



Alexander Pocherdorfer, BSc

# Warmumformung von Achsbrücken: Einflussgrößen und Prozessoptimierung

## MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.- Ing. Ralf Kolleck

Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion  
Inffeldgasse 11/I, 8010 Graz

Dipl. Ing. Wolfgang Kriegner  
voestalpine Anarbeitung GmbH, voestalpine-Str. 3, 4020 Linz

## Zusammenfassung

Im Zuge der Erweiterung ihrer Wertschöpfungskette wurde in der voestalpine Anarbeitung GmbH das neue Umformverfahren „alphas® forming“ zur Herstellung von Komponenten für die Achsbrückenfertigung entwickelt. Die Arbeit befasst sich mit dem Optimierungsprozess dieses Verfahrens, welches erst seit kurzem die Serienreife erreicht hat.

Nach der Verfahrensbeschreibung werden auf Basis der dokumentierten Messwerte die Prozessfähigkeit und die Prozessbeherrschung ermittelt. Darauf aufbauend erfolgt eine genauere Untersuchung der Platinengeometrie, welche maßgeblich die resultierende Formteilgeometrie beeinflusst. Anschließend wird die Einlegeposition der Platine im Werkzeug untersucht, da diese vor allem bei Längsversatz eine ausschussverursachende Größe darstellt. Des Weiteren werden durch die Analyse von verschleißintensiven Bauteilen außergewöhnliche Belastungszustände und Maßabweichungen eruiert und das Messsystem wird hinsichtlich der Genauigkeit der erfassten Messergebnisse überprüft.

Aufbauend auf diese Betrachtungen werden Verbesserungsvorschläge erarbeitet und Korrekturen vorgenommen. Abschließend erfolgt eine Aufstellung von Einstellparametern zur geringfügigen Steuerung der herzustellenden Formteilgeometrie.

## **Abstract**

In order to expand their value-added chain the voestalpine Anarbeitung GmbH invented the new forming process „alphas® forming“ for manufacturing components for the axle housing. The thesis deals with the optimization process of this technique, which only recently reached the readiness to series- production.

After the process description the process capability- and the process control-values will be calculated based on documented measurement results. According to this results a more detailed investigation on the geometry of the blanks is conducted, which substantially influences the geometry of the moulding. Subsequently, the positioning of the blank inside the forming tool will be threatened, because an offset in length would cause rejected goods. Furthermore, the analysis of wear- intensive components shows extraordinary load conditions and dimensional deviations and the accuracy of the detected measuring results of the measurement system will be checked.

Based on this information suggestions for improvement will be elaborated and corrections will be executed. Finally, a listing of setting parameters to slightly steer the geometry of the moulding is carried out.

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

### ***AFFIDAFIT***

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

01.12.2014

Datum / Date



Unterschrift / Signature

## Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen .....	III
1 Einleitung .....	1
1.1 Ausgangssituation.....	2
1.2 Zielsetzung.....	4
2 Verfahren zur temperierten Umformung .....	5
2.1 Warmumgeformte Halbschalen.....	5
2.2 alphas® forming.....	7
2.2.1 Prinzipieller Verfahrensablauf alphas® forming.....	7
2.2.2 Vorteile und Möglichkeiten .....	8
2.2.3 Aufbau Werkzeug.....	10
3 Prozessbeschreibung .....	13
3.1 Geforderte Baureihen und Spezifikationen .....	13
3.1.1 Spezifikationen des Kunden .....	13
3.1.2 Spezifikationen für die Weiterverarbeitung der Halbschalen ....	14
3.2 Herstellungsprozess der Achsbrücken.....	15
3.2.1 Herstellung Platine .....	16
3.2.2 Herstellung Halbschale.....	17
3.3 Messdatendeklarierung.....	24
4 Prozessanalyse.....	25
4.1 Messdatenanalyse des letzten Produktionsjahres .....	25
4.1.1 Prozessfähigkeit und Prozessbeherrschung .....	26
4.2 Zwischenfazit .....	30
5 Analyse der Einflussgrößen .....	31
5.1 Einflüsse vor dem Umformen.....	31
5.1.1 Platinengeometrie (Coildicke & Platinenzuschnitt) .....	31
5.1.2 Platinenpositionierung in der Presse .....	41

5.2	Einflüsse während des Umformens .....	49
5.2.1	Verschleißzustand des Werkzeugs .....	49
5.2.2	Werkzeugtemperatur .....	61
5.3	Einflüsse nach der Umformung .....	64
5.3.1	Messstation .....	64
6	Einstellparameter zur Gewährleistung der Prozessbeherrschung .....	72
6.1	Einstellparameter zur Beeinflussung der Breite .....	72
6.1.1	Luftbodenhöhe.....	72
6.1.2	Anzugsmoment Zuganker & Bodenschrauben .....	74
6.2	Einstellparameter zur Beeinflussung der Höhe .....	77
6.2.1	Höhe Prägeleisten .....	77
6.2.2	Höhe Hauptdistanzen .....	78
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	80
	Literaturverzeichnis .....	83
	Abbildungsverzeichnis .....	84
	Anhang.....	88

## Symbole und Abkürzungen

$\sigma$	Standardabweichung	[mm]
$\bar{x}$	Mittelwert der Messwerte	[mm]
$x$	Messwert	[mm]
$n$	Probenanzahl	[1]
$c_p$	Prozessfähigkeit	[1]
$c_{pk}$	Prozessbeherrschung	[1]
$T$	Toleranzbreite	[mm]
$\Delta_{krit}$	Abstand zur nächsten Toleranzgrenze	[mm]
$R_{p0,2}$	0,2%- Dehngrenze	[N/mm <sup>2</sup> ]
$R_m$	Zugfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]
$L_1$	Länge bei Temperatur $\neq$ Raumtemperatur	[mm]
$L_0$	Länge bei Raumtemperatur	[mm]
$\alpha$	Wärmeleitkoeffizient	[1/K]
$\Delta T$	Temperaturänderung	[°C]

# 1 Einleitung

In Zeiten immer stärkerer Globalisierung sind Nutzfahrzeuge im Fernverkehr zu einem fixen Bestandteil auf den Straßen geworden. Immer mehr Güter befinden sich zur gleichen Zeit auf dem Transportweg. Da die Abmessungen und das höchst zulässige Gesamtgewicht dieser Nutzfahrzeuge gesetzlich festgelegt sind, hängt die Wirtschaftlichkeit eines solchen Transportmediums maßgeblich von den Verhältnissen Ladevolumen zu Gesamtabmessung und Nutzlast zu Gesamtgewicht ab. Um auf diesem Markt also anhaltend erfolgreich sein zu können, ist es notwendig, in den Bereichen des konstruktiven und werkstofflichen Leichtbaus nach der Technikführerschaft zu streben und Innovationskonzepte voranzutreiben<sup>1</sup>. Leichtbau bedeutet unter Berücksichtigung aller einwirkender Kräfte und Lasten, sowie konstruktiver und fertigungstechnischer Randbedingungen, das Gewicht eines Bauteils oder eines ganzen Systems zu reduzieren. Bei bewährten Komponenten im Fahrzeugbau, die unter dem Aspekt des Leichtbaus betrachtet werden, ergeben sich dadurch oftmals große Potentiale, die mechanischen Anforderungen zu erfüllen und gleichzeitig durch Massenreduktion bewegter Teile die dynamischen Eigenschaften zu verbessern.<sup>2</sup>

In diesem Zusammenhang hat in den letzten Jahren vor allem der Einsatz an umgeformten Bauteilen gegenüber Guss- und Schmiedeteilen stark zugenommen. Das liegt vor allem daran, dass Bleche aus Hochleistungsstahl, bei gleichzeitig höheren Zugfestigkeiten, bis zu 50% leichter sind als vergleichbare Bauteile aus Guss. Des Weiteren zeigen sich auch Vorteile in der Produktion, da gegenüber den meist sehr aufwändigen Nachbearbeitungen bei Guss- Teilen diese bei Umformteilen fast vollständig entfallen.

---

<sup>1</sup> Vgl. (Siebenpfeifer Hrsg., 2014).

<sup>2</sup> Vgl. (Häußler, Nowicki, Bangert, & Sauter, 2003)



Im Bereich der Achsbrücken wurden laut eines Artikels des deutschen Handelsblatts<sup>3</sup> im Jahr 2007 bei der Daimler AG bereits 70-80% der bestehenden Komponenten als Blechumformteile ausgeführt. Die Argumente für die besseren Dämpfungseigenschaften von Gussmaterialien konnten die entscheidenden Nachteile von Preis und Gewicht schon damals nicht mehr aufwiegen. (Berger, 2007)

### 1.1 Ausgangssituation

In Abbildung 1.1 ist der grundsätzliche Aufbau einer angetriebenen Hinterachse eines Nutzfahrzeuges dargestellt. Die Achsbrücke bildet zusammen mit den Achsstummeln und den Anschweißteilen das tragende Grundgerüst. Über Motor, Getriebe und Antriebswelle wird das Antriebsmoment in das in der Achsbrücke verbaute Ausgleichsgetriebe geleitet und von dort auf die Reifen übertragen.

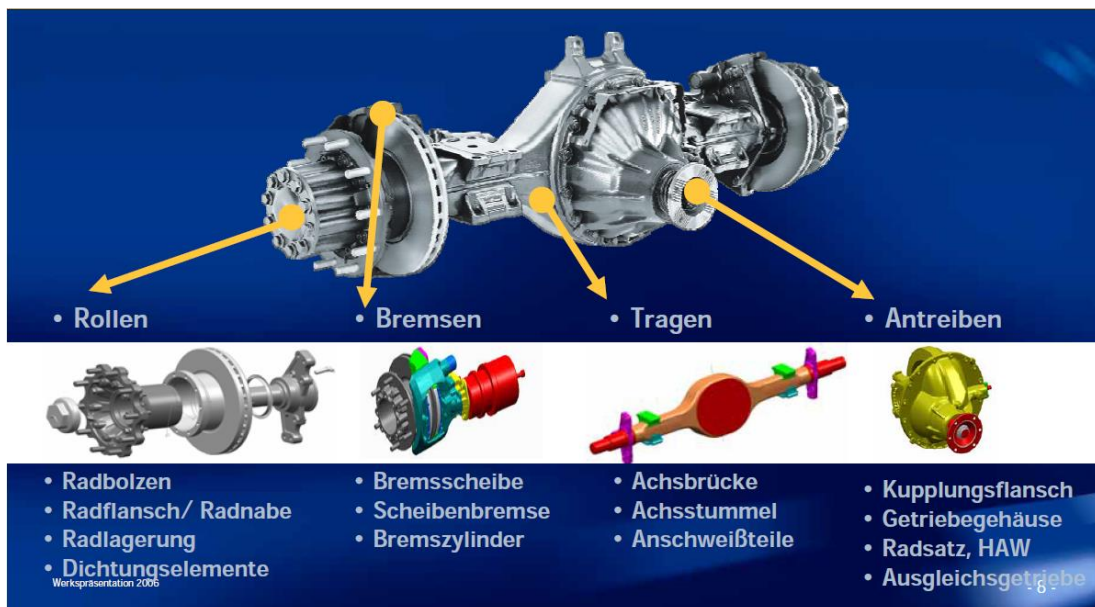


Abbildung 1.1: Hinterachse Baugruppen und Funktion (Daimler AG, 2006)

Bei den Achsbrücken unterscheidet man je nach Bauart zwischen:

- Rohrsteckachse:

Findet heute noch ihren Einsatz im leichten LKW bzw. Kleinlastler.

<sup>3</sup> URL: <http://www.handelsblatt.com/auto/test-technik/blech-statt-guss-autohersteller-setzen-auf-plattenbau/2816742.html> [Stand: 26.09.2014].

- Guss-Achsbrücke:  
Diese wird bei Renault und Volvo in Serie eingesetzt. Bei anderen Herstellern wird sie verstärkt bei Sonderfahrzeugen mit hoher Leistung verbaut.
- Achsbrücke in Umformtechnik:  
Sie ist mittlerweile die am verbreitetsten eingesetzte Achsbrückenart. Dabei wird die Geometrie durch zwei umgeformte Halbschalen erzeugt, die zusammengefügt werden. DAF Trucks N.V. verwendet zum Beispiel kaltumgeformte Halbschalen. Die Unternehmen MAN SE, sowie einige amerikanische Hersteller, verwenden dagegen warmumgeformte Halbschalen. Auch die Daimler AG bezog eine Zeit lang warmumgeformte Halbschalen.<sup>4</sup>



Abbildung 1.2: Verschiedene Bauarten der Achsbrücke (Kriegner, 2012, S. 4)

Aus der Kooperation der Unternehmen voestalpine Anarbeitung GmbH und Daimler AG entstand ein neuartiges Verfahren, genannt „alphas® forming“, zur Herstellung der Halbschalen, mit dem eine neue Generation Achsbrücken ermöglicht wurde. Dabei wird bei der Blechumformung nicht wie bisher ein runder, sondern ein rechteckiger Anschlussquerschnitt ausgebildet, woran die Achsstummel als Einzelkomponenten direkt verschweißt werden. Das Fügen von Umformstahl mit Gussmaterial erfolgt dabei bei Daimler selbst durch ein speziell für diesen Einsatz entwickeltes Induktion- Press- Schweißverfahren<sup>5</sup>. Seit 2009 besteht nun ein Entwicklungskooperations- und Liefervertrag zwischen den beiden Unternehmen von Achsbrücken der „Generation 3<sup>plus</sup>“. Eingesetzt werden diese beispielsweise im für den Fernverkehr konzipierten „Mercedes Benz Actros“.

<sup>4</sup> Vgl. (Kriegner, 2012, S. 4ff).

<sup>5</sup> Patentnummer: DE102008014934A1.



Abbildung 1.3: Achsbrücke Generation 3<sup>plus</sup> (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

## 1.2 Zielsetzung

Aufgrund der Tatsache, dass das Umformverfahren alphas® forming erst seit Kurzem in der Serienproduktion eingesetzt wird, existieren nur geringe Erfahrungen in Bezug auf die Prozessbeherrschung, was sich auch auf den nachfolgenden Fügeprozess negativ auswirkt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Bauteilgeometrie von momentan schwankender Qualität zu stabiler, serienreifer Produktqualität zu steigern. Dazu sollen die Prozessschwankungen analysiert und ihren jeweiligen Ursachen zugeordnet werden, um so deren Potentiale für Optimierungen feststellen zu können. In Abbildung 1.4 sind die untersuchten Größen dargestellt.

Des Weiteren sollen Möglichkeiten erarbeitet werden, Abweichungen langfristig, aber auch unmittelbar im laufenden Prozess, zu korrigieren bzw. von vornherein zu vermeiden.

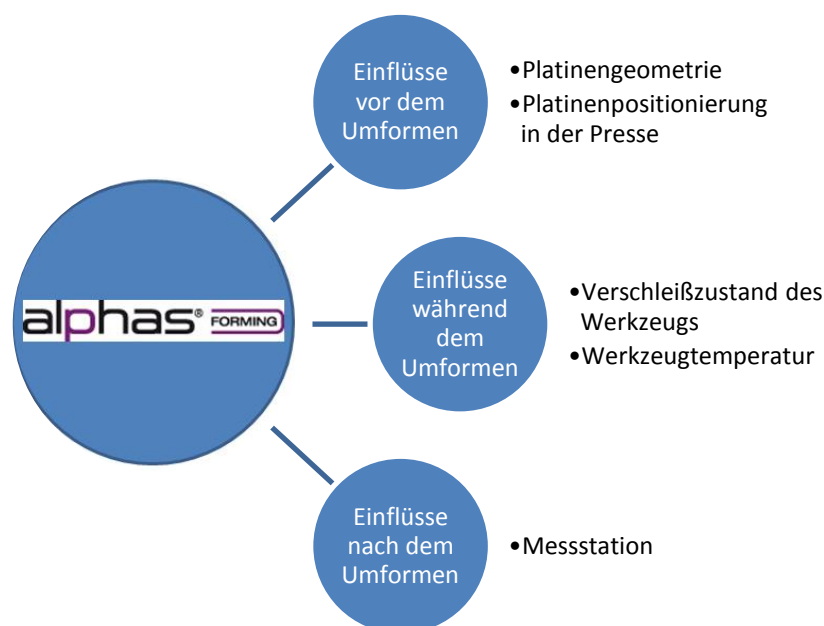


Abbildung 1.4: Zu untersuchende Einflussgrößen alphas® forming

### 2 Verfahren zur temperierten Umformung

In diesem Kapitel wird die klassische Warmumformung in der Halbschalenherstellung dem neuen Verfahren gegenübergestellt.

#### 2.1 Warmumgeformte Halbschalen

Bei Warmumformung spricht man im Allgemeinen von einer Umformung im austenitischen Bereich, also bei ca. 900°C. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Umformung im Werkzeug vor Unterschreiten von  $A_{r3}$  abgeschlossen sein muss. Die anschließende Abkühlung erfolgt im Gegensatz zum Presshärten an ruhender Luft. Bei den verwendeten Stählen muss darauf geachtet werden, dass sie die gewünschte Festigkeit auch nach dieser Wärmebehandlung noch gewährleisten. Die Warmumformung hat den Vorteil, dass im Profil kleinere Radien ausgebildet werden können, was sich in einer höheren Steifigkeit positiv niederschlägt, und somit eine Gewichts- und Materialersparnis erlaubt.<sup>1</sup>

Nach erfolgter Wärmebehandlung zeigt Abbildung 2.1 den prinzipiellen Ablauf eines solchen Verfahrens zur Halbschalenfertigung. Im ersten Prozessschritt wird eine geschnittene Platine (101) durch das Oberteil (104) in das Werkzeug (103) gepresst und die Halbschalenform erzeugt. Da keine Klemmung der Platine erfolgt, spricht man von einer ungeführten, freien Umformung. Nach der Umformung wird das Bauteil in den zweiten Teil des Werkzeugs manipuliert und der zweite Prozessschritt folgt. Die Kanten (106) und Radien (107) werden gestaucht, um einen möglichst rechtwinkligen Querschnitt mit maximaler Steifigkeit zu erhalten. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom „square edge“. Gleichzeitig mit dem Stauchen erfolgt auch ein Prägen der Kanten entsprechend der gewünschten Schweißnahtgeometrie. Die Problematik liegt hier in dem Umstand, dass die Einformung frei erfolgt und somit ein maßhaltiges Ausprägen der Kanten nur schwer durchführbar ist. Außerdem wird durch die gegensätzliche Wölbung

---

<sup>1</sup> Vgl. (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 1ff).

(108) auch ein Teil des Materials in den Boden geschoben, wodurch ein größerer Stauchweg für die Ausprägung erfolgen muss.<sup>2</sup>

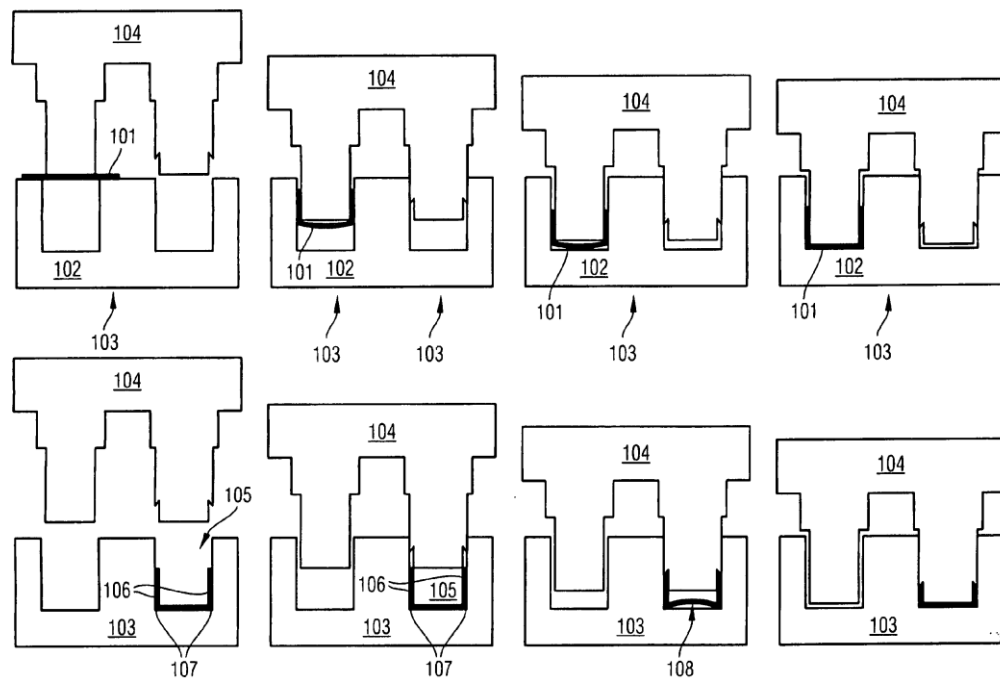


Abbildung 2.1: Verfahrensablauf eines zweistufigen Prozesses nach Stand der Technik  
(Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 48)

Betrachtet man den Prozess nun ganzheitlich, so stellt man fest, dass durch den zweistufigen Prozess immer zwei Teile parallel in einer Presse bearbeitet werden. Der Vorteil der geringeren Umformkräfte durch die hohen Temperaturen wird somit geschmälert<sup>3</sup>. Hinzu kommt, dass die beiden Bauteile unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Die bereits in das zweite Werkzeug manipulierte Platine wird durch den vorangegangenen Umformvorgang stark abgekühlt, was den Kraftaufwand für das Stauchen und Prägen weiter erhöht. In diesem Zusammenhang muss auch darauf geachtet werden, dass  $A_{r3}$  nicht unterschritten wird. Ebenso wichtig ist die Geschwindigkeit mit der das Bauteil im Werkzeug abkühlt, da normalisierend geglühte bzw. gewalzte Stähle ihre mechanischen Eigenschaften vor allem durch die Bildung einer ferritisch-perlitischen Matrix erhalten. Ist die Abkühlgeschwindigkeit im Werkzeug zu hoch, kann dies zu Martensitbildung und infolgedessen zu Versprödungen kommen. Für den Fall, dass keine

<sup>2</sup> Vgl. (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 1ff).

<sup>3</sup> Um diesen Vorteil nutzen zu können bestünde zwar die Möglichkeit zur Verwendung von zwei Pressen mit je einem Werkzeug, was aber mit sehr hohen Investitionskosten verbunden wäre.

Phasenumwandlung beim Erwärmen stattgefunden hat, ist hingegen die Abkühlgeschwindigkeit unkritisch.<sup>4</sup>

### 2.2 alphas® forming

Bei diesem Verfahren liegt die Werkstücktemperatur vor dem Umformen unterhalb von  $A_{C1}$ . Somit zählt dieses zu den Halbwarmumformverfahren. Das Rohteil wird zwar ebenso wie bei der Warmumformung erwärmt, jedoch erfolgt keine Phasenumwandlung. Für dieses Verfahren sind somit alle Stähle geeignet, die bis 700°C noch ein stabiles Gefüge besitzen. Dazu zählen unter anderem normalisierend, aber auch thermomechanisch gewalzte Stähle, wobei bei zweiteren darauf geachtet werden muss, dass durch die Wärmebehandlung keine Festigkeitsminderung<sup>5</sup> stattfindet. Mehrphasenstähle mit martensitischen Anteilen sind nicht geeignet.<sup>6</sup>

#### 2.2.1 Prinzipieller Verfahrensablauf alphas® forming

In Abbildung 2.2 ist der prinzipielle Verfahrensablauf eines mehrfachwirkenden Werkzeugs zur Halbschalenherstellung dargestellt. Dabei wird zunächst die auf Endmaß geschnittene Platine zwischen Stempel (2) und Matrizeneinsatz (3) geklemmt. Dadurch soll ein Schieben der Platine während der Umformung vermieden werden. Die Gasdruckfedern (5) und die Prägezyylinder (4) sind entsprechend druckbeaufschlagt. In Schritt zwei erfolgt die Umformung. Die Gasdruckfedern werden durch den Stempel verdrängt und sind so abgestimmt, dass eine Wölbung der Platine vermieden wird. In Schritt 3 wird die Umformung abgeschlossen. Der Stempel befindet sich nun im unteren Totpunkt und der Matrizeneinsatz stützt sich am Matrizenboden ab. Die Prägezyylinder werden nun drucklos geschaltet und das Oberteil (7) mit den Prägeleisten (8) kann zum Stauchen/Prägen weiter abgesenkt werden. Dadurch, dass der Stempel während der Prägung in UT verbleibt, wird im Gegensatz zum zweistufigen Prozess der Materialaufdickung im Boden entgegengewirkt und die Stauchwege werden

---

<sup>4</sup> Vgl. (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 1ff).

<sup>5</sup> Abhängig von der chemischen Zusammensetzung des TM- gewalzten Bleches.

<sup>6</sup> Vgl. (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 9ff).

zu Gunsten des Verschleißes reduziert. Mit dem Öffnen des Werkzeugs fährt der Matrizeninsatz wieder in seine Ausgangsposition und zwei Auswurfzylinder stoßen das umgeformte Werkstück vom Stempel, sodass dieses auf dem Matrizeninsert zur weiteren Manipulation liegen bleibt.<sup>7</sup>

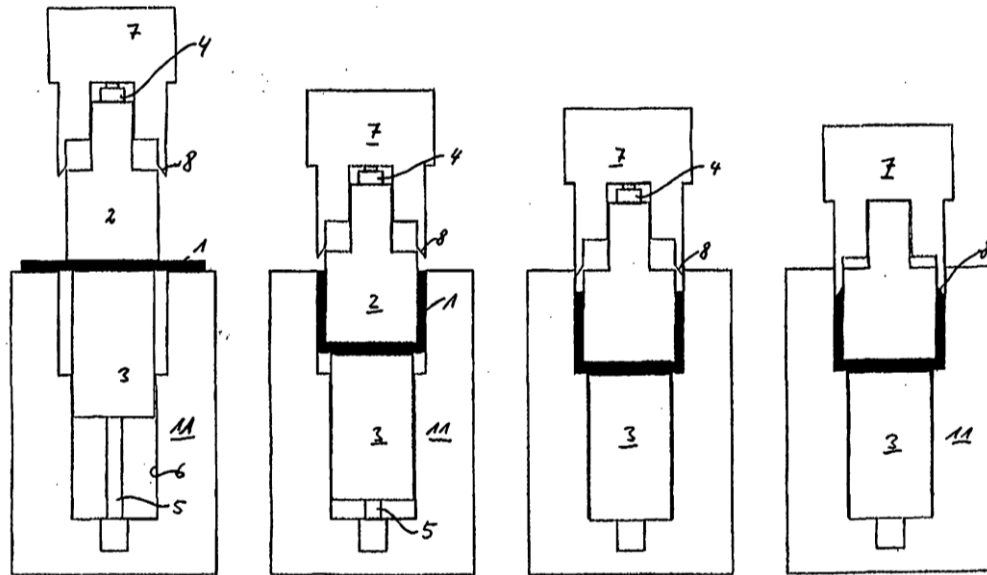


Abbildung 2.2: Prinzipieller Verfahrensablauf alphas® forming (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 30)

### 2.2.2 Vorteile und Möglichkeiten

Generell hat die temperierte Umformung den Vorteil, dass bedeutend komplexere Geometrien durch ein Herabsetzen der Fließspannung des Werkstoffs möglich sind. Somit können kleinere Radien erzeugt werden, ohne dass es in den Umformzonen zu Ausdünnungen kommt. Bei gleicher Ausgangsgeometrie entstehen dadurch Querschnitte mit höherem Flächenwiderstandsmoment, was die Reduktion von Wandstärke und damit Gewicht ermöglicht. Durch das Stauchen wird dieser positive Effekt noch erhöht.<sup>8</sup>

Durch die Reduktion der Umformtemperatur bei alphas® forming kommt es auch zu einer Verminderung der Zunderbildung (siehe Abbildung 2.3). Während beim Warmumformen oberhalb von 900°C schon teils dicke

<sup>7</sup> Vgl. (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 12ff).

<sup>8</sup> Vgl. (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 15ff).

Zunderschichten auftreten, bilden sich durch die exponentielle Charakteristik bei 700°C lediglich dünne Oxidhäute.<sup>9</sup>

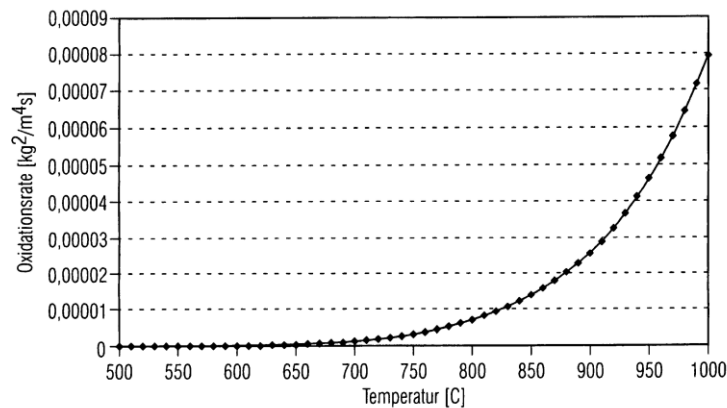


Abbildung 2.3: Oxidationsrate von Eisen an Luft (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 36)

Diese Oxidhäute verursachen prozesstechnisch keine nennenswerten Probleme und es besteht die Möglichkeit, den aus Abbildung 2.1 beschriebenen zweistufigen Prozess in einem Werkzeug zusammenzufassen. Das heißt:

- keine Manipulation im Werkzeug notwendig
- daraus folgt eine erhöhte Maßhaltigkeit
- Problematik der Abkühlgeschwindigkeit hinfällig
- kürzere Taktzeiten
- geringere Verschleißkosten durch den Wegfall eines zweiten Werkzeugs und weniger Zunder
- geringerer Aufwand zur Oberflächenreinigung<sup>10</sup>

Unter Berücksichtigung des Aspekts der Umformkräfte kann man aus Abbildung 2.4 entnehmen, dass diese beim alphas® forming prinzipiell um den Faktor 2 bis 3 gegenüber der Warmumformung größer sind. Bedenkt man aber, dass sich bei der Warmumformung immer zwei Werkstücke parallel in der Presse befinden und dass das Werkstück vor dem zweiten Prozessschritt bereits stark abgekühlt ist, so kann man davon ausgehen, dass der Unterschied nur gering ausfällt. Zusätzlich kann man in Abbildung

<sup>9</sup> Vgl. (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 9).

<sup>10</sup> Vgl. (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 10ff).



2.4 auch sehr gut die erhöhte Reibung bei 900°C erkennen. Im Gegensatz zu den anderen Kurven bei niedrigerer Temperatur fällt hier der Kraftaufwand nach der ersten Umformung nicht ab, was an der verstärkten Reibung durch Zunder im Werkzeug liegt.<sup>11</sup>

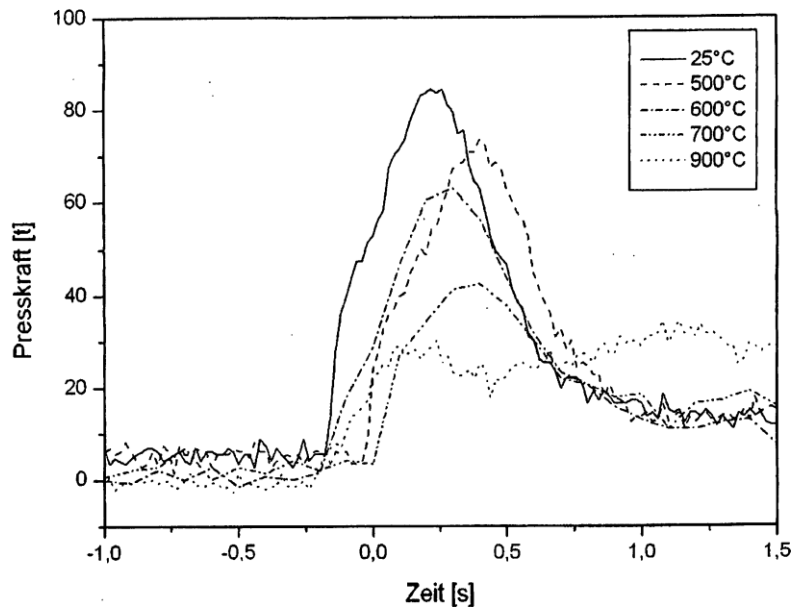


Abbildung 2.4: Umformkräfte abhängig von Temperatur (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 33)

### 2.2.3 Aufbau Werkzeug

In den nachfolgenden Abbildungen ist das Werkzeug zur Halbschalenherstellung nach alphas® forming dargestellt. Die Werkzeugeinsätze sind zur Wärmeabführung gekühlt und an verschleißintensiven Stellen mit hochfesten Werkzeugstählen bestückt. Abbildung 2.5 zeigt das Gesamtwerkzeug inklusive Ober- und Unterteil.

<sup>11</sup> Vgl. (Kirchweger, Krenn, & Kriegner, 2008, S. 14ff).

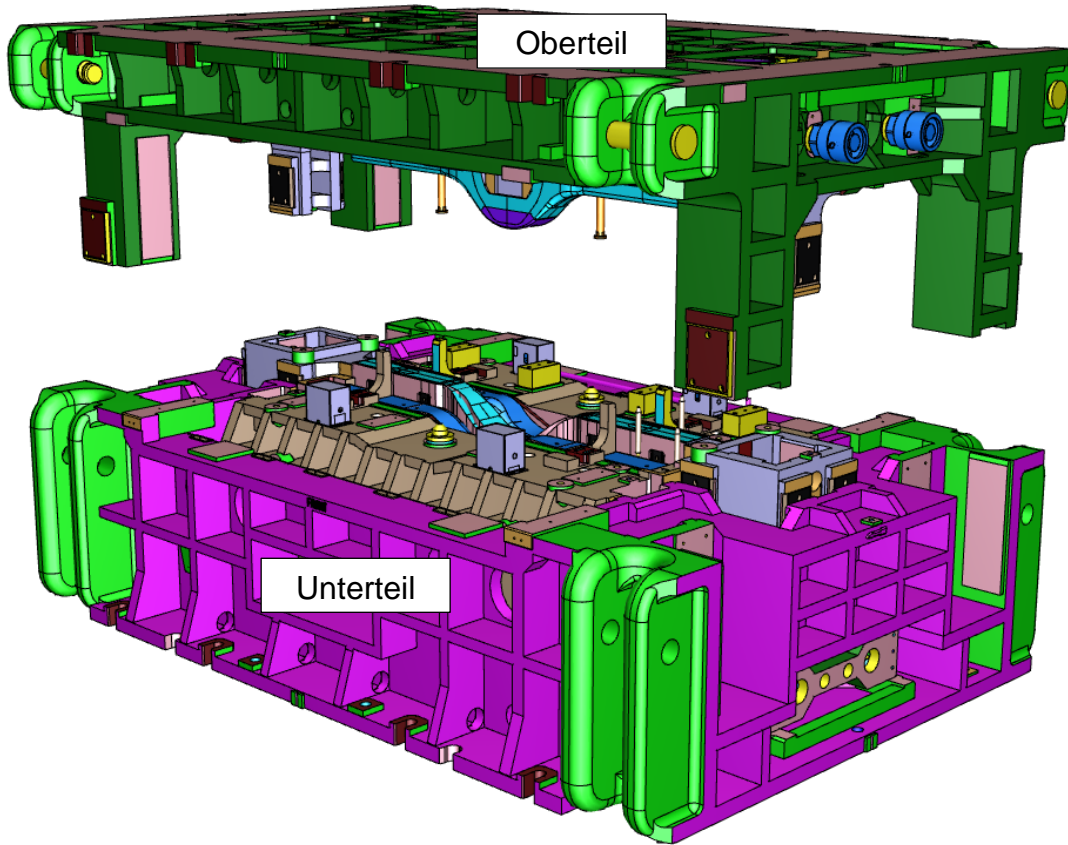


Abbildung 2.5: Gesamtwerkzeug *alpha*® forming (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

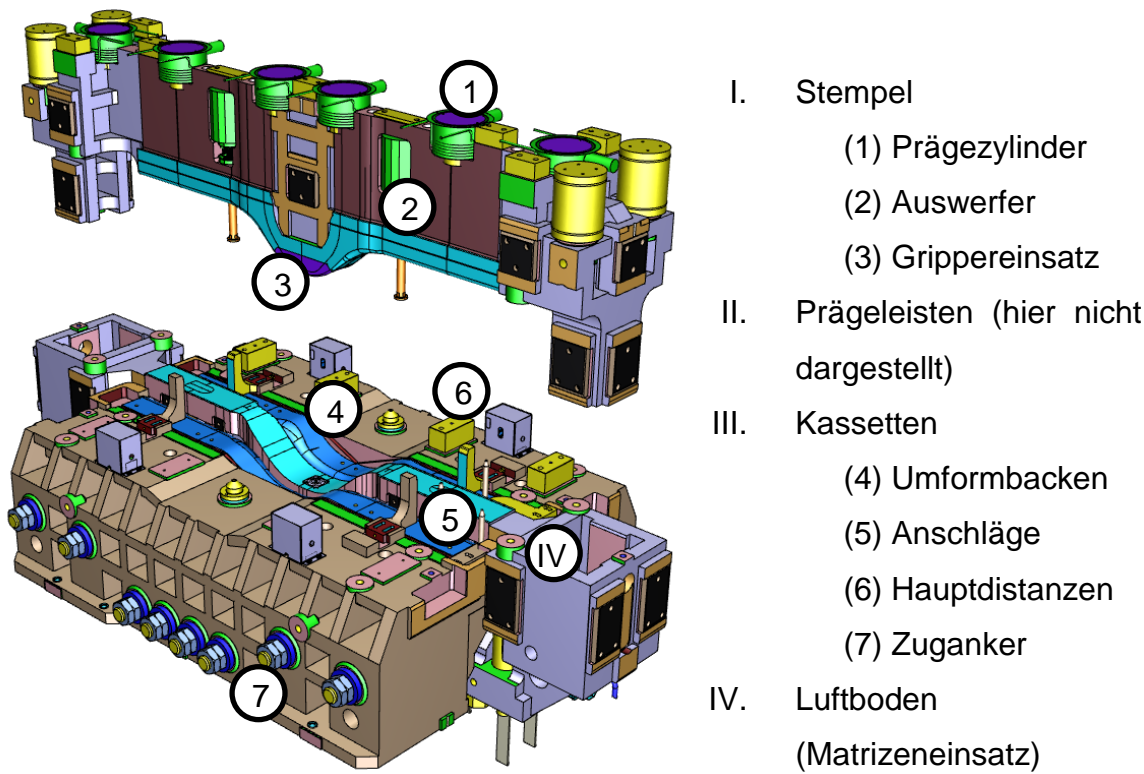


Abbildung 2.6: Werkzeug *alpha*® forming (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

Im Oberteil befindet sich der Stempel, welcher auf den Prägezyindern gelagert ist. Er ist als Gussteil ausgeführt und wird der Länge nach von vier oberflächennahen Kühlkanälen durchzogen. In der Mitte befindet sich der dunkelblau eingefärbte Grippereinsatz. Zwischen diesem und dem Luftboden erfolgt die Klemmung der Platine.

An der Flanke des Stempels, im Oberteil verschraubt, sind die Prägeleisten. Sie werden nicht gekühlt und sind am stärksten beansprucht, weswegen sie ebenfalls aus Werkzeugstahl gefertigt sind und vergütet werden.

Der Matrizeneinsatz (in Folge als Luftboden bezeichnet) ist als Gussteil ausgeführt, wobei auf den durch das Stauchen stark belasteten Stellen hochfeste Werkzeugstahlplatten verbaut sind. Die Kühlung erfolgt hier lediglich durch einen Kühlkanal längs durch das Werkzeug, da hier das Werkzeug nicht vom Werkstück auf 3 Seiten umschlossen ist, wie beim Stempel und somit ein geringerer Wärmeeintrag abgeführt werden muss.

Die Matrize ist so konstruiert, dass nur die Bereiche, welche mit dem Werkstück in Kontakt kommen, also verschleiß- und temperaturbeständig sein müssen, aus hochfestem Werkzeugstahl gefertigt sind. Diese sind in zwei separate Gusskörper gebettet, welche über Zuganker vorgespannt werden. Die Kühlung erfolgt nur an den Kontaktflächen von der Mitte nach außen.

### 3 Prozessbeschreibung

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über den gesamten Herstellungsprozess vom Coil bis zur fertigen Achsbrücke bieten. Dazu wird kurz auf die geforderten Spezifikationen anhand der Halbschalen eingegangen und im Anschluss der Prozess erklärt.

#### 3.1 Geforderte Baureihen und Spezifikationen

Die voestalpine Anarbeitung GmbH besitzt derzeit einen Liefervertrag mit der Daimler AG über Achsbrücken der Generation *3<sup>plus</sup>*. Dabei werden zwei verschiedene Baureihen (nachfolgend BR6 und BR4 genannt) gefordert, wobei erstere den Großteil der Lieferungen ausmacht. Die Stahlgüte ist für beide Baureihen gleich und die Unterschiede sind rein geometrischer Natur.

Abbildung 3.1 zeigt den Auslieferungszustand der fertigen Achsbrücke.



Abbildung 3.1: Auslieferungszustand Achsbrücke, links Deckelseite, rechts Ringseite  
(voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

##### 3.1.1 Spezifikationen des Kunden

Am rechteckigen Anschlussprofil werden mit Ausnahme einer Ablängoperation keinerlei spanabnehmende Bearbeitungen durchgeführt, was bedeutet, dass der Profilquerschnitt nach dem Fügen von zwei Halbschalen direkt der Form dieser Halbschalen entspricht. Da die Toleranzen für das Verschweißen der Achsstummel sehr eng sind, bedeutet dies höchste Ansprüche an die Maßhaltigkeit des Umformverfahrens. Das Einhalten dieser Toleranzen stellt damit die Kernaufgabe beim Umformen dar.

Ein weiteres Kriterium ist das Ausbilden des „square edges“ entlang des rechteckigen Querschnitts. Diese „Längskante“ wird durch das Stauchen mit den Prägeleisten ausgebildet und ist maßgeblich für die erreichbare Biegesteifigkeit. Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 zeigen Teile der geforderten Toleranzen für die Anschlussprofile der jeweiligen Baureihen. Auf genauere Angaben musste auf Forderung des Kunden jedoch verzichtet werden.

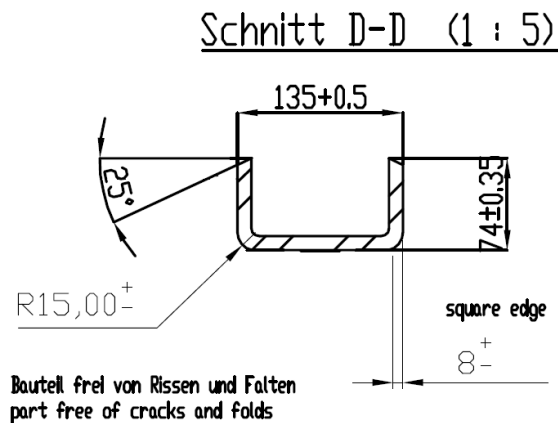


Abbildung 3.2: Anschlussquerschnitt Halbschale BR6 (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

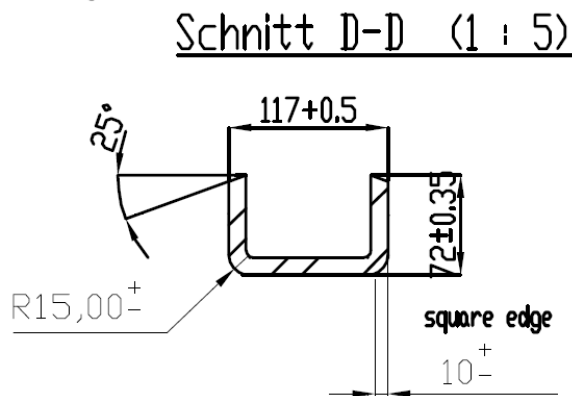


Abbildung 3.3: Anschlussquerschnitt Halbschale BR4 (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

### 3.1.2 Spezifikationen für die Weiterverarbeitung der Halbschalen

Im Sinne der Weiterverarbeitung, also des Fügens zweier Halbschalen zu Achsbrücken, ergeben sich noch weitere Anforderungen, um einen stabilen Prozess zu gewährleisten.

- Halbschalenversatz:  
Für den Fall, dass z.B. die Platine mit Längsversatz in das Umformwerkzeug eingelegt wurde, tritt eine Verschiebung der Kontur auf und die Achsschenkel können unterschiedliche Längen aufweisen.
- Flügelstellung:  
Entsteht durch ein Festsitzen der Halbschale am Stempel, wodurch der benötigte Kraftaufwand zum Loslösen durch die Auswerfer zu einer Überbiegung der Achsschenkel führt.
- Badstützenkontur:  
Entlang des Schweißstegs muss die Kontur der Halbschalen jener der Badstütze (Vorgabe) entsprechen, um einen effektiven Schutz beim Schweißen der Wurzel gewährleisten zu können.

### 3.2 Herstellungsprozess der Achsbrücken

Die Herstellung der Achsbrücke erstreckt sich über mehrere Firmen des voestalpine Konzerns. Diese Prozesskette wird nachfolgend in 3 Etappen unterteilt, wobei die dritte Etappe nur der Vollständigkeit halber angeführt ist, jedoch nicht als Teil dieser Arbeit behandelt wird.

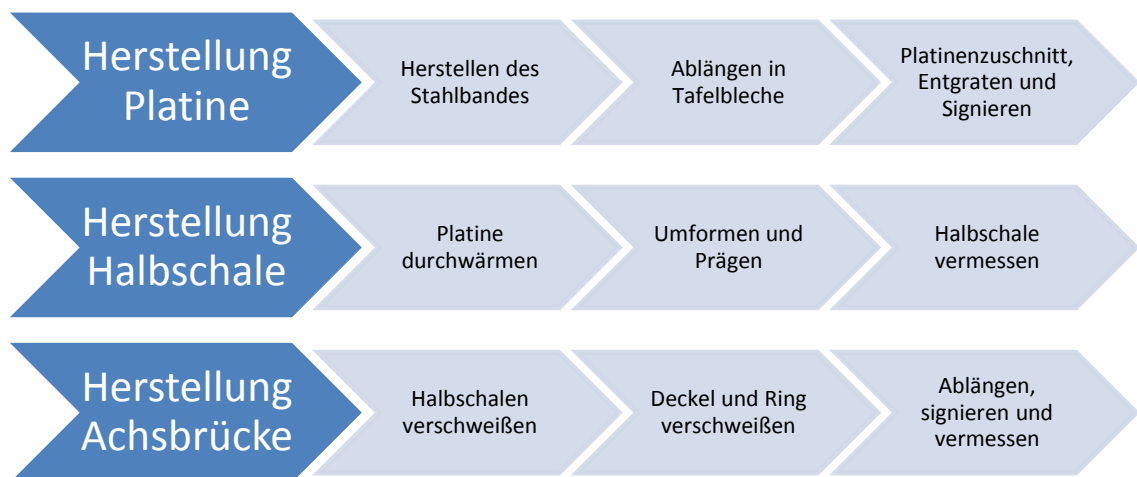


Abbildung 3.4: Prozesskette Achsbrückenherstellung

### 3.2.1 Herstellung Platine

#### 3.2.1.1 Herstellen des Stahlbandes

Das Ausgangsmaterial für die Achsbrückenherstellung sind Coils mit entweder 12,5mm Dicke für Baureihe 4, oder 11,3mm Dicke für Baureihe 6. Die Toleranz für die Abweichung von der geforderten Dicke liegt für beide Baureihen bei  $\pm 0,26\text{mm}$ . Sichergestellt wird dies durch eine außermittig angeordnete, kontinuierliche Dickenmessung, welche ca. meterweise gemittelte Dickenwerte protokolliert. Zur Identifizierung sind alle Coils mit einer 6-stelligen Bundnummer versehen.

Die Stahlsorte ist ein mikrolegierter Feinkornstahl mit der Bezeichnung VM460N. Dieser entspricht einem S460N, wobei auf die Normalglühung aufgrund höherer Festigkeiten verzichtet wird. Der Stahl wird also im Walzzustand geliefert. Entgegen der Bezeichnung werden von der VAAN gegenüber dem Kunden folgende mechanische Eigenschaften garantiert:

- eine Mindeststreckgrenze von  $530 \text{ N/mm}^2$
- eine Zugfestigkeit von mindestens  $650 \text{ N/mm}^2$  und
- eine minimale Bruchdehnung von 14%.

#### 3.2.1.2 Ablängen in Bleche

Das Coil wird anschließend in fünf Blechpakete aufgeteilt, welche ebenso durchnummeriert werden. Diese werden zur Weiterverarbeitung in das Formzuschnittzentrum transportiert.

#### 3.2.1.3 Platinenzuschnitt, Entgraten und Signieren

Aus den einzelnen Blechen werden mittels Plasmaschneiden je nach Baureihe bis zu 18 Platinen geschnitten. Dabei wird die Platine ohne weitere Nacharbeit auf Endmaß mit geforderter Fase geschnitten. Dies ist mit einem sehr hohen technischen Aufwand verbunden. Bezogen auf das angewendete Verfahren sind die Toleranzen von  $\pm 1 \text{ mm}$  in der Breite bei  $\pm 3^\circ$  Abweichung von der Neigung relativ eng. Die Einhaltung der Toleranzen wird mit

Messschieber und Winkelmesser an den beiden Enden bei 50 mm Tiefe, je einmal pro Blech überprüft. Zur optimalen Ausnutzung werden die Platinen versetzt aus dem Blech geschnitten, wodurch Schwankungen bezüglich Dicke und mechanischer Eigenschaften in Kauf genommen werden (Näheres siehe Kapitel 5.1.1).

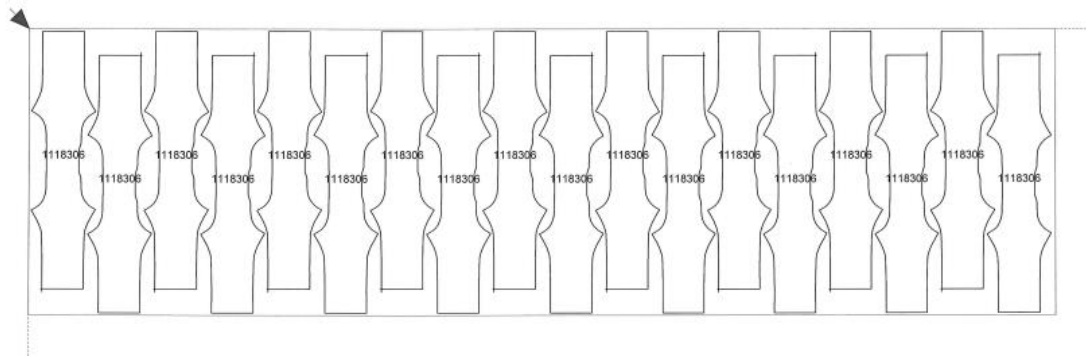


Abbildung 3.5: Schachtelplan BR4 (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

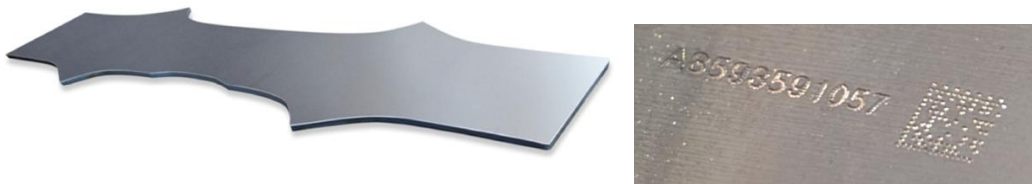


Abbildung 3.6: Platine und Datamatrix Code (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

Im letzten Bearbeitungsschritt werden die Platinen noch entgratet und per Nadelprüfer mit einem Datamatrix Code versehen. Dieser enthält einen baureihenspezifischen Buchstaben (BR4→B, BR6→A), die 6-stellige Coilnummer, die Paketnummer und eine 3-stellige fortlaufende Zahl.

### 3.2.2 Herstellung Halbschale

Dieser Abschnitt umfasst alle Prozesse von der Anlieferung der Platinen ins Tafelblechzentrum bis zur Ablage der vermessenen Halbschalen in den Ladungsträgern.



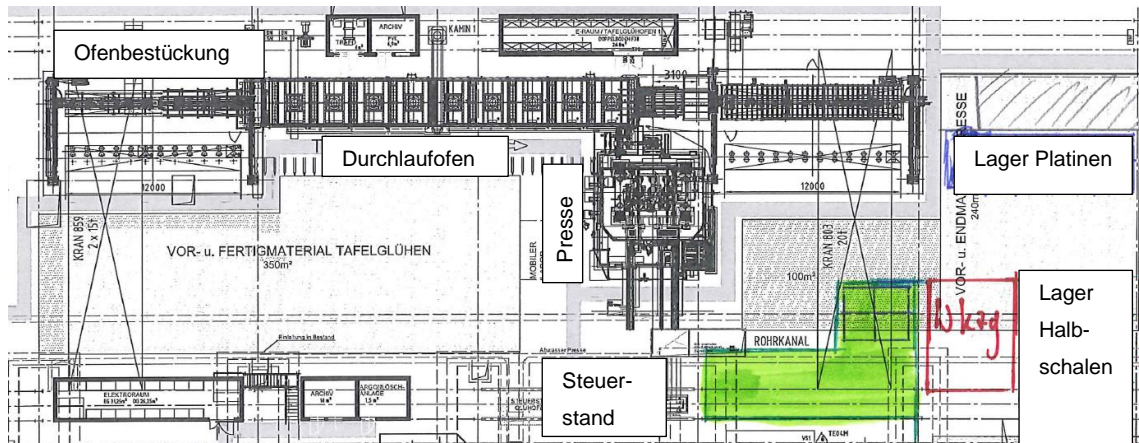


Abbildung 3.7: Layout Tafelblechzentrum (Ausschnitt Halbschalenfertigung) (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

### 3.2.2.1 Platine durchwärmen

Im Tafelblechzentrum werden die Platinen auf eigens angefertigten Ladungsträgern angeliefert. Diese sollen über drei Anschläge eine eindeutig definierte Position der Platinen sicherstellen.



Abbildung 3.8: Platinenladungsträger (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

Die Ofenbestückung erfolgt pneumatisch mit einer Vacohub Anlage. Dabei werden immer jeweils vier Platinen auf der Förderkette abgelegt und dem Ofen zugeführt. Vor der Ofenreise wird von jeder Platine der Datamatrix Code eingescannt, so dass alle folgenden Prozessparameter zugeordnet werden können. Auf einer Länge von 25m und nach einer durchschnittlichen

Ofenzeit von 30min werden die Platinen auf eine errechnete<sup>1</sup> Temperatur von ca. 650°C erwärmt.

### 3.2.2.2 Umformen und Prägen

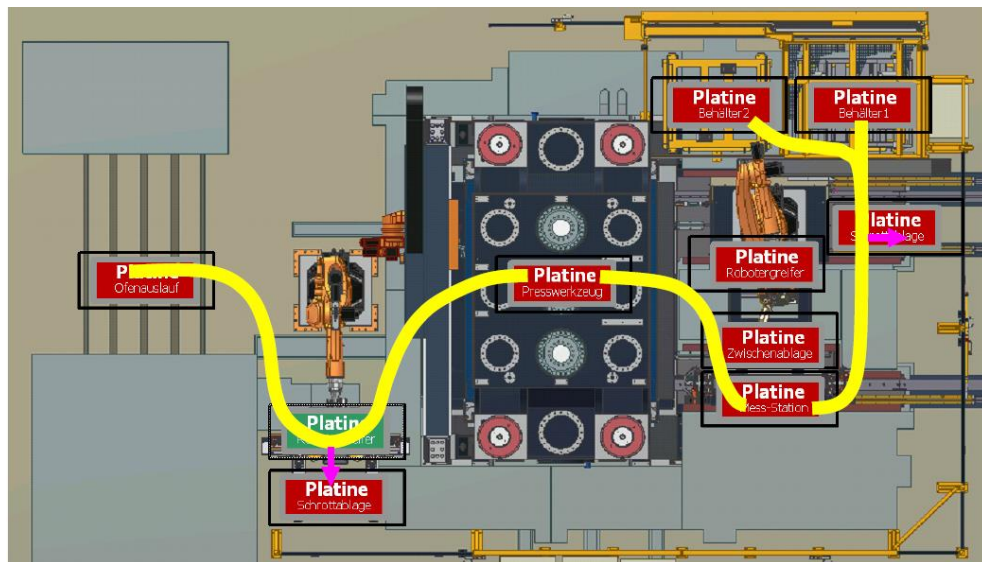


Abbildung 3.9: Pressenlayout (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

Beim Ofenauslauf angekommen, wird die Platine durch den Beladeroboter in die Presse eingelegt. Zur Lagebestimmung besitzt dieser auf drei Punkten mechanische Anschläge. Zusätzlich wird überprüft, dass nicht mehrere Platinen übereinander liegen, dass die Fase vorhanden ist und die Platine die korrekte Orientierung aufweist.

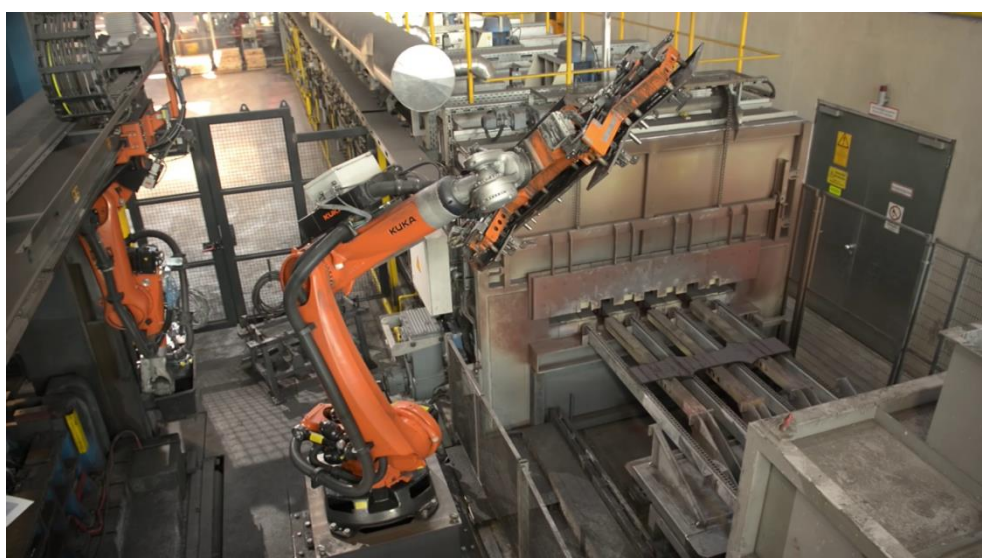


Abbildung 3.10: Beladeroboter (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

<sup>1</sup> Die Temperatur wird auf Basis eines Berechnungsmodells bestimmt und nicht physisch vermessen.

Auf der Rückseite der Presse befindet sich neben dem Beladeroboter ein weiterer Roboter zum Schmiermittelauftrag. Damit werden auf Ober- und Unterwerkzeug spezifische Schmierstoffe aufgebracht. Am Stempel wird das besser haftende mit Graphit versetzte Lubrodal F25 PLE verwendet und auf Luftboden und Umformbacken kommt zur Abriebsminimierung das Beruforge 2002B zum Einsatz.

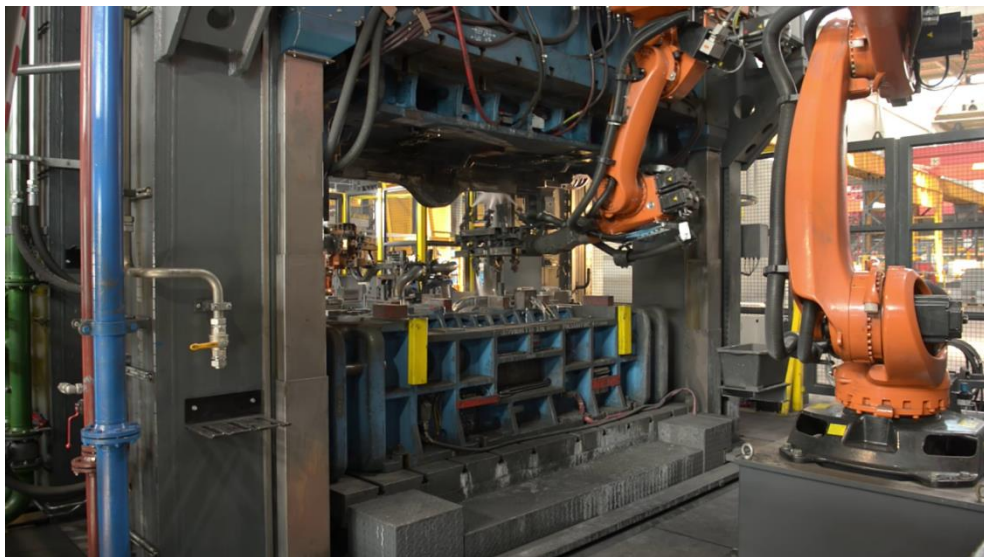


Abbildung 3.11: Schmierstoffauftrag (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

Um beim Ablegen der Platine durch unterschiedliche Reibungsverhältnisse im Greifer ein Verrutschen zu vermeiden, sind im Werkzeug Anschläge verbaut. Aufgrund von Geometrieabweichungen durch Zuschnittstoleranzen und Wärmedehnung muss aber ein gewisser Toleranzabstand eingehalten werden (siehe Kapitel 5.1.2).

Sobald der Stempel die Platine berührt, beginnt der Umformvorgang. Die weiteren Schritte der Umformung sind Kapitel 2.2 zu entnehmen. Beim Öffnen des Werkzeugs sorgen Auswerfer dafür, dass sich die Halbschale vom Stempel löst.





Abbildung 3.12: Umformen (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

Auf der Vorderseite der Presse wird im Anschluss, bereits während der Aufwärtsbewegung des Stößels, die Halbschale durch den Entnahmeroboter entnommen und eine neue Platine aus dem Ofen angefordert.



Abbildung 3.13: Entnahme der umgeformten Platine (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

### 3.2.2.3 Halbschale vermessen

Die Halbschale wird unmittelbar nach dem Umformvorgang durch ein fest installiertes Messsystem am Anschlussquerschnitt vermessen. Dies erfolgt durch eine Referenzmessung zu einem zu Beginn eingelegten Kalibrierteil. Gemessen werden beiderseits die Steghöhen und die Breite der Halbschale

zweimal in einer Höhe von ca. 30mm und 50mm, wobei diese je nach Baureihe leicht differieren.

Da die Halbschale nach dem Umformvorgang immer noch ca. 500°C besitzt, ist es zwingend notwendig die Wärmeausdehnung bei den Messergebnissen zu berücksichtigen. Dazu ist ein Infrarotsensor verbaut, der die aktuelle Temperatur erfasst. Mithilfe eines einfachen Längenänderungsmodells werden die Abmessungen entsprechend Tabelle 1 bei Raumtemperatur ermittelt.



*Abbildung 3.14: Vermessen der Halbschale (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)*

Sind die Maße innerhalb der vorgegebenen Toleranzen, wird die Halbschale durch den Roboter im Halbschalen- Ladungsträger abgelegt. Ist dies nicht der Fall, wird diese rechts neben dem Roboter auf den NIO Ladungsträger abgelegt. Zusätzlich zur 100% Messung des Anschlussquerschnitts wird jedes 30ste Teil, auf die zur Weiterverarbeitung relevanten Merkmale überprüft (vgl. Kapitel 3.1.2), welche in der nachfolgenden Abbildung 3.15 dargestellt sind.

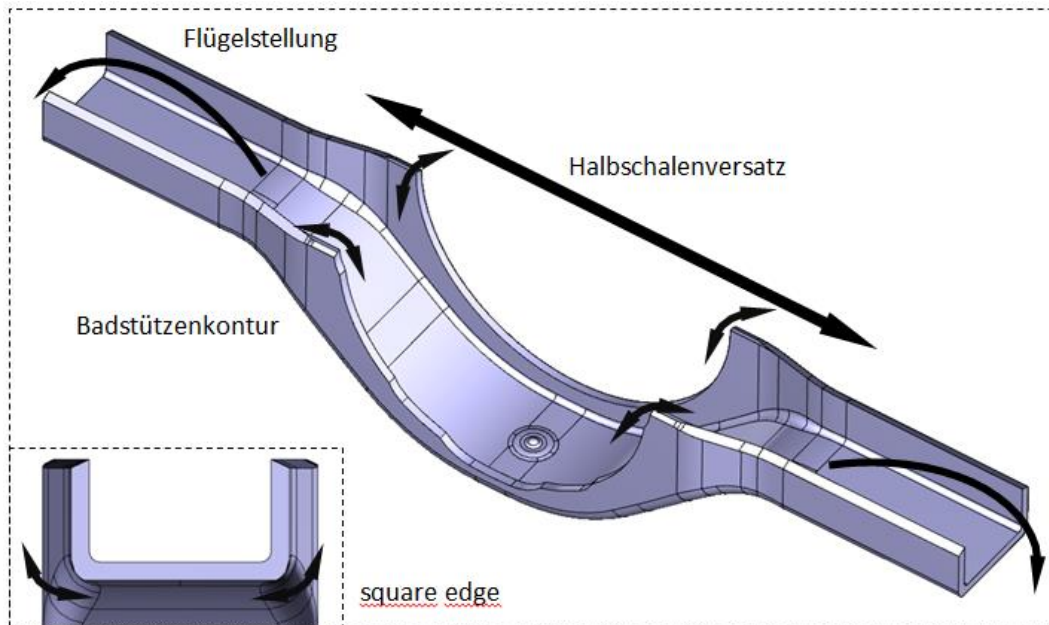


Abbildung 3.15: Zur Weiterverarbeitung relevante Merkmale

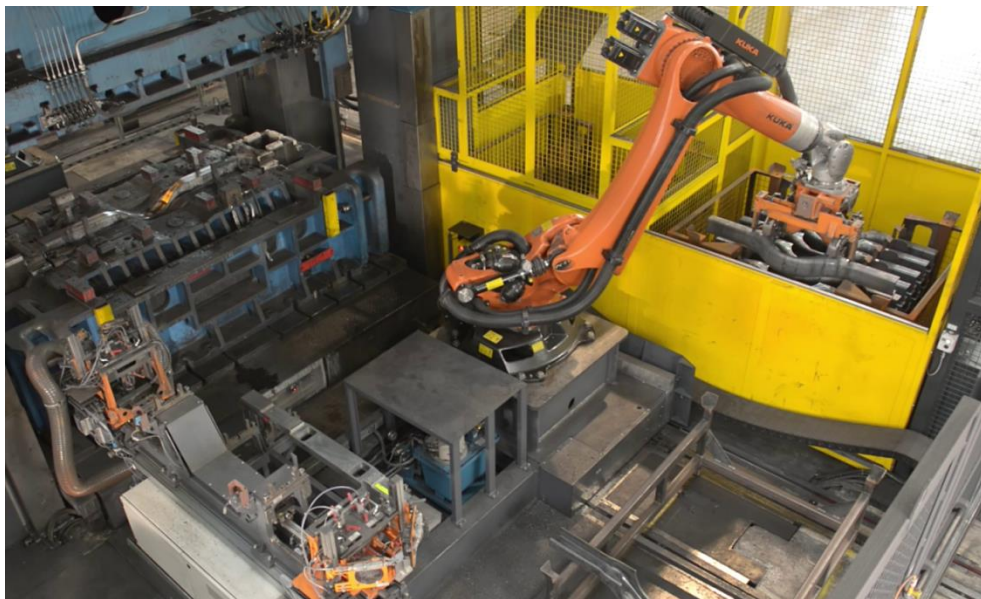


Abbildung 3.16: Ablegen im Halbschalen- Ladungsträger (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

Nachdem die Halbschalen im Ladungsträger abgekühlt sind, werden sie in einer benachbarten Halle weiterverarbeitet. Dazu werden sie im ersten Prozessschritt in einer Sandstrahlanlage gereinigt und dann paarweise auf einem Taktband abgelegt. Von da an werden alle weiteren Schritte aus Abbildung 3.4 in einem vollautomatisierten Prozess durchgeführt.

### 3.3 Messdatendeklaration

Wie bereits erwähnt, werden alle Platinen bereits im Formzuschnitt mittels Datamatrixcode signiert (siehe Kapitel 3.2.1.3). Nachdem dieser Code vor dem Eintritt in den Durchlaufofen eingescannt wird, lässt sich jeder darauffolgende Prozessschritt exakt zuordnen. Nachfolgend ist die festgelegte Deklaration der Seiten dargestellt.

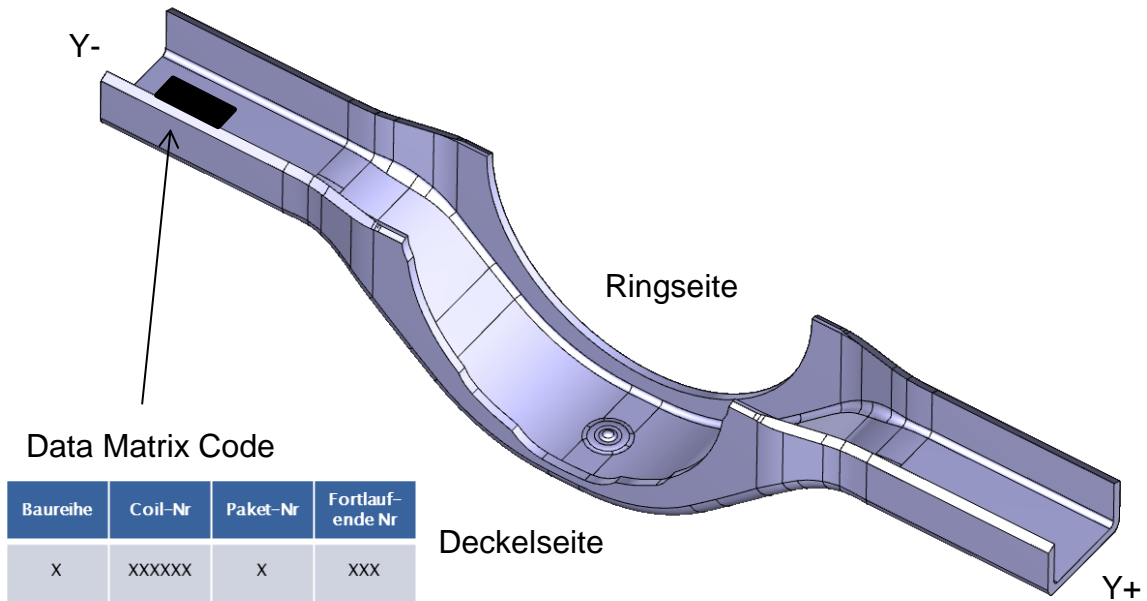


Abbildung 3.17: Messdatenbezeichnung Halbschale

Für die Abmessungen werden also folgende Bezeichnungen verwendet:

	Höhen	Breiten
<b>Y- Seite</b>	Y- Höhe Deckelseite	Y- Breite unten
	Y- Höhe Ringseite	Y- Breite oben
<b>Y+ Seite</b>	Y+ Höhe Deckelseite	Y+ Breite unten
	Y+ Höhe Ringseite	Y+ Breite oben

Tabelle 1: Bezeichnung der Halbschalenabmessungen

## 4 Prozessanalyse

Alle Daten, welche für die Einhaltung von Toleranzen, für die Prozessanalyse sowie für die Dokumentation benötigt werden, werden im SAP spezifisch zu jeder Halbschalenummer gespeichert. Von besonderem Interesse sind hier die Geometriedaten zur Untersuchung der Prozessfähigkeit und der Prozessbeherrschung.

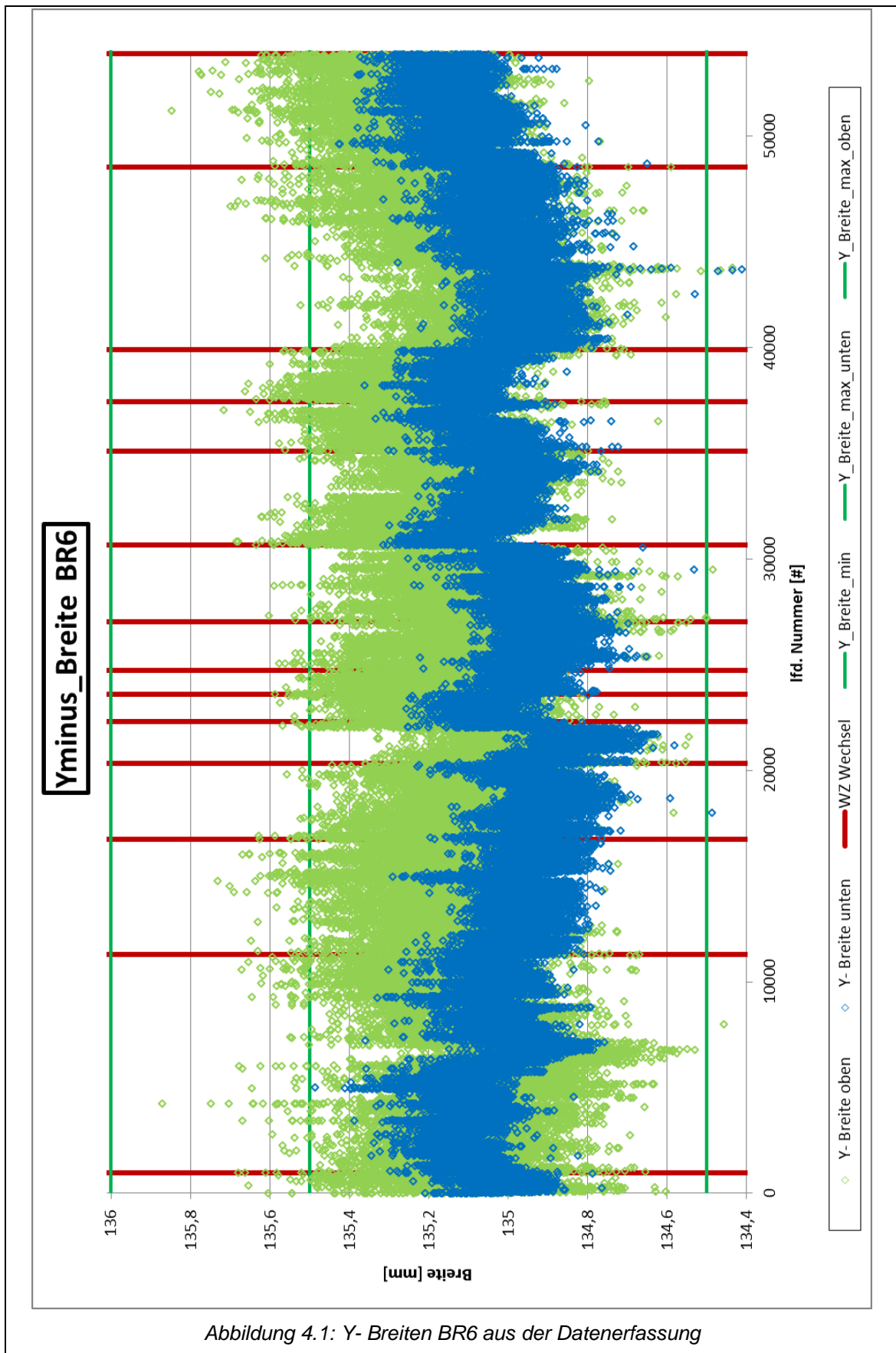
### 4.1 Messdatenanalyse des letzten Produktionsjahres

Zu Beginn der Arbeit werden die Messergebnisse vom letzten Produktionsjahr analysiert. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum ca. 16.000 Halbschalen der Baureihe 4 und ca. 54.000 Halbschalen der Baureihe 6 hergestellt. Um den Lieferforderungen des Kunden nachkommen zu können, wurde insgesamt 14 Mal zwischen den beiden Werkzeugen umgerüstet.

In Abbildung 4.1 sind die Breitenwerte der „Y- Seite“ der Halbschale der BR6 über den genannten Zeitraum grafisch dargestellt. Anhand dieses Beispiels wird eine Analyse der Ergebnisse vorgenommen.



## 4.1.1 Prozessfähigkeit und Prozessbeherrschung



In Abbildung 4.1 sind zu jeder hergestellten BR6 Halbschale im letzten Jahr die durch das Messsystem erfassten Halbschalenbreiten der „Y- Seite“ dargestellt. Die roten Linien, in der Legende als „WZ- Wechsel“ bezeichnet, zeigen einen Umrüstvorgang des Werkzeugs auf Baureihe 4. „Y\_Breite\_min“ kennzeichnet die untere Toleranzgrenze der Breiten, welche für die obere und die untere Breite gleichermaßen gilt. Für die obere Toleranzgrenze der Breiten gilt für „Y- Breite unten“ die Linie „Y\_Breite\_max\_unten“ und für „Y- Breite oben“ die Linie „Y\_Breite\_max\_oben“.

Generell zeigt sich bei Betrachtung der Halbschalenbreiten aus Abbildung 4.1, dass sich nach dem Umrüsten zwischen den Werkzeugen der beiden Baureihen die hergestellten Dimensionen aus dem letzten Presszyklus nur selten reproduzieren lassen. Beispiele sieht man in den Sprüngen bei lfd. Nummer 22.000, 30.500, 40.000...). Dies hat zur Folge, dass im anschließenden Fügeprozess auf diese Änderungen jedes Mal neu reagiert werden muss und somit Zeit verloren geht. Aber auch innerhalb eines Presszyklus treten Schwankungen auf.

Die Ursachen für diese Schwankungen können vielfältig sein. Bei einem Werkzeugwechsel sind vor allem folgende Punkte entscheidend:

- Wiederholgenauigkeit der Werkzeugposition (Setzung, Schmutz)
- Zustand der Wirkflächen (ausgetauschte Verschleißteile)
- Durchgeführte Korrekturmaßnahmen in der Werkzeugeinstellung oder an den Wirkflächen.

Für die Schwankungen innerhalb eines Presszyklus sind auch noch weitere Punkte zu beachten:

- Geänderte dokumentierte Prozessparameter (z.B.: Taktzeit)
- Geänderte, nicht dokumentierte Prozessparameter (z.B.: Einlegeposition der Platine)
- Geometrieschwankungen des Platinenzuschnitts<sup>1</sup>
- Fortschreitender Verschleiß der Wirkflächen

---

<sup>1</sup> Nur teilweise dokumentiert, siehe Kapitel 5.1.1.2

Aufgrund der größtenteils fehlenden Dokumentation sind jedoch nur wenige dieser aufgetretenen Schwankungen einem dieser Punkte direkt zuzuordnen.

#### Mathematische Prozessuntersuchung:

In Abbildung 4.1 ist ersichtlich, dass sich die Streuung der unteren und der oberen Breiten beträchtlich unterscheidet. Um dies zu beziffern, wird für jeden Pressenzyklus<sup>2</sup> die Standardabweichung als Maß für die Streuung berechnet.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}} \quad (4.1)$$

Diese berücksichtigt jedoch nicht die Größe des Toleranzfeldes. Deswegen wird zur weiteren Analyse der Kennwert der Prozessfähigkeit ( $c_p$ ) herangezogen. Um die Lage der Messergebnisse innerhalb des Toleranzfeldes zu beschreiben, wird der Kennwert der Prozessbeherrschung ( $c_{pk}$ ) verwendet, indem für  $\Delta_{krit}$  der kürzeste Abstand zur Toleranzgrenze herangezogen wird.

$$c_p = \frac{T}{6 * \sigma} \quad (4.2)$$

$$c_{pk} = \frac{\Delta_{krit}}{3 * \sigma} \quad (4.3)$$

Im Qualitätsmanagement wird oft von der Six Sigma Methode gesprochen. Diese fordert ein Toleranzfeld von mindestens  $\pm 6 \sigma$ , was einem  $c_p$ -Wert von 2 entspricht. Das heißt, dass bei einer normalverteilten Streuung nur 0,002 Stück von einer Million außerhalb der Toleranz liegen. Aufgrund der produzierten Menge wird hier ein  $c_p$ -Wert von 1,33 als ausreichend definiert, was einem Ausschuss von 66 Stück aus einer Million entspricht.

In Abbildung 4.2 sind diese Analyseparameter für die Messergebnisse aus Abbildung 4.1 bezogen auf den jeweiligen Presszyklus dargestellt.

<sup>2</sup> ...produzierte Halbschalen zwischen einem Werkzeugwechsel. Ein Zyklus besteht aus mehreren Presskampagnen, die oft über eine Dauer von 3 Schichten oder länger durchgeführt werden.

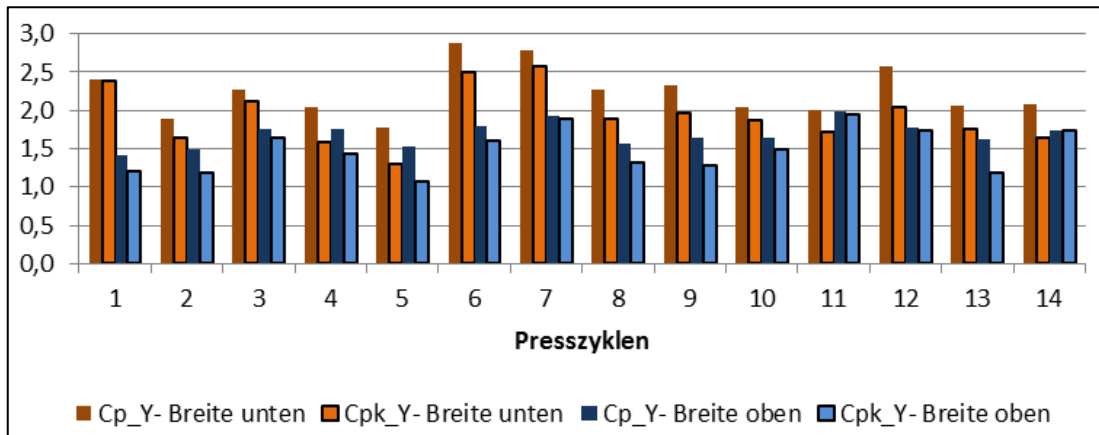


Abbildung 4.2: Cp- und Cpk- Werte von Breiten auf der Y- Seite bezogen auf Presszyklen(BR6)

Bei einem Toleranzfeld von 1mm für „Y- Breite unten“ ergeben sich, nachdem die Messergebnisse einem Plausibilitätscheck unterzogen wurden, in allen Fällen  $c_p$ - Werte von 1,7 bis zu 2,9, was einer guten bis sehr guten Prozessfähigkeit entspricht.

Trotz eines größeren Toleranzfeldes von 1,5mm für „Y- Breite oben“ sind hier die  $c_p$ - Werte tendenziell etwas kleiner, jedoch immer noch auf einem guten Niveau von 1,4 bis fast 2.

Die  $c_{pk}$ - Werte sind erwartungsgemäß etwas kleiner als die Werte für die Prozessfähigkeit. Für „Y- Breite unten“ liegen diese zwischen 1,3 und 2,6 auch etwa im gleichen Streubereich und für „Y- Breite oben“ zwischen 1,1 und 2 ebenso. Hier wird der festgelegte Grenzwert also teilweise unterschritten, was bedeutet, dass ein sicheres Produzieren nicht gewährleistet ist (siehe Abbildung 4.3: Presszyklus 1,2,5,8,9,13).

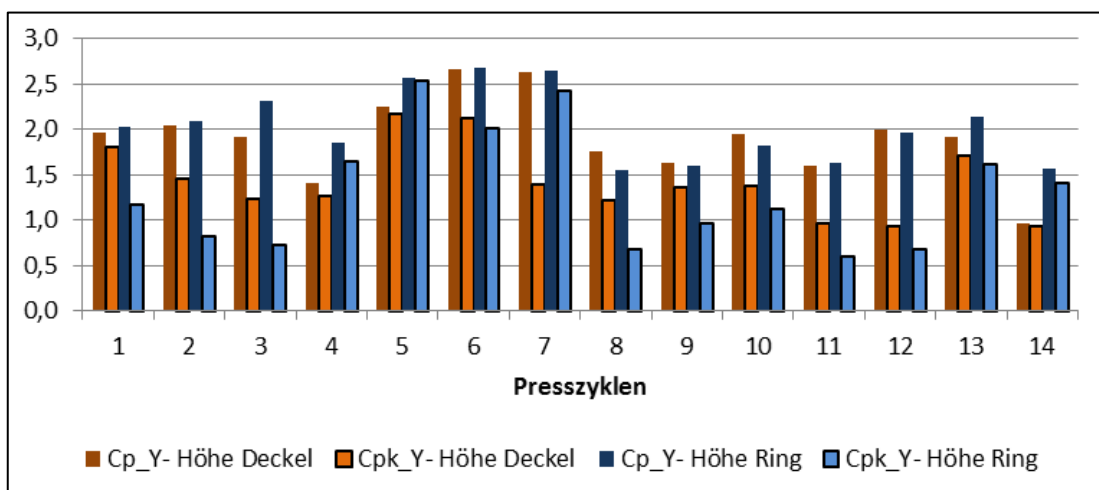


Abbildung 4.3: Cp- und Cpk- Werte von Höhen auf der Y- Seite bezogen auf Presszyklen(BR6)

In Abbildung 4.3 sind für die dargestellten Breiten aus Abbildung 4.1 die  $c_p$ - und  $c_{pk}$ - Werte der zugehörigen Halbschalenhöhen bezogen auf den jeweiligen Presszyklus dargestellt<sup>3</sup>. Die Form der Darstellung veranschaulicht, dass die Prozesswerte hier noch stärker schwanken und vor allem die Unterschiede zwischen den  $c_p$ - und  $c_{pk}$ - Werten größer sind. Das Toleranzfeld ist für alle Höhen der BR6 dasselbe und beträgt 0,7mm. Die  $c_p$ -Werte schwanken hier von knapp unter 1 bis maximal 2,6 und die  $c_{pk}$ -Werte von 0,6 bis 2,5. Das Delta zwischen Prozessfähigkeit und Prozessbeherrschung liegt hier in Extremfällen bei 1,6, was darauf hinweist, dass bei prinzipiell sehr geringer Streuung der Abmessungen der Mittelwert dieser Streuungen am Rand der Toleranzgrenze liegt und somit bei kleinsten Veränderungen Ausschuss verursacht.

## 4.2 Zwischenfazit

Die Ergebnisse zeigen, dass die  $c_p$ -Werte größtenteils sehr gut sind, was eine wesentliche Voraussetzung für die Prozessbeherrschung darstellt. Die  $c_{pk}$ -Werte sind allerdings teilweise stark unter dem festgelegten Niveau. Um einen stabilen Prozess zu gewährleisten, müssen die Schwankungen, wie sie bisher aufgetreten sind, vermieden werden. Eine rückwirkende Analyse der aufgetretenen Schwankungen ist aufgrund der fehlenden Dokumentation kaum möglich. Deshalb werden im folgenden Kapitel die eingangs erwähnten Einflussgrößen mit aktuellen Ergebnissen bei dokumentierten Randbedingungen analysiert.

---

<sup>3</sup> „Y- Höhen BR6 aus der Datenerfassung“ siehe Anhang.

## 5 Analyse der Einflussgrößen

Im Folgenden wird eine Auswahl an Faktoren (siehe Abbildung 1.4) betrachtet, welche einen nachgewiesenen Einfluss auf die Halbschalengeometrie besitzen. Die Auflistung ist chronologisch, also nach dem jeweiligen Auftreten im Prozess angeordnet.

### 5.1 Einflüsse vor dem Umformen

Bereits vor dem eigentlichen Umformprozess bestimmen die Maßhaltigkeit der Platinengeometrie und die Einlegeposition der Platine im Werkzeug die spätere Halbschalengeometrie.

#### 5.1.1 Platinengeometrie (Coildicke & Platinenzuschnitt)

Die Platinengeometrie wird durch die Dicke, welche durch das Walzen erzeugt wird, und durch den Platinenzuschnitt, welcher mittels Plasmaschneiden hergestellt wird, vorgegeben.

##### 5.1.1.1 Änderung der Halbschalengeometrie bei Paketwechsel

Auf einem Platinenladungsträger befinden sich immer zwei, aber maximal drei gesonderte Coilpakete. Das heißt, es kommt während eines Ladungsträgers auch entsprechend oft zu einem Wechsel des Coils oder nur des Pakets. Meistens bleibt so ein Wechsel in der Halbschalenherstellung auch ohne Folgen, jedoch gehen gelegentlich auch sprunghafte Änderungen von bis zu 0,3 mm in den Abmessungen einher. Dabei sind diese Änderungen nicht bei allen Maßen gleich, sondern wie auch im folgenden Beispiel oft unterschiedlich.

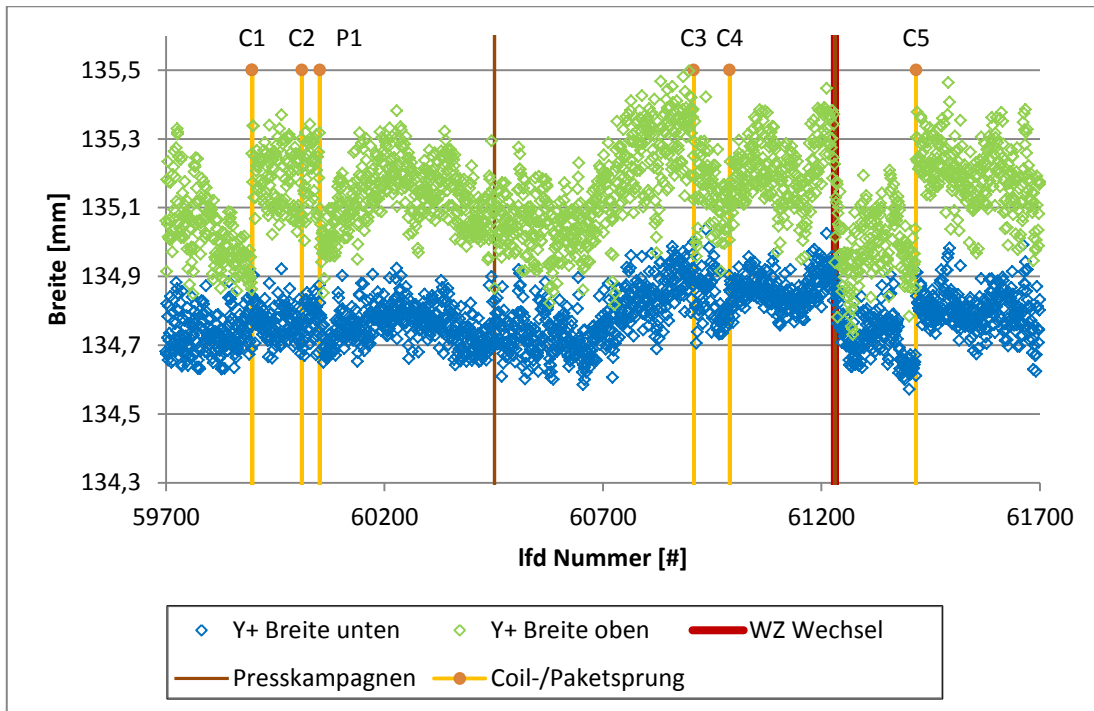


Abbildung 5.1: Sprünge in den Messergebnissen aufgrund von Coil-, bzw. Paketwechsel (BR6 Y+ Breite)

In Abbildung 5.1 sind beispielhaft die Breiten der „Y+Seite“ von 2.000 Halbschalen der BR6 dargestellt. Die in der Legende als „Coil-/Paketsprung“ bezeichneten Linien sind fortlaufend nummeriert, wobei „C“ für einen Wechsel des Coils und „P“ für einen Wechsel des Pakets steht.

Beim ersten Coilsprung „C1“ ist zu erkennen, dass dieser Wechsel fast ausschließlich auf die obere Breite Einfluss hat. Die obere Halbschalenbreite verändert sich sprunghaft um fast 0,3 mm. Beim zweiten Coilsprung „C2“ verändern sich die Messergebnisse dagegen nicht. Der anschließende Wechsel des Pakets „P1“ verursacht dagegen wieder eine signifikante Veränderung der oberen Halbschalenbreite. Hervorzuheben ist abschließend der Coilsprung „C5“, da hier ein Einfluss auf die oberen und auch auf die unteren Halbschalenbreiten festgestellt wird.

Bei den Halbschalenhöhen sind die coil- und paketwechselbedingten Änderungen ähnlich. Zusätzlich zeigen sich aber auch Fälle, bei denen der Wechsel nur gesondert auf die Höhe oder auf die Breite Einfluss nimmt.

Um die Ursachen für die Schwankungen der Halbschalengeometrie, bedingt durch Coil- bzw. Paketwechsel, feststellen zu können, soll im Folgenden eine Analyse auf Basis der vorhandenen Dokumentation erfolgen.

### 5.1.1.2 Zuordnung der Dokumentation zu den hergestellten Halbschalen

Wie bereits aus Kapitel 3.2.1 bekannt, werden die Stahlbandherstellung und der Platinenzuschnitt auf Einhaltung der Toleranzen überprüft. Die Art und Weise der Dokumentation und deren Zuordnung zur Halbschalengeometrie sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

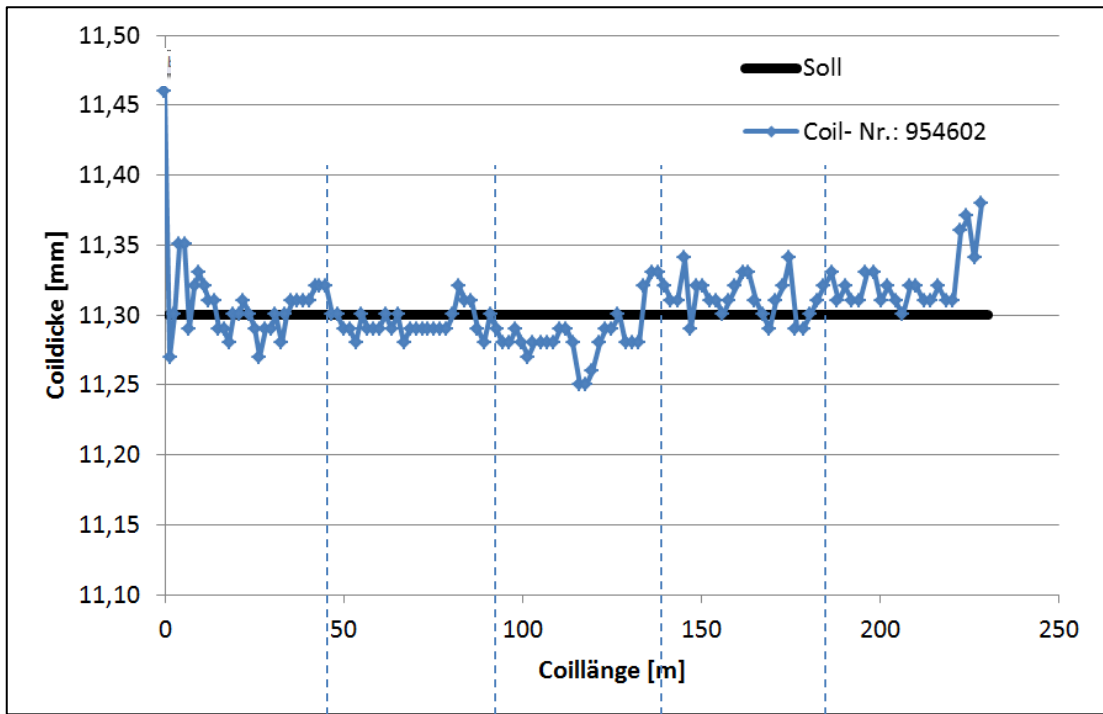
#### Zuordnung Dickenschrieb zur Halbschale

In Abbildung 5.2 ist der Dickenschrieb eines Coils (BR6) dargestellt. Dieser wird im weiteren Prozess in fünf Blechpakete unterteilt, wobei die Nummerierung, im Sinne der Abwicklung des Coils von der Haspel, am Coilende mit eins beginnt. Da auf der Halbschale nur die Paketnummer festgehalten ist und die folgende dreistellige Nummer beliebig zustande kommt, ist dies die kleinste mögliche Zuordnung zum Dickenschrieb.

Die einzige Möglichkeit für eine Zuordnung des Dickenschriebs zu den Halbschalen besteht darin, die Dickenschriebe paketweise zu Mitteln und die Standardabweichung als Maß für die Aussagekraft des Mittelwerts heranzuziehen.

Aus dem Dickenschrieb aus Abbildung 5.2 lässt sich erkennen, dass die Abweichungen großteils wesentlich geringer sind als die erlaubten Toleranzen. Lediglich am Anfang und am Ende des Coils treten des Öfteren, so wie auch hier, größere Schwankungen auf. Die Ursachen hierfür sind auf den Herstellungsprozess zurückzuführen.





Paketnummer	5	4	3	2	1
Mittelwert [mm]	11,308	11,297	11,285	11,310	11,321
Standardabw. [mm]	0,036	0,011	0,016	0,016	0,021

Abbildung 5.2: Dickenschrieb eines Coils(BR6) mit paketweiser Zuordnung der Mittelwerte

### Zuordnung Maßtabelle zur Halbschale

Die Platinen werden automatisiert durch zwei Plasmaschneidanlagen aus zwei parallelen Blechen herausgeschnitten. Die Maßtabelle ist ein handschriftlich geführter Zettel zur Dokumentation von beiderseits (Y+ und Y-) gemessener Platinenbreite und Fasenwinkel und wird für beide Schneidanlagen in separaten Tabellen geführt. Falls ein Maß grenzwertig oder gar außerhalb der Toleranz ist, wird eine Korrektur der Lichtbogenspannung vorgenommen.

Auch hier ist aufgrund der Tatsache, dass sich die laufende Nummer nicht nachvollziehen lässt, nur eine Zuordnung bis zum jeweiligen Paket möglich. Das heißt, dass bei durchschnittlich 6 Blechen pro Paket auch durchschnittlich nur 6 Platinen von 96 (BR6) vermessen werden. Außerdem werden die Platinen eines Pakets von zwei separaten Plasmaschneidanlagen hergestellt, die zwar gleich ausgeführt sind, jedoch

aufgrund von Einstellung und Verschleiß nie die exakt gleiche Qualität liefern.

In Abbildung 5.3 sind die Platinenbreiten der „Y+ Seite“ und der „Y- Seite“ für beide Brenner separat aufgetragen. Dazu wurden die Messergebnisse aus der Dokumentation über einen Zeitraum von ca. zwei Monaten auf die jeweiligen Coilpakete gemittelt.

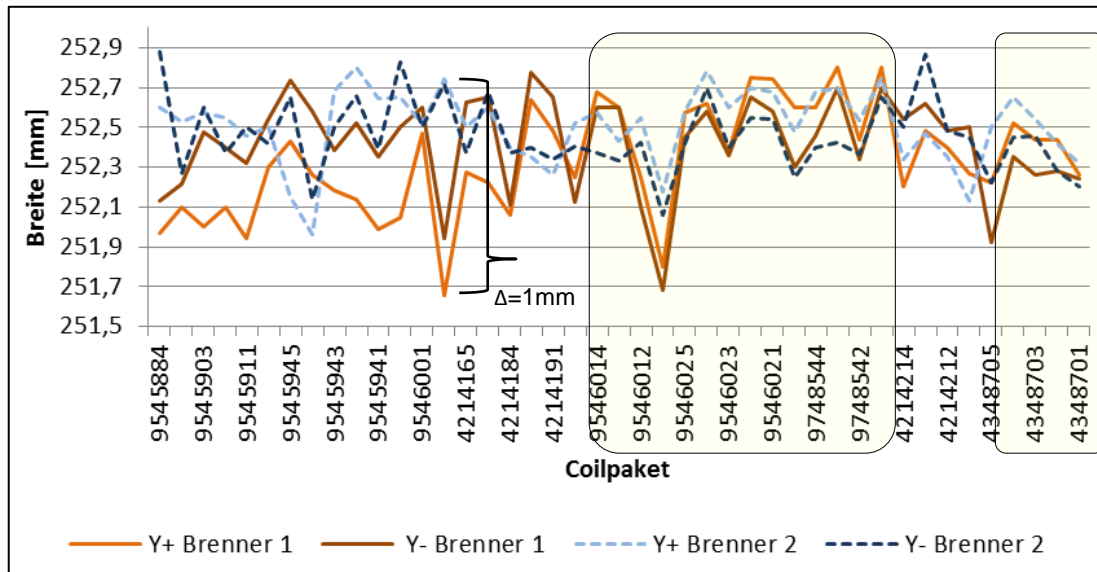


Abbildung 5.3: Mittelwerte der Platinenbreiten je Coilpaket und je Brenner

Wie man aus den Verläufen aus Abbildung 5.3 erkennen kann, betragen die Unterschiede zwischen den Breitenwerten der beiden Brenner teilweise bis zu 1 mm. Außerdem liegen bei individueller Betrachtung eines Brenners die Unterschiede zwischen den Breiten der „Y+“ und der „Y- Seite“ in manchen Fällen auch bei bis zu 0,4 mm. Die gelb markierten Coils wurden mittig geschnitten, da in manchen Fällen die Randoberfläche des Coils von mangelhafter Qualität ist, sodass hier ein anderer Schachtelplan, der keinen Versatz der Platinen aufweist, verwendet werden muss. Da die Streuung der Breiten hier tendenziell kleiner aussieht, soll dieser Umstand später noch näher untersucht werden.

#### Zwischenfazit:

Eine Zuordnung der vorhandenen Dokumentation von Platinendicke und Platinenzuschnitt zu den Messergebnissen aus der Halbschalenproduktion ist also nur mit paketweisen Mittelungen möglich. Diese groben Zuordnungen

lassen eine verwertbare Analyse kaum zu. Speziell im Fall des Platinenzuschnitts sind aufgrund der beiden Brenner zu viele Störgrößen für eine Mittelung vorhanden.

Bezüglich der Coildicke wird dennoch der Versuch gestartet, Abhängigkeiten zu eruieren. Insgesamt werden dazu 30 Coil- und Paketsprünge über alle acht Abmessungsgrößen betrachtet. Daraus kann zumindest eine prinzipielle Tendenz der vorzeichengleichen Abhängigkeit von Coildicke zu Halbschalenbreite festgestellt werden, wobei der Einfluss auf die oberen Breiten merklich größer ist. Bei den Halbschalenhöhen tritt hingegen der gegenteilige Effekt auf, also dass Breiten größer werden und die Höhen abnehmen. Dies lässt sich theoretisch nur durch den überlagerten Einfluss der Platinenbreiten erklären, also dass bei geringen Breiten der umzuformenden Platine die Halbschalenhöhen niedriger resultieren.

### 5.1.1.3 Versuch mit vollständig vermessenem Ladungsträger

Auf Basis der vorangegangenen Erkenntnisse wird als nächste Maßnahme also ein Platinenladungsträger mit 200 Platinen der BR6 vollständig bezüglich Dicke und Breite im relevanten Querschnitt vermessen. Bei der Auswahl des Ladungsträgers wird darauf geachtet, dass dieser mindestens drei verschiedene Coils beinhaltet und dass einer dieser Coils mittig geschnitten ist.

In Abbildung 5.4 & Abbildung 5.5 ist beispielhaft die „Y- Halbschalenhöhe“<sup>1</sup> von 250 Halbschalen dargestellt. Der vermessene Ladungsträger beginnt ab Stück Nr. 28 mit dem ersten Coilsprung. Die erfassten zugehörigen Platinenabmessungen sind auf der Sekundärachse abgebildet. Die Platinen von Stück-Nr. 60 bis 172 sind jene, die mittig geschnitten wurden.

---

<sup>1</sup> „Y+ Halbschalenhöhe“ siehe Anhang.

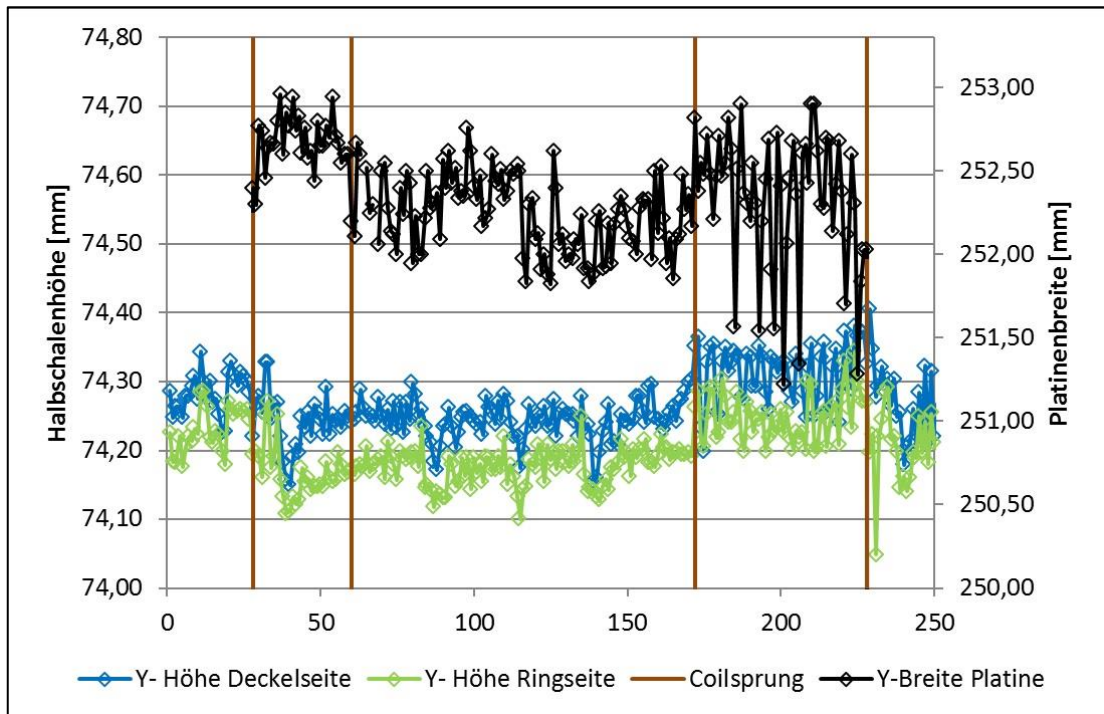


Abbildung 5.4: „Y- Halbschalenhöhe“ abh. von Platinenbreite (BR6)

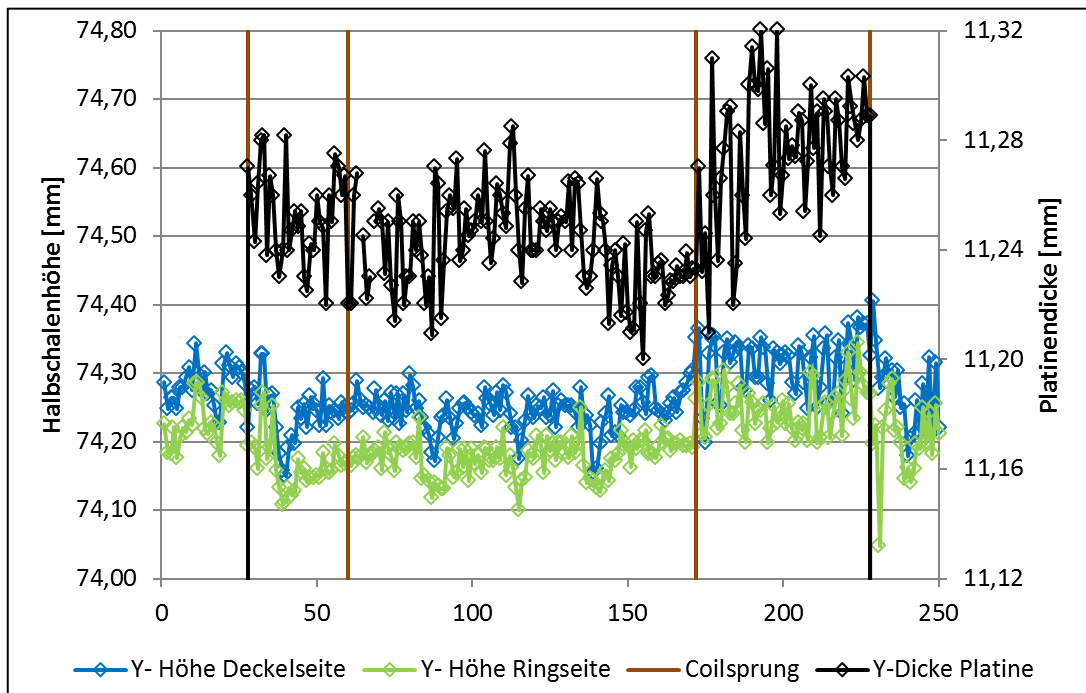


Abbildung 5.5: „Y- Halbschalenhöhe“ abh. von Platinendicke (BR6)

Wie man in Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 sieht, ist der erste Wechsel bei Nr. 60 in den Messergebnissen der Halbschalen kaum bis gar nicht zu detektieren, obwohl tendenzielle Änderungen in den Eingangsgrößen (Dicke, Breite) gemessen werden. Auch zwischen den Coilsprüngen kann man keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen der Platinengeometrie und

der resultierenden Halbschalengeometrie erkennen. Lediglich beim zweiten Sprung bei Stück-Nr. 172 kann man einen signifikanten Sprung bei den Halbschalenhöhen erkennen, welcher sich auch in Platinendicke und Platinenbreite abzeichnet. Der mittig geschnittene Coil zeigt ebenfalls keine Auffälligkeiten in Dicke und Zuschnitt.

Aus der gesamtheitlichen Betrachtung aller acht Messgrößen lässt sich des Weiteren nur noch ein tendenzieller Zusammenhang zwischen den Streuungen der oberen Halbschalenbreiten und jenen der Platinenbreiten zeigen. Der vermutete direkte Zusammenhang zwischen der Platinengeometrie und den resultierenden Halbschalenabmessungen hat sich nur in Teilbereichen bestätigt (siehe Abbildung 5.6).

Abbildung 5.6 dient noch einmal zur Veranschaulichung der Korrelation von Platinengeometrie und Halbschalengeometrie. Die maximalen Schwankungen betragen bei den Platinenbreiten bis zu 1,5 mm und bei den Platinendicken bis zu 0,12 mm. Unter der Annahme, dass die zwar geringeren Abweichungen in der Platinendicke dennoch denselben Einfluss haben wie die Abweichungen in der Platinenbreite, sind diese mit einem Faktor 10 multipliziert und mit der Platinenbreite zu einem Vergleichswert aufaddiert. Dadurch zeigt sich noch einmal deutlich, dass nur in Teilbereichen ein direkter Zusammenhang zwischen Platinengeometrie und Halbschalengeometrie nachgewiesen werden kann (rot eingerahmt: keine Korrelation, schwarz eingerahmt: Korrelation).

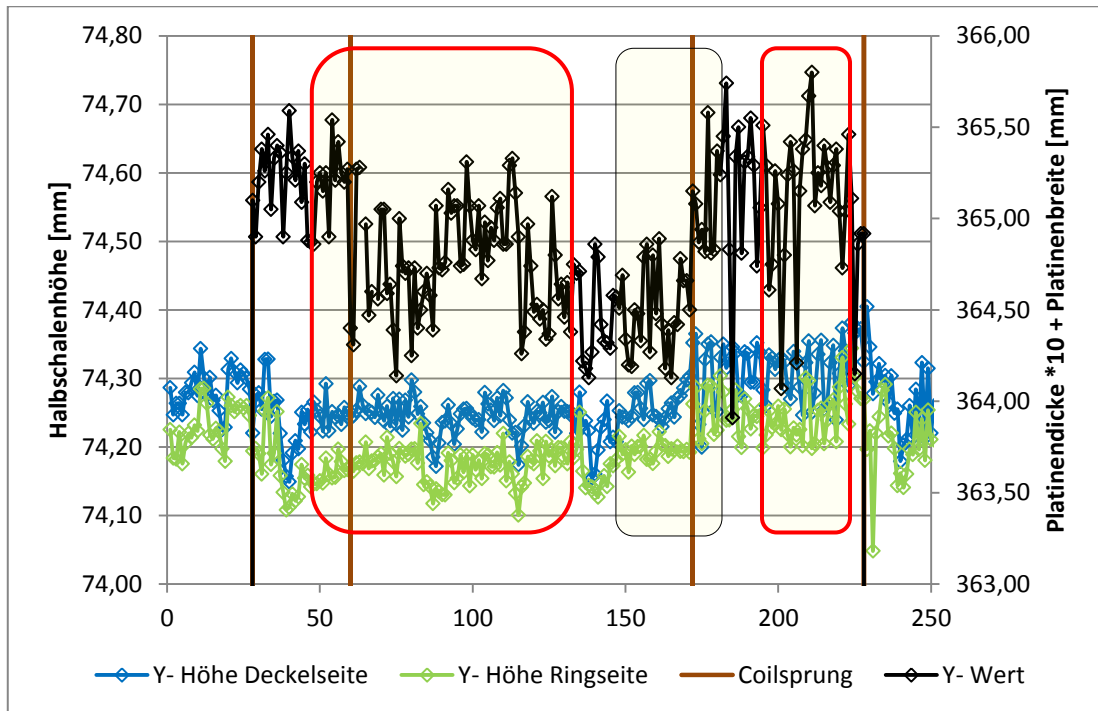


Abbildung 5.6: Halbschalenhöhe abh. von Vergleichswert

#### 5.1.1.4 Versuch mit lasergeschnittenen Platinen

Im Zuge dessen, dass der Platinenzuschnitt zwangsweise, im Vergleich zu den geforderten Toleranzen der fertigen Halbschale, relativ große Toleranzen gestattet, wird abschließend ein Versuch mit 52 lasergeschnittenen Platinen der BR 4 gestartet. Mit diesem Verfahren sind wesentlich höhere Genauigkeiten möglich, sodass die Abweichungen in Breite und Fase auf einen Bereich von  $\pm 0,2\text{mm}$  und  $\pm 0,5^\circ$  reduziert werden können. Das entspricht einer Verbesserung um den Faktor 5 in der Breite und sogar um den Faktor 6 beim Fasenwinkel.

In Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 sind die erzielten Messergebnisse der „Y-Seite“ mit den lasergeschnittenen Platinen im Vergleich zu den konventionell hergestellten Platinen dargestellt. Die als „Änderung“ bezeichnete Linie definiert den Punkt, ab dem die lasergeschnittenen Platinen umgeformt werden.

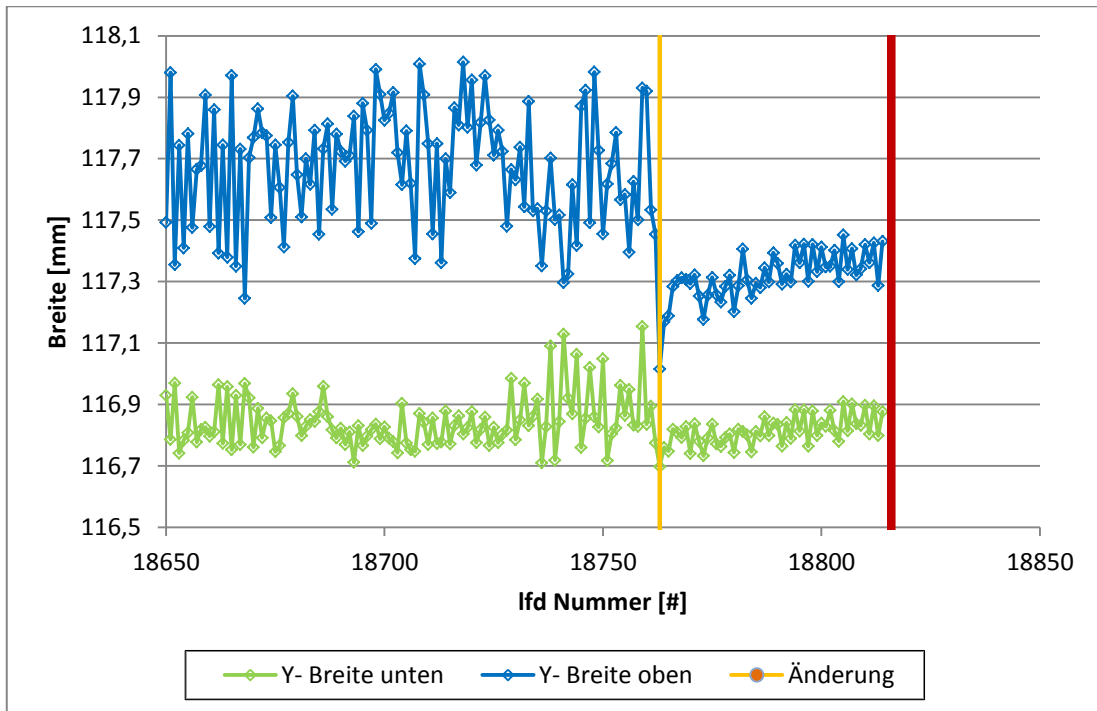


Abbildung 5.7: Y- Breite mit lasergeschnittenen Versuchsplatinen (BR4)

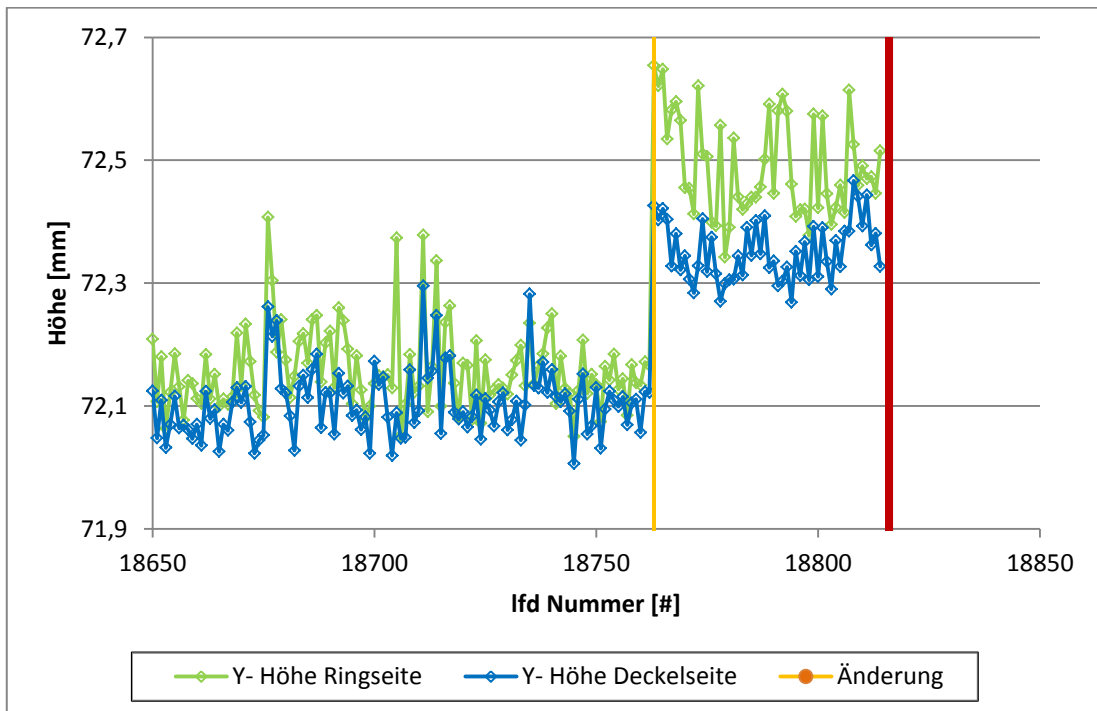


Abbildung 5.8: Y- Höhe mit lasergeschnittenen Versuchsplatinen (BR4)

Aus Abbildung 5.7 ist ersichtlich, dass die Reduzierung der Streuung bei den Platinenbreiten eine immense Verbesserung bei der Streuung der oberen Halbschalenbreiten hervorruft. Damit können folglich dieselben Erkenntnisse aus dem vorherigen Versuch (siehe Kapitel 5.1.1.3) bestätigt werden. Bei den unteren Halbschalenbreiten ist der Effekt aufgrund der ohnehin schon

kleineren Streuung zwar geringer, aber immer noch erkennbar. Bei den Halbschalenhöhen in Abbildung 5.8 ist dagegen keine Verbesserung der Streubreite zu erkennen.

Die Verschiebung der jeweiligen Mittelwerte in der Breite als auch in der Höhe können wieder zweierlei Ursachen haben. Nämlich einerseits ein anderer Mittelwert der Breite beim Platinenzuschnitt und andererseits, da ein Coilsprung vorliegt, eine Änderung der Coildicke.

Da hier im speziellen Fall der Halbschalenbreite ein Sprung von 0,4mm im Mittel vorliegt, kann dieser Umstand jedoch aus bisherigen Erkenntnissen nicht allein von der Änderung der Coildicke kommen, sodass zumindest auch der Einfluss vom Platinenzuschnitt auf die resultierende Halbschalenbreite bestätigt werden kann.

Für die Zukunft ist ein Versuch mit einer größeren Stückzahl von 200 – 300 Stück lasergeschnittener Platinen geplant. Hierbei sollte dann darauf geachtet werden, dass die plasmageschnittenen Platinen, welche vor den Versuchs- Platinen umgeformt werden, ebenfalls vermessen werden. So kann man dann bei neuerlichen Niveausprüngen in den Abmessungen besser nachvollziehen, woraus diese resultieren.

Weiters könnte dieser Versuch dann auch aufgrund der hohen Genauigkeit im Zuschnitt zur nahezu selektiven Betrachtung des Dickeneinflusses genutzt werden. Bei der gewählten Stückzahl wären mehrere Pakete involviert, welche für Untersuchungen herangezogen werden könnten.

### **5.1.2 Platinenpositionierung in der Presse**

Die Platinenpositionierung in der Presse ist eine Größe mit wesentlichem Einfluss. Sobald die Platine nicht zentrisch im Werkzeug liegt, hat dies negative Konsequenzen auf die Halbschalengeometrie. Die Manipulation der Platine vom Ofenauslauf in das Werkzeug erfolgt durch einen Beladeroboter mit bauteilgebundenem Greiferhandling.



## 5.1.2.1 Einflusskette auf Endposition im Werkzeug

Nachdem die Platine im Ofen auf Umformtemperatur erwärmt ist, wird diese mit einem Feeder aus dem Ofen genommen und auf eine Förderkette abgelegt. Anschließend erfolgt über zwei Anschläge eine Ausrichtung normal zur Förderrichtung. Der mögliche Längsversatz, bedingt durch das Ablegen der Platine am Ofeneinlauf, wird hier nicht korrigiert.

Im nächsten Schritt erfasst der Beladeroboter die Platine mit dem Greiferhandling durch sechs über Federn vorgespannte Greifarme. Zur Lagebestimmung befinden sich ringseitig und auf der „Y-Seite“ baureihenspezifische Anschläge, welche durch höhere Federsteifigkeiten auf diesen Seiten erreicht werden sollen (siehe Abbildung 5.9 grüne Pfeile). Die toleranzbedingten Abweichungen werden somit auf der gegenüberliegenden Seite aufgenommen (siehe Abbildung 5.9 rote Pfeile). Eine Überwachung dieser Sollposition ist allerdings ebenfalls nicht vorgesehen.

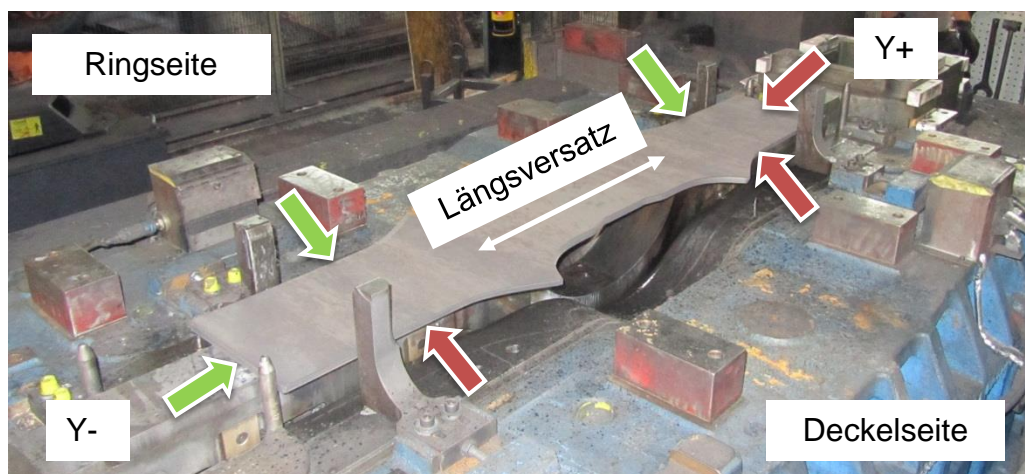


Abbildung 5.9: Platinenanschlüge im Werkzeug & Greifarmpositionen Beladeroboter (Pfeile)

Anschließend wird die Platine im Werkzeug abgelegt. Wie in Abbildung 5.9 erkennbar, befinden sich hier ebenfalls sechs Anschläge, welche ein Verrutschen der Platine beim Öffnen der Greifarme verhindern sollen. Nachdem die maximal tolerierten Platinenbreiten und die Wiederholgenauigkeit des Beladeroboters berücksichtigt werden müssen, ist dies jedoch nur bis zu einem gewissen Grad möglich. Vor allem bei kleineren Abmessungen der Platine ist somit stets ein Spiel vorhanden.

Im Folgenden sollen zwei Fehler aus der Halbschalenherstellung näher erläutert werden, welche von der Einlegeposition der Platine im Werkzeug abhängen.

### 5.1.2.2 Halbschalenversatz

Als Halbschalenversatz wird ein Fehler in der Halbschalenherstellung bezeichnet, der eine Verschiebung der Kontur beschreibt. Durch den vorgegebenen Umriss der Platine ist es notwendig, dass die Platine ohne Längsversatz und ohne Verrutschen im Werkzeug umgeformt wird, um das gewünschte Profil verzerrungsfrei zu erhalten.

#### Ursachen für einen Halbschalenversatz:

- Position der Werkzeug- Längsanschläge

Die meisten Ursachen für das Entstehen von Halbschalenversatz könnten durch exakt positionierte spielfreie Längsanschläge verhindert werden, da ein Verrutschen beim Öffnen der Greifarme oder eine fehlerhafte Einlegeposition dadurch nicht möglich wären. Aufgrund der erwähnten Toleranzen ist dies jedoch nicht realisierbar. Erschwerend kommt hinzu, dass kein Referenzsystem für die Anschlagabstimmung vorhanden ist, so dass es auch vorkommen kann, dass die Abstände zwischen den Anschlägen auch entsprechend größer sind als notwendig.

- Falsch programmierte Einlegeposition  
(innerhalb der Werkzeug- Längsanschläge)

Aufgrund einer fehlerhaft programmierten Einlegeposition der Platine durch den Beladeroboter kann es vorkommen dass, obwohl die Platine im Greiferhandling zentriert wird, diese mit Längsversatz im Werkzeug abgelegt wird.

- Nicht korrigierter Längsversatz im Greiferhandling  
(innerhalb der Werkzeug- Längsanschläge)

Grundsätzlich soll die Platine beim Aufnehmen durch den Beladeroboter in ihrer Längsachse zentriert werden, wobei das aber nicht immer

geschieht und im laufenden Prozess nicht kontrolliert werden kann. Bei gegebenem Längsversatz der Platine am Ofenauslauf kann es vorkommen, dass die Federkraft des entsprechenden Greifarms nicht ausreicht, diesen zu korrigieren, so dass die Platine in einer nicht definierten Lage verbleibt. Bei starkem Längsversatz kommt es sogar vor, dass der gegenüberliegende Greifarm gar keinen Platinenkontakt aufweist (siehe Abbildung 5.10).

Überschreitet der Längsversatz allerdings keinen der Werkzeug-Längsanschläge, so wird der Fehler nicht bemerkt und die umgeformte Platine weist einen Halbschalenversatz auf.

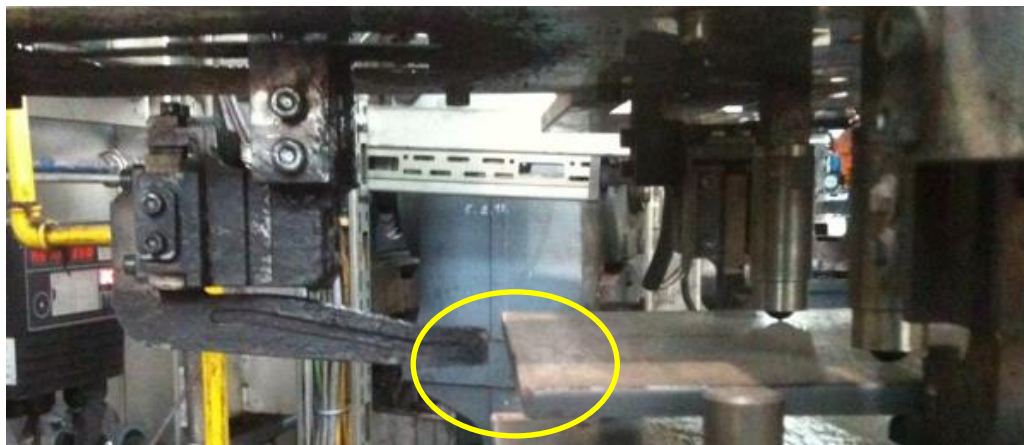


Abbildung 5.10: Längsversatz bei geschlossenem Greiferhandling

- Reibungsverhältnisse im Werkzeug

Bei Kontakt des Stempels mit der Platine kommt es zu einer Biegesituation, ähnlich der eines Trägers (Platine) auf zwei Stützen (Luftboden) unter einer Einzellast (Stempel). Durch unterschiedliche Reibzustände im Werkzeug, aufgrund von Ablagerungen, Schmutz und inhomogener Schmierung kann es dazu kommen, dass eine Platine trotz korrekter Ablageposition auf einer Seite stärker in das Werkzeug eingezogen wird als auf der anderen Seite.

Momentan erfolgt eine Abstimmung der Anschläge und der programmierten Einlegeposition nur korrigierend bei Detektion von Halbschalenversatz. Dabei ist es aufgrund der eben aufgezählten Möglichkeiten oft schwierig, die richtige Ursache ausfindig zu machen. Ist der Halbschalenversatz durch einen Längsversatz im Greiferhandling bedingt, ist eine Korrektur der

Einlegeposition nicht sinnvoll, da auf einen labilen Zustand eine dauerhafte Korrektur folgt. Besser wäre es, den Greifarmanschlag auf der „Y-Seite“ durch einen Sensor zu prüfen, um so diese Fehlerquelle ausschließen zu können. Zusätzlich ist es hilfreich, die Gleitführungen der entsprechenden Greifarme regelmäßig zu warten, um den Kraftaufwand beim Zentrieren zu reduzieren. Um gleichmäßigere Reibungsverhältnisse im Werkzeug zu erhalten, zeigt sich außerdem, dass eine regelmäßige Werkzeugreinigung auch während der laufenden Produktion( alle 200-300 Stück) zweckmäßig ist.

### 5.1.2.3 Abweichung des „square edge- Radius“

Dieser Fehler beschreibt eine abweichende Ausprägung der Längskanten, bedingt durch unterschiedliche Stauchintensitäten. (siehe Abbildung 5.11).

Der Seitenabstand der Längskante wird durch den „square edge- Radius definiert.



Abbildung 5.11: Square Edge „Y-Seite“ BR4: Ringseitig stärkere Stauchung

### Ursachen für eine unsymmetrische Stauchung:

- Falsch programmierte Einlegeposition (innerhalb der Werkzeug- Seitenanschläge)

Die Einlegeposition ist auch für das Ausprägen der Längskante entscheidend, wobei hier die maßgeblichen Faktoren der seitliche Versatz und die Verdrehung sind. Durch eine außermittige Einlegeposition der Platine ist beim Stauchvorgang auf einer Seite mehr Material als auf der

anderen, so dass diese intensiver gestaucht wird. Ein kleinerer square edge-Radius ist die Folge.

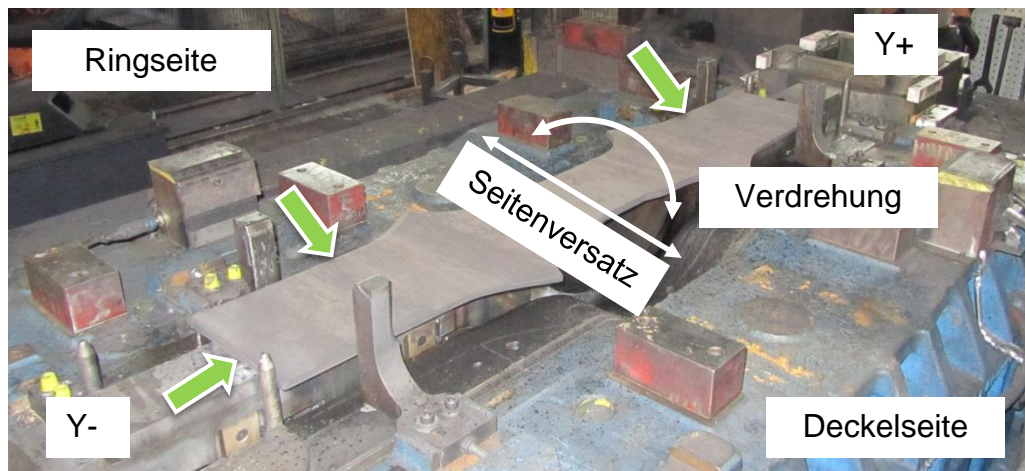


Abbildung 5.12: Seitenversatz und Verdrehung der Platine im Werkzeug

- Halbschalenhöhe

Je nach Einlegeposition ist auch die resultierende Halbschalenhöhe ein Indiz für das Ausprägen der Längskanten. Bei zentrischer Einlegeposition ohne Seitenversatz und Verdrehung ist jene Seite mit der geringeren Halbschalenhöhe auch jene mit dem kleineren square edge- Radius, da diese Seite stärker gestaucht wird.

#### 5.1.2.4 Ursachenanalyse bezüglich abweichender square-edge- Radien BR4

Zum Untersuchungszeitpunkt kann auf den Halbschalen der BR4 eine signifikant stärkere Stauchung auf der Ringseite festgestellt werden (siehe Abbildung 5.11). Die Halbschalenhöhen sind zu diesem Zeitpunkt auf der Ringseite allerdings um ca. 0,2mm höher. Unter Annahme einer zentrischen, nicht versetzten Einlegeposition der Platine lassen sich diese Aussagen nicht miteinander verknüpfen.

Um die Einlegeposition zu prüfen, wird nach dem Einlegen einer erwärmten Platine der Prozess gestoppt. In Abbildung 5.13 ist diese von der „Y- Seite“ grafisch dargestellt. Die nicht dargestellte „Y+ Seite“ zeigt dasselbe Bild. Man kann unschwer erkennen, dass die Platine ringseitig am Anschlag anliegt. Ein Beweis dafür, dass es sich um keinen Einzelfall handelt, liefert die



abgeschliffene Flanke des ringseitigen Anschlags. Außerdem sind die mechanischen Anschläge des Greiferhandlings ebenfalls auf der Ringseite angebracht.



Abbildung 5.13: „Y-Seite“ einer erwärmten Platine BR4 im Werkzeug

Um die square-edge Radien anzupassen, müsste im nächsten Schritt also die Einlegeposition der Platinen Richtung Deckelseite korrigiert werden. Aufgrund eines unerwarteten Produktionsstillstandes kann dies jedoch nicht mehr durchgeführt werden.

Dieser Zustand sollte bei laufender Produktion umgehend korrigiert werden. Aufgrund des Stillstandes besteht nun jedoch die Möglichkeit, zuerst die Differenz in den Halbschalenhöhen zu korrigieren (vgl. Kapitel 5.2.1.5). Dadurch kann die Einlegeposition anschließend, unabhängig von diesem Umstand, den square edge- Radien entsprechend angepasst werden. Außerdem müsste bei unmittelbarer Korrektur der Einlegeposition nach der Korrektur der Halbschalenhöhen eine neuerliche Anpassung der Einlegeposition erfolgen.

#### 5.1.2.5 Überprüfung der Platinenanschlüge im Werkzeug

Nachdem die Einlegeposition im Prozess nicht mehr korrigiert werden kann, erfolgt in Zusammenarbeit mit der Firma 3D- Messtechnik GmbH eine Vermessung der seitlichen Platinenanschlüge im Werkzeug. Damit soll überprüft werden, wo sich diese im Vergleich zum theoretischen Werkzeugmittelpunkt aktuell befinden. Wie bereits erwähnt, existiert kein

geeignetes Referenzsystem, um die Position dieser Anschläge zu bestimmen oder auszurichten. Einstellungen erfolgen lediglich im Sinne von Korrekturen relativ zur bisherigen Position. Deswegen sind die nachfolgenden Ergebnisse auch wenig überraschend.

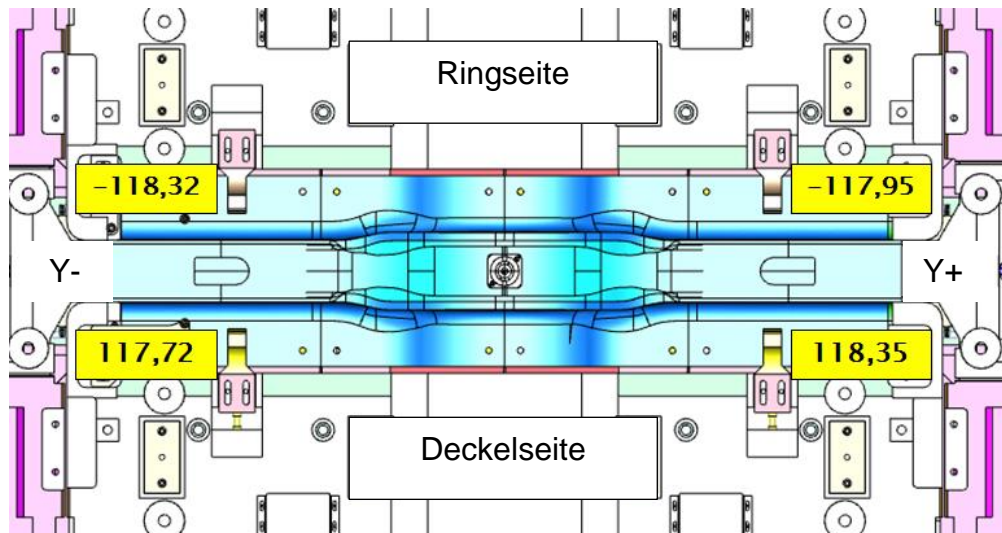


Abbildung 5.14: Ergebnisse aus Vermessung der Platinenanschlätze BR4

Wie man in Abbildung 5.14 sehen kann, liegen die Gesamtabstände bei 236,04mm auf der „Y-Seite“ bzw. 236,30mm auf der „Y+ Seite“. Der geforderte Mindestabstand anhand einer maximal tolerierten Platinenbreite, unter Berücksichtigung der Wärmedehnung bei 650°C, liegt bei ca. 235,2 mm. Das bedeutet selbst auf der „Y- Seite“ immer noch ein Restspiel von 0,84mm. Neben dem größeren Abstand auf der „Y+ Seite“ liegt des Weiteren auch eine Verdrehung von 0,5 mm über der Länge vor.

Aus Kapitel 5.1.2.4 geht hervor, dass die durch das Greiferhandling abgelegte Platine ringseitig auf der „Y+ Seite“ und auf der „Y-Seite“ gleichermaßen streift. Im Zusammenhang mit der Verdrehung der Platinenanschlätze bedeutet das, dass die Einlegeposition durch das Greiferhandling ebenso verdreht ist.

In Verbindung mit der Anpassung des square edge- Radius sollte das Greiferhandling mit den Platinenanschlätzen entsprechend der theoretischen Werkzeugmitte ausgerichtet werden. Dabei ist zu beachten, dass die deckelseitige Anschlagposition aufgrund der eingehenden Toleranzeinflüsse etwas größer gewählt werden muss.

## 5.2 Einflüsse während des Umformens

In diesem Kapitel sollen die variablen Größen betrachtet werden, welche unmittelbar auf den Umformprozess Einfluss haben. Schwerpunktmäßig steht hier der Verschleiß im Vordergrund. Die Werkzeugschmierung wird nicht näher behandelt.

### 5.2.1 Verschleißzustand des Werkzeugs

Beim Umformen kommt es aufgrund der hohen Umformkräfte zu entsprechend hohen Beanspruchungen der Wirkflächen. Verschleißbedingt resultieren Veränderungen in der Oberfläche der Wirkflächen und daran gekoppelt Veränderungen in der Halbschalengeometrie.

Wie man der nachfolgenden qualitativen Darstellung des Kraft- und Geschwindigkeitsverlaufs entnehmen kann, wirken die größten Kräfte beim Stauchen. Das heißt, die am stärksten beanspruchten Komponenten des Werkzeugs sind die Prägeleisten, die die Kraft einbringen und der Luftboden, über welchen die Kraft abgestützt wird. Dementsprechend sollen diese Werkzeugkomponenten im Folgenden näher betrachtet werden.

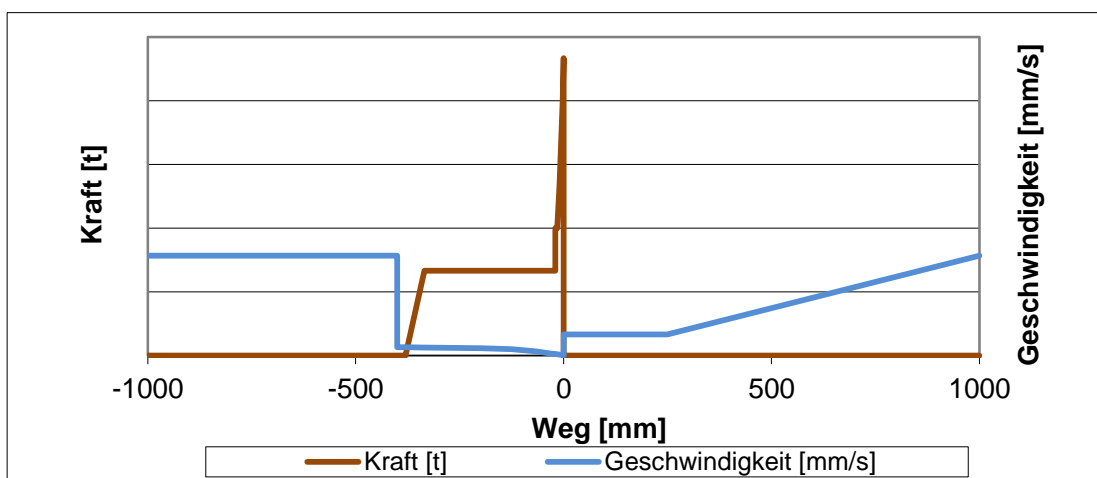


Abbildung 5.15: Kraft- Weg- Geschwindigkeitsverlauf Umformung (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)



## 5.2.1.1 Beanspruchung der Prägeleisten

In Abbildung 5.16 ist die „Y- Seite“ vom Oberteil dargestellt. Der Stempel ist zur besseren Ansicht der Prägeleisten ausgebaut. Im Bildausschnitt sind vier Leisten verbaut, jeweils zwei gerade (außen) und zwei geschwungene (innen). Die Prägeleisten sind aus dem Warmarbeitsstahl der Firma Böhler Edelstahl mit der Bezeichnung W300. Dieser ist zusätzlich für den Einsatz auf einen Wert von 52+2 HRC vergütet.

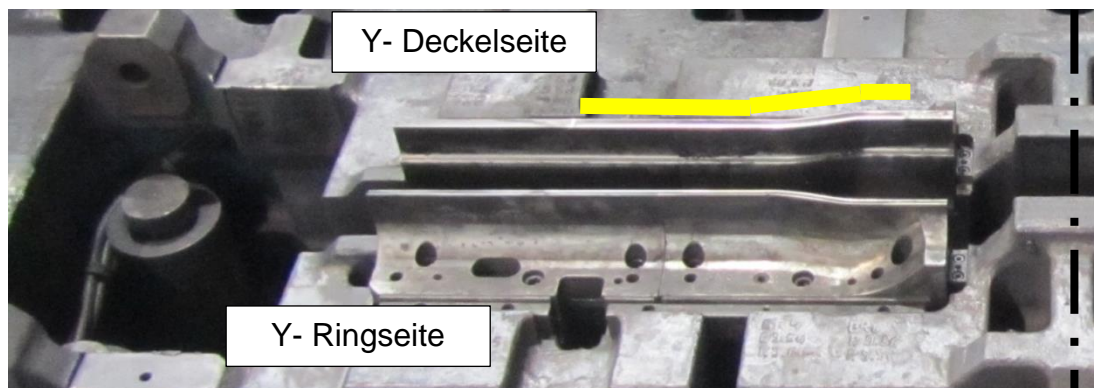


Abbildung 5.16: Prägeleisten der „Y- Seite“

Die gelbe Kontur in Abbildung 5.16 zeigt die in Kontakt stehende Länge der Prägeleisten mit der Halbschale beim Stauchen/Prägen. Im Fall der BR6 beträgt diese Wirklänge eines Quadranten 420 mm. Damit lässt sich die theoretisch maximale Belastung berechnen (siehe Tabelle 2). Wenn man davon ausgeht, dass die Presskraft von 12,7MN im unteren Totpunkt zu 100% über die Prägeleisten übertragen wird, so ergibt dies bei einer Stegbreite von 11,3 mm eine maximale Flächenpressung von ca. 685 N/mm<sup>2</sup>. Zum Vergleich: Der vergütete W300 besitzt selbst bei einer Temperatur von 300°C noch ein  $R_{p0,2}$  von ca. 900 N/mm<sup>2</sup>. Da aus den Warmzugversuchen<sup>2</sup> auch bekannt ist, dass die Streckgrenze des geglühten VM460N bei ca. 200 N/mm<sup>2</sup> liegt, kann selbst bei einer geringeren Temperatur der Platinen davon ausgegangen werden, dass die errechneten Werte bei weitem nicht erreicht werden. Sobald also das Stauchen/Prägen abgeschlossen ist, wird die überschüssige Presskraft durch die Hauptdistanzen aufgenommen.

<sup>2</sup> Siehe Anhang: Warmzugversuche, Datenblatt W300.

	Baureihe 4		Baureihe 6	
Presskraft in UT	13.200.000,0	N	12.700.000,0	N
Breite	12,5	mm	11,3	mm
Länge (1/4)	485,0	mm	420	mm
<b>Flächenpressung</b>	<b>544,33</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>685,30</b>	<b>N/mm<sup>2</sup></b>

Tabelle 2: Maximale Belastung der Prägeleisten durch das Werkzeug

Ebenso wie die Flächenpressung muss auch das angreifende Moment im kritischen Querschnitt berücksichtigt werden. Zur Abbildung des Öffnungswinkels der Schweißnaht ist die Wirkfläche schräg ausgeführt, was im Zuge der Krafteinbringung zu einem resultierenden Moment im kritischen Querschnitt führt (siehe Abbildung 5.17 links). Bedingt durch die Werkstoffermüdung kann es somit zu Rissen im Bereich der Kerbe (gelber Pfeil) kommen (siehe Abbildung 5.17 rechts)

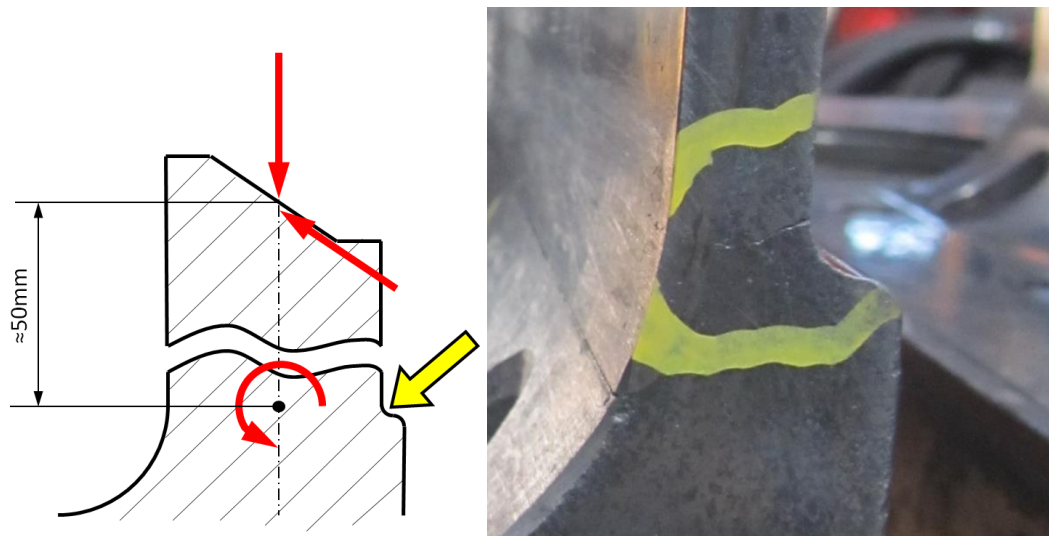


Abbildung 5.17: Kritischer Querschnitt Prägeleiste (links: Kräfteverhältnis, rechts: Beispiel einer eingerissenen Prägeleiste)

### 5.2.1.2 Beanspruchung des Luftbodens

Das Gegenstück zu den Prägeleisten ist der Luftboden. Dieser besitzt eine über den Querschnitt leicht konvexe Oberfläche, um die geforderte Konkavität der Halbschale zu erzeugen. Im Bereich der Längskanten wurden die Wirkflächen, welche vorher aus dem Guss selbst gearbeitet waren,

bereits durch Platten aus W300 ersetzt. Trotz der Erhöhung der Belastbarkeit durch Verwendung eines Spezialstahls sind die hohen Kräfte beim Prägen in Verbindung mit einer durch den Materialfluss bedingten Relativbewegung noch immer der Grund dafür, dass der Luftboden im Bereich der auszubildenden Längskanten einer der verschleißintensivsten Bereiche ist (siehe Abbildung 5.18).



Abbildung 5.18: Verschleiß am Luftboden BR6 („Y+ Seite“)

### 5.2.1.3 Verschleiß der Wirkflächen und Einfluss auf Halbschalenhöhe

Wie bereits erwähnt, wird mithilfe der Prägeleisten die Kontur des Schweißstegs abgebildet. Im anschließenden Fügeprozess werden zwei Halbschalen ohne zusätzliche Bearbeitung miteinander verschweißt. Daher ist es wichtig, dass die Kontur über die ganze Länge plan ist, weil ansonsten Abweichungen im Schweißspalt entstehen, die durch die Schweißnaht nur bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen werden können.

Um diese Planheit bei der fertigen Halbschale zu erreichen, muss im Werkzeug eine Bombierung vorgesehen werden, die die elastische Rückfederung kompensiert. Diese beträgt bei den Prägeleisten der BR6 ca. 4,8mm und bei der BR4 entsprechend der längeren Schenkel in etwa 5,1mm.

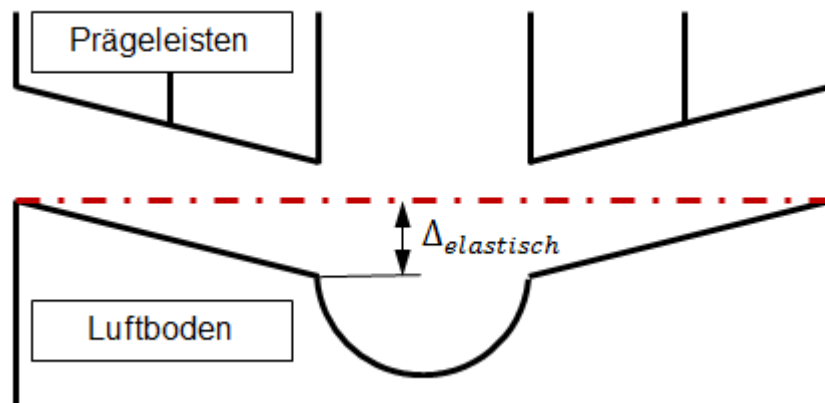


Abbildung 5.19: Überbiegung der Halbschale

Durch die verschleißbedingte Setzung der Prägeleisten kommt es zu einer Abweichung dieser Planheit. Besonders gefährdet ist dabei der Bereich an den äußeren Enden, also im Bereich des Anschlussquerschnitts, da hier die Platine bewusst etwas breiter ausgeführt ist. Dies hat zum Zweck, dass die Stauchhöhe erhöht wird, um so die Innenradien des Querschnitts in diesem Bereich noch kleiner generieren zu können, und um den ungewollten Materialfluss nach außen zu kompensieren.

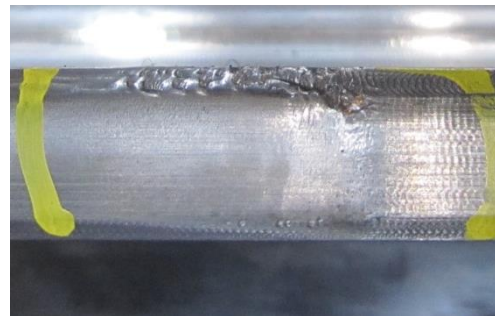


Abbildung 5.20: Verschleißbedingte Setzung einer geraden Prägeleiste BR6

Da dieser erhöht beanspruchte Bereich in der Regel nicht mehr als 20 mm umfasst, wird dieser Bereich nicht durch das Messsystem detektiert (siehe Abbildung 5.21). Somit wird zwar meistens eine repräsentative Höhe für 95% der Länge gemessen, jedoch kann es vorkommen, dass durch unbemerktes Fortschreiten dieser Setzung die zu fügenden Halbschalen einander am Ende bereits berühren und die Weiterverarbeitung behindern.

Genauso wie die Setzung der Prägeleisten hat auch die verschleißbedingte Setzung des Luftbodens Einfluss auf die Halbschalenhöhe (siehe Abbildung 5.21). Im Idealfall sollte der Verschleiß auf allen vier Bereichen der

Längskante gleich ausfallen, jedoch ist dies in der Realität nicht immer der Fall.

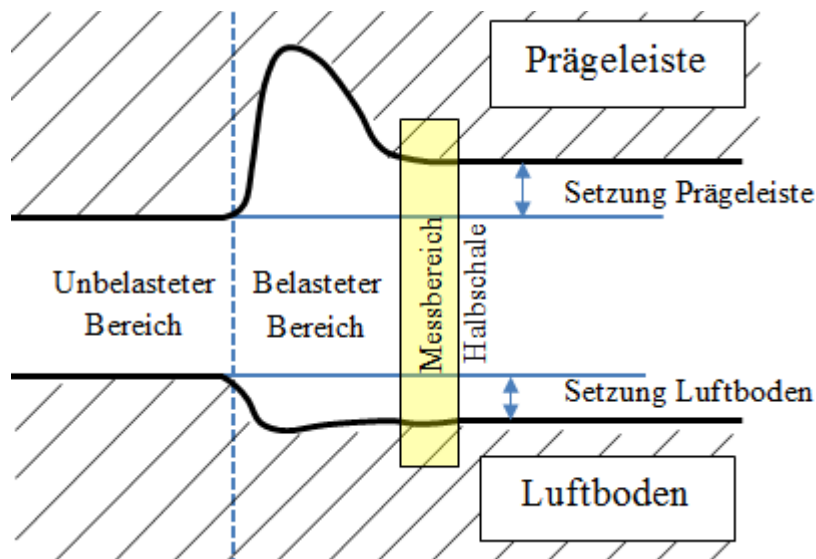


Abbildung 5.21: Einfluss des Verschleißes auf die Halbschalenhöhe

In Abbildung 5.21 sind die vorangehend beschriebenen Einflüsse des Verschleißes im Bereich der äußeren Enden qualitativ dargestellt. Die Bombierung wurde hier nicht berücksichtigt.

Der Einfluss der Setzung bei Prägeleiste und Luftboden auf die Halbschalenhöhe ist hier gut erkennbar. Ebenso sieht man, dass die überdurchschnittliche Setzung der Prägeleiste durch die Aufbreitung der Platine vom Messsystem an der Halbschale nicht detektiert wird. Die generelle Setzung, welche ansonsten relativ gleichmäßig verläuft, wird jedoch mit dem Messsystem erfasst und beeinflusst die gemessene Halbschalenhöhe.

#### 5.2.1.4 Ursachenanalyse bezüglich abweichender Höhe bei BR6

Zum Untersuchungszeitpunkt haben die Prägeleisten der BR6 ca. 15.000 Arbeitshübe seit der letzten Überarbeitung<sup>3</sup> vollzogen. Die Halbschalenhöhen auf der „Y+ Ringseite“ resultieren seit Beginn dieser Korrektur um ca. 0,2 mm geringer als die anderen drei Höhen.

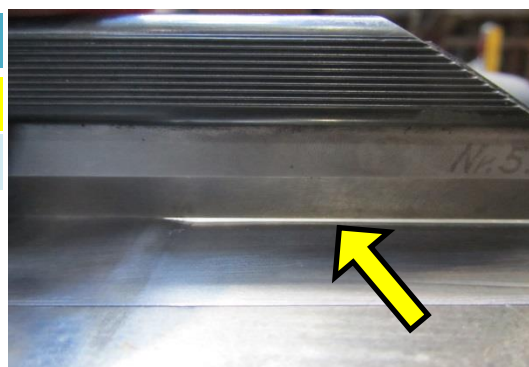
<sup>3</sup> Im Zuge einer Überarbeitung werden die Unebenheiten der Wirkflächen weggefräst und zum Wiederherstellen der ursprünglichen Höhe Bleche untergelegt.

Optisch kann man 15.000 Hübe später erkennen, dass auf der besagten Seite in den Endzonen eine stärkere Beanspruchung vorliegt. Da die Höhenunterschiede allerdings schon seit Beginn der Überarbeitung bestanden, kann die Prägeleiste als Ursache ausgeschlossen werden.

Im Gegensatz dazu wurde seit dem Einbau der W300 Platten im Luftboden in diesem Bereich keine Überarbeitung vorgenommen. Da dieser Einbau vor der Korrektur der Prägeleisten war, kann man also annehmen, dass die gemessenen Halbschalenhöhen den Verschleißzustand des Luftbodens widerspiegeln. Mithilfe eines Haarlineals und einer Spaltmaßlehre kann diese Annahme in weiterer Folge relativ einfach bestätigt werden. Dazu wird das Haarlineal im Bereich der Längskante auf den unbelasteten Bereich des Luftbodens aufgesetzt und mit der Spaltmaßlehre über dem belasteten Bereich die Differenz abgenommen.

	Y-	Y+
Ringseite	-0,25mm	<b>-0,15mm</b>
Deckelseite	-0,30mm	-0,35mm

*Tabelle 3: Messergebnisse Luftbodensetzung  
BR6*



*Abbildung 5.22: Messen der  
Luftbodensetzung*

Wie man sehen kann, ist die Setzung genau im Bereich der „Y+ Ringseite“ am wenigsten fortgeschritten, weswegen die Halbschalenhöhen auf dieser Seite auch entsprechend niedriger sind. Somit lässt sich auch der erhöhte Verschleißzustand auf der entsprechenden Prägeleiste erklären, da gegenüber den anderen Bereichen hier eine stärkere Stauchung stattfindet.

Abschließend erfolgt durch die Zusammenarbeit mit der Firma 3D-Messtechnik GmbH der abschließende Beweis, dass der Höhenunterschied nicht aus den Prägeleisten resultiert. Dazu werden mit einem tragbaren



Messarm die Prägeleistenhöhen im verbauten Zustand in Relation zu den Hauptdistanzauflagen taktile vermessen.



Abbildung 5.23: Vermessung der Prägeleistenhöhen mit Messarm

Abbildung 5.23 zeigt die Vermessung anhand eines festgelegten Abtastmusters. Dieses ist speziell an den Enden und beim Übergang von der äußeren auf die innere Prägeleiste feiner gerastert. Die Messpunkte werden auf der tiefer liegenden stempelnahen Innenseite erfasst, welche der gemessenen Halbschalenhöhe entsprechen. Insgesamt werden 96 Punkte erfasst.

In Abbildung 5.24 sind die Datenreihen von allen vier Seiten grafisch dargestellt. Dazu wurden die Datenreihen der „Y+ Seite“ jener der „Y- Seite“ überlagert. Auf der Ordinate ist die Prägeleistenhöhe ausgehend von den Hauptdistanzflächen aufgetragen. Die Abszisse beschreibt den Abstand zur Werkzeugmitte. Gezeigt wird ein 100 mm langer Ausschnitt der gesamten Prägeleistenlänge. Dieser Ausschnitt ist in Abbildung 5.23 mit einem gelben Strich gekennzeichnet und umfasst den Bereich von der unbelasteten Prägeleiste über das äußere Ende inklusive dem Messbereich der Messstation. Die tendenzielle Steigung zur Mitte hin zeigt die bereits erwähnte Bombierung (siehe Abbildung 5.19).

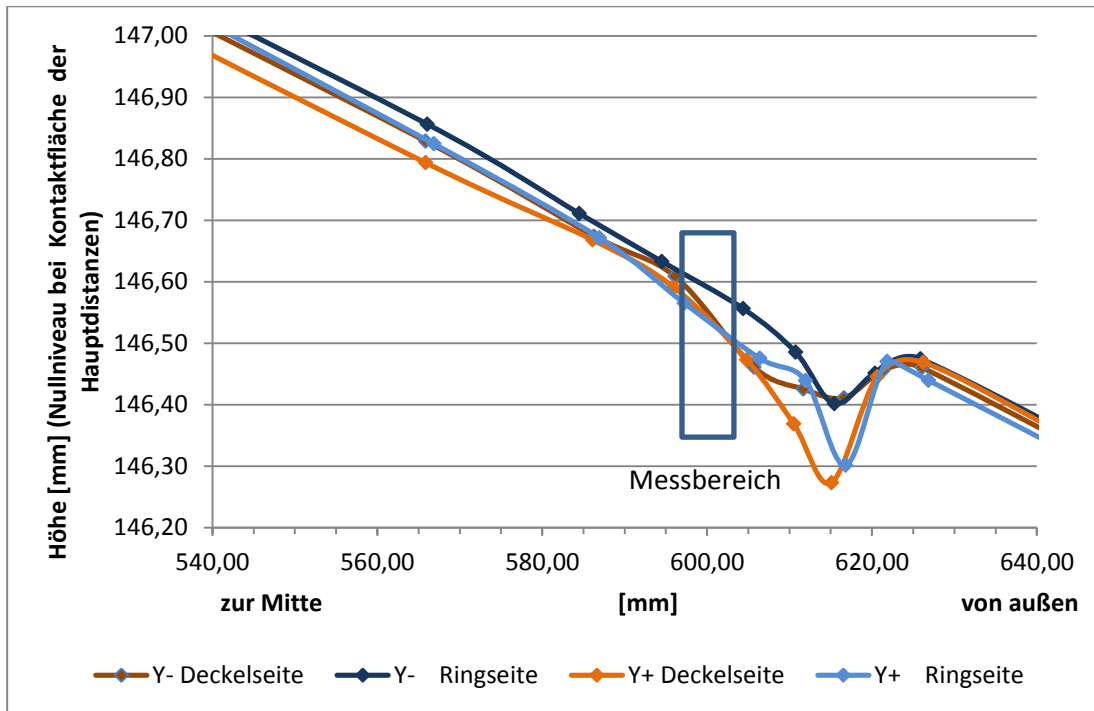


Abbildung 5.24: Ergebnisse aus der Vermessung der Prägeleistenhöhen BR6

Wie man dem Diagramm entnehmen kann, ist die Prägeleistenhöhe der „Y+ Ringseite“ im Bereich der Halbschalenhöhenmessung auf etwa gleichem Niveau wie die anderen Prägeleisten. Dadurch bestätigt sich die Annahme, dass die Prägeleiste nicht für das Abweichen der Halbschalenhöhe auf dieser Seite verantwortlich ist.

Generell ist der Zustand der Prägeleisten nach 15.000 Arbeitshüben, mit Ausnahme des Randbereichs von 600 – 620 mm, noch sehr gut. Die verschleißbedingte Setzung ist hier noch kaum erkennbar. Im Randbereich dagegen ist vor allem auf der „Y+ Seite“ bei beiden Prägeleisten bereits eine Setzung von 0,2 mm vorhanden. Für die „Y+ Ringseite“ bestätigt sich dadurch die Annahme der erhöhten Beanspruchung. Warum die Deckelseite ebenfalls so stark beansprucht ist, ist nicht 100% geklärt. Vermutlich liegt es aber auch an der ebenfalls leicht geringeren Setzung des Luftbodens im Vergleich zu den Setzungen auf der „Y- Seite“.

Durch den Umstand, dass die Halbschalenseiten immer gegengleich gefügt werden („Y+ Seite“ mit „Y- Seite“), ist die „Nasenbildung“ an den Enden der „Y+ Seite“ aufgrund der Setzung der Prägeleisten momentan noch kein großes Problem, doch es sollte auf jeden Fall weiter beobachtet werden.



## 5.2.1.5 Ursachenanalyse bezüglich abweichender Höhen bei BR4

Im Fall der BR4 ist eine fehlerhafte Anpassung neuer Prägeleisten Thema der Untersuchung. Aufgrund von entdeckten Rissen wurden drei Prägeleisten durch neue ersetzt und an das Niveau der verbliebenen angepasst. Betroffen war die gesamte Deckelseite mit Ausnahme der inneren Leiste auf der „Y+ Seite“ (siehe Abbildung 5.25). Die verbliebenen Prägeleisten wurden mit dem Einbau der neuen Leisten nicht überarbeitet. Diese hatten zum Untersuchungszeitpunkt also bereits ca. 14.000 Arbeitshübe geleistet. Die in Abbildung 5.25 als „14.000+“ bezeichneten Leisten sind bereits noch länger im Einsatz, wurden aber beim damaligen Austausch mit überarbeitet.

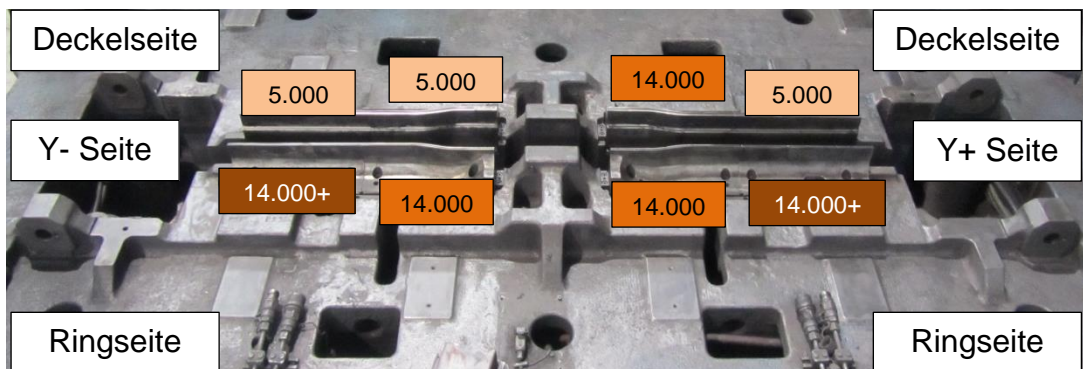


Abbildung 5.25: Geleistete Arbeitshübe der Prägeleisten BR4 zum Untersuchungszeitpunkt

Um der fehlerhaften Anpassung gegenzusteuern, ist bei den ringseitigen Prägeleisten bereits mit 0,5 mm Unterlegsblechen auf das unbelastete Niveau der verbliebenen Prägeleisten korrigiert worden. Dennoch sind die Höhen auf der Ringseite zum Untersuchungszeitpunkt immer noch ca. 0,2 mm höher als auf der Deckelseite. Eine Untersuchung des Luftbodens kann hier keine Erklärung liefern, da sich dieser auf allen vier Seiten gleichmäßig gesetzt hat.

Ebenso wie bei der Untersuchung der Prägeleisten der BR6 werden auch hier in derselben Art und Weise in Zusammenarbeit mit der 3D- Messtechnik GmbH Messdaten generiert und im nachfolgenden Diagramm veranschaulicht. Auch hier wird nur der Randbereich der äußeren Prägeleisten betrachtet.

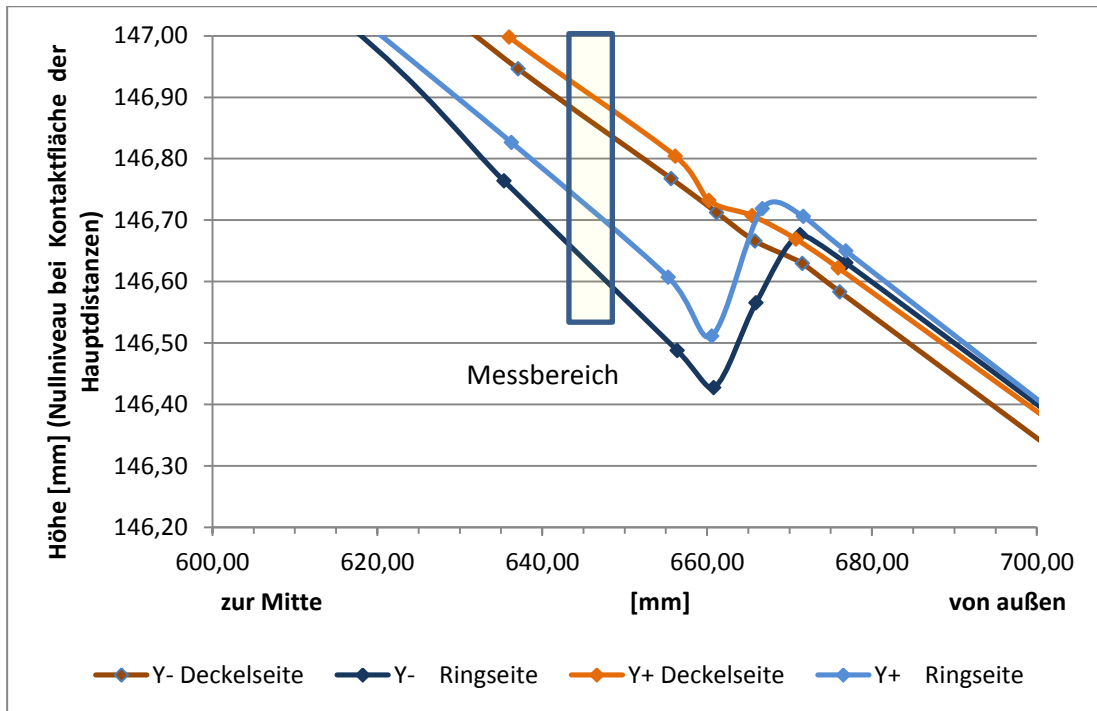


Abbildung 5.26: Ergebnisse aus der Vermessung der Prägeleistenhöhen BR4

Aus der Betrachtung des Messbereichs der Messstation wird klar, woher der Höhenunterschied kommt. Nachdem die deckelseitigen Prägeleisten nahezu neu sind, lässt sich kaum eine verschleißbedingte Setzung detektieren. Die ringseitigen Prägeleisten sind dagegen schon sehr viel länger im Einsatz und haben sich entsprechend gesetzt. Jedoch ist es bei einer Differenz von ca. 9.000 Arbeitshüben unwahrscheinlich, dass diese eine Setzung von 0,2 mm bewirken. Wahrscheinlicher ist, dass aufgrund des langen Einsatzes der ringseitigen Prägeleisten eine Ermüdung des Werkstoffes stattgefunden hat, so dass dieser sich stärker gesetzt hat.

#### 5.2.1.6 Fazit und Ausblick

Die Schlussfolgerung aus den letzten Betrachtungen ist somit, dass der Verschleiß von Luftboden und Prägeleisten maßgeblich die resultierende Halbschalenhöhe beeinflusst. Dabei wirken beide Werkzeugteile gleichermaßen auf die Ergebnisse, wodurch es notwendig wird, dass bei Korrektur oder Austausch eines Bauteils auch immer die verbleibenden Komponenten betrachtet werden. Hätte zum Beispiel im Fall der BR4 im Zuge des Austauschs der Prägeleisten eine Überarbeitung aller Prägeleisten

stattgefunden, hätte wertvolle Zeit durch Fehlersuche und Ausschuss eingespart werden können.

Aufgrund der vergleichsweise sehr starken Setzungen im Bereich der belasteten Endzonen der Prägeleisten, sollte eine Reduktion der Aufbreitung der Platinenkontur erwogen werden, um so die Überarbeitungsintervalle der Prägeleisten zu erhöhen.

Da die Möglichkeit einer Werkzeugvermessung nicht immer besteht und auch eine zu frühe Überarbeitung bzw. ein zu früher Austausch der Prägeleisten kostenintensiv ist, soll hier noch eine Art der Vermessung gezeigt werden, welche regelmäßig durchgeführt werden kann.

Setzungsprüfung der Prägeleisten:

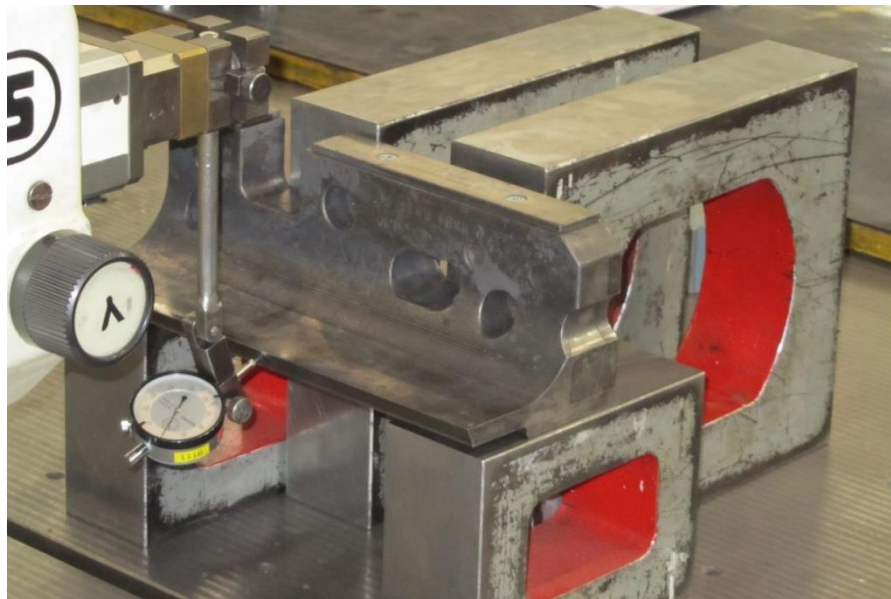


Abbildung 5.27: Prägeleisten auf Verschleißfortschritt messen

Aufgrund der Bombierung von mehr als 2mm über der Länge einer Leiste, ist eine überlagerte Setzung nur schwer zu detektieren. Deswegen ist es notwendig, die zu messende Leiste zuerst auf dem unbelasteten Steg auszurichten. Dazu wird die Leiste der Abbildung entsprechend auf dem Werkzeuggestisch positioniert und solange mit der Messuhr justiert, bis der unbelastete Teil der Leiste auf der Nullebene liegt. Anschließend kann durch

Überfahren des belasteten Teils unter Verwendung eines Rasters der Verschleißfortschritt festgestellt werden.

### 5.2.2 Werkzeugtemperatur

Bei alphas® forming hat die Werkzeugtemperatur im Gegensatz zur Warmumformung nur eine untergeordnete Bedeutung. Da im Bauteil keine Phasenumwandlung stattfindet, hat die Abkühlgeschwindigkeit im Werkzeug keinen Einfluss auf das entstehende Gefüge. Somit dient die Kühlung allein dem Schutz des Werkzeugs vor thermischer Belastung.

Die sich während einer Presskampagne einstellende Werkzeugtemperatur hängt in erster Linie von zwei Faktoren ab. Diese sind Taktzeit und Kühlung. Sobald die Kühlleistung ihr Maximum erreicht hat, ist eine Temperaturregelung im Werkzeug nur mehr durch Variation der Taktzeit möglich. Die Taktzeit selbst wird wiederum durch zwei Größen bestimmt:

- Anforderung einer neuen Platine bei festgelegter Stößelposition.
- Ablegeintervall der Ofenbestückungsanlage (je vier Platinen).

Sind diese Taktzeiten nicht optimal aufeinander eingestellt, kommt es zu einer erzwungenen Verzögerung an der Presse. Dies geschieht indem das Ablegeintervall am Ofen so groß gewählt wird, dass der Abstand zwischen den abgelegten 4er- Einheiten wesentlich größer ist als zwischen den vier Platinen untereinander. Benötigt die vorderste Platine dieser 4er- Einheit nun länger als den festgelegten Pressentakt zum Erreichen der Entnahmeposition, so kommt es zur Verzögerung.

Im Folgenden soll das Warmlaufverhalten nach Stillständen während der Produktion untersucht werden<sup>4</sup>. Dazu wird ein Untersuchungszeitraum gewählt, in dem die Unterschiede zwischen dem Ofen- und dem Pressentakt besonders markant voneinander abweichen.

In Abbildung 5.28 sind dazu die gemessenen Halbschalenbreiten der „Y+ Seite“ von 100 Halbschalen aus BR6 dargestellt. Auf der linken Ordinate sind

---

<sup>4</sup> Die Messgröße „Temperatur des Bauteils beim Messvorgang“ wurde bei dieser Untersuchung nicht zur Analyse herangezogen, wird aber im Kapitel 5.3.1 näher betrachtet.

die dazugehörigen Taktzeiten in logarithmischer Skalierung aufgetragen um die Taktzeiten, aber auch die wesentlich längeren Stillstände darstellen zu können. Abbildung 5.29 zeigt in selber Formatierung die entsprechenden Halbschalenhöhen.

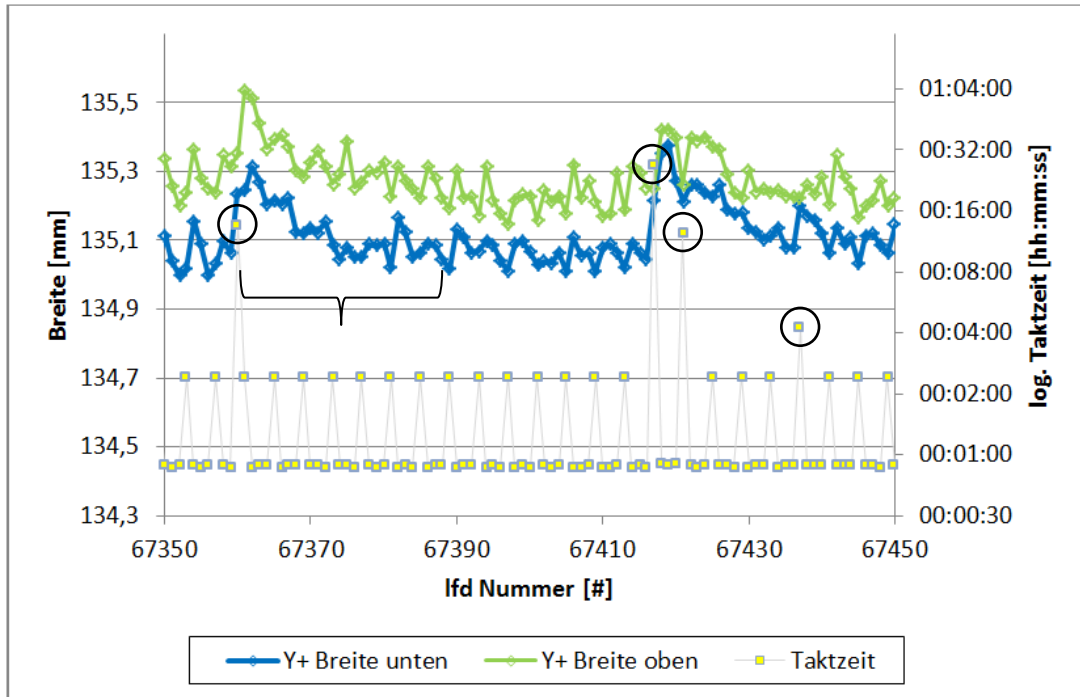


Abbildung 5.28: Warmlaufverhalten Breite BR6

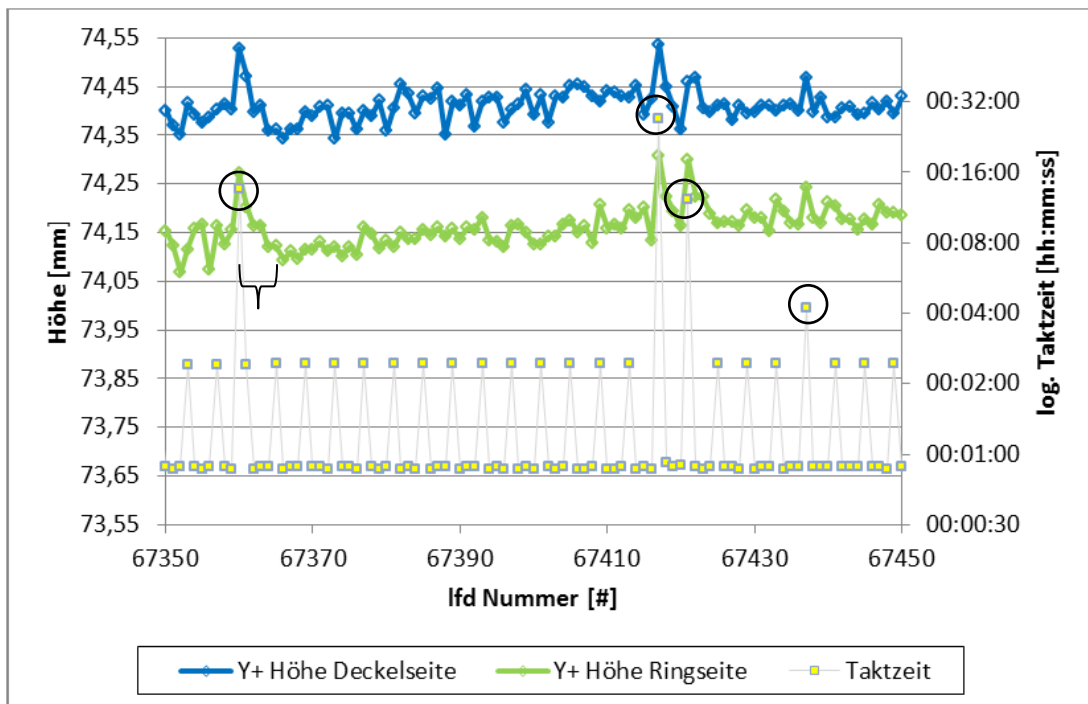


Abbildung 5.29: Warmlaufverhalten Höhe BR6

Dem Verlauf der „Taktzeit“ kann man entnehmen, dass der Presentakt bei 53 Sekunden liegt. Nachdem vier Platinen umgeformt werden, kommt es zum erzwungenen Stillstand, bis die nächsten vier Platinen den Ofenauslauf erreichen. In diesem Fall beträgt die Wartedauer bedingt durch den Ofentakt 153 Sekunden. Des Weiteren liegen vier außerplanmäßige Stillstände vor, welche durch schwarze Kreise in den Abbildungen gekennzeichnet sind. Nach dem ersten Stillstand von ca. 14 Minuten lässt sich erkennen, dass die Halbschalenabmessungen bei neuerlichem Produktionsbeginn größer sind. Erst nach mehreren umgeformten Platinen, stellt sich wieder das Niveau vor dem Stillstand ein. Vergleicht man die Ergebnisse aus Breiten und Höhen, so fällt auf, dass sich bei den Höhen der ursprüngliche Gleichgewichtszustand wesentlich schneller einstellt als bei den Breiten. Innerhalb von fünf umgeformten Platinen werden in der Regel wieder die früheren Dimensionen erzielt. Bei den Breiten dauert das 3 bis 4mal länger. Durch die ofenbedingten Standzeiten, wird das Erreichen des Gleichgewichtszustands zusätzlich verzögert.

Im laufenden Prozess bildet sich ein Temperaturgleichgewicht im Werkzeug. Das Werkzeug dehnt sich dadurch abhängig von Temperatur und Ausdehnungskoeffizient aus. Durch längere Stillstände kühlt das Werkzeug wieder ab und wird entsprechend kleiner. Der Stempel wird also kleiner und die Matrize wird aufgrund des geteilten Aufbaus größer. Die Erklärung für das unterschiedliche Ansprechverhalten von Halbschalenhöhe und Halbschalenbreite liegt in der Masse der beteiligten Werkzeugteile. Im Gegensatz zu den Prägeleisten, welche für die Halbschalenhöhen maßgebend sind, besitzen die Umformbacken eine sehr große Masse und haben somit ein stark verzögertes Ansprechverhalten. Um dennoch auch bei den Breiten lange Warmlaufkurven zu vermeiden, ist es sinnvoll, die Taktungen von Ofen und Presse genau aufeinander abzustimmen um Verzögerungen zu vermeiden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, nach längeren Stillständen bei den ersten Teilen die Haltezeit der Presse im unteren Totpunkt zu erhöhen, um eine schnellere Durchwärmung des Werkzeugs zu erreichen.

### 5.3 Einflüsse nach der Umformung

Nach dem Umformprozess gibt es keine Größe mehr, die die Halbschalengeometrie physisch beeinflussen könnte. Jedoch kann die Messung von Fehlern behaftet sein, sodass durch die Messdaten eine Beeinflussung vorliegt.

#### 5.3.1 Messstation

Wie bereits in Kapitel 3.2.2.3 beschrieben, erfolgt die Vermessung der Halbschalen taktil. Die Messwerte ergeben sich aus einem mittels Kalibrierteil eingestellten Sollwert und den dazu erfassten Abweichungen. Zusätzlich ist ein Infrarotsensor verbaut, welcher die Temperatur der Halbschale zum Zeitpunkt der Messung erfasst. Dadurch werden mithilfe eines einfachen Längenänderungsmodells die Abmessungen bei Raumtemperatur bestimmt.

Aus diesem Aufbau resultieren für die Messeinrichtung folgende Fehlerpotentiale:

- Sollwert- Kalibrierung
- Positionierung der Sensoren (siehe Abbildung 5.30)
- Genauigkeit von Temperatursensor und Längenänderungsmodell.

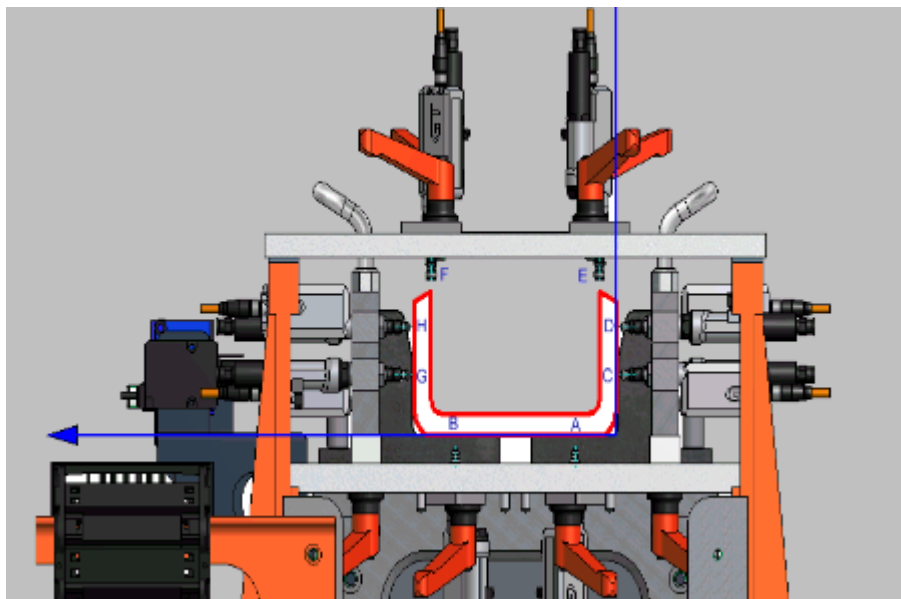


Abbildung 5.30: Messstation: Anordnung der Messtaster



### Sollwert- Kalibrierung

Die Genauigkeit der Kalibrierung hängt im Wesentlichen von der Maßhaltigkeit des Meisterteils ab. Verunreinigungen auf der Oberfläche im Bereich der Messpunkte führen zwingend zu Abweichungen vom einzustellenden Sollwert. Daher ist es notwendig, diese generell vor Schmutz zu schützen bzw. falls dies nicht geschehen ist, auf jeden Fall zu reinigen, bevor eine Kalibrierung vorgenommen wird.



*Abbildung 5.31: Verunreinigte Oberfläche Meisterteil*

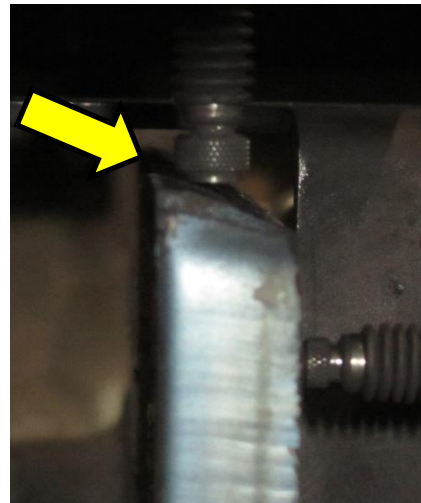
Weiters ist darauf zu achten, dass die Messköpfe auf den Sensoren keine Verunreinigungen aufweisen und dass diese stets fest verschraubt sind und sich nicht lösen, da sonst ein undefinierter Zustand entsteht.

### Positionierung der Sensoren

Beim Wechsel der Baureihe müssen alle Sensoren auf die jeweilige Geometrie angepasst werden. Dazu müssen die Sensoren für die Detektion der Halbschalenbreite mithilfe von Distanzblöcken in der Höhe und durch Stecklöcher in der Breite justiert werden. Speziell bei den berührenden Flächen der Distanzblöcke ist auf Sauberkeit zu achten.



Die unteren Sensoren für die Messung der Halbschalenhöhe werden über Fixanschlüge positioniert. Hierbei ist es wichtig, dass die Anschlagposition erreicht wird. Ansonsten wird durch die Konkavität der Halbschale das Messergebnis verfälscht. Die Positionierung der oberen Sensoren für die Höhenmessung ist besonders fehleranfällig. Bedingt durch die Geometrie der Halbschale ist die Erfassung der Höhe nur auf einem schmalen Grad möglich. Durch ein toleranzbedingtes Spiel in den Auflagern der Messstation wird diese Erfassung weiter erschwert. Der Sensor muss also so positioniert werden, dass der Messkopf diesen Schwankungsbereich vollständig abdeckt und immer die maximale Höhe ermittelt. Abbildung 5.32 zeigt ein Beispiel, in dem der Sensor falsch positioniert ist, sodass die maximale Höhe nicht erfasst wird.



*Abbildung 5.32: Falsch positionierter Sensor*

### Genauigkeit von Temperatursensor und Längenänderungsmodell

Prinzipiell besitzt der verbaute Infrarotsensor eine Wiederholgenauigkeit von  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ . Damit dieser jedoch ordnungsgemäß funktioniert, muss er auf die zu messende Oberfläche kalibriert werden. Dies erfolgt über den Emissionsgrad, welcher am Verstärker des Sensors automatisch durch Eingabe der aktuell gemessenen Oberflächentemperatur eingestellt werden kann.

Neben der korrekten Temperaturerfassung ist auch das Längenänderungsmodell für den Erhalt der Abmessungen bei Raumtemperatur entscheidend. Bei falscher oder ungenauer Modellierung des Abkühlverhaltens werden die Messergebnisse nicht korrekt ermittelt.

Zur Überprüfung der korrekten Messdatenerfassung werden nachstehende Untersuchungen durchgeführt.

## 5.3.1.1 Vermessung abgekühlter Halbschalen

Um festzustellen, ob die ermittelten Messergebnisse auch tatsächlich denen bei Raumtemperatur entsprechen, werden in diesem Versuch abgekühlte Halbschalen noch einmal in der Messstation vermessen. Dazu werden 12 Halbschalen der BR4 und 16 Halbschalen der BR6 vermessen. Die erhaltenen Messdaten werden anschließend mit den errechneten Messergebnissen der warmen Halbschalen verglichen und ausgewertet. In Abbildung 5.33 und Abbildung 5.34 sieht man die Ergebnisse aus Breite und Höhe der „Y-Seite“ von BR4. In der linken Ordinate ist die Differenz zwischen dem errechneten Ergebnis von der warmen Halbschale zu dem der abgekühlten aufgetragen. Zusätzlich ist in der rechten Ordinate die gemessene Bauteiltemperatur zum Zeitpunkt der warmen Bauteilvermessung aufgetragen. Ein Wert von 0,2 mm bei Probe Nr. 4 der Linie „ $\Delta_Y$ -Breite oben“ bedeutet also, dass das errechnete Messergebnis bei 627°C um 0,2 mm größer ist als das bei Raumtemperatur.

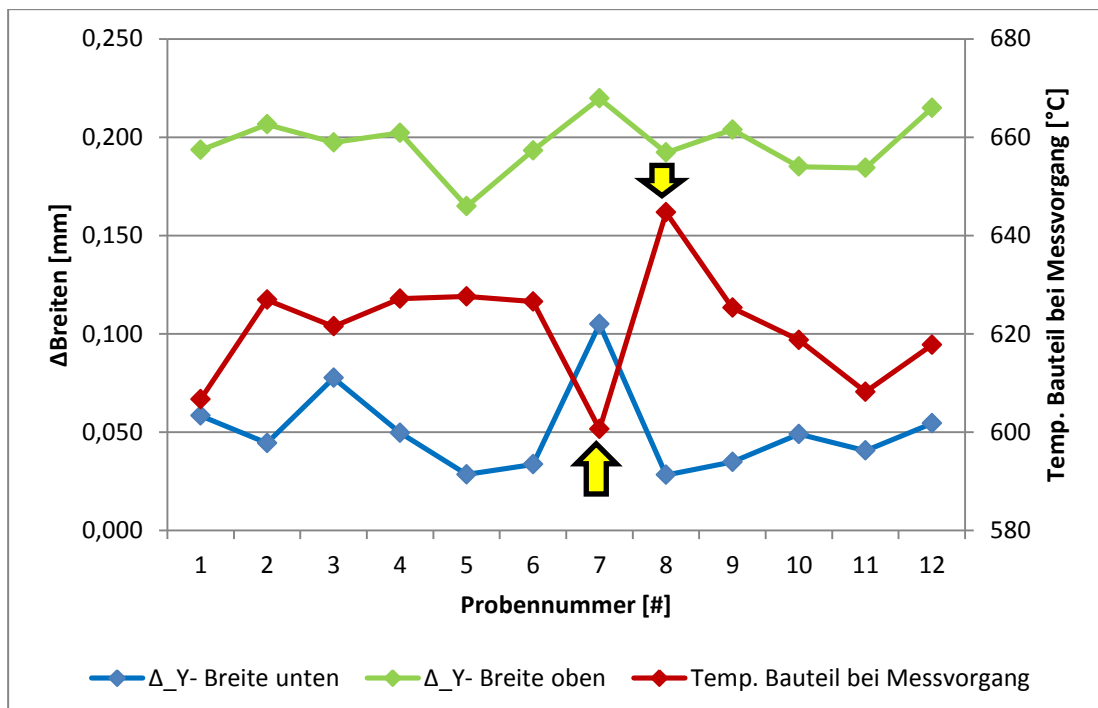


Abbildung 5.33: Differenz zwischen warm und kalt vermessenen Halbschalenbreiten der „Y-Seite“ (BR4)

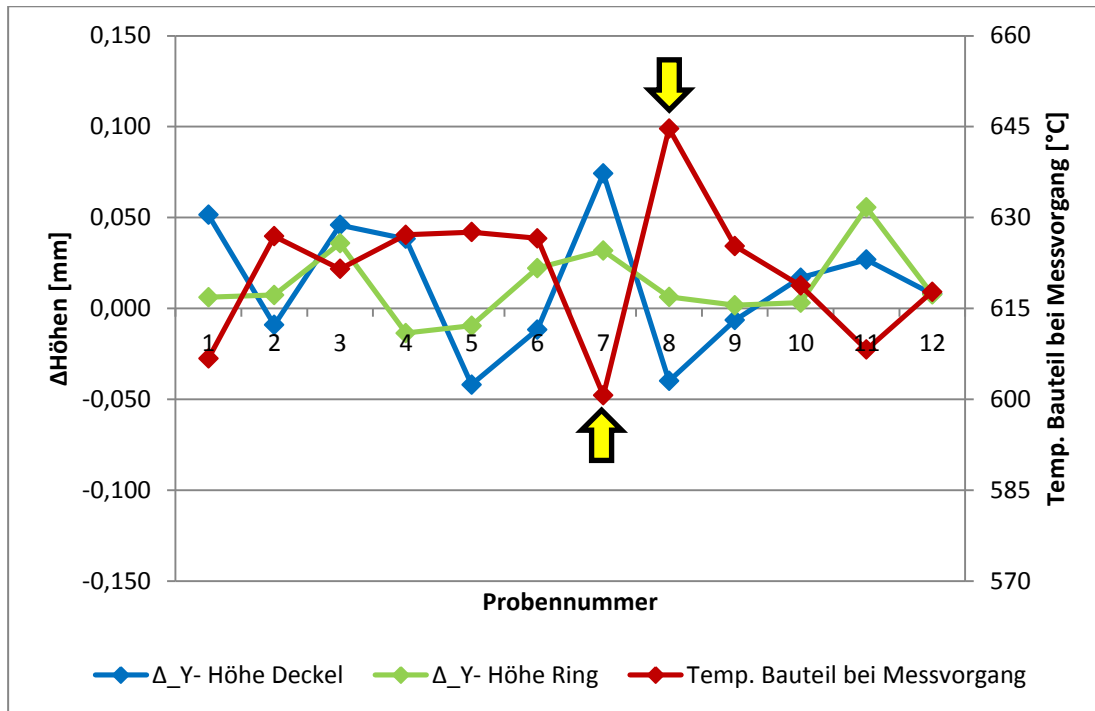


Abbildung 5.34: Differenz zwischen warm und kalt vermessenen Halbschalenhöhen der „Y-Seite“ (BR4)

Die Auswertung der Ergebnisse in Abbildung 5.33 zeigt also, dass die errechneten Breiten der warmen Halbschalen durchwegs zu groß sind. Vor allem die oberen Halbschalenbreiten sind im Mittel um 0,2mm größer. Bei den Höhen lässt sich keine Aussage über eine Tendenz treffen, da die Schwankungen mit einer Ausnahme innerhalb von  $\pm 0,05$  mm um Null liegen.

Betrachtet man die Temperaturen zum Zeitpunkt der Messung, fällt das hohe Temperaturniveau der Halbschalen auf. Bei einer Ofenaustrittstemperatur von 670°C würde sich die Halbschale im Werkzeug nur um 30 – 70°C abkühlen.

Außerdem lässt sich ein Einfluss der aufgezeichneten Bauteiltemperatur auf die ermittelten Abweichungen<sup>5</sup> feststellen. Während diese bei relativ konstanter Temperatur ebenfalls relativ konstant sind, zeigt sich vor allem bei Probe Nr. 7 und 8 eine signifikante Änderung in der Temperatur, aber auch in der ermittelten Abweichung. Daraus kann man schließen, dass die erfasste Temperatur vermutlich nicht den wahren Wert darstellt, da bei korrekter Temperatur die Abweichung konstant bliebe.

<sup>5</sup> Differenz zwischen dem errechneten Ergebnis von der warmen Halbschale zu dem der abgekühlten.

Bei den Halbschalen der BR 6 sind die Ergebnisse<sup>6</sup> ähnlich, jedoch nicht so eindeutig wie bei BR4. Ein Grund dafür ist, dass die erfassten Halbschalen-Temperaturen für das Berechnungsmodell hier innerhalb von fast 130°C schwanken. Bei den untersuchten Halbschalen der BR4 lag die Schwankungsbreite bei lediglich 40°C.

### 5.3.1.2 Temperaturvergleichsmessung

Aufgrund der Unterschiede in den Schwankungsbreiten der Temperatur und auch wegen des generell sehr hohen Temperaturniveaus, soll nun die Temperaturerfassung untersucht werden. Dazu ist in Abbildung 5.35 die Bauteiltemperatur beim Messvorgang von 200 Halbschalen der logarithmisch aufgetragenen Taktzeit gegenübergestellt.

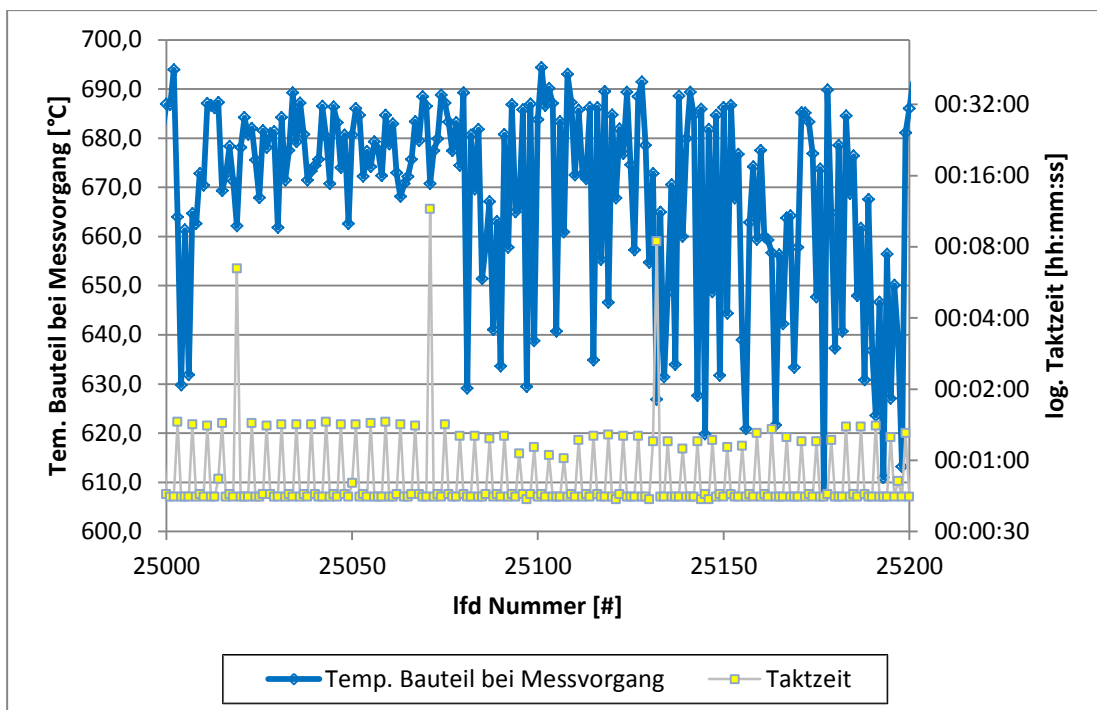


Abbildung 5.35: Zusammenhang von Bauteiltemperatur bei Messvorgang mit Umformtaktzeit (BR4)

Bei genauerer Betrachtung der Abbildung 5.35 fallen mehrere Dinge auf:

#### 1. Das Temperaturniveau:

Wie bereits erwähnt, werden die Halbschalen im Ofen auf eine Temperatur von ca. 670°C erwärmt. Bei den gemessenen

<sup>6</sup> Siehe Anhang: Differenz zwischen warm und kalt vermessenen Halbschalenbreiten (BR6)

Temperaturen würde dies in vielen Fällen voraussetzen, dass die Platine im Werkzeug sogar erwärmt wird.

2. Fehlender Zusammenhang zwischen Standzeit und Bauteiltemperatur:  
Bei den Halbschalen mit der Nr. 25019 und Nr. 25071 sind jeweils Stillstände von mehreren Minuten, in denen das Werkzeug abkühlen kann. Dies zeigt sich aber nicht in den Bauteiltemperaturen.
3. Markante Änderungen in der Streubreite:  
Ab Halbschale Nr. 25080 findet eine unerklärliche Zunahme in der Streuung der gemessenen Bauteiltemperaturen statt.

Mit diesem Ergebnis bestätigt sich die Annahme einer fehlerhaften Temperaturerfassung, so dass im nächsten Schritt eine Kontaktmessung mit einem Thermoelement-Messkopf vom Typ-K durchgeführt wird.

Damit die Messergebnisse des Thermoelements mit der Infrarotmessung vergleichbar sind, erfolgt die Kontaktmessung in unmittelbarer Nähe der Infrarotmessung (siehe Abbildung 5.35). Außerdem werden, bis auf eine verzögerte Messung<sup>7</sup>, keine weiteren Änderungen des Prozesses vorgenommen. Die Versuchsdurchführung erfolgt bei der Produktion von Halbschalen der BR4.

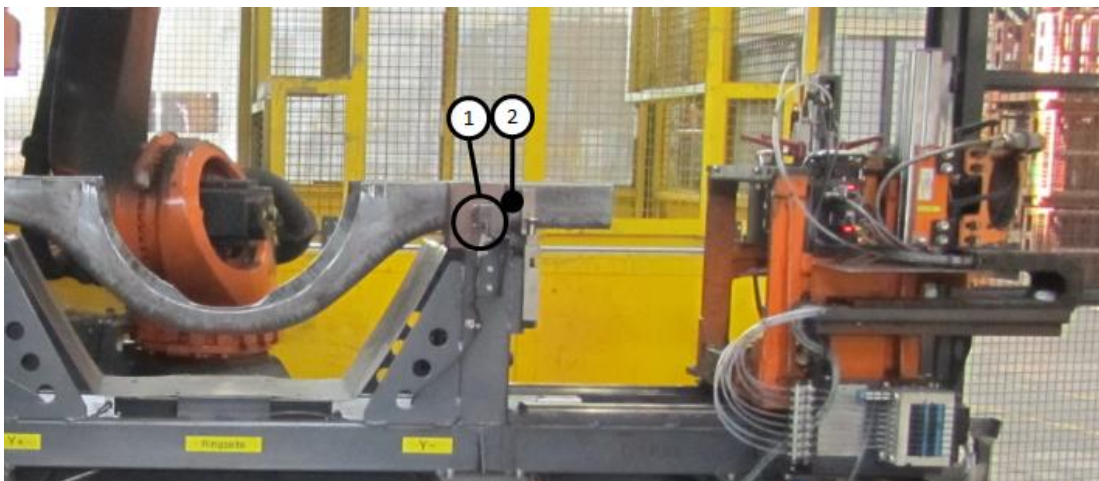


Abbildung 5.36: Messpunkte 1: Infrarotsensor, 2: Kontaktmessung Thermoelement(BR4)

<sup>7</sup> Da das Ansprechverhalten des Thermoelements träger ist als die berührungslose Infrarotmessung, wird die Verweildauer der Halbschale in der Messstation vor Messbeginn erhöht.

In Abbildung 5.37 sind die Ergebnisse der Kontaktmessung den Ergebnissen der Infrarotmessung gegenübergestellt. Die Lage der Kurven bestätigt, dass das Temperaturniveau tatsächlich wesentlich niedriger ist, als durch den Infrarotsensor erfasst. Außerdem zeigt der Verlauf der Kontaktmessung, dass sich die Temperatur der Halbschalen bei kontinuierlicher Produktion kaum ändert.

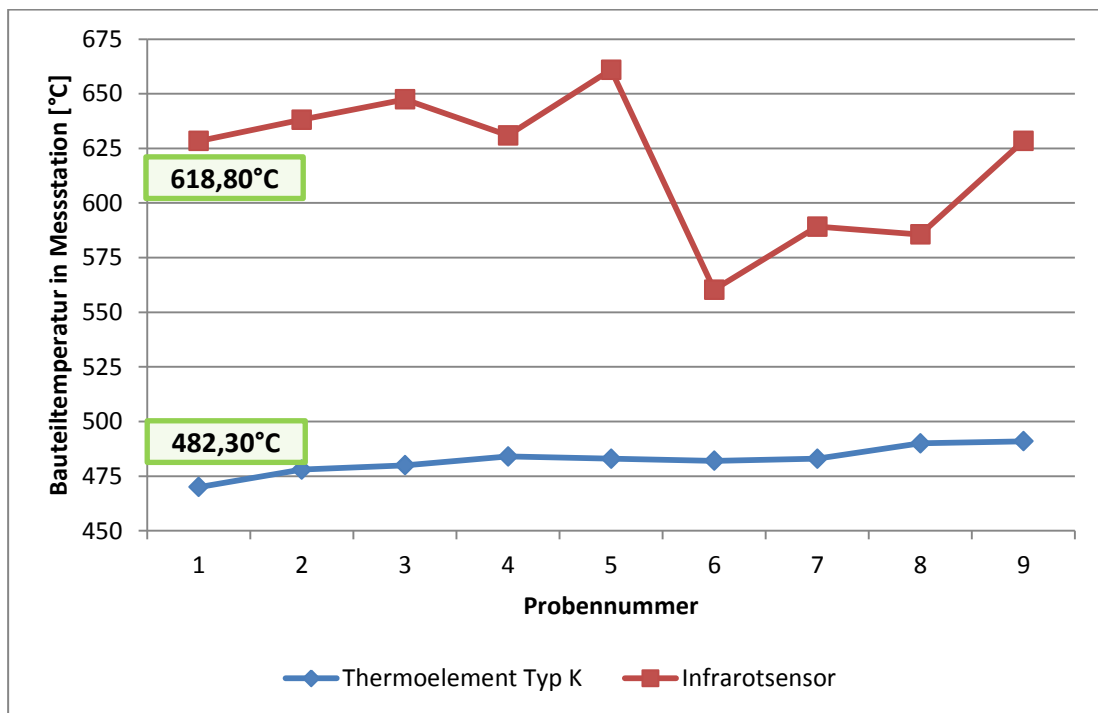


Abbildung 5.37: Vergleich der verbauten Temperaturmessung mit Versuchsmessung (BR4)

### 5.3.1.3 Fazit und Ausblick

Aus den durchgeführten Versuchen lässt sich nun zusammenfassend sagen, dass die momentane Temperaturerfassung die tatsächlichen Messergebnisse sehr stark verzerrt. Dies basiert in erster Linie auf dem falschen Temperaturniveau, aber auch auf den willkürlichen Schwankungswechseln, welche sich unmittelbar auf die Streuung der Messergebnisse auswirken.

Im Zuge einer Neukalibrierung des Infrarotsensors muss überprüft werden, ob mit der Einstellung des korrekten Emissionsgrades die realen Temperaturen dargestellt werden können. Erst dann kann eine Korrektur des Berechnungsmodells vorgenommen werden, indem der Versuch aus Kapitel 5.3.1.1: "Vermessung abgekühlter Halbschalen" wiederholt wird.

## **6 Einstellparameter zur Gewährleistung der Prozessbeherrschung**

In diesem Kapitel sind Einstellparameter aufgelistet, mit denen es möglich ist, die Halbschalengeometrien ohne Wirkflächenkorrektur des Werkzeugs zu beeinflussen. Dadurch soll bei grenzwertigen Messergebnissen die Prozessbeherrschung sichergestellt werden.

### **6.1 Einstellparameter zur Beeinflussung der Breite**

In diesem Unterkapitel werden Parameter behandelt, welche vorwiegend Einfluss auf die Halbschalenbreite haben. Ein gleichzeitiger Einfluss auf die Halbschalenhöhe ist dabei nicht zu vermeiden, jedoch ist dieser meist vernachlässigbar.

#### **6.1.1 Luftbodenhöhe**

Hierbei wird der Aspekt genutzt, dass sich die Ziehflächenkontur der Umformbacken nach oben hin um ca. 2 mm öffnet. Somit ist es möglich, durch Änderung der Luftbodenhöhe in UT die Halbschalenbreite zu beeinflussen. Allerdings ist zu beachten, dass eine Veränderung der Luftbodenhöhe nur im ausgebauten Zustand durch Adaptierung von Distanzen möglich ist. Zusätzlich müssen die Hauptdistanzen (siehe Kapitel 6.2.2) entsprechend angepasst werden, da ansonsten der Abstand zwischen Luftboden und Stempel verändert wird.

Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass das Niveau von den Einlaufradien der Umformbacken zur Luftbodenhöhe keine zu großen Unterschiede aufweist, um Abdrücke auf den Halbschalen zu vermeiden. (siehe Abbildung 6.1)



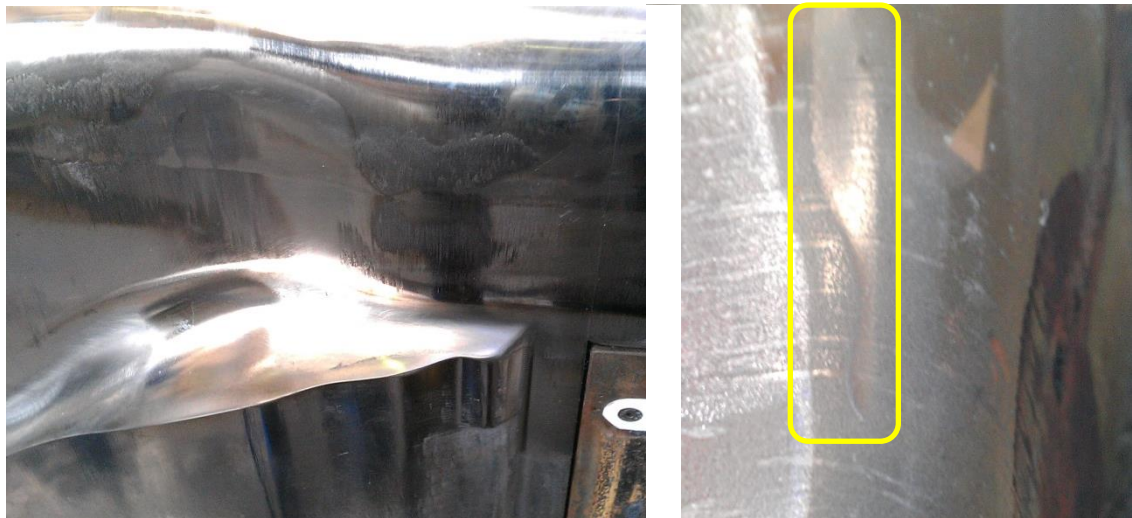


Abbildung 6.1: links: Einlaufradius Umformbacken, rechts: Abdruck des Einlaufradius auf der Halbschale

Im nachfolgenden Beispiel wird bei der BR4 die Luftbodenhöhe um 0,5mm angehoben und die Hauptdistanzen werden entsprechend angepasst. Zur Veranschaulichung sind 200 Halbschalenbreiten der „Y-Seite“ in Abbildung 6.2 dargestellt.

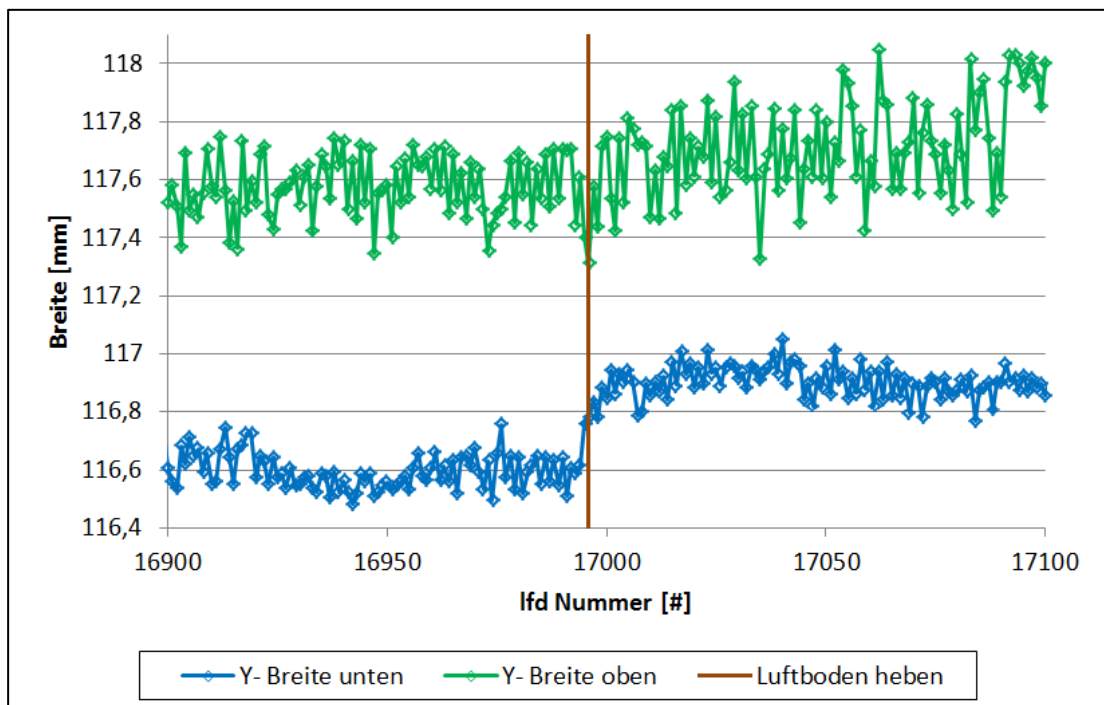


Abbildung 6.2: Halbschalenbreiten „Y-Seite“ BR4 vor und nach dem Luftboden heben

	Y- Seite		Y+ Seite	
	Breite unten	Breite oben	Breite unten	Breite oben
<b>vorher</b>	116,60mm	117,57mm	116,69mm	117,71mm
<b>nachher</b>	116,90mm	117,69mm	116,98mm	117,88mm

Tabelle 4: Mittelwerte der Halbschalenbreiten bei Änderung der Luftbodenhöhe



Wie man erkennen kann, wirkt sich die Luftbodenhöhe vor allem auf die unteren Halbschalenbreiten aus, wo eine Zunahme der Breiten von 0,3mm festgestellt wird. Bei den oberen Breiten beschränkt sich diese Entwicklung im Mittel auf die Hälfte, wobei die unmittelbare Reaktion auf die Adaptierung sehr gering ausgefallen ist. Man kann also davon ausgehen, dass der tatsächliche Einfluss auf die oberen Halbschalenbreiten geringer ist. Die Veränderung der Höhen liegt im Hundertstelbereich und ist somit vernachlässigbar.

### 6.1.2 Anzugsmoment Zuganker & Bodenschrauben

Eine weitere Möglichkeit die Halbschalenbreite einzustellen, gelingt durch die Manipulation des Anzugsmoments der Zuganker. In Abbildung 6.3 ist eine der beiden Kassetten inklusive Zuganker dargestellt. Die Position der Kassetten im Unterteil ist durch Anschläge zur Mitte hin festgelegt (siehe Pfeile). Mithilfe einer in Abbildung 6.6 festgelegten Reihenfolge und eines Anzugsmoments von 1.400 Nm werden die Zuganker vorgespannt, um diese Position sicherzustellen. Anschließend werden die Kassetten durch sogenannte Bodenschrauben (je Kasette vier auf der Innenseite und vier auf der Außenseite) mit dem Unterteil fest verschraubt.

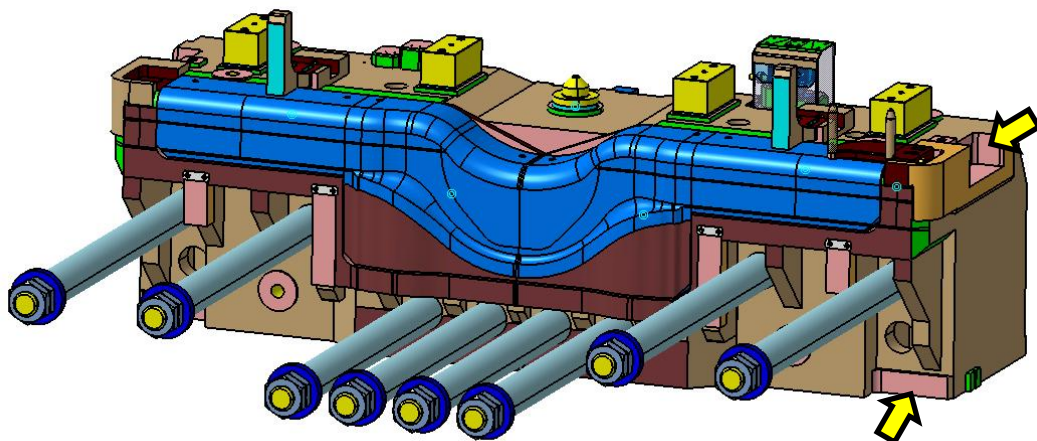


Abbildung 6.3: Kasette inklusive Zuganker

An dieser Stelle sei erwähnt, dass eine Manipulation der festgelegten Parameter nur für kurzfristige Korrekturmaßnahmen zur Vermeidung von Ausschuss gedacht ist, da dadurch Kräfteverhältnisse im Werkzeug entstehen, welche bei der Auslegung nicht berücksichtigt wurden.

Prinzipiell lässt sich in einem Bereich von 0,1 bis maximal 0,2 mm durch eine Erhöhung des Anzugsmoments eine Reduktion der Halbschalenbreite erzielen. Aufgrund der Anordnung der Zuganker ist des Weiteren auch eine spezifische Beeinflussung der oberen oder der unteren Breite möglich. Aufgrund der eingangs beschriebenen Positionierung der Kassetten müssen bei einer Änderung des Anzugsmoments auch die Bodenschrauben gelöst und wieder angezogen werden. Im speziellen Fall einer Anzugsmomentreduktion müssen für eine Neupositionierung die Kassetten angehoben und neu eingesetzt werden. Um diesen Aufwand von mehreren Stunden zu umgehen, besteht die Möglichkeit, die Bodenschrauben nicht festzuziehen, um eine Aufweitung im Zuge der Umformvorgänge zu erreichen. Anschließend sollten diese jedoch wieder festgezogen werden.

Im folgenden Beispiel ist das Ziel eine Reduktion der Halbschalenbreite auf der „Y-Seite“. Dazu werden die beiden oberen Zuganker auf der „Y-Seite“ um 200Nm stärker angezogen. Wie man in Abbildung 6.4 sehen kann, ergibt sich daraus eine Verbesserung von ca. 0,1 mm auf der gewünschten Seite, während die „Y+ Seite“, wie in Abbildung 6.5 ersichtlich, unverändert bleibt.

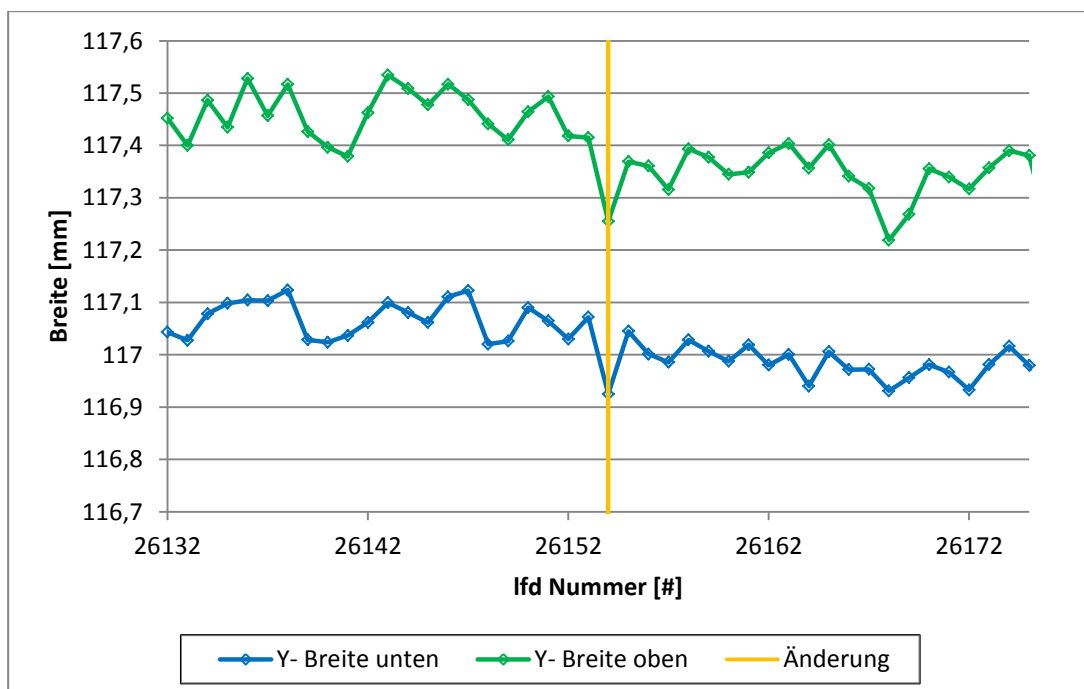


Abbildung 6.4: Halbschalenbreiten „Y-Seite“ BR4 (Einstellparameter: Anzugsmoment und Bodenschrauben)

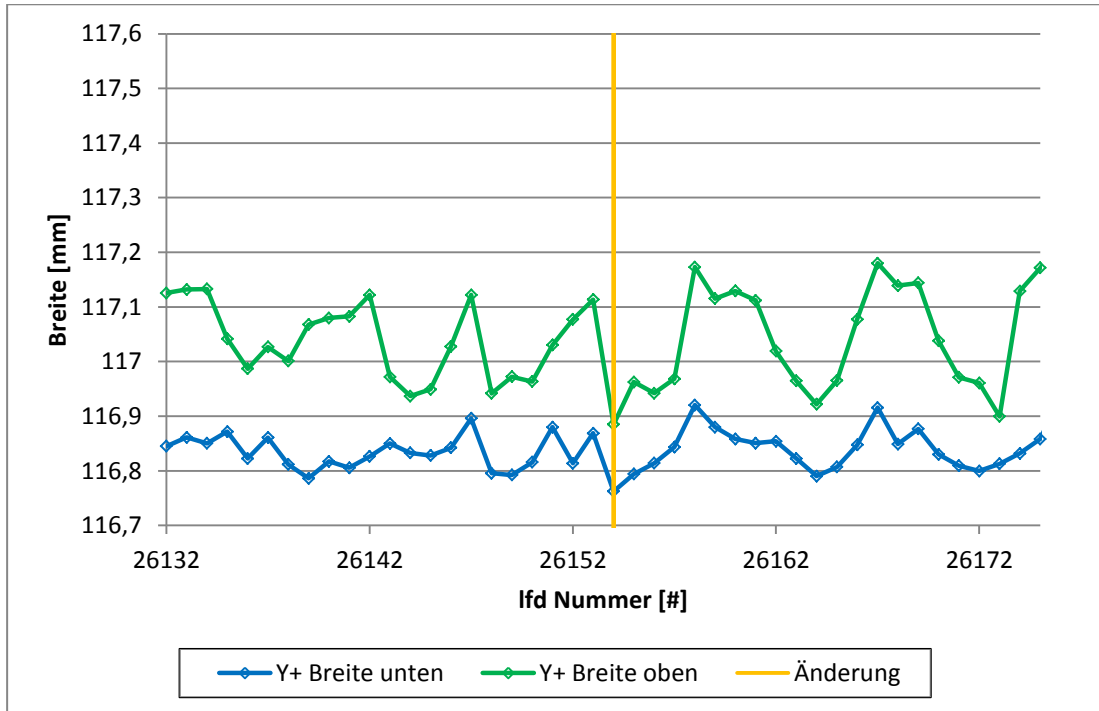


Abbildung 6.5: Halbschalenbreiten „Y+ Seite“ BR4 (Einstellparameter: Anzugsmoment und Bodenschrauben)

84#	Y- Seite		Y+ Seite	
84#	Breite unten	Breite oben	Breite unten	Breite oben
vorher	117,07mm	117,46mm	116,84mm	117,05mm
nachher	<b>116,98mm</b>	<b>117,34mm</b>	116,84mm	117,04mm

Tabelle 5: Mittelwerte der Halbschalenhöhen bei Änderung der Anzugsverhältnisse

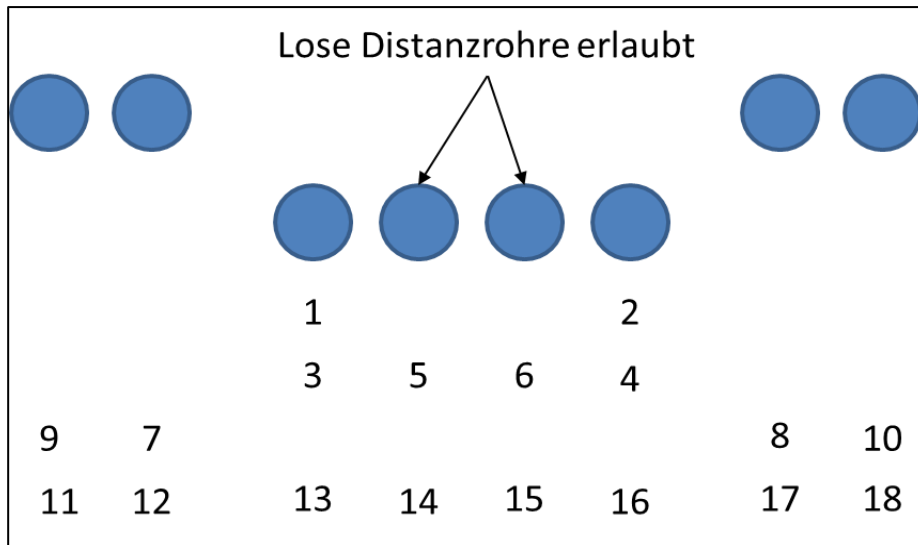


Abbildung 6.6: Anzugsreihenfolge Zuganker (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014)

## 6.2 Einstellparameter zur Beeinflussung der Höhe

In diesem Unterkapitel werden Parameter aufgezeigt, die es ermöglichen, die Halbschalenhöhen einzustellen und anzugleichen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass bei Einflussnahme auf die Halbschalenhöhe immer auch der sich einstellende square edge- Radius verändert wird.

### 6.2.1 Höhe Prägeleisten

Aufgrund des Stauchvorgangs ist die Prägeleistenhöhe maßgebend für die Halbschalenhöhe. Je nach Abweichung von der baureihenspezifischen Höhe ist es möglich, mithilfe von Unterlegsblechen die notwendige Prägeleistenhöhe einzustellen. Da die Prägeleisten im Oberteil verschraubt sind und ein Ausbau kopfüber nur schwer durchzuführen ist, ist eine Anpassung der Prägeleistenhöhe in der Regel nur bei ausgebautem Oberteil vorgesehen.

Im hier gezeigten Beispiel sind die deckelseitigen Prägeleisten aufgrund einer fehlerhaften Überarbeitung höher als die ringseitigen. Um das Niveau der Prägeleisten anzugleichen, werden auf der Ringseite 0,5 mm Bleche untergelegt. Gleichzeitig werden bei den Hauptdistanzen (siehe Kapitel 6.2.2) 0,1 mm beigelegt, um die Halbschalenhöhen auf der Deckelseite in den Toleranzbereich zu heben.

Die Resultate zeigen, dass die Halbschalenhöhen auf der Ringseite nach der Korrektur um 0,3 – 0,4 mm niedriger sind. Auch die „Y+ Höhe Deckelseite“ ist im Mittel um ca. 0,1 mm höher. Bei der „Y- Höhe Deckelseite“ kommt die Korrektur dagegen kaum an. Aufgrund der geringen Anzahl an Proben ist die Aussagekraft der Messergebnisse jedoch relativ gering.

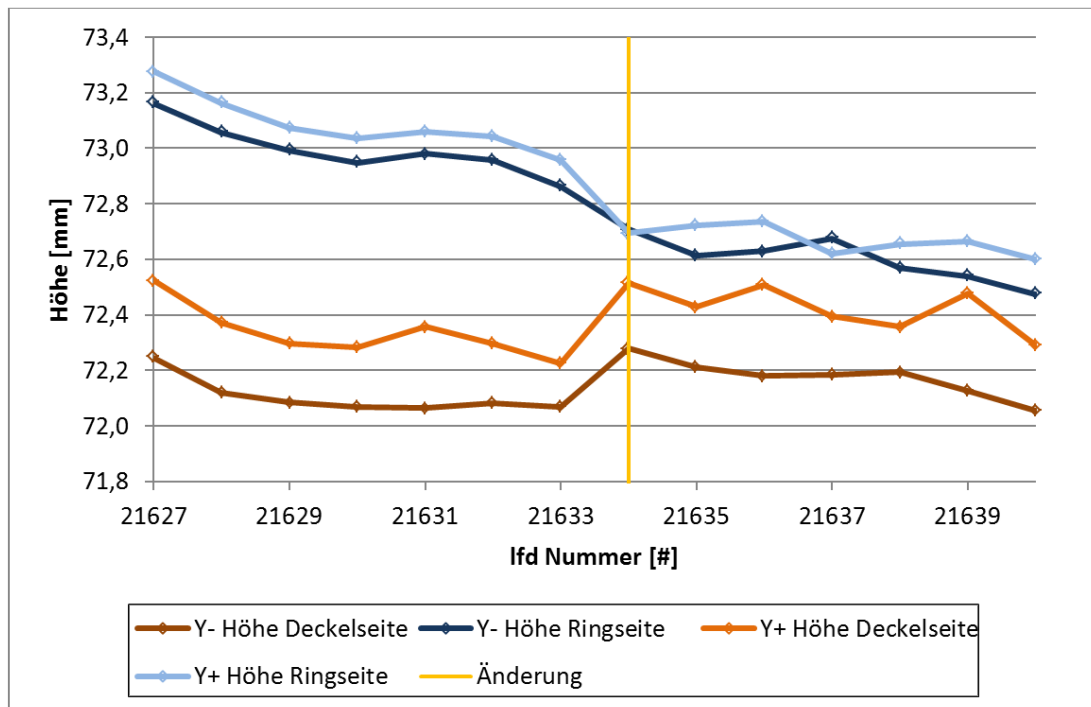


Abbildung 6.7: Halbschalenhöhen BR4 vor und nachdem ringseitig 0,5mm bei den Prägeleisten untergelegt wurde

### 6.2.2 Höhe Hauptdistanzen

Die Hauptdistanzen definieren den unteren Totpunkt im Werkzeug, also den kleinsten Abstand zwischen Stempel und Luftboden. Aufgrund der Toleranzen in der Platinendicke ist im Werkzeug ein Spiel notwendig und nicht zu vermeiden. Somit besteht hier eine weitere, jedoch wesentlich schnellere Möglichkeit, die Halbschalenhöhe zu beeinflussen, da die Hauptdistanzen leicht zugänglich sind. Allerdings können mit dieser Methode keine einzelnen Höhen verändert werden. Bei langfristigen Korrekturen sollten außerdem nur die Prägeleistenhöhen als Einstellgröße verwendet werden.

Im folgenden Beispiel werden im Zuge einer kurzfristigen Höhenanpassung bei den Hauptdistanzen 0,1mm entfernt. In Abbildung 6.8 sind die Halbschalenhöhen vor und nach der Korrektur dargestellt. Die Taktzeit dient hier nur zur Erklärung der Spitzen in den Messergebnissen.

Nachdem die Halbschalenhöhen nach der Korrektur bedingt durch den Stillstand höher resultieren, kann man anschließend sehr gut die entsprechende Abnahme von ca. 0,1mm erkennen.

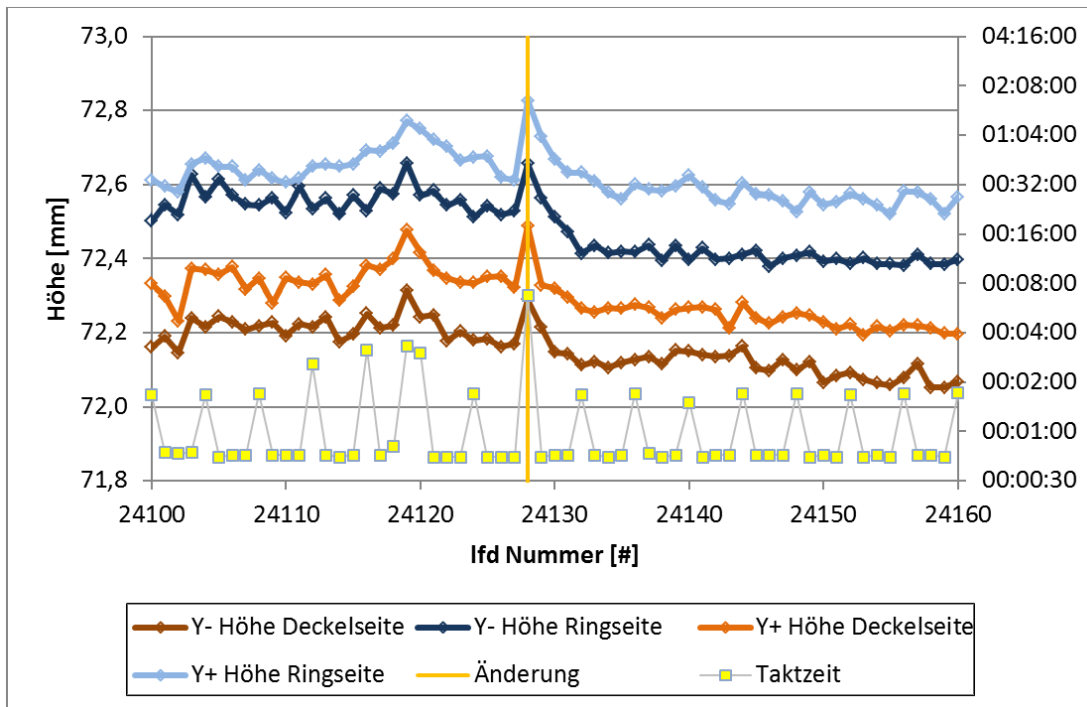


Abbildung 6.8: Halbschalenhöhen BR4 vor und nachdem bei den Hauptdistanzen 0,1mm entfernt wurde

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Prozess des alphas® forming näher zu untersuchen, um diesen langfristig zu stabilisieren und zu optimieren. In diesem Sinne wurden aus dem gesamten Prozess, vom Coil bis zur fertigen Halbschale, Einflussgrößen bestimmt und analysiert. Entsprechend dieser Analysen werden Verbesserungsvorschläge erarbeitet und teilweise umgesetzt. Nachfolgend sollen noch einmal die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse aufgelistet werden.

Grundsätzlich ist das alphas® forming ein Verfahren mit Potential zu sehr hoher Präzision. Die Prozessfähigkeitsuntersuchung zeigte, dass die Streuung der Messergebnisse wesentlich geringer ist als das entsprechende Toleranzfeld. Aufgrund fehlender Dokumentation waren weiterführende Analysen hierzu jedoch nicht möglich. Dementsprechend war das Einführen einer sinnvollen Dokumentation aller relevanten, bisher nicht dokumentierten Prozessgrößen ein notwendiger und wesentlicher Punkt.

Außerdem konnte bestätigt werden, dass sowohl die Platinendicke als auch der Platinenzuschnitt unmittelbar die daraus resultierende Halbschalengeometrie beeinflussen. Mithilfe der lasergeschnittenen Versuchs- Platinen konnte des Weiteren eine außerordentliche Verbesserung bei der Streuung der oberen Halbschalenbreiten festgestellt werden. Die unzureichende Zuordnung der dokumentierten Messergebnisse von Platinendicke und Platinenzuschnitt, zu den hergestellten Halbschalen erschwerten jedoch eine tiefergehende Analyse, da weitere Untersuchungen nur mit sehr hohem Messaufwand realisierbar gewesen wären.

Die Platinenpositionierung im Werkzeug, vor allem in Bezug auf den Längsversatz, stellt eine der wichtigsten Einflussgrößen auf den Prozess dar und ist derzeit nur bedingt erfassbar. Eine Lageerkennung am Beladeroboter zur Überprüfung der Sollposition hat sehr großes Potential, Ausschuss im Sinne von Halbschalenversatz zu vermeiden und sollte ehestmöglich realisiert werden.

Aus der Beobachtung von verschleißintensiven Komponenten des Werkzeugs konnte gezeigt werden, dass der Verschleißzustand des Luftbodens ebenso wie jener der Prägeleisten unmittelbar die Halbschalenhöhe beeinflusst. Die bisherige vorherrschende Meinung eines alleinigen Einflusses des Prägeleistenzustands konnte somit widerlegt werden. Diese Erkenntnis stellt einen entscheidenden Gewinn für die zukünftige Sicherstellung der korrekten Halbschalenhöhen dar. Außerdem konnte eine übermäßige Beanspruchung im Bereich der belasteten Endzonen der Prägeleisten aufgrund der momentanen Platinkontur festgestellt werden. Diese Aufbreitung in den Randzonen der Platine sollte reduziert werden.

Aus der Untersuchung der Messstation konnte festgestellt werden, dass die momentane Temperaturerfassung und somit die errechneten Messergebnisse fehlerhaft sind. Aufgrund von starken Schwankungen in der Temperaturerfassung ist zudem ein Teil der Messwertstreuungen anlagenbedingt und hat nichts mit den physischen Schwankungen der Halbschalengeometrie gemein.

Des Weiteren wurden im Zuge dieser Arbeit Parameter, wie beispielsweise die Luftbodenhöhe, ermittelt, die die hergestellten Halbschalengeometrien ohne Wirkflächenkorrektur geringfügig verändern können. Dadurch ist es möglich, bei grenzwertigen Messergebnissen Ausschuss zu vermeiden.

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse kann man erkennen, dass in einigen Bereichen noch Reserven für weitere Optimierungen vorhanden sind. Beispielsweise zeigte der Versuch mit lasergeschnittenen Platinen sehr hohes Potential und sollte unbedingt weiterverfolgt werden. Dabei ist es sinnvoll, auch den Einfluss der Dicke auf die auftretenden Coil- bzw. Paketsprünge weiter zu untersuchen, um stabilere Prozessfenster zu erreichen und die Einlegeposition der Platinen in Verbindung mit den Platinenanschlüssen besser einstellen bzw. prüfen zu können. Hierzu wäre es hilfreich, ein geeignetes Referenzsystem zu adaptieren.



Darüber hinaus muss die Verschleißbeobachtung der hoch belasteten Komponenten weiter forciert werden. Dadurch lassen sich anstehende Reparaturen sowie das Austauschen bzw. Überarbeiten von Verschleißteilen für die Zukunft abschätzen, um rechtzeitig reagieren zu können. Gleichzeitig ermöglicht dies, außergewöhnliche Verschleißzustände zu detektieren und zu beheben.

## Literaturverzeichnis

- Berger, C. (05. 06 2007). *Handelsblatt*. Abgerufen am 26. 09 2014 von <http://www.handelsblatt.com/auto/test-technik/blech-statt-guss-autohersteller-setzen-auf-plattenbau-seite-all/2816742-all.html>
- Böhler Edelstahl GmbH & Co KG. (kein Datum). *www.boehler-edelstahl.com*. Abgerufen am 26. 11 2014 von <http://www.boehler-edelstahl.com/files/W300DE.pdf>
- Daimler AG. (2006). *vde*. Abgerufen am 26. 10 2014 von <https://www.vde.com/de/Regionalorganisation/Bezirksvereine/Kassel/Berichte/2006/documents/mcms/dcrefachsen.pdf>
- Doege, E., & Behrens, B. A. (2010). *Handbuch Umformtechnik*. Berlin Heidelberg: Springer- Verlag.
- Häußler, P., Nowicki, L., Bangert, C., & Sauter, J. (5. 11 2003). *Das BMBF-Projekt ELAnO: Entwicklung und Konstruktion von innovativen Leichtbauprodukten unter konsequenter Verwendung adaptierter Analyse- und Optimierungsmethoden*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Keyence Corporation. (kein Datum). *Digitale Temperatursensoren Modellreihe FT*. Abgerufen am 26. 11 2014 von [https://www.keyence.com/download/download/confirmation/?dlAssetId=AS\\_5927&dlSeriesId=WS\\_SR\\_ft&dlModelId=&dlLangId=&dlLangType=en-GB](https://www.keyence.com/download/download/confirmation/?dlAssetId=AS_5927&dlSeriesId=WS_SR_ft&dlModelId=&dlLangId=&dlLangType=en-GB)
- Kirchwegger, H. J., Krenn, K. H., & Kriegner, W. (2008). *Patentnr. EP2125263 B1*. Linz.
- Kolleck, R. (2009). *Umformtechnik*. Graz: TU Graz.
- Kolleck, R. (2013). *Werkzeug- und Anlagentechnologie für die Blechumformung*. Graz: TU Graz.
- Kriegner, W. (2012). *Warmumformung voestalpine Anarbeitung*.
- Siebenpfeifer Hrsg., W. (2014). *Leichtbau- Technologien im Automobilbau*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- voestalpine Anarbeitung GmbH. (2014). Linz, Oberösterreich, Österreich.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Hinterachse Baugruppen und Funktion .....	2
Abbildung 1.2: Verschiedene Bauarten der Achsbrücke .....	3
Abbildung 1.3: Achsbrücke Generation <i>3plus</i> .....	4
Abbildung 1.4: Zu untersuchende Einflussgrößen alphas® forming .....	4
Abbildung 2.1: Verfahrensablauf eines zweistufigen Prozesses nach Stand der Technik .....	6
Abbildung 2.2: Prinzipieller Verfahrensablauf alphas® forming .....	8
Abbildung 2.3: Oxidationsrate von Eisen an Luft.....	9
Abbildung 2.4: Umformkräfte abhängig von Temperatur .....	10
Abbildung 2.5: Gesamtwerkzeug alphas® forming .....	11
Abbildung 2.6: Werkzeug alphas® forming .....	11
Abbildung 3.1: Auslieferungszustand Achsbrücke, links Deckelseite, rechts Ringseite .....	13
Abbildung 3.2: Anschlussquerschnitt Halbschale BR6.....	14
Abbildung 3.3: Anschlussquerschnitt Halbschale BR4.....	14
Abbildung 3.4: Prozesskette Achsbrückenherstellung .....	15
Abbildung 3.5: Schachtelplan BR4.....	17
Abbildung 3.6: Platine und Datamatrix Code .....	17
Abbildung 3.7: Layout Tafelblechzentrum(Ausschnitt Halbschalenfertigung) .....	18
Abbildung 3.8: Platinenladungsträger .....	18
Abbildung 3.9: Pressenlayout.....	19
Abbildung 3.10: Beladeroboter.....	19
Abbildung 3.11: Schmierstoffauftrag .....	20
Abbildung 3.12: Umformen .....	21
Abbildung 3.13: Entnahme der umgeformten Platine .....	21
Abbildung 3.14: Vermessen der Halbschale .....	22
Abbildung 3.15: Zur Weiterverarbeitung relevante Merkmale .....	23
Abbildung 3.16: Ablegen im Halbschalen- Ladungsträger .....	23
Abbildung 3.17: Messdatenbezeichnung Halbschale .....	24
Abbildung 4.1: Y- Breiten BR6 aus der Datenerfassung .....	26

Abbildung 4.2: Cp- und Cpk- Werte von Breiten auf der Y- Seite bezogen auf Presszyklen(BR6) .....	29
Abbildung 4.3: Cp- und Cpk- Werte von Höhen auf der Y- Seite bezogen auf Presszyklen(BR6) .....	29
Abbildung 5.1: Sprünge in den Messergebnissen aufgrund von Coil-, bzw. Paketwechsel (BR6 Y+ Breite).....	32
Abbildung 5.2: Dickenschrieb eines Coils(BR6) mit paketweiser Zuordnung der Mittelwerte.....	34
Abbildung 5.3: Mittelwerte der Platinenbreiten je Coilpaket und je Brenner .	35
Abbildung 5.4: „Y- Halbschalenhöhe“ abh. von Platinenbreite (BR6).....	37
Abbildung 5.5: „Y- Halbschalenhöhe“ abh. von Platinendicke (BR6) .....	37
Abbildung 5.6: Halbschalenhöhe abh. von Vergleichswert .....	39
Abbildung 5.7: Y- Breite mit lasergeschnittenen Versuchsplatinen (BR4) ....	40
Abbildung 5.8: Y- Höhe mit lasergeschnittenen Versuchsplatinen (BR4).....	40
Abbildung 5.9: Platinenanschlüge im Werkzeug & Greifarmpositionen Beladeroboter (Pfeile) .....	42
Abbildung 5.10: Längsversatz bei geschlossenem Greiferhandling .....	44
Abbildung 5.11: Square Edge „Y-Seite“ BR4: Ringseitig stärkere Stauchung .....	45
Abbildung 5.12: Seitenversatz und Verdrehung der Platine im Werkzeug ...	46
Abbildung 5.13: „Y-Seite“ einer erwärmten Platine BR4 im Werkzeug.....	47
Abbildung 5.14: Ergebnisse aus Vermessung der Platinenanschlüge BR4 .	48
Abbildung 5.15: Kraft- Weg- Geschwindigkeitsverlauf Umformung.....	49
Abbildung 5.16: Prägeleisten der „Y- Seite“ .....	50
Abbildung 5.17: Kritischer Querschnitt Prägeleiste (links: Kräfteverhältnis, rechts: Beispiel einer eingerissenen Prägeleiste).....	51
Abbildung 5.18: Verschleiß am Luftboden BR6 („Y+ Seite“) .....	52
Abbildung 5.19: Überbiegung der Halbschale .....	53
Abbildung 5.20: Verschleißbedingte Setzung einer geraden Prägeleiste BR6 .....	53
Abbildung 5.21: Einfluss des Verschleißes auf die Halbschalenhöhe .....	54
Abbildung 5.22: Messen der Luftbodensetzung .....	55
Abbildung 5.23: Vermessung der Prägeleistenhöhen mit Messarm.....	56

Abbildung 5.24: Ergebnisse aus der Vermessung der Prägeleistenhöhen BR6 .....	57
Abbildung 5.25: Geleistete Arbeitshübe der Prägeleisten BR4 zum Untersuchungszeitpunkt.....	58
Abbildung 5.26: Ergebnisse aus der Vermessung der Prägeleistenhöhen BR4 .....	59
Abbildung 5.27: Prägeleisten auf Verschleißfortschritt messen .....	60
Abbildung 5.28: Warmlaufverhalten Breite BR6 .....	62
Abbildung 5.29: Warmlaufverhalten Höhe BR6.....	62
Abbildung 5.30: Messstation: Anordnung der Messtaster .....	64
Abbildung 5.31: Verunreinigte Oberfläche Meisterteil .....	65
Abbildung 5.32: Falsch positionierter Sensor .....	66
Abbildung 5.33: Differenz zwischen warm und kalt vermessenen Halbschalenbreiten der „Y- Seite“ (BR4).....	67
Abbildung 5.34: Differenz zwischen warm und kalt vermessenen Halbschalenhöhen der „Y- Seite“ (BR4).....	68
Abbildung 5.35: Zusammenhang von Bauteiltemperatur bei Messvorgang mit Umformtaktzeit (BR4).....	69
Abbildung 5.36: Messpunkte 1: Infrarotsensor, 2: Kontaktmessung Thermoelement(BR4).....	70
Abbildung 5.37: Vergleich der verbauten Temperaturmessung mit Versuchsmessung (BR4) .....	71
Abbildung 6.1: links: Einlaufradius Umformbacken, rechts: Abdruck des Einlaufradius auf der . Halbschale .....	73
Abbildung 6.2: Halbschalenbreiten „Y-Seite“ BR4 vor und nach dem Luftboden heben .....	73
Abbildung 6.3: Kassette inklusive Zuganker .....	74
Abbildung 6.4: Halbschalenbreiten „Y-Seite“ BR4 (Einstellparameter: Anzugsmoment und Bodenschrauben) .....	75
Abbildung 6.5: Halbschalenbreiten „Y+Seite“ BR4 (Einstellparameter: Anzugsmoment und Bodenschrauben) .....	76
Abbildung 6.6: Anzugsreihenfolge Zuganker (voestalpine Anarbeitung GmbH, 2014).....	76

Abbildung 6.7: Halbschalenhöhen BR4 vor und nachdem ringseitig 0,5mm bei den Prägeleisten untergelegt wurde.....	78
Abbildung 6.8: Halbschalenhöhen BR4 vor und nachdem bei den Hauptdistanzen 0,1mm entfernt wurde .....	79

# Anhang

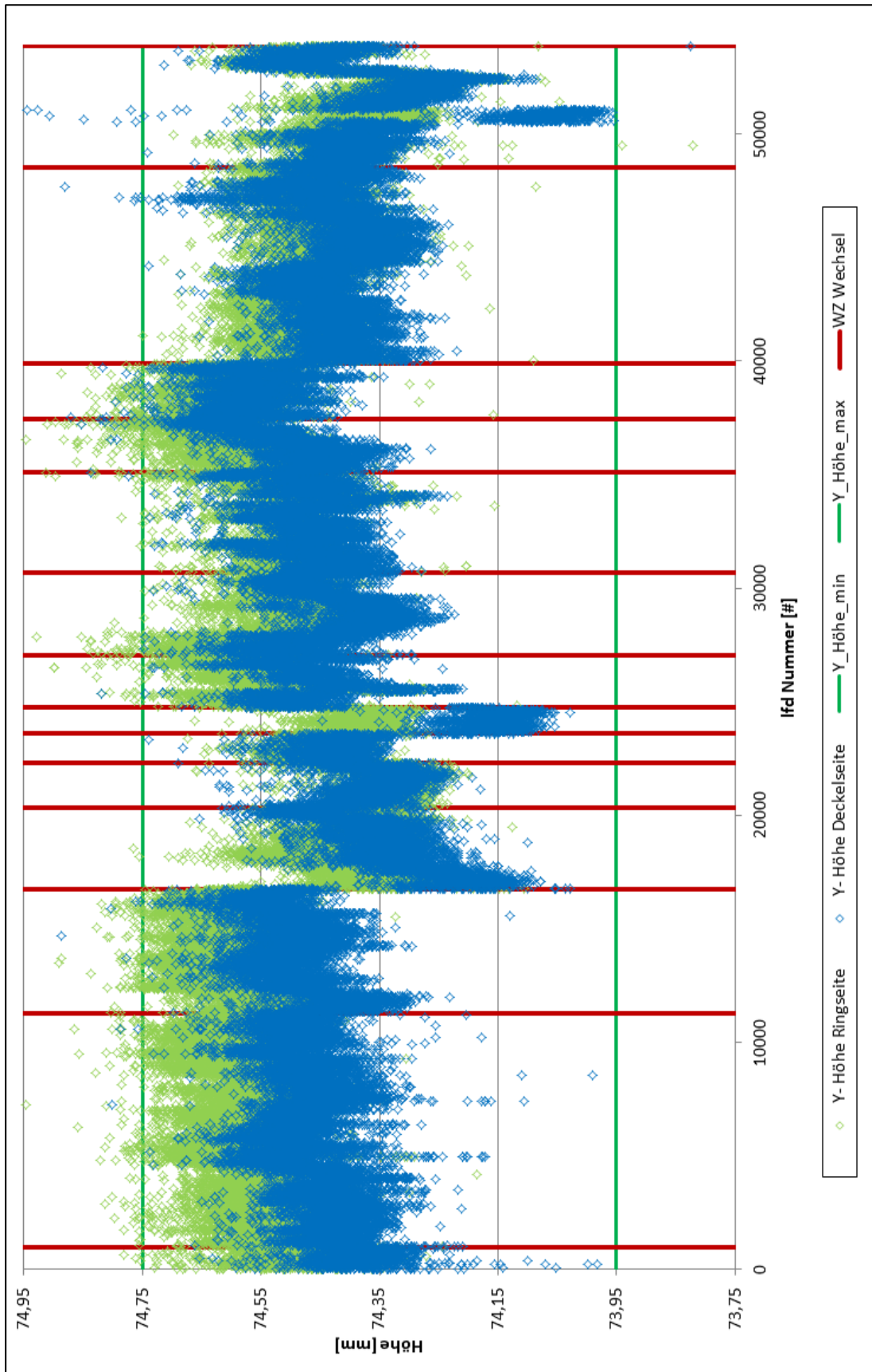


Abbildung 0.1: Y- Höhen BR6 aus der Datenerfassung

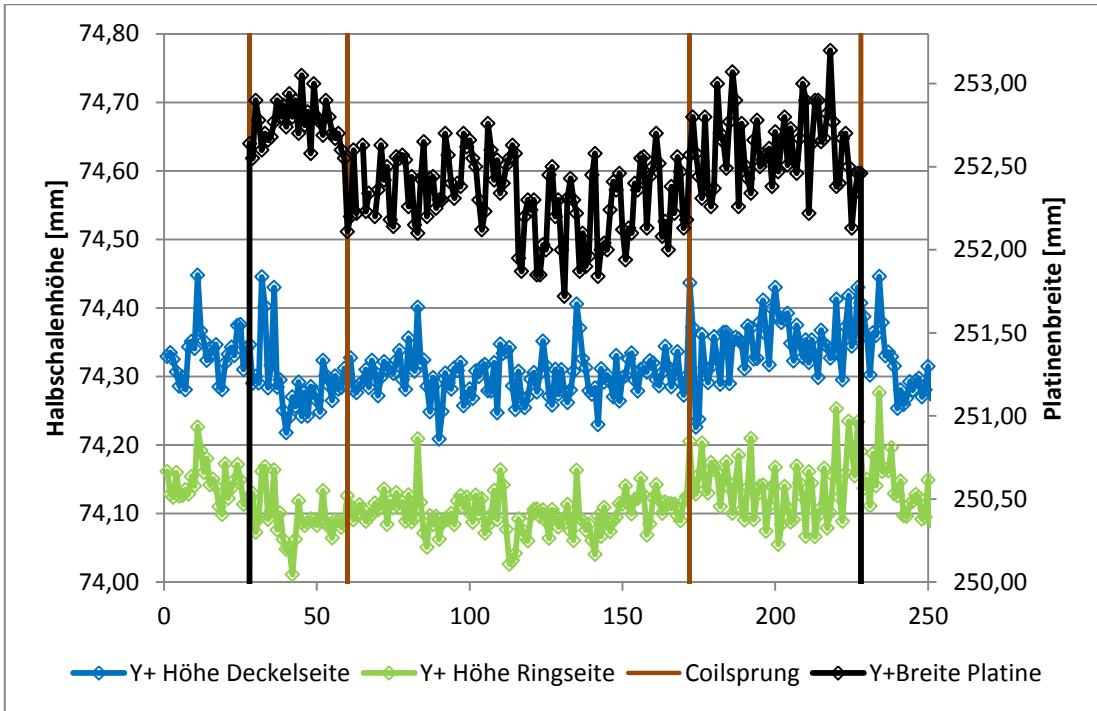


Abbildung 0.2: „Y+ Halbschalenhöhe“ abh. von Platinenbreite (BR6)  
(Vollständig vermessener Ladungsträger)

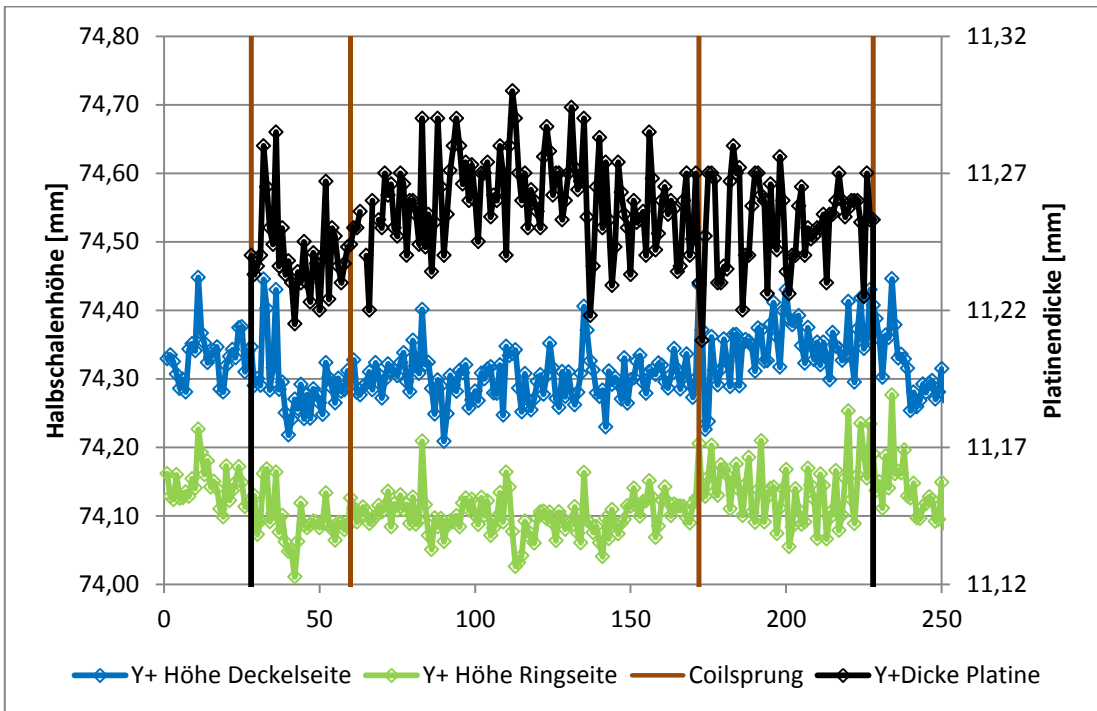


Abbildung 0.3: „Y+ Halbschalenhöhe“ abh. von Platinendicke (BR6)  
(Vollständig vermessener Ladungsträger)



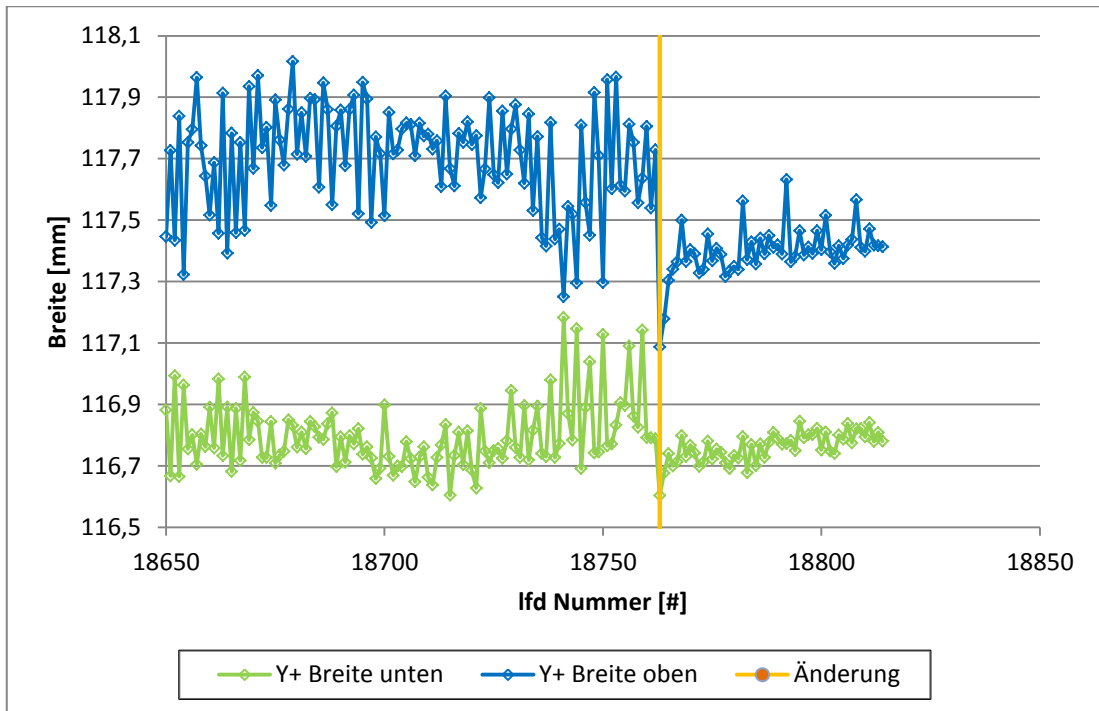


Abbildung 0.4: Y+ Breite mit lasergeschnittenen Versuchsplatinen (BR4)

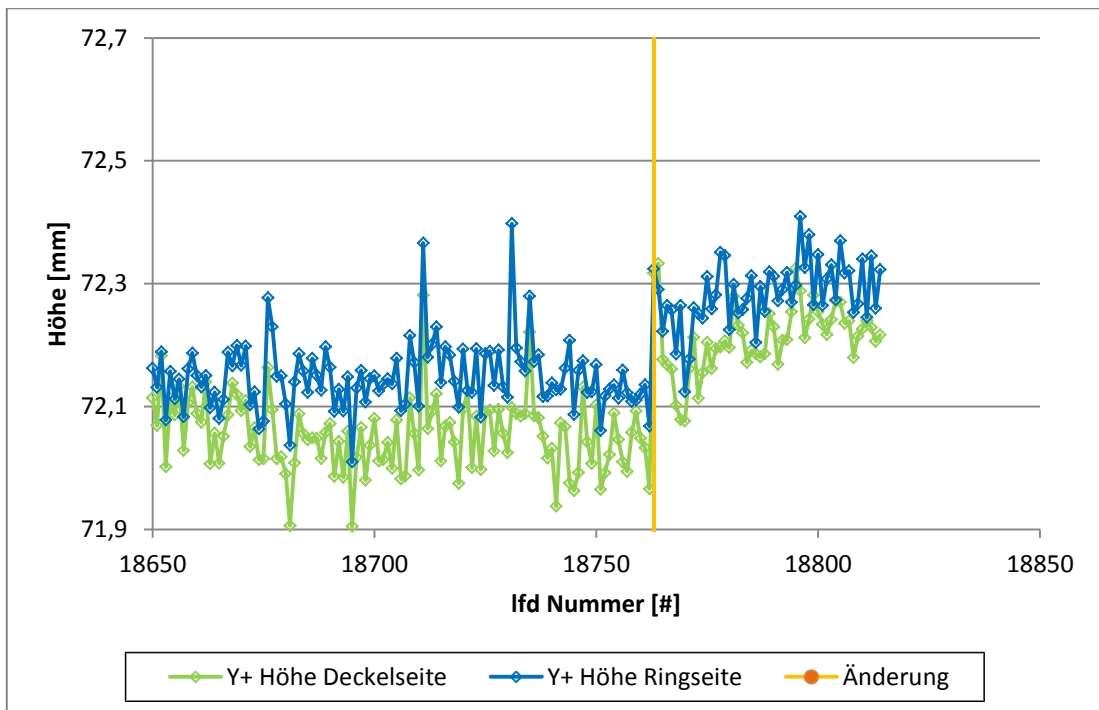


Abbildung 0.5: Y+ Höhe mit lasergeschnittenen Versuchsplatinen (BR4)

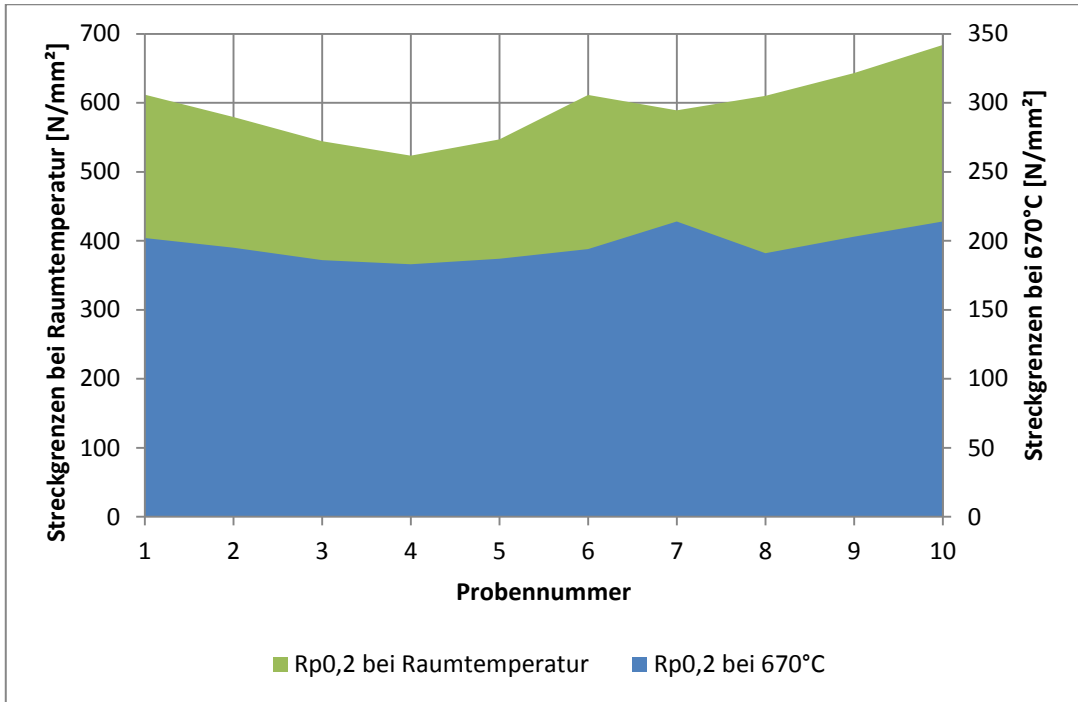


Abbildung 0.6: Streckgrenzenwerte von Warmzugversuchen mit 10 Proben im Vergleich zu regulären Zugproben aus den gleichen Paketen bei Raumtemperatur

## BÖHLER W300

### Warmfestigkeitsschaubild

— vergütet 1600 N/mm<sup>2</sup>  
 - - - - - vergütet 1200 N/mm<sup>2</sup>  
 1... Zugfestigkeit N/mm<sup>2</sup>  
 2... 0,2-Grenze N/mm<sup>2</sup>  
 3... Einschnürung %

### Hot strength chart

— heat treated 1600 N/mm<sup>2</sup>  
 - - - - - heat treated 1200 N/mm<sup>2</sup>  
 1... Tensile strength N/mm<sup>2</sup>  
 2... 0.2% proof stress N/mm<sup>2</sup>  
 3... Reduction of area %

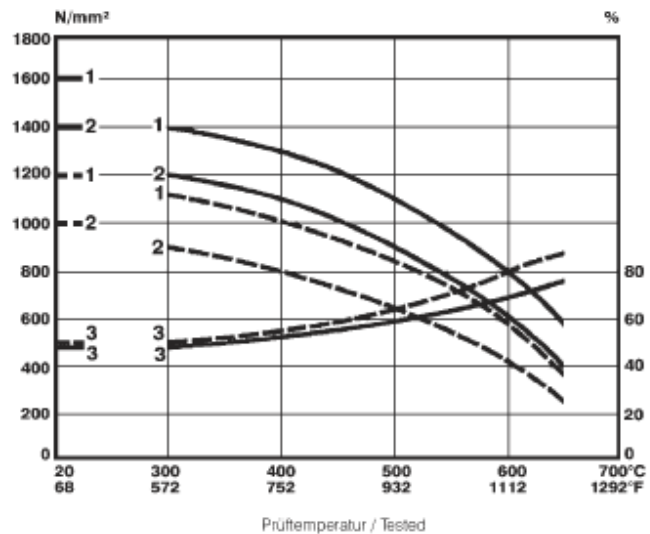


Abbildung 0.7: Warmfestigkeitsschaubild Böhler W300 (Böhler Edelstahl GmbH & Co KG)

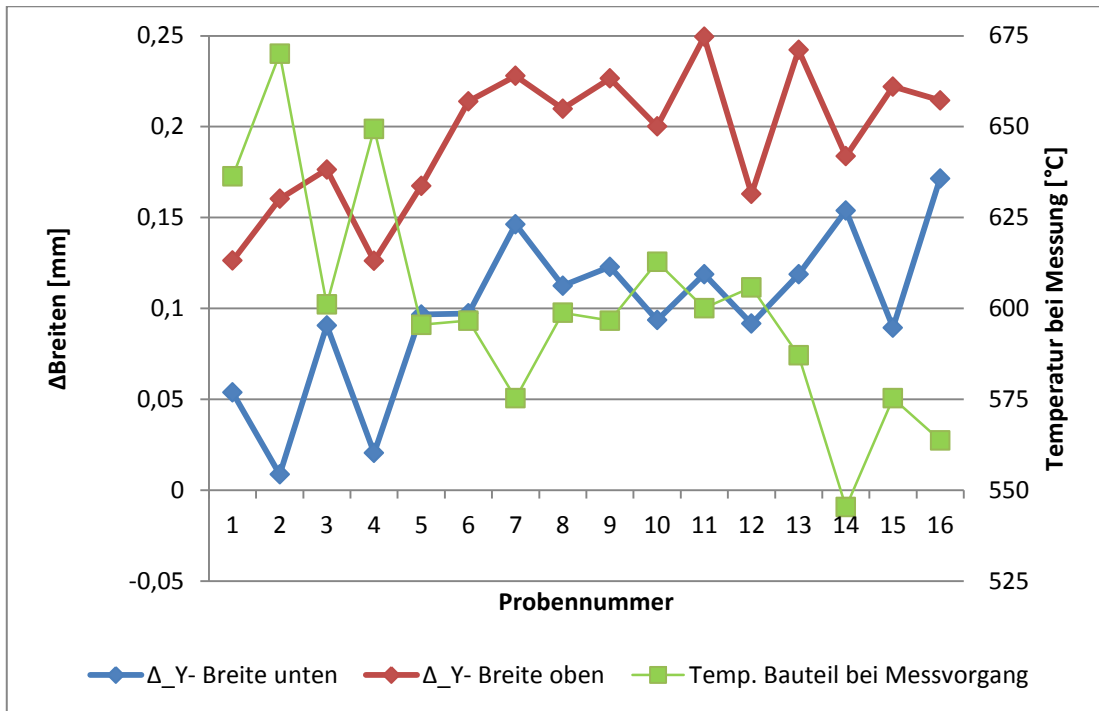


Abbildung 0.8: Differenz zwischen warm und kalt vermessenen Halbschalenbreiten der „Y-Seite“ (BR6)

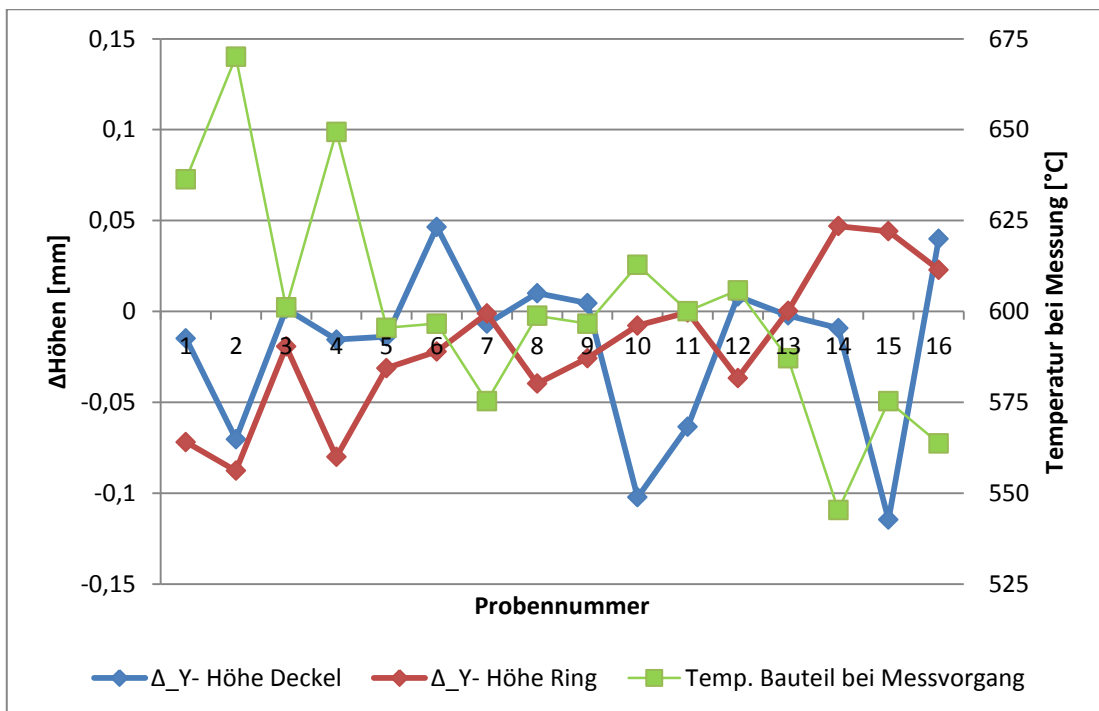


Abbildung 0.9: Differenz zwischen warm und kalt vermessenen Halbschalenhöhen der „Y-Seite“ (BR6)

## Digitale Verstärkungsfunktionen

Die anwenderfreundliche Menüstruktur und die leicht ablesbare Anzeige wurden von KEYENCE beibehalten. FT-50AW(P) und FT-55AW(P) bieten praktische Funktionen, die den Einsatz unkompliziert und einfach machen.

### Komplexe Einstellungsberechnungen – jetzt automatisch

In der Vergangenheit wurde die richtige Temperatur nur dann angezeigt, wenn der zum jeweiligen Material des Messobjektes passende Emissionsgrad zuvor festgelegt wurde, da unterschiedliche Materialien auch unterschiedliche Emissionsgrade aufweisen. Bei der Modellreihe FT muss lediglich die aktuelle Temperatur des Messobjektes eingegeben werden, da der Emissionsgrad anhand der eingegebenen Ist-Temperatur automatisch berechnet wird. Daher gehören komplexe Emissionsgradberechnungen nun endgültig der Vergangenheit an.

#### Was ist der Emissionsgrad?

Wenn zwei unterschiedliche Materialien dieselbe Temperatur aufweisen, ergeben sich dennoch Mengenunterschiede bei der Ausstrahlung im fernen Infrarotbereich. Der Emissionsgrad basiert auf einer Skala von 0 bis 1 und beschreibt die vom jeweiligen Material ausgehende Strahlungsmenge im fernen Infrarotbereich.

#### Beispiele

Wasser: 0,92 bis 0,96  
Kunststoff: 0,85 bis 0,95  
Edelstahl: 0,45  
Keramik: 0,90 bis 0,94



Abbildung 0.10: Einstellung des digitalen Verstärkers für den Infrarotsensor FT-H40K (Keyence Corporation)