

# Schichtdickenmessung auf CFK-Oberflächen

Carsten BRANDT\*

\* Airbus Operations GmbH, Airbus-Allee 1, 28199 Bremen; E-Mail: [carsten.brandt@airbus.com](mailto:carsten.brandt@airbus.com); Telefon: +49 421 538 6189

**Kurzfassung.** Es wird der aktuelle Stand der Untersuchungen zu Messungen der Schichtdicke auf CFK dargestellt. Nach einer Einführung in Randbedingungen, Lackaufbau, Blitzschutzmaterial und Anwendungsfälle werden zunächst die statistischen Begriffe Genauigkeit, Richtigkeit, Präzision und (erweiterte) Messunsicherheit erläutert. Dann werden vier Geräte, basierend auf kapazitiver Messung, Mikrowellen, Ultraschall und Wirbelstrom, vorgestellt sowie die bei Airbus gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse präsentiert. Kapazitive Messung und Ultraschallmessung haben den Nachteil, dass die Schicht, deren Dicke gemessen werden soll, genau bekannt sein und exakt darauf justiert werden muss. Für die Messung mit Mikrowellen wurde eine Sonde mit weitgehender Unabhängigkeit von der Permittivität entwickelt, die weiter untersucht werden soll. Das Wirbelstromverfahren bietet eine prinzipielle Unabhängigkeit von der (nichtleitenden) Schicht, deren Dicke gemessen werden soll, und soll bei Airbus qualifiziert werden; es kann jedoch nur auf solchem CFK, das Blitzschutzmaterial enthält, angewendet werden.

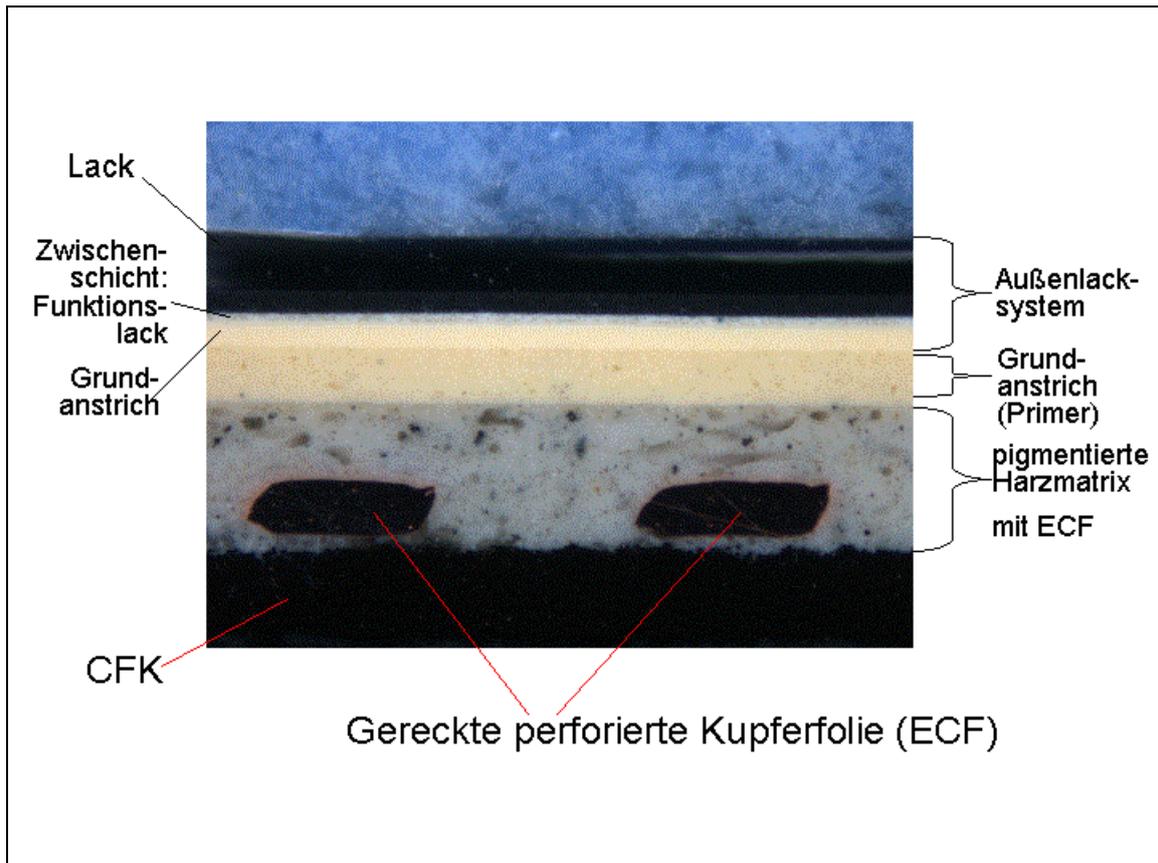
## 1 Einführung

Im Flugzeugbau werden mehr und mehr kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) eingesetzt, für den Airbus A380 sind es bereits ca. 25%, für die A350XWB werden es 53% sein. Ausgehend von diesem stark zunehmenden Einsatz von CFK wird der Bedarf nach einem qualifizierten Verfahren zur Messung von Schichtdicken auf CFK größer.

Ein hoher Anteil der CFK-Bauteile für Rumpf und Flügel der A350XWB ist mit Blitzschutzfolie ausgestattet. Es besteht die Forderung nach der Messung der Isolatorstärke oberhalb dieser Blitzschutzfolie.

## 2 Lackaufbau, Blitzschutz und Anwendungsfälle für die Schichtdickenmessung bei Airbus

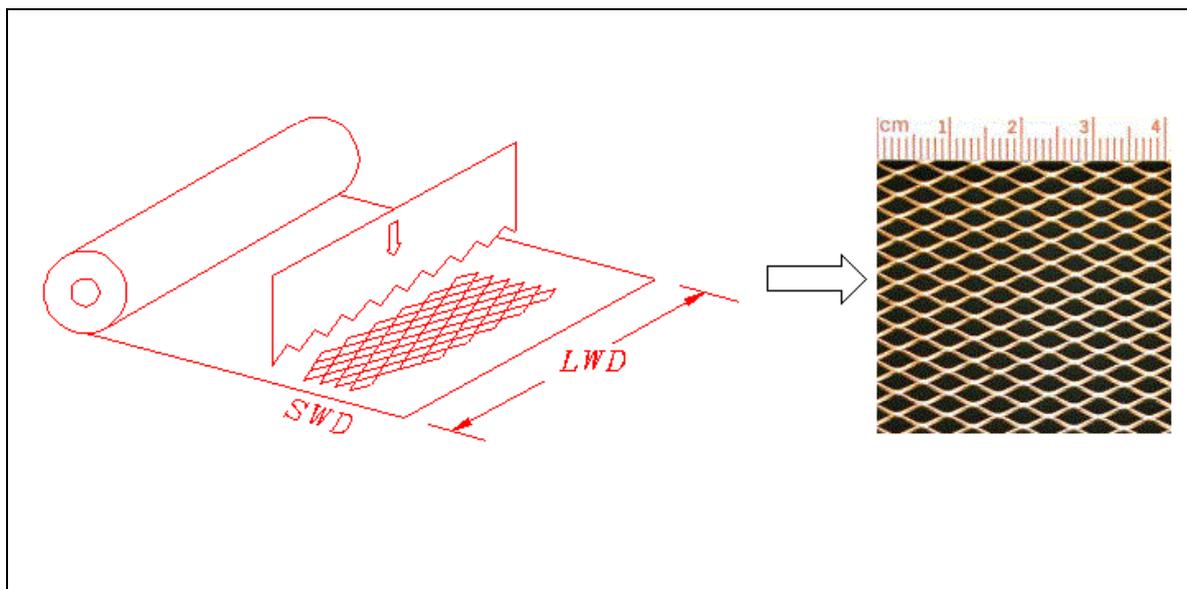
Abbildung 1 zeigt einen typischen Lackaufbau, wie er bei der Airbus A350XWB zur Verwendung kommen könnte, im Schliffbild. Auf das CFK-Bauteil, das zuoberst eine pigmentierte Harzmatrix enthält, wird ein Grundanstrich (engl. primer) sowie das Außenlacksystem aufgetragen. Das Außenlacksystem wiederum besteht ebenfalls aus einem Grundanstrich (engl. external primer), einer Zwischenschicht (engl. intermediate coat) sowie dem eigentlichen Lack.



**Abbildung 1: Lackaufbau für den Airbus A350**

Die pigmentierte Harzmatrix (“Surface Master”), die in Abbildung 1 zu sehen ist, stellt die oberste Schicht des CFK-Bauteils dar, und wird mit diesem in einem Stück ausgehärtet. In diese Harzmatrix ist eine gereckte perforierte Kupferfolie (“Expanded Copper Foil”) eingelegt.

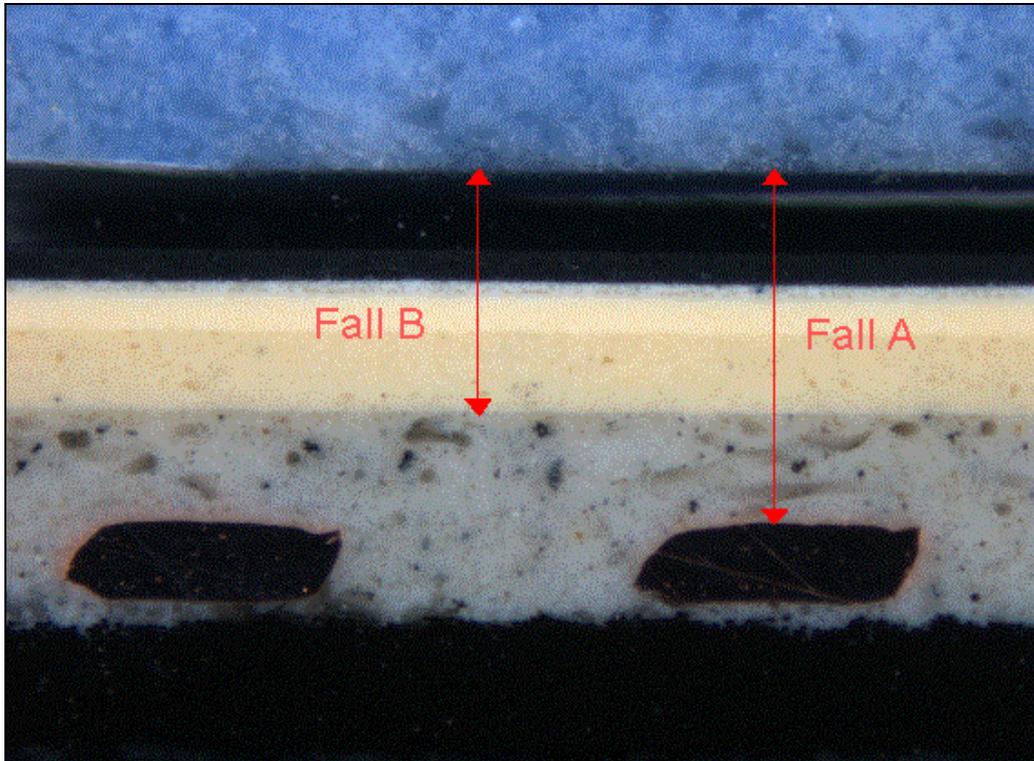
Diese gereckte perforierte Kupferfolie an der Oberfläche des CFKs dient der Ableitung der Energie aus einem Blitzeinschlag. Sie wird durch Schlitzten und Recken aus einer durchgehenden Kupferfolie hergestellt, vgl. Abbildung 2.



**Abbildung 2: Gereckte perforierte Kupferfolie**

Aufgrund dieses Herstellungsprozesses handelt es sich um ein gleichmäßiges, ungefähr 0,1 mm bis 0,2 mm dickes Netz, das im Gegensatz zu einem Gewebe in den Kreuzungspunkten nicht aufgedickt ist.

Bei Airbus wurden aktuell zwei Anwendungsfälle der Schichtdickenmessung untersucht, vergleiche Abbildung 3:



**Abbildung 3: Anwendungsfälle für die Schichtdickenmessung**

Beim ersten Anwendungsfall handelt es sich um die Messung des Anteils der pigmentierten Harzmatrix oberhalb der “Expanded Copper Foil” plus Grundanstrich plus Außenlacksystem. Der zweite Anwendungsfall deckt die Messung von Grundanstrich plus Außenlacksystem auf CFK mit oder ohne gereckter perforierter Kupferfolie ab.

Selbstverständlich gibt es noch weitere Anwendungsfälle, wie z.B. die Messung ausschließlich der Grundanstrichdicke bei Lieferung von beispielsweise Rumpfbauteilen. Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird jedoch explizit ausschließlich auf die oben beschriebenen und in Abbildung 3 gezeigten Fälle eingegangen.

### **3 Genauigkeit und Messunsicherheit**

Gemäß ISO 5725 [1] wird die Genauigkeit eines Messverfahrens durch Präzision und Richtigkeit dargestellt. Abbildung 4 erläutert anschaulich diese Begriffe; der wahre Wert, der möglichst genau gemessen werden soll, befindet sich hierbei im Zentrum der orange dargestellten Kreisflächen.

Die Präzision drückt aus, wie dicht mehrere Messungen beieinander liegen, im Beispiel der Schichtdickenmessung wie dicht mehrere an derselben Position durch ein und dieselbe Person oder durch unterschiedliche “Labore” aufgenommenen Werte beieinander liegen.

Die Richtigkeit besagt, wie nahe der Mittelwert dieser Messwerte am wahren Wert liegen, inwieweit das Messverfahren also z.B. einen systematischen Fehler aufweist.



**Abbildung 4: Zielscheibenmodell zur Erläuterung von Präzision und Richtigkeit**

Die als “GUM” [2] (Guide to the expression of uncertainty in measurement – Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen) bekannte Vornorm DIN V ENV 13005 enthält Methoden, eine Messunsicherheit als eine einzige die Genauigkeit eines Messvorgangs beschreibende Größe zu ermitteln. Diese setzen jedoch voraus, dass die Genauigkeit mittels mathematischer Modelle beschrieben werden kann, wovon oftmals und so auch im vorliegenden Fall nicht ausgegangen werden kann.

Auf Basis der ISO/TS 21748 [3] „Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation“ hat Airbus einen Weg erarbeitet, eine Messunsicherheit auf Basis von mit mehreren Laboren ermittelten empirischen Messwerten zu bestimmen. In diese Messunsicherheit fließen neben der Richtigkeit und Präzision sämtliche zur Unsicherheit eines Verfahrens beitragende Faktoren ein, wie z.B. die möglichen Abweichungen der Dicke von Justierfolien. Des Weiteren wird zur finalen Angabe der Genauigkeit eine erweiterte Unsicherheit verwendet, die einen Faktor 2 enthält, um das in der Luftfahrtbranche übliche Vertrauensniveau von 95% zu erreichen.

Die nachfolgenden Ausführungen zu verschiedenen untersuchten Verfahren enthalten keine nach dem oben beschriebenen Weg ermittelten Messunsicherheiten, da die Untersuchungen und Messreihen bei Airbus noch nicht abgeschlossen sind. Es werden Aussagen zur systematischen Abweichungskomponente getroffen, die sich aus dem Mittelwert der Abweichungen zwischen wahren Wert und Mittelwert der Messungen ergibt und ein Maß für die Richtigkeit darstellt. Diese Abweichungskomponente wurde jedoch nur mit einem Labor ermittelt. Des Weiteren werden teilweise Aussagen zur Wiederholstandardabweichung getroffen, die sich aus mehreren Messungen eines Labors am selben Messpunkt ergibt. Bei dieser Angabe ist zu beachten, dass sie nur ein Teilaspekt der Präzision darstellt, da die Abweichungen zwischen verschiedenen Laboren nicht berücksichtigt sind. Außerdem ist hierin kein Faktor 2 enthalten und somit sind keine Aussagen in Richtung 95% Vertrauensniveau möglich, siehe oben.

## 4 Verfahren zur Schichtdickenmessung auf CFK

Im Folgenden werden vier der bei Airbus untersuchten Verfahren zur Schichtdickenmessung auf CFK kurz vorgestellt und die gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse präsentiert.

### 4.1 Kapazitive Methode

Das Paint Scope der Firma Fogale (Abbildung 5) bietet die Möglichkeit, die Gesamtdicke einer bzw. mehrerer nichtleitenden Schichten sowohl auf CFK als auch auf

gereckter perforierter Kupferfolie zu messen. Das CFK bzw. die Kupferfolie bilden mit der Sonde einen Kondensator, dessen Kapazität gemessen wird [4]. Unter Kenntnis der Permittivität (Dielektrizitätszahl) der nichtleitenden Schicht kann damit der Abstand zwischen der aufliegenden Sonde und dem CFK bzw. der Kupferfolie bestimmt werden, der der Dicke der nichtleitenden Schicht entspricht. Die Permittivität wird im Rahmen von Justierungen auf Bauteilen mit Schichten bekannter Dicke ermittelt.



**Abbildung 5: Paint Scope der Firma Fogale [5]**

Messungen auf Probeteilen mit verschiedenen, für den A380 verwendeten Lacken, lieferten eine mittlere Wiederholstandardabweichung von ca.  $10\ \mu\text{m}$  sowie eine systematische Abweichungskomponente von ca.  $15\ \mu\text{m}$ , jeweils nur mit einem Labor ermittelt.

Die relativ hohe Abweichung wird darauf zurückgeführt, dass sich unterschiedliche Lacke auf den vermessenen Proben befanden, die vermutlich unterschiedliche Permittivitäten aufweisen. Messungen an Proben mit genau einem identischen Lackaufbau von einem Lacklieferanten weisen eine deutlich höhere Richtigkeit auf.

#### 4.2 Mikrowellen

Die Firma FIT-M hat einen mikrowellenbasierten Prototypen FSC-1 zur Schichtdickenmessung entwickelt. Es wird die Amplitude und Phase einer durch die nichtleitende Schicht gesendeten und an CFK oder gereckter perforierter Kupferfolie reflektierten Mikrowelle ausgewertet.



**Abbildung 6: Mikrowellen-Schichtdickenmessgerät FSC-1 der Firma FIT-M [6]**

Mit diesem ersten Prototypen wurden mit Messreihen durch ein Labor systematische Abweichungskomponenten im Bereich von einigen 10  $\mu\text{m}$  erreicht. Die Firma FIT-M hat daraufhin eine neue Sonde entwickelt, die eine weitgehende Unabhängigkeit von der Permittivität der Schicht, deren Dicke gemessen werden soll, aufweisen soll. Erste Messungen mit einer Justierung, die anhand von Kunststofffolien durchgeführt wurde, an Proben mit einem Lackaufbau wie in Kapitel 2 erläutert, haben diese Unabhängigkeit sehr gut bestätigt. Es werden jetzt weitere Messreihen an A350XWB-Proben, vergleiche Kapitel 4.4, durchgeführt, um eine Messunsicherheit gemäß [3] zu ermitteln.

### 4.3 Ultraschall

Die Dickenmessung per Ultraschall basiert auf der Laufzeitmessung von Ultraschall, der in ein Bauteil gesendet und z.B. an der Grenzfläche zwischen Primer und CFK reflektiert wird. Bei Airbus wurde neben anderen Ultraschallprüfgeräten ein Dickenmessgerät aus der „Pelt“-Serie der Firma JSR ultrasonics untersucht, siehe Abbildung 7. Solch ein Dickenmessgerät wird unter anderem im deutschen Automobilbau erfolgreich in der Produktion eingesetzt.



Abbildung 7: „Pelt“-Gerät der Firma JSR ultrasonics [7]

Diese Geräte arbeiten mit einer Prüffrequenz in der Größenordnung von ein bis mehreren 100 MHz, sodass auch Echos von Grenzschichten zwischen Materialien mit nur geringen Unterschieden in der akustischen Impedanz angezeigt werden können. Somit kann auch die Dicke von Einzelschichten, wie z.B. Primer und Lack, gemessen werden. Der Auswertevorgang ist hierbei relativ aufwändig, ein aufgenommenes Amplitudenbild muss mit einem einmal aufgenommenen Referenz-Amplitudenbild verglichen und manuell die relevanten Echos markiert werden. Für jeden einzelnen Lackaufbau – verschiedene Farbtöne, Hersteller, jedwede Unterschiede – muss somit eine Justier- bzw. Kalibrierkurve erstellt werden.

Die prinzipielle Anwendbarkeit für Airbus-Bauteile mit und ohne gereckter perforierter Kupferfolie wurde nachgewiesen. Es sind momentan noch keine weiteren detaillierten Messreihen aufgenommen worden, da diese Methode für den Einsatz bei

Airbus, z.B. in der Endmontagelinie, aufgrund der Notwendigkeit der Justierung auf jeden einzelnen Lackaufbau unpraktikabel ist.

#### 4.4 Wirbelstrom

Die gereckte perforierte Kupferfolie stellt einen metallischen Leiter dar. Dieser hat durch die netzartige Ausbildung nur einen Füllgrad in der Fläche von ungefähr 30%, dennoch ist mit ausreichend hohen Prüffrequenzen eine Schichtdickenmessung per Wirbelstrom möglich. Bei der Schichtdickenmessung per Wirbelstrom wird der Abhebeeffekt der Sonde gemessen und in Geräten wie dem "QNix 8500" (Abbildung 8) der Firma Automation Dr. Nix direkt in einen Schichtdickenwert umgewandelt.



Abbildung 8: QNix-Gerät der Firma Automation Dr. Nix [8]

Bei der Wirbelstromprüfung ist der Messwert unabhängig von der nichtleitenden Schicht, deren Dicke gemessen werden soll. Die Art der gereckten perforierten Kupferfolie hat jedoch einen großen Einfluss auf den Messwert, sodass eine Justierung auf exakt der gleichen Folie vorgenommen werden muss, die im zu messenden Bauteil vorliegt.

Messungen an Laborproben haben eine gute mittlere Wiederholstandardabweichung im Bereich von wenigen Mikrometern sowie eine systematische Abweichungskomponente von ungefähr 5  $\mu\text{m}$  ergeben, wiederum mit einem Labor ermittelt. Als nächster Schritt ist eine Qualifikation mit mehreren Laboren geplant, in deren Rahmen die erweiterte Messunsicherheit gemäß [3] bestimmt wird. Hierzu werden relevante, größere A350-Bauteile verwendet werden, die durch das großflächige Verlegen und lokale Druckunterschiede beim Aushärten Streckungen, Stauchungen und lokale Dellen in der gereckten perforierten Kupferfolie enthalten können.

## 5 Zusammenfassung

Für die zwei Anwendungsfälle zur Schichtdickenmessung wurden vier verschiedene Verfahren bei Airbus untersucht. Kapazitive Messung und Ultraschallmessung können auf CFK mit und ohne gereckter perforierter Kupferfolie angewendet werden, die Ultraschallmessung mit dem untersuchten Gerät bietet zudem prinzipiell die Möglichkeit, die Dicke von einzelnen Schichten innerhalb einer Gesamtschicht anzugeben. Beide Verfahren haben jedoch den Nachteil, dass die Schicht, deren Dicke gemessen werden soll,

genau bekannt sein und exakt darauf justiert werden muss. Für die Messung mit Mikrowellen wurde eine Sonde mit weitgehender Unabhängigkeit von der Permittivität der Schicht entwickelt. Diese Sonde soll weiter untersucht werden und würde die Möglichkeit der Messung für beide Anwendungsfälle bieten, ohne dass die Notwendigkeit der exakten Kenntnis der Schichtzusammensetzung und Justierung hierauf besteht. Das Wirbelstromverfahren bietet eine prinzipielle Unabhängigkeit von der (nichtleitenden) Schicht, deren Dicke gemessen werden soll. Es soll bei Airbus qualifiziert werden; kann jedoch nur auf solchem CFK, das gereckte perforierte Kupferfolie als Blitzschutzmaterial enthält, angewendet werden, und muss exakt auf diese eingesetzte Kupferfolie justiert werden.

## 6 Referenzen

- [1] ISO 5725: „Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen“
- [2] DIN V ENV 13005 „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“
- [3] ISO/TS 21748 „Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation“
- [4] <http://www.fogale.fr/~fogaleco/pages/by-technology/capacitive-sensors-and-systems/capacitive-dimensional-metrology.php>
- [5] <http://www.fogale.fr/~fogaleco/pages/by-technology/capacitive-sensors-and-systems/thickness-of-paint-and-varnish.php>
- [6] Bedienungsanleitung des Schichtdickenmessgeräts FSC-1, FI Test- und Messtechnik GmbH, Stand: 08.01.2009
- [7] [http://www.jsrultrasonics.com/pelt\\_up501.html](http://www.jsrultrasonics.com/pelt_up501.html)
- [8] <http://www.qnix-schichtdickenmessgeraet.de/24/System-QNix-8500.htm>