



**Jahrestagung
Zerstörungsfreie
Materialprüfung
Graz, Österreich**

September 2012

Zeitaufgelöste THz-Spektroskopie für technische und zivile Sicherheitsanwendungen

J. Beckmann, D. Fratzscher, L. S. von Chrzanowski, and U. Ewert

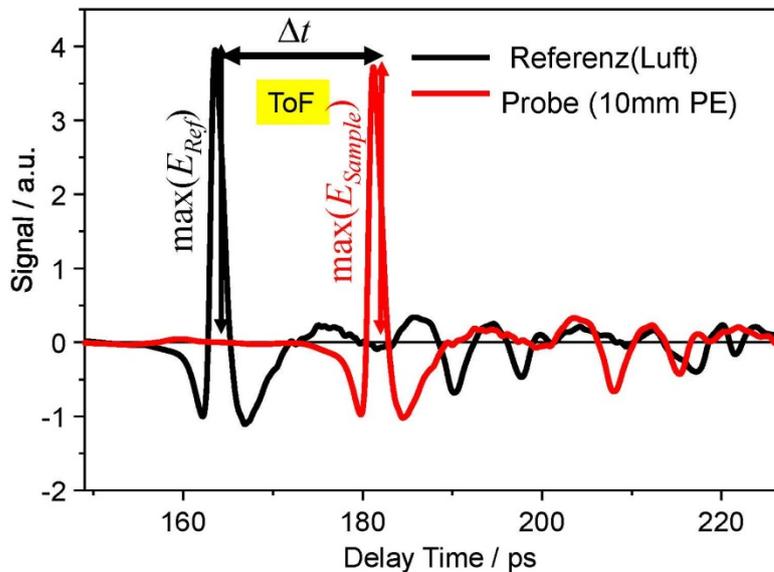
Radiologische Verfahren
VIII.3

J. Beckmann et al. - Zeitaufgelöste THz-Spektroskopie für technische und zivile Sicherheitsanwendungen



Zeitaufgelöste THz-Spektroskopie ²

Messung in der Zeitdomäne



Vereinfachende Bestimmung des Brechungsindex

$$\Delta n = c_0 \frac{\Delta t}{d}$$

Vereinfachende Bestimmung der Absorption

$$\alpha \approx -\frac{2}{d} \ln \left(\frac{E_{\text{Probe}}}{E_{\text{Ref}}} \right)$$

Nachteil:

Keine direkte Aussage zu den komplexen physikalischen Größen, Integrale an Stelle spektraler Informationen!

Radiologische Verfahren
VIII.3

J. Beckmann et al. - Zeitaufgelöste THz-Spektroskopie für technische und zivile Sicherheitsanwendungen



Zeit-Domäne → Frequenz-Domäne ³

FFT

Fourier transformation: $E^*(f) = 1/2\pi \int E(t)e^{2\pi ift} dt$

numerical: $E^*(f_j) = 1/2\pi \sum_{n=0}^{N-1} E(t_n) \exp(2\pi if_j t_n)$ (FFT → 2^p samples)

$$Z = A^* e^{i\varphi}$$

Auflösung $\Delta f = (N\Delta t)^{-1}$
Bandbreite: $f_{\max} = N\Delta f = \Delta t^{-1}$

Reference (Air)
Sample (10mm PE)

Reference (Air)
Sample (10mm PE)

Radiologische Verfahren **VIII.3** J. Beckmann et al. - Zeitaufgelöste THz-Spektroskopie für technische und zivile Sicherheitsanwendungen **BAM**

Motivation ⁴

THz TDS Imaging System

Albert Ludwig University

TeraView TPS Spectra 3000
– THz Pulsed Imaging and Spectroscopy

Picometrix T-Ray™ 2000

Fraunhofer Heinrich Hertz Institute

Mobile TDS THz System

General Features

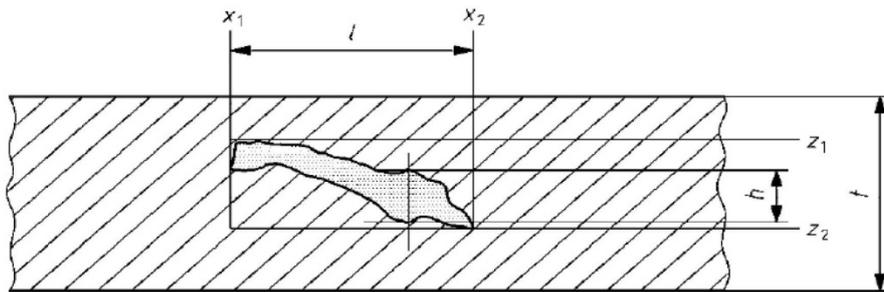
- > plug and play TDS THz system
- > adapted to HHI's fiber-coupled THz-emitter and -receiver heads
- > dimensions: 50x40x30 cm
- > robust packaging for on-site measurement

Flexibilität

handliche
Geräte-
konfiguration

Größe

Radiologische Verfahren **VIII.3** J. Beckmann et al. - Zeitaufgelöste THz-Spektroskopie für technische und zivile Sicherheitsanwendungen **BAM**



Kann die THz-TDS sich zu einer robusten zerstörungsfreien Prüftechnik einwickeln mit der vor Ort dielektrische Materialien untersucht werden können?

Szenario: THz-TDS Flüssigkeitsinspektion

Gefördertes Projekt im „Rahmen der Sicherheitsforschung“

 Bundesministerium
für Bildung
und Forschung
(FKZ 13N9514)



THz-System Gruppe;
Prof. Dr. M. Koch, Universität Marburg



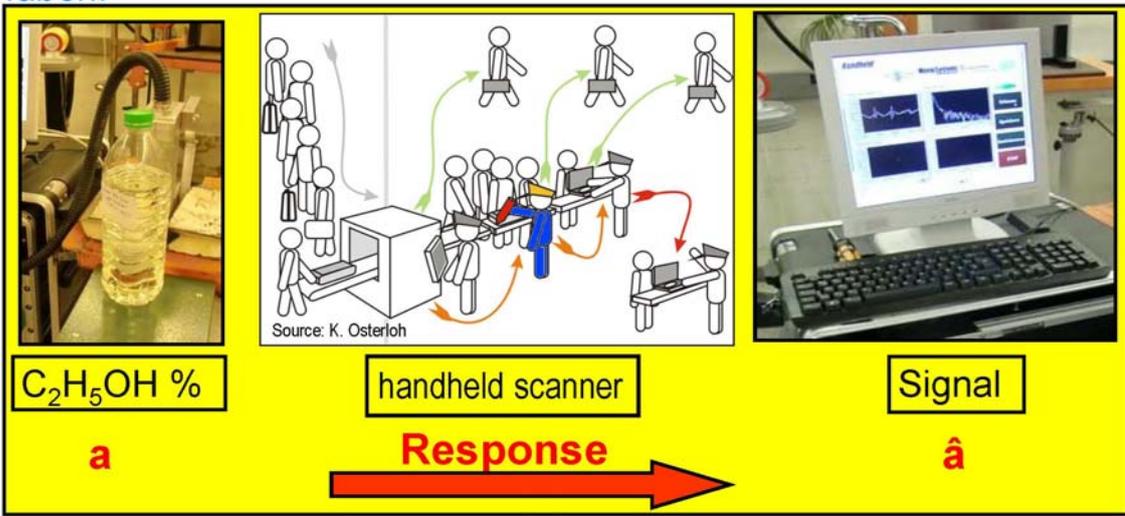
EU-Kommissions-Vorgeschlagen: Verbot zum Mitnehmen von Trinkflaschen in Flugzeugen bis April 2012 aufheben!

Szenario: unerwünschte Flüssigkeiten am Flughafen und bei Sport- und Großveranstaltungen



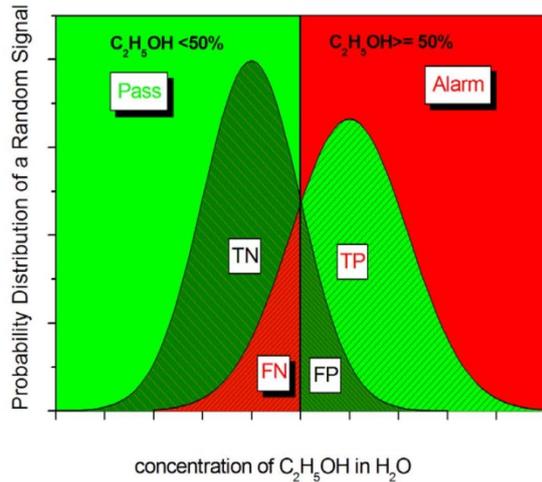
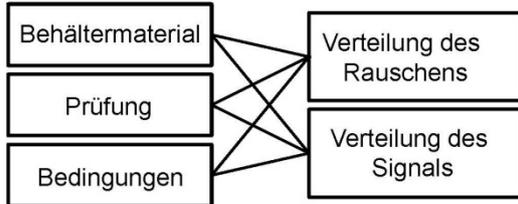
Es ist nicht gestattet, alkoholische Getränke an Board (oder bei Veranstaltungen) mit sich zu führen (um zu konsumieren), die über einen Alkoholgehalt größer gleich 50% verfügen!

Auffindwahrscheinlichkeit für Erkennung ... der Operator muss einen **Schwellwert** am Gerät setzen, um ein klares "Ja-Nein" Kriterium (Alarmanzeige) bei der Kontrolle der gefüllten Flaschen bezüglich der 50% igen Ethanol-Konzentration zu haben!



Kann man die Zuverlässigkeit eines THz-Scanners bewerten?

- Auffindwahrscheinlichkeit einer Gefahr / Eigenschaft → POD
- Wie hoch sind die Fehlanzeigen (Falscher Alarm) ? → FA

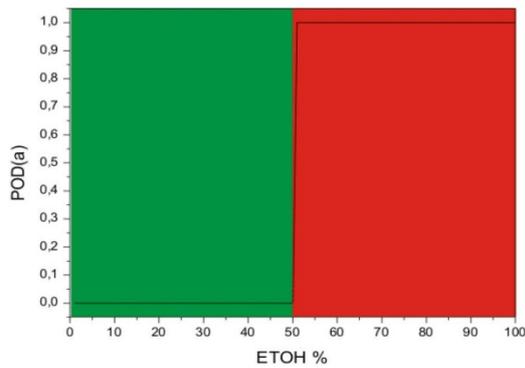


$$POD(a) = P\{\hat{a}(a) > \hat{a}_{dec}\} \quad 10$$

Realität (\hat{a} – Zufallsvariable)

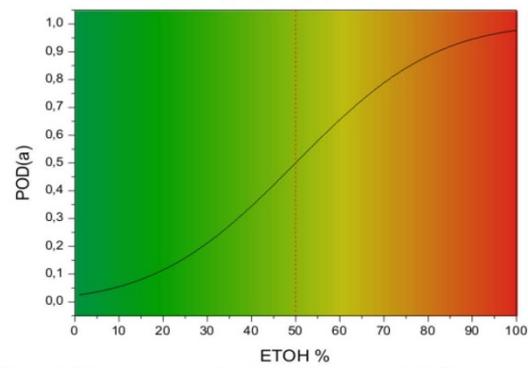
$$\hat{a} = f(\mu(c) + \delta)$$

Ideal
 $\hat{a} = f(a)$



50% ETOH werden immer nachgewiesen.
(100 % der 50% ETOH Proben)

$a \leq 50\%$ $POD(a) = 0.$
 $a > 50\%$ $POD(a) = 1.$



50% ETOH wird mit einer konz. abhängigen Wahrscheinlichkeit nachgewiesen (Anteil der 50% ETOH Probe).

$$POD(a) = P\{\hat{a}(c) > \hat{a}_{dec}\} = \int_{\hat{a}_{dec}}^{+\infty} g_a(\hat{a}) d\hat{a}$$

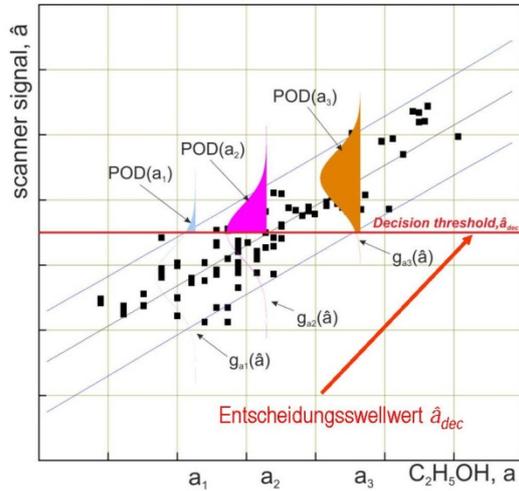
Wahrscheinlichkeitsdichte von \hat{a} ($E(\hat{a}) = \mu(a)$; $D^2(\hat{a}) = \sigma^2(\delta)$):

MIL-HDBK-1823-Entwicklung eines \hat{a} vs. a Models & POD

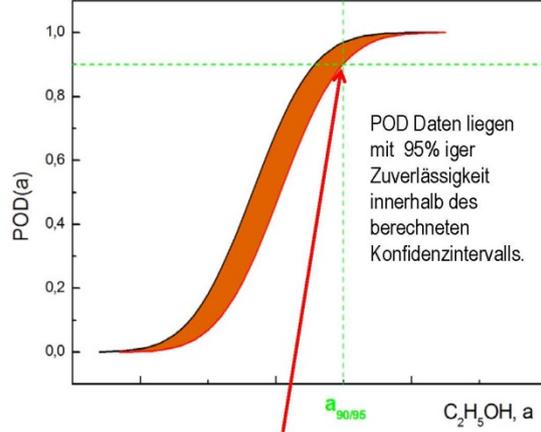
11

- Bestimmung der „ a vs. \hat{a} “ Beziehungen mit Hilfe von Konzentrationsreihen.
- Analyse der „ \hat{a} vs. a “ Beziehung mit Hilfe der Censored Regressions Analyse
- Bestimmung der Reaktion von \hat{a} und deren Streuung

Probability of Detection



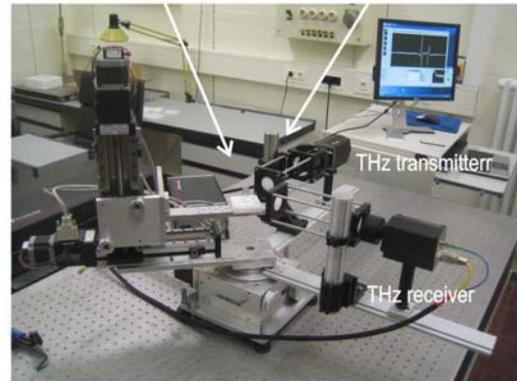
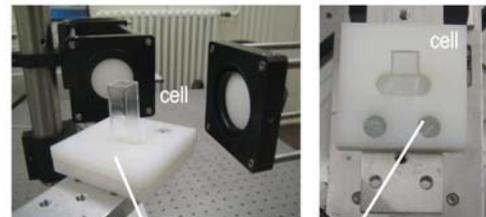
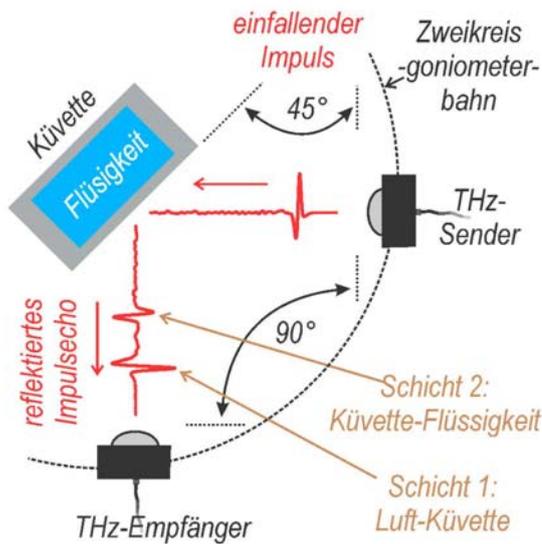
POD Kurve mit unterem 95% Konfidenz Band



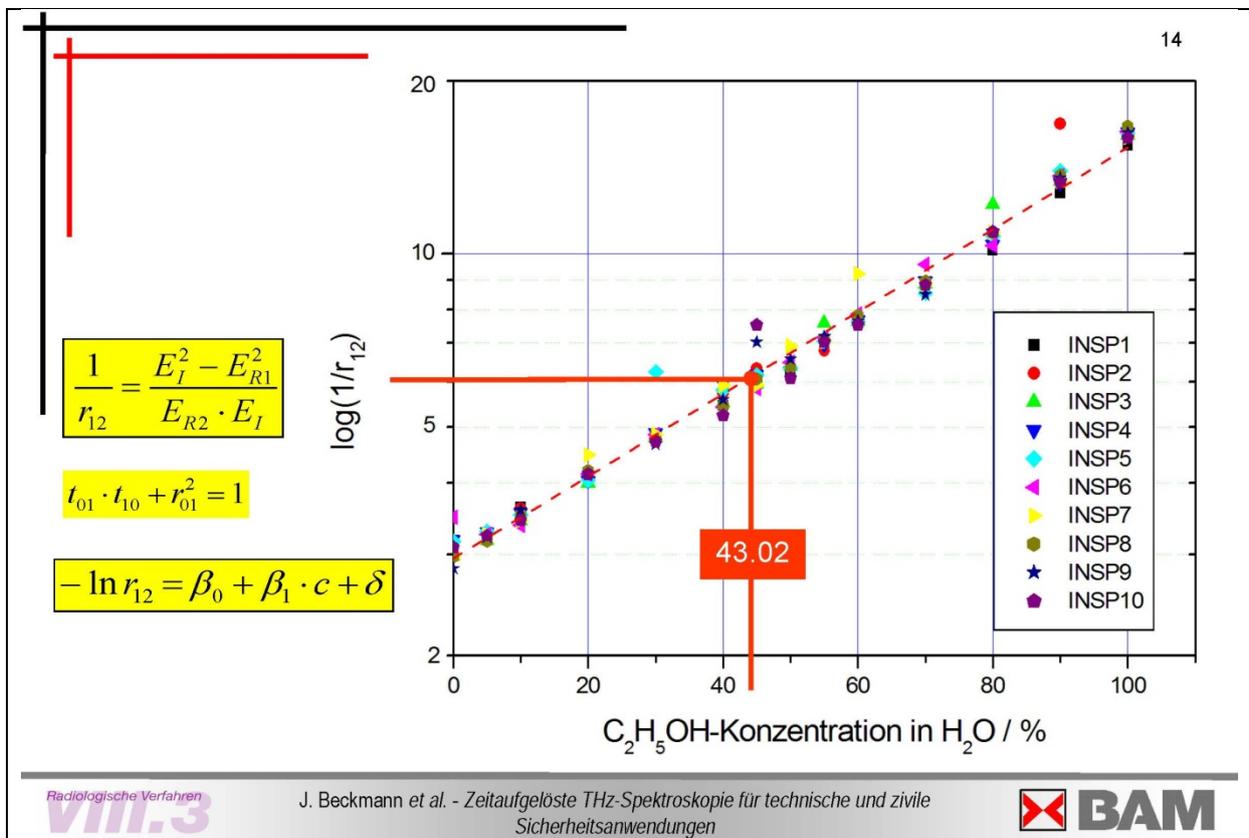
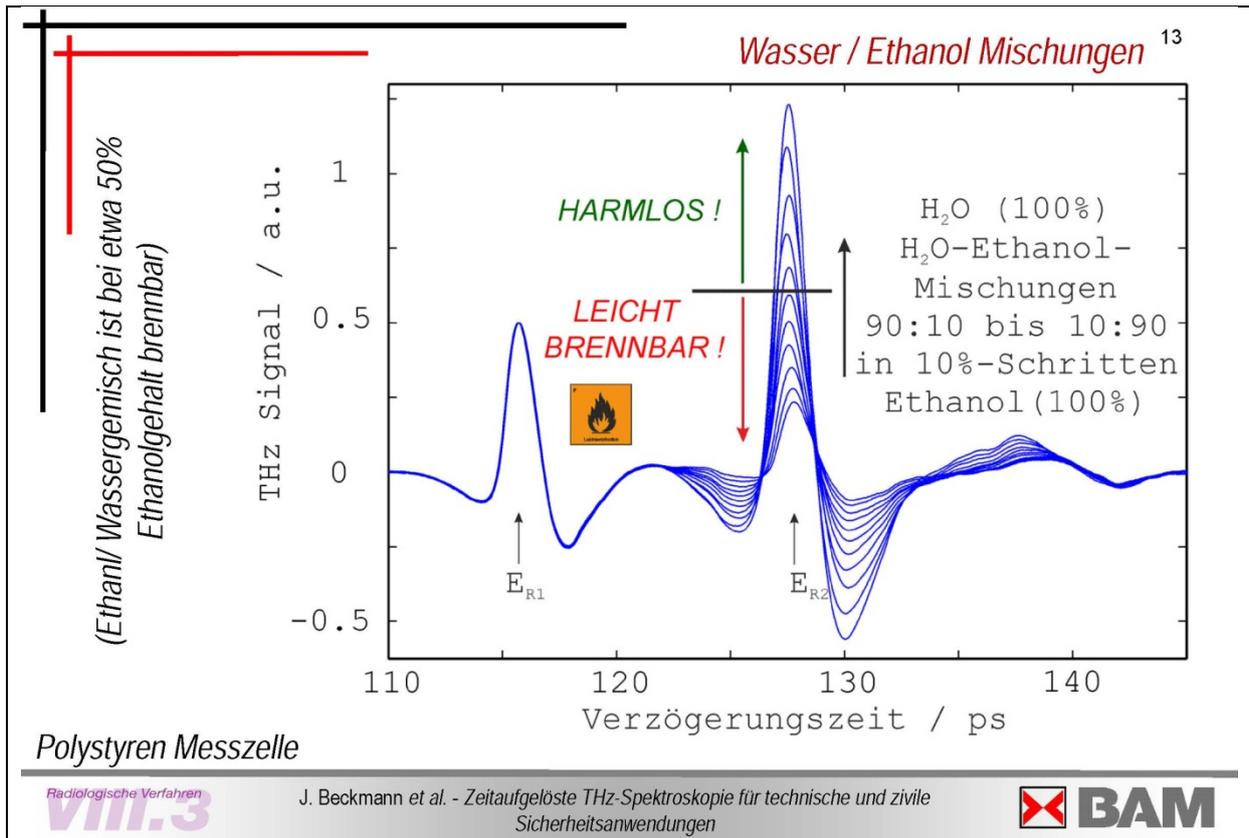
Konzentrationswert 90/95: Konzentration wird mit 90% POD & 95% Konfidenz sicher bestimmt.

THz-TDS Reflexion von Flüssigkeiten

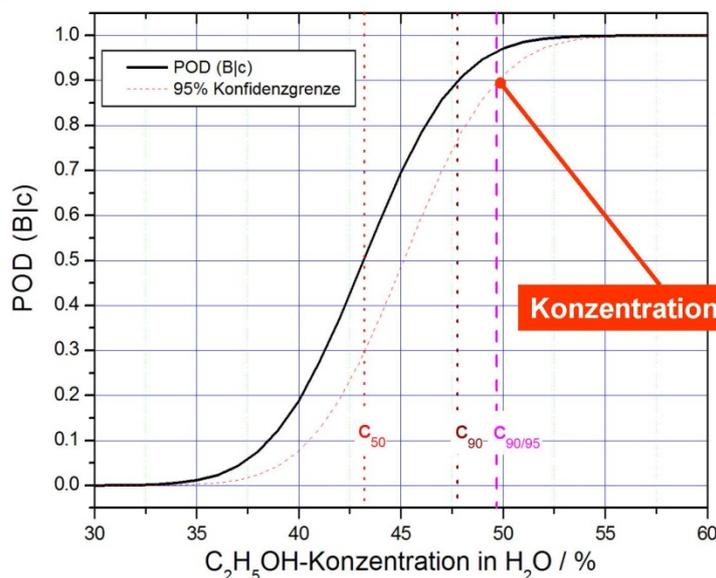
12



1. Puls => Materialeigenschaft des Behälters
2. Puls => Materialeigenschaft der Flüssigkeit



$$POD(B | c) = P\{-\ln(r_{12}) > -\ln(\hat{r}_{dec}) | c\} = \Phi_{normal}\{z\}$$



$$z = (\beta_1 \cdot c + \beta_0 + \log_{10}(r_{12}^{THRES})) / \sigma$$

location parameter $c_{50} : \mu = 43,02$

shape parameter $\sigma = 3,579$

Konzentration 90/95:

$$C_{50} = 43,02$$

$$C_{90} = 47,61$$

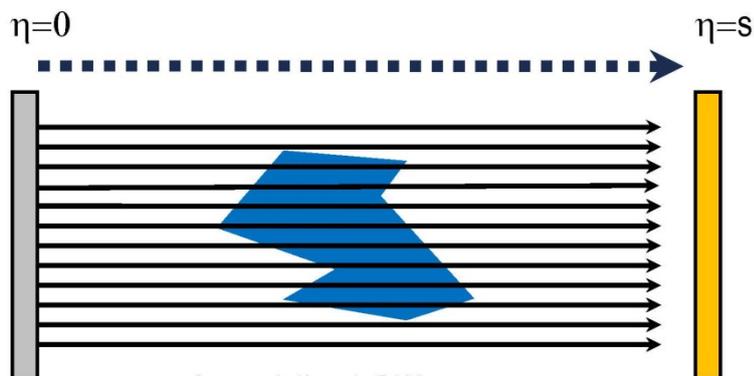
$$C_{90/95} = 49,75$$

Röntgen vs. THz Computertomographie

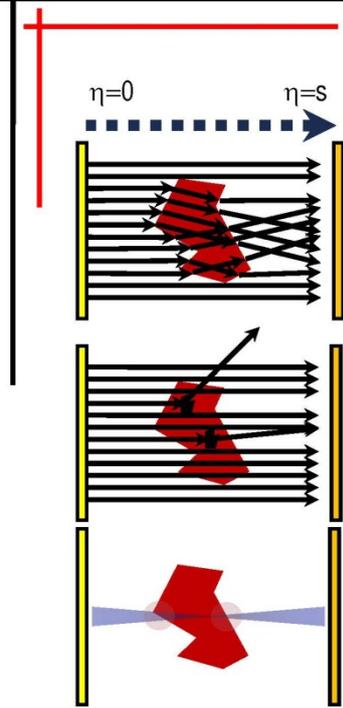
- Röntgentomographie basiert auf der **linear Schwächung** (gemessen durch die Intensität I)

$$I = I_0 e^{-\int \mu(\eta) d\eta}$$

$$p(s) = \int_0^s \mu(\eta) d\eta$$



Source: A. Kupsch, BAM

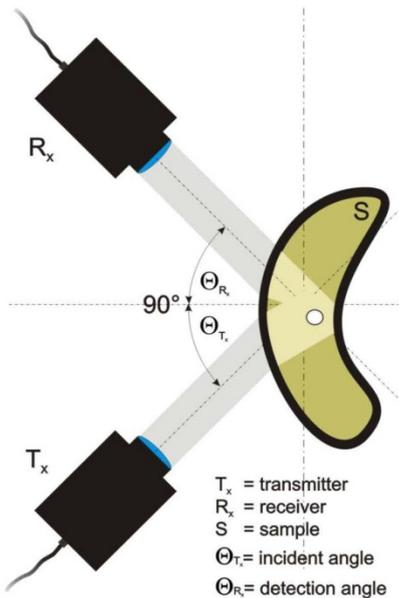


$$p(s) = \int_0^s p(\eta) d\eta$$

- **Brechung von Wellen**
verursacht Nichtlinearitäten in der Absorption bzw. Verstärkung durch Ablenkung des Strahls im Objekt.
- **Brechung und Reflexion der Wellen sowie isotrope Streuung an den Inhomogenitäten (Poren, Partikel)** verursachen eine nichtlineare Schwächung.
- **geometrical Optik** verursacht Abweichungen von der Paralleloptik (→ Unschärfe, nichtlineare Abschwächung infolge der Fokussierung and Defocussierung).

Source: A. Kupsch, BAM

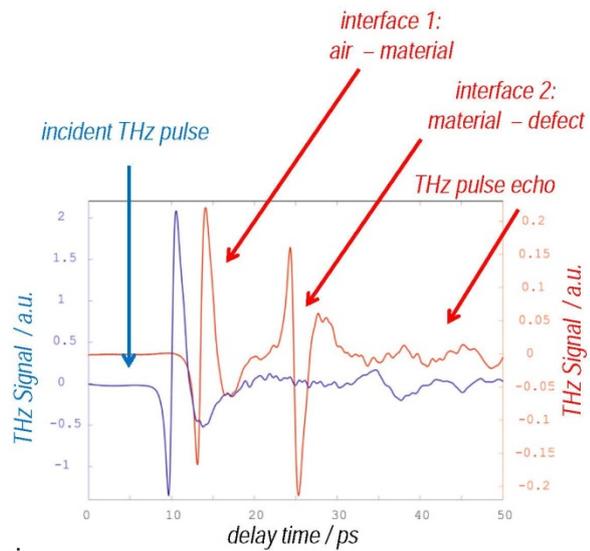
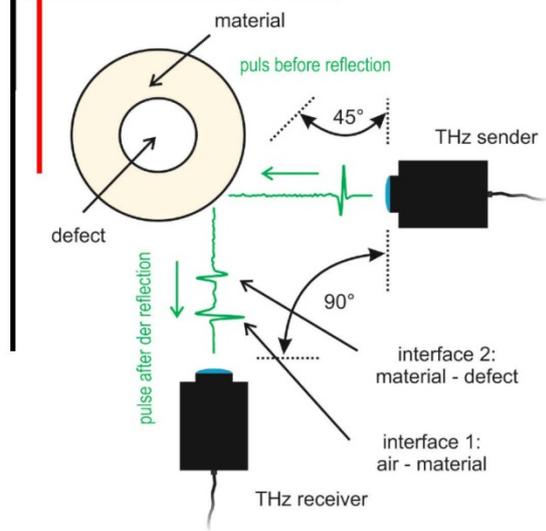
THz-Tomographie



- THz Sender and Empfänger
- Parallelstrahl, Fokussierende Einstrahlung
- sphärische Testobjekte
- Time of Flight Messungen (ToF)
- Model zur tomographischen Rekonstruktion mit Hilfe eines adaptierten **Rückprojektions-** Algorithmus

Reflexion an einer Ungänge

19



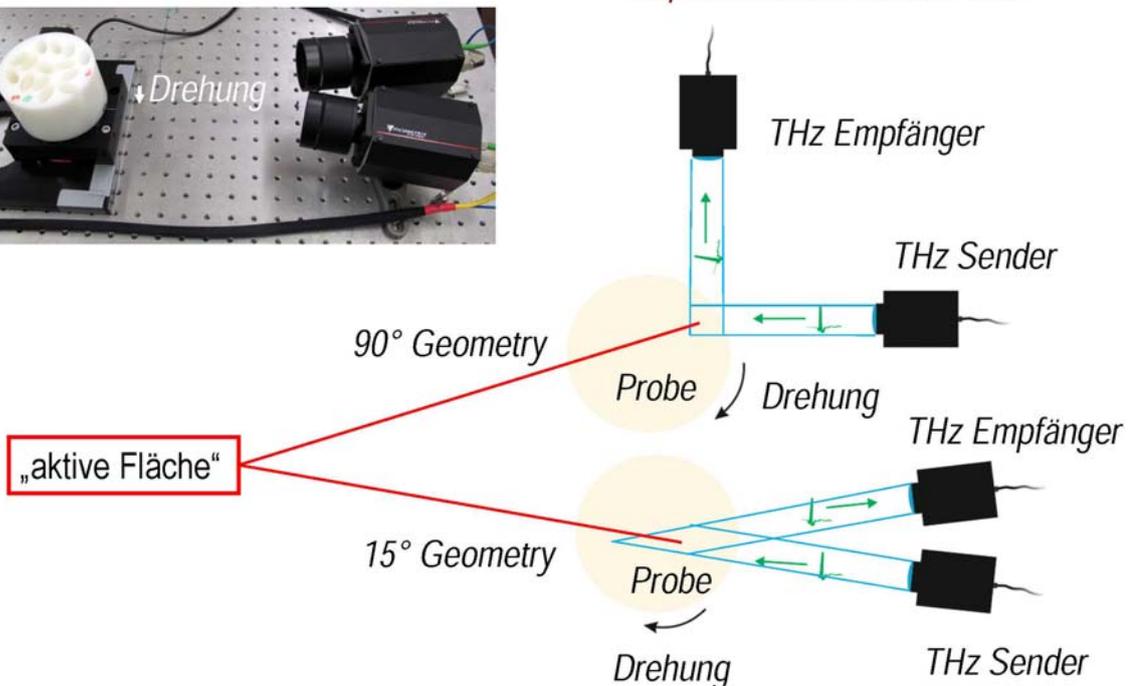
Zeit-Tiefenlageumrechnung bei Kenntnis des Brechungsindizes des Grundmaterials, des Einfalls und Ausfallwinkels möglich

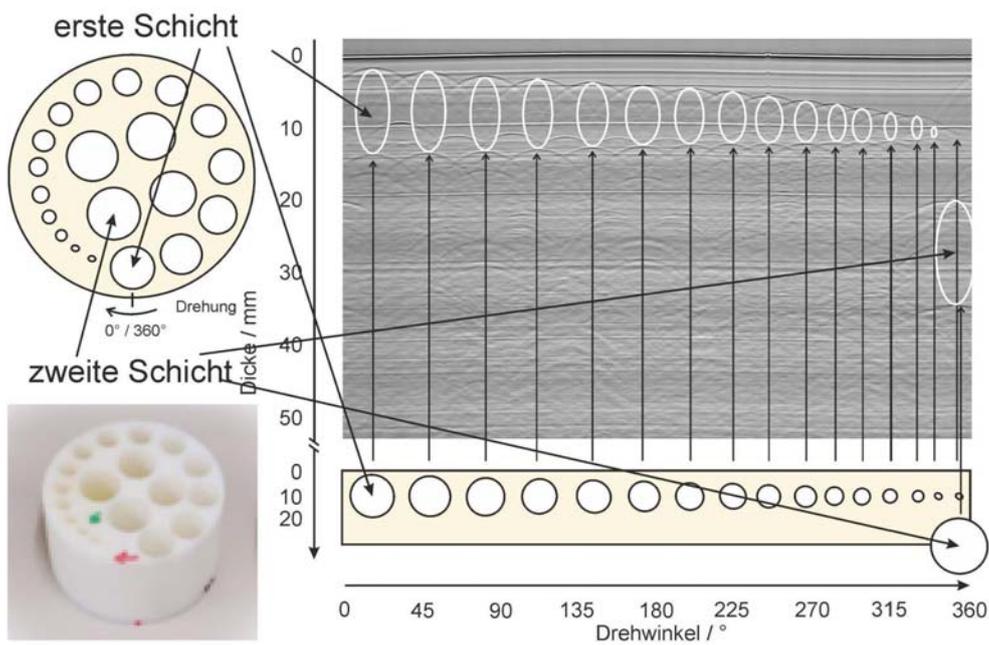
Zeitdifferenz zwischen zwei Impulsmaxima:

$$\Delta t = \frac{2d_1}{c_0 \cdot \cos(\Phi_1)} \cdot (n_1 - n_0 \sin \Phi_1 \cdot \sin \Phi_0) = \frac{2d_1}{c_0} \cdot \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \Phi_0}$$

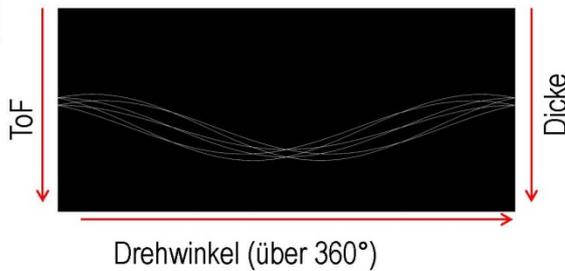
Experimentelle Aufbau - THz

20





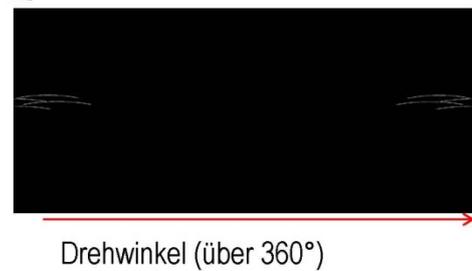
Kompletter Datensatz
Simulation der Messsituation



• kompletter Datensatz

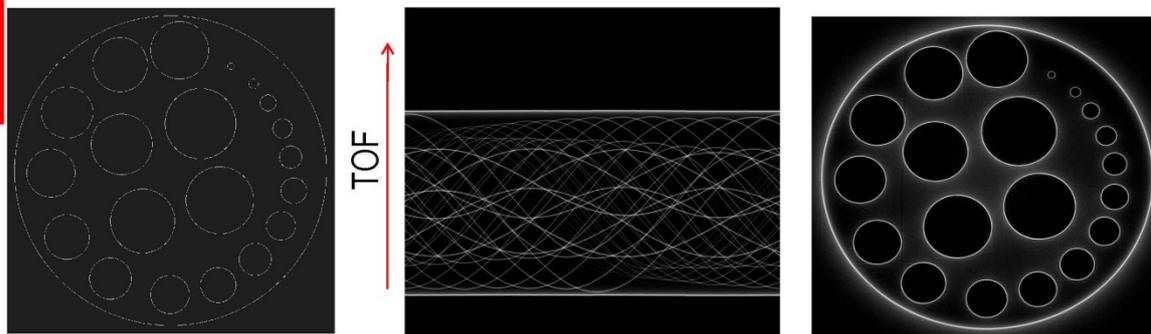
Simulation kleiner Fehlstellen²²

Begrenzter Datensatz (kleine Apertur)
Simulation der Messsituation



... und der Rekonstruktion

- begrenzte Ausleuchtung
- unvollständiges Sinogramm
- Rekonstruktion zeigt charakteristische Artefakte



Phantomgeometrie

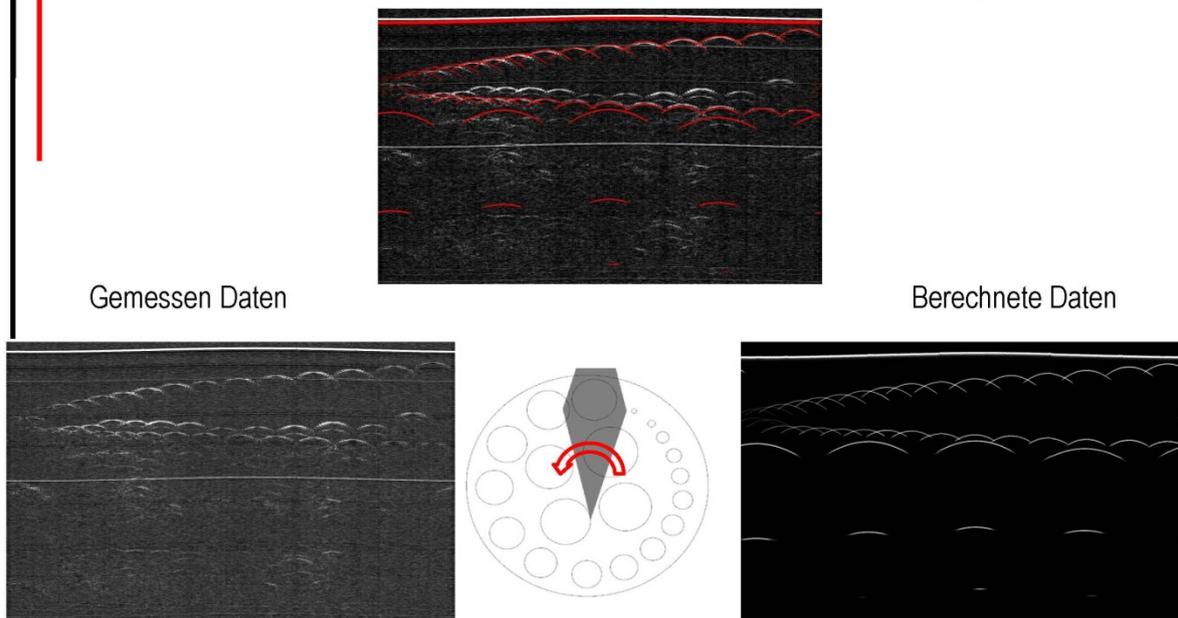
Drehwinkel (über 360°)

Rekonstruiertes Volumen



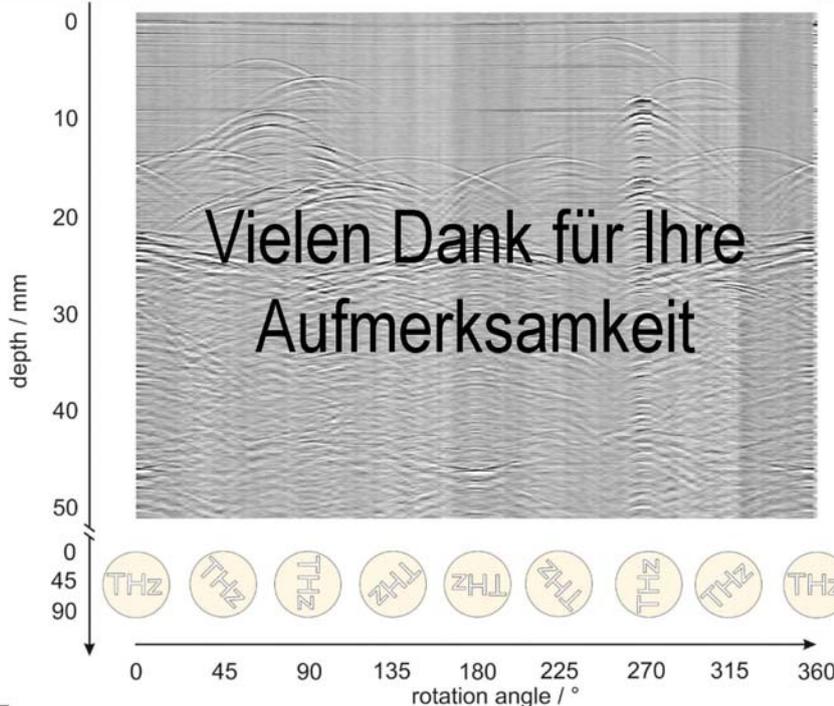
Voraussetzungen:

- Objekt kleiner als die Strahl-Apertur,
- vollständige Ausleuchtung des Objektes durch optimierte Sender-Empfänger-Position,
- Wellen reflektieren an den Grenzflächen ohne Brechung.



Bei Berücksichtigung der Apertureffekte stimmen für die erste Schicht die simulierten Daten gut mit den gemessenen überein!

- ▶ Die Laufzeit und Amplitude des THz-Impulses (I-Ch) erweisen sich als aussagekräftige Kenngröße für die Charakterisierung und dem Nachweis von Fehlstellen in Kunststoffen, Keramiken und anderen halbleitenden Materialien.
- ▶ THz-I-Ch Messungen sind kontaktfrei und erfordern keine Koppelmittel.
- ▶ THz-I-Ch kann für den Nachweis von Fehlstellen in Multischicht-Strukturen und zur Bestimmung der ETOH Konzentration in gefüllten Kunststoffflaschen eingesetzt werden. Eine POD Abschätzung von THz-Flaschen-Scannern, die im Sicherheitsbereich in Zukunft operieren sollen, war mit Hilfe der Bewertung des Fresnel Reflexionskoeffizienten möglich.
- ▶ Tiefenlagen von Fehlstellen können nach ToF Kalibrierung ermittelt werden.
- ▶ THz-Tomographie mit Hilfe der Rückprojektion kann Größe und Lage der Fehlstellen anzeigen. Die Tomogrammqualität wird wesentlich von der ausgeleuchteten Fläche bestimmt. Gute Bildqualitäten erfordern eine Flächenausleuchtung größer als die der inneren Defekte. Die vorliegenden Rekonstruktionsalgorithmen müssen den in der Praxis vorhandene Prüfsituationen angepasst werden.



Dr. rer. nat. Jörg Beckmann
phone : ++49 30 8104 3691
fax : ++49 30 8104 1837
e-mail : joerg.beckmann@bam.de

BAM-Berlin; Federal Institute for Materials Research and Testing
Division 8.3; Non-Destructive Testing / Radiological Methods
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Germany
