

# 3D SAFT-Analyse von großen zylindrischen Schmiedeteilen

Hubert MOOSHOFER<sup>\*</sup>, Uwe BÜCHNER<sup>\*\*</sup>, Werner HEINRICH<sup>\*\*</sup>,  
Karsten KOLK<sup>\*\*</sup>, Hans-Peter LOHMANN<sup>\*\*</sup>, Johannes VRANA<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Siemens Corporate Technology, München

<sup>\*\*</sup> Siemens Energy, Berlin/Mülheim/München

**Kurzfassung.** Im Rahmen dieses Beitrages wird die Leistungsfähigkeit von 2D-SAFT und 3D-SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) verglichen und am Beispiel der Prüfung großer Schmiedeteile quantifiziert. Es wird gezeigt, dass die vollständige 3D-SAFT-Analyse neben der besseren Defekttrennung in der dritten Raumrichtung auch das gefügebedingte Signal/Rausch-Verhältnis verbessert, so dass die Nachweisbarkeit kleiner Defekte gesteigert wird. Anhand der Gegenüberstellung der Rechenzeit auf der CPU eines aktuellen PCs verglichen mit dem Einsatz von Tesla-Grafikkarten werden die derzeitigen Einsatzmöglichkeiten in der Praxis dargestellt.

## 1. Einführung

Der Einsatz der Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) bringt für die mechanisierte Ultraschallprüfung erhebliche Vorteile. Neben der genaueren Defektlokalisierung und der besseren Trennung benachbarter Defektanzeigen ist auch die Verbesserung des gefügebedingten Signal/Rausch-Verhältnisses (SNR) ein wichtiger Grund für den Einsatz von SAFT [1]. Sie lässt sich zur Defektanalyse einsetzen [2] und bietet bei korrekter Parametrierung hohe Robustheit [3].

Zur Durchführung der SAFT-Analyse wird ausreichend Rechenleistung benötigt. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, können die Daten einer Ultraschallprüfung ebenenweise separat mittels 2D-SAFT ausgewertet werden. Obwohl sich diese Ergebnisse auf ein Volumen beziehen und dreidimensional darstellen lassen (und deswegen manchmal irreführenderweise als 3D-SAFT bezeichnet werden), bleiben damit die Vorteile von SAFT teilweise ungenutzt. Im Folgenden werden die Unterschiede zur vollständigen 3D-SAFT-Analyse anhand mehrerer Beispiele großer zylindrischer Schmiedeteile dargestellt.

## 2. Gegenüberstellung 2D-/3D-SAFT

Bei der 2D-SAFT-Analyse wird das zu rekonstruierende Volumen entsprechend dem Prüfraster in Schnittebenen aufgeteilt. Bei zylindrischen Schmiedeteilen, die von der Mantelfläche aus gescannt werden, liegen die Ebenen senkrecht zur Bauteilachse. Die Rekonstruktion erfolgt für jede Schnittebene separat, wobei nur die A-Bilder der Messpunkte innerhalb der Schnittebene berücksichtigt werden. Anschließend wird das zu rekonstruierende Volumen aus den Ergebnissen aller Schnittebenen zusammengesetzt.



Während dadurch die Rechenkomplexität reduziert wird, bedeutet diese Vorgehensweise jedoch, dass die Schallausbreitung nur innerhalb der jeweiligen Schnittebene berücksichtigt wird. Dass die Schallausbreitung in andere Richtungen ignoriert wird, bedeutet physikalisch gesehen die Inkaufnahme einer Ungenauigkeit in der Berechnung.

Bei der vollständigen 3D-SAFT Analyse werden hingegen - physikalisch korrekt - alle beitragenden A-Bilder berücksichtigt. Aus der schematischen Darstellung in Bild 1 lässt sich erkennen, welche Messsignale in die Rekonstruktion eingehen.

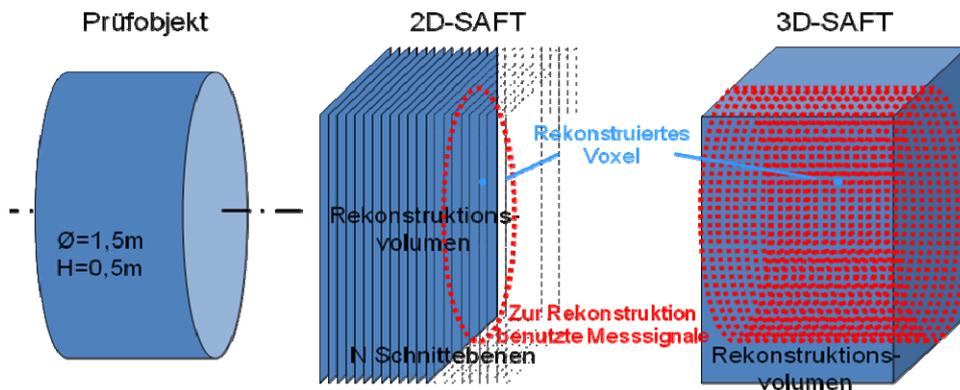


Bild 1 Schematische Darstellung von 2D-SAFT und 3D-SAFT

### 3. Vergleich anhand von Messdaten

#### 3.1. Flachbodenbohrung

In Bild 2 ist die 2D-SAFT Rekonstruktion einer 1 mm Flachbodenbohrung in einer Radscheibe mit Innenbohrung gezeigt. Im Quadranten unten rechts ist der Schnitt senkrecht zur Bauteilsachse dargestellt (X/Y-Querschnitt), unten links und oben rechts die beiden Schnitte in axialer Richtung (d.h. X/Z- und Y/Z-Querschnitt). Während der Defekt in lateraler Richtung (X/Y-Schnitt) in der Größenordnung einer Wellenlänge (3 mm) lokalisiert ist, hat er in axialer Richtung eine Ausdehnung von ca. 70 mm. Mit einem Abstand von 600 mm zwischen Defekt und Bauteiloberfläche und einem beidseitigen Öffnungswinkel des Schallbündels von  $7^\circ$  entspricht dies dem dortigen Bündeldurchmesser. Wie auch in B-Bildern ohne SAFT-Analyse ist die Defektanzeige in den axialen Schnittbildern sichelförmig gekrümmt, d.h. die 2D-Rekonstruktion entfaltet in axialer Richtung keine SAFT-Wirkung.

Das Ergebnis der 3D-SAFT Rekonstruktion ist in Bild 3 gezeigt. Die Anzeigengröße in lateraler Richtung ist unverändert, in axialer Richtung ergibt sich eine deutliche Anzeigenverkürzung. Gegenüber der 2D-Analyse zeigt sich die SAFT-Wirkung nun auch in axialer Richtung.

Wie in [1] dargelegt, verbessert die SAFT-Analyse das gefügebedingte Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Interessant ist nun, dass der Übergang von 2D-SAFT zu 3D-SAFT das SNR weiter verbessert. Im gezeigten Beispiel steigt das SNR von 19,5dB auf 24,6dB als Folge der SAFT-Wirkung in axialer Richtung.

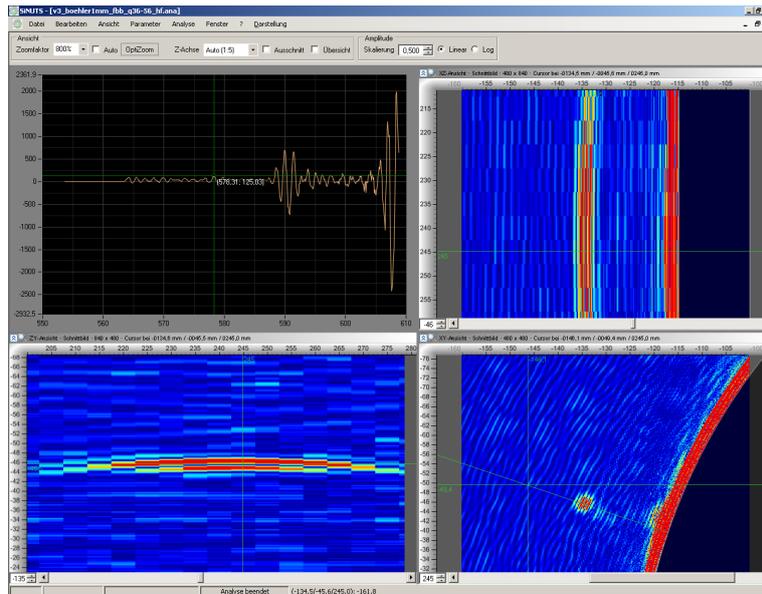


Bild 2 2D-SAFT Anzeige einer 1mm Flachbodenbohrung

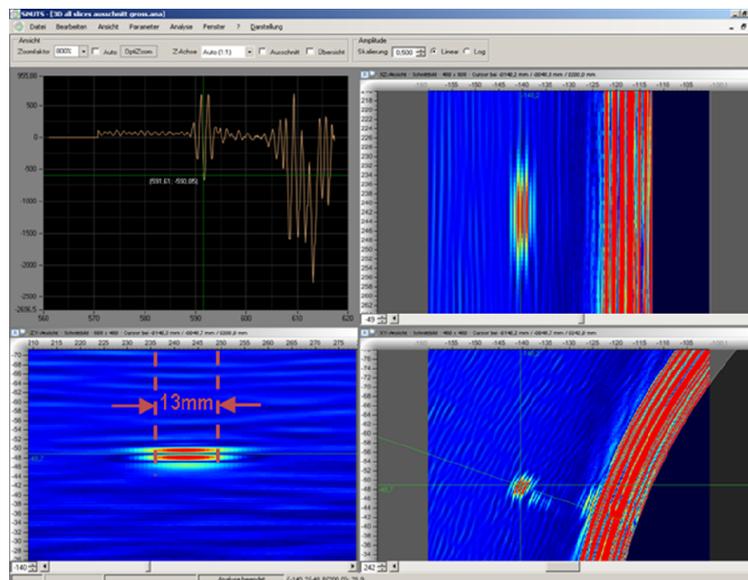


Bild 3 3D-SAFT Anzeige einer 1mm Flachbodenbohrung

### 3.2. Axiale Anzeigenlänge

Zur Klärung, warum die Flachbodenbohrung im obigen Beispiel trotz der 3D-SAFT-Analyse zu einer Anzeige führt, die axial deutlich größer als eine Wellenlänge ist, muss das Zustandekommen einer SAFT-Anzeige betrachtet werden. Durch den Öffnungswinkel des Prüfkopfschallfeldes, ist ein Defekt an vielen Prüfpositionen auf der Oberfläche „sichtbar“. Alle diese Prüfpositionen tragen zum Zustandekommen einer Anzeige im SAFT-Ergebniss bei. An der Stelle maximaler konstruktiver Interferenz findet sich das Maximum der Defektanzeige, während sich seitlich neben der Defektanzeige destruktive Interferenz ergibt.

Ausgehend von einer kegelförmigen Schallabstrahlung mit dem beidseitigen Öffnungswinkel  $\vartheta_{-6dB} = \sin^{-1}(\lambda/D)$  kann man eine Näherungsformel für die axiale Anzeigenausdehnung ableiten. Wenn man für einen zu rekonstruierenden Punkt diejenigen Prüfpositionen auf der Bauteiloberfläche betrachtet, an denen dieser mit den Randstrahlen

getroffen wird, ergibt sich die in Bild 4 gezeigte Konfiguration. Die Breite der Defektanzeige wird durch die Größe der Zone konstruktiver Interferenz bestimmt. Diese entspricht ungefähr dem Abstand zwischen dem Ort maximaler konstruktiver und dem maximaler destruktiver Interferenz. Den lateralen Abstand zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz erhält man nun, wenn man sich auf den Wellenfronten der einen Prüfposition  $\lambda/4$  vorwärts und auf den Wellenfronten der anderen Prüfposition  $\lambda/4$  rückwärts bewegt, so dass sich insgesamt ein Unterschied von  $\lambda/2$  ergibt. Bei Approximation durch ebene Wellenfronten führt die geometrische Betrachtung dieses Dreiecks zu der Formel

$$b = \frac{\lambda/4}{\sin(\beta/2)}$$

wobei mit  $b$  die Anzeigenbreite, mit  $\lambda$  die Wellenlänge und mit  $\beta$  der Winkel bezeichnet ist, unter dem der Defekt angeschallt wird.

Bei Messung mit dem Prüfkopf B2S ( $f = 2\text{MHz}$ ,  $\vartheta_{-6\text{dB}} = 7,4^\circ$ ) ergibt sich rechnerisch eine Anzeigenlänge von 11,5 mm. Dies stimmt gut mit der gemessenen Anzeigenlänge von 13 mm überein. Eine systematische Validierung unter verschiedenen Prüfbedingungen wurde jedoch nicht durchgeführt.

Entsprechend obiger Formel ist die Ausdehnung der Defektanzeige abhängig vom Winkel unter dem der Defekt „sichtbar“ ist. Bei ebener Messfläche ist dieser Winkel gleich dem Öffnungswinkel des Schallbündels. Die obige Formel lässt sich auch auf gekrümmte Oberflächen übertragen, wenn der Öffnungswinkel des Prüfkopfes in den Winkel  $\beta$  umgerechnet wird. Bei zylindrischer Prüffläche kann dazu z.B. das Nomogramm benutzt werden, das ansonsten bei der Rohrprüfung zur Bestimmung des Einschallwinkels auf der Gegenfläche verwendet wird.

Aus obiger Formel folgt: Durch einen Prüfkopf mit größerem Öffnungswinkel kann die Anzeigenlänge in axialer Richtung verkürzt werden. Während in Umfangsrichtung die Oberflächenkrümmung den Winkel  $\beta$  im Inneren vergrößert, gibt es einen solchen Effekt in axialer Richtung nicht.

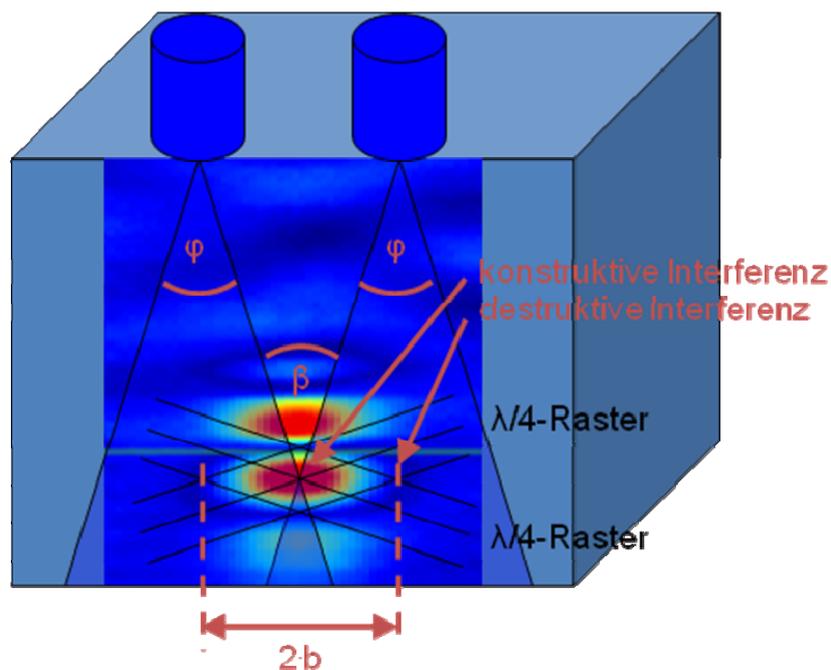


Bild 4 Berechnung der Anzeigenlänge

### 3.3. Querbohrungen

Des Weiteren wurde ein Testkörper untersucht, in dem 5mm Querbohrungen in axialer Richtung eingebracht sind. Die 2D-SAFT Rekonstruktion in Bild 5 zeigt die gute laterale Lokalisierbarkeit (d.h. in einer Schnittebene). In axialer Richtung hat die Anzeige der Querbohrung dagegen kein scharfes Ende, sondern einen stark ausgedehnten Übergangsbereich von 84 mm Länge, so dass die Länge der Querbohrung anhand der Ultraschalldaten nicht zuverlässig bestimmt werden kann.

Bei der in Bild 6 gezeigten 3D-SAFT Rekonstruktion ergibt ein deutlich kürzerer Übergangsbereich von 14 mm Länge, in Übereinstimmung mit der berechneten axialen Auflösung. Wenn man das Bohrungsende anhand der Mitte des Übergangsbereiches bestimmt, ergibt sich eine Bohrungslänge von 303 mm, die sich in der Größenordnung einer Wellenlänge mit der tatsächlichen Bohrungslänge von 300 mm deckt.

Bemerkenswert ist, dass auch der Querschnitt der Defektanzeige in lateraler Richtung bei 3D-SAFT besser mit dem tatsächlichen Bohrungsquerschnitt übereinstimmt: Die 5 mm Querbohrung führt bei 2D-SAFT zu eine Anzeige mit 11 mm Durchmesser und bei 3D-SAFT zu einer Anzeige von 7 mm Durchmesser.

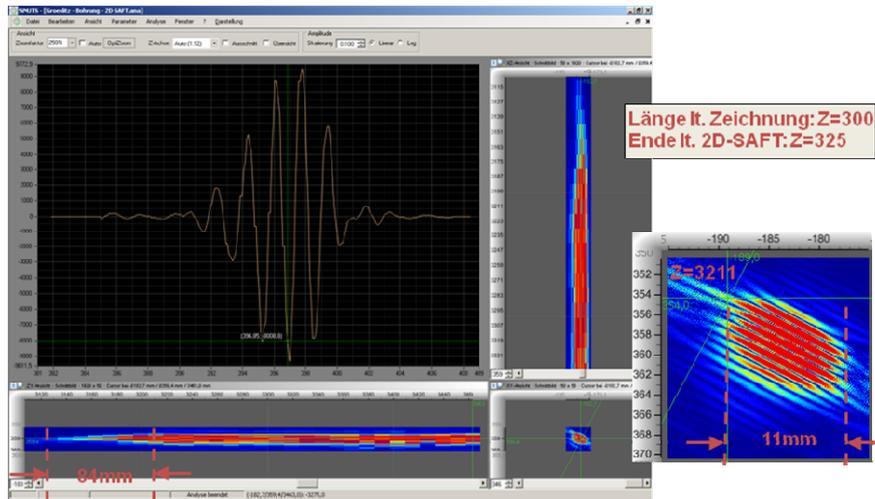


Bild 5 2D-SAFT Anzeige einer Querbohrung

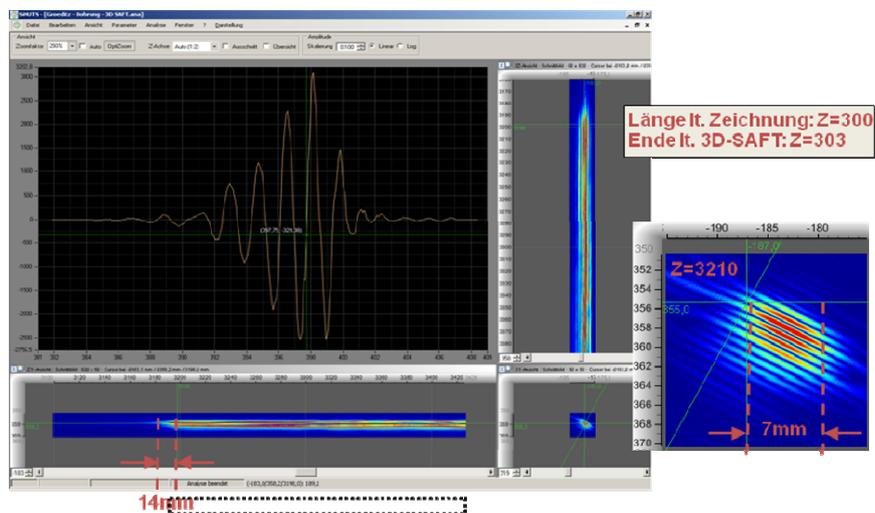


Bild 6 3D-SAFT Anzeige einer Querbohrung

### 3.4. Natürliche Defekte

Neben den künstlich eingebrachten Defekten, ist auch die Betrachtung natürlicher Defekte wichtig. Hierzu wurde ein Bauteil verwendet, das einen Bereich mit Gruppenanzeigen enthält. Der Vergleich von 2D- und 3D-SAFT bestätigt die bekannte Verkürzung der Defektanzeigen und die damit verbundene Verbesserung der axialen Defektauflösung. Wie man in Bild 7 erkennt, führt das zu einer übersichtlicheren Defektanzeige im X/Y-Querschnitt. Die Schnittansichten in axialer Richtung profitieren davon, dass bei 3D-SAFT auch Punkte zwischen den Messebenen rekonstruiert werden können. In Bild 8 ist das Ergebnis der 3D-Rekonstruktion als Schrägansicht dargestellt.

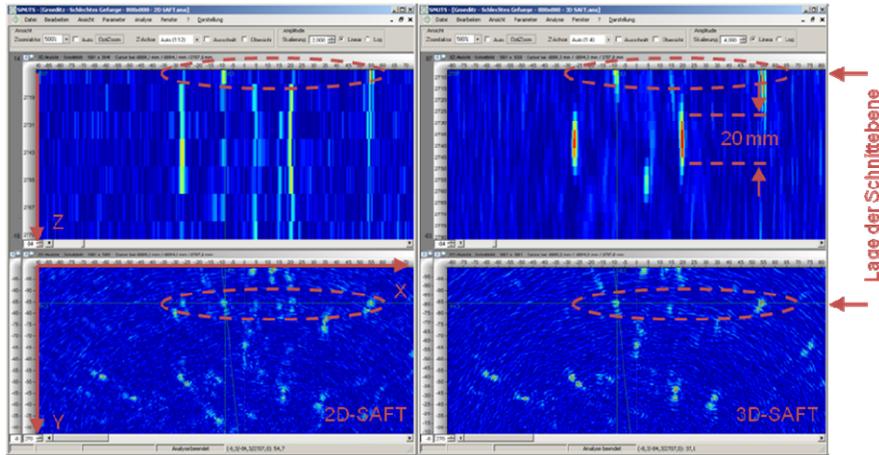


Bild 7 Vergleich der 2D/3D-SAFT Anzeigen natürlicher Defekte

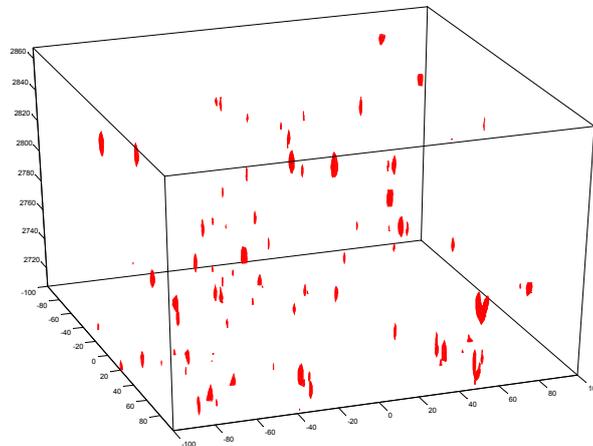


Bild 8 Schrägansicht der 3D-SAFT-Ergebnisse

## 4. Rechenzeit und GPU-Implementierung

Die Rechenzeit der SAFT-Rekonstruktion für eine Radscheibe ohne Innenbohrung mit 1,6m Durchmesser ist in Tabelle 1 angegeben. Die Prüfung umfasst 64 Spuren mit je 1001 Messpunkten auf dem Umfang. Die gescannte axiale Länge beträgt 0,75 m. Das Rekonstruktionsraster ist  $1 \times 1 \times 12 \text{ mm}^3$  bei 2D-SAFT und  $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$  bei 3D-SAFT.

Zur Nutzung mehrerer CPU-Cores wurde die Berechnung mit einfachen Mitteln parallelisiert. Damit ergibt sich bereits eine spürbare Beschleunigung, die Ausnutzung der Cores wurde jedoch nicht optimiert. Die Rechenzeit für die 3D-SAFT Rekonstruktion des gesamten Prüfvolumens wurde auf Basis von Ausschnittrekonstruktionen hochgerechnet.

Tabelle 1 Rechenzeit der SAFT-Rekonstruktion

		2D-SAFT (Messung)	3D-SAFT (Hochrechnung)	
Server	8 Core	25 Min	Ca. 40 Std	10,8x schneller
Server	1 Core	1 Std, 37 Min	Ca. 160 Std.	2,8 x schneller
Laptop	1 Core	4 Std, 30 Min	Ca. 460 Std	Referenz (100%)

Berechnungen, bei denen - wie bei der SAFT-Rekonstruktion - viele gleichartige Rechenschritte mit verschiedenen Daten durchgeführt werden („Datenparallelität“), lassen sich gut mittels Grafikkarten beschleunigen. Diese zeichnen sich durch eine sehr hohe Anzahl von Verarbeitungseinheiten aus, während nur wenig Chipfläche für Verwaltungseinheiten verwendet wird. Speziell für Berechnungszwecke ausgelegte Grafikkarten werden als General Purpose Graphics Processing Units (GP-GPU) bezeichnet.

Zur Implementierung der SAFT-Analyse wurden vier Graphikkarten vom Typ Tesla C2050 der Firma Nvidia verwendet. Diese haben 448 Rechenkerne („Cuda Cores“) und 3 GByte Speicher. Wie in Bild 9 gezeigt, wird durch die GPU-Implementierung eine erhebliche Beschleunigung erreicht (Vergleich einer GPU gegenüber einem CPU Kern). Bei der Rekonstruktion eines Ausschnittes ist die Berechnung um den Faktor 70 bis 184(!) schneller. Die relative große Schwankungsweite erklärt sich durch das Datenmanagement und durch die Tatsache, dass eine im CPU-Programm verwendete datenabhängige Optimierung im GPU-Programm nicht vorgenommen wurde.

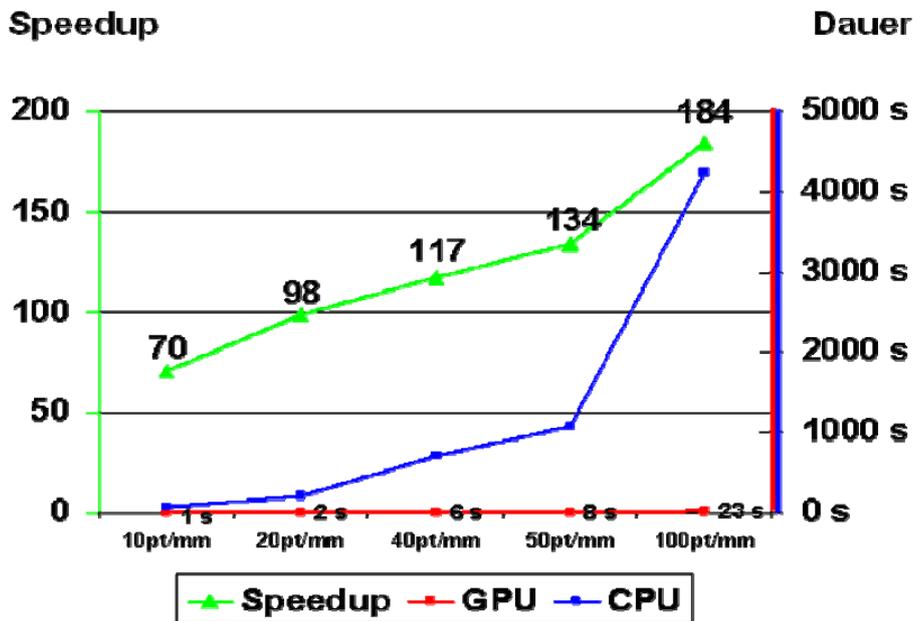


Bild 9 Vergleich der Rechenzeit auf einer GPU vs. CPU

## 5. Zusammenfassung

Um die Vorteile von SAFT in allen Raumrichtungen zu nutzen, ist eine vollständige 3D-SAFT-Analyse notwendig, bei der alle beitragenden A-Bilder berücksichtigt werden, egal in welcher Schnittebene sie liegen. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden folgende Vorteile von 3D-SAFT nachgewiesen:

Vergleich mittels FBB:

- Verkürzung der Anzeigenlänge in Axialrichtung gegenüber 2D-SAFT
- Verbesserung des SNR gegenüber 2D-SAFT

Vergleich mittels QB:

- Genauere Positionsauswertung (nahe der Wellenlänge)
- Bohrungstiefe besser bestimmbar
- Querschnitt näher an der realen Ausdehnung

Vergleich mittels natürlicher Defekte:

- Bessere Trennung von Anzeigen anhand der Axialposition möglich
- Klare Querschnittsdarstellung

Die 2D-SAFT-Rekonstruktion lässt sich mit heutigen Computern für eine typische Prüfaufgabe großer zylindrische Schmiedeteile bereits schneller durchführen als die Messung, d.h. eine Auswertung parallel zur Messung ist möglich (z.B. zeitversetzt um einen Takt). Bisherige Einschränkungen durch den hohen Rechenaufwand lassen sich inzwischen durch die Verfügbarkeit leistungsfähiger Grafikkarten für Berechnungszwecke und bei planarer Messfläche auch durch den Einsatz von FT-SAFT [4] überwinden, so dass die vollständige 3D-SAFT-Analyse inzwischen einem breiten Anwendungsgebiet zugänglich ist.

## 6. Danksagung

Die Autoren danken der Böhler Edelstahl GmbH & Co KG und der Schmiedewerke Gröditz GmbH für die Bereitstellung der Messdaten.

## 7. Referenzen

- [1] R. Böhm, W. Heinrich: „Störsignalminderung bei der Ultraschallprüfung durch ein Auswerteverfahren in Anlehnung an die Synthetic Aperture Focussing Technique (SAFT)“, DGZfP-Jahrestagung St. Gallen, 2008.
- [2] R. Böhm, D. Brackrock, J. Kitze, G. Brekow, M. Kreuzbruck: „Advanced crack shape analysis using SAFT“, American Institute of Physics, 2010, vol.1211, S.814ff
- [3] H. Mooshofer, M. Goldammer, W. Heinrich, K. Kolk: „Untersuchung von Robustheit und SNR der SAFT-Analyse“, DGZfP-Jahrestagung Bremen, 2011.
- [4] A. Zimmer: „Abbildende zerstörungsfreie Prüfverfahren mit elastischen und elektromagnetischen Wellen“, Dissertation an der Universität Kassel, 2008.