

Röntgenuntersuchungen für kurzzeitdynamische Anwendungen

Malte KURFIß¹, Stefan MOSER¹, Gregor POPKO¹, Siegfried NAU¹

¹ Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut (EMI), Efringen-Kirchen

Kontakt E-Mail: malte.kurfiss@emi.fraunhofer.de

Kurzfassung. In der Zerstörungsfreien Prüftechnik ist man seit langem bestrebt die Inspektionszeit durch Beschleunigung des Röntgens zu verkürzen. Insbesondere in der automatischen Prüfung sind die Belichtungszeiten dank moderner Röhren und Detektoren bereits im Bereich weniger Sekunden oder darunter. Eine zwar verwandte, aber prinzipiell mit anderen Herausforderungen verbundene Fragestellung ist die bildgebende Röntgendiagnostik dynamischer Vorgänge auf kurzen Zeitskalen bis hin in zu Mikrosekunden. In der zerstörungsfreien Prüfung ist die Belichtungszeit ein von der zu erreichenden Bildgüte abhängiger Parameter. Bei der Untersuchung von kurzzeitdynamischen Prozessen ist die Belichtungszeit jedoch eine Größe, die von der Zeitskala des Prozesses abhängt. Daher muss hierbei auf Röntgentechnik gesetzt werden, die in kurzer Zeit eine höchstmögliche Dosis liefert. Weiterhin ist man insbesondere bei hochdynamischen Prozessen dazu gezwungen von herkömmlichen und bekannten Aufnahmegeometrien abzuweichen und im Experiment einen Kompromiss zwischen bestmöglichen Bildergebnissen und Schutz der Infrastruktur einzugehen. Mithilfe von Röntgen-Blitz-Röhren und modernen Hochgeschwindigkeitskameras sind hiermit Prozesse beobachtbar, die auf sehr kurzen Zeitskalen ablaufen. Beispiele dafür sind die Öffnung von Airbags oder die Energieabsorption von Stauchrohren, vergleichbar den Vorgängen in einem Fahrzeug-Crash. Damit lassen sich Informationen gewinnen, die mit bisher verfügbaren, herkömmlichen Methoden nicht zugänglich waren. Durch spezielle Computertomographie-Algorithmen, die auf die Verwendung extrem weniger Projektionen optimiert sind, lassen sich sogar 3D-Rekonstruktion zu einzelnen Zeitpunkten der dynamischen Vorgänge berechnen. In diesem Vortrag werden anhand von Beispielen die Möglichkeiten und Einschränkungen der aktuellen Verfahren vorgestellt und diskutiert.

1. Einführung – Warum Röntgenblitztechnik

Am Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, werden Vorgänge der dynamischen Materialverformung auf Zeitskalen untersucht, die von einigen Nanosekunden in den Bereichen der Verteidigungs- und Weltraumforschung bis hin zu einigen Millisekunden während der sicherheitsrelevanten Phase eines Fahrzeugaufpralls reichen. Neben den konventionellen optischen Methoden zur zeitaufgelösten Beobachtung der Vorgänge, der Hochgeschwindigkeits-Videoanalyse, wird am Ernst-Mach-Institut die Technik des Hochgeschwindigkeitsröntgens fortwährend weiterentwickelt.

Der erfolgreiche Einsatz dieser Messtechnik ist mit zwei wesentlichen Herausforderungen verbunden. Die eine Herausforderung ist es, eine hinreichend kurze Aufnahmezeit pro Bild sicherzustellen, damit Bewegungsunschärfe bei hochdynamischen Vorgängen vermieden wird. Die andere ist die nötige hohe Bildrate, die innerhalb der sehr kurzen Zeitspanne eines Experimentes eine ausreichende Menge an Röntgenaufnahmen liefert. Zusätzlich müssen die Parameter Ortsauflösung und Kontrastverhältnis die nötige Bildqualität gewährleisten. Die kurzen Verschlusszeiten können entweder mit getakteten Systemen auf der Röntgenquellen- und auf der Röntgendetektorseite realisiert werden oder es wird nur auf einer Seite eine sehr schnelle Technologie verwendet, wohingegen auf der anderen Seite lediglich die hinreichenden Voraussetzungen für eine hochfrequente Röntgenabbildung gegeben sein müssen. Da Detektoren, die über eine für das Experiment ausreichende aktive Fläche verfügen, mit Szintillatoren zur Umwandlung von Röntgenquanten in sichtbares Licht arbeiten, ist das Nachleuchten dieser Materialien auf der Detektorseite in der Regel der begrenzende Faktor der Bildfrequenz.

Daher werden die nötigen kurzen Belichtungszeiten auf der Quellenseite realisiert und somit diese Zeitkonstante von der Bildfrequenz entkoppelt. Eine der dazu zur Verfügung stehenden Technologien ist die Röntgenblitztechnik, die über die blitzartige Entladung von Kondensatoren als Spannungs- und Stromquelle einer Röntgenröhre dient.

2. Technische Möglichkeiten der Röntgenblitz-Technik

2.1. Räumliche und zeitliche Bildtrennung

Sollen zur Charakterisierung eines dynamischen Vorgangs Bilddaten zu mehreren Zeitpunkten erfasst werden, verwendet man in der Regel die zwei verschiedenen Möglichkeiten der räumlichen oder zeitlichen Bildtrennung.

Erstere wird verwendet, wenn kein zeitlich aufgelöster Detektor, sondern lediglich ein integrierender Detektor (z. B. ein Röntgenfilm oder eine Speicherfolie) zur Verfügung steht. Die Einzelblitzquellen werden so platziert, dass jede das Versuchsobjekt aus einem leicht anderen Winkel auf den Detektor abbildet. Durch eine geeignete Kollimierung bildet damit jede der Quellen das Objekt bzw. den Vorgang auf einen Teil des Detektors ab. Querbildungen können in der Regel durch die geeignete Kollimierung vermieden werden. Durch Auslösen der Blitzquellen zu unterschiedlichen Zeitpunkten ist es möglich, den Vorgang zu frei wählbaren Phasen des Prozesses sowohl räumlich als auch zeitlich getrennt abzubilden.

Die zweite Möglichkeit erfordert einen zeitaufgelösten Detektor, i. d. R. einen Szintillator, welcher von einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt wird. Zum Einsatz kommen hier meist Multi-Anodenröhren, welche den Parallaxenfehler durch Abbildung aus unterschiedlichen Richtungen minimieren. Da die Abstände zwischen Blitzen i. d. R. deutlich höher als die Dauer der Blitze selbst (ca. 20 ns) sind, ist die Framerate lediglich durch die Abklingzeiten der Szintillatoren gegeben.

2.2. 3D-Tomographie mit sehr wenigen Projektionen (HSCT)

Die Hochgeschwindigkeitstomographie (High-Speed Computed Tomography, HSCT) wurde am EMI für die volumetrische 3D-Erfassung schneller, asymmetrischer Vorgänge auf der Zeitskala von Mikrosekunden entwickelt [1]. Anstatt wie bei der räumlichen Bildtrennung den Parallaxenfehler zu minimieren und die Röntgenquellen zu unterschiedlichen Zeitpunkten auszulösen, verwendet man Einzelblitzquellen, die den dynamischen Vorgang zum identischen Zeitpunkt aus möglichst unterschiedlichen Richtungen auf einen jeweils einer Quelle zugeordneten Flächendetektor abbilden. Dadurch erhält man einen zeitlich konsistenten Datensatz weniger Röntgenprojektionen (abhängig vom Problem in der Regel aus zwischen drei und zehn Perspektiven).

Die Rekonstruktion eines solchen HSCT-Datensatzes ist mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, da er sich in zahlreichen Punkten von mit konventionellen Mitteln erzeugten Datensätzen unterscheidet.

Zunächst ist in der Regel die Bildqualität sehr begrenzt, da die Abstände groß (im Bereich weniger Meter) sind und auch bei geeigneter Kollimierung (Quer-)Streuung die Bildqualität negativ beeinflusst. Ein weiterer Faktor ist auch der Brennfleck von Röntgenblitzquellen, der bei einer Quellenspannung von 450 kV (welche für die meisten Anwendungen notwendig ist) in der Größenordnung von ca. 1 mm liegt. Auch die geometrische Kalibrierung des Gesamtaufbaus zur Herstellung geometrischer Konsistenz ist eine nichttriviale Herausforderung, die gegenwärtig durch photogrammetrische Methoden (Ableitung bzw. der realen Aufbaugesamtheit bzw. Ermittlung von Korrekturwerten aus den Messbildern nach dem Versuch) gelöst wird. Aus diesen bauartbedingten Gründen ist die Auflösung des Verfahrens derzeit auf ca. 1 mm beschränkt.

Die in der Praxis wohl größte Herausforderung ist jedoch die Rekonstruktion eines sinnvollen Informationsinhalts aus diesem aus mathematischer Sicht extrem unterbestimmten Datensatz. Dies wird durch eine Kombination aus verschiedenen Methoden erreicht. Zunächst wird auf einen multiplikativen algebraischen Algorithmus gesetzt, der sich in der Praxis als sehr geeignet für diese Problemklasse erwiesen hat [2]. Der Rekonstruktionsprozess kann weiterhin durch die Verwendung von A-Priori-Informationen verbessert werden (möglich sind z. B. die Beschneidung der rekonstruierbaren Dichten auf vorgegebene Wertbereiche oder die Vorgabe von leeren oder mit spezifizierten Dichten gefüllten Volumenbereichen). Eine für die Auswertung experimentell gewonnener Daten unabdingbare Modifikation – insbesondere zum Umgang mit den Bilddaten moderater Qualität – ist die Verwendung eines Regularisierungsverfahrens. Durch die Realisierung des Rückprojektionsschrittes als Voxel- anstatt wie üblich als pixelbasiertes Verfahren konnte dies effizient dem Prinzip des Splatting [3] folgend implementiert werden und zeigt in der Praxis ein gutes Vermögen, Artefakte und Rauschen zu unterdrücken.

2.3. Hardware für Röntgenblitzbildgebung

Am Ernst-Mach-Institut werden Röntgenblitzgeräte der Firma Scandiflash mit Nennspannungen bis zu 450 kV verwendet. Im Wesentlichen bestehen die Röntgenblitzgeräte aus einer Spannungsversorgung und den Hochspannungskondensatoren samt Röntgenröhren. Die Hochspannungskondensatoren bestehen aus mehreren Kondensatorelementen, die in einer Parallelschaltung aufgeladen werden und nach dem Ladevorgang über eine Funkenstrecke in einer Reihenschaltung entladen werden. Die typische Entladedauer beträgt 20 ns und bei einer maximalen Leistung von circa 4,5 MW

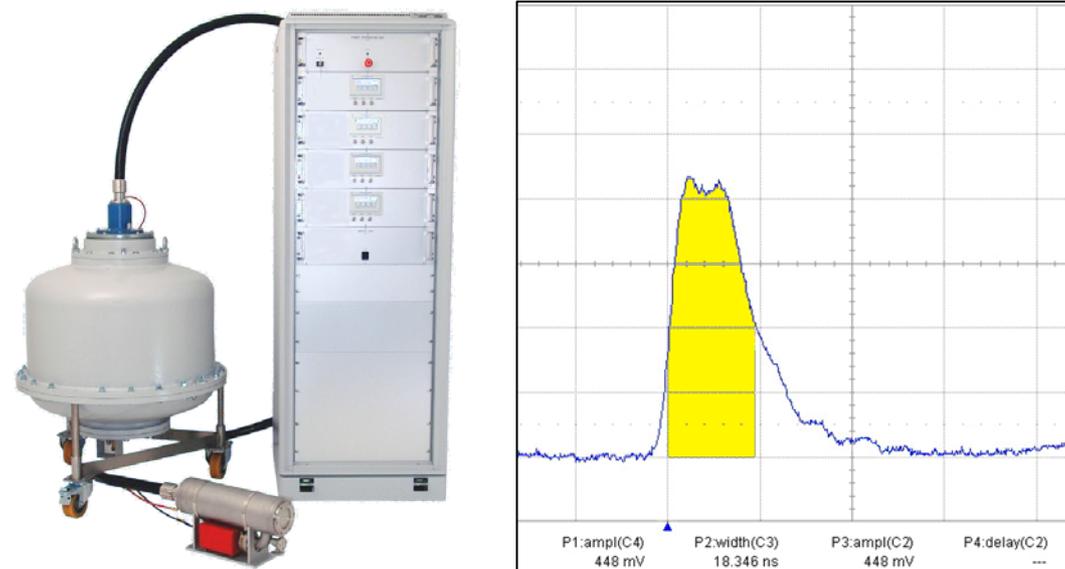


Abbildung 1: Links: Röntgenblitzröhre mit Hochspannungskondensator und Steuerschrank der Firma Scandiflash. Rechts: Messung einer Entladungskurve. Die typische Pulsdauer liegt bei 20 ns und einer maximalen Leistung von 4,5 GW.

Die Kondensatoren sind über ein Hochspannungskabel mit den Röntgenröhren verbunden. Die Kathoden der Röntgenröhren sind ringförmig ausgeführt und umschließen die Spitze der aus Wolfram bestehenden Anode. Beim Zünden der Kondensatoren kommt es zu einer Kaltemission von der Ringkathode zur Anode. Die hohe Pulsleistung führt zu einer Verrundung der Anoden, so dass diese nach einigen Dutzend Röntgenblitzen getauscht werden müssen. Die Brennfleckgröße liegt bei circa 1 mm. Diese vergrößert sich jedoch mit Abnutzung der Anode. Zusätzlich zu einzelnen Röntgenröhren können auch sogenannte Multianodenröhren verwendet werden, bei denen acht einzeln ansteuerbare Anoden in einem Vakuumgefäß untergebracht sind. So können bis zu acht einzelne Röntgenbilder hintereinander von nahezu derselben Position erstellt werden.

3. Röntgen-Car-Crash

Bisher wurde die Röntgenblitztechnik an unserem Institut hauptsächlich für sehr hochdynamische Vorgänge an Objekten mit vergleichsweise geringerer Komplexität eingesetzt. Untersuchungen zum Öffnungsverhalten von Airbags waren eine erste Steigerung zu komplexer aufgebauten und damit von der Bildanalyse anspruchsvolleren Objekten. Mit dem Ziel im Fahrzeug-Crash Röntgentechnik einzusetzen ändert sich das Anforderungsprofil an die Röntgentechnik weiter. Zum einen stellt der Materialmix im Auto und der komplexe Aufbau deutlich höhere Anforderungen an die Bildqualität und zum anderen steigen Abstände und nötige Detektorfläche deutlich an. Dies kann nur zum Teil durch die vergleichsweise lange Dauer des Experiments von bis zu einigen Zehntel Sekunden kompensiert werden.



Abbildung 2: Forschungscrashanlage am Ernst-Mach-Institut in Efringen-Kirchen, Baden-Württemberg. Im Vordergrund ein hydraulisch-pneumatischer Aktuator, mit dem geregelte Impulsprofile von bis zu 70 g erzeugt werden können.

3.1. Gesamtkonzept

Bei allen modernen Fahrzeugen liegen die wichtigsten Strukturen zum Schutz der Insassen nicht sichtbar im Inneren des Fahrzeuges. Zudem werden, getrieben durch Insassenschutz und Leichtbau, immer komplexere Strukturen und Materialien im Fahrzeugbau eingesetzt. Gleichzeitig steigt aufgrund verkürzter Produktentwicklungszyklen die Bedeutung von numerischen Simulationen, insbesondere Crash-Simulationen, stetig an. Simulationsmodelle und -algorithmen werden stetig weiter verbessert, doch trotz gleichzeitig steigender Verfügbarkeit von Rechenzeit ist ein experimenteller Abgleich nötiger denn je. Die in der zerstörungsfreien Materialprüfung seit langem etablierte Röntgentechnik soll dazu Einblicke in Fahrzeuge und Komponenten während eines Fahrzeug-Crashes ermöglichen, um Erkenntnisse aus numerischen Simulationen experimentell zu validieren.

3.2. Demonstration am generischen Crashmodell

Zur Demonstration der Röntgentechnik wurde eine generische Aluminiumstruktur gewählt. Die Struktur besteht aus rechteckigen Aluminiumprofilen, die eine Crashbox von 600 x 400 x 400 mm bilden. Diese wird nach hinten gegen den sogenannten Crash-Block abgestützt. Ähnlich wie die Motorträger beim Frontalaufprall werden die in Belastungsrichtung liegenden Aluminiumprofile unter Ausbildung von Faltenbeulen gestaucht, wobei sie die Impaktenergie aufnehmen. Im Experiment wurde die Struktur mit einem Impaktor mit einem Gewicht von 500 kg und einer Impaktgeschwindigkeit von 10 m/s beschossen. Aus der Simulation ergab sich, dass in den ersten beiden Millisekunden nach dem Impakt der Prozess der Faltenbildung im Bereich der vorderen und hinteren Kanten der Längsstreben initiiert wird. Je nach Schwächung des Materials in den Wärmeeinflusszonen der Schweißnähte beginnt die Vorder- oder Rückseite mit der Faltung. In der Abbildung unten ist an beiden Seiten der Röntgenaufnahme in den ersten zwei Millisekunden eine erste Auffaltung zu erkennen, wobei in der zweiten Millisekunde die Auffaltung auf der hinteren Seite bereits deutlich größer ist als die an der vorderen Seite.

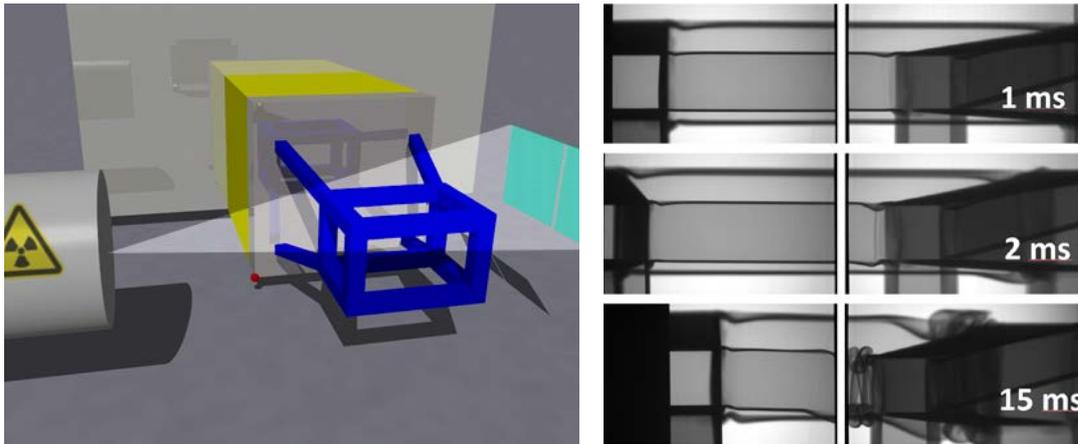


Abbildung 3: Links: In Blau die generische Aluminium-Crashstruktur. Die Breite vorne beträgt 600 mm bei einer Strebebreite von $60 \times 60 \text{ mm}^2$. Die Richtung der Röntgenstrahlung ist von links nach rechts, orthogonal zur Belastungsrichtung. Rechts: Röntgenbilder der Struktur während des Crashes bei einem Impact von links kommend.

Wie in der Modellierung prognostiziert, faltet die Struktur auf der hinteren Seite, was deutlich nach 15 ms im Röntgenbild zu sehen ist.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Artikel wurde die Röntgenblitztechnik zur Bildgebung hochdynamischer Vorgänge vorgestellt. Die grundlegende Technologie wird seit langer Zeit erfolgreich angewendet, ist jedoch als Verfahren relativ unbekannt. Durch moderne digitale Hochgeschwindigkeitskameras, Bildauswertelgorithmen und neue Rekonstruktionsverfahren der Computertomographie konnte der Nutzen dieser Technologie weiter gesteigert werden. Zurzeit wird die Anwendung auf den Fahrzeugcrash mit seinen besonderen Anforderungen ausgedehnt. Dazu werden nicht nur die Detektoren weiterentwickelt, sondern auch auf der Seite der Röntgenquelle neue Systeme beschafft, die deutlich mehr Aufnahmen pro Experiment erlauben, um damit der Vision eines Röntgenfilms beim Fahrzeugcrash einen großen Schritt näher zu kommen.

[1] Stefan Moser, Siegfried Nau, Manfred Salk and Klaus Thoma: "In situ flash x-ray high-speed computed tomography for the quantitative analysis of highly dynamic processes", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 25 No. 2 (2014)

[2] Mishra D, Longtin J P, Singh R P and Prasad V: "Performance evaluation of iterative tomography algorithms for incomplete projection data", *Appl. Opt.* **43** 1522–32 (2004)

[3] Westover L: Splatting: a parallel, feed-forward volume rendering algorithm *Doctoral Dissertation* University of North Carolina at Chapel Hill, NC, USA (1991)