

# Partielle Tomographie mit Neutronen zur Beurteilung von Leimschichten in Holz

Kurt OSTERLOH<sup>\*</sup>, Daniel FRATZSCHER<sup>\*</sup>, Uwe ZSCHERPEL<sup>\*</sup>, Uwe EWERT<sup>\*</sup>,  
Andreas HASENSTAB<sup>\*\*</sup>, Thomas BÜCHERL<sup>\*\*\*</sup>, Burkhard SCHILLINGER<sup>\*\*\*\*</sup>,

<sup>\*</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Unter den Eichen 87,  
12205 Berlin,

<sup>\*\*</sup> Ingenieurbüro Dr. Hasenstab, Carron-du-Val Str. 17, 86161 Augsburg,

<sup>\*\*\*</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für Radiochemie, Walther-Meissner-Str. 3,  
85748 Garching,

<sup>\*\*\*\*</sup> Technische Universität München, FRM II und Fakultät für Physik, Lichtenbergstr. 1,  
85748 Garching

**Kurzfassung.** Verleimte Holzproben wurden je nach Größe mit thermischen (ANTARES) bzw. schnellen Neutronen (NECTAR) an der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) der Technischen Universität München in Garching untersucht. Entweder ließen die durchstrahlbare Schichtdicke oder die eingeschränkte Strahlgeometrie es nicht zu, das Probenteil allseitig zu durchstrahlen. Um dennoch innere Strukturen wie Leimschichten zumindest mit einem eingeschränkten Winkelbereich tomographisch darzustellen, wurde mit Hilfe des Slice-Theorems erfolgreich rekonstruiert. Ein Brett von 2 cm Dicke wurde mit thermischen Neutronen erfolgreich untersucht, ein größeres mit schnellen.

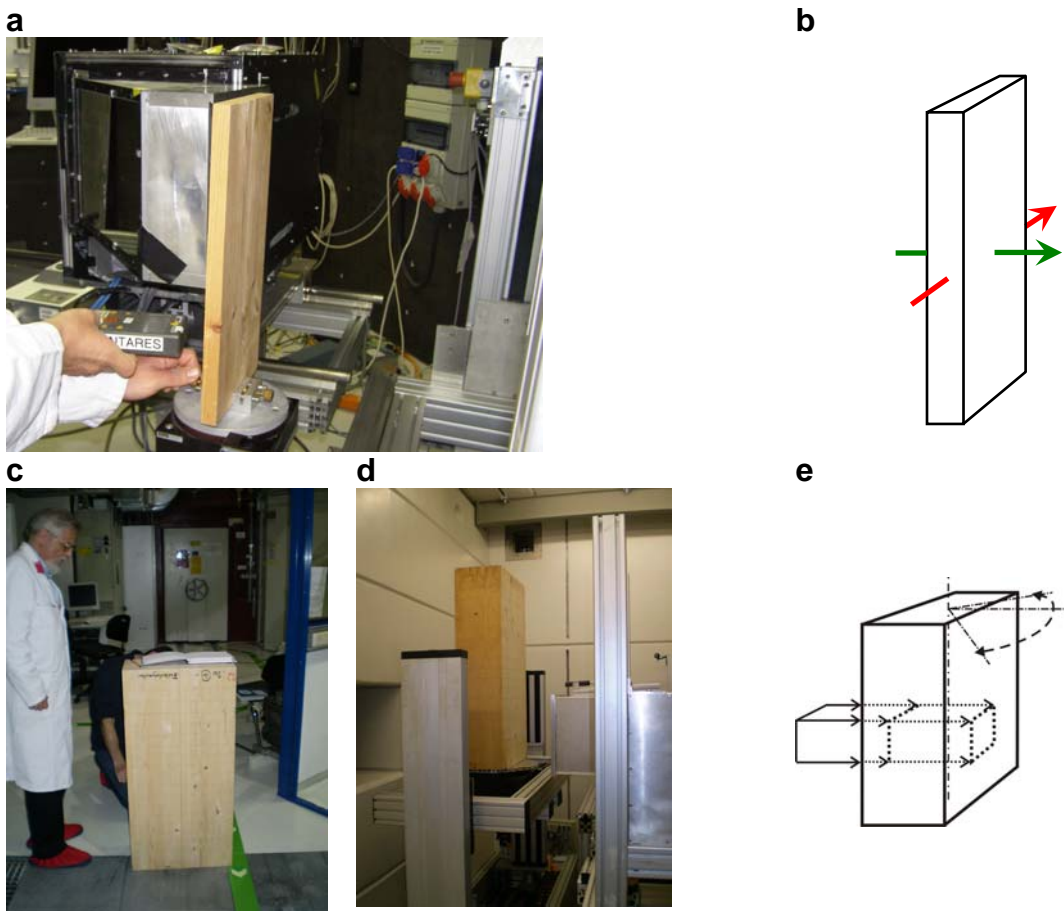
## Einführung

Katastrophale Einstürze von weit gespannten Baukonstruktionen aus Brettschichtholz wie z.B. Hallen oder Brücken führen uns immer wieder vor Augen, dass der Leimfuge eine besondere Beachtung geschenkt werden muss. Dies bedeutet, dass zur Untersuchung des Übergangs Brett–Leim–Brett nach wie vor Forschungsbedarf besteht. Aufgrund der besonders kontrastgebenden Eigenschaft wasserstoffhaltiger Materialien eignen sich Neutronen zur Darstellung von Leimschichten in Holzbrettern und Balken. Dies konnte sowohl mit schnellen [1] als auch mit thermischen Neutronen gezeigt werden [2]. Um den Zustand von Leimschichten in verleimten Holzblöcken darzustellen, eignen sich besonders tomographische Verfahren. Verleimte Holzproben, besonders Brettschichthölzer, besitzen oftmals eine Größe, die eine vollständige Tomographie im Strahlengang von Neutronenquellen ausschließt. Einerseits kann die Schichtdicke in einer Längsausrichtung zu groß für eine Neutronendurchstrahlung werden, andererseits kann die Gesamtgröße des Untersuchungsobjektes den Strahlenquerschnitt bzw. das Detektorfenster deutlich überragen. In solchen Fällen ist die erforderliche Zugänglichkeit von allen Seiten nicht mehr gegeben. Es fehlen somit die Voraussetzungen, einige gängige tomographische Rekonstruktionsverfahren anwenden zu können, wie z.B. die gefilterte Rückprojektion. Hier soll gezeigt werden, dass trotz der hier genannten methodischen Einschränkungen eine Darstellung mittels der Tomographie möglich ist, wenn nach dem „Slice-Theorem“ verfahren wird [3].

# 1. Material und Methoden

## 1.1 Neutronentomographie

Es wurden an der Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) der Technischen Universität München in Garching an zwei Messplätzen Projektionsbilder für tomographische Rekonstruktionen gesammelt, an einem mit thermischen (ANTARES) und an einem anderen mit schnellen Neutronen (NECTAR). Der erstere lieferte einen Neutronenstrom von  $2,6 \times 10^7$  Neutronen /  $\text{cm}^2 \text{ s}$  bei einem L/D-Verhältnis von 400. Als Bilddetektor diente ein Fluoroskop mit einem ZnS(Au,Ag)+LiF-Szintillator mit einer gekühlten Andor DW 436 CCD Kamera. Es konnten hier Holzproben nur bis zu einer maximalen Dicke von 2 cm durchstrahlt werden, d.h. die Probe in **Abbildung 1 a** und **b** war nur quer zur Fläche durchdringbar (grüner Pfeil), nicht in der Länge (roter Pfeil). Größere Proben konnten am zweiten Messplatz NECTAR durchstrahlt werden, bis zu ca. 30 cm. Dort standen schnelle Neutronen im Energiebereich von 1,5 bis 2 MeV mit einem Fluss von  $4,9 \times 10^6$  Neutronen /  $\text{cm}^2 \text{ s}$  mit einem L/D-Verhältnis von ca. 230 zur Verfügung. Dort konnten auch größere Proben durchstrahlt werden (s. **Abbildung 1 c** bis **e**). Bei den hier genannten L/D-Verhältnissen wurde für die Tomographie von einer Parallelstrahlgeometrie ausgegangen. Es handelt sich um eine Brettschichtholzprobe, deren zentrale Leimschicht aus einem auf Harz basierendem Material bestand.



**Abbildung 1:** Proben für die Tomographie:

**a)** Brett  $16 \times 40 \times 2 \text{ cm}^3$  für thermische Neutronen (ANTARES), **b)** Durchstrahlungsrichtungen, **c)** Brettschichtholz  $49 \times 23,5 \times 100 \text{ cm}^3$  für schnelle Neutronen, mit Größenvergleich, **d)** Probe im Strahlengang von NECTAR, **e)** Größenverhältnisse von Probe und Strahlengang, mit Drehwinkel.

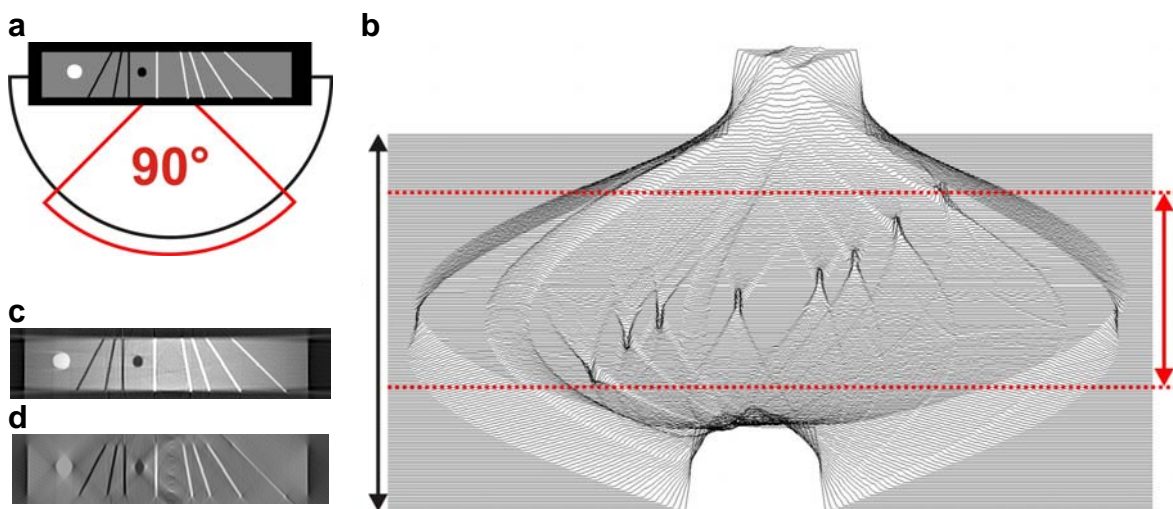
## 1.2 Rekonstruktion

Um zumindest senkrecht zur Breitseitenoberfläche verlaufende Strukturen wie Leimschichten zu untersuchen, wurden räumliche Bilddaten aus unvollständigen Winkelsätzen von Projektionen rekonstruiert. Diese reichten z.B. von  $-45^\circ$  bis  $+45^\circ$  zur Senkrechten auf die Oberfläche der Breitseiten. In den Schichtbildern konnten alle Strukturen in Strahlrichtung, d.h. quer laufend in einem Brett oder ähnlich flach geformtem Objekt, erkannt werden. Es werden Schichtbilder aus allen drei Richtungen des Raumes in Filmsequenzen gezeigt. Mit dem hier angewandten Rekonstruktionsverfahren konnten erfolgreich Tomographien mit unvollständigen Winkelsätzen und über den Bildrand hinausragenden Objekten angefertigt werden.

## 2. Ergebnisse

### 2.1 Theoretisches Modell

Die Rekonstruktionsmethode mittels des „Slice Theorems“ wurde zunächst anhand eines graphisch konstruierten Modells erprobt. Dieses bestand aus einem grauen Rechteck mit verschiedenen Mustern, hier hauptsächlich einer weißen Kreisfläche auf der linken Seite und verschiedenen weißen und schwarzen geraden Strichen zwischen der oberen und unteren Breitkante. Diese verlaufen senkrecht oder in einem Winkel von über  $45^\circ$  zur Ober- bzw. Unterfläche. Dieses Modell ist in der **Abbildung 2a** dargestellt, zusammen mit den Winkeln für eine vollständige Tomographie ( $180^\circ$ , schwarz) und einer mit eingeschränktem Winkelbereich ( $90^\circ$ , rot).



**Abbildung 2:** Tomographische Rekonstruktion eines künstlichen Modells mit vollem und eingeschränktem Winkelumfang:

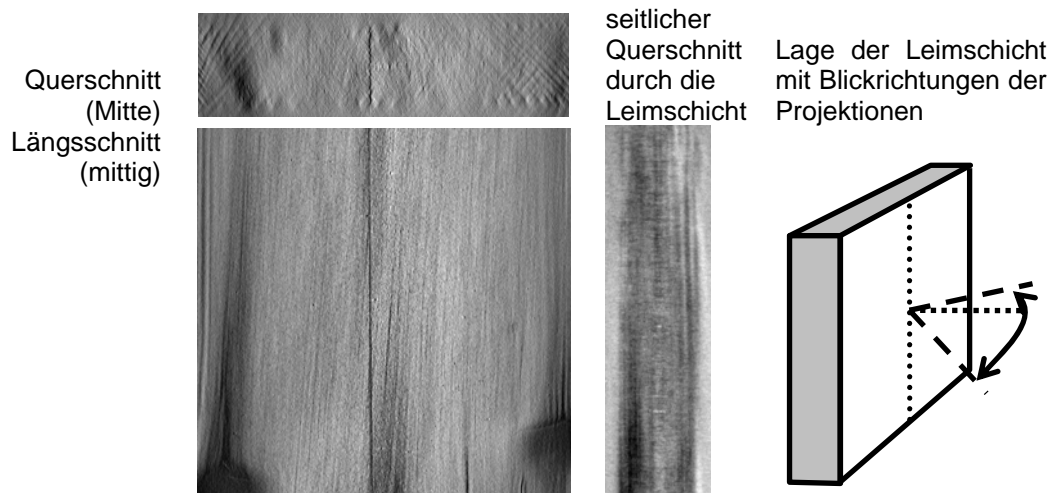
**a)** graphisch konstruiertes Rechteck mit innerer Musterung wie Kreisflächen und geraden Linien zwischen Ober- und Unterkante (zusätzlich sind die Winkelbereiche für eine vollständige (schwarz) und einer eingeschränkten (rot) Tomographie eingezeichnet), **b)** Sinogramm aller Projektionen, schwarzer Pfeil = vollständiger Bereich, roter Pfeil und rote Markierung = eingeschränkter Bereich ( $90^\circ$ ), **c)** vollständige Rekonstruktion ( $180^\circ$ ), **d)** Rekonstruktion mit eingeschränktem Winkelbereich ( $90^\circ$ ).

Die Projektionen wurden als Helligkeitsprofile in einem Sinogramm angeordnet, das in der **Abbildung 2b** gezeigt ist. Klar erkennbar ist darin der Verlauf der Blickrichtungen von einer Stirnseite über die Breitseite auf die andere. Die weiße Kreisfläche auf der

linken Seite im konstruierten Rechteck hinterließ eine durchgehende Spur im Sinogramm durchgehend von unten nach oben. Nicht hingegen die Striche zwischen Unter- und Oberfläche, sie zeichneten sich als begrenzte Figuren zwischen den roten Bereichsmarkierungen ab, die den eingeschränkten Winkelbereich von  $90^\circ$  abgrenzen. Von daher gesehen sollte es auch unter dieser Einschränkung möglich sein, diese geraden Strecken tomographisch zu rekonstruieren. Dass dieses unter Verwendung des Slice-Theorems möglich ist, wird im Vergleich zur vollständigen Rekonstruktion in den **Abbildungen 2 c** und **d** gezeigt. Die Linien sind zu erkennen, die kreisförmigen Flächen nur unvollständig. Die obere und untere Rechteckkante ist nicht in **Abbildung 2 d** zu erkennen, deren Profile liegen auch außerhalb des rot gekennzeichneten  $90^\circ$ -Bereiches im Sinogramm der **Abbildung 2 b**.

## 2.2 Thermische Neutronen

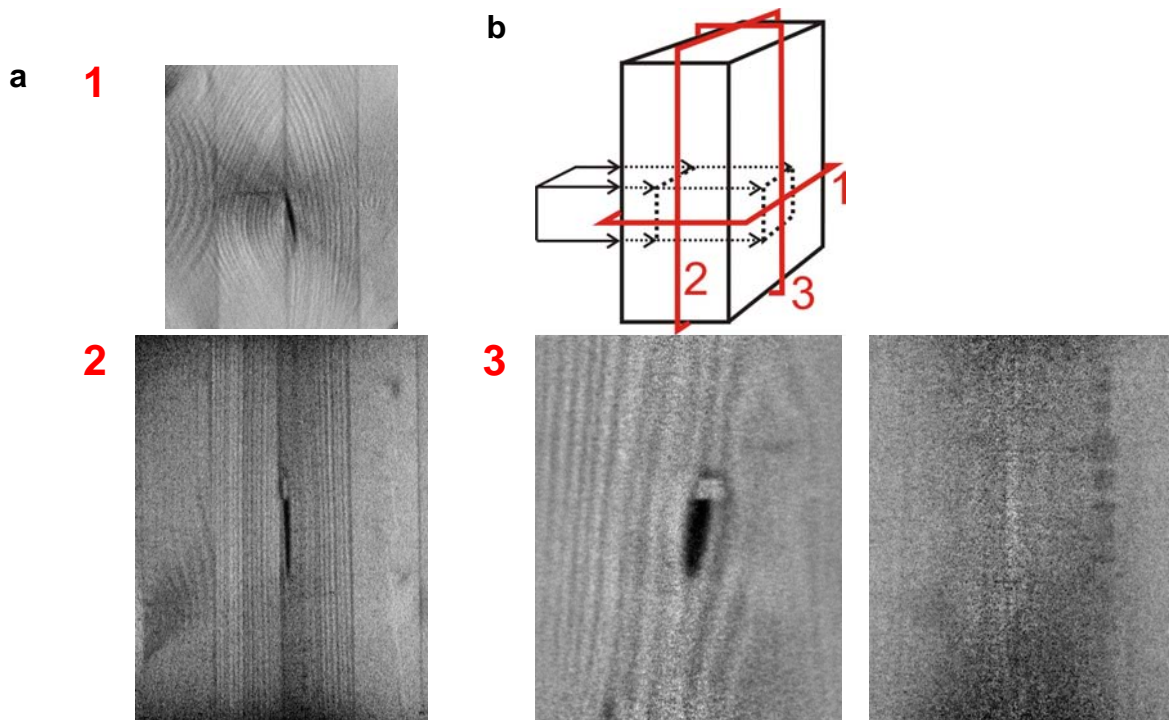
Nachdem gezeigt werden konnte, dass mit thermischen Neutronen Schichten bis zu 2 cm Dicke durchdrungen werden können [2], wurde das in **Abbildung 1a** gezeigte Brett am ANTARES-Messplatz mit thermischen Neutronen tomographisch untersucht. Der eingeschränkte Winkelbereich ist in der Skizze auf der rechten Seite in **Abbildung 3** angedeutet. Dargestellt sind die Schnittbilder in der Mittellage bzw. durch die zentrale Leimschicht nach der Rekonstruktion mit dem angegebenen Verfahren. Im Quer- und Längsschnitt ist die durchgehende Leimschicht in der Mitte zu erkennen, zusätzlich einige Jahrringe, z. T. nur andeutungsweise, am rechten und linken Bildrand zu sehen. Der flächig verlaufende Längsschnitt offenbart zusätzlich Teile von Jahrringen und Ästen. Die heterogene Dichteverteilung der Leimschicht zeigt sich erst im Schnitt mit seitlicher Aufsicht, wobei die maximale Dichte von 10 Schichten in einem Bild vereinigt wurde. Dies war notwendig, da der Verlauf der Leimschicht nicht exakt mit den Schnittschichten aus der Tomographie zusammenfiel. Offensichtlich drang der Leim teilweise in die Jahrringstruktur ein. Im Längsschnitt sind diese so nicht zu erkennen, können es auch nicht, wenn sie quer zur Strahlrichtung verlaufen.



**Abbildung 3:** Tomographie mit thermischen Neutronen und eingeschränktem Winkelbereich ( $90^\circ$ ): Blick auf einen mittigen Querschnitt von oben, einem flächigen Längsschnitt, auch in mittiger Lage und durch die Leimschicht. Im letzteren Bild wurden die maximalen Dichten von 10 Schichten zusammengefasst. In der Skizze rechts im Bild sind die Lage der Leimschicht und der Winkelbereich der Tomographie gezeigt.

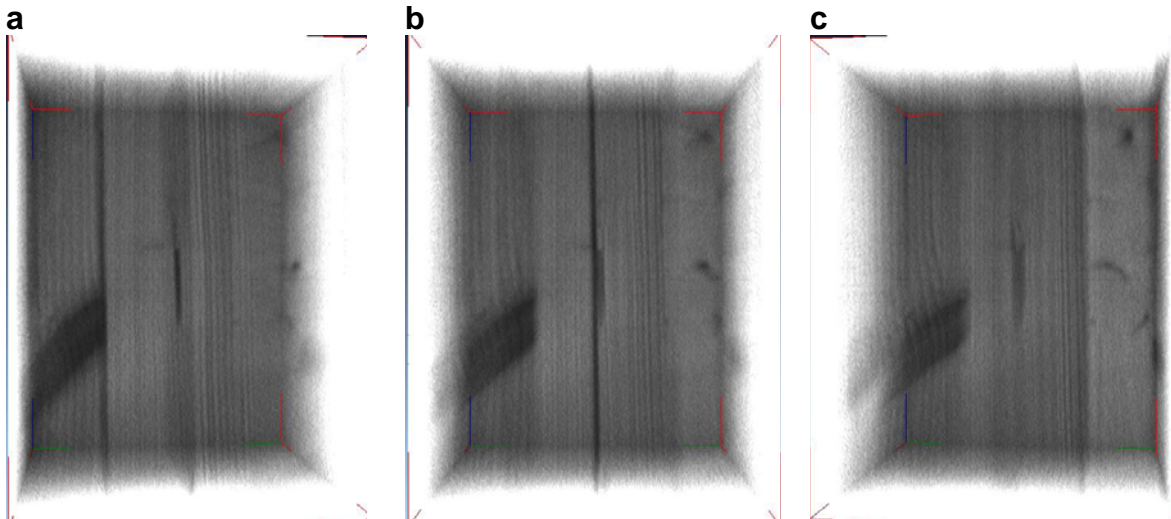
### 2.3 Schnelle Neutronen

Das große Brettschichtholzteil, das in den **Abbildungen 1c** und **1d** zu sehen ist, konnte nur mit den schnellen Neutronen durchdrungen werden, die am NECTAR-Messplatz zur Verfügung stehen. Das Ergebnis ist zusammen mit den Schnittrichtungen in der **Abbildung 4** dargestellt. Die begrenzte Strahlgeometrie erlaubte einen Einblick nur in einem kleinen Ausschnitt. Darin sind aber einige Strukturmerkmale erkennbar, so die Jahrringmuster, soweit sie nicht quer zur Strahlrichtung verlaufen. Zudem wurde in der Bildmitte ein Harzeinschluss gefunden, der anscheinend mit der zentralen Leimschicht verbunden war. Längs- und Querschnitt lassen dies vermuten. Die seitliche Aufsicht auf diesen Körper lässt erkennen, dass dieser mit der Jahrringstruktur in Verbindung steht. Dies geht nicht eindeutig aus den anderen Blickrichtungen hervor. In einer anderen Schicht zwischen zwei Brettern sind deutlich klumpenartige Verdichtungen zu erkennen (Teilbild rechts außen). Offensichtlich handelt es sich um Ausquellungen in einen Hohlraum, d.h. in eine Entlastungsnut, die den Holzblock entlang der Leimschichten durchzog (endgültig feststellen ließe sich dies durch Aufschneiden).



**Abbildung 4:** Tomographie eines Brettschichtholzes mit schnellen Neutronen, **a)** rekonstruierte Schnitte, **b)** Schnittrichtungen mit Nummerierung. Es sind zwei Schnitte hochkant parallel zur Strahlrichtung gezeigt (**3**), ein mit dem Harzeinschluss, der in den anderen Schnittrichtungen in der Mitte auch zu erkennen ist (Mitte) und der andere mit Leimklumpen, die offensichtlich in eine Entlastungsnut gedrückt wurden.

Bereits hier zeigt sich, dass die Erkennbarkeit von Strukturen von der Darstellungsweise abhängt. Die hier in festen Bildern gezeigten lassen sich auch nach und nach in einer angepassten Filmsequenz zeigen, d.h. im Vortrag, leider nicht in einem Artikel. Räumliche Extraktionsverfahren, wie sie üblicherweise bei Darstellung von Tomographieverfahren verwendet werden, stoßen aufgrund der begrenzten Bildqualität in der Radiographie mit schnellen Neutronen auf ihre Grenzen.



**Abbildung 5:** Volumendarstellung der drei im untersuchten Ausschnitt getroffenen Leimschichten:  
**a)** Leimschicht auf Harnstoffbasis in Verbindung mit einem Ast. Jahrringe im linken Brett sind deutlich sichtbar. **b)** mittlere Leimschicht auf Harzbasis. Die anderen Leimschichten sind aufgrund der Blickrichtung nicht erkennbar, jedoch ein Teil der Jahrringe aufgrund ihres unregelmäßigen Verlaufes. **c)** rechte Leimschicht zwischen Holzbrettern mit unterschiedlichem Verlauf der Maserung.

In der **Abbildung 5** sind Bilder in einer semitransparenten Darstellung eines dreidimensionalen Datenblocks mit Hilfe des „Volume Graphics“ Programms [4] aus drei relativ nah benachbarten Blickrichtungen wiedergegeben. Die genaue Einstellung des Sichtwinkels bestimmt die Erkennbarkeit der Leimschichten. Die zentral gelegene, auf Harz basierende Leimschicht ist am dichtesten und schärfsten abgebildet. Für verallgemeinernde Aussagen müssten mehr Untersuchungen an kontrolliert hergestellten Probestücken durchgeführt werden.

### 3. Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass mittels des Slice-Theorems [3] erfolgreich längliche Strukturen im Holz wie Jahrringverläufe, Leimschichten und flache Einschlüsse in Strahlrichtung auch dann erfolgreich tomographisch rekonstruiert wurden, wenn Projektionen nur aus einem eingeschränkten Winkelbereich zur Verfügung standen. Einzelheiten im dreidimensionalen Ergebnis konnten mit verschiedenen Darstellungsweisen wiedergegeben werden. Es fand sich jedoch keine für alle Aspekte. Die hier angewandte Technik erfordert jedoch, dass das zu prüfende Objekt in die Experimentierhalle der Forschungsneutronenquelle verbracht werden muss.

### Referenzen

- [1] Kurt Osterloh, Uwe Ewert, Christoph Rädle, Uwe Zscherpel, Andreas Hasenstab, Thomas Bücherl: Radiographie und Tomographie von Holz mit Neutronen, DACHJahrestagung 2008 in St.Gallen - Poster 30, DGZfP-Berichtsband BB 113 – CD (ISBN 978-3-940283-09-2), 2008
- [2] Kurt Osterloh, Daniel Fratzscher, Andreas Schwabe, Burkhard Schillinger, Uwe Zscherpel, Uwe Ewert, Radiography and Partial Tomography of Wood with Thermal Neutrons, 9th World Conferenc on Neutron Radiography, South Africa, 3 – 8 October 2010 (im Druck), Nucl. Instr. and Meth. A (2011), doi: 10.1016/j.nima.2011.02.095
- [3] T.M. Buzug, Computed Tomography (2008), DOI 10.1007/978-3-540-39408-2, p. 167-170,
- [4] VGStudio MAX 1.2, Volume Graphics GmbH, D-69123 Heidelberg, Germany, 2004, <http://www.volumegraphics.com>