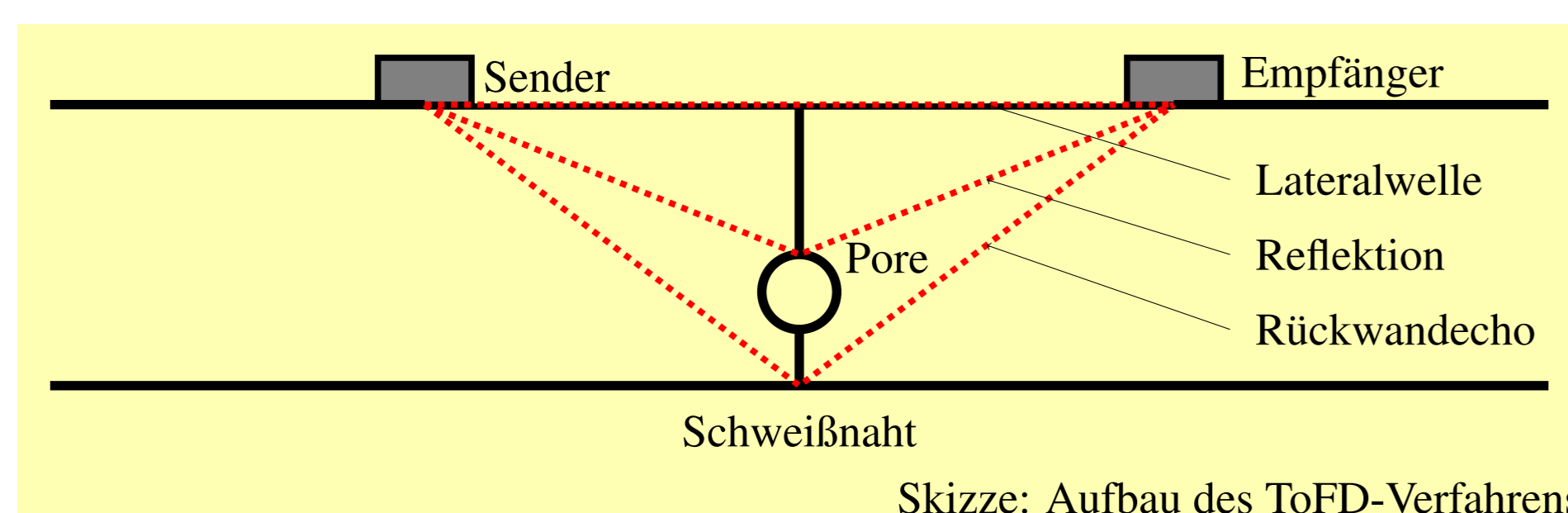


## 1 PROBLEMSTELLUNG

Das "Time-of-Flight-Diffraction"-Verfahren, kurz ToFD-Verfahren, ist ein Ultraschallverfahren zur Detektion von Poren und Fehlern in Schweißnähten an Stahlrohren.

Hierzu werden zwei Prüfköpfe, Sender und Empfänger, jeweils rechts und links der Schweißnaht aufgesetzt. Der Sender strahlt nun Ultraschallwellen in Richtung Schweißnaht aus. Treffen diese auf ein Hindernis, so wird ein Teil von ihnen in Richtung des Empfängers reflektiert. Dieser zeichnet nun die eintreffenden Ultraschallwellen auf.

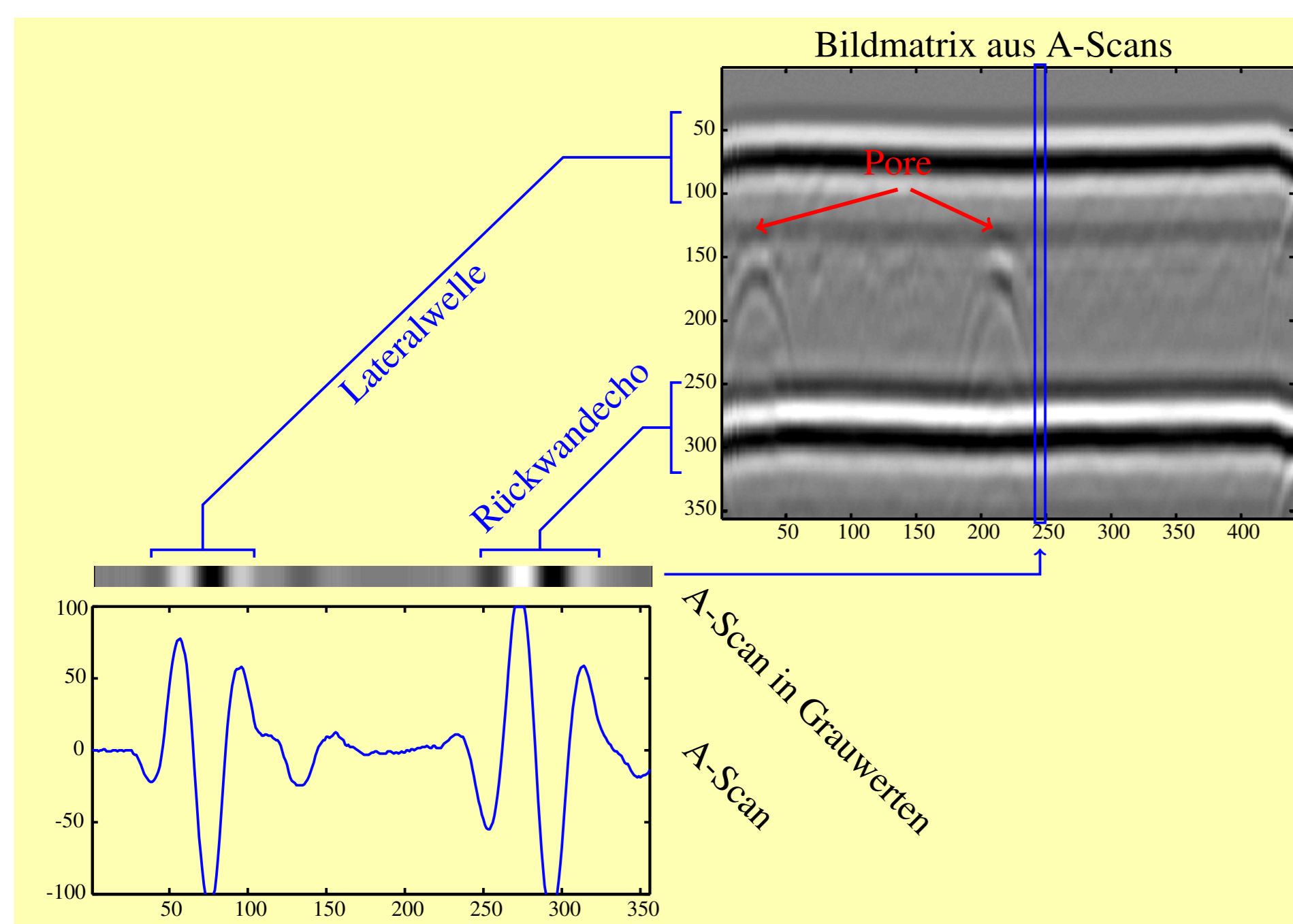
Dabei gibt es zwei Wellen, die, unabhängig von der Beschaffenheit der Schweißnaht, immer beim Empfänger aufgezeichnet werden. Dies sind die Lateralwelle, die ohne Reflektionen vom Sender zum Empfänger gelangt indem sie über die Werkstückoberfläche verläuft, und das Rückwandecho, welches durch Reflektionen der Rückwand entsteht.



Skizze: Aufbau des ToFD-Verfahrens

Die über den Messzeitraum aufgezeichneten Ultraschall-Impulse werden in einem Graphen, dem sogenannten "A-Scan", dargestellt.

Nach der Messung werden die Prüfköpfe um 0,5 – 1mm entlang der Schweißnaht verschoben und eine weitere Messung wird durchgeführt. Auf diese Weise erhält man mehrere A-Scans, die grauwertkodiert zu einer Bildmatrix zusammengesetzt werden.



Während bereits im A-Scan sowohl Lateralwelle als auch Rückwandecho meist deutlich zu erkennen sind, zeigt sich die typische parabelähnliche Form der Poren erst in der Bildmatrix.

Ziel der Arbeit ist es, ein Verfahren zu entwickeln, welches aus den Bildmatrizen die Position und Größe der Poren auslesen kann. Hierzu wird zuerst ein Modell des ToFD-Verfahrens aufgestellt, welches die Entstehung der Bildmatrix bei gegebener Schweißnaht beschreibt. Im zweiten Schritt wird das inverse Problem, die Rekonstruktion der Schweißnaht aus einer gegebenen Bildmatrix, untersucht.

## 2 MODELLIERUNG

Das von uns vorgeschlagene Modell basiert auf der Strahlenoptik. Wir definieren dazu die folgenden Funktionen:

$$\begin{aligned} u : \mathcal{S} \ni (x, y, z) &\rightarrow u(x, y, z) \in [0, 1] & (1) \\ f : \mathbb{R}^2 \ni (x, y) &\rightarrow f(x, y) \in \{0, 1\} & (2) \\ g : \mathbb{R}_+^2 \ni (x, t) &\rightarrow g(x, t) \in \mathbb{R} & (3) \end{aligned}$$

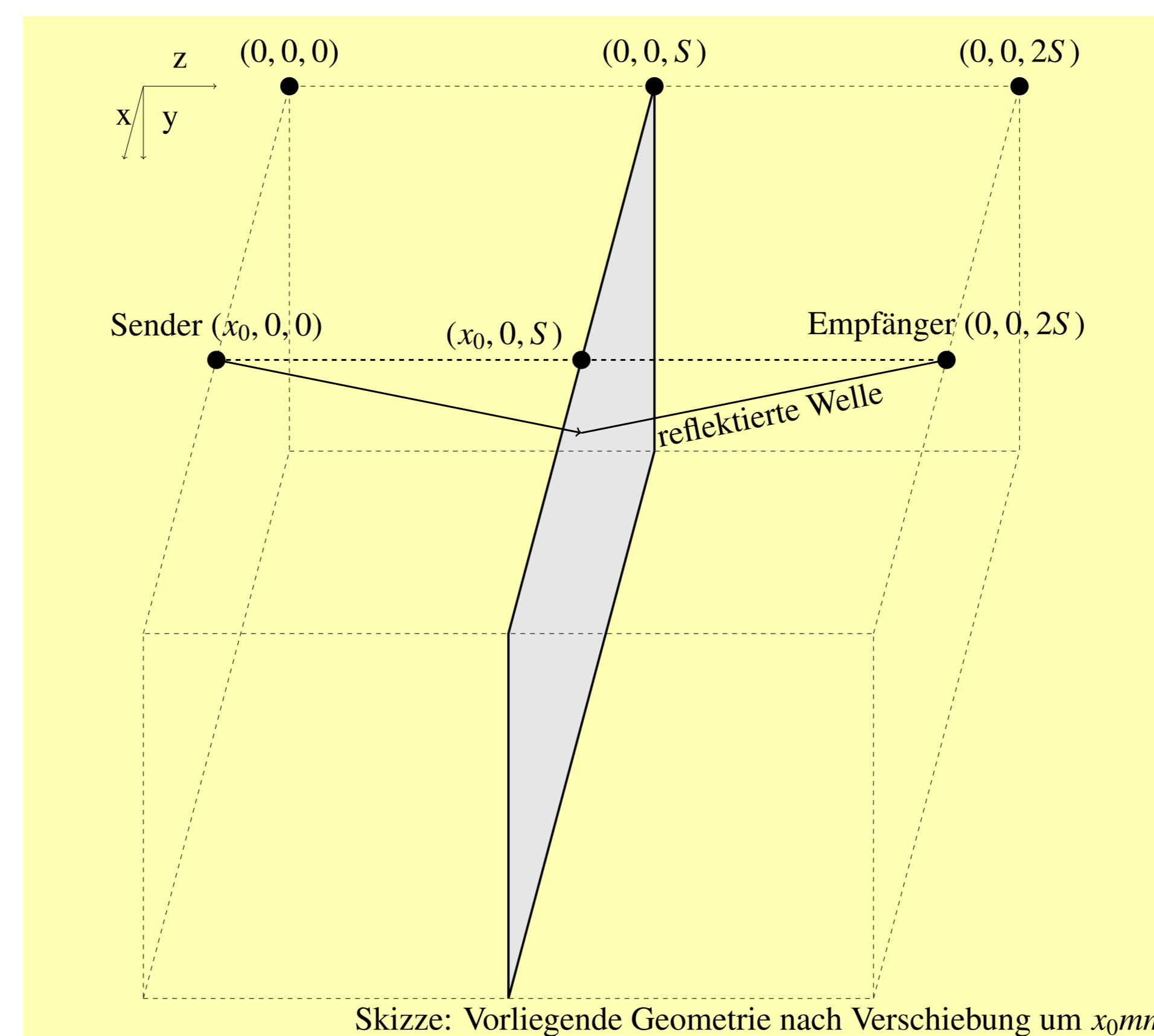
Dabei simuliert die Funktion  $u$  das Aussenden der Ultraschallwellen. Sie bildet jeden (normierten)

Richtungsvektor auf die Intensität der Ausstrahlung in dieser Richtung ab (0 = keine, 1 = maximale Ausstrahlung).

Die Schweißnaht kann als zweidimensionale Teilebene aufgefasst werden. Jedem Punkt dieser Teilebene wird durch  $f$  ein Fehlerwert (1 = Fehler, 0 = kein Fehler) zugeordnet.

Die Funktion  $g$  soll schließlich die aufgezeichneten Daten darstellen.  $g(x_0, t_0)$  ist dabei der Wert eines nach einer Verschiebung der Prüfköpfe um  $x_0$  mm aufgezeichneten A-Scans zum Zeitpunkt  $t_0$ .

Weiterhin sei  $c$  die Ultraschallgeschwindigkeit und  $S$  sei der Abstand der Prüfköpfe zur Schweißnaht.



Skizze: Vorliegende Geometrie nach Verschiebung um  $x_0$  mm

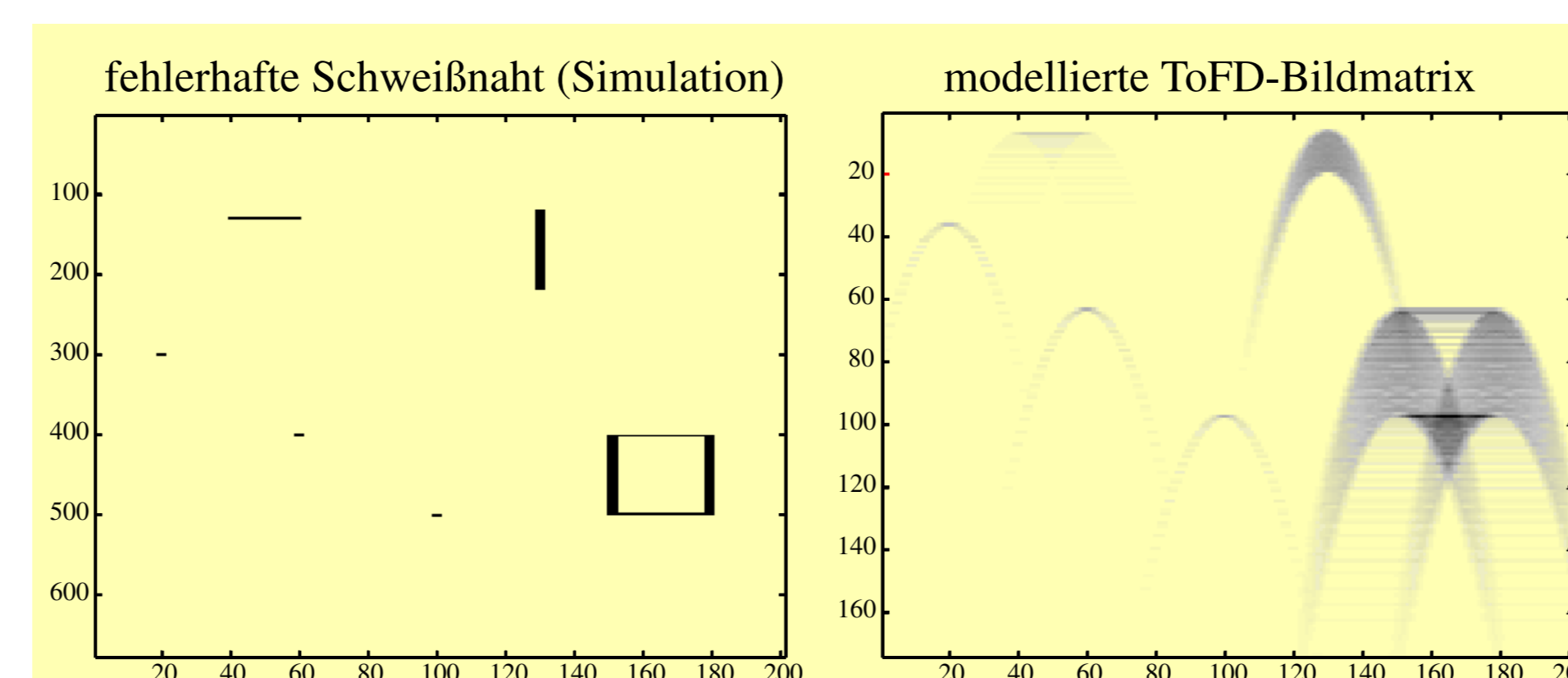
Zur Berechnung von  $g(x_0, t_0)$  ergibt sich das kontinuierliche Modell

$$g(x_0, t_0) = \int_0^{2\pi} \underbrace{f(x_0 + r \cos \phi, r \sin \phi)}_{\text{Reflektionswert}} \cdot \underbrace{u\left(\frac{2r}{t_0 c} \cos \phi, \frac{2r}{t_0 c} \sin \phi, \frac{2S}{t_0 c}\right)}_{\text{Intensität}} d\phi$$

mit  $r = \sqrt{t_0^2 c^2 / 4 - S^2}$ . Zur Diskretisierung des Modells zerlegen wir den Definitionsbereich der Funktionen in ein äquidistantes Gitter mit den Gitterabständen  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  und  $\Delta_t$  in  $x$ -,  $y$ -, bzw. Zeit-Richtung. Außerdem stellen wir die Diskretisierungen  $\tilde{u}$ ,  $\tilde{f}$  und  $\tilde{g}$  der Funktionen (1) – (3) zur Verfügung. Wir erhalten

$$\tilde{g}(n, m) = \sum_{(k, l) \in B_{n, m}} \tilde{f}(k, l) \cdot \tilde{u}(k - n, l) \quad (4)$$

wobei die Indexmenge  $B_{n, m}$  passend gewählt ist.



Das vereinfachte Modell erfasst zwar nicht die wellenartige Struktur des Ultraschalls, aber die parabelähnliche Form der Poren. Dieses Modell wollen wir nun benutzen, um ein automatisiertes Verfahren zur Auswertung von ToFD-Bildmatrizen zu entwickeln.

Dazu untersuchen wir nun das inverse Problem: Gegeben sei eine ToFD-Bildmatrix  $\tilde{g}$  und gesucht ist die Matrix  $\tilde{f}$  aus Formel (4). Nach Definition (1) und (2) sind die Werte  $\tilde{u}$  und  $\tilde{f}$  positiv. Daher können wir aus (4) die Abschätzung

$$\tilde{g}(n, m) \geq \tilde{f}(k, l) \cdot \tilde{u}(k - n, l) \quad (5)$$

für alle  $(k, l) \in B_{n, m}$  folgern. Wir definieren nun die Menge  $B'_{k, l}$  über

$$(n, m) \in B'_{k, l} \Leftrightarrow (k, l) \in B_{n, m}$$

Das heißt,  $B'_{k, l}$  enthält alle Indizes der Bildmatrix, deren Werte durch eine Reflektion am Schweißnahtpunkt  $(k, l)$  beeinflusst werden.

(5) gilt nun auch für alle  $(n, m) \in B'_{k, l}$  und somit folgt:

$$\tilde{f}(k, l) \leq \min_{(n, m) \in B'_{k, l}} \frac{\tilde{g}(n, m)}{\tilde{u}(k - n, l)} \quad (6)$$

Ein erster inverser Operator ergibt sich nun, indem wir in (6) anstelle der Ungleichung die Gleichheit annehmen und die Werte von  $\tilde{f}$  durch den Minimum-Term approximieren.

Einen alternativen inversen Operator erhalten wir mit folgenden Überlegungen: Wir definieren zuerst die Vektoren

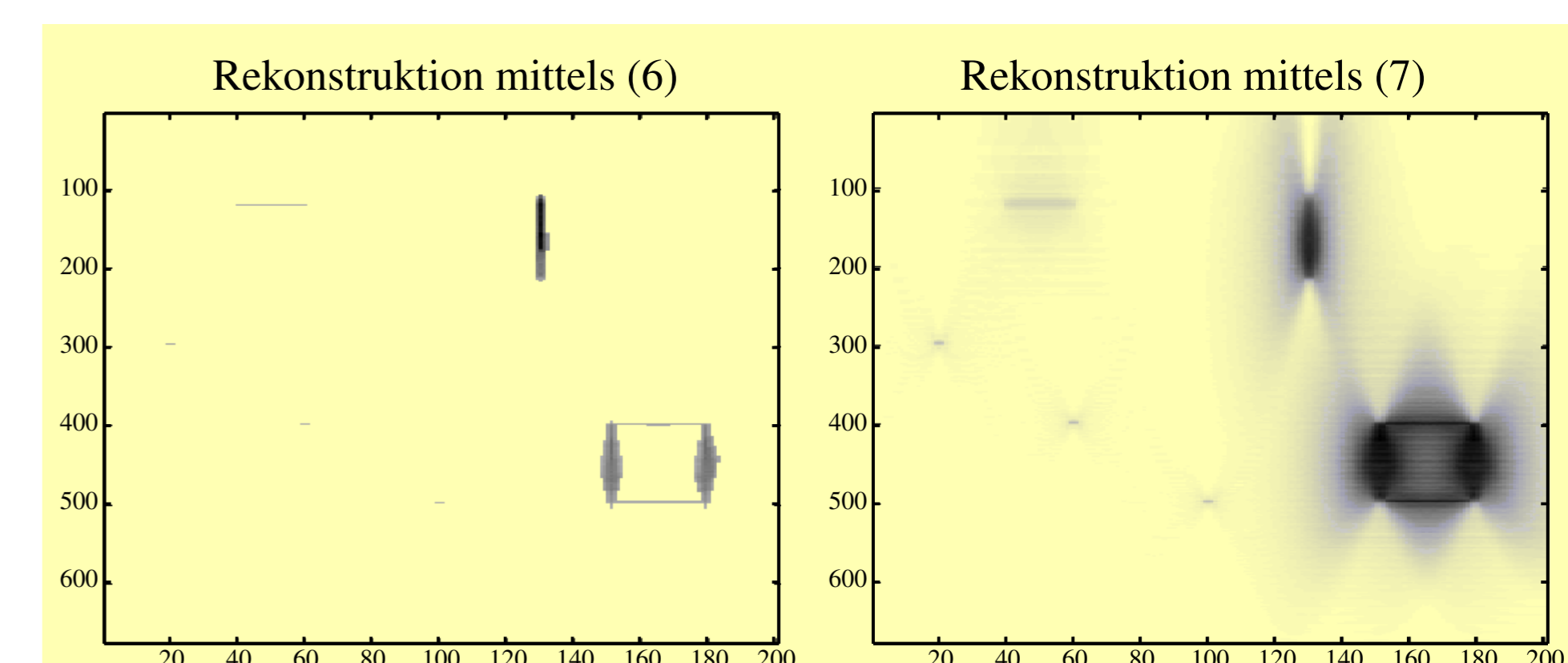
$$\tilde{u}_{k, l} = (\tilde{u}(n - k, l))_{(n, m) \in B'_{k, l}} ; \tilde{g}_{k, l} = (\tilde{g}(n, m))_{(n, m) \in B'_{k, l}}$$

Wir können nun aus (5) herleiten, dass für alle  $(k, l) \in B_{n, m}$  die Ungleichung

$$\tilde{g}_{k, l} \leq \tilde{f}(k, l) \cdot \tilde{u}_{k, l}$$

gilt. Nehmen wir in dieser Formel nun die Gleichheit an, so ergibt sich das Problem der Bestapproximation in endlich-dimensionalen Vektorräumen: Der Faktor  $\tilde{f}(k, l)$  muss so gewählt werden, dass die rechte Seite den Vektor  $\tilde{g}_{k, l}$  best möglich approximiert. Der optimale Wert kann leicht über das Skalarprodukt berechnet werden und wir erhalten als inversen Operator die Gleichung

$$\tilde{f}(k, l) \approx \frac{\langle \tilde{u}_{k, l}, \tilde{g}_{k, l} \rangle}{\|\tilde{u}_{k, l}\|_2} \quad (7)$$



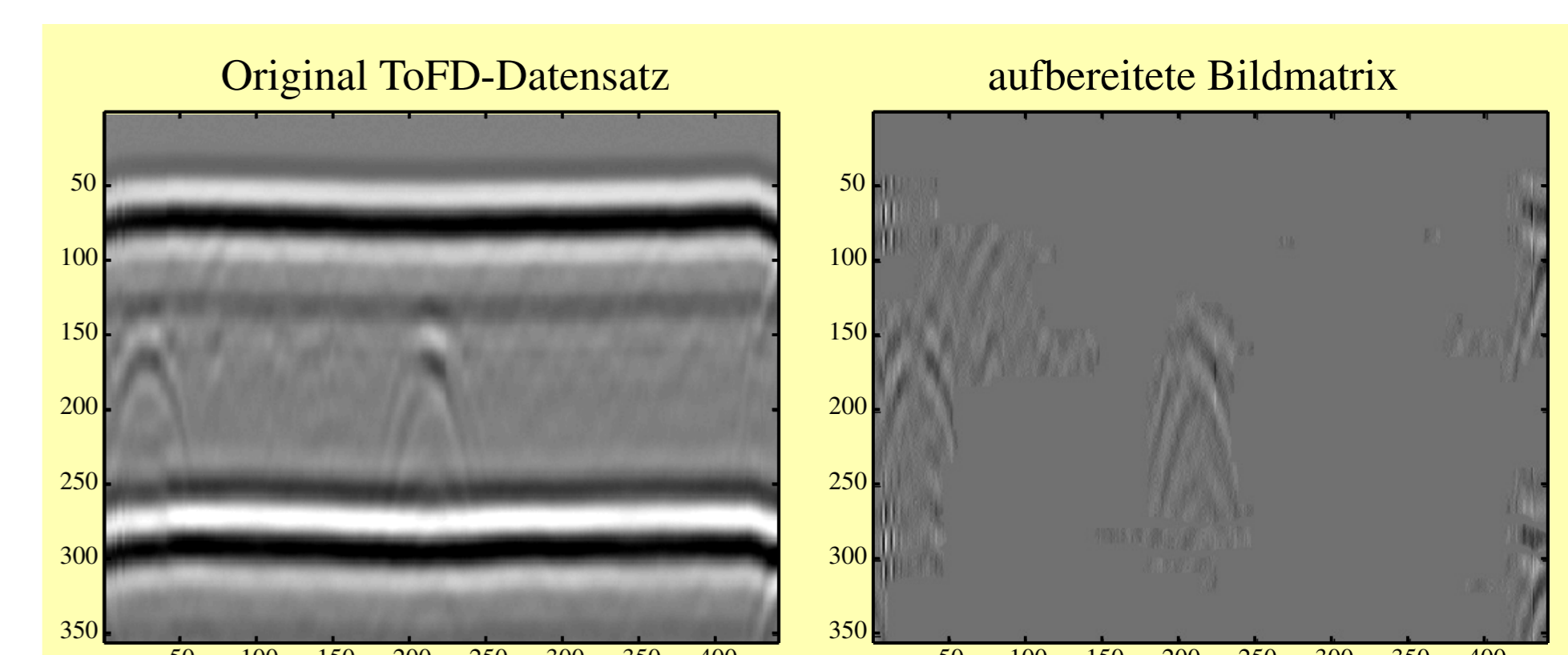
Hier ist gut zu erkennen, dass beide Verfahren sowohl die Position als auch die Größe der Fehler gut rekonstruieren können. Dabei erweist sich das Verfahren (7) als etwas stabiler.

## 3 DATENAUFBEREITUNG

Um das neue Rekonstruktionsmodell anwenden zu können, müssen die realen ToFD-Bildmatrizen entsprechend aufbereitet werden.

Hierzu wurden neben Wavelets auch noch andere Algorithmen der Bildverarbeitung angewandt. Das fertige Verfahren erzeugt nun aus einem gegebenen Datensatz eine Bildmatrix welche

- kein(e) Lateralwelle / Rückwandecho hat,
- ein geringeres Bildrauschen aufweist und
- auf die wesentlichen Details eingeschränkt ist.



Diese Diplomarbeit wurde an der Fakultät für Mathematik und in Kooperation mit der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH verfasst.

Ich bedanke mich bei meiner Betreuerin Frau Prof. Dr. Gerlind Plonka-Hoch (gerlind.plonka@uni-due.de) sowie bei Herrn Dr. Till Schmitte, Herrn Dipl. Phys. Alfred Graff und Herrn Dr. Thomas Orth von der Abteilung für zerstörungsfreie Prüfung der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH.