

Neutron computed laminography on an ancient metal artefact

Neutronen-Laminographie am Beispiel eines historischen Artefakts

**Tobias Arlt^{*1}, Nikolay Kardjilov², Filomena Salvemini³, Andreas Kupsch⁴,
Francesco Grazzi⁵, Ingo Manke²**

- 1) Technische Universität Berlin, Institut für Werkstoffwissenschaften und –
technologien, Hardenbergstraße 36, 10623 Berlin, Germany
- 2) Helmholtz-Zentrum Berlin, Hahn-Meitner Platz 1, 14109 Berlin, Germany
- 3) Australian Centre for Neutron Scattering, ANSTO, Lucas Heights - NSW (AU)
- 4) Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87,
12205 Berlin
- 5) Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto dei Sistemi Complessi, Sesto
Fiorentino (FI), Italy

* Corresponding author: Dr. Tobias Arlt, Technische Universität Berlin, Straße des
17. Juni, 10623 Berlin, Germany, Tel.: +49 30 8062 42822, Fax: +49 30 8062 43059,
Email: tobias.arlt@helmholtz-berlin.de

Keywords

Neutronen-Laminographie, Computer-Tomographie, historische Artefakte, Metall-
Tsuba, Lötstellen, Kulturforschung

Abstract

Computed laminography (CL) has been developed to overcome different issues of the standard computed tomography (CT), especially for three-dimensional imaging of laterally extended specimens. CL was originally applied for medical purposes. Recently, CL has been used as a non-destructive and non-invasive method for materials science and rising interests in artwork investigations and for historical artefacts. Here, we report on the implementation of computed laminography with polychromatic neutron radiation carried out on a historical metal artefact. An analysis of solder joints gives conclusions about the manufacturing process of the tsuba, a Japanese sword guard plate. Different material systems were found, presumably to give the tsuba a higher stability. The measurements were performed at the CONRAD-2 neutron imaging facility at the BER 2 neutron source of the Helmholtz-Zentrum Berlin, Germany (HZB).

Kurzfassung

Die Computer-gestützte Laminographie (CL) wurde als komplementäre Methode zur Computertomographie für die dreidimensionale Bildgebung von lateral ausgedehnten Objekten entwickelt. Ursprünglich für medizinische Zwecke verwendet, wurde diese Methode kürzlich als nicht-zerstörungsfreie und nicht-invasive Methode nicht nur in der materialwissenschaftlichen Forschung, sondern auch mit steigendem Interesse für kunstwerkliche und historische Untersuchungen eingesetzt. In diesem Artikel berichten wir über die Umsetzung der Computer-gestützten Laminographie mit polychromatischer Neutronenstrahlung an einem historischen Tsuba, einem Stichblatt eines japanischen Schwerts. Eine Analyse der Lötstellen gibt Rückschlüsse auf das Herstellungsverfahren. Zudem wurden unterschiedliche Materialsysteme gefunden, vermutlich um dem Tsuba lokal eine höhere Stabilität zu verleihen. Die Messungen wurden an der Imaging-Beamline CONRAD-2 an der Neutronenquelle BER 2 des Helmholtz-Zentrums Berlins (HZB) durchgeführt.

Einleitung

Die Neutronen-Computertomographie (NCT) hat sich als leistungsstarke Methode zur zerstörungsfreien Untersuchung auf zahlreichen Gebieten neben der klassischen Röntgen-Computertomographie etabliert [1-7]. Das Anwendungsfeld reicht von der Untersuchung technischer Materialien, Bauteile und Komponenten [8-12], über nicht-invasive *in-situ/operando*-Untersuchungen zum Beispiel von Batterien [13-15], Brennstoffzellen [16-20] oder Wasserstoffspeichern [21-23], bis hin zu grundlegenden Fragestellungen aus Biologie [24-26] und Physik [27-32]. Nicht zuletzt gibt es eine wachsende Nutzergemeinde aus dem Bereich der Archäologie [33,34]. Ein grundsätzliches Problem stellen flächige Proben für die NCT dar, da bei Einstrahlwinkeln, unter denen die Fläche der Probe parallel oder nahe an dem einfallenden Strahl orientiert ist, die Strahlung fast vollständig geschwächt werden kann, da der Strahl eine dicke Materialschicht durchdringen muss. In diesem Fall kann die Rekonstruktion der NCT-Daten schwer korrigierbare Artefakte erzeugen, welche die Dateninterpretation negativ beeinflussen können [35].

Um dieses Problem zu überwinden wurde die Computer-basierte Laminographie (CL) als Methode zur Komplementierung der Computertomographie zur dreidimensionalen Messung von seitlich ausgedehnten Proben entwickelt. Erste Messungen, bei denen diese Methode Anwendung fand, wurden bereits 1932 durchgeführt [36]. Die CL lässt sich in zwei Verfahren einteilen: der translatorischen und der rotatorischen Laminographie. Bei letzterem auch hier verwendetem Verfahren wird die Drehachse in Bezug auf die senkrecht zum Strahl orientierte Standard-Tomographie-Drehachse geneigt. Die flächige Seite der Probe ist dann etwa senkrecht zur Rotationsachse angeordnet. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die integrale Transmission für den gesamten Satz von Winkelprojektionen nahezu konstant bleibt und keine lokalen Minima unter bestimmten Rotationswinkeln aufweist. Infolgedessen kann die Probe ohne die oben beschriebenen Probleme tomographiert und die Messdaten rekonstruiert werden [37,38].

Die frühzeitige Verwendung von Laminographie mit Röntgenstrahlen erfolgte im Bereich der medizinischen Anwendungen [39]. Kürzlich wurde die Neutronen-basierte Laminographie auch auf die materialwissenschaftliche Forschung [40] angewendet und das Interesse an der Anwendung der Technik auf Kunst oder archäologische Objekte stieg, da solche Proben eine Untersuchung durch nicht-

invasive Methoden erfordern [41,42]. In Anbetracht der Leistungsfähigkeit der Laminographie im Rahmen der Aufarbeitung von Wissen über historische Technologien war der Zweck dieser Studie, weiterführende Anwendungen dieser nicht-invasiven Methoden zu untersuchen. Die vorliegende Studie diskutiert die Verwendung der Neutronen-basierten laminographischen Methode anhand von alten Metallartefakten. Die vorliegende Arbeit basiert auf Messungen, welche bereits anderweitig veröffentlicht worden sind [33] und erweitert diese um technische Detailbetrachtungen.

Versuchsaufbau

Die neutronentomographischen Messungen wurden an der Beamline CONRAD-2 am Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) durchgeführt. CONRAD-2 ist eine multifunktionale Einrichtung für Radiographie und Tomographie mit kalten Neutronen. Die Messstation befindet sich am Ende eines gekrümmten Neutronenleiters der kalten Neutronenquelle des BER 2-Forschungsreaktors [43-45]. Die Anlage liefert einen Strahl kalter Neutronen mit Wellenlängen zwischen 2-12 Å, mit einem Flussmaximum bei ca. 4,5 Å. Der maximal verfügbare Fluss an der Probenposition beträgt etwa $2 \times 10^7 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bei einem L/D-Verhältnis von 300 [46]. L ist hierbei die Flugstrecke der Neutronen zwischen dem Ausgangsfenster des Neutronenleiters und dem Probenort. D ist die Breite des Ausgangsfensters des Neutronenleiters. Auf dieses Verhältnis der beiden Strecken wird im Folgenden und in Abbildung 3a detaillierter eingegangen. Die Verfügbarkeit von kalten Neutronen am Instrument ermöglicht es im Vergleich zu thermischen Neutronen den Kontrast zwischen verschiedenen Elementen/Phasen des Materials zu erhöhen und somit auch die Messsensitivität zu verbessern.

ABBILDUNG 1

Im Probenaufbau ist ein Goniometer integriert, mit welchem Neigungswinkel im Bereich $-20 \dots 20^\circ$ einstellbar sind. Das Goniometer ist, wie in Abbildung 1 gezeigt, derart in den Aufbau integriert, dass nicht nur die Probe selbst sondern auch die

Drehachse geneigt wird. Letzteres ist essentiell für die CL. Die Drehachse wurde für diese Messungen um 20° zum Detektor hin gekippt, s. Abbildung 1 (ein Neigungswinkel $\alpha=0^\circ$ würde einer Standard-Tomographie Messanordnung entsprechen). 500 Winkelprojektionen wurden bei schrittweiser Drehung über einen gesamten Winkelbereich von 360° aufgenommen. Das l/d Verhältnis beschreibt den geometrischen Zusammenhang zwischen der Geometrie des Neutronenstrahls und der Geometrie des Aufbaus Probe und Detektorsystem und hat einen maßgeblichen Einfluss auf die maximal erzielbare optische Auflösung der Tomographie. Je kleiner dieses Verhältnis ist, desto stärker ist die geometrische Verschmierung des Signals am Detektor. So wird die Breite des aus dem Strahlausgangsfenster austretenden Neutronenstrahls mit D gekennzeichnet, die Flugstrecke zur Probe als L . Gleichermaßen wird die Strecke Probe-Detektor als l und die abgebildete Pixelgröße als d gekennzeichnet. Weitere experimentelle Parameter sind in Tabelle 1 aufgelistet. Dieses Verhältnis wurde auf einen Wert von 300 festgelegt und wird im Folgenden näher betrachtet. Die gemessenen Projektionen wurden nach dem laminographischen Verfahren unter Verwendung des Softwarepakets Octopus [47] rekonstruiert und mit VG STUDIOMAX [48] visualisiert.

TABELLE 1

Untersuchungsobjekt

Für die vorliegende Studie wurde ein Handteller eines japanischen Schwerts (Tsuba) untersucht, welcher von einem privaten Sammler zur Verfügung gestellt wurde. Ein Lichtbild der Probe ist in Abbildung 2a gezeigt.

ABBILDUNG 2

Diese aus Eisen bestehende Tsuba weist eine leicht elliptische äußere Form auf und hat einem abgerundeten Rand. Dieses Tsuba ist mit einem Ranken-Design (*Sukashi-Technik*), einschließlich einem Drachen, einem Juwel und stilisierten Blumen verziert.

Die äußere Felge ist abgerundet und vergoldet. Zudem gibt es Gold-Spuren auch in anderen Bereichen. Die Tsuba ist nicht signiert, kann aber aufgrund des erkennbaren *namban*-Stils auf die erste Hälfte des 18. Jahrhunderts datiert werden und stammt vermutlich aus dem Nagasaki (Hizen) Gebiet. Das japanische Wort *namban*, übersetzt "südlicher Barbar", wurde von Japanern nicht nur verwendet um einen Ausländer zu bezeichnen der in ihr Land eintrat, sondern auch um verschiedenste Kunstwerke zu bezeichnen, deren Dekorationen einen fremden Einfluss in ihrem Aussehen widerspiegeln. Der Durchmesser von 8 cm führt lässt vermuten dass dieser Handteller für ein langes Schwert (*katana*) geschaffen wurde. Es ist mit einem *nakago hitu*, dem zentralen Loch für die Anpassung des Erls der Klinge, und ein *kozuka hitsu*, das Loch an der linken Seite für die Aufnahme des Griffs eines kleinen Messers namens *Kozuka*, ausgestattet.

Ergebnisse und Diskussion

Ein sehr interessanter Aspekt ist die Analyse des Einflusses des Neigungswinkels auf die Qualität des rekonstruierten Volumens, welche sich beispielsweise anhand des Signal-Rausch-Verhältnisses quantitativ bewerten lässt. Xu et al. [49] führten weitreichende Untersuchungen durch und schlussfolgerten, dass ein möglichst kleiner Neigungswinkel, der jedoch im Vergleich zur CT die gewünschten Verbesserung mit sich bringt, am geeignetsten ist. Um diesen Winkel zu finden, muss die Messanordnung, die Probengeometrie und die Probenbeschaffenheit einbezogen werden und kann daher nur durch experimentelle Versuche ermittelt werden und ist folglich sehr aufwändig.

Ein weiterer Vorteil der Laminographie ist die Verbesserung des l/d Verhältnisses bei der Verwendung von Neutronenstrahlung, da sich durch die Neigung der Drehachse der Schwerpunkt der Probe näher an den Detektor platzieren lässt. Dies führt für Neigungswinkel $\alpha > 0^\circ$ zu einer verringerten Weglänge l' im Vergleich zur Weglänge l bei einem Neigungswinkel $\alpha = 0^\circ$ (Abbildung 3a). Diese verkürzte Wegstrecke errechnet sich aus $l' = l \cdot \cos(\alpha)$. Für den bei diesen Messungen verwendeten Neigungswinkel von $\alpha = 20^\circ$ erhält man auf diese Weise, im Vergleich zum l/d -Verhältnis, ein um Faktor 0,94 verbessertes l'/d -Verhältnis. Sofern $L/D > l'/d$ erfüllt ist und das Detektorsystem qualitativ ausreichend ist, kann dies zu einer geringeren

Verschmierung der Information auf dem Detektorsystem [50]. Zu beachten ist, dass sich l/d und l'/d auf den Probenschwerpunkt beziehen. Insbesondere gleicht ein Neigungswinkel $\alpha > 0^\circ$ auch das l_1/d , dem Verhältnis der dem Detektorsystem abgewandten Probenteile, und l_2/d , dem Verhältnis der dem Detektorsystem zugewandten Probenteile, an. Bei flächigen Proben, deren äußeren Dimensionen einen deutlichen Unterschied zwischen Breite und Höhe aufweisen, führt dies zu einer weiteren Verbesserung der Rekonstruktion. Diese Verbesserung des geometrischen Verhältnisses wird durch die gepunkteten Linien in Abbildung 3a skizzenhaft verdeutlicht. Grundlage ist jedoch ein in der Höhe ausreichend dimensioniertes Detektorsystem.

ABBILDUNG 3

In der hier untersuchten Probe äußern sich diese Vorteile durch eine sehr detaillierte Abbildung. Eine rekonstruierte Ansicht des Handtellers ist in Abbildung 2b abgebildet. Schwach ausgeprägte Riefen am mittleren Loch, wie im Lichtbild Abbildung 2a, sind auch in der virtuellen Probe erkennbar. Abbildung 4 zeigt in Falschfarben dargestellte orthogonale Schnitte durch die Probe sowie Ausschnittsvergrößerungen von interessanten Bereichen. Helle Bereiche repräsentieren Probenteile hoher Absorption. Rot-bläuliche Bereiche bilden weniger schwächende Bereiche ab. Daher ist in Abbildung 4a die vergoldete Felge der Tsuba anhand der hellen Pixel identifizierbar. Im Inneren der Probe gibt es Bereiche unterschiedlich starker Schwächungen, wobei der Ausschnitt um das Loch für das Messer herum höher schwächend ist. Hier wurde offenbar ein anderes, härteres Material verwendet, vermutlich um diese stark beanspruchte Stelle zu stabilisieren. Anhand von virtuellen Schnittflächen Abbildung 4b und e können Lötstellen gefunden und örtlich zugeordnet werden. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Herstellung dieser komplexen und kunstvollen Strukturen. Interessanterweise sind diese Lötstellen nicht in der orthogonalen Ansicht c-d vorhanden, was anhand den unterschiedlichen Schwächungskoeffizienten in den Ausschnittsvergrößerungen d und e gut erkennbar ist. Hier liegt vermutlich eine Oberflächenveränderung vor [51], was die veränderten Schwächungskoeffizienten erklären könnte. Dieses örtlich gezielte Anwenden des

Lötens als Herstellungstechnik verdeutlicht die Komplexität der Herstellung dieser Tsuba.

ABBILDUNG 4

Zusammenfassung

Die Standard-Computer-Tomographie (CT) ist eine etablierte Messmethode zur zerstörungsfreien Untersuchung von Proben aus unterschiedlichen Fachgebieten geworden. Dennoch beinhaltet sie methodische Einschränkungen, welche das Ergebnis der Analysen verfälschen können. Dies ist insbesondere bei höher schwächenden, flächigen Proben der Fall. In der vorliegenden Studie wird daher die Computer-gestützte Laminographie (CL) als ein Ausweg beschrieben und wird anhand eines Beispiels - eines Stichblatts eines historischen japanischen Schwerts (Tsuba) - erläutert. Im Vergleich zur CT ermöglichen die methodischen Verbesserungen der CL in diesem Fall einen detaillierteren Einblick in die Struktur der Tsuba. Erst dadurch konnten Rückschlüsse auf frühere Verarbeitungstechnologien gezogen werden und lässt die damalige Kultur unter einem anderen Licht erscheinen. Eine Anwendung dieser Messmethodik auf Proben materialwissenschaftlichen oder medizinischen Ursprungs ist ebenso möglich und kann den Zugang zu bisher schwer erfassbaren Informationen vereinfachen.

Danksagung

Die Autoren danken der Royal Society of Chemistry für die Erlaubnis entsprechend markierte Auszüge aus [33] wiederverwenden zu dürfen.

Referenzen

¹ B. Schillinger, E. Lehmann, P. Vontobel: 3D neutron computed tomography: requirements and applications, Physica B 276–278 (2000), pp. 59–62 DOI: 10.1016/S0921-4526(99)01254-5

-
- ² B. Schillinger, W. Blümlhuber, A. Fent, M. Wegner: 3D neutron tomography: recent developments and first steps towards reverse engineering, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 424 (1999), No. 1, pp. 58–65 DOI: 10.1016/S0168-9002(98)01239-X
- ³ E. Lehmann, E. Deschler-Erb, A. Ford: Neutron Tomography as a valuable tool for the non-destructive analysis of historical bronze sculptures, *Archaeometry* 52 (2010), pp. 272-285 DOI: 10.1111/j.1475-4754.2009.00480.x
- ⁴ F. Salvemini, F. Grazzi, S. Peetermans, F. Civita, R. Franci, S. Hartmann, E. Lehmann, M. Zoppi: Quantitative characterization of Japanese ancient swords through energy-resolved neutron imaging, *J. Anal. At. Spectrom.* 27 (2012), pp. 1494-1501 DOI: 10.1039/C2JA30035D
- ⁵ F. Salvemini, F. Grazzi, A. Agostino, R. Iannaccone, F. Civita, S. Hartmann, E. Lehmann, M. Zoppi: Non-invasive characterization through X-ray Fluorescence and neutron radiography of an ancient Japanese lacquer, *Archaeological and Anthropological Sciences* 5 (2013), pp. 197-204 DOI: 10.1007/s12520-013-0127-6
- ⁶ F. Salvemini, F. Grazzi, A. Fedrigo, A. Williams, F. Civita, A. Scherillo, P. Vontobel, S. Hartmann, E. Lehmann, M. Zoppi: Revealing secrets of composite helmets of ancient Japanese tradition, *Eur. Phys. J. Plus* 128 (2013), pp. 87-97 DOI: 10.1140/epjp/i2013-13087-y
- ⁷ N. Kardjilov, I. Manke, R. Woracek, A. Hilger, J. Banhart: Advances in neutron imaging, *Materials Today* DOI: 10.1016/j.mattod.2018.03.001
- ⁸ N. Kardjilov, I. Manke, A. Hilger, S. Williams, M. Strobl, R. Woracek, M. Boin, E. Lehmann, D. Penumadu, J. Banhart: Neutron Bragg-edge mapping of weld seams, *International Journal of Materials Research* 103 (2012), pp. 151-154 DOI: 10.3139/146.110673
- ⁹ A. Griesche, E. Dabah, T. Kannengiesser, N. Kardjilov, A. Hilger, I. Manke: Three-dimensional imaging of hydrogen blister in iron with neutron tomography, *Acta Materialia* 78 (2014), pp. 14-22 DOI: 10.1016/j.actamat.2014.06.034
- ¹⁰ R. Woracek, D. Penumadu, N. Kardjilov, A. Hilger, M. Strobl, R.C. Wimpory, I. Manke, J. Banhart: Neutron Bragg-edge-imaging for strain mapping under in situ tensile loading, *Journal of Applied Physics* 109 (2011), pp. 093506 DOI: 10.1063/1.3582138
- ¹¹ R. Woracek, D. Penumadu, N. Kardjilov, A. Hilger, M. Boin, J. Banhart, I. Manke: 3D Mapping of Crystallographic Phase Distribution using Energy-Selective Neutron Tomography, *Advanced Materials* 26 (2014), pp. 4069-4073 DOI: 10.1002/adma.201400192
- ¹² A. Hilger, N. Kardjilov, T. Kandemir, I. Manke, J. Banhart, D. Penumadu, A. Manescu, M. Strobl: Revealing microstructural inhomogeneities with dark-field neutron imaging, *Journal of Applied Physics* 107 (2010), pp. 036101 DOI: 10.1063/1.3298440
- ¹³ F. Sun, H. Markötter, I. Manke, A. Hilger, S.S. Alrwashdeh, N. Kardjilov, J. Banhart: Complementary X-ray and neutron radiography study of the initial lithiation

process in lithium-ion batteries containing silicon electrodes, *Applied Surface Science* 399 (2017), pp. 359-366 DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.12.093

¹⁴ M. Hofmann, R. Gilles, Y. Gao, J.T. Rijssenbeek, M.J. Muehlbauer: Spatially Resolved Phase Analysis in Sodium Metal Halide Batteries: Neutron Diffraction and Tomography, *Journal of The Electrochemical Society*, 159 (2012), pp. A1827-A1833, DOI: 10.1149/2.058211jes

¹⁵ J.P. Owejan, J.J. Gagliardo, S.J. Harris, H. Wang, D.S. Hussey, D.L. Jacobson: Direct measurement of lithium transport in graphite electrodes using neutrons, *Electrochimica Acta* 66 (2012), pp. 94-99 DOI: 10.1016/j.electacta.2012.01.047

¹⁶ M. Klages, S. Enz, H. Markotter, I. Manke, N. Kardjilov, J. Scholta: Investigations on dynamic water transport characteristics in flow field channels using neutron imaging techniques, *Journal of Power Sources* 239 (2013), pp. 596-603 DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.01.196

¹⁷ H. Markotter, I. Manke, R. Kuhn, T. Arlt, N. Kardjilov, M.P. Hentschel, A. Kupsch, A. Lange, C. Hartnig, J. Scholta, J. Banhart: Neutron tomographic investigations of water distributions in polymer electrolyte membrane fuel cell stacks, *Journal of Power Sources* 219 (2012), pp. 120-125 DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.07.043

¹⁸ T. Arlt, W. Lücke, N. Kardjilov, J. Banhart, W. Lehnert, I. Manke: Monitoring the hydrogen distribution in poly(2,5-benzimidazole)-based (ABPBI) membranes in operating high-temperature polymer electrolyte fuel cells by using H-D contrast neutron imaging, *Journal of Power Sources* 299 (2015), pp. 125-129 DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.08.094

¹⁹ R.J. Bellows, M.Y. Lin, M. Arif, A.K. Thompson, D. Jacobson: Neutron Imaging Technique for In Situ Measurement of Water Transport Gradients within Nafion in Polymer Electrolyte Fuel Cells, *Journal of The Electrochemical Society* 146 (1999), pp. 1099 - 1103 DOI: 10.1149/1.1391727

²⁰ P. Boillat, G. Frei, E.H. Lehmann, G.G. Scherer, A. Wokaun: Neutron Imaging Resolution Improvements Optimized for Fuel Cell Applications, *Electrochemical and Solid-State Letters* 13 (2010), pp. B25-B27 DOI: 10.1149/1.3279636

²¹ L. Gondek, N.B. Selvaraj, J. Czub, H. Figiel, D. Chapelle, N. Kardjilov, A. Hilger, I. Manke: Imaging of an operating LaNi_{4.8}Al_{0.2}-based hydrogen storage container, *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011), pp. 9751-9757 DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.089

²² K. Herbrig, C. Pohlmann, L. Gondek, H. Figiel, N. Kardjilov, A. Hilger, I. Manke, J. Banhart, B. Kieback, L. Röntzsch: Investigations of the structural stability of metal hydride composites by in-situ neutron imaging, *Journal of Power Sources* 293 (2015), pp. 109-118 DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.05.039

²³ C. Pohlmann, K. Herbrig, L. Gondek, N. Kardjilov, A. Hilger, H. Figiel, J. Banhart, B. Kieback, I. Manke, L. Röntzsch: In operando visualization of hydride-graphite composites during cyclic hydrogenation by high-resolution neutron imaging, *Journal of Power Sources* 277 (2015), pp. 360-369 DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.12.011

-
- ²⁴ U. Matsushima, W.B. Herppich, N. Kardjilov, W. Graf, A. Hilger, I. Manke: Estimation of water flow velocity in small plants using cold neutron imaging with D₂O tracer, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 605 (2009), pp. 146-149 DOI: 10.1016/j.nima.2009.01.187
- ²⁵ C. Tötzke, N. Kardjilov, I. Manke, S.E. Oswald: Capturing 3D Water Flow in Rooted Soil by Ultra-fast Neutron Tomography, *Scientific Reports*, 7 (2017) DOI: 10.1038/s41598-017-06046-w
- ²⁶ C. Tötzke, T. Miranda, W. Konrad, J. Gout, N. Kardjilov, M. Dawson, I. Manke, A. Roth-Nebelsick: Visualization of embolism formation in the xylem of liana stems using neutron radiography, *Annals of Botany* 111 (2013), No. 4, pp. 723-730 DOI: 10.1093/aob/mct014
- ²⁷ M. Dawson, I. Manke, N. Kardjilov, A. Hilger, M. Strobl, J. Banhart: Imaging with polarized neutrons, *New Journal of Physics* 11 (2009), pp. 043013 DOI: 10.1088/1367-2630/11/4/043013
- ²⁸ I. Manke, N. Kardjilov, M. Strobl, A. Hilger, J. Banhart: Investigation of the skin effect in the bulk of electrical conductors with spin-polarized neutron radiography, *Journal of Applied Physics* 104 (2008), pp. 076109 DOI: 10.1063/1.2992516
- ²⁹ M. Strobl, W. Treimer, C. Ritzoulis, A.G. Wagh, S. Abbas, I. Manke: The new V12 ultra-small-angle neutron scattering and tomography instrument at the Hahn-Meitner Institut, *Journal of Applied Crystallography* 40 (2007), pp. S463-S465 DOI: 10.1107/s0021889806050813
- ³⁰ M. Strobl, N. Kardjilov, A. Hilger, E. Jericha, G. Badurek, I. Manke: Imaging with polarized neutrons, *Physica B: Condensed Matter* 404 (2009), pp. 2611-2614 DOI: 10.1016/j.physb.2009.06.032
- ³¹ S.W. Lee, K.Y. Kim, O.Y. Kwon, N. Kardjilov, M. Dawson, A. Hilger, I. Manke: Observation of Magnetic Domains in Insulation-Coated Electrical Steels by Neutron Dark-Field Imaging, *Applied Physics Express* 3 (2010), pp. 106602 DOI: 10.1143/APEX.3.106602
- ³² M. Strobl, W. Treimer, P. Walter, S. Keil, I. Manke: Magnetic field induced differential neutron phase contrast imaging, *Applied Physics Letters* 91 (2007), pp. 254104 DOI:10.1063/1.2825276
- ³³ F. Salvemini, F. Grazzi, N. Kardjilov, I. Manke, F. Civita, M. Zoppi: Neutron computed laminography on ancient metal artefacts, *Analytical Methods* 7 (2015), pp. 271-278 DOI: 10.1039/c4ay02014f
- ³⁴ F.C. de Beer, H. Botha, E. Ferg, R. Grundlingh, A. Smith: Archaeology benefits from neutron tomography investigations in South Africa, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* 605 (2009), pp. 167-170 DOI: 10.1016/j.nima.2009.01.213
- ³⁵ L. Helfen, T. Baumbach, P. Mikulik, D. Kiel, P. Pernot, P. Cloetens, J. Baruchel: *Appl. Phys. Lett.* 86 (2005), No. 071915 DOI: 10.1063/1.1854735

-
- ³⁶ Z. des Plantes: Eine neue Methode zur Differenzierung in der Röntgenographie, *Acta Radio.* 13 (1932), pp. 182-192 DOI: 10.3109/00016923209135135
- ³⁷ L. Helfen, T. F. Morgeneyer, F. Xu, M. N. Mavrogordato, I. Sinclair, B. Schillinger, T. Baumbach: Neutron laminography — a novel approach to three-dimensional imaging of flat objects with neutrons, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 651 (2011), No. 1, pp. 135–139 DOI: 10.1016/j.nima.2011.01.114
- ³⁸ L. Helfen, T. F. Morgeneyer, F. Xu, M. N. Mavrogordato, I. Sinclair, B. Schillinger, T. Baumbach: Synchrotron and neutron laminography for three-dimensional imaging of devices and flat material specimens, *Int. J. Mater. Res.* 103 (2012), pp. 170–173, DOI: 10.3139/146.012021
- ³⁹ D. G. Grant: Tomosynthesis: a three-dimensional radiographic imaging technique, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 19 (1972), pp. 20 DOI: 10.1109/TBME.1972.324154
- ⁴⁰ A. Lange, A. Kupsch, M.P. Hentschel, I. Manke, N. Kardjilov, T. Arlt, R. Grothausmann: Reconstruction of limited CT data of fuel cell components using DIRECTT, *Journal of Power Sources* 196 (2010), pp. 5293-5298 DOI: 10.1016/j.jpowsour.2010.10.106
- ⁴¹ K. Krug, L. Porra, P. Coan, G. Tauber, A. Wallert, J. Dik, A. Coerdts, A. Bravin, M. Elyyan, L. Helfen, T. Baumbach: Relics in medieval altarpieces? Combining X-ray tomographic, laminographic and phase-contrast imaging to visualize thin organic objects in paintings, *J. Synchrotron Radiat.* 15 (2008), pp. 55 DOI: 10.1107/S0909049507045438
- ⁴² H.-Y. Nguyen. *Computed Tomography for the Non-destructive Imaging of Cultural Heritage: X-ray, Gamma and Neutron Sources*, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2011, URI: <http://hdl.handle.net/1974/6713>
- ⁴³ N. Kardjilov, A. Hilger, I. Manke, CONRAD-2: Cold Neutron Tomography and Radiography at BER II (V7): *Journal of large-scale research facilities* 2 (2016), pp. A98 DOI:10.17815/jlsrf-2-108
- ⁴⁴ N. Kardjilov, A. Hilger, I. Manke, M. Strobl, S. Williams, M. Dawson, J. Banhart: Neutron tomography instrument CONRAD at HZB, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 651 (2011), No.1, pp. 47–52 DOI: 10.1016/j.nima.2011.01.067
- ⁴⁵ N. Kardjilov, A. Hilger, I. Manke, R. Woracek, J. Banhart: CONRAD-2: the new neutron imaging instrument at the Helmholtz-Zentrum Berlin, *Journal of Applied Crystallography* 49 (2016), pp. 195-202 DOI: 10.1107/s1600576715023353
- ⁴⁶ N. Kardjilov, M. Dawson, A. Hilger, I. Manke, M. Strobl, D. Penumadu, F. H. Kim, F. Garcia-Moreno, J. Banhart, A highly adaptive detector system for high resolution neutron imaging, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 651(2011), No. 1, pp. 95–99 DOI: 10.1016/j.nima.2011.02.084
- ⁴⁷ M. Dierick, B. Masschaele, L. Van Hoorebeke: Octopus, a fast and user-friendly tomographic reconstruction package developed in LabView (R), *Meas. Sci. Technol.* 15 (2004), No. 7, pp. 1366–1370 DOI: <http://hdl.handle.net/1854/LU-310054>

⁴⁸ <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio-max.html> (last access May 14, 2018).

⁴⁹ F. Xu, L. Helfen, T. Baumbach, H. Suhonen, Comparison of image quality in computed laminography and tomography, *Optics Express* 20 (2012), No. 2, pp. 794-806 DOI: 10.1364/OE.20.000794

⁵⁰ Andreas Kupsch, Axel Lange, Manfred P. Hentschel, Bernd R. Müller, Improved Computed Tomography by Variable Desmearing, *Materials Testing* 52 (2010), No. 6, pp. 394-400 DOI: 10.3139/120.110141

⁵¹ E. Sugimori, *Japanese Patinas*, Brynmorgen Press, 2004, ISBN 1-929565-11-9.