

1 Einleitung

Die Qualität und Stabilität eines Baustoffes hängt in hohem Maße von seinem Wassergehalt ab. Bei dem im konstruktiven Ingenieurbau weltweit am meisten verwendeten Baustoff Beton [1] muss der Wassergehalt sowohl während der Herstellung als auch während der Lebensdauer des Bauwerkes innerhalb bestimmter Grenzen liegen. Ist dieses nicht gewährleistet, so kann Feuchte im ungünstigsten Fall zum Versagen der Bauwerke beitragen.

Bereits bei der Herstellung des Betons ist die Kenntnis der zuzugebenden Wassermenge wesentlich. Bei zu niedrigem Wassergehalt droht ein unvollständiges Abbinden. Zu hohe Dosierung resultiert hingegen in einer stark ausgeprägten Porosität, welche sich negativ auf die Festigkeit auswirkt und zudem das Eindringen von schädigenden Substanzen begünstigt. Nach dem Anmischen, dem Einbringen in die Schalung und der Verdichtung erhärtet der Beton. Durch genaue messtechnische Bestimmung des Feuchtegehaltes kann der Entschalungszeitpunkt optimiert [2] und somit die Produktivität gesteigert werden. Während der folgenden Lebensdauer eines Bauwerkes ist die Kenntnis der Feuchte aus vielerlei Gründen notwendig. Die Feuchte agiert als Transportmedium für schädigende Substanzen und kann somit korrosive Prozesse initiieren oder begünstigen. Bei hohen Wassergehalten kann es zu Abplatzungen des Betons unter Frosteinwirkung, zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit sowie zu biologischen Angriffen durch Pilze und Bakterien kommen. Weiterhin lässt sich aus dem Feuchtegehalt auch auf eine mögliche Carbonatisierung des Betons und somit auf eine potenzielle Korrosionsgefährdung der Stahlbewehrung schließen. Die Kenntnis der Feuchte im Beton ist daher generell in jeder Phase des Lebenszyklus eines Bauwerkes von Interesse.

1.1 Bauwerksbestand

Zunehmend wichtiger werden Informationen über die Feuchte und somit über den Zustand des Bauwerkes bei älteren Bauwerken, da diese grundsätzlich anfälliger für Schädigungen sind.

Abbildung 1.1 zeigt die Altersstruktur des bundesdeutschen Wohnungsbestandes von ca. 37 Millionen Wohnungen im Jahre 1999 mit einem Gesamtwert von 4,5 Milliarden Euro [3]. Fast ein Drittel (30,6 %) der Wohnungen stammen aus dem Zeitraum von vor 1949 und fast zwei Drittel (63,7 %) der Wohnungen sind älter als 36 Jahre, wodurch sich stetig steigende Kosten für Instandhaltung

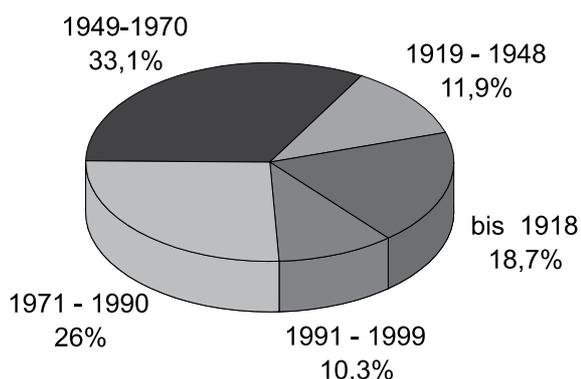


Abbildung 1.1: Altersstruktur des bundesdeutschen Wohnungsbestandes im Jahr 1999 [3].

und Modernisierung ergeben. Für dieses so genannte Bauen im Bestand wurde im Jahre 1999 bereits eine Summe von 76,3 Milliarden Euro aufgewendet, was einem prozentualen Anteil an den Gesamtbauleistungen im Wohnungsbaubereich von 46,3 % entspricht. Dieser Anteil wächst seitdem stetig, und zur Jahrtausendwende wurden erwartungsgemäß erstmals mehr finanzielle Mittel zur Instandhaltung und Modernisierung aufgewendet, als in neue Wohnungen investiert [4–6].

Eine ähnliche Situation besteht bei den Fernverkehrswegen, welche insgesamt ein Anlagevolumen von 330 Milliarden Euro darstellen [7]. Bund und Bundesländer unterhalten ein Straßennetz von über 231.000 km Länge, wovon ca. 25 % auf die besonders vom Schwerverkehr belasteten Bundesstraßen und Autobahnen entfallen. Diese im Begriff Bundesfernstraßen zusammengefassten Verkehrswege bewältigen fast die Hälfte der Jahresfahrleistung aller Kraftfahrzeuge sowie drei Viertel der des Straßengüterverkehrs [8]. Innerhalb dieses Verkehrsnetzes sind die Brücken, von denen 69 % aus Spannbeton hergestellt sind, besonders starken Beanspruchungen ausgesetzt und bedürfen intensiverer Instandsetzungsmaßnahmen als die normale Fahrbahn. Der Grund hierfür liegt in der in Abbildung 1.2 dargestellten Altersstruktur von Spannbetonbrücken. Aufgrund der fast vollständigen Zerstörung der großen Brücken während des zweiten Weltkrieges entstammen die meisten Brücken der Wiederaufbauphase der 60er, 70er und 80er Jahre und stehen somit zu Beginn des neuen Jahrtausends zur ersten größeren Grundinstandsetzung oder sogar Verstärkung an. Letztere ergibt sich aus den damals zu gering angesetzten Lastannahmen, welche nicht mehr dem überproportional gestiegenen Verkehrsaufkommen in Kombination mit zunehmend schwereren Fahrzeugen gerecht werden. Aus diesem Grund werden bereits aktuell 35 % der gesamten Instandsetzungsmaßnahmen für Bundesfernstraßen in Höhe von 5,5 Milliarden Euro für Brücken aufgewendet, obwohl diese lediglich einen Anteil von 0,8 % des gesamten Bundesfernstraßennetzes ausmachen. Trotz dieser im Verhältnis hohen Aufwendungen verschlechtert sich die Qualität der Brücken zunehmend, wie eine Auswertung der Zustandsnoten der letzten Jahre zeigt [9].

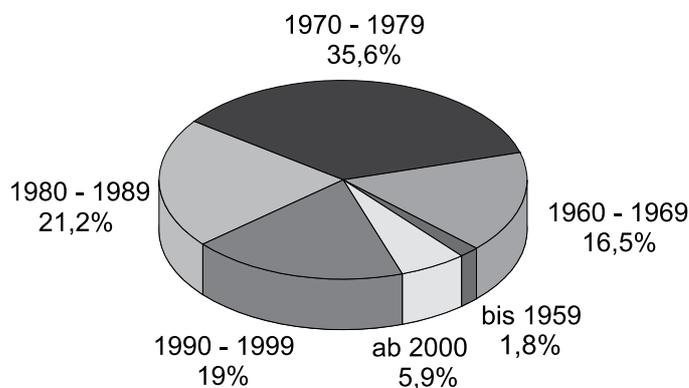


Abbildung 1.2: Altersstruktur bundesdeutscher Autobahnbrücken in Spannbetonbauweise im Jahr 2003 [7].

Zusammenfassend lässt sich sowohl für Wohnbauten als auch für Spannbetonbauwerke ein hoher Instandhaltungsbedarf für die nächsten Jahre feststellen. Um die hierfür zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel möglichst effizient einzusetzen, wurden in den letzten Jahren vermehrt Strategien und Konzepte erforscht, um die Lebensdauer von Bauwerken zu erhöhen und somit Reinvestitionen zu vermeiden.

1.2 Bauwerksüberwachung

Voraussetzung für eine Lebensdauererlängerung von Bauwerken ist eine realistische Bewertung der Restlebensdauer [10], für welche die Kenntnis der Feuchte von großer Bedeutung ist. Herkömmliche Verfahren ermitteln die Restlebensdauer auf Basis des Zustandes eines Bauwerkes zu

nur einem Zeitpunkt und sind somit oftmals nicht zuverlässig. Vorteilhafter erscheint eine kontinuierliche Bauwerksüberwachung. Diese liefert fortlaufend Daten über den Bauwerkszustand und ist somit in der Lage, den günstigsten Sanierungszeitpunkt anzuzeigen. Die Erkennung des günstigsten Zeitpunktes ist insbesondere bei der Stahl- und Spannbetonsanierung von Interesse, da die Kosten hier nicht eine lineare, sondern eine stufenförmige Funktion der Zeit darstellen (siehe Abbildung 1.3). Die Stufenform ergibt sich hierbei aus dem jeweiligen Schädigungsgrad der Bewehrung, wobei sich die unterschiedlichen Abschnitte der Instandsetzung wie folgt darstellen [11]:

- Bereits die *Stufe 0: Qualitätssicherung beim Neubau* wird den Sanierungskonzepten zugeordnet. Besitzt die Bewehrung eine ausreichende Betonüberdeckung von mehr als 3 cm, so ist bei den klimatischen Bedingungen in Deutschland im Normalfall von einem ausreichenden Korrosionsschutz über mehrere Jahrzehnte auszugehen.
- Ist keine ausreichende Betonüberdeckung vorhanden, so kann es innerhalb der ersten 5 - 15 Jahre zu einer oberflächlichen Korrosion der Bewehrung kommen. Wird diese detektiert, folgt die Betoninstandsetzung der *Stufe 1: Oberflächenbehandlung*. Hierbei wird die Oberfläche des Bauwerkes versiegelt oder geeignet hydrophobisiert. Grundsätzlich findet noch keine Sanierung der Bewehrung statt.
- Erfolgt keine rechtzeitige Instandsetzung, so kann es zu starker Korrosion der Bewehrung und infolge dessen zu Abplatzungen der Überdeckung kommen. Dieses passiert typischer Weise nach 20 - 30 Jahren und erfordert eine aufwändige Sanierung der *Stufe 2: Untergrundinstandsetzung der Bewehrung und Oberflächenbehandlung*.
- Ist die Bewehrung schon derart stark angegriffen, dass die Tragfähigkeit eines Bauwerkes bereits beeinträchtigt ist, so stellt die *Stufe 3: Abruch und Erneuerung* zumeist die kostengünstigste Lösung dar.

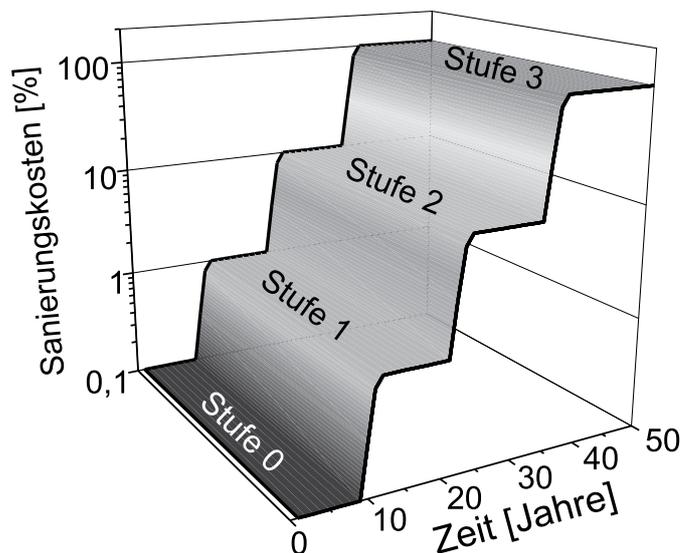


Abbildung 1.3: Stufenartiger Anstieg der Sanierungskosten (in % der Neubaukosten) bei stahlbewehrten Bauwerken [11].

Die Kosten der einzelnen Stufen verhalten sich zueinander im Verhältnis von 1:10:100:1000 [11], so dass der Übergang zu einer höheren Stufe durch rechtzeitig eingeleitete Maßnahmen verhindert werden sollte. Dieses Beispiel verdeutlicht die Wichtigkeit einer kontinuierlichen Bauwerksüberwachung. Aus diesem Grund beschäftigt sich der im Jahre 1998 an der Technischen Universität Braunschweig eingerichtete Sonderforschungsbereich (SFB) 477 mit der *Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mittels innovativer Bauwerksüberwachung* [5]. Innerhalb dieses

SFB werden Methoden und Verfahren erforscht, die adaptiv durch Messwerte gestützt werden, um ein Höchstmaß an zuverlässigen Aussagen über die Restlebensdauer und Versagenswahrscheinlichkeit zu erhalten. Um diese zum Teil hoch komplexen Zusammenhänge zu erfassen, ist der SFB interdisziplinär ausgerichtet und in die vier folgenden, eng miteinander kooperierenden Projektbereiche untergliedert:

- A Methoden und Strategien zur Bauwerksüberwachung
- B Adaptive Modelle
- C Messtechnik - Entwicklung und Adaption
- D Erprobung an Bauwerken.

Weiterhin ist in dem Zeitraum von Ende 2005 bis Anfang 2006 ein Projektbereich *T* eingerichtet worden, welcher sich mit dem Transfer von Forschungsergebnissen in die industrielle Anwendung befasst. Die einzelnen Projektbereiche sind wiederum in mehrere Teilprojekte untergliedert. So wurden z.B. in den ersten beiden Förderperioden des SFB 477 im Rahmen der Teilprojekte *C1* (*Faseroptische und mikrowellentechnische Sensoren für ein in-situ-Messdatenerfassungssystem*) und *C1b* (*Mikrowellensensoren und -messtechnik für die Bauwerksüberwachung*) grundlegende Sensorprinzipien erforscht. Zusammenfassungen der Ergebnisse finden sich in [12] und [13]. Aufbauend auf diesen Arbeiten wurden in der dritten Förderperiode im Teilprojekt *C1b* die Sensoren optimiert und mögliche Konzepte für kompakte Messsysteme erarbeitet. Die Notwendigkeit solcher Systeme ergab sich in besonderem Maß aus einer Vermarktungsinitiative für ein Sensor-Patent aus der zweiten Förderperiode [14]. Die kontaktierten Industrieunternehmen erkannten zwar die Eignung des Sensors an, verdeutlichten jedoch auch, dass der Sensor ohne integriertes Messsystem nur schwer zu vermarkten sei. Aus diesem Grund werden seit Januar 2006 in Kooperation mit dem in Mainz ansässigen Industrieunternehmen *Franz Ludwig GmbH* innerhalb des SFB 477 im Rahmen des Transferprojektes *T3 - Mikrowellenmesssystem für die zerstörungsfreie in-situ-Feuchtemessung in Bauwerken* solche Systeme untersucht. Die Aufgabe des universitären Kooperationspartners liegt in der Erforschung und Konzeption der Systeme, während sich das Unternehmen schwerpunktmäßig mit der Realisierbarkeit unter industriellen Gesichtspunkten sowie der Vermarktung befasst.

1.3 Ziel und Gliederung der Arbeit

Zur Zeit sind keine kostengünstigen, zerstörungsfrei arbeitenden Messsysteme zur kontinuierlichen und querempfindlichkeitsfreien in-situ-Langzeitüberwachung des Feuchtegehaltes von Bauwerken kommerziell erhältlich. Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zur Erforschung solcher Systeme zu leisten. Hierbei werden die Systemkonzeption und -realisierung, die messtechnische Verifikation sowie die Integration in ein Sensornetzwerk (siehe Abbildung 1.4) angestrebt. Innerhalb eines solchen Netzwerkes wird eine Vielzahl von Sensorsystemen über eine Monitoring-Zentrale, welche vorzugsweise mittels eines herkömmlichen Computers zu realisieren ist, aktiviert und ausgelesen. Die Datenübertragung soll variabel über Funk oder kabelgebunden erfolgen, wobei bei der kabellosen Variante besonders auf Energieeffizienz zu achten ist.

Ein einzelnes System besteht aus einem Sensor und einer Auswerteeinheit, welche über eine Datenschnittstelle verfügt (siehe Abbildung 1.5). Der Sensor steht in direktem Kontakt mit der Messumgebung Beton und muss den hier vorliegenden Beanspruchungen genügen. Für den Sensor wird

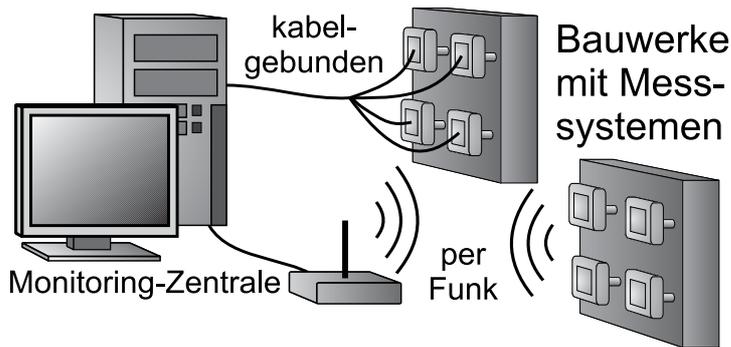


Abbildung 1.4: Schematische Darstellung eines Sensornetzwerkes. Eine Monitoring-Zentrale steuert die Messsysteme kabelgebunden oder per Funk.

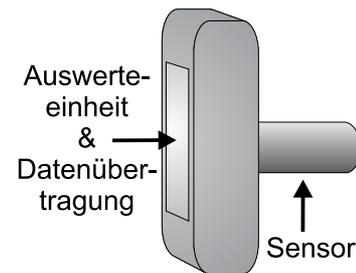


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung eines aus einer Auswerteeinheit und einem Sensor bestehenden Messsystems.

eine geeignete Auswerteeinheit benötigt, wobei im Hinblick auf die industrielle Anwendung besonders kostengünstige und kompakte Lösungen anzustreben sind. Die beiden Komponenten Sensor und Auswerteeinheit sind in Bezug auf Bandbreite, Empfindlichkeit und Herstellbarkeit aufeinander abzustimmen.

In dieser Arbeit wird ausgehend von theoretischen Betrachtungen die Realisierung und Erprobung solcher Messsysteme beschrieben. Die Gliederung ist wie folgt:

Im zweiten Kapitel werden zunächst die Grundlagen der Feuchtemesstechnik dargestellt und die besondere Eignung elektrischer Feuchtemessverfahren im Frequenzbereich zwischen 2,0 GHz und 3,5 GHz herausgearbeitet. In einem weiteren Abschnitt wird die Messumgebung Beton im Hinblick auf die Realisierung von in-situ-Feuchtemesssystemen vorgestellt. Das Grundlagenkapitel schließt mit einer Übersicht der Anforderungen an die zu realisierenden Messsysteme.

Im dritten Kapitel werden unterschiedliche Sensoren vorgestellt und bezüglich ihrer Eignung für kompakte Messsysteme untersucht. Wesentliche Gesichtspunkte der Untersuchung sind konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung der Feuchteempfindlichkeit und zur Reduzierung der Temperaturquerempfindlichkeit sowie die kostengünstige und reproduzierbare Herstellbarkeit. Am Ende dieses Kapitels steht die Charakterisierung feuchtesensitiver Materialien.

Das vierte Kapitel befasst sich mit der Konzeption und Realisierung geeigneter Auswerteeinheiten. Ferner wird die Integration dieser Einheiten mit Sensoren zu Messsystemen beschrieben. Die Untersuchung der jeweiligen Messgenauigkeit ist ein wesentlicher Bestandteil und schließt die Unterkapitel zu den unterschiedlichen Messsystemen ab. Das Kapitel endet mit einem Vergleich und einer Bewertung. Hiervon ausgehend wird ein System favorisiert.

Im fünften Kapitel werden mit dem favorisierten System erzielte Messergebnisse vorgestellt. Das Kapitel beginnt mit der experimentellen Bestimmung der Querempfindlichkeit durch die im Beton vorliegende Ionenleitfähigkeit. Es folgt eine zweistufige Feuchtekalibrierung. Durch deren Anwendung kann der Feuchtegehalt vom Zeitpunkt der Betonage an bestimmt werden. Dieses wird für Zementstein und unterschiedliche Betone messtechnisch verifiziert. Am Ende des Kapitels folgt eine Bewertung der erzielten Messergebnisse.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.