

<b>9</b>	<b>Numerische Simulation und Parameteridentifikation von diffusiven Transportprozessen .....</b>	<b>129</b>
9.1	Grundlagen des Programms für die Simulation und Parameteridentifikation von Ionen-Diffusionsprozessen (SPID) .....	129
9.2	Simulation mit SPID .....	132
9.3	Parameteridentifikation mit SPID .....	134
<b>10</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zum revitalisierenden Ionentransport in Bauwerkstoffen im Anwendungsfall der Kompressenentsalzung</b>	<b>139</b>
10.1	Dauernasse Komresse .....	140
10.1.1	Experimentelle Versuchsdurchführung .....	140
10.1.2	Ergebnisse .....	140
10.2	Abtrocknende Komresse .....	141
10.2.1	Experimentelle Versuchsdurchführung .....	141
10.2.2	Bestimmung der Konzentration der Porenlösung .....	142
10.2.3	Bestimmung des Schadsalzaustrages über die Standzeit der Komresse .....	143
10.3	Vergleichende Untersuchungen des dauernassen und abtrocknenden Kompressenauftrags .....	144
10.4	Einfluss des Kompressenmaterials .....	146
10.4.1	Experimentelle Untersuchungen zum dauernassen Kompressenauftrag .....	147
10.4.2	Experimentelle Untersuchungen zum abtrocknenden Kompressenauftrag .....	148
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>153</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>159</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemübersicht

In Deutschland entstehen erhebliche Schäden an Neubauten und vor allem an bereits sanierten oder modernisierten Gebäuden. Dieses spiegelt sich in den von der Bundesregierung vorgelegten Bauschadensberichten von 1988 [1] und 1996 [2] wieder. Deutlich zeigt sich im Bauschadensbericht von 1996, dass ein erheblicher Anteil der für die Sanierung von vermeidbaren Bauschäden aufzubringende Kosten im Jahre 1992 (7,6 Mrd. DM) auf die Behebung vorangegangener schadhafter Sanierungs- bzw. Modernisierungsarbeiten (3,3 Mrd. DM) zurückzuführen ist. „Bauschäden bei Sanierungs- und Instandsetzungsarbeiten stellen somit ein nicht unerhebliches volkswirtschaftliches Problem dar“ [2]. Ein großer Anteil dieser Schäden wird dabei im Allgemeinen durch die Anwesenheit von Feuchte und in Kombination mit Schadsalzen verursacht. Dies kann zum Teil auf eine mangelnde Kontrolle und Qualität bei der Ausführung zurückzuführen sein. Vielmehr erscheint es jedoch wichtig, dass für eine nachhaltige Sanierung und Instandhaltung der Bausubstanz ein fundiertes Grundverständnis für die Komplexität der Interaktion zwischen den Bauwerkstoffen mit ihren mannigfaltigen chemischen Zusammensetzungen untereinander und mit den Umgebungsbedingungen vorliegt.

Der Eintrag von Feuchte und Schadstoffen aus der Umwelt in ein Bauwerk birgt bei wechselnden klimatischen Randbedingungen ein hohes Gefährdungspotential in sich. Durch die Anwesenheit von Feuchte können Ionen aus den unterschiedlichen verbauten Bauwerkstoffen herausgelöst werden. Des weiteren können Schadsalzionen auch von außen mit der Feuchte (mangelhafte Abdichtung im Dach-, Boden- bzw. Sockelbereich) eingetragen werden. Durch die Aufnahme von Feuchtigkeit und Schadstoffen sowie des Wechsels zwischen einsetzender Trocknung und wiederkehrender Befeuchtung kommt es zur Gradientenbildung von Feuchte und Salzen im Bauteil bzw. Bauwerk. Die Gradienten initiieren dann Feuchte- und Schadsalztransportprozesse. Der Transport, vom lateinischen transportare (hin-) überbringen hergeleitet, bedeutet in diesem Fall das Überbringen von Stoffen (z.B. Feuchte, Salz) und Energie von einem Ort zu einem anderen gemäß der initiierenden Gradienten. Wichtige Merkmale zur Charakterisierung der Transportprozesse sind dabei die Richtung und die Geschwindigkeit. Durch den Einfluss nicht isotroper, inhomogener und chemisch nicht inerter Bauwerkstoffe auf diese Transportprozesse müssen gleichzeitig z.B. Anisotropien der Transportkennwerte, Einflüsse von Grenzflächen und Wechselwirkungen zwischen der Porenlösung und den Porenwänden berücksichtigt werden. Der gezielte Einsatz des

Transportes, initiiert durch Gradienten, kann aber auch zur Revitalisierung durch z.B. Kompressenentsalzungen genutzt werden. Bei der Kompressenentsalzung können durch das temporäre Aufbringen einer salzfreien „Putzschicht“ und der jeweils gewählten Anwendungsform `dauernasse` oder `abtrocknende` Kompressen gezielt Gradienten erzeugt werden, welche zu einer Schadsalzreduzierung im belasteten Bauteil führen. Dies erfolgt in der Regel jedoch noch nicht mit einem nachhaltig zufrieden stellenden Ergebnis [2], da grundlegende Transportmechanismen und zielführende Randbedingungen nicht hinreichend geklärt sind. Das Potential einer wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dieser Thematik wurde erkannt und spiegelt sich in zahlreichen Forschungsprogrammen und Richtlinien wieder (z.B. SFB 524: „Werkstoffe und Konstruktion zur Revitalisierung von Bauwerken“ (DFG), Schwerpunktprogramm SPP 1122: „Vorhersage des zeitlichen Verlaufes von physikalisch-chemischen Schädigungsprozessen von mineralischen Werkstoffen“ (DFG), WTA-Merkblatt 3-13-01/D: „Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen“).

## **1.2 Einordnung und Zielstellung der Arbeit**

Die Vielfalt der in der Praxis auftretenden Schadensfälle durch Feuchte- und Schadsalzeinwirkungen an Denkmälern und Neubauten ist bereits über Jahre in der Literatur dokumentiert z.B. [3,4,5,6]. Viele Untersuchungen zur Sanierung von Feuchte- und Salzschäden wurden als Fallstudien an einzelnen Objekten bzw. Bauwerken durchgeführt. Sie geben Anhaltspunkte und Interpretationsmöglichkeiten der dokumentierten Untersuchungsergebnisse. Verallgemeinernde Aussagen für andersartig gelagerte Schadensfälle lassen sich daraus bislang jedoch nur schwer ableiten.

Eine andere Herangehensweise über die theoretische Beschreibung der zur Schädigung führenden Transport- und Reaktionsprozesse in Bauwerkstoffen wurde sowohl über die Beschreibung von Teilprozessen als auch der Verknüpfung von Teilprozessen zum Gegenstand zahlreicher Arbeiten [7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18]. Die Ansätze enthalten im Allgemeinen unterschiedliche Betrachtungsschwerpunkte und daraus resultierend auch leicht differierende Anwendungsgebiete. Dabei liegen die Schwerpunkte in Verwendung z.B. der folgenden Transportmodelle:

- Modelle, die hauptsächlich den Wassertransport in porösen Bauwerkstoffen beschreiben, sind in Arbeiten von z.B. Kießl [8], Krus [9], Künzel [10], Pel [11], Bednar [12] angegeben. Die Beschreibung des Salztransportes wäre mit diesen Modellen nicht möglich.

- Andere Modelle berücksichtigen den Salztransport hauptsächlich als sogenannten „Huckepack-Transport“ z.B. in Lunk [13], Volkwein [14], d.h. sie berücksichtigen den Transport der Salzionen mit dem Transportmittel Porenlösung.
- In einigen Arbeiten wird der Salzeinfluss auf Teiltransportprozesse untersucht und berücksichtigt [15, 16, 17, 18, 19], wobei die Konzentrations- und Feuchtigkeitsabhängigkeit bei der Bestimmung der diffusiven Transportkennwerte keine oder nur ansatzweise Berücksichtigung finden.

Die Genauigkeit der Vorhersage der Transportprozesse hängt dabei jedoch auch entscheidend von der Genauigkeit der experimentell zu bestimmenden Transportparameter ab. Entscheidend ist dafür die richtige Anwendung der Messmethode und deren Genauigkeit.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Transport der Schadsalze sowie deren Einfluss auf die im Bauwerk stattfindenden Feuchttransportprozesse zu analysieren und quantifizieren. Die Bearbeitung erfolgte dabei in fünf Schwerpunkten:

1. Beschreibung und Modellierung des Salztransports in porösen Bauwerkstoffen. Es wird der Salztransport in Abhängigkeit der Konzentration, der Temperatur und der Porensättigung untersucht. Der Einfluss der porenmorphologischen Vielfalt der Bauwerkstoffe auf die Salztransportprozesse wird anhand einer geeigneten Auswahl bundesweit üblicher Sandsteine und handelsüblicher Ziegel untersucht.
2. Charakterisierung und Quantifizierung des Salzeinflusses auf Feuchttransportprozesse. Es wird der Einfluss verschiedener Salze auf die Feuchttransportprozesse im Bauwerkstoff untersucht. Neben dem Einfluss der Veränderung der klimatischen Randbedingungen wird insbesondere auch der Einfluss der Porenmorphologie untersucht.
3. Bewertung und Entwicklung geeigneter Messmethoden zur Ermittlung von Transportkoeffizienten. Schwerpunkte bilden hierbei die experimentelle Anordnung, die Auswertung und die Detektion und Eliminierung möglicher Fehlerquellen.
4. Entwicklung einer Simulationssoftware zur Parameteridentifikation in Materialien, Materialkombinationen und Kontaktflächen. Für die Diffusion wird zur Verifikation experimenteller Versuchsanordnungen und zur Simulation sanierungstechnischer Fragestellungen im Labormaßstab die Software SPID (Simulation und Parameteridentifikation von Ionen-Diffusionsprozessen) entwickelt.

5. Die Optimierung einer Sanierungsmaßnahme, z.B. der Kompressenentsalzung. Das Erreichen eines effektiven und nachhaltigen Sanierungserfolges erfordert die Wahl geeigneter (Sanierungs-) Materialien und geeigneter verfahrenstechnischer Randbedingungen.

Die Anwendung wird mit zahlreichen Beispielen demonstriert und deren Wirksamkeit an experimentellen Untersuchungen vorrangig anhand der Kompressenentsalzung als schonendes Verfahren zur Schadsalzreduzierung in Bauwerkstoffen nachgewiesen.