



Thomas Vieider, BSc

**Verbesserte Umformeigenschaften von Al-Mg-Si
Legierungen durch partielles Entfestigen vor
dem Tiefziehen mittels Lasererwärmung**

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch

Masterstudium Maschinenbau

Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Michael Machhammer

Graz, Oktober 2016

Eidesstattliche Erklärung / Affidavit

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 Diplomarbeit 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 marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present masterthesis.

Graz, am.....

.....

Thomas Vieider, e.h.

Kurzfassung

Der Werkstoff Aluminium ist heute einer der wichtigsten Leichtbaumaterialien in der Automobilindustrie. Er wird eingesetzt bei Motoren, im Karosseriebereich oder im Fahrwerk. Durch die Reduktion des Gesamtgewichtes eines Fahrzeuges können die geforderten Umweltschutzziele, wie zum Beispiel ein geringerer CO₂ Ausstoss, erreicht werden.

Beim Umformen von Aluminiumblechen ist es oft nicht möglich die Verfahrensgrenzen, die bei der Verwendung von konventionellen Tiefziehstählen erzielt werden, zu erreichen. Um die dabei auftretenden kritischen Spannungen zu minimieren und das Umformverhalten von Aluminium 6016 zu verbessern, kann eine lokale, kurzzeitige Wärmebehandlung vor dem Umformen durchgeführt werden.

Mittels FEM-Simulation wurde versucht zu lokalisieren welche Bereiche der Platine (6016) mittels Lasererwärmung entfestigt werden müssen. Aufbauend auf die FEM-Simulation wurden Platinen mit unterschiedlichen Entfestigungslayouts an einem Napfwerkzeug und einem Kreuzwerkzeug tiefgezogen. Mit Hilfe des Grenzformänderungsschaubildes wurde das Umformverhalten der verschiedenen Layouts evaluiert, um so den Einfluss der Entfestigung zu charakterisieren. Des Weiteren wurde das Rückbildungsverhalten der Entfestigung über einen bestimmten Zeitraum, durch Auslagern der wärmebehandelten Platinen bei Raumtemperatur, untersucht. Die Ergebnisse aus den beiden Untersuchungen konnten zur Ermittlung der Entfestigungszonen an einem kundenspezifischen Bauteil verwendet werden.

Abstract

Aluminum is one of the most commonly used lightweight materials in the automotive industry. It is used in engines, in car bodies or in power trains. By reducing the overall weight of a vehicle the required environmental protection goals, such as a lower CO₂- emissions, can be achieved.

When forming aluminum sheets, it is often not possible to achieve the process limits, which can be reached by conventional deep drawing steels. To minimize the critical stresses and to improve the forming behavior of aluminum 6016, a promising method is the local short-term heat treatment before the forming process.

By the use of FEM simulation the area for the heat-treatment, by laser heating, was determined. Based on the FEM simulation blanks were deep drawn with different heat-treatment layouts conducted with a cup tool and cross tool. With the help of the forming limit diagram the forming behavior of different layouts could be compared in order to characterize the influence of heat-treatment. Furthermore, the effect of natural aging at room temperature in the heat-treated area was analyzed. The obtained knowledge from the cup test and cross test, were used to determine the heat treatment zone on a customer-specific component.

Danksagung

Diese Diplomarbeit wurde im Studienjahr 2015/16 am Institut für Werkzeugtechnik und spanlose Produktion durchgeführt.

Ich möchte mich ganz herzlich bei allen am Projekt beteiligten Personen für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima bedanken. Besonderer Dank gilt M.Machhammer für seine hervorragende Betreuung, seine Bemühungen mir den Einstieg in das umfangreiche Themengebiet der Umformtechnik zu erleichtern und für seine gute Zusammenarbeit während dieser Arbeit.

Mein Dank geht auch an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch für die Begutachtung meiner Diplomarbeit.

Meinen Wohnungs- und Studienkollegen und allen weiteren Freunden danke ich für die schöne Zeit die ich während meiner Studienzeit in Graz hatte, und für die ständige moralische Unterstützung und Motivation, die wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit und des Studiums beitrug.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Familie, sowie meiner Freundin bedanken, welche mich während des Studiums immer unterstützt haben und immer hinter meinen Entscheidungen gestanden sind.

Danke.

Graz, im Oktober 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Aluminiumwerkstoffe	3
2.1.1	Aluminiumwerkstoffe im modernen Karosseriebau	4
2.1.2	Legierungssystem Al-Mg-Si (6xxx)	5
2.2	Umformtechnik	7
2.2.1	Grundlagen des Tiefziehens	8
2.2.1.1	Einflussgrößen und Prozessablauf beim Tiefziehen	9
2.2.1.2	Spannungen beim Tiefziehen	10
2.2.1.3	Fehler- und Versagensmöglichkeiten beim Tiefziehen	11
2.2.1.4	Anisotropie	12
2.2.1.5	Umformgrad φ (logarithmische Formänderung)	14
2.2.1.6	Fließspannung	14
2.2.1.7	Fließkurve	15
2.2.1.8	FLD-Grenzformänderungsdiagramm	15
2.2.2	Tribologisches Verhalten	16
2.2.2.1	Reibungsmechanismus	16
2.2.2.2	Blechoberfläche	17
2.2.2.3	Schmierstoffe	18
2.2.2.4	Trockenschmierstoffe	19
2.3	Tailored Blanks	20
2.3.1	Tailored Heat Treated Blanks	22
2.3.1.1	Prozesskette beim Einsatz von THTB im Karosseriebau	22
2.3.1.2	Fließverhalten und Mikrostruktur von THTB	23
2.3.1.3	Prozessgrenzen hinsichtlich des Umformens	26
2.3.1.4	Wirkprinzipien und -mechanismen für THTB	27

2.3.1.5	Aufheiztechnologien für die lokale Wärmebehandlung	28
2.3.2	Lasertechnologien für eine lokale Wärmebehandlung	30
2.3.2.1	CO ₂ -Laser	30
2.3.2.2	Festkörperlaser	32
2.3.2.3	Absorption von Laserstrahlung	33
3	Zielsetzung der Arbeit	35
4	Versuchseinrichtung und -Durchführung	36
4.1	Eingesetzter Werkstoff	36
4.2	Anlage für die lokale Wärmebehandlung und Temperaturmessung .	37
4.2.1	Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera	37
4.3	Anlagen und Werkzeuge für die Tiefziehversuche	38
4.3.1	Napfwerkzeug	38
4.3.2	Kreuzwerkzeug	39
4.3.3	Kundenspezifisches Bauteil	40
4.4	Versuchsaufbau	40
4.4.1	Versuchsaufbau für die lokale Wärmebehandlung	40
4.4.2	Blechvorbereitung	41
4.4.2.1	Vorbereitung der CNC-Programme für die Laser- anlage	42
4.4.3	Versuchsaufbau für die Tiefziehversuche in der hydraulischen Presse	43
4.5	Versuchsdurchführung	45
4.5.1	Versuchsdurchführung der lokalen Wärmebehandlung mit- tels Lasererwärmung	45
4.5.2	Versuchsdurchführung Umformversuche	45
5	Evaluierung der Erwärmungslayouts für die späteren Umformversuche mittels FEM-Simulation	47
5.1	FE-Modell	47
5.1.1	Erstellung der Wärmebehandlungslayouts	49
5.1.1.1	Layouts für das Napfwerkzeug	49
5.1.1.2	Layouts für das Kreuzwerkzeug	54

6	Ergebnisse und Diskussion	59
6.1	Thermographische Ansicht der Layouts	59
6.1.1	Thermografische Ansicht Layouts-Napfwerkzeug	59
6.1.1.1	Temperatur - Zeitverlauf am Napf	61
6.1.2	Thermographische Ansicht Layout-KWKZ	61
6.1.2.1	Temperatur - Zeitverlauf am KWKZ	62
6.1.3	Ziehtiefenvergleich der tiefgezogenen Layouts	63
6.2	GOM Vermessung	65
6.2.1	Ergebnisse GOM-Vermessung am Napf	67
6.3	Blechdickenverlauf	71
6.3.1	Blechdickenverlauf am Napf	72
6.3.2	Blechdickenverlauf am Kreuzziehteil	73
6.3.3	Einfluss der Lagerzeit zwischen Wärmebehandlung und Um- formprozess auf den Blechdickenverlauf am Napfziehteil . . .	75
6.4	Kundenspezifisches Bauteil	77
6.4.1	Anbringen von Opferzonen am kundenspezifisches Bauteil . .	78
6.4.2	Entfestigen der Zarge/Flansches am kundenspezifisches Bau- teil	80
6.4.3	Fehlerfreies kundenspezifisches Bauteil	81
6.4.4	Thermographische Ansicht kundenspezifisches Bauteil	82
6.4.4.1	Temperatur - Zeitverlauf am kundenspezifische Bau- teil	83
7	Zusammenfassung und Ausblick	85
	Abbildungsverzeichnis	87
	Tabellenverzeichnis	91

1 Einleitung

"Nichts ist älter in der Natur als Bewegung" (Galileo Galilei). Dieser Grundgedanke beschäftigt die Menschheit schon seit jeher. Mit dem Wunsch sich frei, schneller und wenn möglich ohne körperliche Anstrengung bewegen zu können und dabei noch schwere Lasten zu transportieren, wurden im Laufe der Zeit erhebliche technische Fortschritte gemacht[1]. Wurde im Mittelalter die Pferdekutsche als Fortbewegungsmittel genutzt, so ist es heute das Automobil, das Flugzeug oder die Bahn.

Bei der Entwicklung des Automobils bis Ende des zweiten Weltkrieges gab es weder Emissionsvorschriften noch Sicherheitsgesetze zu beachten. Mit Einführung der *Federal Motor Vehicle Safety Standards* Mitte der Sechzigerjahre in den USA, wurde bei der Entwicklung immer mehr Wert auf Sicherheit und Komfort gelegt[1]. Diese Steigerung der Gesamtfahrzeugqualität hat zu einer erheblichen Gewichtszunahme geführt. Mehr Masse bedeutet stärker ausgelegte Fahrwerke und größere Aggregate, was wiederum mehr Kraftstoffverbrauch und CO_2 -Ausstoß zur Folge hat[2].

Durch neue Innovationen der Automobilhersteller und -zulieferer können die CO_2 -Emissionen von Kraftfahrzeugen verringert werden. Die Verminderung der Emissionen aus dem Verbrennungsprozess führt nicht nur zu niedrigerem Kraftstoffverbrauch, sondern auch zu einer Schonung fossiler Brennstoffe. Um diese Ziele zu erreichen, ist eine wichtige technische Maßnahme der Leichtbau[2]. Ein Beispiel dafür zeigt: bei Verminderung des Fahrzeuggewichts um 100 kg, kann der Kraftstoffverbrauch um etwa 0,3 Liter pro 100 Kilometer reduziert werden. Das ergibt umgerechnet auf den Kilometer bei einem Ottomotor 7,1 Gramm und bei einem Diesel 7,9 Gramm weniger CO_2 [3].

Die Karosserie ist mit ca. 40 Prozent des Gesamtgewichtes eines Fahrzeuges die Komponente, wo am meisten an Masse eingespart werden kann, und die gleichzei-

tig verformbar und stabil sein soll[4]. So entwickelte Audi in den 90er Jahren das Karosseriekonzept des ASF, welche aus einem Aluminiumhalbzeugmix aus Guss, Profilen und Blechen besteht. Bei diesem Leichtbaukonzept kommen verschiedene Aluminiumlegierungen zum Einsatz, wie die neuentwickelten, schnellaushärtenden Legierungen, auf Basis der AA6016 für den Aussenhautbereich[1].

Auf Grund der geringeren Umformbarkeit von Aluminiumblechen, im Gegensatz zu konventionellen Tiefziehstählen, ist es notwendig neue Fertigungsverfahren zu entwickeln, welche die Umformbarkeit steigern, um so eine kosteneffiziente Herstellung von komplexen Geometrien zu gewährleisten[5]. Ein Verfahren hierfür ist das sogenannte Tailored Heat Treated Blanks (THTB). Bei diesem Verfahren werden durch eine Wärmebehandlung die mechanischen Werkstoffeigenschaften der Platine vor dem Umformprozess lokal angepasst[6].

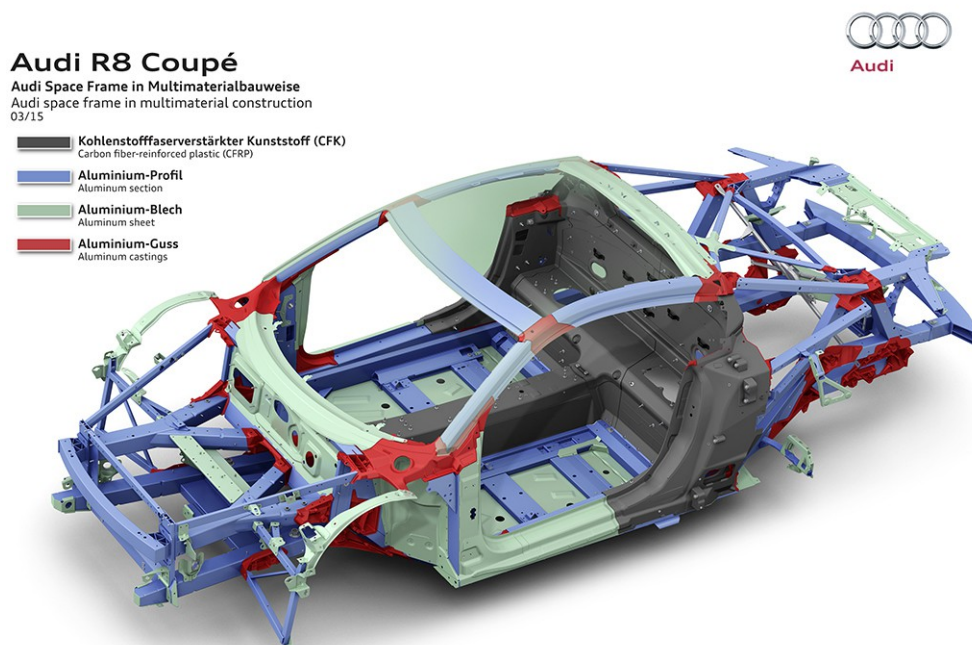


Abbildung 1.1: Audi Space Frame (ASF), Gesamtgewicht 200 kg[7]

2 Stand der Technik

2.1 Aluminiumwerkstoffe

Der Einsatz von Aluminium hat in den letzten Jahren aufgrund seiner guten Eigenschaften, wie geringe Dichte, hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit, Korrosionsbeständigkeit und passable Umformbarkeit, stark zugenommen[1].

Aluminiumlegierungen werden in Knet- und Gusslegierungen eingeteilt. Die Haupteigenschaft der Knetlegierung besteht in der plastischen Verformbarkeit, wobei die Gusslegierungen ein gutes Formfüllvermögen und gute Vergießbarkeit aufweisen. Innerhalb dieser beiden Hauptgruppen unterscheidet man zudem zwischen aushärtbare und nichtaushärtbare (naturharte) Legierungen[8].

Durch einen vierstelligen Zahlencode werden Aluminiumlegierungen nach ihren Legierungstyp eingeteilt. Das Hauptlegierungselement wird mit der ersten Ziffer gekennzeichnet, während mit den drei übrigen Ziffern die spezifische Legierung genauer beschrieben wird. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Aluminiumlegierungstypen, sowie deren Eigenschaften und Einsatzgebiet. Zur Feineinstellung der Materialeigenschaften werden den Legierungen laut Tabelle 2.1 noch weitere Elemente hinzugefügt, die hier nicht angeführt werden da sie einen sehr kleinen prozentualen Anteil ausmachen.

Zusätzlich werden die aushärtbaren Aluminiumknetlegierungen mit dem Buchstaben T, sowie einer nachfolgenden Ziffer von eins bis neun gekennzeichnet, welche die Zustände durch eine Wärmebehandlung charakterisieren. (Tabelle 2.2)

Tabelle 2.1: Aluminiumlegierungstypen mit deren Eigenschaften und Anwendungsgebiete [9]

Gruppe	Legierungstyp	aushärtbar	Eigensch./Anwendung
1xxx	Reinaluminium	nein	korrosionbest., > elektr. Leitf.
2xxx	Al-CU	ja	hohe Festigkeit, Flugzeugbau
3xxx	Al-Mn	nein	korrosionsbest., gut formbar
4xxx	Al-Si	ja/nein	Schweißzusatz
5xxx	Al-Mg	nein	hohe Festigkeit, Schiffbau
6xxx	Al-Mg-Si	ja	Schweißbar, Flug/Fahrzeugbau
7xxx	Al-Zn-Mg	ja	höchste Festigkeit, Raumfahrt
8xxx	Sonstige Al- Leg.	ja/nein	

Tabelle 2.2: Übersicht der relevanten Werkstoffzustände nach DIN EN 515[10]

Zustand	
T1	Abgeschreckt von der Warmumformungstemperatur und kaltausgelagert
T2	Abgeschreckt von der Warmumformungstemperatur, kaltverfestigt und kaltausgelagert
T3	Lösungsgeglüht, kaltverfestigt und kaltausgelagert
T4	Lösungsgeglüht, abgeschreckt und kaltausgelagert
T5	Abgeschreckt von der Warmumformungstemperatur und warmausgelagert
T6	Lösungsgeglüht, abgeschreckt und warmausgelagert
T7	Lösungsgeglüht, abgeschreckt, warmausgelagert und überhärtet
T8	Lösungsgeglüht, kaltverfestigt und warmausgelagert
T9	Lösungsgeglüht, warmausgelagert und kaltverfestigt

2.1.1 Aluminiumwerkstoffe im modernen Karosseriebau

Im modernen Karosseriebau kommen hauptsächlich Aluminiumhalbzeuge aus Guss, Profilen und Blechen zum Einsatz. Für die Blechlegierungen werden zum größten Teil Legierungen auf Al-Mg-Basis (5xxx, nicht aushärtbar) und Al-Mg-Si-Basis

(6xxx, ausscheidungshärtbar) eingesetzt[11]. Legierungen der 6xxx- Serie haben den Vorteil, dass nach dem Umformen durch eine gezielte Wärmebehandlung eine Festigkeitssteigerung erzielt werden kann. Darüber hinaus weisen sie eine fließfigurenfreie Oberfläche auf, was für Sichtteile von großer Bedeutung ist. Auf Grund dessen werden in Europa hauptsächlich die Aluminiumlegierungen AA6016 und AA6181 eingesetzt[5]. Tabelle 2.3 gibt eine Übersicht über die am häufigsten eingesetzten Aluminiumlegierungen der 6000 Serie und deren Einsatzfelder im Fahrzeugbau. Das Kürzel PX kennzeichnet die schnellaushärtbaren Aluminiumlegierungen, welche immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Tabelle 2.3: Die am häufigsten eingesetzten Aluminiumlegierungen der 6000 Serie und deren Einsatzfelder im Fahrzeugbau[12]

Aluminiumlegierung	Anwendung
AA6016PX	Außenhautteile (Standard)
AA6014PX	Außenhautteile mit hohen Börderanforderungen
AA6111T4	Außenhautteile höherer Festigkeit
AA6181T4	Innenteile (Standard)
AA6014T4	Strukturelle Anhängeteile
AA6501T4	Innenteile, Fußgängerschutz

2.1.2 Legierungssystem Al-Mg-Si (6xxx)

Das Legierungssystem Al-Mg-Si zählt zu den ausscheidungshärtbaren Aluminiumknetlegierungen, welche durch eine gezielte Wärmebehandlung Legierungselemente ausscheiden und dadurch eine Festigkeitssteigerung ermöglichen. Diese Steigerung der Festigkeit wird darauf zurückgeführt, dass Ausscheidungen in Mischkristallen Gleitbewegungen verhindern und so durch Versetzungen¹ umgangen oder abgeschert werden. Damit eine Legierung ausscheidungshärtbar ist muss sie folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Die Mischkristallbildung der beiden (oder mehr) Legierungskonstituenten ist

¹linienförmige Fehlstellen im Kristallaufbau

beschränkt.

- Die Löslichkeit mindestens eines Legierungselements nimmt bei sinkender Temperatur ab.
- Es gibt eine Tendenz zur Bildung kohärenter Zwischenphasen.

Al-Mg-Si Legierungen werden nach dem Kaltwalzen bei 470 °C bis 560 °C lösungsgelüht, wodurch ein übersättigter Mischkristall aus Si und Mg entsteht. Nach dem Lösungsglühen (Abb. 2.1) erfolgt eine rasche Abkühlung in Wasser oder bewegter Luft auf Raumtemperatur, wodurch eine diffusionsgesteuerte Keimbildung von Ausscheidungen unterbunden wird und die Leerstellen im Wirtsgitter eingefroren werden [13]. Durch diesen Abkühlprozess entsteht ein doppelgesättigter Mischkristall (Legierungsatome + Leerstellen) mit geringer Festigkeit (Zustand W). Gleich nach dem Abkühlprozess entstehen kohärente MgSi-Cluster, die durch eine nachfolgende Wärmebehandlung (warmauslagern) in Mg₂Si Ausscheidungen umgewandelt werden können. Diese Ausscheidungen verzerren die Aluminiummatrix, was zur Folge hat, dass die Versetzungsbewegungen behindert werden und so eine Festigkeitssteigerung erzielt wird [5], aber gleichzeitig auch, dass das Formgebungsvermögen verringert wird.

Mit diesen nachfolgenden Wärmebehandlungen können die Werkstoffzustände wie sie in Tabelle 2.2 aufgelistet sind, erreicht werden. So wird z.B. der Zustand T4 durch zweiwöchiges Kaltauslagern bei Raumtemperatur erreicht. Ab diesem Zeitpunkt können keine Veränderung der mechanischen Eigenschaften am Werkstoffe festgestellt werden.

Damit eine Festigkeitssteigerung erreicht wird, muss eine Warmaushärtung bei 100°C bis 200°C durchgeführt werden (Zustand T6). Bei dieser Nachbehandlung bilden sich teilkohärente und inkohärente Ausscheidungen, welche die maximale Verspannung der Matrix hervorrufen [13].

Bei Legierungen der 6xxx-Gruppe, besteht die Möglichkeit den Vorgang der Kaltauslagerung (Zustand T4) mittels einer kurzzeitigen Wärmebehandlung wieder rückgängig zu machen, was bedeutet, dass die vorliegenden Ausscheidungen wieder ganz oder teilweise aufgelöst werden. Durch das Rückglühen wird beinahe der Zustand W, wie nach dem Lösungsglühen erreicht. Auf Grund dieses Effektes ergibt sich die Möglichkeit Werkstoffe der 6xxx Gruppe für THTB zu verwenden.

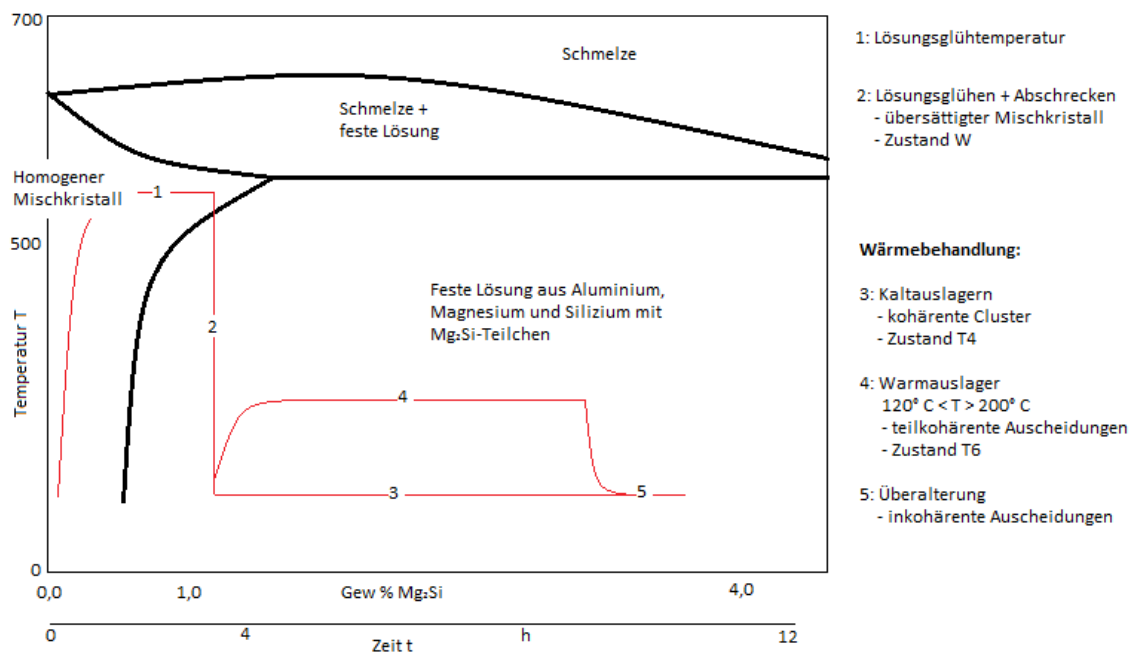


Abbildung 2.1: Ausscheidungsmechanismus bei der Wärmebehandlung von AlMgSi-Legierungen der 6xxx-Gruppe[13]

2.2 Umformtechnik

Nach DIN 8580 ist das Umformen definiert als Fertigen durch bildsames oder plastisches Ändern der Form eines festen Körpers. Dabei werden sowohl die Masse als auch der Stoffzusammenhalt beibehalten.[14]

In DIN 8582 werden die Umformverfahren(Abb. 2.2) nach dem herrschenden Spannungszustand unterteilt.[1]

Im folgenden Kapitel werden die grundlegenden Begriffe des Tiefziehens etwas genauer beschrieben. Des Weiteren werden die wichtigsten Grundbegriffe der Umformtechnik erläutert um ein Grundverständnis der Materialumformung zu schaffen.

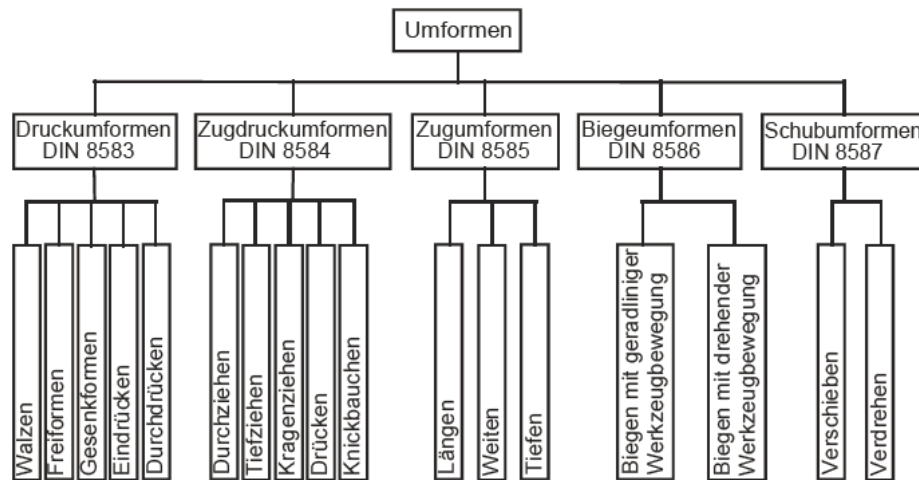


Abbildung 2.2: Gliederung der 6 Hauptgruppen der Fertigungsverfahren (nach DIN 8582)[14]

2.2.1 Grundlagen des Tiefziehens

Nach DIN 8584 ist Tiefziehen Zugdruckumformen eines Blechzuschnittes zu einem einseitig offenen Hohlkörper oder Zugdruckumformen eines Hohlkörpers zu einem Hohlkörper mit kleinerem Umfang ohne beabsichtigte Änderung der Blechdicke.[11]

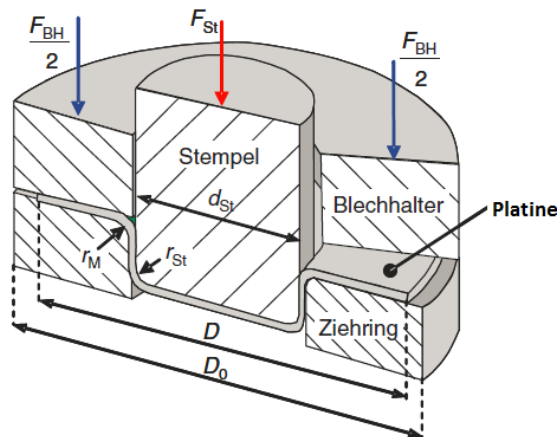


Abbildung 2.3: Aufbau eines Tiefziehwerkzeuges[2]

Abbildung 2.3 zeigt ein Tiefziehwerkzeug zur Herstellung eines rotationssymme-

trischen Bauteils bestehend aus Matrize(Ziehring), Stempel und einem Niederhalter(Blechhalter).

2.2.1.1 Einflussgrößen und Prozessablauf beim Tiefziehen

Der Prozessablauf (Abb.2.4) beim Tiefziehen kann in vier Schritten aufgeteilt werden. Dabei wird der Blechzuschnitt (Platine) in das Werkzeug zwischen Matrize und Niederhalter eingelegt und das Werkzeug geschlossen. Durch aufbringen der Niederhalterkraft wird die Platine eingeklemmt. Danach wird die Platine durch Bewegen des Stempels relativ zu Blechhalter und Matrize umgeformt.

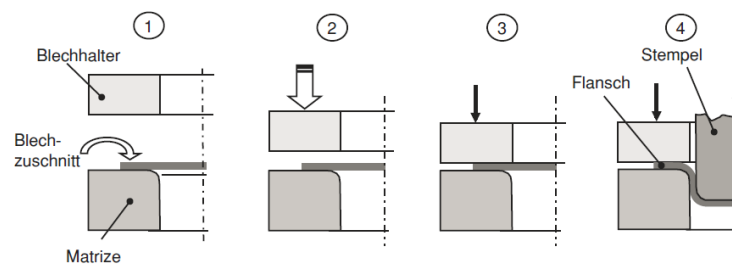


Abbildung 2.4: Prozessablauf beim Tiefziehen[11]

Tabelle 2.4: Prozessgrößen beim Tiefziehen

Prozessgröße	Symbol
Ausgangsdurchmesser Platine	D_0
aktueller Platinendurchmesser	D
Stempeldurchmesser	d_{St}
Stempelradius	r_{St}
Stempelkraft	F_{St}
Niederhalterkraft	F_{NH}
Ziehspalt	u_z
Ziehtiefe	h_z
Platinendicke	s_0
Ziehkantenradius	r_M
Matrizendurchmesser	D_M
max. zulässiges Ziehverhältnis	β_{0zul}

2.2.1.2 Spannungen beim Tiefziehen

Beim Tiefziehen wird die Umformkraft über den Ziehteilboden eingeleitet und muss über die Ziehteilzarge in den Ziehteilflansch übertragen werden. Aufgrund dessen spricht man von einer indirekten Kräfteinleitung.

Abbildung 2.5 stellt die auftretenden Spannungen während eines Tiefziehprozesses dar. Dabei handelt es sich im Flanschbereich um eine Zug-/Druckbeanspruchung, im Bodenbereich um eine Zug-/Stauchbeanspruchung und im Auslauf der Stempelkante um eine sogenannte behinderte einachsige Zugbeanspruchung.

In Abbildung 2.6 sind die verschiedenen Werkstückzonen und der Kraftfluss entlang der Platine an einem Ziehteil dargestellt.

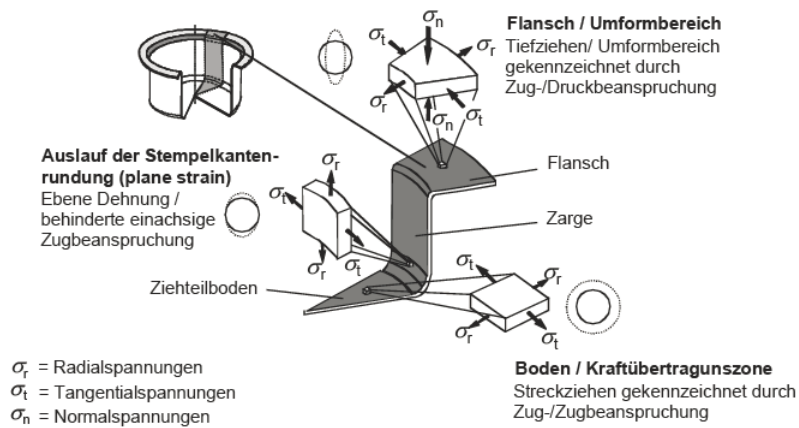


Abbildung 2.5: Beanspruchungen beim Tiefziehen[14]

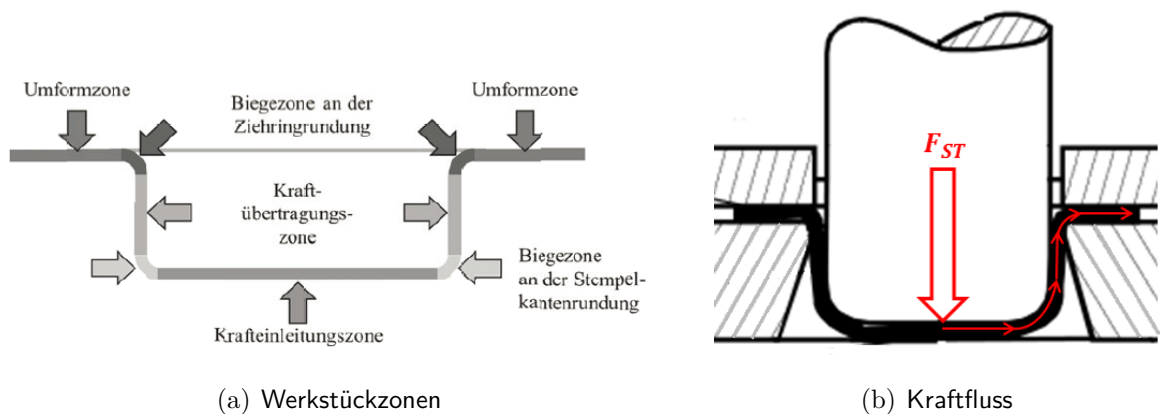


Abbildung 2.6: Werkstückzonen und Kraftfluss beim Tiefziehen im Erstzug[15]

2.2.1.3 Fehler- und Versagensmöglichkeiten beim Tiefziehen

Durch die auftretenden Spannungen beim Tiefziehen ist der Werkstoff unterschiedlichen Beanspruchungen ausgesetzt, was zu Fehler- und Versagensmöglichkeiten im Tiefziehteil führen kann.

In Tabelle 2.5 sind die üblichen Versagensfälle mit deren Ursache und Gegenmaßnahmen aufgelistet. Abbildung 2.7 zeigt die Versagensarten am einem tiefgezogenen Napf.

Tabelle 2.5: Versagensarten beim Tiefziehen[14]

Versagensart	Ursachen	Gegenmaßnahmen
Bodenreißer	risskritische Zugspannungen, die in der Größenordnung der Zugfestigkeit des betreffenden Werkstoffs liegen, welche durch zu hoher Ziehkraft hervorgerufen werden.	Niederhalterkraft verringern; Ziehspalt vergrößern; Ziehkantenradius und/oder Stempelradius erhöhen
Falten 1.Ord.	treten im Ziehteilflansch auf, aufgrund zu geringer Niederhalterkraft	Reibung im Flansch erhöhen; Niederhalterkraft erhöhen
Falten 2.Ord	treten in der Ziehteilzarge auf, in Bereichen mit tangentialen Druckspannungen	Platindurchmesser erhöhen; Ziehspalt verkleinern; Niederhalterkraft erhöhen; Verwendung von Ziehwülsten
Zipfelbildung	ebene Anisotropie des Bleches	Ziehspalt verkleinern; Niederhalterkraft erhöhen; Ziehkantenabrundung verkleinern



(a) Bodenreißer

(b) Faltenbildung 1.Ordnung im Flansch

(c) Faltenbildung 2.Ordnung in der Zarge

(d) Zipfelbildung

Abbildung 2.7: Versagensfälle beim Tiefziehen[16]

2.2.1.4 Anisotropie

Unter Anisotropie versteht man in der Blechumformung die Richtungsabhängigkeit von Blecheigenschaften. Sind die Blecheigenschaften nicht richtungsabhängig, spricht man von Isotropie.[15]

In der Blechumformung sind die senkrechte Anisotropie r und die ebene Anisotropie Δr gebräuchlich. Beide Werte werden aus dem Zugversuch ermittelt. Ein hoher r -Wert ($r > 1$) bedeutet, dass das Material mehr aus der Blechbreite als aus der Blechdicke fließt, während bei einem niedrigeren r -Wert ($r < 1$) das Material hauptsächlich aus der Blechdicke und kaum aus der Breite fließt.

Senkrecht Anisotropie: Die senkrechte Anisotropie r beschreibt, ob die Längenänderung der Zugprobe im einachsigen Zugversuch eher zu Lasten der Probenbreite

oder eher zu Lasten der Probendicke erfolgt. Sie ist definiert als das Verhältnis von logarithmischer Blechbreitenformänderung φ_b zu logarithmischer Blechdickenformänderung φ_s . [15] (Abb. 2.8)

$$r = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{s_0}{s}} = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (2.1)$$

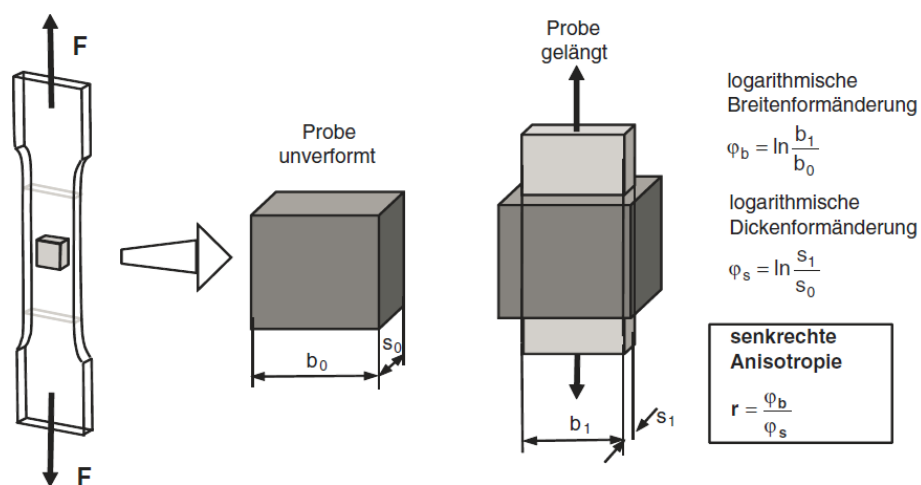


Abbildung 2.8: Bestimmung der senkrechten Anisotropie aus dem Flachzugversuch [15]

Ebene Anisotropie: Die ebene Anisotropie Δr gibt Aufschluss darüber, inwiefern sich die Walzrichtung auf die mechanischen Kennwerte auswirkt. Sie wird ermittelt, indem zunächst Zugproben unter 0° , 45° und 90° zur Walzrichtung aus dem zu prüfenden Blech entnommen werden. Für diese Zugproben werden in einem ersten Schritt die r -Werte, r_{0° , r_{45° und r_{90° , dann die mittlere senkrechte Anisotropie r_m und aus diesen wiederum Δr berechnet. [15] (Abb. 2.9)

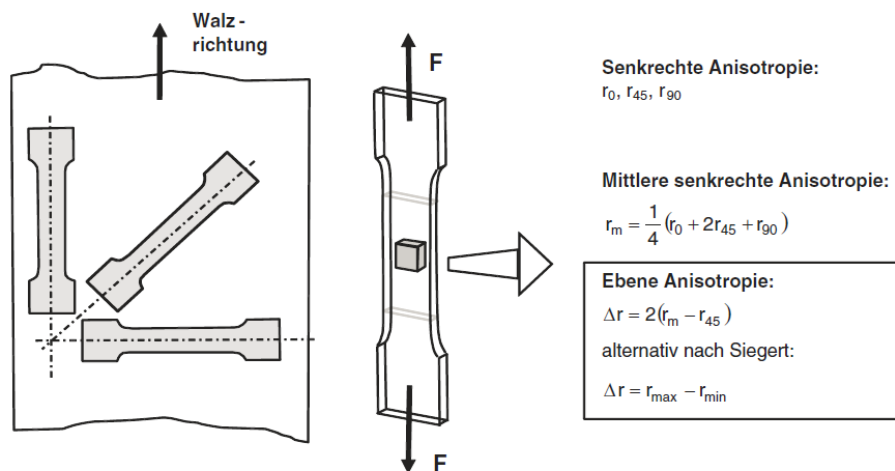


Abbildung 2.9: Bestimmung der ebenen Anisotropie aus dem Flachzugversuch[15]

2.2.1.5 Umformgrad φ (logarithmische Formänderung)

Der Umformgrad φ (logarithmische Formänderung) beschreibt die Größe der Formänderung eines Körpers mit definierten Volumen beim einwirken einer äußeren Kraft. Dabei wird die Änderung eines Körpermaßes auf das augenblickliche Maß des Körpers bezogen.

$$d\varphi = \frac{dh}{h} \Rightarrow \varphi = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = \ln h_1 - \ln h_0 = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (2.2)$$

Der Umformgrad φ kann auch über die Dehnung wie folgt dargestellt werden:

$$\epsilon = \frac{h_1 - h_0}{h_0} = \frac{h_1}{h_0} - 1 \Rightarrow \frac{h_1}{h_0} = \epsilon + 1 \quad (2.3)$$

$$\Rightarrow \varphi = \ln \frac{h_1}{h_0} \Rightarrow \varphi = \ln(\epsilon + 1) \quad (2.4)$$

2.2.1.6 Fließspannung

Die Fließspannung k_f (auch Formänderungsfestigkeit genannt) ist die im einachsigen Spannungszustand zu verzeichnende Kraft F bezogen auf die jeweilige momentane Querschnittsfläche A , bei der der Werkstoff fließt, d. h. eine bleibende

Formänderung erfährt.[17]

$$k_f = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

Des Weiteren ist die Fließspannung von folgenden Faktoren abhängig:

- Umformgrad (Abb. 2.4a)
- Umformgeschwindigkeit (Abb. 2.4b)
- Umformtemperatur (Abb. 2.4c)
- Werkstoff

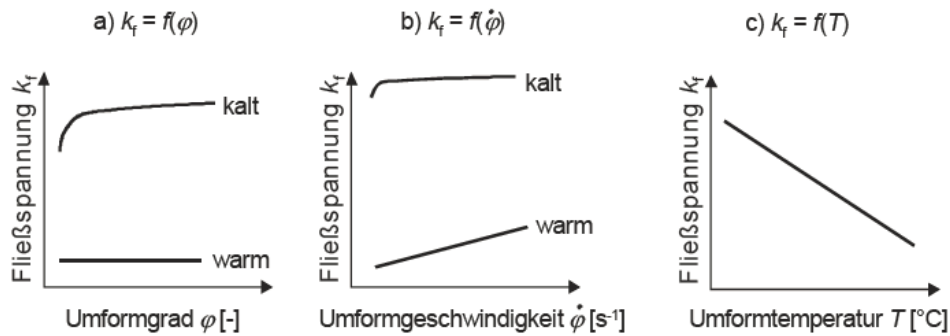


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung von k_f in Abhängigkeit der Temperatur (a), des Umformgrads (b) und der Umformgeschwindigkeit (c)[14]

2.2.1.7 Fließkurve

Die Darstellung (Abb.2.10) der Fließspannung k_f in Abhängigkeit vom Umformgrad φ , der Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ und der Umformtemperatur ϑ nennt man Fließkurven.

2.2.1.8 FLD-Grenzformänderungsdiagramm

Das Grenzformänderungsschaubild gibt Aufschluss ab wann Einschnürungen und Reißen eines Blechwerkstoffes für unterschiedliche Beanspruchungszustände mit ho-

her Wahrscheinlichkeit auftreten. Dabei werden durch verschiedene Prüfverfahren, wie von Keeler und Goodwin, Nakajima, Hasek und Marciniak die Nebenformänderungen φ_2 und die Hauptformänderungen φ_1 ermittelt und aufgetragen, woraus sich dann die Grenzformänderungskurve ergibt[18].

Wird die Grenzformänderungskurve überschritten, so kann mit höchster Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass ein fehlerhafter Bauteil mit Reißen entsteht.

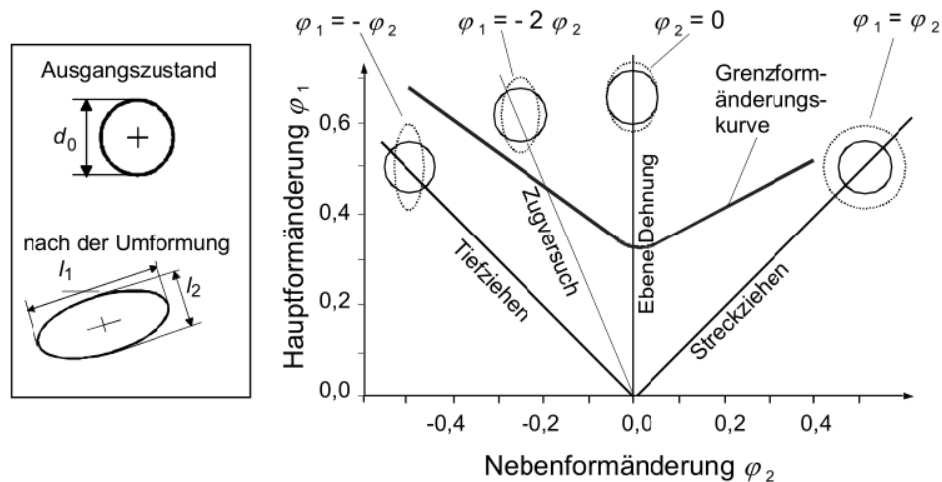


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung einer Grenzformänderungskurve[14]

2.2.2 Tribologisches Verhalten

Neben den Prozessgrößen aus Tabelle 2.4 und den Umformeigenschaften des Werkstoffes haben auch die tribologischen Gegebenheiten in den Kontaktzonen einen wesentlichen Einfluss auf den Umformprozess. Die Reibung in den Kontaktzonen zwischen Platine und Werkzeug kann durch die Blechoberfläche, Werkzeugoberfläche und Schmierung gezielt beeinflusst werden[4].

2.2.2.1 Reibungsmechanismus

Beim Ziehprozess treten Reibungszustände von Flüssigkeitsreibung, Mischreibung bis hin zur Festkörperreibung auf. Beim Schließen des Tiefziehwerkzeuges kommt

es zum Kontakt zwischen der Blechoberfläche und der Werkzeugoberfläche. Diese Kontaktzonen beschränken sich auf wenige Rauheitserhebungen. Durch die Niederhaltekraft entstehen an den Rauheitserhebungen sehr hohe Spannungen, wodurch es zu einer plastomechanischen Einebnung der Rauheitsspitzen kommt[19].

Dabei baut sich in den Profiltälern, wo Schmierstoff eingeschlossen wird, ein hydrostatischer Druck auf, was eine Verdrängung des Schmierstoffes mit sich bringt und an den oberen ebenen Flächen einen Grenzschnierfilm erzeugt. Durch die entstehende Relativbewegung zwischen den Oberflächen entstehen Schubspannungen zwischen den geebneten Flächen und der Werkzeugoberfläche. Durch zu hohen Druck des Werkzeuges und der Relativbewegung zwischen den Oberflächen kann es zum Abreißen des Grenzflächenfilms kommen, was einen direkten metallischen Kontakt und Adhäsion der Platine am Werkzeug zur Folge hat. Es treten Kaltverschweißungen auf, sogenannte Metallbrücken zwischen Platine und Werkzeug. Bei weiterer Relativbewegung werden diese Metallbrücken abgeschert und können entweder am Werkzeug haften oder lösen sich als Abriebpartikel los[4].

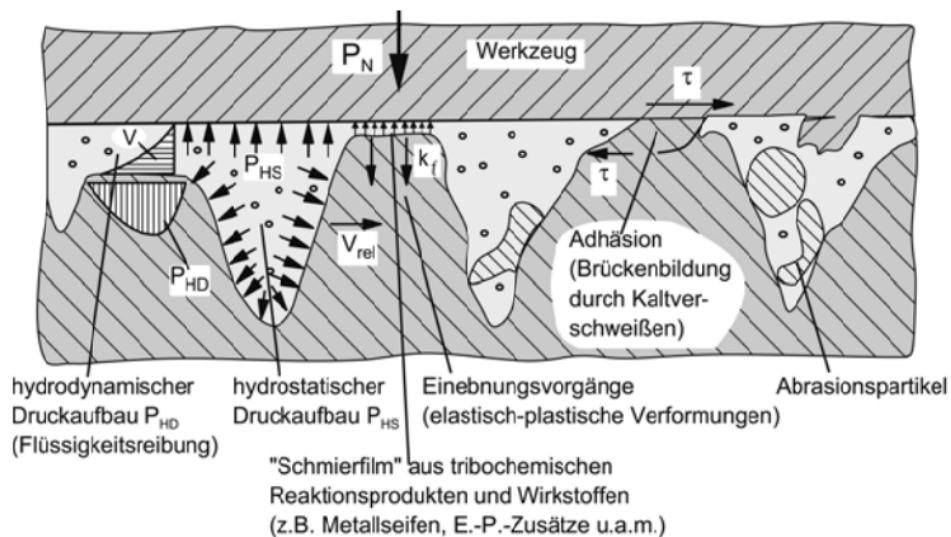


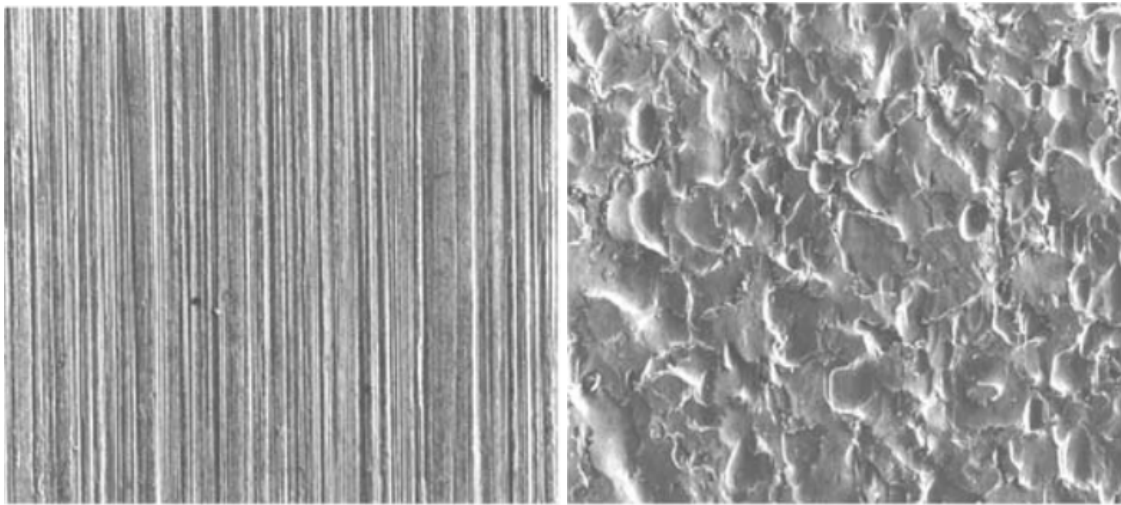
Abbildung 2.12: Reibungsmechanismen beim Ziehprozeß[4]

2.2.2.2 Blechoberfläche

Die Oberfläche von Standardwalzblechen weist eine gerichtete Rauigkeit auf, die mit tangential geschliffenen Walzen hergestellt wird. Nachteil von diesem Oberflächenprofil ist, dass das Schmiermittel aus den Längsrillen beim Umformprozess

herausgequetscht wird und so kein hydrostatischer Druck aufgebaut werden kann. Die Folge daraus ist eine Neigung zu Adhäsion und Abrieb des Aluminiums am Werkzeug. Des Weiteren ergibt sich ein richtungsabhängiger Reibungskoeffizient. Um diese Vorgänge zu vermeiden werden die Walzen durch Elektroerodieren bearbeitet und in einem Dressierstich auf die Bandoberfläche aufgeprägt. Mit diesem Verfahren entsteht an der Blechoberfläche eine ungerichtete Rauheit[4].

Abbildung 2.13 zeigt eine sogenannte mill-finish und eine elektroerodierte Oberfläche unterm Elektronenmikroskop einer AlMg4,5Mn0,4-Legierung.



(a) mill-finish

(b) erodiert

Abbildung 2.13: mill-finish und eine elektroerodierte Oberfläche unterm Elektronenmikroskop einer AlMg4,5Mn0,4-Legierung[4]

Aluminiumbleche werden des Öfteren für den Transport, für die Umformung sowie für die Weiterverarbeitung mit speziellen Beschichtungen wie Trockenschmierstoff, Konversionsschichten für Lack- und Klebstoffhaftung usw. versehen.

2.2.2.3 Schmierstoffe

Beim Tiefziehen kommen überwiegend Schmierstoffe, wie Öle und Emulsionen, im flüssigen Zustand zum Einsatz die vor dem Umformprozess auf die Platinenoberfläche aufgebracht werden. Der Trend bei Aluminium geht jedoch hin zu Trockenschmierstoffen, da sie zu folgenden Verbesserungen führen: Robustheit der Produktion, Kostenreduzierung durch Wegfallen von Fertigungsschritten in der

Produktion wie die Ölschmierung und Reinigung der Bleche.

2.2.2.4 Trockenschmierstoffe

Durch den Einsatz von Trockenschmierstoffen wird das Haften zwischen Blechplatte und Werkzeug reduziert. Gleichzeitig dienen sie als Schutz der Blechoberfläche gegen Transportschäden, da sie direkt im Walzwerk aufgebracht werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass sie temperatur- und druckbeständig sind, und bei Oberflächenbeschichtungen auf den Blechen fest haften.

Trockenschmierstoffe können in folgenden Arten eingeteilt werden:

- Systeme auf Wasserbasis: Diese werden mit Ultraviolettbestrahlung aufgebracht. Dadurch entsteht eine völlig trockene Polymerschicht. Zum Entfernen können wässrige alkalische Reiniger verwendet werden.
- Hydrierte Polymerdispersionen: Diese werden mit Wärme getrocknet und hinterlassen eine trockene Schicht. Zum Entfernen können ebenfalls wässrige alkalische Reiniger verwendet werden.
- Wasserlösliche Beschichtungen auf Seifenbasis
- Nicht-wassermischbare / trockene Systeme: werden elektrostatisch bei einer bestimmten Temperatur oder durch Erhitzen beim Bandschichten aufgebracht.
- Nicht entfernbare, Wasser und Lösungsmittel resistente, Lebensmittel gerechte Trockenschmierstoffe

Durch das Aufbringen von Trockenschmierstoffes können die Verfahrensgrenzen beim Tiefziehen deutlich erhöht werden. In Abbildung 2.14 wird ein Trockenschmierstoff auf Wasserbasis mit dem unlegierten Mineralöl M100 bei einem Tiefziehprozess verglichen. Es lässt sich deutlich erkennen dass mit dem Trockenschmierstoff größere Ziehtiefen erreicht werden[20].

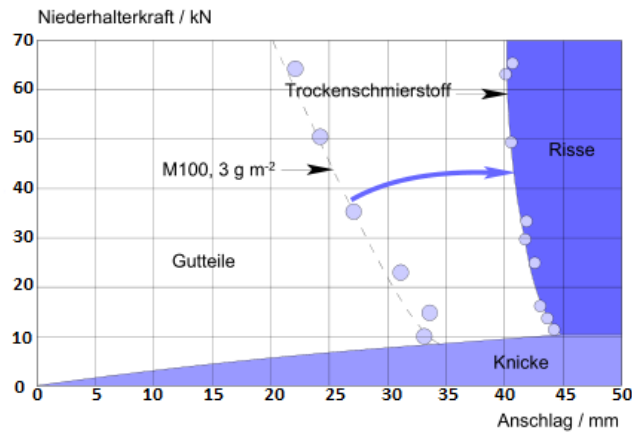


Abbildung 2.14: Vergleich der Ziehtiefe eines Trockenschmierstoffes auf Wasserbasis mit dem unlegierten Mineralöl M100[20]

2.3 Tailored Blanks

Tailored Blank sind Platinen, die mit unterschiedlichen Dickenverlauf, Beschichtungen und lokal mechanischen Eigenschaften hergestellt und eingesetzt werden. Solche Platinen finden vor allem im Karosseriebau immer mehr an Bedeutung, da sie durch lokale Blechdickenänderungen und Werkstoffgüten Gewichts- und Kostenreduzierung ermöglichen. Ein typisches Anwendungsbeispiel hierfür ist die B-Säule, bei der im Kopfbereich (oberen Bereich) hohe Festigkeiten zum Schutz der Insassen erforderlich sind und im unteren Bereich durch Verformen möglichst viel Energie absorbiert werden soll.

Im Wesentlichen lassen sich Tailored Blanks in vier Arten, die sich vor allem in der Herstellung unterscheiden, einteilen:

- Tailored Welded Blanks
- Patchworks Blanks
- Tailored Rolled Blanks
- Tailored Heat Treated Blanks

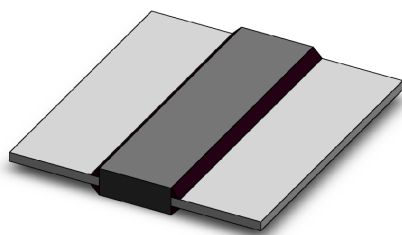
Tailored Welded Blanks: Kombination verschiedener Materialien und unterschiedliche Blechdicken in einem einzigen Rohling, um so die Eigenschaften wie

Gewicht, Festigkeit und Crashverhalten des finalen Bauteils einzustellen.

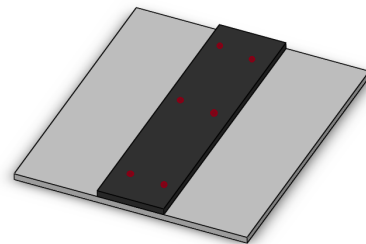
Patchworks Blanks: Werden ähnlich wie Tailored Welded Blanks durch Punktschweißen, Laserschweißen oder Kleben hergestellt. Dabei werden auf einer Grundplatte zusätzliche Einzelbleche (die Patches) befestigt. Einsatzgebiete sind Trägerverstärkungen, Scharniere oder Schlossverstärkungen.

Tailored Rolled Blanks: Das Blechdickenprofil wird während des Walzprozesses durch ändern des Walzspaltes eingestellt. Damit entstehen keine Fügeverbindungsstellen was eine homogene mechanische Eigenschaften an der Platine mit sich bringt. Eingesetzt werden Tailored Rolled Blanks z.B. im Bereich der B-Säule.

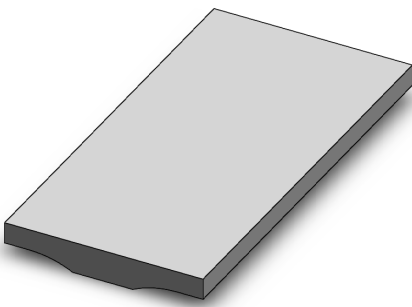
Tailored Heat Treated Blanks: Durch lokale Wärmebehandlungen werden die mechanischen Eigenschaften der Platine verändert, um so das Umformverhalten zu verbessern.



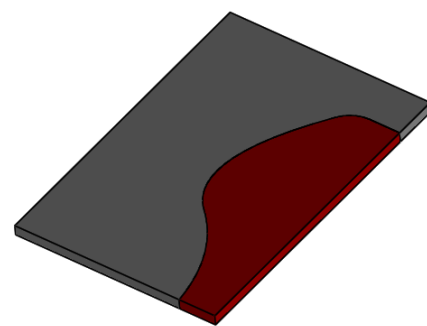
(a) Tailored Welded Blank



(b) Patchwork Blank



(c) Tailored Rolled Blank



(d) Tailored Heat Treated Blank

Abbildung 2.15: Tailored Products an einem ebenen Blechhalbzeug

2.3.1 Tailored Heat Treated Blanks

Dem Begriff Tailored Heat Treated Blanks (THTB) werden Halbzeugplatinen zugeordnet, bei denen durch eine lokale Wärmebehandlung eine Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen erzielt wird. Mit dieser Technologie ist es möglich die Verteilung der Festigkeit innerhalb der Platine zu steuern. Dabei ist eine Minimierung der Umformkräfte und eine Reduktion der Fließspannung k_f in den Umformzonen anzustreben, so wie hohe Festigkeiten in den kraftübertragenden Zonen. Ersteres gelingt durch partielles Entfestigen, was zur Folge hat, dass geringere Spannungen in den auf Zug belasteten Platinenbereichen und während der Umformung auftreten und so Tiefziehfehler wie Reißen vermieden werden[5].

2.3.1.1 Prozesskette beim Einsatz von THTB im Karosseriebau

Im Karosseriebau werden die Blechhalbzeuge vom Werkstoffherstellen meistens mit beauftragten Trockenschmierstoff(Abschnitt 2.2.2.3) angeliefert. Vor dem Umformen wird die lokale Wärmebehandlung durchgeführt. Die aus der Umformung fertigen Bauteile werden zu einer fertigen Rohkarosse zusammengebaut und anschließend gereinigt und entfettet. Im letzten Schritt der Prozesskette wird die Rohkarosse lackiert. Dabei erfolgt die Aushärtung der Lackschicht zwischen 180°C und 250°C. Dieses Aushärten wird gleichzeitig genutzt um bei den eingesetzten Werkstoffen eine Festigkeitssteigerung zu erzielen. So werden zum Beispiel AlMgSi-Legierungen, welche im Zustand T4 den beschriebenen Prozess durchlaufen, auf den Zustand T6 verfestigt[21].

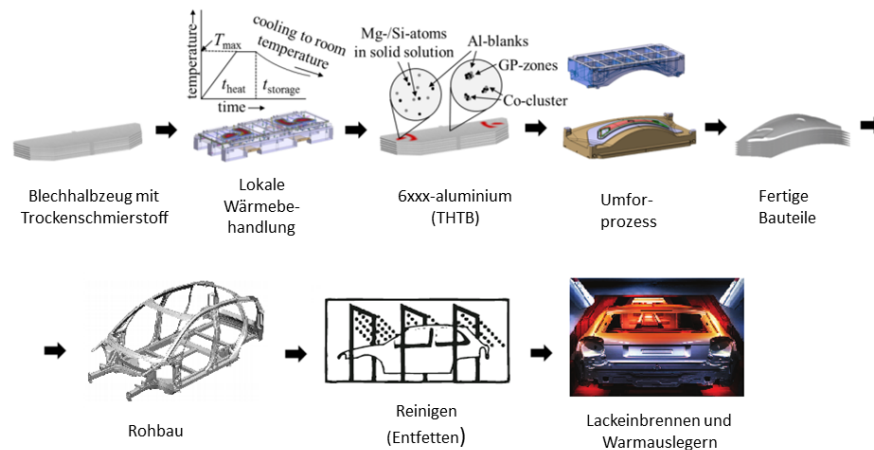


Abbildung 2.16: Prozesskette zur Herstellung einer Fahrzeugkarosserie inklusive einer lokalen Wärmebehandlung von Blechhalbzeugen[5][21]

2.3.1.2 Fließverhalten und Mikrostruktur von THTB

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, können Al-Mg-Si Legierungen durch eine kurzzeitige Wärmebehandlung entfestigt werden. Ein wichtiger Parameter dafür ist die untere so wie die ober Grenztemperatur (T_{UG}, T_{OG}). Wird die unter Grenztemperatur überschritten erfolgt ein kontinuierlicher Festigkeitsabfall bis zur oberen Schwelltemperatur(T_{OG}), wo sich der Zustand von maximaler Entfestigung einstellt (Abbildung 2.17). Eine weitere Festigkeitsabnahme ist durch eine zusätzliche Temperaturerhöhung nicht möglich[6].

Wird die untere Grenztemperatur T_{UG} , welche bei Al-Mg-Si Legierungen zwischen 180°C und 200°C liegt durch ein kurzzeitiges Stoßglühen überschritten, so lösen sich die in der Matrix kohärent eingeordneten MgSi-Cluster teilweise bis vollständig auf. Dieses Verhalten konnte auch in der Wärmeeinflusszone von 200°C bis 500°C beim Laserstrahlschweißen beobachtet werden[23]. Durch einen plötzlichen Temperaturanstieg, wie es bei Laserbiegeoperationen vorkommt, konnte festgestellt werden dass sich größere MgSi-Ausscheidungen (inkohärente-Ausscheidungen) da-

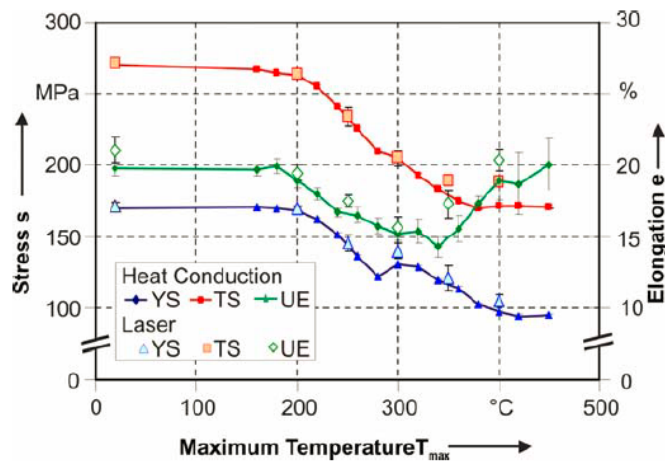


Abbildung 2.17: Verlauf der Zugfestigkeit R_m in Abhängigkeit der Maximaltemperatur bei einer kurzzeitigen Wärmebehandlung[22]

durch auflösen lassen. Daraus resultiert, dass das Auflösen von MgSi-Ausscheidungen durch eine kurzzeitige Wärmebehandlung schneller von statten geht umso höher die Maximaltemperatur T_{max} ist.

Wird mit T_{max} die obere Grenztemperatur T_{OG} überschritten, so ist die maximale Entfestigung des Werkstoffes erreicht. Bei den konventionell aushärtbaren AlMgSi-Legierungen, wie zum Beispiel AA6016, liegt T_{max} circa bei 380°C[5]. Ab dieser Temperatur kann man von einem quasi-lösungsgeglühten Zustand sprechen. Das Gefüge ähnelt dem, wie nach dem konventionellen Lösungsglühen. Die Mg- und Si-Atome liegen in der Aluminiummatrix als Substitutionsatome vor und hinterlassen einen übersättigten Mischkristall. Die Festigkeit der Aluminiumlegierung nimmt nach der kurzzeitigen Wärmebehandlung langsam wieder zu, da sich die aufgelösten MgSi-Cluster durch Diffusionsvorgänge wieder gruppieren[13]. Nach ungefähr 120 Tagen wird die Ausgangsfestigkeit wieder erreicht.

Durch eine kurzzeitige Wärmebehandlung wird des Weiteren ein Absinken der Formänderungskurve hervorgerufen. Abbildung 2.18 zeigt die Formänderungskurve der Aluminiumlegierung AA6016 im Zustand T4 bei Raumtemperatur (RT), so wie nach einer kurzzeitigen Wärmebehandlung mit einer Temperatur von 250°C und 350°C.

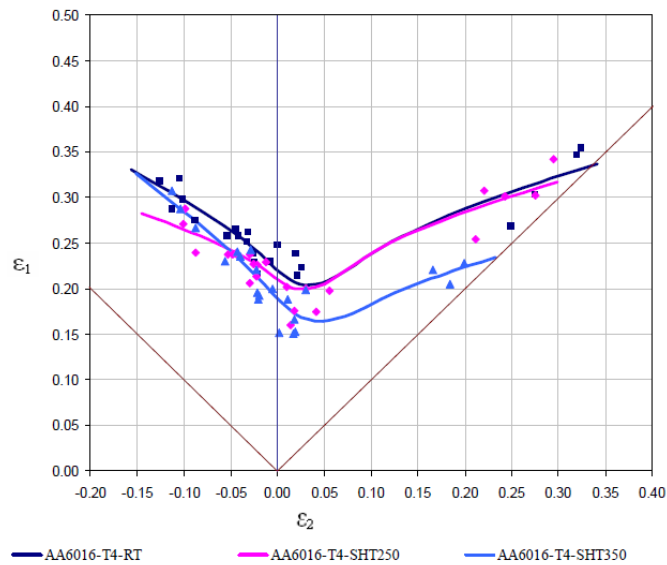


Abbildung 2.18: Formänderungskurve der Legierung AA6016-T4 bei RT, 250°C und 350°C[24]

Haupteinflussgröße auf die resultierenden Werkstoffeigenschaften ist somit die Maximaltemperatur T_{max} . Des Weiteren ist bei einer lokalen Wärmebehandlung eine möglichst kurze Haltedauer anzustreben, um den Bereich der Wärmeeinflusszonen so lokal wie möglich zu halten. Vor allem bei Aluminium, das eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit besitzt.

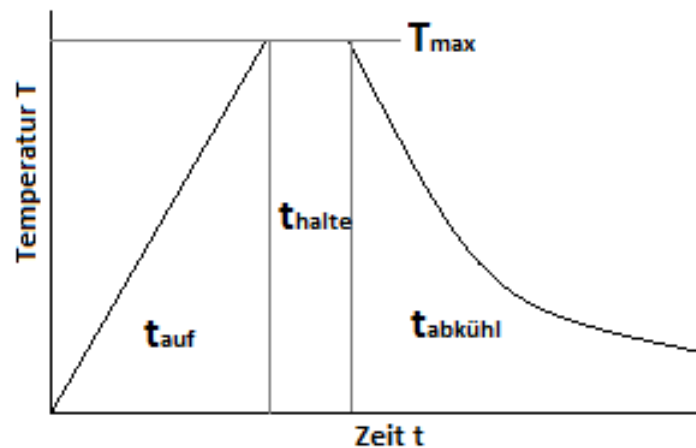


Abbildung 2.19: Temperatur-Zeit-Profil einer typischen lokalen, kurzzeitigen Wärmebehandlung (schematisch)[5]

2.3.1.3 Prozessgrenzen hinsichtlich des Umformens

Um eine örtliche Werkstofffestigung durch eine lokale Wärmebehandlung zu erzielen, liegt das Prozessfenster in einem Temperaturbereich von $>200^{\circ}\text{C}$ und $<400^{\circ}\text{C}$. In diesem Bereich muss jedoch auf die kritische Zersetzungstemperatur des Trockenschmierstoffes geachtet werden. Bei den meisten Schmierstoffen liegt die Zersetzungstemperatur im Bereich von circa 250°C . Wird diese Temperatur überschritten verliert der Schmierstoff seine Schmierfähigkeit. Dies hat zur Folge, dass das Prozessfenster für die Umformung eingeschränkt wird[5].

In Abbildung 2.20 wird anhand des Schmierstoffes Multidraw Drylube E1 die Reibzahl μ in Abhängigkeit der Maximaltemperatur T_{max} dargestellt. Es ist ersichtlich, dass ab einer Temperatur von 250°C ein linearer Zustieg der Reibzahl μ erfolgt. Der Schmierstoff zersetzt sich also mit steigender Temperatur. Durch die Zersetzung des Schmierstoffes ab einer Temperatur von 250°C verschlechtern sich die Reibverhältnisse, was wiederum einen erhöhten Werkzeugverschleiß mit sich bringt und den Umformprozess negativ beeinflusst.

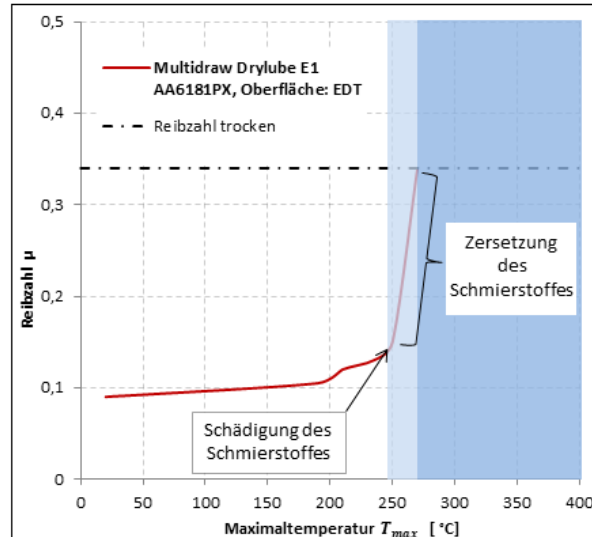


Abbildung 2.20: Reibzahl μ des wärmebehandelten Schmierstoffes in Abhängigkeit der auf den Schmierstoff Drylube E1 einwirkenden Maximaltemperatur T_{max} [5]

2.3.1.4 Wirkprinzipien und -mechanismen für THTB

Auf der Basis der Mikrostrukturanalyse und den Kenntnissen, wie die mechanischen Eigenschaften durch lokales Entfestigen beeinflusst werden, können zwei grundlegende Wirkmechanismen abgeleitet werden:

1. ein kraftorientierter Wirkmechanismus
2. ein werkstoffflussorientierter Wirkmechanismus

Kraftorientierter Wirkmechanismus: Der erste Wirkmechanismus baut auf den Kraftfluss innerhalb des Umformteils auf. Dabei erfolgt die Krafteinleitung im Stempel und geht über die Zarge bis hin zum Flansch, wo die Umformzonen des Blechteils liegen. Dadurch muss in diesen Bereichen am meisten an Plastifizierungsarbeit geleistet werden. Wird also in den Umformzonen (plastifizierende Bereiche) eine lokale Entfestigung mittels einer Wärmbehandlung durchgeführt, so werden geringere Umformkräfte benötigt, was wiederum geringere Kräfte entlang des Kraftpfades hervorruft. Proportional dazu treten während der Umformung geringere Spannungen auf. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Zugfestigkeit örtlich nicht überschritten wird und ein Versagen des Bauteils durch Reißen reduziert wird. Abbildung 2.21 links, zeigt den Kraftfluss an einem tiefgezogenen kreiszylindrischen Napf. Durch eine lokale Entfestigung am Flansch (Umformzone) können durch den Stempel am Ziehteilboden geringere Umformkräfte eingeleitet werden, was zu geringeren Reaktionskräften im kritischen Napfradius bis in den Flansch führt. Durch die geringeren Reaktionskräfte werden die Spannungen im rissgefährdeten Napfbodenradius reduziert[25].

Werkstoffflussorientierter Wirkmechanismus: Dieser Wirkmechanismus wird auf einen begünstigten Werkstofffluss zurückgeführt. Dabei werden die entfestigten Zonen als Opferbereiche herangezogen, was zu Gunsten der kritischen Bereiche spricht. Es entstehen an den kritischen Blechzonen geringere Ausdünnungen und eine geringere Streckung der Blechelemente, was wiederum zu geringeren Spannungen in diesen Bereichen führt. Mit diesem Mechanismus wird der Materialfluss entlang der wirkenden Lastpfade erleichtert.

Abbildung 2.21 rechts zeigt eine entfestigte Zone am tiefgezogenen kreiszylindrischen Napf im Bauteilboden welche als Opferzone dient. Die entfestigte Zone dünnt zu Gunsten des angrenzenden risskritischen Napfbodenradiusbereiches mehr aus

und führt zu einer geringeren Streckung der Blechelemente im kritischen Bereich[5].

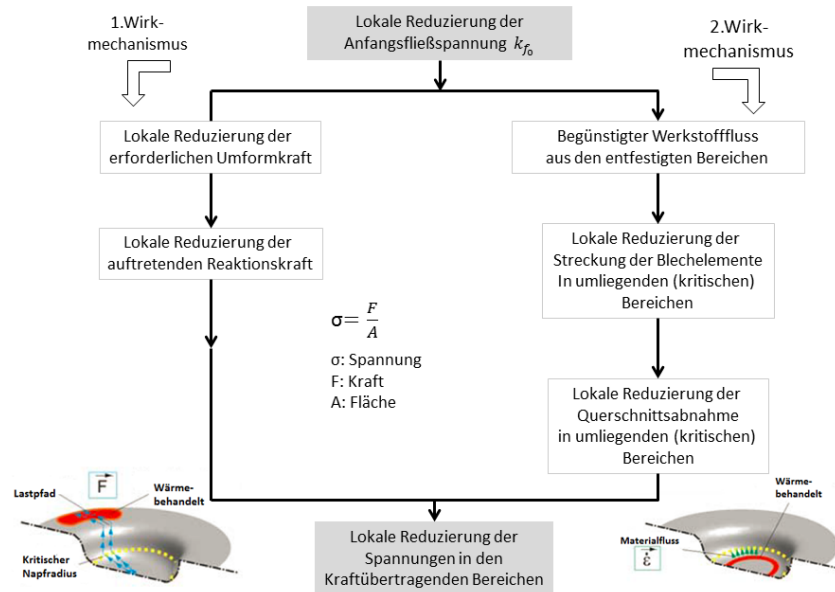


Abbildung 2.21: Wirkprinzipien und -mechanismen lokal entfestigter Bereiche eines THTB[5]

Die beiden Wirkmechanismen sind eng miteinander verbunden. Durch die reduzierten Reaktionskräfte aus dem 1. Wirkmechanismus wird gleichzeitig eine Abnahme der Streckung der Blechelemente in den kritischen Bereichen hervorgerufen. Zusammenfassend lässt sich aus den beiden Wirkmechanismen der Gestaltungsansatz zur Vermeidung von Reißen ableiten: Das Wärmebehandlungslayout eines THTB aus AlMgSi-Legierung zielt immer auf die indirekte Verbesserung des örtlichen Umformvermögens ab. Die risskritischen Bereiche selbst dürfen nicht entfestigt werden[5].

2.3.1.5 Aufheiztechnologien für die lokale Wärmebehandlung

Um eine lokale Wärmebehandlung durchzuführen werden verschiedene Wirkprinzipien eingesetzt, welche sich durch ihre technologischen Merkmale und Wirtschaftlichkeit unterscheiden. (Tabelle 2.6)

Die am Häufigsten eingesetzten sind:

- a) Wärmebehandlung durch Laser
- b) Wärmebehandlung durch elektromagnetische Induktion
- c) Wärmebehandlung durch Wärmeleitung

a) Wärmebehandlung durch Laser

Die Wärmebehandlung mittels robotergeführter Laser eignet sich sehr gut im Prototypenbau sowie für Kleinserien mit großer Variantenvielfalt. Die Vorteile liegen vor allem im geringen Rüst- und Einstellaufwand bei verschiedenen Erwärmungslayouts. Nachteilig hingegen sind die hohen Investkosten der Anlage und die Möglichkeit einer Haltedauer.

b) Wärmebehandlung durch elektromagnetische Induktion


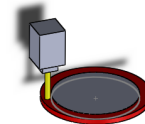

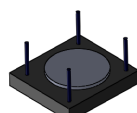
Werden bei der Herstellung große bis mittlere Stückzahlen verlangt, wird des Öfteren die induktive Wärmebehandlungsmethode eingesetzt. Gleich wie beim Laser wird damit eine hohe Aufheizrate erzielt.

c) Wärmebehandlung durch Wärmeleitung

Eine gängige Methode für das Aufheizen von Blechen mittels Wärmeleitung ist der Einsatz von beheizten Kontaktplatten. Vorteile dieser Methode sind eine homogene Temperaturverteilung in den zu wärmebehandelten Zonen, gute Reproduzierbarkeit und die Möglichkeit einer definierten Haltedauer.

Bei der Erwärmung mittels Laser und Induktion handelt es sich um Aufheizmethoden bei denen die Blechplatinen nur auf einer Seite erhitzt werden, was bis zu einer Blechdicke von 1,5mm keinen Einfluss hat. Die Platinen werden, gleich wie durch Erwärmung mittels Kontaktplatten, von beiden Seiten homogen und schlagartig über die gesamte Blechdicke erwärmt[13].

Tabelle 2.6: Übersicht der Wärmebehandlungsmethoden und ihrer technologischen und wirtschaftlichen Merkmale[5]

				
Aufheizrate	+++	+++	+++	++
Homogene Temperaturverteilung	0	0	--	+++
Reproduzierbarkeit	0	0	-	+++
Möglichkeit einer Haltedauer	---	---	-	+++
Investkosten Anlage	---	---	0	0
Investkosten Werkzeuge	+++	+++	--	--
Rüstaufwand	+++	+++	--	0
Produktivität	--	--	+++	+++

2.3.2 Lasertechnologien für eine lokale Wärmebehandlung

Die Lasermaterialbearbeitung (LMB) hat in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung zugenommen. Ihr Einsatzgebiet reicht vom Schweißen, Bohren, Schneiden, Abtragen und Beschriften bis hin zum Airbagperforieren. Dabei haben sich für die LMB Gaslaser und die Festkörperlaser durchgesetzt, da sie durch eine hohe auskoppelbare Laserleistung, gute Fokussierbarkeit und eine hohe Fertügarkeit gekennzeichnet sind[26].

2.3.2.1 CO₂-Laser

Der CO₂-Laser, wie der Name schon sagt, zählt zu den Gaslasern bei dem CO₂-Moleküle das Laserlicht aussenden. Die Wellenlänge beträgt 10,6 Mikrometer und liegt im fernen Infrarotbereich. Weitere Merkmale sind ein großer Leistungsbereich von 10 Watt bis über 20.000 Watt, eine hohe Strahlqualitäten (M² von 1,1 bis 5,0) und wählbare Betriebsarten: gepulster oder Dauerstrichbetrieb[27].

Das laseraktive Medium bei einem CO₂-Laser besteht aus einem Gemisch von

Helium (He), Stickstoff (N_2) und Kohlendioxid (CO_2). Die Hilfsgase Helium und Stickstoff unterstützen den Laserprozess im CO_2 -Molekül. Durch Aufbringen von hochfrequenter Wechselspannung oder hoher Gleichspannung entstehen durch Gasentladung freie Elektronen. Dadurch werden die Stickstoff-Moleküle angeregt und zum Schwingen gebracht. Die sich im Grundzustand befindenden CO_2 -Moleküle werden von den N_2 -Molekülen angestoßen und durch die dabei frei werdende Energie ins obere Laserniveau gebracht, wo alle drei Atome des CO_2 -Moleküls in Bewegung sind. Das CO_2 -Molekül kehrt in den Grundzustand zurück, wobei es das untere Laserniveau durchläuft und bis dahin Laserlicht mit einer Wellenlänge von 10,6 Mikrometer emittiert. Dabei wird Wärme frei. Vom unteren Laserniveau bis zum Grundzustand werden die CO_2 -Moleküle von den Heliumatomen angestoßen, was eine Beschleunigung der Entleerung mit sich bringt. Die Heliumatome nehmen die Wärme auf und leiten sie ab.

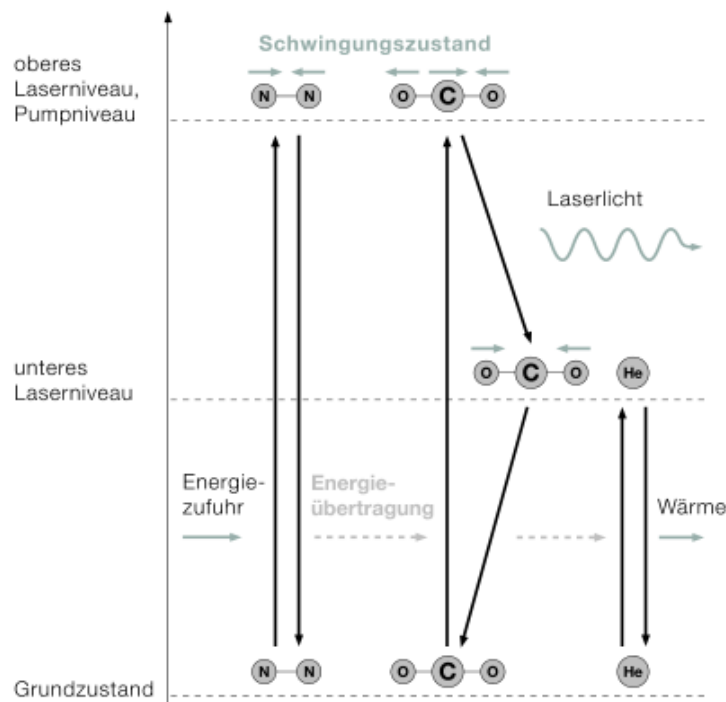


Abbildung 2.22: Wechselspiel von Molekülen und Atomen beim Laserprozess im CO_2 -Laser[27]

2.3.2.2 Festkörperlaser

Beim Festkörperlaser wird als aktives Medium ein dotierter Kristall oder dotiertes Glas verwendet. Die Wellenlänge hängt hauptsächlich vom Dotierungsmaterial ab und beträgt rund 1 Mikrometer. Typisch dafür ist ein Neodym-dotiertes (Nd:YAG) oder Ytterbium-dotiertes (Yb:YAG) Aluminium-Granat sowie Ytterbium-dotiertes Glas (Yb: Glas)[28]:

Festkörperlaser weisen folgende Eigenschaften und Merkmale auf:

- kurze Grundwellenlängen von etwa 1 Mikrometer die sich verändern lassen
- Es gibt gepulste Festkörperlaser und cw-Laser, die im Dauerstrichbetrieb und im Pulsbetrieb arbeiten können.
- großes Leistungsspektrum: von einigen Kilowatt mit cw-Laser bis zu einigen 100 Kilowatt mit Puls laser
- variierende Strahlenqualität von mittel bis sehr groß: M^2 von 1,2 bis 74

Festkörperlaser haben den Vorteil, dass die Laserstrahlen in Glasfasern eingekoppelt werden können und so in Laserlichtkabel transportfähig sind, ohne dabei an Qualität und Leistung zu verlieren. Darüber hinaus wird die Strahlung des Nd:YAG von vielen Metallen besser absorbiert als CO_2 -Laserstrahlen[29].

Für die industrielle LMB werden vor allem Neodym (Nd) und Ytterbium (Yb) zum dotieren verwendet, die in geringen Mengen in einen Wirtskristall oder in Gläser eingebunden werden. Das Laserlicht entsteht durch die fluoreszierenden Fremdionen und besitzt eine Wellenlänge von 1,06 Mikrometern (Neodym) und 1,03 Mikrometern (Ytterbium).

Nd:YAG: Durch die Zugabe von Neodym-Ionen wird aus dem durchsichtigen Yttrium-Aluminium-Granat ein rötlich schimmernder Kristall. Gleich wie beim CO_2 -Laser umfasst der Laserprozess vier Energieniveaus. Die Neodym-Ionen werden durch Licht aus Bogenlampen oder Diodenlaser angeregt und gehen in das obere Laserniveau über. Bei diesem Prozess wird Wärme frei, welche an den Wirtskristall abgegeben wird. Anschließend entsteht das Laserlicht von 1,06 Mikrometer durch den Übergang in das untere Laserniveau. Von hier aus erfolgt ein Übergang der Elektronen in den Grundzustand wodurch Wärme frei wird. Der Grundzustand des Neodym-Ions liegt deutlich unterhalb des unteren Laserniveaus wodurch es im

Grundzustand des Kristalls nicht besetzt ist[27].

Yb:YAG und Yb:Glas: Diese Lasertypen besitzen eine höhere Leistung pro Volumen des aktiven Mediums, welche durch höhere Dotierung mit Ytterbium erreicht wird. Die Konzentration liegt circa bei 10 Prozent. Der Laserprozess des Ytterbium-Ions besteht ebenso aus vier Energieniveaus, jedoch liegt das untere Laserniveau und der Grundzustand sehr eng beieinander. Dadurch reicht wenig Wärme aus, damit das untere Laserniveau besetzt wird. Um eine konstante Laserleistung zu erhalten und die Besetzungsinversion zu erreichen muss eine gute Kühlung des aktiven Mediums erfolgen[27].

2.3.2.3 Absorption von Laserstrahlung

Für die LMB ist die Absorption A ein wichtiges Maß, da die absorbierte Energie in Wärme umgewandelt wird. Sie gibt Aufschluss wie viel Leistung P_{abs} für die Bearbeitung zur Verfügung steht. Daraus folgt die Definition des Absorptionsgrades α als das Verhältnis von eingekoppelter Leistung zu der auf das Werkstück auftreffenden Leistung[29]:

$$\alpha = \frac{P_{abs}}{P}$$

Die Absorption von metallischen Werkstoffen hängt stark von folgenden Parametern ab:

- optischen Konstanten des Werkstoffes
- verwendete Wellenlänge
- eingestrahlte Intensität
- geometrischer Zustand der Werkstoffoberfläche
- chemische Beschaffenheit der Oberfläche

Jedes Material hat eine Grundabsorption die in starkem Maße von der Wellenlänge abhängig ist. Wie in Abbildung 2.23 gut zu erkennen ist wird von Aluminium der Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1,03 Mikrometern besser absorbiert als der CO₂-Laser. Des Weiteren ist der Absorptionsgrad von der Oberflächenbeschaffenheit wie Rauheit, Beschichtung und Oxidation abhängig. Bei Oberflächenstruk-

turen welche in der Größenordnung der Wellenlänge liegen, wird der Laserstrahl unregelmäßig und zerstreut reflektiert, was einen Energieverlust bewirkt. Um eine bessere Energieeinbringung zu erzielen, können Oberflächenbehandlungen wie Sandstrahlen oder Aufbringen von Deckschichten durchgeführt werden. Durch das Sandstrahlen werden die Oberflächenstrukturen größer als die Wellenlängen, was eine Mehrfachreflexion in den Vertiefungen mit sich bringt (Tabelle 2.7). Durch das Aufbringen von Deckschichten erfolgt die Energieeinkopplung an der absorbierenden Schicht [26].

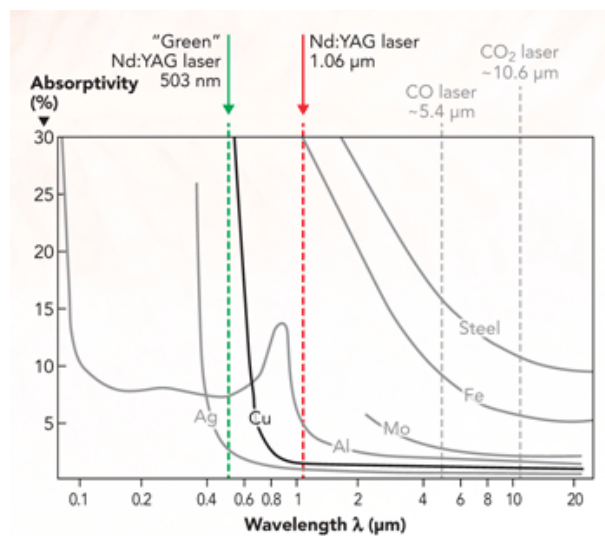


Abbildung 2.23: Abhängigkeit der Absorption von Material und Wellenlänge [30]

Tabelle 2.7: Typische Oberflächenstrukturen und deren Einfluss auf Reflexion und Absorption [26]

Rauheit	Welligkeit	Strukturen	Deckschichten	Plasmaentstehung

3 Zielsetzung der Arbeit

Obwohl die Weiterentwicklung für die Umformbarkeit von Aluminiumlegierungen in den letzten Jahren einen wesentlichen Fortschritt gemacht hat, lassen sich Aluminiumhalbzeuge weiterhin schlechter in Form bringen als die meisten konventionellen Tiefziehstähle.

Ein großes Potenzial zur Steigerung der Umformbarkeit von Aluminiumblechen der 6xxx-Serie zeigt das Verfahren der Tailored Heat Treated Blanks (THTB) auf. Der Einsatz von THTB ermöglicht eine Steigerung des Umformvermögens von AlMgSi-Legierungen, um so eine kostengünstige Herstellung von komplexen Aluminiumziehteilen zu gewährleisten.

Im Zuge dieser Arbeit soll für die Aluminiumlegierung AA6016-T4, durch den Einsatz von THTB, die Erweiterung der Formgebungsgrenzen untersucht werden. Dies kann durch Reduktion der Umformkräfte sowie durch Beeinflussen des Materialflusses, erzielt werden. Ausgehend von diesen beiden Wirkmechanismen kann die Zielsetzung in folgende Punkten gegliedert werden:

- Einfluss unterschiedlicher Erwärmungszonen auf die maximale Ziehtiefe beim Napf- und Kreuzziehteil
- Einfluss unterschiedlicher Erwärmungszonen auf die Blechdickenverteilung beim Napf- und Kreuzziehteil
- Einfluss der Lagerzeit zwischen Wärmebehandlung und Umformprozess
- Erstellung eines fehlerfreien kundenspezifischen Bauteils, ausgehend von den vorhergehenden Untersuchungen

4 Versuchseinrichtung und -Durchführung

4.1 Eingesetzter Werkstoff

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die aushärtbare Aluminiumlegierung AA6016 im Zustand T4 eingesetzt. Mit dem Zustand T4 werden Aluminiumlegierungen der 6000-Serie bezeichnet welche lösungsgeglüht, abgeschreckt und kaltausgelagert wurden (Tabelle 2.2). Die Blechhalbzeuge wurden vom Hersteller mit einem Trockenschmierstoff beschichtet. Die Versuchsdurchführung erfolgte innerhalb von 6 bis 12 Monaten[6] nach dem Anlieferungszeitpunkt. Wird der Werkstoff nicht innerhalb dieses Zeitraums verarbeitet, wirkt sich dies negativ auf das Formgebungsvermögen durch Überalterung bei Raumtemperatur aus. Tabelle 4.1 gibt die mechanischen Eigenschaften und Haupteigenschaften des angelieferten Werkstoffs wieder.

Tabelle 4.1: Eingesetzte Aluminiumlegierung mit den mechanischen Eigenschaften und Hauptlegierungselemente

Aluminium- legierung	Blechdicke [mm]	$R_{p0,2}(T4)$ [MPa]	$R_m(T4)$ [MPa]	A_g [%]	Si	Mg [Massen-%]	Fe
AA6016-T4	1	104	214	22,9	1,06	0,4	0,16

4.2 Anlage für die lokale Wärmebehandlung und Temperaturmessung

Die lokale Wärmebehandlung der Blechhalbzeuge erfolgte mit der Lasermaschine der Firma Trumpf, Modell Truma Form DMD 505. Die Strahlquelle besteht aus einem CO₂-Laser der TLF-Baureihe mit einer Leistung von 3,2 kW. Am Laserkopf wurde eine speziell für die Erwärmung umgebaute Düse montiert. Die Lasermaschine ist mit einer fünf achsigen CNC-Steuerung des Typs Siemens SINUMERIK 840 D ausgestattet, welche zur Steuerung des Laserkopfes dient.



Abbildung 4.1: Verwendete Laseranlage der Firma Trumpf, Modell Truma Form DMD 505

4.2.1 Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera

Die Temperaturmessung wurde mit der Wärmebildkamera der Firma InfraTec aus der Reihe VarioCAM durchgeführt. Diese Kamera eignet sich hervorragend für Langzeitmessungen. Der Temperaturmessbereich liegt zwischen -40°C und 1200°C. Dabei besitzt sie eine thermische Auflösung von 0,03 K bei 30°C und eine Bildauflösung von 640 x 480 IR-Pixel. Durch die Software InfraTec Irbis 3 plus besteht die Möglichkeit einer direkten Übertragung des Messbildes auf einen Messrechner.

4.3 Anlagen und Werkzeuge für die Tiefziehversuche

Die Umformversuche wurden auf einer zweifach wirkenden hydraulischen Presse der Firma Schuler des Typs SHC-400-2,0x1,3 Baujahr 2005 durchgeführt. Die maximale Schließkraft des Hauptstößels beträgt 4000 kN bei einer maximalen Hublänge von 800 mm. Die Grundfläche der eingebauten Werkzeuge darf die Maße (B x T) von 2000 x 1300 mm nicht überschreiten. Abbildung 4.2 zeigt den Arbeitsraum der hydraulischen Presse mit eingebauten Werkzeug.

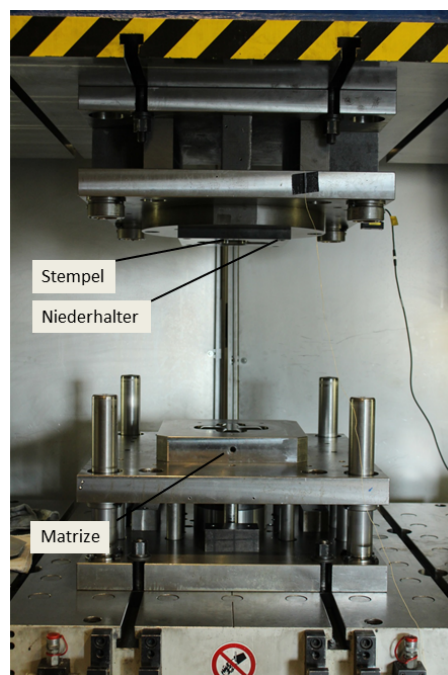


Abbildung 4.2: Eingebautes Werkzeug in der hydraulischer Presse der Firma Schuler

4.3.1 Napfwerkzeug

Zum Einsatz kam ein Napfwerkzeug welches nach den Marciniak-Ansatz[31] konstruiert wurde (Abbildung 2.3). Bei dieser Napfgeometrie ist der Stempel flach und zylindrisch ausgeführt. Durch die einfache Werkzeuggeometrie ist eine einfache Beurteilung des Kraft und Stoffflusses möglich. Die in Abschnitt 2.3.1.4 beschriebenen Wirkprinzipien beruhen auf dem Napfwerkzeug.

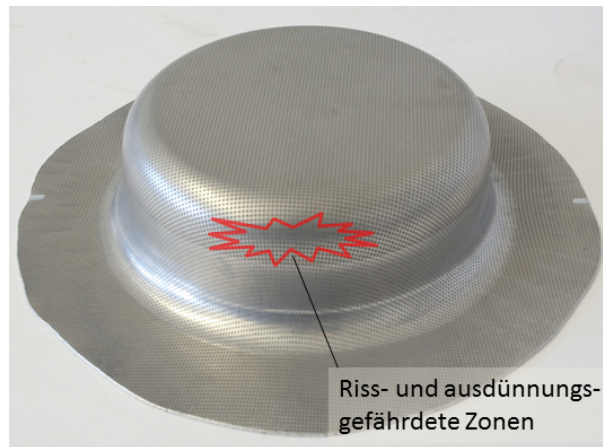


Abbildung 4.3: Riss- und ausdünnungsgefährdete Zonen beim Napfziehteil

4.3.2 Kreuzwerkzeug

Mit dem verwendeten Kreuzwerkzeug entsteht ein tiefgezogenes symmetrisches Kreuz. Die durch Rissbildung und Ausdünnung gefährdeten Zonen befinden sich bei dieser Geometrie in den inneren Eckbereichen zwischen Flansch und Zarge, und am äußeren Eckradius zwischen Zarge und Ziehteilboden. Beim Umformen dieser komplexen Geometrie treten Dehnpfade in allen relevanten Bereichen des Grenzformänderungsschaubildes auf[5]. In Abbildung 4.4 sind die riss- und ausdünnungsgefährdeten Zonen beim Kreuzziehteil dargestellt.

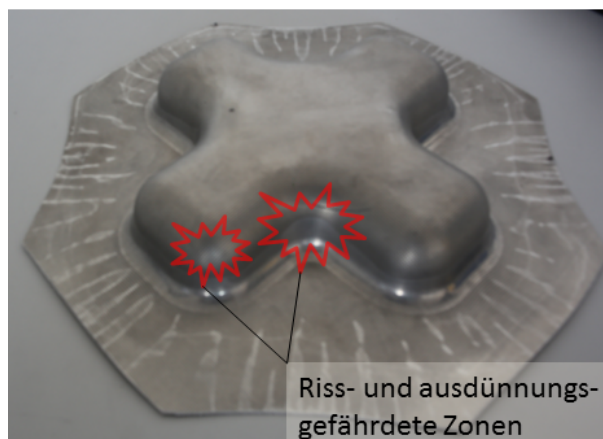


Abbildung 4.4: Riss- und ausdünnungsgefährdete Zonen beim Kreuzziehteil

4.3.3 Kundenspezifisches Bauteil

Dieses Werkzeug stellt eine Seitenaufprallgeometrie mit B-Säulenverstärkung dar. Dabei wurden am unteren Ende durch Wechseleinsätze sogenannte Sicken eingebaut um das Umformverhalten beim Tiefziehen zu untersuchen. Durch den Wechseleinsatz entstanden riss- und einschnürungsgefährdete Zonen an den Sicken. Abbildung 4.5 zeigt die Geometrie des kundenspezifischen Bauteils mit deren gefährdeten Zonen.

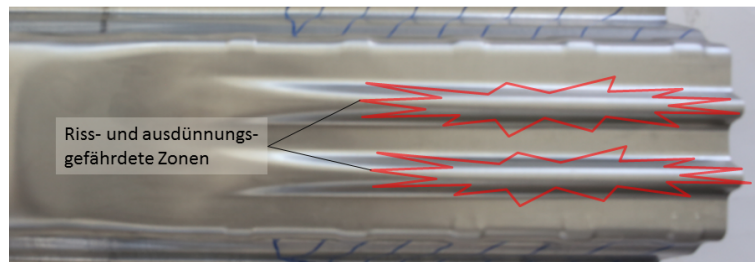


Abbildung 4.5: Riss- und ausdünnungsgefährdete Zonen beim kundenspezifischen Bauteil

4.4 Versuchsaufbau

Für die Durchführung der Tiefziehversuche und für die lokale Wärmebehandlung wurde der Aufbau in der hydraulischen Presse und in der Lasermaschine wie folgt durchgeführt.

4.4.1 Versuchsaufbau für die lokale Wärmebehandlung

Abbildung 4.6 zeigt den gesamten Versuchsaufbau für die lokale Wärmebehandlung in der Lasermaschine. Das Aluminiumblech (2) wird durch senkrecht auftretenden Laserstrahl von oben erwärmt. Mit dem definierten Abstand von 300 mm zwischen Laserkopf (1) und Platine (2) wird ein Durchmesser von 20 mm des Laserstrahles erreicht.

Die Temperaturerfassung während des Erwärmungsvorganges erfolgt berührungslos und thermographisch mit einer Wärmebildkamera (4) (Abschnitt 4.2.1) von

unten. Durch den Schutzkasten (3) und an die Wärmebildkamera angepassten Schutzgehäuse wird gewährleistet, dass keine Reflexionen des Laserstrahls auf die Linse der Thermocam auftreffen. Der Schutzkasten ist innen mit schwarz lackierten Blechen ausgekleidet, um die Strahlen so gut wie möglich zu absorbieren. Die Wärmebildkamera ist mit Schutzgehäuse im Schutzkasten untergebracht. Über einen in Aluminiumfolie geschützten Kabel werden die Daten von der Thermocam an den Mess- und Auswertrechner, der mit der Software InfraTec Irbis 3 plus ausgestattet ist, übertragen.

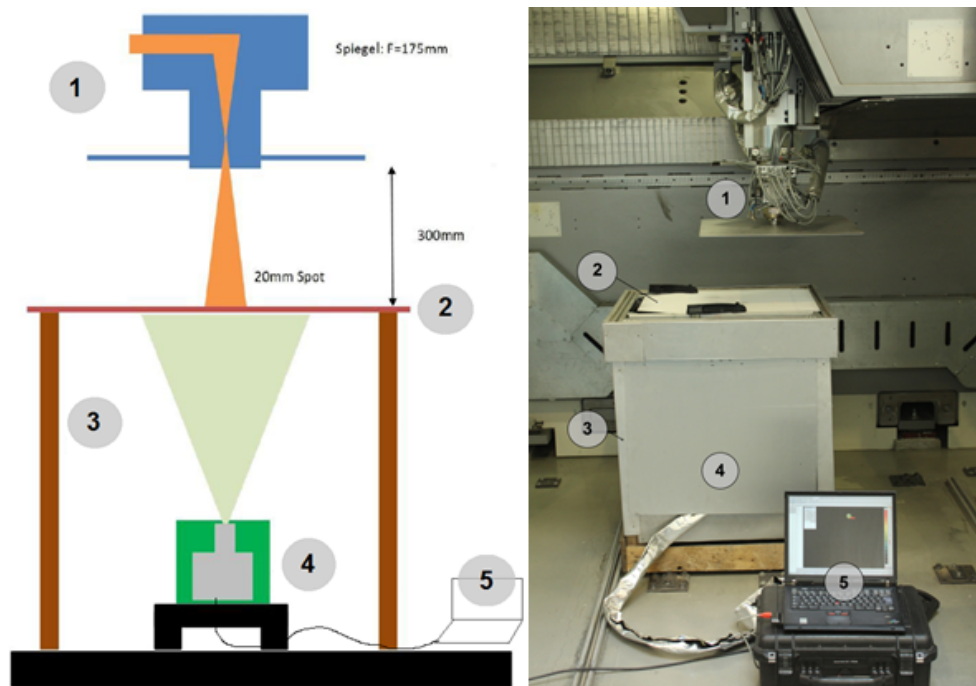


Abbildung 4.6: Versuchsaufbau Lasermaschine: 1...Laserkopf, 2...Platine AA6016-T4, 3...Schutzkasten, 4...Wärmebildkamera, 5...Mess- und Auswertrechner

4.4.2 Blechvorbereitung

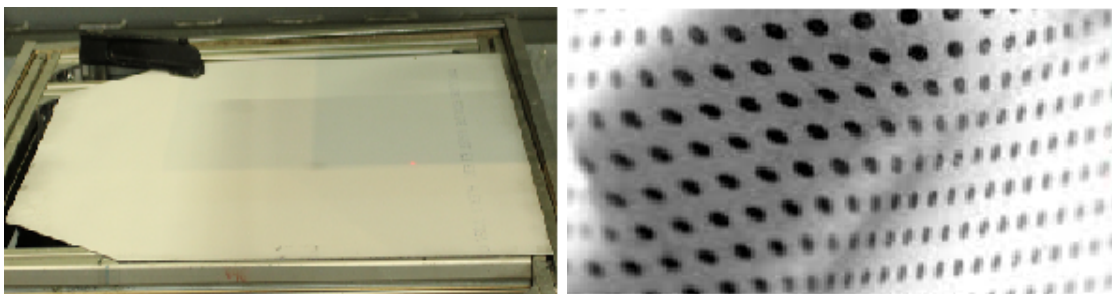
Um Vergleichsbedingungen beim Umformen, sowie bei der lokalen Wärmebehandlung zu schaffen, wird bei den Blechplatten der vom Hersteller aufgetragene Trockenschmierstoff mit einem Industriereiniger entfernt.

Für die Aufnahmen mit der Thermocam wird eine Versuchsplatte verwendet, welche an der Hinterseite mit schwarzem, hitzebeständigem Ofenlack gleichmäßig

besprüht wurde, um eine Reflexion der Strahlen zu vermeiden. Auf der Oberseite, wo der Laser auftritt, wird eine spezielle Laser- Beschichtung (Lasercoat) mittels einer handelsüblichen Lackierpistole aufgetragen. Diese sorgt für eine optimale Energieeinbringung des Lasers. (Abschnitt 2.3.2.3)

Bei den Platinen welche später für die Umformversuche verwendet wurden, wurde die Hinterseite nicht beschichtet, da bei denen keine Aufnahmen mit der Wärmebildkamera durchgeführt wurde. An der Oberseite wurde bei den Platinen für den Napf- und Kreuzversuch ein regelmäßiges Punktemuster chemisch aufgeätzt um nach dem Tiefziehen mit Hilfe der ARGUS-Software von GOM (Abschnitt 6.2) eine Dehnungsmessung durchführen zu können.

Das Aufbringen des Lasercoats musste so gleichmäßig wie möglich erfolgen um einen konstanten Temperaturverlauf zu erreichen. Große Abweichung der Schichtdicke hat einen ungleichmäßigen Temperaturverlauf zur Folge.



(a) Mit Lasercoat beschichtete Platine

(b) Beispielbild: aufgeätztes Muster

Abbildung 4.7: Platine mit Lasercoat und aufgeätzten Muster

4.4.2.1 Vorbereitung der CNC-Programme für die Laseranlage

Die Geometrien für die verschiedenen Erwärmungslayouts, wurden in die Programmiersoftware TRU TOPS importiert. Um eine flächendeckende Erwärmung zu gewährleisten, mussten mehrere Bahnen programmiert werden. Die Parameter für den Laser, wie Leistung, Verweilzeit und Vorschubgeschwindigkeit, wurden vorerst aus Erfahrungswerten angenommen. Abbildung 4.8 zeigt die programmierten Bahnen an der Platine für das Kreuzwerkzeug.

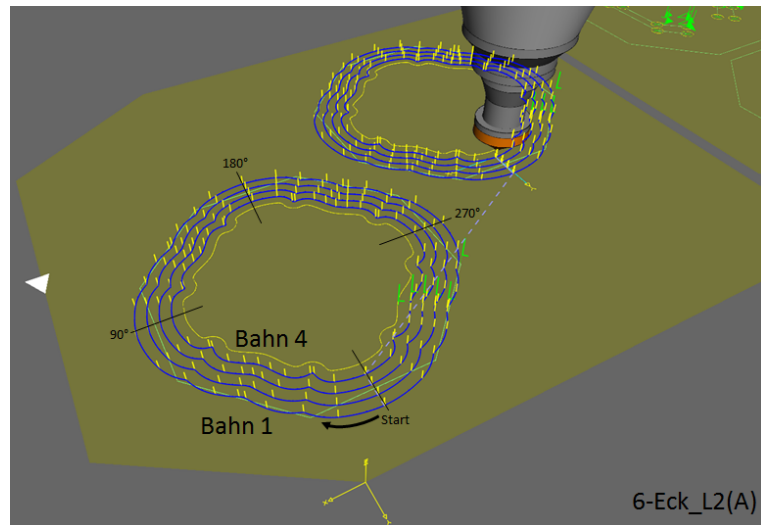
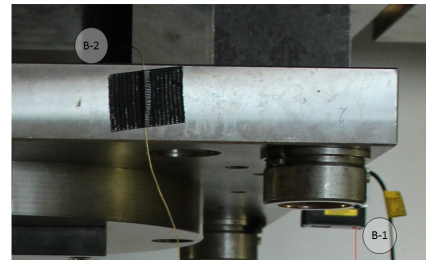
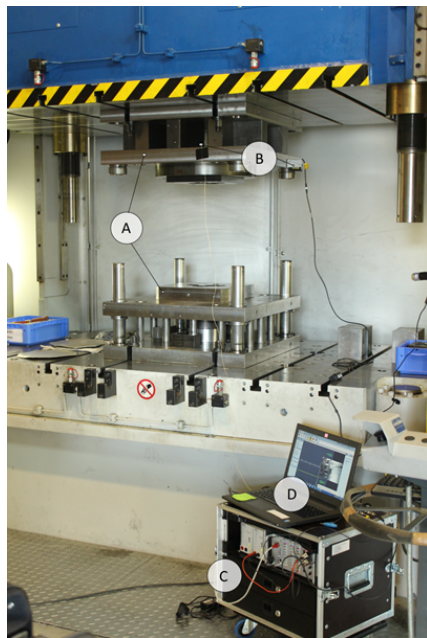


Abbildung 4.8: Darstellung der programmierten Bahnen

4.4.3 Versuchsaufbau für die Tiefziehversuche in der hydraulischen Presse

Der Versuchsaufbau für die Ermittlung der maximalen Ziehtiefe vor Bauteilversagen beim Napfwerkzeug und Kreuzwerkzeug wird in Abbildung 4.9 a) dargestellt. Die Ermittlung der maximalen Ziehtiefe erfolgt mit Hilfe eines berührungslosen Messsystems. Dabei wird durch Körperschallmessung mittels Akustiksensoren der Zeitpunkt ermittelt, bei dem der Riss eintritt. Die durch den Riss erzeugte mechanische Schallenergie wird in einer Schwingungsmembran eines Lautsprechers in elektrische Energie umgewandelt und im Datenerfassungssystem in ein verwertbares Messsignal weiterverarbeitet. Die Ziehtiefe wird durch die gemeinsame Weiterverarbeitung des Weg- und Akustiksignals im Datenerfassungssystem ermittelt. Am Oberwerkzeug befindet sich ein optischer Messkopf mit Lasersensor der Firma Keyence Modell IL-300. Dieser wird mittels Spiegel vertikal ausgerichtet, bei geschlossenem Werkzeug abgenullt und für alle Versuchsreihen pro Werkzeug nicht mehr verändert. Abbildung 4.9 b) zeigt die Anordnung des Weg- und Akustiksensors am Oberwerkzeug für das Napf- und Kreuzwerkzeug.

Für die Umformversuche beim kundenspezifischen Bauteil wurden keine Messsensoren angebracht, da die Ermittlung der maximalen Ziehtiefe nicht relevant war.



(a) Versuchsaufbau Presse: A...Versuchswerkzeug, B...Weg- und Akustiksensoren, C...Datenerfassung, D...Mess- und Auswertrechner

(b) Risserkennungssensoren: B-1...Wegsensor, B-2...Akustiksensoren

Abbildung 4.9: Versuchsaufbau Presse mit Weg- und Akustiksensoren

Anhand der aufgezeichneten Messdaten wird der Zeitpunkt des Versagens durch auftreten eines Risses ermittelt. Abbildung 4.10 stellt die Aufzeichnung der Messdaten des Wegsensors und Akustiksensors an einem Beispieldiagramm dar. Das linke Diagramm zeigt die Wegkurve und das rechte das parallel aufgezeichnete Akustiksignal. Des Weiteren ist die Ziehtiefe mit dem Ausschlag der Schwingungsmembrane dargestellt.

Die so ermittelten Ziehtiefen für die Napfversuche und Kreuzversuche werden anschließend für eine statistische Versuchsauswertung herangezogen. (Abschnitt 6.1.3)

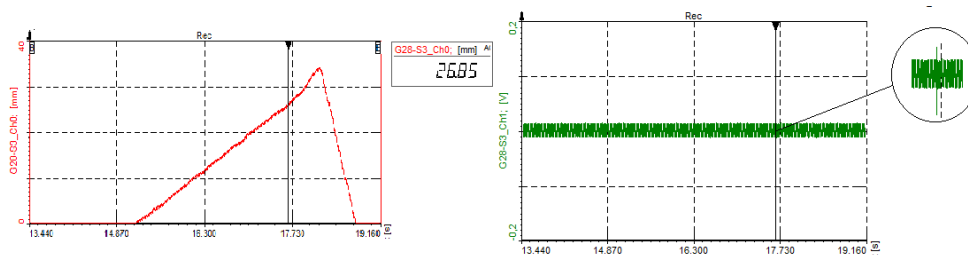


Abbildung 4.10: Beispieldiagramm: Risserkennung und Ziehtiefenermittlung

4.5 Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung wurden die Wärmelayouts aus Tabelle 5.2 für das Napfwerkzeug verwendet. Für die Umformversuche des Kreuzziehteiles wurde das Wärmelayout L1 aus Abschnitt 5.1.1.2 in die Praxis umgesetzt.

4.5.1 Versuchsdurchführung der lokalen Wärmebehandlung mittels Lasererwärmung

Die Testplatinen wurden laut Abschnitt 4.4.2 vorbereitet und in die Lasermaschine wie in Abbildung 4.6 dargestellt eingespannt. An der Wärmebildkamera musste ein Emissionsgrad von 0,98 eingestellt werden, der in Vorversuchen anhand einer Bakkalaureatsarbeit[32] ermittelt wurde. Des Weiteren wurde ein Temperaturbereich von 100°C bis 600°C und ein Messabstand von 1 m zum fokussieren der Kamera eingegeben. Die Bleche wurden mittels Schraubzwinde am Schutzkasten befestigt, da sie sich durch thermisches Ausdehnen verziehen und während der Erwärmung eine genaue Position gewährleistet werden muss. Die Lücken zwischen Schutzkasten und Blech müssen abgedeckt werden damit keine Strahlen ins Innere des Kastens gelangen.

Beim Abfahren der Programme wurde die Aufnahme der Wärmebildkamera auf den Messlaptop übertragen. Die Parameter der Lasermaschine wurden so geändert bis ein Temperaturverlauf über die erwärmten Zonen zwischen 250°C und 350°C erreicht wurde. Abschließend wurde mit den richtig eingestellten Parametern eine Aufnahme mit der Kamera gemacht, um später den Temperaturverlauf nachvollziehen zu können.

Dieser Vorgang wurde für jedes Erwärmungslayout des Napfwerkzeuges, Kreuzwerkzeuges und des kundenspezifischen Bauteils wiederholt.

4.5.2 Versuchsdurchführung Umformversuche

Die wärmebehandelten Platinen mussten vor dem Umformen zugeschnitten werden. Dafür wurde eine Schablone zum Einzeichnen der Platinenform an der richtigen Position angefertigt. Das Zuschneiden erfolgte mit Hand an einer Bandsäge.

Die Platinen wurden vor dem Umformen nochmals gründlich vom Lasercoat und von Verschmutzungen gereinigt. Um die Reibung während des Umformprozesses zu minimieren wurde mittels einer Pipette eine geringe Menge des Schmierstoffes WISURA ZO 3107/180 aufgebracht. Für eine homogene Schmierstoffverteilung wurde eine handelsübliche Kunststoffwalze mit Walzenbezug und Kunststoffkern verwendet.

5 Evaluierung der Erwärmungslayouts für die späteren Umformversuche mittels FEM-Simulation

5.1 FE-Modell

Das Finite Elemente Modell für die Simulation der Tiefziehversuche wurde mit der Software LS-Dyna erstellt. Dabei wurde das Werkzeug (Abbildung 5.1 a)) als starrer Körper angenommen und die Platine (Abbildung 5.1 b)) mit den Materialeigenschaften im Zustand T4 und mit einer lokalen Wärmebehandlung von 270°C modelliert.

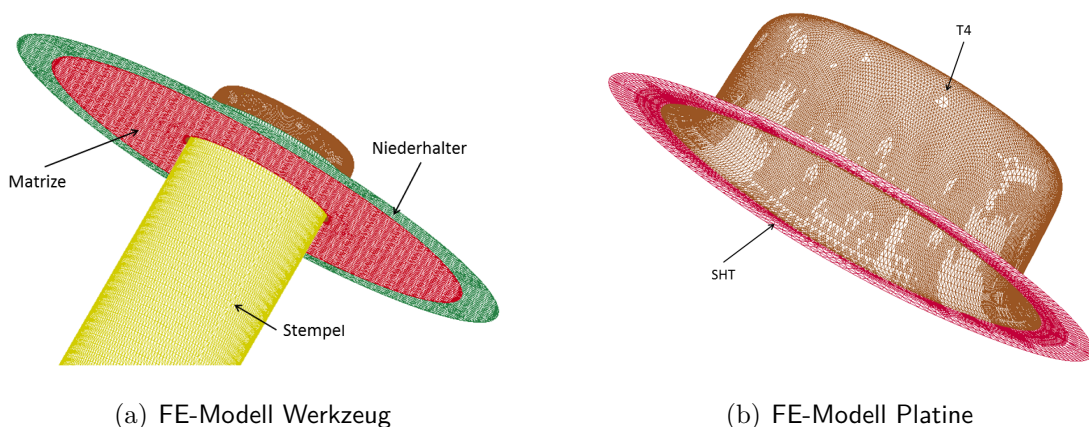


Abbildung 5.1: FE-Modell-Platine und Werkzeug

Basierend auf den Ergebnissen des Zugversuches wurde die Materialverfestigung für die Aluminiumlegierung der 6016 Serie nach der Hocket-Sherby Gleichung 5.1 modelliert[33]. In Tabelle 5.1 werden die relevanten Parameter für die Gleichung dargestellt.

$$\sigma = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_y)e^{-\alpha \cdot \epsilon^p} \quad (5.1)$$

Tabelle 5.1: Hocket-Sherby hardening Parameter des verwendeten Materials AA6000

SHT-Temperatur	σ_s [MPa]	σ_y [MPa]	α	p
T4	331	122	5.4	0.82
270°C	280	84	3.7	0.67

Das Fließkriterium Yld 2000-2d wurde ausgewählt um den Beginn des Fließens in Zusammenhang mit den auftretenden Spannungszuständen zu beschreiben. Dabei wurden die acht Fließparameter aus [34] entnommen. Für die Reibung zwischen Platine und Werkzeug wurde ein konstanter Wert von $\mu = 0,14$ angenommen[35]. Des Weiteren wurde der Bereich des Wärmeübergangs so wie die Dehnrage vernachlässigt.

Um die Simulationsergebnisse evaluieren zu können wurden die Formänderungskurven laut Abbildung 5.2 herangezogen, welche durch den Nakajima Test ermittelt wurden.

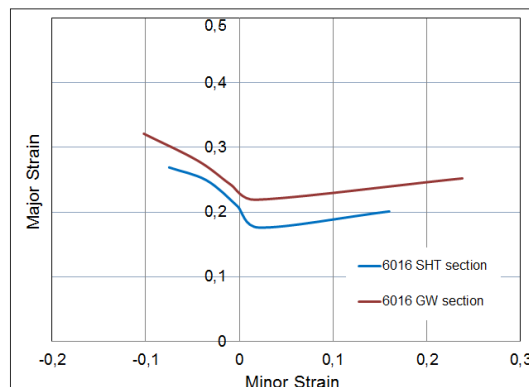


Abbildung 5.2: Formänderungskurven für die Simulation

5.1.1 Erstellung der Wärmebehandlungslayouts


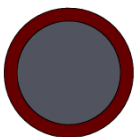



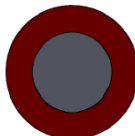
Mittels FEM-Simulation wurde versucht zu lokalisieren, welche Bereiche der Platine mittels Lasererwärmung entfestigt werden müssen. Dabei wurde die Platine in zwei Bereiche mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften eingeteilt. In den nachfolgenden Abschnitten werden die modellierten Platinen als Layouts bezeichnet.

5.1.1.1 Layouts für das Napfwerkzeug

In Tabelle 5.2 sind die Wärmelayouts für das Napfwerkzeug dargestellt. Die rot markierten Bereiche kennzeichnen die wärmebehandelten Zonen, in den grauen Bereichen liegt der Zustand T4 vor.

Beim Erstellen der Layouts wurde nach den Wirkmechanismen laut Abschnitt 2.3.1.4 vorgegangen. Um die verschiedenen Layouts miteinander vergleichen zu können wurde vorerst eine Platine mit dem Zustand T4 bis zum ersten Auftreten von Werkstoffversagen simuliert, welche später als Referenzgeometrie diente. Zum Evaluieren der Simulationsergebnisse wurde das Formänderungsdiagramm herangezogen.

Tabelle 5.2: Simulierte Layouts mit den wärmebehandelten (rot) und unbehandelten (grau) Zonen für das Napfziehteil

Layout T4	Layout L1	Layout L7
		
wärmb. Zone:	wärmb. Zone: Flansch: 20 mm	wärmb. Zone: Flansch: 20 mm Innenring: 20 mm
Layout L8	Layout L11	Layout L12
		
wärmb. Zone: Flansch: 20 mm Punkt: Ø20 mm	wärmb. Zone: Innenring: 20 mm	wärmb. Zone: Flansch: 40 mm

LAYOUT T4: Stellt die unbehandelte Platine dar. Im Formänderungsdiagramm (Abbildung 5.3 (a)) wird die FLC-Kurve (rot) eindeutig überschritten, was ein Versagen des Bauteils bedeutet. In Abbildung 5.3(b) wird dargestellt an welcher Stelle das Versagen des Bauteils auftritt. In diesem Falle liegt die kritische Stelle am Napfbodenradius.

Layout T4 dient mit einer simulierten Ziehtiefe von circa 50 mm als Referenzlayout, mit dem die weiteren Layouts verglichen werden.

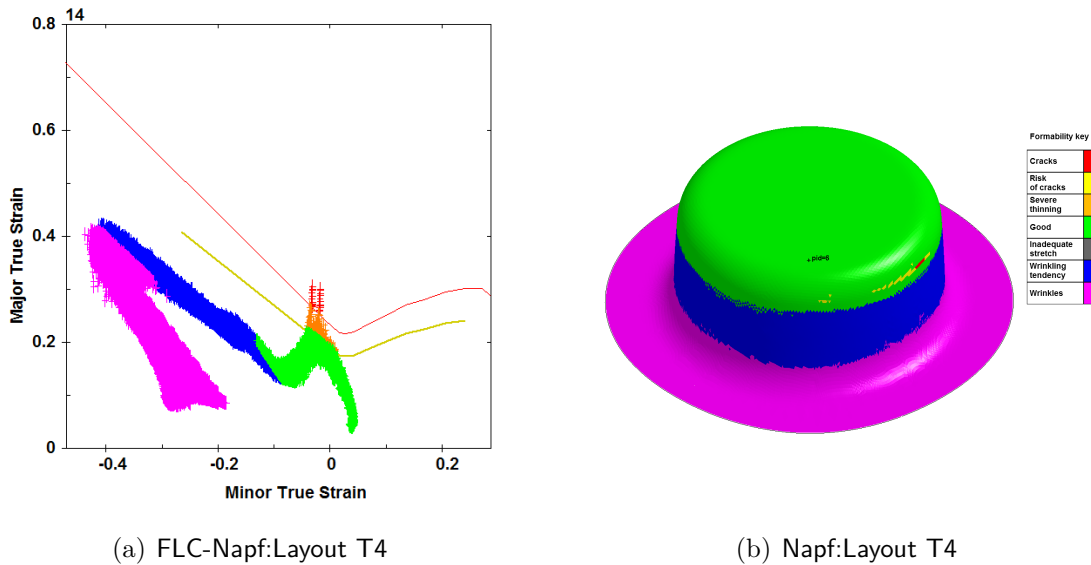


Abbildung 5.3: Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout T4

Layout L1: Es wurden die Materialeigenschaften der Platine im Flanschbereich mit einer Breite von 20 mm geändert. In diesem Bereich liegt der Zustand SHT bei 270°C vor. Dadurch kann am simulierten Bauteil eine eindeutige Verbesserung erkannt werden. Wie in Abschnitt 2.3.1.4 beschrieben, treten dadurch geringere Kräfte im Bauteil auf, was geringere Spannungen in den kritischen Zonen hervorruft.

Der Abstand der maximalen Dehnung in Richtung Plain Strain zur FLC-Kurve konnte erweitert werden. Es kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass ein fehlerfreies Bauteil simuliert wurde, da die maximale Dehnung unterhalb der FLC (rot) liegt. Jedoch immer noch oberhalb der gelben Kurve, die sogenannte „safety margin“ welche eine Sicherheit von 20 % vorgibt (Abbildung 5.4 (a)).

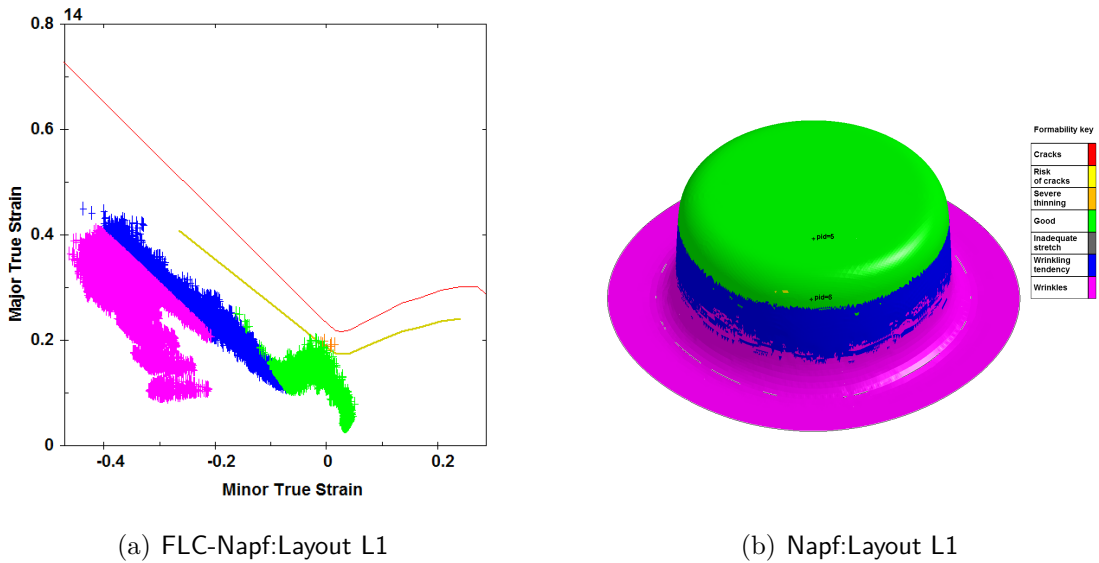


Abbildung 5.4: Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout L1

Layout L7: In Layout L7 werden die Materialeigenschaften im Flanschbereich und durch einen Ring von 20 mm in der Nähe der kritischen Zonen verändert. Durch die Entfestigung in der Nähe der kritischen Zone können die auftretenden Spannungen vom Material nicht aufgenommen werden und es kommt schon vor dem Erreichen der Referenzziehtiefe zum Versagen des Bauteils.

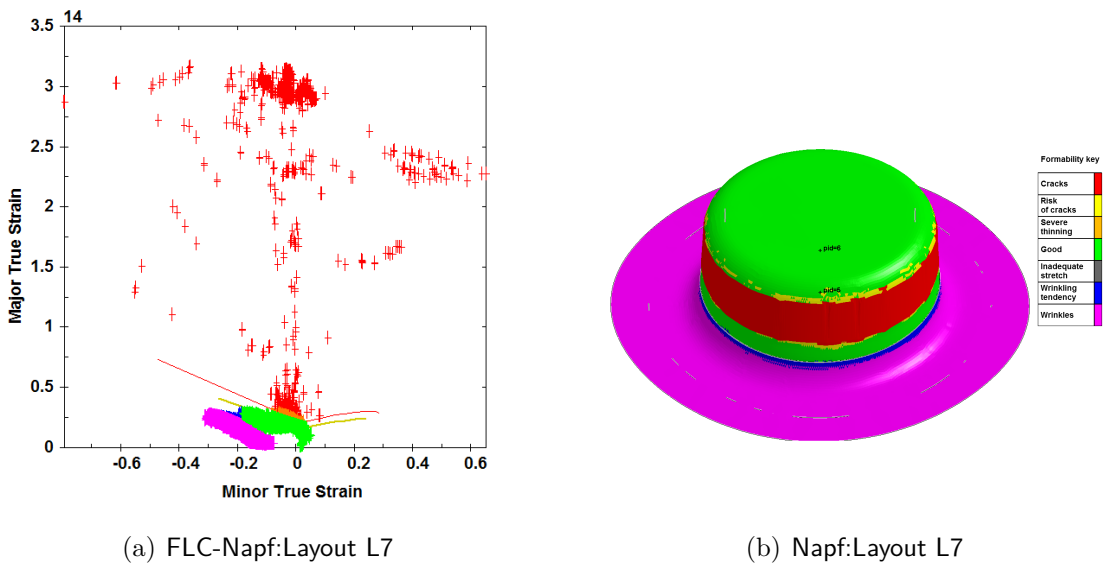


Abbildung 5.5: Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout L7

Layout L11: Bei Layout L11 wurden die Materialeigenschaften in der Nähe der kritischen Zone durch einen Ring von 20 mm geändert. Dadurch wird ersichtlich, dass durch eine Entfestigung in der Nähe der rissgefährdeten Zonen die Umformbarkeit erheblich verschlechtert wird. Durch Evaluieren des Simulationsergebnisses kann schon frühzeitig ein Versagen des Bauteils festgestellt werden. Die Referenzziehtiefe kann nicht erreicht werden.

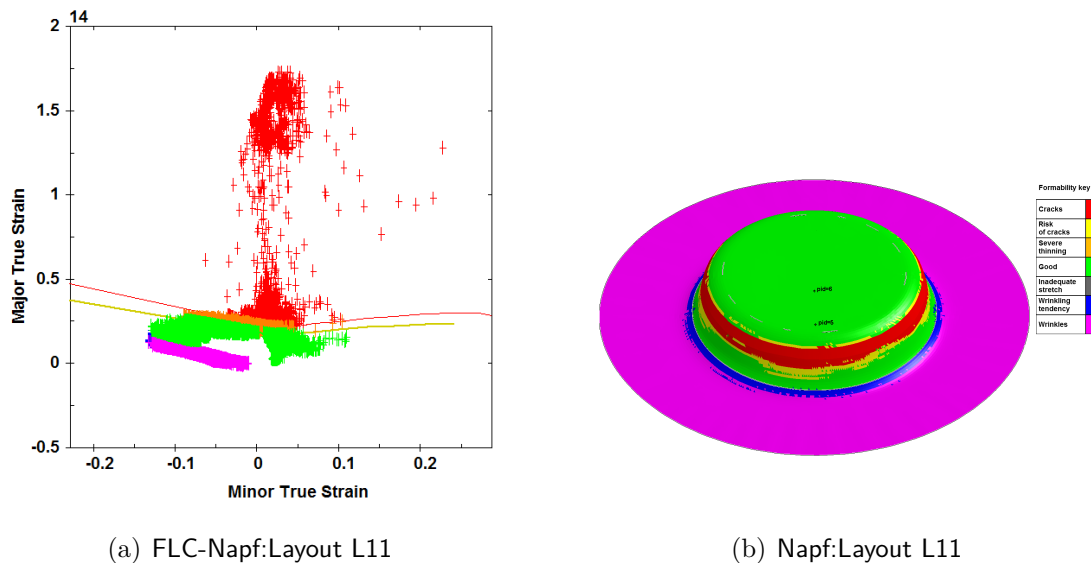


Abbildung 5.6: Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout L11

Layout L12: Durch Verändern der Materialeigenschaften im Flanschbereich mit einer Breite von 40 mm, steigt die Gefahr vom Bauteilversagen an. Dadurch wandert der Bereich mit den Eigenschaften SHT(270°C) bis in die Zarge (Abbildung 5.7 (b)). Durch die Entfestigung im Zargenbereich wird das Material in diesem Bereich größeren Dehnungen ausgesetzt. In Abbildung 5.7 (a)) wird dies ersichtlich. Die Referenzziehtiefe kann immerhin erreicht werden, jedoch wird die „safety margin“ im Formänderungsdiagramm überschritten.

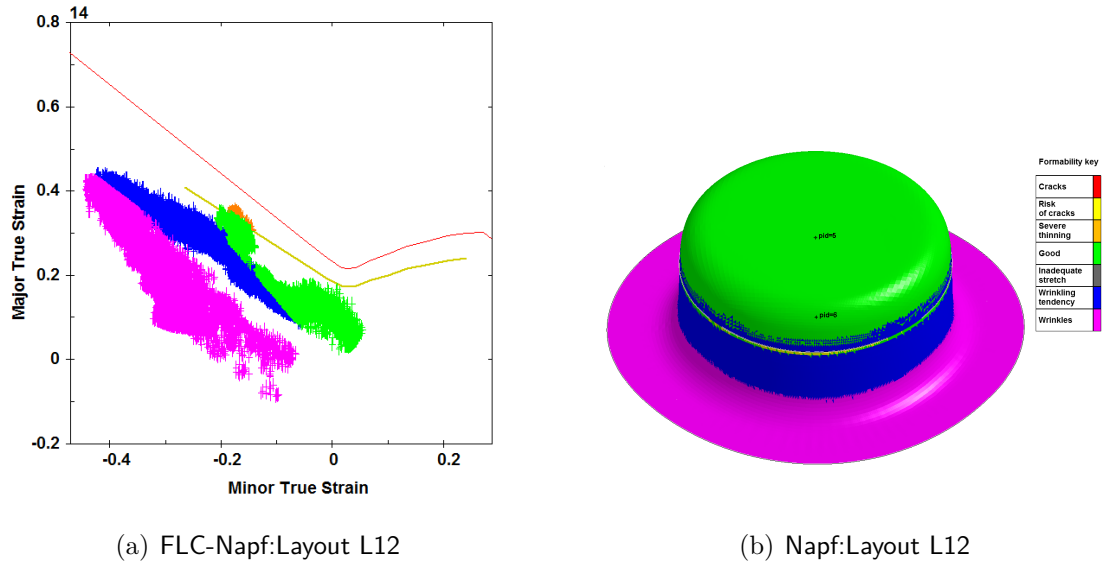


Abbildung 5.7: Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout L12

Layout L8: Mit Layout L8 wurde ein fehlerfreies Bauteil modelliert. Dies konnte durch Verändern der Materialeigenschaften im Flanschbereich mit einer Breite von 20 mm und das Anbringen einer entfestigten Zone durch einen Punkt ($\varnothing 20$ mm) im Mittelpunkt der Platine erreicht werden. Es wurden die beiden Wirkmechanismen aus Abschnitt 2.3.1.4 miteinander kombiniert. Die Materialeigenschaft SHT(270°C) im Mittelpunkt der Platine dient als sogenannte Opferzone, welche den Materialfluss begünstigt. Wobei hingegen die Veränderung am Flansch eine Reduktion der Umformkräfte hervorruft.

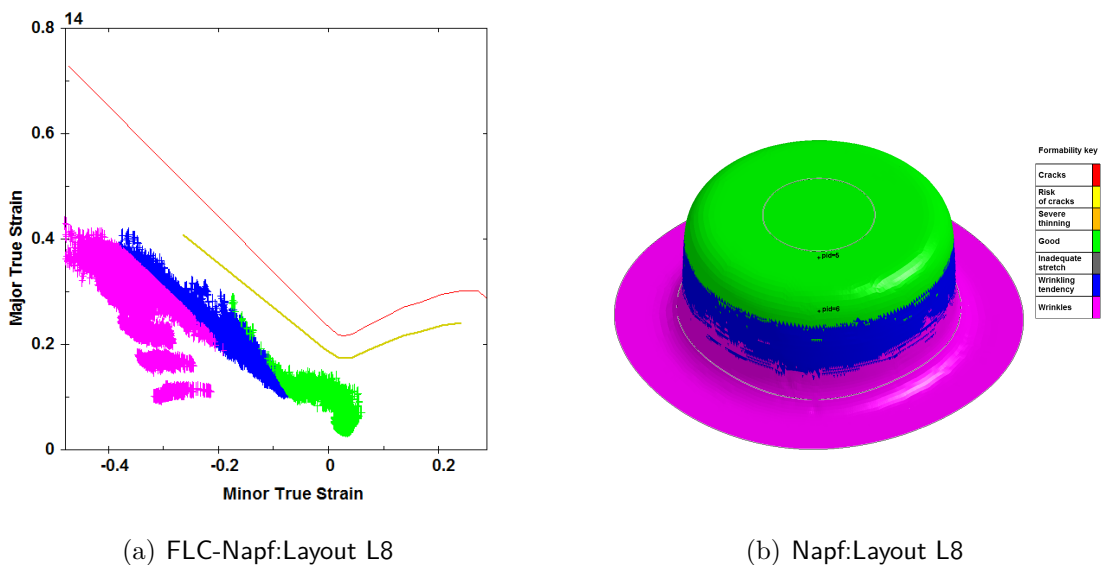




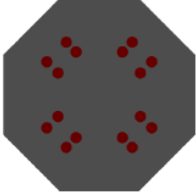


Abbildung 5.8: Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout L8

5.1.1.2 Layouts für das Kreuzwerkzeug

Zum Erstellen der Layouts für das Kreuzwerkzeug wurde versucht gleich vorzugehen wie beim Napfwerkzeug. Es wurde vorerst wiederum ein Bauteil im Zustand T4 simuliert welches als Referenzgeometrie diente.

In Tabelle 5.3 sind die verschiedenen Erwärmungslayouts für das Kreuzwerkzeug dargestellt. Um für die späteren Umformversuche das Einlegen der Platine ins Werkzeug, in Abhängigkeit der Walzrichtung zu erleichtern, wurde eine achteckige Platinengeometrie gewählt.

Tabelle 5.3: Simulierte Layouts mit den wärmebehandelten (rot) und unbehandelten (grau) Zonen für das Kreuzziehteil

Layout T4	Layout L1	Layout L7
 <p>wärmebe. Zone:</p>	 <p>wärmebe. Zone: Flansch</p>	 <p>wärmebe. Zone: Punkte mit Ø20 mm als Opferzonen</p>
Layout L8	Layout L11	
 <p>wärmebe. Zone: Opferzonen</p>	 <p>wärmebe. Zone: Flansch Punkte mit Ø20 mm und Opferzonen</p>	

Layout KWKZ T4: Stellt die unbehandelte Platine dar und wird wiederum mit einer maximalen Ziehtiefe von circa 28 mm als Referenzlayout herangezogen. In Abbildung 5.9 b) lassen sich die Problemzonen (rot) des Kreuzziehteiles gut erkennen. Die riss- und ausdünnungsgefährdeten Zonen liegen in den inneren Eckbereichen zwischen Bauteilboden und Zarge. Eine weitere Problemzone liegt am Aussenradius des Kreuzes vor.

Des Weiteren läßt sich die Umformbarkeit in abhängigkeit der Walzrichtung in Abbildung 5.9 b) erkennen. In Walzrichtung wird in den Problemzonen die „safety margin“(gelbe Bereiche) überschritten. Wobei mit 90° zur Walzrichtung ein Überschreiten der FLC (rote Bereiche) hervorgerufen wird.

Abbildung 5.9 a) stellt das Grenzformänderungsschaubild dar.

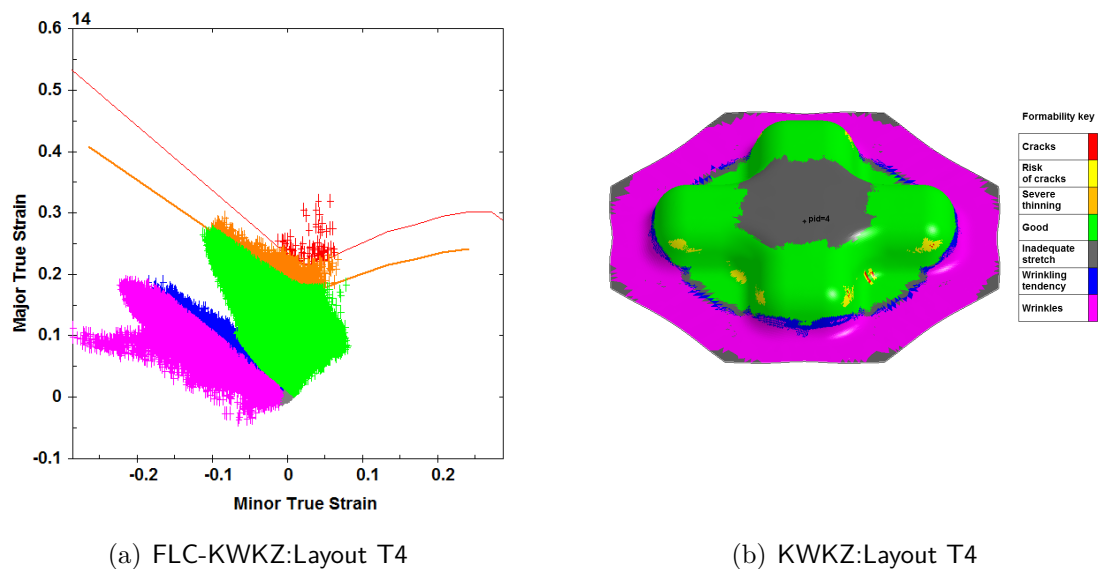


Abbildung 5.9: Grenzformänderungsdiagramm und umgeformtes Kreuzziehteil: Layout T4

Layout KWKZ L1: Mit Layout L1 konnte durch verändern der Materialeigenschaften im Flanschbereich ein fehlerfreies Bauteil simuliert werden. Die Flanschkontur wurde der Kreuzgeometrie angepasst (Abbildung 5.10 b)). Durch das Verändern der Materialeigenschaften im Flanschbereich werden geringere Umformkräfte benötigt, somit treten in den kritischen Zonen geringere Spannungen sowie Dehnungen auf.

In Abbildung 5.10 a) wird ersichtlich, dass der Abstand der maximlen Dehnung in Richtung Plain Strain zur FLC erweitert werden konnte. Im inneren Eckbereich zwischen Bauteilboden und Zarge kann noch ein Überschreiten der „safety margin“

festgestellt werden.

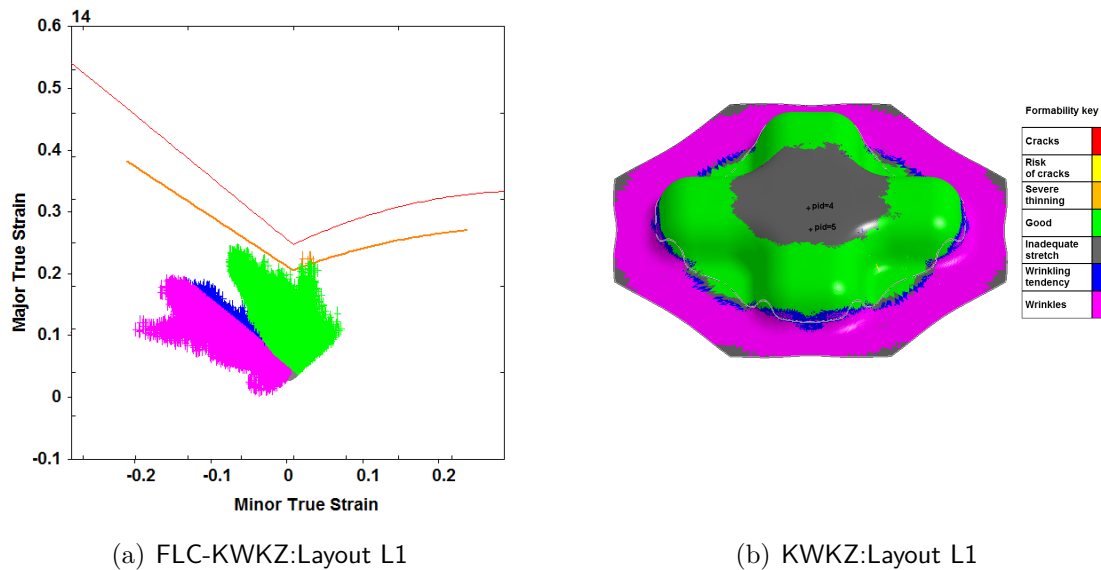


Abbildung 5.10: Grenzformänderungsdiagramm und umgeformtes Kreuzziehteil: Layout L1

Layout KWKZ L8 und L7: Um die Umformbarkeit weiter zu verbessern wurde versucht mit Layout L8 und L7 in der Nähe der kritischen Zonen sogenannte Opferzonen zu erstellen. Durch Verändern der Materialeigenschaften an der Oberseite des Kreuzes (Abbildung 5.11 b)) konnte keine wesentliche Verbesserung der Umformbarkeit im Gegensatz zum Zustand T4 erreicht werden.

Mit Layout L7 wurden die Materialeigenschaften in der Umgebung der riss- und ausdünnungsgefährdeten Zonen angebracht, um das Versagen des Bauteiles in den inneren Eckbereichen zwischen Bauteilboden und Zarge zu vermeiden (Abbildung 5.12).

Das Ändern der Materialeigenschaften, laut Layout L8 und L7, um somit sogenannte Opferzonen zu schaffen führt beim Kreuzziehteil zu keinem positiven Erfolg. Daraufhin wurde versucht ein Layout zu erstellen, bei dem die Materialeigenschaften im Flansch, an der Oberseite des Kreuzes, sowie in der Nähe der riss- und ausdünnungsgefährdeten Zonen angebracht werden.

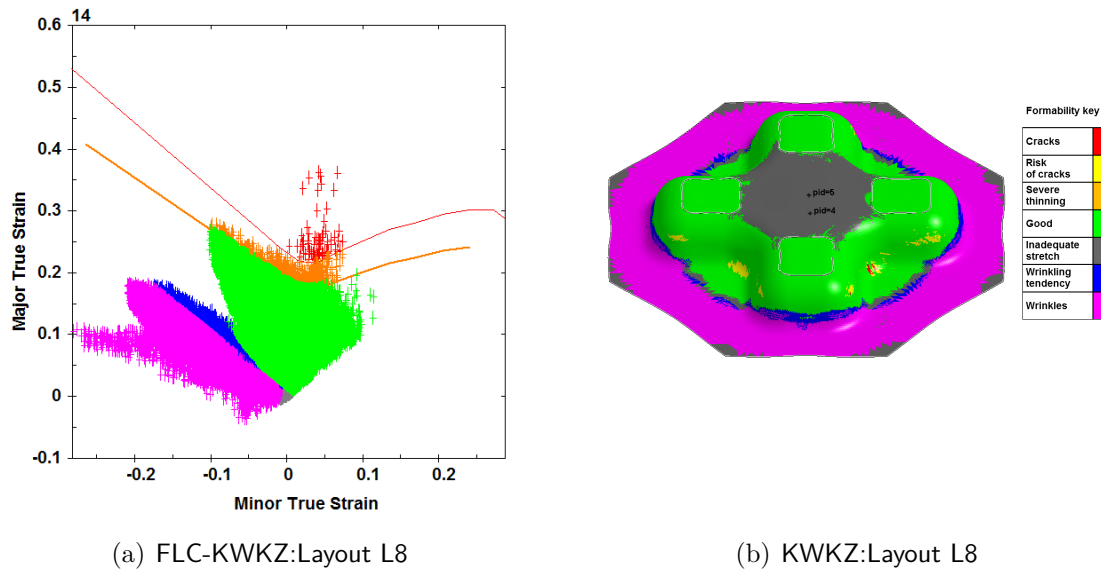


Abbildung 5.11: Grenzformänderungsdiagramm und umgeformtes Kreuzziehteil: Layout L8

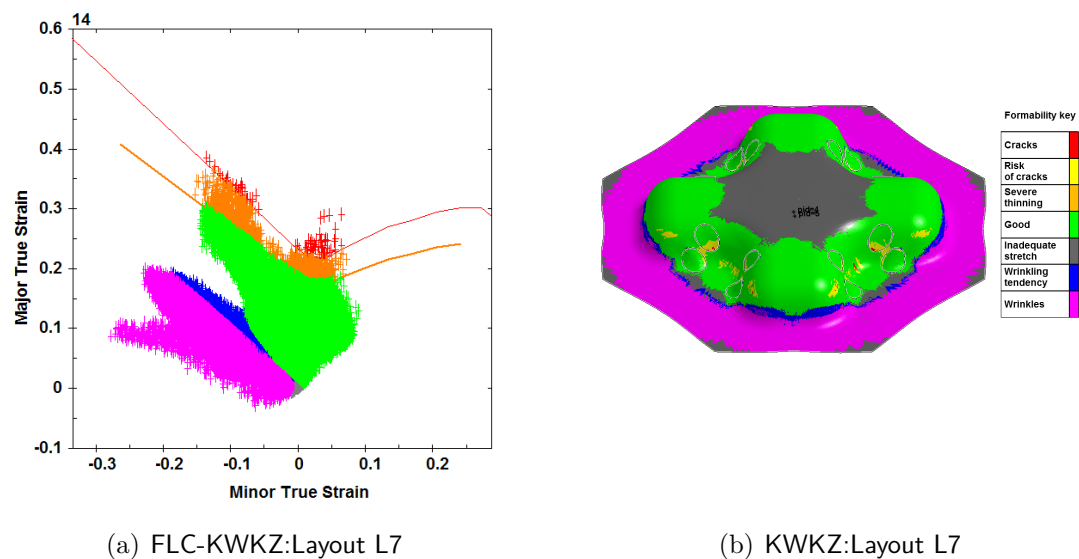
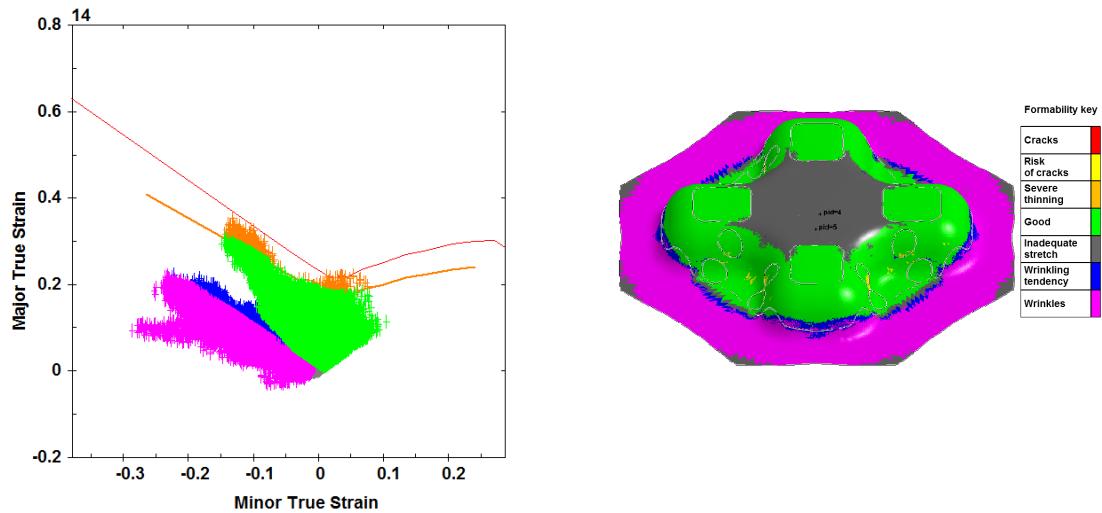


Abbildung 5.12: Grenzformänderungsdiagramm und umgeformtes Kreuzziehteil: Layout L7

Layout KWKZ L11: Das Verändern der Materialeigenschaften im Flanschbereich bewirkt eine Reduktion der Umformkräfte. Somit treten entlang der Lastpfade geringere Spannungen und Dehnungen auf. Durch das Entfestigen im Flanschbereich konnten die Problemzonen am Außenradius des Kreuzes eliminiert werden, was in Abbildung 5.13 b) ersichtlich ist. Das Anbringen der sogenannten Opferzonen bringt keine wesentliche Verbesserung der Umformbarkeit mit sich.

Laut Abbildung 5.13 a) kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass ein Versagen des Bauteils auftritt, da die FLC überschritten wird.



(a) FLC-KWKZ:Layout L11

(b) KWKZ:Layout L11

Abbildung 5.13: Grenzformänderungsdiagramm und umgeformtes Kreuzziehteil: Layout L11

6 Ergebnisse und Diskussion

Die Messdatenauswertung und -verarbeitung wurde mit verschiedenen Softwares durchgeführt. Für die Erstellung der thermographischen Bilder kam die Software IRBIS 3 zum Einsatz. DEWE-Soft diente für die Auswertung der Ziehtiefen. Mittels der ARGUS-Software von GOM erfolgte die Auswertung der tiefgezogenen Platinen. Des Weiteren kam ein Ultraschallmessgerät zum Einsatz um den Blechdickenverlauf zu ermitteln.

Die grafische Darstellung und Versuchsauswertung erfolgte mit der Software Minitab 17 und Excel von Microsoft.

6.1 Thermographische Ansicht der Layouts

6.1.1 Thermografische Ansicht Layouts-Napfwerkzeug

Abbildung 6.1 stellt die Temperaturverteilung an den Platinen des Napfwerkzeuges dar. Erwärmt und umgeformt wurden die Layouts aus Abschnitt 5.

Mit den schwarzen Linien (Kreise) werden die Konturen der wärmebehandelten Bereiche dargestellt. Der äußerste Kreis beträgt einen Durchmesser von 200 mm, welcher den Platinen Durchmesser angibt.

Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben ist die untere Grenztemperatur ein wichtiger Parameter damit eine Entfestigung stattfindet, welche ca. bei 200°C liegt. Wird diese Temperatur überschritten erfolgt ein Festigkeitsabfall bis zur oberen Grenztemperatur ($T_{OG} = 380^{\circ}\text{C}$)[22].

In den Abbildungen 6.1 lässt sich erkennen dass die untere Grenztemperatur bei jedem Layout überschritten wurde. Es fand also eine Entfestigung statt. Jedoch ist die Temperaturverteilung nicht homogen, was zu einer inhomogenen Festig-

keitsverteilung laut Abbildung 2.17 innerhalb der Platine führt. Die inhomogene Temperaturverteilung kann auf die unregelmäßige Beschichtung der Platinen zurückgeführt werden. Dies bedeutet, dass an den Stellen bei denen die Temperatur variiert, eine unterschiedliche Schichtdicke des aufgetragenen Lasercoats vorlag. Deshalb konnte an diesen Stellen nicht die gesamte Laserenergie eingebracht werden.

Um den Einfluss der Vorwärme beim Erwärmen der Platine zwischen den einzelnen Bahnen zu eliminieren, wurde zwischen dem Abfahren der Bahnen eine Wartezeit von 90 Sekunden gewählt. In dieser Zeit kühlte die Platine wieder auf die Ausgangstemperatur von ca. 30°C ab. Dadurch wurde für jede Bahn die gleiche Ausgangsbedingung geschaffen.

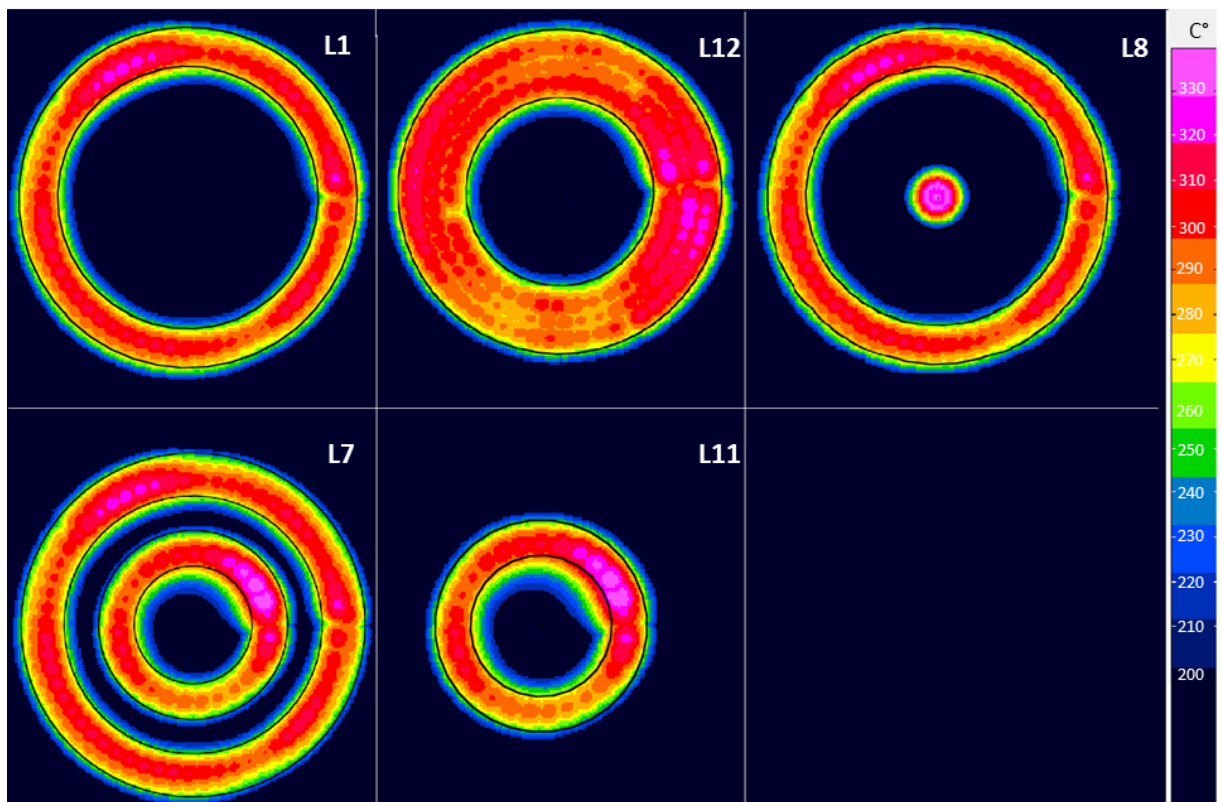


Abbildung 6.1: Thermographische Bilder der Napflayouts

6.1.1.1 Temperatur - Zeitverlauf am Napf

Abbildung 6.2 stellt den Temperaturverlauf über die Zeit der ersten Bahn am Napf dar. Die weiße Linie repräsentiert den Weg des Laserstrahles. Um auf die Temperatur von circa 300°C aufzuheizen und den Umfang des Durchmessers von ungefähr 200 mm abzufahren werden insgesamt 70 Sekunden benötigt. Die erste Entfestigung tritt dabei bei einer Temperatur von etwa 200°C auf, welche nach ungefähr 2 Sekunden erreicht wird. Des Weiteren ist ersichtlich, dass über den gesamten Zeitraum die untere Grenztemperatur T_{UG} nicht unterschritten wird. Es kann also laut Abbildung 6.1 davon ausgegangen werden, dass bei jedem Layout eine Entfestigung über den gesamten erwärmten Bereich stattgefunden hat.

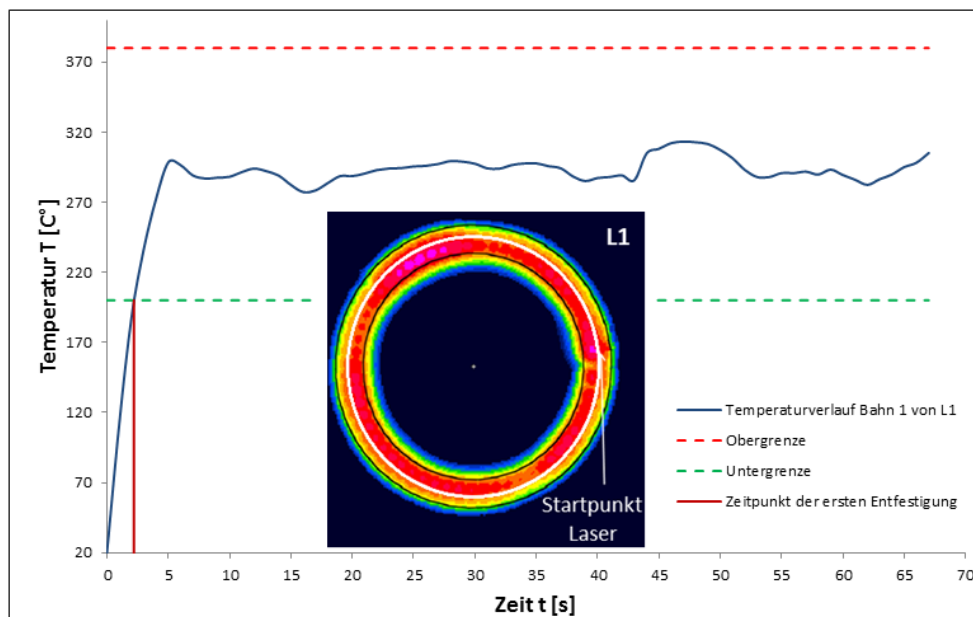


Abbildung 6.2: Temperatur- Zeitverlauf Bahn 1

6.1.2 Thermographische Ansicht Layout-KWKZ

Ausgehend von Abschnitt 5.1.1.2 wurde für das KWKZ das Erwärmungslayout L1 gewählt. Abbildung 6.3 zeigt das thermographische Bild des KWKZ. Die Außenkontur der Platine wird durch die schwarze Linie dargestellt (8-Eck). Die innere Kontur kennzeichnet die Kreuzgeometrie (innere Linie), welche den kritischen Zonen angepasst wurde.

Die inhomogene Temperaturverteilung ist hier besonders gut zu erkennen. Die Temperatur schwankt zwischen 250°C und 330°C.

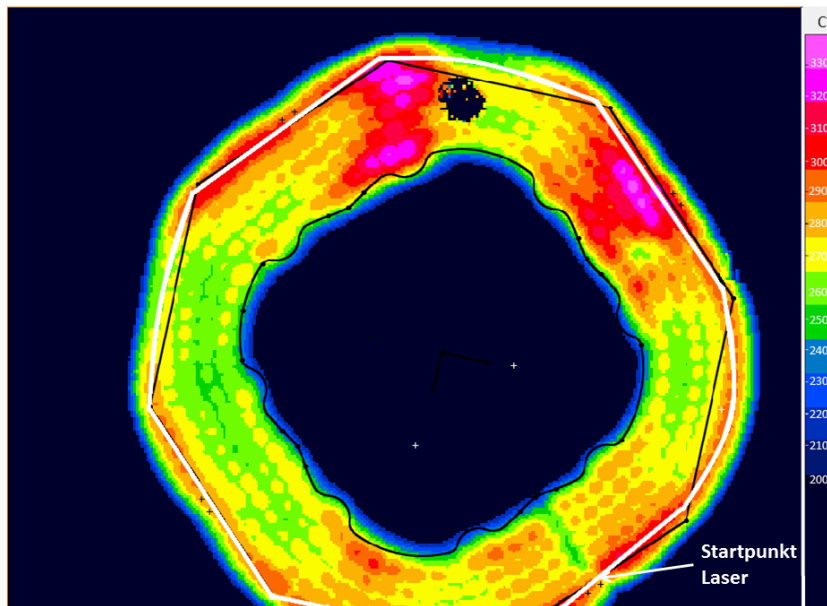


Abbildung 6.3: Thermographisches Bild KWZ

6.1.2.1 Temperatur - Zeitverlauf am KWZ

Abbildung 6.4 stellt die Temperaturverteilung über die Zeit am KWZ dar. Die Verteilung wurde anhand der weißen Linie aus Abbildung 6.3 erstellt, welche wiederum die programmierte Bahn (Abschnitt 4.4.2.1) des Lasers repräsentiert. Dabei werden für das Aufheizen auf circa 300°C und das Abfahren der Bahn 85 Sekunden benötigt. Die erste Entfestigung tritt wiederum bei 200°C auf, welche nach circa 2,5 Sekunden erreicht wird. Ausgehend von dieser Verteilung ist ersichtlich, dass eine Entfestigung im gesamten erwärmten Bereich stattgefunden hat, da die untere Grenztemperatur T_{UG} nicht unterschritten wird.

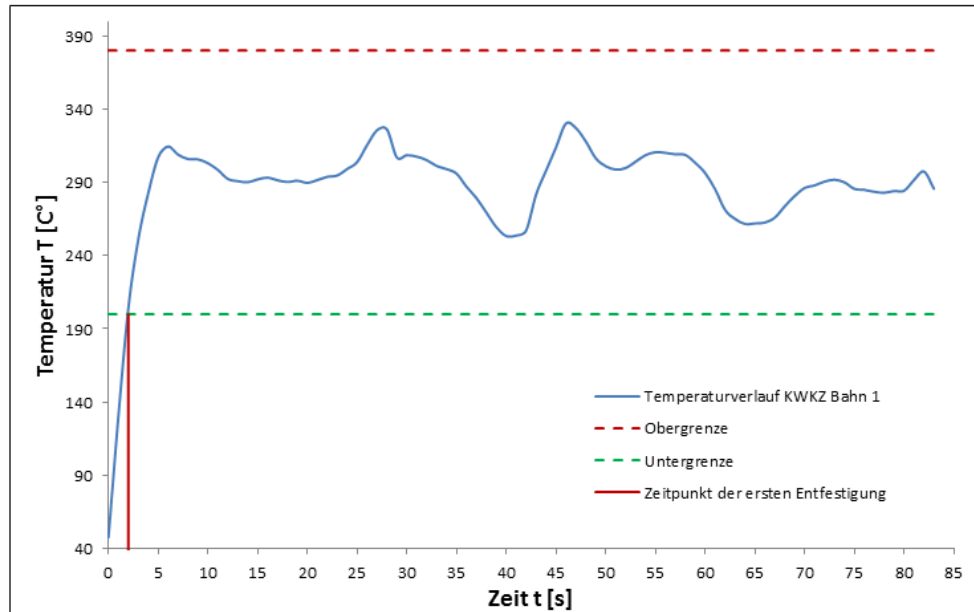


Abbildung 6.4: Temperaturverlauf KWKZ Bahn 1 aus Abbildung 6.3

6.1.3 Ziehtiefenvergleich der tiefgezogenen Layouts

In Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6 können die Ergebnisse der ermittelten Ziehtiefen am Napf und Kreuzwerkzeug entnommen werden. Es ist jeweils der Mittelwert, der Standardfehler sowie die Standardabweichung (realer Fehler) dargestellt.

Die zwei Erwärmungslayout L1 und L8 zeigen eine deutliche Verbesserung des Umformvermögens im Gegensatz zum Zustand T4. Die beiden Layouts konnten ohne Auftreten von Rissen umgeformt werden. Abbildung 6.7 a) zeigt den durchgezogenen Napf.

Der Ziehtiefenvergleich spiegelt wiederum die Aussage, dass eine Erwärmung in der Nähe der kritischen Zonen keine Verbesserung der Umformbarkeit mit sich bringt. Dies wird mit den Ergebnissen aus Layout L12 und L7 ersichtlich. Beide liegen deutlich unterhalb der maximalen Ziehtiefe vom Zustand T4. Abbildung 6.5 b) zeigt den gerissenen Napf.

Layout L11 ist in Abbildung 6.5 nicht ersichtlich, da ein Versagen des Bauteils schon bei einer Ziehtiefe von ungefähr 10 mm auftrat.

Eine Erhöhung der Ziehtiefe konnte auch beim KWKZ erzielt werden. Hier wurde

mit Layout L1 eine Ziehtiefe von 42 mm erreicht. Hingegen zum Zustand T4 mit dem eine Ziehtiefe von 37,5 mm erzielt wurde.

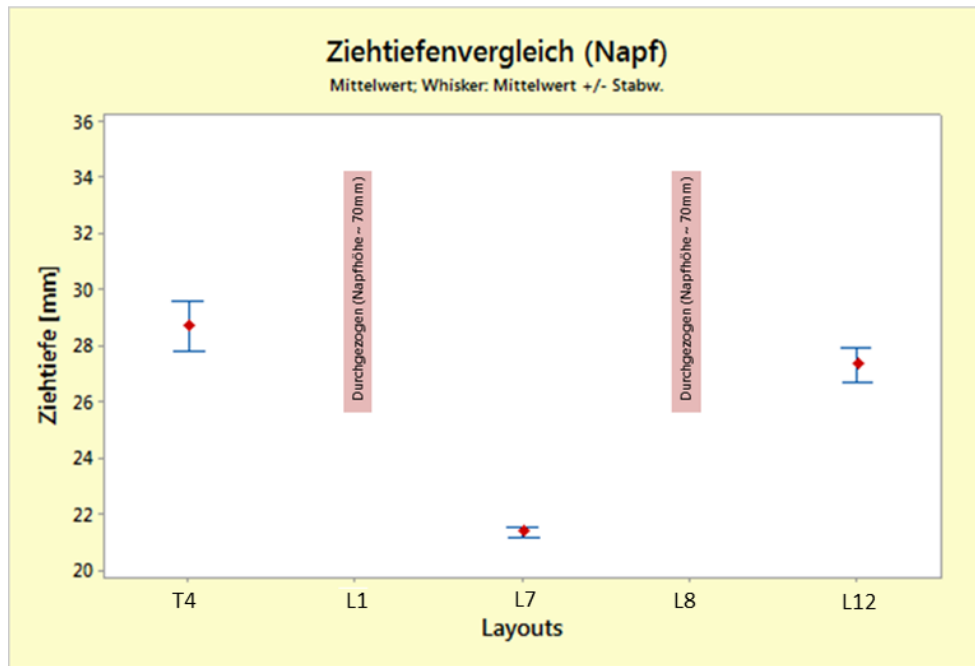


Abbildung 6.5: Ziehtiefenvergleich Napf

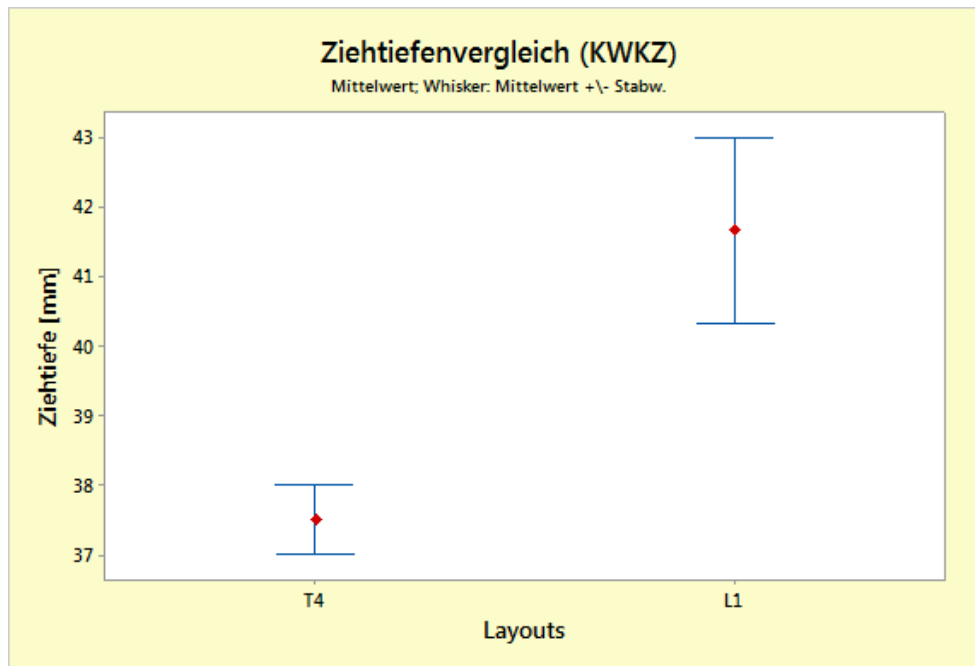
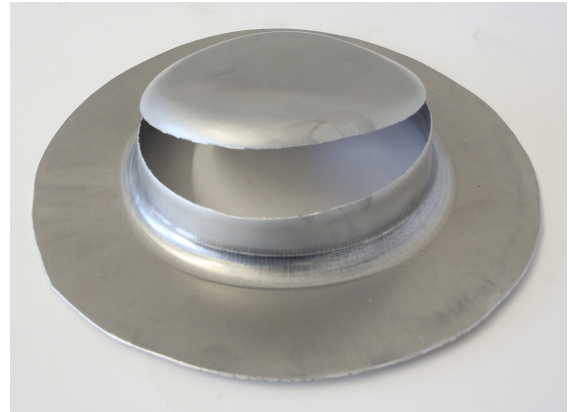


Abbildung 6.6: Ziehtiefenvergleich Kreuzziehteil



(a) durchgezogener Napf



(b) Reier am Napf

Abbildung 6.7: tiefgezogener Napf

6.2 GOM Vermessung

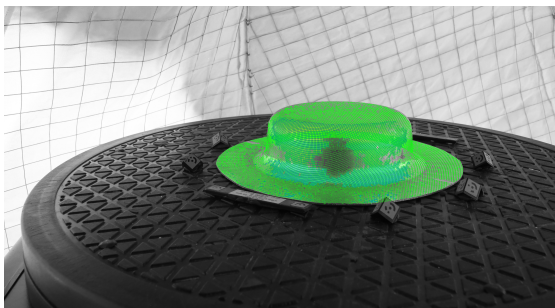
Die umzuformenden Platinen werden mit einem Punktemuster versehen und nach dem Umformen fotografiert. Die einzelnen Bilder aus verschiedenen Perspektiven werden durch die Software photogrammetrisch zu einem Bildband zusammengefasst.

Durch das Tiefziehen werden die Punkte in den Umformzonen verzerrt. Das Messsystem berechnet sich aus den lokalen Verzerrungen des Punktemusters die lokale Verformung (Haupt- und Nebenformänderung). Die Ergebnisse werden im Formänderungsdiagramm dargestellt. Durch die Ergänzung des Diagramms mit der materialabhängigen Grenzformänderungskurve (Forming Limit Curve, FLC) können die Verfahrensgrenzen des Umformprozesses beurteilt werden.

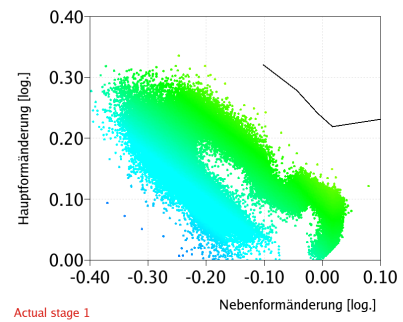
Abbildung 6.8 zeigt anhand des umgeformten Napfes den GOM Messaufbau. In Abbildung 6.9 a) wird das aufgelöste Netz am Napf, welches durch die ARGUS-Software erstellt wird dargestellt. Abbildung 6.9 b) zeigt das Grenzformänderungsdiagramm mit den gemessenen Haupt- und Nebenformänderungen.



Abbildung 6.8: GOM Messaufbau



(a) aufgelöstes Netz am Napf



ARGUS

gom
www.gom.com

(b) Grenzformänderungsdiagramm mit FLC

Abbildung 6.9: GOM Vermessung

6.2.1 Ergebnisse GOM-Vermessung am Napf

Im folgenden Abschnitt wurde eine Beurteilung der umgeformten Layouts T4, L1, L8 und L12 mit Hilfe des Formänderungsdiagramms durchgeführt. Die umgeformten Layouts wurden mit der ARGUS-Software von GOM vermessen.

Layout T4:

Layout T4 wurde bis auf einer maximalen Ziehtiefe von 30 mm umgeformt und vermessen. In Abbildung 6.10 a) werden die Nebenformänderungen und Hauptformänderungen dargestellt. Durch Hinzufügen der FLC, der Aluminiumlegierung 6016 im Zustand T4, kann eine Beurteilung des Umformprozesses durchgeführt werden. Dabei wurde der maximale Abstand $\Delta\epsilon$ zur FLC in Richtung Plain Strain gemessen.

$\Delta\epsilon = -0,0210 \log$ dient im Weiteren als Referenzwert, mit dem die nachfolgenden Layouts verglichen werden.

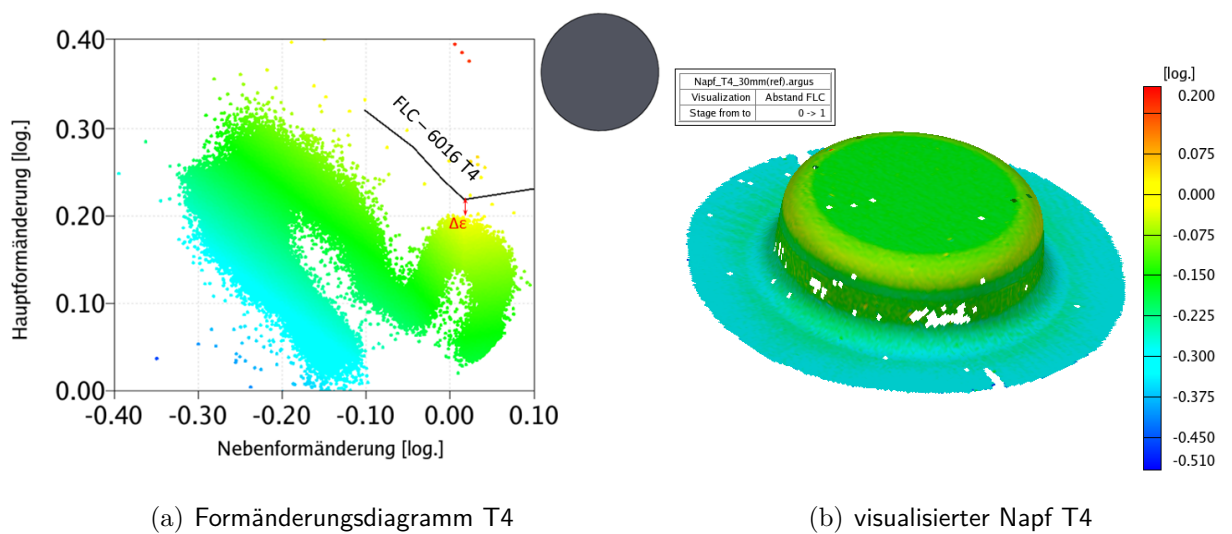


Abbildung 6.10: GOM Vermessung T4

Layout L1:

Wie aus Abschnitt 6.5 eindeutig zu erkennen ist kann mit Layout L1 das Umformvermögen gesteigert werden. Mit Abbildung 6.11 wird dies nochmals bestätigt. Der Abstand $\Delta\epsilon$ zur Grenzformänderungskurve in Richtung Plain Strain konnte auf einen Wert von $\Delta\epsilon = -0,1007 \log$ erweitert werden.

Durch eine lokale Wärmebehandlung im Flanschbereich werden jene Zonen entfestigt, in denen die Umformkräfte für die Plastifizierung des Werkstoffes benötigt

werden. Durch die Entfestigung muss also weniger an Plastifizierungsarbeit geleistet werden was wiederum zu geringeren Spannungen im rissgefährdeten Napfbodenradius führt. Somit werden auch die Dehnungen in diesem Bereich reduziert (Abbildung 6.11).

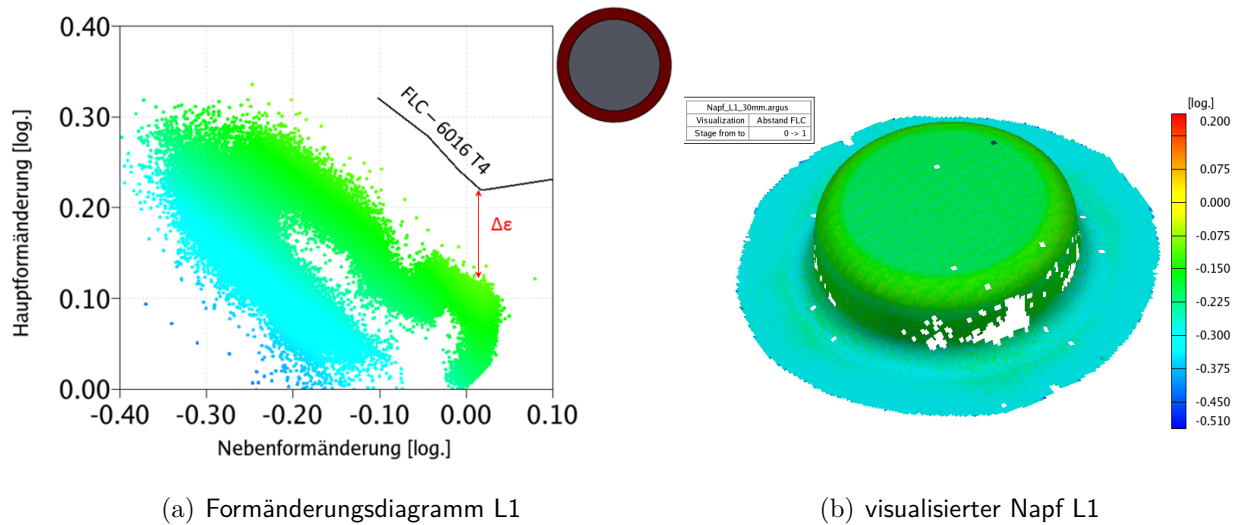


Abbildung 6.11: GOM Vermessung L1

Layout L8:

Mit anbringen einer lokalen Wärmebehandlung im Zentrum der Platine konnte der Abstand $\Delta\epsilon$ zur Grenzformänderungskurve in Richtung Plain Strain, im Vergleich zu Layout T4, erweitert werden.

Der gemessenen Abstand $\Delta\epsilon$ beträgt $-0,1078 \log$. Vergleicht man den Wert $\Delta\epsilon$ mit dem aus Layout L1, so kann nur eine minimale Erweiterung festgestellt werden. Die Zentrale Erwärmung sollte als Opferzone dienen und somit ein ausdünnen in den kritischen Bereichen vermeiden.

Abbildung 6.12 a) stellt das Formänderungsschaubild von Layout L8 dar.

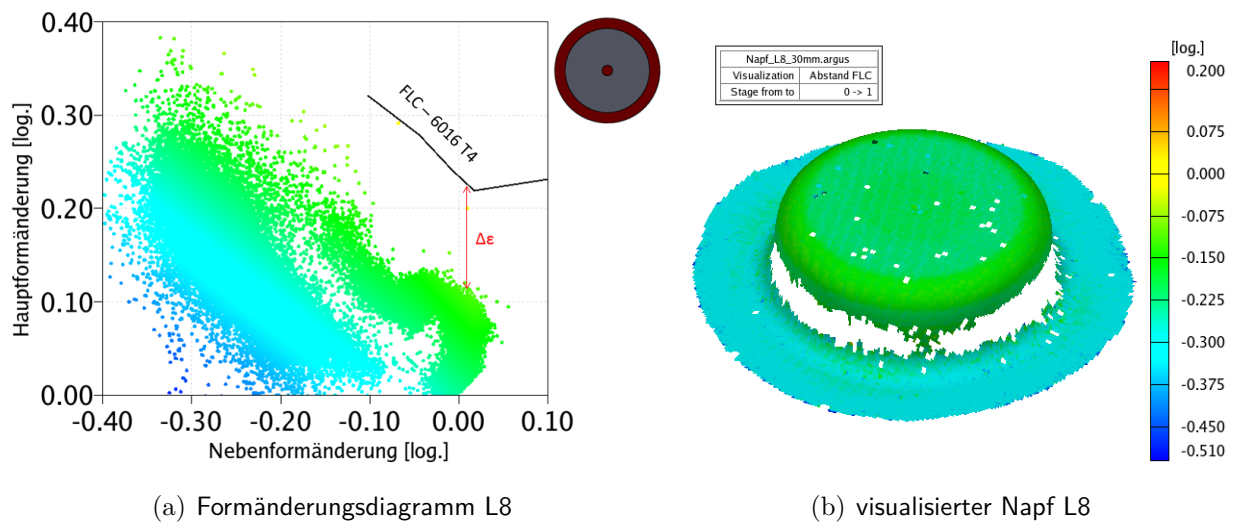


Abbildung 6.12: GOM Vermessung L8

Layout L12:

Bei Layout L12 ist aus der ARGUS-Messung ersichtlich, dass an den riss- und ausdünnungsgefährdeten Zonen die FLC überschritten bzw. angenähert wird (Abbildung 6.13).

Vergleicht man das Formänderungsdiagramm des Layouts L12 aus Abschnitt 5.1.1.1 mit dem der Argus-Messung, lässt sich erkennen, dass bei der Simulation kein Überschreiten der FLC festgestellt werden kann. Dies kann auf den Wärmeübergangsbereich bei der lokalen Wärmebehandlung mittels Laser zurückgeführt werden. Bei der FE-Simulation wurde der Wärmeübergangsbereich vernachlässigt. In Abbildung 6.1 lässt sich erkennen, dass eine Entfestigung über die 40 mm stattgefunden hat, und somit beim Umformen der Bereich der Entfestigung bis in den Übergang zwischen Zarge und Napfbodenradius reicht.

Durch vergrößern der wärmebehandelten Zone im Flansch Bereich von 20 mm auf 40 mm wandern die entfestigten Bereiche in den Zargenbereich des Napfes, und somit in den Bereich in dem die Kraftübertragung stattfindet, was in Abbildung 5.7 ersichtlich ist. Der entfestigte Werkstoff wird in den kritischen Zonen größeren Dehnungen im Vergleich zu Zustand T4 ausgesetzt.

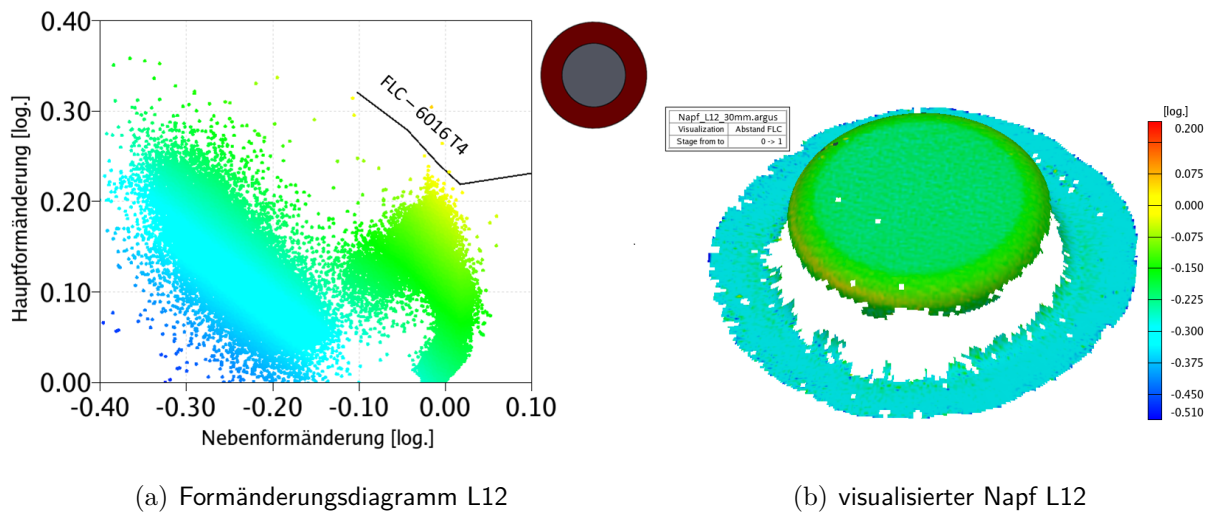


Abbildung 6.13: GOM Vermessung L12

6.3 Blechdickenverlauf

Der Blechdickenverlauf hängt direkt mit der Dehnung ϵ zusammen. Dieser Zusammenhang kann mittels der bezogenen Formänderung, Dehnung ϵ beschrieben werden. Dabei wird die Änderung eines Körpermaßes auf das Ausgangsmaß eines Körpers bezogen[14]. Für einen Körper laut Abbildung 6.14 gilt für die Höhenänderung bzw. Dickenänderung folgendes:

$$d\epsilon = \frac{dh}{h_0} \Rightarrow \epsilon = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h_0} = \frac{h_1 - h_0}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (6.1)$$

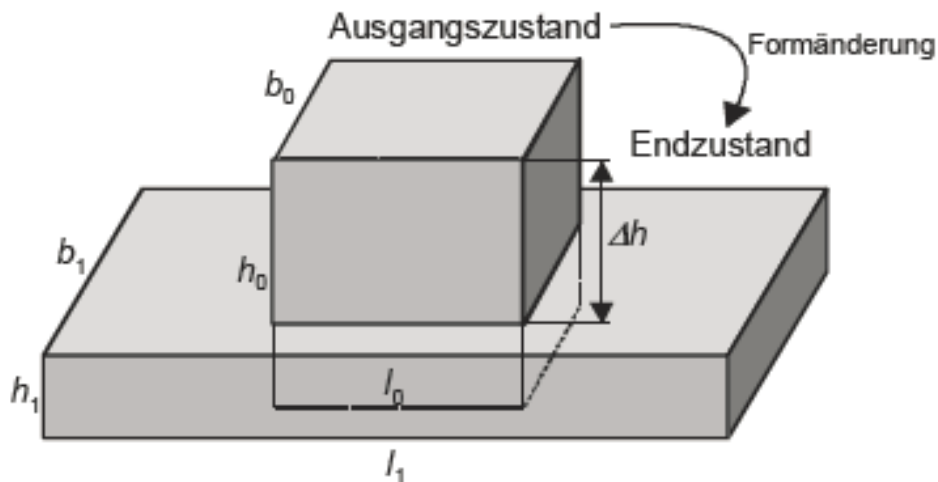


Abbildung 6.14: Abmessungen eines quaderförmigen Körpers im Ausgangszustand (l_0, b_0, h_0) und im Endzustand (l_1, b_1, h_1) nach plastischer Verformung[14]

Laut Gleichung 6.1 kann also über die Dehnung ϵ eine Aussage über die Blechdicke s erfolgen:

- mit Zunahme der Dehnung ϵ erfolgt eine Abnahme der Blechdicke s
- mit Zunahme der Blechdicke s erfolgt eine Abnahme der Dehnung ϵ

6.3.1 Blechdickenverlauf am Napf

Laut Formel 6.1 müsste Layout L1 und L8 die geringste Ausdünnung, Dickenabnahme in den kritischen Bereichen aufweisen. Da laut GOM-Vermessung bei diesen Layouts die geringsten Dehnungen auftreten. Um diese Aussage zu bestätigen wurde an allen Näpfen der Blechdickenverlauf mittels Ultraschall gemessen und in einem Diagramm aufgetragen und verglichen. Abbildung 6.15 zeigt den Blechdickenverlauf entlang der umgeformten Näpfe.

Wie zu erwarten tritt die größte Ausdünnung bei der unbehandelten Platine im Zustand T4 auf. Vor allem in den rissgefährdeten Bereichen. Hier wird eine Blechdickenabnahme von circa 0,14 mm gemessen.

Eine wesentliche Verbesserung ist bei Layout L1 zu erkennen, mit einer maximalen Blechdickenabnahme von circa 0,06 mm in den kritischen Bereichen. Durch entfestigen des Flansches treten geringeren Reaktionskräfte entlang der Platine auf. Im rissgefährdeten Napfbodenradius werden geringere Spannungen hervorgerufen, was eine Minderung der Dehnungen bewirkt. Im Vergleich zu Layout T4 kann eine somit geringere Ausdünnung im gesamten Platinen Bereich festgestellt werden.

Besonders auffällig ist der Verlauf von Layout L8. Durch das Anbringen der sogenannten Opferzone im Zentrum der Platine wird der Materialfluss in diesem Bereich begünstigt. Dies ist durch leichte Abnahme der Blechdicke ersichtlich. Die Abnahme in diesem Bereich wirkt sich positiv, mit Zunahme der Blechdicke in den kritischen Bereichen aus. Hier wird eine maximale Abnahme von circa 0,03 mm erreicht.

Bei Layout L12 ist ersichtlich, dass im T4-Bereich die Ausdünnung im Vergleich zu Layout T4 reduziert wird, jedoch in den riss- und ausdünnungsgefährdeten Zonen stark zunimmt. Dies lässt sich in Abbildung 6.15 an dem horizontalen Verlauf im Bereich zwischen circa 70 mm bis 150 mm erkennen. Die maximale Ausdünnung findet im Bereich der kritischen Zonen, Übergang Flanschbodenradius/Zarge statt. Dieses Ergebnis war bereits aus der GOM-Vermessung laut Abbildung 6.13 zu erwarten, da die FLC teils überschritten bzw. angenähert wird und somit eine maximale Dehnung an diesen Stellen auftritt. Aus Abbildung 6.15 kann eine maximale Abnahme von 0,13 mm gemessen werden.

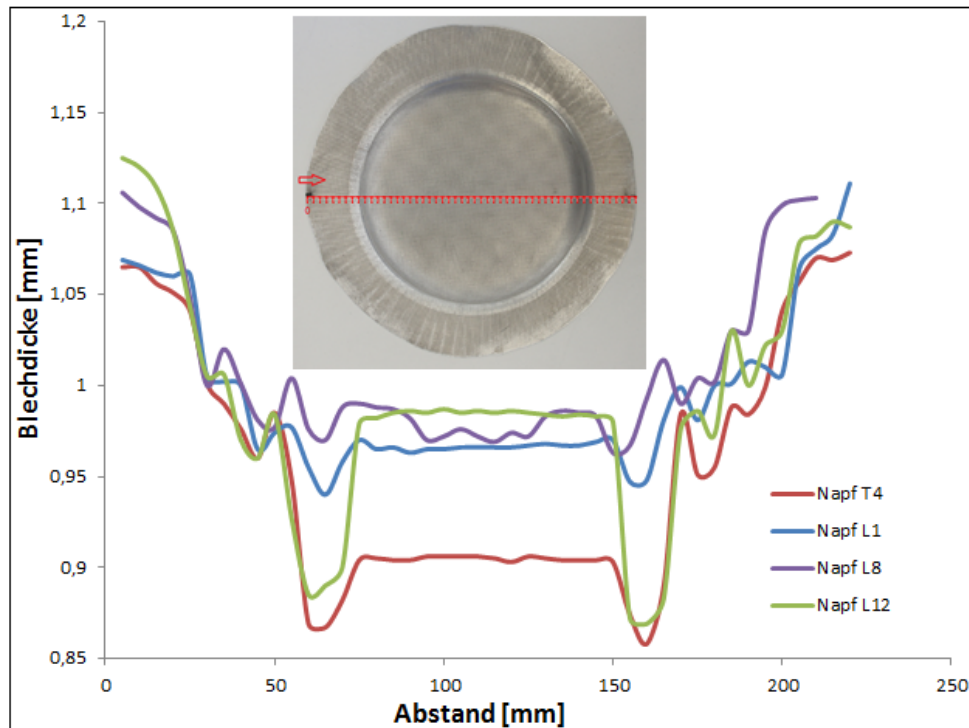


Abbildung 6.15: Blechdickenverlauf am Napf

6.3.2 Blechdickenverlauf am Kreuzziehteil

Beim Kreuzziehteil konnte mittels der GOM-Vermessung und somit dem Grenzformänderungsdiagramm keine wesentliche Aussage über eine Verbesserung des Umformverhaltens der Platine im Zustand T4 zu Layout L1 gemacht werden. Da durch das Umformen das auf geätzte Punktemuster in den kritischen Zonen abgerieben wurde und nicht mehr sichtbar war. Laut Abbildung 6.6 konnte eine Erweiterung der Ziehtiefe um circa 4 mm erzielt werden. Für eine weitere Bewertung wurde der Blechdickenverlauf entlang der kritischen Bereiche gemessen (Abbildung 6.17 und 6.16).

In Abbildung 6.16 lässt sich erkennen, dass durch eine lokale Wärmebehandlung im Flanscbereich eine Steigerung des Umformvermögens erzielt werden kann. Vergleicht man die maximale Ausdünnung des Layouts T4 mit Layout L1, so kann eine Steigerung im inneren Eckbereich zwischen Flansch und Zarge von circa 0,04 mm festgestellt werden.

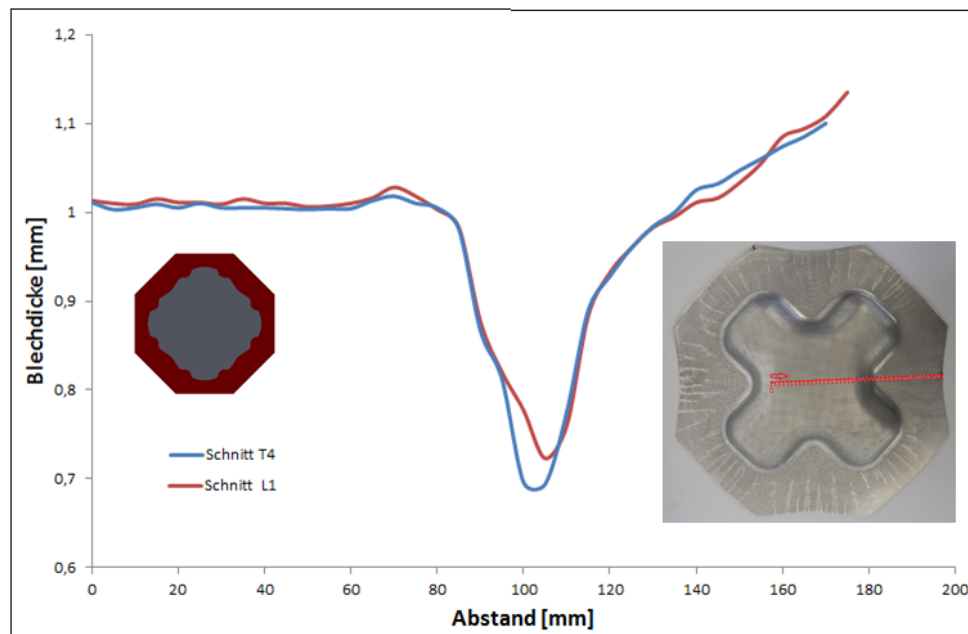


Abbildung 6.16: Blechdickenverlauf Kreuzziehteil: Innerer Eckbereich zwischen Flansch und Zarge

Eine wesentliche geringere Blechdickenabnahme lässt sich am äußeren Eckbereich zwischen Zarge und Ziehteilboden erkennen. Dies konnte bereits aus Abschnitt 5.1.1.2 erkannt werden, da an den äußerer Eckbereichen bei Layout L1 kein Auftreten von Rissen zu erkennen war, was auf die Reduktion der Umformkräfte durch entfestigen des Flanschbereiches zurückzuführen ist. Abbildung 6.17 zeigt den Blechdickenverlauf entlang des äußeren Eckbereiches. Es kann eine maximale Abnahme der Blechdicke von ungefähr 0,14 mm gemessen werden. Im Gegensatz zum Zustand T4 wo die maximale Abnahme der Blechdicke circa 0,17 mm beträgt.

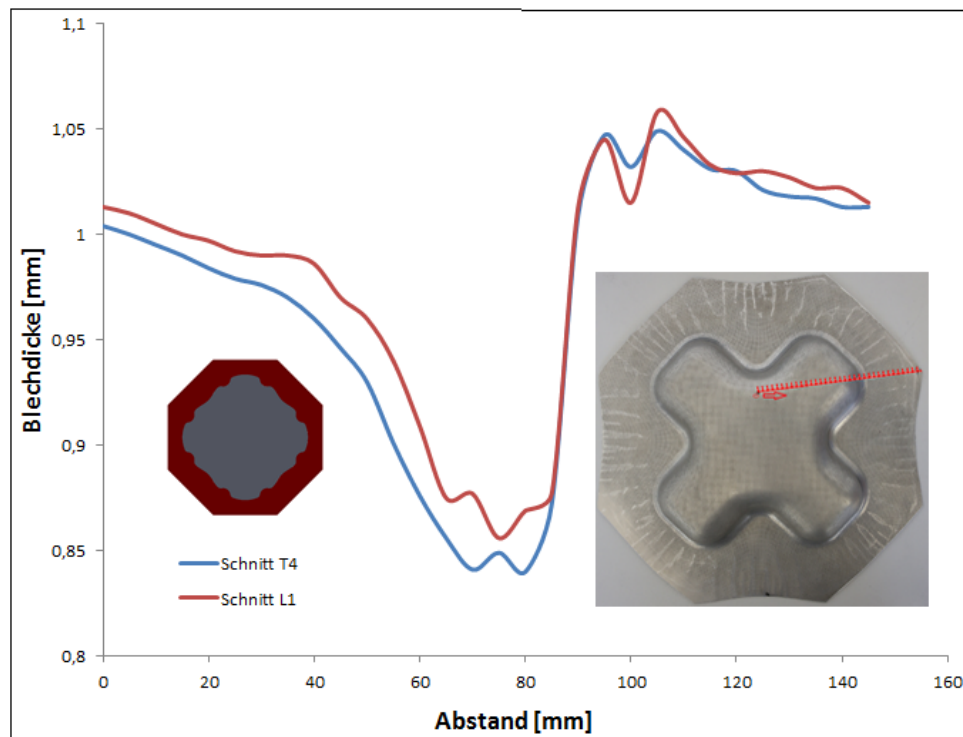


Abbildung 6.17: Blehdickenverlauf Kreuzziehteil: Äußerer Eckbereich zwischen Zarge und Ziehteilboden

6.3.3 Einfluss der Lagerzeit zwischen Wärmebehandlung und Umformprozess auf den Blehdickenverlauf am Napfziehteil

Für die Untersuchung der natürlichen Rückbildung der Ausscheidungen wurde das Layout L1 des Napfes herangezogen und in den Zeitabständen von 0 h, 76 h, 124 h und 594 h auf eine Ziehtiefe von 55 mm umgeformt und vermessen. Für jeden Zeitabschnitt wurden jeweils drei Platinen angefertigt, vermessen und der gemittelte Wert im Diagramm laut Abbildung 6.18 eingetragen.

Abbildung 6.18 zeigt den Blehdickenverlauf an den ausgelagerten Platinen. Es ist ersichtlich, dass eine Rückbildung und somit eine Festigkeitssteigerung stattgefunden hat. Die Zunahme der Festigkeit im Material bewirkt eine Steigerung der Fließspannung, wodurch ein Nachfließen des Materials vom Flanschbereich erschwert wird. Um die Ziehtiefe von 55 mm zu erreichen muss eine stärkere Ausdünnung entlang des gesamten Napfes erfolgen, was zugleich eine Zunahme der

Dehnung ϵ mit sich bringt. In Abbildung 6.18 ist dies ersichtlich.

Ab den Zeitpunkt von 124 h kann keine weitere Abnahme der Blechdicke erkannt werden, was so viel bedeutet, dass die Diffusionsvorgänge welche für die Rückbildung der MgSi-Cluster verantwortlich sind, abgeschlossen sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass die natürliche Rückbildung ab einem Zeitpunkt von circa 160 h abgeschlossen ist, da bei 594 h derselbe Verlauf der Blechdicke wie bei 124 h zu erkennen ist. Dieses Ergebnis konnte sowohl in der Arbeit [36] festgestellt werden.

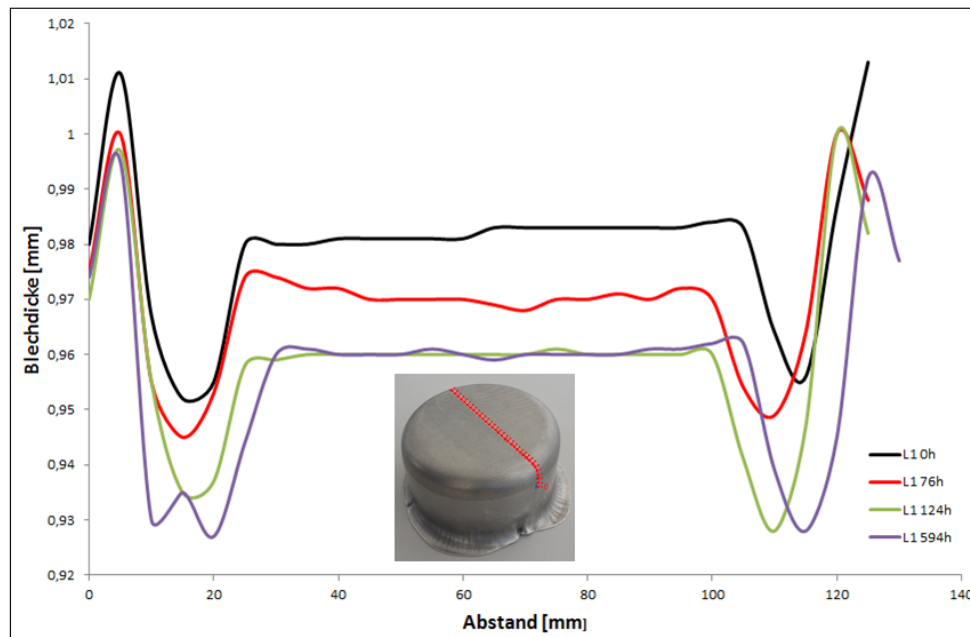


Abbildung 6.18: Blechdickenverlauf am ausgelagerten Napf

6.4 Kundenspezifisches Bauteil

Das in Abschnitt 4.3.3 vorgestellte kundenspezifisches Bauteil stellt eine Seitenaufprallgeometrie mit B-Säulen Verstärkung dar, und lässt sich mit einer konventionellen Blechplatine aus AA6016 im Zustand T4 nicht riss frei umformen. Abbildung 6.19 zeigt die Bereiche in denen beim Umformen im Zustand T4 Risse entstanden sind, und somit ein fehlerhaftes Bauteil produziert wurde.

Mit den Ergebnissen aus dem Napfziehteil sowie aus dem Kreuzziehteil wurde versucht, die Entfestigungszonen am kundenspezifischen Bauteil zu ermitteln um ein fehlerfreies Bauteil zu erstellen.

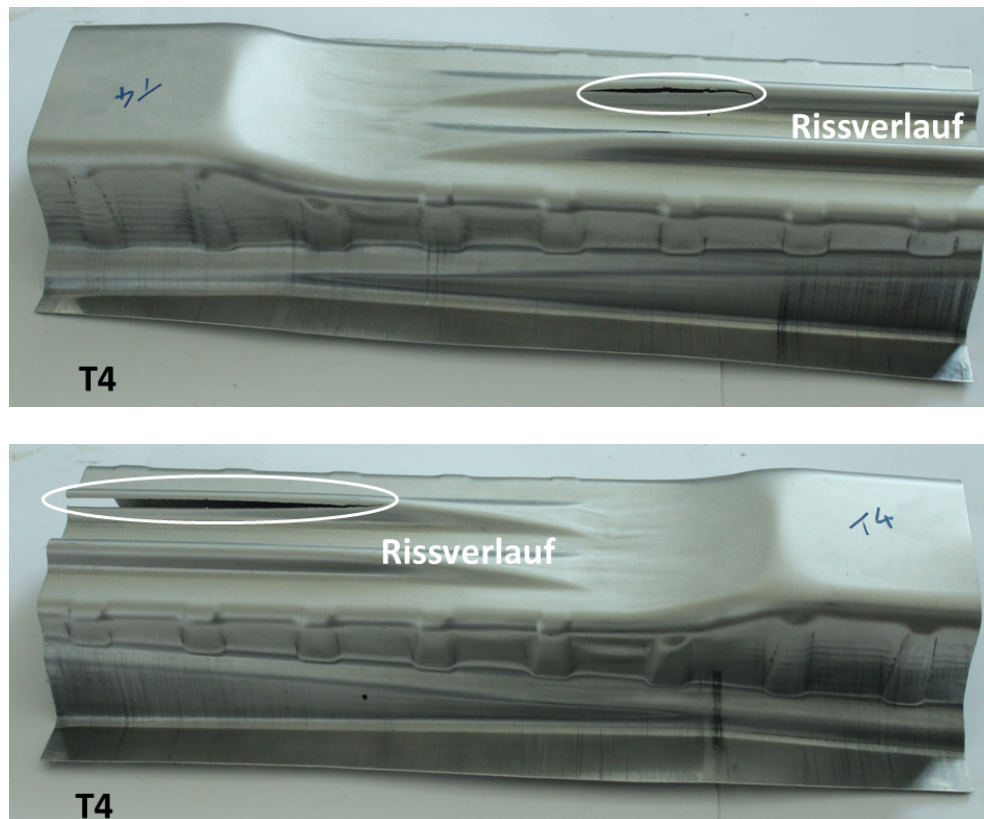


Abbildung 6.19: kundenspezifisches Bauteil im Zustand T4 mit Rissverlauf

6.4.1 Anbringen von Opferzonen am kundenspezifisches Bauteil

In Abbildung 6.19 ist ersichtlich, dass das Materialversagen durch Risse im Bereich der Krafteinleitung stattfindet. Durch das Anbringen entfestigter Bereiche in der Nähe der riss- und ausdünnungsgefährdeten Zonen wurde versucht ein fehlerfreies Bauteil zu erzeugen. Das Anbringen sogenannter Opferzonen sollte den Materialfluss entlang der wirkenden Lastpfade erleichtern und somit in den kritischen Blechzonen eine geringere Ausdünnungen sowie eine Reduktion der Spannungen mit sich bringen.

Abbildung 6.20 stellt den Verlauf des Risses durch das Anbringen der Opferzonen am Bauteilboden, sowie in der Nähe der Sicken mit 10 mm Breite und einer Länge von 170 mm dar. Die Risse an den Sicken konnten teils eliminiert werden, was darauf zurückzuführen ist, dass ein begünstigter Materialfluss entlang der wirkenden Lastpfade stattgefunden hat und somit in den kritischen Blechzonen eine geringere Ausdünnung stattfand.

In Abbildung 6.20 lässt sich erkennen, dass der Riss seine Position geändert hat. Das Materialversagen tritt am Rande der entfestigten Zonen so wie am Sickenradius, am unteren Ende des Bauteils auf. Der Verlauf des Risses am Rande der wärmebehandelten Zone, kann auf die Reduktion der maximal ertragbaren Dehnungen zurückgeführt werden, da in diesem Bereich das Material durch die geringere Festigkeit (Abbildung 2.17) mehr ausgedünnt wird.

Der Riss am Sickenradius tritt auf, da in diesem Bereich oder Umgebung keine Entfestigung stattgefunden hat und somit kein nachfließen des Materials gewährleistet wird.

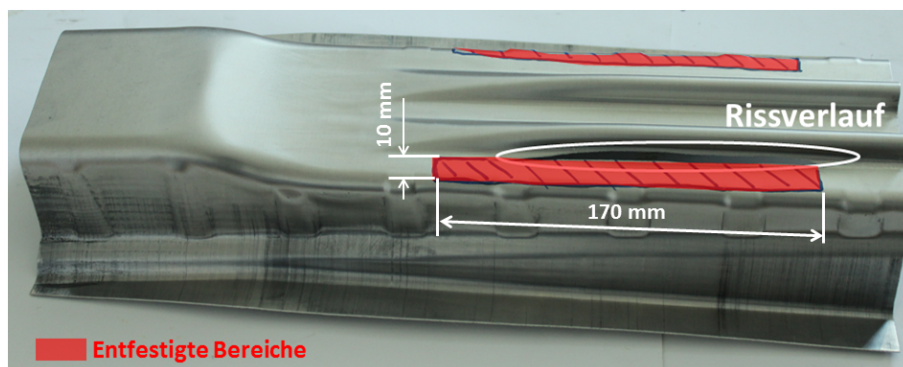


Abbildung 6.20: a) kundenspezifisches Bauteil mit angebrachten Opferzonen

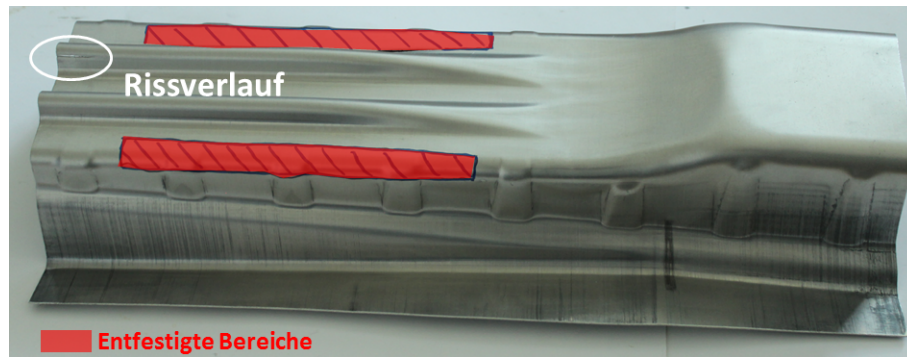


Abbildung 6.20: b) kundenspezifisches Bauteil mit angebrachten Opferzonen

Ausgehend vom Rissverlauf aus Abbildung 6.20 wurde der entfestigte Bereich von 10 auf 20 mm erweitert und in Richtung Zarge verschoben. Dadurch konnte keine wesentliche Verbesserung des Bauteils im Gegensatz zum Zustand T4 festgestellt werden, was darauf hinweist, dass beim Umformprozess in den Kraftereinleitungszonen zu hohe Umformkräfte vorhanden sind. Abbildung 6.21 zeigt den Verlauf der Risse durch verschieben und erweitern der wärmebehandelten Zonen.

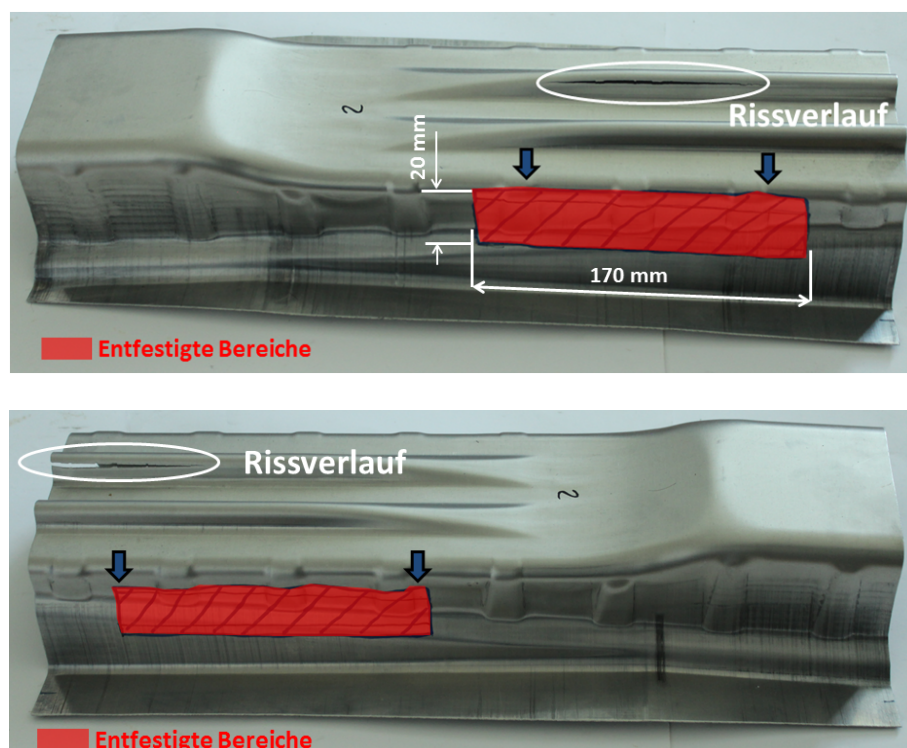


Abbildung 6.21: kundenspezifisches Bauteil mit erweiterten Opferzonen

6.4.2 Entfestigen der Zarge/Flansches am kundenspezifisches Bauteil

Eine weitere Vorgehensweise um das Umformverhalten zu beeinflussen ist eine Reduktion der Umformkräfte. Dies kann durch entfestigen des Blechteils in den Umformzonen erreicht werden, welche beim kundenspezifischen Bauteil im Bereich der Zarge/Flansch liegen. Ausgehend von diesem Wirkmechanismus wurde versucht durch eine lokale Wärmebehandlung im Zargenbereich des Bauteils das Umformverhalten zu beeinflussen. In Abbildung 6.22 werden die entfestigten Bereiche im Flanschbereich dargestellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Reduktion der Umformkräfte stattgefunden hat, da am Bauteilboden bzw. an den Sicken keine Risse auftreten.

In Abbildung 6.22 ist ersichtlich, dass das Auftreten des Risses, durch die lokale Wärmebehandlung in der Biegezone der Stempelkantenrundung stattfindet, welche typische Problemzonen beim Tiefziehen sind. Dies wurde bereits am Napfzieheteil so wie am Kreuzzieheteil ersichtlich. Durch das Entfestigen wird ein absinken der FLC (Abbildung:2.18) hervorgerufen. Dies hat zur Folge, dass am Stempelbodenradius die maximal ertragbaren Dehnungen überschritten werden und durch die niedrigere Festigkeit es zu höheren Ausdünnungen bis zum Materialversagen kommt.

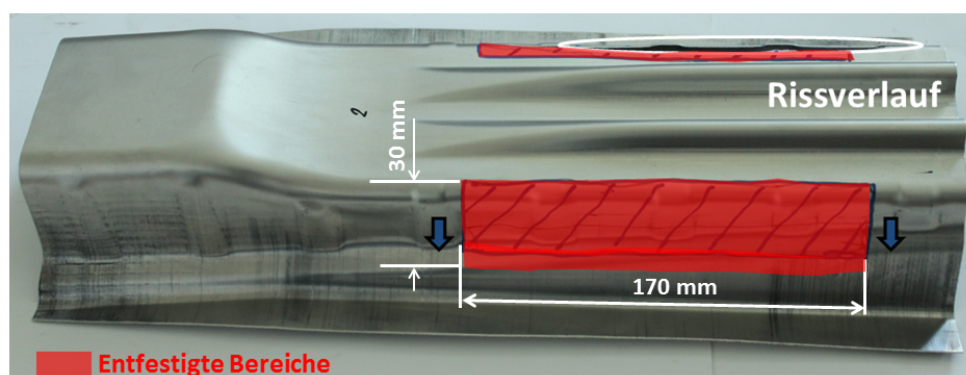


Abbildung 6.22: a) kundenspezifisches Bauteil: Entfestigung Übergang Stempelkantenrundung, Zarge

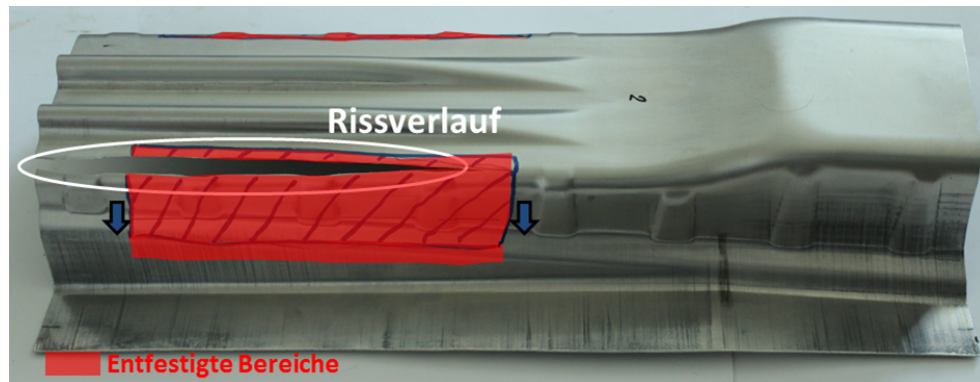


Abbildung 6.22: b) kundenspezifisches Bauteil: Entfestigung Übergang Stempelkantenrundung, Zarge

6.4.3 Fehlerfreies kundenspezifisches Bauteil

Um den Riss am Stempelbodenradius zu vermeiden wurden die entfestigten Bereiche bis in die Zarge verschoben. Des Weiteren wurden die Bereiche der lokalen Wärmebehandlung von 170 mm auf 260 mm erweitern, um die gesamte Sickenlänge abzudecken. Mit einer Erweiterung der entfestigten Zonen von 30 mm Breite auf 85 mm konnte sowohl eine Entfestigung im Flanschbereich erzielt werden.

Durch das Anbringen des oben beschriebenen Entfestigungslayout an der Ausgangsplatine konnte ein fehlerfreies Bauteil erstellt werden, welches in Abbildung 6.23 dargestellt wird. Mit diesem Layout konnten jene Bereiche entfestigt werden in denen der Umformprozess stattfindet, was eine Reduktion der Umformkräfte zur Folge hat. Durch das Herabsetzen der Festigkeit in diesen Bereichen werden geringere Kräfte benötigt um das Material zum Fließen zu bringen, was gleichzeitig zu geringeren Spannungen im gesamten Bauteil führt und somit in den kritischen Zonen eine geringere Dehnungen mit sich bringt. Durch das Verringern der Dehnungen in den kritischen Bereichen dünnt das Material weniger aus und es kommt nicht zum Versagen des Bauteils.

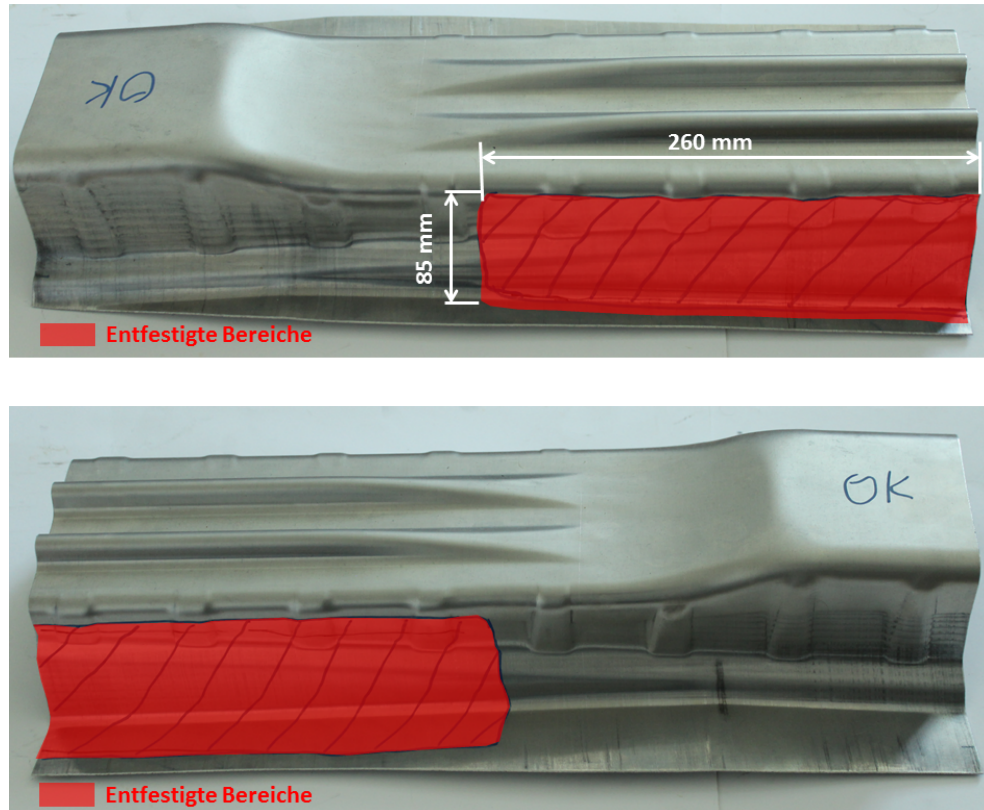


Abbildung 6.23: fehlerfreies kundenspezifisches Bauteil

6.4.4 Thermographische Ansicht kundenspezifisches Bauteil

Abbildung 6.24 zeigt das thermographische Bild der entfestigten Zonen, welches am fehlerfreien kundenspezifischen Bauteil aufgenommen wurde. Durch das Abringen von fünf parallel verlaufenden Bahnen, mit einer Länge von ungefähr 260 mm und einen Abstand von 15 mm konnten die entfestigten Bereiche so angebracht werden damit ein fehlerfreies Bauteil entsteht. Mit den Abstand von 15 mm zwischen den einzelnen Bahnen wurde ein überlappen der Laserbahnen erreicht und somit eine gleichmäßige Entfestigung entlang der gesamten Fläche erzielt. Der Abstand zwischen den beiden erwärmten Flächen betrug bei der Ausgangsplatine 150 mm. Damit konnten die entfestigten Bereiche im Flansch- und Zargenbereich platziert werden.

Des Weiteren ist eine inhomogene Temperaturverteilung im Bereich der entfestigten Zonen zu erkennen, was wiederum auf die unterschiedliche Schichtdicke des Lasercoats zurückzuführen ist.

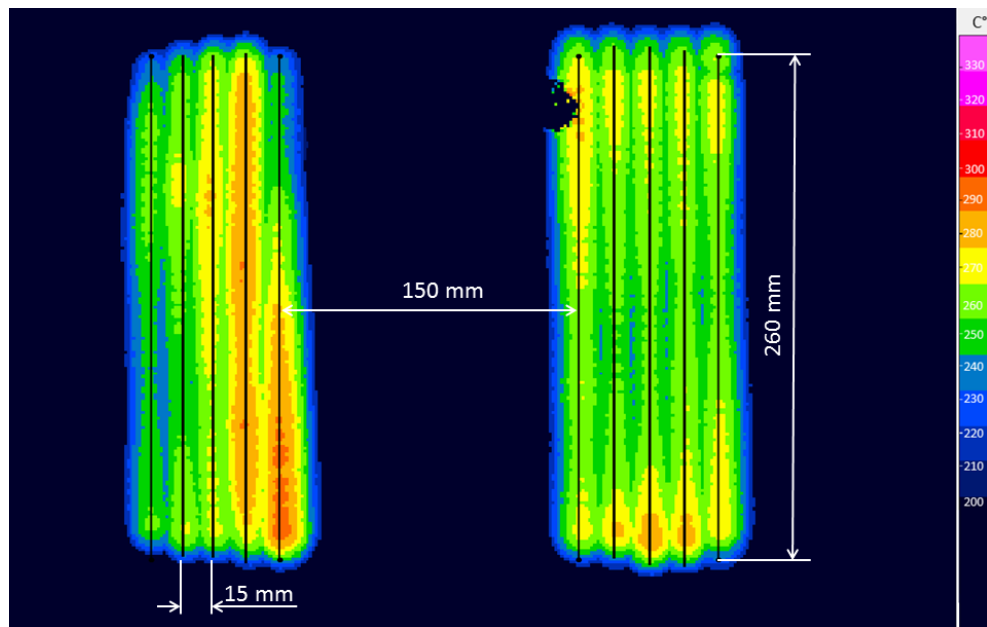


Abbildung 6.24: Thermographisches Bild am kundenspezifischen Bauteil

6.4.4.1 Temperatur - Zeitverlauf am kundenspezifische Bauteil

Abbildung 6.25 stellt die Temperaturverteilung über die Zeit am kundenspezifischen Bauteil dar. Die weiße Linie repräsentiert die erste Bahn des Lasers. Zum Aufheizen auf die Temperatur von 250°C und Abfahren der 260 mm werden ungefähr 30 Sekunden benötigt.

In Abbildung 6.25 ist ersichtlich, dass eine Entfestigung im gesamten erwärmten Bereich stattgefunden hat. Die untere Grenztemperatur von 200°C wurde nach circa 3 Sekunden erreicht. Eine maximale Entfestigung hat nicht stattgefunden, da die obere Grenztemperatur von 400°C nicht erreicht wurde.

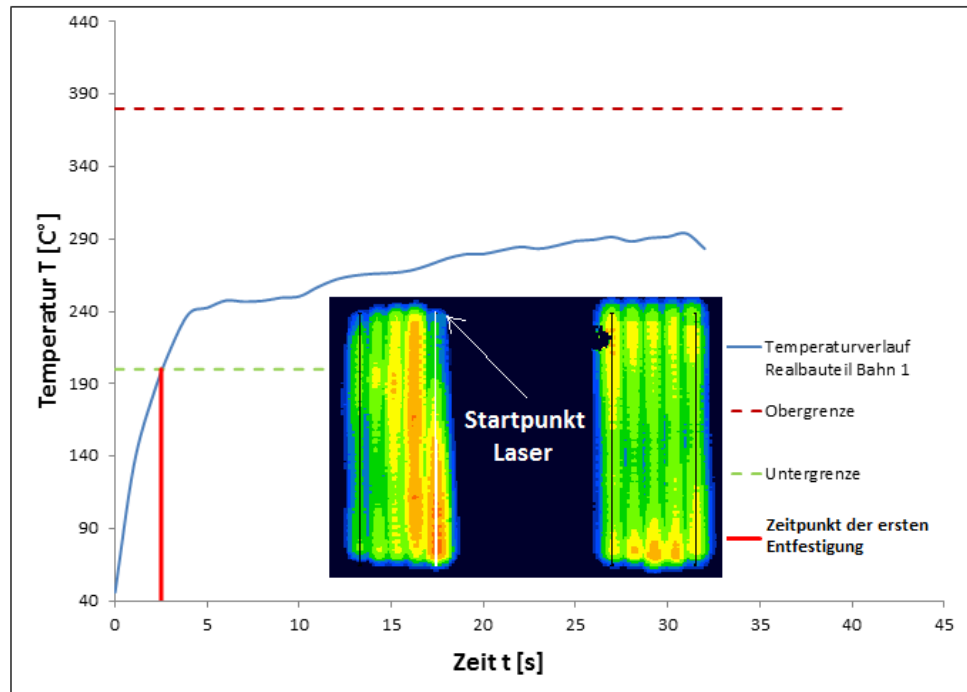


Abbildung 6.25: Temperatur - Zeitverlauf am kundenspezifische Bauteil

7 Zusammenfassung und Ausblick

Eine wesentliche Strategie, um eine Reduktion des CO_2 -Ausstoßes im Transportwesen zu erzielen ist konsequenter Leichtbau. Ein Ansatz dafür ist der Einsatz von Tailored Heat Treated Blanks (THTB), um Aluminiumbleche in Strukturbauteilen mit hoher gewichtsspezifischer Steifig- und Festigkeit einsetzen zu können.

Durch eine lokale Wärmebehandlung werden dabei die mechanischen Eigenschaften der Aluminiumplatte vor dem Umformprozess in auserwählten Bereichen geändert. Dabei werden zwei wesentliche Wirkmechanismen verfolgt: der werkstoffflussorientierte sowie der kraftorientierte. Dabei werden beim kraftorientierten Wirkmechanismus die Umformzonen entfestigt was eine Reduzierung der Fließspannung zur Folge hat und somit ein Herabsetzen der Umformkräfte mit sich bringt. Im Gegensatz zum werkstoffflussorientierten Wirkmechanismus, bei dem die lokal wärmebehandelten Bereiche als Opferzonen dienen und somit eine Ausdünnen in den rissgefährdeten Bereichen verhindert werden kann.

Ausgehend von diesen beiden Wirkmechanismen wurden vorerst für das Napfziehteil und Kreuzziehteil, durch eine FEM-Simulation die Bereiche lokalisiert, an denen eine Wärmebehandlung angewandt werden kann, um eine Steigerung des Umformvermögens zu erreichen. Die unterschiedlichen Entfestigungslayouts für das Napf- und Kreuzziehteil wurden mittels Lasererwärmung in die Praxis umgesetzt und tiefgezogen. Anschließend erfolgte eine Evaluierung der verschiedenen Layouts mit Hilfe des Grenzformänderungsschaubildes und einer Ultraschallmessung der Blechdicke, um so den Einfluss der Entfestigung zu charakterisieren. Durch Auslagern der wärmebehandelten Platinen bei Raumtemperatur wurde das Rückbildungsverhalten der Entfestigung über einen bestimmten Zeitraum untersucht. Abschließend konnten die Ergebnisse aus den beiden Untersuchungen zur Ermittlung der Entfestigungszonen an einem kundenspezifischen Bauteil verwendet werden.

Aus den Untersuchungen ging hervor, dass durch eine laserinduzierte Wärmebehandlung das Teifziehverhalten der Aluminiumlegierung AA6016 im Zustand T4 verbessert werden kann. Dabei ist es wichtig zu beachten an welchen Bereichen eine Entfestigung durchgeführt wird. So darf zum Beispiel keine Entfestigung in den risikritischen Bereichen durchgeführt werden. Des Weiteren konnte der Einfluss der Lagerzeit zwischen Wärmebehandlung und Umformprozess bei Raumtemperatur untersucht werden, was zu folgendem Ergebnis führte: Nach circa 124 h sind die Diffusionsvorgänge, welche für die Rückbildung der MgSi-Cluster verantwortlich sind abgeschlossen. Da bis zu einer Auslagerungszeit von 594 h keine weitere Abnahme der Blechdicke festgestellt werden konnte. Am kundenspezifischen Bauteil konnte nachgewiesen werden, dass durch den Einsatz von Tailored Heat Treated Blank (THTB) an komplexen Bauteilgeometrien eine Erweiterung der Formgebungsgrenzen erzielt werden kann.

Die Ergebnisse aus dieser Arbeit zeigen, dass der Einsatz von Tailored Heat Treated Blank (THTB) an komplexen Bauteilen grundsätzlich möglich ist. Um das Verfahren für industrielle Anwendungen attraktiv zu machen, müsste jedoch ein Festkörperlaser zum Einsatz kommen, da das Aufbringen des Lasercoats, der für die notwendige Energieeinbringung sorgt, weitere Arbeitsschritte wie reinigen der Platinen und Kontrolle der Aufheiztemperatur mit sich bringt. Um weitere Arbeitsschritte in der Serienfertigung einzusparen, wäre der Einsatz von hitzebeständigen Trockenschmierstoffen von großem Vorteil. Beim seriellen Einsatz unter industriellen Bedingungen spielt die Zykluszeit eine wesentliche wirtschaftliche Rolle, daher müsste auf eine flächendeckende Wärmebehandlungsmethode gewechselt werden. Dafür würde sich der Einsatz von Heizplatten bestens eignen.

Des Weiteren müssten Untersuchungen gemacht werden, welche Festigkeit nach der Rückbildung des Materials nach circa 130 h vorliegt um den Einsatz von THTB bei sicherheitsrelevante Bauteilen, welche eine hohe Festigkeit aufweisen müssen, zu gewährleisten. Ausgehend von diesem Zustand müssten noch Langzeituntersuchung für die Rückbildung durchgeführt werden, sowie welcher Zustand durch das Lackeinbrennen und Warmauslagern erreicht werden kann.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Audi Space Frame (ASF), Gesamtgewicht 200 kg[7]	2
2.1	Ausscheidungsmechanismus bei der Wärmebehandlung von AlMgSi-Legierungen der 6xxx-Gruppe[13]	7
2.2	Gliederung der 6 Hauptgruppen der Fertigungsverfahren (nach DIN 8582)[14]	8
2.3	Aufbau eines Tiefziehwerkzeuges[2]	8
2.4	Prozessablauf beim Tiefziehen[11]	9
2.5	Beanspruchungen beim Tiefziehen[14]	10
2.6	Werkstückzonen und Kraftfluss beim Tiefziehen im Erstzug[15] . . .	10
2.7	Versagensfälle beim Tiefziehen[16]	12
2.8	Bestimmung der senkrechten Anisotropie aus dem Flachzugversuch[15]	13
2.9	Bestimmung der ebenen Anisotropie aus dem Flachzugversuch[15]	14
2.10	Schematische Darstellung von k_f in Abhängigkeit der Temperatur (a), des Umformgrads (b) und der Umformgeschwindigkeit (c)[14]	15
2.11	Schematische Darstellung einer Grenzformänderungskurve[14]	16
2.12	Reibungsmechanismen beim Ziehprozeß[4]	17
2.13	mill-finish und eine elektroerodierte Oberfläche unterm Elektronenmikroskop einer AlMg _{4,5} Mn _{0,4} -Legierung[4]	18
2.14	Vergleich der Ziehtiefe eines Trockenschmierstoffes auf Wasserbasis mit dem unlegierten Mineralöl M100[20]	20
2.15	Tailored Products an einem ebenen Blechhalbzeug	21
2.16	Prozesskette zur Herstellung einer Fahrzeugkarosserie inklusive einer lokalen Wärmebehandlung von Blechhalbzeugen[5][21]	23
2.17	Verlauf der Zugfestigkeit R_m in Abhängigkeit der Maximaltemperatur bei einer kurzzeitigen Wärmebehandlung[22]	24
2.18	Formänderungskurve der Legierung AA6016-T4 bei RT, 250°C und 350°C[24]	25

2.19	Temperatur-Zeit-Profil einer typischen lokalen, kurzzeitigen Wärmebehandlung (schematisch)[5]	25
2.20	Reibzahl μ des wärmebehandelten Schmierstoffes in Abhängigkeit der auf den Schmierstoff Drylube E1 einwirkenden Maximaltemperatur T_{max} [5]	26
2.21	Wirkprinzipien und -mechanismen lokal entfestigter Bereiche eines THTB[5]	28
2.22	Wechselspiel von Molekülen und Atomen beim Laserprozess im CO ₂ -Laser[27]	31
2.23	Abhängigkeit der Absorption von Material und Wellenlänge[30]	34
4.1	Verwendete Laseranlage der Firma Trumpf, Modell Truma Form DMD 505	37
4.2	Eingebautes Werkzeug in der hydraulischer Presse der Firma Schuler	38
4.3	Riss- und ausdünnungsgefährdete Zonen beim Napfziehteil	39
4.4	Riss- und ausdünnungsgefährdete Zonen beim Kreuzziehteil	39
4.5	Riss- und ausdünnungsgefährdete Zonen beim kundenspezifischen Bauteil	40
4.6	Versuchsaufbau Lasermaschine: 1...Laserkopf, 2...Platine AA6016-T4, 3...Schutzkasten, 4...Wärmebildkamera, 5...Mess- und Auswertrechner	41
4.7	Platine mit Lasercoat und aufgeätzten Muster	42
4.8	Darstellung der programmierten Bahnen	43
4.9	Versuchsaufbau Presse mit Weg- und Akustiksensoren	44
4.10	Beispieldiagramm: Risserkennung und Ziehtiefenermittlung	44
5.1	FE-Modell-Platine und Werkzeug	47
5.2	Formänderungskurven für die Simulation	48
5.3	Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout T4	50
5.4	Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout L1	51
5.5	Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout L7	51
5.6	Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout L11	52
5.7	Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout L12	53
5.8	Grenzformänderungsdiagramm und umgeformter Napf: Layout L8	53
5.9	Grenzformänderungsdiagramm und umgeformtes Kreuzziehteil: Layout T4	55

5.10	Grenzformänderungsdiagramm und umgeformtes Kreuzziehteil: Layout L1	56
5.11	Grenzformänderungsdiagramm und umgeformtes Kreuzziehteil: Layout L8	57
5.12	Grenzformänderungsdiagramm und umgeformtes Kreuzziehteil: Layout L7	57
5.13	Grenzformänderungsdiagramm und umgeformtes Kreuzziehteil: Layout L11	58
6.1	Thermographische Bilder der Napflayouts	60
6.2	Temperatur- Zeitverlauf Bahn 1	61
6.3	Thermographisches Bild KWKZ	62
6.4	Temperaturverlauf KWKZ Bahn 1 aus Abbildung 6.3	63
6.5	Ziehtiefenvergleich Napf	64
6.6	Ziehtiefenvergleich Kreuzziehteil	64
6.7	tiefgezogener Napf	65
6.8	GOM Messaufbau	66
6.9	GOM Vermessung	66
6.10	GOM Vermessung T4	67
6.11	GOM Vermessung L1	68
6.12	GOM Vermessung L8	69
6.13	GOM Vermessung L12	70
6.14	Abmessungen eines quaderförmigen Körpers im Ausgangszustand (l_0, b_0, h_0) und im Endzustand (l_1, b_1, h_1) nach plastischer Verformung[14]	71
6.15	Blehdickenverlauf am Napf	73
6.16	Blehdickenverlauf Kreuzziehteil: Innerer Eckbereich zwischen Flansch und Zarge	74
6.17	Blehdickenverlauf Kreuzziehteil: Äußerer Eckbereich zwischen Zarge und Ziehteilboden	75
6.18	Blehdickenverlauf am ausgelagerten Napf	76
6.19	kundenspezifisches Bauteil im Zustand T4 mit Rissverlauf	77
6.20	b) kundenspezifisches Bauteil mit angebrachten Opferzonen	79
6.21	kundenspezifisches Bauteil mit erweiterten Opferzonen	79
6.22	b) kundenspezifisches Bauteil: Entfestigung Übergang Stempelkan- tenrundung, Zarge	81
6.23	fehlerfreies kundenspezifisches Bauteil	82

6.24 Thermographisches Bild am kundenspezifischen Bauteil	83
6.25 Temperatur - Zeitverlauf am kundenspezifische Bauteil	84

Tabellenverzeichnis

2.1	Aluminiumlegierungstypen mit deren Eigenschaften und Anwendungsgebiete [9]	4
2.2	Übersicht der relevanten Werkstoffzustände nach DIN EN 515[10]	4
2.3	Die am häufigsten eingesetzten Aluminiumlegierungen der 6000 Serie und deren Einsatzfelder im Fahrzeugbau[12]	5
2.4	Prozessgrößen beim Tiefziehen	9
2.5	Versagensarten beim Tiefziehen[14]	11
2.6	Übersicht der Wärmebehandlungsmethoden und ihrer technologischen und wirtschaftlichen Merkmale[5]	30
2.7	Typische Oberflächenstrukturen und deren Einfluss auf Reflexion und Absorption[26]	34
4.1	Eingesetzte Aluminiumlegierung mit den mechanischen Eigenschaften und Hauptlegierungselemente	36
5.1	Hocket-Sherby hardening Parameter des verwendeten Materials AA6000	48
5.2	Simulierte Layouts mit den wärmebehandelten (rot) und unbehandelten (grau) Zonen für das Napfziehteil	49
5.3	Simulierte Layouts mit den wärmebehandelten (rot) und unbehandelten (grau) Zonen für das Kreuzziehteil	54

Symbolverzeichnis

Symbol	SI-Einheit	Beschreibung
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
k_f	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Fließspannung
σ	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Spannung
A	mm^2	Fläche
F	N	Kraft
α		Absorptionsgrad
P_{abs}	W	absolute Leistung
P	W	eingekoppelte Leistung
λ	μ	Wellenlänge
D_0	mm	ausgangsdurchmesser Platine
D	mm	aktueller Platinendurchmesser
d_{St}	mm	Stempeldurchmesser
r_{St}	mm	Stempelradius
F_{St}	N	Stempelkraft
F_{NH}	N	Niederhalterkraft
u_z	mm	Ziehspalt
h_z	mm	Ziehtiefe
s_0	mm	Platinendicke
r_M	mm	Ziehkantenradius
D_M	mm	Matrizendurchmesser
β_{0zul}		max. zulaässiges Ziehverhältnis
σ_r	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Radialspannungen
σ_t	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Tangentialspannungen
σ_n	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Normalspannungen

Symbol	SI-Einheit	Beschreibung
r		senkrechte Anisotropie
Δ_r		ebene Anisotropie
r_m		mittlere senkrechte Anisotropie
φ_b		logarithmische Blechbreitenformänderung
φ_s		logarithmische Blechdickenformänderung
φ		Umformgrad
$\dot{\varphi}$	s^{-1}	Umformgeschwindigkeit
φ_1		Hauptformänderung
φ_2		Nebenformänderung
ϵ		Dehnung

Literaturverzeichnis

- [1] Hans-Hermann Braess, Ulrich Seiffert, and Braess-Seiffert, editors. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg, Wiesbaden, 5., überarb. und erw. Aufl. edition, 2007.
- [2] Horst E. Friedrich, editor. *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. ATZ / MTZ-Fachbuch. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., 2013.
- [3] Bartos Ralph. *Automobiler Leichtbau mit Stahl*: <http://www.stahl-online.de/index.php/medieninformation/automobiler-leichtbau-mit-stahl-2/>. Düsseldorf, [Online; Stand 08.03.2010].
- [4] Friedrich Ostermann. *Anwendungstechnologie Aluminium*. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage edition, 2007.
- [5] Uwe Vogt. *Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks: Univ., Diss.–Erlangen-Nürnberg, 2009*, volume 208 of *Fertigungstechnik - Erlangen*. Meisenbach, Bamberg, 2009.
- [6] Michael Kerausch. *Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten: Univ., Diss.–Erlangen-Nürnberg, 2007*, volume 187 of *Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie*. Meisenbach, Bamberg, 2007.
- [7] <http://www.audi-technology-portal.de/de/karosserie/aluminiumkarosserien/neuer-audi-space-frame-mit-hohen-anteilen-an-aluminium-und-cfk>. [Online: Stand 03.2015].
- [8] Catrin Kammer. *Aluminium-Taschenbuch*. Aluminium-Verl., Düsseldorf, 16. Aufl. 2002, überarb. Aufl. edition, 2009.

- [9] Benedikt Klobes. *Strukturelle Umordnungen in Aluminiumlegierungen: ein komplementärer Ansatz aus der Perspektive von Leerstellen und Fremdatomen: Univ., Diss.–Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2010.* Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät.
- [10] DIN. e.V. *Aluminium 2: Stangen, Rohre, Profile, Drähte, Vormaterial*, volume v.450 of *DIN-Taschenbuch*. Beuth, Berlin, 2nd ed. edition, 2009.
- [11] Arndt Birkert, Stefan Haage, and Markus Straub. *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile: Auslegung von Ziehanlagen*. SpringerLink. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [12] Furrer Peter. Car body design with aluminium sheets. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, May 2008, Volume 8, Issue 5, pp 46-51.
- [13] Achim Robert Hofmann. *Erweiterung von Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen: Univ., Diss.–Erlangen-Nürnberg, 2002*, volume 128 of *Fertigungstechnik - Erlangen*. Meisenbach, Bamberg, 2002.
- [14] Eckart Doege and Bernd-Arno Behrens. *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. VDI-Buch. Springer-Verlag, s.l., 2. aufl. edition, 2010.
- [15] Klaus Siegert, editor. *Blechumformung: Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, 2015.
- [16] Eckard Macherauch and Hans-Werner Zoch, editors. *Praktikum in Werkstoffkunde*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2011.
- [17] Heinrich Dubbel, Karl-Heinrich Grote, and Jörg Feldhusen, editors. *Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 23., neu bearb. und erw. aufl. edition, 2011.
- [18] Heinz Tschätsch. *Praxis der Umformtechnik: Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge*. Vieweg Praxiswissen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, s.l., 8., aktualisierte und erweiterte auflage edition, 2005.
- [19] Dierk Raabe. *Einfluß der Rauheit metallischer Oberflächen auf Reibung und Rückfederung: Max-Planck Institut für Eisenforschung, Düsseldorf 2004*.

- [20] <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/ger/default.asp?>
- [21] Alexander Kahrmanidis, Michael Lechner, Julia Degner, Daniel Wortberg, and Marion Merklein. *Process Design of Aluminum Tailor Heat Treated Blanks*, volume 8. 2015.
- [22] U. Vogt and M. Merklein. *Design principles of tailored heat treated blanks for the manufacturing of complex car body parts: Friedrich-Alexander University of Erlangen-Nuremberg*. 2008.
- [23] S. Reichstein, H. Zhang, and H. W. Bergmann. *Heißrißbildung und Entfestigung in der Wärmeeinflußzone beim Laserstrahlschweißen von AA6016-Legierungen*, volume 32. Wiley Online Library, 2001.
- [24] Banabic D. *Research on the shock heat treatment method used for modifying the formability of aluminium alloys: MTeM 211Cluj- Napoca*. 2011.
- [25] Manfred Geiger, Marion Merklein, and Uwe Vogt. *Aluminum tailored heat treated blanks*, volume 3. 2009.
- [26] Jens Bliedtner, Hartmut Müller, and Andrea Barz. *Lasermaterialbearbeitung: Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele*. Hanser, München, 2013.
- [27] Copyright TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG. *Werkzeug Laser*.
- [28] Copyright TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG. *Technische Information Laserbearbeitung CO2-Laser, 2007-02*.
- [29] Reinhart Poprawe. *Lasertechnik für die Fertigung: Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur ; mit 26 Tabellen*. VDI-Buch. Springer, Berlin, 2005.
- [30] Eckhard Beyer and Konrad Wissenbach. *Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung*. Laser in Technik und Forschung. Springer, Berlin and Heidelberg, 1998.
- [31] Michael Preininger. *Untersuchung und Bewertung der Kaltumformbarkeit des Hoch-Mangan-Stahls X40MnCrAl19-2: Graz University of Technology*. Institute Tools and Forming. 2014.
- [32] Stefan Manuel Ferchhumer. *Lasererwärmung von Aluminiumplatten*.

-
- [33] J. E. Hockett and O. D. Sherby. *Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures*, volume 23. 1975.
- [34] A. Güner, C. Soyarslan, A. Brosius, and A. E. Tekkaya. *Characterization of anisotropy of sheet metals employing inhomogeneous strain fields for Yld2000-2D yield function*, volume 49. 2012.
- [35] Wilko C. Emmens, Jan Bottema. *Friction of Aluminium in Deep Drawing: IDDRG CONGRESS*. 1998.
- [36] M.Machhammer C.Sommitsch. *The interaction between short-term heat-treatment and the formability of an AL-MG-SI alloy regarding deep drawing processes: Graz University of Technology*. Institute Tools and Forming. 2016.