



**Fooke GmbH**

**Abschlussbericht**

**„Entwicklung einer neuen Frästechnik für die schnelle und zugleich hochgenaue Trocken- und Minimalmengenschmierbearbeitung von gekrümmten Aluminium-Großblechen mit dem Ziel der Substitution galvanischer Abtragsverfahren“**

zusammen mit dem Mechatronik Institut Bocholt **MIB** der FH Gelesenkirchen

gefördert von der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

unter dem Az: 23420

**Prof. Dr.-Ing. Peter Kerstiens, MIB  
Dipl.-Ing. FH Richard Löttert, Fooke  
Dipl.-Ing. TH Christian Spieker, Fooke**

**Borken, Juni 2007**

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>23420</b>	Referat	<b>21/0</b>	Fördersumme	<b>125.000,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>		Entwicklung einer neuen Frästechnik für die schnelle und zugleich hochgenaue Trocken- und Minimalmengenbearbeitung von gekrümmten Aluminium-Großblechen mit dem Ziel der Substitution galvanischer Abtragsverfahren			
<b>Stichworte</b>		Verfahren, Abwasser, Energie, Verminderung			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
<b>22 Monate</b>		<b>07.06.2005</b>		<b>31.03.2007</b>	
Projektphase(n)		<b>5</b>			
Zwischenberichte:		alle 6 Monate Kurzbericht			
<b>Bewilligungsempfänger</b>		<b>FOOKE GmbH</b> Raiffeisenstr. 18 - 22 46325 Borken		Tel <b>02861/8009-410</b> Fax <b>02861/8009-174</b>	
				Projektleitung Dipl.-Ing. Johannes Fooke, GF	
				Bearbeiter Dipl.-Betriebswirt Hans Roß, ppa.	
<b>Kooperationspartner</b>		Fachhochschule Gelsenkirchen, Mechatronik Institut Bocholt, FH-Abteilung Bocholt			
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
<p>Gegenstand des Projektes war die Verfahrensentwicklung „Hochgeschwindigkeitsfräsen von großflächig gekrümmten Aluminium-Dünoblechen (Flugzeugaußenhaut) als umweltverträglichere Alternative zum chemischen Abtragen“. Der ursprüngliche Lösungsansatz hierfür war der Einsatz eines Fräsroboters mit „fliegendem“ Gegenhalter, ebenfalls als Roboter ausgebildet, und frei im Raum hängendem Großblech.</p>					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
<p>Die Projektdurchführung erfolgte über die Arbeitsschritte 1. Vertiefende Bauteilanalyse, 2. Versuche mit einem Fräs- und einem zusätzlichen „Gegenhalter“-Roboter, 3. Notwendige Neukonzeption einer geeigneten Frästechnik, 4. Entwicklung des neuen Fräskonzeptes und schließlich 5. Umfangreiche Erprobung mit realen Bauteilen. Im Rahmen der umfangreichen Entwicklungszusammenarbeit des Werkzeugmaschinenbauers Fooke GmbH aus Borken (Fräskonzeptanalyse, Prototypenentwicklung, -bau und -erprobung) mit dem Mechatronik Institut Bocholt an der Fachhochschulabteilung in Bocholt (Finite-Elemente-Methode –FEM- und Mehr-Körper-Simulation –MKS-, Fräsversuchdurchführungen) konnte herausgefunden werden, dass weder mit der Roboterfräs- noch mit der flexiblen Spanntechnik den geforderten hohen Form- und Oberflächengenauigkeiten entsprochen werden kann. Vielmehr, so das erreichte Forschungs- und Entwicklungsergebnis, ist für die hochgenaue Fräsbearbeitung mit aus wirtschaftlichen Gründen notwendiger hoher Zerspanungsleistung sowohl ein formstabiles Maschinengestell als auch eine solche Aufspannung für das mehrere qm umfassende 3 mm dünne Aluminiumblech erforderlich.</p> <p>Trotz der damit verbundenen relativ hohen Investitionsaufwendungen zeigt sich aufgrund der sehr guten Zerspan- und zugleich Qualitätsleistungen ein guter wirtschaftlicher Ansatz für die neu entwickelte High-Speed-Fräsbearbeitung der Flugzeugaußenhaut aus Aluminiumblechen als Alternative zu dem bislang üblichen Ätzverfahren. Dies gerade auch „nachhaltig“ aus Sicht der Reduktion von Umweltbelastungen für die Volkswirtschaft.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190					

**Inhaltsangabe  
über die DBU geförderte Zusammenarbeit  
der Fa. Fooke mit dem MIB**



**Mechatronik Institut Bocholt:**

Maschinenhalle, Mechatronik-Labore, Simulations-Rechner, Büroräume  
[www.mib.fh-gelsenkirchen.de](http://www.mib.fh-gelsenkirchen.de)

	<b>Seite</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>1. Einführung</b>	<b>3</b>
<b>2. Zielsetzung und Umweltrelevanz</b>	
<b>3. Aufgabenstellung</b>	<b>4</b>
<b>4. Darstellung der Arbeitsschritte und –ergebnisse</b>	<b>5</b>
<b>4.1 Bauteilanalyse</b>	<b>5</b>
<b>4.2 Robotereinsatz</b>	<b>10</b>
<b>4.3 Aufbau Fräsmaschine und Vorrichtung</b>	<b>12</b>
<b>4.4 Fräskonzept</b>	<b>15</b>
<b>4.5 Reale Geometrien</b>	<b>19</b>
<b>5. Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>20</b>
<b>6. Bewertung der Ergebnisse</b>	<b>21</b>
<b>7. Verbreitung der Forschungsergebnisse</b>	<b>22</b>
<b>8. Technologie-Fazit</b>	<b>22</b>

**Zusammenfassung:** Gegenstand des Projektes war die Verfahrensentwicklung „Hochgeschwindigkeitsfräsen von großflächig gekrümmten Aluminium-Dünnsblechen (Flugzeugaußenhaut) als umweltverträglichere Alternative zum chemischen Abtragen“. Der ursprüngliche Lösungsansatz hierfür war der Einsatz eines Fräsroboters mit „fliegendem“ Gegenhalter und frei im Raum hängendem Großblech. Über die umfangreiche Entwicklungszusammenarbeit des Werkzeugmaschinenbauers Fooke GmbH aus Borken mit dem Mechatronik Institut Bocholt an der Fachhochschulabteilung in Bocholt konnte herausgefunden werden, dass weder mit der Roboterfräs- noch mit der flexiblen Spanntechnik den geforderten hohen Form- und Oberflächengenauigkeiten entsprochen werden kann. Vielmehr ist für die hochgenaue Fräsbearbeitung mit aus wirtschaftlichen Gründen notwendiger hoher Zerspanungsleistung sowohl ein formstabilen Maschinengestell als auch eine solche Aufspannung für das mehrere qm umfassende 3 mm dünne Aluminiumblech erforderlich. Trotz der damit verbundenen relativ hohen Investitionsaufwendungen zeigt sich aufgrund der möglichen hohen Zerspanleistungen ein guter wirtschaftlicher Ansatz für die Fräsbearbeitung als Alternative zu dem bislang üblichen Ätzverfahren, dies gerade aus Sicht der Reduktion von Umweltbelastungen „nachhaltig“ für die Volkswirtschaft. Die Projektpartner Fooke GmbH aus Borken und FH-Abteilung aus Bocholt führten im Wesentlichen folgende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durch:



#### 1. Vertiefende Bauteilanalyse



#### 2. Fräsen mit zwei Robotern



#### 3. Neukonzeption einer Fräsmaschine



#### 4. Neues Fräskonzept



#### 5. Umfangreiche Erprobung

## 1. Einführung

In der Luftfahrt werden in großen Stückzahlen sphärisch gekrümmte Aluminiumbleche mit 3 mm Wandstärke in einer Vielzahl von Größen- (bis zu 12 m breit und 4 m hoch mit Wölbungen von 1 m bis 4 m) und Formvarianten für die Flugzeugaußenhaut eingesetzt. Dabei ist das Verhältnis zwischen fliegendem Gewicht und umhülltem Transportvolumen eine maßgebende Eigenschaft. Das Gewicht der Flugzeugaußenhautteile ist dabei ein wichtiges Kriterium. Heute werden Rumpfschalenmaterialien wie Aluminium und neuerdings auch CFK eingesetzt. Im Detail ist immer ein optimales Verhältnis zwischen Tragfähigkeit / Belastbarkeit und einzusetzender Masse oder Material zu finden. Verschiedene Konstruktionsprinzipien wie Schalen / Spanten / Stringer kommen hierbei mit den unterschiedlichsten Materialpaarungen zum Einsatz. Die Wirtschaftlichkeit wird aber nicht nur durch das später im Betrieb eingesetzte Konstruktionsprinzip und durch die Materialpaarungen bestimmt, sondern auch schon die im Vorfeld durch dazu erforderlichen Fertigungsprinzipien. Diese entsprechenden Bilanzen werden durch „Materialstrom/Stoffstrom- und Energieeinsatzanalysen“ transparent und führen zu einer umfassenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.

Die ein- und ausgehenden Stoff- und Energieströme beschreiben die Umweltbelastung. In folgenden Prozessschritten fallen Abgase, Wärmestrahlungen, Wasseremissionen und Ablerungsgüter als Umweltbelastungen an:

- Herstellung der Strukturausgangsmaterialien (Gewinnung von Aluminium und deren Weiterverarbeitung zu Rohausgangsstoffen wie Blechen, Blockmaterialien usw.)
- Fertigung der Teile, z.B. Umrissfräsen, chemisches Ätzen und Zusammenführen mit verschiedenen Verbindungstechniken,
- Lackierung.

Bei der Herstellung der Ausgangsstoffe in Block-, Blech- und anderen Formmaterialien gab es in den letzten Jahren wenige Veränderungen. Form- und Toleranz bestimmende Verfahren finden sich hierbei in der Fertigung, in der gleichzeitig ein sehr hoher Material- und Energiestrom zu finden ist. Die Weiterverarbeitung von Aluminiumrumpfschalen ist ein exemplarisches Beispiel. Nach dem Walzen, Form- und Streckziehen weisen die Rumpfschalenhautbleche eine nahezu gleichbleibende Blechdicke auf. Um Gewichtseinsparungen an weniger belasteten Rumpfbereichen zu erzielen, werden große Teilbereiche der vorher konstant dicken Rumpfschalen auf dünnere Restwandstärken in chemisch aufwendigen Abtragsverfahren geätzt. Die größten Neuerungen wurden im Bereich der Fertigungs-, Verbindungs- und Lackiertechnik durchgeführt.

„ Chemisches Abtragen ist das Abtrennen von Stoffteilchen, bei dem sich der Werkstückwerkstoff in einer ausschließlich chemischen Reaktion mit einem Wirkmedium zu einer flüchtigen oder leicht entfernbaren Verbindung umsetzt. Mindestens einer der Wirkpartner ist dabei elektrisch nicht leitend.“ (Definition aus Quelle : Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Prof. Dr.-Ing. E. Uhlmann, TU – Berlin). Der Werkstoff setzt sich unter direkter Reaktion mit einem Wirkmedium in eine Verbindung um, die leicht entfernbar ist (flüssige Reaktionslösung).

Dabei taucht man die Aluminium – Rumpfelemente in Natriumoxid – Bädern, in dem nichtabgedeckte Bereiche in einer bestimmten vorgegebenen Zeit durch chemische Ätzung erodiert werden. Nichtabzutragende Bereiche, wie Stege und Flächen, werden mit Kaschierfolien überzogen. Vor der Maskierung / Kaschierung wird das Aluminiumblech mit einem Lösungsmittel (Perchlorethylen) gereinigt. Während des ´Badens´ löst sich das abgetragene Material als  $\text{NaAlO}_2$  in der Reaktionslösung auf und lagert sich als Schlamm im Bad ab. Der Prozess des chemischen Ätzens wird mehrmals nacheinander durchgeführt, wobei nach jedem Eintauchen das Blech in einem Spülvorgang mit Wasser abgewaschen wird. Während des Abtragens auch elektrochemischer Wege treten keine Prozesskräfte auf.

Dieser Abtragprozess ist sehr zeit- sowie energieintensiv und auch hinsichtlich der resultierenden Abfallstoffe sehr belastend für die Umwelt:

- Es entstehen bei Airbus ca. 16.000 Tonnen Abfallstoffe, wie Industrieschlämme, CO<sub>2</sub> – und H<sub>2</sub> – Emissionen, und es werden
- 225.000 m<sup>3</sup> Spülwasser benötigt.
- Der erhöhte Energieverbrauch in Form von hochwertigem Strom liegt bei ca. 60%

Lässt sich das chemische Abtragsverfahren nun durch eine mechanische Bearbeitung substituieren, so geht man von einer

- Senkung der Fertigungszykluszeit um 50%,
- Reduktion der Fertigungskosten pro Werkstück um 20% und eine
- Minderung der Herstellkosten von 50% aus. (Quelle: Airbus.)

Die Substitution des chemischen Abtrags durch das mechanische Fräsen stellt im Ergebnis eine erhebliche Verringerung der Umweltbelastung dar.

## **2. Zielsetzung**

Im Rahmen des Entwicklungsprozesses soll eine Verfahrenstechnik für die hochgenaue Bearbeitung von dünnen im Raum gekrümmten Aluminium-Großblechen erarbeitet werden, die im Flugzeugbau für die Außenhaut eingesetzt werden. Grundsätzlich soll ein umweltorientierter Prozess in Verbindung mit einer deutlich höheren Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Im Mittelpunkt steht die Entwicklung einer neuen Frästechnik für die schnelle und zugleich hochgenaue Trocken- und Minimalmengen-Schmierbearbeitung von gekrümmten Aluminium-Großblechen mit dem Ziel der Substitution galvanischer Abtragsverfahren.

Folgende qualitative Anforderungen werden an das Bauteil gestellt (Ausgang 3 mm Wandstärke):

### Flächenfräsen

- Restwandstärken : -0,1 mm / +0,2mm
- Positioniergenauigkeit von Fräsflächen : ± 0,2 mm
- Oberflächenrauheit R<sub>a</sub> : 3,2 µm
- Stufenversatz in der Fräsebene : ± 0,025 mm

### Umrissfräsen und Bohren

- Konturabweichung : ± 0,2 mm
- Positionsabweichung : ± 0,2 mm

## **3. Aufgabenstellung**

Zur mechanischen Endbearbeitung zylindrischer und sphärisch geformter Bleche muss hierzu eine 5-Achsen HSC-Bearbeitung mit Spannsystem zum Einsatz kommen. Das gezielte Einbringen von Erleichterungsfeldern und Funktionsflächen sowie das anschließende Fräsen von Konturen und das Einbringen von Bohrungen stellt in das gekrümmte große Ausgangsblech dabei die Kernaufgabe dar. Die Fräsbearbeitung muss aufgrund der sphärisch geformten Bauteile mit einer 5-Achskinematik, drei translatorische Hauptachsen (X, Y, Z) und zwei rotatorische Achsen für die Werkzeugorientierung (z.B. A- und C-Achsen) durchgeführt werden. Für die Werkstückaufnahme muss ein flexibles Spannsystem verwendet werden. Durch geeignete Maßnahmen an das Spannsystem und die Werkzeugmaschine mit Steuerung ist zu gewährleisten, dass die geforderten Toleranzen der Großbleche bezüglich Restwandstär-

ke, Position der Taschen, Oberflächenrauheit und weitere Qualitätsmerkmale eingehalten werden. Das Einlegen, Handling und Abrüsten der Werkstücke erfolgt manuell.

Die Aufgabenstellung lässt sich in folgende zwei Teilbereiche untergliedern:

1. Entwicklung eines für die hohen Ansprüche geeigneten Fräsprozesses (neue Spann-technik, Einsatz von verschiedenen Fräswerkzeugen und Werkzeugführungssystemen. Hierbei ist besonders die Wechselwirkung zwischen Werkzeug und Werkstück zu beachten.
2. Einhaltung der Toleranzen, Genauigkeiten und Oberflächenruhmigkeiten durch Maschinen-, Steuerungs-, Schnittstellen- und ggf. Sensorkomponenten

## 4. Darstellung der Arbeitsschritte und Ergebnisse

### 4.1 Bauteilanalyse

Die Bauteiluntersuchung kann als Grundlage für die weiteren Analysen zur Einhaltung der Genauigkeiten betrachtet werden. Erschwerend für die Entwicklung eines geeigneten Fertigungs-Fräsprozesses ist, dass die Bauteile der theoretischen CAD – Kontur nicht entsprechen. Hierzu müssen die aus dem CAD generierten NC – Programme auf die reale Bauteilgeometrie transformiert werden.

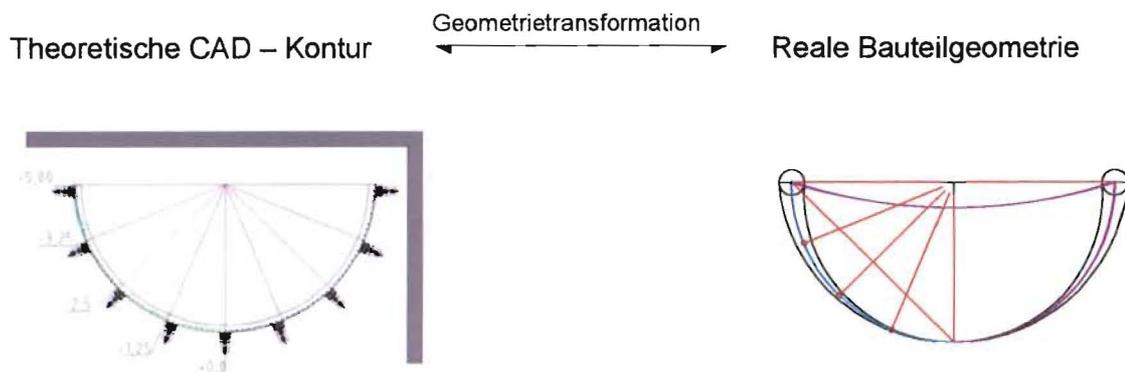


Bild : Spring in , spring out Effekte Welligkeiten und weitere Abwicklungsabweichungen.

Die Abfolge für die Geometrietransformation ist wie folgt:

- Bauteil wird in ein flexibles Vorrichtungssystem möglichst spannungsfrei bzw. im möglichst nicht eingezwungenen verspannten Zustand eingelegt (Kraftsensorik verbunden mit Vakuumüberwachung für die Bauteilkontaktüberwachung),
- die Vakuum – Bauteilkontaktpunkte sind genau bekannt, da die verstellbaren Aktuatoren auf Position gesteuert / kalibriert zum MKS verfahrbar sind,
- die Bauteiloberfläche wird mittels Werkzeugmaschine und Messtaster vermessen,
- die theoretische CAD-Geometrie in Form der NC-Programme wird durch Transformationsvorschriften auf die reale Werkstückabwicklung mit einem sogenannte 'best fit'-Verfahren übertragen.

Darüber hinaus ist eine Geometrieuntersuchung bezogen auf die Geometrieverhältnisse der Werkstückrumpfschalen – Fräsdurchmesser Maße vorzunehmen.

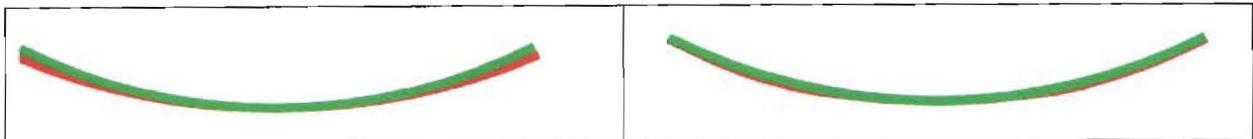
### Einflussgrößen auf die Blechgeometrie



Abweichungen in der Blechdicke.



Abw. vom CAD-Stand durch Spring-In-Effekte



Abw. vom CAD-Stand  
durch Spring-Out-Effekte

Überlagerte Abweichungen vom CAD-Stand  
durch Spring-Out-Effekte

#### Auswirkungen von Spring-In-Effekten am Beispiel von Bohrungsgeometrien

Das Bauteil steht mit einem Geometriefehler zu weit nach innen (Annahme ca. 2,5 mm) wie in der Abbildung unten dargestellt. Bei der Bearbeitung wird die Bohrung nach theoretischer Zeichnungsposition gebohrt. Wenn das Blech bei der Weiterverarbeitung und Montage in Solllage gedrückt wird, verschiebt sich die Bohrung um ca. 0,8 mm (Annahme ca. 2,5 mm) nach innen. Dieser Fehler tritt auch bei der Taschen- und Umrissbearbeitung auf. Die Restwandstärke wird von der schwankenden Blechdicke und von den Geometriefehlern Spring-In Spring-Out beeinflusst.



Bild: Die grüne Fläche zeigt die theoretische Lage des Bauteils mit einer Bohrung im Schnitt im Außenbereich. Die rote Fläche zeigt die reale Lage des Bauteils mit einem Geometriefehler von 2,5 mm. Durch den Geometriefehler ergibt sich ein Bohrungsversatz von 0,8 mm.

#### Kompensationen der Abweichungen

Das Bauteil wird in einem Raster von ca. 200 mm vermessen. Hierbei wird die Innenposition (Abstandssensor) und Blechstärke (Ultraschall) an jeder Rasterposition vermessen. Das genaue Rastermass ergibt sich aus der Geometriequalität des Bleches. Mit diesen Werten wird das NC-Programm korrigiert. Weiterhin werden zu der Position der Werkzeugspitze zwei Positionen für 2 Messachsen errechnet und im NC-Programm zum jeweiligen NC-Satz hinzugefügt.



Bild: Mögliches Referenzraster am Bauteil zur Minderung der Geometriefehler

Für einen Fräsversuch wird im Werk Fooke in Borken eine Spannvorrichtung modifiziert. Die Spannvorrichtung wurde steuerungstechnisch mit zusätzlichen Funktionen erweitert, um nicht nur eigensteife Kohlefaser-Bauteile aufnehmen zu können, sondern auch dünnwandige relativ instabile Aluminiumbleche zu spannen. Weiterhin wurde ein Faro-Messarm eingesetzt um die Sensor-Erfassung im Prozess offline nachzubilden.

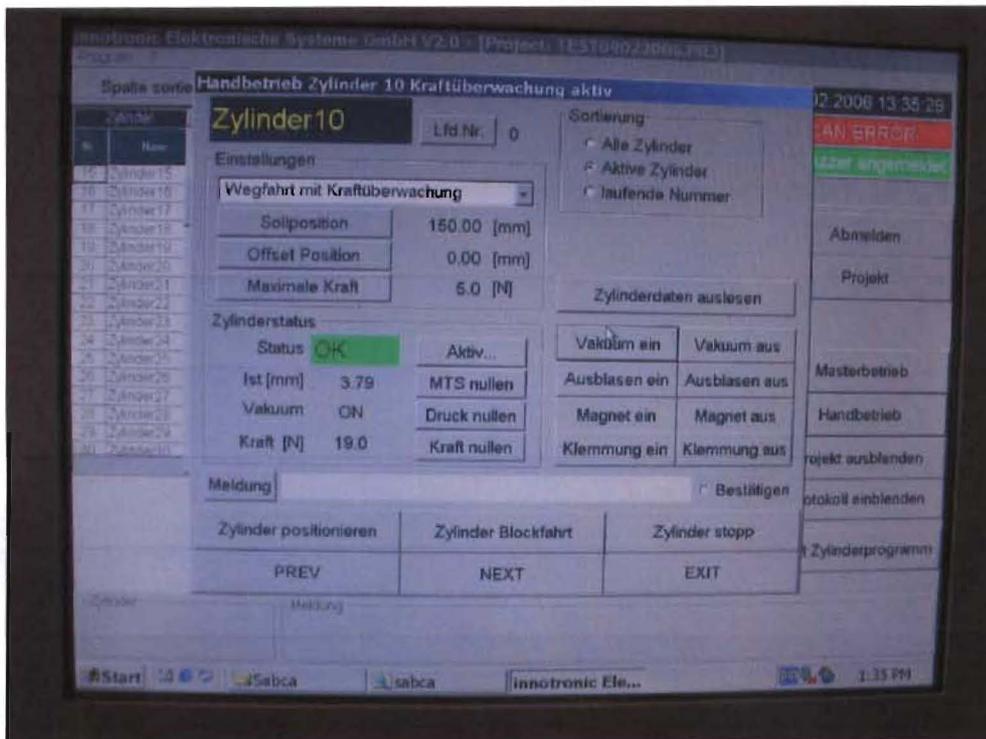


Versuchsanordnung Endura900 + modifizierte Spannvorrichtung A400 M Landeklappen

Zunächst wurde das Blech auf den Spannaktuatoren aufgenommen. Hierzu wurde jeder Aktuator mit einer mindest Kontaktkraft von 5 Newton an das Bauteil gefahren.



Durch eine Kontaktkraftüberwachung in der Vorrichtung kann das Blech mit seinen Geometriefehlern spannungsarm fixiert werden

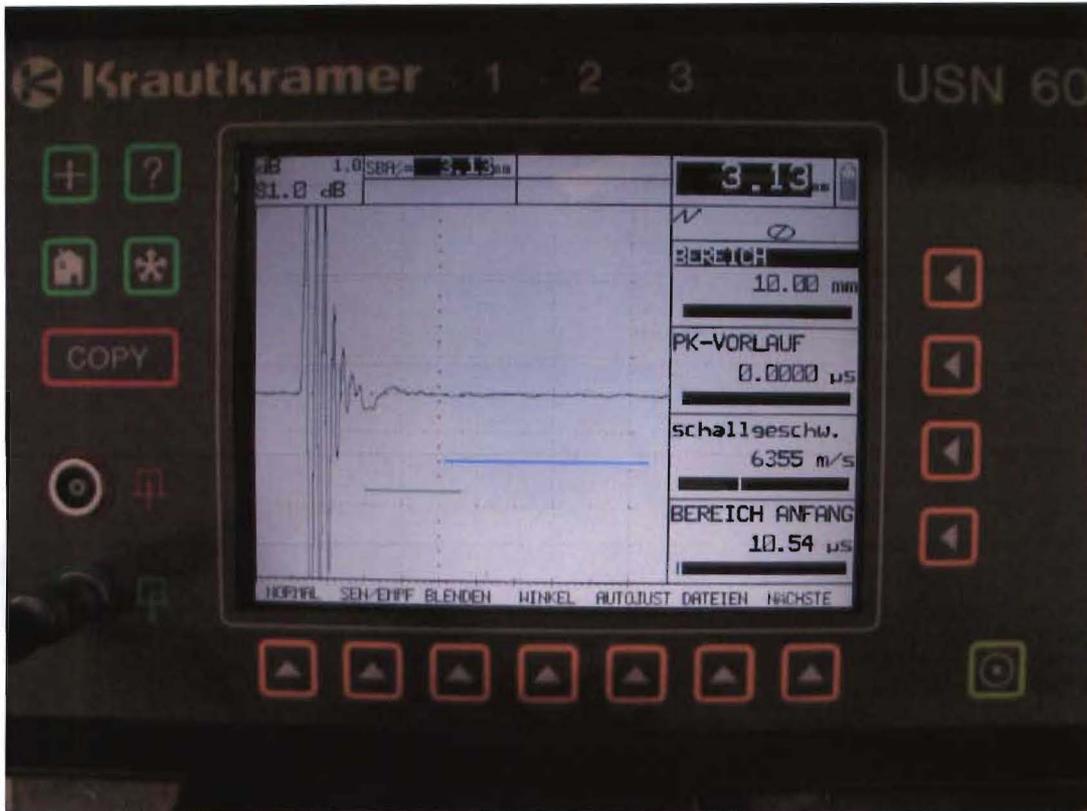


Zustandsanzeige von Aktuator Nr 10

Nach der Positionierung und Spannung des Versuchsbleches wurde die Blechdicke punktuell in einer Rasterauflösung von 50 mm mit einem Ultraschallmessgerät vermessen



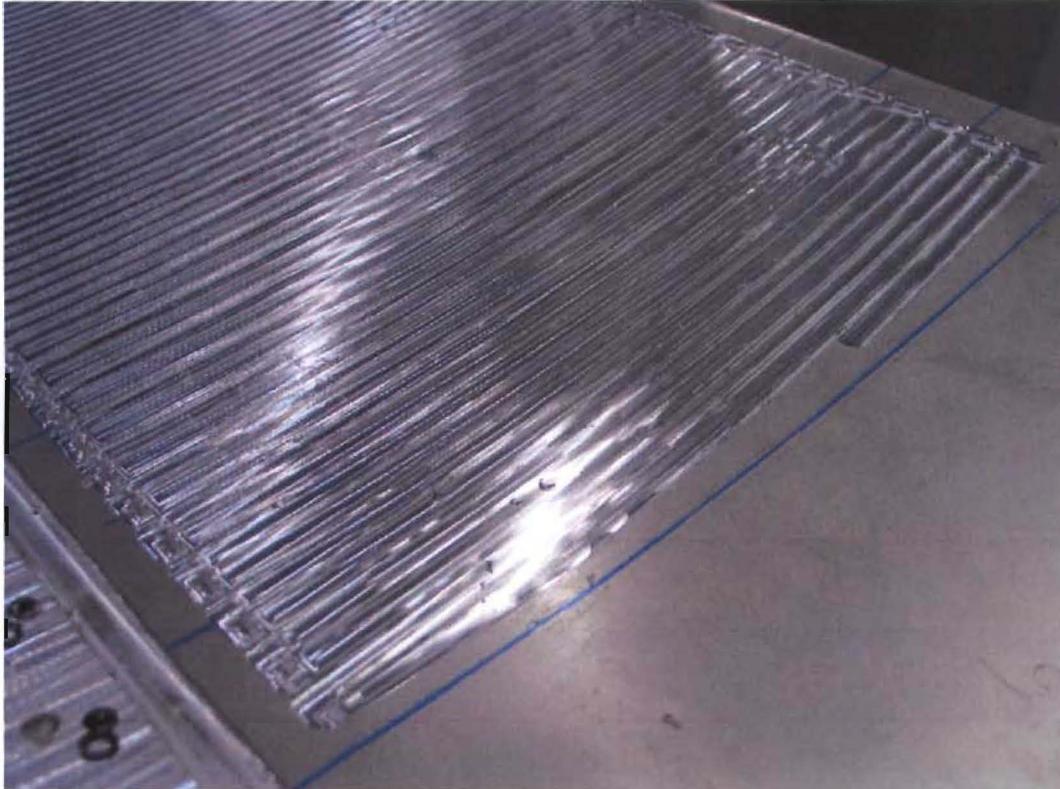
Mit dem Ultraschallmessgerät wird die Blechdicke mit folgenden Parametern vermessen



Vermessung der realen Blechgeometrie mit Hilfe eines Faro-Messarms. Bei dieser Vermessung werden Linienzüge auch wiederum in einem Raster von 50 mm aufgenommen.



Aus der ermittelten Blechdicke, der theoretischen und der realen Blechinnenfläche wurde ein NC - Programm erzeugt. Mit diesem NC-Programm wurde dann das vermessene Blech gefräst. Nach der Bearbeitung des Bleches wurden die gefrästen Spuren mit Ultraschall die Restwandstärke gemessen. Dabei wurde festgestellt, dass die Toleranzen um ca.  $\pm 0.1$  mm überschritten wurden. Im Kontaktbereich der Aktuatoren konnten die Toleranzen eingehalten werden.



#### 4.2. Einsatz von zwei Robotern für das Fräsen

Das ursprüngliche Anlagenkonzept bestand aus zwei Maschinen mit jeweils einem schweren Ständer, von denen der eine die Frässpindel führt und der andere den Gegenhalter trägt. Zwischen diesen beiden Maschinen sollte das Aluminiumblech in einem Rahmen senkrecht eingespannt werden. Frässpindel und Gegenblech sollen nun äquidistant über das Werkstück bzw. Alublech geführt werden: die Spindel fräst, der Halter stützt, direkt gegenüber der Frässtelle, quasi als flexible Vorrichtung. Dieses erste Anlagenkonzept schied schon in der Vorphase wegen des damit verbundenen Investitionsaufwandes aus.

Als ein kostengünstiges Anlagenkonzept boten sich fünfsachsige Industrieroboter an, die auf zwei linearen Verfahreinheiten einander gegenüber stehen. Eine solche Konfiguration war im Mechatronik Institut Bocholt (MIB) der FH Gelsenkirchen bereits vorhanden, allerdings mit älteren und recht kleinen Industrierobotern. Für erste Grundlagenversuche reichte diese Produktionsanlage aber aus.



Bild: Prototypenanlage mit zwei Robotern zum Fräsen

Für einen solchen Einsatz musste jedoch ein Rahmen konstruiert und installiert werden, auf dem ein 1qm großes Aluminiumblech an vier Auflagepunkten senkrecht aufgespannt werden konnte. Der eine Roboter wurde mit einer Halterung mit einer einfachen Frässpindel ausgerüstet, der andere Roboter mit einer Kugelkalotte als einfachen Gegenhalter.



Bild: Fräsversuche mit dem Roboter an der FH in Bocholt

Darüber hinaus sind die Bewegungen der beiden Roboter synchronisiert worden, indem ihre Steuerungen über einen Leitreechner verbunden wurden. Ein spezielles neu aufgestelltes Softwareprogramm im Leitreechner führte die Synchronisation der relativ alten Robotersteuerungen durch. Mit dieser Einrichtung wurden verschiedene Fräsversuche an dem senkrecht aufgespannten 1 qm großen Alublech unternommen.

Es ließen sich zwar kleine Taschen in das Blech fräsen, die Genauigkeiten lagen aber deutlich über 2/10 mm, die Oberfläche war sehr rau und die Seitenkanten waren ausgefranst. Als Fräs geschwindigkeit ließen sich nur max. 1 m/min. umsetzen, mehr Fräsleistung war mit der Spindel nicht zu erreichen. Eine Ursache lag in der kleinen Leistung der Spindel und dem

Spiel in den Gelenken der beiden Roboter, aber wesentlich auch in der Nachgiebigkeit der Roboterstruktur.

Die eigenen Testerfahrten wurden durch das PTW der TH Darmstadt bestätigt: Die Darmstädter befassen sich in einem Forschungsprojekt mit dem Einsatz von mehrachsigen Knickarmrobotern für das Fräsen von metallischen Werkstoffen.



Bild: Roboter PTW, TH Darmstadt



Bild: KUKA IR 30 High Accuracy

Die Erkenntnisse der Wissenschaftler vom PTW sind, dass die Genauigkeit und Steifigkeit von Robotern verbessert werden kann, einerseits durch den Einsatz von spielarmen Getrieben, andererseits durch Positionieralgorithmen in der Steuerung. Eine weitere Steigerung der Genauigkeit besser als 0,5 mm und der Steifigkeit von Robotern höher als 5 N/μm am TCP ist aber strukturell nicht möglich. Besonders wegen der kleinen Nachgiebigkeiten – so die wissenschaftlichen Erkenntnisse – lässt sich die Genauigkeit und Oberflächengüte unter den beim Fräsen auftretenden Kräften nicht weiter verbessern.

In einem weiteren Gespräch mit der Firma KUKA wurde zwar bestätigt, dass diese Firma spezielle Roboter mit erhöhter Bahngenauigkeit (IR 30) anbietet – auch für den Einsatz beim Fräsen. Letztlich reicht die Steifigkeit auch dieser Roboter nicht aus, um metallische Werkstoffe mit ausreichenden Geschwindigkeiten und einer hohen Oberflächengüte reproduzierbar zu fräsen. Daher ist das Konzept mit zwei Robotern zum Fräsen von Blechen aus Aluminium mit der geforderten Genauigkeit und Oberflächengüte sowie Reproduzierbarkeit definitiv nicht geeignet!

### 4.3. Aufbau von Fräsmaschine und Vorrichtung

Ein neues alternatives Anlagenkonzept wurde nun von der Firma Fooke mit dem Mechatronik Institut Bocholt entwickelt und getestet, dies auf der Grundlage der Standardmaschine der Firma FOKE (ENDURA 900 LINEAR). Diese Fräsmaschine zeichnet sich als Portalmaschine durch eine hohe Struktursteifigkeit aus; Neu implementierte Linearmotoren ermöglichen zudem bei der Fräsmaschine eine besonders hohe Vorschubdynamik. Ein Prototyp dieser Maschine steht im Mechatronik Institut Bocholt in Bocholt; er konnte für dieses Projekt direkt eingesetzt werden, der Arbeitsraum der Maschine beträgt 2 x 2 x 1 m:



Bild: Portalfräsmaschine ENDURA 900 LINEAR im MIB der FH in Bocholt

1 x 2 m große Aluminiumbleche wurden unter der Fräsmaschine waagrecht auf einer Rahmenkonstruktion gespannt. Unter dem Aluminiumblech, auf dem Maschinentisch, befindet sich eine dreiachsige Verfahrereinheit (auch in Portalbauweise), die den Gegenhalter dreiachsrig führt (als Stift oder Kugel). Diese dreiachsige Unterkonstruktion musste eigens für dieses Projekt konstruiert und installiert werden:

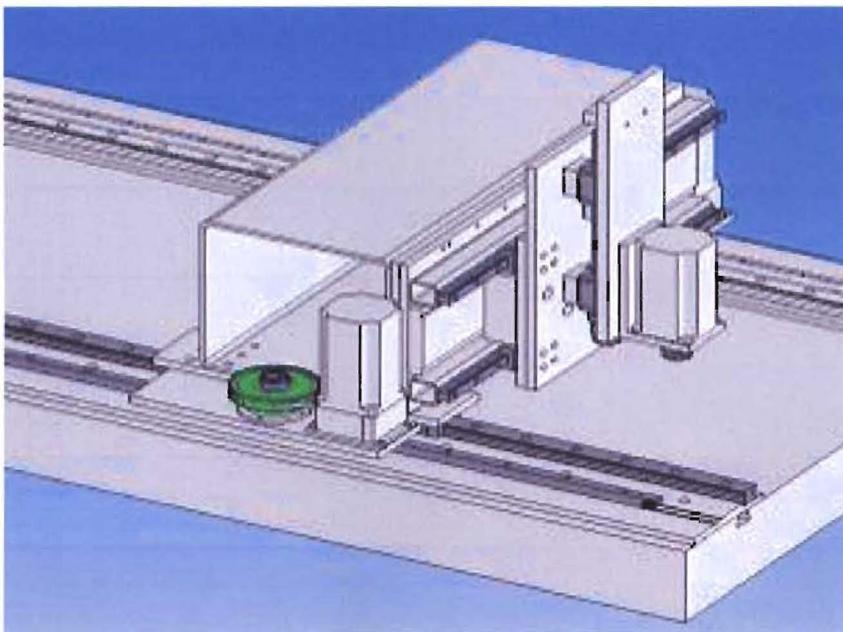


Bild: Konstruktion einer flexiblen dreiachsigen Unterstützung

Zu diesem Zweck wurden vier Vorschubachsen umgebaut und eingesetzt, die im MIB bereits vorhanden waren, allerdings in anderen Versuchseinrichtungen. Eine bereits vorhandene CNC-Steuerung wurde an diese Verfahrereinheit angeschlossen; sie musste über eine Kommunikations-Schnittstelle mit der CNC-Steuerung der Fräsmaschine verbunden werden; so wurde eine Synchronisation der beiden Einrichtungen während der Fräsversuche ermöglicht. Ferner erhielten beide Steuerungen jeweils eine Schnittstelle für eine Sensorführung. Trotz der vielen bereits intern verfügbaren Elemente war ein hoher Arbeitsaufwand nötig, um diese flexible dreiachsige Vorrichtung zu konstruieren, aufzubauen und in die Fräsmaschine

des Institutes so zu integrieren (Bild 08). Der personelle Aufwand betrug 6 Mannmonate, der sachliche Aufwand etwa 8.000 EUR.



Bild: Dreiachsige Unterkonstruktion mit CNC-Steuerung (rechts)

Mit dieser fünfachsiges Fräsmaschine und flexiblen dreiachsigen Vorrichtung wurden daraufhin verschiedene Fräsversuche an ganz geraden und schwach gekrümmten Aluminiumblechen durchgeführt.



Bild: Fräsversuche



Bild: Fräsprobe

Es wurden kleinere und größere Taschen mit unterschiedlichen Tiefen gefräst, dies mit verschiedenen Fräs Werkzeugen und Gegenhaltern. Die einzelnen Ergebnisse sind in folgenden Bildern näher dargestellt.

#### 4.4. Fräskonzept, Fräskräfte sowie Fräszeiten

##### Fräsen von Dünoblech: A: Längsbahn:

##### Vorraussetzung:

Ein 3 mm Aluminiumblech 2000x1000 ist an den vier Ecken verschraubt und wird Bahnsynchron unter dem Fräsermittelpunkt durch eine gehärtete Stahlkugel unterstützt. Es werden rechteckige Taschen mit einer Kantenlänge  $Y=100\text{mm}$ ,  $X = 25\text{ mm}$  durch Abzeilen gefräst. Dabei wird läuft der Bahnvorschub entlang der Y Achse, der Zeilenvorschub entlang der X Achse.

##### Fräsdaten:

VHM Kugelfräser  $d= 12\text{mm}$   $z= 2$ , Drehzahl  $S = 10000\text{ min}^{-1}$ , Vorschub  $f = 6000\text{ mm/min}$   
Schnitttiefe  $a_p=0,9\text{ mm}$ , Zeilenvorschub  $a_e= 0,25\text{ mm}$ , Rauheitsmessungen:

##### Ergebnisse:

Zur Bestimmung der Oberflächenrauheiten wurden Rauheitsmessungen vorgenommen. Da sich die Oberflächen in X und Y Richtung bedingt durch die Fräsrichtung unterschiedlich verhalten, wurden hierzu für jede Achsrichtung separate Messungen vorgenommen. Von jeder Messung wurde ein Messschrieb angefertigt. Die Vorgabe war eine Rauheit von  $3,2\mu\text{m}$ .

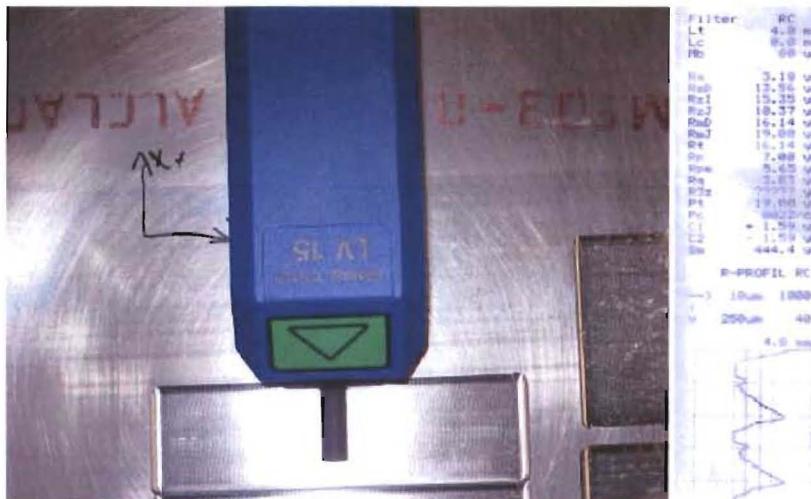


Bild: Rauheit entlang X-Achse (Zeilensprung 0,25 mm) ermittelter Ra Wert =  $3,18\ \mu\text{m}$

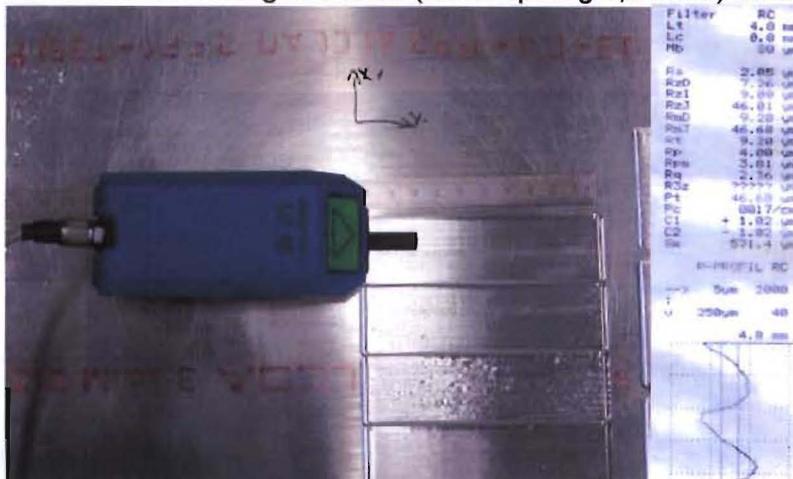


Bild: Rauheit entlang Y-Achse (Vorschub 6000 mm/min) ermittelter Ra Wert =  $2,05\ \mu\text{m}$   
Dickemessung mittels Ultraschall:

An der Fräsbahn wurden, an den im Bild eingezeichneten Punkten, die verbleibende Blechdicke mittels Ultraschall gemessen. Vorgegebene Toleranz in der Abweichung der Blechdicke  $\pm 0,1\text{mm}$



X / Y [mm]		95		50		5
5	7)	2,16	4)	2,12	1)	2,07
12,5	8)	2,16	5)	2,12	2)	2,07
20	9)	2,15	6)	2,11	3)	2,07

Bild: Dickenmessung

#### Parallelitätsfehler Fräskopf:

Da die Abweichungen in der Blechdicke sich im Grenzbereich der Toleranzzone befinden und auch eine gewisse Stetigkeit aufweisen, wurde eine Messung der Parallelität im Bereich der gefrästen Fläche von X und Y Achse zwischen Stützaufbau und Fräskopf vorgenommen. Dabei wurde ein Parallelitätsfehler von  $-0,08\text{mm} / 100\text{mm}$  (gemessen  $-0,15\text{mm} / 200\text{mm}$ ) in Richtung positiver Y-Achse und  $+0,02\text{mm} / 100\text{mm}$  in Richtung positiver X-Achse festgestellt. Rechnet man diesen Fehler in die gemessene Blechdicke mit ein, kommt man auf eine Dickenabweichung von  $0,01 - 0,02\text{mm}$  in der gemessenen Tasche.

#### Kraftmessung:

Zur Messung der Kräfte wurde unter der Stahlkugel ein Kraftmessring angebracht. Mit ihm konnten die Abstützkräfte des Bleches auf die Stahlkugel gemessen werden.

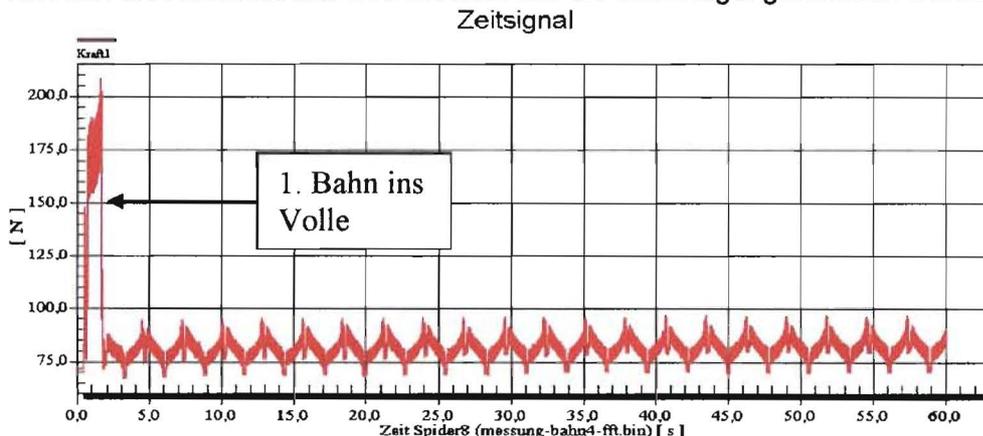


Bild: Messwerte Abstützkraft

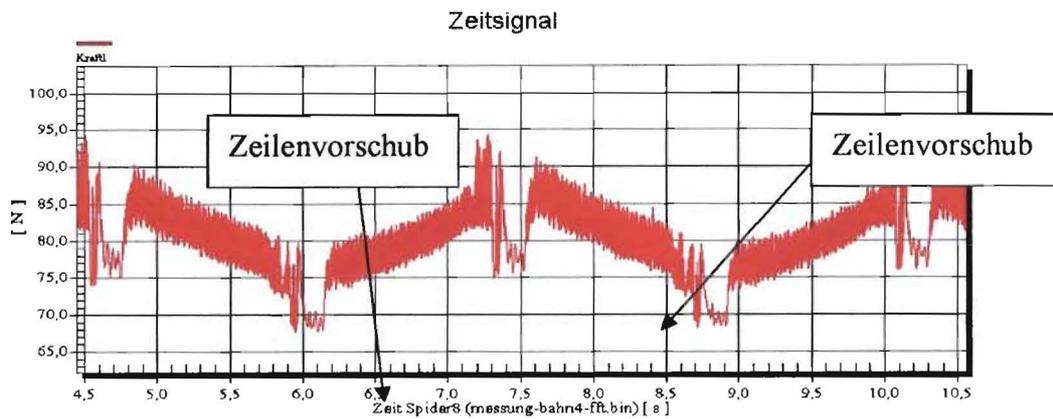


Bild: Ausschnitt Kraftmessung

Die Abstützkräfte beim regulären Fräsen liegen im Bereich von 70-100 N und beim 1. Schnitt ins Volle im Bereich von 150-175 N.

Allerdings bildete sich bei nicht ausreichender Schmierung an der Kontaktfläche der Kugel mit dem Blech eine Aufbauschicht, die die Blechunterseite (Bild li) zerkratzt und durch Schwingungen zu einer „Orangenhaut“ ähnlichen Oberfläche führt Bild re)

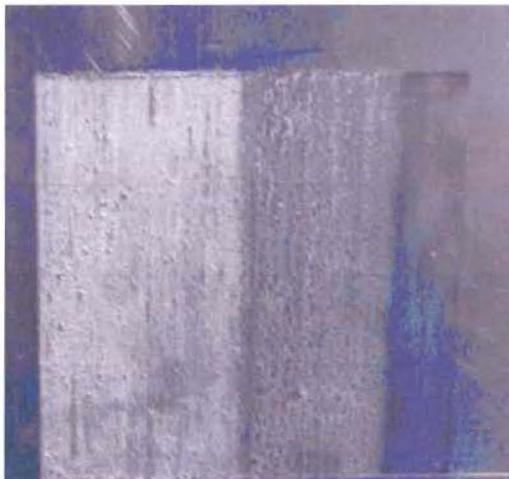


Bild: Zerkratzte Blechunterseite



Bild: Oberfläche nach Aufbauschicht

Die Entwicklung der Aufbauschicht lässt sich auch im Kraftsignal durch leichtes Ansteigen der absoluten Kraft bzw. durch ein Vergrößern der Amplitude erkennen.

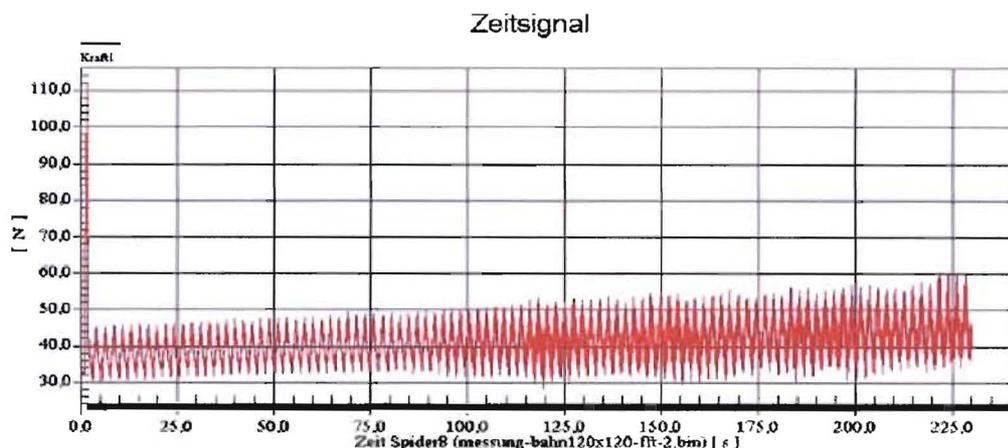


Bild: Kraftdiagramm bei der Aufbauschichtbildung

Abhilfe kann hier ein stetig ausreichender Schmierfilm zwischen Blech und Stahlkugel, eine rollender Gegenhalter, bzw. eine Verringerung der Flächenpressung durch Vergrößern der Kontaktfläche (Geometrieänderung des Gegenhalters) schaffen.

Als Problematisch erweist sich die Synchronisation der beiden Steuerungen nur durch die digitalen Ein und Ausgänge, vor allem bei:

- Verhalten bei Programmstart / Abbruch der Gegenhalter läuft weiter und das Fräsmodul läuft verzögert zum Haltemodul
- Synchronisation der Fräsprogramme bei Parameteranpassung (Vorschub, Geometrie etc)
- Vorschubpotentiometer zum Beispiel beim Anfahren ( nur an einigen kritischen Stellen)
- nur einfache Programme einsetzbar (über Schleifen)

#### Fräsen von Dünoblechen B: Viereck 200x 300 mm:

##### Vorraussetzung:

Ein 3 mm Aluminiumblech 2000x1000 ist an den vier Ecken verschraubt und wird Bahnsynchron unter dem Fräsermittelpunkt durch eine gehärtete Stahlkugel unterstützt. Es wurde eine rechteckige Tasche mit einer Kantenlänge  $Y=300\text{mm}$ ,  $X = 200\text{ mm}$  durch Abzeilen gefräst. Dabei wird läuft der Bahnvorschub entlang der Y Achse, der Zeilenvorschub entlang der X Achse.

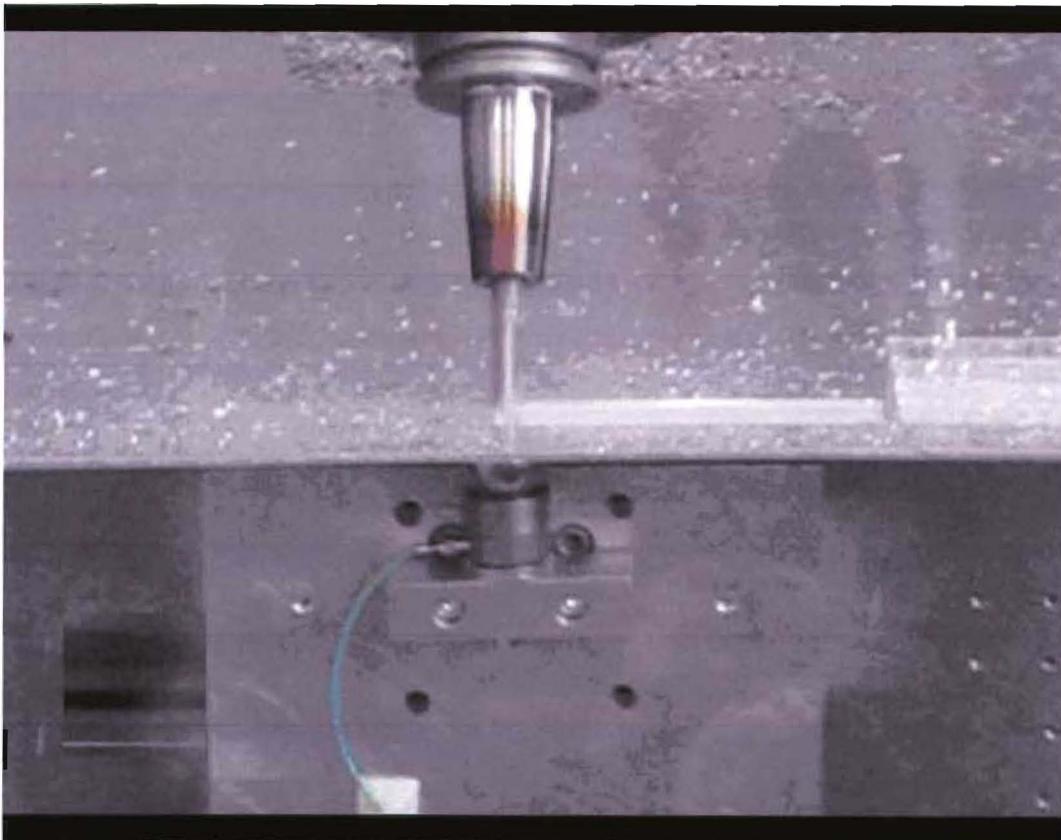


Bild: Fräser mit Unterstützung

Fräsdaten:

VHM Kugelfräser  $d = 12\text{mm}$   $z = 2$ , Drehzahl  $S = 15000\text{ min}^{-1}$ , Vorschub  $f = 7500\text{ mm/min}$ , Schnitttiefe  $a_p = 1\text{ mm}$ , Zeilenvorschub  $a_e = 0,25\text{ mm}$

Rauhigkeitsmessungen:

Zur Bestimmung der Oberflächenrauheiten wurden Rauhigkeitsmessungen vorgenommen. Da sich die Oberflächen in X und Y Richtung bedingt durch die Fräsrichtung unterschiedlich verhalten, wurden hierzu für jede Achsrichtung separate Messungen vorgenommen. Von jeder Messung wurde ein Mess-Schrieb angefertigt (Vorgabe Rauheit von  $3,2\mu\text{m}$ ).

ermittelter Ra Wert =  $2,66\ \mu\text{m}$  entlang X Achse (Zeilensprung  $0,25\text{ mm}$ )  
ermittelter Ra Wert =  $1,43\ \mu\text{m}$  entlang Y Achse (Vorschub  $7500\text{ mm/min}$ )

Dickenmessung mittels Ultraschall:

An der fertigen Fräsbahn wurde im Raster von  $25\text{ mm}$ , die verbleibende Blechdicke mittels Ultraschall gemessen. Vorgegebene Toleranz in der Abweichung der Blechdicke:  $\pm 0,1\text{ mm}$   
Die zugehörigen Daten sind in der anhängenden Tabelle aufgeführt und grafisch dargestellt.

Weitere Beobachtungen:

Aufbauen von Abrieb auf der Kugel wie im Versuch Bahn4.

Durch gute Schmierung (Bettbahnöl) lassen sich die im ersten Versuch beobachteten Abrieb (Fress-) Erscheinungen auf der Rückseite des Bleches vermeiden, bzw. soweit verringern, dass sie über die gefräste Strecke nicht stärker werden.

#### 4.5. Einbindung realer Geometriedaten

Die Einbindung der realen Geometriedaten in den Bearbeitungsprozess gewinnt in Zukunft an großer Bedeutung, da hierdurch die Prozesssicherheit und Prozesskosten wesentlich beeinflusst werden können. Bei komplexen Großbauteilen wie Flugzeughautfeldern ist es sinnvoll, die Bauteilform und die Bauteildicke über eine integrierte Messfunktionalität in der Fräsmaschine zu erfassen. Durch eine entsprechende Erfassung können dann die Bauteilfehler während der Bearbeitung über Transformationen und Werkzeuglängenänderung im Fräsprozess berücksichtigt werden. Die messtechnische Erfassung kann in die Bereiche Blechdicke und Blechform aufgeteilt werden. Die Blechstärke kann vorteilhaft mit einer Ultraschalldickenmessung erfasst werden. Das Ultraschallmessverfahren wird bereits in eigenständigen Prüfanlagen zu Dicken- und Gefügemessungen seit längerer Zeit eingesetzt.

Neu ist der Ansatz, die Ultraschallmessung in die Fräsmaschine zu integrieren. Hierzu wurde an der Endura Fräsmaschine in der Fachhochschule Bocholt eine Sensor-Anbindung eingerichtet und das Regelverhalten im Fräsprozess untersucht. Hierzu wurde weiterhin eine Ultraschallmessanlage von Krautkrämer angeschlossen und die Signalverarbeitung getestet. Dieses Sensor-Signal wurde dann in eine 5-Achs- Werkzeuglängenkorrektur umgerechnet und mit entsprechenden Dämpfungsfiltren ausgefahren. Das Regelverhalten der Achsen wurde positiv getestet.

Der Krautkrämer-Sensor wurde auch am Aluminium-Blech getestet und dafür der Sensor in einen vorhandenen Aktuator mittig integriert. Um den Sensor wurde ein Wasserkreislauf als Koppelmittel für die Ultraschallmessung angebracht. Diese Versuche konnten wegen Undichtigkeiten zwischen Wasserkreislauf und Vakuumbereich nicht positiv abgeschlossen werden. Durch Modifikation der Dichtung konnten Verbesserungen erzielt werden. Die Schnittstelle zwischen Sensor und Blech über einen mitgeführten Aktuator (in Verbindung mit einer Stützfunktion für das Blech) beeinflusst ganz wesentlich die Prozesssicherheit. Durch konstruktive Maßnahmen im Bereich Abdichtung und weitere Trennung zwischen Vakuum und Koppelmittel konnte die Prozesssicherheit zwar erhöht werden. Dennoch bleibt dieser Bereich für die Prozesssicherheit kritisch.

Der zweite Bereich, die Herstellung der Blech-Geometrieform, kann grundsätzlich durch konventionelle Messverfahren wie taktiles Vermessen mit einem Renishaw-Taster realisiert werden. Der Einfluss der realen Geometrieform auf die Toleranzen musste allerdings zunächst nur theoretisch untersucht, weil Bauteile und Spannvorrichtungen in realer Größe nicht verfügbar waren. Die gemessenen Abweichungen an kleinen realen Bauteilen wurden auf die großen Bauteile hoch projiziert. Für das Messen können auch weitere Verfahren eingesetzt werden: Laser-Scannung, Streifen-Projektion, Photogrammetrie. Ein bedeutender Optimierungsansatz bei der Vermessung der Bauteile besteht darin, möglichst wenige Messpunkte aufzunehmen und diese Messpunkte mit vereinfachten Geometrieformen zu verknüpfen. Damit können diese Messpunkte in einem automatisierten Ablauf in der CNC Steuerung einer Fräsmaschine direkt verarbeitet werden.

Bei einer Toleranzvorgabe von 0.2 mm für die Randbereiche und Taschenränder darf allerdings die reale Geometrie zu der theoretischen in der Fläche maximal + - 0.6 mm abweichen. Durch Versuche ist im Bereich der Kontaktzone zwischen Stützaktuator und dünnwandigem Blech ist eine Toleranz von ca. +- 0.1 mm erreicht worden: der direkte Kontaktbereich des Aktuators ist damit unkritisch.

Außerhalb des direkten Aktuatorbereiches allerdings wächst die Formabweichung auf teilweise größer + - 0.6 mm an. Um diese Abweichungen optimal zu berücksichtigen, müsste ein NC-Programm für die Abwicklung des Bleches erzeugt werden. Wenn das relativ instabile Blech mit Bezug auf die Abwicklung bearbeitet werden könnte, wäre es möglich, dieses Blech bei der Montage der Rumpfsegmente auf die Stützrippen in eine theoretische Zwangslage zu fixieren und das Bohrbild sowie Taschenränder und Kanten genau zu montieren. Nach dem derzeitigen Stand der Technik aber kann eine CNC-Steuerung nicht in direktem Bezug zu einer abgewickelten Fläche fräsen. Von daher ist versucht worden, die Bauteilfläche in einzelne vereinfachte Regelgeometrien aufzuteilen, diese dann zu verknüpfen und über die reduzierten Messpunkte in der CNC-Steuerung neu auszurichten:

Dieses Verfahren wurde von Fooke mit zwei Geometrieelementen in Form von Dreiecken erfolgreich realisiert. Für die Blechbearbeitung von Hautfeldern muss die Anzahl der Geometrieelemente auf 200 bis 400 Elemente erhöht werden. Die Gesamttoleranz-Abweichung ergibt sich aus der Summe der Einzeltoleranzen pro vereinfachtes Geometrieelement. Dieses Verfahren wurde für eine Blechhalbschale mit einem Radius von 2000 mm und einer Länge von 4000 mm untersucht.

## **5. Diskussion der Ergebnisse hinsichtlich der ursprünglichen Zielsetzung**

Die erforderlichen Fräsgenauigkeiten und -oberflächengüten wurden nur bei kleinen Ausschnitten mit kleinen Schaftfräsern und geringen Leistungen erreicht. Bei höheren Leistungen (durch größere Vorschubgeschwindigkeiten oder größere Fräserdurchmesser) konnten die geforderten Toleranzen nicht eingehalten werden.

Die wesentliche Ursache lag in der weichen Auflage, die der punktförmige Gegenhalter unterhalb des Aluminiumbleches bildet, die zu einem wellenförmigen Beulen des Bleches geführt hat. Darüber hinaus trat ein leichtes Abheben des Bleches und weiteren Beulen des Bleches auf, insbesondere bei großen Geschwindigkeiten und Leistungen. Eine relativ großflächige Auflage des Bleches ist daher notwendig, die zudem das Blech festhält bzw. ein Abheben verhindert. Erst unter dieser Voraussetzung einer großflächigen sicheren Einspannung des dünnwandigen großen Aluminiumbleches ist ein gutes Fräsergebnis mit ausreichend hoher Genauigkeit, Geschwindigkeit und Oberflächengüte möglich.

## 6. Technische, ökologische und ökonomische Bewertung der Ergebnisse

An der Thematik „Fräsbearbeitung räumlich gekrümmte Aluminiumhautfelder“ wird bei Fooke mit ersten Konzepten bereits seit Ende 2002 gearbeitet. Für die Konzeptentwicklung wurden erste Fräsversuche in provisorischen Vorrichtungen durchgeführt. Diese Konzepte waren die Grundlage für den Einstieg in erste Gespräche im Frühjahr 2003 mit Airbus Frankreich in Saint-Nazaire. Erörtert wurde ein Projekt für die gemeinsame Entwicklung einer komplexen Fräsmaschine. Die Werksleitung von Saint-Nazaire Airbus France hat sich allerdings im Sommer 2003 für den französischen Entwicklungspartner Dufieux - Industrie entschieden.

Bei Airbus – Frankreich sind bei der Anwendung allerdings erhebliche Probleme mit der Prozessstabilität aufgetreten, die für uns aus der eigenen Projektarbeit gut nachvollziehbar sind: Die Hauptschwierigkeiten liegen in der Überwachung und Online-Korrektur der Blech-Restwandstärke und in der Geometrieabweichung der Blechform. Weitere Probleme zeigen sich in der Interaktion zwischen Fräser und Blech

Bedauerlicherweise hat Airbus France mit Dufieux die Lösungsansätze der Firma Fooke ca. ein Jahr später zum Patent angemeldet! In der Anmeldung wird der technische Projektleiter Jean-Christophe Hamman, der die technischen Gespräche bei Fooke geführt hat, als Erfinder genannt. Eine Patentklage ist wegen der Gefahr, dadurch einen potentiellen Großkunden verlieren zu können und auch wegen des unabsehbaren für einen mittelständischen Betrieb kaum zu tragenden Kostenrisikos nicht opportun.

Weiterhin ist bemerkenswert, dass seit 2005 das Projekt Airbus France - Dufieux – Industrie von der Europäischen Gemeinschaft aus „Life“ unterstützt wird. Dieser detaillierte Sachverhalt ist uns erst seit Anfang 2006 bekannt.

Zusammengenommen ist eine direkte wirtschaftliche Umsetzung unserer Arbeitsergebnisse bei Airbus in Frankreich nur noch schwer möglich. Allerdings ist nicht ausgeschlossen, dass das „französische“ Projekt aus (den auch oben beschriebenen) technischen Unzulänglichkeiten nicht realisiert werden kann. Dann würde u. U. Airbus Frankreich wieder auf Fooke zukommen.

Ein weiterer interessanter Auftraggeber ist das Airbus-Werk Nordenham. Mit den Projektverantwortlichen aus Nordenham wurden schon im Frühjahr 2004 Gespräche über eine gemeinsame Entwicklung geführt. Die dargelegte Fooke-Fräskonzeption wurde von Airbus-Nordenham zunächst als innovativ und zielführend bewertet.

Der Entwicklungsauftrag wurde aber Ende 2004 an das spanische Unternehmen M -Torres vergeben. Bekannt ist, dass bei dem Fertigungsanlauf erhebliche Probleme mit der Prozesssicherheit aufgetreten sind. Die Fertigung kann nur mit einem erheblichen Ausschussanteil durchgeführt werden. Nach Angaben von Airbus Nordenham musste sich M – Torres aus dem gemeinsamen Projekt zurückziehen.

Trotz der momentan ungünstigen Aussichten Airbus Nordenham oder Airbus Frankreich als Projektpartner zu gewinnen, ist die Projektdurchführung für das Unternehmen Fooke von großen Vorteilen verbunden: Die Fooke - Endura Fräsmaschinen wurden über die von der DBU-geförderte Maßnahme intensiv auch mit der Linear-Motor-Technik weiterentwickelt. Dies hat zu einem sehr guten Preis-Leistungs-Verhältnis bei den Fooke-Portalfräsmaschinen und damit zu einer exponierten Marktposition geführt. Für die neue ENDURA®-Technik konnten „Großkunden“ wie BMW und Daimler Chrysler ebenso wie mehrere mittelständische insbesondere Kunststoff verarbeitende Betriebe neu gewonnen werden.

Um sich auf Dauer für die Luftfahrtindustrie als interessanter Portalfräsen-Lieferant platzieren zu können, bedarf es neben der Kompetenz im Bereich der Hochleistungsfrästechnik auch vertiefende Kenntnisse im Bereich der Vorrichtungen und Werkzeuge. Für die optimale

Fertigung von komplexen Großbauteilen rückt das vertiefende Wissen über die Prozessabläufe und respektive über die Prozesssicherheit immer mehr in den Vordergrund. Airbus hat sich mit dem Programm „Power 8“ das Ziel gesteckt, erhebliche Kosten einzusparen und damit auch zukünftig die Bauteilfertigung nach Unterlieferanten zu verlagern. Über das „DBU-Projekt“ hat Fooke zusammen mit der kooperierenden Fachhochschulabteilung in Bocholt diese Kompetenz deutlich weiter ausgebaut.

Weiterhin ist zu sehen, dass bei den Unterlieferanten von Airbus die Technik und gerade auch die Kosten ohne „politische Sachzwänge“ objektiver bewertet werden. Somit besteht auch hier ein interessanter Ansatz, die erzielten Projektergebnisse in nachfolgende Projekte einfließen lassen zu können. Kurz- und mittelfristig kann also mit entsprechenden Anfragen von Airbus Unterlieferanten gerechnet werden.

Bei neuen Flugzeugmodellen wird zukünftig die Aluminium-Außenhaut vermehrt durch Kohlefaserbauteile abgelöst. Bei der Bearbeitung von Kohlefaserbauteilen treten ähnliche Fertigungsprobleme auf, wie sie in unserem Projekt untersucht und bearbeitet wurden. So weisen diese Kohlefaserbauteile auch Geometrieformabweichungen auf, die voraussichtlich mit den gefundenen Lösungsansätzen überwunden werden können. Auch müssen die Kohlefaserbauteile im Umriss und bereichsweise in der Fläche bearbeitet und dabei ähnliche Toleranzen in der Restwandstärke wie beim AL-Werkstoff berücksichtigt werden. Die in den Kohlefaserbauteilen vorhandenen Faserstrukturen dürfen im Fräsprozess nicht beeinträchtigt werden. Hier zeichnen sich schon aus der Projektarbeit zwischen der Firma Fooke, dem Messtechnikhersteller Krautkrämer und der FH-Abteilung Bocholt neue Entwicklungsprojekte für die Luftfahrtindustrie ab.

## **7. Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Forschungsergebnisse**

Es ist vorgesehen, die grundsätzlich erreichten Forschungsergebnisse auf der Messe Emo in Hannover interessierten Kunden zu präsentieren. Auch sollen die Ergebnisse in die Projektverhandlungen mit möglichen Entwicklungspartnern (zumeist kleine Mess- und Steuerungstechnik-Unternehmen) und Kunden (auch aus dem Bereich Schienenfahrzeugbau, weil dort auch komplexe Großbauteile gefertigt werden).

Die Forschungsergebnisse fließen weiter auch die die FH-Lehre ein.

## **8. Technologie-Fazit**

Diese Projektergebnisse zeigen, dass für die erforderlichen hohen Oberflächen- und Formgenauigkeiten beim Hochgeschwindigkeitsfräsen von dünnwandigen Aluminiumblechen eine großflächige und steife Aufspannung erforderlich ist. Ein ursprünglich angestrebter sensorgeführter flexibler Gegenhalter führt zu keinem ausreichenden Fräsergebnis. Auch die hierzu vorgesehene direkte Messung der Wandstärke im Prozess über Sensoren ist nur als Zusatzfunktion für eine auf jeden Fall zu wählende steife Werkstückauflage praktikabel. Eine stabile Maschinenkonstruktion und ebenso Werkstückaufspannung führt zwangsläufig zu einer aufwändigen Anlagenkonzeption. Diese ist aber unumgänglich, wie dies auch durch Untersuchungen und Versuche anderer Entwicklungseinrichtungen bestätigt wird. Insofern kann man das Fräsen dünner Bleche aus Aluminium mit einer einfachen Blechaufspannung und einer flexiblen Haltevorrichtung nicht realisieren; dabei hilft auch eine Sensorführung für die Wanddickenmessung nicht weiter.