf dem obersten Parkdeck einer Tiefgarage, wobei im Hinblick auf eine

geplante Sanierung nach drei Potentialbeziehungsweise Schädigungsbereichen, hier farblich dargestellt, unterschieden wurde:

- rot: sehr negatives Potential mit hohem Chloridgehalt und starker Korrosion,
- gelb: mittleres Potential mit mittlerer Chloridbelastung und geringer Korrosion,
- grün: positiveres Potential ohne korrosionsauslösende Chloride und ohne Korrosion.

Da Parkhausnutzer die Gewohnheit haben, die nächstgelegenen Abstellplätze zu wählen, ist die Chloridbelastung und Schädigung in der Regel im Einfahrbereich stark ausgeprägt und nimmt in Fahrtrichtung ab. In den tieferen Etagen überwiegen ungeschädigte Flächen.

Um auch abschätzen zu können, wie tief eine Chloridbelastung vorliegt, wird in den rot markierten Bereichen, zu Referenzzwecken auch in einigen grünen, vermutet unbelasteten Bereichen tiefenabhängig der Chloridgehalt des Betons untersucht. Dazu wird aus der Konstruktion Betonmehl entnommen und chemisch auf Chloridgehalt hin analysiert.

## **Chloridentzug nach der Methode der elektrochemischen Chloridextraktion (ECE)**

Bei der elektrochemischen Chloridextraktion wird nicht der chloridbelastete Beton entfernt, sondern dem Beton wird das vorhandene Chlorid aktiv entzogen.

Dazu wird zwischen der Bewehrung (Kathode) und einem auf der Betonoberfläche aufgebrachten Anodenmaterial über eine Gleichstromquelle ein künstliches elektrisches Feld erzeugt. Durch das positiv geladene Anodenmaterial wandern im Beton vorhandene negativ geladene Ionen  $\text{Cl}^-$  und  $\text{OH}^-$  zur Anode. Positiv geladene Ionen, z. B.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  und  $\text{Ca}^{2+}$  wandern hingegen in Richtung Kathode (Bewehrung).

Auf die Betonoberfläche wird ein Anodenmaterial (meist in Gitterform) aufgebracht. Da sich die Umgebung des Anodenstahls aufgrund der ablaufenden elektrochemischen Reaktionen ansäuert, muss bei einer gewünschten Wiederverwendung des Anodenmaterials ein Edelmetall (im vorliegenden Fall Titan(mischoxid)) verwendet werden, unedler Stahl würde korrodieren.

Um den Ionentransport im Beton zu ermöglichen, muss zwischen dem Anodengitter und der Betonoberfläche ein ionenleitender Kontakt hergestellt werden. Dies geschieht durch das Einbetten des Anodengitters in einen Elektrolyten, welcher zum Beispiel aus wassergetränkter Zellulose bestehen kann.

Die angelegten Spannungen betragen zwischen rund 30 V und 40 V, bei Stromstärken von rund einem bis zwei Ampere pro Quadratmeter ( $\text{A}/\text{m}^2$ ) Bewehrungsfläche. Die Stromstärke ist unbedingt nach oben zu begrenzen, da ansonsten Schäden im Beton, insbesondere Verbundstörungen zwischen Beton und Bewehrung auftreten können (Wasserstoffentwicklung).

Die Effektivität des Chloridentzugs beziehungsweise die durchzuführende Regelung der Stromversorgung ist von zahlreichen Randbedingungen abhängig, unter anderem sind dies:

- Bewehrungsgehalt
- Betondeckung (Maß und Variabilität)
- Dichtheit beziehungsweise Porosität des Betons
- Inhomogenitäten des Betons, beispielsweise Risse, Kiesnester
- Betonfeuchte

- Gehalt an Ionen (zum Beispiel Salzgehalt)
- Bauwerks- und Umgebungstemperatur.

Dies macht deutlich, dass die Steuerung der Stromversorgung eine sehr komplexe Aufgabe darstellt, die einen hohen Kenntnisstand der technischen Zusammenhänge und Erfahrung voraussetzt. Die vor der Chloridextraktion flächig gemessenen Potentialfelder, die Ergebnisse der flächigen Betondeckungsmessung und die Chloridprofile sind neben den Bewehrungsplänen die wichtigsten Informationsquellen für die zielgenaue Einstellung der Steuerung des Stromflusses während des Chloridentzugs.

Der Erfolg einer elektrochemischen Chloridextraktion wird letztendlich jedoch daran beurteilt, ob nach Abschluss der Maßnahme die vorab projektspezifisch festgelegten Zielwerte für den Chloridgehalt örtlich nicht überschritten werden und das Betongefüge durch die Maßnahme nicht geschädigt wurde (Druckfestigkeitsprüfung an Bohrkernen, Vergleich vorher/nachher). Mit einer Potentialfeldmessung kann ebenfalls der Erfolg der Maßnahme nachgewiesen werden. Das Potentialfeld sollte nach entsprechend langer Ruhephase deutlich edlere, das heißt in den positiven Spannungsbereich verschobene Werte aufweisen. Es kann jedoch mehrere Wochen bis Monate dauern, bis sich das durch die Extraktionsmaßnahme beträchtlich veränderte, negativ ausgenektete Potentialfeldbild der Betonstahlbewehrung wieder normalisiert hat.

Um das erneute Eindringen von Chlorid in den Beton zu vermeiden, sollte nach erfolgreichem Abschluss der Extraktionsmaßnahme eine Beschichtung aufgebracht werden.

## **Verhinderung der Bewehrungskorrosion durch kathodischen Korrosionsschutz (KKS)**

Ein konventioneller kathodischer Schutz wird dann erreicht, wenn die zu erwartende Korrosionsrate von kathodisch geschützten Bauteilen unter einem bestimmten bautechnisch erforderlichen Grenzwert gehalten werden kann. Das heißt, es handelt sich hier nicht um ein klassisches Instandsetzungsverfahren, hier wird lediglich der gegenwärtige Zustand des Bauteils konserviert.

Im Vergleich zu der elektrochemischen Chloridextraktion besitzt der kathodische

In Fällen, wo bereits ein fortgeschrittener Korrosionsabtrag an der Bewehrung stattgefunden hat, aber auch in Bereichen, wo der Beton nennenswert mit Chlorid belastet ist, muss der belastete Beton in der Regel vollständig entfernt werden, um die Korrosion zu stoppen. Die Entfernung des belasteten Betons kann entweder mechanisch mit konventionellem Stemmergerät oder mit dem Höchstdruckwasserstrahlverfahren (HDW) erfolgen. Beide Verfahren sind insbesondere aufgrund der einhergehenden Lärmentwicklung, dem Abwasseranfall und den Verschmutzungen mit erheblichen Belästigungen für die Nutzer verbunden. Beim mechanischen Stemmen ist außerdem immer die Gefahr gegeben, dass im Zuge der Stemmarbeiten Bewehrung zum Teil erheblich geschädigt wird und sich Gefügelockerungen entlang der Bewehrung im verbleibenden Beton einstellen.

Alternative Methoden der Chloridentfernung beziehungsweise der Unschädlichmachung von Chloriden ohne beziehungsweise mit nur geringer Lärmbelastung und nur geringem Schmutzanfall stellen die Methode der elektrochemischen Chloridextraktion (Chloridentfernung) und des kathodischen Korrosionsschutzes (Unschädlichmachung) dar: Bei beiden Verfahren wird das Bauteil konstruktiv nicht geschwächt.

Eine Voraussetzung zur wirtschaftlichen Durchführung beider, auf elektrochemischen Prinzipien beruhenden Methoden ist, dass die Bewehrung jedoch noch nicht in dem Umfang geschädigt ist, dass die Tragfähigkeit des Bauteils einschränkt oder Bewehrungsergänzung erforderlich ist. Im Rahmen von Voruntersuchungen ist es deshalb zwingend erforderlich, den Zustand der Bewehrung durch lokale Öffnung des Betons zu überprüfen (Bestimmung des Querschnittsverlustes). Das Auffinden der hierzu maßgebenden Öffnungsstellen sollte anhand der Ergebnisse einer vollflächigen Potentialfeldmessung erfolgen.

Korrosionsschutz die längere technische Tradition. Dies wird unter anderem auch dadurch dokumentiert, dass dieses Verfahren in DIN EN 12696 [2] technisch geregelt ist und damit Sicherheit zwischen Ausschreibenden und Anbietern vermittelt. In Österreich und der Schweiz erschienen zu diesem Thema Richtlinien, [3] und [4]. Weltweit sind bereits mehrere Millionen Kubikmeter Stahlbeton mit diesem Verfahren gegen Korrosion geschützt, wobei gerade in den letzten Jahren einige technisch und wirtschaftlich interessante Entwicklungen bei den Anodentypen hinzugekommen sind.

Das Prinzip des kathodischen Korrosionsschutzes beruht darauf, die anodische Eisenauflösung baupraktisch zu unterdrücken. Grundsätzlich werden zwei Systeme unterschieden, die aber auf identischem Wirkprinzip basieren:

### **KKS mit Hilfe von Opferanoden**

Hierzu wird auf die Bauteiloberseite des zu schützenden Bauteils, das heißt in der Nähe der zu schützenden Bewehrung, eine so genannte Opferanode in Form zum Beispiel einer flächig aufgespritzten oder hydrogelverklebten Zinkfolie aufgebracht, die in regelmäßigen Abständen über Kontakte elektrisch leitend mit der Bewehrung verbunden werden muss. Es gibt auch andere Ausführungsvarianten, beispielsweise lokal installierte Opferanoden. Die Bewehrung wird dadurch zeitlich begrenzt kathodisch geschützt, ein weiterer Korrosionsabtrag an der Bewehrung technisch auf vernachlässigbare Werte abgesenkt.

### **KKS mit Hilfe von Fremdstrom**

Im Gegensatz zur unedlen Opferanode wird beim Einsatz von Fremdstrom eine edle Titananode verwendet. Diese wird auf der Betonoberfläche fixiert und durch Normalbeton, bei vertikalen Oberflächen auch mit Hilfe von Spritzbeton, auf der entsprechend vorbereiteten Betonoberfläche dauerhaft in den Querschnitt eingebunden. Durch das Einspeisen eines äußeren Stroms (Fremdstrom) wird die Bewehrung zur Kathode.

Vom Prinzip her vergleichbar mit der ECE wird beim KKS die zu schützende Bewehrung mit Fremdstrom beschickt, entweder gespeist von sich allmählich auflösenden Opferanoden oder durch angelegten Fremdstrom. Durch den so erzeugten Elektronenfluss wird die Bewehrung

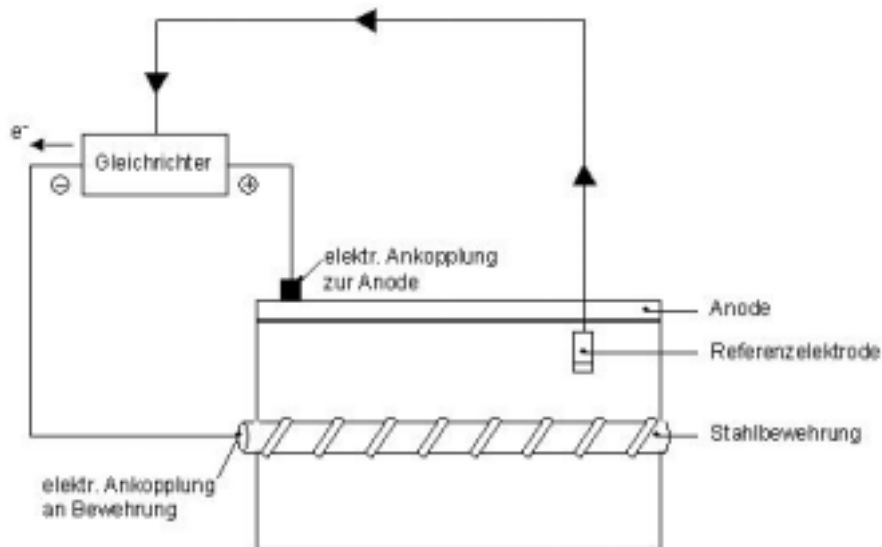


Abb. 9: Kathodischer Korrosionsschutz an Betonbauteilen, Variante Fremdstrombeaufschlagung.

ung kathodisch polarisiert, so dass die anodische Teilreaktion (Eisenauflösung) nahezu unterdrückt wird (Abb. 9).

Im Vergleich zur ECE sind beim KKS allerdings sehr viel geringere Spannungen und Ströme notwendig (rund zehn bis 100 Milliampere pro Quadratmeter). Die Gefahr schädigender, chemischer Reaktionen an der Bewehrung ist infolge der geringen Schutzströme deshalb gering, jedoch nicht gänzlich auszuschließen.

Das Verfahren bietet den Vorteil, dass nur in den Bereichen, in denen bereits eine fortgeschrittene Zerstörung der Bewehrung oder des Betons, zum Beispiel Hohllagenbildung, stattgefunden hat, ein Betonabtrag erfolgen muss. Da beim kathodischen Korrosionsschutz eine dauerhafte und kontinuierliche Strombeaufschlagung stattfindet, müssen chloridbelastete Betonbereiche nicht entfernt werden.

Ob KKS zum Schutz von korrosionsgefährdetem bewehrten Beton überhaupt einsetzbar ist, hängt zunächst davon ab, ob die zu schützende Spannstahl- und/oder Betonstahlbewehrung elektrisch ausreichend leitend miteinander in Kontakt steht. Der elektrische Kontakt zwischen den Bewehrungsstählen muss in jedem Falle mit Hilfe von Widerstandsmessungen überprüft werden. Ist die Bewehrung nicht leitend miteinander verbunden, wird der Schutzstrom unter Umständen zum korrosiv wirkenden Streustrom.

Neben anderen, zum Teil aufwendigen Voruntersuchungen muss im Vorfeld zum Beispiel die Betondeckung und der

Bewehrungsgehalt ortsabhängig, das heißt flächig festgestellt werden. Insbesondere müssen Bereiche mit dichter Bewehrung lokalisiert werden, um zu überprüfen, ob der Anoden-/Kathodenabstand für das potentiell in Frage kommende Anodensystem ausreichend ist, um die erforderliche Stromdichte zu gewährleisten. Eine gleichmäßig Betondeckung und eine gleichmäßige Bewehrungsdichte geben, wie auch schon bei der ECE, Gewähr dafür, dass die Stromverteilung homogen und gleichmäßig über die zu schützende Fläche verteilt wirken kann.

Ist KKS prinzipiell anwendbar, muss das auszuwählende Schutzsystem im Allgemeinen folgende Anforderungen erfüllen:

- Abgabe eines ausreichenden, über das zu schützende Betonstahlbewehrungsnetz möglichst gleichmäßig verteilten Schutzstromes, und zwar ohne dass andere Zerstörungsmechanismen eingeleitet oder beschleunigt werden.
- Möglichst wenig zusätzliches Gewicht, möglichst geringe Änderung der Abmessung und Ästhetik der Struktur.
- Lange Lebensdauer des Gesamtsystems.
- Einfache Kontroll- und Überwachungsmöglichkeiten der Funktion und Wirksamkeit.
- Einfacher Ersatz.



### **Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen**

---

**Nach dem Studium der Physik, Chemie und Mineralogie an der Universität Bonn und des Bauingenieur- und Vermessungswesens an der RWTH Aachen war Christoph Gehlen als Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Arbeitsgruppenleiter an der TH Aachen tätig. Im Juli 2000 promovierte er an der TH Aachen zum Thema „Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken“ und war Geschäftsführender Gesellschafter eines Ingenieurbüros in München. Vom Sommersemester 2003 bis 2005 war er Lehrbeauftragter an der TU München zum Thema „Bauschäden in der Praxis“. Seit April 2006 ist Christoph Gehlen Professor für „Werkstoffe im Bauwesen“ und Direktor des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen sowie Direktor der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart.**



### **Prof. Dr.-Ing. Ulf Nürnberger**

---

**studierte Metallkunde an der TU Clausthal-Zellerfeld. Nach der Promotion 1972 an der TU Braunschweig wurde er 1974 Mitarbeiter am Otto-Graf-Institut Stuttgart. Ulf Nürnberger habilitierte sich 1987 an der Universität Stuttgart für das Fach „Korrosion im Bauwesen“. 1988 wurde er Privatdozent und 1995 zum außerplanmäßigen Professor an der Universität Stuttgart ernannt. Seit 2001 ist Prof. Nürnberger Stellvertretender Direktor des Otto-Graf-Instituts (seit 2003 Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart) und seit 2003 leitet er den Fachbereich „Erhaltung von Bauten und Anlagen“ der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart.**

Die Auswahl einer speziellen Anlage wird in der Regel unter Berücksichtigung lokaler Randbedingungen vor dem Hintergrund dieses Anforderungskatalogs getroffen.

Neben den technischen Anforderungen an das Material, die Einfluss auf die Auswahl eines Systems haben, sind aber auch andere Randbedingungen unter Umständen von entscheidender Bedeutung. Kann zum Beispiel zusätzliches Eigengewicht über die bestehende Konstruktion ohne zusätzliche Verstärkung nicht sicher abgetragen werden, scheidet die Fremdstromvariante praktisch aus, wie beispielsweise im KKS Aufbau der Abbildung 9 zu sehen. Auf der anderen Seite liegen gerade hier die größten baupraktischen Erfahrungen vor. Hinzu kommt, dass die Lebensdauer einer Fremdstromanlage der zu erwartenden Lebensdauer von Opferanoden in der Regel weit überlegen ist. Insofern muss hier sorgfältig abgewogen werden.

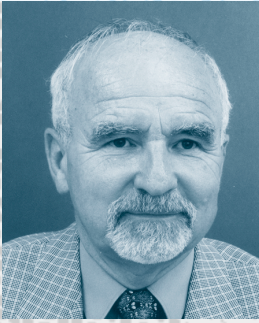
In der Zwischenzeit gibt es verschiedenste Produktvarianten, die prinzipiell zum Einsatz kommen können. Zum Teil sind die Erfahrungen, insbesondere langjährige, mit den entsprechenden Systemen jedoch noch sehr gering.

### **Literatur**

---

- [1] Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag, Wiesbaden 1995
- [2] DIN EN 12696:2000: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton, Juni 2000
- [3] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: Richtlinie Kathodischer Korrosionsschutz von Stahlbetonbauteilen. Ausgabe Dezember 2003
- [4] Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz: Richtlinie für Projektierung, Ausführung und Überwachung des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahlbetonbauwerken. C7d Ausgabe 1991





**Prof. Dr.-Ing.  
Bernd Neubert**

---

war nach dem Studium der Fachrichtung Bauingenieurwesen Wissenschaftlicher Assistent an der TU Braunschweig. 1977 wurde er Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, von 1977 bis 1986 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und von 1986 bis 1996 Referatsleiter für „Betontechnologie“ am Otto-Graf-Institut. Seit 1996 war Bernd Neubert Professor für Baustoffkunde, Baustoffprüfung und Straßenbaustoffe an der Hochschule für Technik Stuttgart. Im September 2006 verstarb er nach kurzer, schwerer Krankheit.