



# Neutronen-Computer-Tomographie: Moderne Technik zur Baustofferkundung

Ronald Haselsteiner und Harald Wildner

## Zusammenfassung

Am Lehrstuhl und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München steht das dreijährige Forschungsvorhaben *Injektionen mit hydraulischen Bindemitteln im porösen Massenbeton* kurz vor dem Abschluss. Diese dabei durchgeführten Untersuchungen beinhalteten neben der Variation verschiedener Injektionsparameter, wie z.B. die Wahl der Bindemittelsuspension, des Injektionsdruckes und der Verpressgeschwindigkeit, auch die Erkundung des zu behandelnden Mediums Massenbeton. Im Zuge der Erkundung der Hohlraumstruktur des Betons wurde eine Neutronen-Tomographie am Forschungsreaktor I der TU München in Garching vom Physik Department E21 unter durchgeführt. Ein definiertes Ziel war es, eine visuelle Darstellung der Hohlräume innerhalb des Betons zu erhalten. Denn besonders der Verlauf und die Größe dieser Poren sind maßgebend für die Durchlässigkeit und somit auch für die Injizierfähigkeit des porösen Massenbetons. Dieser Aufsatz befasst sich mit den Grundlagen der Neutronen-Computer-Tomographie, den Anwendungsgebieten und den gewonnenen Ergebnissen bei der Untersuchung von porösem Massenbeton.

## 1 Grundlagen der Computer-Tomographie

Die Computer-Tomographie ist ein bildgebendes Untersuchungsverfahren, mit dem unter der Verwendung von Sondenstrahlen (z.B. Gamma-, Röntgenstrahlen oder Neutronen) zweidimensionale Schnitte erzeugt werden. Das mathematische Modell der Tomographie ist u.a. bei WEGNER 1998 ausführlich beschrieben. Die zugehörigen einzelnen Arbeitsschritte Projektion, Inversion der Radon-Transformierten und Rückprojektion werden dort im Detail eingehender erläutert.

Durch Drehung des zu untersuchenden Objekts lässt sich mittels Überlagerung aller Projektionen ein berechnetes Bild eines zweidimensionalen Schnitts durch den Prüfkörper gewinnen. Summiert man diese Schnitte über die Höhe auf, kann eine dreidimensionale Darstellung des untersuchten Prüfkörpers erzeugt werden.

Die in Garching existierende Messstation setzt sich, wie Abb. 1 zeigt, aus folgenden Elementen zusammen:

- Szintillator: Ein chemisches Gemisch bestehend aus  ${}^6\text{LiF}$  und  $\text{ZnS(Ag)}$ -Kristallpulver, welches mit einem Bindemittel zu einer 0,3 mm dicken, milchigen Schicht verpresst ist, wird auf eine 1 mm starke Aluminiumplatte aufgetragen.
- Umlenkspiegel: Dieser aluminiumbedampfte Oberflächenspiegel lenkt Photonen zum Objektiv in Richtung der CCD-Kamera um, wobei er die Neutronen zum Strahlfänger hin passieren lässt. Pro eintreffendes Neutron werden rd.  $1,77 \cdot 10^5$  Photonen emittiert.
- Strahlfänger: Er absorbiert die emittierten Neutronen nach dem Durchdringen des Untersuchungsobjekts.
- Objektiv: Mit einer Brennweite von 24 mm und einer Lichtstärke von 1 : 1,4 garantiert das Objektiv die Bündelung des Lichts und die exakte Abbildung auf den 10 mm  $\times$  10 mm großen CCD-Chip.
- Gekühlte CCD-Kamera: Sie besteht aus einem CCD-Chip, der Kameraelektronik und der Kühlung dieser Kamera. Der CCD-Chip liest die ankommenden Lichtsignale mittels einer HighDetectivity-Auslese ein. Über einen 16-Bit A/D-Wandler werden die optischen Daten digitalisiert.
- Rechereinheit: Über eine AT-Bus-Steckkarte ist der Rechner mit dem CCD verbunden. Simultan zur Datenspeicherung wird der gesamte Versuchsablauf von einer Steuerkarte und dem Rechner gleichzeitig gesteuert.

Für die mathematische Auswertung der Neutronen-Computer-Tomographie müssen einige Annahmen bezüglich der Strahlungseigenschaften getroffen werden:

- Es handelt sich um einen monochromatischen Neutronenstrahl.
- Der Neutronenstrahl ist ein idealer Parallelstrahl.
- Gestreute Neutronen treffen nicht den Detektor.
- Außerhalb der Probe findet keine Wechselwirkung statt.

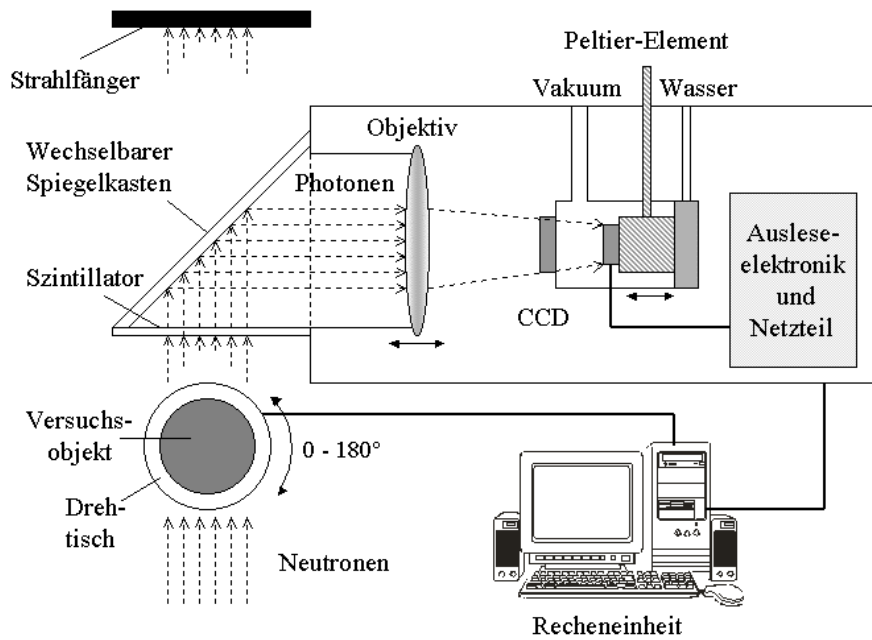


Abb. 1: Messaufbau der Neutronen-Computer-Tomographie des Physik Departments E21 der Technischen Universität München (nach SCHILLINGER 1999).

## 2 Neutronen-Computer-Tomographie

Ein entscheidender Vorteil der Neutronen-Computer-Tomographie gegenüber herkömmlichen Durchstrahlungsmethoden, wie z. B. dem Röntgenverfahren, liegt darin, dass Neutronen von schweren Elementen, wie z.B. Eisen, Wismut oder Blei, weniger absorbiert werden, so dass dickere Objekte untersucht werden können. Die Detektion leichter Elemente (z. B. Wasserstoff) erfolgt ebenfalls effizienter, weil Neutronen von Wasserstoff besonders stark gestreut werden. Ein Nachteil liegt in der sogenannten Strahlaufhärtung, welche bei polychromatischen Neutronenstrahlung, d.h. bei dem Vorhandensein von Neutronen verschiedener Energie, auftritt. Die Strahlaufhärtung bezeichnet den Effekt, dass der Schwächungskoeffizient des untersuchten Materials für kleinere Energien größer ist als bei größeren Energien. Folge ist, dass das Ausgangsspektrum einen geringeren Anteil von Neutronen mit kleinerer Energie hat als das Eingangsspektrum. Bei der Verwendung von monochromatischen Neutronen wird dieser Effekt der Strahlaufhärtung wegen des relativ schmalen Energiespektrums von Neutronen vernachlässigt.

In SCHILLINGER und PFISTER 1998 befinden sich Beispiele, an denen diese Untersuchungsmethode erfolgreich durchgeführt wurde. Zu den bisher durchgeführten Computer-Tomographien zählen:

- Wanddickenmessung von Turbinenschaufeln (siehe Abb. 2 und 3)
- Lokalisierung von Bauteilfehlern (Risse, Lunken, Inhomogenitäten)
- Nachweis von Korrosionsschäden
- Untersuchung archäologischer Proben



Abb. 2: Photographie einer Turbinenschaufel.



Abb. 3: Ergebnis einer Tomographie einer Turbinenschaufel.

### 3 Untersuchungen an Bohrkernen aus porösem Massenbeton mittels Neutronen-Computer-Tomographie

Im Zuge der Planung von Sanierungsmaßnahmen an Wasserbauwerken wie z.B. Wehranlagen, Kraftwerksbauten, Schleusen oder Staumauern wird der Bestandsbeton anhand entnommener Bohrkerns untersuchen. An diesen Proben wird dann die Wasseraufnahme, die Trockenrohdichte und die Druckfestigkeit ermittelt, um indirekt auf die Injizierbarkeit schließen zu können. Um eben eine visuelle Darstellung des inneren Gefüges zu erhalten, wurde an mehreren Bohrkernen eine Tomographie durchgeführt.

Mit Hilfe einer 3D-Visualisierungssoftware wurde aus den schichtweise (ca. 300 Schnittebenen) ermittelten Datensätzen (Abb. 5) ein dreidimensionales Modell der untersuchten Bohrkerns erzeugt. Abb. 4 zeigt ein typisches Exemplar der Untersuchungsreihe. Im ebenen Schnitt sind die luftgefüllten Hohlräume rot dargestellt. Wie Abb. 6 zeigt, sind die luftgefüllten Poren im Inneren des Bohrkerns bei der 3D-Visualisierung ebenfalls in roter Farbe abgebildet. Die deutlich vermehrte Rotintensität an den beiden Enden des Körpers resultiert daraus, dass hier die anstehende Luftsäule erfasst wurde. Oben stand eine reine Luftsäule an, dagegen war am Fuß des Körpers ein Luft-Klebstoff-Gemisch vorhanden, welches die Probe auf dem Drehtisch fixierte. In Abb. 7 ist das Anschauungsstück anhand einer Ansicht näher erläutert.

In bisher erfolgten eigenen Untersuchungen (WILDNER 2000) wurde immer nach einer Inaugenscheinnahme eines Bohrkerns entschieden, ob dieser weiteren Untersuchungen unterzogen werden sollte. Die in Abb. 7 rot dargestellten Bereiche der Mantelfläche des Betonzylinders, die sich nicht bis in das Innere erstrecken, verdeutlichen, dass eine visuelle Beurteilung der Mantelfläche eines Bohrkerns noch kein ausreichendes Kriterium zur Feststellung eines durchgängigen Porensystems darstellt, das Rückschlüsse auf eine mögliche Injizierbarkeit eines Bohrkerns zulässt.



Abb. 4: Probeexemplar

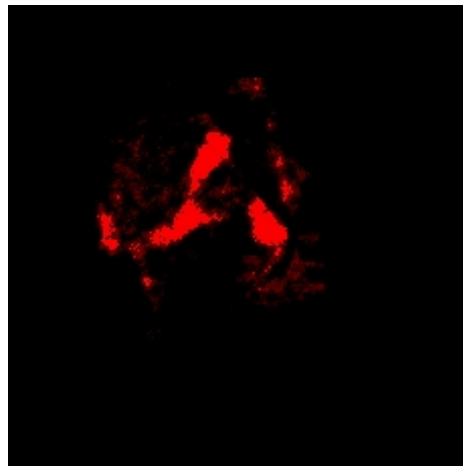


Abb. 5: Schnittbild des  
Probeexemplars

Sieht man vom erfassten Luft-Klebstoff-Gemisch und der anstehenden Luftsäule einmal ab, ist es möglich, einzelne Porenbereiche zu unterscheiden. Auffällig ist die bläschenartige Wolke in der Mitte des unteren Drittels. Es wurde als Poren-Feststoff-Gemisch klassifiziert. Da die Auflösung des Verfahrens aufgrund der gewählten Projektionsgeometrie auf etwa  $400\ \mu\text{m}$  begrenzt ist, ist auf die Tatsache zu schließen, dass hier viele variable und vor allem sehr kleine Luftporen in der Zementmatrix vorhanden sind, deren Größe nicht exakt bestimmt werden kann, aber die dennoch qualitativ nachgewiesen werden können. Solche Poren-Feststoff-Gemische sind im ebenen Schnitt (Abb. 5) auch neben den eindeutig roten Stellen als dunklere Mischbereiche zu erkennen. Diese Bereiche sind die Übergangszonen von Feststoff zu luftgefüllten Poren und entstehen wegen der oben bereits beschriebenen begrenzten Auflösung der Neutronen-Tomographie von etwa  $400\ \mu\text{m}$ . Davon ausgehend, dass bei einem Größtkorndurchmesser von ca.  $20\ \mu\text{m}$  des Feinstbindemitteltrockenstoffes in einer Injektionssuspension Poren und Klüfte im Beton bis zu einem Durchmesser von  $50\ \mu\text{m}$  mit hydraulischen Bindemitteln erfahrungsgemäß gerade noch injiziert werden können, wäre es im Sinne der Forschung durchaus wünschenswert, dieses Poren-

Feststoff-Gemisch geometrisch exakter zu beschreiben, um eventuell für die Praxis nützliche Erkenntnisse zu erlangen.



Abb. 6: 3D-Darstellung

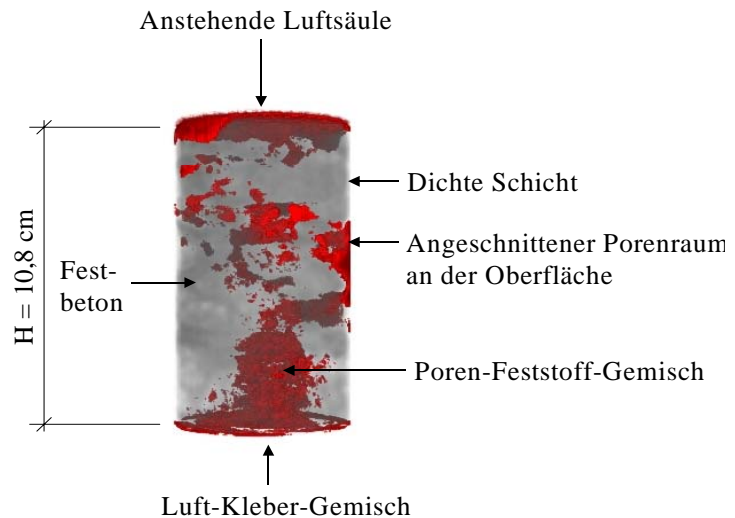


Abb. 7: Ansicht des Bohrkernelements mit Erläuterungen.

#### 4 Wertung und Ausblick

Mit dem Verfahren der Neutronen-Computer-Tomographie am Forschungsreaktor I der TU München in Garching war es möglich, mit einer auf ca. 400  $\mu\text{m}$  begrenzten Auflösung die Porenstrukturen von Bohrkernelementen aus Beton bis zu einem Durchmesser von rd. 6 cm und rd. 10 cm Höhe visuell darzustellen.

Ausgehend von einem in der Wirklichkeit recht massigen Bauwerksvolumen mit beispielhaften Abmessungen eines Wehrpfeilers von 15 m  $\times$  4 m  $\times$  20 m (L  $\times$  B  $\times$  H) im Verhältnis zum untersuchten Probekörpervolumen mit  $h/d = 10 \text{ cm} / 6 \text{ cm}$  hat eine Untersuchung der Bohrkerne mittels Neutronen-Tomographie stark wissenschaftlichen Charakter.

Neben dem angewendeten Untersuchungsmethode gibt es auch die Röntgen-Computer-Tomographie, neben jener jedoch derzeit kein Verfahren existieren dürfte, Inhomogenitäten innerhalb eines porösen Bohrkernelements aus Stampfbeton exakter zu erfassen.

Die physikalischen Untersuchungsgrenzen und der spezifische Aufwand lässt zur Zeit keine Anwendung außerhalb der Grundlagenforschung zum wirtschaftlichen Einsatz bei der Prüfung von Baumaterialien zu.

## Literatur

Schillinger, B. 1999: „Tomographie mit thermischen Neutronen und zu deren routinemäßigem Einsatz“, Doktorarbeit Technische Universität München, Mensch und Buch Verlag, Berlin.

Schillinger, B.; Pfister, G. 1998: „Radiographie und Tomographie an technischen Objekten“, Neue Forschung-Neutronenquelle Garching, Technische Universität München, Projektgruppe FRM-II, Öffentlichkeitsarbeit, Fränkischer Tag, Bamberg.

Wegner, M. 1998: „Spezielle Anwendungen der Radiographie und der Computer-Tomographie mit Neutronen“, Diplomarbeit, Technische Universität München, Institut für Experimentalphysik E21, unveröffentlicht.

Wildner, H. 2000: „Sanierung von Wasserbauten aus porösem Massenbeton mittels Injektionen mit hydraulischen Bindemittelsuspensionen“, Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen. Symposium, Technische Universität Graz, S. 317 – 326, Oktober 2000.

### Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Ing. Harald Wildner  
Lehrstuhl für Wasserbau  
und Wasserwirtschaft  
Technische Universität München  
Arcisstraße 21  
80333 München  
E-mail: h.wildner@bv.tum.de

Dipl.-Ing. Ronald Haselsteiner  
Lehrstuhl für Wasserbau  
und Wasserwirtschaft  
Technische Universität München  
Arcisstraße 21  
80333 München  
E-mail: r.haselsteiner@bv.tum.de