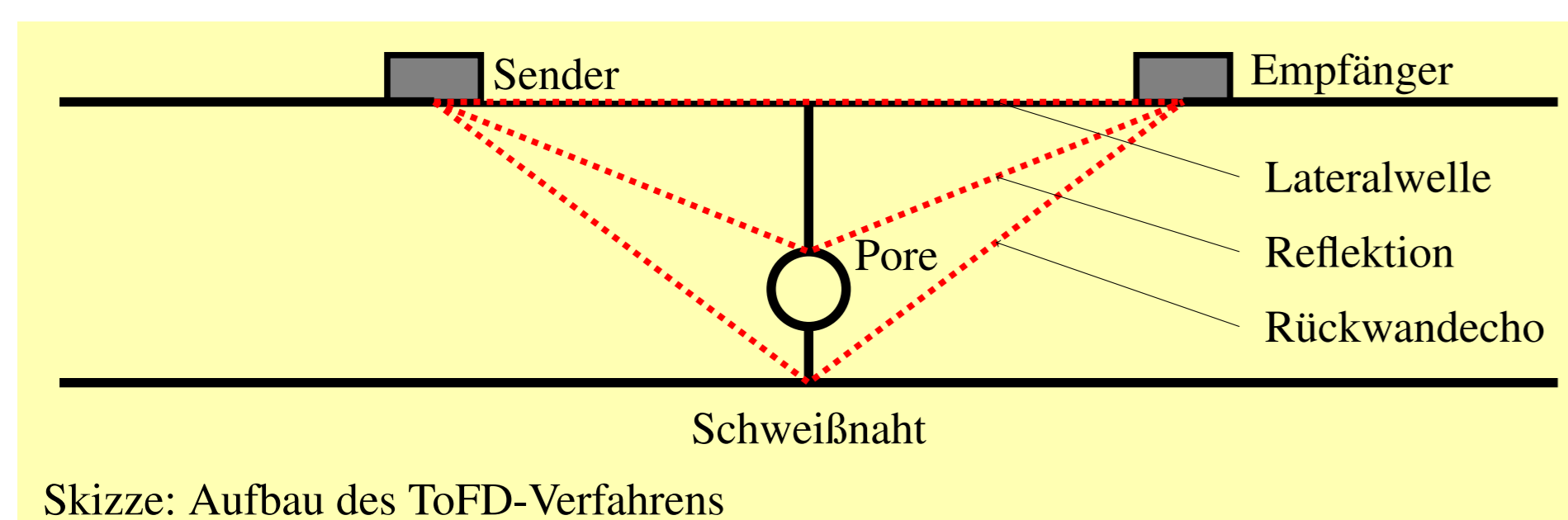


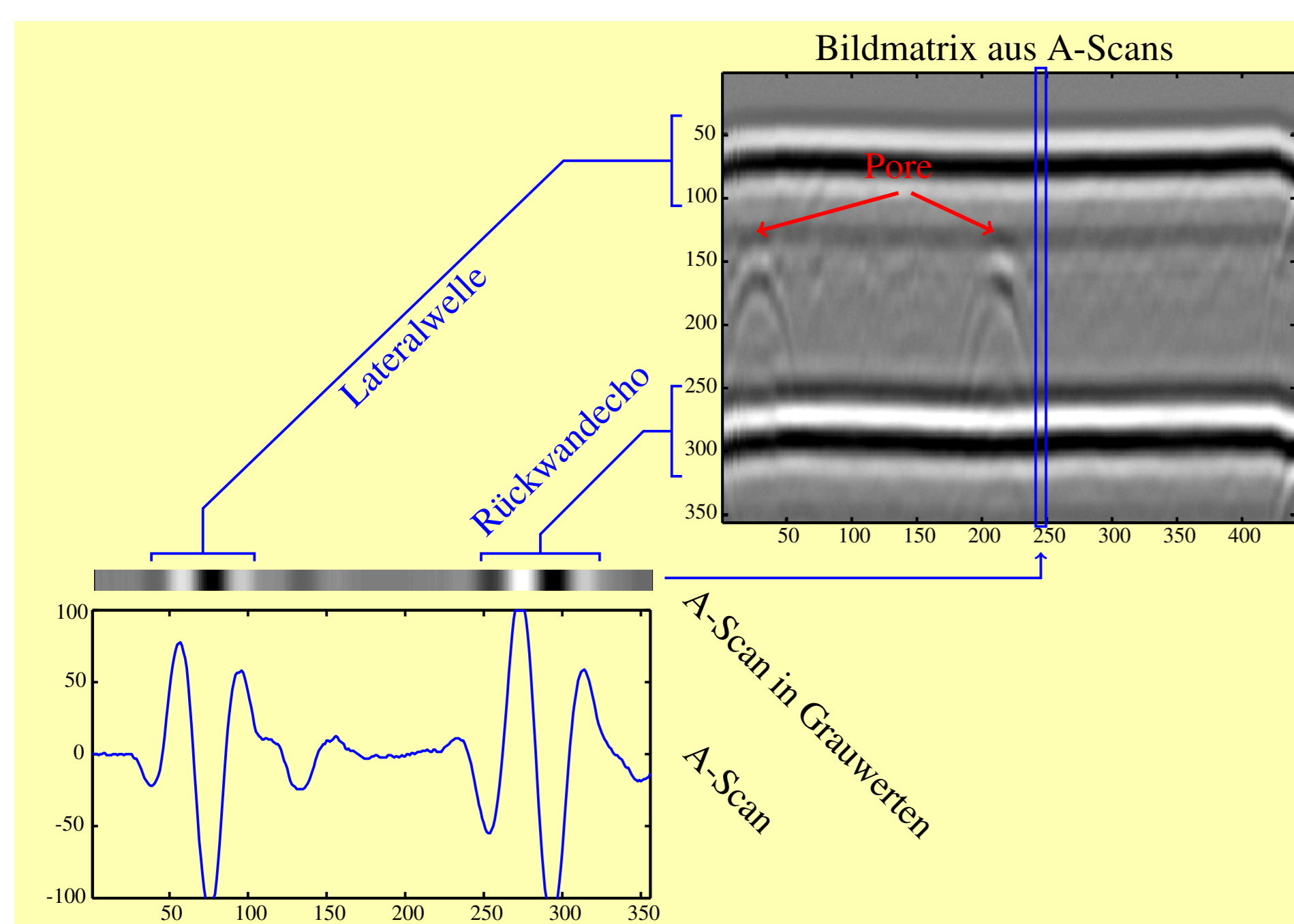
1 PROBLEMSTELLUNG

Das "Time-of-Flight-Diffraction" Verfahren, kurz ToFD-Verfahren, ist ein Ultraschallverfahren zur Detektion von innenliegenden Fehlern in Schweißnähten an Stahlrohren. Es ist das Standardverfahren zur Inspektion der Rundnähte bei der Verlegung von Pipelines.

Hierzu werden zwei Prüfköpfe, Sender und Empfänger, jeweils rechts und links symmetrisch zur Schweißnaht aufgesetzt. Der Sender strahlt nun Ultraschallwellen in Richtung Schweißnaht aus. Treffen diese auf ein Hindernis, so werden am Fehler erzeugte Beugungswellen 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 vom Sender direkt zum Empfänger gelangt, und das Rückwandecho, welches durch Reflexionen an der Rückwand entsteht.



Die über den Messzeitraum aufgezeichneten Ultraschalldaten werden in einem Graphen, dem so genannten "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 von z.B. Poren erst in der Bildmatrix.

Ziel der Arbeit ist es, ein Verfahren zu entwickeln, welches aus den Bildmatrizen die Position und Größe der Fehler (z.B. Poren) auslesen kann. Dazu 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:

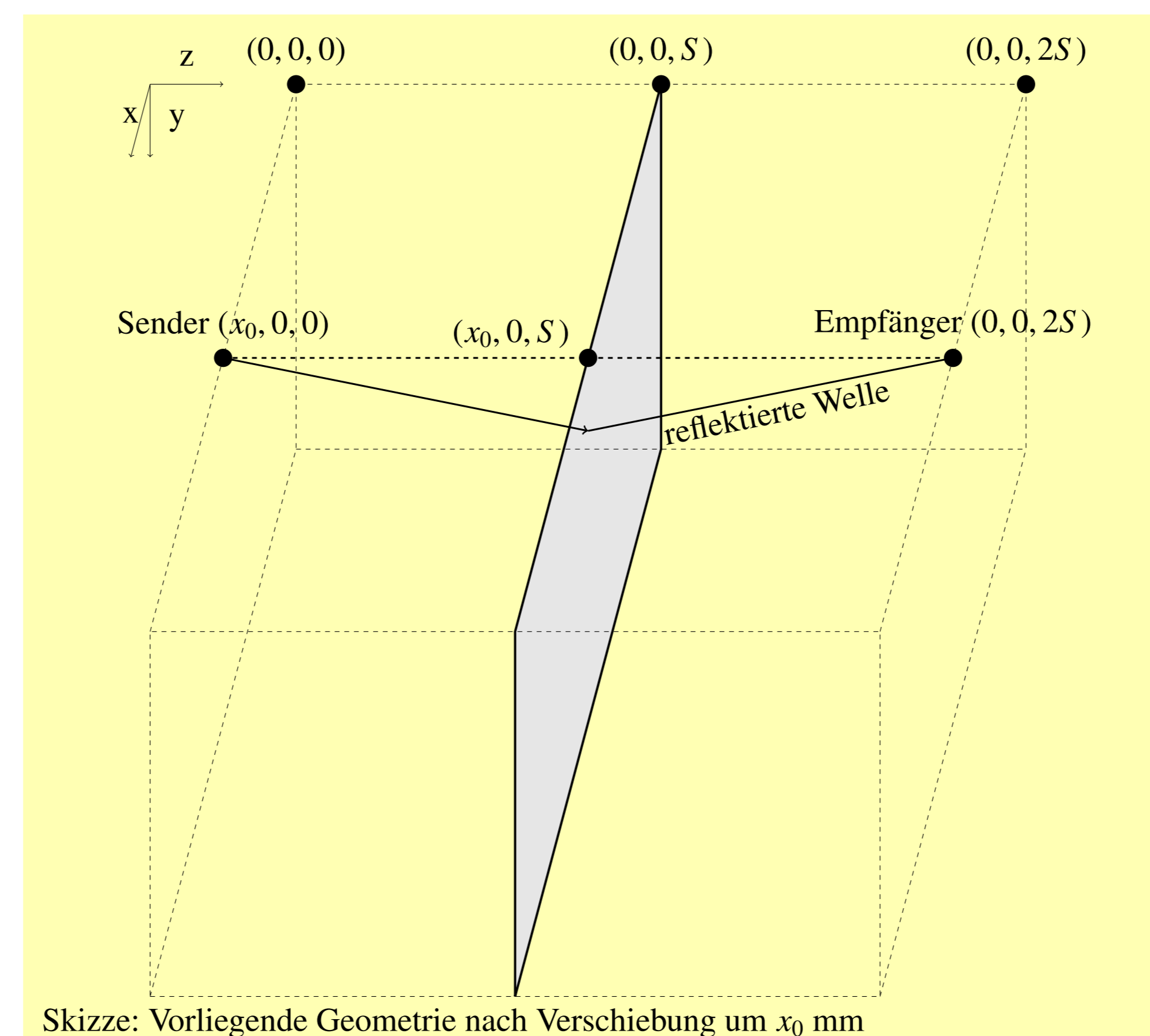
$$\begin{aligned} u : \mathcal{S} \ni (x, y, z) &\rightarrow u(x, y, z) \in [0, 1] & (1) \\ f : \mathbb{R}^2 \ni (x, y) &\rightarrow f(x, y) \in \{0, 1\} & (2) \\ g : \mathbb{R}_+^2 \ni (x, t) &\rightarrow g(x, t) \in \mathbb{R} & (3) \end{aligned}$$

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 Teilenebene aufgefasst werden. Jedem Punkt dieser Teilenebene wird durch f ein Fehlerwert ($1 =$ Fehler, $0 =$ kein Fehler) zugeordnet.

Die Funktion g soll schließlich die aufgezeichneten Daten darstellen. Dabei ist $g(x_0, t_0)$ 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.



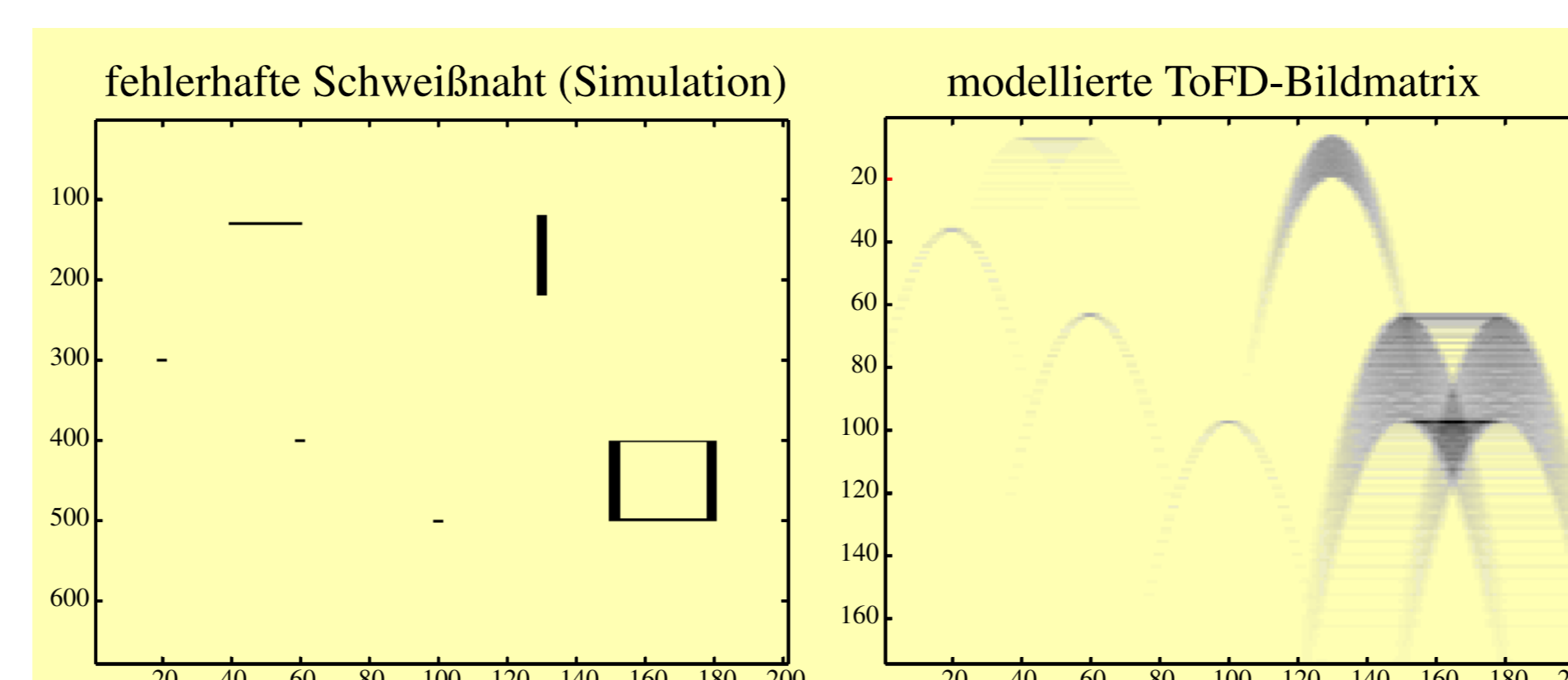
Zur Berechnung von $g(x_0, t_0)$ ergibt sich das kontinuierliche Modell

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

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 Abständen Δ_x , Δ_y und Δ_t in x -, y -, bzw. Zeitrichtung. 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 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 Reflexion am Schweißnahtpunkt (k, l) beeinflusst werden.

Die Ungleichung (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, 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

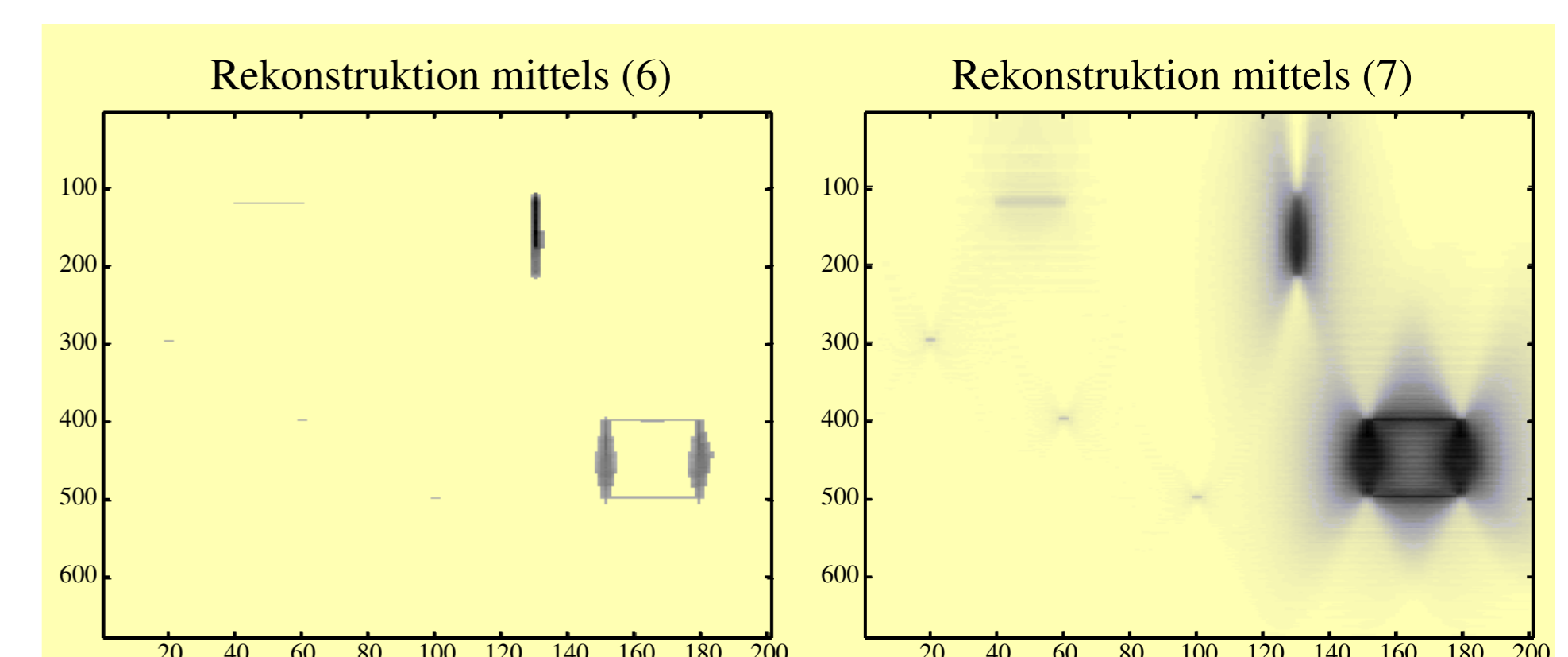
$$\tilde{u}_{k,l} = (\tilde{u}(n - k, l))_{(n,m) \in B'_{k,l}}; \quad \tilde{g}_{k,l} = (\tilde{g}(n, m))_{(n,m) \in B'_{k,l}}.$$

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 $\tilde{g}_{k,l}$ bestmöglich 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.

