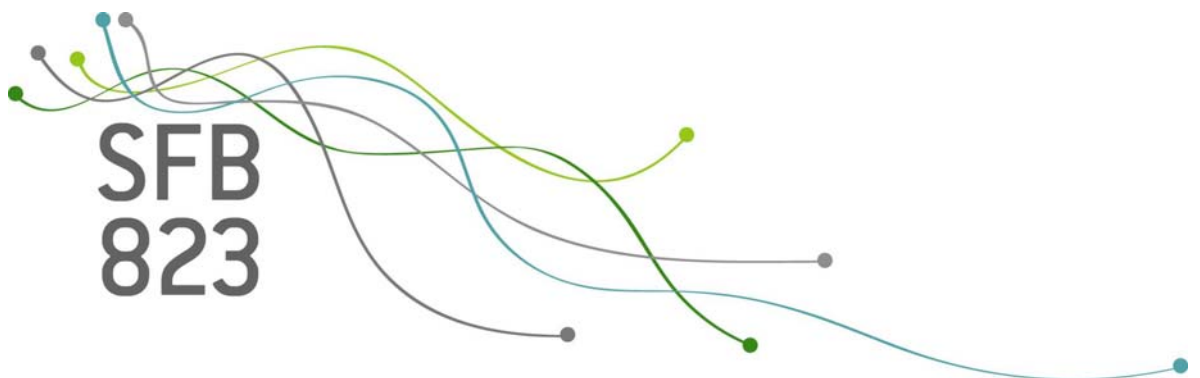


SFB
823

Aufbereitung von optischen Messdaten zur Analyse der asymmetrischen inkrementellen Blechumformung (AIBU)

Oliver Melsheimer, Gerd Sebastiani,
Simone Wenzel, A. Erman Tekkaya,
Joachim Kunert

Nr. 51/2011



Discussion Paper

**Aufbereitung von optischen Messdaten zur
Analyse der asymmetrischen inkrementellen
Blechumformung (AIBU)**

Oliver Melsheimer
Gerd Sebastiani
Simone Wenzel
A. Erman Tekkaya
Joachim Kunert

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Prozesstechnische Grundlagen der asymmetrischen inkrementellen Blechumformung	1
1.1.1	Prozessparameter und Einflussgrößen	2
1.2	Ziele der optischen Vermessung	3
2	Referenzexperiment und Messmethodik	4
2.1	Beschreibung der Referenzgeometrie	4
2.2	Messverfahren	4
2.3	Das STL-Format der Messdaten	5
3	Aufbereitung der optischen Daten	6
3.1	Elimination von Artefakten	7
3.2	Anpassen der Daten an die Sollgeometrie	8
3.3	Auffinden der Walzrichtungsmarkierung	10
3.4	Berechnung der Wandstärken	12
4	Diskussion	13
	Literatur	15

1 Einleitung

Ziel unseres Projektes ist die statistische Analyse der bisher wenig erforschten asymmetrischen inkrementellen Blechumformung (AIBU). Ein elementares Problem hierbei ist die Quantifizierung der Qualität eines gefertigten Bauteils. Da der AIBU-Prozess ein inkrementeller Prozess ist, spielt die Qualität der gesamten dreidimensionalen Geometrie des Fertigteils eine Rolle. Nur wenn sie gänzlich quantifiziert werden kann, ist eine Untersuchung der Prozessdynamik möglich. Die dreidimensionale Vermessung des Fertigteils ist jedoch mit den herkömmlichen (taktile) Messmethoden nur schwer möglich, daher stellen wir in diesem Diskussionspapier ein Verfahren zur Aufbereitung von optischen Messdaten vor, welches eine solche Analyse ermöglicht. Hierbei wird die Geometrie der Bauteile zunächst optisch komplett vermessen. Aufbauend auf diesen Messungen werden in einem mehrstufigen Ansatz die Messdaten mittels statistischer Methoden aufbereitet, um Artefakte heraus zu filtern, Ober- und Unterseiten zu trennen und schließlich auch die Wandstärken zu bestimmen. Kennt man die exakte Geometrie des Fertigteils und dessen Wandstärke über die gesamte Oberfläche, können hieraus leicht Qualitätskennzahlen errechnet werden.

In Kapitel 2 werden zunächst die prozesstechnischen Grundlagen der AIBU und deren Prozessparameter und Einflussfaktoren eingeführt. In Kapitel 3 wird das in diesem Papier verwendete Experiment und die Messmethodik erklärt. Das Kapitel 4 befasst sich dann detailliert mit den einzelnen Schritten der Messdatenaufbereitung. Das letzte Kapitel diskutiert die Reproduzierbarkeit und Verlässlichkeit der vorgestellten Methode.

1.1 Prozesstechnische Grundlagen der asymmetrischen inkrementellen Blechumformung

Die asymmetrische inkrementelle Blechumformung (AIBU) bezeichnet die schrittweise Umformung von Blechbauteilen durch eine lokal begrenzte plastische Deformation [JMH⁺05]. Während die manuelle, hämmernde Bearbeitung von Blechen bereits seit der Bronzezeit (bspw. [BB08]) und das Drücken rotationssymmetrischer Teile seit dem 10. Jahrhundert bekannt sind [WDL03], wurden mechanisierte Verfahren erst 1967 von Leszak [Les64] und automatisierte Verfahren für die asymmetrische IBU von Doege 1993 [Doe93] patentiert. Die gegenwärtigen Prozessvarianten zur IBU werden von Schäfer [Sch07] hinsichtlich der physikalischen Wirkprinzipien und weiterhin nach der Funktionsweise des Werkzeuges klassifiziert.

Die im folgenden betrachteten Verfahren befassen sich ausschließlich mit der CNC-gesteuerten, asymmetrischen IBU mit kontinuierlich drückenden Werkzeugen, deren Prozessvarianten in Abbildung 1 dargestellt sind. Die Umformung erfolgt durch einen Drückstichel, der einer gewissen Bahnstrategie (bestehend aus Werkzeugpfad und Zustellung) folgend auf das eingespannte Werkstück drückt, um es so inkrementell in eine gewünschte Zielgeometrie umzuformen. Die Prozessvarianten unterscheiden sich durch die Wahl des Gegenwerkzeugs. Es kann gänzlich ohne oder mit einem massiven, partiellen oder kinematischen Gegenwerkzeug gearbeitet werden.

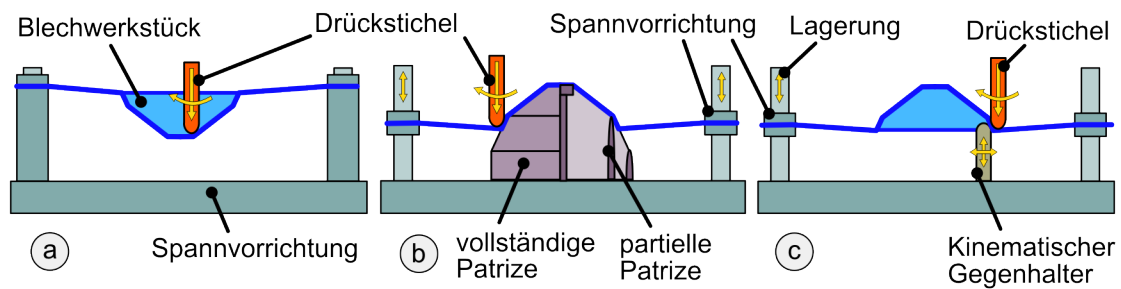


Abb. 1: Prozessvarianten in der IBU: a) ohne Gegenwerkzeug (SPIF), b) massives und partielles Gegenwerkzeug (TPIF), c) kinematisches Gegenwerkzeug.

1.1.1 Prozessparameter und Einflussgrößen

Die primären Merkmale eines mit der AIBU gefertigten Bauteils definiert Junk [Jun03] anhand Zargenwinkel, Radienart und Radiengröße. In der Praxis liegen übliche Zargenwinkel zwischen 60° und 70° für die meisten Aluminiumlegierungen, HSS und Kupfer [JMH⁺05]. Ähnliche Zusammenhänge zeigen sich auch bei TRIP [MSNM05] und Titan [HG06]. Jeswiet et al. betrachten weiterhin die Kraft am Werkzeug [JMH⁺05].

Abbildung 2 zeigt einige für die AIBU typische Fertigteile.

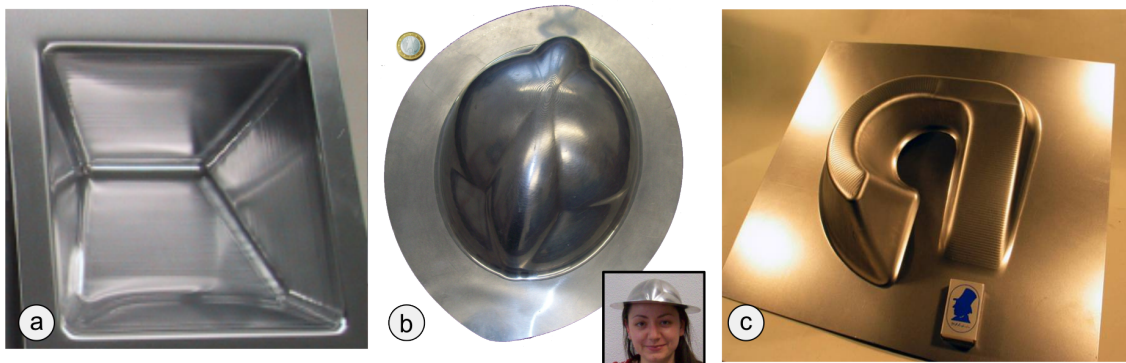


Abb. 2: Typische Fertigteile des AIBU Prozesses: a) Solarkochkiste [JDA05], b) Helmgeometrie [Jad05], c) Auspuff [Skj07].

Wesentlicher Einflussparameter der Werkzeuge ist der Durchmesser des Drückstichels. Hierbei stellt der kleinste konkave Radius am Werkstück die obere Schranke für den Drückstichelradius dar.

Bei der Wahl der Bahnstrategie stehen sich die Anforderungen nach Formgenauigkeit und Oberflächenqualität gegenüber. Jeder sprunghafte Wechsel der Bewegungsrichtung führt zu sichtbaren Marken auf der Werkstückoberfläche. Kann man diese Wechsel nicht an existierenden Kanten im Werkstück durchführen, so bleibt als Option ein kontinuierlicher, spiralförmiger Werkzeugpfad, wie er in Abbildung 3b dargestellt ist. Dieser, von Filice et al. beschriebene [FFM02] und von Skjødt et al. umgesetzte [Skj07], Werkzeugpfad führt jedoch zu einer Verwindung des Bauteils in Richtung des Werkzeugpfades und damit zu einer geringeren Bauteilgenauigkeit [Jad05]. Um diese Verwindungen auszugleichen verwendet Junk einen Pfadrichtungswechsel nach jeder Zustel-

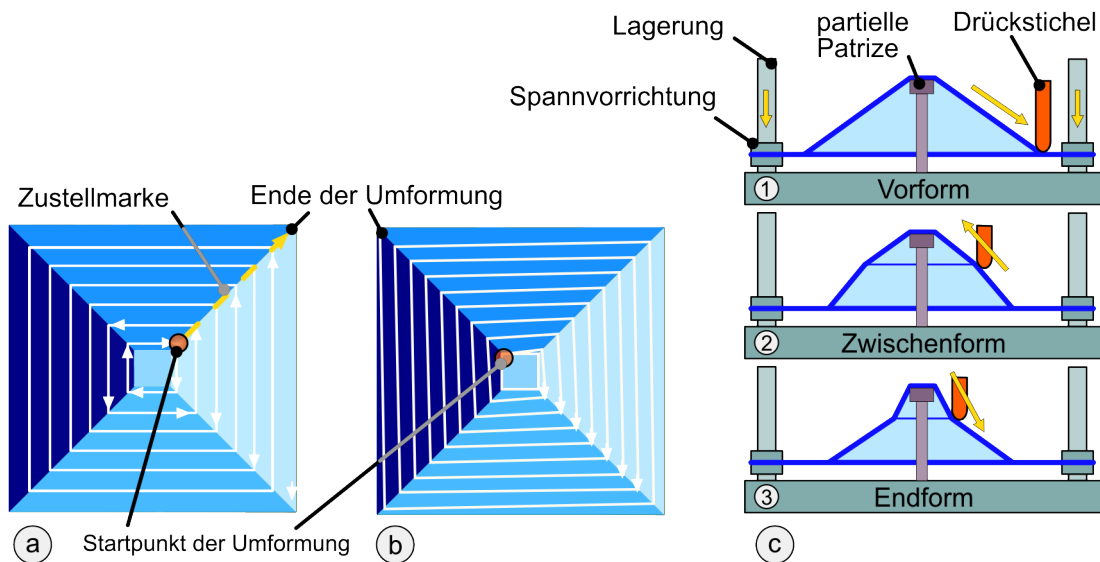


Abb. 3: Bahnstrategien in der IBU: a) Spiralbahn, b) bidirektionale Bahn, c) mehrstufige Bahn für steile Zargen.

lung (bidirektionale Bahn) sowie eine massive Patrize. Durch diese, in Abbildung 3a dargestellte, Strategie wird eine höhere Maßhaltigkeit auf Kosten einer Zustellmarke auf der Oberfläche erreicht [Jun03]. Für die Fertigung steiler Zargenwinkel sollte nach Junk eine spezielle mehrstufige Bahnstrategie wie in Abbildung 3c verwendet werden. Durch die Verwendung eines kinematischen Gegenwerkzeugs lässt sich das Verfahren weiter flexibilisieren [MZB⁺07, Zha08]. Erwähnt sei noch die unidirektionale Bahn mit diskreter Zustellung nach jedem Umlauf. Diese Bahn bringt jedoch keine weiteren Vorteile sondern vereint die Nachteile der im Vorfeld diskutierten Strategien [Jad05].

1.2 Ziele der optischen Vermessung

Im vorherigen Abschnitt wurden die Einflussgrößen und Prozessparameter kurz skizziert. Da das AIBU Verfahren noch recht jung ist, ist es wünschenswert die Verfahrensgrenzen der asymmetrischen inkrementellen Blechumformung durch eine dynamisch angepasste Prozessführung zu erweitern. Hierbei ist es wichtig, das Bauteilversagen aufgrund von Blechausdünnung, durch dynamische Optimierung, zu minimieren. Ein wichtiges Hilfsmittel um grundlegende Kenntnisse über die Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mit der AIBU gefertigten Bauteile zu untersuchen ist statistische Versuchsplanung. Der Fokus der Untersuchungen sollte hierbei auf der Analyse der folgenden Merkmale liegen:

1. Der Verlauf der Blechdickenabnahme über die Zarge.
2. Die Abweichung der Bauteile von der Sollgeometrie.
3. Der erreichte maximale Zargenwinkel bzw. die erreichte Bauteiltiefe bis zum Riss.

In der Praxis stellt sich die Analyse dieser Merkmale speziell bei der AIBU als komplexes Problem heraus. Die Quantifizierung der ersten beiden Merkmale für die gesamte dreidimensionale Ober-

fläche erfordert eine spezielle Messmethodik und Aufbereitung der Daten. Ziel dieser Arbeit ist es, beispielhaft an einem einfachen Bauteil zu zeigen, wie solch eine Quantifizierung schnell und einfach durchgeführt werden kann.

2 Referenzexperiment und Messmethodik

2.1 Beschreibung der Referenzgeometrie

Um grundlegende Kenntnisse über die Zusammenhänge der Einflussgrößen und Bauteilmerkmale zu erhalten, wird üblicherweise zunächst eine einfach zu fertigende und analytisch beschreibbare Geometrie verwendet, wie sie in Abbildung 4 dargestellt ist. Daher haben wir unser Verfahren zur Aufbereitung der Messdaten zunächst für solch ein einfaches Bauteil entwickelt.

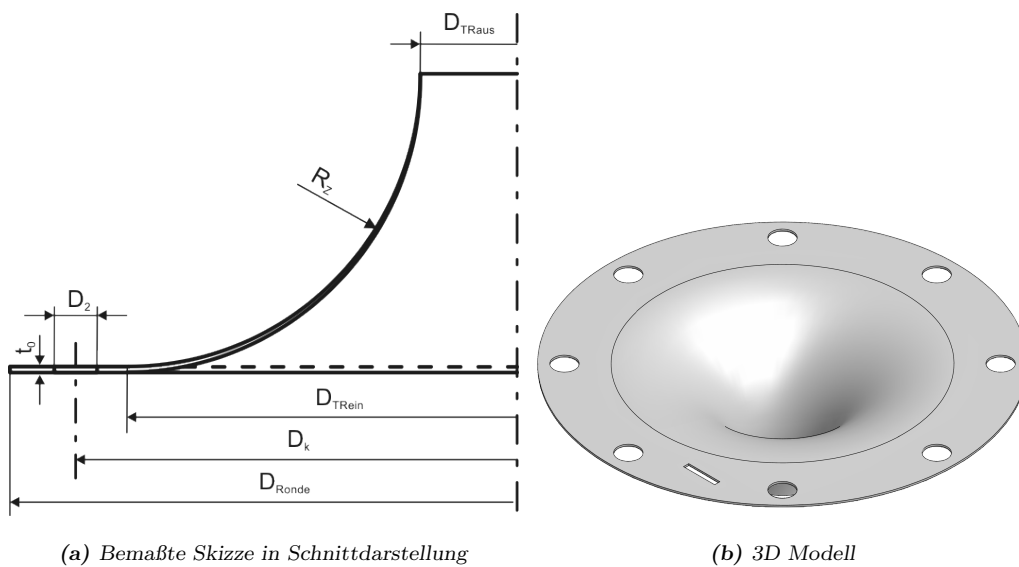


Abb. 4: Trichterförmige Demonstratorgeometrie

Der hier gezeigte Trichter wird aus einem runden Blechzuschnitt mit 200mm Durchmesser – nachfolgend als *Ronde* bezeichnet – gefertigt. Eine Trichterform mit fixem Radius der Seitenwand (*Zarge*) hat den Vorteil einer vollständigen analytischen Beschreibung. Durch die Rotationssymmetrie ist es möglich das Bauteil die Einflussgrößen auf einen zweidimensionalen Schnitt der Bauteilwand zu reduzieren.

Die Wahl der geometrischen Parameter wird hierbei durch die verfügbaren Werkzeuge bestimmt. Die sich daraus für das Experiment ergebenden Größen sind in Tabelle 1 dargestellt.

2.2 Messverfahren

Um den Messaufwand gering zu halten ist es erstrebenswert, sowohl die Form als auch die Blechdicke durch eine Messung bestimmen zu können. Dazu ist eine genaue und robuste Erfassung beider Oberflächen erforderlich, aufgrund dessen die resultierende Blechdicke als Distanz zwischen diesen

Tab. 1: Dimensionen des Trichter-Demonstrators

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert in mm
Rondendurchmesser	D_{Ronde}	200
Eingangsdurchmesser	$D_{Tr\ddot{e}in}$	140
Ausgangsdurchmesser	$D_{Tr\ddot{a}us}$	35
Zargenradius	$R_Z = \frac{R_{Tr\ddot{e}in} - D_{Tr\ddot{a}us}}{2}$	52,5
Ausgangsblechstärke	t_0	1,0
Bohrungsdurchmesser	D_2	12
Lochkreisdurchmesser	D_k	180

beiden Flächen bestimmt werden kann. Zur Digitalisierung stehen am Institut für Umformtechnik und Leichtbau sowohl taktile als auch optische Verfahren zur Verfügung.

Sind nur einzelne Punkte oder Linien zu erfassen wird im industriellen Umfeld häufig ein Koordinatenmessgerät eingesetzt. Erwartet man Abweichungen in Bezug auf die Rotationssymmetrie, ist anstelle einer Messung der Querschnittsgeometrie (siehe Abbildung 4a) eine vollständige Digitalisierung des Bauteils erforderlich. Da die taktile Form der Messung allerdings nur entlang von vorbestimmten Pfaden möglich ist, wäre eine taktile Vermessung der kompletten 3D-Kontur zu zeitaufwändig. Die taktile Messung ist in unserem Fall zudem nicht brauchbar, da das Bauteil an allen Bereichen für den Tastkopf zugänglich sein muss, was bei der Trichterform nicht unbedingt gegeben ist. Außerdem würde eine durch die Berührung des Tastkopfes hervorgerufene Reaktion des Bauteils die ermittelte Blechdicke unbrauchbar machen.

Wir haben daher ein Verfahren entwickelt, mit dem Geometrietreue und Wandstärkenverteilung des gesamten Bauteils auf einfache, aber verlässliche Art und Weise untersucht werden können. Die Grundlage dieses Verfahrens stellen dabei optische Messgeräte dar. Zur optischen Vermessung der Bauteile wird eine Kombination verschiedener Messverfahren eingesetzt. Für die Lokalisation der Bauteile im Raum wird zunächst das Kameratool 'Tritop' benutzt, für die anschließende Erfassung der Geometrie dann das Verfahren 'ATOS', das mittels Streifenprojektion die Digitalisierung vornimmt (vgl. Abbildung 5). Um diese Verfahren anwenden zu können, müssen die gefertigten Bauteile zunächst von spiegelnden Oberflächen befreit und mit Referenzpunkten versehen werden. Sowohl der Farbauftrag als auch die aufgeklebten Referenzpunkte lassen sich nach der Vermessung wieder rückstandslos entfernen. ATOS liefert triangulierte Oberflächendaten, die im STL-Format bereitgestellt werden.

Wie sich aus diesen optischen Messdaten die Abweichungen von der Sollgeometrie und die jeweiligen Wandstärken berechnen lassen, wird in den folgenden Abschnitten dieses Diskussionspapiers ausführlich erklärt.

2.3 Das STL-Format der Messdaten

Die optische Messung mittels ATOS liefert triangulierte Oberflächendaten im STL-Format. Dieses Format ist so aufgebaut, dass in jedem Datenblock neben drei Datenpunkten, die das jeweilige

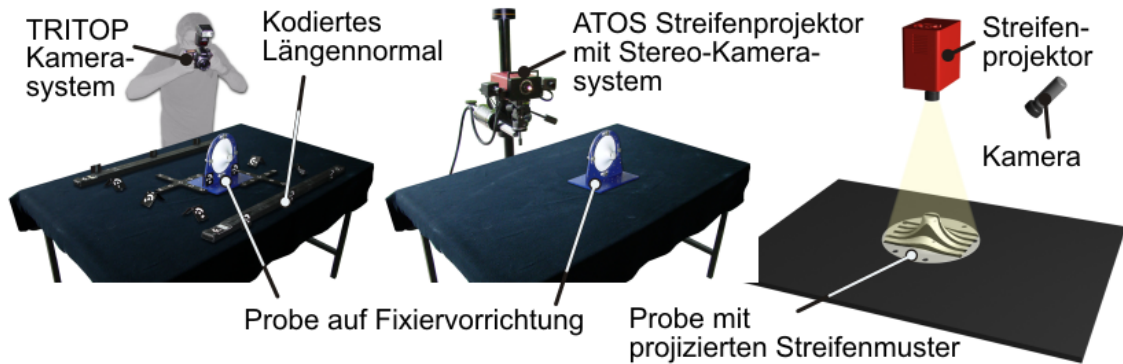


Abb. 5: Ablauf der optischen Vermessung: Lokalisation mit Tritop-Kamerasystem (links), Vermessung mit ATOS-3D-Scanner (mitte) mittels Streifenprojektion (rechts).

Dreieck aufspannen, auch noch der zum Dreieck gehörende Normalvektor mitangegeben wird (vgl. Abbildung 6).

```

facet normal -0.937694 0.021924 -0.346771
  outer loop
    vertex -191.430283 102.562363 -0.289010
    vertex -191.342377 102.536659 -0.528307
    vertex -191.451141 102.346039 -0.246288
  endloop
endfacet
facet normal -0.865297 -0.122528 -0.486054
  outer loop
    vertex -191.424133 103.854919 -0.445038
    vertex -191.306671 104.060516 -0.705961
    vertex -191.330322 103.516098 -0.526635
  endloop
endfacet

```

Abb. 6: Ausschnitt aus den STL-Daten. Ein Datenblock beginnt immer mit *facet* und endet mit *endfacet*. Neben dem Normalvektor werden in einem Block immer die drei Eckpunkte des Dreiecks angegeben (*vertex*)

Die Oberflächen der Bauteile werden jeweils rundherum vermessen. Bei der gewählten Genauigkeitseinstellung beinhaltet jede erzeugte STL-Datei zwischen 60000 und 100000 verschiedene Messpunkte.

3 Aufbereitung der optischen Daten

Im vorigen Abschnitt haben wir erläutert, wie es möglich ist einen dreidimensionalen optischen Rundum-Scan des Bauteils durchzuführen. Die so gewonnenen triangulierten Daten sind danach im STL-Format vorhanden. Ob ein bestimmter Datenpunkt auf der Ober- oder der Unterseite des gefertigten Bauteils liegt, ist anhand der STL-Darstellungen nicht erkennbar. Auch tauchen immer wieder Störungen in den Messungen auf, die eine Verwendung der rohen Messdaten zur Analyse der Qualität des Bauteils gänzlich unbrauchbar machen. Zudem ist die Wandstärke nicht direkt aus diesen optischen Messungen ablesbar. Die in den STL-Dateien gespeicherten Datenpunkte müssen also schrittweise aufbereitet werden, um eine Quantifizierung der Qualität vornehmen zu können.

In den einzelnen Schritten der Aufbereitung wird die Triangulierung der Daten zunächst außer Acht gelassen und es wird nur mit der Menge der Datenpunkte weitergearbeitet.

3.1 Elimination von Artefakten

Ein Nachteil der optischen Vermessung besteht darin, dass sich häufig Artefakte unter den gemessenen Datenpunkten befinden, wie beispielhaft in der nachfolgenden Abbildung gesehen werden kann.

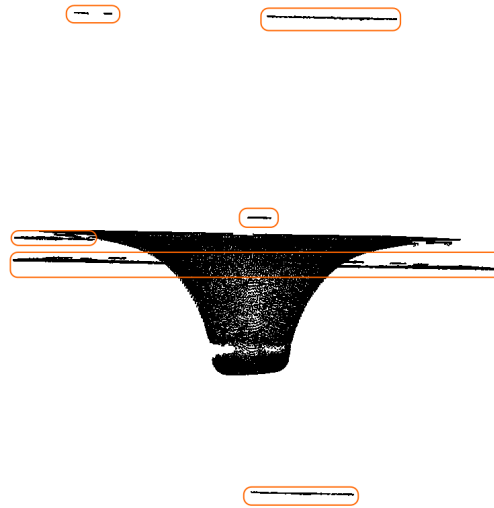


Abb. 7: Projektionsplot der Originaldatenpunkte. Mutmassliche Artefakte sind farblich markiert.

Die Grafik zeigt eine Projektion der Datenpunkte. Farblich markiert sind dabei die mutmaßlichen Artefakte, also Punktwolken, die mit ziemlicher Sicherheit nicht Bereiche des vermessenen Bauteils darstellen.

Wie es zur Entstehung dieser Artefakte kommt, ist unklar. Die wahrscheinlichste Ursache für ihr Auftreten liegt darin, dass bei der Vermessung die zur Arretierung des Bauteils benötigten Hilfsmittel wie Stellschrauben und ähnliches miterfasst werden. Das Auftreten von Artefakten ist zwar unschön, blieb jedoch in den meisten Fällen für die weitere Aufarbeitung der Daten ohne Folgen. Einige besondere Artefakte, die sehr weit vom Rest der Daten entfernt liegen, vermögen jedoch auch die weiteren Aufarbeitungsschritte der Daten so zu stören, dass kein vernünftiges Resultat mehr zu erhalten wäre.

Um diese besonders schwerwiegenden Artefakte schnell aus den Daten herauszufiltern, hat sich in der Praxis der folgende Ansatz bewährt:

1. Knapp 1000 der Datenpunkte (und damit zwischen 1 und 1,5 Prozent der Daten) werden raumfüllend ausgewählt und mit der *Single Linkage*-Methode hierarchisch geclustert [Eve80]. Diejenigen Cluster, die sehr klein sind und einen hohen Abstand zu den großen Clustern haben, werden anschließend zur Elimination vorgemerkt. Als „sehr klein“ werden dabei alle Cluster bezeichnet, die aus weniger als 75 Punkten bestehen, als „hoher Abstand“ zu den anderen Clustern gilt eine Distanz von 30mm und mehr.

2. Die nicht zum Clustern verwendeten 98,5 bis 99 Prozent der Daten werden nun auf ihre Nähe zu den zu streichenden Clustern untersucht. Liegen Datenpunkte nah an diesen zu eliminierenden Clustern, aber sehr weit vom Schwerpunkt der Daten entfernt, so werden auch diese zur späteren Elimination vorgemerkt. Als Schwerpunkt der Daten gilt hierbei das 10%-getrimmte arithmetische Mittel der Daten. Alle Datenpunkte, deren Abstand zum Schwerpunkt größer ist als der Radius des umgeformten Bereichs von 70mm gelten als „sehr weit“ entfernt. Als „nah“ zu diesen Streichpunkten gelten Datenpunkte mit einer Distanz von 30mm und weniger.
3. Die vorausgegangenen ersten beiden Schritte werden zur Sicherheit noch zweimal mit anderen Clusterpunkten wiederholt. Dabei wird darauf geachtet, dass kein Datenpunkt mehr als einmal zur Clusterung verwendet wird.
4. Schließlich werden alle Punkte, die in den ersten drei Schritten zur Elimination vorgemerkt wurden, aus den Daten entfernt.

Abbildung 8 zeigt den Projektionsplot der Originaldatenpunkte nach Durchführung des beschriebenen Filtervorgangs. Artefakte, die sehr nahe an den tatsächlichen Messdaten des Bauteils liegen, werden von dem Filterschritt bewusst in der Datenmenge belassen. Weit entfernte Artefakte werden gut und vor allem schnell eliminiert.



Abb. 8: Projektionsplot der gefilterten Originaldatenpunkte

3.2 Anpassen der Daten an die Sollgeometrie

Um Kenngrößen zur Bauteilqualität quantifizieren zu können, muss das Bauteil mit der zu erzielenden Sollgeometrie verglichen werden. Die von den Artefakten bereinigten Datenpunkte liegen aber häufig wie in Abbildung 9 dargestellt beliebig „schief“ im Raum. Bevor eine Beurteilung der Abweichungen zur gewünschten Geometrie möglich ist, müssen die Daten deshalb zunächst dafür vorbereitet, d.h. entsprechend rotiert und verschoben werden.

Diese Anpassung der Daten erfolgt iterativ mit Hilfe von nicht-linearen Optimierungsmethoden. Dabei werden die Daten auch gleich in Punkte der Ober- und der Unterseite aufgeteilt.

1. Anhand der x- und y-Koordinaten der Daten werden die Sollwerte der z-Koordinate ermittelt. Hierbei bedient man sich der Funktionsdarstellung der gewünschten Geometrie:

$$f(x, y) = \begin{cases} h_1 + h_2, & \text{wenn } \sqrt{x^2 + y^2} \leq r_1 \\ h_2 - \frac{h_2}{r_2} \cdot \sqrt{r_2^2 - (r_1 + r_2 - \sqrt{x^2 + y^2})^2}, & \text{wenn } r_1 < \sqrt{x^2 + y^2} \leq r_1 + r_2 \\ 0, & \text{wenn } \sqrt{x^2 + y^2} > r_1 + r_2 \end{cases}$$

Die Größen r_1 und r_2 bezeichnen dabei den Innenradius der Trichterröhre und den Radius

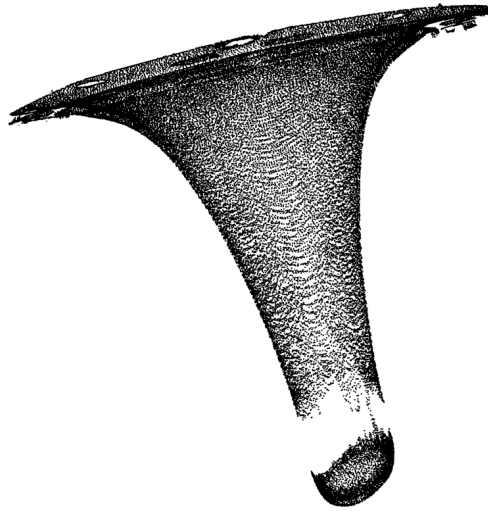


Abb. 9: Projektion der Datenpunkte vor dem Anpassungsschritt

des umgeformten Bereichs, die Größen h_1 und h_2 stehen für die zugehörigen Höhen dieser Bereiche wie auch die Konstruktionszeichnung in Abbildung 10 zeigt.

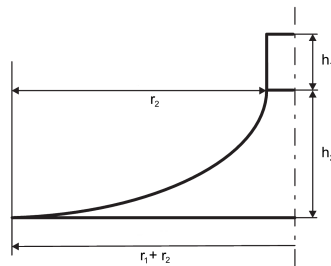


Abb. 10: Sollgeometrie des Trichters mit Bemassung

2. Als erstes Maß für den Abstand zwischen den tatsächlichen z -Koordinaten der Datenpunkte und ihren Sollwerten berechnet man nun eine gewichtete Summe ihrer quadrierten Abweichungen. Die Gewichte sind dabei so gewählt, dass Abweichungen in der Trichterröhre keine Rolle spielen (Gewichte hier also gleich 0) und die Gewichte nach aussen hin langsam ansteigen. Mit einer Variante des Newton-Algorithmus (**R**-Funktion `n1m()` [R D05]) wird nun nach dem Verschiebungsvektor \vec{v} und den Rotationswinkeln α_1 , α_2 und α_3 gesucht, die bezüglich dieses Abstandsmaßes zu einer optimalen Transformation der Daten führen und diese dann auf die Daten angewandt. Die Daten werden in diesem Schritt abschliessend um all jene Punkte bereinigt, die nach dieser Transformation weit außerhalb des umgeformten Bereichs lägen (Punkte, deren Abstand zum Zentrum mehr als $r_1 + r_2 + 5$ beträgt).
3. Nun wird untersucht, ob ein Datenpunkt auf der Ober- oder Unterseite des Bauteils gemessen wurde. Dazu wird die im letzten Schritt als optimal ermittelte Transformation auch auf die Ausgangsdaten in ihrer triangulierten Form angewandt und die Normalvektoren entsprechend mitrotiert.
Zeigt ein rotierter Vektor anschliessend nach unten, d.h. ist seine z -Komponente negativ, so werden die drei Punkte des zu ihm gehörenden Dreiecks zur Unterseite gezählt; zeigt er nach oben, so zählen die Eckpunkte des Dreiecks zur Oberseite.

Die im zweiten Schritt übriggebliebenen Datenpunkte werden entsprechend in Ober- und Unterseitenpunkte unterteilt.

4. Um die Güte der Anpassung zu erhöhen, wird die im zweiten Schritt erläuterte Anpassung nur mit den Daten der Punkte der Unterseite wiederholt. Hierbei wird ein modifiziertes Abstandsmaß verwendet: Die verwendeten Gewichte betragen 0 innerhalb der Trichterröhre und auch sonst bis auf wenige Ausnahmen. Die Ausnahmen betreffen acht Bereiche am Rand des umgeformten Bereichs, in denen die Punkte mit Faktor 1000 gewertet werden. Durch die hohe Gewichtung dieser Randbereiche soll erzwungen werden, dass das angepasste Bauteil gerade in der XY-Ebene liegt. Um die optimale Anpassung sicherzustellen, wird von der erhaltenen Abweichungsquadratsumme zudem noch das Quadrat der Summe der univariaten Spannweiten der Daten in x-, y- und z-Richtung abgezogen.

Die mit dem Newton-Algorithmus für dieses Abstandsmaß als optimal bestimmte Rotation wird anschliessend separat auf die Daten der Ober- und der Unterseite angewendet.

Abbildung 11 zeigt die mit dieser Vorgehensweise erhaltene Anpassung des vorher „schiefen“ Bauteils aus Abbildung 9. Die Anpassung erweist sich als erfreulich gut.

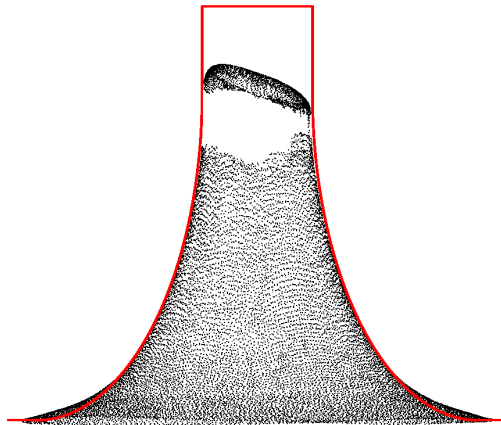


Abb. 11: Projektion der Datenpunkte nach dem Anpassungsschritt (rote Linie $\hat{=}$ Sollgeometrie)

Eine guten Überblick über die Abweichungen eines Bauteils von der Sollgeometrie erhält man, indem man die neuen x- gegen die neuen y-Koordinaten der rotierten Daten abträgt und die jeweiligen Abweichungen farbcodiert in die Abbildung einzeichnet. Die folgende Abbildung 12 zeigt solch einen XY-Plot beispielhaft für die Abweichungen der Bauteilunterseite.

3.3 Auffinden der Walzrichtungsmarkierung

Im Rahmen des Projekts soll unter anderem untersucht werden, inwiefern die Richtung, in der das Blech der Ausgangsrunde gewalzt wurde, das Ergebnis der Fertigung beeinflusst. Während an der unbehandelten Ausgangsrunde die Walzrichtung problemlos ablesbar ist, lässt sie sich an den für die optische Messung vorbereiteten Bauteilen und den damit ermittelten Datenpunkten aber nicht mehr feststellen.

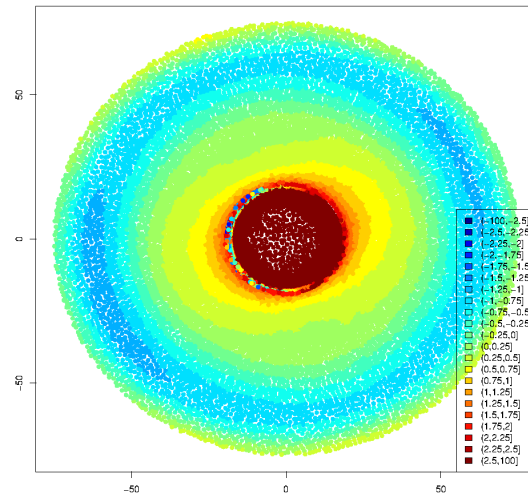


Abb. 12: Abweichungen der Bauteilunterseite zur Sollgeometrie

Um dennoch Walzrichtungseffekte bezüglich der Geometrietreue und Wandstärkenverteilung untersuchen zu können, behelfen wir uns deshalb mit einem Trick: In das Blech der Ausgangsrunde wird in einem Bereich, der bei der anschließenden Fertigung nicht mit dem Drückstichel bearbeitet wird, eine rechteckige Öffnung gelasert, deren längere Seite in Walzrichtung weist. Diese Walzrichtungsmarkierung wird dabei immer in den Bereich zwischen zwei für Stellschrauben vorgesehene kreisrunde Öffnungen gesetzt, welche im Abstand von jeweils 45 Grad am Außenrand der Runde zu finden sind (vergleiche Abbildung 4b).

Um diese Öffnung nun anhand der Daten der optischen Vermessung wiederzufinden, werden mit den ursprünglichen und ungefilterten Messdaten zunächst die im letzten Schritt ermittelten optimalen Transformationen durchgeführt. Anschließend betrachtet man die XY-Projektion dieser Daten und sucht in dieser im Aussenring zunächst nach den Schraubenlöchern. Dazu legt man ein feines Gitternetz in die Daten und ermittelt von jedem dieser Gitterpunkte den Abstand zum nächstgelegenen echten Datenpunkt. Ist dieser Abstand an einer bestimmten Stelle nicht sehr viel kleiner als der Radius der Schraubenlöcher, so hat man möglicherweise ein solches gefunden.

Da im Außenbereich der Runde häufig aber auch Artefakte in und um die Schraublöcher auftreten und es an anderen Stellen in diesem Bereich mitunter Probleme bei der Erfassung der Messdaten gibt, sind die so gefundenen Punkte aber nur Kandidaten und separat betrachtet für eine verlässliche Identifizierung der Schraublöcher nicht ausreichend. Mit einem einfachen Regressionsansatz, bei dem berücksichtigt wird, dass Schraublöcher in 45 Grad Abständen auf dem Außenring verteilt sind, wird nun aber anhand all dieser Kandidatenpunkte eine Schätzung ihrer Lage ermittelt, die sich in der Praxis als höchst zuverlässig erwiesen hat.

Durch die Kenntnis der Lage der Schraublöcher ist man nun in der Lage, die Suche nach der Walzrichtungsmarkierung anzugehen. Es wird erneut ein Gitter von Punkten in den äußeren Ring der Daten gelegt, dabei jedoch die Bereiche in und um die Schraublöcher außen vor gelassen. Die Gitterpunkte, zu denen es in einem Abstand von 1,1mm keinen echten Datenpunkt gibt, der sich in keiner Dimension um mehr als 1mm entfernt befindet, werden als potentielle Punkte der Walzrichtungsmarkierung betrachtet.

Um nun die Walzrichtung anhand dieser Punkte ausfindig zu machen, werden diese Kandidatenpunkte mit dem *Complete Linkage*-Verfahren [Eve80] geclustert, wobei bei einer Distanz von knapp über 15mm - was der Länge der Öffnung entsprechen sollte - im Dendrogramm die Gruppeneinteilung erfolgt. Gibt es nach dieser Clusterung mehrere Gruppen, so werden alle Gruppen mit mindestens 5 Kandidatenpunkten separat betrachtet und für jede der Punktgruppen der Anteil der ersten Hauptkomponente an der Gesamtvarianz dieser Punkte berechnet. Dieser Anteil wird anschliessend noch mit einem Korrekturfaktor verrechnet, der die Grösse des jeweiligen Clusters miteinbeziehen soll. Die Punkte des Clusters, das den höchsten derart bestimmten Anteil aufweist, werden zu den Punkten der Walzrichtungsmarkierung erklärt.

Um abschliessend nun die Richtung der Markierung zu bestimmen, wird erneut eine Hauptkomponentenanalyse [FR88] durchgeführt, diesmal jedoch auf Basis einer robust geschätzten Kovarianzmatrix der Walzrichtungspunkte (**R**-Funktion `cov.rob()` [R D05]). Durch die robuste Schätzung fallen fälschlich als Markierungspunkte identifizierte Gitterpunkte bei der Richtungsbestimmung kaum noch ins Gewicht. In den meisten Fällen ist diese zusätzliche Robustifizierung zwar nicht notwendig, sie schadet aber auch nicht.

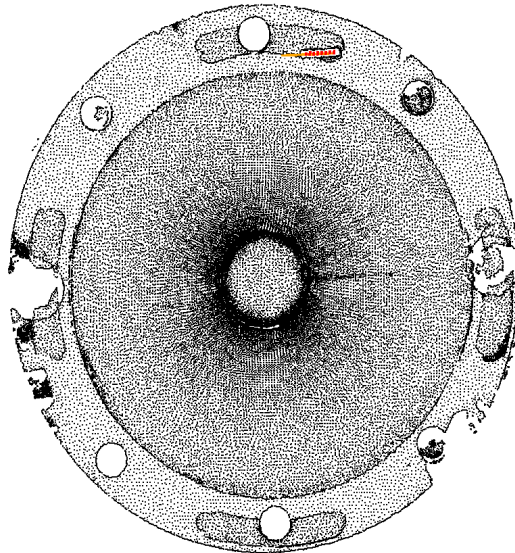


Abb. 13: Projektionsplot der Daten mit oranger Markierung der Walzrichtung. Die roten Punkte kennzeichnen die Kandidatenpunkte, anhand derer die Walzrichtung ermittelt wurde.

3.4 Berechnung der Wandstärken

Als Wandstärke wird in den Ingenieurwissenschaften nach Wikipedia die Differenz der inneren und der äusseren Abmessungen der Wände eines Rohres, Gehäuses, eines Druckbehälters oder eines Gebäudes bezeichnet, wobei ihre Messung immer senkrecht zur Wandausdehnung zu erfolgen hat.

Diese Definition praktisch umzusetzen, ist in unserer Situation nur sehr schwer möglich, da wir es mit triangulierten Daten zu tun haben und Ober- und Unterseite zudem unabhängig - und damit auch völlig unterschiedlich - trianguliert wurden. Wir behelfen uns mit einer alternativen Definition der Wandstärke, die in den allermeisten Fällen aber zum selben Ergebnis führen sollte

wie die obige Definition: Als Wandstärke in einem bestimmten Punkt der Unterseite wird danach der kleinste euklidische Abstand dieses Punktes zu den Punkten der Oberseite festgelegt.

Da - wie schon erwähnt - Ober- und Unterseite eine unterschiedliche Triangulation aufweisen, kann diese Definition aber zu einer Überschätzung der tatsächlichen Wandstärke führen: Gibt es keine Oberseitenpunkte, die in x- und y-Koordinate sehr nah an dem Punkt der Unterseite liegen, für den man die Wandstärke berechnen möchte, so führt diese x- und y-Abweichung schon zu recht hohen euklidischen Distanzen, auch wenn die z-Koordinaten sich nicht sehr unterscheiden. Die Lösung dieses Problems sind Interpolationsmethoden mit denen wir zusätzliche Oberflächenpunkte generieren (siehe Abbildung 14), sodass zu jedem gemessenen Punkt auf der Unterseite ein quasi gegenüberliegender interpolierter Punkt auf der Oberseite vorhanden ist.

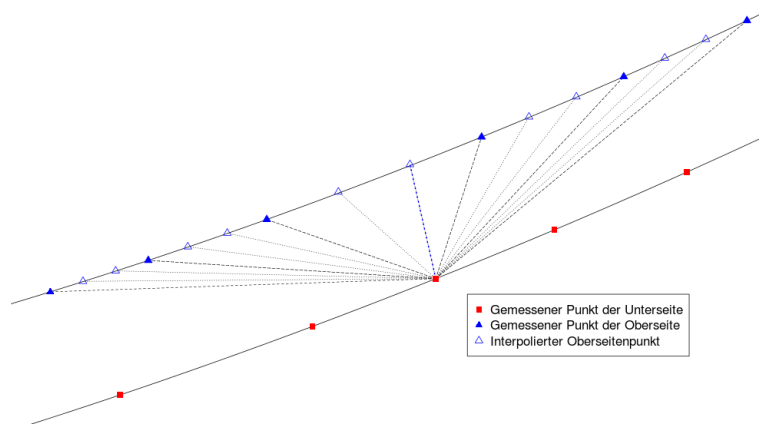


Abb. 14: Schematische Darstellung der Wandstärkenbestimmung

Zur Interpolation dieser neuen Punkte wurde das Verfahren der *Local Trend Surfaces* [VR02] eingesetzt (**R**-Funktion `loess()` [R D05]), bei dem mit Hilfe von Polynomen die Oberfläche jeweils lokal approximiert wird.

Da in den vorausgegangenen Schritten die Datenpunkte schon in Ober- und Unterseitenpunkte aufgeteilt wurden, sind für die Berechnungen keine weiteren Vorbereitungen mehr notwendig. Das Ergebnis lässt sich anschließend am besten mittels eines XY-Projektionsplots begutachten, wobei die Wandstärke wie beim Abweichungsplot wieder farbcodiert in die Grafik eingetragen wird (siehe Abbildung 15).

4 Diskussion

In diesem Diskussionspapier wurde ein Verfahren zur Bestimmung der Abweichungen eines gefertigten Bauteils von der Sollgeometrie und zur Ermittlung seiner Wandstärkenverteilung vorgestellt. Dieses Verfahren unterscheidet sich insofern von klassischen Verfahren, als dass es komplett auf optischen Vermessungen der Bauteile basiert. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass sich die Bauteile relativ einfach und schnell vermessen lassen und Wandstärken und Geometrieabweichungen nicht nur entlang von festgelegten Pfaden, sondern über das gesamte Bauteil erfasst werden. Da die optische Vermessung der Bauteile aber eben nur eine Triangulierung der gesamten Oberfläche bereitstellt, werden in unserem Verfahren schrittweise Artefakte eliminiert, Rotationen vorgenom-

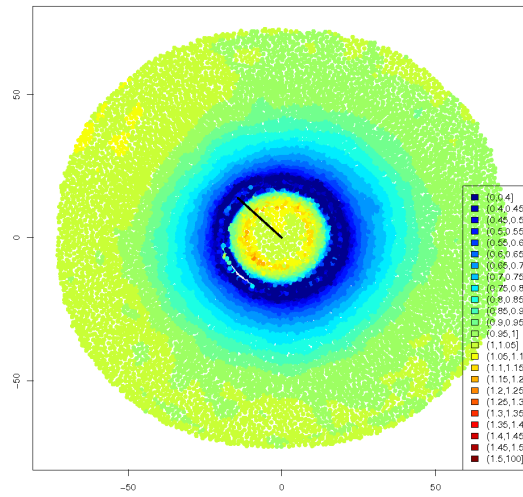


Abb. 15: XY-Plot der Wandstärkenverteilung. Der schwarze Strich kennzeichnet die Richtung, in der die Ausgangsrunde gewalzt wurde.

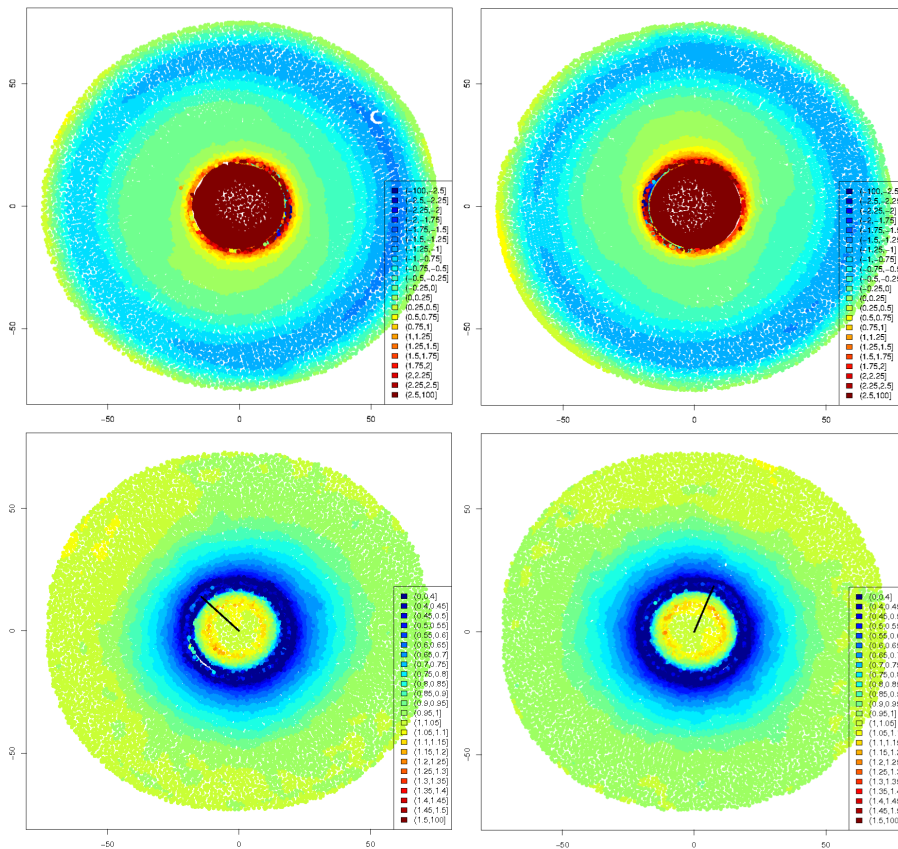


Abb. 16: Wiederholungsmessung und -bestimmung von Abweichungs- (oben) und Wandstärkenplots (unten)

men, und eine Unterteilung in Oberseite und Unterseite durchgeführt bevor aus diesen Messdaten die tatsächliche erzielte Bauteilgeometrie und dessen Wandstärkenverlauf erkennbar sind.

Wie sich im Laufe unserer Versuchsreihen gezeigt hat, führen wiederholte Messungen desselben Bauteils zu sehr ähnlichen Geometrieabweichungs- bzw. Wandstärkengrafiken, was für eine gute Reproduktionsvarianz dieser Verfahren spricht. Abbildung 16 zeigt beispielhaft eine wiederholte Messung eines Bauteils.

Stichprobenartige Überprüfungen der so ermittelten Wandstärkendaten mit Hilfe klassischer taktischer Methoden führten ebenfalls zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Das von uns neu verwendete optische Verfahren hat sich in der Praxis gut bewährt. Aus den so errechneten Wandstärken können nun Kenngrößen wie z.B. die kleinste Höhe, ab der ein kritischer Schwellenwert der Wandstärke unterschritten wird, ermittelt werden. Diese Kenngrößen können dann anschließend zur statistischen Untersuchung verschiedener potentieller Einflussgrößen herangezogen werden.

Die hier vorgestellte Vorgehensweise zur Vermessung eines 3D-Objektes ist grundsätzlich unabhängig von der Wahl der Geometrie, dementsprechend kann dieses Verfahren auch sehr leicht bei veränderten bzw. komplexen Geometrien verwendet werden.

Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes durch den Sonderforschungsbereich "Statistik nichtlinearer dynamischer Prozesse" (SFB 823, Teilprojekt B2) der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Literatur

- [BB08] BERTEMES, François ; BIEHL, Peter F.: *Forschergruppe 550 – Der Aufbruch zu neuen Horizonten. Die Funde von Nebra, Sachsen-Anhalt, und ihre Bedeutung für die Bronzezeit Europas*. Project Homepage. <http://www.for550.uni-halle.de>. Version:07 2008. – (Homepage vom 2008-07-11)
- [Doe93] DOEGE, Michael; Kruska Jens-Uwe; Neubert Jürgen; Schulze T. Eckart; Huck H. Eckart; Huck: *Ziehverfahren*. 07 1993
- [Eve80] EVERITT, Brian: *Cluster Analysis*. Social Science Research Council, Halsted Press, 1980
- [FFM02] FILICE, L. ; FRATINI, L. ; MICARI, F.: Analysis of Material Formability in Incremental Forming. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51 (2002), Nr. 1, S. 199–202. [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61499-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61499-1). – DOI 10.1016/S0007-8506(07)61499-1
- [FR88] FLURY, B. ; RIEDWYL, H.: *Multivariate Statistics - A Practical Approach*. Chapman and Hall, 1988

- [HG06] HUSSAIN, G. ; GAO, L.: Fundamental studies on incremental forming of titanium sheet-metal. In: *International Conference on Manufacturing Science and Engineering, MSEC 2006* Bd. 2006. Ypsilanti, MI, 2006, –
- [Jad05] JADHAV, Sanjay: *Basic investigations of the incremental sheet metal forming process on a CNC milling machine*, Universität Dortmund, Diss., 2005
- [JDA05] JESWIET, Jack ; DUFLOU, Joost R. ; A, Szekeres: Forces in single point and two point incremental forming. In: *Advanced Materials Research* Vols. 6-8 (2005), Nr. 6, S. pp. 449–456. ISBN 0–87849–972–5
- [JMH+05] JESWIET, J. ; MICARI, F. ; HIRT, G. ; BRAMLEY, A. ; DUFLOU, J. ; ALLWOOD, J.: Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. In: *CIRP ANNALS - Manufacturing Technology* Bd. 2 College International pour la Recherche en Productique, 2005. – ISSN 1726–0604, S. 623–649
- [Jun03] JUNK, S.: *Inkrementelle Blechumformung mit CNC-Werkzeugmaschinen: Verfahrensgrenzen und Umformstrategien*, LPT, Universität des Saarlandes, Diss., 2003
- [Les64] LESZAK, Edward: *Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming*. 08 1964
- [MSNM05] MAŠEK, Bohuslav ; STANKOVÁ, Hana ; NOVÝ, Zbyšek ; MEYER, L. W.: Development of New Incremental Forming Strategies for Low-alloyed TRIP Steels, 2005
- [MZB+07] MAIDAGAN, E. ; ZETTLER, J. ; BAMBACH, M. ; RODRÍGUEZ, P.P. ; HIRT, G.: A new incremental sheet forming process based on a flexible supporting die system. In: *Key Eng Mat* 344 (2007), S. 607–614. – ISSN 10139826 (ISSN)
- [R D05] R DEVELOPMENT CORE TEAM ; R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING (Hrsg.): *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2005. <http://www.R-project.org>. – ISBN 3-900051-07-0
- [Sch07] SCHÄFER, Timo: *Verfahren zur hämmernden Blechumformung mit Industrierobotern*, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart, Diss., 2007. http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2007/3032/pdf/Diss_Schaefer_hs.pdf
- [Skj07] SKJOEDT: Creating Helical Tool Paths for Single Point Incremental Forming. In: *Key Engineering Materials* Vol. 344 (2007), S. pp. 583–590
- [VR02] VENABLES, W.N. ; RIPLEY, B.D.: *Modern Applied Statistics with S*. Springer, 2002
- [WDL03] WONG, C. C. ; DEAN, T. A. ; LIN, J.: A review of spinning, shear forming and flow forming processes. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (2003), November, Nr. 14, S. 1419–1435. [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00172-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00172-X). – DOI 10.1016/S0890-6955(03)00172-X
- [Zha08] ZHANG, Jian: *Roboterbasiertes inkrementelles Blechumformen*, LPS der Ruhr Universität Bochum, Diss., 2008. <http://www.shaker.eu/catalogue/Details.asp?ISBN=978-3-8322-7169-5>

