

DGZfP-Berichtsband BB 69-CD  
Vortrag A4

## **Elektroosmose – ein Vergleich theoretischer Ergebnisse mit experimentellen Resultaten**

G. Scherpke, U. Schneider, Technische Universität Wien

---

### **Kurzfassung**

Ein wichtiger Teil der Sanierung von Altbauten ist die Trockenlegung und Entsalzung von Bauteilen. Diesbezüglich werden gegenwärtig viele Verfahren am Markt angeboten und eingesetzt, von denen im vorliegenden Bericht die Gruppe der elektroosmotischen Verfahren zur Mauerwerkstrockenlegung einer Bewertung unterzogen werden.

Für eine wissenschaftliche Beurteilung gab es bisher zu wenig Erkenntnisse und Erfahrungen über das Transportverhalten von Flüssigkeiten in porösen Baustoffen bei angelegten äußeren elektrischen Spannungen. In der Praxis ließ sich häufig nicht eindeutig beurteilen, ob eine Mauer durch das angewandte elektroosmotische Sanierungsverfahren, durch die begleitenden Maßnahmen oder einfach durch günstige klimatische Verhältnisse ausgetrocknet war. Die vorliegende Arbeit trägt bei, diese Lücke zu schließen.

Es werden hier Ergebnisse von Laborversuchen zur Messung elektroosmotischer Feuchtetransportkoeffizienten von feuchte- bzw. salzbelasteten Sandstein- und Ziegelproben (vorgelagert in Wasser bzw. NaCl-Lösungen) präsentiert. Es wird der entsprechende Feuchtetransportmechanismus in den getränkten Baustoffproben experimentell nachgewiesen, mit theoretischen Ergebnissen verglichen und diskutiert.

Abschließend werden die Auswirkungen der dargestellten Ergebnisse auf die Baupraxis, d. h. die Trockenlegung feuchten Mauerwerks beschrieben.

### **1 Einleitung**

Eine an der Phasengrenze zweier Medien (z. B. Feststoff und Flüssigkeit) entstandene Ladungsverteilung, bei der sich zwei entgegengesetzt geladene Schichten von Ladungsträgern gegenüber stehen, wird als elektrische Doppelschicht bezeichnet. Im Bauwesen tritt dieser Effekt beim kapillaren Feuchtetransport durch poröse Baustoffe auf. Durch die normalerweise vorhandene Salzbelastung in porösen Baustoffen kann die wandernde Feuchte als Elektrolytlösung betrachtet werden. Die elektrische Doppelschicht bildet sich hier an der Innenwand der Poren aus. Man unterscheidet zwischen der Ladung am festen Stoff selbst, der Ladung der fest am Feststoff haftenden Schicht (starre Doppelschicht) und der Ladungsverteilung in der beweglichen Flüssigkeit (diffuse Doppelschicht). Die Ausbildung der elektrischen

Doppelschicht und die damit verbundene lokale Konzentrierung beweglicher Ladungsträger in porösen, wasser- und salzbelasteten Baustoffen ist die Basis für die sogenannten elektroosmotischen Erscheinungen, d. h. des Feuchtettransports in einem porösen Feststoff aufgrund einer von außen angelegten elektrischen Spannung.

Das elektrische Potential der Gleitebene zwischen starrer und diffuser Doppelschicht wird als  $\zeta$ -(Zeta)-Potential bezeichnet. Aufgrund der vielen Einflußgrößen (z. B. Ionenart und -konzentration, Ionenaustauschvorgänge, Porosität und Permeabilität) sind die Werte von  $\zeta$ -Potentialen in porösen Systemen bei bestimmten Umgebungsbedingungen auf theoretischem Wege nicht zu bestimmen. Aus diesen Gründen ist das  $\zeta$ -Potential keine geeignete Größe, um einen elektroosmotischen Massentransport zuverlässig vorauszusagen oder abzuschätzen. Um dieser Problematik zu entgehen, wurden zur theoretischen Formulierung des gegenständlichen Sachverhalts bzw. zur Berechnung elektroosmotischer Transportkoeffizienten poröser Baustoffe die phänomenologischen Gleichungen der Thermodynamik irreversibler Prozesse herangezogen und gleichzeitig auf eine explizite Darstellung des  $\zeta$ -Potentials verzichtet.

Mit Hilfe der im weiteren beschriebenen Versuchsanordnung ist es möglich, die elektroosmotischen Transportkoeffizienten experimentell zu bestimmen. Die hier dargestellten Messungen wurden an praxisrelevanten kalkhaltigen Sandsteinproben aus dem St. Margaretner Steinbruch (nahe Wien) und an üblichen Mauerziegeln der Fa. Wienerberger durchgeführt.

Die experimentell erhaltenen Ergebnisse werden den theoretischen Resultaten gegenübergestellt. Daraus werden die Erfolgsaussichten beim Einsatz elektroosmotischer Anlagen zur Trockenlegung feuchten Mauerwerks abgeleitet.

## 2 Theoretische Beschreibung des elektroosmotischen Feuchte- transports in porösen Baustoffen

Die in [1] mit Hilfe von phänomenologischen Gleichungen der irreversiblen Thermodynamik beschriebene und auf der stationären hydrodynamischen Grundgleichung basierende Theorie der elektroosmotischen Erscheinungen zielt auf die Darstellung der sogenannten elektroosmotischen Beweglichkeiten  $L$  ab. Gl. (1) beschreibt den Flüssigkeitsstrom einer Elektrolytlösung in einem idealisierten, zylindrischen Rohr bei einem Druckunterschied  $\nabla P$  und einer an den Rohrenden angelegten elektrischen Gleichspannung  $\nabla U$  (jeweils normiert auf die Rohrlänge):

$$V = \frac{a^2}{8\eta} \cdot \nabla P + L_{12} \cdot \nabla U \quad (1)$$

- V... Transportgeschwindigkeit der Flüssigkeit [m/s] in einem Rohr
- $\nabla P$ ... Druckgradient / Rohrlänge [ $\text{N/m}^3$ ]
- a... Rohrradius [m]
- $\eta$ ... Viskosität des Elektrolyten [ $\text{Ns/m}^2$ ]
- $\nabla U$ ... Spannungsunterschied / Rohrlänge [V/m]
- $L_{12}$ ... Elektroosmotische Beweglichkeit

Der erste Koeffizient in Gl. (1) ist für das gegenständliche Problem eine vereinfachte, jedoch hinreichend genaue Darstellung. Die Existenz der elektroosmotischen Beweglichkeit ist in der Ausbildung einer elektrischen Doppelschicht bzw. einer sogenannten diffusen Ladungsverteilung an der Grenzfläche zwischen dem Elektrolyten und der Rohrwand begründet. Die theoretische Ableitung nach [2] ergibt:

$$L_{12} = \frac{DRT}{4\pi z_- F \eta_0} \cdot \ln \left( \exp - \left| \frac{z_- F \varphi}{RT} \right| + \frac{B c_\infty}{\eta_0} \right) \quad (2)$$

- z... Ionenwertigkeit der Anionen
- D... Dielektrizitätskonstante der Elektrolytlösung [C<sup>2</sup>/Nm<sup>2</sup>]
- R... Gaskonstante (R = 8.314 J/mol K)
- T... absolute Temperatur [K]
- F... Faradaykonstante (F = 9.648 x 10<sup>4</sup> C/mol)
- η<sub>0</sub>... Viskosität des reinen Wassers [N s/m<sup>2</sup>]
- φ... Differenz der Galvanipotential einer Lösung mit elektrokinetischer Beweglichkeit 0 und der zu betrachtenden Lösung in Volt (wird als Potentialabfall in der diffusen Doppelschicht identifiziert; Hier nach [2]: -0.291 V bei 20°C)
- B... Korrekturfaktor für die Viskosität (hier für NaCl = 0.06 x 10<sup>-6</sup> Js/mol)
- c<sub>∞</sub>... Ionenkonzentration im Innern der Lösung [mol/l]

Im folgenden wird das Prinzip der experimentellen Bestimmung dieser Koeffizienten beschrieben und desweiteren die Meßanordnung erklärt.

### 3 Grundprinzip der Messung

Die durch einen durchfeuchteten Baustoff mit angelegter elektrischer Feldstärke durchströmende Flüssigkeitsmenge mit der Dimension [kg/m<sup>2</sup>s] ist unter bestimmten Bedingungen meßbar. Aus entsprechenden Meßergebnissen können der elektroosmotische Durchflußkoeffizient X bzw. die Beweglichkeit L mittels u. a. Gl. (3) und Gl. (4) zurückgerechnet werden. Es können somit die nach Gl. (2) für die Strömung in einer zylinderförmigen Pore theoretisch ermittelten Werte mit experimentellen Ergebnissen verglichen werden.

Das Grundproblem im Rahmen der durchgeführten Arbeiten war die Messung eines Flüssigkeitstransports durch den Querschnitt eines regelmäßigen porösen Baustoffes. Da die Oberfläche eines solchen Baustoffes ebenfalls eine Querschnittsfläche darstellt, müssen sich Feuchtetransportphänomene nach dorthin fortsetzen und sich auf die Dynamik der Verdunstungsprozesse auswirken. Diese Überlegung fließt in die nachher beschriebene Versuchsanordnung ein, die aus zwei voneinander unabhängigen Meßkreisläufen besteht. Diese Meßkreisläufe dienen dazu, die mengenmäßige Verdunstung von Flüssigkeiten aus feuchten porösen Baustoffen über deren gegenüber liegenden Stirnflächen zu untersuchen.

Über eventuell auftretende signifikante Differenzen hinsichtlich der Verdunstung aus den gegenüberliegenden Stirnflächen (hier: bei einer an den Baustoff angelegten elektrischen Spannung) wird auf eine gerichtete Flüssigkeitsströmung innerhalb der Matrix, welche durch das elektrische Feld verursacht wird, geschlossen. Diese

Strömung wird als elektroosmotischer Effekt bezeichnet und der Größenordnung nach experimentell bestimmt.

Der in [3] detailliert beschriebene Versuchsaufbau zur experimentellen Bestimmung elektroosmotischer Beweglichkeiten poröser Baustoffe nimmt auf Gl. (1) Bezug, die vorliegenden experimentellen Bedingungen gelten für  $\nabla P = 0$ . Dadurch vereinfacht sich Gl. (1) zu:

$$V = L_{12} \cdot \nabla U \quad (3)$$

Multipliziert man diese Gleichung mit der Dichte des Elektrolyten, erhält man daraus den in einer Baustoffpore durch die elektrische Spannung induzierten und meßbaren Massetransport  $M$  der elektrolytischen Flüssigkeit:

$$M = X \cdot \nabla U \quad (4)$$

- M... Flüssigkeitstransport (zeitlicher Massefluß/Querschnitt) [kg/m<sup>2</sup>s]  
X... elektroosmotischer Durchflußkoeffizient [kg/mVs]  
 $\nabla U$ ... Spannungsunterschied / Rohrlänge [V/m]

Anschließend kann dieser Feuchtettransporteffekt mit jenen Kräften verglichen werden, die das kapillare Aufsaugen einer Flüssigkeit bei Kontakt mit der Baustoffoberfläche bewirken. Daraus läßt sich eine Aussage ableiten, ob die elektroosmotischen Erscheinungen quantitativ ausreichen, den kapillaren Flüssigkeitstransport in einem porösen Baustoff zu stoppen bzw. zurückzudrängen. Es wird so in weiterer Folge die Wirksamkeit elektroosmotischer Mauertrockenlegungsverfahren beurteilt (vgl. auch [4] und [5]).

## 4 Experimentelle Vorgangsweise zur Bestimmung elektroosmotischer Feuchtettransportkoeffizienten

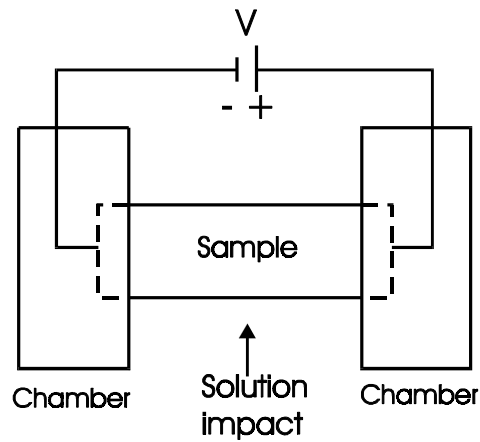
### 4.1 Charakterisierung der Proben

Zur Durchführung der beschriebenen Messungen (vgl. [3]) wurden 4x4x10 cm<sup>3</sup> St. Margaretner Sandsteine (Sandstein mit calcitischen Anteilen) und Ziegelproben verwendet. Der Sandstein ist praxisrelevant, da er zur Sanierung historischer Bauten im Raum Wien verwendet wird (z. B. Stephansdom) und wurde von der Fa. Hummel, 1160 Wien, in dieser Form teilweise kostenlos zur Verfügung gestellt. Bei den Ziegelproben handelte es sich um volle Mauerziegel welche von der Fa. Wienerberger zur Verfügung gestellt wurden und die weltweit einen standardmäßigen Baustoff darstellen.

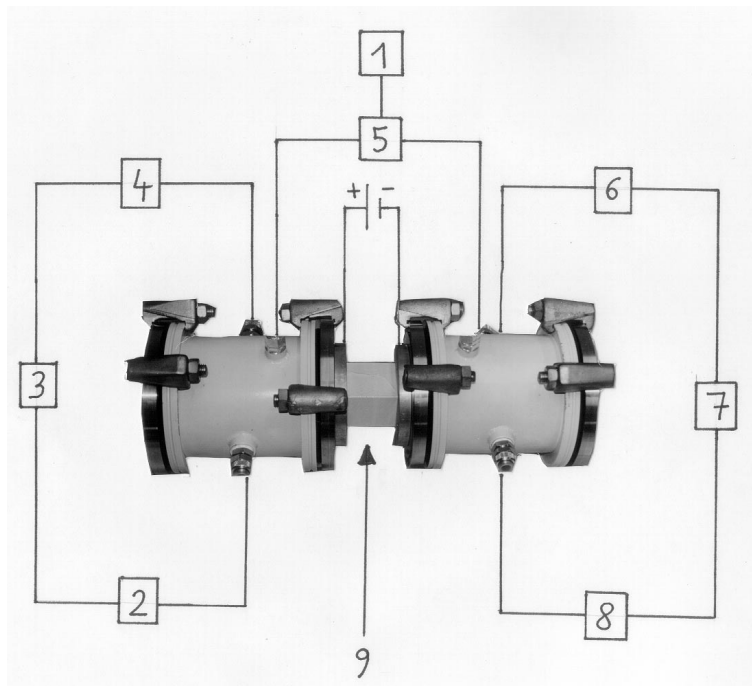
Untersuchungen mit einem Hg-Druckporosimeter ergaben für die in weiterer Folge zu den Berechnungen herangezogenen mittleren Porenradien:

St. Margaretner Sandstein:	10 µm
Wienerberger Mauervollziegel:	0.4µm

Es wurden sowohl Probekörper, die nur in Wasser, als auch solche, die in wässriger NaCl-Lösung (1.7 mol/l) oder Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Lösung (0.6 mol/l) vorgelagert waren, untersucht.



**Abb. 1:** Prinzip der Meßanordnung zur Messung elektroosmotischer Feuchte-transporterscheinungen



**Abb. 2:** Skizzierung der experimentelle Meßanordnung  
1...Monitor  
5...Feuchte/Temperatur-Sensoren (in beide Kammern eingeführt)  
2, 6...Luftdurchflußzähler  
3, 7...Silicagel-Behälter  
4, 8...Membran-Pumpen  
9...Baustoffprobe

## 4.2 Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung (siehe Abb. 1 und 2) zur Messung elektroosmotischer Feuchtetransportphänomene besteht aus zwei voneinander unabhängigen geschlossenen, gesteuerten Luftkreisläufen welche über Schlauchleitungen verbunden jeweils aus Verdunstungskammer, Membranpumpe, Luftdurchflußzähler, mit Silicagel gefülltem Plexiglasbehälter und empfindlichem Feuchte/Temperatur-sensor bestehen. Die Feuchte/Temperatursensoren, welche in unmittelbarer Umgebung der beiden Probenstirnflächen positioniert sind, zeichnen den zeitlichen Verlauf der Temperatur- und Feuchtebedingungen in den Meßkammern, d. h. das Verdunstungsverhalten der Proben auf. Diesbezügliche sprunghafte Veränderungen, z. B. nach Einschalten einer an den Baustoff angelegten äußeren elektrischen Spannung werden sehr genau angezeigt und werden dem untersuchten Feuchtetransportmechanismus zugeordnet. Daraus lassen sich in weiterer Folge die diesen Verdunstungsänderungen zugrunde liegenden Feuchtetransportkoeffizienten (hier: elektroosmotischer Durchflußkoeffizient) ableiten.

Die so ermittelten Werte für die Feuchtetransportkoeffizienten werden nach entsprechender Korrektur hinsichtlich der Porenstruktur der untersuchten Baustoffproben für eine grundsätzliche Beurteilung der Wirksamkeit elektroosmotischer Verfahren zur Mauerwerkstrockenlegung herangezogen, wobei die erhaltenen Ergebnisse eine Empfehlung solcher Anlagen für diesen Zweck in der Zukunft ausschließen.

## 5 Gegenüberstellung theoretischer und experimenteller Ergebnisse für elektroosmotische Feuchtetransportkoeffizienten

In der folgenden Tabelle 1 werden die ermittelten Werte für die elektroosmotische Beweglichkeit  $L_{12}$ , welche den Massentransport eines Elektrolyten durch eine zylindrische Pore unter dem Einfluß einer bestimmten elektrischen Feldstärke beschreibt, verglichen. Es ist zu erkennen, daß die theoretisch und experimentell ermittelten Werte für die untersuchten Sandstein- und Ziegelproben gut übereinstimmen. Der meßtechnisch bedingte relative Fehler für  $L_{12}$  wird mit max. 20 % abgeschätzt. Während der Messung betrug der Feuchtegehalt ca. 4 M. -% (Sandstein) bzw. ca. 20 M. -% (Ziegel). Die Chloridbelastung der Proben war 0.28 M. -% (Sandstein) und 0.7 M. % (Ziegel). Die angelegten elektrischen Feldstärken zur Ermittlung der Meßwerte waren 200 V/m (Sandstein) bzw. 100 V/m (Ziegel).

Die durch Messung erhaltenen Werte für  $L_{12}$  werden in Gl. (1) eingesetzt und man kann auf diese Weise den beschriebenen elektroosmotischen Feuchtetransporteffekt bzw. die damit verbundenen Drücke mit den am Bauwerk zu „bekämpfenden“ Kapillardrücken bilanzieren, wie im folgenden Abschnitt dargestellt wird.

**Tabelle 1:** Vergleich von theoretisch und experimentell ermittelten elektroosmotischen Beweglichkeiten  $L_{12}$

Probenbezeichnung	Vorlage- rung	$L_{12}$ [m <sup>2</sup> /Vs] (theoretisch)	$L_{12}$ [m <sup>2</sup> /Vs] (experimentell)
Sandsteinprobe S1	NaCl	$1.3 \times 10^{-9}$	$2.4 \times 10^{-9}$
Sandsteinprobe S2	NaCl	$1.3 \times 10^{-9}$	$4.0 \times 10^{-9}$
Sandsteinprobe S3	NaCl	$1.3 \times 10^{-9}$	$2.0 \times 10^{-9}$
Sandsteinprobe S4	NaCl	$1.3 \times 10^{-9}$	$1.2 \times 10^{-9}$
Ziegelprobe Z1	NaCl	$1.0 \times 10^{-9}$	$4.3 \times 10^{-10}$
Ziegelprobe Z2	NaCl	$1.0 \times 10^{-9}$	$4.7 \times 10^{-10}$
Ziegelprobe Z3	H <sub>2</sub> O	$2.4 \times 10^{-9}$	$9.0 \times 10^{-10}$
Ziegelprobe Z4	H <sub>2</sub> O	$2.4 \times 10^{-9}$	$4.0 \times 10^{-10}$

## 6 Auswirkungen der Ergebnisse auf die Baupraxis

Die in den voran gegangenen Kapiteln für Sandstein- und Ziegelproben theoretisch beschriebenen und experimentell nachgewiesenen elektroosmotischen Durchflußkoeffizienten  $X$  und die daraus berechneten Beweglichkeiten  $L_{12}$  finden ihre Anwendung im Bauwesen im Zusammenhang mit am Markt angebotenen elektroosmotischen Verfahren zur Mauerwerkstrockenlegung. Diese Verfahren wurden in die ÖNORM B 3355 (Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk) aufgenommen. Die erhaltenen Meßergebnisse ermöglichen eine größenordnungsmäßige Abschätzung der grundsätzlichen Wirksamkeit solcher Sanierungsmethoden. Diese wird hier auf der Grundlage o. a. Randbedingungen für kalkhaltigen St. Margaretnr Sandstein für  $L_{12} \cong 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/Vs bzw. für volle Mauerziegel, Fa. Wienerberger für  $L_{12} \cong 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/Vs (vgl. Tab. 1) durchgeführt.

Nach Gl. (1) errechnet sich daher die Transportgeschwindigkeit eines Elektrolyten in einer Baustoffpore (Annahme: E-Feld in Porenrichtung) als:

$$V = \frac{a^2}{8\eta} \nabla P + 10^{-9} \nabla U \quad (\text{Sandstein}) \quad (5)$$

$$V = \frac{a^2}{8\eta} \nabla P + 10^{-10} \nabla U \quad (\text{Ziegel}) \quad (6)$$

- V... Transportgeschwindigkeit der Flüssigkeit in einer Pore [m/s]  
 a... Porenradius [m]  
 $\eta$ ... Viskosität des Elektrolyten [Ns/m<sup>2</sup>] (hier hinreichend genau: 0.001 Ns/m<sup>2</sup>)  
 $\nabla P$ ... äußere Druckdifferenz/Probenlänge [N/m<sup>3</sup>] (hier interpretiert als Kapillardruck)  
 $\nabla U$ ... Elektr. Spannungsunterschied/Probenlänge, d. h. elektr. Feldstärke [V/m]

Im praktischen Anwendungsfall eines durch erdaufsteigende Feuchtigkeit belasteten Gebäudes treten Kapillardrücke auf. Somit gilt die in den Laborversuchen erzeugte Bedingung  $\nabla P = 0$  nicht mehr. Mit den in Kap. 4. 1 angegebenen Werten für die mittleren Porenradien der hier diskutierten Materialien ergibt sich folgende Abschätzung für den Flüssigkeitstransport in einer Pore, der aus der Kombination äußerer Kräfte P (welche noch nicht näher spezifiziert wurden, man identifiziert sie im hier beschriebenen Anwendungsfall als Zusammenspiel des Kapillardrucks, der kapillaren Reibungskraft und der Gewichtskraft) und einer angelegten elektrischen Spannung U entsteht. Das Minus in Gl. (7) und Gl. (8) soll signalisieren, daß bei richtiger Polung der elektrischen Spannung beide beschriebenen Transportprozesse im Zuge einer Sanierung entgegengesetzt laufen müssen.

$$V = 10^{-8} \nabla P - 10^{-9} \nabla U \quad (\text{Sandstein}) \quad (7)$$

$$V = 10^{-11} \nabla P - 10^{-10} \nabla U \quad (\text{Ziegel}) \quad (8)$$

Legt man als Mindestziel einer Mauertrockenlegung das Stoppen der kapillar aufsteigenden Feuchtigkeit, d. h.  $V = 0$  fest, so ergibt sich in einer gefüllten Pore für die aus  $\nabla P$  und den vorhandenen Gewichtskräften bilanzierte Größe P sowie der von außen angelegten elektrischen Feldstärke  $\nabla U$  folgendes:

$$P = 10^{-1} \nabla U \quad (\text{Sandstein}) \quad (9)$$

$$P = 10 \nabla U \quad (\text{Ziegel}) \quad (10)$$

Daraus leiten sich unter der Annahme einer baupraktisch zu realisierenden elektrischen Feldstärke  $\nabla U = 100$  V/m die in den Poren der untersuchten Baustoffe „elektrisch“ zu erzielenden Drücke von 10 Pa (Sandstein) bzw. 1000 Pa (Ziegel) ab.

Dies entspricht einem möglichen elektroosmotischen Absenken des Feuchtespiegels ausgehend von der maximalen kapillaren Steighöhe nach [6] um:

$$1 \text{ mm} \quad (\text{Sandstein})$$

$$10 \text{ cm} \quad (\text{Ziegel})$$

Die elektroosmotischen Effekte sind quantitativ gering und praktisch nur nahe der maximalen kapillaren Steighöhe wirksam. Dies ist eine mögliche Erklärung dafür, daß in mehreren Laborversuchen [9] an in Flüssigkeit eingelagerten Probekörpern keine vertikalen elektroosmotischen Effekte gemessen werden konnten. In diesen Fällen war das Eigengewicht der Flüssigkeitsfäden aufgrund der geringen Porendimensionen zu gering und die elektroosmotischen Effekte nicht ausreichend, um den Kapillardrücken signifikant entgegenzuwirken.

Insgesamt kann aufgrund der hier präsentierten Ergebnisse davon ausgegangen werden, daß mit Mauerwerkstrockenlegungsverfahren, die ausschließlich auf der



Ausnutzung elektroosmotischer Feuchtetransporteffekte im Sinne dieser Arbeit beruhen, an Baustoffen mit üblichen Porenradienverteilungen sowie baupraktisch relevanten Feuchte- und Salzgehalten keine signifikanten Trocknungseffekte zu erwarten sind. Dies gilt mit großer Sicherheit im gesamten für diesen Zweck in Frage kommenden elektrischen Spannungsbereich.

## 7 Zusammenfassung

Nach der Theorie der Ausbildung von elektrischen Doppelschichten in einer flüssigkeitsdurchströmten Pore ist die Möglichkeit gegeben, durch Anlegen einer elektrischen Gleichspannung an einen porösen, feuchten Körper einen gerichteten Flüssigkeitstransport hervorzurufen. Die Annahme einer elektrischen Kraft sowie eines äußeren Druckgradienten als Ursachen für einen Flüssigkeitstransport in einem porösen System ergeben die Möglichkeit der Formulierung dieses Sachverhalts im Rahmen der phänomenologischen Gleichungen der Thermodynamik irreversibler Prozesse. Der dadurch theoretisch abgeleitete elektroosmotische Durchflußkoeffizient kann experimentell nachgewiesen werden, wozu eine spezielle Versuchsanordnung entwickelt wurde.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die beschriebene Versuchsanordnung zum Nachweis des elektroosmotischen Feuchtigkeitstransports geeignet ist. Die Messungen wurden an praxisrelevanten kalkhaltigen Sandsteinproben aus dem St. Margareter Steinbruch (z. B. eingesetzt zur Renovierung des Wiener Stephansdoms) und an üblichen Mauerziegeln der Fa. Wienerberger durchgeführt. Es wurden sowohl Probekörper, die zuvor nur in Wasser, als auch solche, die in wässriger NaCl-Lösung (1.7 mol/l) oder Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Lösung (0.6 mol/l) vorgelagert waren, untersucht.

Für die quantitativ ausgewerteten Proben ergaben sich unter den beschriebenen Bedingungen elektroosmotische Beweglichkeiten  $L_{12}$  (vgl. Gl. (1)) in der Größenordnung von  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{Vs}$  für Sandstein und  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{Vs}$  für Ziegel.

Die elektroosmotische Feuchteumlagerung fand jeweils in Richtung der Kathode statt.

Die Messungen von in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Lösung vorgelagerten Proben ergaben aufgrund der raschen Auskristallisation des Natriumsulfats und der damit verbundenen Porenverstopfung an den Oberflächen keine signifikanten Ergebnisse, d. h. elektroosmotische Transportkoeffizienten konnten in diesem Fall nicht gemessen werden.

Die experimentellen Ergebnisse stimmen mit den auf theoretischem Wege ermittelten Feuchtetransportkenngrößen relativ gut überein.

Die elektrolytische Zersetzung von Wassermolekülen und damit verbundene Effekte wurden im Rahmen der Versuche nicht beobachtet.

Durch die Anwendung von elektroosmotischen Verfahren zur Mauertrockenlegung hat diese Arbeit unmittelbaren Praxisbezug. Jene physikalisch-chemischen Effekte in porösen Baustoffen, auf die sich Anbieter solcher Verfahren berufen, wurden in dieser Arbeit erstmals einem Vergleich zwischen Theorie und Experiment unterzo-

gen. Die gemessenen Feuchtetransporteffekte liegen in unbedeutenden Größenordnungen. Sie können bei Trockenlegungsmaßnahmen kaum als Unterstützung dienen. Es können bestenfalls geringfügige und in der Praxis kaum merkbare Effekte in der Umgebung der maximalen kapillaren Steighöhe erzielt werden.

Verarbeitungstechnische Aspekte beim Einbau von Elektroden in ein Mauerwerk, die gewisse Übergangswiderstände in den Kontaktzonen zum Mauerwerk erwarten lassen, verbessern die Erfolgswahrscheinlichkeit nicht.

Es wurde hier nicht auf die Entwicklung eines speziellen Elektrodensystems (wie es z. B. zur Entsalzung von Mauerwerk angeboten wird) Wert gelegt, da die realisierten Versuchsdauern für die Korrosionsbeständigkeit der verwendeten Leitsilberelektroden hinreichend kurz waren. Das hier entwickelte Meßprinzip kann jedoch dazu dienen, verschiedene Elektrodensysteme bzw. Baustoff-Elektroden-Kombinationen auf deren Effizienz hinsichtlich des von ihnen bewirkten Austrocknungsverhaltens und deren Korrosionsbeständigkeit, auch unter Anlegung höherer Spannungen und unter Berücksichtigung der Einflußnahme von erhöhten Temperaturen zu testen.

Es wird abschließend darauf hingewiesen, daß sehr hohe elektrische Feldstärken (für die beschriebenen Bedingungen ca. 900 V/m), zumindest im Elektrodenbereich elektrochemische Reaktionen bzw. thermische Entwicklungen und Feuchteumlagerungen hervorrufen können, die nichts mit den in dieser Arbeit untersuchten elektroosmotischen Transportvorgängen aufgrund von Grenzflächeneffekten an den Porenwänden zu tun haben. Die eventuelle Nutzung solcher durch Anlegen höherer Spannungen hervorgerufener Effekte zur Mauerwerkstrockenlegung bedingt jedoch weitere Untersuchungen. Es muß in diesem Zusammenhang insbesondere der Einfluß bzw. die Gefahr höherer Spannungen bzw. Feldstärken auf die Beständigkeit des zu trocknenden Materials (z. B. Bindemittel) untersucht werden.

## 8 Literatur

- [1] H. J. Oel, Zur Theorie de elektrokinetischen Erscheinungen, in Zeitschrift für Physikalische Chemie, Neue Folge, **5**, 1/2, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt, 1955
- [2] G. Scherpke, U. Schneider, Elektrochemische Transportprozesse in porösen Baustoffen. Advances in Building Materials Science (Festschrift Wittmann), Seite 375, AEDIFICATIO, Freiburg, Deutschland, 1996
- [3] Scherpke, G.: Bestimmung elektrokinetischer Feuchtetransport-Kenngrößen für poröse Baustoffe für die Bewertung elektroosmotischer Anlagen zur Trockenlegung feuchten Mauerwerks, Dissertation, Technische Universität Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 1999
- [4] Scherpke, G., Schneider, U.: Elektrisch induzierter Feuchtetransport in Naturstein, Ingenieur-Hochbau. Berichte aus Forschung und Praxis, Festschrift Cziesielski, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1998
- [5] Scherpke, G., Schneider, U.: Prüfverfahren für elektrisch induzierten Feuchtigkeitstransport in porösen Baustoffen, WTA-Schriftenreihe, Heft 17, Berichtsband zum WTA-Kolloquium, Fulda, AEDIFICATIO Verlag Freiburg, 1998

- [6] R. Hohmann, M. J. Setzer, Bauphysikalische Formeln und Tabellen, Werner Verlag, Düsseldorf, 1995
- [7] C. Arendt, Trockenlegung, Leitfaden zur Sanierung feuchter Bauwerke, Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart, 1983
- [8] F. H. Wittmann, Kann das Prinzip der Elektroosmose zur Trockenlegung von Mauerwerk angewendet werden?, Bautenschutz & Bausanierung **4/1981**, Seite 126
- [9] Balak M.: Elektrophysikalische Trockenlegungsverfahren, Theoretische Erwägungen, Praktische Erfahrungen, Qualitätssicherung bzw. -bewertung, Tagungsbericht 3. Hanseatische Sanierungstage, Kühlungsborn, 1992, Fachverband für Bautenschutz, Berlin
- [10] N. V. Waubke, Erfahrungen mit Verfahren zur Mauerwerkstrockenlegung, Bauphysik **13 /1991**, Heft 5, Seite 153