

# TeraNix

Verbundvorhaben:

**RegRo – Regenerosion an Rotorblättern**

Teilvorhaben:

**Entwicklung eines semi-portablen  
Terahertz basierten  
Schichtdickenmesssystems zur  
Untersuchung von Schäden an  
Rotorblättern von Windenergieanlagen**

Abschlussbericht des Entwicklungsprojekts

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

betreut vom





## **März 2017**

### **Verbundprojekt im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms (BMU, später BMWi)**

Dieses Entwicklungsprojekt wurde anfangs mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit mit dem Förderkennzeichen 0325633B gefördert und vom Projektträger Jülich (PTJ) fachlich und wirtschaftlich betreut. Im April 2014 wurde das Förderprogramm unter Einbehaltung des Projektträgers vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) übernommen. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

#### **Laufzeit:**

1. Oktober 2013 bis 30. September 2016

#### **Redaktion:**

Dipl.-Ing. S. Nix, Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG  
Dr. Ciprian Zafiu, Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG

#### **Autoren:**

Dr. Ciprian Zafiu, Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG  
Dr.-Ing. Dennis Stanze, Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG  
Dipl.-Ing. S. Nix, Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG

Die Dokumentation stellt die Ergebnisse aus einem Forschungs-Teilprojekt der Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG dar, wobei das Verbundprojekt vom Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) koordiniert wurde. Verantwortlich für den Inhalt sind die jeweiligen Autoren.

#### **Projektkoordinator des Verbundprojektes:**

Dipl.-Ing. Benjamin Buchholz, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Kompetenzzentrum Rotorblatt

Die Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG übernimmt keine Gewähr, insbesondere für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit der Angaben, sowie die Beachtung privater Rechte.

#### **Druck und Verbreitung:**

Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG  
Robert-Perthel-Str. 2  
D-50739 Köln

Version 1.0

# Inhaltsverzeichnis

## Inhalt

1	Einleitung .....	5
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung im Projekt .....	5
1.2	Ausgangssituation und Problemstellung .....	5
1.3	Struktur und Ablauf des Projektes .....	8
2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....	11
2.1	Einleitung zu der Windenergie-Industrie .....	11
2.2	Aktuelle Lage und Projektmotivation .....	11
2.3	THz-Messtechnik .....	13
2.3.1	THz-Strahlung .....	13
2.3.2	Ein Frequenzbereich – mehrere Betriebsarten .....	14
2.3.3	Erzeugungsmethoden für THz-Strahlung .....	14
2.3.4	Eignungsanalyse in Bezug auf die Projektziele .....	15
2.3.4.1	TDTS (Zeitbereichs-THz-Spektroskopie) .....	16
2.3.4.2	CW (Dauerstrich-THz-Strahlung) .....	16
2.3.4.3	FMCW (Frequenzmodulierte Dauerstrich)-THz-Strahlung .....	17
2.4	TDTS als Methode zur Schichtdickenmessung .....	19
2.4.1	Prinzipielle Funktionsweise .....	19
2.4.2	Geräteaufbau .....	22
2.4.3	Messdatenauswertung .....	24
2.4.4	Kriterien für die Findung eines geeigneten Geräts .....	25
2.4.5	Lastenheft .....	26
2.5	Messgerät .....	28
2.5.1	Entscheidungsfindung .....	28
2.5.2	Geräteentwicklung .....	28
2.5.3	Erosionsproben und Messvorrichtung .....	29
2.6	Auswertungsalgorithmus .....	32
2.6.1	Das physikalische Schicht-Modell .....	32
2.6.1.1	Einzelschichten .....	32
2.6.1.2	Mehrlagige Beschichtungen .....	34
2.6.2	Kalibrierung (Materialparameterberechnung) .....	36
2.6.3	Datenauswertung von Schichtdickenmessungen .....	40
2.6.4	Plausibilitätsanalyse (Vergleich mit Mikroskopmessungen von Schliffproben) .....	40
2.6.5	Live-Messung .....	42
2.7	Messungen von Erosionsproben .....	44
2.7.1	Beschichtungssysteme und Kalibrierbeschichtungen .....	44
2.7.2	Beschichtungsfehler .....	45
2.7.3	Materialparameter der Erosionsproben .....	47
2.7.4	Schichtdickenmessungen .....	49
2.7.5	Einfluss der Mischverhältnisse bei 2-Komponenten Beschichtungsstoffen .....	53
3	Zusammenfassung und Perspektiven .....	56
4	Literaturverzeichnis .....	57
5	Danksagung .....	60

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung im Projekt

In zunehmendem Maße werden in unterschiedlichen Industriebereichen neuartige Werkstoffe eingesetzt, die auf Kunststoffen und Kompositmaterialien wie Glas- oder Kohlenstofffaser verstärkten Kunststoffen basieren. Auch solche Materialien benötigen, ähnlich, manchmal aber auch mehr als ihre Vorgänger, die auf Metall basieren, einen entsprechenden Schutz gegen Umgebungseinflüsse, wie z.B. Licht oder Witterung. Dem entsprechend wurden parallel zu diesen Werkstoffen entsprechende Beschichtungssysteme entwickelt, die ganz gezielt und spezifisch für die Einsatzart abgestimmt sind. Somit stellt sich von der Geburtsstunde solcher Beschichtungen das Problem der Qualitätssicherung und implizit der Messbarkeit. Dieses Problem steht damit in Zusammenhang, dass nur ein relativ eng tolerierter Dickenbereich den gewünschten Schutz und Funktionalität sichern kann.

Auch im Windenergiebereich spielten Kompositmaterialien von Anfang an eine sehr wichtige Rolle. Glasfaser, neuerdings in größeren Modellen Kohlefaser verstärkter Kunststoff, sind in der Fertigung von Rotorblättern unerlässliche Materialien. Für diese sehr großen, jedoch beweglichen Systemteile muss eine äußerst stabile Konstruktion mit einem minimierten Gewicht in Einklang gebracht werden. Leider sind diese Kompositmaterialien äußerst anfällig für Witterungseinflüsse. Es muss dabei beachtet werden, dass Windenergieanlagen dauerhaft, teilweise über Jahrzehnte, den unterschiedlichen Wetterverhältnissen ausgesetzt sind. Außerdem erfahren die Rotorblätter gewaltige mechanische Belastungen insbesondere bei Vollast. Blattspitzengeschwindigkeiten von ca. 300km/h sind bei 50m oder 60m langen Rotorblättern keine Seltenheit und bringen das schwer beherrschbare Problem der Regen-, Hagel-, in manchen Regionen sogar der Staub- oder Sanderosion mit sich. Naturgemäß beeinträchtigt eine unregelmäßige, raue Oberfläche die Aerodynamik der Rotorblätter und sorgt für einen beachtlichen Effizienzverlust der gesamten Anlage, selbst wenn die Beschädigung nur einen sehr geringen Anteil der Blattoberfläche betrifft.

Das Ziel des Verbundprojektes war die Entwicklung einer objektiven und reproduzierbaren Methode und der entsprechenden Messkriterien für die Untersuchung der Regenerosion unter unterschiedlichen Umweltbedingungen an Rotorblattbeschichtungen.

Ziel des Teilvorhabens unseres Unternehmens war die Entwicklung einer terahertzbasierten, zerstörungsfreien Messmethode für die Untersuchung der Rotorblattbeschichtungen in unterschiedlichen Phasen der Regenerosion, vor allem bei der Entstehung der Erosionsschäden, wenn diese an der Oberfläche noch nicht erkennbar sind.

## 1.2 Ausgangssituation und Problemstellung

Seit mehr als 35 Jahren hat sich das Unternehmen Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG (Automation) auf die Entwicklung und Fertigung von Schichtdickenmessgeräten für den industriellen Einsatz spezialisiert. Die verwendeten Messverfahren basieren auf unterschiedlichen magnetischen Effekten – entweder auf dem Einsatz von Permanentmagneten, auf magnetischer Induktion oder auf der Anregung von Wirbelströmen im Beschichtungsträger – und können daher nur auf metallischen Untergründen verwendet werden.

Prinzipiell nutzen alle Messverfahren die physikalisch bekannte quadratische Abnahme der Magnetfeldstärke mit dem Abstand vom metallischen Substrat aus. Bei einer berührenden

Messung gibt diese Magnetfeldabnahme direkten Aufschluss über die Beschichtungsdicke, wenn das Messgerät vorher bei direkter Kontaktierung auf das Substrat kalibriert wurde. Durch intensive Entwicklungsarbeit konnten bekannte Messschwierigkeiten technisch gelöst werden und das Unternehmen erwarb diesbezüglich mehrere Patente. Die prinzipielle Messbarkeit nur auf metallischen Untergründen stellte jedoch eine große Einschränkung dar und angesichts des Bedarfs in der Industrie für eine Messmethode, die auch auf nicht-leitenden Substraten funktioniert, hat das Entwicklungsteam seit der Jahrtausendwende intensiv nach alternativen, zerstörungsfreien Messmethoden gesucht.

So hat sich das Unternehmen mit dem Thema der Ultraschallmessung auseinander gesetzt. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass diese Messtechnik aufgrund des in vielen Fällen nicht genügend ausgeprägten Materialkontrasts zwischen den unterschiedlichen Schichten eines Beschichtungssystems nur begrenzt einsetzbar ist. Außerdem ist diese Messtechnik grundsätzlich berührend, was in manchen Anwendungsfällen nicht gewünscht oder erlaubt ist.

Anschließend hat das Unternehmen zusammen mit Partnern aus dem akademischen Bereich die Entwicklung einer neuartigen Messmethode basierend auf der Impuls-Thermografie vorangetrieben. Die Ergebnisse zeigten aufgrund von Simulationen und physikalischen Modellierungen, dass eine prinzipielle Messbarkeit, selbst an mehrschichtigen Beschichtungssystemen, gegeben ist. Die praktischen Untersuchungen scheiterten jedoch an den Materialeigenschaften gängiger Beschichtungen und an der nicht-idealen Impulsform der Laserquellen. Relativ gute empirische Ergebnisse liefert diese Methode nur bei Einzelschichten bis zu einer Maximaldicke von ca. 100µm.

Auch die Mikrowellen-Messtechnik wurde ausführlich untersucht. Aufgrund der relativ großen Wellenlängen, kann diese Technik generell nur dickere, mit der Wellenlänge vergleichbare Schichten auflösen. Auch die Messauflösung leidet leider unter dieser physikalischen Begrenzung. Nur in einer speziellen, resonanten Konfiguration sind dünnere Beschichtungen, mit guter Auflösung messbar. Leider setzt diese resonante Methode ein leitendes oder zumindest halb-leitendes Substrat voraus, was die praktische Einsetzbarkeit drastisch reduziert.

Auch andere, zum Teil sehr exotische Messmethoden wurden, zumindest auf der Basis der online verfügbaren Informationen, bewertet. Darunter zählen abgeleitete Ultraschall Techniken (Ultraschall mit Lufteinkopplung, Ultraschall mit Phasenarray, Ultraschall Tomografie, Laser induzierter Ultraschall), optische Verfahren aller Art (chromatisch-konfokale Technik, Infrarot-Absorption, optische Kohärenztomografie, passive Thermografie, Ultraschall angeregte lock-in Thermografie, induktiv angeregte Aktiv-Thermografie, Defektoskopie, Shearografie), sowie radiologische Messmethoden (Beta-Rückstreuung, Röntgen-Streuung).

Allein die Messmethode basierend auf Terahertz-Strahlung (THz) hat sich nach vorläufigen Untersuchungen als erfolgsversprechende Alternative erwiesen. Maßgebend dafür ist ihr hohes Durchdringungsvermögen für dielektrische Materialien, sowie die – im Gegensatz zur Röntgenstrahlung – geringe, nichtionisierende Photonenenergie gegeben durch die relativ geringe Frequenz, die sie in Bezug auf lebende Organismen völlig unbedenklich macht.

Bei dieser Messtechnik handelt es sich um die sogenannte Zeitbereichs-THz-Spektroskopie. Hierbei werden mittels Ultrakurzpulslaser (Femtosekunden-Laser) sehr kurze elektromagnetische Impulse mit Frequenzen zwischen 100GHz und 3-4THz in Halbleiter-Antennen produziert, die die Messproben beaufschlagen. Wie alle elektromagnetischen Wellen, erfahren auch die THz-Wellen bei allen Materialübergängen Reflexionen. Werden die Proben in Reflexion untersucht, so werden Tiefeninformationen erhalten, da die Reflexionen an tiefer liegenden Übergängen, aufgrund der längeren Laufzeit durch die Materialien, zeitverzögert registriert werden.

Dadurch, dass sich das Unternehmen auch in der Vergangenheit neben der herkömmlichen, magnet-induktiven Messtechnik, mit Machbarkeitsstudien zum Thema THz-Messtechnik in Bezug auf die Vermessung von ein- oder mehrlagigen Beschichtungssystemen beschäftigt und zwischen 2008 und 2011 auch ein gefördertes Projekt zur Untersuchung der THz-Messtechnik durchgeführt hat, war diese Entwicklungsrichtung schon im Vorfeld des TeraNix Projektes fest verankert und thematisch in die Unternehmensgesamtstrategie gut eingegliedert. Das Projekt bot die Gelegenheit, den Sprung von der Machbarkeitsstudie hin zu einem Demonstrator zu realisieren, mit Hilfe dessen Erosionsproben im Verbundprojekt analysiert werden konnten. Dadurch, dass die Erosionsproben hinsichtlich der Beschichtungen möglichst realitätsnah gebaut worden sind, haben alle gewonnenen messtechnischen Erkenntnisse eine unmittelbare Relevanz für die Feldanwendung dieser Messtechnik in der Windenergieindustrie.

Um das Potential der hier entwickelten Messtechnik über die Grenzen der Windenergieindustrie hinaus zu erörtern, wurden unabhängig vom Projektrahmen zahlreiche Kundenbesuche veranstaltet, wobei besonderes Interesse auf die aus damaliger und heutiger Sicht viel versprechenden Industriesparten gelegt wurde.

Die Einbindung des Projektes in die Vorgehensweise des Unternehmens ist in

Abbildung 1 gezeigt.

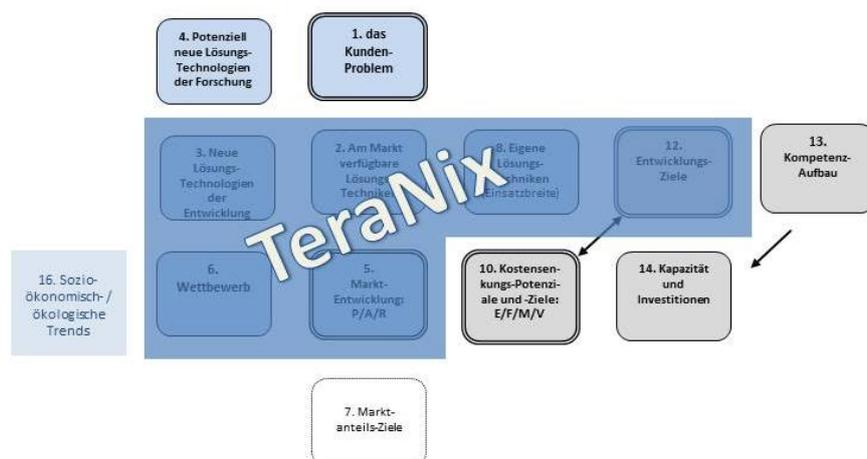


Abbildung 1: Struktur der Vorgehensweise aufbauend auf der Unternehmensstrategie

### 1.3 Struktur und Ablauf des Projektes

Geförderte Antragsteller im Projekt waren das Fraunhofer IWES als Haupt- und Automation Dr. Nix und Fraunhofer IFAM als Nebenantragsteller. Alle anderen Projektmitglieder waren nicht-geförderte Beteiligte, die Proben oder Fachwissen beigesteuert haben, oder das Projekt aus reinem wirtschaftlichem Interesse aktiv begleitet haben.

Für das TeraNix-Projekt arbeiteten Automation Dr. Nix, das Fraunhofer IWES und alle anderen Projektmitglieder erfolgreich zusammen.

Die grundsätzliche Arbeitsteilung sowie die Zusammenarbeit sind in der graphischen Übersicht in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Zusammenarbeit der Projektpartner Schnittpunkte zwischen dem Hauptprojekt „RegRo“ und Teilprojekt „TeraNix“

Die Bearbeitung des Projektes gliedert sich in neun Arbeitspakete, die im Folgenden beschrieben sind.

**Arbeitspaket 1:** In der ersten Projektphase ist von der Firma Automation Dr. Nix ein Lastenheft zur Festhaltung aller erforderlichen messtechnischen Eigenschaften der zu entwickelnden THz-Messtechnik erarbeitet worden. Dieses Lastenheft wurde bei den ersten Projekttreffen vorgestellt und die technischen Eigenschaften wurden einer Abstimmung unter allen Projektmitgliedern unterzogen. Nach einigen Iterationen ist der komplette Satz an Messeigenschaften und Funktionsbedingungen in einem endgültigen Lastenheft zusammengefasst worden. Es beinhaltet in einer standardisierten Form unter anderen Angaben über den Produkteinsatz, die Lager- und Betriebsbedingungen, sowie die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen.

**Arbeitspaket 2:** Anhand dieser im Projekt benötigten Eigenschaften ist anschließend die Suche nach einem geeigneten THz-Gerät bzw. Hersteller angefangen worden. Dabei sind alle uns bekannten Hersteller von THz-Messtechnik untersucht und deren Messgeräte auf die Tauglichkeit für die im Projekt vorgesehene Aufgabe hin bewertet worden. Einige von ihnen wurden auch besucht und die Messgeräte wurden mit realen Proben aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen getestet. In zwei Iterationen wurde schließlich ein Messgerät ausgesucht, mit dessen Hersteller die Fa. Automation Dr. Nix dann in engeren Kontakt getreten ist, um die Auslegung und Herstellung des THz-Messgeräts gemäß den Vorgaben aus dem Lastenheft sicherzustellen. Darüber hinaus hat sich Automation Dr. Nix aktiv in alle technischen Details der Geräteauslegung eingesetzt insbesondere im Design des THz-Messkopfes und der Messdatenerfassung.

**Arbeitspaket 3:** Der in der Standardausführung vorhandene THz-Messkopf hatte einen relativ langen THz-Strahlweg, mit sehr begrenzten Einstellmöglichkeiten, daher musste er neu konstruiert werden. Dabei ist großer Wert auf die vernünftige Einstellbarkeit der THz-Antennen und auf einen möglichst kleinen THz-Messfleck gelegt worden. Dieser Schritt erfolgte in zwei Iterationsschritten. Auch die faseroptische Verbindung zwischen Messkopf und THz-Messgerät wurde auf 2,5 m verlängert, um einen möglichst großen Schwenkradius um das Messgerät herum zu gewährleisten.

**Arbeitspaket 4:** Für die Datenaufbereitung und -auswertung war der Einsatz eines industriellen Computerboards vorgesehen. Aufgrund der benötigten Rechenleistung für die umfangreiche Messdatenauswertung und der fehlenden Kompatibilität mit der Software-Entwicklungsumgebung, wurde jedoch entschieden, dieses Computerboard durch einen vollwertigen Windows-Laptop zu ersetzen. Für die Messauslösung und Datenanzeige wurde in den Messkopf ein kleines, klappbares Display mit Touch-Funktion integriert.

**Arbeitspaket 5:** Für die Umrechnung der gemessenen Zeitintervalle zwischen den THz-Reflexionsimpulsen in Materialdicken wurde ein umfangreiches Softwarepaket entwickelt. Ausgehend von einem physikalischen Reflexionsmodell an einer mehrlagigen Schichtstruktur, wurden die Routinen für ein mehrstufiges Auswertungsverfahren entwickelt. Parallel dazu wurde auch eine Kalibriersoftware erarbeitet, um die für die THz-Messdatenauswertung zwingend erforderlichen Materialparameter im THz-Spektralbereich für die in den Beschichtungssystemen vorkommenden Beschichtungsstoffe zu ermitteln.

**Arbeitspaket 6:** Gleichzeitig mit der Entwicklung der Kalibrier- und Auswertungssoftware hat auch die Beschaffung von Projekt relevanten Proben und die Erprobung der in Entwicklung befindlichen Softwarepakete an den von diesen Proben verfügbaren THz-

Messdaten angefangen. Es wurden von zwei der beteiligten Projektmitglieder GFK-Proben mit unterschiedlichen, mehrlagigen Beschichtungssystemen angefertigt und entsprechende Kalibrierproben von allen dort vorkommenden Materialien vorbereitet. Durch das Geschäftsfeld dieser Projektmitglieder konnten die Proben in zwei große Kategorien geteilt werden: Beschichtungssysteme unterschiedlicher Generation, die in flüssiger Form als Farbe aufgetragen werden, und Beschichtungen, die in Form von selbstklebenden Schutzfolien verfügbar sind.

**Arbeitspakete 7 und 8:** es war geplant, im Gesamtprojekt die Beschichtungsproben zuerst über längere Zeit unter leichter bis mäßiger Beanspruchung zu erodieren, bis ähnliche Schäden wie bei realen Windenergieanlagen auftreten. In einer zweiten Phase war beabsichtigt, die Erosionsintervalle zu verkürzen bei gleichzeitiger Erhöhung der Beanspruchung durch erhöhte Drehgeschwindigkeit. Anhand der vorhandenen Erfahrungen eines der Projektbeteiligten im Bereich der simulierten Regenerosion bei Rotorblattbeschichtungen, wurden jedoch diese zwei Projektphasen zusammengelegt und nur Proben mit verkürzten und intensiven Beanspruchungen produziert. Für die Vermessung der Schichtdicken an diesen Proben wurde das Messgerät mit seiner optimierten Auswertungssoftware eingesetzt.

Für das Projekt beantragten wir Sachressourcen und Geräte, die vorher nicht in dieser Form für andere Verwendungszwecke im Unternehmen benötigt wurden.

Die Tabelle 1 stellt den zeitlichen Verlauf des Projektes nach Arbeitspaketen dar.

Arbeitspaket	Beginn	Ende	Aufwand / Stunden
AP1: Erarbeitung eines Lastenhefts für die Auslegung des THz-Messgeräts in Zusammenarbeit mit IWES	Oktober 2013	November 2013	420
AP2: Auslegung und Fertigung eines THz-Messsystems	November 2013	September 2014	1320
AP3: Entwicklung eines THz-Messkopfes	März 2014	August 2014	430
AP4: Integrierung eines industriellen Computerboards zur Ansteuerung, Datenauswertung und Anzeige	Mai 2014	September 2014	250
AP5: Anpassung der Auswertungssoftware für reale Messdaten	August 2014	November 2014	1420
AP6: Erprobung des THz-Messsystems	November. 2014	Januar 2015	850
AP7+8: Kurz- und Langzeitversuche im Gesamtprojekt mit anschließenden Messungen	März 2015	September 2016	1077
		Summe:	5767

Tabelle 1: *Arbeitspakete und Arbeitsaufwand*

## **2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse**

### **2.1 Einleitung zu der Windenergie-Industrie**

Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist laut dem BMWi eine zentrale Tragsäule der Energiewende. So trugen im Jahr 2016 regenerative Energiequellen mit ca. 30% zum in Deutschland gesamt produzierten Bruttostrom bei – Tendenz wachsend [1]: bis zum Jahr 2020 sollen es mindestens 35% und bis zum Jahr 2035 solle es zwischen 55% und 60% sein. Fast die Hälfte davon wird momentan mit 12,3% durch die Nutzung der Windkraft produziert und repräsentiert damit den größten Anteil unter anderen „grünen“ Energiequellen wie Wasserkraft, Biomasse, Fotovoltaik und Geothermie.

Somit spielt die Windenergieindustrie eine sehr gewichtige Rolle in der Erreichung der Klimaschutzziele der nächsten Generationen. So wurde im ersten Halbjahr 2016 eine Windenergieleistung von netto 1.892MW am Land zugebaut [2]. Dies entspricht einem Zuwachs von 73% im Vergleich zum Vorjahreszeitraum (1.093MW). Die Prognose bis Jahresende 2016 war zwischen 4000 und 4400 MW. Auch für das Jahr 2017 wird aufgrund der bereits erteilten Genehmigungen, die eine noch gesetzlich festgelegte Vergütung garantiert, mit einem Zubau in vergleichbarer Höhe gerechnet. Aufgrund der Sonderdegression ab März 2017 und der verschärften Degression ab dem darauf folgenden Oktober ist jedoch mit einem klaren Interessensverlust zu rechnen, wodurch der Ausbau dann definitiv weniger attraktiv gemacht wird. Experten rechnen jedoch auch unter diesen Umständen eher mit einem konstanten Energievolumen, das trotz der sinkenden Anzahl an installierten Anlagen durch höhere Erträge pro Anlage zu erklären ist.

Auch international war im Jahr 2016 der Weltmarkt für Windkraftanlagen am Land auf ca. 55GW abgeschätzt, was sich in den folgenden Jahren laut Prognosen fortsetzen wird. Deutsche Unternehmen haben im weltweiten Konsolidierungsprozess die Chance, ihre Position in Wachstumsmärkten zu stärken. China bleibt jedoch weiterhin ein verschlossener Markt aufgrund der strengen Auflagen bzgl. des lokalen Anteils der Wertschöpfung. Hier bedarf z. B. einer politischen Intervention seitens der Bundesregierung für faire Marktchancen der deutschen Windindustrie.

### **2.2 Aktuelle Lage und Projektmotivation**

Trotz der positiven Entwicklung und der Position der Windenergie als bedeutender Hoffnungsträger in der Erreichung der klimapolitischen Ziele, haben auch Windenergieanlagen relativ enge Grenzen für eine effiziente Funktionsweise. So ist die Bildung einer laminaren Grenzschichtströmung an den Rotorblattoberflächen unerlässlich für eine gute Energieeffizienz der Gesamtanlage. Diese laminare Strömung wird maßgeblich durch das Rotorblattprofil aber auch von der Beschaffenheit der Blattoberfläche insbesondere an den Flügelvorderkanten bestimmt. So können z.B. kleine Verschmutzungen oder die zeitliche Zunahme der Rauigkeit an der Rotorblattnase zu drastischen Leistungseinbußen der Gesamtanlage führen. Insbesondere die Blattvorderkante ist durch Regen, Staub, Sand und Schmutz starken Beanspruchungen ausgesetzt, die durch Umwelteinflüsse wie Temperaturwechsel, Meersalz und Sonneneinstrahlung massiv verstärkt werden. Dies kommt dadurch zustande, dass die Blattspitzen unter Vollast sehr hohe Umlaufgeschwindigkeiten von teilweise um die 300km/h, in einzelnen Fällen bis zu 500km/h erreichen können. Das Ergebnis ist eine mit der Zeit zunehmende Aufrauung der wichtigen aerodynamischen

Oberflächen aufgrund mechanischer Abrasion. Zusätzlich erhöht die gestörte Strömung auch die Geräuschemissionen der Rotoren.

In Zukunft sind zwecks Effektivitätssteigerung höhere Blattspitzengeschwindigkeiten geplant. Da die o.g. Oberflächenschädigungen in einem überproportionalen Verhältnis zu der Rotordrehgeschwindigkeit stehen, befindet sich zumindest der Offshore-Bereich in einem akuten Bedarf nach verbesserten, erosionsbeständigen Beschichtungssystemen. Ein nicht vernachlässigbarer Faktor ist im Offshore-Bereich zusätzlich die Tatsache, dass der Wartungs- und Reparaturaufwand auf See erheblich ist. Daher ist eine Optimierung der heutigen Konzepte unentbehrlich. So werden hier Betriebsdauern ohne erhebliche Beeinträchtigung der Effizienz von ca. 20 Jahren erwartet. Die Hersteller von Oberflächenschutzsystemen aber auch Rotorblathersteller und schließlich auch Windparkbetreiber benötigen daher möglichst verlässliche Vorhersagen über die Beständigkeit dieser Beschichtungen.

Ein großes Hindernis ist zur Zeit die Gegebenheit, dass es kein etabliertes und objektiv anerkanntes Verfahren zur Beurteilung der Erosionsbeständigkeit von Lack- und Beschichtungssystemen gibt, welches im Hinblick auf variable Testbedingungen wie Umlaufgeschwindigkeit, Klima oder Sonneneinstrahlung, speziell für die Prüfung von Rotorblättern abgestimmt wäre. Es gibt grundsätzlich zwei Erosionsmethoden: durch Beaufschlagung mit einem starken Wasserstrahl (ähnlich wie beim Hochdruckreiniger oder bei wasserstrahlbasierter Materialtrennung) und die sogenannte Helikopter-Methode, wobei die Probe mit hoher Geschwindigkeit durch ein mittels Düsen erzeugtes Regenfeld rotiert wird. Erfahrungsgemäß ist die zweite Methode realitätsnaher und erzeugt Schadensbilder, die denen von im Feld erodierten Rotorblättern ähnlich sehen.

Aus diesem Grund wurde am Fraunhofer IWES im Rahmen des Kooperationsprojektes „RegRo“ ein klimatisierter Regenerosionsteststand aufgebaut und darauf basierend eine objektive Prozedur zur Untersuchung der Regenerosionsbeständigkeit von Beschichtungssystemen für Windkraftrotoren erarbeitet. Dabei wurden Belastungssimulationskonzepte für möglichst realitätsnahe Erosionsproben aus Glasfaser verstärktem Kunststoff (GFK) festgelegt, die sowohl mit älteren, im Feld vorhandenen, als auch neu entwickelten Lacksystemen beschichtet wurden.

Gleichzeitig ist in der Fa. Automation Dr. Nix in dem Teilprojekt „TeraNix“ ein neuartiges Schichtdickenmessgerät für die Untersuchung der Anfangsstadien der Regenerosion entwickelt worden. Die Aufgabe dieses Geräts im Gesamtprojekt war, unsichtbare, oberflächennahe oder tieferliegende Fehlstellen sichtbar zu machen, die als Vorläufer von später an der Oberfläche sichtbaren Schäden vermutet werden. Vermutet wurde auch ein relativ gleichmäßiger Materialabtrag an der Lackoberfläche, der nach fortlaufender Erosion in punktuellen, kraterartiges Materialversagen übergeht.

Gleichzeitig verfolgt das Unternehmen Automation seit mehreren Jahren das strategische Ziel, die im TeraNix-Projekt entwickelte THz-Messtechnik auch in anderen vielversprechenden Anwendungsbereichen zu erproben und zu etablieren. Durch das Vorhandensein der Messtechnik und Auswertungsmethode wurde für das Unternehmen auch möglich, alle vielversprechenden Industriebereiche, wo diese Messtechnik Anwendung finden könnte, intensiver zu recherchieren und entsprechende Kundenbesuche, Vorführungen und Messungen mit repräsentativen Proben durchzuführen.

## 2.3 THz-Messtechnik

Der Begriff Terahertz-Messtechnik (THz) ist ein sehr umfangreicher Allgemeinbegriff, der eine Fülle von unterschiedlichen Messmethoden umfasst, die auf die Verwendung von THz-Wellen basieren.

### 2.3.1 THz-Strahlung

Terahertz-Wellen (THz) sind elektromagnetische Wellen, mit einem Frequenzbereich zwischen 100GHz und 10THz ( $10^{11}$ - $10^{13}$ Hz). Bis in die frühen 90-er Jahren blieb dieser Wellenlängenbereich völlig unerforscht, da er sich am Übergang zwischen dem bekannten Mikrowellenbereich – dem Bereich der höchsten, mit elektronischen Mitteln erzeugbaren Frequenzen – und dem Infrarotlichtbereich – dem Bereich der tiefsten, mit optischen Methoden generierbaren Frequenzen – befindet (siehe Abbildung 3). Dadurch blieb dieser Frequenzbereich sowohl für elektronische als auch für optische Methoden fast komplett verschlossen.

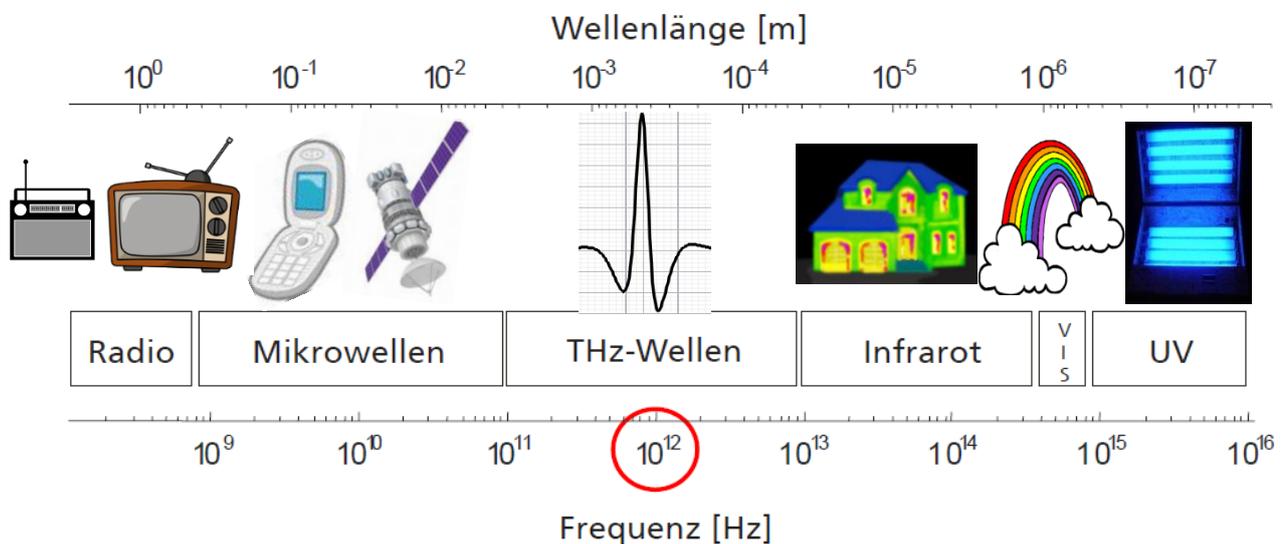


Abbildung 3: Der THz-Bereich innerhalb des elektromagnetischen Spektrums

Gleichzeitig vereint aber die THz-Strahlung einige Vorteile der angrenzenden Spektralbereiche. So ist das hohe Durchdringungsvermögen von nicht-leitenden Stoffen die Eigenschaft, die diese Strahlung so interessant macht. Sie ist auf eine Photonenenergie zurückzuführen, die niedriger als die Bandlücke von dielektrischen Materialien ist. Diese Eigenschaft eröffnet eine ganze Fülle von Anwendungsmöglichkeiten.

Relativ lange Zeit bevor diese Strahlen erzeugt und gemessen werden konnten, sprach die wissenschaftliche Welt von der so-genannten Terahertz-Lücke im elektromagnetischen Spektrum. Aufgrund dieser Übergangslage im elektromagnetischen Spektralbereich können diese Frequenzen durch ein Gemisch von elektronischen und optischen Prozessen, meistens durch Frequenzuntermischung optischer Frequenzen oder durch Frequenzvervielfachung von Mikrowellensignalen erzeugt werden.

Die Anfänge der THz-strahlung reichen zurück bis zum Anfang des letzten Jahrhunderts, wo in der damaligen Physikalisch Technischen Reichsanstalt Strahlungsnormale und Detektoren bis in den THz-Spektralbereich entwickelt wurden [3]. Auch die in derselben Periode vom Berliner Physikprofessor Heinrich Rubens entwickelte Reststrahlenmethode war in der Lage, THz-Wellen mit einer Frequenz ab 6THz zu messen.

In der Natur ist die THz-Strahlung überall vorhanden. Allein die thermische Strahlung bei Raumtemperatur fällt zum großen Teil in diesen Spektralbereich. Viele physikalische Effekte spielen sich in einem Energiebereich ab, der der THz-Strahlung entsprechen. Beispielsweise weisen viele Halbleitermaterialien Gitterschwingungen (sogenannte optische Phononen) oder viele Moleküle Rotationsübergänge im THz-Bereich auf. Auch in der Astronomie gibt die THz-Strahlung Hinweise auf die Existenz und Dichte bestimmter Moleküle im interstellaren Medium. In allen Bereichen haben die Wissenschaftler jedoch mit der Tatsache zu kämpfen, dass die THz-Strahlung durch die Feuchtigkeit der Atmosphäre stark absorbiert wird. Bereits einige 10cm durch die Umgebungsluft bei normaler relativer Luftfeuchtigkeit reichen um eine fast komplette Auslöschung der THz-Welle hervorzurufen.

### **2.3.2 Ein Frequenzbereich – mehrere Betriebsarten**

Es gibt heutzutage viele Ansätze für die Erzeugung und Detektion der THz-Wellen. Grundsätzlich können diese Ansätze in zwei große Zweige unterteilt werden: gepulste und Dauerstrich-THz-Strahlung.

Naturgemäß deckt der Pulsbetrieb einen großen Wellenlängenbereich ab, da die THz-Strahlung in kurzen Pulsen abgestrahlt wird, deren Pulsdauer (Pulsbreite) von derselben Größenordnung ist wie die Grundfrequenz der THz-Welle selbst. Dies ruft eine von der Pulsdauer invers proportional abhängige Spektralbreite des THz-Signals hervor. Man spricht von einem spektral breiten THz-Impulssignal.

Es sind jedoch auch THz-Quellen im Pulsbetrieb bekannt, deren Pulsbreiten sehr lang sind im Vergleich zu der THz-Grundschiwingung. Solche gepulsten Quellen emittieren naturgemäß in einem relativ engen Spektralbereich.

Unter den im Dauerstrich-Betrieb funktionierenden THz-Quellen unterscheidet man zwei Gruppen: die verstimmbaren und die unverstimmbaren Quellen. Die Verstimmbaren können in jedem Moment nur eine einzige THz-frequenz emittieren, die jedoch innerhalb eines definierten Frequenzbereiches verschoben werden kann. Man spricht hier von einer durchstimmbaren CW-THz-Quelle (CW = continuous wave = Dauerstrich-Welle). Die unverstimmbaren Quellen können immer nur eine einzige Frequenz emittieren, die nicht verstimmt werden kann. Diese haben meistens eine durch das Design der Quelle definierte, feste Emissionsfrequenz.

Alle diese THz-Quellen haben eine kohärente Emission als Grundeigenschaft gemeinsam, die die emittierte Strahlung für die bisher angesprochenen Anwendungen qualifiziert.

### **2.3.3 Erzeugungsmethoden für THz-Strahlung**

In Anlehnung an die unterschiedlichen Betriebsarten sind auch die Erzeugungsmethoden sehr verschieden. So basieren die meisten Methoden, mit wenigen Ausnahmen, auf der Frequenzmischung optischer oder Mikrowellen-Frequenzen in einem nicht-linearen Medium.

So wird rein elektronisch versucht, von der Mikrowellenseite her, den THz-Frequenzbereich mittels Frequenzmultiplikation [4], Gunn-Dioden [5] oder resonanter Tunnel-Dioden [6] zu erschließen.

Auch von der optischen Seite her wird mittels optischer Umsetzung/Gleichrichtung [7] oder Quanten-Kaskaden-Laser [8] der THz-Frequenzbereich erschlossen.

Der optoelektronische Ansatz ergänzt die Schließung der THz-Lücke und ermöglicht mit relativ geringem Aufwand, einigermaßen breitbandige THz-Strahlung zu erzeugen und zu detektieren. In dieser Klasse wird zwischen zwei Kategorien von Systemen unterschieden: Kurzpuls-THz-Systeme (aufgrund der Erzeugung und der Abtastung genannt auch Zeitbereichs-THz-Systeme) und die Dauerstrich-THz-Systeme (aus dem englischen, genannt auch Continuous-wave- oder CW-Systeme).

Ersteres wurde bereits 1989 entwickelt [9] und war in der Lage, THz-Wellen zu erzeugen und zu detektieren. Das relativ einfache Verfahren mittels ultrakurzer Laserimpulse hat dazu geführt, dass anfangs ausschließlich Systeme dieser Bauart gebaut wurden. Auch die ersten kommerziell verfügbaren Geräte waren Zeitbereichs-THz-Systeme [10] [11] [12]. Für den Kurzpulsbetrieb werden meistens der Photo-Dember-Effekt (Bildung eines elektrischen Dipols in der Oberflächennähe eines Photoschalters bei Anregung mit einem ultrakurzen Laserimpuls) oder die optische Rektifizierung zu Nutze gemacht.

In den vergangenen Jahren haben die Dauerstrich-THz-Systeme jedoch zunehmendes Interesse erfahren. Grund dafür waren die sehr hohen Anschaffungskosten, die Störanfälligkeit und die mangelnde Robustheit der Zeitbereichs-THz-Technik, der Bedarf an einer höheren spektralen Leistungsdichte und eine verbesserte Frequenzauflösung von deutlich unter 1GHz. Zusätzlich hat die Entwicklung von neuen nichtlinearen Halbleitermaterialien die Geburt der Dauerstrich-THz-Technik ermöglicht. Das gängigste hierfür verwendete Verfahren ist die Photomischung. Dieser Begriff beschreibt die heterodyne Differenzfrequenzerzeugung der THz-Strahlung als Differenzfrequenz zweier optischer Wellen in einem schnellen Halbleitermaterial.

Ein weiterer Ansatz zur Erzeugung von THz-Wellen, diesmal im sehr hohen Leistungsbereich involviert große Teilchenbeschleuniger-Anlagen. Ein Gyrotron ist im Grunde genommen ein Freielektronen-Maser. Die Strahlung wird in einem beschleunigten Elektronenstrahl durch die spiralförmige Bewegung der Elektronen in einem starken Magnetfeld (die so-genannte Zyklotron-Resonanz) erzeugt [13]. Die THz-Wellen sind kohärent und können sehr hohe Intensitäten aufweisen. Aufgrund dieser Eigenschaften eignet sich die auf diesem Wege erzeugte THz-Strahlung als Energiequelle für die Aufheizung von Plasmen in groß angelegten Kernfusionsexperimenten.

#### **2.3.4 Eignungsanalyse in Bezug auf die Projektziele**

Einer der Meilensteine beim Erreichen der Projektziele war die Findung eines für die Messaufgabe geeigneten THz-Messgeräts. In dieser Hinsicht wurde ein Lastenheft mit den wichtigsten vom Messgerät zu erfüllenden Eigenschaften erstellt. Anhand dessen wurde anschließend der aufgabenrelevante Suchbereich unter den am Markt verfügbaren THz-Geräten festgelegt. Aufgrund der Messaufgabe erschienen und die zwei Geräteklassen als die erfolgversprechendsten: die Zeitbereichs- und die Dauerstrich-THz-Messtechnik.

### **2.3.4.1 TDTs (Zeitbereichs-THz-Spektroskopie)**

Die Zeitbereichs-THz-Spektroskopie (TDTs), die auch als Impuls-THz-Messtechnik bekannt ist, basiert auf der Erzeugung von sehr kurzen elektromagnetischen Impulsen in sehr schnellen Halbleitermaterialien durch die Beaufschlagung mit ultrakurzen Laserimpulsen mit einer Pulsdauer von einigen 10fs bis 100fs. Die dadurch erzeugten THz-Impulse weisen Pulsdauern von einigen wenigen Picosekunden auf.

Die Zeitbereichs-Technologie ähnelt in vieler Hinsicht der bekannten Ultraschall-Messtechnik. Der Unterschied besteht letztendlich darin, dass anstatt der Schallwellen elektromagnetische Wellen als Informationsträger dienen. Daraus resultiert auch der Unterschied in der Erzeugung und Detektion. Die Amplituden- und Phasenerfassung sowie die Wiederholbarkeit der Messsignale erlauben eine Analyse sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich.

Aus spektraler Sicht betrachtet, besitzen diese elektromagnetischen Impulse aufgrund ihrer kurzen Pulsdauer eine entsprechend große spektrale Bandbreite von bis zu 5-6THz [14]. Spezielle ultraschnelle Antennen aus nichtlinearen organischen Kristallen können Bandbreiten bis zu 16 THz erzielen [15, 16, 17], allerdings bei sehr bescheidenen Signal-zu-Rausch-Verhältnissen. Dadurch, dass die Impulsenergie über das gesamte vorhandene Spektrum verteilt ist, ist die spektrale Energiedichte sehr gering, insbesondere im Bereich der höheren Frequenzen ab ca. 1,5THz.

Das Messprinzip basiert auf der Veränderung, die die Messstrahlung beim Wechselwirken mit dem Messobjekt erfährt.

So erfährt der Teststrahl eine von der Natur, Dicke und Beschaffenheit des Messobjektes abhängige Verschiebung, Abschwächung und Phasenveränderung bei einer Messung in Transmissionskonfiguration. Bei einer mehrlagigen Struktur treten mehrfache Reflexionen der Testwelle auf, die dann im detektierten Signal direkte Hinweise über diese Struktur geben [18].

In Reflexionsgeometrie hingegen können dieselben mehrfachen Reflexionen auftreten, wobei sich die Lagendicken in unterschiedlichen Impulsabständen oder Abschwächungseffekten widerspiegeln. Diese Eigenschaften machen die TDTs einen aussichtsreichen Kandidaten zur Lösung unserer im Projekt festgelegten Messaufgabe.

Die TDTs wird des Weiteren in der Untersuchung und Erkennung von Stoffen [19], in der zerstörungsfreien Prüfung von Strukturdefekten, oder bei der Vermessung der lokalen elektrischen Leitfähigkeit in Halbleitern verwendet. Aufgrund der starken Absorption der THz-Strahlung in Wasser oder Wasserdampf kann diese Messtechnik auch in der Überwachung der Trocknungsprozesse z.B. in der Papier- [20, 21] oder Lebensmittelherstellung [22] eingesetzt werden.

### **2.3.4.2 CW (Dauerstrich-THz-Strahlung)**

Die Dauerstrich-THz-Wellen (CW-THz) können grundsätzlich durch zwei Methoden erzeugt werden: durch Photomischen und durch die o. g. Differenzfrequenzbildung. Auf der Detektionsseite können reine Leistungsdetektoren oder elektro-optische bzw. photokonduktive Empfängerelemente verwendet werden.

Es gibt zwei Klassen von Dauerstrich-THz-Quellen: diejenigen mit fester, durch den Aufbau des Transmitters festgelegte Frequenz, wie z.B. Quantenkaskaden-Laser oder Backward-Wave-Oszillatoren und diejenigen, die über einen relativ großen Frequenzbereich verstimmbar werden können.

Im Allgemeinen, wurde die durchstimmbare CW-THz-Messtechnik als Antwort auf die Probleme der TDTS-Technik entwickelt. Dieser Entstehungsprozess erklärt vielleicht auch die Tatsache, dass diese Technik einige Jahre später entstanden ist und vom technologischen Reifegrad her sich 2 bis 3 Jahre hinter der TDTS befindet. Ein weiterer Grund ist auch die höhere Komplexität der nichtlinearen Materialien, die für die CW-THz-Antennen verwendet werden, die bei deutlich niedrigeren optischen Intensitäten arbeiten müssen als bei TDTS, wo die Spitzenintensitäten in den Femtosekunden-Lasern extrem hohe Niveaus erreichen können.

Die durchstimmbare CW-THz-Technik setzt die Verfügbarkeit von Lasern mit relativ schmalen Linienbreiten voraus, die aber in einem sehr großen Frequenzbereich verstimmbar werden können. Je nach Zielsetzung oder der verwendeten Messtechnik, bezieht die CW-Messung die Erfassung der THz-Wellen-Amplitude allein [23] oder zusätzlich aber auch die der Wellen-Phase [24] mit ein.

Aus Kostengründen hat sich in den letzten Jahren die Erzeugung und Detektion der CW-THz-Strahlung insbesondere bei Telekommunikationswellenlängen durchgesetzt [25]. Diese seit mehreren Jahren etablierte Telekommunikationstechnologie bietet zusätzlich zu den Preisvorteilen auch einen ausgeprägten Reifegrad mit ausgesprochener Robustheit und Fehlerfreiheit.

Die CW-Messtechnik kann aufgrund der sehr guten Spektralaufösung im spektroskopischen Bereich, sowie in der Stofferkennung und -diagnose Anwendung finden. Auch die zerstörungsfreie Prüfung profitiert in zunehmendem Maße von den Vorteilen dieser Messtechnik. Trotzdem gilt nach wie vor die Tatsache, dass die CW-THz-Messtechnik gegenüber der gepulsten Technik im Reifegrad um 2 bis 3 Jahre nachsteht.

Die Amplitude erfassende CW-THz-Messtechnik wurde hinsichtlich der Eignung für die im Projekt festgelegte Messaufgabe eingehend untersucht. Wir sind aber aufgrund der alleinigen Amplitudenerfassung zu der Erkenntnis gekommen, dass diese Technik zwar die Messung einlagiger Schichten mit gewissen Einschränkungen erlaubt, für mehrlagige Beschichtungen jedoch völlig ungeeignet ist. Grund dafür ist die Unsicherheit über die Schichtreihenfolge in der Auswertung und Mischeffekte, die bei dünnen Schichten eine Auswertung sogar unmöglich macht.

Die optoelektronische Technik, die neben der Amplituden- auch die Phasenerfassung der THz-Signale erlaubt, war uns bis ungefähr zur Hälfte der Projektlaufzeit jedoch unbekannt, daher blieb sie in der Eignungsbewertung in der Projekt-Anfangsphase leider völlig unberücksichtigt. Andere Techniken, die auf rein elektronischer Basis sowohl die Amplitude als auch die Phase auswerten, haben wir am Anfang des Projektes aufgrund der Gerätegröße und der exorbitanten Kosten unbeachtet lassen müssen.

#### **2.3.4.3 FMCW (Frequenzmodulierte Dauerstrich)-THz-Strahlung**

FMCW-THz-Technik funktioniert auf demselben Prinzip wie der FMCW-Radar [26]: ein THz-Messsignal mit zeitlich präzise veränderbarer Frequenz wird auf das Messobjekt

gesendet. Das Reflexionssignal wird gemischt mit dem Sendesignal und die Frequenzverschiebung aufgrund der vom Messsignal zurückgelegten Entfernung wird als Differenzfrequenz genau ermittelt.

Der Erfolg einer solchen Messung setzt die genaue Kenntnis über die zeitliche Veränderung der Frequenz und eine relativ schmale Linienbreite des zu einem gewissen Zeitpunkt gestrahlten Frequenzsignals voraus.

Diese Funktionsweise macht die FMCW-Technik bestens geeignet für die Vermessung von Abständen und implizit für Strukturuntersuchungen [27]. Aufgrund der Entwicklung dieser Messtechnik hauptsächlich im Bereich der niedrigeren Frequenzen bis ca. 200GHz mittels rein elektronischer Mittel, bleibt die longitudinale Auflösung jedoch auf einem Niveau, das für unsere Messaufgabe leider nicht ausreichend ist. Daher haben wir diese Messtechnik als nicht erfolversprechend eingestuft und im weiteren Projektverlauf außer Acht gelassen.

## 2.4 TDTS als Methode zur Schichtdickenmessung

Mit Ausnahme der zum Zeitpunkt der Bewertung uns nicht bekannten optoelektronischen CW-Technik mit Amplituden- und Phasenerfassung, eignet sich die TDTS unter allen THz-Techniken, wie bereits erwähnt, bestens für die Vermessung von Beschichtungsdicken. In einem separaten, unternehmensinternen Projekt wurden die unterschiedlichen Messtechniken bewertet, die potentielle Kandidaten zur Lösung der Messaufgabe darstellen. Die TDTS wurde als erfolversprechendster davon ausgewählt, daher werden wir uns in den folgenden Abschnitten nur auf die TDTS-Technik konzentrieren.

Die voraussichtlich sehr begrenzte beidseitige Zugänglichkeit der zu vermessenden Gegenstände macht des Weiteren eine Messung in Transmission in den meisten Fällen unmöglich, weswegen wir hier nur die Reflexionsgeometrie betrachtet haben.

Wie bei anderen Messtechniken, setzt der Messerfolg die Erfüllung bestimmter Bedingungen voraus, die sich aus der Funktionsweise dieser Messmethode ableiten. Im folgenden Abschnitt werden wir uns mit dem Funktionsprinzip, dem Geräteaufbau, den Messdaten und der Messdatenauswertung in der TDTS-Technik beschäftigen.

### 2.4.1 Prinzipielle Funktionsweise

Die gepulste Funktionsweise der TDTS-Technik bietet automatisch eine gewisse Analogie zu der Ultraschallmesstechnik. So können die sehr kurzen THz-Impulse an den Materialübergängen je nach Materialkontrast Reflexionsimpulse hervorrufen, die anhand der zeitlichen Abstände Informationen über die räumlichen Abstände zwischen den Materialgrenzen und somit über die vorhandenen Schichtdicken liefern können.

Die Auflösung der Schichten bis zum Substrat setzt allerdings einige wenige Bedingungen voraus, die in ähnlicher Weise auch für die Ultraschallmesstechnik gelten:

- 1) die Tatsache, dass alle Schichten im THz-Spektralbereich genügend durchsichtig sind
- 2) die Materialien benachbarter Schichten (in einem mehrlagigen Beschichtungssystem) genügend Kontrast hinsichtlich der optischen Dichte aufweisen, so dass die Reflexionsimpulse an den Materialübergängen stark genug sind, um eindeutig identifiziert und ausgewertet zu werden.
- 3) für die Umrechnung der zeitlichen Abstände zwischen den Reflexionsimpulsen in Materialdicken ist eine detaillierte, idealerweise auch spektral aufgelöste Kenntnis über die Materialparameter zwingend notwendig. Die hier relevanten Materialparameter sind der Brechungsindex im THz-Spektralbereich und die THz-Absorption oder Extinktion, die zusammen den komplexen Brechungsindex des Materials bilden.

$$\tilde{n}(f) = \sqrt{\mu_r(f) (\epsilon_r'(f) - j\epsilon_r''(f))} = n(f) - j\kappa(f) \quad \text{mit } j = \sqrt{-1}$$

Gleichung 1

Diese Frequenzabhängigkeit ist auf die Definition der komplexen elektrischen Permittivität zurückzuführen:

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0 \cdot (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') = \epsilon_0 \cdot \tilde{\epsilon}_r$$

Gleichung 2

mit

$$\boxed{\varepsilon_r' = \varepsilon_r}$$

Gleichung 3

und

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} = \varepsilon_0 \cdot \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r'' \Rightarrow \boxed{\varepsilon_r'' = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}}$$

Gleichung 4

$\sigma$  repräsentiert hier die elektrische Leitfähigkeit des Materials.

Die Transmission bzw. Reflexion an einem Materialübergang ist direkt maßgebend für die Amplitude und den Phasenverlauf eines Reflexions- oder Transmissionsimpulses und kann (z. B. für eine senkrechte Einstrahlung) folgendermaßen beschrieben werden:

$$\vec{E}_I(z,t) = E_i \cdot \vec{e}_x \cdot e^{-jk_1 \cdot z + j\omega t}, \quad \vec{E}_T(z,t) = E_T \cdot \vec{e}_x \cdot e^{-jk_2 \cdot z + j\omega t}, \quad \vec{E}_R(z,t) = E_R \cdot \vec{e}_x \cdot e^{+jk_1 \cdot z + j\omega t}$$

Gleichungen 5

wobei die einfallende, transmittierte und reflektierte Wellen durch die Indices „I“, „T“ bzw. „R“ beschrieben werden.

Die Reflexions- und Transmissionskoeffizienten bei normalem Einfall und unter Einsatz der Wellenwiderstände  $Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}$  und  $Z_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}$  werden folgendermaßen beschrieben:

$$\boxed{R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}} \quad ; \quad \boxed{T_{12} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}}$$

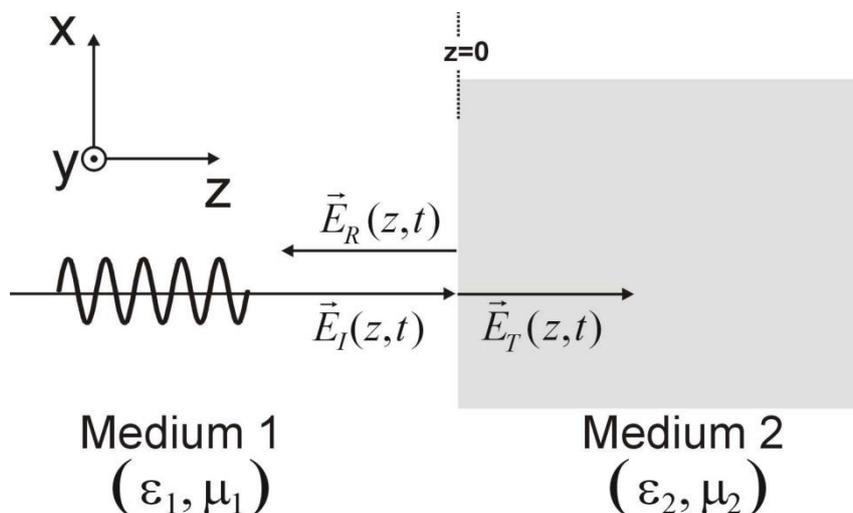


Abbildung 4: Transmission und Reflexion an einer Grenzfläche

Unter der Annahme, dass die Materialien keine magnetischen Eigenschaften haben ( $\mu_r = 1$ ), ergeben sich hieraus die bekannten Fresnell'schen Formeln:

$$R_{12} \cong \frac{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1}}}}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1}}}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} = \frac{\tilde{n}_1 - \tilde{n}_2}{\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2}$$

und

$$T_{12} \cong \frac{2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r2}}}}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1}}}} = \frac{2 \cdot \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} = \frac{2 \cdot \tilde{n}_1}{\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2}$$

Bei einem nicht-senkrechten Einfall, muss zusätzlich die Abhängigkeit vom Einfallswinkel berücksichtigt werden:

1) für die s-Polarisation (TE), senkrecht zur Einfallsebene:

$$R_{s,12} = \frac{\tilde{n}_1 \cdot \cos \theta_1 - \tilde{n}_2 \cdot \cos \theta_2}{\tilde{n}_1 \cdot \cos \theta_1 + \tilde{n}_2 \cdot \cos \theta_2}$$

;

$$T_{s,12} = \frac{2 \cdot \tilde{n}_1 \cdot \cos \theta_1}{\tilde{n}_1 \cdot \cos \theta_1 + \tilde{n}_2 \cdot \cos \theta_2}$$

Gleichung 6

2) für die p-Polarisation (TM), parallel zur Einfallsebene:

$$R_{p,12} = \frac{\tilde{n}_1 \cdot \cos \theta_2 - \tilde{n}_2 \cdot \cos \theta_1}{\tilde{n}_1 \cdot \cos \theta_2 + \tilde{n}_2 \cdot \cos \theta_1}$$

;

$$T_{p,12} = \frac{2 \cdot \tilde{n}_1 \cdot \cos \theta_1}{\tilde{n}_1 \cdot \cos \theta_2 + \tilde{n}_2 \cdot \cos \theta_1}$$

Gleichung 7

Diese Gleichungen können direkt aus den Fresnel'schen Gleichungen für normalen Einfall abgeleitet werden, unter der Annahme, dass:

1) für die s-Polarisation  $n_{i,eff} = n_i \cdot \cos \theta_i$

2) für die p-Polarisation  $n_{i,eff} = \frac{n_i}{\cos \theta_i}$

Da bei der Wechselwirkung der THz-Strahlung mit den zu vermessenden Materialien keine nichtlinearen Effekte mit Frequenzänderung zu erwarten sind, können in den Gleichungen 5 alle Faktoren  $e^{i\omega t}$  gekürzt werden, so dass nur die materialabhängigen Ausbreitungsanteile  $e^{\pm jk_i z}$  bestehen bleiben. So wird eine Wellenausbreitung in einem Material mit dem komplexen Brechungsindex  $\tilde{n}_i$  und Dicke  $d_i$  durch folgende Funktion beschrieben:

$$e^{\pm j\omega \frac{\tilde{n}_i}{c_0} \cdot d_i / \cos \theta_i}$$

Gleichung 8

Wobei  $\theta_i$  der Winkel der Ausbreitungsrichtung relativ zur Senkrechten auf der Ebene des Materialübergangs ist.

Diese Funktion beinhaltet über den komplexen Brechungsindex die frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle durch das Material, gleichzeitig aber auch das frequenzabhängige Abschwächungsvermögen des Materials, so dass ggf. auch Resonanzeffekte berücksichtigt werden können.

Ein Typischer Messvorgang, unter der Voraussetzung, dass die Materialparameter bereits vorhanden sind, sollte folgendermaßen ablaufen:

- 1) Auswahl und Aufladen der Materialparameter in der Reihenfolge der im Beschichtungssystem vorhandenen Schichten
- 2) Ggf. Aufnahme einer THz-Referenz
- 3) Auslösung der Messung durch den Benutzer mit anschließender Messdatenaufnahme
- 4) Messdatenvorbereitung, -auswertung und Ergebnisanzeige.

## 2.4.2 Geräteaufbau

Die THz-Impulse werden durch die Beaufschlagung des Antennen-Halbleitermaterials mit ultrakurzen Laserimpulsen mit einer Impulsdauer von ein paar 10fs bis 100fs erzeugt. Solche ultrakurzen Laserimpulse werden üblicherweise durch einen Femtosekunden-Laser (fs-Laser) zur Verfügung gestellt. Derselbe Laser oder ein anderer, phasengekoppelter fs-Laser wird benutzt um die THz-Messsignale zu erfassen (siehe Gesamtaufbau in der folgenden Abbildung).

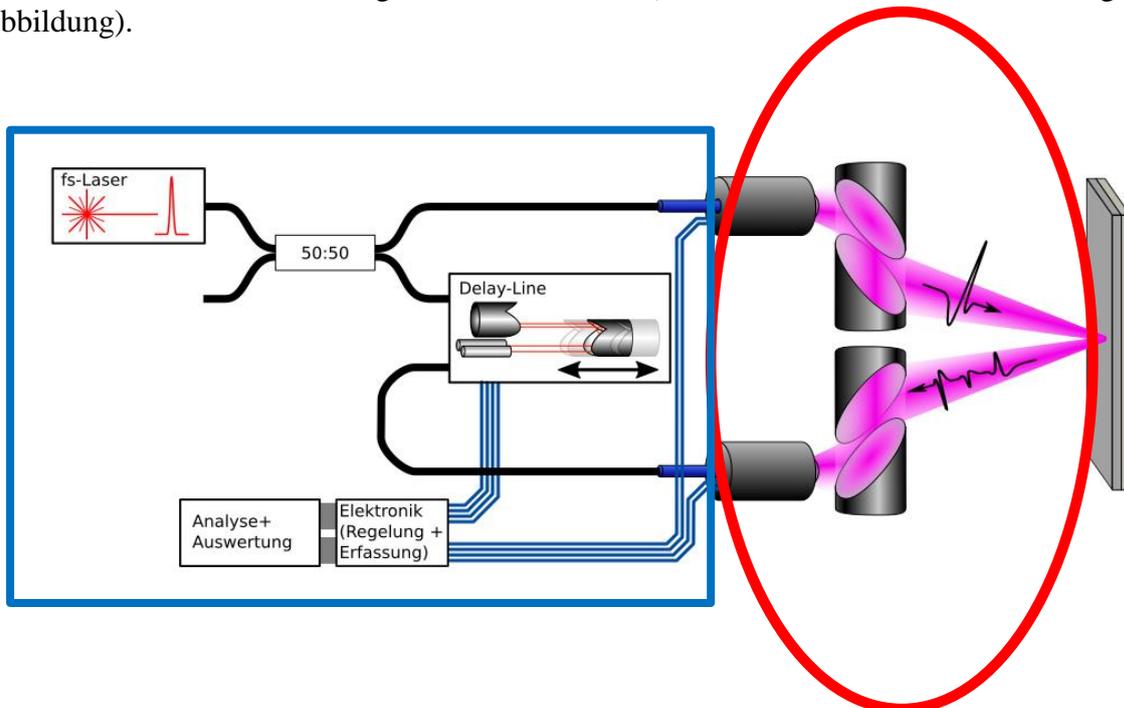


Abbildung 5: Der typische Aufbau eines TD-THz-Spektrometers in Reflexionsgeometrie

Aufgrund Ihrer großen Bandbreite und einer sehr präzisen Modenkopplung wird bei fs-Lasern innerhalb einer Wiederholperiode die gesamte Energie in einem extrem kurzen Zeitbereich ausgestrahlt, in dem sich alle vorhandenen longitudinalen Lasermodi konstruktiv überlagern. In der Übrigen Zeit ist die Lichtintensität null, da sich die Lasermodi aufgrund der unterschiedlichen Phasenlagen gegenseitig auslöschen. Die bekanntesten fs-Laser sind modengekoppelte Titan-Saphir-Laser (Ti:Sa) [28] mit einer Zentralwellenlänge bei ca. 800nm. Durch die Entwicklung von Faserlaser sind in den letzten Jahren auch fs-Faserlaser mit vergleichbaren technischen Eigenschaften kommerziell verfügbar geworden, die den Bedürfnissen der TDTS-Technik völlig genügen [29].

Da die Laserpulse viel kürzer sind als die THz-Impulse, müssen die Ersteren in einer Art Rasterverfahren zeitlich über die Letzteren verschoben werden. Dies wird meistens durch eine mechanische Verzögerungsstrecke erreicht, in der der Abtastlaserimpuls über eine variable Strecke in kleinen Schritten zeitlich verzögert wird. Es werden seit einigen Jahren auch Systeme kommerziell angeboten, die alternative Methoden für die zeitliche Abtastung des THz-Impulses verwenden. Die bekanntesten sind die Faser-Stretcher-Technik, in der eine Lichtwellenleiter-Strecke mechanisch gedehnt wird [30], ECOPS (**E**lectronically **C**ontrolled **O**ptical **S**ampling) [31] [32] [33], ASOPS (**A**synchroneous **O**ptical **S**ampling) [34], OSCAT (**O**ptical **S**ampling by **C**avity **T**uning) [35].

In vielen Fällen sind die optischen Strecken einfache Freistrahlstrecken, die unempfindlich gegen nichtlineare Effekte sind, die von den energieintensiven ultrakurzen Laserimpulsen sonst zu erwarten wären. Bei solchen Geräten ist meistens der THz-Messraum integriert. Mit der Entwicklung der Lichtwellenleitertechnik durfte auch der Bedarf für eine abgesetzte THz-Messstrecke bedient werden. So konnten die Laserstrahlen über Faserleitungen zu den Emitter- und Detektor-Antennen über Strecken von einigen Metern hinweg geführt werden, so dass die Antennen, zusammen mit der dazugehörigen THz-Strahlaufbereitung und -führung, von der restlichen, schwereren Technik losgelöst, einfacher bedienbar geworden sind (siehe in der Abbildung 5 den in rot eingekreisten Bereich). Damit ist das Konzept des abgesetzten THz-Messkopfes entstanden, was ein großer Fortschritt in der Bedienbarkeit von THz-Messgeräten für industrielle Anwendungen bedeutet hat.

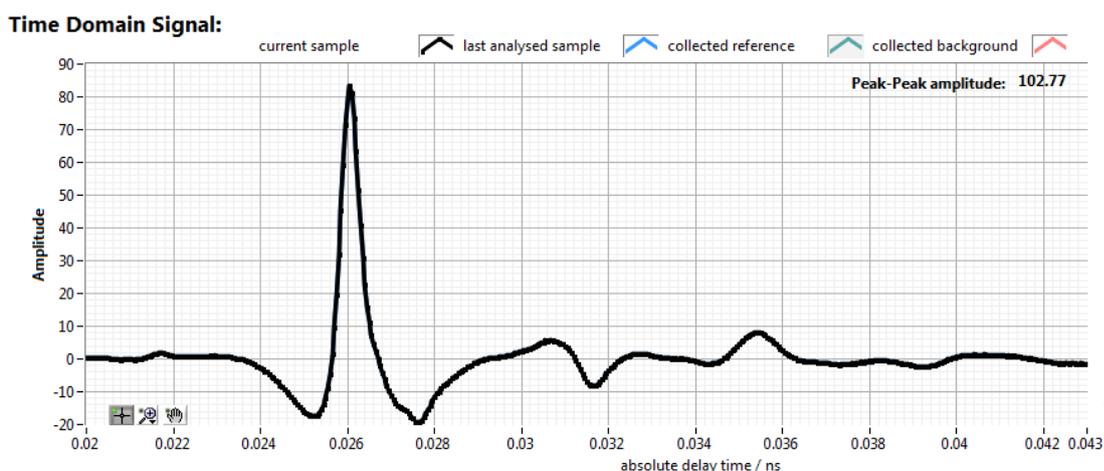


Abbildung 6: THz-Messsignal, zeitlicher Ablauf der Signalamplitude

Aufgrund der sehr niedrigen Signalamplituden auf der THz-Detektorseite, werden diese Signale zuerst durch einen Transimpedanzverstärker verstärkt. Um Störeinflüsse weiter zu reduzieren, wird in manchen Fällen das Messsignal zusätzlich durch einen Lock-in-Verstärker

gefiltert und verstärkt. Bei Systemen mit einer sehr schnellen Aufnahmegeschwindigkeit oder mit hoher Signalamplitude kann der Lock-in-Verstärker entfallen.

Die Datenerfassung wird meistens durch einen schnellen digital-analog Konverter realisiert und die Messdaten werden in Form eines zeitlichen Ablaufs des THz-Amplitudensignals bereitgestellt, wie die Abbildung 6 zeigt.

Die Abbildung 6 zeigt darüber hinaus beispielhaft die THz-Reflexionsimpulse an mehreren Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Materialien.

### 2.4.3 Messdatenauswertung

Die Messdatenauswertung setzt die Kenntnis über die im Idealfall spektral aufgelösten Materialparameter der im zu vermessenden Beschichtungssystem vorhandenen Schichten voraus. Darunter ist der komplexe Brechungsindex, bestehend aus dem Brechungsindex und dem Extinktionsfaktor, zu verstehen. Bei relativ dicken Schichten genügt meistens die Kenntnis der gemittelten Materialparameter, bei dünnen oder stark absorbierenden Schichten hingegen ist der spektrale Verlauf der Materialparameter meistens unerlässlich.

Die Messdatenauswertung erfolgt auf einem Rechner unter Berücksichtigung der Messgeometrie, der Materialparameter und unter Einsatz eines umfangreichen physikalischen Modells, das die Ausbreitung der THz-Wellen durch das Beschichtungssystem möglichst genau beschreibt. In einem separaten Auswertungsmodul ist auch die Materialkalibrierung, d.h. die Ermittlung der Materialparameter möglich

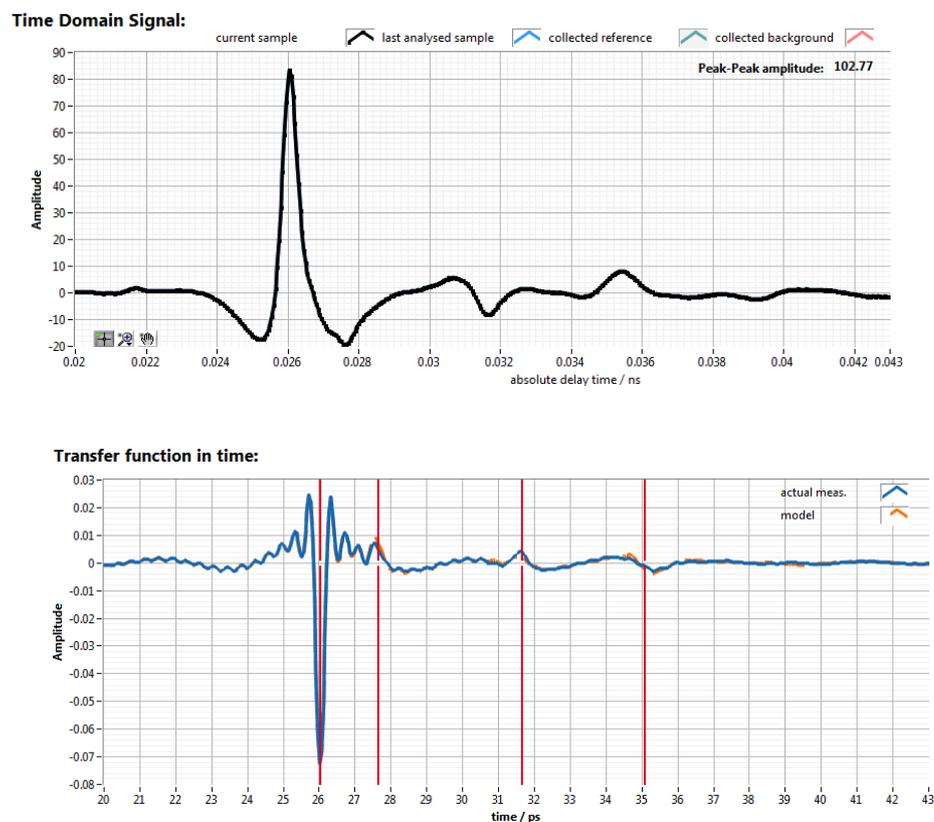


Abbildung 7: Messkurve (oben) und entsprechende, "THz-Impuls-bereinigte" Transferfunktion (unten).

Da die Messdaten unter unterschiedlichen Bedingungen aufgenommen werden können (unterschiedliche Zeitauflösung, Aufnahmedauer unterschiedlicher Länge, unterschiedliche Verstärkereinstellungen), werden die Messsignale auf eine gemeinsame Basis gebracht. Somit wird sichergestellt, dass bei quantitativen Analysen und Vergleichen zwischen unterschiedlichen Messdaten keine Artefakte auftreten.

Anschließend werden die zeitlichen Positionen der Reflexionsimpulse entweder direkt an den Messkurven, oder, nach einer Eliminierung der vom Messsystem erzeugten Pulsform, an der sogenannten Transferfunktion ermittelt, die eine direkte Beschreibung des Beschichtungssystems erlaubt.

Es ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass die zeitlichen Breiten der Reflexionsimpulse in der Transferfunktion-Darstellung viel geringer als in der Messkurve ausfallen. Sie hängen allein von der Bandbreite des im Referenzimpuls vorhandenen Frequenzspektrums ab. Die tatsächliche zeitliche Breite des Messsignals wird sozusagen „herausgefiltert“, was in den meisten Fällen sich vorteilhaft auf die Ermittlungsgenauigkeit der zeitlichen Positionen der Reflexionsimpulse auswirkt.

Des Weiteren geben die Polaritäten der Reflexionsimpulse in der Transferfunktion einen direkten Hinweis über die Sprungrichtung der Materialdichte. So erfährt die THz-Welle einen Phasensprung um  $\pi$  beim Übergang aus einem undichteren in ein dichteres Medium, was sich in einem negativen Impuls in der Transferfunktion widerspiegelt. Beim Übergang aus einem dichteren in ein undichteres Medium erfährt die THz-Welle hingegen keinen Phasensprung. Somit ruft dies dabei einen positiven Reflexionsimpuls hervor.

Auch die Amplituden der Reflexionsimpulse in der Transferfunktion stehen, unter Berücksichtigung der Absorptionseffekte, in direkter Relation zu den an den entsprechenden Materialübergängen zu erwartenden Reflexionskoeffizienten.

#### **2.4.4 Kriterien für die Findung eines geeigneten Geräts**

Unter den zahlreichen THz-Messtechniken haben wir bereits eine Vorauswahl zugunsten der TDTS-Technik getroffen. Aufgrund des relativ großen Angebots an mehr oder weniger kommerziell verfügbaren Zeitbereichs-THz-Geräten, mussten sehr klare Kriterien für die Entscheidung für ein Gerät festgelegt werden, das als Basis für die im Projekt zu entwickelnde Apparatur dienen soll, die die Messaufgabe zielführend löst.

Die Geräte, die in die engere Auswahl kamen, wurden an Musterproben durchgehend geprüft. Dazu kamen nicht nur Bewertungskriterien technischer Art zum Tragen, sondern, angesichts der Absicht zur Weiterverwertung der Projektergebnisse bei zukünftigen Entwicklungsprojekten für neue Produkte, auch Kriterien strategischer Natur. Diese waren insbesondere relevant hinsichtlich einer weiteren Kooperation und des Potenzials des verwendeten Gerätedesigns in Bezug auf Miniaturisierung, Kostenreduktion und Robustheitssteigerung.

Folgende Kriterien sind für die Bewertung dieser Geräte verwendet worden:

##### **1. Technische Kriterien:**

- a. Abgesetzter Messkopf
- b. SNR (bei Messgeschw. Von 1 Spektrum / 1-2 Sek)

- c. Zentralfrequenz
- d. Bandbreite
- e. Geschwindigkeit
- f. Antennen
  - i. Emitter
  - ii. Detektor
- g. Laser
- h. Verzögerungsstrecke
- i. Lock-in-Verstärker
- j. Auswertungssoftware

**2. Anwendungspotenzial:**

- a. Robustheit
- b. Handhabung
- c. Treffer-Quote 1-fach Schichten
- d. Eignung f. Dünn-Schicht Dickenmessungen (< 50 µm)
- e. Eignung f. X-fach-Schicht Dickenmessungen
- f. Eignung f. Scan → Strukturdefekterkennung
- g. Potenzial für flächige Defekterkennung in der Firma vorhanden
- h. Miniaturisierungspotenzial

**3. Strategische Kriterien:**

- a. Aufwand bis zur Markteinführung für die Fa. Automation
- b. Geografische Nähe
- c. Kooperationsbereitschaft
- d. Perspektive eigener (AUT-) Komponenten
- e. Kostensenkungspotenzial des verwendeten Gerätedesign

Die Kriterien wurden, je nach Relevanz mit individuellen Gewichtungen versehen, so dass die Gesamtnote den damaligen Erkenntnisstand bezüglich des Eignungsgrads jedes der bewerteten Geräte für die Messaufgabe widerspiegelt.

**2.4.5 Lastenheft**

Gleichzeitig mit der Suche nach einem geeigneten, anpassungsfähigen Gerät sind wir mit den Projektpartnern, insbesondere mit denjenigen von der Anwenderseite, in Kontakt getreten, um die Anforderungen an die THz-Messtechnik festzulegen. So sind in der ersten Projektphase die wichtigsten, insbesondere die anwendungstechnischen Details in mehreren Iterationen mit den Projektpartnern abgestimmt worden.

Gesamtschichtdickenbereich	350-2500µm
Einzelschicht-Dickenbereich	50-2000µm
Maximale Anzahl von Schichten	4 (Substrat, Spachtel, 2x-Beschichtung)  Alternativ – 3 Schichten: Substrat, Spachtel, Kantenschutzfolie
Schichtabfolge	GFK → Spachtelmasse → Basecoat → Topcoat (Putty ist nicht schichtbildend)
Schichtdicken-Messauflösung	10µm

Tabelle 2: Technische Eigenschaften des zu entwickelnden THz-Messgeräts (Auszug aus dem Lastenheft)

Die Ergebnisse sind anschließend in dem Lastenheft zusammengefasst worden. Eine kurze Zusammenfassung wird in den Tabellen 2 und 3 präsentiert.

Diese Angaben sind als Mindestwert zu betrachten, die darauf zurückzuführen sind, dass am Anfang des Projektes nur grobe Erfahrung in der Schichtdickenmessung mittels THz im Unternehmen vorhanden war. Durch die ständig verbesserte Auswertungsroutine, wies das Messgerät gegen Ende des Projektes deutlich verbesserte, in manchen Fällen um ein Vielfaches überlegene Messeigenschaften auf.

Betriebs- Temperaturen	15°C bis 30°C für den Halleneinsatz / (15°C bis 40°C für den Außeneinsatz)
maximale Temperaturänderung	3°C / Minute in Anlehnung an IEC / EN / DIN EN 60068-2-14
Betriebsfeuchtigkeit	10 % bis 80 % rel. Luftfeuchtigkeit ( nicht kondensierend) in Anlehnung an IEC 60068-2-30 Variante 2 (TZ-Strahl muss vor Feuchtigkeit geschützt werden)
Schock	wg. der schwingenden DL nicht zutreffend
Vibration	wg. der schwingenden DL nicht zutreffend
Wasser & Staubschutz	IP 51 5: Schutz gegen Berührung & Staubablagerung 1: Schutzgrade gegen senkrecht fallendes Tropfwasser in Anlehnung an DIN 40050 / IEC 60529.
Druck	Normaler Druck (1bar)

Tabelle 3: *Betriebsbedingungen des zu entwickelnden THz-Messgeräts (Auszug aus dem Lastenheft)*

Die abschließende Festlegung des Lastenheftes stellte die Erreichung des 1. Meilensteins im Projektablauf dar.

Wichtig hier ist hervorzuheben, dass das THz-Messgerät eine teil-tragbare Lösung darstellen sollte, die einen vernünftigen Einsatz auch in den Laboren oder Werkshallen der Projektpartner, insbesondere vom Fraunhofer-IWES, erlauben soll. Diesen tragbaren Charakter haben wir beim Erreichen des 2. Meilensteins durch das Vorstellen des Messgeräts den Projektteilnehmern beim Projekttreffen demonstriert.

## 2.5 Messgerät

### 2.5.1 Entscheidungsfindung

Anhand der im vorigen Abschnitt erläuterten Bewertungskriterien, kamen drei THz-Geräte in die engere Auswahl mit entsprechenden Vor- und Nachteilen. Schließlich wurde das Gerät ausgewählt, das anhand der o.g. Kriterien die Projektanforderungen am besten erfüllte und dessen Hersteller uns als bester Partner für zukünftige Entwicklungsprojekte erschien.

### 2.5.2 Geräteentwicklung

Das Messgerät in seiner Originalform wurde als Basis für die Weiterentwicklung eines THz-Messsystems für die Schichtdickenmessung an industriellen Beschichtungssystemen benutzt.

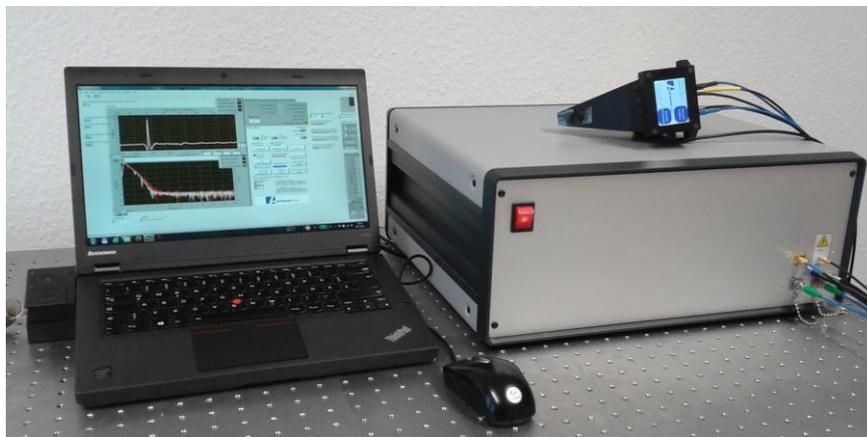


Abbildung 8: THz-Messgerät nach der Umrüstung zur Durchführung von Schichtdickenmessungen

Eine wichtige Eigenschaft des zu entwickelnden Geräts war die Eignung für spontane Messungen direkt am Messobjekt, außerhalb eines Messlabors. Dafür war die Auslösung des Messvorgangs und die Anzeige des Messergebnisses direkt am Messkopf sehr wichtig.

Für diese Aufgabe haben wir am Messkopf einen kleinen Bildschirm mit Touch-Funktion integriert (siehe Abbildung 9). Die Versorgungs- und Datenleitungen wurden entlang der Lichtwellenleiter zwischen dem Messsystem und dem Messkopf geführt. Das Display kann je nach Probenlage in die passende Position orientiert werden (siehe Abbildung 9).

Da die Qualität der Messungen, insbesondere bei schweren Kontrastverhältnissen zwischen den Beschichtungsstoffen, oder bei extrem schwachen Messsignalen, durch die Luftfeuchtigkeit im THz-Strahlengang beeinträchtigt wird, haben wir das Innere des Messkopfes mit einer Trockenluftspülung ausgestattet, die die Wasserabsorption auf ein möglichst niedriges Niveau hält.

Für die Geräteansteuerung und Messdatenauswertung war bei der Projektinitiierung ein integrierter Miniaturrechner vorgesehen. Aufgrund von Kompatibilitätsproblemen und der geringen Rechenleistung eines solchen Rechners mussten wir leider von dieser Idee Abstand nehmen. Wir konnten leider keinen Einzelplatinen-Rechner mit genügend Rechenleistung finden, der mit Windows-Betriebssystem funktioniert.

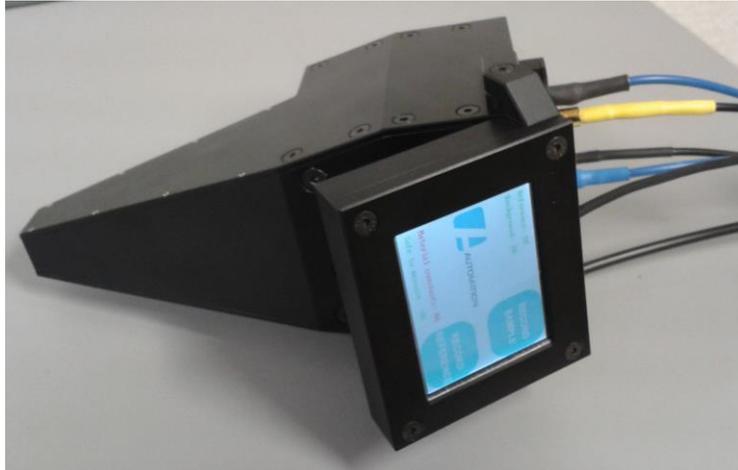


Abbildung 9: THz-Messkopf mit Display zur Messauslösung und Ergebnisanzeige. Der THz-Strahlengang wird im Messkopf mit Trockenluft gespült.

Windows war deswegen zwingend nötig, weil die Ansteuerung des THz-Geräts in einer Windows-Version der Entwicklungsumgebung LabView funktioniert hat und wir deswegen auch eine zusätzliche LabView Lizenz für Windows beantragt hatten. Aus diesen Gründen haben wir uns für ein leistungsstarkes Laptop mit Docking-Station entschieden.

### 2.5.3 Erosionsproben und Messvorrichtung

Zusätzlich zu den Messungen „aus der Hand“ an größeren Messobjekten wurde auch die Notwendigkeit festgestellt, an den Erosionsproben wiederholte Messungen an denselben Stellen durchzuführen, da Anfangsstadien und Fortschritt der Erosion nur durch solche wiederholte Messungen überhaupt erkannt werden können. Aus diesem Grund haben wir relativ früh im Projekt eine Haltevorrichtung für die Erosionsproben ins Gespräch gebracht, die das präzise Vermessen bestimmter Stellen auf den Proben erlaubt.

Anfangs wurde aus aerodynamischen Gründen eine Geometrie der Erosionsproben in Form eines fallenden Wassertropfens festgelegt (siehe Abbildung 10). Die Haltevorrichtung hätte den Messkopf des THz-Messsystems genau über die Oberfläche führen sollen und wäre dadurch relativ aufwändig in der Fertigung gewesen. Aus diesem Grund wurde später die Form der Probenprofile in einen Halbzylinder mit ca. 30mm Durchmesser geändert.

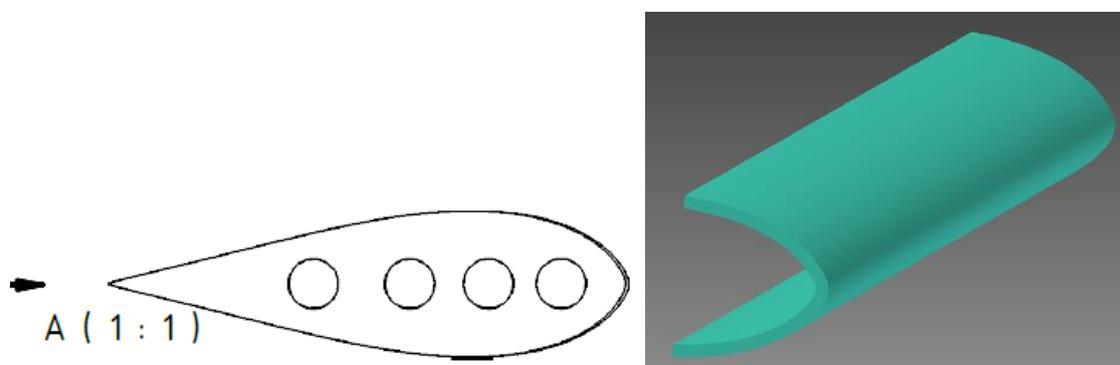


Abbildung 10: Anfängliche Form der Erosionsprofile – fallender Wassertropfen

Dies hat aufgrund der Rotationssymmetrie auch die Messvorrichtung deutlich vereinfacht. In einem ersten Entwurf hätte diese Halterung den Messkopf um die Probe herum geführt. Eine 3D Darstellung dieses Entwurfs ist in der Abbildung 11 zu sehen.

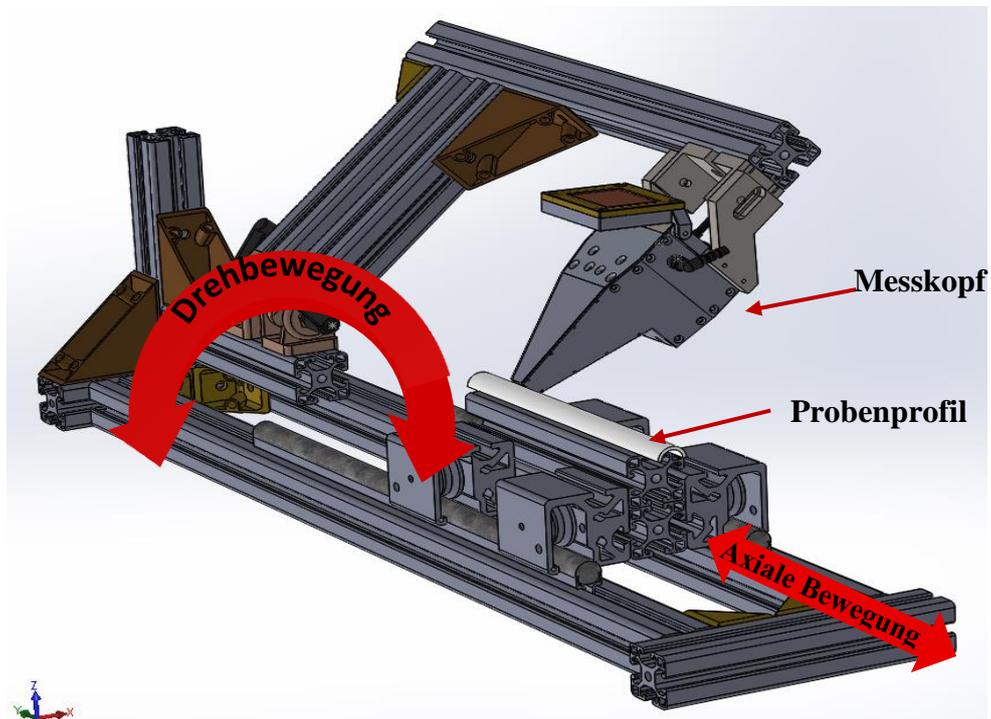


Abbildung 11: Erster Entwurf der Messvorrichtung: Schwenkbarer Messkopf um die feste Probe herum

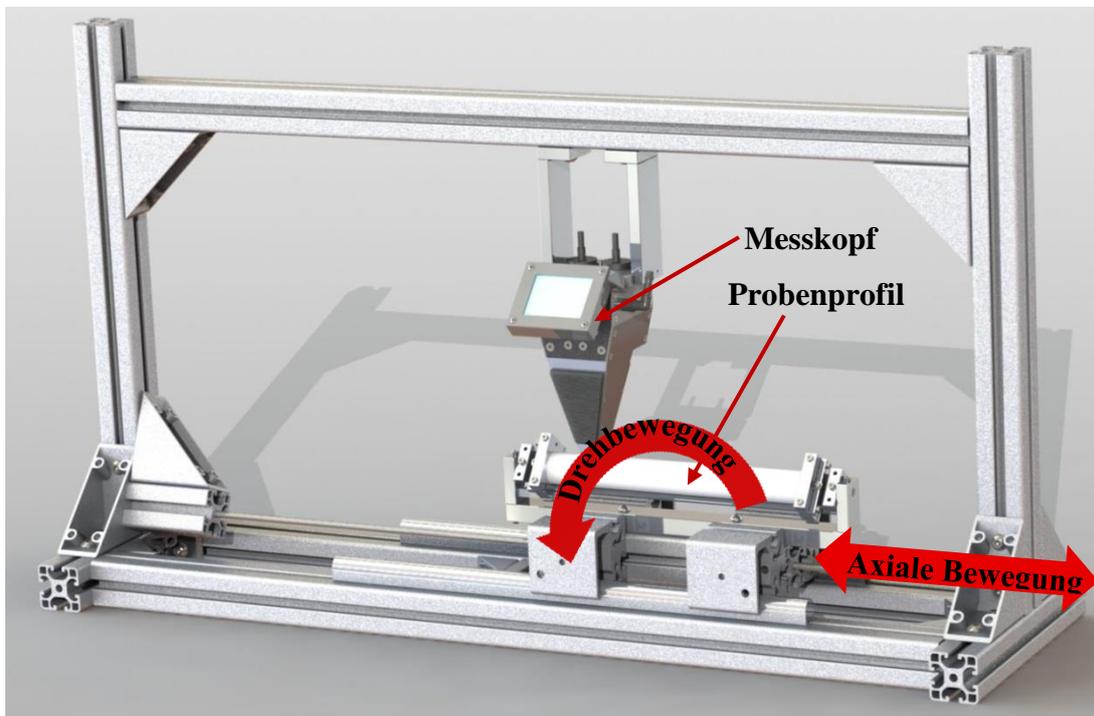


Abbildung 12: Endgültiger Entwurf der Messvorrichtung: Drehbare und verschiebbare Probe unter einem festen Messkopf

Aufgrund der relativ großen Masse des Messkopfes und des drehbaren Arms haben auf dem Scharniergelement zu große Kräfte gewirkt und die mechanische Präzision des Scharniers war leider zu gering, so dass der Messkopf nicht präzise genug über die Probe geführt werden konnte. Daher mussten wir die Messvorrichtung so ändern, dass der Messkopf fest gehalten worden ist, während dessen die Probe unter ihm gedreht und verschoben werden konnte. Eine 3D Darstellung dieses endgültigen Entwurfs befindet sich in der Abbildung 12.

Mit dieser Messvorrichtung wurden schließlich alle Erosionsproben im Projekt gemessen. Die genaue Lage der Drehvorrichtung wurde mit Hilfe einer Winkel- und einer Längenanzeige erfasst.

## 2.6 Auswertungsalgorithmus

Für die Auswertung der THz-Messdaten wurde ein umfangreiches Softwarepaket in der Entwicklungsumgebung „LabView“ von National Instruments erarbeitet. Dies beinhaltet sowohl die Schichtdickenmessung als auch die Kalibrierung der Materialparameter. Auch das originale, relativ rudimentäre Ansteuerungssoftware des THz-Messgeräts wurde komplett überarbeitet, um viele Funktionen ergänzt und in die Auswertungssoftware integriert.

### 2.6.1 Das physikalische Schicht-Modell.

Für die Berechnung der Schichtdicken aus den Zeitabständen zwischen den Reflexionsimpulsen in den Messdaten wurde ein Physikalisches Modell aufgesetzt, das die Reflexion und Transmission der THz-Wellen an allen Materialübergängen und deren Ausbreitung durch die unterschiedlichen Materialien, unter Berücksichtigung der Dispersion und Absorption, möglichst realitätsnah beschreibt.

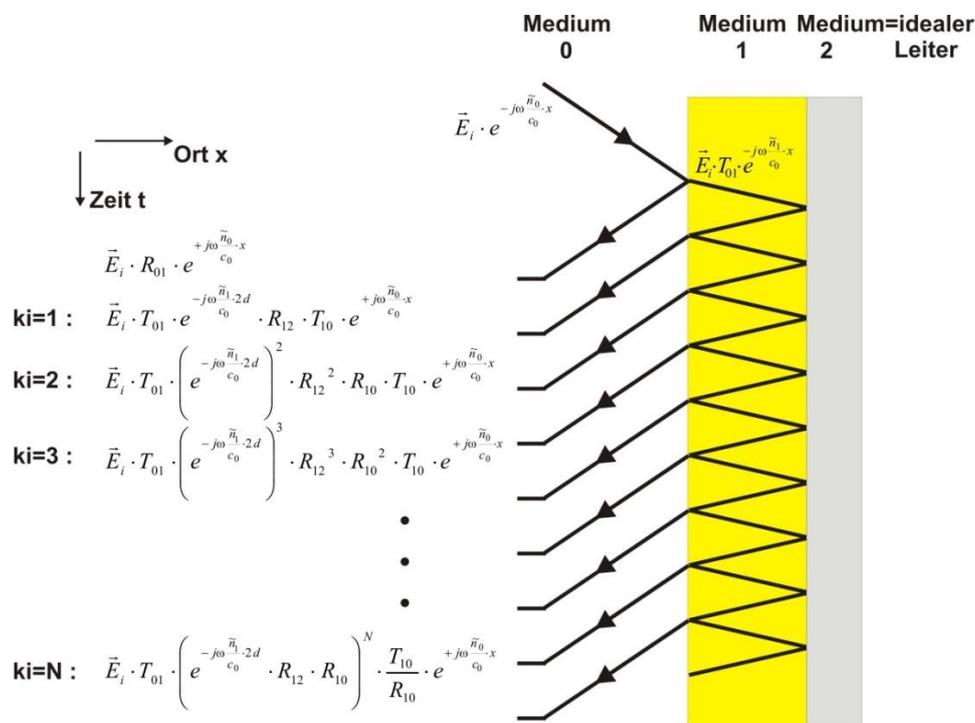


Abbildung 13: Mehrfache Reflexionen an einer Einzelschicht

#### 2.6.1.1 Einzelschichten

Wie bereits erläutert, werden die THz-Wellen an jeden Materialübergang zum Teil reflektiert und zum Teil transmittiert. Das Letztere gilt natürlich nur für nicht-leitende Stoffe. Bei einer einzigen dielektrischen Schicht können mehrfache Reflexionen auftreten (siehe Abbildung 13), insbesondere, wenn das Material an dessen Flächen die Reflexionen stattfinden, einen geringen Absorptionsgrad hat. Die Intensität dieser Reflexionen hängt unmittelbar von den Differenzen der Brechungsindizes an den Grenzflächen ab, wie die Formeldarstellung in der Abbildung 13 zeigt. Diese Mehrfach-Reflexionen werden auch abhängig von der Länge des optischen Weges, den die Strahlung zurückgelegt hat, unterschiedlich verzögert, so dass

Reflexionen höherer Ordnung stärker verzögert werden als die einer niedrigeren Ordnung. Dadurch ordnen sich die Reflexionen in einer Zeitbereichsaufnahme mit steigender Zeitskala von links nach rechts nach steigender Ordnungszahl ein.

Die Faktoren  $e^{-j\omega\frac{\tilde{n}_1}{c_0} \cdot 2d_1}$  beschreiben die Ausbreitung durch das Material 1 und die Reflexions- und Transmissionsfaktoren R und T die Reflexionen und die Transmissionen an der Vorder- und Rückseite.

Die reflektierten Wellen laufen in negativer x-Richtung, welches durch das positive Vorzeichen des Orts-Koeffizienten  $+j\omega\tilde{n}_0/c_0$  dargestellt wird.

Die Summierung über die N Beiträge der einzelnen Reflexionen ergibt den zeitinvarianten Phasor

$$\vec{E}_{mess} = \left[ R_{0,1} + T_{0,1} \cdot \frac{T_{1,0}}{R_{1,0}} \cdot \frac{\left( e^{-j\omega\frac{\tilde{n}_1}{c_0} \cdot 2d_1} \cdot R_{1,2} \cdot R_{1,0} \right) - \left( e^{-j\omega\frac{\tilde{n}_1}{c_0} \cdot 2d_1} \cdot R_{1,2} \cdot R_{1,0} \right)^{NR+1}}{1 - \left( e^{-j\omega\frac{\tilde{n}_1}{c_0} \cdot 2d_1} \cdot R_{1,2} \cdot R_{1,0} \right)} \right] \cdot \vec{E}_i \cdot e^{+j\omega\frac{\tilde{n}_0}{c_0} \cdot x}$$

Für die Berechnung der vollständigen Proben-Impulsantwort sind für jede relevante Frequenz des Impulsspektrums die Systemantworten der einzelnen Frequenzen zu berechnen.

Unter der Berücksichtigung der Tatsache, dass die Impulsantwort des Messsystems, die auch parasitäre Reflexionen an den Antennen beinhalten kann, alle Proben-Impulsantworten überlagert und somit „verunreinigt“, muss diese eliminiert werden. Dies kann durch die Entfaltung der Messsignale mit der Übertragungsfunktion des Messsystems, die vor der eigentlichen Messung, mit einer sogenannten Referenzmessung aufgenommen wird, erreicht werden. Die Referenz wird an einer möglichst idealen, leitenden Oberfläche aufgenommen und wird durch die folgende Funktion beschrieben:

$$\vec{E}_{ref} = R_{0, \text{Metall}} \cdot \vec{E}_i \cdot e^{+j\omega\frac{\tilde{n}_0}{c_0} \cdot x} \cdot e^{+j\omega\frac{\tilde{n}_0}{c_0} \cdot \Delta d_0} = (-1) \cdot \vec{E}_i \cdot e^{+j\omega\frac{\tilde{n}_0}{c_0} \cdot x} \cdot e^{+j\omega\frac{\tilde{n}_0}{c_0} \cdot \Delta d_0}$$

Der Faktor (-1) deutet auf eine Totalreflexion an der leitenden Oberfläche hin.

Der Quotient  $\vec{E}_{mess} / \vec{E}_{ref}$  ergibt demnach die Impulsantwort der Schicht:

$$\frac{\vec{E}_{mess}}{\vec{E}_{ref}} = \left[ R_{0,1} + T_{0,1} \cdot \frac{T_{1,0}}{R_{1,0}} \cdot \frac{\left( e^{-j\omega\frac{\tilde{n}_1}{c_0} \cdot 2d_1} \cdot R_{1,2} \cdot R_{1,0} \right) - \left( e^{-j\omega\frac{\tilde{n}_1}{c_0} \cdot 2d_1} \cdot R_{1,2} \cdot R_{1,0} \right)^{NR+1}}{1 - \left( e^{-j\omega\frac{\tilde{n}_1}{c_0} \cdot 2d_1} \cdot R_{1,2} \cdot R_{1,0} \right)} \right] \cdot e^{-2j\omega\frac{\tilde{n}_0}{c_0} \cdot \Delta d_0}$$

Gleichung 9

Diese Funktionsbeschreibung kann z.B. bei Vermessung einzelner Schichten oder beim Kalibriervorgang, d.h. bei der Ermittlung der spektralaufgelösten Materialparameter, verwendet werden.

Bei normaler Einstrahlung gleichen die Materialdicken  $d_1$  und  $d_0$  den tatsächlichen Materialdicken oder Abständen. Wenn der Einfallswinkel  $\theta > 0^\circ$  ist, was bei unserem Messgerät der Fall ist, verlängert sich der optische Weg entsprechend:

$$d_{1,opt} = d_1 / \cos \theta_1 \text{ und } d_{0,opt} = d_0 / \cos \theta_0 .$$

$d_1$  und  $d_0$  in Gleichung 9 werden durch  $d_{1,opt} = d_1 / \cos \theta_1$  bzw.  $d_{0,opt} = d_0 / \cos \theta_0$  ersetzt.

Die Winkel in den unterschiedlichen Materialien werden durch das Snellius'sche Gesetz bestimmt:

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1$$

Bei unserem Messgerät beträgt der Einfallswinkel in Luft  $\theta_0 = 9^\circ$

### 2.6.1.2 Mehrlagige Beschichtungen

Bei einer Mehrschichtstruktur, wo an jedem Materialübergang, d.h. bei der Vorder- und Rückseite jeder einzelnen Schicht, jeweils eine Reflexion auftreten kann, ist das Bild und die zeitliche Reihenfolge der Reflexionsimpulse deutlich komplizierter. Beispielsweise können Transmissionsimpulse von einer oberflächennahen Schicht Reflexionen in den tieferliegenden Schichten hervorrufen, oder Mehrfachreflexionen zwischen unterschiedlichen Schichten auftreten.

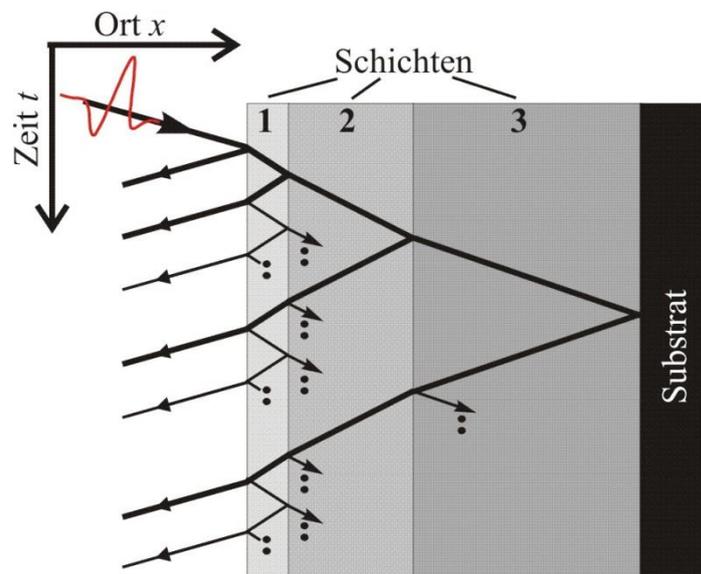


Abbildung 14: Reflexions- und Transmissionsvorgang an einem mehrlagigen Schichtsystem

Für die physikalische Beschreibung der Reflexions- und Transmissionsvorgänge jeder der einzelnen Schichten wird ein Matrizenformalismus verwendet, in dem jede einzelne Schicht durch eine Matrixe dargestellt wird [36] [37] [38] [39] [40]. Die Funktion der einzelnen Matrixelemente wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

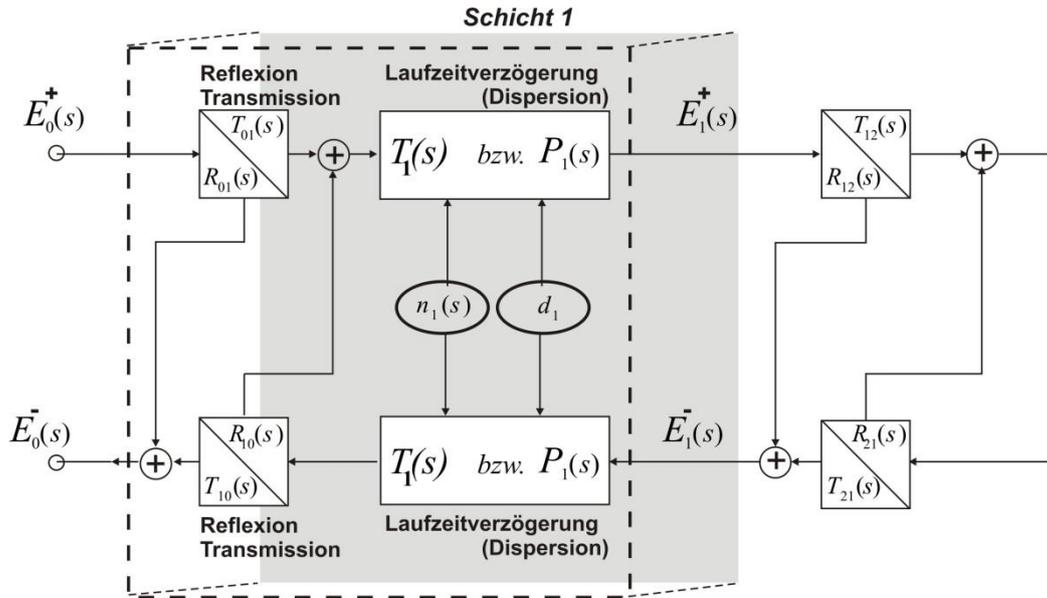


Abbildung 15: Matrizenformalismus bei mehrlagigen Schichten. Blockdiagramm jeder einzelnen Schicht

Das vorwärts bewegende Feld  $E_i^+$  und das zurück reflektierte Feld  $E_i^-$  an der ersten Grenzfläche einer Schicht „i“ hängt von den Vorwärts- und Rückwärtsfeldern an der zweiten Grenzfläche derselben Schicht über folgende Formel ab:

$$\begin{pmatrix} E_{i-1}^+ \\ E_{i-1}^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Gamma_{11}^{(i)} & \Gamma_{12}^{(i)} \\ \Gamma_{21}^{(i)} & \Gamma_{22}^{(i)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_i^+ \\ E_i^- \end{pmatrix} = \Gamma_i$$

Gleichung 10

$\Gamma_i$  ist dabei die Transfermatrix der Schicht „i“.

Bei einem mehrlagigen Schichtsystem trägt jede Schicht über ihre eigene Transfermatrix zum Gesamtfeld bei:

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Gamma_{11}^{(S1)} & \Gamma_{12}^{(S1)} \\ \Gamma_{21}^{(S1)} & \Gamma_{22}^{(S1)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Gamma_{11}^{(S2)} & \Gamma_{12}^{(S2)} \\ \Gamma_{21}^{(S2)} & \Gamma_{22}^{(S2)} \end{pmatrix} \cdots \begin{pmatrix} \Gamma_{11}^{(SL-1)} & \Gamma_{12}^{(SL-1)} \\ \Gamma_{21}^{(SL-1)} & \Gamma_{22}^{(SL-1)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Gamma_{11}^{(SL)} & \Gamma_{12}^{(SL)} \\ \Gamma_{21}^{(SL)} & \Gamma_{22}^{(SL)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ R_{L,L+1} \end{pmatrix} \cdot E_L^+$$

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2 \cdot \Gamma_3 \cdots \Gamma_L \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ R_{L,L+1} \end{pmatrix} \cdot E_L^+$$

Gleichung 11

also

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Gamma_1^{(System)} \\ \Gamma_2^{(System)} \end{pmatrix} \cdot E_L^+$$

Gleichung 12

Daraus ergibt sich direkt das Reflexionsfeld des Beschichtungssystems:

$$E_0^- = \frac{\Gamma_2^{(System)}}{\Gamma_1^{(System)}} \cdot E_0^+$$

Gleichung 13

Unter Einsatz der Definitionen für  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$ , ...,  $\Gamma_L$  und unter Berücksichtigung der Materialkonstanten und Ausbreitungswinkel in den entsprechenden Materialien, kann das Reflexionsfeld als Gesamttransferfunktion des Schichtaufbaus berechnet werden:

$$\frac{E_0^-}{\bar{E}_{ref}(x=0)} = (-1) \cdot \frac{\Gamma_2^{(System)}}{\Gamma_1^{(System)}} \cdot e^{-2j\omega \frac{\tilde{n}_0}{c_0} d_{ref,opt}}$$

Gleichung 14

Selbstverständlich kann dieser Formalismus in vereinfachter Form auch für die Beschreibung von Einzelschichten verwendet werden.

## 2.6.2 Kalibrierung (Materialparameterberechnung)

Wie aus der o.g. Formalbeschreibung des Transmissions- und Reflexionsvorgangs in einem Mehrschichtsystem ersichtlich wird, sind für die Berechnung der Transferfunktion die Materialparameter in Form von komplexen Brechungsindizes  $\tilde{n}_i$  zwingend erforderlich.

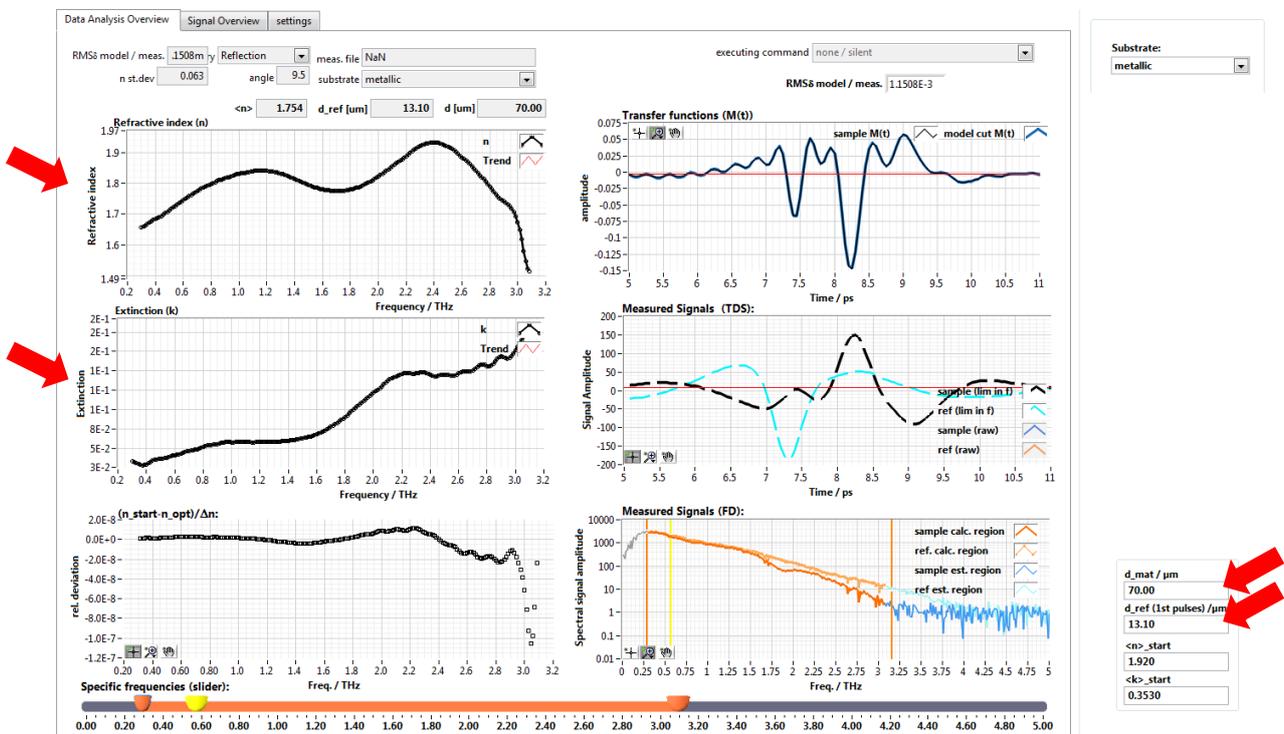


Abbildung 16: Routine zur Materialparameter Berechnung

Um diese Materialparameter zu gewinnen, werden von jedem Beschichtungsmaterial aus dem Schichtsystem jeweils eine oder mehrere sogenannte Kalibrierproben gefertigt und untersucht. Kalibrierproben sind solche, bei denen auf einer Metallplatte ein einziger Beschichtungsstoff möglichst gleichmäßig, d.h. mit möglichst gleichmäßiger Schichtdicke, aufgetragen wird. Bei

der Kalibrierung wird in einem Optimierverfahren bei jeder im Spektrum der THz-Strahlung verfügbaren Frequenz der komplexe Brechungsindex errechnet. Es werden die frequenzspezifischen Brechungsindizes genommen, die die Differenz zwischen der gemessenen und der anhand der Brechungsindizes errechneten Transferfunktion minimieren. Es gibt hierzu unterschiedliche Verfahrensweisen und Verfeinerungsstufen [41] [42] [43] [44] [45] [46].

Die frequenzweise Berechnung der Materialparameter erfolgt in einer globalen Optimierungsroutine, d.h. es werden auf unterschiedlichen Iterationsniveaus alle relevanten Parameter optimiert (siehe Abbildung 16): die Schichtdicke und der Referenzabstand werde in einem 2-dimensionalen Raum variiert, wobei für jeden der Werte die frequenz aufgelösten, komplexen Brechungsindizes berechnet werden. Die roten Pfeile markieren diese gleichzeitig optimierten Parameter.

Zur Veranschaulichung, nehmen wir den Fall einer Gelcoat-Schicht. Mittels Wirbelstromverfahren wurde eine Schichtdicke von ca. 100µm gemessen, die Materialparameter-Kurven mit relativ hoher Welligkeit produziert (siehe Abbildung 17).

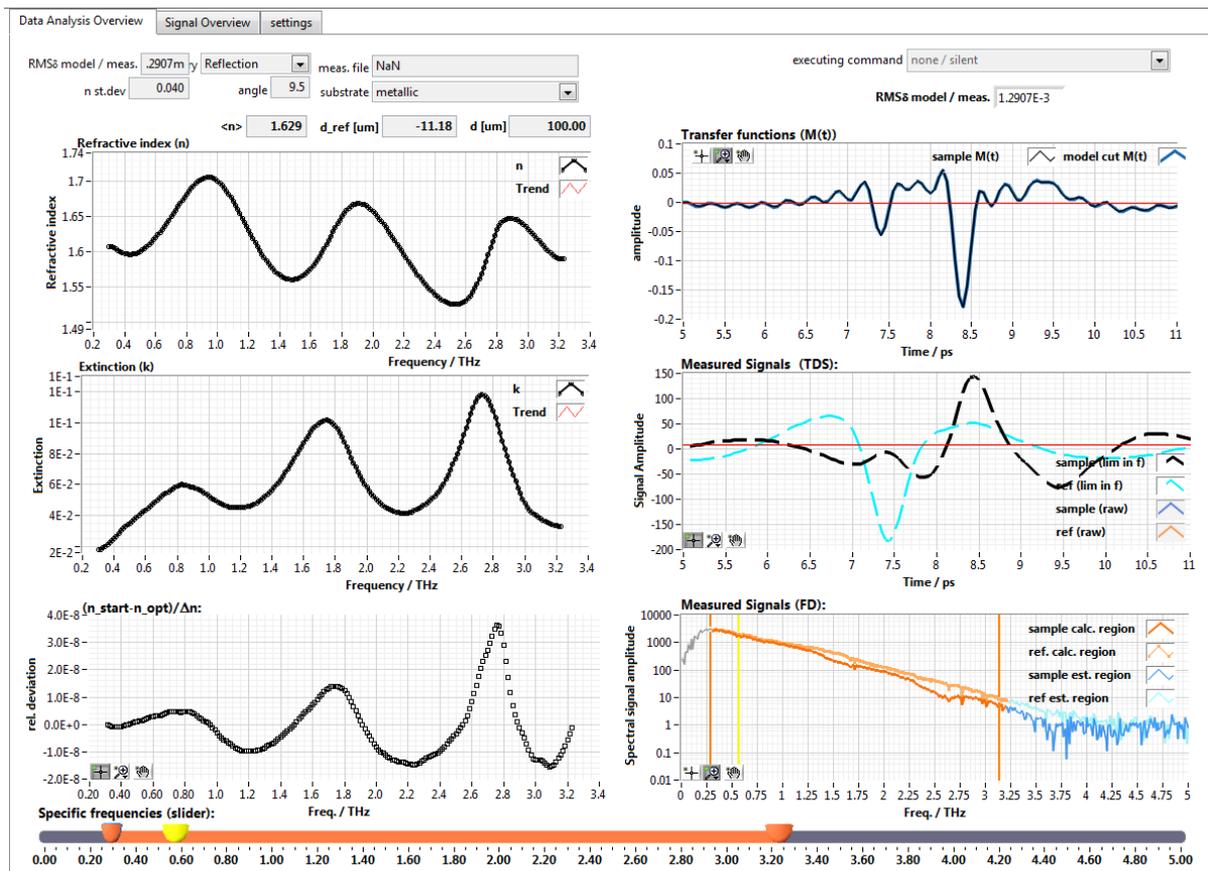


Abbildung 17: Materialparameter vor der Optimierung

Nach der Optimierung, haben sich die Schichtdicke und der Referenzabstand leicht geändert und die Welligkeit wurde drastisch reduziert. (siehe Abbildung 18)

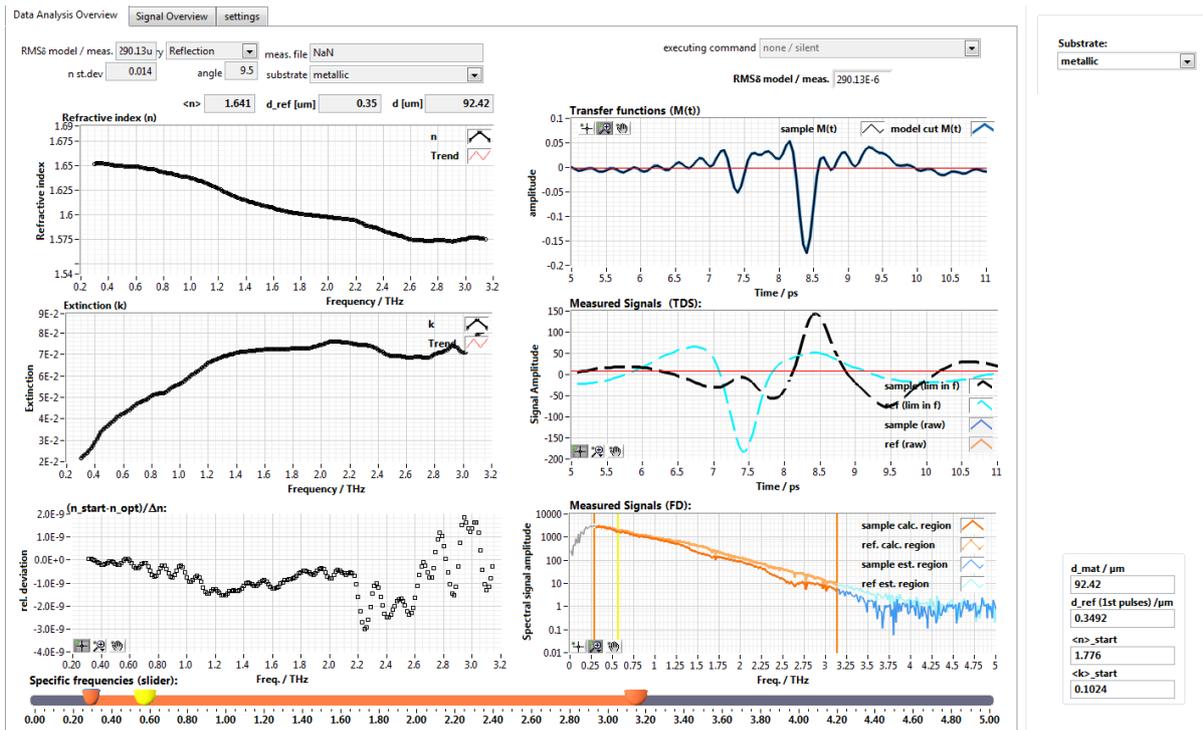


Abbildung 18: Materialparameter nach der Optimierung

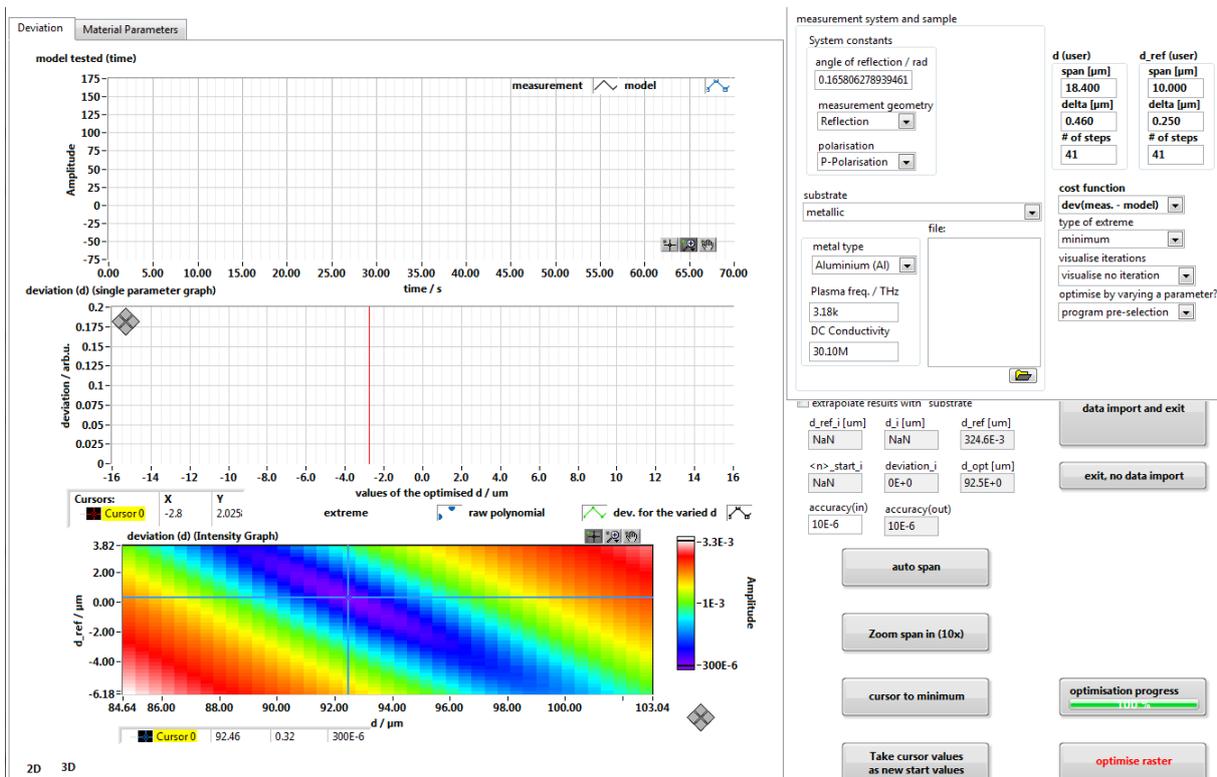


Abbildung 19: Materialparameterberechnung im Rasterverfahren

Für den Fall, dass eine automatische Optimierung nicht möglich ist, welcher meistens bei sehr dünnen Kalibrierproben mit ungleichmäßiger Schichtdickenverteilung auftreten kann, wurde eine zusätzliche Berechnung eingeführt, in dem die Schichtdicke und der Referenzabstand in einem von Benutzer zu definierenden Raster zweidimensional variiert werden. Als Ergebnis

dieser Berechnung wird die Differenz zwischen der berechneten und der gemessenen Transferfunktionen in einer Farbkodierung dargestellt (siehe Abbildung 19). Das Optimum kann entweder automatisch oder durch den Benutzer ausgewählt werden.

Parallel zu dieser frequenzweisen Methode können auch globale Auswertungsverfahren verwendet werden, wobei die Materialparameter über eine Funktion definiert werden und im Rahmen der Optimierung die Koeffizienten dieser Funktion zu einer Minimierung der o.g. Differenz hin angepasst werden. Die Funktion wird passend zur Natur der zu kalibrierenden Stoffe, anhand von theoretischen Modellen definiert.

Die Berechnungsroutine führt zuerst eine globale Optimierung durch, in der die Koeffizienten der Funktion grob berechnet werden. Die globale Optimierung ist notwendig für die grobe Findung eines globalen Minimums, da andere Methoden hier daran scheitern würden, dass das Problem eine Vielzahl von lokalen Minima hat. Aufgrund des rechnerischen Aufwands der globalen Optimierung für eine Feinanpassung der Parameter kommt für die finale Optimierung ein weiterer Algorithmus zum Einsatz, der ein absolutes Minimum des Problems findet und somit die optimalen Parameter der Materialfunktion berechnet.

Ein Beispiel einer Optimierung kann in der Abbildung 20 gesehen werden.

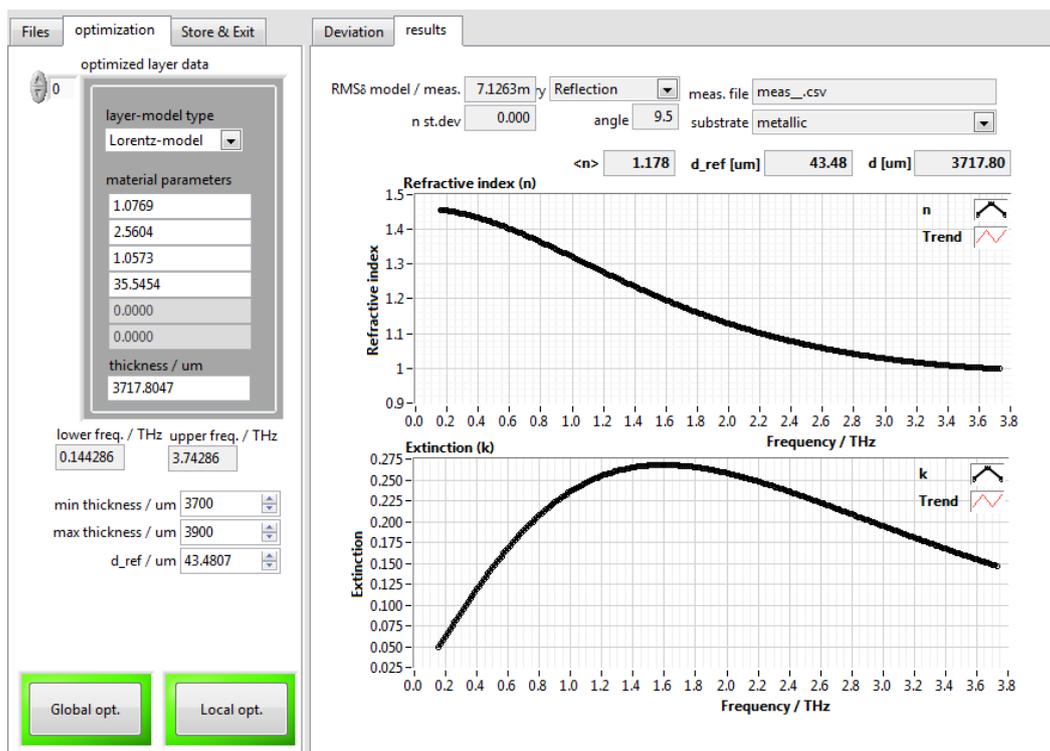


Abbildung 20: Routine zur Berechnung der Materialparameter unter Annahme eines funktionalen Verlaufs. Globale Optimierung und finale Anpassung.

Es ist hier zu vermerken, dass eine Berechnung der Materialparameter nach einer funktionalen Form größere Abweichungen zwischen der gemessenen und der berechneten Transferfunktion der Beschichtung in Vergleich zu der frequenzweisen Methode aufweist.

### 2.6.3 .Datenauswertung von Schichtdickenmessungen

Für die Auswertung der Messdaten von mehrlagigen Beschichtungssystemen wird das physikalische Modell in seiner Matrizenform verwendet, um mehrfache Reflexionen und Mischprozesse zwischen Reflexion und Transmission zwischen den unterschiedlichen Schichten zu beschreiben.

- a) Zuerst werden die Materialparameter, die zu den im Schichtaufbau verfügbaren Beschichtungsstoffen gehören, geladen.
- b) Anschließend werden die Referenz und die Messung durchgeführt und, falls nötig, auf eine gemeinsame Zeitskala gebracht.
- c) Die THz-Impulsform wird rechnerisch aus dem Messsignal entfernt.
- d) Des Weiteren werden die potentiellen Reflexionsimpulse lokalisiert und die Zeitabstände zwischen ihnen berechnet
- e) Im nächsten Schritt werden alle möglichen Kombinationen dieser Zeitabstände berechnet, die der Anzahl der Schichten im Beschichtungssystem entsprechen, und anhand von messtechnischen und physikalischen Kriterien werden die unwahrscheinlichsten von ihnen aussortiert.
- f) Zuletzt werden die Zeitabstände, die die beste Übereinstimmung mit den Messungen hervorrufen, übernommen und weiter optimiert. Die Materialdicken, die nach der Optimierung die beste Übereinstimmung mit den Messungen erlauben, werden schließlich als Endergebnis angenommen.

### 2.6.4 Plausibilitätsanalyse (Vergleich mit Mikroskopmessungen von Schliffproben)

Zur Prüfung der Schichten, insbesondere derjenigen, wo aufgrund des mangelnden Materialkontrasts oder der sehr dünnen Schichtdicken mit Schwierigkeiten zu rechnen ist, sind in vielen Fällen auch Vergleichsmessungen nötig. Diese Vergleichsmessungen sind auch nötig, um den Suchbereich der Messdatenauswertung einzugrenzen, wenn der übliche Optimierungsraum zu aufwändigen und zeitraubenden Berechnungen führt. Auch während der Entwicklungsphase der Auswertungsalgorithmen waren solche Vergleichsmessungen unerlässliche Hilfsmittel.

Zum Vergleich wurden von den zu untersuchenden Beschichtungen Schliffproben mit Hilfe einer Poliermaschine erstellt. Je nach Beschichtungsdicke wurden Schliffgenauigkeiten von unter  $1\mu\text{m}$  erstellt.

Die folgenden Bilder zeigen einen typischen Beschichtungsaufbau aus dem Windenergiebereich bestehend auf einer Gelcoatschicht auf GFK, die durch eine grauen und eine rote Topcoatschicht geschützt ist.

Dadurch, dass die rote Oberschicht im Vergleich zur Unterschicht extrem dünn aufgetragen ist, waren in diesem Fall zwei Aufnahmen notwendig, um die Dicken richtig zu erfassen. So musste die unterste Gelcoat-Schicht mit einer 5x Vergrößerung aufgenommen werden, während die rote Topcoat nur unter 20x Vergrößerung messbar war.

Die mittels THz-Messungen ermittelten Schichtdicken (roter Topcoat:  $11,68\mu\text{m}$ , grauer Topcoat:  $72,84\mu\text{m}$  und Gelcoat:  $280,51\mu\text{m}$ ) ähneln denen aus Schliffmessungen sehr gut (siehe Abbildung 21) und rufen die Mess- und Modellkurve in der Abbildung 22 hervor.

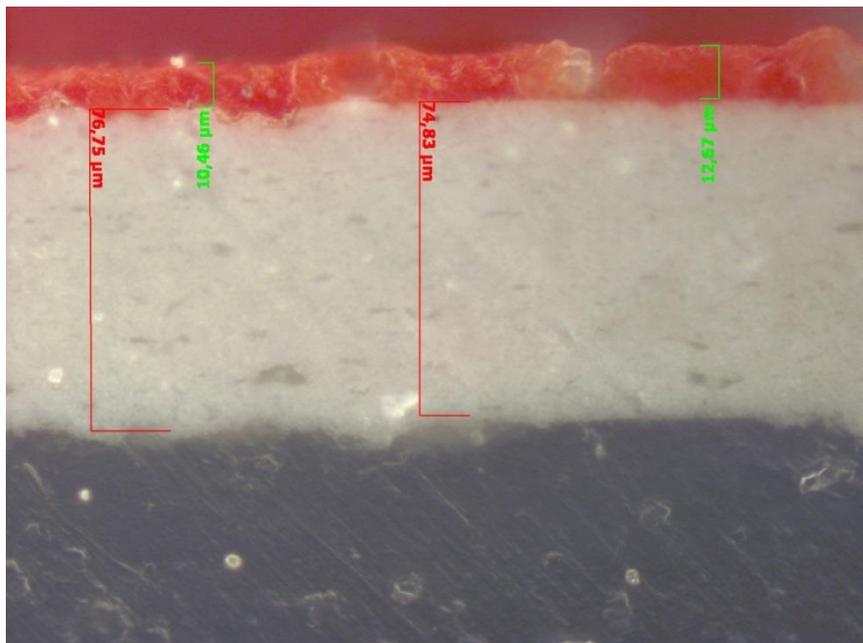
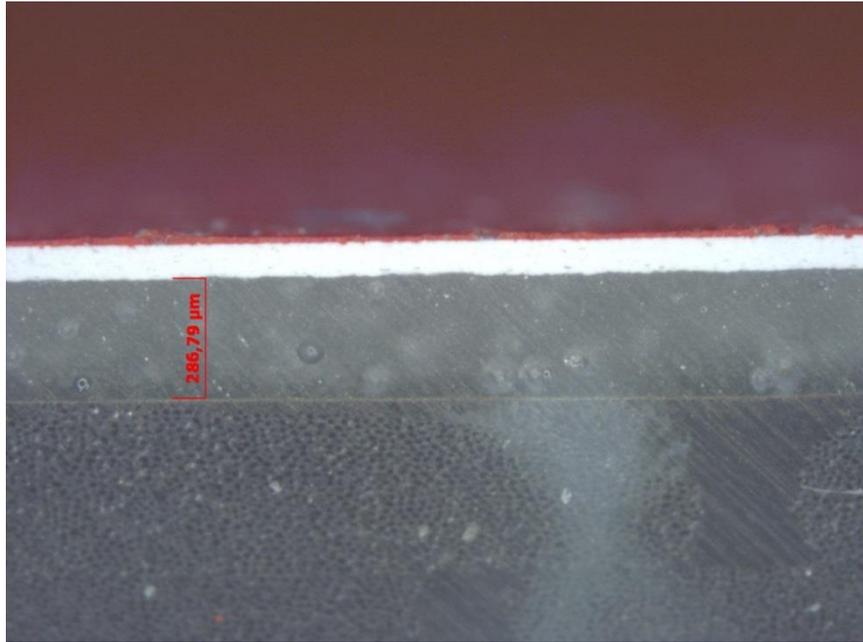


Abbildung 21: *Schliffprobenmessung einer Rotorblattbeschichtung: oben bei 5x und unten bei 20x Vergrößerung*

Die oberste Schicht ist in diesem Fall so dünn, dass sie visuell in der Messkurve nicht eindeutig identifiziert und verifiziert werden kann, weil sich die Reflexionsimpulse von der Vor- und Rückseite der Schicht quasi überlagern. Trotzdem war das Messergebnis eindeutig und die Schichtdickenerkennung numerisch zielführend, was der anschließende Vergleich mit der Schliffmessung belegt hat. Die geringen Abweichungen zwischen THz- und Schliffmessungen sind in diesem Fall auf die Tatsache zurückzuführen, dass die THz-Messungen in der Mitte der Proben, währenddessen die Schliffmessungen am Rande der Beschichtungen durchgeführt worden sind.

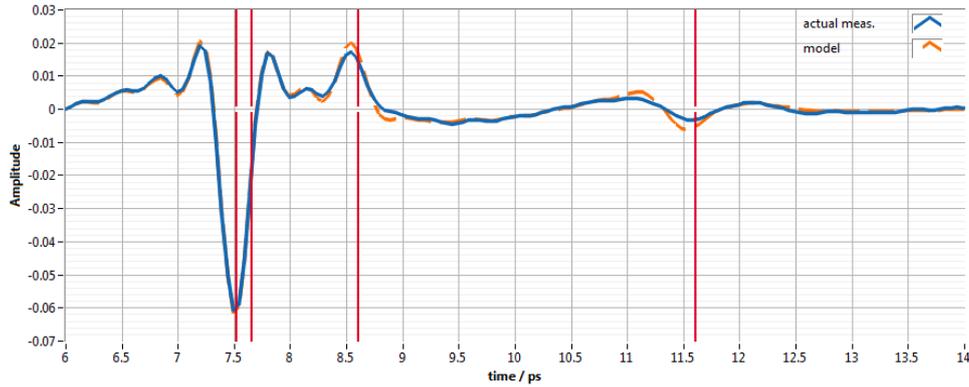
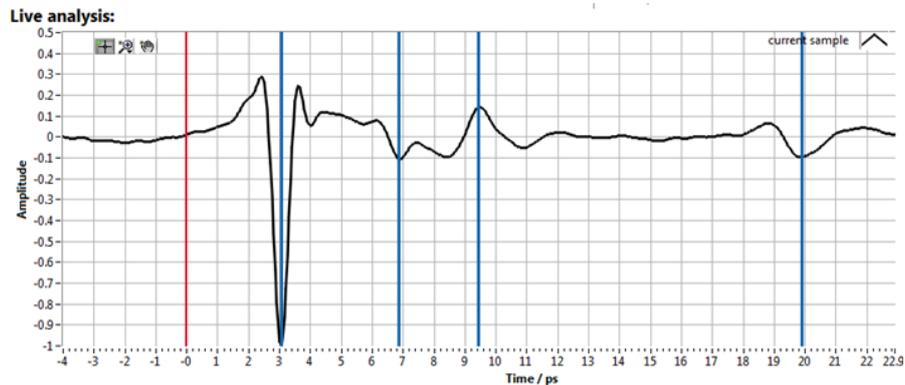


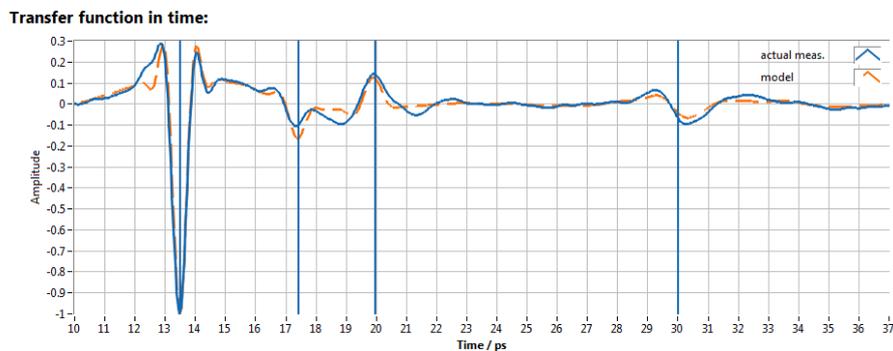
Abbildung 22: THz-Messung von derselben Probe, von der die Schlicfmessung von Abbildung 21 stammt. Schichtdicken: roter Topcoat: 11,68 $\mu\text{m}$ , grauer Topcoat: 72,84  $\mu\text{m}$  und Gelcoat: 280,51  $\mu\text{m}$

## 2.6.5 Live-Messung

Für Messungen „aus der Hand“, wo eine optimale Messung relativ schwer durchzuführen ist, haben wir eine schnelle Auswertung in die Benutzeroberfläche eingepflegt, die eine große Hilfe bei der Bestimmung des richtigen Zeitpunktes für eine Messung leisten kann.



Thicknesses	ref. dist.	Layer 1	Layer 2	Layer 3
/ $\mu\text{m}$ :	450.8	338.6	204.6	957.9



Thicknesses	ref. dist.	Layer 1	Layer 2	Layer 3
/ $\mu\text{m}$ :	449.3	349.5	199	923

Abbildung 23: Vergleich zwischen der Live- und der ausführlichen THz-Auswertung

Dadurch, dass diese schnelle Auswertung quasi in Echtzeit erfolgen muss, mussten bei der Auswertungsgenauigkeit bestimmte Kompromisse eingegangen werden. Ein Vergleich zwischen der Live- und der ausführlichen Auswertung kann in der Abbildung 23 gesehen werden.

Da der Live-Modus eine ausschließliche Auswertung der Signalamplituden durchführt und kein Physikalisches Modell involviert, können gegenseitige, phasenbezogene Einflüsse zwischen den Reflexionsimpulsen oder Absorptionseffekte nicht berücksichtigt werden. Daher können manchmal große Abweichungen zwischen den beiden Modi auftreten.

## 2.7 Messungen von Erosionsproben

Beim Fraunhofer IWES wurde speziell für die Beanspruchung von Rotorblattbeschichtungen unter Erosionsbedingungen eine Anlage entwickelt, die basierend auf dem Hubschrauber-Funktionsprinzip funktioniert. Speziell gefertigte Profile werden aus GFK hergestellt, bei den Beschichtungsherstellern mit bestimmten, für das Projekt relevanten Beschichtungssystemen beschichtet und anschließend nach festen, im Projekt erarbeiteten Vorgaben in der Erosionsanlage erodiert.

Da das Einsetzen und die Auswirkungen der Erosion nur durch wiederholte Messungen nach unterschiedlichen Beanspruchungszeiten an immer denselben Stellen auf den Proben festzustellen sind, haben wir seit Anfang des Projektes die Idee einer Messvorrichtung ins Gespräch gebracht, die die räumliche Wiederholbarkeit der Messungen an den halbzyklischen Erosionsprofilen sicherstellt (siehe Abschnitt 2.5.3).

Außerdem wurden sehr viele Erosionsversuche mit Beschichtungssystemen älterer und neuerer Generation durchgeführt, um deren Beständigkeit gegen Regenerosion zu ermitteln und die Eignung für weitere, detailliertere Untersuchungen festzulegen.

### 2.7.1 Beschichtungssysteme und Kalibrierbeschichtungen

Für die Kalibrierung der Beschichtungsstoffe wurden Kalibrierplatten bereitgestellt, wobei die Beschichtungen sowohl auf Aluminium- als auch auf Stahlplatten aufgetragen wurden. Stahl gilt einerseits als besser geeignetes Material für die Schichtdickenmessung mittels magnet-induktiver Messverfahren, ist jedoch aufgrund der schlechteren elektrischen Leitfähigkeit weiter entfernt vom idealen, perfekt leitenden Metall. Auf der anderen Seite sind magnet-induktive Messungen auf Aluminium-Substrat von potenziell höheren Messfehlern betroffen, das Substratmaterial kann aber aufgrund der sehr hohen elektrischen Leitfähigkeit besser durch ein ideales, perfekt leitendes Metall beschrieben werden. Aus diesem Grund haben wir die Kalibrierproben auf beide Trägermaterialien auftragen lassen.

In manchen Fällen wird zusätzlich ein Porenfüller auf den Gelcoat aufgetragen, der die eventuellen Poren in der Oberfläche schließen soll, der aber auf eine Dicke von fast 0µm „abgezogen“ wird. Daher ist der Porenfüller THZ-messtechnisch nicht relevant und wird im weiteren Verlauf nicht mehr berücksichtigt.

Erosionsprobe	Bezeichnung	Material
139-1, 2 und 3	Hightech System	GFK
		Gelcoat
		Kantenschutz
128-1, 2 und 3	Mittelklasse-system	GFK
		Gelcoat
		Topcoat
		Kantenschutz

Tabelle 4: Schichtaufbau der wiederholt erodierten Beschichtungssysteme

Die Entscheidung fiel schließlich, nähere Untersuchungen von zwei Beschichtungssystemen mittels THz-Messtechnik durchzuführen, wobei diese Proben mehrmals beansprucht und nach jedem Erosionsvorgang an festgelegten Stellen vermessen werden sollten. Es handelt sich dabei um ein Mittelklasse-System und ein Hightech-System. Die Tabelle 4 zeigt den Aufbau dieser untersuchten Beschichtungssysteme.

### 2.7.2 Beschichtungsfehler

Es wurden mehrere Erosionsproben hergestellt, wo immer wieder Beschichtungsfehler festgestellt wurden, die eine weitere Beanspruchung in der Erosionsanlage aussichtslos machten. Insbesondere das Hightech-System war davon betroffen, da hier die obere Schicht aufgerollt wird und dadurch Lufteinschlüsse bilden kann. Solche oberflächennahe Lufteinschlüsse, die zum Teil, wenn sie groß genug sind, auch eine Öffnung an der Oberfläche bilden (siehe Abbildung 24), reißen unter Beanspruchung in der Erosionsanlage auf und wachsen durch die Erosion sehr schnell, so dass sie in kurzer Zeit eine Kraterstruktur auf der Probe bilden (siehe Abbildung 26). Da diese Lufteinschlüsse beim Auftragen der Beschichtung unkontrolliert entstehen, wurde diese Problematik als eines der größten Hindernisse für eine reale und objektive Vergleichbarkeit der Beständigkeit der untersuchten Beschichtungen gegen Erosion eingestuft.

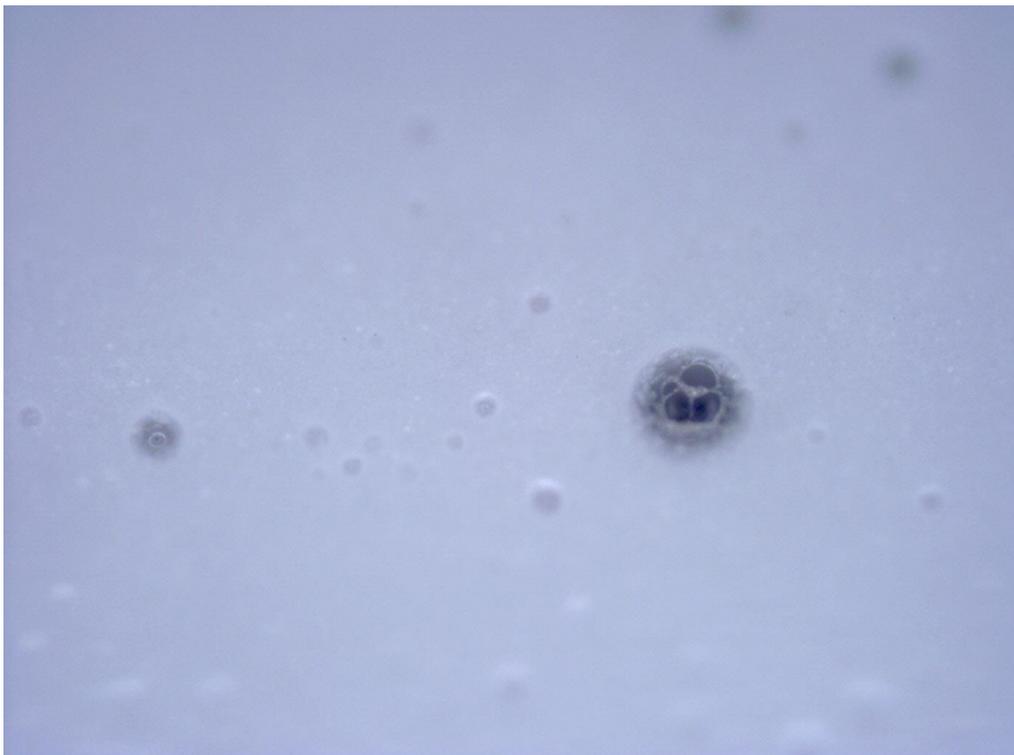


Abbildung 24: *Beschichtungsfehler, die eine direkte Vergleichbarkeit von Proben erschwerte. Mikroskopaufnahme mit 5-facher Vergrößerung*

Es wurde großer Aufwand für die Herstellung von möglichst fehlerfreien Proben betrieben. Trotzdem waren an allen Proben, die mit dem Hightech-System präpariert worden sind, Beschichtungsfehler vorhanden. Auch die Proben, die später wiederholten Erosionsprozeduren unterzogen wurden, haben ähnliche Schäden, allerdings weniger ausgeprägt gezeigt (siehe Abbildung 25)

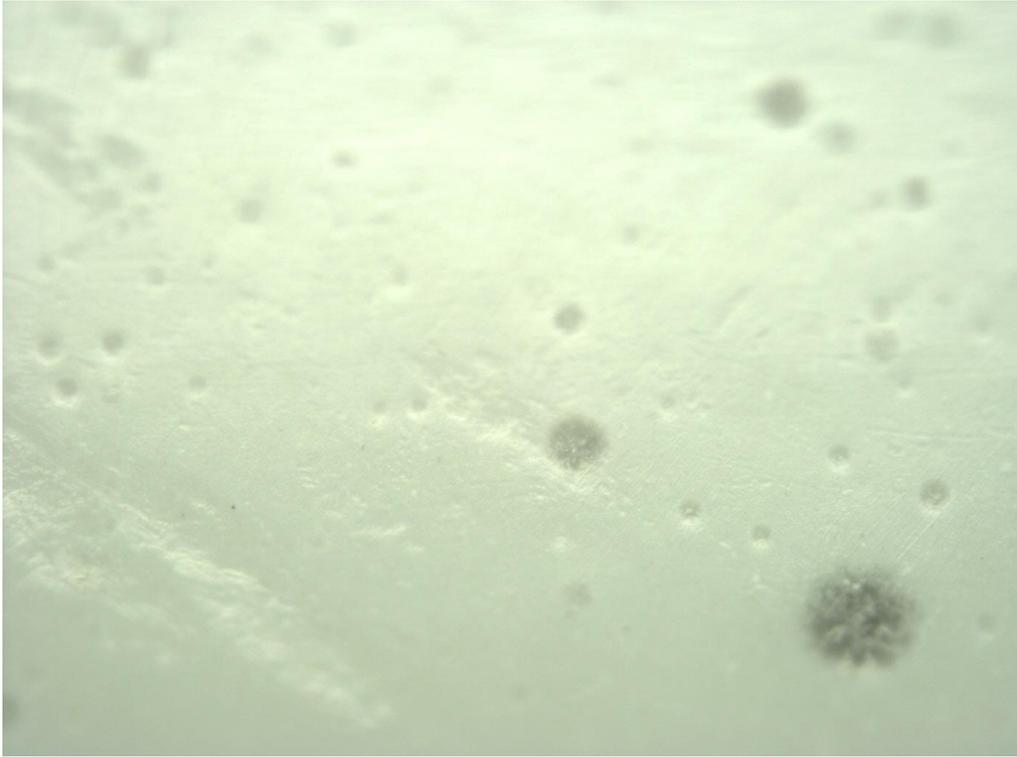


Abbildung 25: Beschichtungsfehler bei den für die wiederholten Erosionsversuche freigegebenen Proben. Mikroskopaufnahme mit 20-facher Vergrößerung.

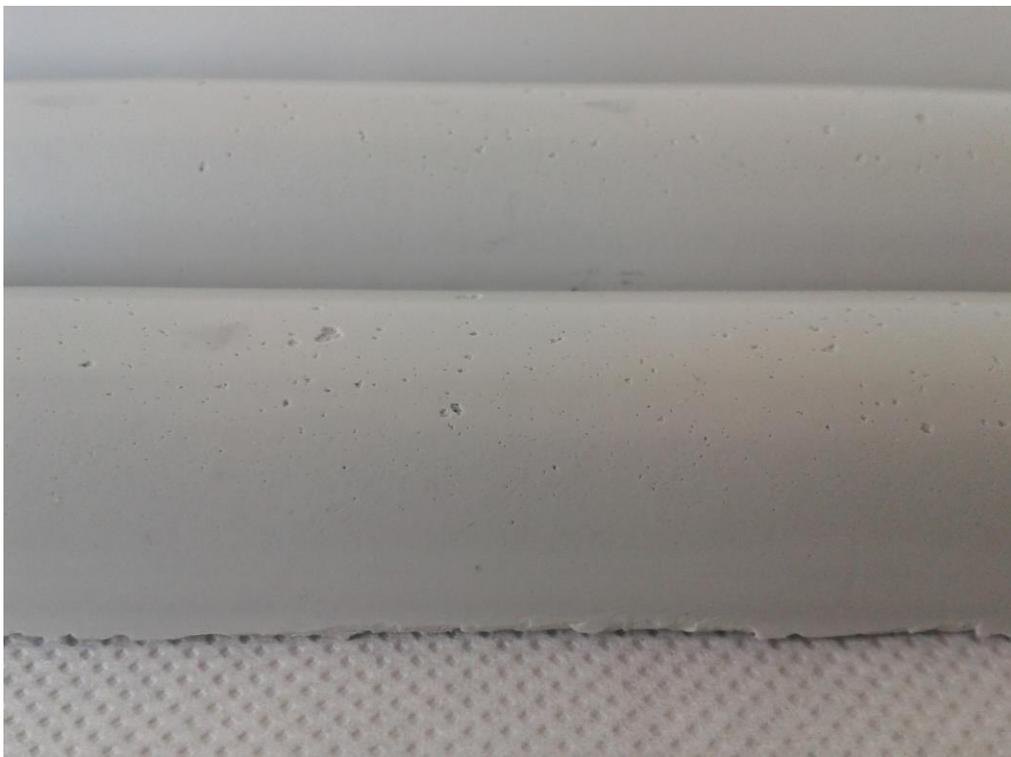


Abbildung 26: Beschichtungsfehler, die nach kurzer Erosionszeit zu Kraterbildung führen.

Bei fortlaufender Erosion können katastrophale Schäden an der Beschichtung auftreten, bei denen das Beschichtungsmaterial großflächig abgetragen, das Substrat freigelegt, und selbst z.T. abgetragen wird (siehe die Abbildungen 27 und 28). Solche Schäden würden bei einer WEA relativ schnell zum Ausfall des betroffenen Rotorblatts führen.

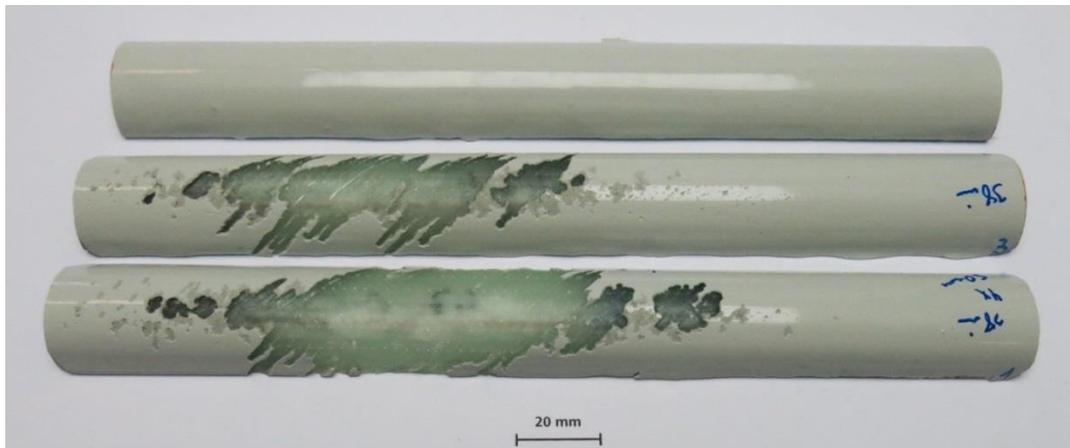


Abbildung 27: Spontan entstandenes Komplettversagen der Beschichtung nach 47 Minuten Erosionszeit mit Weißbruch im Substrat (Bild von Fraunhofer IFAM)

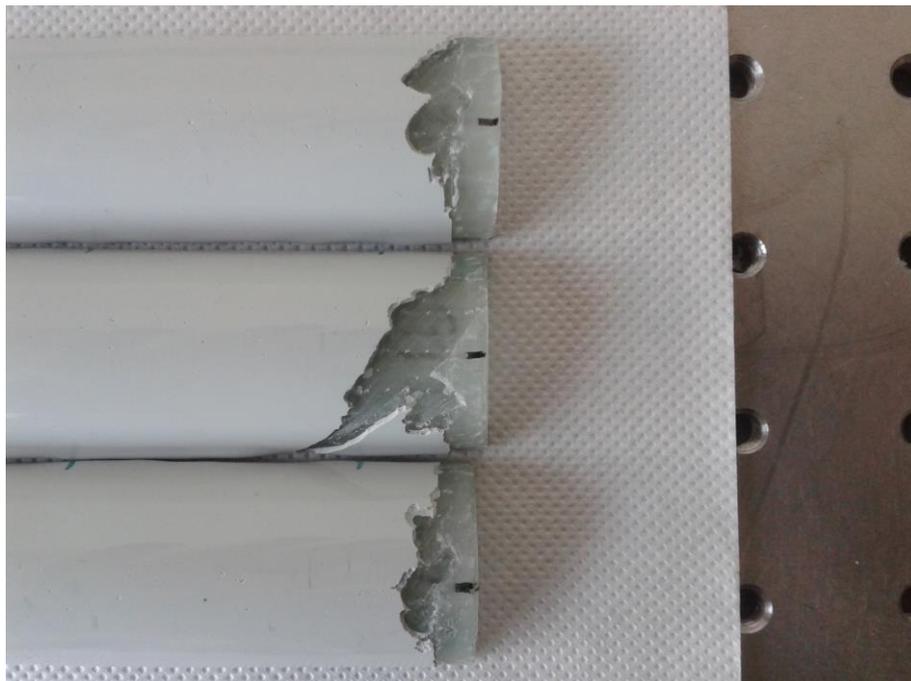


Abbildung 28: Komplettversagen der Beschichtung nach 22 Minuten Erosionszeit in der Nähe vorbeschädigter Stellen. Z.T. wurde hier auch freigelegtes Substratmaterial abgetragen

### 2.7.3 Materialparameter der Erosionsproben

Die Kalibrierung der drei Materialien, die beim Hightech-Beschichtungssystem P369-O vorhanden sind (GFK, Gelcoat P369-P und Kantenschutz P369-H), hat überraschenderweise ergeben, dass der Gelcoat und Kantenschutz fast die gleichen Materialparameter haben (siehe Abbildung 29).

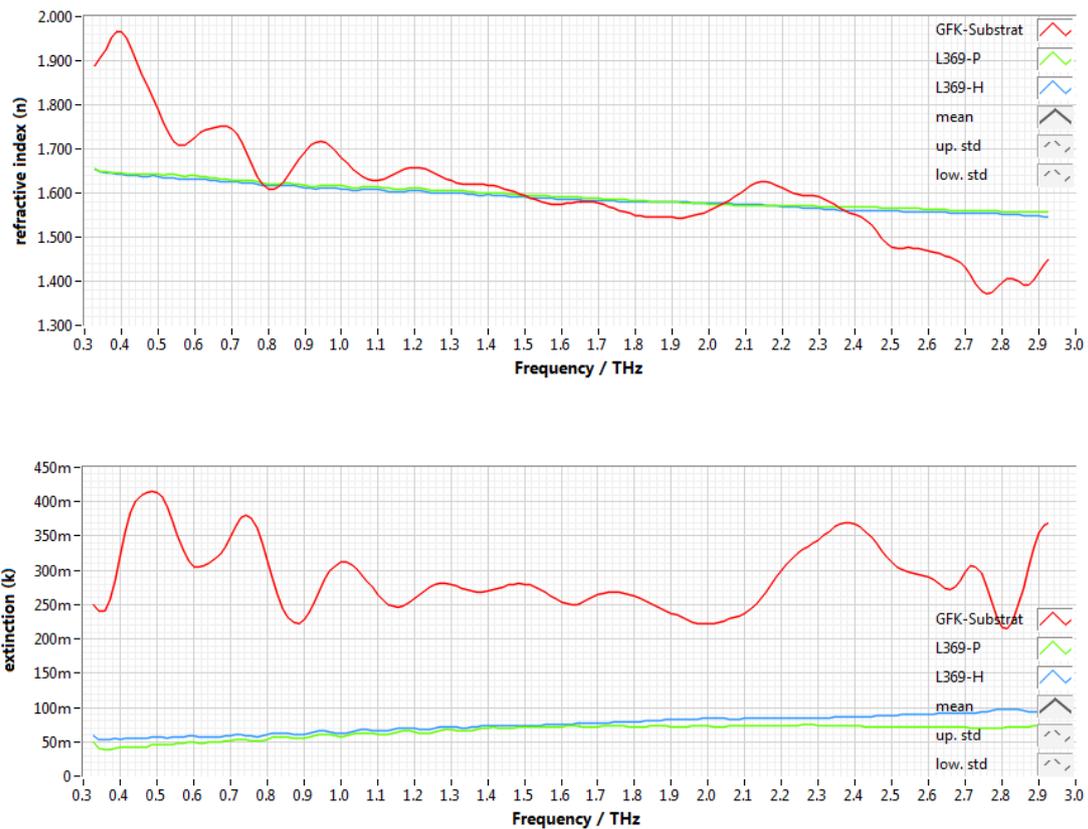
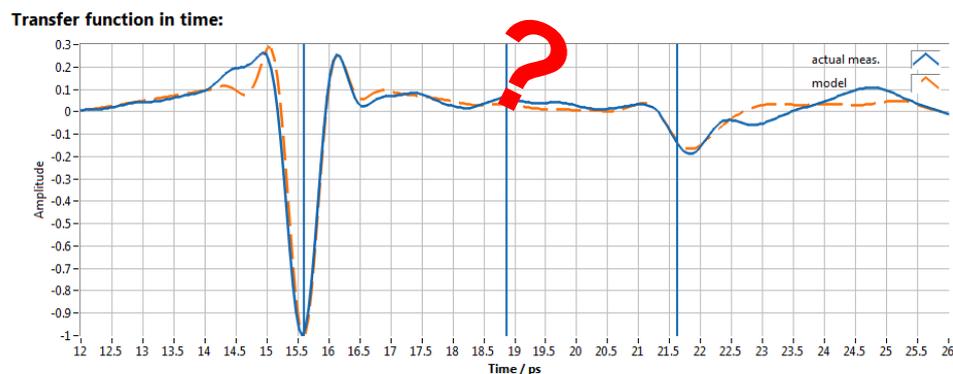


Abbildung 29: Materialparameter des Hightech Beschichtungsystems.

Somit ist hier der für eine akkurate Auswertung benötigte Materialkontrast leider nicht gegeben. Auch die späteren Messungen und Auswertungsversuche der Schichtdicken sind fehlgeschlagen, da der Reflexionsimpuls vom Materialübergang Gelcoat/Kantenschutz zu niedrig ausfiel und deswegen nicht richtig ausgewertet werden konnte (siehe Abbildung 30). Für dieses Beschichtungssystem ist somit höchstens eine Gesamtschichtdickenmessung vorstellbar.



Thicknesses	ref. dist.	Layer 1	Layer 2
/ $\mu\text{m}$ :	768.1	296.8	252.2

Abbildung 30: Schichtdickenmessung am Hightech-Beschichtungssystem P369-O.

Die Kalibrierung des Mittelklasse-Systems, bestehend aus GFK, Gelcoat P369-P, Topcoat P369-A und Kantenschutz P369-B, hat im Vergleich zum Highend-System viel günstigere Kontrastverhältnisse ergeben (siehe Abbildung 31).

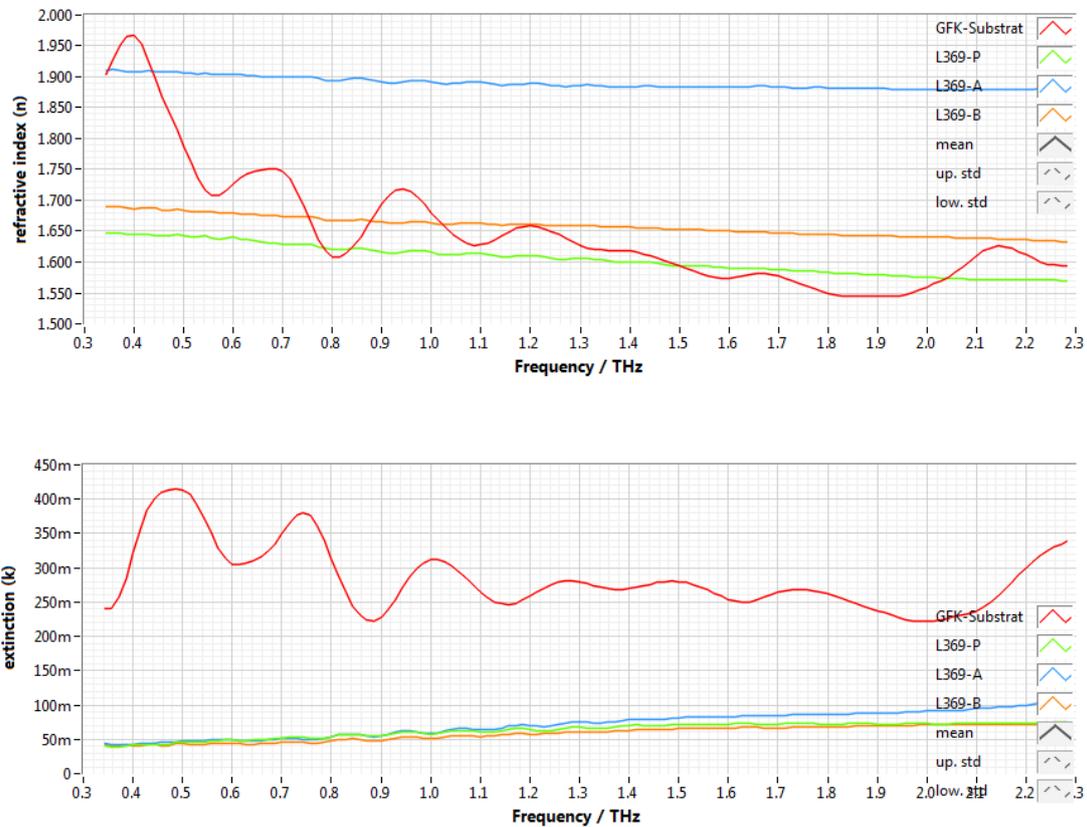


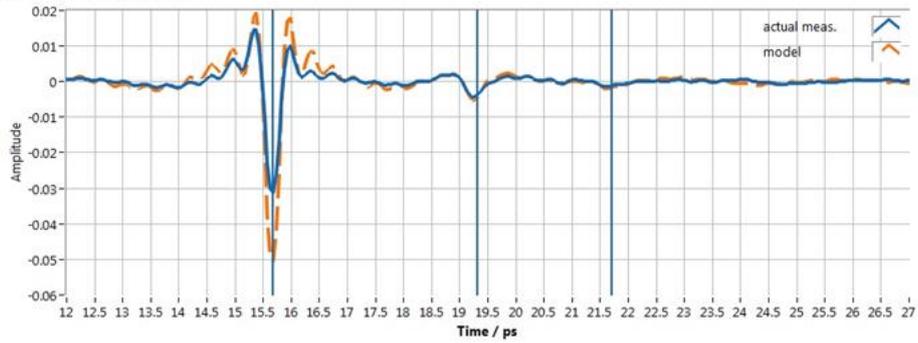
Abbildung 31: Materialparameter des Mittelklasse Beschichtungssystems P369-L

Selbst wenn der Gelcoat P369-P und der Kantenschutz P369-B z.T. einen Brechungsindexunterschied von weniger als 0,05 aufweisen, sind sie durch den Topcoat separiert, der einen komfortablen Materialkontrast an allen Materialübergängen sichert.

## 2.7.4 Schichtdickenmessungen

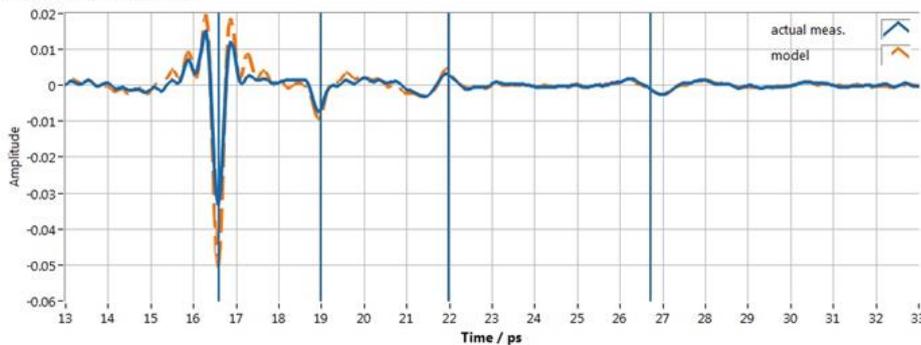
Im Vorfeld zu Messungen an den Erosionsprofilen wurden GFK-Platten mit dem Mittelklasse-System entweder mit oder ohne Gelcoat präpariert. Die Messergebnisse an diesen Proben sind weiter unten dargestellt.

Transfer function in time:



Thicknesses	ref. dist.	Layer 1	Layer 2
/ $\mu\text{m}$ :	18.5	325.8	182.9

Transfer function in time:



Thicknesses	ref. dist.	Layer 1	Layer 2	Layer 3
/ $\mu\text{m}$ :	116.5	214	229.4	432.2

Abbildung 32: Schichtdickenmessungen am Mittelklasse-System P369-L oben ohne und unten mit Gelcoat

Mit Hilfe der Messvorrichtung konnten relativ genau bestimmte, festgelegte Stellen auf der Probe gemessen werden. So waren Messungen der Dickenverteilung in axialer Richtung oder entlang einer Kontur möglich. Beispiele davon sind in den Abbildungen 33 und 34 dargestellt.

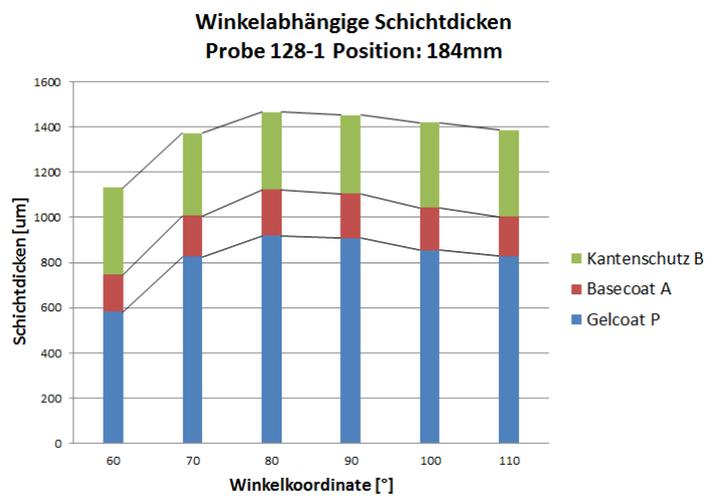
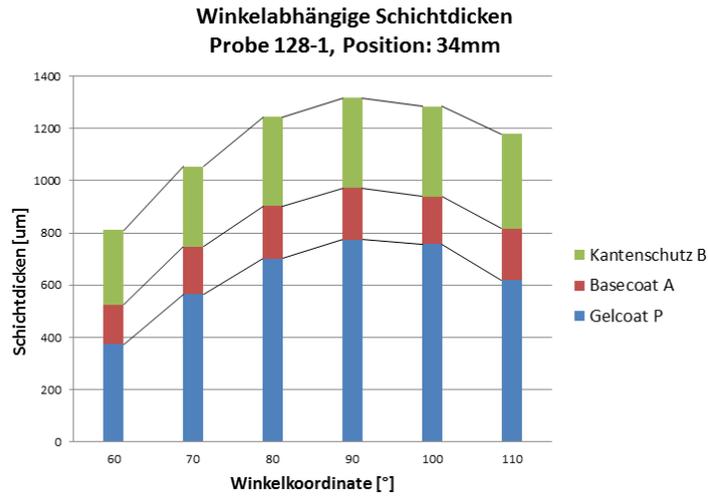


Abbildung 33: Schichtdickenmessungen entlang einer Kontur an unterschiedlichen Axialpositionen am Mittelklasse-System P369-L

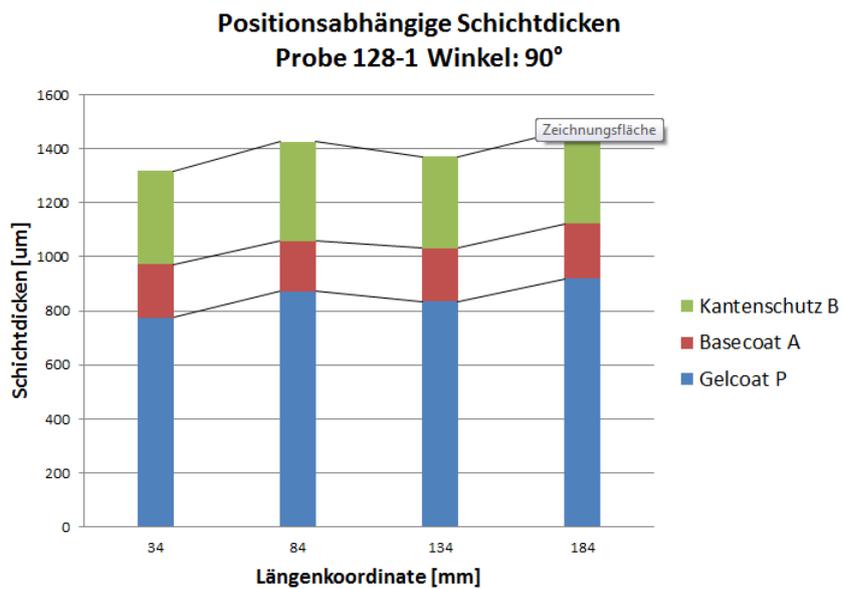


Abbildung 34: Schichtdickenmessungen entlang der Probenvorderkante an unterschiedlichen Axialpositionen am Mittelklasse-System P369-L

Offensichtlich wurde im Bereich der Profilverkante (im Winkelbereich von  $90^{\circ} \pm 10^{\circ}$ ) deutlich mehr Gelcoat aufgetragen als an den Rändern. Das kommt dadurch zustande, dass der Gelcoat in der Gießform der Profile vor der Profilherstellung aufgetragen wurde und, bevor er trocknen konnte, z.T. in Richtung der tiefsten Stelle der Mulde geflossen ist. Die darüber liegenden Schichten weisen gleichmäßige Dickenverteilungen über der Winkelkoordinate auf (siehe Abbildung 33).

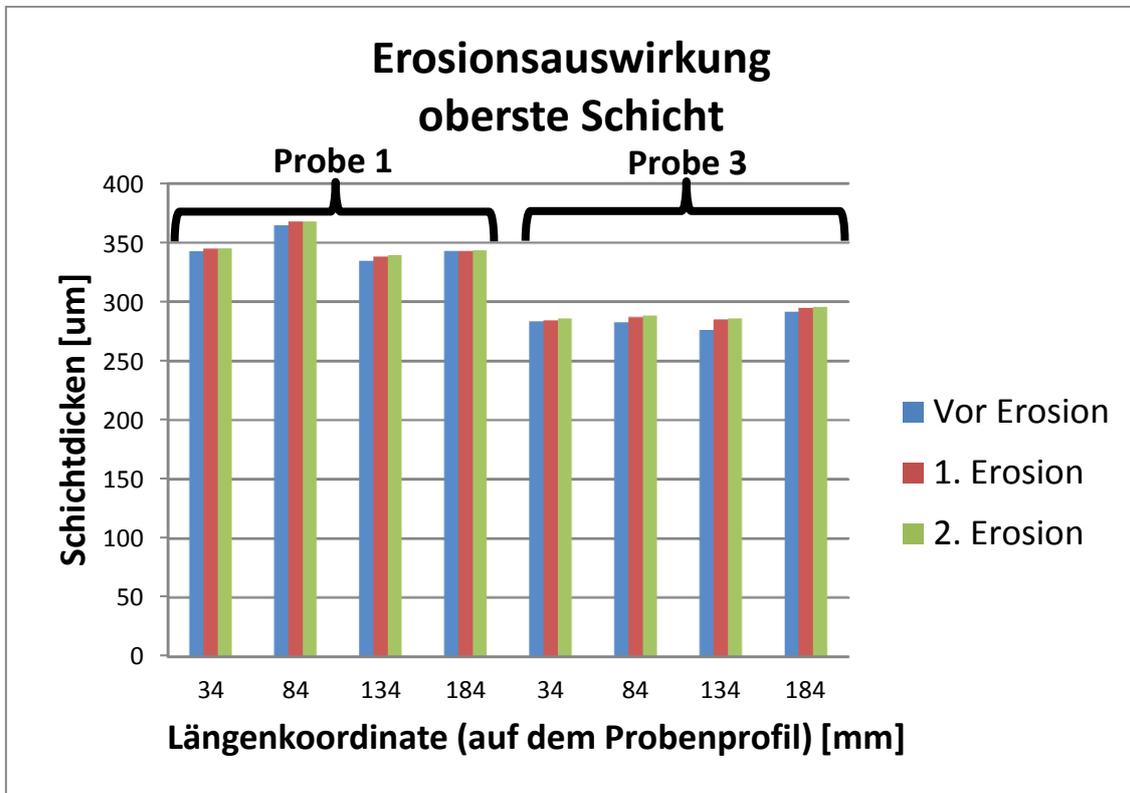


Abbildung 35: Schichtdickenveränderungen der obersten Schicht nach zwei Erosionsvorgängen am Mittelklasse-System P369-L

In der Hoffnung dass ein gleichmäßiger Materialabtrag in den Anfangsstadien der Erosion festgestellt wird, wurden THz-Dickenmessungen vor und nach zwei Erosionsvorgängen durchgeführt. Wider Erwarten, haben die Messergebnisse keine Schichtdickenabnahme, sondern sogar eine leicht Zunahme bei der letzten Schicht gezeigt, wie in der Abbildung 35 dargestellt wird.

Nach Rücksprache mit dem Hersteller der untersuchten Beschichtungssysteme könnte für diese Dickenzunahme die Wasseraufnahme durch die letzte Schicht verantwortlich sein. Auch eine Auflockerung des Beschichtungsmaterials durch den Aufprallimpuls der Wassertropfen könnte dazu beigetragen haben.

Somit konnte die Anfangsvermutung, dass die Regenerosion mit einem flächigen Materialabtrag einhergeht, widerlegt werden. Ausgehend von den Beschichtungsfehlern, die vor dem Erosionsvorgang vorhanden waren, bilden sich an den Stellen dieser Beschichtungsfehler immer größere Krater, die die darunter liegenden Schichten freilegen. Somit bleiben diese Stellen völlig ungeschützt und die Regenerosion greift diese Stellen immer tiefer und großflächiger an, bis die gesamte Beschichtung und ggf. auch Teile des Substratmaterials abgetragen sind. Dies würde auf Dauer im Normalbetrieb einer Windenergieanlage zu einem kompletten Versagen des betroffenen Rotorblatts führen.

Des Weiteren wurden punktuell auch Messungen an selbstklebenden Kantenschutzfolien durchgeführt, die zum Teil bei Rotorblättern im Vorderkantenbereich verwendet werden. Eine besondere Herausforderung war bei diesen Folien die Ermittlung der Materialparameter der Selbstklebeschicht, da dieses Material naturgemäß sehr weich ist. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 36 und 37 dargestellt. Diese Folien wurden nicht in der Erosionsanlage beansprucht.

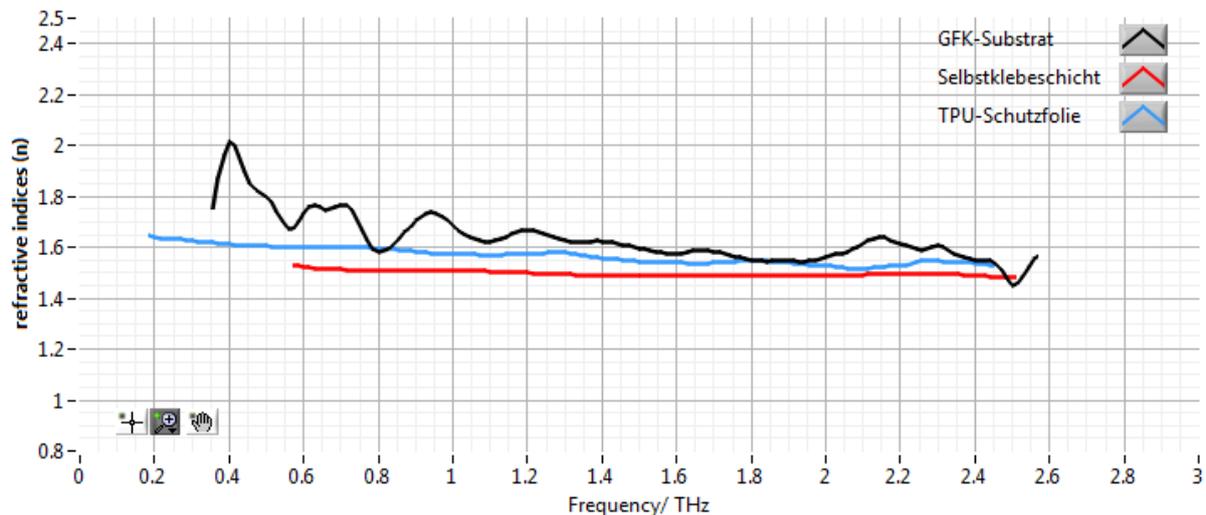


Abbildung 36: Materialparameter der selbstklebenden Kantenschutzfolie

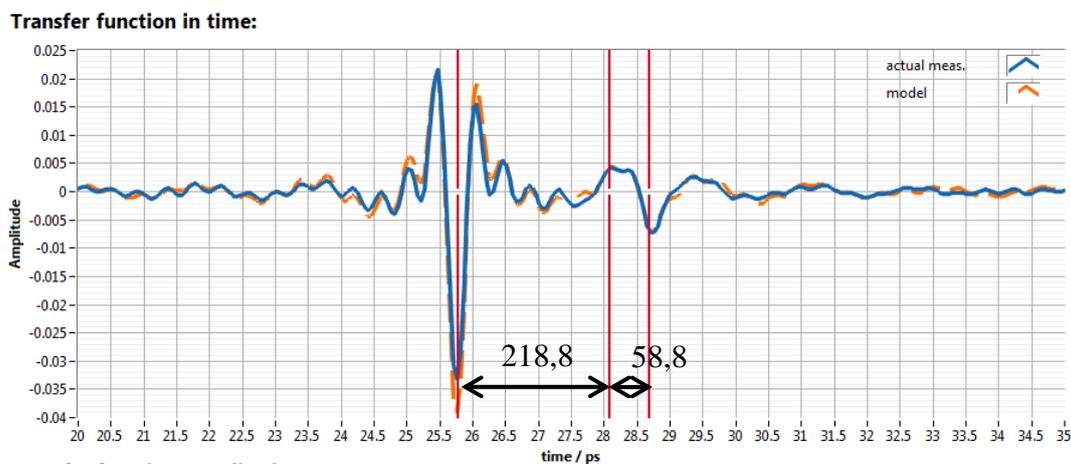


Abbildung 37: Schichtdickenmessung der selbstklebenden Kantenschutzfolie: die Selbstklebeschicht hat eine Dicke von ca. 59µm

## 2.7.5 Einfluss der Mischverhältnisse bei 2-Komponenten Beschichtungsstoffen

Da die Genauigkeit der Schichtdickenmessungen direkt durch die Materialparameter der einzelnen Schichten beeinflusst wird, war auch das Thema der Abhängigkeit der Materialparameter von den Mischverhältnissen bei 2-Komponenten-Beschichtungsstoffen von großem Interesse.

Es bestand die Vermutung, dass produktionsbedingte Mischschwankungen sich auf die Materialeigenschaften im THz-Frequenzbereich und somit auf die Genauigkeit der Dickenmessungen auswirken.

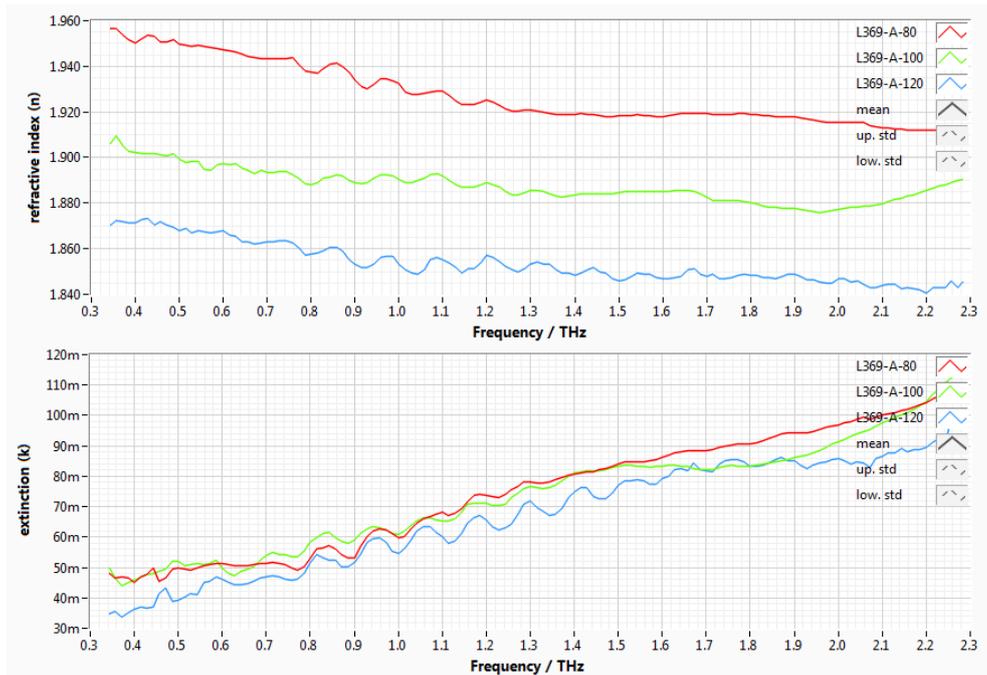


Abbildung 38: L369-A- Eine Variation im Vernetzungsgrad von  $\pm 20\%$  ergab im Schnitt eine Variation des Brechungsindices von  $\Delta n \approx \pm 2\%$ .

Um diese Vermutung mit konkreten Messergebnissen zu untermauern, wurde ein Satz von 5 Beschichtungsstoffen (L369-A, -B, -H, -P und -Q) mit jeweils 3 Mischverhältnissen (Vernetzungsgrade von 80%, 100% und 120%) zwischen den 2 Komponenten präpariert und auf Metallplättchen für die THz-Kalibrierung aufgetragen. Ergebnisbeispiele sind in den Abbildungen 38 und 39 dargestellt.

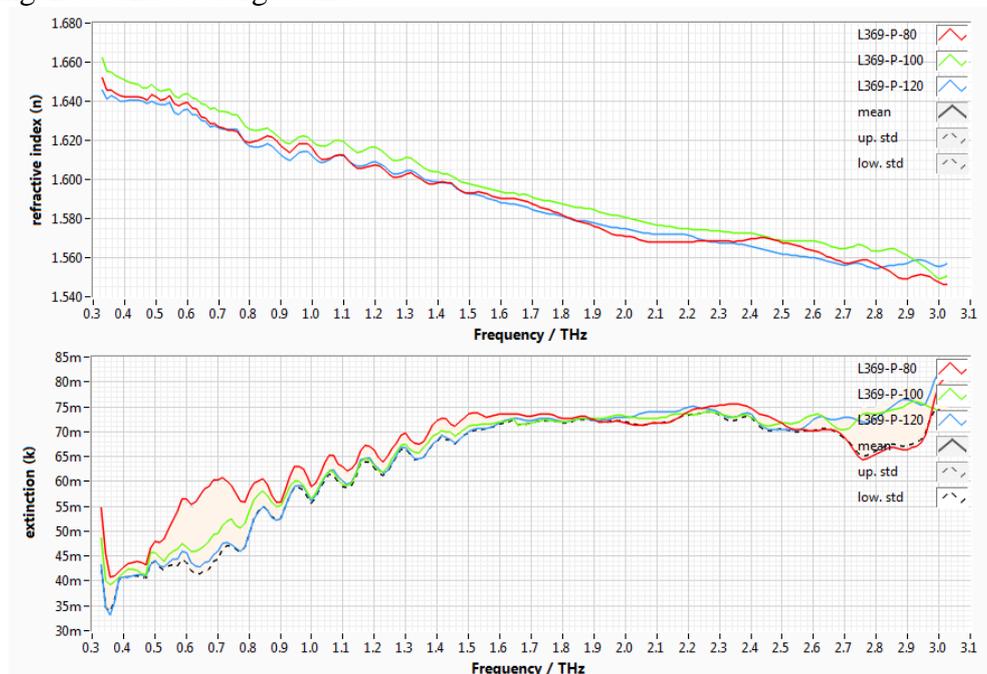


Abbildung 39: L369-P- Eine Variation im Vernetzungsgrad von  $\pm 20\%$  ergab im Schnitt eine Variation des Brechungsindices von  $\Delta n \approx \pm 0,25\%$ .

Generell, konnte eine mehr oder weniger ausgeprägte Änderung der Brechungsindices mit dem Vernetzungsgrad festgestellt werden (siehe Tabelle 5 und Abbildungen 38 und 39). Eine

ähnliche Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten konnte hingegen aufgrund der niedrigen Absorption dieser Stoffe nicht eindeutig bewiesen werden. Für die Extinktion ist die Variation eher durch Rauschen bedingt.

Nr.	Beschichtungsstoff	$\Delta n$ @ Vernetzung $\pm 20\%$	$\Delta k$ @ Vernetzung $\pm 20\%$
1	L369-A	$\pm 2\%$	$\pm 6,8\%$ .
2	L369-B	$\pm 0,75\%$ .	$\pm 5,4\%$ .
3	L369-H	$0,75\%$ .	$\pm 2\%$ .
4	L369-P	$\pm 0,25\%$ .	$\pm 3,7\%$ .
5	L369-Q	$\pm 0,7\%$ .	$\pm 5\%$ .

Tabelle 5: Änderung des Brechungsindices und des Extinktionskoeffizienten bei einer Variation um  $\pm 20\%$  des Vernetzungsgrades bei 2-Komponenten-Beschichtungen.

Hierfür ist eine Bemerkung sehr wichtig: der Brechungsindex ist für die Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit für die Schichtdickenmessung extrem relevant. Die Extinktion hat eher Einfluss auf die Dämpfung und auf die Phasenlage der Impulse und ist somit eher für die Form der Signale zuständig, ist aber eh relativ niedrig. Daher ist in diesem konkreten Fall eine Verfälschung der Schichtdickenmessergebnisse allein durch die Variation der Brechungsindices zu erwarten.

Den größten Einfluss sehen wir beim Stoff L369-A: ca. 2% (siehe Abbildung 38). Bei allen anderen fällt dieser Einfluss deutlich unter 1%. Wenn eine THz-Messgenauigkeit von 1% erzielt werden soll, muss also beim Stoff L369-A der Vernetzungsgrad deutlich genauer als  $\pm 20\%$  eingestellt werden.

### 3 Zusammenfassung und Perspektiven

Der Einsatz von Kunststoffen hat in den letzten Jahrzehnten massiv zugenommen, so dass der Volumenanteil von Kunststoffprodukten im Vergleich zu Metallprodukten momentan weit überlegen ist. Da auch Kunststoffe vor Umwelteinflüssen oder vor widrigen Bedingungen, die in Zusammenhang mit ihrem Einsatz stehen, geschützt werden müssen, ist auch die Relevanz der Beschichtungen für Kunststoffe gewachsen. Kunststoffe sind insbesondere empfindlich für Licht, Lösemittel und weitere Chemikalien. Daher sind funktionale Beschichtungen in diesen Bereichen eine Schlüsselkomponente, die die gewünschte Lebensdauer dieser Kunststoffe sichert. Ferner müssen bestimmte Anforderungen wie z.B. eine optimale Schichtdicke erfüllt werden.

In diesem globalen Zusammenhang sind bestimmte Bauteile in der Automobil-, Flugzeug und Windenergieindustrie ohne Kunststoff in der aktuellen Vielfalt von Formen und Zusammensetzungen nicht mehr vorstellbar. Aus diesen drei Bereichen haben wir uns im Rahmen des TeraNix-Projektes auf einen der wichtigsten konzentriert, nämlich auf die Windenergieindustrie, da die Energiegewinnung eine der zentralen Fragen der Menschheit für die Zukunft darstellt. Je größer und leistungsstärker in Zukunft die Windenergieanlagen (WEAs) werden, desto relevanter wird hinsichtlich deren Lebensdauer auch die Problematik der Erosion durch Wind, Regen, Salzwasser (insbesondere für off-shore Anlagen), Sand, Staub (für Wüsten-Standorte) oder Eis. Für die messtechnische Untersuchung dieser Thematik haben wir eine erste, quasi tragbare Messanlage basierend auf THz-Wellen entwickelt und deren erfolgreichen Einsatz bei WEA-Beschichtungen gezeigt. Wir haben für dieses Messsystem ein umfangreiches Softwarepaket entwickelt, das in der Lage ist, die einzelnen Schichtdicken in einem mehrlagigen Beschichtungssystem zu ermitteln, unbekannte Materialien im THz-Frequenzbereich zu charakterisieren und sogar Echtzeit-Messungen „aus der Hand“ durchzuführen.

Mit diesem Projekt haben wir es geschafft, unsere Fachkompetenz in einem Bereich zu stärken, in dem wir eine reale Alternative zu unserer herkömmlichen Messtechnologie gesehen haben.

In Diesem Sinne wurden zusätzlich zu der Windenergieindustrie, unabhängig vom Projekt, auch in den anderen erfolversprechenden Anwendungsbereichen Kontakte geknüpft, sowie Produktanforderungen gesammelt, Vorführungen durchgeführt und Marktpotenziale ermittelt. So wurden Industriebranchen wie der Flugzeug- und Automobilbau, Kunststoff- und Folienextrusion intensiv angegangen.

## 4 Literaturverzeichnis

- [1] Umwelt Bundesamt, „Erneuerbare Energien in Zahlen,“ 24 03 2017. [Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#textpart-1>. [Zugriff am 15 03 2017].
- [2] VDMA Power Systems, „Windenergie an Land, Ausbauzahlen für das erste Halbjahr 2016 in Deutschland,“ 27 07 2016. [Online]. Available: <https://www.windenergie.de/presse/pressemitteilungen/2016/windenergie-land-ausbauzahlen-fuer-das-erste-halbjahr-2016>.
- [3] H. W. Hübers, „Terahertz-Technologie an der Schwelle von wissenschaftlichen Anwendungen zu kommerzieller Nutzung,“ *PTB Mitteilungen: Amts - und Mitteilungsblatt der Physikalisch - Technischen Bundesanstalt*, Bd. 120, pp. 187-197, März 2010.
- [4] A. Maestrini et al., „A 540-560 GHz high frequency four-anode frequency tripler,“ *IEEE Transactions on Microwave Theory*, Bde. %1 von %2Vol 43, no 9, pp. 2835-2843, September 2005.
- [5] N. Karppowicz et al., „Compact continuous wave sub-terahertz system for inspection applications,“ *Applied Physics Letters*, Bd. vol. 86 no.5, p. 054105, Januar 2005.
- [6] M. Feiginov et al., „Resonant-tunnelling-diode oscillators operating at frequencies above 1.1 Thz,“ *Applied Physics Letters*, Bde. %1 von %2Bd. 99, Nr. 23, p. 233506, 2011.
- [7] L. Xu et al., „Terahertz beam generation by femtosecond optical pulses,“ *Applied Physics Letters*, Bd. Bd. 61, p. 1784, 1992.
- [8] J. Faist et al., „Quantum Cascade Laser,“ *Science*, Bde. %1 von %2Vol. 264, Nr. 5158, pp. 553-556, Februar 1994.
- [9] M. van Exter et al., „Terahertz time -domain spectroscopy of water vapor,“ *Optics Letters*, Bd. Bd. 14, pp. 1128-1130, 1989.
- [10] Z-Omega Inc., [Online]. Available: [www.z-thz.com](http://www.z-thz.com). [Zugriff am 02 08 2012].
- [11] Luna Inc (ehemals Picomaterials), [Online]. Available: <http://lunainc.com/thz/products>. [Zugriff am 07 03 2017].
- [12] TeraView, [Online]. Available: <http://www.teraview.com/>. [Zugriff am 07 03 2017].
- [13] R. J. Temkin, „THz Gyrotrons and Their Applications,“ in *IRMMW 2014 Proceedings*, Tucson, 2014.
- [14] N. Vieweg et al., „Terahertz-time domain spectrometer with 90 dB peak,“ *J Infrared Milli Terahz Waves*, Juli 2014.
- [15] C. P. Hauri et al., „Strong-field single-cycle THz pulses generated in an organic crystal,“ *Appl. Phys. Lett.*, Bd. 99, p. 161116, 2011.
- [16] A. Schneider et al., „High Efficiency Generation and Detection of Terahertz Pulses Using Laser Pulses at Telecommunication Wavelengths,“ *Opt. Express*, Bd. 14, pp. 5376-5384.
- [17] M. Jazbinsek et al., „Photonic applications with the organic nonlinear optical crystal DAST,“ *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics*, Bd. 14, pp. 1298-1311, 2008.
- [18] S. Krimi et al., „Highly accurate thickness measurement of multi-layered automotive paints using terahertz technology,“ *Applied Physics Letters*, Bd. 109, p. 021105, 2016.

- [19] F. Ellrich et al., „Improved substance identification by suppression of multiple-reflection-induced spectral noise,“ in *39th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2014. Proceedings. Vol.1*, Tucson Arizona, 2014.
- [20] P. Plew et al., „Charakterisierung von Emulsionen und Suspensionen mittels THz,“ München, 2015.
- [21] D. Banerjee et al., „Diagnosing water content in paper by terahertz radiation,“ *Optics Express*, Bd. 16 (12), p. 9060, Juli 2008.
- [22] [Online]. Available: [https://www.uni-marburg.de/fb13/forschungsgruppen/experimentelle-halbleiterphysik/agkoch/forschung/thz\\_system\\_folder/thz\\_system\\_industrie/thz\\_system\\_lebensmittelindustrie](https://www.uni-marburg.de/fb13/forschungsgruppen/experimentelle-halbleiterphysik/agkoch/forschung/thz_system_folder/thz_system_industrie/thz_system_lebensmittelindustrie). [Zugriff am 09 03 2017].
- [23] D. Stanze et al., „Compact cw Terahertz Spectrometer Pumped,“ *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2010.
- [24] D. Stanze et al., „Multilayer thickness determination using continuous wave THz spectroscopy,“ *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Bd. 4, pp. 696-701, 2014.
- [25] B. Sartorius et al., „Continuous wave terahertz systems exploiting 1.5  $\mu\text{m}$  telecom technologies,“ *Optics Express*, Bd. 17, Nr. 17, p. 15001, 2009.
- [26] J. Grzyb et al., „A 210–270-GHz Circularly Polarized FMCW Radar With a Single-Lens-Coupled SiGe HBT Chip,“ *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Bd. 6, Nr. 6, pp. 771-783, 2016.
- [27] A. Brahm et al., „All-electronic 3D computed THz tomography,“ in : *Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2011 36th International Conference on*, 2011.
- [28] „Femtosecond Ti:Sapphire laser,“ [Online]. Available: [http://www.atto.physik.uni-muenchen.de/download/praktikum/femtosec\\_\\_laser.pdf](http://www.atto.physik.uni-muenchen.de/download/praktikum/femtosec__laser.pdf). [Zugriff am 15 03 2017].
- [29] „Toptica Femtosecond Fiber Laser,“ Toptica, [Online]. Available: <http://www.toptica.com/products/psfs-fiber-lasers/>. [Zugriff am 15 03 2017].
- [30] A. Roggenbuck et al., „Using a fiber stretcher as a fast phase modulator i,“ *J. Optical Soc. America B*, Bd. 29, pp. 614-620, 2012.
- [31] Y. Kim et al., „High-speed terahertz time-domain spectroscopy based on electronically controlled optical sampling,“ *Opti. Lett.*, Bd. 15, pp. 3715-7, November 2010.
- [32] M. Yahyapour et al., „Non-Contact Thickness Measurements with Terahertz Pulses,“ in *19-th World Comference on Non-Destructive Testing 2016*, 2016.
- [33] R.J.B. Dietz et al., „All fiber-coupled THz-TDS system with kHz measurement...,“ *Opt. Lett.*, Bd. 39, pp. 6482-6485, 2014.
- [34] A. Bartels et al., *Technisches Messen*, Bd. 75, pp. 1-8, 2008.
- [35] C. Gleichweit, „TERA OSCAT High-speed Terahertz Spectrometer,“ [Online]. Available: <http://www.menlosystems.com/en/products/thz-time-domain-solutions/high-speed-terahertz-spectrometer/>. [Zugriff am 15 03 2017].
- [36] S. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*, E. D. Rutgers University, Hrsg., 94 Brett Road, Piscataway, 2008.
- [37] K. Küpfmüller et al., *Theoretische Elektrotechnik*, Berlin: Springer, 2008.
- [38] T. Grunwald, *Terahertz-Antwort von zweidimensionalen Ladungsträgersystemen in GaAs-basierten Hertostrukturen*, Phillips-Universität Marburg, 2009, pp. 99-108.
- [39] M. Born et al., *Principles of Optics 7th (expanded) edition*, Cambridge University,

- 2001.
- [40] C.C. Katsidis et al., „General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference,“ *Applied Optics*, Bd. 41, Nr. 19, pp. 3978-3987, 2002.
  - [41] L. Duvillaret et al., „Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy,“ *Applied Optics*, Bd. 38, Nr. 2, pp. 409-415, 1999.
  - [42] T. D. Dorney, „Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy,“ *Journal of the Optical Society of America A*, Bd. 18, Nr. 7, pp. 1562-1571.
  - [43] A. Pashkin et al., „THz transmission spectroscopy applied to dielectrics and microwave ceramics,“ *Ferroelectrics*, Bd. 254, Nr. 1, pp. 113-120, 2001.
  - [44] H. Nemeč et al., „Independent determination of the complex refractive index and,“ *Optics Communications*, Bd. 260, pp. 175-183, 2006.
  - [45] M. Scheller et al., „Fast and accurate thickness determination of unknown materials using terahertz time domain spectroscopy,“ *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Bd. 30, Nr. 7, pp. 762-769, 2009.
  - [46] J. Pupeza et al., „Highly accurate optical material parameter determination with THz time-domain spectroscopy,“ *Opt Express*, Bd. 15, Nr. 7, pp. 4335-4350, Apr. 2007.
  - [47] A. Sommerfeld et al., *Handbuch der Physik: Elektronentheorie der Metalle, Teil 2: Aufbau der zusammenhängenden Materie*, Bd. 24, Berlin: Springer, 1933.
  - [48] P. Drude, „Zur Elektronentheorie der Metalle,“ *Annalen der Physik*, Bd. 306, Nr. 3, 1900.
  - [49] Edward M. Purcell, *Electricity and Magnetism*, McGraw-Hill, 1965, pp. 117-122.
  - [50] MIT open course, „Electrical-engineering-and-computer-science/6-007-electromagnetic-energy-from-motors-to-lasers-spring-2011/lecture-notes,“ 2011. [Online]. Available: [https://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-007-electromagnetic-energy-from-motors-to-lasers-spring-2011/lecture-notes/MIT6\\_007S11\\_lec22.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-007-electromagnetic-energy-from-motors-to-lasers-spring-2011/lecture-notes/MIT6_007S11_lec22.pdf). [Zugriff am 15 03 2017].
  - [51] K. Oughstun, „On the Lorentz-Lorenz formula and the Lorentz model of dielectric dispersion,“ *Opt Express*, Bd. 11, Nr. 13, pp. 1541-6, Jun 2003.
  - [52] M. Lang et al., „Laser-based terahertz generation & applications,“ *Photonik International*, 2012.

## 5 Danksagung

Wir danken unseren Projektpartnern und Kunden für die Bereitstellung von Proben und Anwendungswissen sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Ermöglichung des Projektes, das vom Projektträger Jülich (PTJ) in der Fördermaßnahme "6. Energieforschungsprogramm: Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung" betreut wurde.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0325633B gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

März 2017

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  TeraNix: Entwicklung eines semi-portablen Terahertz basierten Schichtdickenmesssystems zur Untersuchung von Schäden an Rotorblättern von Windenergieanlagen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Dr. Ciprian Zafiu, Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG Dr.-Ing. Dennis Stanze, Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG Dipl.-Ing. S. Nix, Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2016
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG Robert-Perthel-Str. 2, D-50739 Köln	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 0325633B
	11. Seitenzahl 60
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 10115 Berlin	13. Literaturangaben 52
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 39
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

#### 18. Kurzfassung

In zunehmendem Maße werden in unterschiedlichen Industriebereichen neuartige Werkstoffe eingesetzt, die auf Kunststoffen und Kompositmaterialien wie Glas- oder Kohlenstofffaser verstärkten Kunststoffen basieren. So ist der Fall auch im Windenergiebereich, wo Glasfaser, neuerdings in größeren Modellen, Kohlefaser verstärkte Kunststoffe in der Fertigung von Rotorblättern unerlässliche Materialien geworden sind. Leider sind diese Kompositmaterialien äußerst anfällig für Witterungseinflüsse und müssen daher mittels Funktionsbeschichtungen über Jahre, manchmal über Jahrzehnte geschützt werden. Blattspitzengeschwindigkeiten von ca. 300km/h sind bei 50m oder 60m langen Rotorblättern keine Seltenheit und bringen das schwer beherrschbare Problem der Regen-, Hagel-, in manchen Regionen sogar der Staub- oder Sanderosion mit sich.

Das Ziel des Verbundprojektes war die Entwicklung einer objektiven und reproduzierbaren Methode und der entsprechenden Messkriterien für die Untersuchung der Regenerosion unter unterschiedlichen Umweltbedingungen an Rotorblattbeschichtungen. Hierfür wurde am Fraunhofer IWES in Bremerhaven eine Regenerosionsanlage zur Untersuchung aller projektrelevanten Rotorblattbeschichtungen gebaut.

Ziel des Teilvorhabens unseres Unternehmens war die Entwicklung einer terahertzbasierten, zerstörungsfreien Messmethode für die Untersuchung der Rotorblattbeschichtungen in unterschiedlichen Phasen der Regenerosion, vor allem bei der Entstehung der Erosionsschäden, wenn diese an der Oberfläche noch nicht erkennbar sind. Vor dem Projektstart konnten solche Messungen nur zerstörend durchgeführt werden.

Zu diesem Zweck hat die Fa. Automation ein auf dem Markt erhältliches THz-Spektrometer hin zu einem Messgerätedemonstrator für die Schichtdickenmessung weiterentwickelt. Die Entwicklungsarbeit betraf sowohl die Gerätearchitektur, wobei praktische Zusätze für die mobile Dickenmessung an Rotorblatt- und anderen dielektrischen Beschichtungen eingearbeitet wurden, als auch die Messdatenauswertung durch die Entwicklung eines umfangreichen Softwarepakets zur Schichtdickenmessung und Kalibrierung von Materialparameter dieser Beschichtungen.

Mit diesem Gerät wurden umfangreiche Kalibrier- und Schichtdickenmessungen an Rotorblatt-Beschichtungssystemen durchgeführt, wobei die Letzteren die Ermittlung der Schichtdicken jedes einzelnen Beschichtungsstoffs in einem mehrlagigen Beschichtungssystem mit sehr hoher Genauigkeit erlaubten. Die Messungen haben z.B. eine gewisse Abhängigkeit der Materialparameter vom Vernetzungsgrad in 2-Komponenten Beschichtungen gezeigt, aber auch dass in den Anfangsstadien der Regenerosion kein gleichmäßiger Materialabtrag zu verzeichnen ist, sondern die Erosionsschäden zunächst an Stellen entstehen, wo produktionsbedingte Beschichtungsfehler schon vorhanden waren.

Die Messmethode und das im Projekt entwickelte Messgerät können in zahlreichen weiteren Anwendungsfeldern zur Schichtdickenmessung eingesetzt werden, dort wo die Vermessung einzelner Materialdicken qualitätsrelevant ist: in der Automobilindustrie, im Flugzeugbau, in der Verpackungsherstellung, bei Extrusionsprodukten, aber auch in der Pharmaindustrie.

#### 19. Schlagwörter

Terahertz, Schichtdickenmessung, Windenergieindustrie, Rotorblattbeschichtungen, Regenerosion

20. Verlag

21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication)
3. title TeraNix: Development of a semi-portable System for coating thickness measurements based on Terahertz waves for investigation of damages on rotor blades of wind turbines	
4. author(s) (family name, first name(s))  Dr. Ciprian Zafiu, Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG Dr.-Ing. Dennis Stanze, Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG Dipl.-Ing. S. Nix, Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG	5. end of project 09.30.2016
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address)  Automation Dr. Nix GmbH & Co. KG Robert-Perthel-Str. 2, D-50739 Köln	9. originator's report no.
	10. reference no. 0325633B
	11. no. of pages 60
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 10115 Berlin	13. no. of references 52
	14. no. of tables 5
	15. no. of figures 39
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

Glass fibre or Carbon fibre reinforced Plastics (GFRP or CFRP) became more and more important in the industrial applications over the last decades. This is also the case in the wind power industry, where GFRP, sometimes – in long models – CFRP became essential in the construction of rotor blades. Unfortunately these materials are very sensitive against the action of various environmental factors. Therefore they need to be protected by functional coatings against these factors over long periods of time like years or decades. Additionally, the outer segments of rotor blades reach peak velocities of around 300km/h and even more, which causes accelerated damage due to rain, hail, in some regions even dust or sand erosion.

The goal of the cooperation project was the development of an objective and reproducible method and a set of measurement criteria for the investigation of rain erosion on rotor blades under various environmental conditions. Therefore a rain erosion simulator was built at the Fraunhofer IWES in Bremerhaven.

The goal of the project in our company was the development of a non-destructive measurement method based on terahertz waves for the investigation of rotor blade coatings during various erosion stages, especially in the incipient phase, when these damages are not visible at the surface yet. Prior to this project there were only destructive test methods available in this field.

For this aim, a commercially available THz-spectrometer was modified for allowing thickness measurements. The development effort was related to the system architecture, by adding several features allowing mobile use, as well as concerning the processing of the measurement data, by developing an extensive software package for calibration and thickness measurements.

A considerable amount of calibration and thickness measurements have been performed on rotor blade coatings using this apparatus. An important feature of the system is its capability to measure the individual thickness of every layer in a multilayer coating system with high precision. For example, the measurements have demonstrated a certain dependency of the material parameters over the mixture ratio in 2-component coatings. We could also prove that during the incipient phase of rain erosion there is no material uniformly carried off from the surface, but the damage always seeds in coating defects unwittingly built in during production.

Furthermore, the THz measurement method and system can be used in a series of industrial application fields where the thickness measurement is relevant for the quality inspection like: automotive, aerospace, packaging, pharmaceutical industry or extruded products.

19. keywords

Terahertz, coating thickness measurements, wind power, rotor blade coatings, rain erosion

20. publisher

21. price