

# 4D Ultraschall - Ein neuer Ansatz auf Basis der mechanischen Bildzerlegung

Robert SCHMITT\*, Sebastian POLLMANN\*<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen, Prof. Schmitt, Steinbachstraße 19, 52074 Aachen

Tel.: 0241/80-20283, e-mail: R.Schmitt@WZL.RWTH-Aachen.de

**Kurzfassung.** Dieser Beitrag beschreibt die Verwendung der Nipkow-Scheibe zur schnellen Aufnahme von dreidimensionalen Ultraschallbildern. Dabei werden sowohl der Aufbau eines Systemprototypen als auch Auswertungsbeispiele von Probemessungen (Flächen- und Volumenbilder) vorgestellt. Anhand des Versuchsaufbaus wird gezeigt, dass bereits konventionelle, industrielle Ultraschallsysteme und -sensoren ausreichend sind, um 4D-Ultraschalldaten aufzuzeichnen.

## 1 Einleitung

Moderne Ultraschallsysteme erlauben eine Erfassung und Darstellung von bewegten dreidimensionalen Volumenbildern von inneren Merkmalen („4D-Ultraschall“) [1]. Zur Aufnahme von 4D-Ultraschalldaten sind jedoch kostenintensive Hardwarekomponenten zur Schallerzeugung und -aufnahme sowie eine technisch komplexe Sensorik (z.B. Array-Sensoren) erforderlich [2, 3]. Aus diesen Gründen werden 4D-Ultraschallsysteme heutzutage fast ausschließlich stationär im Rahmen der medizinischen Diagnostik eingesetzt. Um dreidimensionale Ultraschallbilder in Echtzeit und deren sehr gute Auswertbarkeit auch für die industrielle Werkstoffprüfung nutzen zu können, müssen die Systemkosten erheblich reduziert werden.

Eine Strategie um dieser Herausforderung zu begegnen, ist die Reduzierung der Komplexität von Sensor und Ultraschallsystem durch Nutzung alternativer Scanning-Verfahren als Grundlage der Bildgebung. In einem ersten Ansatz wurde hierzu am WZL ein Systemprototyp entwickelt, welcher Methoden der mechanischen Bildzerlegung auf Basis der Nipkow-Scheibe nutzt. Dieses Prinzip zur Bildzerlegung und -darstellung wurde ursprünglich zur Fernübertragung von optischen Bildern entwickelt und wurde in der frühen Fernsehtechnik eingesetzt [4].

## 2 Technische Grundlagen

### 2.1 Verfahren zur orts aufgelösten Ultraschallmessung

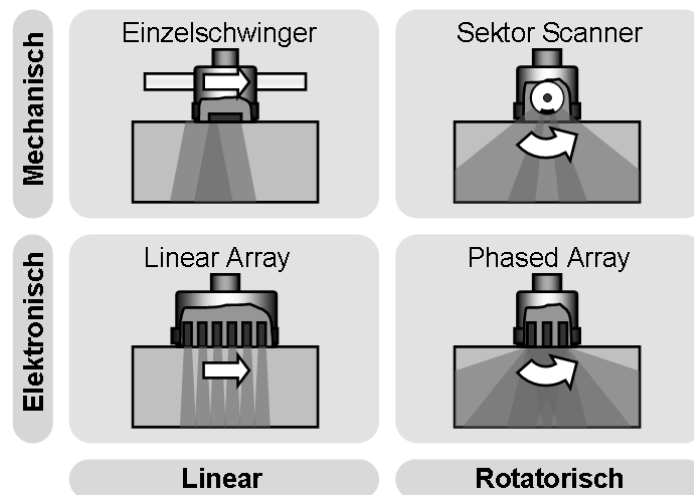
Die Aufnahme von statischen (3D) und dynamischen (4D) Ultraschallvolumenaufnahmen ist stets an einen Scan- bzw. Bildzerlegungsvorgang gekoppelt und wird in Impuls-Echo-Anordnung ausgeführt. Bei der Impuls-Echo-Technik wird ein Ultraschallprüfkopf zur

Schallerzeugung und zum Empfang der im Bauteil reflektierten Ultraschallechos verwendet. Über die Laufzeit der Ultraschallechos kann die Lage der Reflektoren (z.B. Fehlstellen bei der Werkstoffprüfung, Organe bei medizinischen Untersuchungen) bestimmt werden. [5]

Das Scanning ist notwendig, um eine lateral aufgelöste Darstellung der inneren Reflektoren zu erhalten. Die Visualisierung der so aufgenommenen Ultraschalldaten wird als Bildgebung bezeichnet. Das eingesetzte Scan- bzw. Bildzerlegungsprinzip ist dabei eng verknüpft mit den verwendeten Sensoren bzw. der Ultraschallhardware.

Die Scanprinzipien lassen sich grob in vier grundsätzlich verschiedene Gruppen bzw. Sensortypen einteilen, wobei hybride oder abgeleitete Funktionsweisen hier nicht vorgestellt werden. (siehe Bild 1)

Der Scanvorgang kann entweder mechanisch durch Bewegung eines Schallerzeugers oder elektronisches Verschalten einer Schallerzeugergruppe erfolgen [6]. Die Bewegung der Schallkeule durch den Messbereich kann dabei translatorisch oder durch einen Schwenkvorgang realisiert werden.



**Bild 1:** Sensorbauformen zur ortsauflösten Ultraschallmessung in Impuls-Echo-Anordnung

Einzelschwinger werden entweder definiert verfahren oder benötigen ein Tracking-System zur Positionserfassung. Sie eignen sich insbesondere zur Aufnahme statischer 3D-Ultraschalldaten. [2]

Sektorscanner bzw. Wobblers sind für zeitaufgelöste 2D-Schnittbilder z.B. im medizinischen Bereich sehr gut geeignet. Bei mehrachsigen Schwenkvorgängen zum Erhalt von 4D-Aufnahmen sind diese jedoch ebenfalls in ihrer Aufnahmegeschwindigkeit begrenzt. [3]

Der Sektorscanner und abgeleitete Bauformen mit mechanischer Schwenkeinrichtung sind heutzutage aufgrund des guten Preis-Leistungsverhältnisses immer noch konkurrenzfähig gegenüber elektronischen scannenden Systemen. [3]

Elektronisch scannende Systeme basieren auf sogenannten Array-Sensoren, welche mehrere einzeln angesteuerte Schallerzeuger umfassen. Die einzelnen Elemente sind zumeist linien- oder matrixförmig angeordnet. [3, 7]

Bei einer Aufnahme mit dem Linear Array senden die einzelnen Schallerzeuger (bzw. kleinere Gruppen) kaskadiert Ultraschallimpulse aus. Auf diese Weise kann eine Ebene oder ein Volumen unterhalb des Sensors gescannt werden ohne den Sensor bewegen zu müssen. [3]

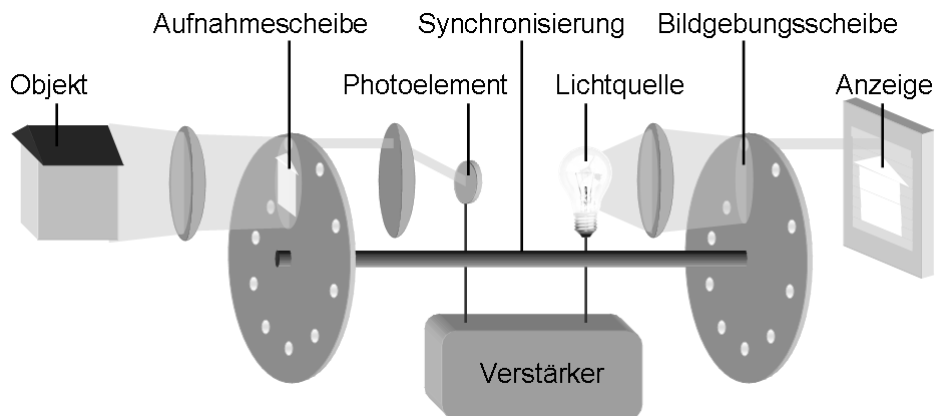
Beim Phased Array senden die einzelnen Schallerzeuger mit kurzem zeitlichen Versatz Ultraschallsignale aus. Der zeitliche Versatz kann derart gesteuert werden, dass sich

resultierende Wellenfronten aus den Einzelimpulsen mit variabler Winkellage ergeben. Auf diese Weise kann ein elektronisches Schwenken realisiert werden. [3]

Die Array Technologie erlaubt hohe Mess- bzw. Scangeschwindigkeiten und somit eine schnelle Aufnahme von 4D-Ultraschalldaten. Durch die Notwendigkeit zur einzelnen Ansteuerung der separaten Schallerzeuger sind Array Sensoren und entsprechende Auswertungssysteme sehr kostenintensiv. [8]

### 2.1 Mechanische Bildzerlegung mittels Nipkow-Scheibe

Das hier eingesetzte Bildzerlegungsverfahren basiert auf der von Paul Nipkow 1884 erfundenen, rotierenden Blendenscheibe. Die sogenannte Nipkow-Scheibe weist eine oder mehrere Bohrungsgruppen auf, die auf Spiralbahnen auf dem Scheibenumfang verteilt sind. Diese Art der optischen Bildzerlegung wurde in der frühen Fernsehtechnik zu Beginn des 20. Jahrhunderts sowohl zur Bildaufnahme und als auch Wiedergabe verwendet. Bild 2 zeigt schematisch einen entsprechenden Aufbau. [4, 9]



**Bild 2:** Funktionsschema eines optischen Bildzerlegungs- und Rekonstruktionssystems auf Basis der Nipkow-Scheibe

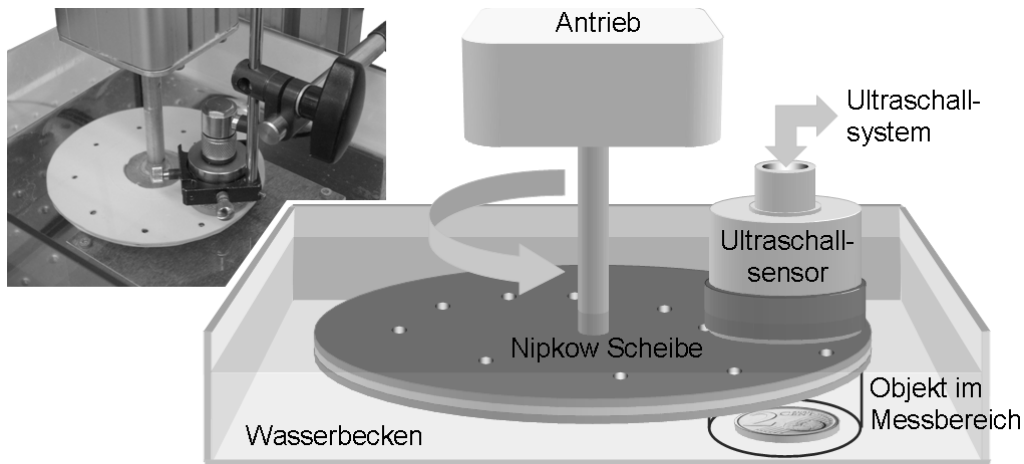
Während einer Umdrehung der Aufnahmescheibe passieren die Blendenlöcher nacheinander das optische Abbild des aufzunehmenden Objekts. Durch die spiralförmige Anordnung der Bohrungen erfolgt eine Zeilenrasterung, die es ermöglicht, ein zweidimensionales Bild in eine Helligkeitssequenz zu wandeln. Diese Sequenz kann mit Hilfe eines einzelnen fotoempfindlichen Elements in ein elektrisches Signal konvertiert werden. Das elektrische Signal wird verstärkt, übertragen und bei einer entfernten Empfangseinheit zur synchronen Steuerung einer Lichtquelle verwendet. Bei ausreichend hohen Drehgeschwindigkeiten der ebenfalls synchron rotierenden Projektionsscheibe wird vom menschlichen Auge auf der Anzeige ein flächiges Bild wahrgenommen. [4, 9]

Das auf diese Weise realisierte mechanische Fernsehen bot jedoch nach heutigen Maßstäben nur eine schlechte Bildqualität und langsame Bildwiederholraten. In den 1930er Jahren wurde die Verwendung von Nipkow-Scheiben in der Fernsehtechnik eingestellt. Dies wurde vor allem durch die Verfügbarkeit von schnelleren und robusteren elektrisch arbeitenden Bildzerlegern und Anzeigen bedingt. [4]

### 3 Experimenteller Aufbau

#### 3.1 Funktionsprinzip des akustischen Nipkow Systems

Die beschriebenen Nachteile des Nipkow-Systems sind für die Ultraschalltechnik aufgrund geringerer Anforderungen an die Bildgebungsqualität weitgehend unkritisch. Bild 4 zeigt schematisch den Versuchsaufbau für ein Nipkow-Scheiben-basiertes Bildzerlegungssystem für Ultraschallfelder.



**Bild 4:** Systemkonzept des akustischen Nipkow-Systems

Das System ist zur besseren Schallübertragung in einem Wasserbecken installiert. [10] Der zylindrische Ultraschallsensor ist direkt auf der horizontal angeordneten akustischen Nipkow-Scheibe positioniert und wird nicht bewegt. Unterhalb des Sensors ergibt sich ein annähernd zylindrischer Messbereich, der orts- und zeitaufgelöst erfasst werden kann.

Das beschriebene System verwendet einen Standardprüfkopf mit 5 MHz für die manuelle Prüfung, welcher mit konventioneller Schallerzeugungs-Hardware betrieben werden kann. Die Auswertung und Rekonstruktion erfolgt allein auf Basis der aufgenommenen Ultraschallsequenz und benötigt keine weitere Steuerungselektronik (Positionserfassung, Trigger etc.)

Der Prototyp der neu entwickelten, akustischen Nipkow-Scheibe weist zehn Löcher mit 3 mm Durchmesser auf und kann daher bei einer Umdrehung das zylindrische Messvolumen (30 mm Durchmesser) in zehn Volumenzeilen bzw. Scheiben zerlegen. Die zehn Scheiben erscheinen infolge der Rotation der Nipkow-Scheibe als ein aneinandergereihtes Schnittbild.

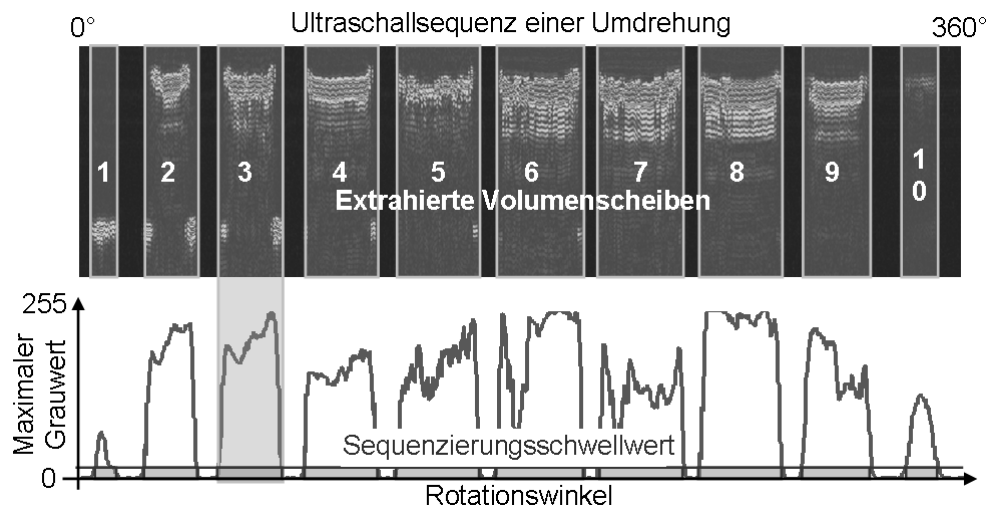
Die Lochabstände sind so gewählt, dass der Ultraschallsensor immer nur ein Loch gleichzeitig durchschallt und das Ultraschallsignal bei Lochübergängen kurz ausgeblendet wird.

#### 3.2 Datenerfassung und -verarbeitung

Im ersten Schritt wird mittels des stationären Ultraschallsensors eine Ultraschallsequenz im Zeitbereich aufgenommen (BT-Scan) während die Nipkow-Scheibe rotiert. Die Zeilentrennung und deren Volumenrekonstruktion erfolgt anschließend rechnergestützt. Bild 5 zeigt schematisch die Extraktion der einzelnen Volumenzeilen bzw. -scheiben aus der Ultraschallsequenz.

Jede Bildspalte entspricht einem Ultraschallsignal mit einer grauwertcodierten Darstellung der Echohöhen. Die Trennung der Volumenscheiben aus der Bildsequenz erfolgt durch Vergleich des Maximalwertverlaufs der Ultraschallsignale mit einem Schwellwert. Ist der Sensor genau zwischen zwei Blendenlöchern, wird kein Ultraschallecho detektiert. Der Maximalwert liegt dann unter dem Schwellwert und es wird ein Zeilenumbruch festgestellt. Sequenzbereiche deren Maximalwerte oberhalb des Schwellwerts liegen werden als ein zusammenhängendes Bild gespeichert. Jede Umdrehung der hier betrachteten akustischen Nipkow-Scheibe erzeugt auf diese Weise zehn Ultraschallschnittbilder.

Durch Rekonstruktionsalgorithmen im Messrechner wird in Echtzeit ein Schnittbildstapel erzeugt und in eine Volumendarstellung umgewandelt. Auf diese Weise entsteht ein bewegtes dreidimensionales Abbild des Messbereichs.



**Bild 5:** Schwellwertbasierte Identifikation des Volumenzeilenumbruchs

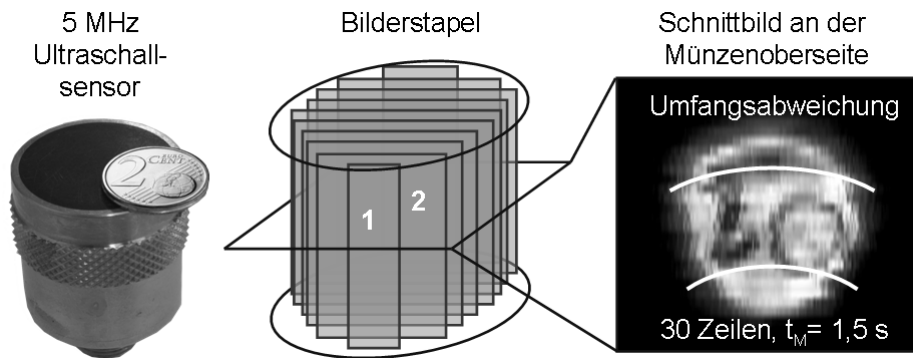
## 4 Probemessungen

### 4.1 Messung von Oberflächen

Zu Beginn der Messreihen wurde eine 2ct-Münze aufgenommen um die Ortsauflösung des Systems qualitativ zu betrachten. Die laterale Auflösung ist zum einen maßgeblich abhängig (neben der Sensorcharakteristik) von der Anzahl und Größe der Blendenlöcher und zum anderen von der Rotationsgeschwindigkeit bzw. der Impulsfolgefrequenz des eingesetzten Ultraschallsystems.

Das mit dem Versuchsaufbau erfasste zylindrische Messvolumen hat sensorbedingt einen Durchmesser von 30 mm und eine bislang getestete Höhe von 20 mm. Der verwendete Antrieb erlaubt eine maximale Drehgeschwindigkeit von zwei Umdrehungen pro Sekunde, sodass eine Messzeit für das Volumen von 0,5 Sekunden erreicht wird. In Abhängigkeit von der Leistungsfähigkeit des Ultraschallsystems können bei dieser Geschwindigkeit deutlich über 100 Ultraschallsignale in einer Bildzeile aufgenommen werden.

Bild 6 zeigt ein Schema des zusammengesetzten Bilderstapels und einen horizontalen Schnitt durch das Ultraschallvolumen auf Höhe der Münzenvorderseite.



**Bild 6:** Zusammengesetztes Messvolumen und 2D Visualisierungsbeispiel

In diesem speziellen Beispiel wurde die Münze mit drei Umdrehungen der Nipkow-Scheibe gemessen, um den Effekt einer größeren Scheibe mit 30 Löchern zu simulieren. Dementsprechend besteht das Volumen aus 30 Scheiben und wurde in 1,5 Sekunden aufgenommen.

Im zweidimensionalen Bild sind die „2“ und die Weltkugel auf der Münzenvorderseite klar zu erkennen. Weiterhin sind Darstellungsverzerrungen aufgrund der stark gebogenen Scanbahnen der Blendenlöcher bei kleinen Scheibendurchmessern erkennbar. Diese müssen ggf. nachfolgend in der Auswertung kompensiert werden.

In Bild 8 ist eine dreidimensionale Visualisierung des gesamten Messvolumens am Beispiel einer 1ct-Münze dargestellt. Das Volumen wurde mit einer Umdrehung erfasst und besteht aus einem Stapel von zehn Einzelbildern.

Die Oberfläche der Münze wurde mit ausreichender lateraler und vertikaler Auflösung aufgenommen, um die „1“, die Weltkugel und die Kanten erfassen zu können. Die Münze scheint frei über der Probeauflage zu schweben, da zum Schallfeld orthogonale Flächen keine signifikanten Echos bedingen und somit nicht visualisiert werden können. Die Umrandung der Auflagefläche stellt gleichzeitig die seitlichen Grenzen des Messbereichs dar.



**Bild 7:** 3D Visualisierung der Ultraschallmessung einer 1ct Münze

#### 4.2 Messung innerer Merkmale

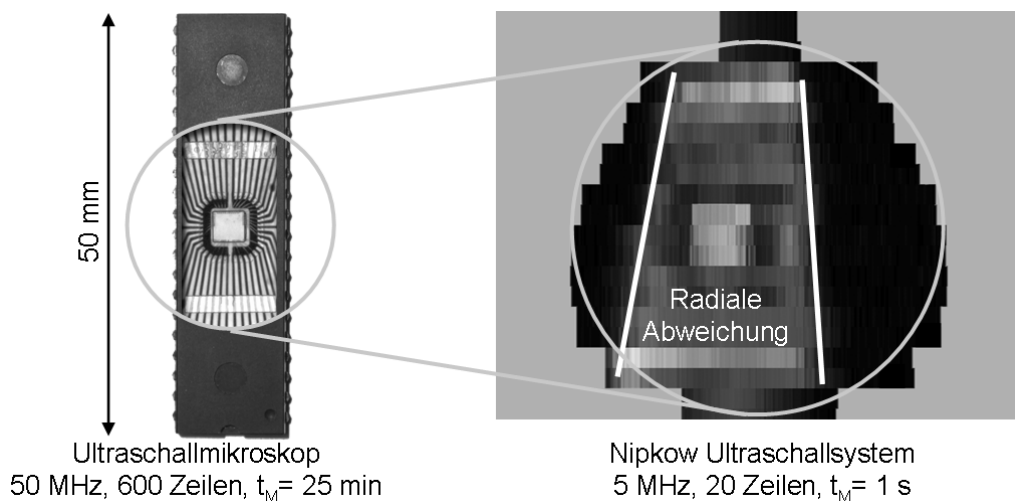
Bild 8 zeigt zwei Ultraschallschnittbilder eines Mikrochips auf Höhe der inneliegenden Leiterbahnen.

Auf der linken Seite ist zur besseren Interpretation ein x-y-Scan des Chips mit einem Ultraschallmikroskop aufgeführt. In der Nipkow-basierten Messung auf der rechten Seite sind Lage und Größe des inneren IC-Bausteins sowie der Vergussfixierungen

wiederzuerkennen. Die einzelnen Leiterbahnen sind hier nicht mehr trennbar und erscheinen als geschlossene Echotextur.

Des Weiteren sind Darstellungsverzerrungen in radialer Richtung zu beobachten, die durch verschiedene Bahngeschwindigkeiten der Blendenlöcher bedingt werden. Bei gleicher Messrate des Ultraschallsystems werden daher Objekte zur Scheibenmitte aufgrund der geringeren Bahngeschwindigkeit breiter dargestellt.

Die Probemessungen haben weiterhin gezeigt, dass das Einbringen der hier vorgestellten Nipkow-Scheibe als Schallfeldblende eine Signalschwächung von ca. 40 dB verursacht. Während Kunststoffe im Innern mit diesem Versuchsaufbau noch prüfbar sind, ist die Schallreflexion an Übergängen zu metallischen Werkstoffen für die Prüfung innerer Merkmale zu groß. An dieser Stelle müssen entsprechende Ausgleichstrategien ggf. aus der Luftultraschalltechnik näher untersucht und adaptiert werden.



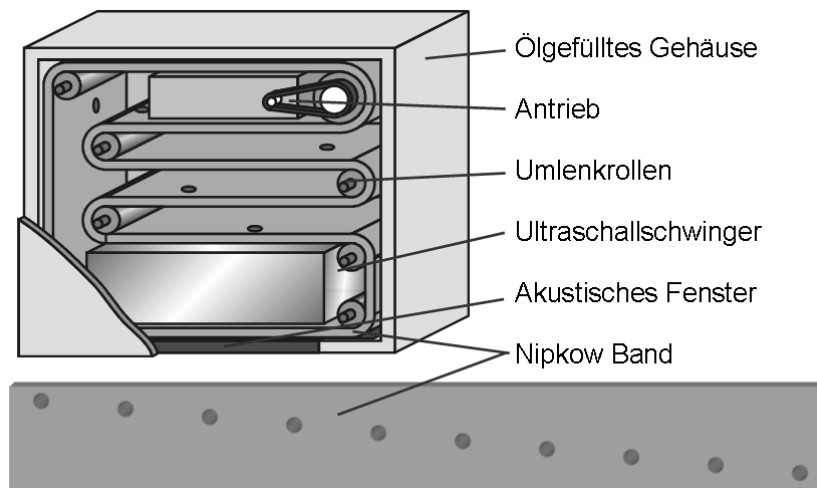
**Bild 8:** Darstellung innerer Merkmale am Beispiel eines Mikrochips

## 5 Sensorkonzept für mobile Messungen

Zur Verwendung in handgeführten Sensoren für mobile Untersuchungen ist der Einsatz der Nipkow-Scheibe in einem Wassertank nicht zweckmäßig. Zum Bau kompakter Sensoren wurde daher das Konzept eines band-basierten Bildzerlegers entwickelt (Bild 9). Hierzu wird ein „Nipkow-Band“ mit einer Lochtreppe vor dem rechteckigen Schallerzeuger positioniert. Das Sensorgehäuse ist zur Schallübertragung mit einer Flüssigkeit gefüllt.

Das Nipkow-Band wird zwischen Sensor und einem „akustischen Fenster“ geführt. Die Blendenlöcher vollziehen sukzessive eine lineare Bewegung durch das Schallfeld und erlauben dadurch eine verzerrungsfreie Bildgebung des Messbereichs. Mit ausreichender Bahngeschwindigkeit des Bands, lassen sich 4D-Ultraschallinformationen generieren.

Der praktische Einsatz erfolgt durch Aufsetzen des Sensors auf den Prüfkörper mit einer dazwischen liegenden Koppelschicht aus z.B. Öl, Wasser oder Gel. Um Reflexionsverluste bei der Schallübertragung zu minimieren, müssen das Fenster sowie das innere und das äußere Koppelfluid hinsichtlich der akustischen Eigenschaften aufeinander abgestimmt sein.



**Bild 9:** Konzept eines handgeführten Ultraschallsensors für 4D-Ultraschallaufnahmen

## 6 Fazit

Das neu entwickelte, akustische Nipkow-Verfahren kann zum einen, hinsichtlich der Aufnahmegeschwindigkeit, schneller als gleichfalls kostengünstige mechanische Ultraschallschanner Daten erfassen. Zum anderen wären diese Systeme aufgrund der technologischen Einfachheit sehr viel kostengünstiger als elektronisch scannende Systeme zu realisieren, die ähnliche hohe Messgeschwindigkeiten erreichen.

Die gezeigten Ergebnisse können zum einen direkt genutzt werden, um schnelle automatisierte Ultraschallprüfanlagen für die Fließfertigung bereitzustellen. Zum Anderen wurde auf Basis des Systemschemas ein kompaktes Sensorkonzept entwickelt, um eine mobile, handgeführte Ultraschallprüfung in der Fertigung oder im Feld bzw. eine Nutzung in der medizinischen Diagnostik zu ermöglichen.

## Literatur

- [1] Smith, A.; Chudleigh, T.; Maxwell, D.: Incorporating 3D and 4D Ultrasound into Clinical Practice, Ultrasound, Jg. 13, Nr. 1, S. 4-10, British Medical Ultrasound Society (Hrsg.), London: Maney Publishing, 2005
- [2] Nelson, T. R.: Three dimensional Ultrasound Imaging, Proceedings of 35th Annual UIA Symposium, Ultrasonic Industry Association (Hrsg.), San Diego, 2006
- [3] Lorenz, A.; Delorme, S.: B-Bild-Sonographie Technische Grundlagen, Der Urologe B, Jg. 41, Nr. 2, S. 168-181, Berlin: Springer, 2001
- [4] Van den Ende, J.; Ravesteijn, W.; De Wit, D.: Shaping the early Development of Television, IEEE Technology and Society Magazine, Jg. 16, Nr. 4, S. 13-26, IEEE Society on Social Implications of Technology (Hrsg.), 1997
- [5] Deutsch, V.; Platte, M.; Vogt, W.: Ultraschallprüfung - Grundlagen und industrielle Anwendungen, S. 74-76, Berlin: Springer, 1997
- [6] Elliott, S. T.: Volume Ultrasound: the next big Thing ?, The British Journal of Radiology, Jg. 81, Nr. 961, S. 8-9, The British Institute of Radiology (Hrsg.), Stanford: HighWire Press, 2008
- [7] Raatz Stephenson, S.: 3D and 4D Sonography - History and Theory, Journal of Diagnostic Medical Sonography, Jg. 21, Nr. 5, S. 392-399, Society of Diagnostic Medical Sonography (Hrsg.), London: Sage, 2005
- [8] Chaoui, R.; Rake, A.; Heling, K. S.: Drei- und vierdimensionale fetale Echokardiographie, Der Gynäkologe, Jg. 39, Nr. 1, S. 15-24, Beck, L. et. al. (Hrsg.), Berlin: Springer, 2006
- [9] Nipkow, P.: Elektrisches Teleskop, Patentschrift Nr. 30105, Berlin: Kaiserliches Patentamt, 1884
- [10] Barbian, O. A.: Handbuch Automatische Ultraschall-Prüfsysteme, S. 161f, DGZfP (Hrsg.), Düsseldorf: DVS-Verlag, 2003