

# 1 Einleitung

## 1.1 Erhaltung des Baubestands

Bauwerke sind nach den Landesbauordnungen so zu errichten und zu unterhalten, dass Leben und Gesundheit der Benutzer nicht gefährdet sind [1]. Für das sichere Errichten von Bauwerken ist der vom Bauherr beauftragte Bauunternehmer verantwortlich, für den sicheren Unterhalt der Bauherr und/oder Betreiber selbst. Obwohl nach dem Baurecht dazu verpflichtet, sind diese fachlich meist nicht dazu in der Lage, die Überwachung der Bauwerke in dem erforderlichen Maße zu gewährleisten.

Heutzutage ist der wichtigste Baustoff Beton im Verbund mit Stahl zur Bewehrung. Betonbauten sind bei fachgerechter Ausführung während der gesamten Nutzungsdauer sicher und bedürfen somit keiner Kontrolle. Es hat sich jedoch gezeigt, dass Herstellungsmängel trotz Normen und Kontrollen nie vollständig vermieden werden können. Für eine sichere Unterhaltung der Bauwerke sind somit regelmäßige Kontrollen vonnöten, um auftretende Schäden rechtzeitig erkennen und gegebenenfalls sanieren zu können. Entscheidend für die Kostenentwicklung einer Sanierung ist, wie weit der Schaden fortgeschritten ist<sup>1</sup>. Bei Stahlbetonbauten bilden die Kosten eine Treppenfunktion [5], die in Bild 1.1 dargestellt ist. Die günstigste Stufe für eine „Sanierung“ ist „Stufe Null: Qualitätssicherung beim Neubau“. Durch hohe Qualität beim Bau werden Schäden und somit Sanierungsmaßnahmen minimiert und Kosten gespart. Treten dennoch Mängel auf oder soll die Lebenserwartung des Gebäudes verlängert werden, so kann durch vergleichsweise einfache Methoden zur Oberflächenbehandlung das weitere Eindringen von schädlichen Stoffen verlangsamt oder unterbunden werden. Die Kosten verbleiben solange auf dem Niveau von „Stufe 1: Oberflächenbehandlung“, bis die Korrosion der Bewehrung beginnt. Setzt diese ein, steigen die Kosten sprunghaft an auf „Stufe 2: Betonsanierung“, da die nun erforderlichen Sanierungsmaßnahmen weitaus aufwendiger und somit kostenintensiver sind. Der „Übergangsbereich 1/2“ beginnt, wenn die Carbonatisierung im Beton die ersten Bewehrungsstäbe erreicht und endet mit den ersten Betonabplatzungen durch Korrosion der Bewehrung. Auch auf Stufe 2 bleiben die Sanierungskosten zunächst stabil. Hierzu muss in den geschädigten Bereichen die Bewehrung freigelegt, bearbeitet und

---

<sup>1</sup>Eine ausführlicher Erläuterung von Schadensbildern und -verläufen bei Stahlbeton erfolgt in Kapitel 2.3.

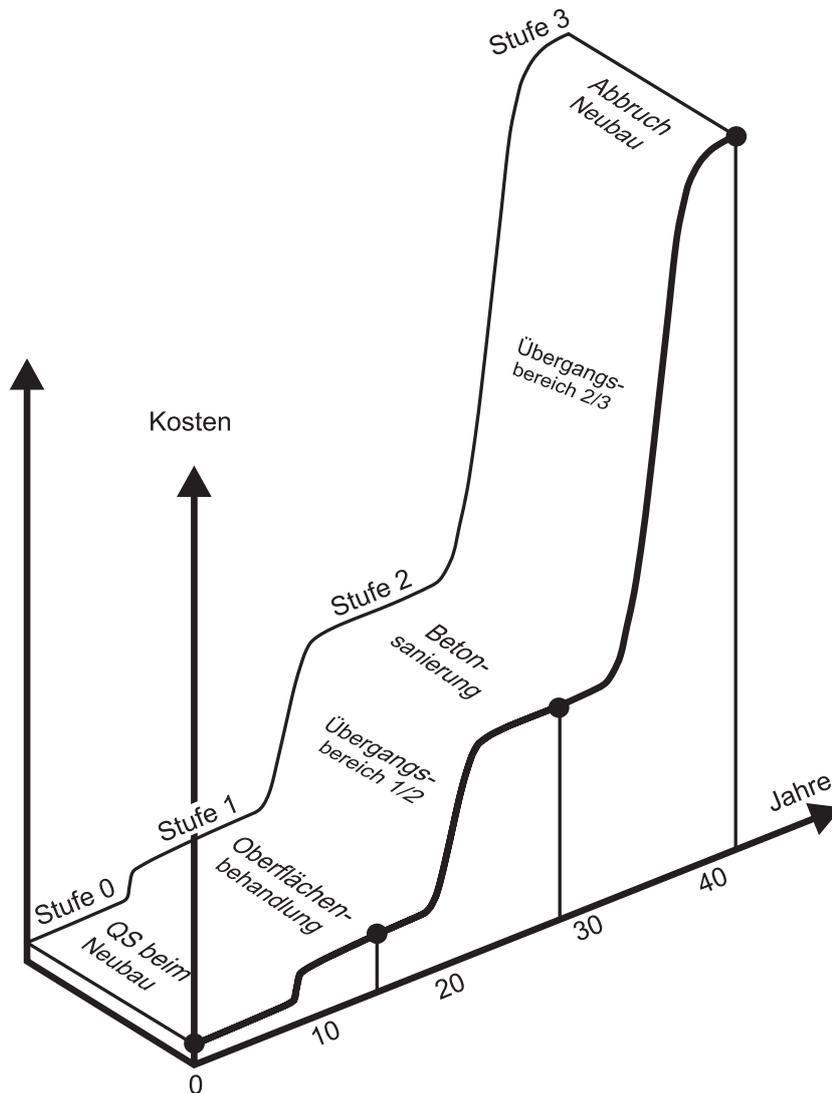


Bild 1.1: Die Kostenstufen der Betonsanierung [5]

dann mit Spritzbeton wieder versiegelt werden. Geschieht dies nicht, nehmen die Korrosionsschäden solch ein Ausmaß an, dass der Anteil an freizulegender Bewehrung durch Spritzbeton nicht mehr abgedeckt werden kann. Dies markiert den Beginn von „Übergangsbereich 2/3“, in dem die Kosten schnell soweit ansteigen, dass ein Abbruch und Neubau wirtschaftlich sinnvoller als eine Sanierung ist. Günstige Zeitpunkte für eine Sanierung liegen entweder kurz vor dem Übergangsbereich 1/2 oder vor 2/3. Eine frühzeitige Sanierung bindet ohne zwingende Notwendigkeit Geldmittel, während ein Überschreiten des jeweiligen Übergangsbereichs zum sprunghaften Anstieg der Sanierungskosten führt. Zur Festlegung des günstigsten Sanierungszeitpunkts ist die Bestimmung des Bauwerkszustands notwendig. Neben eventuellen

Sanierungsarbeiten, die größere Schäden an der Bausubstanz beheben, fallen häufiger Renovierungsarbeiten zur Beseitigung kleinerer Mängel an. Sanierungen und Renovierungen dienen somit der Instandhaltung des Bauwerks. Des Weiteren ist eine Modernisierung des Bauwerks möglich, die nicht Schäden beseitigt, sondern vielmehr zur Verbesserung der Ausstattung des Bauwerks wie z. B. der Anbringung von Wärmedämmung dient. Die sich in der gesamten Nutzungsdauer für ein Bauwerk akkumulierenden Kosten setzen sich somit zusammen aus:

- Kosten für den Neubau
- Kosten für den Unterhalt:
  - Betriebskosten (Energie etc.)
  - Regelmäßige Untersuchung zur Bestimmung des Bauwerkszustands
  - Renovierungs- und/oder Modernisierungsarbeiten
  - evtl. Sanierung
- Kosten für den Abbruch

Laut [6] haben die Instandhaltungskosten eines Gebäudes mit einer Nutzungsdauer von 60 Jahren rund 22 % Anteil an den gesamten Lebenszykluskosten des Gebäudes<sup>2</sup>. Der derzeitige Baubestand der Bundesrepublik Deutschland besitzt einen Wert von rund 8,1 *Bill. €*, wovon ca. 4,5 *Bill. €* auf Wohngebäude und 3,6 *Bill. €* auf die restlichen Bauwerke entfallen [7]. Die Abschätzung der Instandhaltungskosten für Wohngebäude der Bundesrepublik Deutschland nach [6] ergibt geschätzte 16,5 *Mrd. €* pro Jahr. Tatsächlich sind im Jahr 1999 in der Bundesrepublik Deutschland für Modernisierung und Instandsetzung im Wohnungsbestand 76,3 *Mrd. €* erbracht worden [7]. Die Differenz zur obigen Abschätzung lässt sich nicht nur durch Modernisierungskosten erklären. Sehr viel wahrscheinlicher sind zu spät durchgeführte Sanierungen und Baumängel. Eine Analyse des Alters des Wohnbestands der Bundesrepublik ergibt (s. Tabelle 1.1), dass die Instandhaltungskosten eher noch steigen werden, weil immer weniger neue Gebäude zum Bestand hinzukommen. So lag im Jahr 1997 in Deutschland das Verhältnis von Neubauleistungen zu Bauleistungen im Bestand bei 53,7 % zu 46,3 %, während in [7] für das Jahr 2001 eine Umkehrung auf 43,8 % zu 56,2 % vorausgesagt wurde.

---

<sup>2</sup>Ein Gebäude ist ein Unterbegriff von Bauwerk. S. Landesbauordnung von Niedersachsen, §2, Absatz 2: „Gebäude sind selbständig benutzbare, überdeckte bauliche Anlagen, die von Menschen betreten werden können und geeignet oder bestimmt sind, dem Schutz von Menschen, Tieren oder Sachen zu dienen.“

Tabelle 1.1: Wohnungsbestand der Bundesrepublik Deutschland nach Baualter sortiert [7]

Baualter	Anteil in %
bis 1918:	18,7
1919 – 1948:	11,9
1949 – 1970:	33,1
1971 – 1990:	26,0
1991 – 1999:	10,3

Die Dimension der genannten Zahlen zeigt, wie wichtig es für die gesamte Volkswirtschaft ist, geeignete Methoden zu realisieren, die die Kosten für die Erhaltung des Baubestands reduzieren und gleichzeitig die Sicherheit und Nutzbarkeit der Bauwerke gewährleisten. Eine mögliche Methode hierfür sind fest installierte und automatisierte Messsysteme zur Bauwerksüberwachung.

Nicht nur für die Instandhaltung von normalen Bauwerken ist solch ein System von großem Interesse. Historische Bauwerke leiden unter Umwelteinflüssen mindestens genauso stark wie moderne Bauten. Da jedoch ihr kultureller Wert für die Gemeinschaft ungleich höher ist, verdient ihre Erhaltung besondere Aufmerksamkeit. Bei historischen Bauwerken soll die Baubsubstanz möglichst lange erhalten bleiben, bevor das Bauwerk restauriert wird. Die Restauration kann bis zu dem Zeitpunkt hinausgezögert werden, an dem die Schäden am historischen Bauwerk sprunghaft ansteigen. Automatisierte Überwachungssysteme könnten in Zukunft dazu dienen, diesen optimalen Zeitpunkt für die Restauration zu bestimmen.

## 1.2 Bauwerksüberwachung

Ein Möglichkeit der Bauwerksüberwachung stellen automatisierte Messsysteme dar, die *in-situ* wichtige Parameter des Bauwerks erfassen, so dass gehaltvolle Aussagen über den Zustand des Bauwerks getroffen werden können. Zur sinnvollen Entwicklung und Anwendung solch eines Systems sind eine Reihe von Randbedingungen zu erfüllen. Eine genaue Kenntnis über das Baumaterial und den Bauablauf auf der Baustelle liefert nicht nur Informationen über Belastungen, denen die Sensoren ausgesetzt sind, sondern auch darüber, welche Sensortypen in der Praxis anwendbar sind. Das Baumaterial bestimmt ebenfalls, welche Kenngrößen es zu überwachen gilt. Gemessene Kenngrößen sagen jedoch noch nichts über den Zustand des Bauwerks aus. Sie müssen durch Modelle in einen sinnvollen Kontext gestellt werden, wobei für verschiedene Bauwerke unterschiedliche Modelle notwendig sind. Bei der

Modellbildung muss beachtet, dass Abhängigkeiten zwischen den Kenngrößen existieren können. Die Modelle helfen ebenfalls bei der Bestimmung kritischer Orte am Bauwerk, die von Sensoren überwacht werden müssen. Um diese vielfältigen Aufgaben zu bewältigen, wurde 1998 der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Sonderforschungsbereich 477, „Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung“, eingerichtet worden. Der SFB 477 unterteilt sich in vier Projektbereiche, deren interdisziplinäre Arbeitsgruppen eng miteinander kooperieren:

**A** Methoden und Strategien zur Bauwerksüberwachung

**B** Adaptive Modelle

**C** Messtechnik - Entwicklung und Adaption

**D** Erprobung an Bauwerken.

**T** Transferbereich

Die in dieser Arbeit präsentierten Forschungsergebnisse sind im Rahmen des Teilprojekts C1a, „Faseroptische Sensoren für die Bauwerksüberwachung“, erarbeitet worden. Der Projektbereich **T** ist in der dritten Förderperiode des SFB 477 entstanden und beinhaltet Projekte, die erfolgreiche Entwicklungen aus den ersten beiden Förderperioden mit Partnern aus der Industrie für die Einführung in den Markt vorbereiten. Aus dem Teilprojekt C1a ist das Transferprojekt T2, „Integrierte Mikrosensoren für die Bauwerksüberwachung“, hervorgegangen, in dem zusammen mit dem Kooperationspartner *CiS Institut für Mikrosensorik GmbH* aus Erfurt Sensoren für die industrielle Anwendung entwickelt werden.

### 1.3 Gliederung dieser Arbeit

Der Begriff Bauwerk ist ein Sammelbegriff für eine Vielzahl von Menschen errichteter Konstruktionen, die verschiedenste Anforderungen an ein Überwachungssystem stellen. Daher ist es notwendig, die Bauwerke in verschiedene Bauwerkstypen zu gliedern, für die getrennt voneinander Messsysteme entwickelt werden. Beton ist der wichtigste Baustoff des 20. und 21. Jahrhunderts. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung und Erprobung von faseroptischen Sensoren zur Messung der Feuchtigkeit und des pH-Werts in Beton. Da Beton aus Mörtel hervorgegangen ist, der als Bindemittel für Ziegel- und Natursteine verwendet wird, sind die entwickelten faseroptischen Sensoren auch für den Einsatz in Bauwerken aus

Ziegel- und Natursteinen geeignet, was sie besonders interessant für historische Bauwerke macht.

Bevor jedoch auf die Sensoren eingegangen wird, wird zunächst in Kapitel 2 eine ausführlichen Analyse von Beton als Messumgebung für Sensoren vorgenommen. Neben der Identifikation der zu überwachenden Parameter dient das Kapitel der Beschreibung aller Belastungen, denen die Sensoren im Beton und während der Betonierung ausgesetzt sind, sowie die Erörterung aller Randbedingungen, die für eine erfolgreiche Messung der jeweiligen Parameter wichtig sind.

Kapitel 3 befasst sich mit allen Aspekten der Entwicklung der faseroptischen Sensoren. Neben den verwendeten Sensormaterialien zur molekularen Detektion der zu überwachenden Parameter wird die Historie der Entwicklung der Sensoren beleuchtet, um die gesammelten Erfahrungen mit faseroptischen Sensoren im Beton zu erläutern.

Die Vorstellung von Messergebnissen der entwickelten faseroptischen Sensoren erfolgt in Kapitel 4. Die gesammelten Messdaten stammen größtenteils aus Laborversuchen. Einige der entwickelten Sensoren wurden und werden jedoch bereits in realen Bauwerken getestet. Des Weiteren werden in Kapitel 4 knapp einige wirtschaftliche Aspekte der Bauwerksüberwachung besprochen.

Die Arbeit wird mit einer Zusammenfassung in Kapitel 5 abgeschlossen.

Im Anhang A werden in knapper Form Grundlagen zum Atom- und Molekülaufbau aufgeführt. Diese dienen als Hilfestellung für das Verständnis der in dieser Arbeit verwendeten organischen Materialien.

An der Entwicklung der Sensoren waren Wissenschaftler der Fachrichtungen Elektrotechnik, Chemie und Bauwesen beteiligt. Für eine erfolgreiche interdisziplinäre Arbeit ist ein Verständnis für die Grundlagen der betroffenen Bereiche dieser Fachrichtungen notwendig. Aus diesem Grund werden die Grundlagen in den Kapiteln 2 und 3 etwas ausführlicher dargestellt.

## 2 Bauwerke und Bauwerksüberwachung

### 2.1 Historischer Überblick

Neben natürlich vorkommenden Baustoffen wie Naturstein und Holz haben Menschen bereits in der Jungsteinzeit<sup>1</sup> mit künstlich hergestellten Lehmziegel gebaut, deren Verwendung besonders im Nahen Osten, Europa und China verbreitet war. Als Bindemittel für Lehmziegel wird bis heute Mörtel genutzt, der primär aus gebranntem Kalk besteht. Lehmziegel stellten eine praktische und günstige Alternative zum Naturstein dar, da sie sich leichter transportieren und durch die beim Brennen festgelegte Form besser zusammenfügen ließen. Während des Römischen Reiches hat sich die Technik des Bauens mit Lehmziegeln in ganz Europa verbreitet und war für viele Jahrhunderte die wichtigste Bauweise in Europa. Im Römischen Reich erlangte im ersten Jahrhundert n. Chr. ein weiterer Baustoff eine große Bedeutung: das *opus caementitium*<sup>2</sup>, auch bekannt als römischer Beton oder Kalkbeton. Dieser Baustoff setzt sich aus Mörtel und Bruchsteinen zusammen. Verwendet wurde er von den Römern unter anderem beim Bau von Aquädukten und dem Pantheon in Rom. Im Mittelalter in Vergessenheit geraten, wurde der Baustoff Beton, so wie er heutzutage verwendet wird, erst im 18. und 19. Jahrhundert wiederentdeckt, als nach einem wasserbeständigen Mörtel für Ziegelsteine gesucht wurde. Im Jahre 1755 erkannte der Engländer *John Smeaton*, dass durch das Mischen von gebranntem Kalk, Tonmineralien und Wasser ein selbst erhärtendes und wasserbeständiges Material entsteht. Das Gemisch aus gebranntem Kalk und Ton wird Zementmörtel genannt oder kurz Zement, was vom *opus caementitium* abgeleitet ist. Durch das Mischen dieser neuen Mörtelart mit Zuschlägen aus Bruchsteinen, Kies oder Sand entstand ein neuer, äußerst stabiler Baustoff, der Beton. Die Erfindung des Portlandzements von *Joseph Aspdin* im Jahre 1824 auf der englischen Halbinsel Portland leitete letztendlich den modernen Betonbau ein. Ein weiterer wichtiger Entwicklungssprung war die Kombination von Beton und Stahl zum sog. Stahlbeton durch den Franzosen *Joseph Monier* im Jahr 1849, dessen besondere Merkmale eine große Druck- (Beton) und Zugfestigkeit (Stahl) sind. In den letzten Jahrzehnten wurde das „einfache“ Drei-Stoff-Gemisch Beton (Zement, Zuschlag und Wasser) um die weiteren Komponenten der Betonzusatzstoffe und -mittel er-

---

<sup>1</sup>ca. 10.000 bis 8.000 v. Chr.

<sup>2</sup>lat. *opus* = Werk, Bauwerk; *caementitium* = Zuschlagstoff, Bruchstein