



Joachim Jonuscheit, Jens Klier, Stefan Duran, Daniel Molter,
Shiva Mohammadzadeh, Andreas Keil, Fabian Friederich

Terahertz-Messtechnik zur Inline Beschichtungskontrolle von Batteriefolien

Terahertz zur Inline-Beschichtungskontrolle

Inhaltsverzeichnis

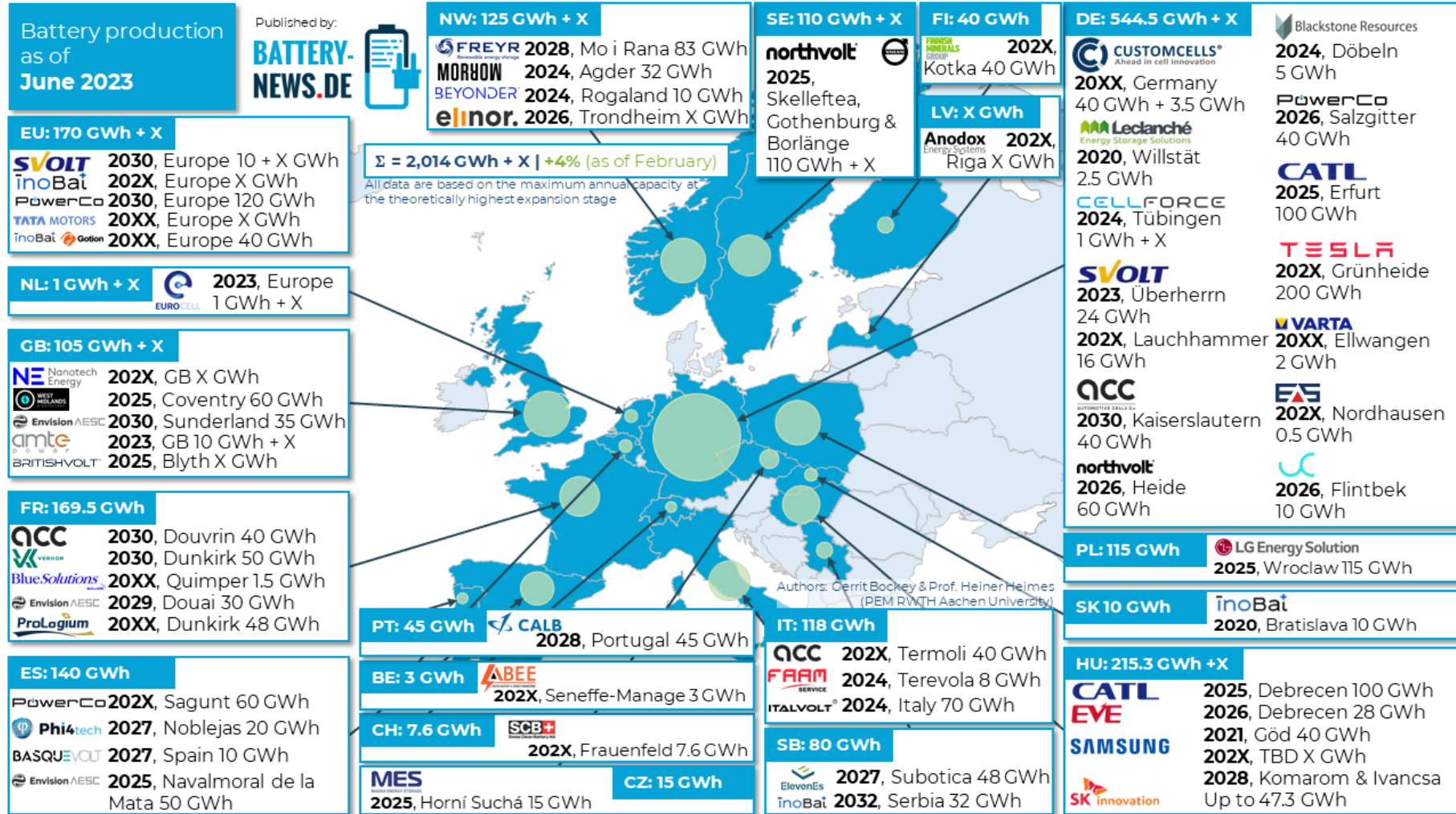
- **Motivation**
- **Terahertz – Messtechnik**
- **Schichtdickenmessung mit Terahertz-TDS**
- **Schichtdickenmessung mit Terahertz-FMCW**
- **Anwendung in Batteriefertigung**
- **Zusammenfassung / Ausblick**



© Studio Wiegel für Fraunhofer FFB

Motivation

Batterieproduktion in Europa



Quelle: [Europa Batterieproduktion - Battery-News](#)

Motivation

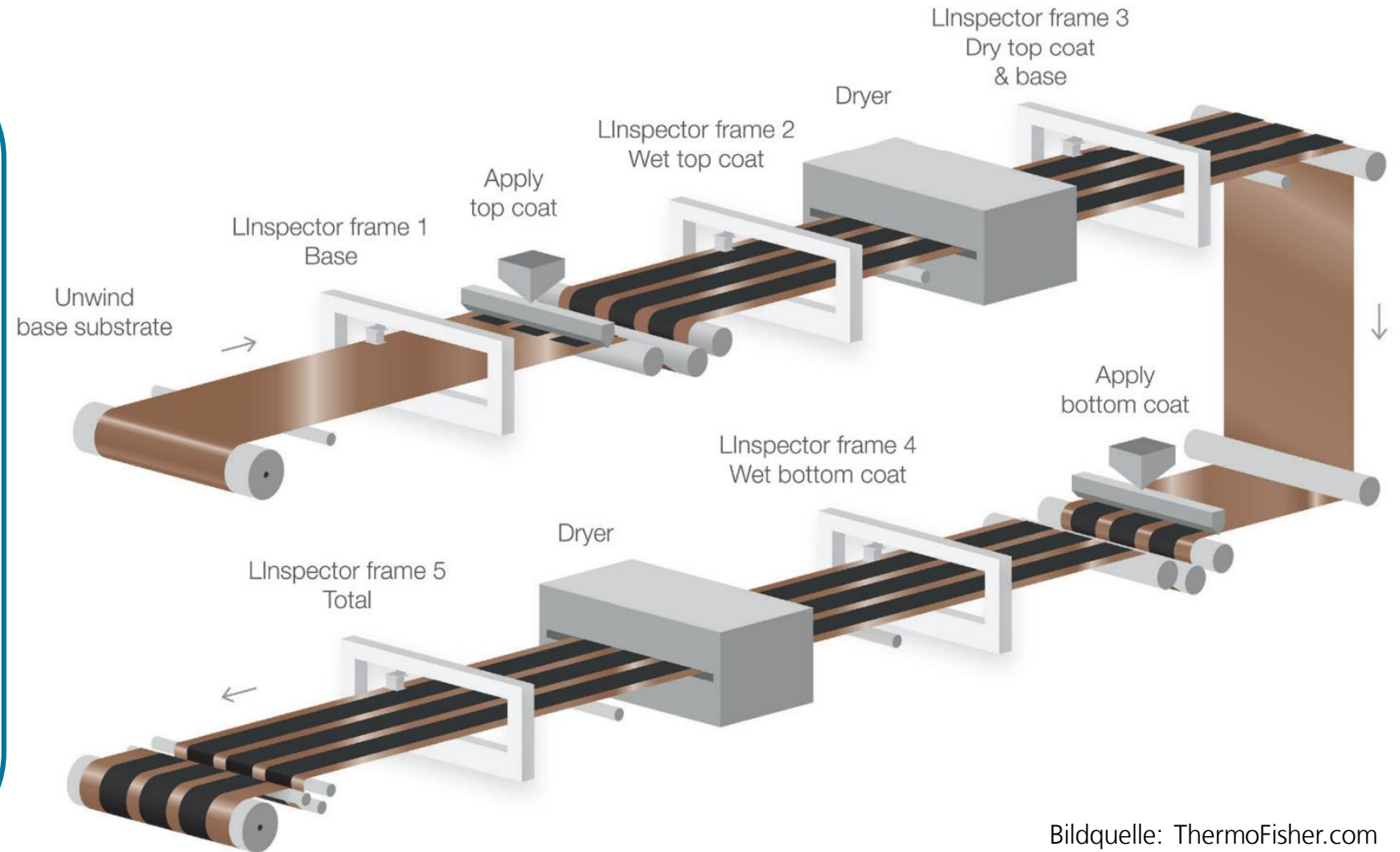
Nass-Prozess - Positionen für berührungslose und zerstörungsfreie Inline-Schichtdickenmessung

Aktuell eingesetzte Messtechnik:

- Betastrahlung
- Röntgen

Beide Techniken messen in Transmission und erfassen so nur die Gesamtdicke (Folie plus Beschichtung)

- Zur Schichtdickenmessung sind Differenzmessungen vor und nach dem Beschichten notwendig
- Ohne aufwendige Kontrolle erfolgt die Differenzbildung nicht an der gleichen Bandposition
- Messfehler summieren sich auf und erhöhen diesen im Laufe des Prozesses drastisch!



Bildquelle: ThermoFisher.com

Motivation

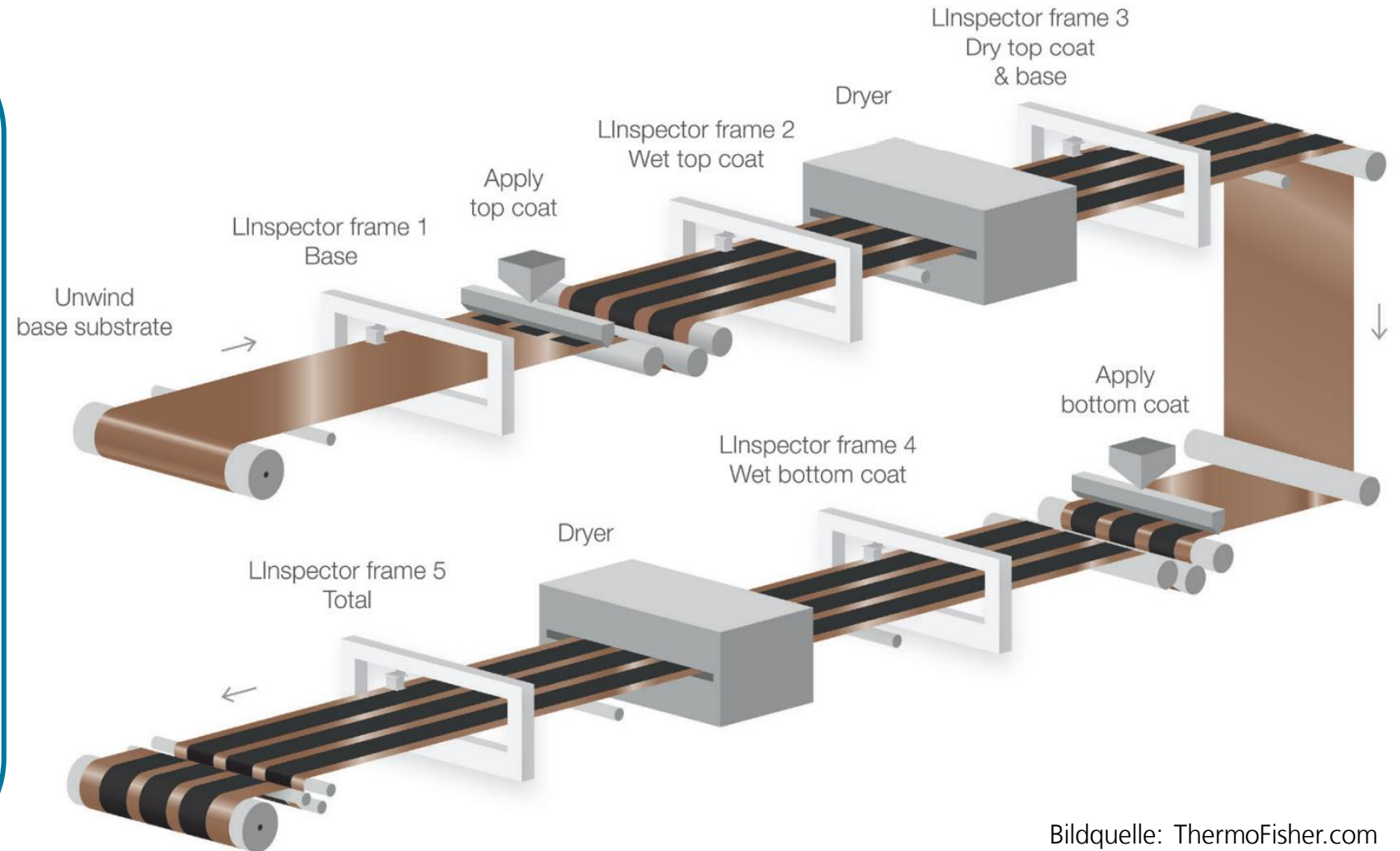
Nass-Prozess - Positionen für berührungslose und zerstörungsfreie Inline-Schichtdickenmessung

Neu eingesetzte Messtechnik:

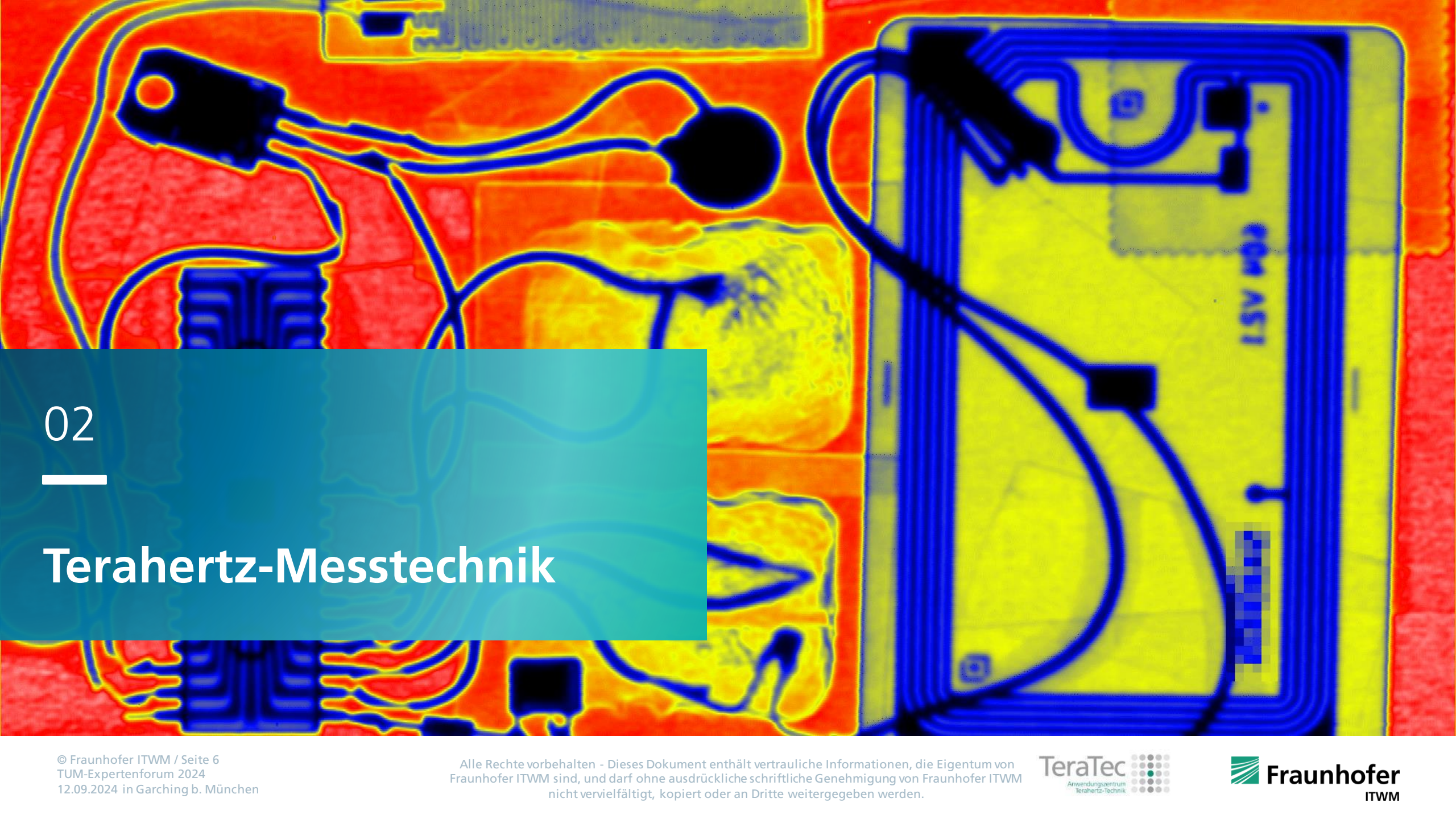
- Terahertz-Strahlung (Laufzeitmessung)

Diese Technik misst in **Reflexion** und erfasst so direkt die Schichtdicke der Beschichtung. Messdauer < 5 ms

- Kein Strahlenschutz notwendig
- Keine Fehler durch Differenzbildung
- Reduzierung der Scanneranzahl
- Keine Kontrolle der Bandgeschwindigkeit notwendig
- Skalierung des Sensors möglich, so dass mehrere Sensoren über dem Band positioniert werden, um eine höhere Abdeckung zu erreichen.
- Optional: Charakterisierung der Beschichtung



Bildquelle: ThermoFisher.com

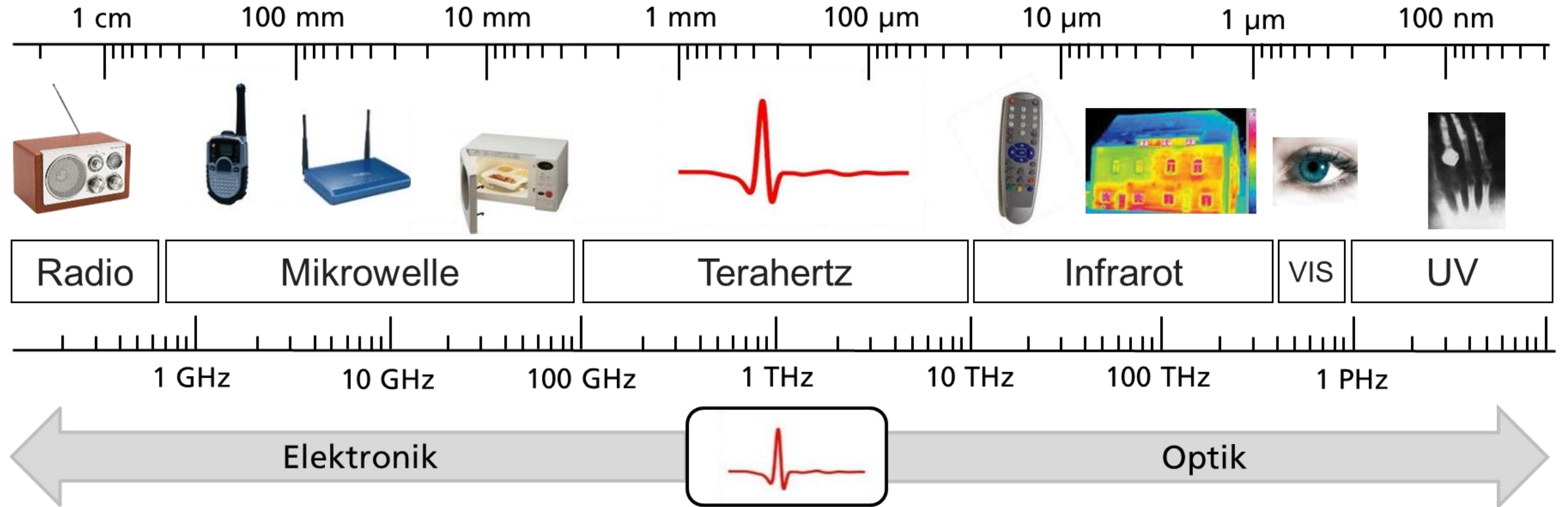


02

Terahertz-Messtechnik

Terahertz-Spektralbereich

Übersicht



Terahertz-Strahlung ist im Spektrum zwischen Mikrowellen und Infrarot angesiedelt und verbindet somit die Vorteile beider Frequenzbereiche.

Terahertz-Spektralbereich

Eigenschaften

Terahertz-Wellen sind **gesundheitlich unbedenklich**.

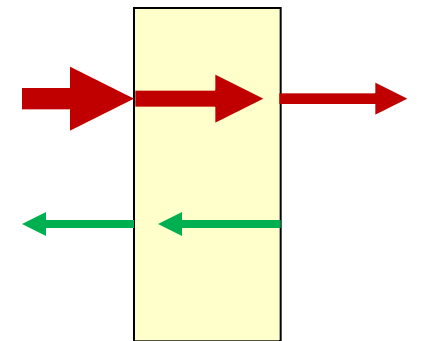
- Keine Veränderungen organischer Substanzen
- Keine besonderen Strahlenschutzmaßnahmen notwendig

Messtechnik ist **berührungslos und zerstörungsfrei**.

- Kein Kopplungsmedium notwendig

Prüfung in Reflexion ist möglich.

- Einseitiger Zugang ausreichend



Terahertz-Spektralbereich

Eigenschaften

Viele Werkstoffe wie Papier, Keramik, Kunststoff und Textilien sind **transparent**.

Bei elektrischen Leitern hängt die Transparenz von der elektrischen Leitfähigkeit ab:
Je höher die Leitfähigkeit, desto geringer ist die Transparenz.

Metalle sind **Reflektoren**.

- Kein Blick ins Bauteilinnere
- Untersuchung der Oberfläche und Beschichtung

Starke **Absorption** durch polare Flüssigkeiten wie Wasser.

- Geringe Eindringtiefe in wasserhaltigen Objekten
- Quantitative Bestimmung des Wassergehaltes



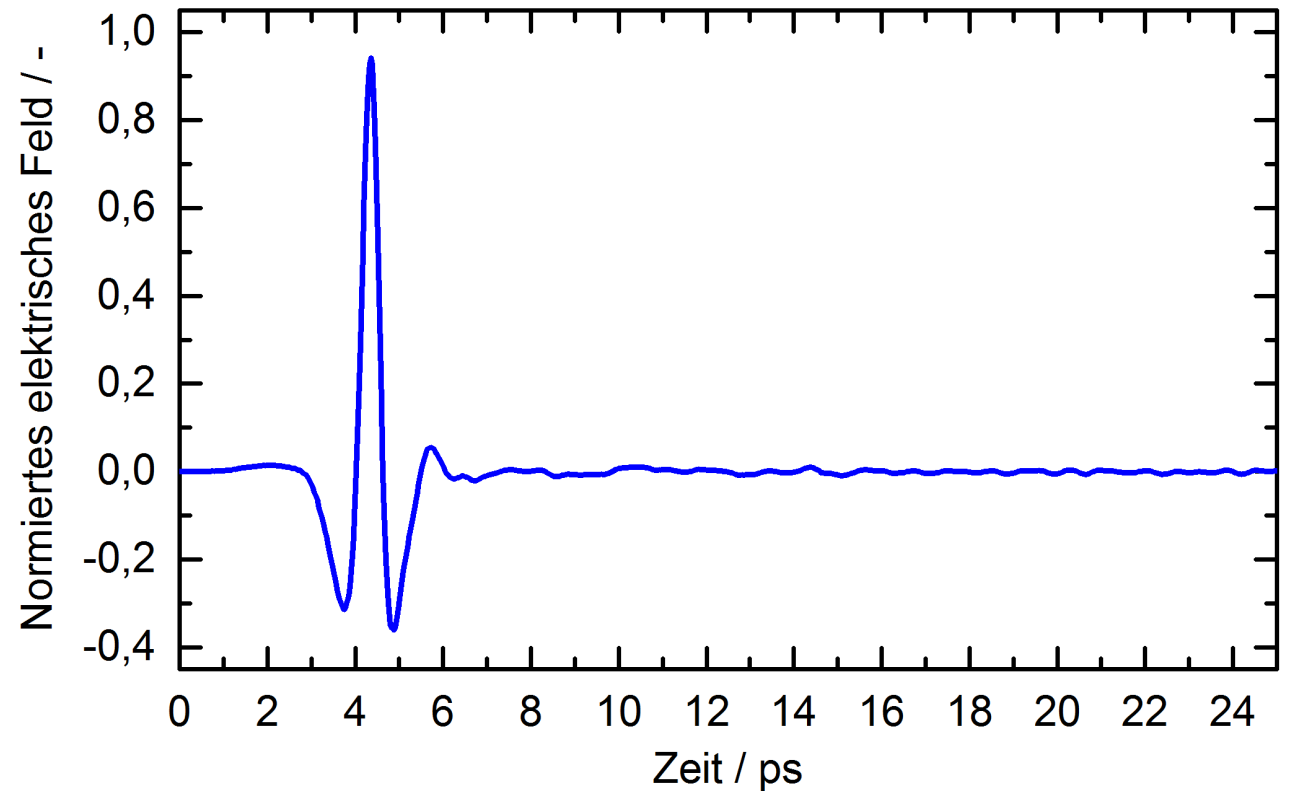
03

Schichtdickenmessung mit Terahertz-TDS

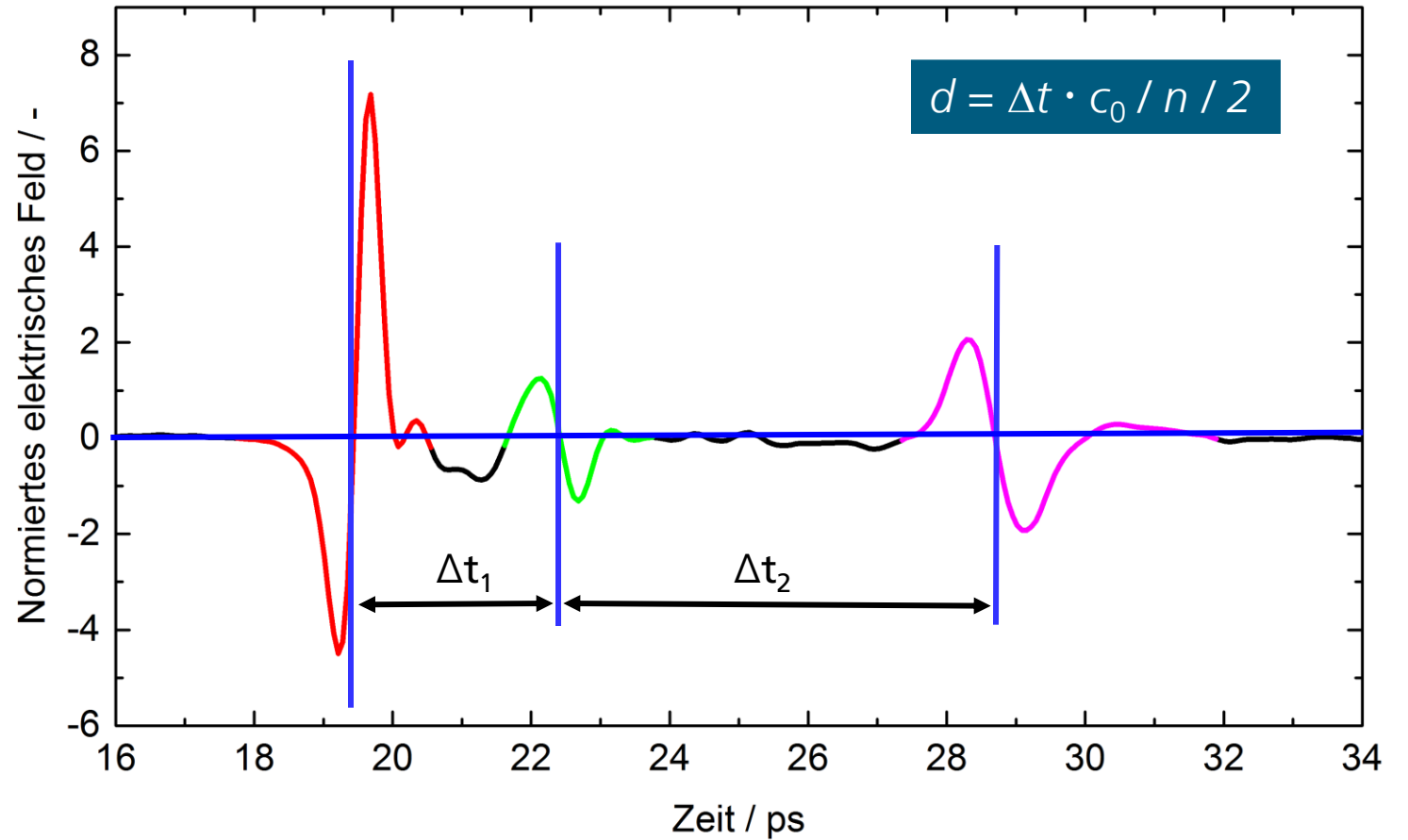
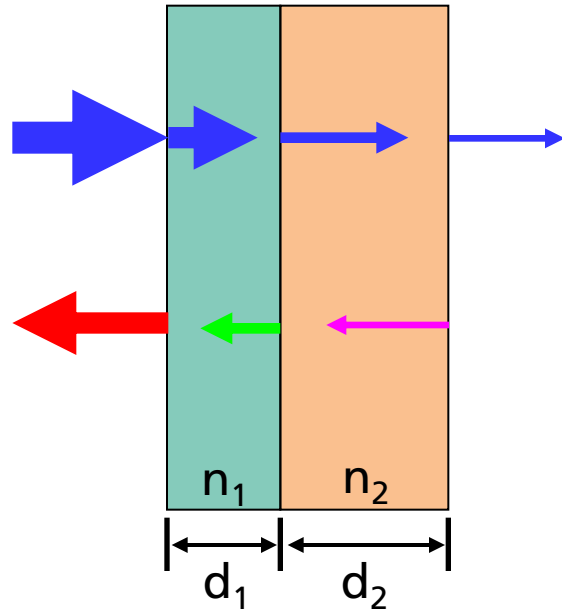
Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie

Messprinzip

- Messung des elektrischen Feldes
- Pulsdauer < 1 ps
- Dynamik > 60 dB
- 40 Wellenformen pro Sekunde
(bis zu 1.600 Wellenformen pro Sekunde)



Schichtdickenbestimmung in Reflexion - Messprinzip



Schichtdickenbestimmung

in Reflexion - Messprinzip

1 μm

10 μm

100 μm

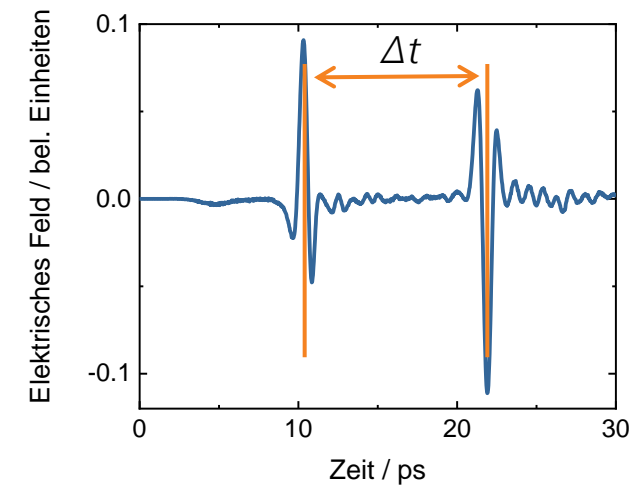
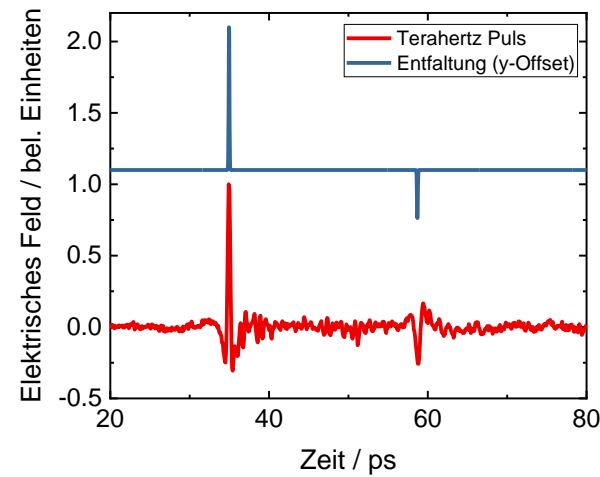
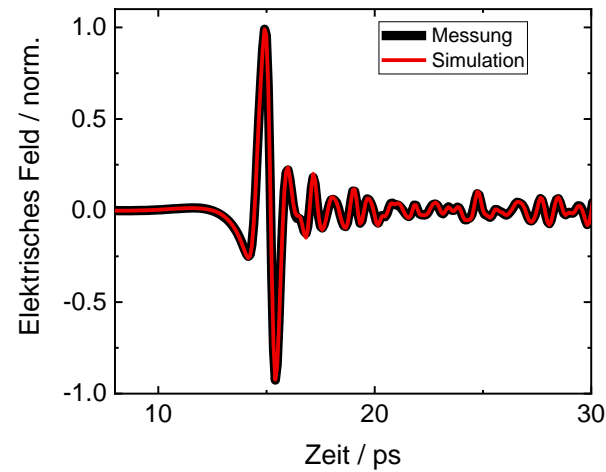
1 mm

10 mm

Peakfindung

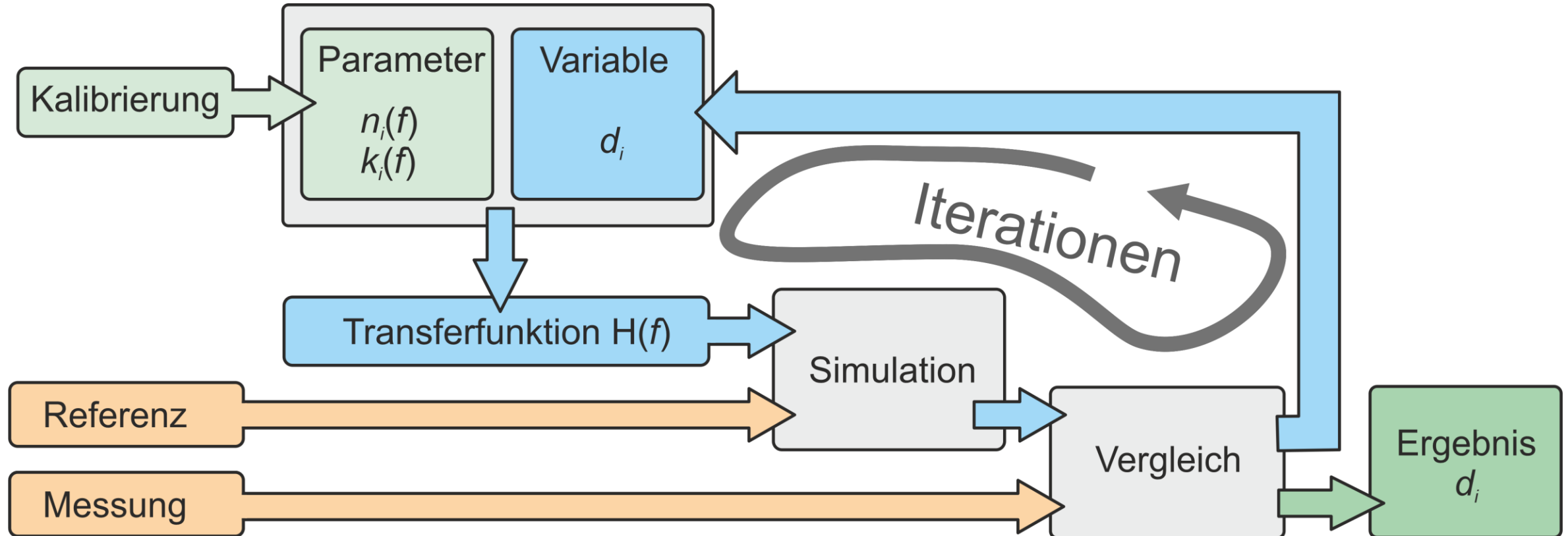
Entfaltung

Retrival-Methode



Schichtdickenbestimmung

Flussdiagramm der Auswertung von dünnen Schichten

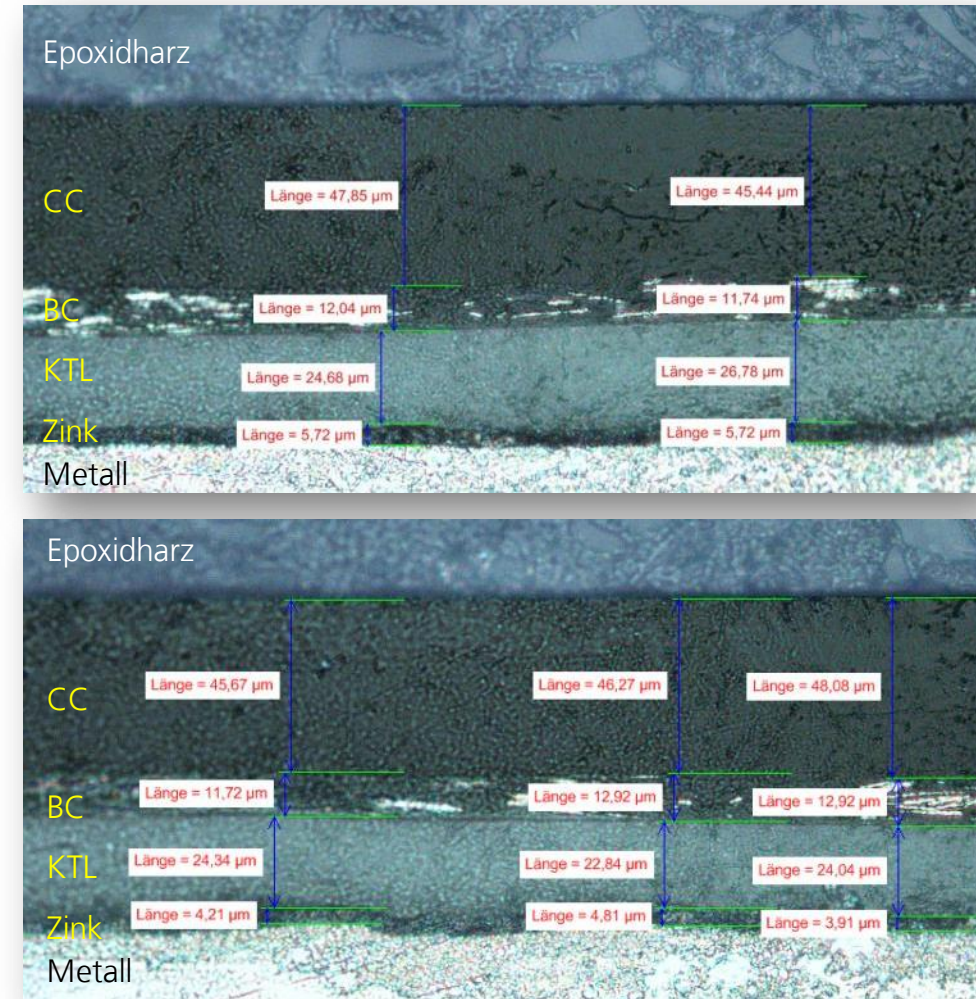


Schichtdickenbestimmung

Drei-Schicht-System auf Metall

Schicht	Terahertz μm	Querschliff μm
CC	45.2 ± 0.5	45.4 – 48.0
BC	13.5 ± 0.4	11.7 – 12.9
KTL	24.2 ± 0.8	22.8 – 26.7

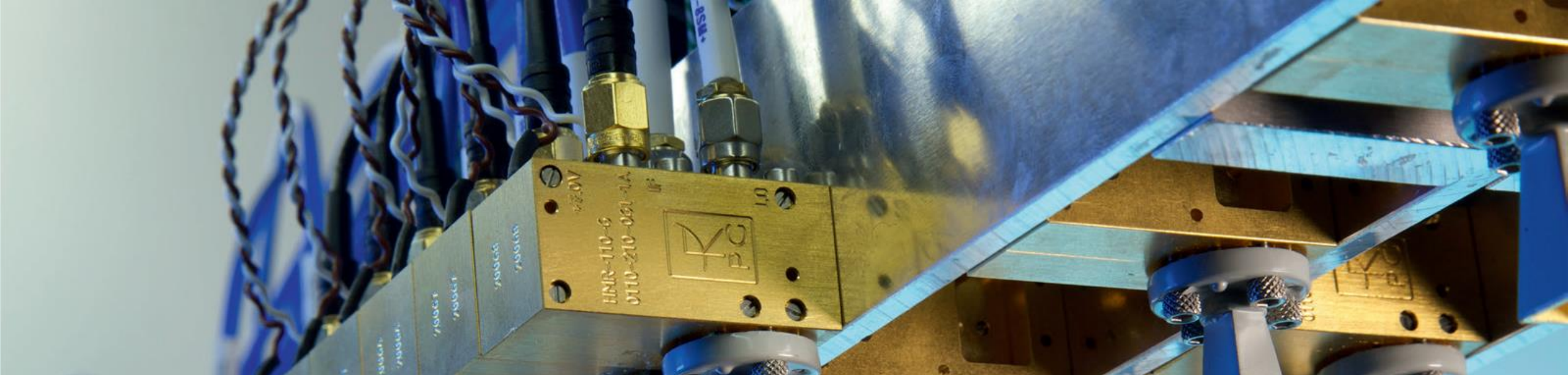
Vergleich mit »Goldstandard«:
Querschliff und Mikroskop



Schichtdickenmessung in Produktionsumgebung

Weltweit erste Installation in 2020 in Navarra: über 400.000 Karosserien geprüft





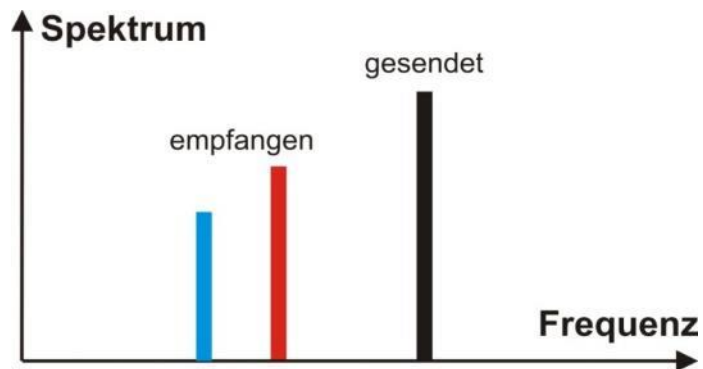
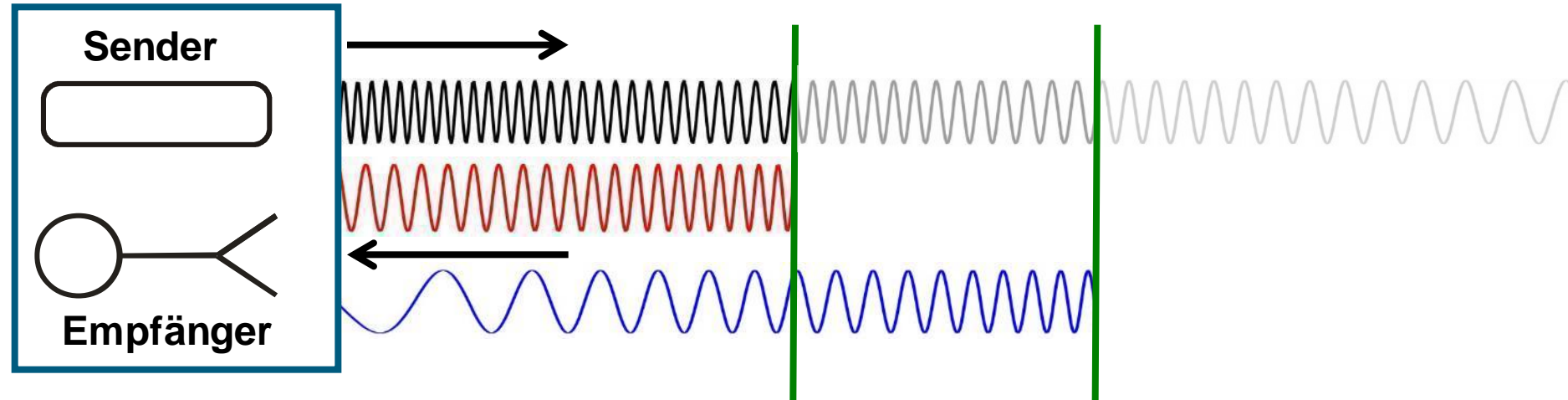
04

Schichtdickenmessung mit Terahertz-FMCW

Terahertz-Radar-Messtechnik

mit kontinuierlichen Wellen variabler Frequenz (FMCW-Radar)

THz Messsystem



Durch das FMCW-Verfahren erhält man tiefenaufgelöste Informationen zum untersuchten Objekt

Terahertz-Radar-Messtechnik

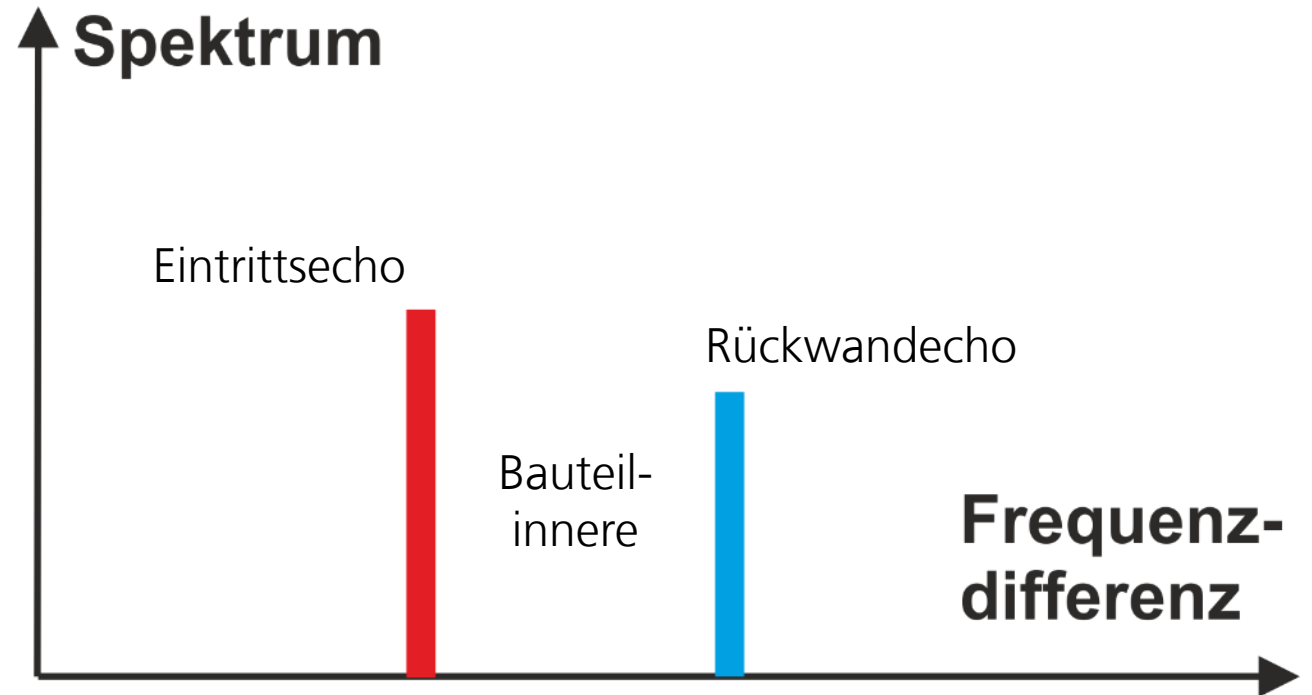
mit kontinuierlichen Wellen variabler Frequenz (FMCW-Radar)

Frequenzdifferenz

- Abstand
- Dicke
- Tiefeninformation

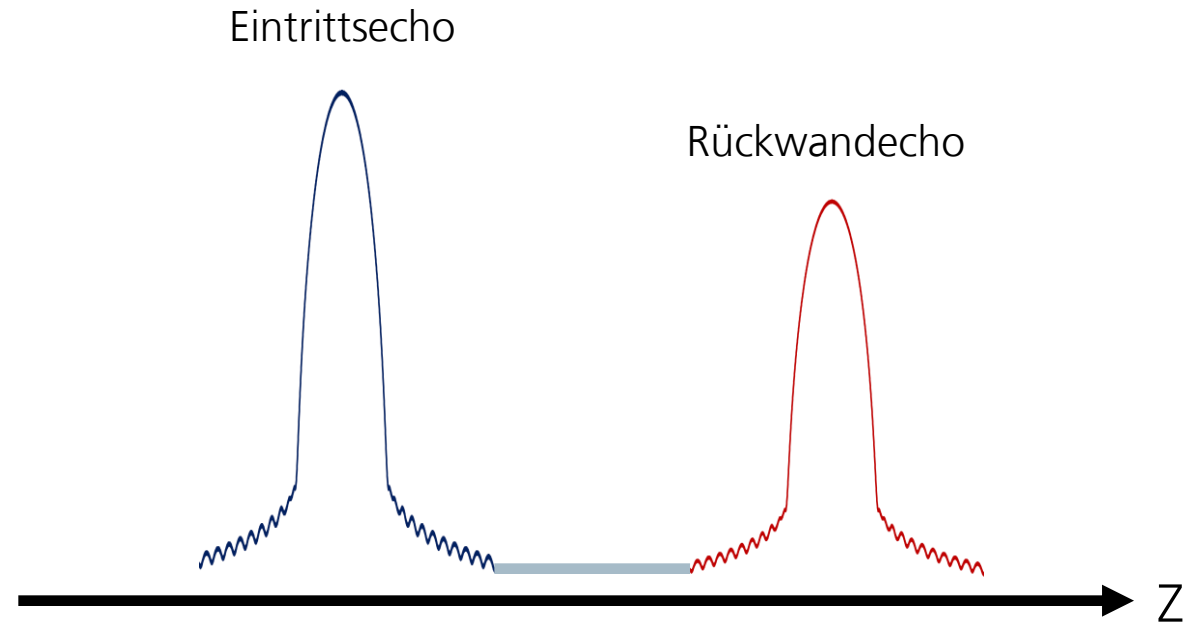
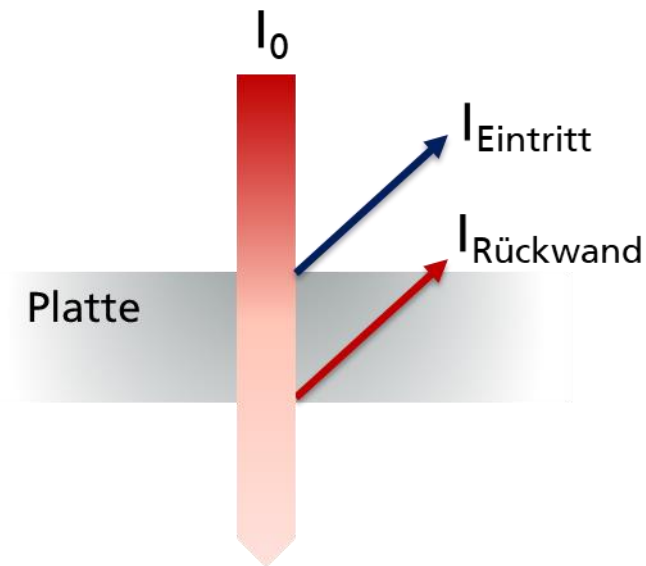
Amplitudenänderung

- Absorption / Streuung
- Dicke
- Inhomogenitäten
- Fehlstellen



Terahertz-FMCW-Radar

Prinzip – Homogene Schicht



A-Scan (Sweep an fester Position)

Eintrittsecho

Intensität abhängig vom Materialübergang

Rückwandecho

Intensität abhängig vom Materialübergang und Materialdämpfung

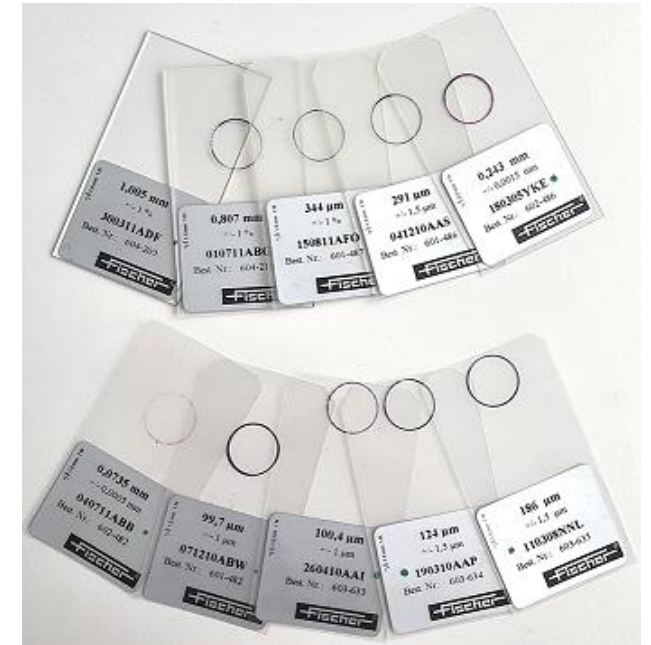
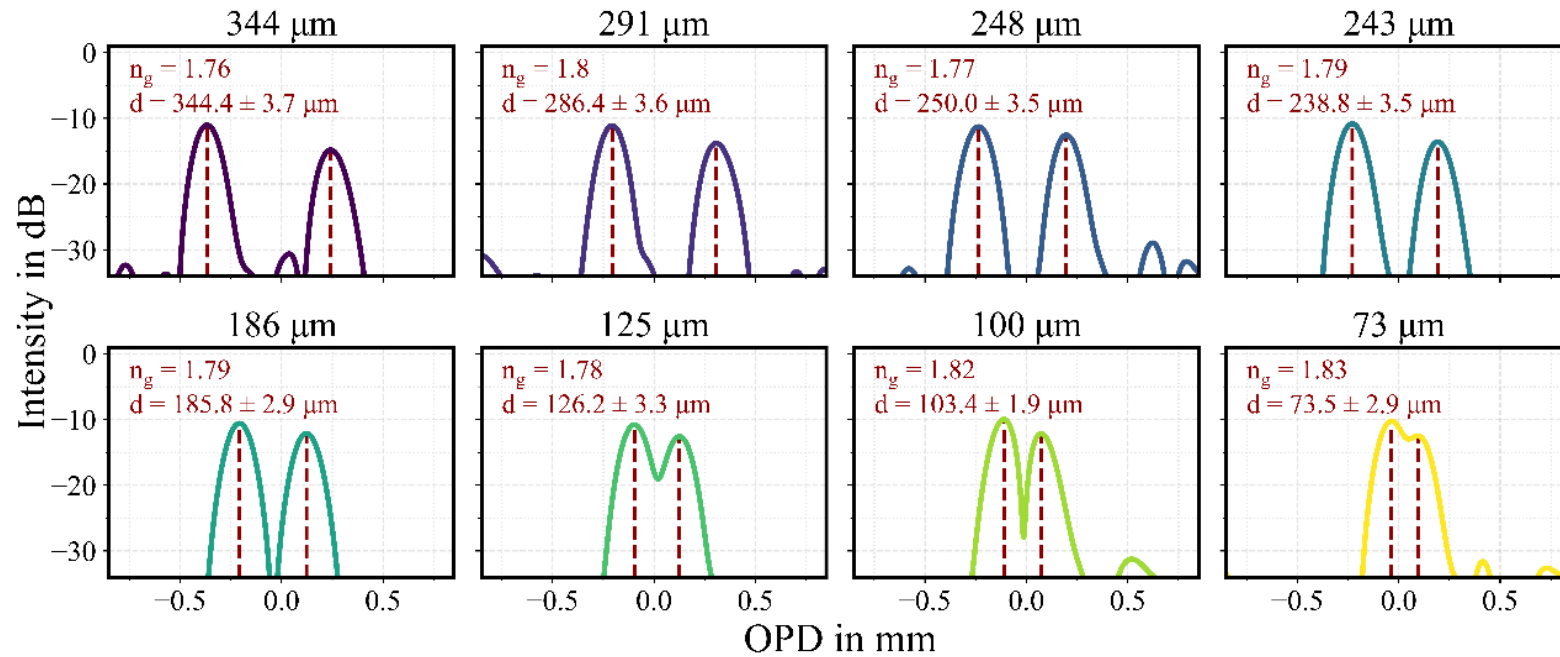
Terahertz-FMCW-Radar

Spezifikationen

Spezifikationen				
Technologie	vollelektronisch			photonisch
Anzahl der Kanäle	1			skalierbar, aktuell 8 Kanäle realisiert
Messzeit pro Pixel	250 μ s für komplette Frequenzrampe			2 ms für eine Frequenzrampe von 1 THz
Dynamikbereich	> 50 dB			tbd
Arbeitsfrequenz	100 GHz	150 GHz	300 GHz	variabel im Bereich von 10 GHz bis 1,5 THz
Frequenzband	60 - 110 GHz	110 - 170 GHz	230 - 320 GHz	variabel im Bereich von 10 GHz bis 1,5 THz
Laterale Auflösung mit Brennweite 100 mm	3 mm	2 mm	1 mm	1 - 3 mm, frequenzabhängig
Tiefenauflösung @ Brechungsindex $n = 1$	3,8 mm	3,2 mm	1,7 mm	100 μ m bis mm, bandbreitenabhängig
Eindringtiefe	einige cm, materialabhängig			einige cm, materialabhängig

Terahertz-FMCW-Radar

Dickenmessungen an Referenzfolien





05

Anwendung in Batteriefertigung

© Studio Wiegel für Fraunhofer FFB

© Fraunhofer ITWM / Seite 23
TUM-Expertenforum 2024
12.09.2024 in Garching b. München

Alle Rechte vorbehalten - Dieses Dokument enthält vertrauliche Informationen, die Eigentum von Fraunhofer ITWM sind, und darf ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung von Fraunhofer ITWM nicht vervielfältigt, kopiert oder an Dritte weitergegeben werden.

TeraTec
Anwendungszentrum
Terahertz-Technik

Fraunhofer
ITWM

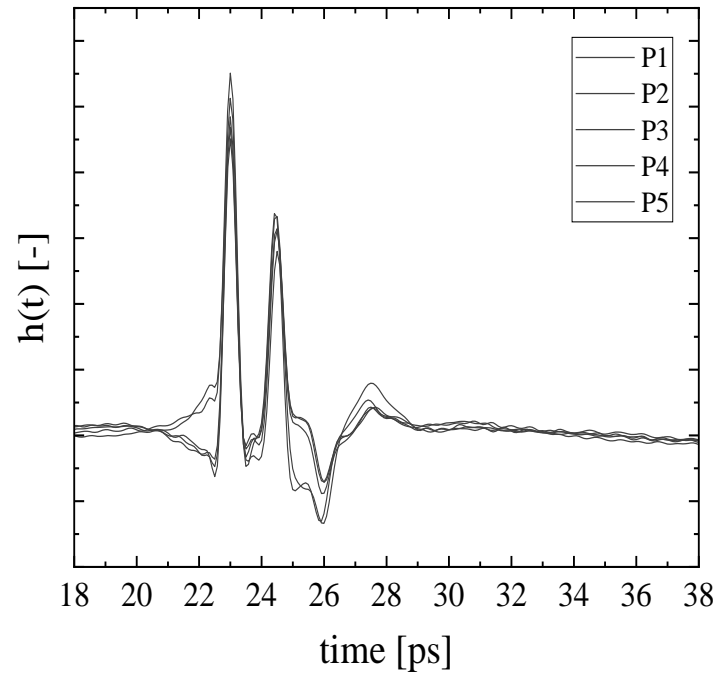
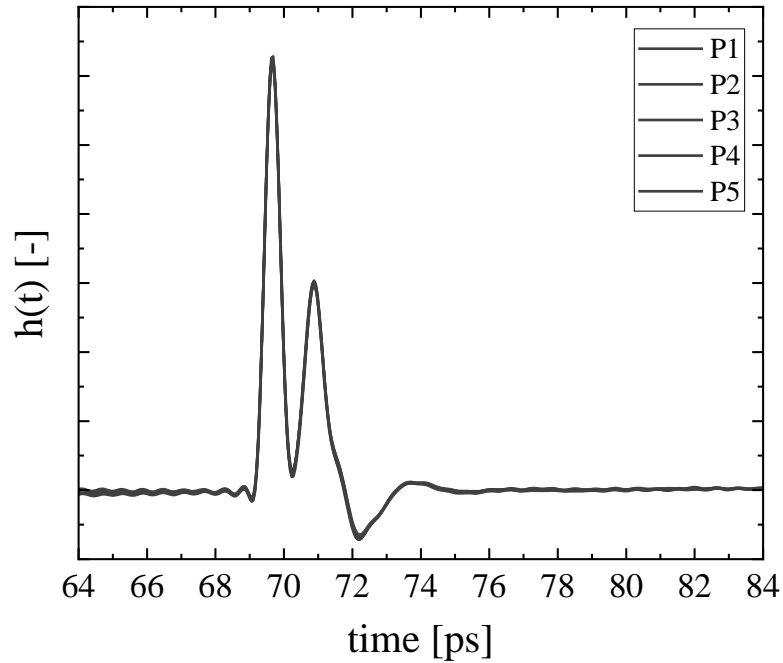
Kathode



- Trägermaterial: Aluminium
- Schichtdickenbereich: 30 μm – 300 μm
- Es gibt verschiedene Materialgruppen für die Beschichtung.
- Leitfähigkeit geringer als bei Anode

Kathode

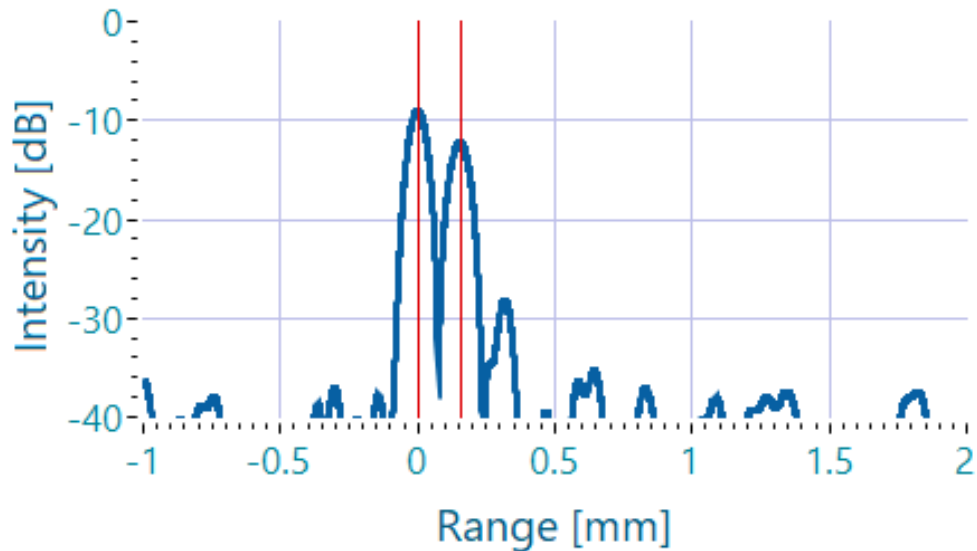
Terahertz-TDS - Verschiedene Hersteller



- Dicke der Beschichtung sehr gut bestimmbar
- Messgeschwindigkeit bei 1.000 Messungen pro Sekunde
- Gleichzeitige Bestimmung von Dichte und Leitfähigkeit vorstellbar

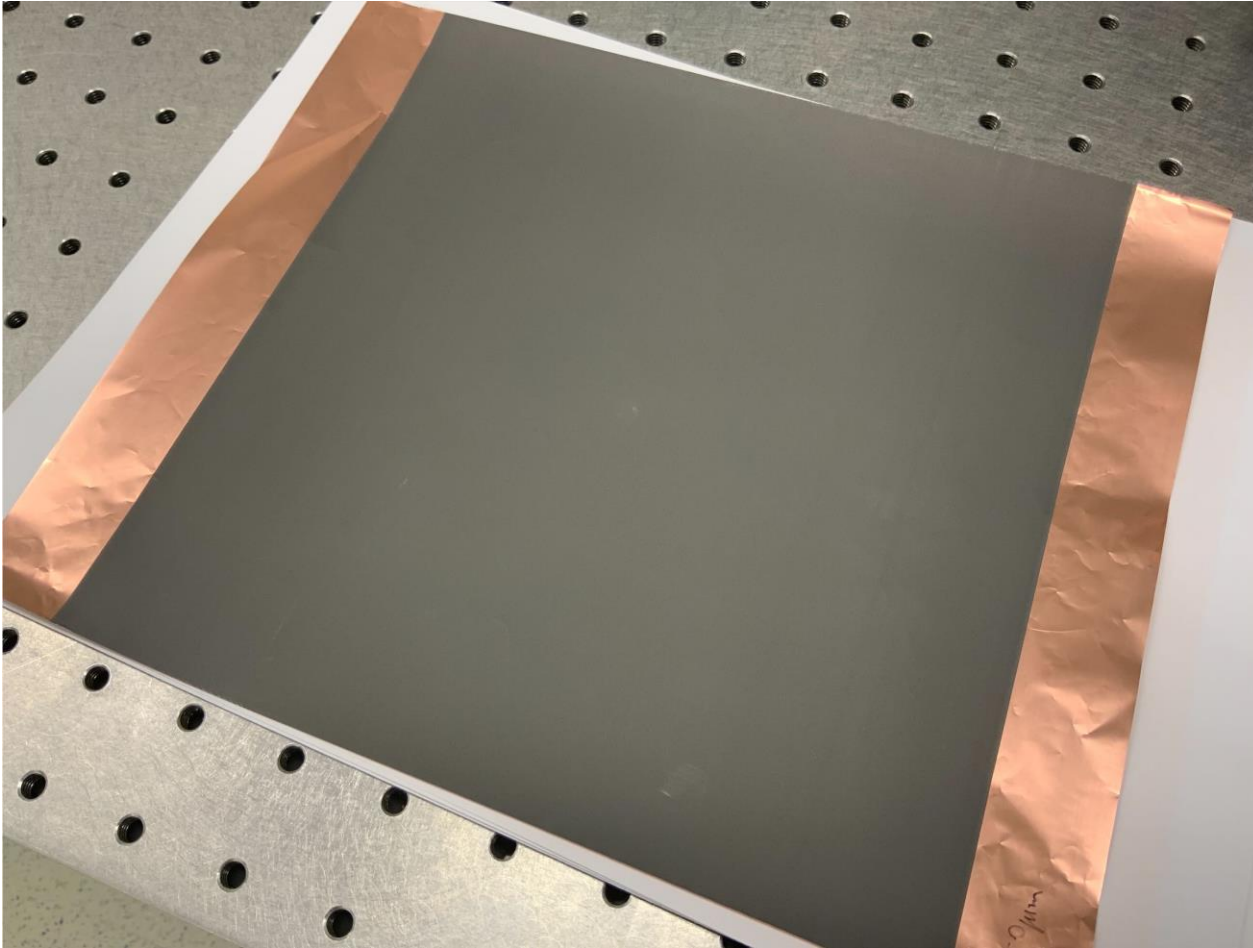
Kathode

Terahertz-FMCW – Beidseitige Messung



- Verwendeter Frequenzbereich 50 – 1.500 GHz
- Messgeschwindigkeit bei 50 Messungen pro Sekunde
- Auswertung vom 10.000 Messungen mittels Peak-Detection:
Vorderseite: $59,0 \pm 0,4 \mu\text{m}$
Rückseite: $62,9 \pm 0,4 \mu\text{m}$

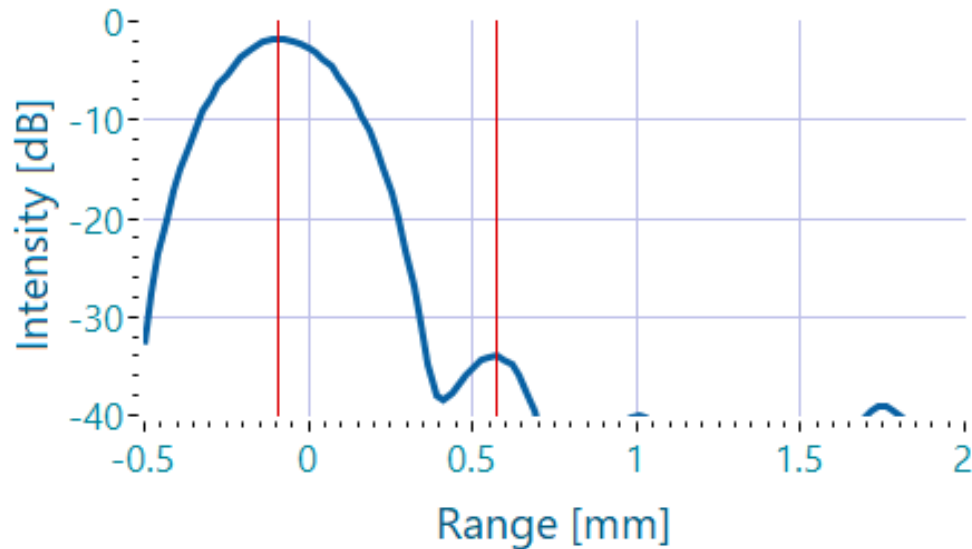
Anode



- Trägermaterial: Kupfer
- Schichtdickenbereich: 35 μm – 240 μm
- Es gibt verschiedene Materialgruppen für die Beschichtung.
- Leitfähigkeit höher als bei Kathode

Anode

Terahertz-FMCW – Beidseitige Messung

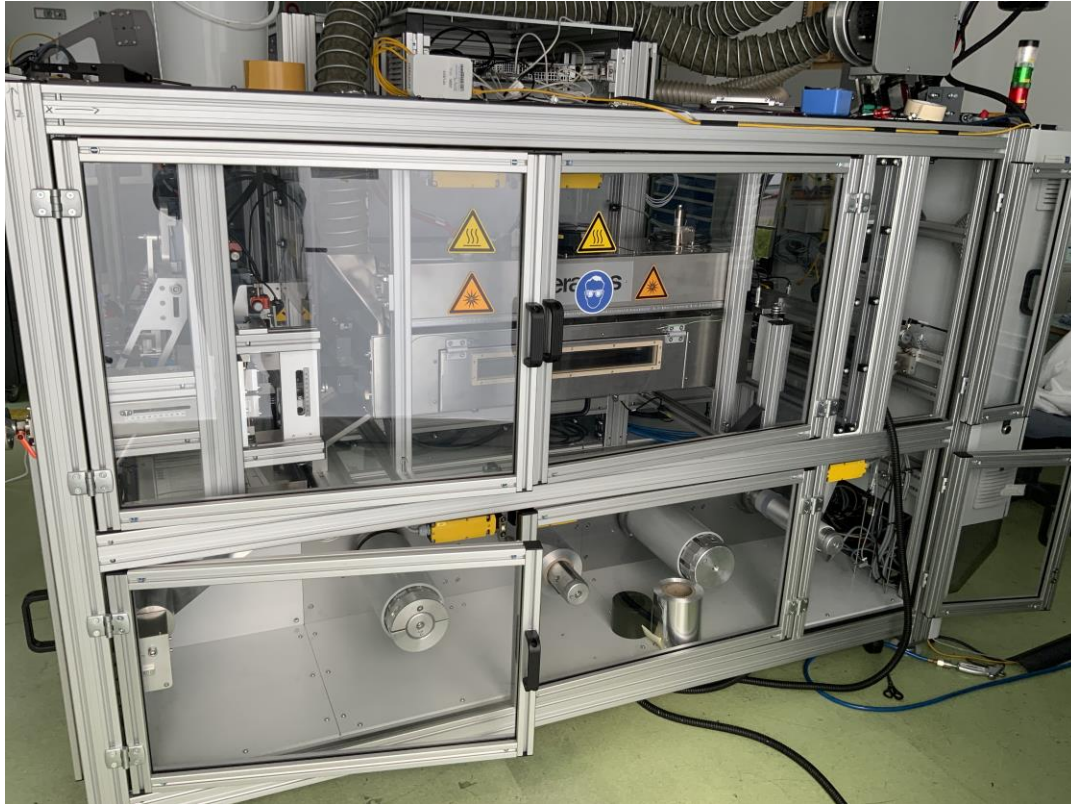


- Wegen der erhöhten Absorption bei höheren Frequenzen reduzierter Frequenzbereich
- Messgeschwindigkeit bei 50 Messungen pro Sekunde
- Auswertung vom 10.000 Messungen mittels Modell-basiertem Ansatz:
Vorderseite: $77,0 \pm 2,4 \mu\text{m}$
Rückseite: $84,0 \pm 3,2 \mu\text{m}$

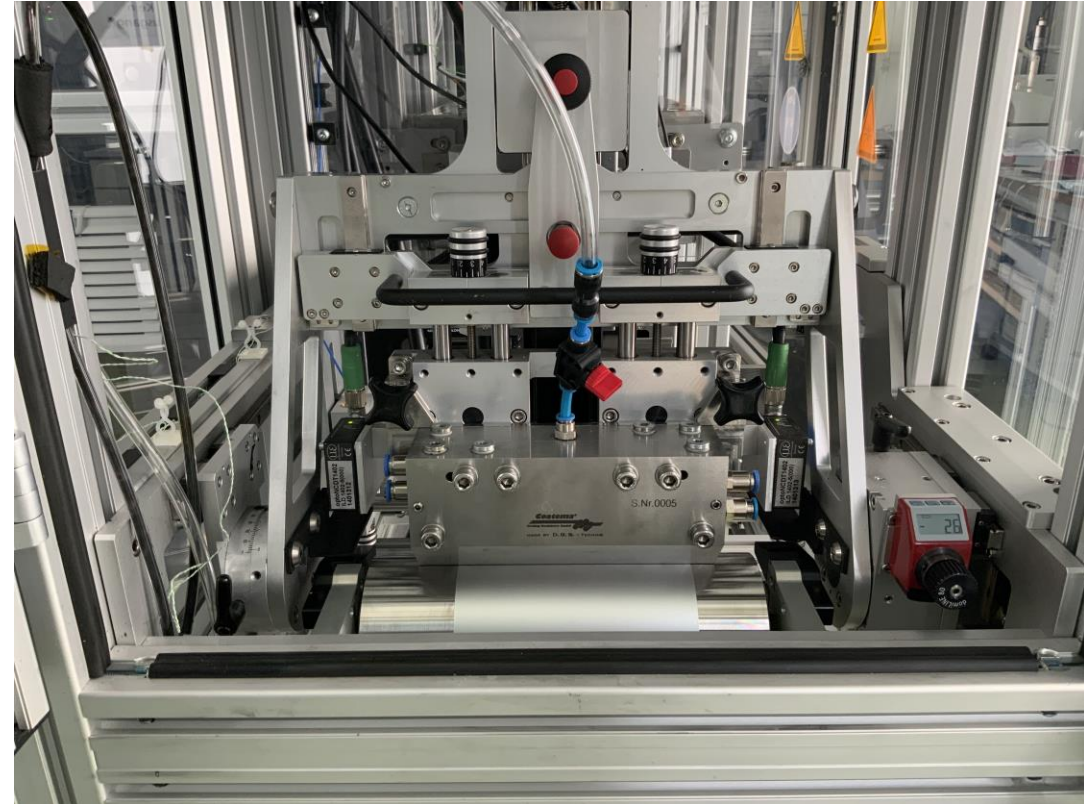
Feldversuch am Fraunhofer IPA

Beschichtungsanlage

Gesamtanlage



Schlitzdüse



Feldversuch am Fraunhofer IPA

Beschichtungsanlage

Laser-Abstandsensoren

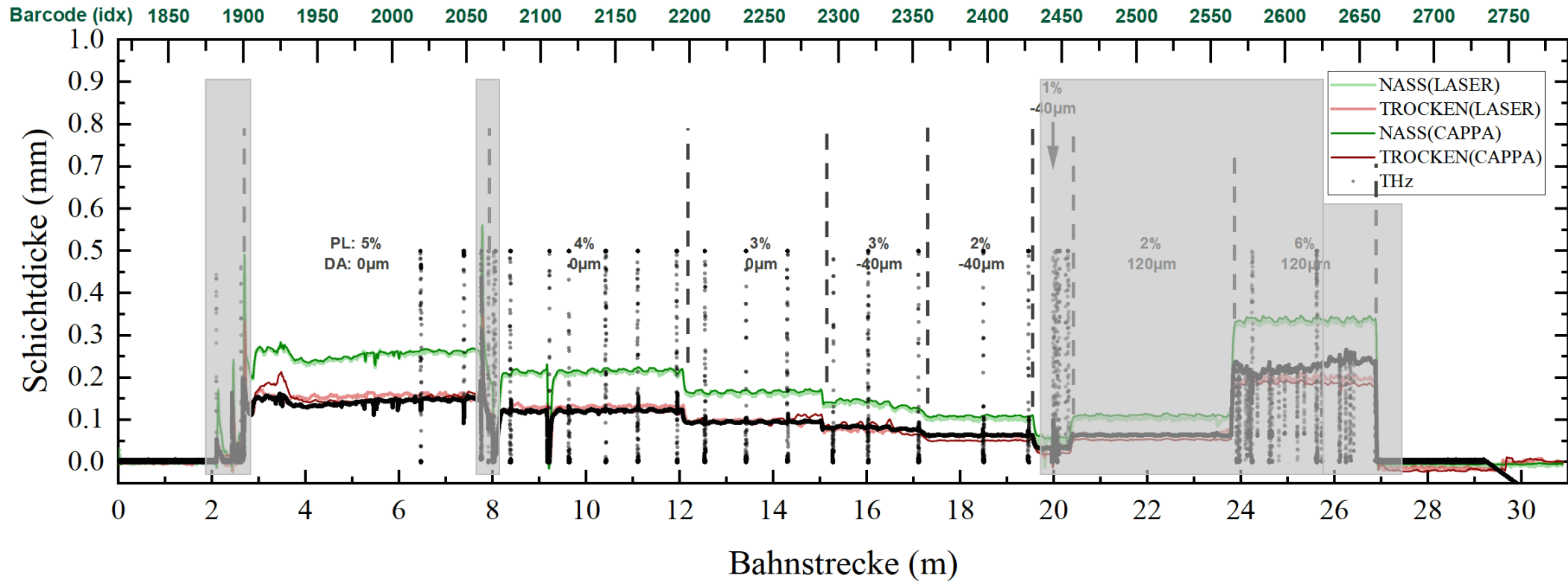


Terahertz-Sensor mit Umlenkspiegel



Feldversuch am Fraunhofer IPA

Schichtdickenmessung



Zusammenfassung und Ausblick

Inline-Dickenmessung der Elektrodenbeschichtung in der Batterieproduktion

1

Die Kathodenbeschichtung kann mit Terahertz-TDS und photonischem Terahertz-FMCW gemessen werden.

2

Die Anodenbeschichtung kann mit photonischem Terahertz-FMCW gemessen werden; in wenigen Fällen auch mit Terahertz-TDS.

3

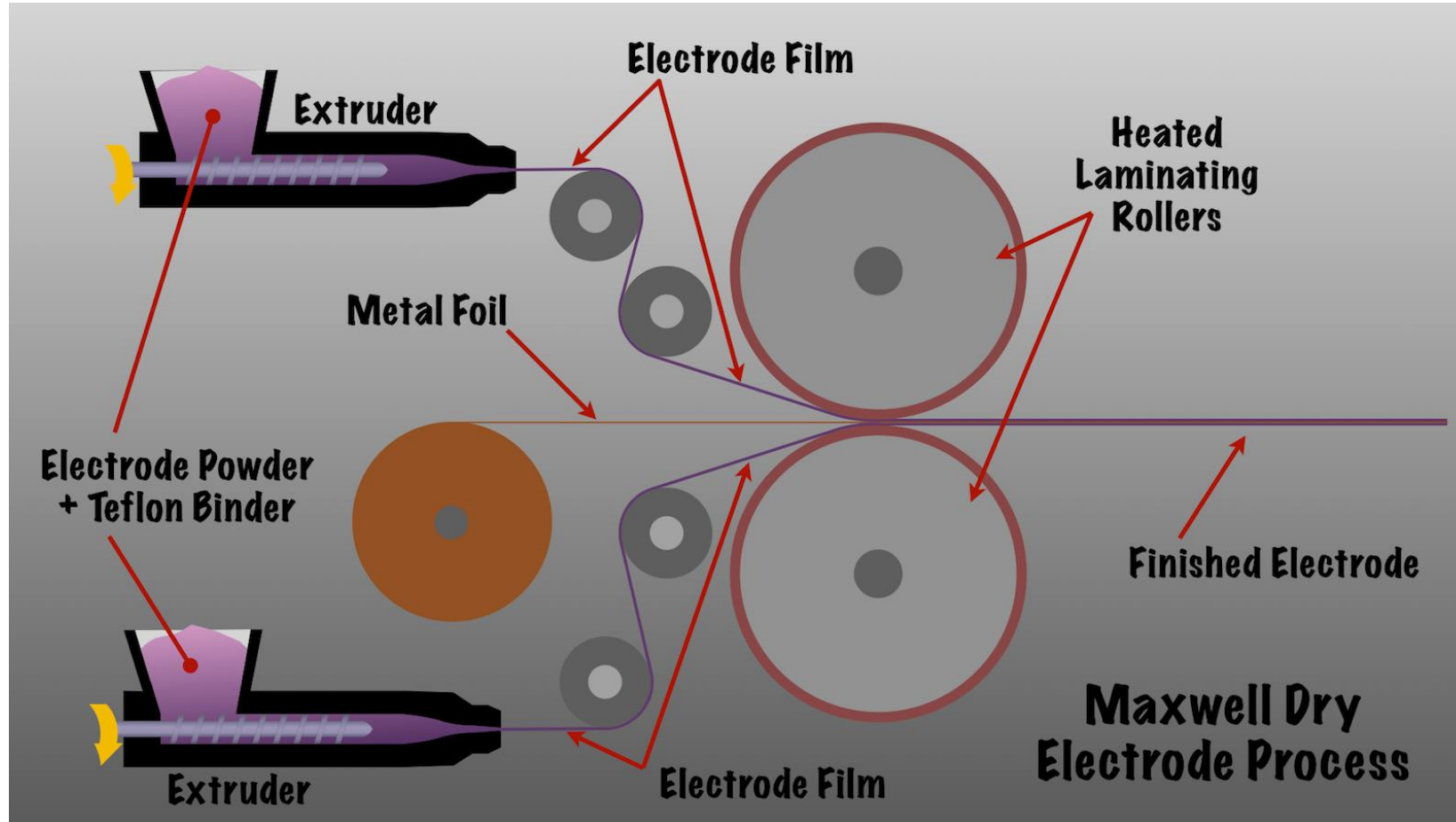
Terahertz-TDS ist ein gut entwickeltes Verfahren, das bereits in der Produktion eingesetzt wird. Photonisches Terahertz-FMCW ist eine neue Technik. Mobiler Labor-Demonstrator ist vorhanden.

4

Feldversuche bei namhaften Industriepartnern und Forschungseinrichtungen sind in Planung.

Ausblick

Trocken-Prozess



- Prozess der Zukunft
- Hier muss die Dickenmessung entweder auf den Walzen oder auf den beidseitig beschichteten Folien erfolgen
→ Transmissionsmessung nicht mehr sinnvoll

Quelle: [Tesla And Maxwell: Assessing The Deal \(NASDAQ:TSLA\) | Seeking Alpha](#)

Kontakt

Dr. Joachim Jonuscheit
Abteilung »Materialcharakterisierung und -prüfung«
Tel. +49 631 31600-4911
Fax +49 631 31600-5911
joachim.jonuscheit@itwm.fraunhofer.de

Fraunhofer ITWM
Fraunhofer-Platz 1
67663 Kaiserslautern
www.itwm.fraunhofer.de

TERAHERTZ

EINE INNOVATIVE UND VIELSEITIGE TECHNIK

FÜR BERÜHRUNGSLOSE UND ZERSTÖRUNGSFREIE

PRÜFUNG!
