

# Echte Industriereferenz für die Terahertz-Technologie: Prozesswanddickenmessung in der Kunststoffrohrextrusion

Stefan KREMLING<sup>1\*</sup>, Thomas HOCHREIN<sup>1</sup>, Arno NEUMEISTER<sup>2</sup>, Ralph KLOSE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SKZ - Das Kunststoff-Zentrum, Friedrich-Bergius-Ring 22, 97076 Würzburg

<sup>2</sup> iNOEX GmbH, Maschweg 70, 49324 Melle

\*s.kremling@skz.de

## Kurzfassung

Eine wirtschaftliche Nutzung von elektromagnetischer Strahlung mit Terahertz (THz)-Frequenzen galt lange Zeit als eine der letzten großen Herausforderungen. Geeignete Quellen und Detektoren wurden erst durch den technologischen Fortschritt der letzten 20 Jahre verfügbar. Einzigartige Eigenschaften in Kombination mit erschwinglichen Komponenten verhalfen dieser Technologie schließlich zum Durchbruch. Neben der Detektion von Inhomogenitäten und Materialkennwerten hat sich die Bestimmung von Schichtdicken als vielversprechendes Anwendungsfeld herauskristallisiert. Dielektrische Materialeigenschaften führen zu einer Laufzeitänderung beim Durchdringen einer Schicht, woraus auf die Schichtdicke zurückgeschlossen wird. Bei mehreren Schichten treten jeweils Reflexionen an Grenzflächen zweier verschiedener Materialien auf. Dies erlaubt die Bestimmung jeder einzelnen Schicht mit einer Genauigkeit von einigen Mikrometern.

Ausgehend von einem gemeinsamen Forschungsprojekt wurden die Möglichkeiten der THz-Technologie zur Dickenmessung in der Kunststoffextrusion erforscht. Ausschlaggebend waren die zahlreichen Vorteile dieser Technologie: Verglichen mit klassischem Ultraschall arbeitet die THz-Technologie berührungslos und kann geschäumte oder luftgefüllte Proben durchleuchten. Im Gegensatz zur Röntgentechnologie ist THz-Strahlung nicht ionisierend und gesundheitlich unbedenklich. Außerdem kann bei Mehrschichtsystemen jede einzelne Schicht bestimmt werden. Mehrere bilaterale Forschungsaktivitäten führten zur stetigen Weiterentwicklung, wie z. B. der optimalen Detektoranordnung oder präzisen Datenauswertung. Verschiedene Systemkonfigurationen ermöglichen heute eine breite Anwendungspalette, angefangen von Einschichtrohren über geschäumte Mehrschichtrohre bis hin zu Wellrohren. Zurzeit stehen vier standardisierte Systeme mit einem reversierenden Terahertz-Sensor für Rohrdimensionen von 10 bis 1000 mm zur Verfügung. Vorteil der reversierenden Technologie ist die Information der Dickenverteilung über den kompletten Rohrumfang!

J. Hauck et al., "Industrielle Prozesswanddickenmessung in der Kunststoffrohrextrusion," *DGZfP-Jahrestagung*, Dresden (2013)

J. Hauck et al., "Zerstörungsfreie Prüfung von Kunststoffbauteilen mittels THz-Technologie," *DGZfP-Jahrestagung*, Potsdam (2014)



## Erste Industriereferenz für die Terahertz-Technologie: Prozesswanddickenmessung in der Kunststoffrohrextrusion

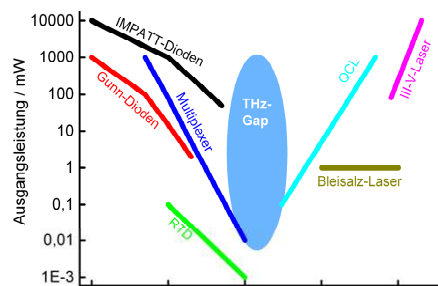
Stefan KREMLING<sup>1</sup>, Thomas HOCHREIN<sup>1</sup>  
Arno NEUMEISTER<sup>2</sup>, Ralph KLOSE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, 97076 Würzburg  
<sup>2</sup> INOEX GmbH, 49324 Melle

2. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis  
11. März 2015



## Elektromagnetisches Spektrum



THz-Bereich in Zahlen:

f: 0,1 ... 10 THz

$\lambda$ : 3000 ... 30  $\mu\text{m}$

E: 0,41 ... 41 meV



Radiowellen



Mikrowellen



Terahertz



Infrarot



sichtbar



Ultraviolett



Röntgenstrahlen

10<sup>7</sup>

10<sup>8</sup>

10<sup>9</sup>

10<sup>10</sup>

10<sup>11</sup>

10<sup>12</sup>

10<sup>13</sup>

10<sup>14</sup>

10<sup>15</sup>

10<sup>16</sup>

10<sup>17</sup>

1 GHz

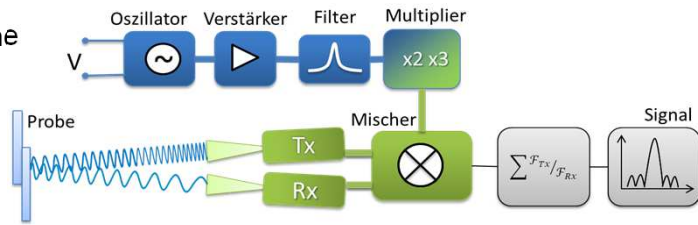
1 THz

1 PHz

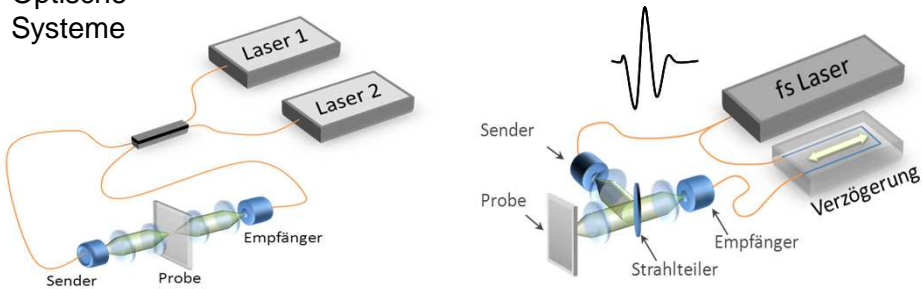
Elektronik

Optik

## Vollelektronische Systeme

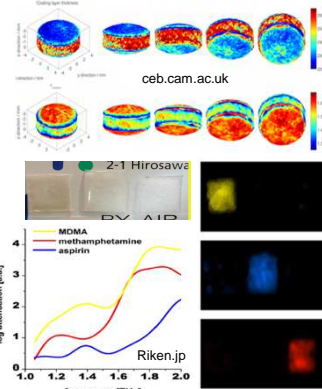
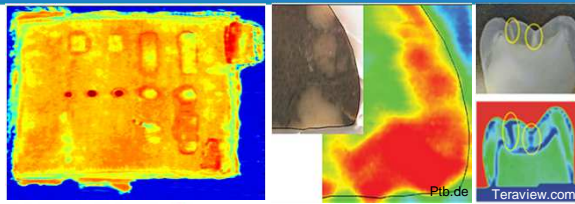


## Optische Systeme



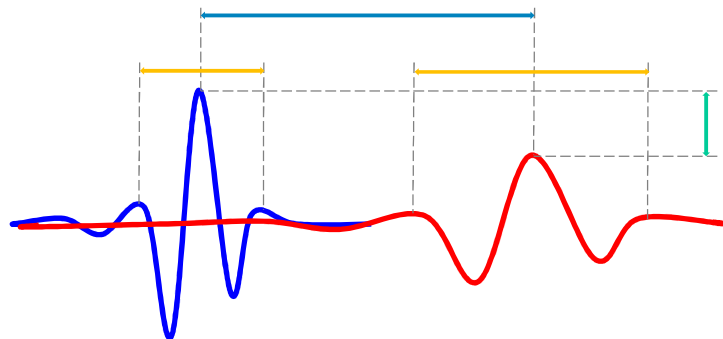
# Einsatzgebiete von THz-Wellen

- Zerstörungsfreie Prüfung
  - bildgebend
  - spektral
- Prozesskontrolle



- Kunststoff, Keramik, Papier
- Medizinische Anwendung
- Pharmazeutische Industrie
- Sicherheitstechnik
- Lebensmittel
- Astronomie
- Kommunikationsbranche

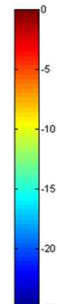
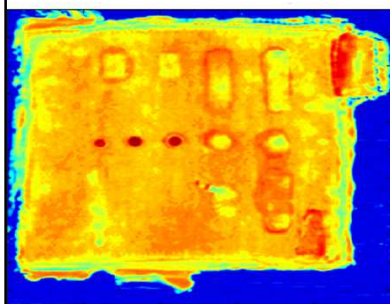
## Materialkenndaten aus THz-Pulsen



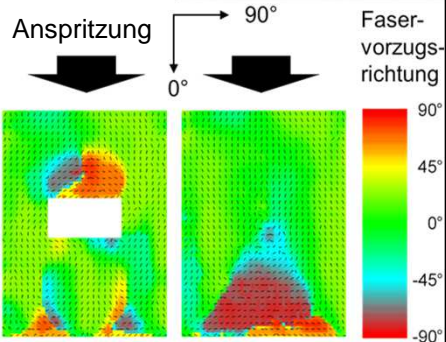
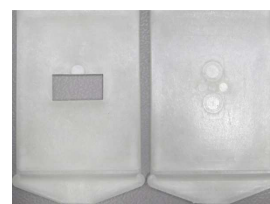
Pulsverzögerung  $\Rightarrow$  Brechungsindex  
 Pulsabschwächung  $\Rightarrow$  Absorptionskoeffizient  
 Pulsverbreiterung  $\Rightarrow$  spektraler Verlauf

} Dielektrische Materialeigenschaften

## Beispiele: Defekte & Faserorientierung



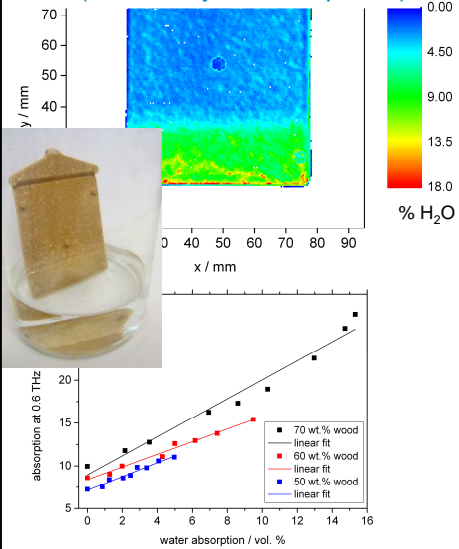
### Polypropylen mit 30 % Glasfasern



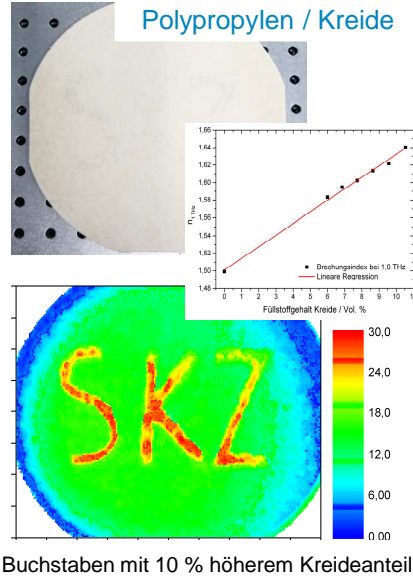
## Beispiele: Feuchte- und Füllstoffgehalt

SKZ

### WPC (Wood Polymer Compound)



### Polypropylen / Kreide



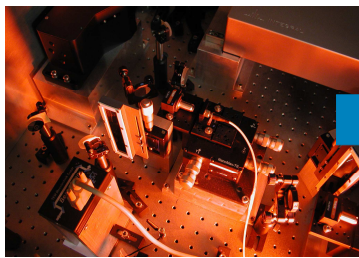
Buchstaben mit 10 % höherem Kreideanteil

7 Produktqualität • Weiterbildung • Forschung • Zertifizierung

www.skz.de

## Umsetzung der Terahertz-Technologie zur Überwachung industrieller Extrusionsprozesse

SKZ



INOEX  
BATOP  
optoelectronics  
i B A  
CONSULTANCY FOR THE EXTRUSION INDUSTRY  
MenloSystems

### Ziele:

- Industrielles **Wanddicken-Messsystem** mit Fokus Rohrextrusion
- **Berührungslose Dickenmessung** ohne Wasserankopplung (auch für geschäumte oder dickwandige Rohre)
- **Nachfolgetechnologie** für Ultraschallmesstechnik
- Entwicklung einschraubbarer **Schmelzesonden** für Compoundierprozesse

Philipps  
Universität  
Marburg

ZIM  
Zentrales  
Innovationsprogramm  
Mittelstand

2010 – 2012

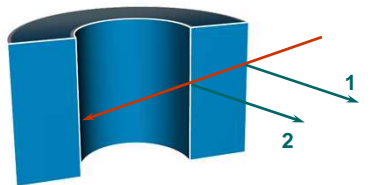
•8 Produktqualität • Weiterbildung • Forschung • Zertifizierung

www.skz.de

## Funktionsprinzip Terahertz-Rohrwanddickenmessung

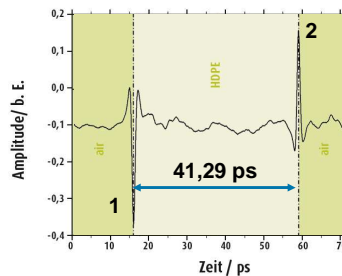


Massives HDPE Rohr



einfallender Strahl | reflektierte Strahlen

Terahertz-Messung



$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cdot n}$$

$c$  : Lichtgeschwindigkeit  
 $\Delta t$  : Pulsabstand  
 $n$  : Brechungsindex

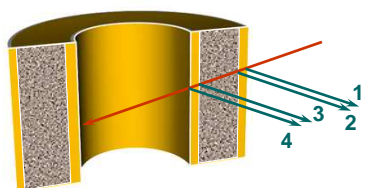
Vergleich mit Referenzmessungen

	d / mm
Terahertz	4,07 ± 0,01
Messschieber / Optisches Verfahren	4,03 ± 0,05
Brechungsindex	1,52

## Mehrschicht-Rohrwanddickenmessung

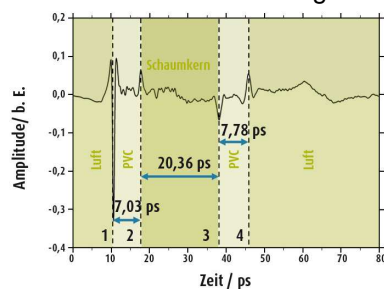


Geschäumtes PVC Rohr



einfallender Strahl | reflektierte Strahlen

Terahertz-Messung



Wanddicken im Vergleich mit Referenzmessungen

	$d_{1-2}$ / mm	$d_{2-3}$ / mm	$d_{3-4}$ / mm	$d_{1-4}$ / mm
Terahertz	0,62 ± 0,01	2,35 ± 0,01	0,69 ± 0,01	3,66 ± 0,02
Messschieber / Optisches Verfahren	0,6 ± 0,2	2,4 ± 0,2	0,7 ± 0,2	3,65 ± 0,01
Brechungsindex	1,70	1,30	1,70	-

## Vorteile in der Wanddickenmessung mit THz

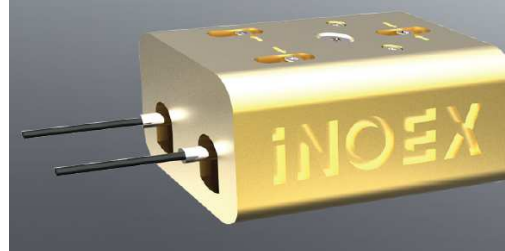


	Ultraschall	Röntgen	Terahertz
Berührungslos			
Trennung verschiedener Kunststoffschichten			
Messung geschäumter und dickwandiger Rohre			
Ionisierende Strahlung			

## Inline-Wanddickenmessung in der Rohrextrusion mittels Terahertz-Technologie



Quelle: Broschüre „AUREX Terahertz - The next dimension of wall thickness measurement“, iNOEX GmbH, Melle (2013)



**iNOEX**  
THE FUTURE OF EXTRUSION

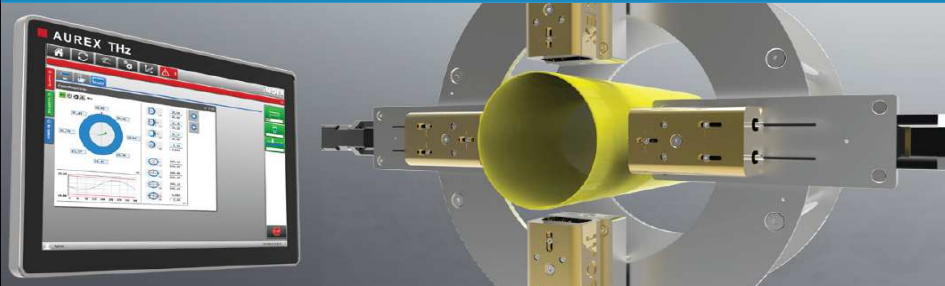


„AUREX THz - Terahertz ist das erste Wanddickenmesssystem in der Kunststoffrohrextrusion, welches ohne Koppelmedium und ohne Kalibrierung auskommt und dessen Messprinzip absolut unbedenklich ist.“

RALPH KLOSE, Leiter Forschung & Entwicklung iNOEX

## Wanddickenmesssystem für Glattrohre

SKZ



- Spezielles Optikdesign für Messkopf in Reflexion ohne Strahlteiler
- System geeignet für Massivrohre, Schaumkernrohre und Wellrohre
- Auswertelgorithmen zur präzisen Dickenbestimmung (z. B. Exakte Bestimmung der Pulsposition oder Berücksichtigung von Dispersion)
- Vier Messköpfe an fixen Positionen

Broschüre „AUREX Terahertz – The next dimension of wall thickness measurement“, INOEX GmbH, Melle (2013)

13 Produktqualität • Weiterbildung • Forschung • Zertifizierung

www.skz.de

## Neue Möglichkeiten für Schaum- und Wellrohre

SKZ



14 Produktqualität • Weiterbildung • Forschung • Zertifizierung

www.skz.de



## 2. Entwicklungsstufe: Quantum

SKZ

QUANTUM



15 Produktqualität • Weiterbildung • Forschung • Zertifizierung

www.skz.de

## Aktuelle Systemkonfiguration

SKZ

Type	Range [mm]	Range extension [mm]
QUANTUM 125	10 – 125	
QUANTUM 250	10 – 250	
QUANTUM 630	250 – 630	90 – 630
QUANTUM 1000	600 – 1000	250 – 1000



- Reversierender Messkopf ermöglicht Kontrolle des vollen 360° Umfangs!
- Einfache Plug & Play Installation @ 240V

16 Produktqualität • Weiterbildung • Forschung • Zertifizierung

www.skz.de

Fragen??

**iNOEX** **SKZ**  
THE FUTURE OF EXTRUSION



iNOEX GmbH  
Maschweg 70  
49324 Melle  
+49 (0)5422-60507-0  
[www.inoex.de](http://www.inoex.de)

SKZ-KFE gGmbH  
Friedrich-Bergius-Ring 22  
97076 Würzburg  
+49 (0)931-4104-0  
[www.skz.de](http://www.skz.de)

Produktqualität • Weiterbildung • Forschung • Zertifizierung

[www.skz.de](http://www.skz.de)