

Rekonstruktion limitierter CT-Datensätze von Brennstoffzellen mit DIRECTT

Axel LANGE*, Manfred P. HENTSCHEL*, Andreas KUPSCH*, Ingo MANKE**,
Nikolay KARDJILOV**, Tobias ARLT**, Roman GROTHAUSMANN**

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12200 Berlin

** Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, Hahn-Meitner-Platz 1,
14109 Berlin

Kurzfassung. Die Aufklärung spezifischer Fragestellungen zur Funktionalität von PEM (polymer electrolyte membrane)- und DMFC (Direct Methanol)-Brennstoffzellen bedarf der 3D-Abbildung der betreffenden Komponenten. Mittel der Wahl sind CT-Messungen mit unterschiedlichen Strahlungsarten: zur Darstellung des Wassergehalts in den Flowfields kommen Neutronen zum Einsatz, Synchrotronstrahlung zur Beschreibung von Alterungsprozessen der Katalysatoren in der MEA (membrane electrode assembly) auf der mm- bzw. μm -Skala sowie Elektronen (TEM) zur Bestimmung der freien (reaktiven) Oberfläche von nanometergroßen Katalysatorpartikeln. Diese Messungen gehen einher mit massiven Restriktionen: einer ortsabhängigen Brennfleckverschmierung bei Neutronen, deutlichen Manipulatorinstabilitäten bei den Synchrotronmessungen sowie einer Kombination von Limited View, wenigen Projektionswinkeln und teilweiser Nichtdurchstrahlbarkeit bei der Elektronen-CT. Die Vorteile des eigens fortentwickelten DIRECTT-Algorithmus' bei der Bewältigung dieser Randbedingungen gegenüber gefilterten Rückprojektionen werden aufgezeigt.

Einführung

Im Zusammenhang mit regenerativen Energiequellen der Zukunft werden häufig Brennstoffzellen [1] zur Verwertung von Energiezwischen Speichern diskutiert. Insbesondere Niedertemperaturbrennstoffzellen haben wegen hoher Herstellungskosten, suboptimaler Leistungsdichte und Alterungseffekten noch nicht die kommerzielle Reife erlangt.

Die damit verbundenen technischen Probleme betreffen vor allem das ‚Wassermanagement‘ in der Zelle, d.h. die Betriebsparameter, aber auch die Präparation kritischer Komponenten [2,3].

Es besteht also die Herausforderung, das Verständnis der realen physikalischen und elektrochemischen Vorgänge in Brennstoffzellen zu verbessern. Für die Gewinnung neuartiger Erkenntnisse werden zerstörungsfreie bildgebende Verfahren eingesetzt, beispielsweise Neutronenradiographie zur *in situ*-Abbildung des Wassertransports in den Flowfield-Kanälen. Allerdings ist die derart erhaltene Information nur 2-dimensional, da in Durchstrahlungsrichtung über alle Schwächungskoeffizienten integriert wird. Mit erheblichen Mehraufwand können jedoch durch computertomographische Untersuchungsmethoden 3-dimensionale Abbildungen gewonnen werden. Je nach Fragestellung werden die Art der Strahlung, Messzeit und Detektoren so gewählt, dass Dynamikbereich, Kontrast und Ortsauflösung der spezifischen Aufgabenstellung angemessen sind. Die Abmessungen der jeweiligen interessierenden Objekte überstreichen mehrere Größen-

ordnungen: von einigen Nanometern bis zu einigen Hundert Mikrometern: (i) auf der Nanometerskala soll die freie (reaktive) Oberfläche von metallischen Katalysatorpartikeln auf Kohlenstoff-Supports abgeschätzt, (ii) auf der Mikrometerskala Degradationen der MEA vor und nach Betrieb einer DMFC untersucht und (iii) auf der Skala einiger Hundert Mikrometer die Tröpfchenbildung flüssigen Wassers in den Flowfield-Kanälen 3-dimensional abgebildet werden (Abb. 1). Der erreichbare Kontrast wird durch die Wechselwirkungsmechanismen der jeweiligen Strahlung mit Materie bestimmt. Für Aufgabe (iii) ist Röntgenstrahlung ungeeignet, da Wasser sie nur schwach absorbiert. Dagegen kann Wasserstoff (wegen starker Streuung) mit Neutronen sehr gut abgebildet werden. Für (ii) findet parallele monochromatische Synchrotronstrahlung Anwendung, für (i) werden die Tomogramme wegen der geforderten Ortsauflösung im Transmissions-elektronenmikroskop (TEM) aufgenommen.

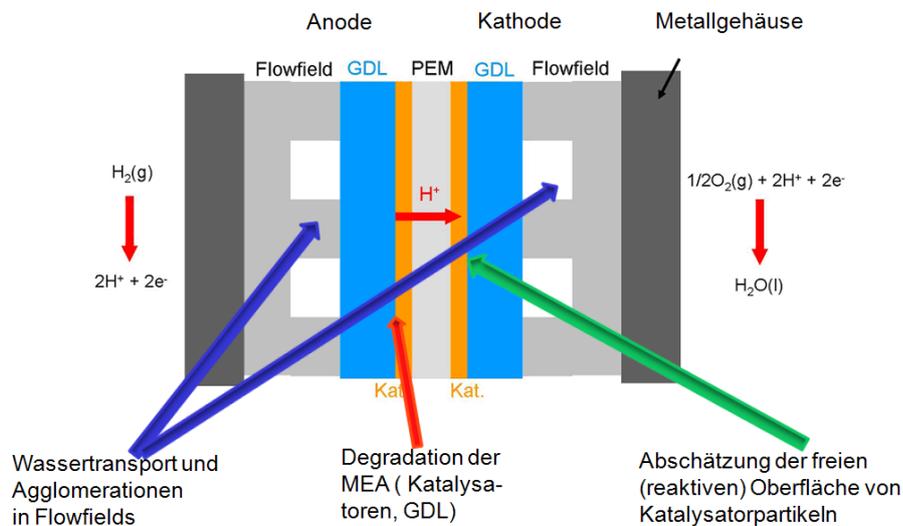


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Brennstoffzelle und Messaufgaben der Computer-Tomographie

Alle entsprechenden Messungen sind mit Restriktionen (im Sinne unvollständiger CT-Datensätze), Abbildungsfehlern oder Messinstabilitäten verbunden, die bei Anwendung der Standard-Rekonstruktionsalgorithmen zu starken Artefakten führen. Da sich der DIRECTT-Algorithmus (Direkte iterative Rekonstruktion computertomographischer Trajektorien) [4] in Modellrechnungen als robust gegenüber den verschiedenen Restriktionen erweist [5,6], wird er hier zur Bewältigung dieser anspruchsvollen Rekonstruktionsprobleme eingesetzt. Im Gegensatz zu Modellrechnungen treten die Restriktion hier kombiniert auf. Andererseits können die Vorteile von DIRECTT nur genutzt werden, wenn die Messdaten Mindestanforderungen an die Genauigkeit (bzgl. Intensität und Geometrie) genügen. Deshalb werden die Rohdaten stets einer sorgfältigen Vorbehandlung unterzogen, um korrigierbare Messfehler vor der Rekonstruktion zu eliminieren.

Neutronen-CT: Wasseragglomerationen in Flowfields

Die metallischen Komponenten (Gehäuse, Katalysatoren etc.) verhindern die Abbildung von Wasser in komplett montierten Zellen mit Röntgen- (bzw. Synchrotron-) Strahlung wegen der monotonen Abhängigkeit des Schwächungskoeffizienten von der Ordnungszahl der beteiligten Elemente. Dagegen weist Wasserstoff bei Bestrahlung mit thermischen

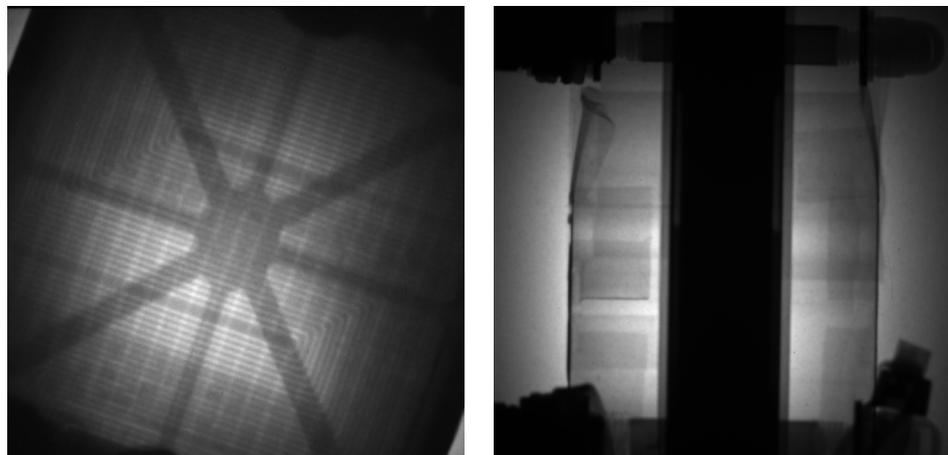
Neutronen einen sehr hohen Schwächungskoeffizienten (verursacht durch Streuung) auf, kann also zu fast allen anderen Elementen hervorragend kontrastiert werden.

Die erwähnte Einstellung optimaler Betriebsparameter einer Brennstoffzelle durch Verbesserung des Wassermanagements betrifft u.a. störendes flüssiges Wasser in den Flowfieldkanälen als Hindernis für die Reaktionsgase, andererseits muss die Membran durchfeuchtet werden, um die Protonenleitfähigkeit zu gewährleisten.

Die tomographischen Messungen wurden an der Strahllinie CONRAD/V7 des Helmholtz-Zentrums Berlin (HZB) am Forschungsreaktor BER II durchgeführt. Über einen 360° -Bereich wurden 1000 Projektionen mit einem LiF-Szintillations-Flächendetektor aufgenommen. Zusätzlich wurden je zehn zur Korrektur notwendige Flat- und Darkfield-Messungen erstellt. Die Untersuchungen wurden an einem Dreifach-Brennstoffzellen-Stack inklusive Gasleitungen in zwei Betriebszuständen durchgeführt: direkt nach dem Betrieb und 30 Minuten später, in einem ‚quasi-stationären‘ Zustand.

Abb. 2 zeigt zwei ausgewählte Einzelprojektionen des Messdatensatzes. Unter idealen CT-Bedingungen ist die projizierte Masse eine Erhaltungsgröße. Da die Probe unter 0° und 180° (und benachbarten Winkelbereichen) nur teilweise erfasst wird (Abb.2 links), wächst die projizierte Masse sinusartig bei weiterer Verdrehung. Erst wenn die Probe vollständig in den Detektor abgebildet wird (Abb.2 rechts), ist ein Plateau zu erwarten. Abb. 3 oben zeigt ein Dichtesinogramm (Projektionswinkel horizontal) und ausgewählte horizontale Querschnitte, die dieses Problem verdeutlichen. Die kumulative ‚Cross Section‘ (entspricht dem Integral über eine Detektorzeile) im unteren Teilbild gibt außerhalb des schraffierten Bereichs das sinusartig Anwachsen der projizierten Masse wieder. Das erwartete Plateau wird jedoch in der vorliegenden Messung nicht erreicht, weil bereits vorher Nichtdurchstrahlbarkeit aufgrund des ungünstigen Aspektverhältnisses eintritt.

Abb. 2:
Neutronen-CT:
Einzelprojektionen
des Dreifach-
Stacks unter 0° und
 90°



Die Bahnverfolgung einzelner Sinusbahnen (markanter Objekte) ergibt, dass die Drehachse bezüglich der kartesischen Detektorkoordinaten um etwa 1.3° geneigt ist. Planare Sinogramme liegen also schräg im Projektionsraum. Durch Drehung der Einzelprojektionen wird die planare Information wieder separiert. Ungenauigkeit beseitigt. Außerdem gibt es Indikationen für eine Schrägstellung der Achse in Strahlrichtung, was zu elliptischen Trajektorien im Projektionsraum führt (analog zu Trajektorien außerhalb der Zentralebene in Kegelstrahlmessungen, hier jedoch mit konstanter Öffnung der Ellipsen). Diese Fehlweisung ist durch Datenvorverarbeitung nicht zu beheben, stellt vielmehr eine Anforderung an die Justage der Messung dar.

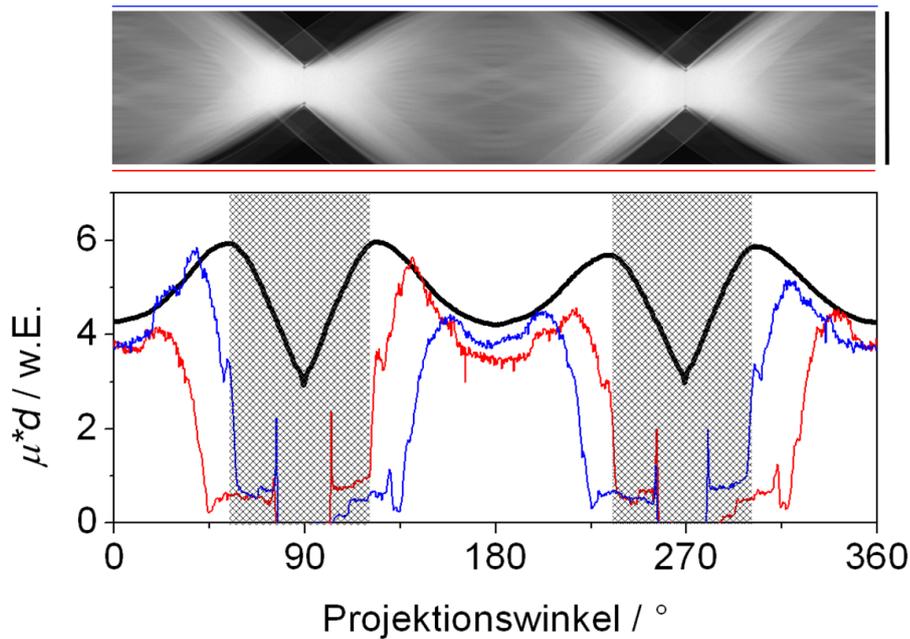


Abb. 3: Ausgewähltes Dichtesinogramm einer Neutronen-Tomographie (oben) des Brennstoffzellenstacks (dreifach). Die Linien geben den kumulativen Querschnitt (fett, schwarz) sowie lineare Schnitte an den Detektorrändern (rot bzw. blau) an.

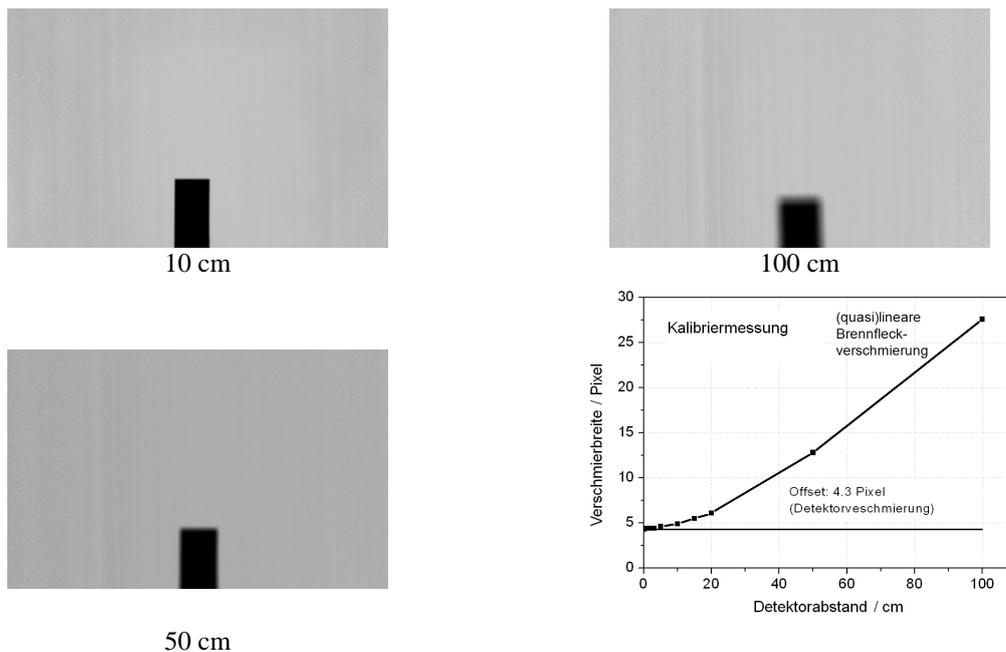


Abb. 4: Neutronen-Radiogramme einer Gd-Folie bei variabler Tiefenposition und Abhängigkeit der Verschmierung vom Detektorabstand (intrinsische Detektorverschmierung: 4.3 Pixel)

Die beschriebenen Fehlweisungen der Neutronenradiogramme erfordern für die möglichst realitätsgetreue Rekonstruktion insbesondere die winkelabhängige Berücksichtigung der Nichtdurchstrahlbarkeit sowie die Unterdrückung von Artefakten, die durch nicht vollständig projizierte Massenelemente (außerhalb des Detektors, ROI) entstehen. Entgegen den Erwartungen sind Qualitätsgewinne durch vielfache iterative Rekonstruktion gering und rechtfertigen nicht den erheblichen Aufwand an Rechenzeit.

Allein die Berücksichtigung der Asymmetrie durch die entfernungsabhängige Verschmierung der Projektionen (bedingt durch die große Eintrittsapertur) wird deshalb in einer eigens entwickelten Prozedur zur Bildverbesserung eingesetzt. Sie wird ausschließlich auf den Projektionsteil einer Iteration angewendet; eine Entschmierung im Sinne einer

Entfaltung im Rekonstruktionsteil ist nicht zulässig [7]. Analog zur Vergrößerung im Kegelstrahl steigt die Breite der Verschmierung mit wachsendem Abstand des Objekts vom Detektor. Um die Verschmierung quantitativ zu bestimmen, wurden Kalibriermessungen mit einer Gadolinium-Folie durchgeführt. Wie in Abb. 4 zu erkennen, wird die Abbildung der Folie mit wachsendem Detektorabstand unschärfer. Eine quantitative Bewertung der Kantenschärfe führt zur gezeigten Kalibrierkurve. Dagegen ergibt sich keine Abhängigkeit von der lateralen Positionierung.

Obwohl für die Parallelstrahlgeometrie 180° -Datensätze grundsätzlich alle erforderlichen Informationen beinhalten, sind deshalb jedoch alle Projektionen des Vollkreises erforderlich, um die entfernungsabhängigen Verschmierungen für eine verbesserte Rekonstruktionsqualität zu nutzen. Abb. 5 zeigt die erfolgreiche Verwendung einer entfernungs-spezifischen Gewichtung mittels einer Rampenfunktion in Richtung der jeweiligen Projektion anhand der Rekonstruktion von 180° -Sektoren des Sinogramms (wie skizziert), in denen jeweils verschiedene Elemente durch ‚scharfe‘ Abbildung bevorzugt sind.

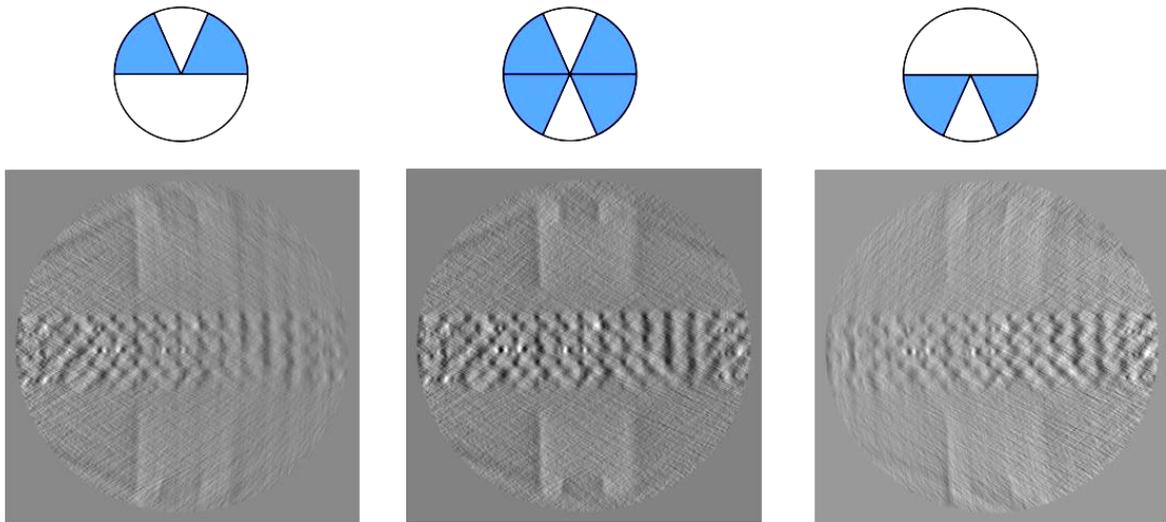
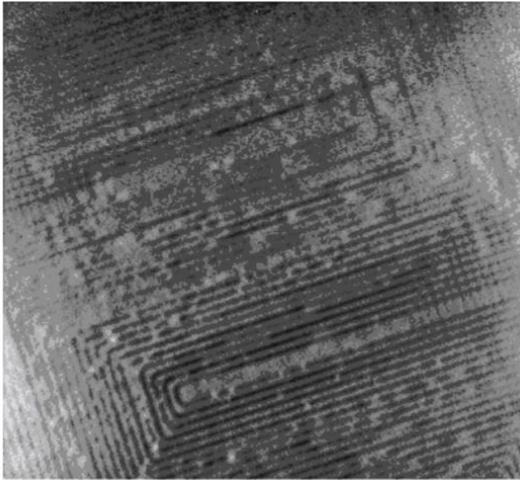
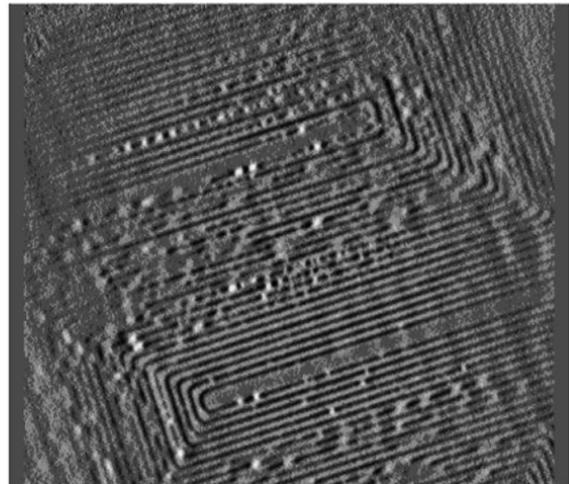


Abb. 5: Rekonstruktion einer Einzelebene aus verschiedenen Winkelbereichen; links: nur die Elemente auf der linken Seite durchlaufen den „scharfen“ Halbraum; rechts: nur die Elemente auf der rechten Seite durchlaufen den „scharfen“ Halbraum; Mitte: bei vollem Winkelsatz tragen die ‚scharfen‘ Teile einer jeden Trajektorie überproportional zur Bildung des Gesamtgewichtes eines Rekonstruktionselementes bei und verbessern damit insgesamt die Qualität.

Im Vergleich der Rekonstruktionen der kompletten Neutronenmessdatensätze ergibt sich durch Nutzung der entfernungsabhängigen Entschmierung ein eindeutiger Vorteil der DIRECTT-Rekonstruktion gegenüber der gefilterten Rückprojektion. Abb. 6 zeigt dies exemplarisch an einer Kathode, die, anders als in Abb. 5, hier einen senkrecht zur Rekonstruktionsebene verlaufenden Schnitt darstellt. An der abgebildeten mittleren Kathode sind die Unterschiede besonders groß. Die Wassertröpfchen sind in der DIRECTT-Rekonstruktion sehr gut lokalisiert, während sie in der gefilterten Rückprojektion nur diffus wiedergegeben werden.



FBP



DIRECTT

Abb 6: Vergleich der Rekonstruktionen mit gefilterter Rückprojektion (links) und DIRECTT (rechts) an der Kathode 2. Abgesehen von Kontrastunterschieden wird besonders im oberen Teil des Bildes die deutlich bessere Auflösung (Erkennbarkeit) von Wassertröpfchen augenfällig.

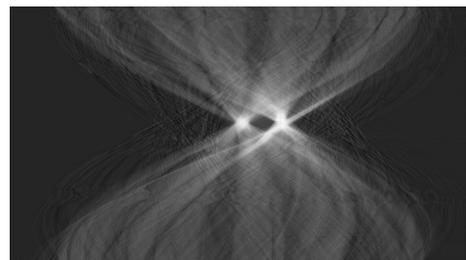
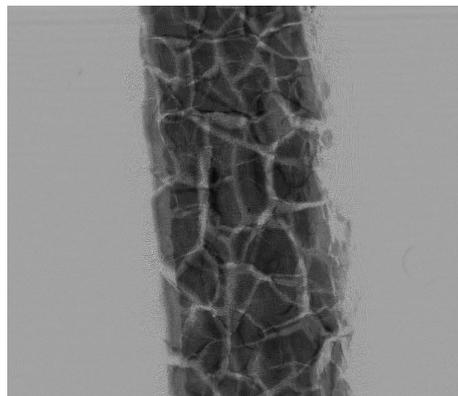
Ein Ziel der Rekonstruktion ist die genauestmögliche Lokalisierung von (kondensiertem) Wasser auf den Elektroden. Die deutlicheren Wasseranzeigen (Kontrast) sind erwartungsgemäß an den Kathodenseiten zu finden (wohin die Protonen diffundieren, also die Wasserbildung stattfindet). Allerdings überlagern die Kathodenstrukturen, inkl. der Wasseranlagerungen, partiell mit den benachbarten Anoden, was in Abb. 6 anhand der kreuzenden Kanäle sichtbar wird.

Insgesamt ist jedoch die Unterscheidbarkeit des Wassergehaltes der Kathoden- und Anodenebenen zweifellos gegeben und der Bewertung zugänglich.

Synchrotron-CT: Alterung des Membrane Electrode Assembly (MEA)

Um die vermuteten Alterungseffekte in der MEA aufzuklären, wurden Synchrotronmessungen jeweils vor und nach Betrieb (2000 h) in einer DMFC an der BAMline des BESSY (Berliner Speicherring für Synchrotronstrahlung) mit monochromatischer Strahlung ($E=10$ keV) durchgeführt. Die Messdaten betreffen einen 180° - Winkelsektor in Parallelstrahlgeometrie, in dem 1000 Projektionen mit einem 4K-Detektor (Dynamikbereich 14 Bit) aufgenommen wurden. Abb. 7 zeigt exemplarisch eine Einzelaufnahme aus dieser Serie sowie ein Dichtesinogramm.

Abb. 7:
Synchrotron-CT:
Einzelpjektion
nach Flat Field-
Korrektur (links)
sowie ein
ausgewähltes
Dichtesinogramm
(rechts)



Für die DIRECTT-Rekonstruktionen wurde zunächst wegen eines stark inhomogenen Untergrundverlaufs eine individuelle, dynamische Flat Field-Korrektur der einzelnen Messbilder durchgeführt.

Eine sorgfältige Analyse der korrigierten Rohdaten (hier: Sinogramme) zeigt Indikationen für Manipulatorinstabilitäten: Vertikalbewegungen der Probe und Lagevariationen der Rotationsachse. Die Vertikalbewegungen äußern sich als unterbrochene Sinusspuren in einer festen Detektorhöhe. Um ein Maß für die notwendige individuelle Höhenkorrektur zu erhalten, wurde für alle Projektionen über jede Detektorzeile integriert, um die projizierte Masse der Projektionsebenen als Erhaltungsgröße zu verifizieren. Die Auftragung der integralen Massen als Grauwert über dem Projektionswinkel und der Detektorhöhe ist in Abb. 8 dargestellt. Im Idealfall ist ein über dem Projektionswinkel ortsinvariantes Masseprofil zu erwarten. Hier treten jedoch deutliche Abweichungen in Form von horizontalen Fluktuationen auf: die Probe bewegt sich parallel zur vertikalen Drehachse. Die typischen Profile (Abb. 8 rechts) werden für eine empirische Höhenkorrektur benutzt.

Wie Abb. 8 links zeigt, sind die enthaltenen Katalysatorschichten in einem Winkelsegment von etwa 10° nicht durchstrahlbar (schwarzer Streifen im Bereich um 90°), so dass dieser Winkelbereich für die Rekonstruktion nicht verwendet werden konnte, sich also wiederum ein Limited View-Problem ergibt.

Angeichts der zahlreichen Projektionen (1000 Winkel) mit hoher Ortsauflösung (Bildausschnitte eines 4K-Detektors) und der damit verbundenen großen Rekonstruktionszeiten pro Iterationszyklus wurde diese in 4 parallelen Batches auf einem 16-Core-Rechner verarbeitet. Wegen des mehrmaligen Zugriffs auf die großen Datenfiles (einige Gigabyte) ist der Gewinn an Rechenzeit jedoch nur mit einem Faktor 2.5 zu beziffern.

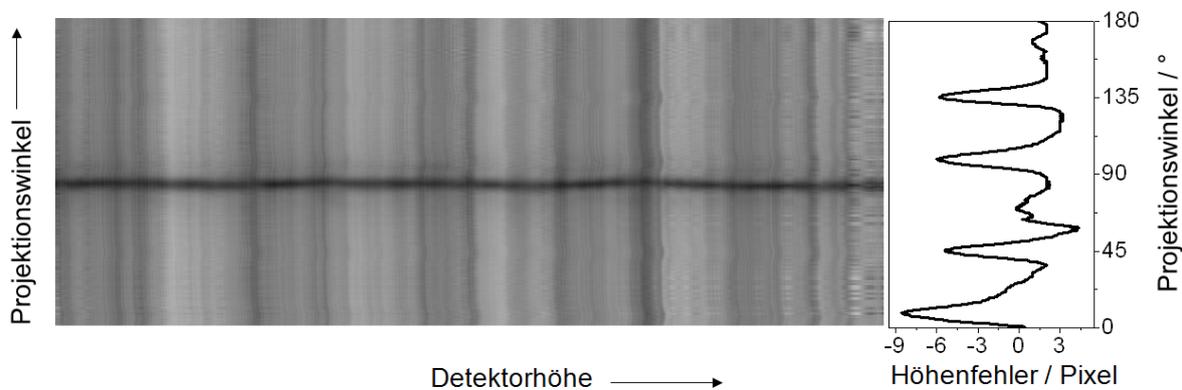


Abb. 8: „Massebild“ einer Synchrotrontomographie. Die Grauwerte geben das Integral über eine Detektorzeile als Funktion von Projektionswinkel und Detektorhöhe (\parallel zur Drehachse) an. Im Bild rechts ist die mittlere Höhenfehlweisung als Funktion der Projektionswinkels aufgetragen, die als Korrekturfunktion benutzt wird.

Mithilfe der höhenkorrigierten Messdatensätze gelingt es, detaillierte 3-dimensionale CT-Rekonstruktionen mit bis zu 10 Iterationen zu realisieren. Die Abb. 9 und 10 zeigen exemplarisch eine rekonstruierte Einzelebene sowie die Visualisierung der gesamten rekonstruierten 3D-Struktur. Zur optimalen Kontrastierung der Oberflächenverhältnisse an GDL und Katalysator ist in Abb. 10 sind MPL und Membran durch Schwellwerte unterdrückt. Damit war es möglich, die entscheidende Fragestellung zur betriebsbedingten Veränderung der MEA quantitativ durch geeignete Bildverarbeitungsalgorithmen zu beantworten.

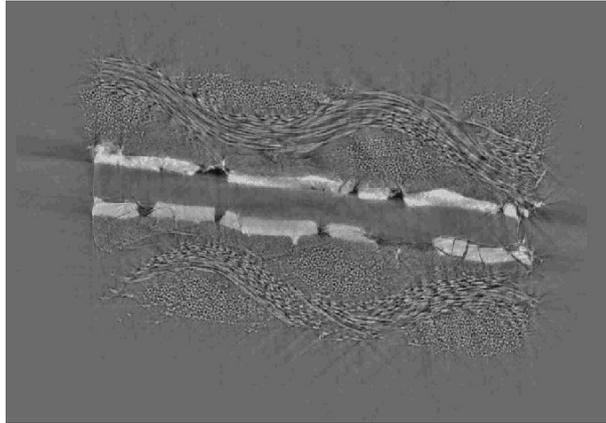


Abb. 9: Einzelebene der 3D-DIRECTT-Rekonstruktion einer MEA

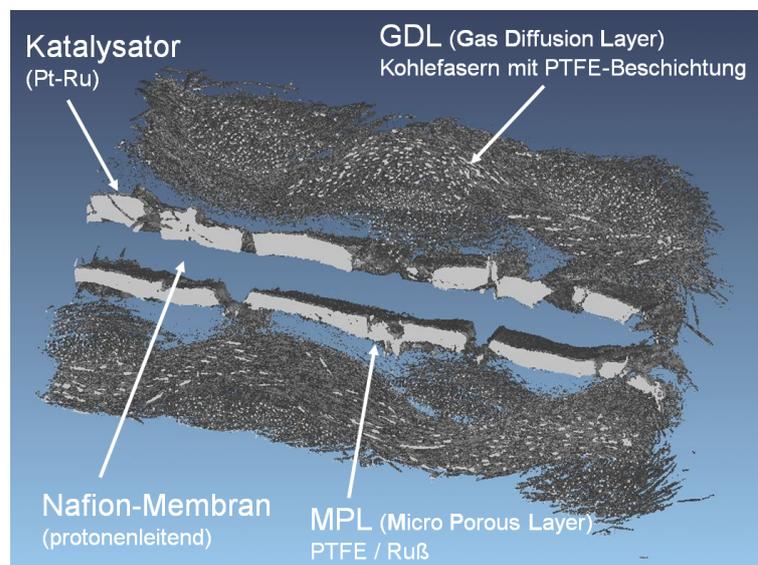


Abb. 10: 3D-Darstellung der rekonstruierten MEA (Membrane Electrode Assembly); die gewebte GDL, Risse in der Katalysatorschicht (die geringen Dichten der Membran und des MPL (Micro Porous Layer) sind hier maskiert)

Elektronen-CT: Freie Oberfläche von Katalysatorpartikeln

Die entscheidende Funktion der Brennstoffzelle für die Stromgewinnung durch die Reaktion von Wasser- und Sauerstoff wird durch die Katalysatorfunktion von Pt- bzw. Ru-Nanopartikeln garantiert. Für die Optimierung dieser Wasserbildung wird die Partikelverteilung auf Kohlenstoffträgern mittels elektronen-tomographischer Untersuchungen (TEM) charakterisiert. Eine genauestmögliche räumliche Abbildung der Partikel dient der Abschätzung der freien Katalysatoroberfläche, denn nur diese steht der chemischen Reaktion zur Verfügung. Zum Zwecke der Reorientierungsmöglichkeit der stark fluktuierenden Einzelprojektionen (Abb. 11) werden annähernd sphärische Gold-Marker in das Messvolumen eingebracht. Die Hellfeldmessungen bei einer kinetischen Energie der Elektronen von 200 keV entsprechen einer Parallelstrahlgeometrie. Unter ausgezeichneten Projektionswinkeln werden Weitwinkelreflexe (Beugung) der metallischen Partikel als versetzte Abbildung (hoher Intensität) ihrer Umrisse beobachtet, hier jedoch ohne Auswirkung auf die CT-Rekonstruktion.

Die Methode der Elektronen-Tomographie bezieht ihre Attraktivität aus ihrer einzigartigen Ortsauflösung (Detektorauflösung hier z.B. 0.26 nm). Die aus der molekularbiologischen Forschung entspringende Methode leidet einerseits an der unpräzisen Drehachse, andererseits ermöglicht der hohe Absorptionskontrast der hier interessierenden Katalysatorpartikel (wegen ihrer relativ hohen Ordnungszahl) eine wesentlich bessere Abbildung der Massenverteilung als in funktionalen Gruppen biologischer Zellstrukturen. Vor allem stellt Elektronen-Tomographie jedoch eine besondere Herausforderung für die Robustheit der verwendeten Rekonstruktionsalgorithmen abseits der Standardaufgaben dar, da hier eine außerordentliche Häufung von Restriktionen zusammentrifft, die bisher zu unvermeidbaren Artefakten führte.

Aufgrund der Probenhaltergröße (im Verhältnis zum Abstand der Polschuhe) ist keine vollständige Rotation möglich; es ergibt sich ein *integrales Limited View*-Problem. Der überstrichene Winkelbereich beträgt typisch 140°. Wegen der Strahlendosis können Anlagerungen an der Probe nicht ausgeschlossen werden. Daher ist die Messzeit pro Projektion (etwa 90 s) und total möglichst gering zu halten. Die Messung umfasst lediglich 143 Projektionen, ist also bezogen auf die Detektorzeilenlänge von 1550 Pixeln ein stark unterbestimmtes *Few Angles*-Problem.

Die Proben (inkl. Au-Marker) sind größer als der bestrahlte Bereich, so dass Randelemente nicht unter allen Winkeln gesehen werden und das Integral über die Masse nicht erhalten bleibt (*ROI*-Problem). Das *ROI*-Problem erschwert die empirische Bestimmung der genauen Lage der Drehachse, da die Phasenabhängigkeit des Schwerpunktes nicht verfolgt werden kann. Die genaue Kenntnis der Lage der Drehachse ist jedoch von großer Bedeutung für die erreichbare Qualität der Rekonstruktion.

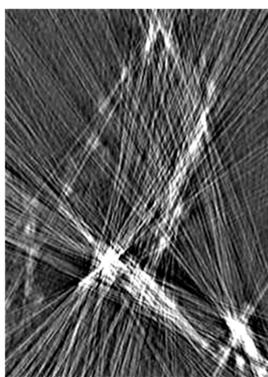
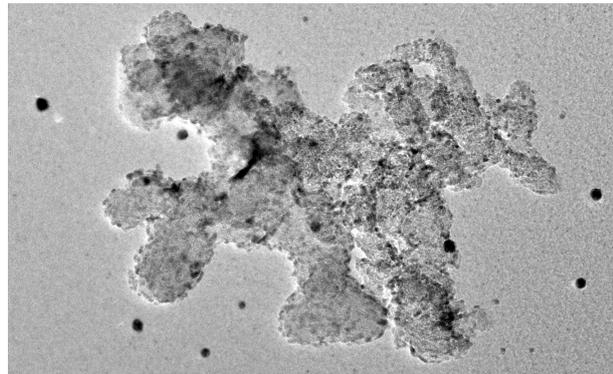
Volumenelemente großer Dichte (Gold-Marker, Katalysatorpartikel) sind *nicht durchstrahlbar*. Die gemessene Intensität liegt außerhalb des zulässigen Dynamikbereiches. Im Rekonstrukt treten starke Streifen-Artefakte auf, und die Durchstrahlungslängen dieser Absorber können nicht in sinnvolle Verläufe des Schwächungskoeffizienten umgesetzt werden. Für die verdeckten Volumenbereiche ergibt sich ein partielles, *phasenabhängiges Limited View*-Problem. Das Zusammenspiel der starken Au-Absorber mit dem *ROI*-Problem bewirkt, dass ‚von außen‘ große (nicht rekonstruierte) Dichte in Form von Streifenartefakten in den *ROI*-Bereich ‚strahlt‘. Es erweist sich als äußerst vorteilhaft, den Rekonstruktionsbereich über den Detektor zu erweitern und so die störende Masse durch Lokalisierung zu beseitigen. Hier kommt eine Stärke von *DIRECTT* zum Tragen: die Bewertung von Trajektorien fordert nicht zwingend, dass eine Trajektorie vollständig sein muss; Teiltrajektorien genügen hinreichend zur Lokalisierung der Masse außerhalb des *ROI*-Bereiches.

Aus dem Winkelbereich und der Anzahl der Projektionen ergibt sich ein mittleres Winkelinkrement von 1°. Die Winkeleinstellung im Elektronenmikroskop kann jedoch nur mit einer Unsicherheit von etwa 0.2° vorgewählt werden, so dass sich eine Abfolge *nicht-äquidistanter Projektionswinkel* ergibt, als zusätzlicher Freiheitsgrad in den *DIRECTT*-Algorithmus implementiert wurde. Diese Winkelliste wird durch Ausrichten und Entzerren der Projektionen erstellt. Zwei Indikatoren bestätigen (in den meisten Fällen) die Vorteile der Winkelliste: die Bahnverfolgung großer markanter Elemente (z.B. Au-Marker) liefert unter Verwendung der Liste eine deutliche bessere (örtliche) Approximation an eine Sinusbahn als mit konstanten (mittleren) Winkelinkrementen, und die Qualität der Rekonstruktion steigt – ablesbar aus den integralen Bewertungskriterien Gewicht und Varianz des Restsinogramms sowie aus Details der Rekonstruktion.

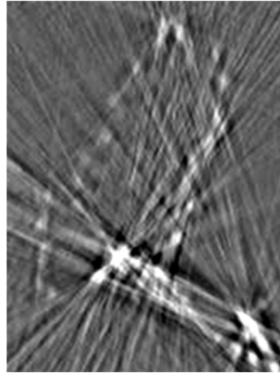
Die Messdaten können nicht unbearbeitet einem Standardalgorithmus übergeben werden, sondern bedürfen in jedem Einzelfall einer Beurteilung bezüglich Geometrie (z.B. Lage der Drehachse) und einem Schwellwert der Intensität (starke Absorber). Wird darauf verzichtet, ergibt sich eine Rekonstruktion, die von Streifenartefakten dominiert wird und

die interessierende Struktur nicht mehr erkennen lässt (Abb. 12, FBP). Erst mit diesen Voreinstellungen wird die Rekonstruktion iterationsfähig.

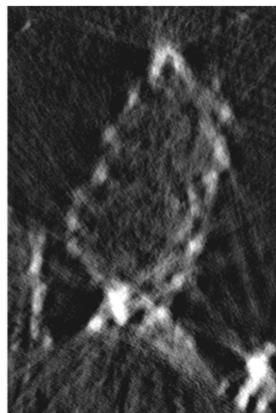
Abb. 11: Elektronen-CT: Einzelprojektion; die Au-Marker sind als schwarze Kreise deutlich erkennbar. Die Katalysator-Partikel sind kleine Absorberpartikel auf der Oberfläche der ‚wolkigen‘ Kohlenstoffsupports.



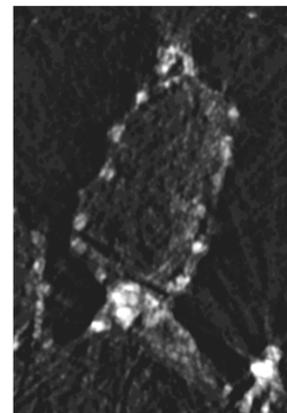
FBP



SIRT



SIRT (optimiert)



DIRECTT

Abb. 12: Vergleich verschiedener Algorithmen anhand eines einzelnen Katalysator-Partikels auf Kohlenstoff-Support (Rekonstruktionsausschnitt)

Damit schneiden die Rekonstruktionsergebnisse im Vergleich mit konkurrierenden Algorithmen quantitativ deutlich besser ab. Die in Abb. 12 wiedergegebenen Vergleiche belegen die wesentlich bessere Ortsauflösung (Detailerkennbarkeit) des DIRECTT-Rekonstrukts auch gegenüber dem in der Elektronen-Tomographie favorisierten SIRT-Algorithmus. Darüber erfordert SIRT eine um etwa zwei Größenordnungen größere Rekonstruktionszeit. Über die 2D-Details in Abb. 12 vermitteln die 3D-Darstellungen in Abb. 13 einen Eindruck von den Größenverhältnissen und der Anordnung der Partikel auf der Trägermembran (maskiert) und den Kohlenstoffsupports.

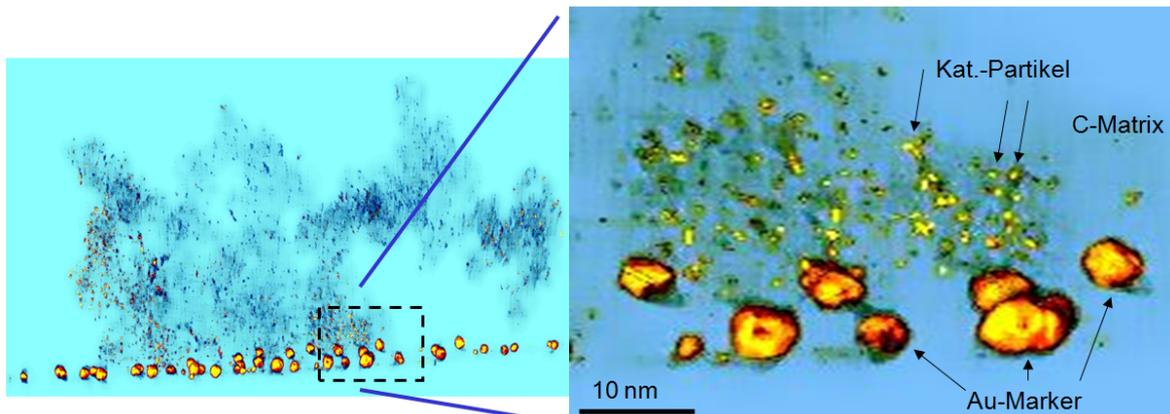


Abb. 13: 3D-Darstellung der Ru-Katalysator-Nanopartikel und vergrößerter Ausschnitt; dominante Au-Marker vor Kohlenstoff-Supports

Ausblick

Die dargestellten Vorzüge des DIRECTT-Algorithmus' für die Rekonstruktion von CT-Messdaten unterschiedlichster Strahlungsarten werfen ebenso die Frage nach seinen Leistungsgrenzen in Forschung und Anwendung auf. Dazu kommt es entscheidend auf die experimentellen Randbedingungen an, insbesondere die Einhaltung der geometrisch korrekten Objektmanipulation, die Linearität der Detektionsmedien sowie die präzise Kenntnis der Strahlung. Im günstigen Fall können auch extrem unvollständige Datensätze, die von den allgemein notwendigen Idealbedingungen stark abweichen, gut rekonstruiert werden. Dazu bedarf es mitunter eines erheblichen Aufwandes der Datenvorverarbeitung zur Korrektur von Fehlweisungen in den Rohdaten. Schließlich kann die Rekonstruktion mit dem iterativen Verfahren DIRECTT im Falle qualitativ hochwertiger Messdaten durch erhöhten Rechenaufwand vorteilhaft beeinflusst werden.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für finanzielle Unterstützung unter dem Förderkennzeichen 03SF0324B.

Referenzen

- [1] Handbook of Fuel Cells - Fundamentals, Technology and Applications, John Wiley & Sons, Chichester (2003).
- [2] C. Hartnig, R. Kuhn, P. Krüger, I. Manke, N. Kardjilov, J. Goebbels, B.R. Müller, H. Riesemeier: Wassermanagement in Brennstoffzellen - die Bedeutung von hochauflösenden zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden. *MP Materials Testing* **50** (10) (2008) 609-614.
- [3] I. Manke, C. Hartnig, N. Kardjilov, A. Hilger, A. Lange, A. Kupsch, J. Banhart: Wasserverteilung in PEM-Brennstoffzellen. *MP Materials Testing* **51** (4) (2009) 219-226.
- [4] A. Lange, M.P. Hentschel, A. Kupsch: Computertomographische Rekonstruktion mit DIRECTT: 2D-Modellrechnungen im Vergleich zur gefilterten Rückprojektion. *MP Materials Testing* **50** (5) (2008) 272-277.
- [5] A. Kupsch, A. Lange, M.P. Hentschel: Enhanced spatial resolution in 2D-Reconstruction without Filtered Back Projection: DIRECTT. *Proceedings 17th World Conference on Non-Destructive Testing* (2008).
- [6] A. Kupsch, A. Lange, M.P. Hentschel: Modellrekonstruktionen unvollständiger computertomographischer Datensätze. in diesem Berichtsband.
- [7] A. Kupsch, A. Lange, M.P. Hentschel, B.R. Müller: Improved Computed Tomography by Variable Desmearing: Model reconstructions by iterative DIRECTT algorithm. *MP Materials Testing* **52** (6) (2010) 394-400.