



Howmet Fastening Systems

Fairchild Fasteners Europe - VSD GmbH

Steven 3

31135 Hildesheim

Schlussbericht NiCO - Teilprojekt BUSch

Bauteilnahe Untersuchungen für die Substitution Cadmiumhaltiger Beschichtungen auf Verbindungselementen in der Luftfahrt (FKZ: 20W1523D)

Interne Report Nr. 2021-06-01

Ausgabedatum: 22-Jun-2021

Verfasser:

Nils Murray

Projektleiter R&D

Internes Review:

Dr.-Ing. Jürgen Rösing

Engineering Manager

©2021 Howmet Aerospace Inc. All rights reserved

Any reproduction of this document or portions thereof must also reproduce this page of the document.

Inhaltverzeichnis

2	Einleitung.....	3
3	Testteile für Beschichtungsversuche.....	4
3.1	Testbleche	4
3.2	Anwendungsnahe Verbinder	4
3.3	Hochpräzise Testbauteile zur Reibwertbestimmung	5
3.4	Herstellung der Verbinderlose	6
4	Entwicklung einer neuen Vermessungsmethodik der lokalen Gewindeparameter zur Schichtcharakterisierung	8
5	Lokale Schichtdickencharakterisierung durch kreuzkorrelierte Vorher-Nachher-Analyse 10	
6	Charakterisierung der beschichteten Teile	12
6.1	Schichtdickencharakterisierung durch optische 3D-Vermessung	12
6.1.1	Lösemittelbasierter Beschichtungsprozess (Fraunhofer IPA).....	12
6.1.2	Ionische Flüssigkeiten.....	13
6.1.3	Al-Legierungsschichten mittels Hochratenverdampfen (Fraunhofer FEP).....	15
6.2	Metallographie.....	16
6.3	Rauheit und Einfluss der Nachbehandlung durch Glaskugelstrahlen	17
6.4	Schichthaftung.....	19
7	Verschraubungsprüfung.....	20
7.1	Prüfung an 1/4-Zoll Gewinden.....	20
7.2	Prüfung an 5/8-Zoll Gewinden.....	22
8	Zusammenfassung	24

2 Einleitung

Das übergreifende Ziel des Verbunds NiCO ist der Ersatz umwelt- und arbeitsschutzbedenklicher Stoffe wie Cadmium, das vielfältig für die Beschichtung von Flugzeugbauteilen eingesetzt wird. Als Alternativcoating wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Aluminiumlegierungen entwickelt, die die bis dato unerreichten technischen Eigenschaften von Cadmium ersetzen können. Galvanisch aufgetragenes Cadmium ist derzeit die Standardbeschichtung für hochfeste Verbindungselemente aus Stahl. Neben der hervorragenden Korrosionseignung („Selbsteheilungskräfte des Cadmiums“) sind ebenfalls die tribologischen Eigenschaften hervorzuheben. Dem gegenüber stehen die Gefahren für Gesundheit und Umwelt durch Cadmium während Herstellung, Installation, Wartung sowie Entsorgung. Durch die Ergebnisse von NiCO soll der Einsatz der „besorgniserregenden“ Stoffe Cadmium und Nickel deutlich vor einer möglichen gesetzlichen Vorgabe im Jahr 2030+ beendet werden und somit klar zu dem Ziel 1 „Umweltfreundliche Luftfahrt“ des geltenden LuFo Förderprogrammes beitragen. Der Ersatz dieser Stoffe hat Einfluss auf den gesamten Lebenszyklus des Flugzeugs, besonders aber auf die Phasen Produktion, Betrieb und Wartung sowie die Außerbetriebnahme und Wiederverwertung.

Der Projektanteil von Howmet Hildesheim konzentrierte sich darauf, dass die neu entwickelten Schichten neben den Anforderungen an den Korrosionsschutz vor allem auch dieselben Parameter bezüglich Herstellung und Installation von luftfahrttypischen Verbindungssystemen erfüllen. Für den Erfolg der hier entwickelten Systeme ist es unbedingt notwendig, dass industrieweit etablierte Parameter wie z.B. Anzugsmomente unverändert im Vergleich zu cadmierten Teilen bleiben können. Nur auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die neuen Schichten als 1:1-Ersatz für Cadmium angesehen werden können.

Anmerkung: Während der Projektlaufzeit fanden mehrfach Umbenennungen und Aufspaltungen der Mutterunternehmen des Antragstellers statt. Das Projekt wurde noch als Teil von Alcoa Fastening Systems and Rings beantragt. Später erfolgte die Abspaltung und Umbenennung zu Arconic Fastening Systems and Rings und später zu Arconic Fastening Systems. Nach einer weiteren Unternehmensspaltung im April 2020 ist die Fairchild Fasteners Europe VSD GmbH ein hundertprozentiges Tochterunternehmen der Howmet Aerospace Inc. und Teil der Unternehmenssparte Howmet Fastening Systems. In Einklang mit den Unternehmensrichtlinien wird innerhalb dieses Berichtes vor allem die Bezeichnung Howmet bzw. Howmet Hildesheim verwendet.

3 Testteile für Beschichtungsversuche

Im Rahmen der gemeinsamen Untersuchungen zum Projekt NiCO hat Howmet Hildesheim die ersten Lose von Probenmaterial für alle beteiligten Projektpartner ausgewählt und beschafft. Hierzu gehörten Testbleche zur Prozessentwicklung sowie zur späteren Korrosionsuntersuchung. Außerdem wurden Verbinder als Versuchsbauteile hergestellt, vermessen und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Im Einzelnen wurde mit den Beschichtern die Größe der Bauteile sowie weitere Eigenschaften abgesprochen, um den späteren Beschichtungsprozess zu erleichtern und die Charakterisierung der Beschichtungen normgerecht durchführen zu können aber auch anwendungsorientierte Untersuchungen zu ermöglichen. Vor diesem Hintergrund wurden zwei unterschiedliche Varianten von Versuchsbauteilen entworfen, hergestellt und untersucht. Zum einen wurde sogenannte Testbolzen produziert, die mit hochpräzisen Gewindeparametern als Prüfmittel für Verschraubungs- oder Reibwertprüfungen verwendet werden. Zum anderen wurden anwendungsnahe Testbauteile entworfen und hergestellt, an denen die Eignung der entwickelten Verfahren für die Belange der Verbinderherstellung abgeprüft werden kann.

3.1 Testbleche

Im Januar 2018 wurden Blechabschnitte an die Projektpartner ACW, HZG, IPA, TUIL geliefert, um die Untersuchungen der Prozessführung, der Schichterzeugung, der Schichtqualität und der Korrosionseigenschaften mit den zu untersuchenden Zusammensetzungen zu ermöglichen.

Ausgesucht wurde die Stahllegierung 1.7734.4, da diese als Standardwerkstoff beim Projektpartner Airbus für Korrosionsuntersuchungen eingesetzt wird. Auf diese Weise ist größtmögliche Vergleichbarkeit mit früheren Untersuchungen und bekannte Kennwerte für etablierte Systeme wie z.B. Cadmium gegeben.

Darüber hinaus wurde in Q1 und Q2/2018 der Entwurfsprozess der Verbinderbauteile zur Beschichtung mit den neuen Korrosionsschutzschichten abgeschlossen. Im Einzelnen wurde mit den Beschichtern die Größe der Bauteile sowie weitere Eigenschaften abgesprochen, um den späteren Beschichtungsprozess zu erleichtern und die Charakterisierung der Beschichtungen normgerecht durchführen zu können.

Es wurden zwei unterschiedliche Varianten von Versuchsbauteilen vereinbart, anwendungsnahe Verbinder basierend auf typischen Bauteilen der Luftfahrt sowie Testbauteile mit hochpräzisen Gewinden, die eine Charakterisierung der Schicht in Bezug auf Schichtdicke und der Verschraubungsparameter ermöglichen.

3.2 Anwendungsnahe Verbinder

Die Bauteile wurden in Anlehnung an die Normen EN6114 bzw. EN6115 entworfen und für die Zwecke des Projektes NiCO modifiziert, um die Handhabung im Rahmen des Forschungsprojektes zu erleichtern sowie Eigenschaften der erzeugten Schichten besser beurteilen zu können. Zur Bauteilhalterung für die galvanischen Verfahren (IPA und TUIL) wurden sie zusätzlich mit Innengewinden (M5) im Kopfbereich versehen, die zur

mechanischen Befestigung und zur Stromkontaktierung in den Versuchsbädern dienen. Zur erweiterten Charakterisierung der Schichtausbildung wurden die Teile mit Querbohrungen versehen, um die Beschichtungsqualität an problematischen Bauteilstellen bewerten zu können. Eine tief eingravierte Teilenummer ermöglicht die spätere Zuordnung der jeweiligen Teile auch nach Aufbringung der Schichten, um die Schichtdicken oder etwaige Veränderungen zu charakterisieren.

Die Herstellung der anwendungsnahen Testbauteile in zwei unterschiedlichen Größen (1/4" sowie 5/8"). Die Größenauswahl für die Testteile wurden dabei aus folgenden Gesichtspunkten getroffen:

- 1/4 Zoll hat sich innerhalb für Luftfahrtverbinder als Standardgröße für Produkt- und Prozessentwicklung etabliert. In vielen Normen wird empfohlen, zur Qualifikation von neuen oder geänderten Prozessen vor allem diese Größe als Benchmark einzusetzen. Obwohl Verbinder aus Stahl in der Luftfahrt vor allem mit größeren Durchmessern eingesetzt werden, wurde die Größe 1/4 Zoll für die Untersuchungen im Projekt ausgewählt, um größtmögliche Vergleichbarkeit mit etablierten Methoden zu gewährleisten.
- 5/8 Zoll wurde ausgewählt, da es sich hierbei um eine typische Größe für Stahlverbinder in der Luftfahrt handelt. Zugleich bleibt diese Größe innerhalb der mit den Projektpartnern vereinbarten Teilegröße, so dass die Beschichtung auch in den vergleichsweise kleinen Versuchsaufbauten der TU Ilmenau und des Fraunhofer IPA möglich sein würde.

3.3 Hochpräzise Testbauteile zur Reibwertbestimmung

Diese Bauteile beruhen auf den Bauteilen in Anlehnung an Bauteile der Reihe TB12 in Anlehnung an die Normen ABS1420 und dienen der Reibwertuntersuchung, bzw. der Charakterisierung der Anzugs-, Losbrech- und Lösemomente. Genau wie die anwendungsnahen Bauteile wurden sie in zwei unterschiedlichen Größen (1/4" sowie 5/8") hergestellt, mit einem M5-Gewinde im Kopf versehen und mittels Gravur serialisiert. Die Teile sind im Gewindebereich deutlich enger toleriert als Standardbauteile. Die Herstellung dieser Testbauteile in zwei unterschiedlichen Größen (1/4" sowie 5/8") und deren Vermessung wurden im Berichtszeitraum abgeschlossen. Um den Aufwand für die Parameterfindung bei den Projektpartnern gering zu halten, wurden dieselben Größen ausgesucht wie für die anwendungsnahen Verbinder.



Abbildung 1: Testbolzen mit hochpräzisem Gewinde der Größe 0.2500-28 UNJF mit zusätzlichem M5 Innengewinde im Kopf. Die Gravur der Seriennummer ist zum Zeitpunkt der Fotoaufnahme noch nicht erfolgt.

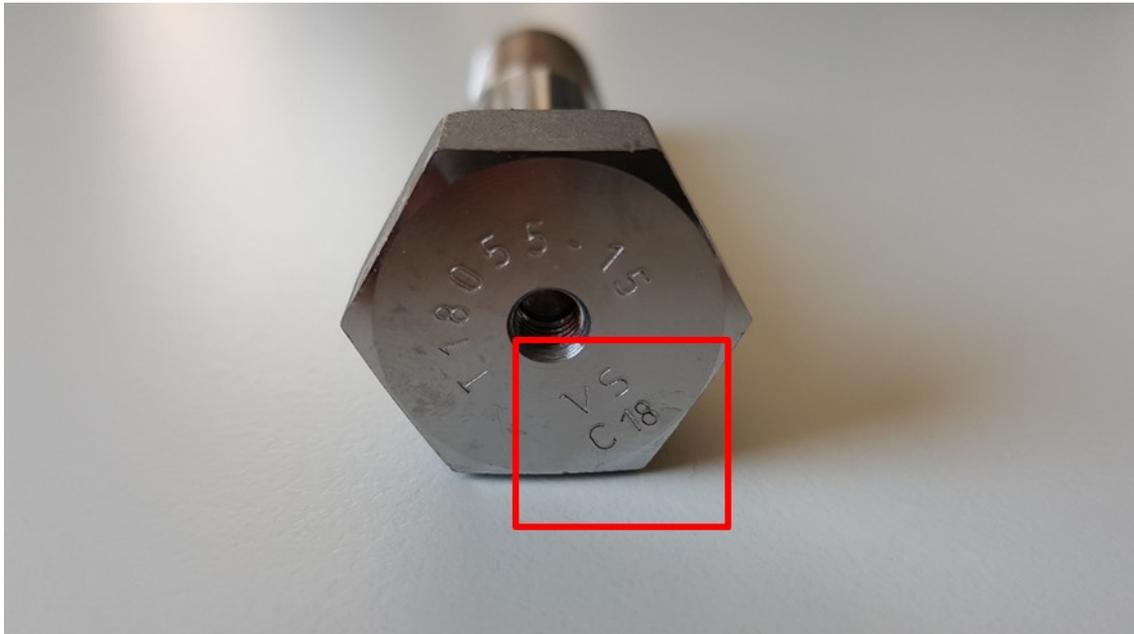


Abbildung 2: Testbolzen mit hochpräzisem Gewinde der Größe 0.2500-28 UNJF mit zusätzlichem M5 Innengewinde im Kopf und eingravierter Seriennummer.

3.4 Herstellung der Verbinderlose

Die Herstellrouten der oben beschriebenen Verbinderlose orientierte sich in weiten Teilen an den Standard-Arbeitsplänen bei Howmet Hildesheim. Im Detail wurden aber immer wieder arbeitsintensive, manuelle Arbeitsgänge eingepflegt. Dies war insbesondere für folgende Aspekte notwendig:

- individuelle Markierung mittels Gravur
- Querbohrung
- M5 Gewindebohrung im Kopf zur versuchsweisen Kontaktierung

Auch bei der Gewindeherstellung musste im Detail von den Standard-Parametern abgewichen werden, um die notwendigen Abmaße für die Beschichtungsverfahren zu berücksichtigen.



Abbildung 3: Anwendungsnaher Verbinder mit Gewindegröße 0.2500-28 UNJF auf Basis des Standardbauteils EN6115-4 mit zusätzlicher Querbohrung im Schaft sowie M5 Innengewinde im Kopf (nicht sichtbar).



Abbildung 4: Anwendungsnaher Verbinder mit Gewindegröße 0.6250-18 UNJF auf Basis des Standardbauteils EN6114-10 mit M5 Innengewinde im Kopf.

4 Entwicklung einer neuen Vermessungsmethodik der lokalen Gewindeparameter zur Schichtcharakterisierung

Zur späteren Bestimmung der Schichtdicken und zur Charakterisierung etwaiger maßlicher Veränderungen durch die Beschichtungs- oder Vorbehandlungsverfahren werden alle auszuliefernden Testbauteile mit einem hochpräzisen optischen Messsystem vermessen. Von anderen Beschichtungsverfahren ist bekannt, dass die gemessene Schichtdicke auf dem Schaft nicht ohne weiteres als Messresultat auf dem Gewinde angenommen werden kann. Es stellen sich für die unterschiedlichen Funktionsbereiche eines Verbinders mit Außengewinde jeweils unterschiedliche Schichtdicken am Schaft und am Gewinde ein. Um diese Unterschiede zu charakterisieren, ist für dieses Projekt ein spezieller Messablauf entworfen und getestet worden. Für jedes Bauteil wird der Verlauf der Kennwerte Gewindeaußendurchmesser, Flankendurchmesser und Kerndurchmesser über die gesamte Gewindelänge sowie der Verlauf des Schaftdurchmessers bestimmt. Zur späteren Zuordnung und zum Vergleich mit den Kennwerten im beschichteten Zustand werden die Daten serialisiert gespeichert.

Für diesen Zweck wurde ein Messprogramm in der Skriptsprache des verwendeten Messsystems ECM SV601 verfasst. Da diese Vorgehensweise die bisherigen Messverfahren im Detailgrad deutlich übertrifft, wurde diese Funktion durch den Hersteller der Messmaschinen eigens für dieses Projekt programmiert und in der verwendeten Messmaschine implementiert. Die Fehlerprüfung des Programms erfolgte an vorhandenen Standardbauteilen.

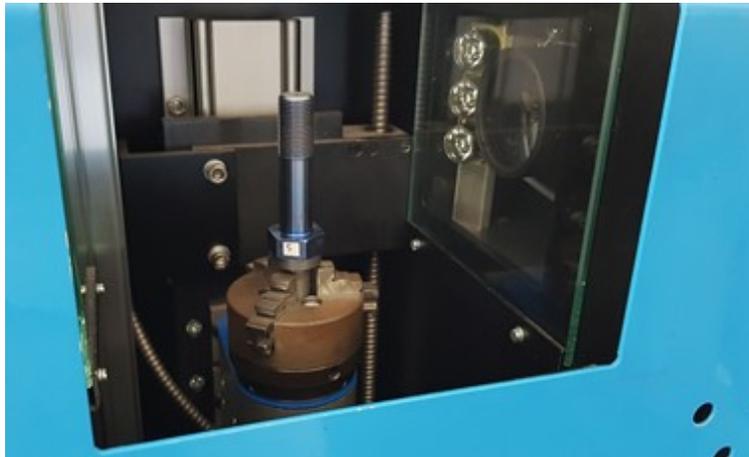


Abbildung 5: Messposition der verwendeten optischen 3D-Messmaschine (Hersteller ECM Datensysteme). Ein Prüfbauteil wird auf den drehbaren Messteller gestellt und von einer Seite mit einem parallelen Strahlbündel beleuchtet. Eine kalibrierte Kamera nimmt den Schattenwurf als Bild auf. Durch Drehung um 360° kann ein Quasi-3D-Scan erzeugt werden. Mittels Kantenerfassungen und Bildanalyse werden die relevanten Bauteilparameter winkel- und orts aufgelöst erfasst und gemeinsam analysiert.

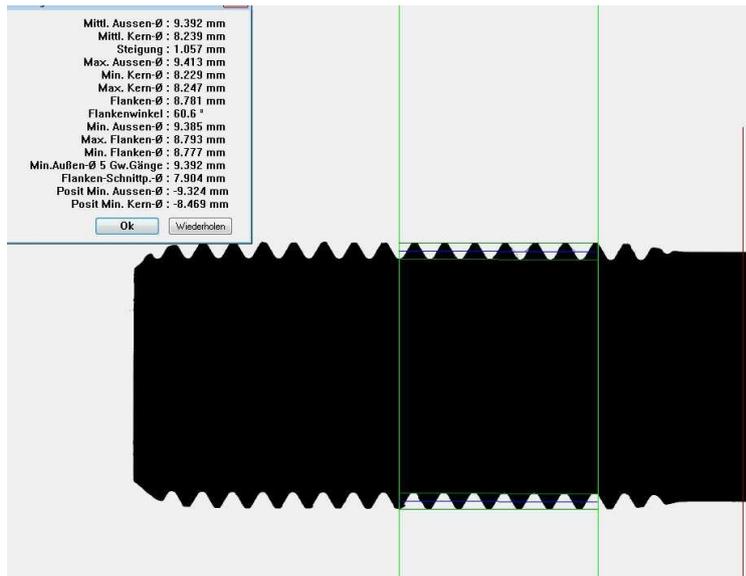


Abbildung 6: Beispielaufnahme eines Gewindescans, inklusive interaktiver maßlicher Auswertung. Hier gezeigt ist die 2D-Ansicht einer einzelnen Blickrichtung. Die 3D-Analyse erfolgt anhand des vollständigen 3D-Datensatzes. Die Prüfabläufe, die im Rahmen dieses Projektes entwickelt wurden, laufen dabei als nicht-interaktives, automatisches Skript ab um größtmögliche Vergleichbarkeit und minimalen Bediener Einfluss zu gewährleisten.

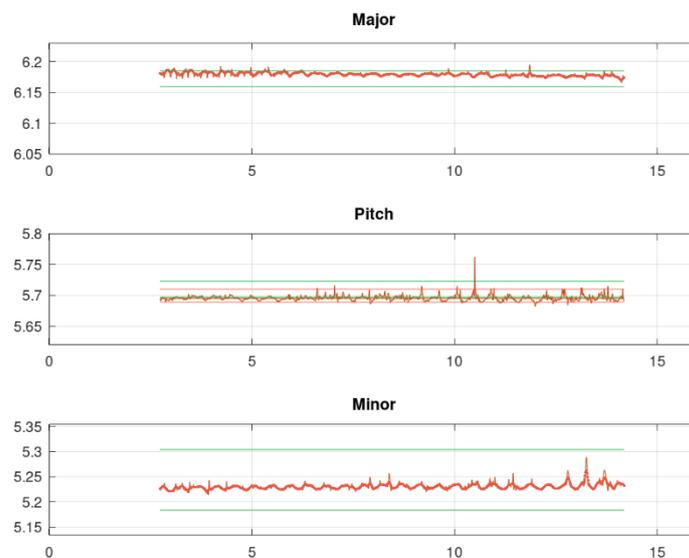


Abbildung 7: Lokaler Verlauf der Gewindeparameter Außendurchmesser, Flankendurchmesser und Kerndurchmesser entlang des Gewindes (in Orange). In Grün angegeben sind die Toleranzfelder für den jeweiligen Wert.

5 Lokale Schichtdickencharakterisierung durch kreuzkorrelierte Vorher-Nachher-Analyse

Die Prozesszeiten und Anlagenkapazitäten bei den Projektpartnern ließen eine nur geringe Anzahl an korrekt beschichteten Verbindern erwarten. Die maßliche Bestimmung der Beschichtungsdicke im Gewinde, insbesondere die Unterscheidung je nach Gewinderegion (Gewindgrund, Gewindeflanke sowie Gewindespitze) erfolgt üblicherweise zerstörend im metallographischen Schliff. Um bei einer stark begrenzten Verfügbarkeit von Testbauteilen sowohl eine maßliche Charakterisierung als auch eine weitergehende Prüfung ermöglichen zu können, wurde ein nicht-zerstörendes Messverfahren mittels automatischer optischer Vermessung entwickelt. Die Grundlage bildete dabei das im Projekt entwickelte Messskript (Kapitel 4). Zur Korrelation werden die beschichteten Teile mit demselben Skript erneut vermessen und die individuelle Teilenummer zugewiesen. Zur weiteren Analyse werden die Daten im CSV-Format an ein weiteres Analyseprogramm weitergegeben. Hierzu kamen im Projekt das Paket Octave zum Einsatz, für das entsprechende Analyseskripte programmiert wurden.

Als Eingangsdatensätze wird der vollständige Scan des unbeschichteten Teils sowie der vollständige Scan desselben Teils mit im beschichteten Zustand eingelesen. Da die Startposition für jeden Scan um wenige Grad unterschiedlich sein kann, wird in einem zweiten Analyseschritt eine die Kreuzkorrelation der Verläufe des jeweiligen Gewindeparameters in beiden Zuständen berechnet und durch numerisches Suchen des best-fit die Winkelverschiebung, bzw. -verdrehung gegeneinander bestimmt und anschließend ausgeglichen. Auf diese Weise wird erreicht, dass die Kurven weitestgehend übereinander liegen und ein lokaler Vergleich der Gewindeparameter möglich ist.

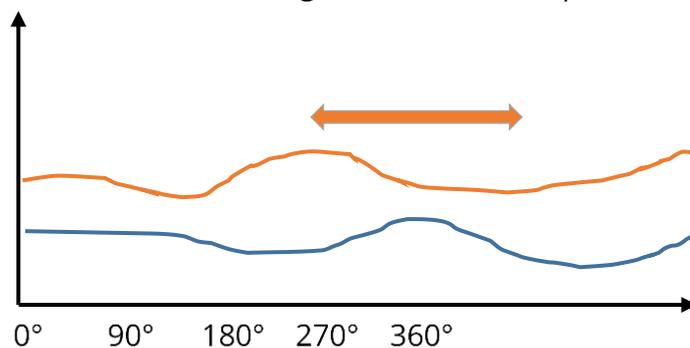


Abbildung 8: Finden des best-fit zweier Gewindeparameterverläufe. Die orangefarbene Kurve wird numerisch gegenüber der blauen Kurve verschoben und mittels Kreuzkorrelation die Position gesucht, die die höchste Übereinstimmung der Verläufe zueinander haben.

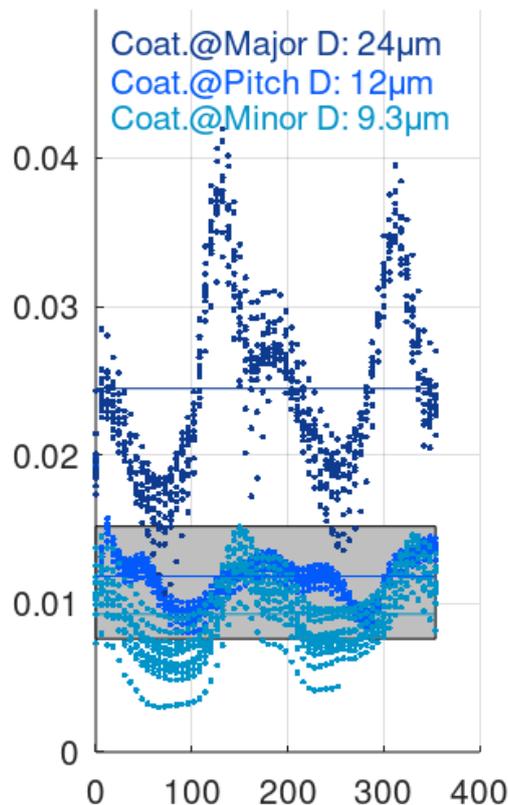


Abbildung 9: Plot der Schichtdicke eines Bauteils gegenüber der Rotation um die Längsachse. Man erkennt für dieses Bauteil eine große Inhomogenität der Schichtdicke sowohl in Bezug auf die Drehachse als auch je nach betrachteter Gewinderegion. Das hier untersuchte Beschichtungsverfahren führt zu einer deutlich größeren Schichtdicke auf dem Gewindeaußendurchmesser und zeigt hier auch eine größere Abhängigkeit von der Betrachtungsrichtung um die Drehachse.

Um die Machbarkeit der Schichtdickenbestimmung mit diesem Verfahren zu prüfen, wurde gemeinsam mit dem Projektpartner Aero Coating Wismar mehrere Testreihen an etablierten Beschichtungsverfahren der Luftfahrtbranche durchgeführt. Mittels Vermessung vor und nach der Beschichtung wurde die erzielte Schichtdicke von aluminiumpigmentierten Lacken sowie von IVD-Al Schichten auf Titanbauteilen mit der beschriebenen Vorgehensweise bestimmt. Bei aluminiumpigmentierten Lacken wurde dabei wertvolle Erkenntnisse zum Einfluss von Nachbehandlungen gewonnen. Diese Art von Lack wird nach dem Beschichten noch im Ofen ausgebacken. Hierbei kommt es zu einem Schrumpfungsprozess, vermutlich durch Entweichen des Lösemittels. Die direkt nach dem Beschichten gemessenen Durchmesser reduzieren sich nochmal. Die berechnete Schichtdicke reduzierte sich dabei deutlich auf 50-70% des Ausgangswertes. Sofern das hier entwickelte Messverfahren zur Schichtdickenkalibrierung eines Beschichtungsprozesses genutzt werden sollten, müssen die Effekte von Nachbehandlungsverfahren ebenfalls untersucht werden. Durch den Vergleich der Ergebnisse kann dann ein Korrekturfaktor abgeschätzt werden.

6 Charakterisierung der beschichteten Teile

6.1 Schichtdickencharakterisierung durch optische 3D- Vermessung

6.1.1 Lösemittelbasierter Beschichtungsprozess (Fraunhofer IPA)

Das Fraunhofer IPA stellte insgesamt 6 Stück der hochgenau vermessenen Testbolzen T18055-09 (Nenngröße 1/4 Zoll) sowie 10 Stück der Variante des Standardbauteils EN6115-4 zur Verfügung. Das Erscheinungsbild der Schichten ist matt-weiß. Es zeichnen sich teilweise leichte Ränder und Farbübergänge entlang der Längsachse der Bauteile ab. Die Schichtoberfläche ist dabei deutlich rauer als vergleichbare Cadmiumschichten (siehe Abschnitt 6.3). Die Schichten zeigen deutlich eine typische Erscheinungsform elektrochemisch abgeschiedener Schichten mit stark erhöhtem Schichtwachstum an den Gewindespitzen und deutlich geringerem im Gewindegrund. Im Mittel beträgt die Schichtdicke 45 μm an den Gewindespitzen, 10 μm an den Gewindeflanken und 2 μm im Gewindegrund. Diese Charakteristik ist dabei sehr konstant, mit guter Wiederholgenauigkeit und geringer Standardabweichung, siehe Tabelle 1.

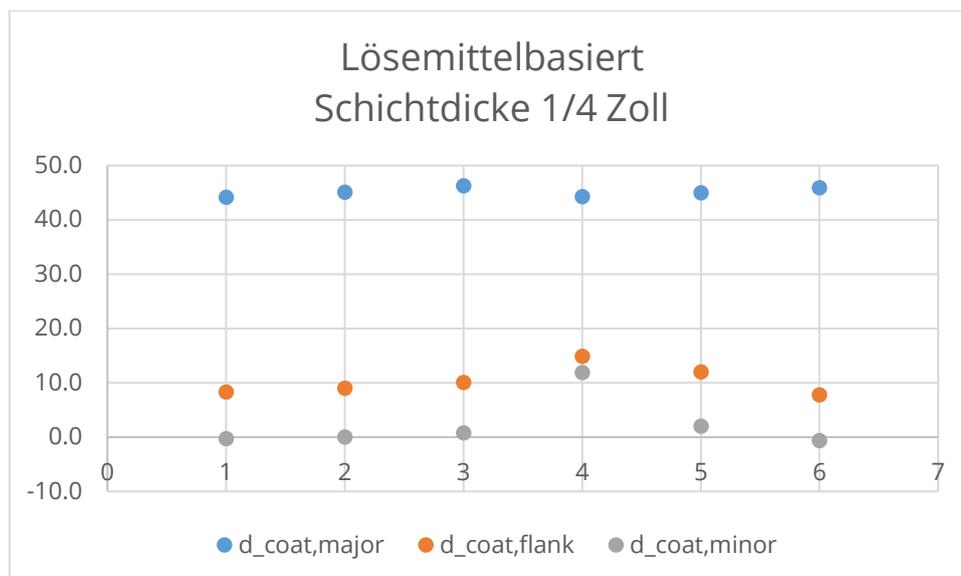


Abbildung 10: Schichtdicken in den drei untersuchten Gewindebereichen Gewindespitzen ($d_{\text{coat,major}}$), Gewindeflanken ($d_{\text{coat,flank}}$) und Gewindegrund ($d_{\text{coat,minor}}$) der am Fraunhofer IPA im Lösemittel basierten Prozess beschichteten Fastener.

Tabelle 1: Schichtdicken in den drei untersuchten Gewindebereichen der am Fraunhofer IPA im Lösemittel basierten Prozess beschichteten Fastener. Angabe der Einzelwerte, sowie der Mittelwerte und der Standardabweichung.

Nr	d_coat,major	d_coat,flank	d_coat,minor
A03	44.2	8.3	-0.3
A04	45.1	9.0	0.0
A05	46.3	10.1	0.8
A06	44.3	14.9	11.9

A11	45.0	12.0	2.0
A17	45.9	7.8	-0.6
Mittelwerte	45.1	10.3	2.3
Standardabw	0.85	2.68	4.78

6.1.2 Ionische Flüssigkeiten

Die TU Ilmenau stellte insgesamt 20 Stück der hochgenau vermessenen Testbolzen T18055-09 (Nenngröße 1/4 Zoll) sowie 40 Stück der hochgenau vermessenen Testbolzen T18055-15 (Nenngröße 5/8 Zoll) zur Verfügung. Das Erscheinungsbild der Schichten ähnelt leicht mattem Perlmutter. Es zeichnen sich teilweise leichte Ränder und Farbübergänge entlang der Längsachse der Bauteile ab. Die Charakteristik des Schichtwachstums hängt stark von der Bauteilgröße, bzw. von der Gewindesteigung ab. Während die größeren Bauteile eine signifikant erhöhte Schichtdicke am Gewindeaußendurchmesser aufzeigen, ist dies bei den kleineren Bauteilen deutlich homogener.

6.1.2.1 1/4 Zoll Bauteile T18055-09

Für die T18055-09 beträgt die Schichtdicke im Mittel 15 µm an den Gewindespitzen, 12 µm an den Gewindeflanken und 12 µm im Gewindegrund.

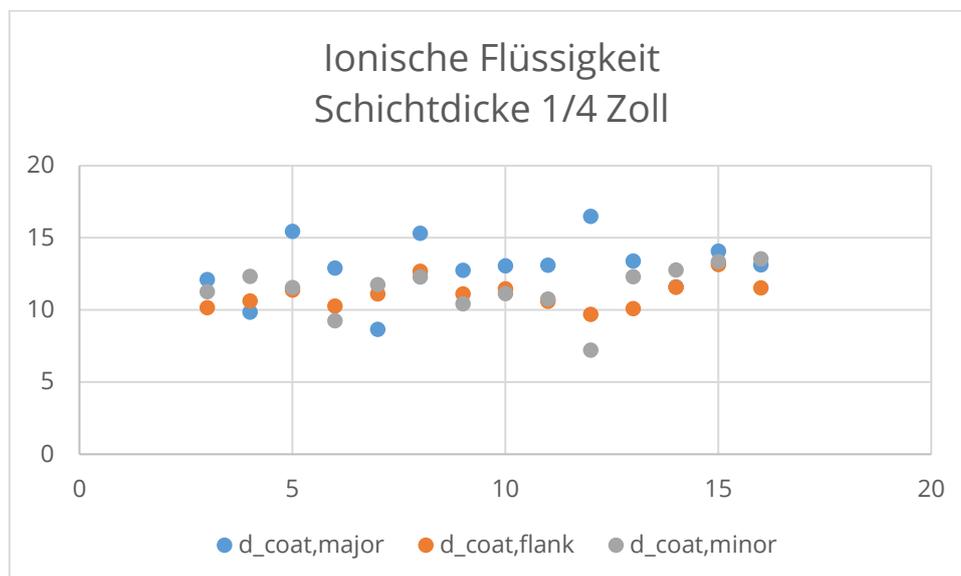


Abbildung 11: Schichtdicken in den drei untersuchten Gewindebereichen Gewindespitzen ($d_{coat,major}$), Gewindeflanken ($d_{coat,flank}$) und Gewindegrund ($d_{coat,minor}$) der an der TU Ilmenau im Prozess mit ionischen Flüssigkeiten beschichteten Fastener (1/4 Zoll).

Tabelle 2: Schichtdicken in den drei untersuchten Gewindebereichen der an der TU Ilmenau im Prozess mit ionischen Flüssigkeiten beschichteten Fastener (1/4 Zoll). Angabe der Einzelwerte, sowie der Mittelwerte und der Standardabweichung.

Nr	$d_{coat,major}$	$d_{coat,flank}$	$d_{coat,minor}$
B01	31.9	15.1	22.3
B02	23.6	12.9	16.7

B04	12.1	10.2	11.3
B05	9.9	10.6	12.3
B06	15.5	11.4	11.6
B07	12.9	10.3	9.3
B09	8.7	11.1	11.8
B10	15.3	12.7	12.3
B11	12.8	11.1	10.4
B12	13.1	11.5	11.1
B13	13.1	10.6	10.8
B14	16.5	9.7	7.2
B15	13.4	10.1	12.3
B16	11.6	11.6	12.8
B18	14.1	13.2	13.3
B19	13.1	11.5	13.5
Mittelwerte	14.8	11.5	12.4
Standardabw	5.6	1.4	3.3

6.1.2.2 5/8-Zoll Bauteile T18055-15

Für die T18055-15 beträgt die Schichtdicke im Mittel 20 µm an den Gewindespitzen, 12 µm an den Gewindeflanken und 11 µm im Gewindegrund.

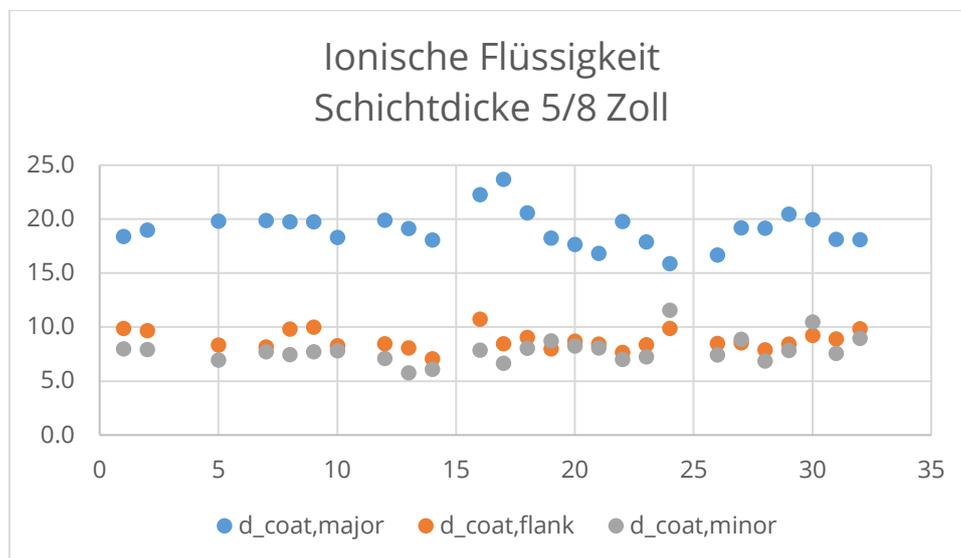


Abbildung 12: Schichtdicken in den drei untersuchten Gewindebereichen der an der TU Ilmenau im Prozess mit ionischen Flüssigkeiten beschichteten Fastener (5/8 Zoll).

Tabelle 3: Schichtdicken in den drei untersuchten Gewindebereichen der an der TU Ilmenau im Prozess mit ionischen Flüssigkeiten beschichteten Fastener (5/8 Zoll). Angabe der Einzelwerte, sowie der Mittelwerte und der Standardabweichung).

Part No#	d_coat,major	d_coat,flank	d_coat,minor
B07	11.9	5.8	6.0

B08	25.6	13.0	10.4
B09	18.4	9.9	8.0
B10	19.0	9.6	7.9
B11	26.9	26.1	29.8
B12	20.9	18.5	15.2
B13	19.8	8.3	6.9
B14	27.4	32.2	36.5
B15	19.8	8.2	7.7
B16	19.7	9.8	7.4
B17	19.7	10.0	7.7
B18	18.3	8.3	7.8
B19	30.4	55.7	40.6
B20	19.9	8.4	7.1
B21	19.1	8.1	5.8
B22	18.1	7.0	6.1
B23			
B24	22.3	10.7	7.8
B25	23.7	8.4	6.6
B26	20.6	9.0	8.0
B27	18.2	8.0	8.7
B28	17.7	8.7	8.2
B29	16.8	8.4	8.1
B30	19.8	7.6	7.0
B31	17.9	8.3	7.2
B32	15.9	9.9	11.5
B33			
B34	16.7	8.5	7.4
B35	19.2	8.5	8.9
B36	19.2	7.9	6.8
B37	20.5	8.4	7.8
B38	19.9	9.2	10.5
B39	18.1	8.9	7.6
B40	18.1	9.8	8.9
Mittelwerte	20.0	11.8	10.7
Standardabw	3.6	9.6	8.5

6.1.3 Al-Legierungsschichten mittels Hochratenverdampfen (Fraunhofer FEP)

Über den Projektpartner Airbus Operations wurden Untersuchungen mit einem weiteren Beschichtungsverfahren am Fraunhofer Institut FEP in Dresden vorgenommen. Das Verfahren des Hochratenverdampfen aus Draht ist in vielen Gesichtspunkten sehr ähnlich zum IVD. Beide Verfahren verarbeiten Draht mittels Schiffchenverdampfung und sind für Gestellware als auch Schüttgut geeignet. Die Hochratenverdampfung verfügt

zusätzlich über eine Hohlkatode, um die Plasmadichte im Prozessraum steuern zu können und verfügt über die Möglichkeit einen Co-Sputterprozess parallel laufen zu lassen, um beispielsweise einen Legierungswerkstoff gezielt in die Schicht einzubringen. Das Fraunhofer FEP hat vor allem die im Projekt verwendeten, hochpräzisen 1/4-Zoll Verbinder beschichtet. Co-Sputtern wurde für die hier untersuchten Schichten nicht verwendet.

6.2 Metallographie

Die metallographische Analyse erfolgt in erster Linie zur Plausibilitätsprüfung der in Abschnitt 5 und 6 beschriebenen, zerstörungsfreien Analysemethoden.

EN6115-4 A08

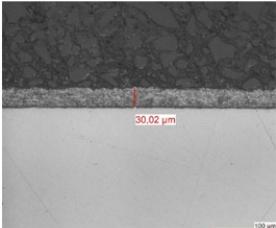
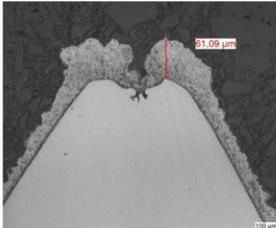
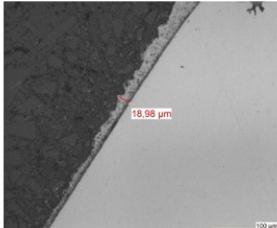
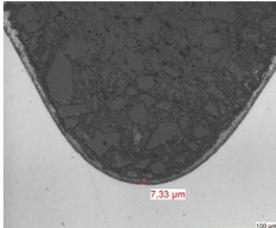
Schaft	Gewindespitze	Flanke	Gewindegrund
Schichtdicke: 30 µm (metallogr.)	Schichtdicke: 61 µm (metallogr.) 45 µm (maßlich) „Furche“ in der Mitte	Schichtdicke: 19 µm (metallogr.) 10 µm (maßlich) Gradient: Starker Einfluss der Position	Schichtdicke: 7 µm (metallogr.) 2 µm (maßlich)
			

Abbildung 13: Metallographische Analyse einer Schicht aus der lösemittelbasierten Abscheidung (IPA), 1/4 Zoll.

EN6115-4 B02

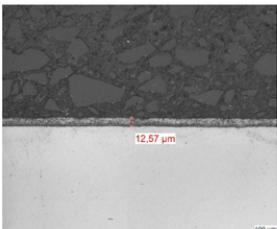
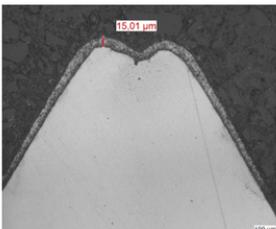
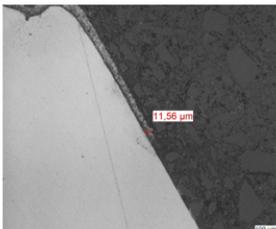
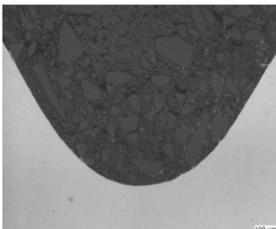
Schaft	Gewindespitze	Flanke	Gewindegrund
Schichtdicke: 13 µm (metallogr.)	Schichtdicke: 15 µm (metallogr.) 14 µm (maßlich)	Schichtdicke: 12 µm (metallogr.) 12 µm (maßlich)	Schichthaftung nicht ausreichend. Beim Trennen abgeplatzt
			

Abbildung 14: Metallographische Analyse einer Schicht aus Abscheidung aus ionischen Flüssigkeiten (TU Ilmenau), 1/4 Zoll.

EN6114-10 B10

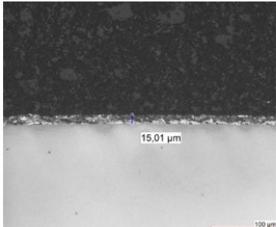
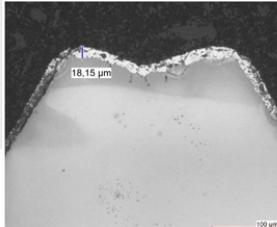
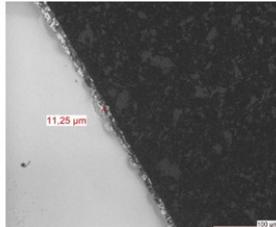
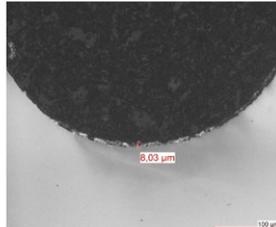
Schaft	Gewindespitze	Flanke	Gewindegrund
Schichtdicke: 15 µm (metallogr.)	Schichtdicke: 18 µm (metallogr.) 22 µm (maßlich)	Schichtdicke: 11 µm (metallogr.) 9 µm (maßlich)	Schichtdicke: 8 µm (metallogr.) 6 µm (maßlich)
			

Abbildung 15: Metallographische Analyse einer Schicht aus Abscheidung aus ionischen Flüssigkeiten (TU Ilmenau), 5/8 Zoll.

6.3 Rauheit und Einfluss der Nachbehandlung durch Glaskugelstrahlen

Im Vergleich mit kadmierten Schichten waren die Oberflächen der meisten im Projekt untersuchten Beschichtungsverfahren deutlich rauer. Lediglich die Beschichtung aus ionischen Flüssigkeiten zeigte bereits ohne Nachbehandlung einen metallischen Glanz. Vor diesem Hintergrund wurde ein anschließender Nachbehandlungsschritt mittels Glaskugelstrahlen durchgeführt. Dieser Prozessschritt gehört beispielsweise zum Standard für das Reinaluminium IVD und führt in der Regel zur Ausbildung eines leichten, metallischen Glanzes, zur Kompaktierung der Schicht samt maßlicher Änderung und zur Homogenisierung der Anzugskräfte bei der Verschraubung.

Die Mittenrauwert der Fastener ist im Folgenden zusammengefasst. Gemessen wurde jeweils auf dem Schaft mit einem Tastschnittgerät Mitotoyo SJ-210:

Tabelle 4: Gemessene Mittenrauwerte der untersuchten Beschichtungsverfahren. Messung auf dem Schaft der hochpräzisen Testbauteile mit Tastschnittgerät Mitotoyo SJ-210.

Beschichtung, Verfahren + Nachbeh.	Mittenrauwert Ra [µm]
Kadmiert	0,42
AlZn Ionische Flüssigkeit	0,53
AlZn Lösemittelbasierte Abscheidung	0,93
AlZn Hochratenverdampfen - Rohzust.	2,50
AlZn Hochratenverdampfen - Glaskugel	2,16
Al IVD - Glaskugel+Passivierung	0,89

In allen Fällen konnte durch das Glaskugelstrahlen eine homogenere Oberfläche mit geringerer Rauheit erzielt werden. Für Proben des Fraunhofer IPA sowie der TU Ilmenau

konnten Vergleichsmessungen vor und nach der Nachbehandlung durchgeführt werden, um die maßliche Änderung durch den Prozess zu charakterisieren. Hierbei zeigte sich, dass die Schicht lösemittelbasierten Prozesses wie erwartet kompaktiert wurde und sich eine Reduzierung der Durchmesser an Schaft und Gewinde zwischen $7\mu\text{m}$ und $32\mu\text{m}$ einstellte (siehe Tabelle). Die Beschichtung aus Ionischen Flüssigkeiten zeigte dagegen z.T. sogar eine Vergrößerung der gemessenen Durchmesser, was auch Ablösungserscheinungen der Schicht hinweist. In Anbetracht der Schichterscheinung in Zustand ohne Nachbehandlung ist es für diesen Beschichtungsprozess jedoch fraglich, ob überhaupt eine Nachbehandlung durch Glaskugelstrahlen notwendig sein würde.

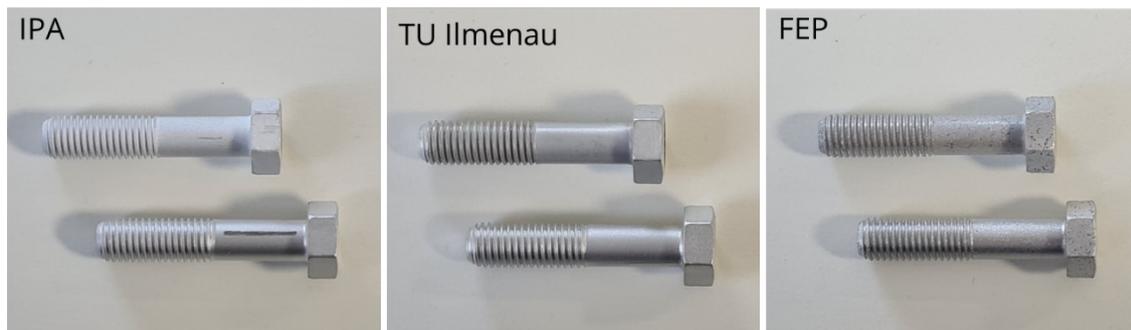


Abbildung 16: Beschichtete Fastener der untersuchten Beschichtungsverfahren aus Lösemittelbasierter Elektrolytabcheidung (links, IPA), Abscheidung aus Ionischen Flüssigkeiten (Mitte, TU Ilmenau) und Hochratenverdampfen (rechts, FEP). Jeweils oben im Bild ist der Lieferzustand nach dem Beschichtungsverfahren ohne weitere Nachbehandlung, unten ist der Zustand nach dem Glaskugelstrahlen.



Abbildung 17: Beschichtete, anwendungsnahe Fastener auf Basis EN6115-4 vor und nach der Nachbehandlung mittels Glaskugelstrahlen. Die aus Ionischer Flüssigkeit abgeschiedene Schicht hat dabei deutliche, z.T. großflächige Abplatzungen erlitten, die auf mangelnde Schichthaftung hinweisen.

Tabelle 5: Maßliche Änderung der Bauteile vor und nach der Glaskugelbehandlung. Angegeben ist die Maßänderung des jeweiligen Durchmessers an den angegebenen Bauteilregionen.

		Schaft "Gewinde"	Schaft "Kopf"	Außen	Kern	Flanke
IPA	kompaktiert	-7	-9	-10	-11	-27
IPA	kompaktiert	-11	-11	-16	-8	-32
TU Ilm.	kompaktiert	+2	+24	+6	-5	+15

6.4 Schichthaftung

Als Prüfverfahren für die Schichthaftung wurde dasselbe Verfahren wie die äquivalenten, kadmierten Stahlbauteile nach AMS QQ-P-416 geprüft. Hierfür wird die Beschichtung am Schaft des Bauteils mit einer scharfen kante, bzw. Klinge bis zum Grundwerkstoff angekratzt und anschließend mittels Sichtprüfung bei 4- bis 10-facher Vergrößerung untersucht, ob Anzeichen einer Schichtablösung zu erkennen sind.



Abbildung 18: Auf Schichthaftung geprüfte Beschichtungen. Links: zwei Proben des IPA, oben im Rohzustand, unten kompaktiert. Rechts: eine Probe mit deutlich abgelöster Schicht der TU Ilmenau im kompaktierten Zustand.

Die Schichthaftung wurde für alle untersuchten Proben des IPA im Rohzustand als auch im kompaktierten Zustand als gut eingestuft. Die Beschichtung der TU Ilmenau zeigte auf den anwendungsnahen Fastener vom Typ EN6114 nach der Behandlung durch Glaskugelstrahlen eine deutliche Ablösung der Schicht. Im Rohzustand wurde die Schichthaftung jedoch als gut beurteilt. Vom FEP lagen nur Proben der Testbolzen für Gewindeversuche vor. Die Schichthaftung auf diesen Proben wurde in allen Fällen als nicht in Ordnung eingestuft. Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse zusammengefasst:

Tabelle 6: Zusammenfassung der Prüfung auf Schichthaftung nach DIN EN4473 für die Anwendungsnahen Fastener vom Typ EN6114-4.

EN6114-4	A (IPA)	B (TU Ilmenau)	FEP
roh	i.O.	i.O.	n/a
kompaktiert	i.O.	n.i.O.	n/a

Tabelle 7: Zusammenfassung der Prüfung auf Schichthaftung nach DIN EN4473 für die Anwendungsnahen Fastener vom Typ T18055 09.

T18055 09			
roh	i.O.	i.O.	n.i.O.
kompaktiert	i.O.	i.O.	n.i.O.

7 Verschraubungsprüfung

Für den Einsatz als 1:1-Ersatz von Cadmium-Beschichtungen auf Schraubverbindern ist es für den praktischen Einsatz notwendig, dass die Verschraubungsparameter identisch sind, so dass industrieweit etablierte Drehmomentvorgaben erhalten bleiben können. Vor diesem Hintergrund ist die Prüfung im Schraubenprüfstand eines der wichtigsten Kriterien für die Begutachtung der Eignung der hier untersuchten Schichten. Es hat sich im Projektverlauf herausgestellt, dass die Prozesskontrolle noch deutlich besser verstanden werden muss. Dies äußert sich unter anderem in großen Inhomogenitäten der Schichten und vor allem der Schichtdicken. Eine Prüfung im Schraubenprüfstand liefert jedoch nur dann sicher interpretierbare Erkenntnisse, wenn mindestens die Maßhaltigkeit und ein ausreichendes Maß an Schichthftung auf den beschichteten Gewinden gegeben ist. Aufgrund der gelieferten Probenanzahlen und -qualität (insbesondere Maßhaltigkeit) konnten somit nur Proben der mit Ionischen Flüssigkeiten beschichteten Verbinder in statisch relevanter Menge geprüft werden. Für die anderen Verfahren standen zu wenig Verbinder zu Verfügung, die maßlich die in Ordnung waren. Diese Proben wurden ebenfalls geprüft, es die Ergebnisse können nur als Richtmaß für die weitere Entwicklung dienen. Ein Vergleich mit konventionell kadmierten Proben dient der Einstufung der Ergebnisse bezüglich der Eignung als 1:1-Ersatz.

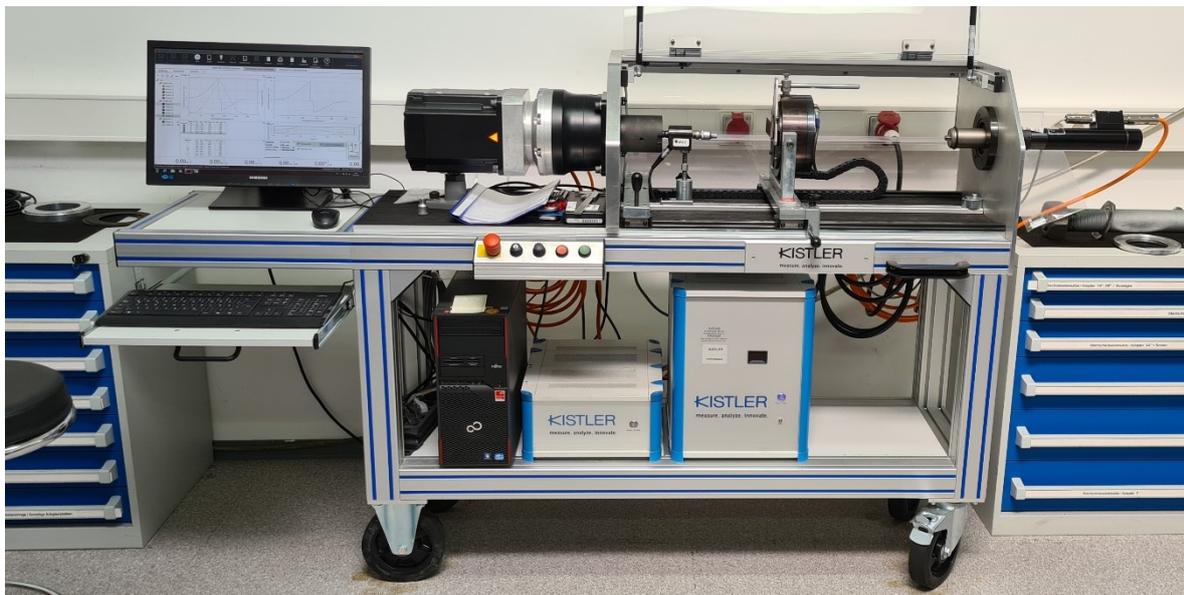


Abbildung 19: Schraubenprüfstand der Fa. Kistler, der für die Verschraubungsprüfungen eingesetzt wurde.

7.1 Prüfung an 1/4-Zoll Gewinden

Die Veränderungen am Schraubendesign, insbesondere das M5-Innengewinde am Kopf, veränderten die Eigenschaften der Testbolzen soweit, dass eine Prüfung nach etablierten Normen nicht, bzw. nicht vollständig möglich war. Insbesondere das Anzugsmoment musste im Vergleich zu Normvorgaben deutlich gesenkt werden, da es sonst zum Abriss des Kopfes gekommen wäre. Vor diesem Hintergrund wurde eine Prüfung in Anlehnung an Spezifikation AB1420 durchgeführt. Das Drehmoment zu Endanzug wurde dabei für die 1/4-Zoll-Testbolzen von 6 Nm auf 4 Nm reduziert.

Es wurden Vergleichsprüfungen mit kadmierten Testbolzen als Referenz durchgeführt. Die Kadmiumbeschichtung wurde hierfür nach AMS-QQ-P-416 appliziert. Die Testbolzen mit AlZn-Beschichtung aus Ionischen Flüssigkeiten wurden für die Versuche keiner mechanischen oder chemischen Nachbehandlung unterzogen. Beide Versuchslose wurden mit einer luftfahrttypischen Schmierschicht aus Cetyl überzogen. Hierbei kam eine umweltfreundliche, wasserbasierte Cetyl-Emulsion in Einklang mit HS305 zum Einsatz.

Alle Schraubversuche wurden mit Muttern vom Typ NSA5472 durchgeführt. Diese Muttern sind für die Verschraubung mit cadmierten Schrauben und Pins vorgesehen und dienen somit als ideales Beispiel für den angestrebten 1:1-Ersatz.

Eine erste Versuchsreihe wurde anhand von AlZn- sowie Cd-beschichteten Schrauben durchgeführt. Dabei wurde der Schraubenkopf festgehalten und die Mutter gegen eine Stahlunterlage angezogen.

Tabelle 8: Prüfergebnisse aus der Verschraubungsprüfung beim Anzug bis 4 Nm.

	Klemmkraft [kN]	Drehmoment [Nm]	μ
Cd	5,94	4,0	0,062
AlZn	6,09	4,0	0,060

Beide Prüflöse zeigten vergleichbare Klemmkraft sowie Reibwerte im Gewinde. Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Beschichtungswerkstoffen bezüglich der Verschraubungsparameter. Aus Sicht der Montageparameter erscheint die Al-Legierungsschicht als 1:1-Ersatzwerkstoff geeignet.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde zusätzlich das Schmiermittel auf dem Gewinde variiert. Dabei wurden zwei verschiedene Cetyl-Präparate auf Wasserbasis angewandt. Der Anzug erfolgte hier ebenfalls mit Muttern vom Typ NSA5472, in diesem Fall jedoch gegen eine Unterlage aus Aluminium.

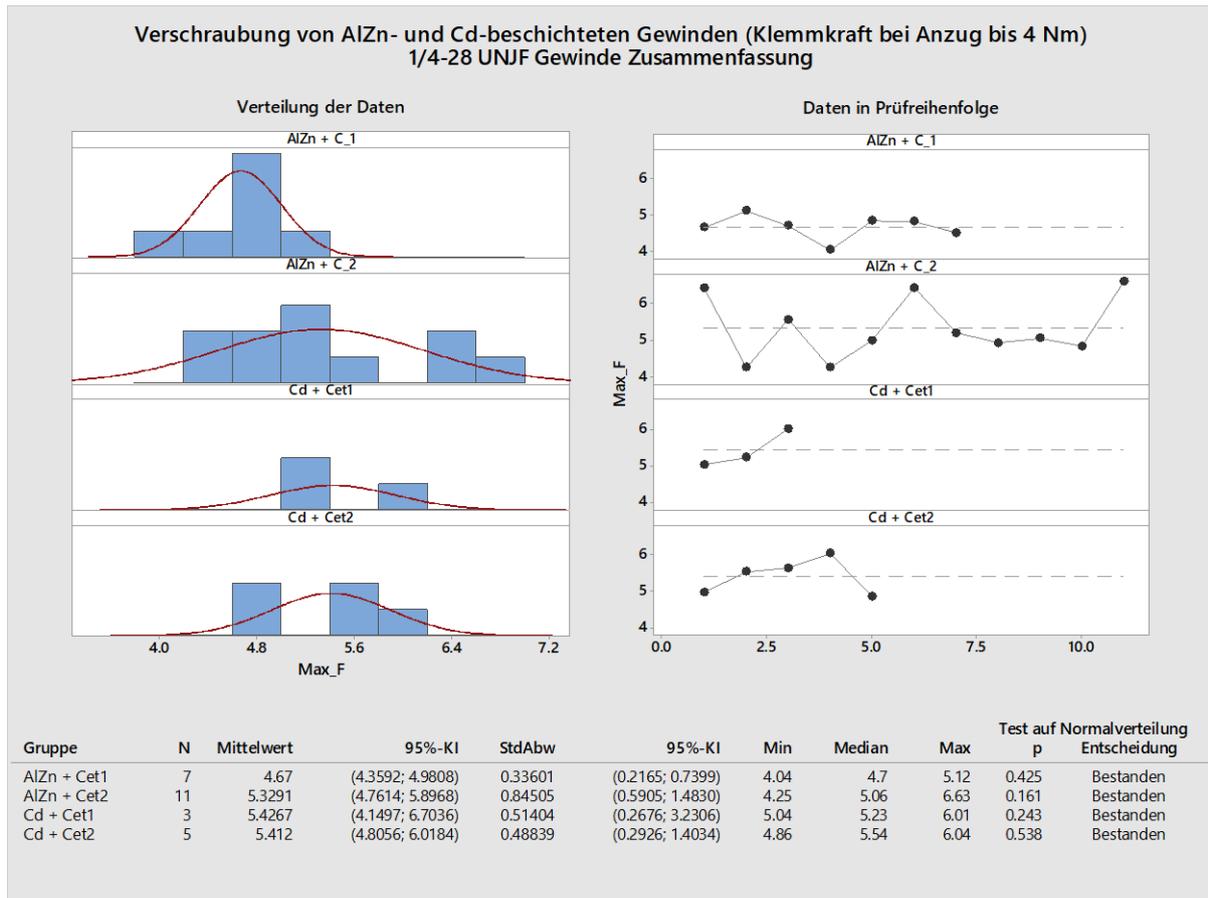


Abbildung 20: Grafische Zusammenfassung der Verschraubungsversuche von 1/4-Zoll Testbolzen mit AlZn-Schicht sowie Cd-Schicht mit zwei unterschiedlichen Cetyl-Präparaten als Schmierstoff. . Prüfkriterium ist die erreichte Klemmkraft bei 4 Nm Anzugsmoment.

Für die Kombination mit dem Produkt Cetyl2 wird mit AlZn eine vergleichbare Klemmkraft erzielt wie für die kadmierte Oberfläche. Das Schmiermittel Cetyl1 zeigte dagegen eine Reduktion der Klemmkraft von etwa 5,4 kN (für Cd) auf 4,7 kN (für AlZn).

7.2 Prüfung an 5/8-Zoll Gewinden

Größere Gewinde zeigen sowohl für Beschichtungsverfahren als auch in der Verschraubung ein anderes Verhalten. Das Schichtwachstum ändert sich aufgrund der typischerweise größeren geometrischen Dimensionen, z.B. werden typischerweise Kanteneffekte bedeutsamer. Die größeren Kräfte und Drehmomente bei größeren Gewinden führen tendenziell zu einem anderen Verhalten von Schmierstoffen sowie veränderter Schichterosion während des Anzugs. Aus diesem Grund wurden auch Gewinde mit größeren Gewindedimensionen geprüft. Aufgrund der von den Projektpartnern erzielten Fortschritte, konnten nur mittels AlZn-Abscheidung aus ionischen Flüssigkeiten beschichtete Gewinde sowie kadmierte Gewinde nach AMS-QQ-P-416 als Referenz im Schraubversuch eingesetzt werden.

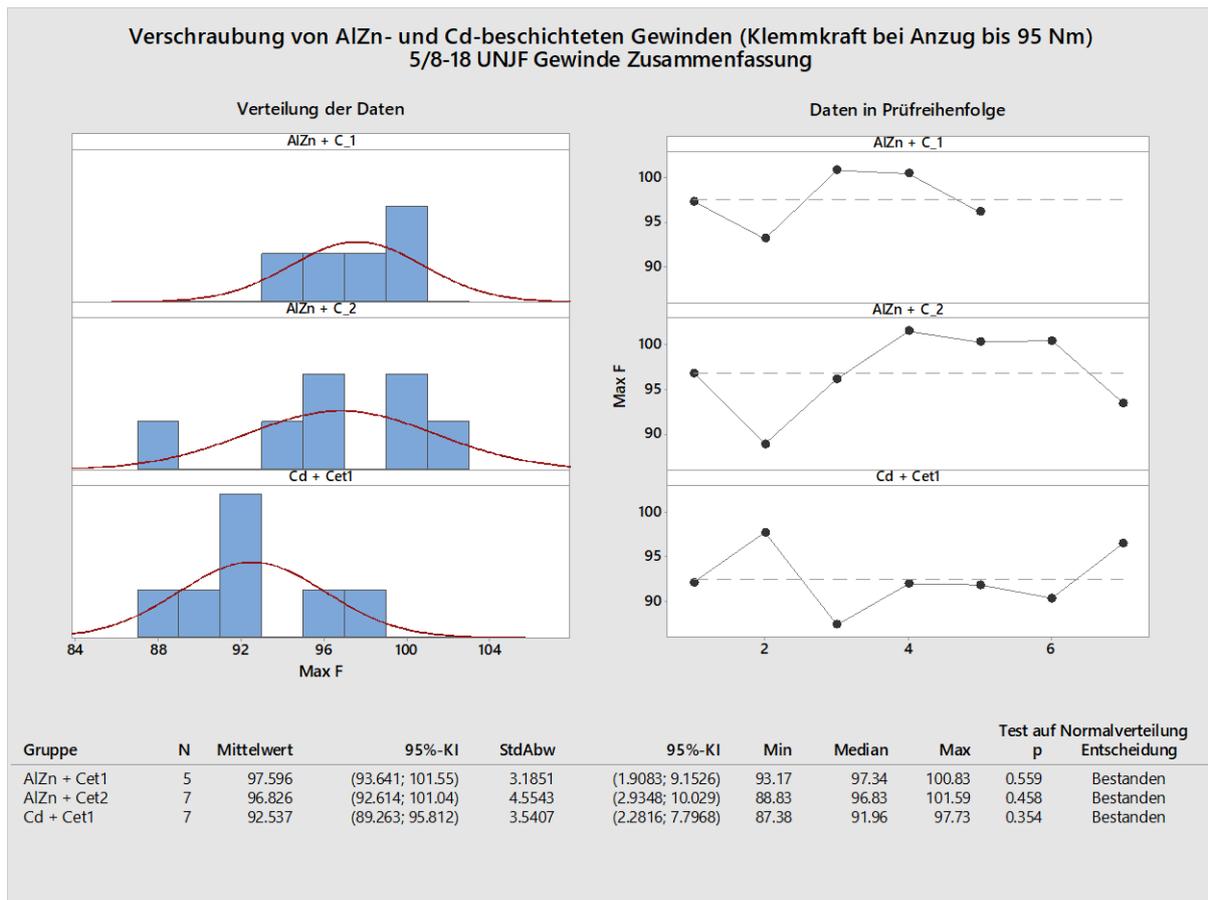


Abbildung 21: Grafische Zusammenfassung der Verschraubungsversuche von 5/8-Zoll Testbolzen mit AlZn-Schicht sowie Cd-Schicht mit zwei unterschiedlichen Cetyl-Präparaten als Schmierstoff. Prüfkriterium ist die erreichte Klemmkraft bei 95 Nm Anzugsmoment.

Tabelle 9: Prüfergebnisse der 5/8-Zoll Gewinde beim Anzug bis 95 Nm.

	Klemmkraft [kN]	Drehmoment [Nm]	μ
Cd	92.5	95	0.071
AlZn	97.1	95	0.066

Bei der Versuchsreihe mit größeren Gewinden zeigte sich die erreichte Klemmkraft an den AlZn-Proben etwas höher als für die Referenzproben. Beide Werte sind jedoch sicher innerhalb der geforderten Anzugskräfte für diese Verbindung. Anders als für die kleineren Gewinde zeigte sich hier kein Unterschied zwischen den Schmierstoffen.

8 Zusammenfassung

Das NiCO-Konsortium arbeitete sowohl an stark werkstofftechnisch geprägten Arbeitspaketen zum Korrosionsschutz sowie an praxisnaher Prozessentwicklung und Schichtprüfung. Die Teilnahme von Howmet Hildesheim konzentrierte dabei praxisnah auf die Erzielung relevanter Schichteigenschaften für den angestrebten 1:1-Ersatz von Cadmium als Schichtwerkstoff zum Korrosionsschutz von Stahlverbindern der Luftfahrt. Die gemeinsame Arbeit innerhalb des Konsortiums war über die gesamte Projektlaufzeit geprägt von dem Bedürfnis, die Schichtqualitäten auf ein für die Anwendung notwendiges Maß zu bringen sowie das Verständnis der Prozesskontrolle aufzubauen. In dieser Phase konnte Howmet vor allem mit der Bereitstellung von Probenmaterial sowie der Weitergaben von Prozesswissen für Luftfahrtprodukte zu Projekt beitragen.

Die Bereitstellung hochgenau vermessener Gewinde für die spätere Analyse übertraf in vielen Aspekten die üblichen Anforderungen deutlich. Howmet konnte in den Bereichen schneller, optischer Gewindevermessung sowie der Schichtanalytik aus diesen Daten neues Wissen aufbauen. Diese Kenntnisse konnte auch schon für Zwecke außerhalb der Projektarbeit als Dienstleistung vermarktet werden.

Die Verschraubungsprüfung erster erfolgreich beschichteter Verbinder zeigte schnell, dass die Schichteigenschaften bezüglich Reibwert und Schichthaltbarkeit in der Verschraubung nah an den geforderten Werten lagen und mit kadmierten Produkten vergleichbar waren. Untersuchungen mit umweltfreundlichen, wasserbasierten Cetyl-Schmierfilmen zeigten ebenfalls ein hohes Potential um die bislang etablierten Systeme ersetzen zu können. Mit den Erkenntnissen aus dem Projekt NiCO erscheint eine schnelle Umsetzbarkeit des erwünschten 1:1-Ersatzsystems für kadmierte Stahlverbinder gut realisierbar.