

# Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit  
im Studiengang Physik  
vorgelegt von  
Marcus Trapp  
geboren in Mannheim  
2007



Radiographische und  
tomographische  
Materialuntersuchungen bei hohen  
Neutronenflüssen

Diese Diplomarbeit wurde von  
Marcus Trapp  
ausgeführt am  
PHYSIKALISCHEN INSTITUT  
HEIDELBERG  
unter der Betreuung von  
Herrn Prof. Dr. Hartmut Abele



## Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Anwendungen der Neutronenradiographie und -tomographie. Aufgrund des hohen Neutronenflusses der Tomographie Station NEUTROGRAPH am Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble, ist es möglich dynamische Prozesse dreidimensional zu visualisieren.

Es wird ausführlich auf Experimente mit neuartigen, wasserdurchlässigen Asphaltgemischen eingegangen. Mit Hilfe neuartiger Methoden war es zum ersten Mal möglich den Wasserfluß durch die Probe in ausgewählten Hohlräumen in Echtzeit darzustellen. Hierraus können Rückschlüsse auf das Größe der Hohlräume und das Fließverhalten des Wassers gezogen werden.

Des Weiteren wurden Experimente mit Fossilien durchgeführt, hierbei sollte deren erdgeschichtlichen Einordnung ermöglicht werden. Außerdem werden Versuche mit antiken Artefakten erläutert, um auf die Herstellungsweise antiker Gefäße zu schließen.

## Abstract

This diploma thesis describes several applications of neutron radiography and -tomography. Because of its high flux the tomography station NEUTROGRAPH at the Institut Laue-Langevin (ILL) at Grenoble has the possibility to visualize dynamic processes three-dimensional.

Experiments with new porous asphalt mixtures are described in detail. It was possible to display the waterflow through some cavities in real-time for the first time. The results may be used to optimize the composition of asphalt.

Other experiments dealt with fossils. This was done to determine the geological era in which the animal lived. Furthermore experiments with historical artefacts are described. Aim of the experiments was to conclude from the inner structure the way the pottery was made.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	3
2.2	Grundlagen der Neutronen-Radiographie . . . . .	6
2.3	Grundlagen der Neutronen-Tomographie . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Aufbau der Radiographiestation</b>	<b>11</b>
3.1	Strahlrohr . . . . .	11
3.2	Strahleigenschaften . . . . .	11
3.3	Kasematte . . . . .	14
3.4	Detektor . . . . .	16
3.5	Probenumgebungen . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Visualisierung des Wasserflusses durch Asphalt</b>	<b>19</b>
4.1	Aufbau . . . . .	23
4.2	Durchführung der Messungen . . . . .	26
4.2.1	Durchflußmessung . . . . .	26
4.2.2	Verhalten von Wasser auf einer gefrorenen Probe . . . . .	27
4.2.3	Messung mit verunreinigten Proben . . . . .	27
4.3	Auswertung und Ergebnisse . . . . .	28
4.3.1	Durchflußmessung . . . . .	29
4.3.2	Verhalten von Wasser auf einer gefrorenen Probe . . . . .	40
4.3.3	Messung mit verunreinigten Proben . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Weitere Experimente</b>	<b>43</b>
5.1	Fossilien . . . . .	44
5.2	Historische Artefakte . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>47</b>

<b>Anhang</b>	<b>I</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>A Danksagung</b>	<b>IX</b>
<b>B Erklärung</b>	<b>XI</b>
<b>C Zur beiliegenden CD</b>	<b>XIII</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

Die Radiographie- und Tomographie-Station NEUTROGRAPH befindet sich an der europäischen Neutronenquelle des Instituts Laue-Langevin (ILL) in Grenoble, Frankreich. Am Strahlrohr H9, an dem die Tomographie Station von unserer Gruppe aufgebaut wurde, steht ein thermischer Neutronenfluss von  $3 \times 10^9$  Neutronen  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  zur Verfügung. Dieser hohe Fluß erlaubt eine Zeitaufösung im Mikrosekundenbereich.

Die Divergenz des Strahles beträgt 6 mrad. Das Verhältniss von Flugstrecke zu Quelldurchmesser (L/D), ergibt sich aus der Geometrie zu ungefähr 150. Dies ermöglicht eine Ortsauflösung, die je nach Versuchsaufbau zwischen 100  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$  liegt.

Kapitel 2 dieser Diplomarbeit gibt einen Überblick über die Grundlagen der Radiographie sowie der Tomographie, und es werden Unterschiede zur Radiographie mit Röntgenstrahlung besprochen.

In Kapitel 3 wird der experimentelle Aufbau der Radiographiestation, das Detektorsystem und die zur Probenmanipulation zur Verfügung stehenden Hilfsmittel beschrieben.

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bilden neu durchgeführte Experimente. Speziell auf die Messungen mit wasserdurchlässigem Asphalt wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

Bei neuartigen Asphaltmischungen wird das Wasser nicht mehr über die Oberfläche, sondern über Poren in dem Asphalt von der Straße abgeführt. Um die Eigenschaften einer dieser Asphaltarten zu charakterisieren, wurde der Wasserfluß durch eine Probe tomographisch gemessen und kann in Echtzeit dargestellt werden. Um äußere Einflüsse zu simulieren, wurde der Versuch mit einer Probe wiederholt, deren Oberfläche mit Sand verschmutzt war. Die Ergebnisse dieser Messung und ein Vergleich zu der Messung ohne Verschmutzung werden in Abschnitt 4.3.3 dargestellt. Des Weitern wurde mit einer Probe, die auf eine Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser gekühlt war, untersucht wie sich das Verhalten des Asphalttes bei diesen Temperaturen ändert.

Weitere Experimente mit Fossilien und archäologischen Fundstücken werden in Kapitel 5 beschrieben.

Den Abschluss bilden eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf anstehende Experimente in Kapitel 6.

# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Physikalische Grundlagen

Elektromagnetische Strahlung wechselwirkt über drei verschiedene Prozesse (Compton-Streuung, Paarbildung und Photoeffekt) mit der Atomhülle. Jeder dieser drei Prozesse ist in charakteristischer Weise von der Kernladungszahl der Materie, mit der sie wechselwirken, abhängig. Im Gegensatz zu elektromagnetischer Strahlung kann man bei Neutronen keine solche generelle Aussage machen (siehe Diagramm 2.1), da Neutronen über die kurzreichweitige starke Wechselwirkung mit dem Atomkern wechselwirken. Hierbei kann es zu Streuung (kohärent oder inkohärent) oder Absorption kommen. Durch dieses unterschiedliche Verhalten von Röntgenstrahlung und Neutronen beim Durchgang durch Materie ergänzen sich diese zwei Methoden hervorragend. Sie liefern häufig komplementäre Informationen über den Aufbau der untersuchten Probe.

Die Streuung kann zumeist als unabhängig von der Geschwindigkeit der einfallenden Neutronen angenommen werden, wohingegen der Absorptionsquerschnitt reziprok von der Geschwindigkeit der Neutronen abhängig ist. Deshalb werden häufiger kalte und thermische Neutronen für radiographische Aufnahmen genutzt als epithermische oder schnelle Neutronen. Zur Einteilung und Bezeichnungen der verschiedenen Klassen von Neutronen siehe Tabelle 2.1.

Der totale Wirkungsquerschnitt thermischer Neutronen berechnet sich über folgende Formel:

$$\sigma_{tot} = \sigma_{Streu} + \frac{v_0}{v_n} \sigma_{Abs,2200} \quad (2.1)$$

wobei der Wert für  $\sigma_{Streu}$  sich additiv aus den Werten für kohärente  $\sigma_{coh}$  und inkohärente  $\sigma_{inc}$  Streuung zusammensetzt,  $v_0=2200 \text{ ms}^{-1}$  die Geschwindigkeit thermischer Neutronen,  $v_n$  die Geschwindigkeit der Neutronen und  $\sigma_{Abs,2200}$  der Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen ist.

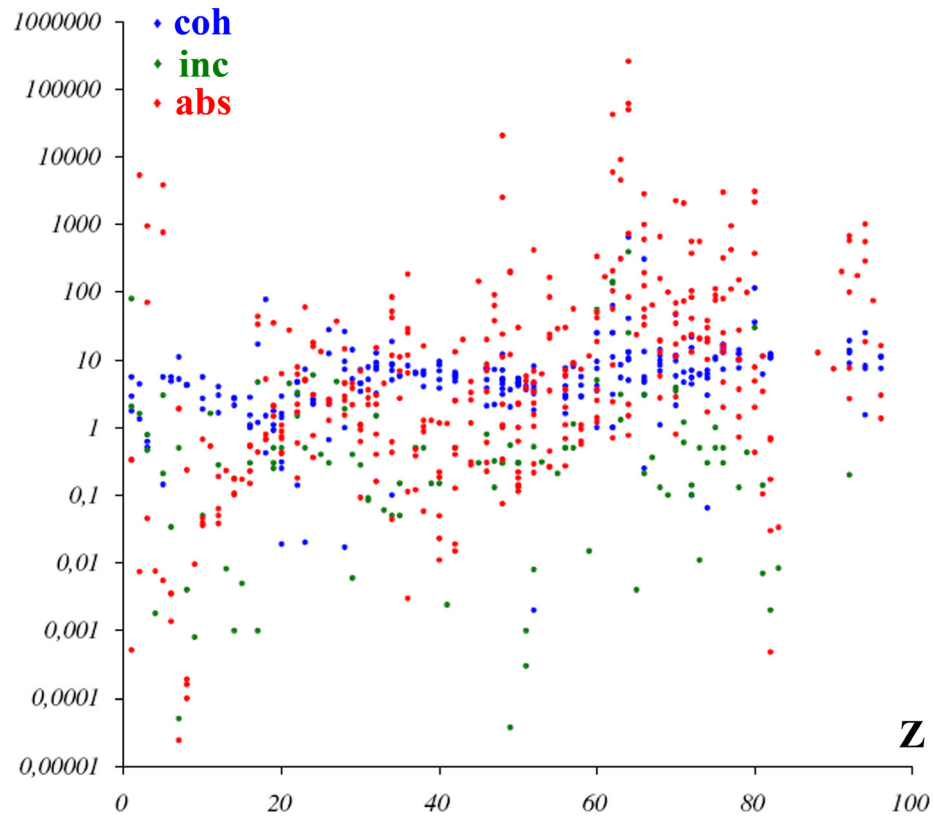


Abbildung 2.1: Darstellung der Wirkungsquerschnitte für Neutronen in barn. Es werden der kohärente Streuquerschnitt (in blau), der inkohärente Streuquerschnitt (in grün) und der Absorptionsquerschnitt (in rot) gezeigt. Quelle [Bal07]

Neutronen	Energie	Temperatur	Geschwindigkeit
ultrakalt	100 neV	1 mK	5 m/s
kalt	3 meV	40 K	800 m/s
thermisch	25 meV	300 K	2200 m/s
Splat neutronen	2 MeV	$10^{10}$	$10^7$ m/s

Tabelle 2.1: Charakteristische Neutronen Energien am ILL

In der Tabelle 2.2 sind Werte für die verschiedenen Streuquerschnitte  $\sigma$  und Abschwächungskoeffizienten  $\mu$  (zur Definition des Abschwächungskoeffizienten siehe Formel 2.3) angegeben. Die aufgeführten Elemente treten häufig bei der Neutronenradiographie auf. Bei Elementen, bei denen keine Isotopenbezeichnung angegeben ist, beziehen sich die Angaben auf das natürliche Isotopenverhältnis. Man kann aus der Tabelle auch erkennen, dass es bei einzelnen Elementen starke Unterschiede in den Streu- und Absorptionsquerschnitten zwischen einzelnen Isotopen gibt. Diese Differenz in den Wirkungsquerschnitten kann bei der Radiographie genutzt werden, um einen guten Kontrast zwischen diesen Isotopen zu erzielen und sie somit zu unterscheiden. So kann in einem Experiment leichtes Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) durch schweres Wasser ( $\text{D}_2\text{O}$ ) ersetzt werden. Eine weitere Anwendung, bei der starke Unterschiede im Abschwächungskoeffizienten  $\mu$  zwischen zwei Isotopen für die Radiographie genutzt wird, ist der  $^3\text{He}/^4\text{He}$  Phasenübergang [VO06]. Aufgrund der großen Absorptionsquerschnitte von Lithium, Bor, Cadmium und Gadolinium werden diese Elemente zur Abschirmung und als Beamstopp verwendet.

Isotop	$\sigma_{streu_{coh}}$ [barn]	$\sigma_{streu_{incoh}}$ [barn]	$\sigma_{absorb}$ [barn]	$\mu$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]
H	1,75	80,26	0,33	3,48
$^1\text{H}$	1,75	80,27	0,33	3,48
$^2\text{H}$	5,59	7,64	0,001	$3 \times 10^{-4}$
$^3\text{He}$	4,42	1,53	5333,0	100
$^4\text{He}$	1,34	0	0	0,025
Li	0,45	0,92	70,5	3,33
$^6\text{Li}$	0,51	0,46	940,0	50,31
$^7\text{Li}$	0,62	0,78	0,05	0,067
B	3,54	1,70	767,0	100,66
$^{10}\text{B}$	0,144	3,0	3835	540,15
Al	1,50	0,01	1,50	0,10
Cd	3,04	3,46	2520	117,08
Gd	29,3	151,0	49700	1509
$^{157}\text{Gd}$	650,0	394,0	259000	7884,61

Tabelle 2.2: Verschiedene Streuquerschnitte  $\sigma$  und Abschwächungskoeffizienten  $\mu$ . Angaben ohne Isotopenangaben beziehen sich auf das natürliche Isotopenverhältnis. Quelle: [LD04]

Die Abschwächung eines kollimierten Nadelstrahls bei Durchgang durch Materie verläuft exponentiell:

$$I = I_0 \exp(-\mu \Delta x) \quad (2.2)$$

Hierbei ist  $I_0$  die einfallende,  $I$  die gemessene Intensität,  $\mu$  der Abschwächungskoeffizient und  $\Delta x$  der in der Probe zurückgelegte Weg entlang einer geraden Linie.

Der Koeffizient  $\mu$  berechnet sich aus:

$$\mu = \sigma_{tot} \frac{\rho N_A}{M_{mol}} \quad (2.3)$$

( $\sigma_{tot}$ : totaler Wirkungsquerschnitt,  $\rho$ : Dichte der Probe,  $N_A$ : Avogadro Zahl und  $M_{mol}$ : Mol-Masse). Besteht die zu untersuchende Probe aus mehreren verschiedenen Stoffen, so muß über die einzelnen Abschwächungskoeffizienten summiert werden.

$$\mu = \sum_i \sigma_{tot,i} \frac{\rho_i N_A}{M_{mol,i}} \quad (2.4)$$

Für eine inhomogene Probe gilt entsprechend:

$$I = I_0 \exp\left(-\int_C \mu(\vec{x}) d\vec{x}\right) \quad (2.5)$$

## 2.2 Grundlagen der Neutronen-Radiographie

Bei der Neutronen Radiographie wird ein zweidimensionales Bild des nach Gleichung 2.5 abgeschwächten Neutronenstrahls aufgenommen. Durch Logarithmierung läßt sich hieraus der Abschwächungskoeffizient  $\mu$  gewinnen.

$$\int_C \mu(\vec{x}) dx = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2.6)$$

Auf die orts aufgelöste Detektion von Neutronen mittels Szintillatoren und das Detektorsystem bei NEUTROGRAPH wird in Kapitel 3.4 näher eingegangen.

Das aufgenommene Bild ist noch fehlerbehaftet und bedarf einiger Korrekturen. Deren Ursache rühren sowohl vom Detektor (Dunkelstrom, Offset), als auch vom Versuchsaufbau (Gammastrahlung) her. Es wird also nicht die Intensität, sondern der sogenannte Grauwert  $g$ , der sich gemäß Gleichung 2.7 zusammensetzt, gemessen.

$$g = Q \times I + D \quad (2.7)$$

$Q$  bezeichnet hierbei einen Qualitätsfaktor, der unter anderem durch die Lichtausbeute des verwendeten Szintillators und die Quanteneffizienz des CCD Chips bestimmt wird.  $D$  steht für den Dunkelstrom und Kameraoffset (siehe unten).

Im Folgenden werden diese Fehlerquellen im Einzelnen angesprochen und einige Methoden aufgezeigt, diese Fehler zu minimieren.

### Dunkelstrom

Der Dunkelstrom entsteht durch thermische Anregung der Elektronen im Basismaterial des CCD Chips. Er ist linear von der Chiptemperatur und der Belichtungszeit abhängig. Um den Dunkelstrom zu reduzieren, wird deshalb der Chip der Kamera gekühlt.

### Offset

Der Offset ist wie der Dunkelstrom eine Eigenschaft der jeweils verwendeten Kamera. Er ist ein positiver Wert, der auf das Signal addiert wird, bevor dieses ausgelesen wird.

Sowohl Dunkelstrom als auch Offset lassen sich durch Abziehen eines Dunkelbildes von den Rohdaten korrigieren. Dazu wird bei geschlossenem Strahl und gleichen Kameraeinstellungen wie bei der Messung, ein Bild aufgenommen. Dieses wird bei der Datenverarbeitung von den unbearbeiteten Daten abgezogen.

### Strahl- und Detektorinhomogenität

Die Intensität des Strahles ist nicht gleichmäßig über das gesamte Strahlprofil verteilt, sondern der Strahl ist im Zentrum intensiver, als am Rand [VO06]. Unter anderem führt dies dazu, dass auf der unbearbeiteten Radiographie Helligkeitsunterschiede auftreten, die keine physikalische Eigenschaft der Probe darstellen.

Zur Korrektur dieses Effektes nimmt man vor Beginn der Messung ein, bei langen Messungen auch während der Messung (s. nächster Abschnitt), Bilder des Strahls ohne Probe und Dunkelbilder auf. Mit diesem Strahlbild (open beam) werden die Daten durch Division normalisiert.

Für Gleichung 2.6 ergibt sich mit diesen Korrekturen:

$$\int_C \mu(\vec{x}) dx = -\ln\left(\frac{g-D}{g_0-D}\right) = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2.8)$$

In Abbildung 2.2 sind die oben erwähnten Korrekturen dargestellt. Auf der linken Seite sieht man die Rohdaten ohne jegliche Korrektur. Die rechte Seite zeigt die Radiographie nach Abzug des Dunkelbildes, Normalisierung mit dem Strahlbild und Logarithmierung.

Außerdem gibt es noch weitere Fehlerquellen, die im Folgenden angesprochen werden.

### Szintillatorabbrand

Damit wird der Effekt beschrieben, der bei längeren Messzeiten (länger als

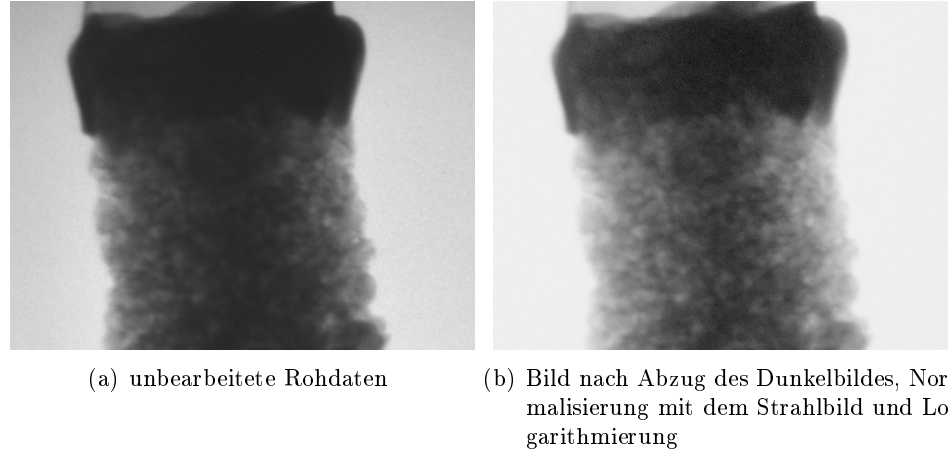


Abbildung 2.2: Bearbeitungsschritte einer Radiographie

einige Minuten) dazu führt, dass sich die Sensibilität des Szintillators verschlechtert und somit die Lichtausbeute verringert. Dieser Effekt ist abhängig von der Form der untersuchten Probe, da im Schatten der Probe weniger Neutronen den Szintillator treffen, aber auch von der Vorgeschichte des verwendeten Szintillators.

Eine Möglichkeit auf diesen Effekt zu korrigieren, ist die Aufnahme mehrerer Strahlbilder, nicht nur vor und nach der Messung, sondern auch während dieser. Für die Korrektur der Daten wird dann zwischen den Strahlbildern linear interpoliert [VO06].

### **Gammastrahlung**

Die hier auftretende Gammastrahlung kann von zwei unterschiedlichen Quellen herrühren.

1. Gammastrahlung, die bei der Kernspaltung im Brennelement entsteht und durch das Strahlrohr in die Kasematte. Da sich NEUTROGRAPH an Ende eines gradlinigen Leiters befindet, kann Gammastrahlung ungehindert mit den Neutronen durch den Leiter in die Kasematte gelangen. Um diesen Gammahintergrund zu reduzieren, werden an anderen Strahlplätzen am ILL gekrümmte Leiter eingesetzt.
2. Gammastrahlung, die durch Wechselwirkung der Neutronen mit Material in der Experimentierzone entsteht. Dies ist durch die Aktivierung der Probe unvermeidlich und kann durch gute Abschirmung des Aufbaues verringert werden. Zum Aufbau des Experimentes und Abschirmung siehe Kapitel 3.3.

Gammastrahlung, die den CCD Chip der Kamera trifft, sättigt die getroffenen Pixel und führt dazu, dass Information über die Probe verloren



geht. Diese Bildfehler, die als helle Punkte auf der Aufnahme erscheinen, lassen sich sowohl bei Einzelaufnahmen, als auch bei Bilderreihen durch Filter beheben.

Einen weitergehende Diskussion der Fehlerreduktion findet sich in [Bal07].

## 2.3 Grundlagen der Neutronen-Tomographie

Die Tomographie erlaubt es, aus den zweidimensionalen Radiographiaufnahmen eine dreidimensionale Dichteverteilung der untersuchten Objekte zu rekonstruieren. Dazu wird das Objekt unter verschiedenen Winkeln radiografiert und am Computer durch geeignete Transformationen ein dreidimensionales Bild zusammengesetzt.

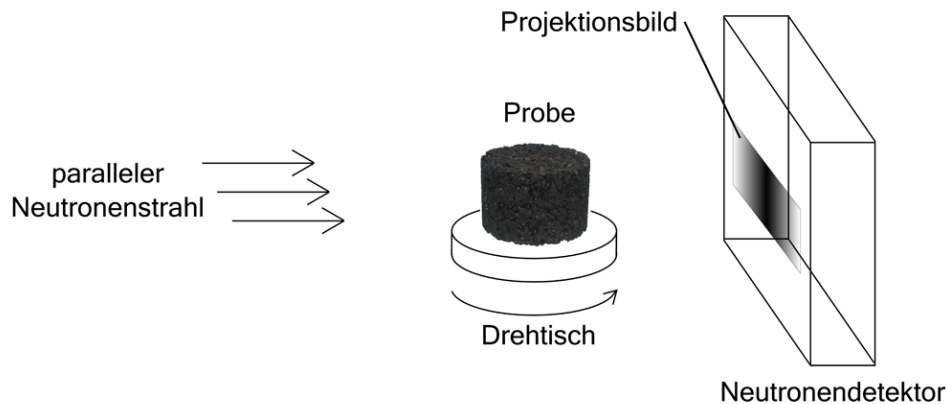


Abbildung 2.3: Prinzip der Tomographie. Der von links kommende Neutronenstrahl trifft die Probe und wirft ein Schattenbild auf den Detektor. Die Probe befindet sich auf einem Drehtisch, der es ermöglicht sie um die vertikale Achse zu drehen. Für jeden Winkelschritt wird ein Bild aufgenommen, aus den am Computer eine dreidimensionale Rekonstruktion der Probe errechnet wird.

Bei der aus der Medizin bekannten Röntgen-Computer-Tomographie werden meist punktförmige Quellen verwandt. Hierbei handelt es sich um eine sogenannte Fächergeometrie. Im Gegensatz dazu arbeitet man bei der Neutronentomographie in der Regel mit einem parallelen Strahl. Bei dieser parallelen Tomographie wird das zu untersuchende Objekt in dem Strahl gedreht. Bei dieser Geometrie ist es nicht nötig um  $2\pi$  zu drehen, wie bei der Fächergeometrie. Es reicht aus, das Objekt um  $\pi$  zu drehen, da die Bilder für den Winkel  $\varphi + \pi$  symmetrisch zu den Bildern für  $\varphi$  sind und somit keine

neue Information liefern. Im Folgenden wird nur auf eine parallele Strahlgeometrie eingegangen.

In der parallelen Geometrie können zudem alle horizontalen Ebenen unabhängig voneinander rekonstruiert werden. Die Daten, die zu einer Ebene gehören und diese aus verschiedenen Winkeln projizieren, nennt man Sinogramm. Mit Hilfe der gefilterten Rückprojektion werden diese Sinogramme rekonstruiert. Geeignete Computerprogramme fügen diese einzelnen Schichten zu einer dreidimensionalen Repräsentation des Objektes zusammen. Solche Verfahren werden ausführlich in [Bor02] erläutert.

Bei einer standardmäßig durchgeführten Tomographie bei NEUTROGRAPH werden die  $180^\circ$ , um die die Probe gedreht wird, typischerweise in 800 Winkelschritte unterteilt. Von diesen 800 Winkeln werden jeweils, wie bei der Radiographie auch, mehrere Aufnahmen (frames) gemacht, um durch die bessere Statistik Einflüsse, wie zum Beispiel die Sättigung eines Kamerapixels durch Gammastrahlung, auszugleichen (siehe Abschnitt 2.2). Damit liegt die Dauer einer Tomographie im Bereich von einigen Sekunden bis zu einigen Stunden, je nach Belichtungszeit und Anzahl der Aufnahmen.

Mit unserer Anlage ist es möglich schnelle Tomographien durchzuführen [VO06]. Als „schnelle Tomographie“ wird in dieser Arbeit eine Tomographie bezeichnet, deren Aufnahmezeit im Bereich von einigen Sekunden liegt. Um diese geringe Aufnahmezeit zu erhalten, werden dabei weniger Winkelschritte als bei einer gewöhnlichen Tomographie gemacht, außerdem wird pro Schritt jeweils nur ein frame aufgenommen.

## Kapitel 3

# Aufbau der Radiographiestation

### 3.1 Strahlrohr

Die NEUTROGRAPH Station befindet sich auf Level C innerhalb des Reaktorgebäudes des ILL 15,3m vom Beginn des Strahlrohres H9 entfernt. In Abbildung 3.1 ist die Station rot eingefärbt zu erkennen. Der Reaktor wird 50 Tage mit einem Brennelement aus hochangereichertem Uran betrieben. Durch Moderation mit  $D_2O$  (schwerem Wasser) werden die Neutronen auf thermische Energien (siehe Tabelle 2.1) abgebremst.

Den Strahl teilt sich die Station mit LOHENGRIN, einem Spektrometer, zur Untersuchung von Spaltungsprodukten.

Dazu werden Proben auf einem beweglichen Schlitten nahe an das Brennelement gebracht. Die elektrisch geladenen Spaltprodukte werden dann mit Hilfe eines Dipolmagneten aus dem Strahlrohr extrahiert. Anschließend werden die Teilchen durch einen gekrümmten Plattenkondensator geführt. Die Neutronen werden nicht durch den Magneten von LOHENGRIN beeinflusst und erreichen die Experimentierzone von NEUTROGRAPH ungestört. Allerdings wird das Profil des Strahls in H9 durch die Position des Schlittens bei LOHENGRIN beeinflusst. Da die Position des Schlittens jedoch normalerweise während einer Messung an der Station nicht verändert wird, hat dies keinen Einfluß auf die Messung.

### 3.2 Strahleigenschaften

Um eine Radiographie Anlage zu charakterisieren, gibt es mehrere charakteristische Größen. Dies sind der am Experiment zur Verfügung stehende **Fluß**, die **Homogenität** und das **Spektrum** des Strahles und die **Divergenz**.

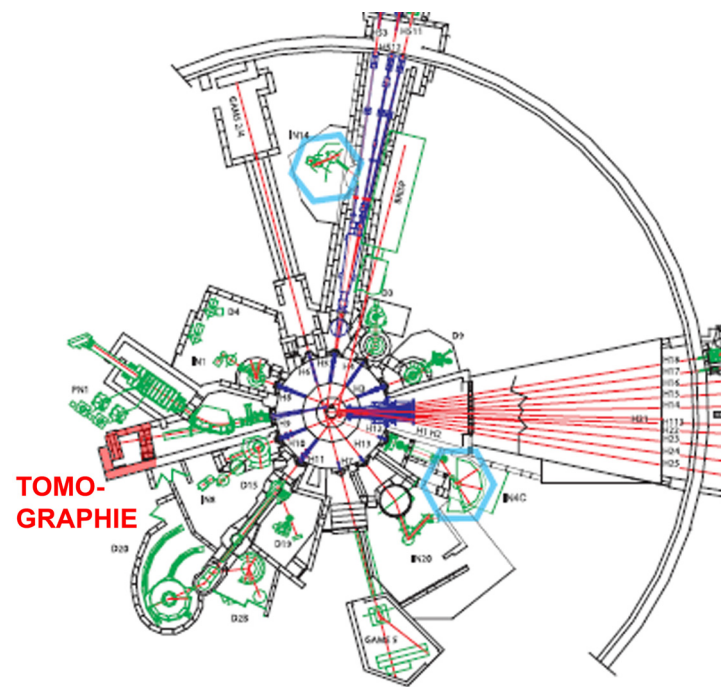


Abbildung 3.1: Übersicht über die Experimente auf Niveau C des ILL.  
Quelle:[ILL]

**Fluß**

2002 und 2005 wurde der Fluß des Strahles bestimmt. Dazu jeweils Goldfolien Aktivierungsmessungen durchgeführt [VO06]. Bei diesen Messungen wurde der am Experiment zur Verfügung stehende thermische Neutronenfluß zu  $3 \times 10^9 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  bestimmt. Dieser hohe Fluß macht Aufnahmezeiten von bis zu  $100 \mu\text{s}$  möglich.

**Homogenität**

Der Strahl ist in einem Gebiet von  $91 \times 212 \text{ mm}^2$  zu 20% homogen und 30% homogen in einem Bereich von  $116 \times 212 \text{ m}^2$  [VO06]. Durch die Normalisierung der aufgenommenen Radiographie mit einem Strahlbild (vgl. Abschnitt 2.2) stellen Inhomogenitäten in dieser Größenordnung kein Problem für eine Messung dar.

**Spektrum**

Die Energie der an der Tomographie Station ankommenden Neutronen ist Maxwell-verteilt mit dem Maximum bei der Wellenlänge von thermischen Neutronen ( $1,8 \text{ \AA}$ ). Allerdings ist der Anteil epithermischer und schneller Neutronen recht hoch, da das Strahlrohr H9 auf die heiße Quelle des Reaktors gerichtet ist. Eine genaue Charakterisierung des Strahlspektrums liegt bisher noch nicht vor. Es existieren allerdings Monte-Carlo Simulationen des Spektrums [Ballhausen:07].

**Divergenz**

Die Divergenz ergibt sich aus der Geometrie zu 6 mrad. Als weiteres charakteristisches Maß gibt man das sogenannte L/D Verhältnis der Station an. Es gibt das Verhältnis von Abstand Quelle-Probe (L) zu Quellgröße (D) an. Rechnerisch erhält man für dieses L/D Verhältnis für NEUTROGRAPH einen Wert von 150. Zwei mit unterschiedlichen Methoden durchgeführte Messungen in den Jahren 2002 und 2005 bestätigen diesen Wert, siehe [VO06].

Eine besseres L/D Verhältnis kann durch Kollimation des Strahles erreicht werden. Dazu werden parallel angeordnete Lamellen so in den Strahl gebracht, dass der divergentere Anteil des Strahles durch die Lamellen absorbiert wird und nur der parallele Anteil des Strahles den Kollimator ungestört passieren kann. Auf diese Weise wird der Strahl entweder horizontal oder vertikal kollimiert; um eine Kollimation in beiden Dimensionen zu erhalten, muss man einen Aufbau aus zwei um  $90^\circ$  gegeneinander gedrehten Kollimatoren verwenden. Dadurch verliert der so kollimierte Strahl natürlich an Intensität, allerdings kann man so einen höheren L/D Wert und damit eine höhere Ortsauflösung erzielen. Solche Lamellen Kollimatoren nennt man

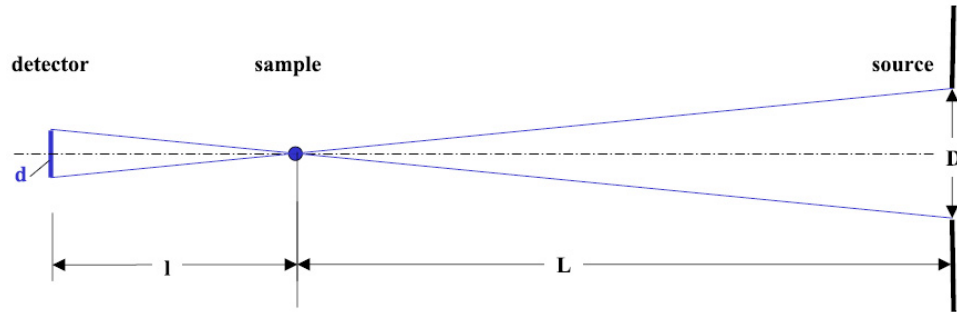


Abbildung 3.2: Zur Bestimmung des  $L/D$  Verhältnisses. Quelle: [VO06]

Soller Kollimatoren.

Ein optionales Kollimatorsystem ist im Augenblick in Planung. Damit wird es möglich die Station in zwei Modi zu betreiben. Der erste Modus (ohne Kollimator) bietet eine hohe Zeitaufösung und geringe Kollimation und der zweite Modus (mit Kollimator) eine hohe Ortsaufösung mit längerer Aufnahmezeit.

Eine weitere Methode zur Kollimation besteht in der Benutzung von microchannel plates (MCP). Diese einige Millimeter dicken Platten sind mit Löchern im Mikrometerbereich versehen durch die der Strahl fällt. Dadurch wird ebenfalls ein hoher  $L/D$  Wert erreicht. Die Platten werden aus Glas hergestellt, das wahlweise mit Lithium, Bor, Cadmium oder Gadolinium versetzt werden kann [TF06]. Durch diesen Zusatz werden die Neutronen in der MCP absorbiert und somit der Strahl kollimiert. Zu Testzwecken wurden zwei solche MCP's der Firma Nova Scientific angeschafft.

Der Vorteil von MCP Kollimatoren gegenüber Soller Kollimatoren ist der geringe Platzbedarf und die gleichzeitige Kollimation in zwei zueinander senkrecht stehenden Ebenen. Ein weiterer Vorteil dieser Kollimationsmethode ist, dass das von ihm erzeugte Muster in der Regel vom Szintillator nicht mehr aufgelöst werden kann und wenn, dann schon bei kürzeren Abständen zwischen Kollimator und Detektor durch die Restdivergenz eliminiert wird.

### 3.3 Kasematte

Die Kasematte schirmt die Umgebung gegen die, in der Experimentierzone auftretende Strahlung, ab. Sie ist  $2,5\text{m} \times 2,5\text{m} \times 3\text{m}$  groß und teilweise aus Schwerbetonblöcken aufgebaut. Abbildung 3.3 zeigt den Grundriss der Station rot eingefärbt.

Der Neutronenstrahl wird durch einen Shutter aus Schwerbeton, der noch vor der Kasematte montiert ist, abgeschirmt (In Abbildung 3.3 grün eingefärbt). Dieser Shutter ist 1m dick und lässt sich innerhalb von ca. 40 Sekunden öff-

nen und schließen. Ein zweiter Shutter aus 50mm Polyethylen, das mit Bor angereicht ist, befindet sich auf der Innenseite der Kasematte. Dieser schnelle Strahlverschluss, auch „fast shutter“ genannt, wird mit Druckluft betrieben und lässt sich innerhalb einer Sekunde öffnen und schließen.

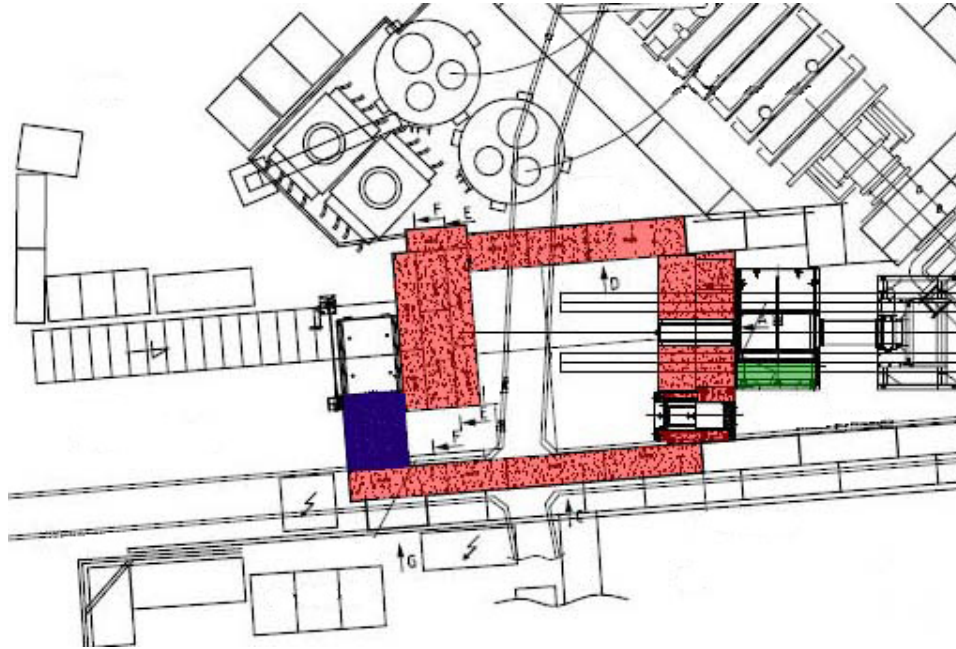


Abbildung 3.3: Grundriss der NEUTROGRAPH Station. Quelle:[VO06]. Die Betonabschirmung ist rot, die Tür blau und der Hauptshutter grün dargestellt. Der Kondensator von LOHENGRIN ist in der oberen rechten Ecke zu erkennen.

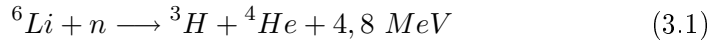
Es gibt verschiedene Sicherheitsvorkehrungen, die verhindern, dass man bei zu hoher Strahlenbelastung die Kasematte betritt. Vor Beginn des Experimentes muß man die Kasematte durch eine Tür aus Schwerbeton schließen (In Abbildung 3.3 blau dargestellt). Die Tür wird durch einen Schlüssel verriegelt. Dieser Schlüssel dient gleichzeitig auch zum Öffnen des Shutters aus Schwerbeton. Damit wird verhindert, dass der Neutronenstrahl geöffnet wird, während die Tür der Kasematte offen ist. Nach der Messung bleibt der Schlüssel in der Kontrollbox zur Shutteröffnung arretiert, bis die Gammastrahlung in der Kasematte unter  $100 \mu\text{S}/\text{h}$  gefallen ist. Erst danach läßt sich der Schlüssel abziehen und die Tür öffnen. Diese Gammastrahlung stellt nicht nur als Strahlenbelastung, sondern auch als zusätzliche Fehlerquelle bei den Experimenten ein Problem dar (s. Abschnitt 2.2).

Um so wenig wie möglich gestreute Neutronen und Gammastrahlung zu erzeugen, ist das Beamfenster, durch das der Strahl in die Kasematte eintritt aus Aluminium, da dieses einen geringen Streuquerschnitt für Neutronen hat.

Außerdem ist die Kasematte noch mit 5mm starken  $B_4C$  Matten ausgekleidet, um gestreute Neutronen zu absorbieren.  $B_4C$  hat den Vorteil, dass es Neutronen absorbiert, ohne radioaktiv zu werden. Als Beamstopp am hinteren Ende der Kasematte wird ein Target aus  ${}^6Li$  verwendet. Dieses hat zwar einen etwas geringeren Absorbtiionsquerschnitt als Bor, produziert aber keine Gammastrahlung.

### 3.4 Detektor

Als Detektor wird eine Kombination aus Szintillator und CCD Kamera verwendet. Der Szintillator wandelt die auftreffenden Neutronen über die folgende Reaktion in Tritium und  $\alpha$ -Teilchen um.



Das Tritium und die  $\alpha$ -Teilchen geben ihre kinetische Energie durch Anregung und Ionisation an das umgebende Szintillatormaterial ab und erzeugen dabei Photonen. Die Reichweite beträgt typischerweise  $50 \mu\text{m}$ . Hierdurch wird auch die Ortsauflösung des Szintillators begrenzt. Der verwendete Szintillator ist um einen Faktor  $10^4$  weniger empfindlich für Gammastrahlung als für Neutronen. Das so entstandene zweidimensionale Bild wird von einer CCD Kamera aufgezeichnet.

Um zu verhindern, dass die CCD auch Gammastrahlung, die mit den Neutronen durch das Strahlrohr in die Kasematte gelangt, aufzeichnet, wird das Bild über zwei Spiegel zur CCD geführt. Damit sich so wenig wie möglich Material im Strahl befindet, das zusätzliche Gammastrahlung erzeugt, wurde der erste Spiegel speziell angefertigt. Er besteht aus einem Siliziumwaver, der mit Aluminium beschichtet wurde. Der zweite Spiegel ist ein normaler Glasspiegel. Der Szintillator, die Spiegel und das verwendete Objektiv befinden sich in einem lichtdichten Gehäuse, um das Bild auf dem Szintillator nicht durch äußere Lichtquellen zu überblenden. Dieses Gehäuse besteht aus Aluminium, um die Aktivierung des Gehäusematerials möglichst gering zu halten. Eine ausführlichere Beschreibung des Aufbaus des Kamerakastens und der Spiegel ist in [Gil03] zu finden, der im Rahmen seiner Diplomarbeit dieses Gehäuse konstruierte.

Sowohl das Gehäuse, als auch die Kamera werden durch Bleibarren vor Gammastrahlung geschützt, diese werden wiederum durch  $B_4C$  Matten vor Aktivierung durch gestreute Neutronen geschützt. Es ist sehr wichtig die Kamera und damit den CCD Chip vor Gammastrahlung zu schützen, da diese Pixel sättigt und somit Information verloren geht (siehe Abschnitt 2.2).

Zur Aufnahme des vom Szintillator erzeugten Bildes stehen seit diesem Jahr zwei CCD Kameras zur Verfügung:



- SensiCam von PCO imaging
- iXon von Andor

Die SensiCam eignet sich besonders gut für Aufnahmen mit kurzen Belichtungszeiten, da ihre kürzeste Belichtungszeit 100 ns ist. Der CCD Chip hat die Abmaße  $9,9 \mu\text{m} \times 9,9 \mu\text{m}$  und eine Auflösung von  $640 \times 480$  Pixel [PCO02]. Die schnelle Belichtungszeit wird durch eine spezielle Bauweise des CCD Chips erreicht. Diese Bauart wird als „interline sensor“ bezeichnet. Hierbei wechseln sich lichtempfindliche mit abgedunkelten Spalten ab. Beim Auslesen müssen die Ladungen jeweils nur um eine Spalte verschoben werden und nicht, wie bei herkömmlichen CCD Chips über die gesamte Chipbreite. Der lichtempfindliche Teil des CCD steht nun wieder für die Belichtung zur Verfügung, während gleichzeitig der abgedunkelte Teil ausgelesen wird. Für eine eingehendere Beschreibung der verschiedenen Betriebsarten der PCO Kamera siehe [Fer03].

Der CCD Chip der iXon Kamera kann auf bis zu  $-75^\circ\text{C}$  heruntergekühlt werden. Damit wird der Dunkelstrom stärker verringert als bei der PCO Kamera. Diese Kamera wird bei Messungen mit einem schwachen Signal eingesetzt. Die Chipgröße dieser Kamera beträgt  $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$  und hat eine Auflösung von  $1004 \times 1002$  Pixel [And03].

Um das Bild von dem Szintillator auf den Chip abzubilden, stehen drei Objektive mit den Brennweiten 35 mm, 50 mm und 85 mm der Firma Nikon zur Verfügung. Außerdem kann man zwischen zwei verschiedenen langen Kamerakästen mit einem optischen Weg von 1000 mm bzw. 700 mm wählen. Das größte Blickfeld ergibt sich mit dem langen Kamerakasten und der iXon Kamera, wenn das 35 mm Objektiv montiert ist. Seine Größe beträgt  $(22,60 \pm 0,05) \text{ cm} \times (22,60 \pm 0,05) \text{ cm}$ . Man kann damit also den kompletten Strahlquerschnitt aufnehmen. Mit der PCO Kamera, dem kurzen Kamerakasten und dem 85 mm Objektiv ist das Blickfeld am kleinsten. Es hat eine Größe von  $(4,59 \pm 0,03) \text{ cm} \times (3,43 \pm 0,03) \text{ cm}$ , siehe Abb.3.4. Die unterschiedlichen Bildgrößen kommen auch durch die verschieden großen Chips der beiden Kameras zustande.

### 3.5 Probenumgebungen

Um die jeweiligen Proben in den Strahl zu bringen und Tomographien mit ihnen durchführen zu können sind verschiedene Hilfsmittel an der Station vorhanden.

Es steht ein Scherentisch zur vertikalen Positionierung der Probe zu Verfügung. Er kann bis zu 300 kg tragen und hat einen Hub von 80 cm. Eine Lineareinheit vom Typ LF 5 der Firma ISEL [ISE] mit einer Positioniergenauigkeit von 0,02 mm sorgt für die exakte Positionierung der Probe. Diese Lineareinheit dient dazu den Versuchsaufbau in den Strahl zu bewegen und

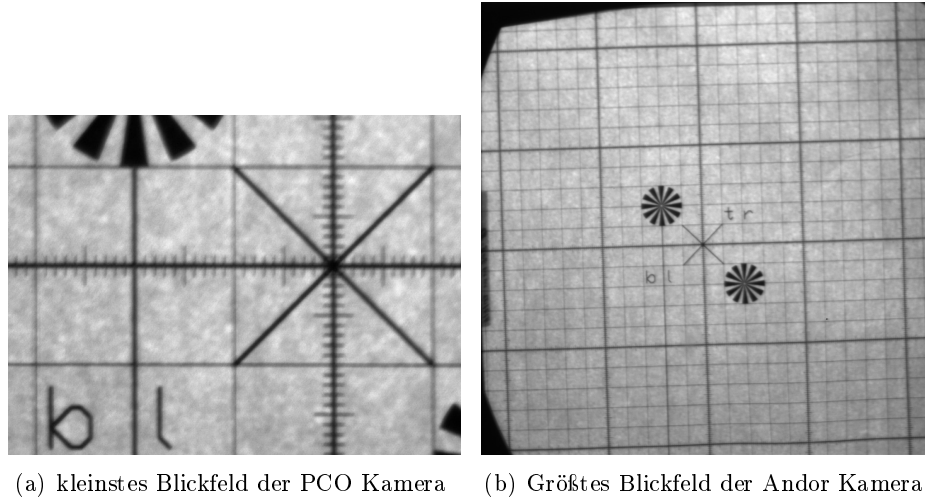


Abbildung 3.4: Vergleich der verschiedenen Blickfelder

für Strahlbilder, die Probe wieder herauszufahren. Diese Positioniergenauigkeiten sind nötig, damit nach einem Strahlbild während einer Tomographieaufnahme die Probe wieder ihre ursprüngliche Position vor dem Szintillator erreicht. Diese Lineareinheit ist für eine Belastung bis 30 kg ausgelegt. Ihr Fahrweg beträgt 800 mm.

Zur Ausrichtung und zum Drehen der Probe bei einer Tomographieaufnahme stehen mehrere Drehtische zur Verfügung. Der häufigste verwendete Drehtisch ist ein Rundschalttisch mit Drehteller der Firma ISEL [ISE]. Seine Schrittweite beträgt  $0.0375^\circ$ / Schritte (4800 Schritte ergeben  $180^\circ$ ). Er kann bis zu 10kg tragen. Des Weiteren steht für kleinere Proben noch ein Drehtisch der Firma Micos mit einer Schrittweite von  $0,0025^\circ$  (72000 Schritte für  $180^\circ$ ) zur Verfügung. Allerdings kann dieser nur 500 Gramm tragen.

Seit diesem Jahr steht außerdem noch eine Lineareinheit Typ LF 4 zur Verfügung. Ihre technischen Kennziffern entsprechen denen der LF 5, der Fahrweg beträgt 100 mm.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Möglichkeit geschaffen, Wasser zur Probenmanipulation innerhalb der Kasematte zu verwenden. Die Regelung des Wasserflusses ist von außerhalb der Kasematte über eine Pumpe möglich.

Durch den Aufbau der Pumpe außerhalb der Kasematte ist es nun möglich, während einer Messung den Wasserfluß zu verändern, ohne die Kasematte betreten zu müssen.

## Kapitel 4

# Visualisierung des Wasserflusses durch Asphalt

Im modernen Straßenbau werden immer höhere Anforderungen an den Straßenbelag gestellt. Er muss dem stärker werdenden Verkehrsaufkommen standhalten, soll den Geräuschpegel reduzieren und bei Regen das auf der Straße stehende Wasser schnell durch Versickerung abführen. Letzteres beugt gleichzeitig der großflächigen Versiegelung des Untergrundes durch Asphaltflächen vor.

Zu diesem Zweck wurden spezielle Asphaltarten entwickelt, die besonders viele durch die Asphaltdecke hindurchgehende Hohlräume enthalten, um Wasser schnell abfließen zu lassen. Sie sind in der Abbildung 4.1 hellgrau eingefärbt.

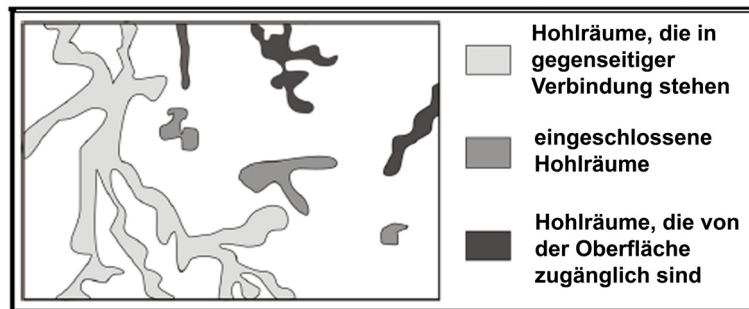


Abbildung 4.1: Darstellung der verschiedenen Hohlräume in der Asphaltdecke. Aus [BR05]

Der von der TU Darmstadt durchgeführte Forschungsauftrag „Optimierung der Zusammensetzung wasserdurchlässiger Asphaltbefestigungen“ [BR05] befaßt sich mit diesen speziellen Sorten von Asphalt, dem sogenannten offenporigen Asphalt.

Ein typischer Aufbau eines Straßenbelages ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Die Proben stellen Asphalt dar, der als Asphaltdecke im Oberbau des Straßenbelages verwendet wird (in Abb 4.2 als „Decke“ bezeichnet).

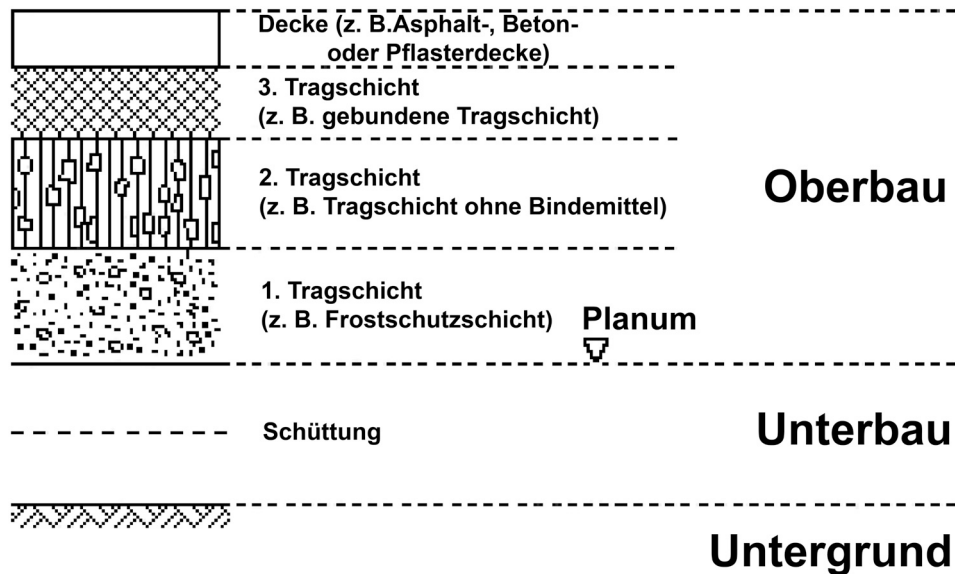


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau eines typischen Straßenbelages nach [FGS98b]

Ziel der bei NEUTROGRAPH durchgeführten Versuche war es, sowohl die Größe der sich im Asphalt befindenden Hohlräume festzustellen, als auch den Wasserfluß durch eine Probe zu quantifizieren und dynamisch sichtbar zu machen. Aus den Ergebnissen dieser Messungen können Rückschlüsse auf die optimale Zusammensetzung von wasserdurchlässigem Asphalt gezogen werden.

Für diese Messung wurden von der TU Darmstadt, Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt, zwei Marshall Probenkörper (MPK) zur Verfügung gestellt. Diese Proben waren zylindrisch und hatten eine Höhe von  $(66 \pm 1)$  mm und einen Durchmesser von  $(102 \pm 1)$  mm (Probe Nr. 1) bzw. eine Höhe von  $(65 \pm 1)$  mm und einen Durchmesser von  $(101 \pm 1)$  mm (Probe Nr. 2). Probe Nr.1 war mit einer gelben „4“ gekennzeichnet, Probe 2 mit einer „5“. Das Material, aus dem die Proben bestehen, wird in der Forschungsarbeit als „WA 0-8\_5,5\_45\_OPU“ bezeichnet. Dabei steht WA für **W**asserdurchlässigen **A**sphalt, 0-8 für die Asphaltart 0/8, 5,5 für den Bindemittelanteil von 5,5%, 45 für die Bindemittelart und OPU für die Sieblinienlage. Das Mischungsverhältnis der einzelnen Bestandteile, sowie Hohlraumgehalt und Bindemittelanteil der Probe sind in Tabelle 4.1 wiedergegeben.



(a) Probe 2 seitlicher Blick

(b) Probe 2 Blick von oben

Abbildung 4.3: Ansicht des zweiten Marshallprobenkörpers

Als Füller wurde Dolomitstein, als Splitt Diabas und als Bindemittel polymermodifiziertes Bitumen (PmB) verwendet. Alle Angaben zur Zusammensetzung der Probenkörper wurden dem Forschungsbericht [BR05] entnommen.

Die chemische Zusammensetzung von Dolomit ist  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Für Diabas ist die Angabe der enthaltenen Elemente leider nicht so einfach, da die Bezeichnung „Diabas“ nur einen Sammelbegriff für alte Basaltgesteine ist und somit hängen die Elemente, die im Gestein enthalten sind, von der Region ab, in der das Gestein gebrochen wurde. Auch die genauen Inhaltsstoffes des PmB waren nicht bekannt.

Bezeichnung	WA 0-8_5,5_45_OPU
Füllergehalt [M.-%]	4,0
Sandgehalt [M.-%]	6,9
Splittgehalt [M.-%]	89,1
Bindemittelgehalt [M.-%]	5,5
Hohlraumgehalt [Vol.-%]	21,8

Tabelle 4.1: Zusammensetzungen der Proben. Quelle: [BR05]

Um herauszufinden, welche Elemente in den Proben enthalten waren, wurde die Zusammensetzung der Proben nach einer Kurzzeitaktivierung mit Neutronen durch die Aufnahme eines Gammaspektrums bestimmt. Die genaue Kenntnis der in der Probe vorhandenen Elemente dient auch der Entscheidung, ob eine Probe überhaupt für längere Zeit bestrahlt werden kann.

Diese Aktivierung fand am 29.06. statt. Dabei wurde Probe Nummer 2 fünf Minuten lang dem Strahl von NEUTROGRAPH ausgesetzt. Aufgrund der hohen Aktivität der Probe nach der Aktivierung wurde das erste Gammapektrum am 3.7. aufgenommen. Es ergab sich die in Tabelle 4.2 gezeigten Zusammensetzungen. Bei einer Messzeit von 400 Sekunden betrug die Totzeit des Detektors 3,66%. Der Detektor wurde durch die Aktivität der Probe im unteren Energiebereich gesättigt. Deshalb wurde am 11.07. ein zweites Gammapektrum aufgenommen. Die Messzeit für die Aufnahme des zweiten Gammapektrums betrug bei dieser Messung 138 Sekunden mit einer Detektortotzeit von 0%. Das Resultat ist in Tabelle 4.3 aufgelistet.

Während der ersten Messung lag die Aktivität des  $^{24}\text{Na}$  um einen Faktor 100 über der Aktivität der anderen aufgeführten Isotope und verursacht damit 87,46% der gemessenen Aktivität. Die Zeit, die bis zur Aufnahme des zweiten Gammapektrums vergangen ist, entspricht 13 Halbwertszeiten dieses Isotopes. Es ist daher nicht verwunderlich, dass das Natrium nicht in der zweiten Messung erscheint. Da beide Proben mit Material, das im dem selben Abbauggebiet gebrochen wurde und auch auf identische Weise hergestellt wurden, wurde davon abgesehen, ein Gammapektrum der Probe Nummer 1 aufzunehmen.

Außerdem wurde zur Bestimmung des Abschwächungskoeffizienten  $\mu$  ein Bild der Probe genommen. Es ergab sich für die Proben mit einem Durchmesser von 100 mm eine Transmission von 3% bei einer Belichtungszeit von 50ms.

Mutterkern	$\sigma_{tot}$ [barn]	Isotop	Halbwertszeit	Anteil an der Aktivität
$^{23}\text{Na}$	3,81	$^{24}\text{Na}$	14,96h	88,51%
$^{41}\text{K}$	2,66	$^{42}\text{K}$	12,36h	1,36%
$^{45}\text{Sc}$	51,0	$^{46}\text{Sc}$	83,81d	1,70%
$^{58}\text{Fe}$	29,28	$^{59}\text{Fe}$	44,51d	0,94%
$^{63}\text{Cu}$	9,7	$^{64}\text{Cu}$	12,701h	6,74%
$^{139}\text{La}$	18,59	$^{140}\text{La}$	1,678d	0,75%

Tabelle 4.2: Gammapektrums der Probe Nr. 2 vom 03.07.

Mutterkern	$\sigma_{tot}$ [barn]	Isotop	Halbwertszeit	Anteil an der Aktivität
$^{45}\text{Sc}$	51,0	$^{46}\text{Sc}$	83,81d	65,63%
$^{58}\text{Fe}$	29,28	$^{59}\text{Fe}$	44,51d	29,42%
$^{59}\text{Co}$	42,78	$^{60}\text{Co}$	5,27y	4,95%

Tabelle 4.3: Gammapektrums der Probe Nr. 2 vom 11.07.

## 4.1 Aufbau

Um den Wasserdurchfluß durch eine Asphaltprobe zu bestimmen, schreibt die Norm „Asphalt-Prüfverfahren für Heißasphalt-Teil 19: Durchlässigkeit von Probenkörpern; DIN EN 12697-19:2004“ [Beu04a] einen Aufbau, wie er in Abbildung 4.4 gezeigt ist, vor.

Die Probe, an der der Wasserdurchfluß gemessen werden soll, wird bis zu ihrer Oberkante in ein Wasserbad gestellt. Mit Hilfe einer Gummimanschette wird über dem Probenkörper ein Kunststoffrohr angebracht. Dieses Kunststoffrohr wird bis zu einer Höhe von  $(300 \pm 1)$  mm mit Wasser befüllt und diese Höhe wird während der gesamten Messung konstant gehalten. Um nun den Wasserdurchfluß durch die Probe zu bestimmen, wird für mindestens 60 Sekunden das durch die Probe fließende Wasser aufgefangen und gewogen. Der Durchfluß  $Q$  berechnet sich dann nach folgender Formel:

$$Q = \frac{m_{\text{wasser}}}{t} \times 10^{-6} \quad (4.1)$$

Wobei  $m_{\text{wasser}}$  die Masse des abgeflossenen Wassers im Gramm und  $t$  die Messzeit in Sekunden sind.  $Q$  wird hier in  $\text{m}^3/\text{s}$  angegeben. Wenn man die Dichte von Wasser mit  $1 \text{ g/cm}^3$  annimmt, ergibt sich damit der in Formel 4.1 angegebene Umrechnungsfaktor von  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{g}$ .

Eine weitere wichtige Größe bei der Charakterisierung der Wasserdurchlässigkeit durch poröse Stoffe ist die Durchlässigkeit oder auch Durchlässigkeitsbeiwert  $K_f$ . Dieser Wert wird mit Hilfe des Gesetzes von Darcy berechnet. Es gibt für die Durchströmung von porösen Medien und stellt einen linearen Zusammenhang zwischen  $Q$  und  $K_f$  her. Allgemein lautet die Formel:

$$K_f = \frac{Q \cdot l}{\Delta h \cdot A} \quad (4.2)$$

$Q$  bezeichnet den Durchfluß in Kubikmeter pro Sekunde,  $l$  die Fließstrecke im Meter,  $\Delta h$  die in Meter und  $A$  die durchströmte Fläche in Quadratmeter. Mit den Vorgaben einer zylindrischen Probe kann man 4.2 zu 4.3 umformen

$$K_f = \frac{4 \cdot Q \cdot l}{h \cdot \pi \cdot D^2} \quad (4.3)$$

Hierbei ist  $Q$  wieder der oben erwähnte Durchfluß in Kubikmeter pro Sekunde,  $l$  die Dicke des Probenkörpers in Meter,  $h$  die tatsächliche Höhe der Wassersäule und  $D$  der Durchmesser der Probe ebenfalls in Metern.

Je nach Größe des Durchlässigkeitsbeiwertes unterscheidet man zwischen fünf Durchlässigkeitsbereichen, die in Tabelle 4.4 aufgelistet sind.

Für eine Messung mit Neutronen ist der Aufbau aus der DIN Norm aus zwei Gründen nicht geeignet.

1. In der Norm wird der Durchmesser der Probe auf 100 bzw. 150 mm festgeschrieben. Aufgrund der geringen Transmission der Probe bei diesem Durchmesser ist damit keine schnelle Tomographie möglich.

Bezeichnung	Durchlässigkeitsbeiwert $K_f$ [m/s]
sehr stark durchlässig	$> 10^{-2}$
stark durchlässig	$10^{-4} - 10^{-2}$
durchlässig	$10^{-6} - 10^{-2}$
schwach durchlässig	$10^{-8} - 10^{-6}$
sehr schwach durchlässig	$< 10^{-8}$

Tabelle 4.4: Einteilung der  $K_f$  Werte. Quelle: [FGS98b]

2. Das den MPK umgebende Wasser würde aufgrund seines hohen Streuwirkungsquerschnittes eine Messung verhindern

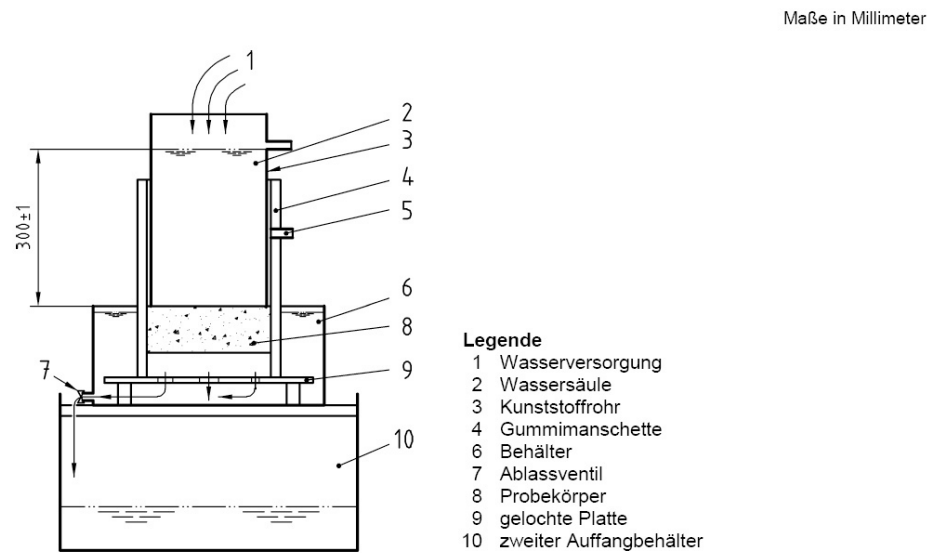


Abbildung 4.4: Schemazeichnung des Messaufbaues nach DIN 12697-19:04. Quelle:[Beu04a]

Da das Ziel der durchgeführten Versuche die Visualisierung des Wasserflusses durch den Asphalt war, wurde eine schnelle Tomographie als Messmethode gewählt. Um eine schnelle Tomographie mit Belichtungszeit im Bereich von einigen Millisekunden zu ermöglichen, wurde die Probe mit der Beschriftung „4“ in mehrere Teil zerkleinert. Nachdem der MPK halbiert worden war, wurde eine Hälfte nochmals in drei gleichgroße Teile zerlegt. Diese wurden für die verschiedenen Messungen verwendet.

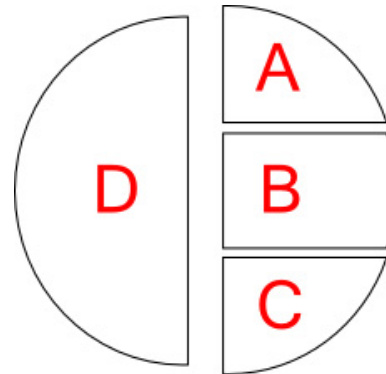
Zur Unterscheidung wurden die einzelnen Stücke mit A-D bezeichnet, wobei A-C für Experimente verwendet wurden und D die nicht zerkleinerte Hälfte des MPK bezeichnet. Zur Bezeichnung siehe Abbildung 4.5(a).



Bei dem Stück mit der Bezeichnung „D“ wurde versucht mit einem Hohlbohrer einen Zylinder aus der Probe herauszulösen. Die Auswirkungen kann man gut in Abbildung 4.5(a) erkennen. Der Asphalt erwärmte sich sehr stark, verformte sich und bröckelte auseinander. Nach diesem ersten Versuch der maschinellen Bearbeitung wurden alle weiteren Schnitte mit einer Handsäge durchgeführt, um eine zu große Erhitzung der Probe zu verhindern.



(a) Zerkleinerter MPK



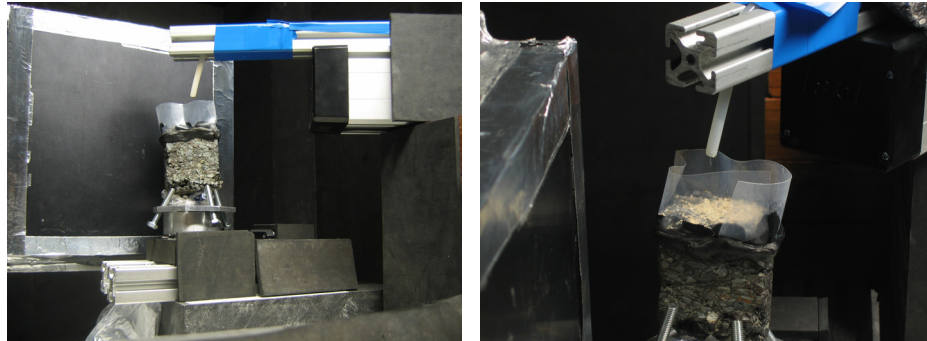
(b) Schemadarstellung der zerkleinerten Probe mit Bezeichnungen

Abbildung 4.5: zerkleinerter MPK mit Bezeichnungen

Aufgrund des Wasserdurchflusses durch die Probe konnte der Asphalt nicht direkt auf einen Probenträger aus Aluminium montiert werden. Um zu gewährleisten, dass das Wasser ungehindert abfließen konnte, wurde die Probe mit Hilfe von Schrauben ca. 1 cm über einer Aluminiumplatte befestigt. Das ausgetretene Wasser wurde mit einem Gefäß, das sich unter dem Asphalt befand, aufgefangen. Über einen Schlauch, der mit einer außerhalb der Kasematte stehenden Pumpe verbunden war, wurde das Wasser auf die Proben getropft. Dazu wurde eine Pumpe vom Typ Aladdin AL-2000 der Firma World Precision Instruments [Wor] verwendet. Der Schlauch wurde an einem Aluminiumprofil, das auf der ISEL Lineareinheit LF 4 festgeschraubt war, fixiert. Damit war es möglich, das Schlauchende auch während der Messung direkt über der Drehachse zu platzieren. Der ganze Versuchsaufbau wurde durch Bormatten und Platten aus gesintertem Bor gegen der Neutronenstrahl abgeschirmt um Streuung zu verhindern und den Aufbau nicht unnötig zu aktivieren.

Für alle Messungen wurde der lange Kamerakasten, sowie das 50 mm Objektiv verwendet. Da bei allen Messungen jeweils nur ein frame pro Projektion aufgenommen werden konnte, war es wichtig, dass so wenige Pixel, wie möglich durch Gammastrahlung gesättigt wurden, um diese Information nicht zu verlieren. Deshalb kam bei allen Messungen die PCO Kamera zur Verwen-

nung, da sie bei gleicher Abschirmung weniger sensibel auf Gammastrahlung reagiert als die Andor Kamera.



(a) Bild des Messaufbaues zur Durchflussmessung (b) Bild des Messaufbaues zur Durchflussmessung mit Sand auf der Oberfläche

Abbildung 4.6: Verschiedene Messaufbauten

## 4.2 Durchführung der Messungen

### 4.2.1 Durchflußmessung

Für diese Messung wurde das Asphaltstück „A“ gewählt. Die Oberfläche der Proben wurde als  $\frac{1}{6}$  der Gesamtoberfläche des MPK abgeschätzt. Es ergab sich mit dieser Abschätzung eine Oberfläche von  $13 \text{ cm}^2$ . Laut [FGS98b] soll Wasserdurchlässigen Asphalt eine Regenspende von  $270 \text{ l/s} \times \text{ha}$  abführen können, was einem  $K_f$  von  $5,4 \cdot 10^{-5}$  entspricht. Für die verwendete Probe ergibt sich mit dem Wert von  $270 \text{ l/s} \times \text{ha}$  ein Wert von  $2,12 \text{ ml/min}$ . In dem Forschungsbericht wurde für die in diesen Versuchen verwendete Sorte „WA 0-8\_5,5\_45\_OPU“ ein Wert von  $K_f = 7,6 \cdot 10^{-4}$  für Marshall Porbenkörper dieser Asphaltart nachgewiesen.

Am 09.09.2006 wurden insgesamt 14 Messreihen durchgeführt, dabei wurde die Tropfgeschwindigkeit des Wassers zwischen  $0,3 \text{ ml/min}$  und  $2,0 \text{ ml/min}$  variiert. Um zu verhindern, dass das Wasser an der Seite abläuft, wurde mit Dichtungsmasse Plastikfolie am oberen Rand der Probe befestigt (siehe Abb. 4.6(a)). Für die erste Messung wurde die PCO Kamera extern mit einem Frequenzgenerator XG 2102 der Firma Multiplex [Gro] getriggert. Da die Kamera bei einer Belichtungszeit von  $10 \text{ ms}$   $31,57 \text{ ms}$  benötigt um den kompletten Chip auszulesen, wurde der Trigger auf  $(19,987 \pm 0,004) \text{ Hz}$  eingestellt, um der Kamera genügend Zeit zum Auslesen der Aufnahme zu geben. Aus diesen Vorgaben (Drehung um  $180^\circ$  und  $50 \text{ ms}$  Zeit bis zur nächsten Belichtung) ergibt sich damit eine Dauer von neun Sekunden für eine komplette Tomographie.

Diese schnellen Raten werden dadurch erreicht, dass die Hersteller Software von PCO die aufgenommenen Daten nicht direkt auf die Festplatte, sondern im RAM speichert und erst nach Beendigung der Messung die Daten auf die Festplatte schreibt. Allerdings wird hierdurch gleichzeitig durch die Größe des RAM die maximale Bilderzahl festgelegt. Diese lag bei der Messung während des zweiten Zyklusses (Durchflußmessung und gefrorene Probe) bei 2374 Bildern pro Datensatz. Die Speicherzeit pro Datensatz betrug 2:20 Minuten.

#### 4.2.2 Verhalten von Wasser auf einer gefrorenen Probe

Um das Verhalten von Niederschlag auf gefrorenem Untergrund zu untersuchen, wurde die Probe „C“ (Abb 4.5(b)) vor dem Versuch auf  $-80^{\circ}\text{C}$  heruntergekühlt. Sie lagerte für einige Tage in einem Tieftemperaturkühlschrank des Laboratoire de Biophysique Moléculaire des Institut de Biologie Structurale, so dass davon ausgegangen werden kann, dass es bei Beginn der Messung keinen Temperaturgradienten in der Probe gab. Aufgrund der Lagerung bei  $-80^{\circ}\text{C}$  war es nicht möglich dieses Asphaltstück in ähnlicher Weise mit Folie und Dichtungsmasse zu präparieren, wie dies bei der Durchflussmessungen und der Messung mit der verunreinigten Probe möglich gewesen ist. Für diese Messung wurden die selben Kameraeinstellung wie bei der Durchflussmessung verwendet. Die Oberfläche entsprach der Oberfläche der Probe „A“, die bei den Durchflußmessungen verwendet wurde. Deshalb wurden ähnliche Tropfgeschwindigkeiten, wie bei der vorhergegangenen Messung gewählt. In drei Messreihen am 11.09.2006 wurde der Wasserfluß zu je 0,5 ml/min, 0,7 ml/min und 1,0 ml/min eingestellt.

#### 4.2.3 Messung mit verunreinigten Proben

Um die Auswirkungen von Verunreinigungen, wie zum Beispiel Sand oder Gummiabrieb, auf die Wasserdurchlässigkeit des Asphaltens zu untersuchen, wurde vor der Wasserspende eine Schicht aus Sand auf eine Probe aufgetragen. Für diesen Versuch wurde die Probe mit der Bezeichnung „B“ verwendet (Abb 4.5(b)). Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.6(b) dargestellt. Aufgrund der hohen Aktivität der Probe „A“ war es nicht möglich diese Probe für die Messung mit Verunreinigungen zu benutzen.

In zwei Messreihen, die während des dritten Strahlzyklusses dieses Jahres (Messung am 22.11.2006) durchgeführt wurden, wurde dieser Effekt untersucht. Dabei wurde der Wasserfluß zu 0,5 ml/min beziehungsweise zu 1,0 ml/min eingestellt. Als Belichtungszeit wurden wiederum 10 ms festgelegt. Da bei dieser Messung nicht der komplette Chip ausgelesen wurde, sondern das Blickfeld auf  $576 \times 416$  Pixel beschränkt wurde, konnte die Auslesezeit zu 28,84 ms verkürzt werden, was eine Framerate von 25,64 Hz und somit 39 ms für Aufnahme plus Auslesen ermöglicht. Außerdem erhöhte sich damit die

Anzahl der Bilder, die während einer Messung aufgenommen werden können von 2374 auf 3044. Des Weiteren wurde bei diesen Messungen auf eine externe Triggerung verzichtet und nur der interne Trigger der PCO Kamera verwendet.

Bei einer Dauer von neun Sekunden für eine Drehung um  $180^\circ$  und einer Drehgeschwindigkeit von 8027 Schritten pro Sekunde, erhält man damit 230 Projektionen. Bei diesem Experiment mußte der Drehtisch der Firma Micos verwendet, da es bei dem Drehtisch der Firma ISEL zu mehreren Motorschäden kam und dieser während der zweiten und dritten Strahlzeit nur selten zur Verfügung stand. Bei dem Micos Drehtisch entsprechen 72000 Schritte einer  $180^\circ$  Drehung, deshalb weicht die Drehgeschwindigkeit dieses Motors stark von der bei dem ISEL Drehtisch verwendeten Geschwindigkeit ab.

### 4.3 Auswertung und Ergebnisse

Die aufgenommenen Bilder wurden dunkelstromkorrigiert und normalisiert. Dazu wurden 1000 Dunkelbilder bei geschlossenem Hauptschutter aufgenommen und daraus der Mittelwert gebildet, dieser wurde von den Daten und dem open beam Bild abgezogen. Für die Normalisierung wurde vor der Aufnahme der Messreihen und nach Beendigung der Datennahme jeweils 1000 Aufnahmen des Strahles ohne Probe (open beam) gemacht. Hieraus wurden ebenfalls durch Mittelwertbildung zwei open beam Bilder gewonnen. Für die Normalisierung der einzelnen Messreihen wurde linear zwischen diesen beiden open beam Bildern interpoliert. Danach wurden jeweils die Dateien für eine  $180^\circ$  Drehung zusammengefaßt, um eine temporale Gliederung zu erhalten. Diese einzelnen „Pakete“ werden im Folgenden als Datensätze bezeichnet. Aus jedem Datensatz resultiert eine tomographische Rekonstruktion.

Nach der Rekonstruktion wurde von den erhaltenen Schichten die entsprechende Schicht einer Referenzaufnahme abgezogen. Die Referenzaufnahme entstand aus einer Tomographie der Probe ohne Wasserfluß, aber mit den gleichen Kameraeinstellung, wie bei der Messung mit Wasserfluß. Sie wurde auf die gleiche Weise rekonstruiert. Da der im Wasser enthaltene Wasserstoff einen sehr hohen Streuquerschnitt von über 80 barn hat, treten die Stellen, an denen sich Wasser innerhalb der Probe gesammelt hat, in den einzelnen Schichten stark hervor. Somit ist die Differenz zwischen Referenz und aktueller Messung eine geeignete Möglichkeit, das sich in der Probe befindende Wasser nachzuweisen. Um das Signal des Wassers hervorzuheben und Streueffekte zu unterdrücken, wurden in der Differenz alle Werte, die kleiner als 58% des maximalen Grauwertes waren, auf null gesetzt. Dies war möglich, da sich das Signal des Wassers bei Werten über 90% des maximalen Grauwertes befindet. Die Daten wurden mit Hilfe des Programmes „VG Studio“ der Firma Volume Graphics [Vol05] dreidimensional dargestellt. Um Wasserreservoirs

in den Asphaltproben zu identifizieren und ihre zeitliche Veränderung sichtbar zu machen, wurde in jeder Messreihe bei jedem Datensatz Schicht für Schicht größere Streuzentren von Hand markiert und blau eingefärbt. Diese sind in den Abbildungen 4.7-4.15 zu sehen. Die Referenzaufnahme ist ebenfalls in den Abbildungen dargestellt. Sie wurde in Grauwerten dargestellt, außerdem ist sie so zugeschnitten, dass man die verschiedenen Reservoirs gut erkennen kann.

### 4.3.1 Durchflußmessung

Durch das Zusammenfassen der Bilder in den einzelnen Messreihen entstanden jeweils 24 Datensätze pro Messreihe. Aus diesen 14 Messreihen, die während der Durchflußmessung aufgenommen wurden, wurden diejenigen mit einem an der Pumpe eingestellten Fluß von 0,5 ml/min bzw. 1,0 ml/min ausgewählt, um sie mit den anderen Messungen vergleichen zu können. Im ersten Teil des Abschnitts 4.3.1 werden zwei Messreihen mit einem Durchfluß von 0,5 ml/min, danach wird eine Messung mit 1,0 ml/min Wasserfluß beschrieben. Für jede Messreihe werden die Volumina tabellarisch angegeben und typische Abbildungen der Volumina gezeigt.

#### Durchfluß von 0,5 ml/min

In diesem Abschnitt, das die Ergebnisse der Messungen bei einer Tropfgeschwindigkeit von 0,5 ml/min beschreibt, werden zwei Datenreihen, nämlich Datenreihe 04 und Datenreihe 05, besprochen. Zwischen Ende der Datenreihe 04 und Start der Datenreihe 05 sind 3 Minuten vergangen. Davon sind, wie bereits oben erwähnt 2:20 Minuten die Zeit, die benötigt wird, um die Daten auf der Festplatte zu speichern. Die restliche Zeit wird benötigt, um den Drehtisch wieder in Bewegung zu setzen und die neue Aufnahme zu starten. Diese Zeit kann als typische Zeit zwischen zwei Datenreihen angesehen werden.

#### Datenreihe 04

Bei dieser Messreihe beginnt sich ab der sechsten Tomographie nach dem Start der Messung ein Hohlraum im oberen Teil der Probe zu füllen. Die Aufnahme der Bilder wurde gleichzeitig mit der Pumpe gestartet. Es sind also 45 Sekunden seit dem Start des Wasserflusses vergangen. Dieses erste Signal ist in Abbildung 4.7(a) tomographisch dargestellt. Die größte Ausdehnung (Abb. 4.7(b)) dieses Reservoirs wird während der zehnten Tomographie, also 81 Sekunden nach Beginn der Messung, erreicht. In der darauffolgenden Tomographie beginnt sich ein tiefergelegener Hohlraum mit Wasser zu füllen. Auch hier sind der Beginn (Abb. 4.8(a)) und die größte Ausdehnung (4.8(b)), die 3:27 Minuten nach Start der Messung erreicht wird, dargestellt.

Aus Tabelle 4.5 kann man die Volumenveränderung  $\Delta V$  des Wasserstandes in den Hohlräumen entnehmen. Sie wird aus der Differenz der Volumina zweier aufeinanderfolgender Tomographien bestimmt. Die größte Volumenveränderung für das obere Reservoir findet zwischen der zehnten und der elften Tomographie statt. Der Hohlraum verliert  $98,44 \text{ mm}^3$ . Berechnet man nun hiermit die Volumensveränderung pro Zeit, ergibt sich ein Wert von  $11 \text{ mm}^3/\text{s}$  oder  $0,66 \text{ ml}/\text{min}$ . Zur Vereinfachung wird im Folgenden die Volumensänderung pro Zeit gemäß der Definition 4.4 mit  $F$  bezeichnet. Maximalwerte werden als  $F_{max}$ , Mittelwerte mit  $\bar{F}$  angegeben.

$$F = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (4.4)$$

Der Maximalwert  $F_{max}$  dieser Messung stimmt gut mit den für diese Messreihe eingestellten Tropfgeschwindigkeit von  $0,5 \text{ ml}/\text{min}$  überein. Berechnet man den Mittelwert aller Differenzen erhält man einen Wert von  $22,01 \text{ mm}^3$ . Aufgrund der großen Schwankungen des Volumens liegt die Standardabweichung des Mittelwertes bei  $5,65 \text{ mm}^3$ .  $\bar{F}$  ergibt sich hier zu  $(0,15 \pm 0,04) \text{ ml}/\text{min}$ . Als Fehler wird auch hier die Standardabweichung des Mittelwertes angegeben.



- (a) Darstellung des Beginns des Füllens des oberen Hohlraumes während der sechsten Tomographie
- (b) Darstellung der größten Füllung des oberen Hohlraumes während der zehnten Tomographie

Abbildung 4.7: Verschiedene Füllungen des oberen Hohlraumes bei einem Wasserfluß von  $0,5 \text{ ml}/\text{min}$  aus Datenreihe 04

Bei dem unteren Reservoir findet die größte Volumenänderung beim Übergang von der 20. zur 21. Tomographie statt. Hierbei nimmt der Hohlraum ein Volumen von  $84,37 \text{ mm}^3$  auf. Damit ergibt sich ein  $F_{max}$  von  $0,56 \text{ ml}/\text{min}$ . Für  $\bar{F}$  erhält man einen Wert von  $(0,18 \pm 0,04) \text{ ml}/\text{min}$ .

Bild- nummer	oberes Reservoir			unteres Reservoir		
	Vol [mm <sup>3</sup> ]	$\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]	F [ml/min]	Vol [mm <sup>3</sup> ]	$\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]	F [ml/min]
6	73,92					
7	79,02	5,10	0,03			
8	84,54	5,52	0,04			
9	95,46	10,92	0,07			
10	113,84	18,38	0,12			
11	15,39	98,44	0,66	129,72		
12	19,31	3,92	0,03	138,35	8,63	0,06
13	64,65	45,34	0,30	92,69	45,66	0,30
14	30,38	34,27	0,23	71,40	21,29	0,14
15	25,05	5,33	0,04	70,19	1,22	0,01
16	16,83	8,22	0,05	37,12	33,07	0,22
17	23,95	7,12	0,05	71,40	34,28	0,23
18	28,00	4,05	0,03	98,85	27,45	0,18
19	21,81	6,20	0,04	124,34	25,49	0,17
20	50,37	28,56	0,19	116,46	7,88	0,05
21	52,19	1,82	0,01	200,82	84,37	0,56
22	20,19	32,0	0,21	204,23	3,41	0,02
23	62,91	42,72	0,28	241,92	37,69	0,25
24	24,64	38,27	0,26	225,03	16,90	0,11

Tabelle 4.5: Volumenangaben der Reservoirs der Datenreihe 04



- (a) Darstellung des Beginns des Füllens des unteren Hohlraumes während der elften Tomographie
- (b) Die größte Füllens des unteren Hohlraumes wird während der 23. Tomographie erreicht

Abbildung 4.8: Verschiedene Füllungen des unteren Hohlraumes bei einem Wasserfluß von 0,5 ml/min aus Datenreihe 04

### Datenreihe 05

Bei dieser Datenreihe waren die beiden Reservoirs von Beginn der Messung an gefüllt. Dies kann mehrere Gründe haben. Zum Beispiel kann sich der Abfluß aus einem Reservoir in einer gewissen Höhe und nicht direkt am Boden des Reservoirs befinden. Das Reservoir würde sich bis zu diesem Abfluß füllen und erst ab dieser Höhe würde das Wasser beginnen abzufließen. In Abbildung 4.9 sind die kleinste, in Abbildung 4.10 größte Füllung des oberen Reservoirs dargestellt. Es werden eine frontale und eine seitliche Ansicht gezeigt, um eine besser räumliche Darstellung des Reservoirs zu ermöglichen. In den Abbildungen 4.7(b) und 4.10(b), die jeweils die größte Füllung des oberen Hohlraumes darstellen, kann man erkennen, dass sich die Form des Reservoirs in den beiden Messreihen entsprechen. Die angewandte Auswertungsmethode liefert also reproduzierbare Aussagen über die Gestalt der Hohlräume.

In dieser Datenreihe findet  $\Delta V_{max}$  des oberen Reservoirs zwischen der achten und neunten Tomographie statt, der Hohlraum verliert ein Volumen von  $65,66 \text{ mm}^3$ . Dies entspricht einem  $F_{max}$  von  $0,44 \text{ ml/min}$ . Für den Mittelwert der Volumenänderung pro Zeit  $\bar{F}$  ergibt sich ein Wert von  $(0,13 \pm 0,03) \text{ ml/min}$ .

In den Abbildungen 4.11 und 4.12 ist das zeitliche Füllungsverhalten eines zweiten Hohlraumes dargestellt. Dieser wird im Folgenden als „mittleres“ Reservoir bezeichnet und stellt nicht das unterer Reservoir aus Datenreihe





- (a) Visualisierung der kleinsten Füllung des oberen Reservoirs (frontale Ansicht)      (b) Visualisierung der kleinsten Füllung des oberen Reservoirs (seitliche Ansicht)

Abbildung 4.9: Zwei Ansichten der kleinsten Füllung des oberen Reservoirs in der Datenreihe 05. Sie gibt die vierte aufgenommene Tomographie wieder



- (a) Visualisierung der größten Füllung des oberen Reservoirs (frontale Ansicht)      (b) Visualisierung der größten Füllung des oberen Reservoirs (seitliche Ansicht)

Abbildung 4.10: Zwei Ansichten der größten Füllung des oberen Reservoirs in der Datenreihe 05. Die größte Füllung wird während der achten Tomographie erreicht

04 dar. Wie in Abbildung 4.9 und 4.10 werden sowohl seitliche Ansichten, als auch frontale Ansichten der kleinsten und größten Füllung dieses Reservoirs gezeigt. Die zugehörigen Volumenangaben werden in Tabelle 4.6 angegeben.  $\Delta V_{max}$  beträgt  $27,60 \text{ mm}^3$  und wird zwischen der 16. und 17. Tomographie gemessen. Dies entspricht einem  $F_{max}$  von  $0,18 \text{ ml/min}$ . Für  $\bar{F}$  ergibt sich ein Wert von  $(0,04 \pm 0,01) \text{ ml/min}$



(a) Darstellung der kleinsten Füllung des mittleren Reservoirs (frontale Ansicht) (b) Darstellung der kleinsten Füllung des mittleren Reservoirs (seitliche Ansicht)

Abbildung 4.11: Zwei Ansichten der kleinsten Füllung des mittleren Reservoirs in der Datenreihe 05. Die Abbildung zeigen die dritte aufgenommene Tomographie

Die hier besprochenen Reservoirs geben nicht das gesamte, sich in der Probe befindende, Wasser wieder. Aufgrund des hohen Wasserstoffanteils in der Masse, die zur Befestigung des Plastiks an der Oberseite der Probe, verwendet wurde und der daraus resultierenden Streuung der Neutronen in diesem Bereich ist es nicht möglich, Aussagen für diesen oberen Bereich zu treffen. Im oberen Teil der Abbildungen 4.13 ist die Dichtungsmasse auf der Außenseite der Probe gut zu erkennen.

Des Weiteren wurden zur Veranschaulichung nur solche Hohlräume ausgewählt, bei denen eine deutliche Veränderung des Wasserinhaltes während einer Messreihe zu erkennen war. Als Beispiel eines Hohlraumes, der keinen Abfluß zur Unterseite der Probe hin hat, sei hier ein weiteres Reservoir im oberen Bereich der Probe erwähnt. Dieses Reservoir besitzt einen Abfluß zur Seite der Probe hin. Im Verlauf der Messung (Datenreihe 05) hat sich dieser Hohlraum gefüllt und durch den Kanal floß das Wasser seitlich an der Probe ab. Die Bildung des Tropfens an der Oberfläche und das Abfließen sind in den Bildern 4.13(a) und 4.13(b) dargestellt. Das mittlere Volumen  $\bar{V}$  des

Tomographie- nummer	oberes Reservoir			mittleres Reservoir		
	Vol [mm <sup>3</sup> ]	$\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]	F [ml/min]	Vol [mm <sup>3</sup> ]	$\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]	F [ml/min]
2	17,35			40,78		
3	14,06	3,29	0,02	36,85	3,93	0,03
4	13,74	0,32	0	38,06	1,22	0,01
5	14,06	0,32	0	38,35	0,29	0
6	69,21	55,15	0,37	41,19	2,84	0,02
7	73,68	4,47	0,03	39,21	1,98	0,01
8	86,71	13,03	0,09	40,26	1,05	0,01
9	21,05	65,66	0,44	42,45	2,19	0,01
10	23,31	2,26	0,02	44,80	2,35	0,02
11	47,84	24,53	0,16	43,33	1,47	0,01
12	50,42	2,59	0,02	55,16	11,83	0,08
13	55,55	5,13	0,03	51,37	3,80	0,03
14	85,26	29,71	0,20	53,64	2,28	0,02
15	36,38	48,88	0,33	49,54	4,10	0,03
16	30,64	5,74	0,04	43,70	5,84	0,04
17	57,11	26,47	0,18	71,30	27,60	0,18
18	37,47	19,63	0,13	54,20	17,10	0,11
19	27,55	9,93	0,07	48,55	5,65	0,04
20	18,94	8,61	0,06	37,54	11,0	0,07
21	54,51	35,57	0,24	50,15	12,61	0,08
22	30,99	23,51	0,16	45,95	4,20	0,03
23	66,86	35,87	0,24	47,30	1,35	0,01
24	68,52	1,65	0,01	55,72	8,42	0,06

Tabelle 4.6: Volumenangaben der Reservoirs der Datenreihe 05



(a) größte Füllung des mittleren Reservoirs (frontale Ansicht) (b) größte Füllung des mittleren Reservoirs (seitliche Ansicht)

Abbildung 4.12: Zwei Ansichten der größten Füllung des mittleren Reservoirs in der Datenreihe 05. Darstellung der 17. Tomographie

zum Tropfen gehörenden Hohlraumes beträgt während Messreihe 05 ( $80,95 \pm 4,16$ )  $\text{mm}^3$ .  $\bar{F}$  ergibt sich zu ( $0,08 \pm 0,02$ )  $\text{ml}/\text{min}$ . Bei den weiteren Messreihen wurde dieser Hohlraum nicht mehr berücksichtigt.

Da bei den Messungen jeweils nur einzelne Reservoirs betrachtet wurden, liegen die Werte für  $\bar{F}$  systematisch niedriger, als der an der Pumpe vorgegebene Wert von  $0,5 \text{ ml}/\text{min}$ .

Da das Reservoir des Tropfens keine Verbindung zu den anderen Reservoirs hat, können diese als unabhängig voneinander betrachtet werden. Addiert man die Flüsse, erhält man für Messreihe 04 einen Wert von ( $0,23 \pm 0,04$ )  $\text{ml}/\text{min}$ , für Datenreihe 05 ( $0,21 \pm 0,04$ )  $\text{ml}/\text{min}$ . Diese große Abweichung von 7 bzw. 8  $\sigma$  von dem an der Pumpe eingestellten Wert, hat seine Ursache darin, dass, wie oben erwähnt nicht alle gefüllten Hohlräume betrachtet wurden konnten.



(a) Bildung des Tropfens. Der zugehörige Hohlraum im Inneren des Asphalts hat ein Volumen von  $\bar{V}$  von rund  $81 \text{ mm}^3$

(b) Abfluß des Tropfens

Abbildung 4.13: Bildung und Abfluß eines Wassertropfens am Probenrand

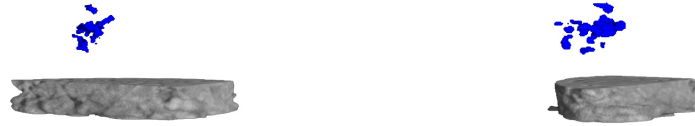
### Durchfluß von $1,0 \text{ ml/min}$

Anhand von Tabelle 4.7 kann man erkennen, dass sich die Füllung des als „mittleren Reservoirs“ bezeichneten Hohlraumes während der gesamten Messung (Messreihe 11) kaum verändert. Deshalb wird bei dieser Serie das Augenmerk auf den als „oberes Reservoir“ bezeichneten Hohlraum gelegt. Wie auch schon bei der Datenreihe 05 war der Hohlraum bereits zu Beginn der Messung mit Wasser gefüllt. Die Visualisierung der ersten Tomographie ist in Abbildung 4.14(a) und 4.14(b) dargestellt. Während der ersten fünf Tomographien kann man ein deutliches Ansteigen der Wassermenge im Hohlraum erkennen. Die größte Füllung ist während der sechsten Tomographie erreicht (Abb. 4.14(c) und 4.14(d)). Auf den letzten zwei Bildern (Abb. 4.14(e) und 4.14(f)) ist deutlich der Abfluß des Wassers in den unteren Teil der Probe zu sehen. Sie stellen die letzte der 24 Tomographie nach 216 Sekunden Messzeit dar.

Wenn man hier  $\Delta V_{max}$  bestimmt, findet man zwischen der 16. und 17. Tomographie einen Wert von  $112,20 \text{ mm}^3$  und einer  $F_{max}$  von  $0,75 \text{ ml/min}$ .

Die Berechnung von  $\bar{F}$  für den oberen Hohlraum ergibt einen Wert von  $(0,39 \pm 0,06) \text{ ml/min}$ . Wie bereits oben angedeutet, ist der Fluß durch den mittleren Hohlraum sehr gering, das hier bestimmte  $\bar{F}$  beträgt  $(0,04 \pm 0,01) \text{ ml/min}$ .

Auch bei dieser Messung stimmt das  $\bar{F}$  des oberen Reservoirs mit  $(0,39 \pm 0,06) \text{ ml/min}$  nicht innerhalb des Fehlers mit der Tropfgeschwindigkeit von  $1,0 \text{ ml/min}$  überein. Da das mittlere Reservoir bei dieser Messung nicht mit dem oberen Reservoir in Kontakt kam, kann man für den Gesamtfluß



(a) frontale Ansicht der ersten Tomographie (b) seitliche Ansicht der ersten Tomographie



(c) Die Größte Füllung des Reservoirs wird während der zwölften Tomographie erreicht (frontale Ansicht) (d) seitliche Ansicht der grösste Füllung während der zwölften Tomographie



(e) frontale Ansicht der letzten Tomographie (f) seitliche Ansicht der letzten Tomographie

Abbildung 4.14: Verschiedene Füllungen des oberen Hohlraumes bei einem Wasserfluß von 1,0 ml/min aus Datenreihe 11

Tomographie- nummer	oberes Reservoir			mittleres Reservoir		
	Vol [mm <sup>3</sup> ]	$\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]	F [ml/min]	Vol [mm <sup>3</sup> ]	$\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]	F [ml/min]
2	78,39					
3	123,31	44,92	0,30	11,60		
4	172,40	49,09	0,33	11,04	0,56	0,0
5	187,40	15,01	0,10	7,16	3,88	0,03
6	278,77	91,37	0,61	11,17	4,02	0,03
7	231,64	47,13	0,31	12,91	1,74	0,01
8	237,35	5,71	0,04	13,40	0,49	0,0
9	231,34	6,01	0,04	12,05	1,35	0,01
10	218,80	12,54	0,08	13,05	1,00	0,01
11	142,42	76,38	0,51	7,97	5,10	0,03
12	216,93	74,51	0,50	15,43	7,46	0,05
13	150,28	66,64	0,44	10,67	4,76	0,03
14	191,81	41,52	0,28	14,01	3,34	0,02
15	155,43	36,38	0,24	9,76	4,25	0,03
16	210,56	55,13	0,37	18,75	9,0	0,06
17	98,36	112,20	0,75	4,69	14,06	0,09
18	196,84	98,48	0,66	18,16	13,47	0,09
19	131,38	65,46	0,44	7,95	10,21	0,07
21	167,84	167,84	1,12	8,49	8,49	0,06
22	200,08	32,24	0,21	13,88	5,38	0,04
23	167,45	32,63	0,22	11,46	2,41	0,02
24	178,67	11,23	0,08	15,11	3,65	0,02

Tabelle 4.7: Volumenangaben der Reservoirs der Datenreihe 11

die beiden  $\overline{F}$  addieren und erhält  $\overline{F}_{ges} = (0,43 \pm 0,06)$  ml/min.

### 4.3.2 Verhalten von Wasser auf einer gefrorenen Probe

Es wurden je eine Messreihe à 24 Datensätzen mit 0,5 ml/min, 0,7 ml/min und 1,0 ml/min aufgenommen und ausgewertet. Bei keiner dieser drei Messreihe konnte ein gefülltes Reservoir in der Probe nachgewiesen werden. Das Wasser könnte auf der Oberfläche des Asphaltes festgefroren sein und deshalb nicht in den Asphalt eindringen. Eine weitere Möglichkeit, warum kein Wasser während dieser Messungen nachgewiesen werden konnte, ist die Tatsache, dass die Probe nicht, wie bei der Durchflußmessung, präpariert werden konnte und somit das Wasser an der Seite ablaufen konnte, ohne in den Asphalt einzudringen.

Als problematisch stellt sich die hohe Raumtemperatur von 23°C in der Kassetten dar. Da der Asphalt sehr schnell aufwärmt, sind nur wenige Messreihen möglich, bei der die Probe eine Temperatur unter dem Gefrierpunkt hat. Für weitere Versuche müsste es möglich sein, die Probe während der Messung konstant unter 0°C zu halten. Gleichzeitig sollte so wenig zusätzliches Material, wie möglich in den Strahl gebracht werden, um Abschwächung und zusätzliche Streueffekte so gering, wie möglich zu halten. In einem möglichen Versuchsaufbau könnte die Probe durch ausströmendes Gas, das ein geringes  $\sigma_{tot}$  besitzt, wie Stickstoff oder Helium, gekühlt werden.

### 4.3.3 Messung mit verunreinigten Proben

Bei dieser Messung umfaßt eine Messreihe jeweils 12 Datensätze, da bei dieser Messung 230 Bilder für einen Datensatz verwendet wurden und nicht, wie bei der Durchflußmessung, nur 96 (siehe Kapitel 4.3).

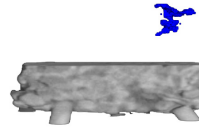
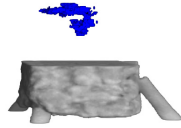
In der ersten Messreihe war der Wasserfluß auf 0,5 ml/min eingestellt. Während dieser 108 Sekunden konnte keine Füllung eines Reservoirs gefunden werden.

Bei der zweiten Messung (1,0 ml/min Wasserfluß) wurde das erste Signal während der siebten Tomographie aufgenommen und konnte bis zum Ende dieser Messreihe verfolgt werden. Dieses Signal ist in Abbildung 4.15(a) und 4.15(b) dargestellt. Die größte Ausdehnung, die während der achten Tomographie erreicht wird, ist in den Abbildungen 4.15(c) und 4.15(d) dargestellt. Die letzten beiden Bilder 4.15(e) und 4.15(f) zeigen die letzte Tomographie dieses Datensatzes.

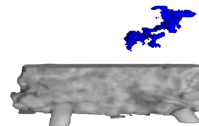
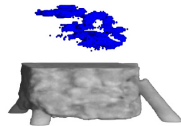
In Tabelle 4.7 sind, wie bei den vorangegangenen Messungen auch, die gemessenen Volumina angegeben.  $\Delta V_{max}$  beträgt 50,20 mm<sup>3</sup>.  $F_{max}$  ergibt sich zu 0,33 ml/min und  $\overline{F}$  hat einen Wert von  $(0,19 \pm 0,05)$  ml/min.

Auch bei dieser Messung liegt der Wert für  $\overline{F}$  unter dem an der Pumpe eingestellten Wert von 1,0 ml/min. Allerdings liegt dieser Wert auch um

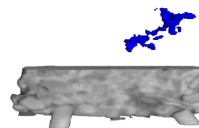
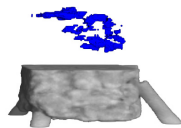




- (a) frontale Ansicht der ersten Füllung des Reservoirs während der siebten Tomographie (b) seitliche Ansicht der ersten Füllung des Reservoirs während der siebten Tomographie



- (c) frontale Ansicht der größten Füllung des Reservoirs während der achten Tomographie (d) seitliche Ansicht der größten Füllung des Reservoirs während der achten Tomographie



- (e) frontale Ansicht der zwölften und letzten Tomographie dieser Messreihe (f) seitliche Ansicht der zwölften und letzten Tomographie dieser Messreihe

Abbildung 4.15: Verschiedene Füllungen bei einem Wasserfluß von 1,0 ml/min und verschmutzter Probe

Tomographie- nummern	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	$\Delta V$ [mm <sup>3</sup> ]	F [ml/min]
7	32,29		
8	82,49	50,20	0,33
9	39,04	43,45	0,29
10	66,30	27,26	0,18
11	48,28	18,03	0,12
12	54,32	6,04	0,04

Tabelle 4.8: Volumenangaben des Reservoirs während der Messung mit einer verschmutzten Probe und einem Wasserfluß von 1,0 ml/min

einen Faktor zwei unter den Werten, die ohne Verunreinigung gemessen wurden. Auffällig ist außerdem, dass im Verlauf der Messung  $\Delta V$  und damit auch F kontinuierlich abnehmen. Dies und die Tatsache, dass bei der Messung mit einem Wasserfluß von 0,5 ml/min kein Wasser in die Probe eindrang, läßt darauf schließen, dass der sich auf der Oberfläche befindende Sand, sich in den Hohlräumen ansammelt und so den Wasserfluß behindert.

## Kapitel 5

# Weitere Experimente

Aufgrund des Durchdringungsvermögens von Neutronen durch Metalle, eignet sich die Neutronenradiographie und -Tomographie hervorragend zur Untersuchung neuartiger Schweißmethoden, wie Friction Stir Welding und Transient Liquid Phase Bonding [BAE<sup>+</sup>06]. Untersuchungen, die an Werkstücken, die mit diesen Methoden zusammengefügt wurden, werden ausführlich in [Bal07] beschrieben.

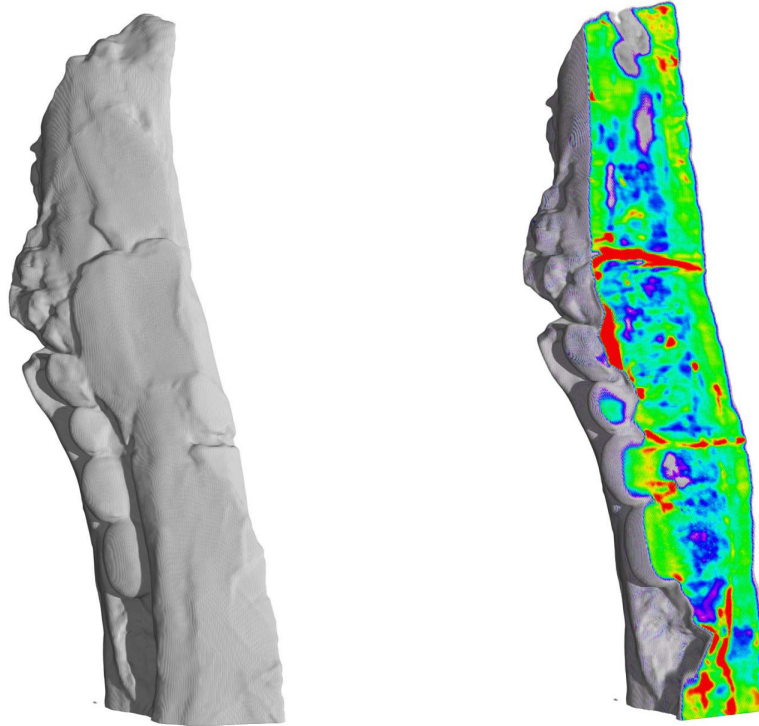
Im Rahmen dieser Arbeit soll eine weitere Anwendung der Neutronentomographie besprochen werden, nämlich die tomographische Untersuchung archäologischer Fundstücke. Fossilien, die sich noch in dem umgebenden Material befinden und mit bloßem Auge nicht zu erkennen sind, können mit Hilfe der Neutronentomographie sichtbar gemacht werden. So konnte zum Beispiel in einem Stein, der in der Antarktis gefunden wurde Teile eines prähistorischen Baumes, der dem heute noch in Südamerika vorkommenden „Monkey Puzzle Tree“ ähnelt, sichtbar gemacht werden [VO06].

Im Folgenden werden zwei Experimente, die dieses Jahr bei NEUTROGRAPH durchgeführt wurden, näher vorgestellt. Bei dem ersten Experiment handelt es sich um die Untersuchung eines Unterkiefers eines prähistorischen Reptils. Das zweite Beispiel zeigt Bruchstücke eines historischen Tongefäßes.

## 5.1 Fossilien

Bei dem untersuchten Fossil handelt es sich um den Unterkieferknochen eines Reptils. Er wurde von einer Gruppe des **Muséum national d'Histoire naturelle** (MNHN), Paris [San06] in einem Steinbruch in der Türkei gefunden. Aus der Altersdatierung der Lagerstätte wurde auf ein Alter des Fossils von 330 Millionen Jahren geschlossen. Allerdings ähnelt der Form des Unterkiefers einer Alligatorart, die vor ca. 80 Millionen Jahren in New Mexico lebte. Um diese Diskrepanz aufklären zu können, ist es wichtig, den inneren Aufbau des Kiefers zu kennen. Da solche Fossilienfund sehr selten und damit wertvoll sind, werden diese Untersuchungen mit zerstörungsfreien Methoden durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurde während des ersten Strahlzykluses dieses Jahres eine Tomographie mit diesem Kiefer durchgeführt. Die Rekonstruktion ist in Abbildung 5.1(b) zu sehen. Deutlich kann man zwei wasserstoffhaltige Klebestellen, an denen das Fossil gebrochen ist, als rote Linien in der Falschfarbendarstellung erkennen. Ein weitergehende Auswertung der Daten, die auch Aufschluß über die Position der Knochenverbindung geben soll, erfolgt momentan durch die Gruppe am MNHN.



(a) tomographische Rekonstruktion

(b) Falschfarbendarstellung des Abschwächungskoeffizienten

Abbildung 5.1: Tomographie eines Alligatorunterkiefers

## 5.2 Historische Artefakte

Das Artefakt, zu dem die untersuchte Tonscherbe gehört, wurde während der Bronzezeit in England gefertigt und ist ungefähr 1200 Jahre alt. Bei der Herstellung dieser Gefäße wurde zuerst der Ton zu „Würsten“ gerollt, danach wurden aus mehreren dieser „Würste“ das Gefäß geformt. Vor dem Brennen wurde dem Ton noch Feuerstein beigemischt. Der Feuerstein sollte während des Brennens dazu dienen die Feuchtigkeit, die sich im Ton befand, leichter an die Oberfläche zu bringen und so zu verhindern, dass das Gefäß beim Brennen sprang. Die Fragestellung für dieses Experiment war nun, ob die Feuersteineinschlüsse zufällig über das Gefäß verteilt sind, oder ob es eine bestimmte Anordnung der Einschlüsse gibt und man daraus Rückschlüsse auf die Herstellungsweise dieser Gefäße ziehen kann.

Die Scherbe ist 1,0 cm dick, ca. 4,3 cm breit und 4,7 cm hoch. Sie wurde von Professor Dominic Powlesland vom Institut für mittelalterliche Studien der Universität Leeds zur Verfügung gestellt.

Abbildung 5.2 zeigt eine tomographische Rekonstruktion der Tonscherbe. Um die Einschlüsse, die violett dargestellt sind, besser sichtbar zu machen wurde die Opazität des umgebenden Tonmaterials, das rot dargestellt ist, verringert. Man kann deutlich erkennen, dass der Feuerstein in Schichten angeordnet ist. Diese Anordnung legt nahe, dass die Tonwürste vor dem Zusammenfügen in dem Feuersteingranulat gewälzt wurden und das Granulat nicht etwa in die Tonmasse eingearbeitet wurde.

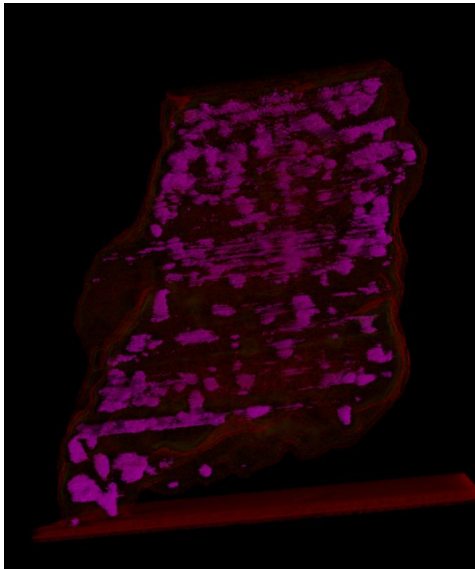


Abbildung 5.2: Einschlüsse in einer mittelalterlichen Tonscherbe

## Kapitel 6

# Zusammenfassung und Ausblick

Während dieser Diplomarbeit wurde gezeigt, dass es mit Hilfe der Neutronenradiographie und -Tomographie nicht nur möglich ist, den Wasserfluß durch offenporigen Asphalt quantitativ darzustellen, sondern auch für ausgewählte Hohlräume die Volumensänderung pro Zeit zu bestimmen. Außerdem gelang es zum ersten Mal, den Wasserfluß durch Asphalt in Echtzeit darzustellen. Damit liefert diese Methode eine zusätzliche Möglichkeit zur Untersuchung und Bestimmung der Eigenschaften dieser neuartigen Asphaltsorte. Da nur der Fluß durch einzelne Hohlräume betrachtet wurde, liegen die erhaltenen Werte systematisch unter den erwarteten Werten.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde lediglich die Gesteinsmischung WA 0-8\_5,5\_45\_OPU untersucht. Um Unterschiede zu anderen Mischungsverhältnissen zu charakterisieren, sind weitergehende Messung mit anderen Asphaltarten nötig. Man kann bei diesen Messungen ebenfalls untersuchen, welchen Einfluß verschiedene Produktionsarten auf die Hohlräume und den Aufbau der jeweiligen Asphaltssorte haben.

Um die Dauer einer Tomographie zu verkürzen, muß bei weiteren Versuchen zu höheren Drehgeschwindigkeiten übergegangen werden. Aufgrund der hohen Positioniergenauigkeit des kleinen MICOS Drehtisches ist die schnellstmögliche Zeit für eine Drehung um  $180^\circ$  mit diesem Tisch 7,2 Sekunden. Bei Verwendung des ISEL Drehtisches können Zeiten von bis zu 0,48 Sekunden für eine Tomographie erreicht werden. Dabei könnten bei Verwendung der PCO Kamera und einer Belichtungszeit von 10ms bis zu 99 Winkel aufgenommen werden, was, wie man bei an der Durchflußmessung (96 Projektionen pro Tomographie) sieht, aussagekräftige Daten liefert.

Als Verbesserung des Versuchsaufbaues zur Untersuchung von Proben bei Temperaturen unter  $0^\circ\text{C}$ , ist die Kühlung der Probe mittels ausströmendes Gases in Planung. Damit wird es möglich, Situationen, die als „überfrierende

Nässe“ bekannt sind, zu simulieren.



# Tabellenverzeichnis

2.1	Charakteristische Neutronen Energien am ILL . . . . .	4
2.2	Verschiedene Streuquerschnitte $\sigma$ und Abschwächungskoeffizienten $\mu$ . . . . .	5
4.1	Zusammensetzungen der Proben . . . . .	21
4.2	Gammaspektrums der Probe Nr. 2 vom 03.07. . . . .	22
4.3	Gammaspektrums der Probe Nr. 2 vom 11.07. . . . .	22
4.4	Einteilung der $K_f$ Werte . . . . .	24
4.5	Volumenangaben der Reservoirs der Datenreihe 04 . . . . .	31
4.6	Volumenangaben der Reservoirs der Datenreihe 05 . . . . .	35
4.7	Volumenangaben der Reservoirs der Datenreihe 11 . . . . .	39
4.8	Volumenangaben des Reservoirs während der Messung mit einer verschmutzten Probe und einem Wasserfluß von 1,0 ml/min	42



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Wirkungsquerschnitte für Neutronen . . . . .	4
2.2	Bearbeitungsschritte einer Radiographie . . . . .	8
2.3	Prinzip der Tomographie . . . . .	9
3.1	Übersicht über die Experimente auf Niveau C des ILL . . . . .	12
3.2	Zur Bestimmung des L/D Verhältnisses . . . . .	14
3.3	Grundriss der NEUTROGRAPH Station . . . . .	15
3.4	Vergleich der verschiedenen Blickfelder . . . . .	18
4.1	Darstellung der verschiedenen Hohlräume in der Asphaltdecke . . . . .	19
4.2	Schematischer Aufbau eines typischen Straßenbelages . . . . .	20
4.3	Ansicht des zweiten Marshallprobenkörpers . . . . .	21
4.4	Schemazeichnung des Messaufbaues nach DIN 12697-19:04 . . . . .	24
4.5	Zerkleinerter MPK mit Bezeichnungen . . . . .	25
4.6	Verschiedene Messaufbauten . . . . .	26
4.7	Verschiedene Füllungen des oberen Hohlraumes bei einem Wasserfluß von 0,5 ml/min aus Datenreihe 04 . . . . .	30
4.8	Verschiedene Füllungen des unteren Hohlraumes bei einem Wasserfluß von 0,5 ml/min aus Datenreihe 04 . . . . .	32
4.9	Zwei Ansichten der kleinsten Füllung des oberen Reservoirs in der Datenreihe 05 . . . . .	33
4.10	Zwei Ansichten der größten Füllung des oberen Reservoirs in der Datenreihe 05 . . . . .	33
4.11	Zwei Ansichten der kleinsten Füllung des mittleren Reservoirs in der Datenreihe 05 . . . . .	34
4.12	Zwei Ansichten der größten Füllung des mittleren Reservoirs in der Datenreihe 05 . . . . .	36
4.13	Bildung und Abfluß eines Wassertropfens am Probenrand . . . . .	37
4.14	Verschiedene Füllungen des oberen Hohlraumes bei einem Wasserfluß von 1,0 ml/min aus Datenreihe 11 . . . . .	38
4.15	Verschiedene Füllungen bei einem Wasserfluß von 1,0 ml/min und verschmutzter Probe . . . . .	41
5.1	Tomographie eines Alligatorunterkiefers . . . . .	45

5.2	Einschlüsse in einer mittelalterlichen Tonscherbe . . . . .	46
-----	---	----

# Literaturverzeichnis

- [And03] ANDOR TECHNOLOGY: *Andor iXon DV885*, 2003.
- [BAE<sup>+</sup>06] BALLHAUSEN, H., H. ABELE, R. S. ECCLESTON, R. GÄHLER, A. J. SMITH, A. STEUWER und A. VAN OVERBERGHE: *Neutron Radiography Analysis of a Transient Liquid Phase Joint*. 2006. preprint, ArXiv: cond-mat/0604450.
- [Bal07] BALLHAUSEN, H.: *Methoden und Anwendungen für bildgebende Verfahren mit hohen Neutronenflüssen*. Dissertation, Universität Heidelberg, 2007.
- [Beu04a] BEUTH VERLAG: *DIN 12697-19:04 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt*, 2004. Teil 19: Durchlässigkeit von Probekörpern.
- [Beu04b] BEUTH VERLAG: *DIN 12697-29:04 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt*, 2004. Teil 29: Bestimmung der Maße von Asphalt-Probekörpern.
- [Bev69] BEVINGTON, PHILIP R.: *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw-Hill, 1969.
- [Bor02] BORTFELD, T.: *Röntgencomputertomographie, Mathematische Grundlagen*, Seiten 229–245. Springer Verlag. Springer Verlag, 2002. Hsg: W. Schlegel, J. Bille.
- [BR04] BÖHM, S. und V. ROOT: *Wasserdurchlässiger Asphalt*. Asphalt, 6:24–30, 2004.
- [BR05] BÖHM, DR.-ING. STEFAN und DIPL.-ING. VIKTOR ROOT: *Optimierung der Zusammensetzung wasserdurchlässiger Asphaltbefestigungen*. Schlussbericht eines Forschungsauftrages, TU Darmstadt, Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt, Oktober 2005.
- [Eng04] ENGELHARDT, M.: *Imaging of dynamic processes with a timescale of microseconds at a thermal neutron beam*. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2004.
- [Eur] EUROCOLLIMATORS. <http://www.eurocollimators.com/>.

- [Fer03] FERGER, T.: *Aufbau einer dynamischen Radiographie- und Tomographiestation für thermische Neutronen*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 2003.
- [FGS98a] FGSV-NR. 750: *Merkblatt für den Bau offenporiger Asphaltdeckschichten*, 1998. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- [FGS98b] FGSV-NR.947: *Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen*, 1998. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- [Gil03] GILDEMEISTER, A.: *Fast dynamic radiography at a high-flux thermal neutron beam*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 2003.
- [Gro] GROUPE CHAUVIN ARNOUX: *Générateur de Fonctions Fréquence-mètre Numérique*.
- [ILL] ILL. <http://www.ill.fr>.
- [ISE] ISEL. <http://iselautomation.de/>.
- [LD04] LANDER, G. und A.-J. DIANOUX: *Neutron Data Booklet*, 2004. Institut Laue-Langevin.
- [NIS03] NIST, NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY: *neutron scattering length and cross sections*, 2003. <http://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths/>.
- [PCO02] PCO CCD IMAGING: *Sensicam, Sensicam QE, Bedienungsanleitung*, 2002.
- [PSI] PSI. <http://neutra.web.psi.ch/>.
- [Rad17] RADON, J.: *Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten*. Berichte Sächsische Akademie der Wissenschaften, Math.-Phys. Kl., 69:262–267, 1917.
- [Res00a] RESEARCH SYSTEMS, INC.: *Building IDL applications*, September 2000. Handbuch.
- [Res00b] RESEARCH SYSTEMS, INC.: *Using IDL*, September 2000. Handbuch.
- [San06] SANCHEZ, SOPHIE: *private Kommunikation*, 2006. Muséum national d’Histoire naturelle, Paris.
- [Sch01] SCHNEIDER, M.: *Studies for neutron radiography at the Institute Laue-Langevin*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 2001.

- 
- [TF06] TREMSIN, ANTON S. und W. BRUCE FELLER: *The theory of compact and efficient circular-pore MCP neutron collimators*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 556:556–564, 2006.
- [VO06] VAN OVERBERGHE, A.: *High flux neutron imaging for highly dynamic and time resolved non-destructive testing*. Dissertation, Universität Heidelberg, 2006.
- [Vol05] VOLUME GRAPHICS GMBH: *Analysis and visualisation of voxel data. VG Studio Max 1.2.1*, 2005.
- [web] WEBELEMENTS. <http://www.webelements.com/>.
- [Wor] WORLD PRECISION INSTRUMENTS: *instruction manual for Aladdin pump*.





# Anhang A

## Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Arbeit an dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

- Zu allererst bei meinen Betreuern Herrn Prof. Dr. Hartmut Abele und Dr. Roland Gähler.
- Bei allen Mitgliedern der NEUTROGRAPH Gruppe: Dr. Andreas Van Overberghe, Hendrik Ballhausen und Martin Dawson.
- Außerdem möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Dipl. Ing. Viktor Root und dem Fachgebiet Straßenwesen der Technischen Universität Darmstadt für die Bereitstellung der Asphaltprobenkörper bedanken.
- Bei Eva Rosenbaum, Bastian Märkisch und allen Korrekturlesern.



# Anhang B

## Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen, als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den 11.01.2007

.....  
(Marcus Trapp)



# Anhang C

## Zur beiliegenden CD

Die beiliegende CD enthält drei Filme, die den Wasserfluß durch den Probenkörper im zeitlichen Verlauf darstellen. Diese Filme sollen dazu dienen, den Vorteil dieser Messmethode, nämlich die Darstellung des Wasserflusses durch Asphalt in Echtzeit noch besser zu veranschaulichen, als dies durch einzelne Bilder in Kapitel 4 möglich ist. Mit Hilfe des Programmes VG Studio wurden je neun aufeinanderfolgende Tomographien zu diesen Filmen zusammengefaßt. Die 72 Sekunden Filmlänge entsprechen einer Messzeit von 72 Sekunden, geben den Wasserfluß also in Echtzeit wieder. Zwischen den einzelnen Tomographien wird durch das Programm linear überblendet.

Wie auch bei den Abbildungen in Kapitel 4 ist ebenfalls die Referenzaufnahme der Asphaltprobe in Grauwerten gezeigt. Für die einzelnen Schritte wird sie jeweils zugeschnitten.

Die Filme der Datenreihe 04 zeigen den Abfluß des gefüllten oberen Reservoirs in das untere. Gegen Ende füllt sich der obere Hohlraum erneut. Beide Filme zeigen die gleichen Daten, der Unterschied besteht darin, dass bei dem Film „Datenreihe 04 feste Position“ die Position der Probe fest gehalten wird, wohingegen in dem Film „Datenreihe 04 gedreht“ die Probe um 360° um die vertikale Achse gedreht wird. Die Filme beginnen mit der sechsten Tomographie, bei der auch die erste Füllung des oberen Hohlraumes detektiert wurde.

Der Film „Datenreihe 11 gedreht“ veranschaulicht den Wasserfluß bei einer Tropfgeschwindigkeit von 1,0 ml/min. Auch hier kann man sehr schön den Fluß durch die Probe beobachten. Das obere Reservoir fließt in ein weiter unten liegendes ab, welches sich ebenfalls leert.