

Abschlussbericht

V 3.1 Grundlagenentwicklungen zum Umformen und Zerteilen von Strukturen aus Magnesium

**im Verbundprojekt V 3 der TeMaK
Innovative Technologien zum Umformen
von Magnesium-Knetlegierungen**

ZE: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik
Reichenhainer Str. 88
09126 Chemnitz

Förderkennzeichen: 03WKBF1A

Laufzeit: 01.04.2007 - 31.03.2010

Berichtszeitraum: 01.04.2007 – 31.03.2010

Projektleiter: Dipl.-Ing. Sören Scheffler

Chemnitz, 31.08.2010

.....

Dr.-Ing. Hans Bräunlich
Hauptabteilungsleiter Massivumformung

Inhalt

1	Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse.....	3
1.1	Teilprojekt V 3.1.1 „Kennwertermittlung“	3
1.2	Teilprojekt V 3.1.2 „Prozesssimulation“	18
1.3	Teilprojekt V 3.1.3 „Tief und Streckziehen“	37
1.4	Teilprojekt V 3.1.4 „Hydroformen“	49
1.5	Teilprojekt V 3.1.5 „Rohr- und Profilbiegen“	66
1.6	Teilprojekt V 3.1.6 „Fließpressen“	82
2	Demonstrator	94
3	Vergleich Vorhabensstand Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung.....	95
4	Aussichten für die Erreichung der Ziele.....	96
5	Bekanntwerden von FE-Ergebnissen von dritter Seite	96
6	Änderungen in der Zielsetzung	96
7	Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplanes	96

1 Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse

1.1 Teilprojekt V 3.1.1 „Kennwertermittlung“

Bisher wurden Versuche an Proben unterschiedlicher Blechdicke der Magnesium-knetlegierung AZ31 mit verschiedenartigen Prüfmethode durchgeführt. Insbesondere für das kinematische und gemischt isotrop-kinematische Verfestigungsverhalten wurden mit einer am IWU Chemnitz entwickelten Zug-Druck-Prüfeinrichtung erste Versuchsreihen durchgeführt.

Als Materialmodelle für den kinematischen Verfestigungsanteil (Chaboche, Prager) wurden im Prozess der Detaillierung die in den kommerziellen FEM-Programmen PAM-STAMP 2G, LS-DYNA und INDEED implementierten Varianten gewählt, um eventuelle Unterschiede der Approximationsgüte dieser Materialmodellvarianten detektieren zu können. Auf diesem Weg ist auch die Übertrag- und Nutzbarkeit der durchgeführten Untersuchungen abgesichert.

Zur Identifikation der Parameter in den unterschiedlichen Materialmodellen wird ein am IWU entwickelter Algorithmus eingesetzt, bei dem das Fehlerquadrat-Minimumverfahren genutzt wird und die Extremwertbestimmung über die erste und zweite Ableitung der Größe $\Phi(p)$ erfolgt:

$$\Phi(p) = [\sigma^* - \sigma(p, \varepsilon^*)]^T [\sigma^* - \sigma(p, \varepsilon^*)] \rightarrow \min.$$

$$\nabla \Phi(p) = 0; \quad |\nabla^2 \Phi(p)| > 0$$

Dieses gradientenbasierte Verfahren nutzt eine semianalytische Berechnung des Gradienten des Spannungstensors $\nabla \sigma(p)$ bei der numerischen Integration der Materialgleichungen

$$\dot{\sigma} = \Sigma(\sigma, \alpha, \varepsilon, p); \quad \dot{\alpha} = \lambda A(\sigma, \alpha, p); \quad 0 = \lambda F(\sigma, \alpha, p)$$

mit einem Rückwärtsdifferenzenverfahren sechster Ordnung.

Die Größe $\dot{\sigma}$ beinhaltet das elastische Teilstoffgesetz und die Normalenregel, $\dot{\alpha}$ ist die Evolutionsgleichung für alle Verfestigungsparameter und die dritte Gleichung enthält die Fließbedingung und den plastischen Multiplikator.

Als Optimierungsstrategie hat sich dabei das Verfahren nach Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shenno als besonders geeignet erwiesen. Der Nachweis hierfür konnte bei Tests mit synthetischen Messdaten geführt werden, Genauigkeit und Stabilität erwiesen sich als zufriedenstellend. Kritisch ist allerdings die Rechenzeit von einigen Tagen auf einer Compaq ES45. Dieser Punkt kann allerdings durch die Beschaffung bzw. den Einsatz moderner leistungsstärkerer Hardware ausgeräumt werden (ein Zehntel der bisherigen Rechenzeit).

Die Ermittlung des Fließ- und Umformverhaltens bei Raumtemperatur und in Abhängigkeit von der Temperatur sowie die Bestimmung des Verfestigungsverhaltens und des Umformvermögens bis zum Eintritt von Versagensfällen ist eine zentrale und notwendige Aufgabe bei der umfassenden Charakterisierung des Materialverhaltens der hergestellten Magnesiumbleche.

Am Anfang der Untersuchungen standen somit einachsige Zugversuche zur Ermittlung der mechanisch-physikalischen Kennwerte, der richtungsabhängigen Anisotropiewerte und des Verfestigungsverhaltens bis zur Gleichmaßdehnung.

Es wurden die konventionellen Werkstoffkennwerte, wie Elastizitätsmodul, Streckgrenze $R_{p0,2}$, Zugfestigkeit R_m , Gleichmaßdehnung A_g und Bruchdehnung A_{Br} sowie das Spannungs-Dehnungs-Diagramm bestimmt bzw. aufgenommen.

Weiterhin erfolgte die Beschreibung des Anisotropiezustandes durch die Ermittlung der r-Werte in, quer und unter 45° zur Walzrichtung.

Schließlich wurden die Fließkurven bei RT und für ausgewählte, praxisrelevante Umformtemperaturen (200°C, 250°C, 300°C) im Bereich der Gleichmaßdehnung ermittelt sowie die Verfestigungsexponenten (n-Werte) und die Fließkurvenkonstanten C der Ludwik-Funktion bestimmt.

Nachfolgend sind die ermittelten Fließkurven und die Werkstoffkennwerte zusammengefasst.

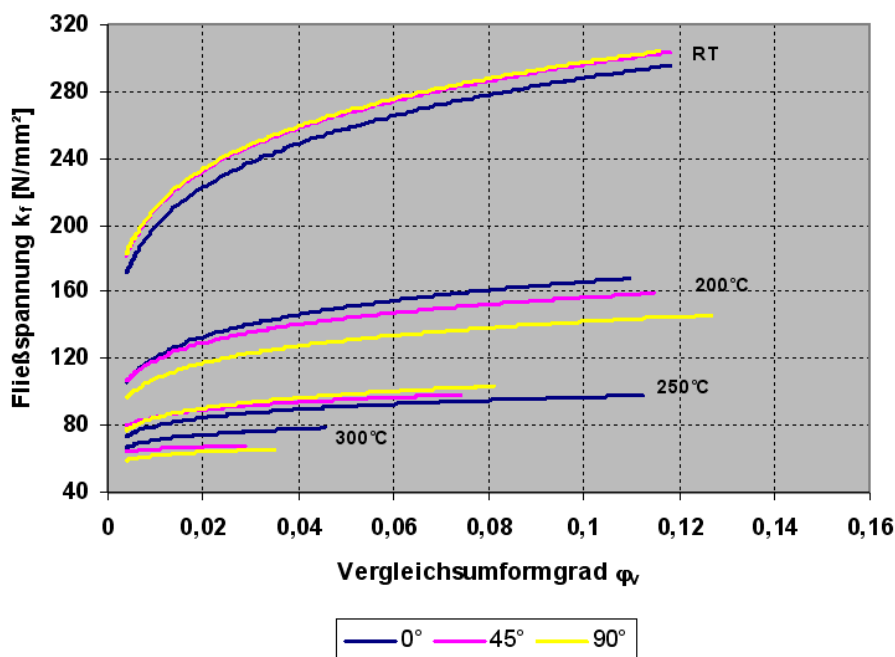


Abb. 1 Kalt- und Warmfließkurven von AZ31 ($s = 1,24 \text{ mm}$)

Temperatur	WR	$R_{p0,2}$	R_m	A_g	A_{Br}	n-Wert	r-Wert	E-Modul	C
		N/mm^2	N/mm^2	%	%				
RT	0°	179,5	263,0	13,1	19,8	0,16	2,77	43	416

	45°	196,0	268,0	13,2	19,8	0,15	2,83	42	418
	90°	178,0	262,0	12,9	15,5	0,16	2,11	43	420
200°C	0°	97,0	149,0	11,7	45,7	0,14	-	16	228
	45°	98,0	141,0	12,1	50,8	0,12	-	15	206
	90°	96,0	128,0	12,0	46,7	0,12	-	16	187
250°C	0°	73,0	87,0	11,8	44,0	0,085	-	13	118
	45°	71,0	91,5	7,7	47,9	0,075	-	12	120
	90°	69,0	95,0	8,4	44,9	0,10	-	12	132
300°C	0°	65,0	74,0	4,7	36,0	0,065	-	11	96
	45°	61,5	66,0	3,0	61,3	0,03	-	10	76
	90°	57,0	63,0	3,6	50,1	0,05	-	10	78

Tab. 1 Mechanische Kennwerte von AZ31 (s = 1,24 mm)

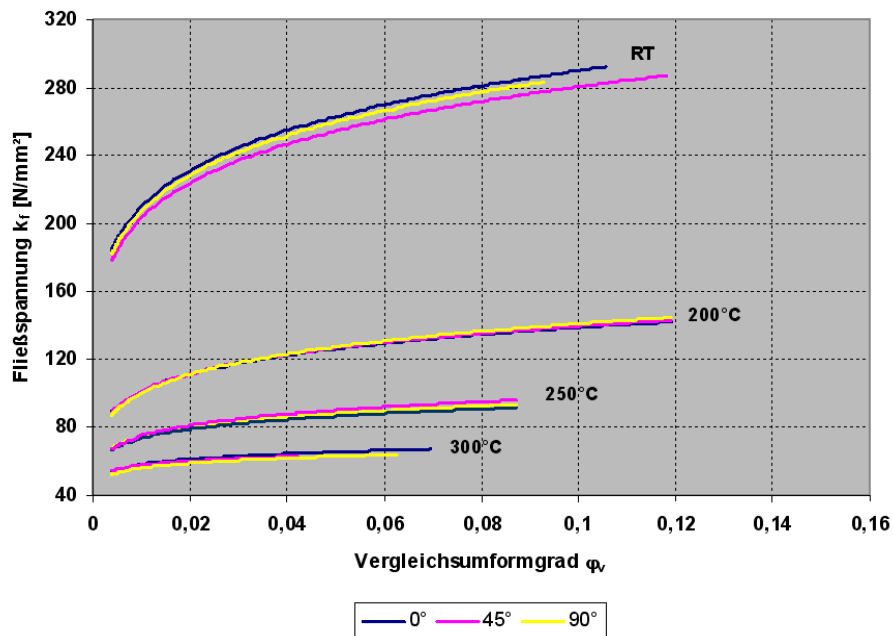


Abb. 2 Kalt- und Warmfließkurven von AZ31 (s = 1,98 mm)

Temperatur	WR	Rp _{0,2}	Rm	A _g	A _{Br}	n-Wert	r-Wert	E-Modul	C
		N/mm ²	N/mm ²	%	%			kN/mm ²	N/mm ²
RT	0°	165,5	259,0	11,8	14,6	0,14	2,00	43	400
	45°	164,0	254,0	13,1	15,7	0,14	1,97	42	387
	90°	162,0	257,0	10,6	10,1	0,14	1,75	44	395
200°C	0°	85,0	125,0	13,2	46,7	0,14	-	15	190
	45°	86,0	126,0	13,0	50,0	0,14	-	15	192

	90°	83,0	127,5	12,6	43,8	0,15	-	15	198
250°C	0°	66,0	85,0	9,0	45,2	0,10	-	13	120
	45°	66,0	83,0	9,1	44,8	0,10	-	13	117
	90°	66,0	87,0	9,0	36,3	0,115	-	12	127
300°C	0°	53,0	62,5	7,2	53,2	0,075	-	10	82
	45°	54,0	60,0	4,3	44,8	0,06	-	10	76
	90°	52,0	60,0	6,4	38,5	0,07	-	10	78

Tab. 2 Mechanische Kennwerte von AZ31 (s = 1,98 mm)

Für beide Blechdicken zeigt sich wie erwartet eine Abnahme der Festigkeitswerte mit steigender Temperatur, ebenso verhält sich die Gleichmaßdehnung A_g .

Die höchsten Bruchdehnungswerte A_{Br} ergeben sich bei Temperaturen von 200 und 300 °C.

Mit zunehmender Umformtemperatur fallen auch die Werte für den n-Wert, den Elastizitätsmodul und die Fließkurvenkonstante C.

Bei der Legierung AZ31 mit der Blechdicke $s = 1,24$ mm ist der Einfluß der Lage zur Walzrichtung stärker ausgeprägt als bei der Dicke $s = 1,98$ mm. Dies korreliert auch mit den etwas größeren Unterschieden bei den einzelnen r-Werten in 0°, 45° und 90° zur Walzrichtung.

Beide Blechwerkstoffe zeigen bei Raumtemperatur (RT) nur eine sehr geringe diffuse Einschnürung vor dem Bruch. Im Temperaturbereich zwischen 200 und 300°C hingegen, ist eine ausgeprägte lokale Einschnürung zu verzeichnen. Dabei zeigen sich innerhalb der Messlänge auch mehrere, unterschiedlich starke, Einschnürzonen.

Insgesamt gesehen, weist der Mg-Werkstoff mit der geringeren Blechdicke leicht höhere Festigkeitswerte, aber auch punktuell etwas höhere Verformungswerte (Dehnungen) auf.

Für die Zug-Druck-Versuche wurden kleine Zugproben mit einer bestimmten Geometrie verwendet, die es erlaubt, die Blechproben mit Druckkräften zu beaufschlagen, ohne dass die Probe ausknickt und der plastische Bereich sicher erreicht wird. Für die Versuche wurden Blechproben hergestellt, wobei die Ausgangsstreifen aus den vorhandenen Magnesium-Platinen unter 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° und 90° zur Walzrichtung entnommen wurden.

Für die Versuche kam eine verifizierte Prüfvorrichtung für Bleche zum Einsatz, die Messdaten sowohl im Zug-Bereich als auch im Druck-Bereich, aber auch bei Lastrichtungswechsel (zyklische Versuche) liefert. Zusätzlich erwies es sich als erforderlich, die Querdehnungen zu vermessen und den Fließbeginn exakt zu identifizieren. Als Messsysteme kamen ein elektronisches Laser-Speckle-Interferometer (ESPI) als Dehnungsmesssystem und eine Thermografiekamera zur Detektierung des Fließbeginns zum Einsatz (Abb. 3). Somit war eine ortsauflösende Dehnungsmessung der beiden Komponenten in der Blechebene verfügbar, die Nutzung des thermoelastischen Effekts (Joule-Thomson-Effekt) erlaubte eine objektive und exakte Bestimmung des Fließbeginns.

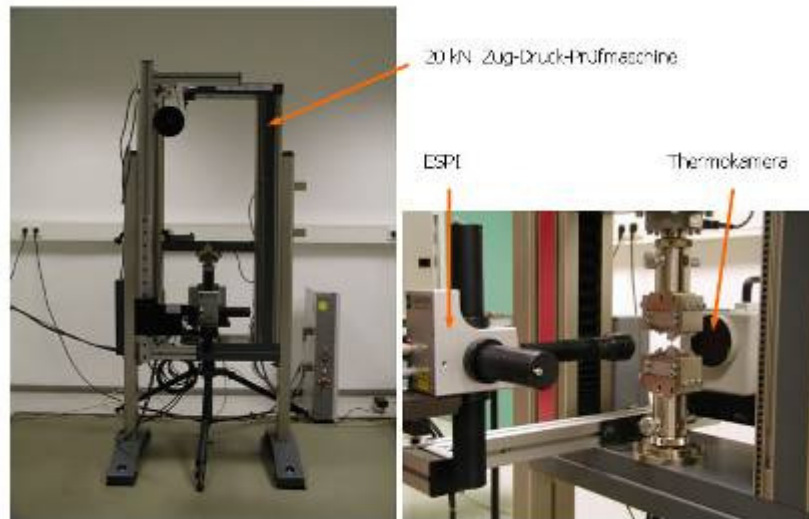


Abb. 3 Zug-Druck Prüfeinrichtung mit Messsystemen

Damit konnte dann ein großer Bereich der Fließellipse der beiden Mg-Werkstoffe ermittelt werden, wie er in Abb. 7 dargestellt ist. Vor allem die Gewinnung von weiteren Stützpunkten im dritten Quadranten der Anfangsfließortkurve (negative Spannungen) ist ein wichtiger Punkt, um das Verfestigungsverhalten im Druckbereich beurteilen zu können. Eine Diskussion der ermittelten Anfangsfließsorte erfolgt später im Abschnitt zu den Biachsial-Zugversuchen.

Die ermittelten E-Moduli korrelieren gut mit den Werten aus den einachsigen Zugversuchen (Tab. 1 und Tab. 2).

Schließlich lässt sich ansatzweise schlussfolgern, dass sich bei Gegenüberstellung der experimentellen Werte der Unterschied zwischen Zug- und Druckfließspannung bei Raumtemperatur (RT) nicht so groß darstellt, wie es oftmals vermutet wird. Da es nicht möglich war, temperierte Zug-Druck-Versuche durchzuführen (erforderliche Prüftechnik nicht vorhanden), konnte der Einfluß der Temperatur auf die Fließspannung bei Lastrichtungswechsel (Bauschinger-Effekt) nicht untersucht werden. Dies war aber auch nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen.

Die Durchführung von Maxi-Bulge-Tests (MBT) hatte zum Inhalt, weitere experimentelle Werte für die Fließkurve der AZ31-Legierungen oberhalb der Gleichmaßdehnung zu gewinnen.

Der MBT wurde mit dem nachfolgend beschriebenen Versuchsaufbau durchgeführt. Das Oberwerkzeug besteht aus der Kopfplatte, 8 massiven Säulen und dem Ziehring. Im Unterwerkzeug sind die Befüllöffnung und der Drucksensor untergebracht. Der Druckaufbau erfolgt mit einem separaten Hydraulik-Aggregat mit einem maximalen Systemdruck von 250 bar. Die In-Prozess-Druckmessung erfolgt mit einem schnellen Drucksensor.

In Abb. 4 ist das eingebaute MBT-Werkzeug auf einer Hydroforming-Pressen SHP 50.000 zu sehen, mit der es möglich ist, in Abhängigkeit vom zu prüfenden Werkstoff extrem hohe erforderliche Haltekräfte bis 50.000 kN aufzubringen. Mittels eines an der Kopfplatte befestigten Kamerasystems, bestehend aus vier Kameras,

erfolgt hierbei die In-Prozess-Messung der Formänderungen und der Krümmungen im Pol der Bulge-Probe.

Die Steuerung des gesamten Prüfablaufs erfolgt über einen übergeordneten Rechner, der eine synchrone Datenaufnahme bezüglich Dehnung und Krümmung am Pol sowie Druck gewährleistet. Das automatisierte, optische Meßsystem und die Druckmessung liefern dabei hochgenaue Messdaten.

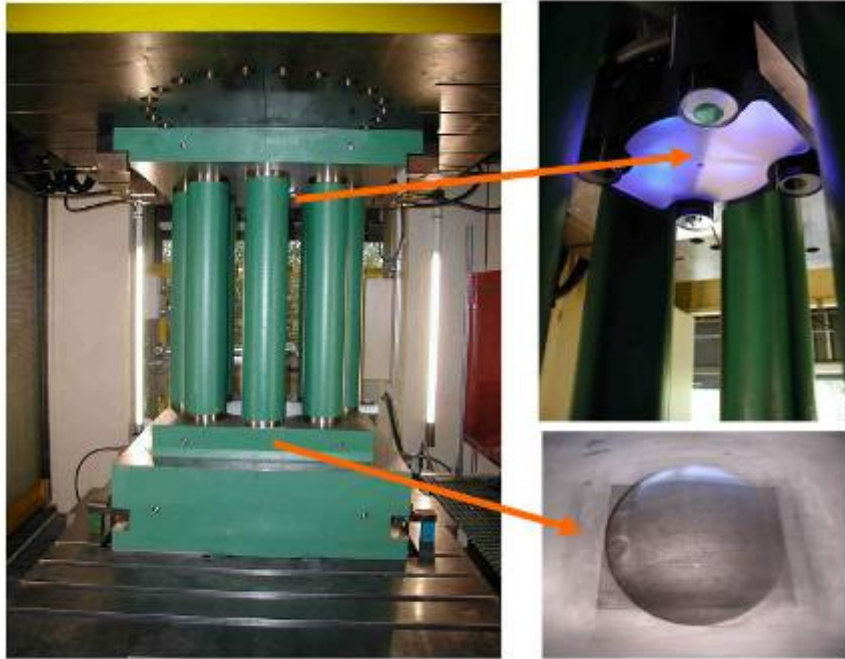


Abb. 4 MBT-Werkzeug im eingebauten Zustand und umgeformte MBT-Probe bis zum Anriss (AZ31, $s = 1.24 \text{ mm}$)

Für die Maxi-Bulge-Tests wurde ein Ziehring mit einem Innendurchmesser von 300 mm eingesetzt, da die gegenwärtig lieferbare Bandbreite 600 mm beträgt, so dass für die Bulge-Versuche Zuschnitte von 1.000 x 600 mm zur Verfügung standen.

Damit war ein sicheres Klemmen des Zuschnittes zwischen Grundplatte und Ziehring, der gleichzeitig als Niederhalter fungiert, gewährleistet. Ein Nachfließen aus dem Haltebereich muss vollständig verhindert werden, da die Versuche sonst nicht auswertbar sind.

In Abhängigkeit von der Festigkeit der Magnesiumbleche und der Blechdicken von $s_0 = 1,24 \text{ mm}$ und $s_0 = 1,98 \text{ mm}$ wurden die Blechproben mit einer Haltekraft von 5.000 kN umgeformt. Je Versuchsbedingung wurden drei Blechproben „gebulget“, um die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse abzusichern.

Die Tab. 3 zeigt eine Zusammenstellung der Versuchs- und Messwerte.

Werkstoff	Versuchsart	Druck (bar)	Versuchsdauer (sec.)	Beulhöhe (mm)
AZ31; s = 1,24 mm	Bersten	9,3	14,5	-
	≈ Druck-Maximum	8,4	11,0	11,85
AZ31; S = 1,98 mm	Bersten	11,6	10,5	-
	≈ Druck-Maximum	10,6	10,0	11,45

Tab. 3 Versuchs- und Messwerte der Bulge-Tests

Die Werte der Tab. 3 sind jeweils die Mittelwerte aus den Versuchen, wobei nur eine geringe Streubreite zu verzeichnen war.

Das Versuchsregime wurde so gewählt, dass zunächst die Berstversuche durchgeführt wurden, um den Maximaldruck zu ermitteln. In den weiteren Versuchen wurde dann bis knapp unterhalb dieses Maximaldruckes gefahren, um ein Bersten sicher zu verhindern, da sonst ein Schaden am verwendeten Kamerasystem eintreten könnte.

Die geringen Beulhöhen, die in den Versuchen erreicht wurden (Abb. 5), hatten demzufolge auch nur geringe erreichbare Dehnungen im Pol der Bulgeprobe zur Folge.

Die erreichten Vergleichsformänderungen von $\varphi_v = 0,015 - 0,02$ spiegeln dies wieder.

Somit war es nicht möglich, Werte für die Fließkurven der Magnesium-Legierungen oberhalb der Gleichmaßdehnung zu gewinnen (Abb. 1 und Abb. 2), das heißt die Fließkurve aus dem einachsigen Zugversuch konnte nicht zu höheren Vergleichsformänderungen verlängert werden.

Als Ursache für dieses Werkstoffverhalten muss die sehr schlechte Streckziehbarkeit der beiden AZ31-Legierungen genannt werden. Dies korreliert mit den relativ hohen r-Werten (Tab. 1 und Tab. 2) sehr gut. Damit fließt der Werkstoff vorwiegend nur aus der Breite und nicht aus der Dicke. Beim Bulge-Test muss aber ein Nachfließen aus dem Klemmbereich, wie bereits erwähnt, vollständig vermieden werden, so dass die Formänderungen ausschließlich aus der Blechdicke resultieren. In Verbindung mit dem nur mäßigen Formänderungsvermögen bei Raumtemperatur zeigen sich dann die dargestellten Ergebnisse.



Abb. 5 Erreichte Beulhöhe an einer MBT-Probe

Für die Aufnahme von Anfangsfließortkurven zur differenzierten Ermittlung des Fließbeginns wurden gleichfalls das laseroptische Dehnungsmeßsystem und die Thermokamera an der Biachsialzug-Prüfanlage eingesetzt.

Die Probenform wurde durch FE-Rechnungen zum Biachs-Versuch in der Weise optimiert, dass im Mittenbereich der Probe ein nahezu homogenes Messfeld verfügbar ist (Abb. 6 rechts).

Die Prüfanlage in Präzisionsspindelausführung und vertikaler Bauweise besitzt vier Belastungseinheiten mit den entsprechenden Spannbacken. Je Achse ist eine maximale Prüfkraft von 250 kN verfügbar.

Durch eine entsprechende Wahl der Belastungskombinationen konnten für beide Mg-Legierungen die Fließsorte im ersten Quadranten der AFOK ermittelt werden (Abb. 7).

Weiterführende Ausführungen zu den Biachsialzugversuchen und den ermittelten Anfangsfließorten enthält das Kapitel zum Teilprojekt V 3.1.2 Prozesssimulation.



Abb. 6 Gesamtansicht Biachsialzug-Prüfanlage (links) und Prüfraum (rechts)

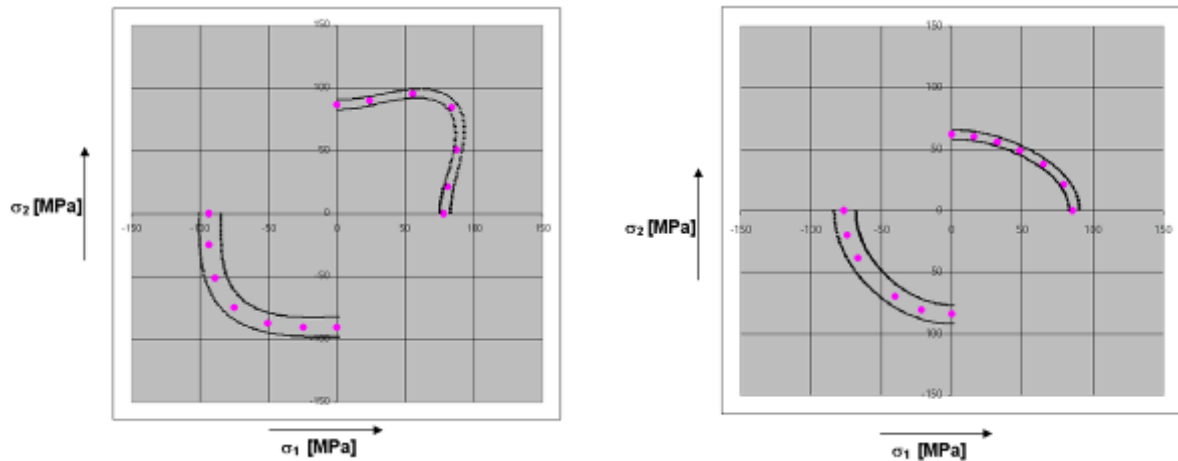


Abb. 7 Anfangsfließorte AZ31, $s = 1,24$ mm (links) und Anfangsfließorte AZ31, $s = 1,98$ mm (rechts)

Die Auswertung und Aufbereitung der durchgeführten Werkstoffuntersuchungen ermöglicht es, die Ergebnisse in Form eines komplexen Datensystems für die Mg-Legierung AZ31 darzustellen, das eine detaillierte Werkstoffcharakterisierung und Beurteilung im elastischen und plastischen Bereich sowie bei Fließbeginn gestattet.

Neben einem entsprechenden Datenblatt mit den Werkstoffkennwerten, Materialparametern sowie den Darstellungen zum Anfangsfließort und dem Verfestigungsverhalten von AZ31 wurden in weiteren Datenblättern technologische Empfehlungen, Verarbeitungshinweise und Gebrauchseigenschaften aus werkstofftechnischer Sicht in übersichtlicher Form aufgelistet und teilweise durch quantitative Angaben ergänzt.

Die blechverarbeitenden Unternehmen haben somit ein werkstoffbasiertes Instrumentarium vorliegen, um sicher und effizient Umformoperationen und Umformwerkzeuge auslegen, Prozessabläufe optimieren und Bauteileigenschaften gezielt einstellen zu können, so dass sich die Erfolgsaussichten für die Verwendung von Magnesiumblechen auch unter Beachtung der Ergebnisse der anderen Teilprojekte wesentlich erhöht haben.

DATENBLATT 01 - Werkstoffkennwerte und -charakteristiken

Legierung AZ31 (s = 1,24 mm)

Temperatur	WR	Rp _{0,2}	Rm	A _g	A _{Br}	n-Wert	r-Wert	E-Modul	C
		N/mm ²	N/mm ²	%	%			kN/mm ²	N/mm ²
RT	0°	179,5	263,0	13,1	19,8	0,16	2,77	43	416
	45°	196,0	268,0	13,2	19,8	0,15	2,83	42	418
	90°	178,0	262,0	12,9	15,5	0,16	2,11	43	420
200°C	0°	97,0	149,0	11,7	45,7	0,14	-	16	228
	45°	98,0	141,0	12,1	50,8	0,12	-	15	206
	90°	96,0	128,0	12,0	46,7	0,12	-	16	187
250°C	0°	73,0	87,0	11,8	44,0	0,085	-	13	118
	45°	71,0	91,5	7,7	47,9	0,075	-	12	120
	90°	69,0	95,0	8,4	44,9	0,10	-	12	132
300°C	0°	65,0	74,0	4,7	36,0	0,065	-	11	96
	45°	61,5	66,0	3,0	61,3	0,03	-	10	76
	90°	57,0	63,0	3,6	50,1	0,05	-	10	78

Tab. 4 Mechanische Kennwerte

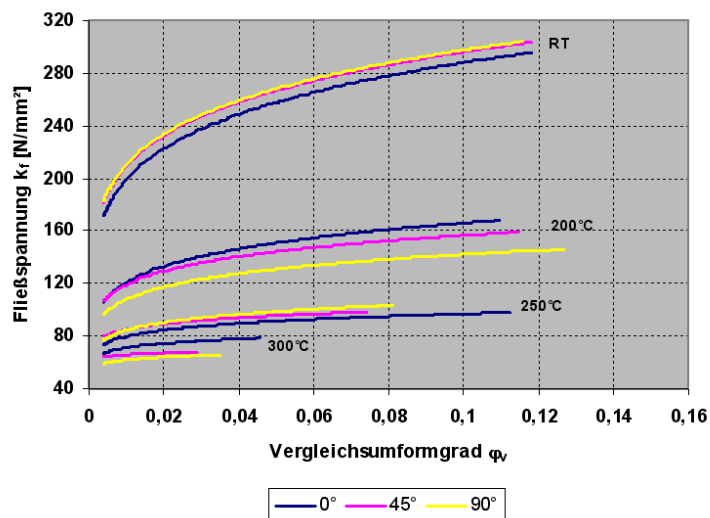
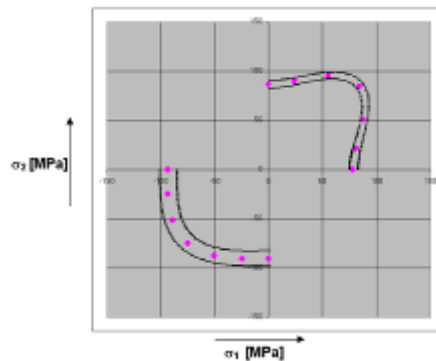


Abb. 8 Kalt- und Warmfließkurven



Tab. 5 Anfangsfließborte

DATENBLATT 01 - Werkstoffkennwerte und -charakteristiken

Legierung AZ31 (s = 1,98 mm)

Temperatur	WR	Rp _{0,2}	Rm	A _g	A _{Br}	n-Wert	r-Wert	E-Modul	C
		N/mm ²	N/mm ²	%	%			kN/mm ²	N/mm ²
RT	0°	165,5	259,0	11,8	14,6	0,14	2,00	43	400
	45°	164,0	254,0	13,1	15,7	0,14	1,97	42	387
	90°	162,0	257,0	10,6	10,1	0,14	1,75	44	395
200°C	0°	85,0	125,0	13,2	46,7	0,14	-	15	190
	45°	86,0	126,0	13,0	50,0	0,14	-	15	192
	90°	83,0	127,5	12,6	43,8	0,15	-	15	198
250°C	0°	66,0	85,0	9,0	45,2	0,10	-	13	120
	45°	66,0	83,0	9,1	44,8	0,10	-	13	117
	90°	66,0	87,0	9,0	36,3	0,115	-	12	127
300°C	0°	53,0	62,5	7,2	53,2	0,075	-	10	82
	45°	54,0	60,0	4,3	44,8	0,06	-	10	76
	90°	52,0	60,0	6,4	38,5	0,07	-	10	78

Tab. 6 Mechanische Kennwerte

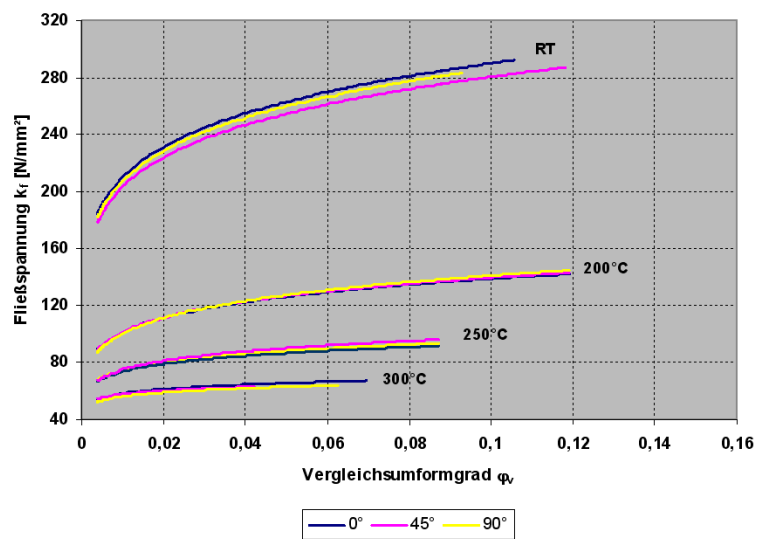


Abb. 9 Kalt- und Warmfließkurven

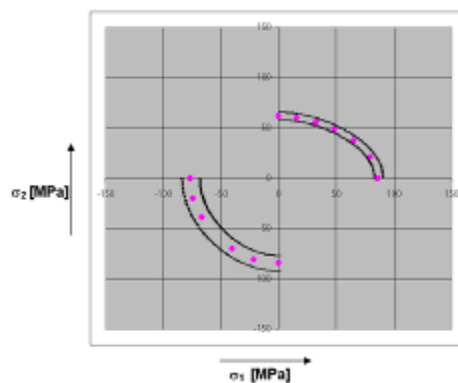


Abb. 10 Anfangsfließborte

DATENBLATT 02 – Empfehlungen und Verarbeitungshinweise (Blatt 1)

Legierung AZ31

- Die bedeutendste Rolle im Bereich der Magnesiumknetlegierungen kommt den Werkstoffen der AZ-Gruppe zu. Am gebräuchlichsten sind die Legierungen **AZ31 (ca. 3 % Al, 1 % Zn)**, AZ61 (ca. 6 % Al, 1 % Zn) und AZ80 (ca. 8 % Al, 0,5 % Zn). Sie besitzen im Vergleich zu den AZ-Gusslegierungen geringere Gehalte an Aluminium.
- Wegen der hexagonalen Kristallstruktur sind Mg-Legierungen schwierig kalt - umformbar, so dass unter Beachtung der herzustellenden Teilegeometrie eine temperierte Umformung zu bevorzugen ist.
- Bei einer Temperatur von über $T = 225 \text{ °C}$ werden die pyramidalen Gleitebenen aktiviert, so dass eine Erhöhung des Formänderungsvermögens der Magnesiumbleche beobachtet werden kann (→ Herstellung rissfreier Teile). Ein weiterer hinzukommender Verformungsmechanismus ist das Gleiten von Versetzungen auf prismatischen Ebenen. Bei einer Temperatur von ca. $T = 260 \text{ °C}$ und geringen Dehnraten setzt ein alternierendes pyramidales und prismatisches Gleiten im Kristall ein (wellige Gleitbänder auf der Oberfläche).
- Bei der umformenden Herstellung von Blechteilen guter Qualität aus der Legierung AZ31 liegt unter Beachtung technischer und ökonomischer Aspekte der günstigste Temperaturbereich bei $250 \pm 25 \text{ °C}$. Dadurch werden zum Beispiel die erreichbaren Formänderungen um $250 - 400 \text{ %}$ erhöht, gleichzeitig wird die benötigte Umformkraft um ca. $30 - 40 \text{ %}$ reduziert.
- Die Verformbarkeit steigt jedoch über 300 °C speziell für AZ31 nicht mehr weiter an.
- Da die Umformeigenschaften von Magnesiumlegierungen in einem weit größeren Maße von der Temperatur abhängen als bei Aluminiumlegierungen, ist eine genaue Einhaltung und Konstanthaltung der erforderlichen Umformtemperatur während des Umformprozesses (Tiefziehen, Streckziehen, Biegen u.a.) von Magnesiumblechen unabdingbar.
- Empfehlungen für die Werkzeuggeometrie beim Biegen und Tiefziehen der Magnesiumlegierung AZ31:
 - geringe Umformungen sind bereits bei Raumtemperatur möglich, wenn große Werkzeugradien gewählt werden
 - der minimale Biegeradius nimmt mit steigender Umformtemperatur deutlich ab
- Allerdings sollten kalt umgeformte Teile aus AZ-Legierungen (Mg-Al-Zn) nach dem Umformen spannungsarm gegläht werden, um Spannungsrisskorrosion zu vermeiden.

DATENBLATT 02 – Empfehlungen und Verarbeitungshinweise (Blatt 2)

Legierung AZ31

- Das höhere Streckgrenzenverhältnis $R_{p0,2} / R_m$ der Magnesiumlegierungen (hier für AZ31 zwischen 0,64 und 0,72 bei RT) deutet in Bezug auf vergleichbare Aluminiumlegierungen auch auf eingeschränkte Umformeigenschaften bei Raumtemperatur hin.
- Die relativ hohen Anisotropiewerte der Mg-Bleche ($r \approx 2,0$ bis 2,8) bei Raumtemperatur führen dazu, dass der Werkstoff kaum aus der Dicke fließt, sondern überwiegend aus der Breite. Dies ist besonders nachteilig für Kaltumformoperationen mit Streckziehbeanspruchungen.
- Aufgrund des geringeren E-Moduls im Vergleich zu Stahl- und Aluminium-Werkstoffen ist nach Umformprozessen bei RT mit höheren Rückfederungswerten zu rechnen. Bei temperierter Umformung verbessert sich das Rückfederungsverhalten der Mg-Bleche merklich.
- Eine Gemeinsamkeit aller Mg-Legierungen besteht darin, dass die Fließkurven mit steigender Temperatur einerseits auf einem geringeren Festigkeitsniveau liegen und andererseits deutlich flacher verlaufen (\rightarrow fallende n -Werte), d.h. die Verfestigung mit steigender Temperatur signifikant abnimmt.
- Eine steigende Prozesstemperatur bewirkt eine deutliche Erhöhung des Grenzziehverhältnisses beim Tiefziehen. Andererseits nimmt die Festigkeit der Magnesiumbleche mit steigender Temperatur ab, so dass eine geringere Ziehkraft über die Ziehteilzarge in die Umformzone übertragen werden kann. Darüber hinaus bewirkt eine Temperaturerhöhung eine Verringerung der infolge der Umformung auftretenden Werkstoffverfestigung. Dies hat zur Folge, dass der vom Flanschbereich über die Ziehkante in den Zargenbereich einfließende Werkstoff mit steigender Temperatur eine deutlich verminderte Festigkeit aufweist, die schließlich die Ursache für das Reißen des Werkstoffes im Zargenbereich darstellt. Eine weitere Steigerung des Grenzziehverhältnisses kann aber durch die Verwendung eines gekühlten Stempels erreicht werden. Dadurch bleibt die zur Übertragung der Umformkraft benötigte Festigkeit des Werkstoffs lokal im Bereich der Stempelkante bzw. Zarge erhalten, wodurch höhere Umformungen möglich sind.
- Bei Komplexbauteilen, bei denen unterschiedliche Werkstoffbeanspruchungen zur Realisierung des finalen Bauteiles führen, ist es sinnvoll, das Werkzeug partiell zu beheizen und in entsprechenden Werkzeugbereichen zu kühlen.

DATENBLATT 02 – Empfehlungen und Verarbeitungshinweise (Blatt 3)

Legierung AZ31

- Die Anwendung des temperierten Innenhochdruck-Umformens bzw. des Innenhochdruck-Blechumformens zur Realisierung von Bauteilen aus Magnesium bietet die Chance, die Vorteile wirkmedienbasierter Umformverfahren mit den Temperatureffekten zu kombinieren.
- Dafür ist es aber auch erforderlich, die prozesstechnischen Voraussetzungen zu schaffen und geeignete Prozessfenster zu identifizieren. Wichtige Aspekte, die dabei unbedingt beachtet werden müssen sind
 - die maßgeschneiderte Gestaltung des Umformwerkzeugs,
 - die spezifische Auslegung der Umform- bzw. Erwärmungseinrichtung,
 - die sichere Bereitstellung der geforderten Temperaturen bzw. Temperaturverteilung (Erwärmungsstrategie) sowie
 - die gezielte Beeinflussung des tribologischen Systems.
- Vorteile von Magnesiumlegierungen (Bleche) sind vor allem das hohe Festigkeits-Gewichts-Verhältnis, gute Dämpfungseigenschaften, ein ausgeprägter Beulwiderstand sowie eine hohe spezifische Festigkeit (Dichte / Dehngrenze). Darüber hinaus ist Magnesium nach wie vor das leichteste Konstruktionsmetall mit hoher Rohstoffverfügbarkeit und guter Recyclingfähigkeit. Leichte Mg-Komponenten im Automobilbau zeigen eine positive Ökobilanz über den Produktlebenszyklus.
- Physikalische Eigenschaften von Magnesium, von denen einige stark temperaturabhängig sind:
 - Dichte bei RT ρ [g/cm^3] 1,738
 - Schmelztemperatur TS [$^{\circ}\text{C}$] 650
 - E-Modul E [N/mm^2] 45.000
 - Wärmeausdehnungskoeffizient α [K^{-1}] 25×10^{-6}
 - Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W}/(\text{m} \times \text{K})$] 160
 - spezifische Wärmekapazität c_p [$\text{J}/(\text{kg} \times \text{K})$] 1023

DATENBLATT 02 – Empfehlungen und Verarbeitungshinweise (Blatt 4)

Legierung AZ31

- Magnesium-Flachprodukte haben im Vergleich zu Stahl und Aluminium ein vorteilhaftes Anwendungspotenzial, wenn Biege- und Beulbeanspruchungen eine wesentliche Rolle spielen. Am Beispiel der Legierung AZ31 lässt sich dies anschaulich durch die Gegenüberstellung von relevanten Leichtbaufaktoren (normiert auf Stahl) verdeutlichen:

Leichtbaufaktor	Definition	mikroleg. Stahl	AlMgSi1	AZ31
spezifische Beulsteifigkeit	$E^{1/2} / \rho$	1,0	1,7	2,0
spezifische Beulfestigkeit	$(R_{p0,2})^{1/2} / \rho$	1,0	3,2	4,0
spezifische Plattenbiegesteifigkeit	$E^{1/3} / \rho$	1,0	2,0	2,65

- Aus Veröffentlichungen ist bekannt, dass bereits Magnesiumbleche mit einer minimalen Blechdicke von ca. 0,4 mm hergestellt wurden, die sich für eine umformende Weiterverarbeitung eignen (Zielgröße).

1.2 Teilprojekt V 3.1.2 „Prozesssimulation“

Es wurde eine Analyse der projektrelevanten Magnesiumumformprozesse bezüglich ihrer Anforderungen an die numerische Simulation vorgenommen. Bei der Simulation von Tief- und Streckziehumformprozessen steht die Ermittlung von Gutteilfenstern in Abhängigkeit von Temperatur, Werkzeuggraden und Prozessgeschwindigkeiten im Zusammenhang mit der Ermittlung von umformtechnischen/technologischen Grenzen im Zentrum des Interesses. Zusätzlich ist die Wahl einer optimalen inhomogenen Temperaturverteilung unter Erfüllung umform-technischer und funktionaler Randbedingungen ist eine zentrale Frage beim Hydroforming, Rollbiegen und Rohrbiegen.

Bei der numerischen Simulation der projektrelevanten Magnesiumumformprozesse handelt es sich folglich um die Lösung von thermomechanisch gekoppelten Prozessen. Das FEM-Programm ABAQUS erlaubt die Simulation thermomechanisch gekoppelter Phänomene auch bei Vorliegen großer plastischer Deformationen, außerdem verfügt ABAQUS über ein komfortables Angebot von USER-Schnittstellen. Aus diesen Gründen wird ABAQUS in der weiteren Projektbearbeitung zur Behandlung nicht-isothermer Probleme zum Einsatz kommen, für isotherme Probleme werden zusätzlich PAM-STAMP und Autoform verwendet.

Aus den bisher vorliegenden Ergebnissen des Teilprojektes Kennwertermittlung geht hervor, dass Magnesiumknetlegierungen ein gemischt isotrop-kinematisches Verfestigungsverhalten zeigen, das durch in den FEM-Programmen PAM-STAMP 2G, LS-DYNA und INDEED implementierte Materialmodelle in unterschiedlicher Güte approximiert werden kann. Der Temperatureinfluss auf das Fließverhalten kann vorerst nur für den isotropen Verfestigungsanteil detektiert werden. Dem Rechnung tragend wurde das elastisch-plastische Materialmodell

$$\sigma = S(\varphi, \varphi_p) \quad (\text{elastisches Teilstoffgesetz})$$

$$\dot{\varphi}_p = \lambda \frac{\partial F(\sigma, \alpha, \vartheta)}{\partial \sigma} \quad (\text{Fließregel})$$

$$\dot{\alpha} = \lambda A(\sigma, \alpha) \quad (\text{Evolutionsgleichung der Verfestigungsparameter})$$

$$0 = \lambda F(\sigma, \alpha, \vartheta) \quad (\text{Fließbedingung})$$

(Umformgrad φ , plastischer Umformgrad φ_p , Cauchy-Spannung σ , Vektor der Verfestigungsvariablen α , Temperatur ϑ) als Basis für die Simulation von Umformprozessen von Magnesiumknetlegierungen gewählt.

Zur numerischen Integration der obigen konstitutiven Gleichungen wurde ein Radial-Return, mit Substepping zur Sicherung einer ausreichenden Genauigkeit, gewählt und in eine USER-Subroutine (vumat) für ABAQUS/explicit implementiert.

Eine Verifikation des Modells erfolgt derzeit durch die Simulation der Prüfversuche aus dem Teilprojekt Kennwertermittlung.

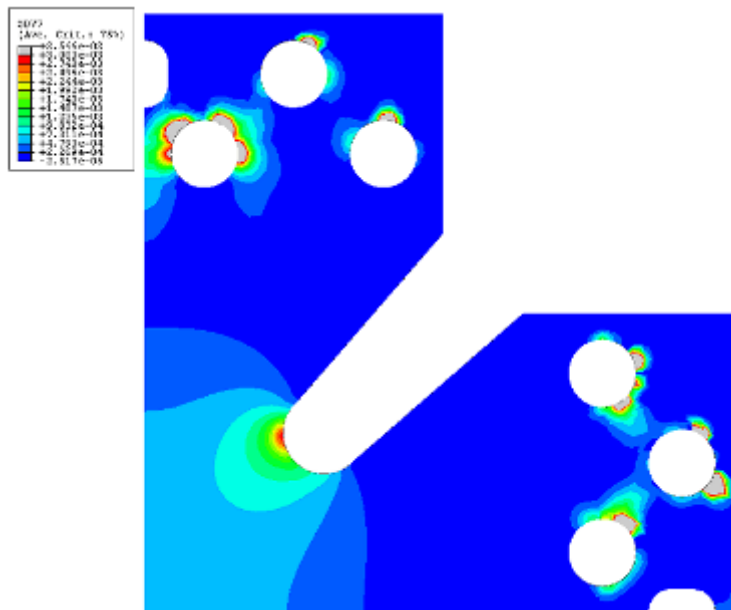


Abb. 11 Biachsial-Zugprüfversuch (plastischer Vergleichsumformgrad, kurz nach Fließbeginn)

Nach der Durchführung weiterer Tests bezüglich Genauigkeit und Laufzeit wird dieses Modell die Basis für die Simulation ausgewählter isothermer und nicht-isothermer Herstellungsprozesse sein. Da im isothermen Fall Materialmodelle gewählt wurden, die in anerkannten Blechumformprogrammen (z.B. PAM-STAMP) zum Einsatz kommen, ist die Grundlage für die Verifikation des implementierten Algorithmus durch Vergleiche von Simulationsergebnissen gelegt.

Die Simulation von ausgewählten Herstellungsprozessen für Teile aus Magnesiumknetlegierungen wurde mit der Ermittlung der maximal erreichbaren Ziehtiefe im Knochenwerkzeug bei isothermer Prozessführung gestartet. Bei einer Prozess-temperatur von 250 °C konnte mit PAM-STAMP 2G die maximal erreichbare Ziehtiefe mit 47 mm abgeschätzt werden. Als Versagenskriterium wurde dabei das Erreichen der Bruchdehnung (ca. 45%) verwendet.

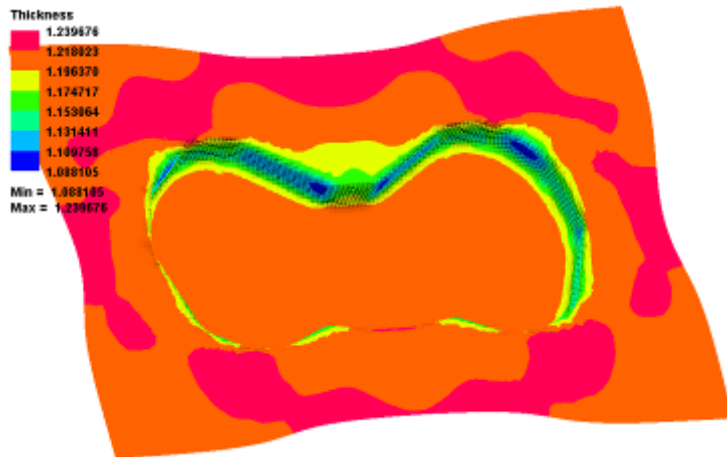


Abb. 12 Versuchswerkzeug: Blechdickenverteilung bei maximaler Ziehtiefe

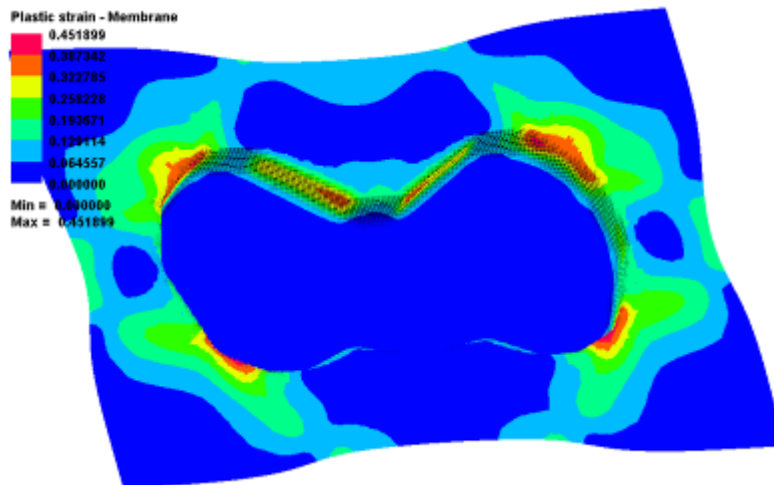


Abb. 13 Versuchswerkzeug: plastischer Vergleichsumformgrad bei maximaler Ziehtiefe

Für die Machbarkeitsuntersuchung des Tür-Innenteils bei isothermer Prozessführung wurde Autoform eingesetzt.

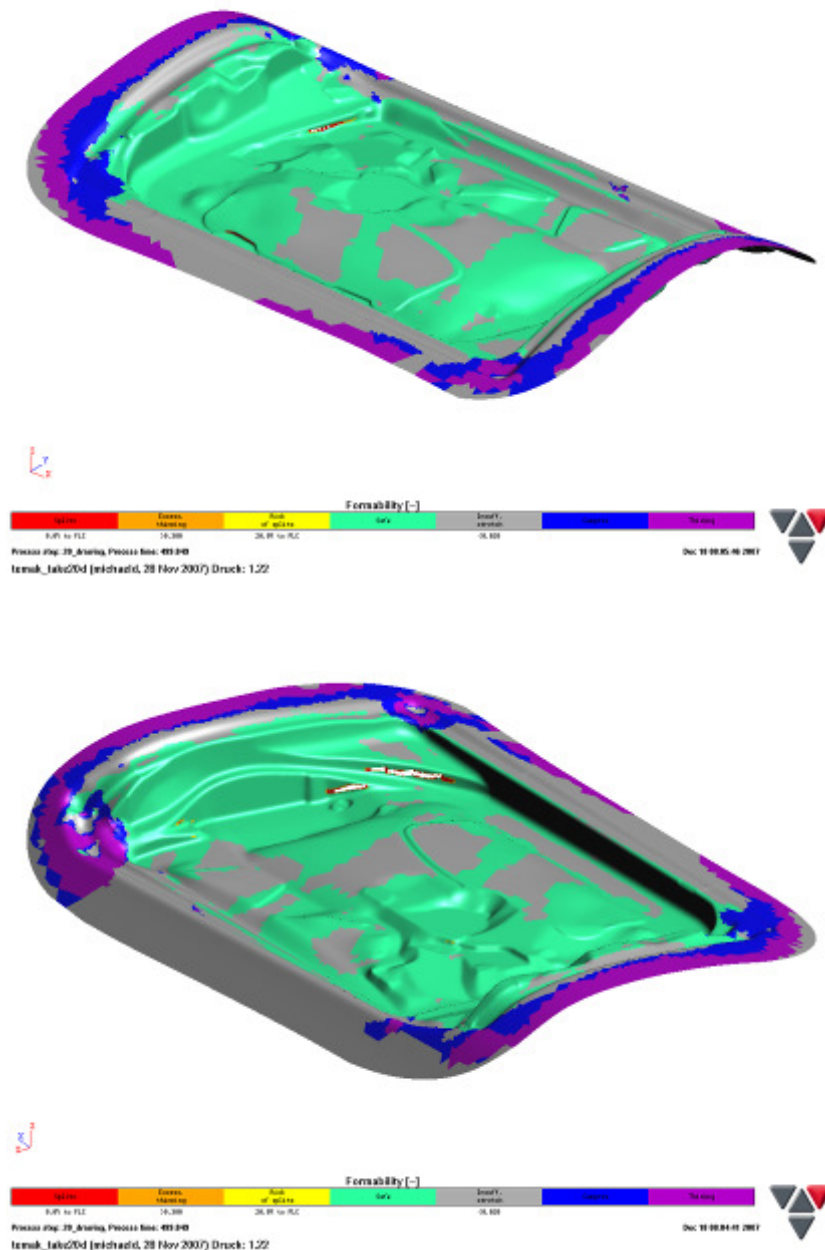


Abb. 14 Tür-Innenteil, Machbarkeitsuntersuchung (Auftreten von Reißern bei der vorliegenden Werkzeuggeometrie)

Für die Identifikation einer geeigneten Materialklasse für die zum Einsatz kommenden Magnesiumknetlegierungen sind insbesondere die im Teilprojekt Kennwertermittlung durchgeführten Zug-Druck-Prüfversuche von Interesse. Die aus den Versuchsdaten (Spannung, Umformgrad, Probentemperatur) ableitbaren Anfangsfließborte (vgl. Teilprojekt V 3.1.1 „Kennwertermittlung“) im ersten und dritten Quadranten des Spannungsraums σ_1 - σ_2 spiegeln die plastische Anisotropie der untersuchten Legierungen gut wieder. Bei der Blechdicke 1,24 mm (Abb. 7 links) beträgt die Anfangsrückspannung $\alpha_1 = -8$ MPa und $\alpha_2 = -2$ MPa und bei der Blechdicke 1,98 mm (Abb. 7 rechts) $\alpha_1 = 5$ MPa und $\alpha_2 = -12$ MPa mit einer Toleranz von ± 8 MPa. Darüber hinaus erscheinen beide Anfangsfließsorte als um ca. 90° gegeneinander verkippt. Dies kann ein Indiz für eine deutliche Distorsionsverfestigung bei

AZ31 sein. Der verfügbare Datenbestand ist allerdings noch nicht ausreichend, um Aussagen über die Evolution der Distorsionsverfestigung ableiten zu können. Die Gestalt der Anfangsfließsorte lässt sich unter Beachtung des Streuungsintervalls der gemessenen Spannungen gut mit dem Modell Hill48 approximieren, wobei allerdings Halbzeuge mit unterschiedlichen Blechdicken letztlich als unterschiedliche Materialien (unterschiedliche r -Werte) zu behandeln sind. Genauere Aussagen sind allerdings erst durch noch feinrastrigere (σ_1 - σ_2 Verhältnisse) Biachsial-Zugprüfversuche möglich.

Der vergleichsweise große Toleranzbereich der Anfangsrückspannungen rechtfertigt noch nicht die Existenz von Anfangsrückspannungen in die Simulationen zur Bauteilentwicklung aufzunehmen. Auf Basis des derzeit verfügbaren Datenbestandes kann eingeschätzt werden, dass die isotrope Verfestigung der dominierende Anteil der Verfestigungsmechanismen bei AZ31 ist.

Auf Basis des neuen Materialdatenbestandes konnten die Simulationsergebnisse zum Grundwerkzeug (Abb. 15) qualifiziert werden. Bei der Simulation wurden eine Halbzeugtemperatur von 250 °C, eine Niederhalterkraft von 56 kN und eine Gegenhalterkraft von 5 kN angenommen. Diese Werte entsprechen im Wesentlichen den Versuchsbedingungen. Bei der im Versuch erreichten Ziehtiefe von 88 mm stellt sich in der Simulation eine Stempelkraft von 164 kN in guter Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen ein. Im Grenzformänderungsschaubild sind noch keine Zeichen für das Erreichen eines kritischen Zustands zu erkennen. Die Ausdünnung liegt knapp unter 20%, ein Wert der neben dem Grenzformänderungsschaubild eine Basis für weitere Machbarkeitsstudien bildet.

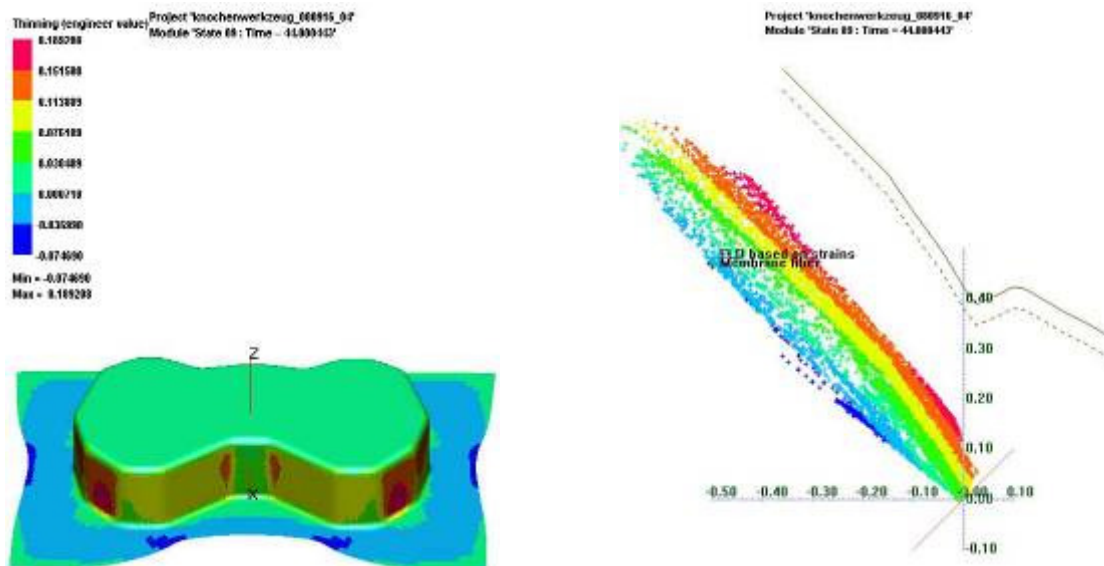


Abb. 15 Versuchswerkzeug: Ausdünnung bei maximaler Ziehtiefe $t = 88$ mm (links) und zugehöriges Grenzformänderungsschaubild (rechts)

Die in Abb. 14 dargestellten Ergebnisse zeigten, dass das Türinnenteil nicht ziehbar ist. Die erforderlichen Änderungen der Werkzeuggeometrie wurden auf der Basis von Tiefziehsimulationen mit PAM-STAMP detektiert. Nach mehreren Iterationsschleifen konnte die in Abb. 16 dargestellte Geometrie als ziehbar eingestuft werden.

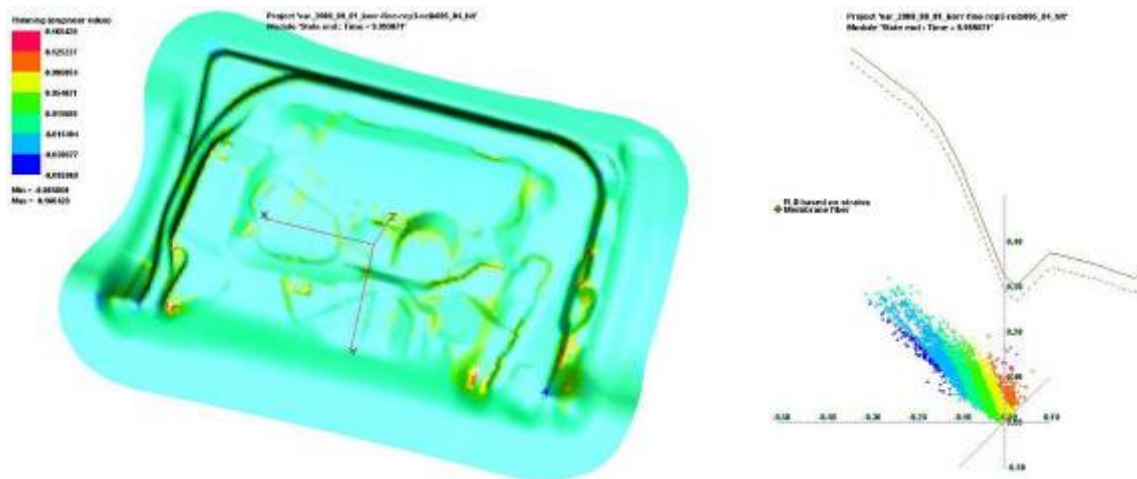


Abb. 16 Tür-Innenteil, Machbarkeitsuntersuchung, Ausdünnung < 20% (links) und Grenzformänderungsschaubild; Dehnungsreserve > 14% (rechts)

Auch für das Tür-Außenteil konnte auf diese Weise eine ziehbare Geometrie detektiert werden (Abb. 17)

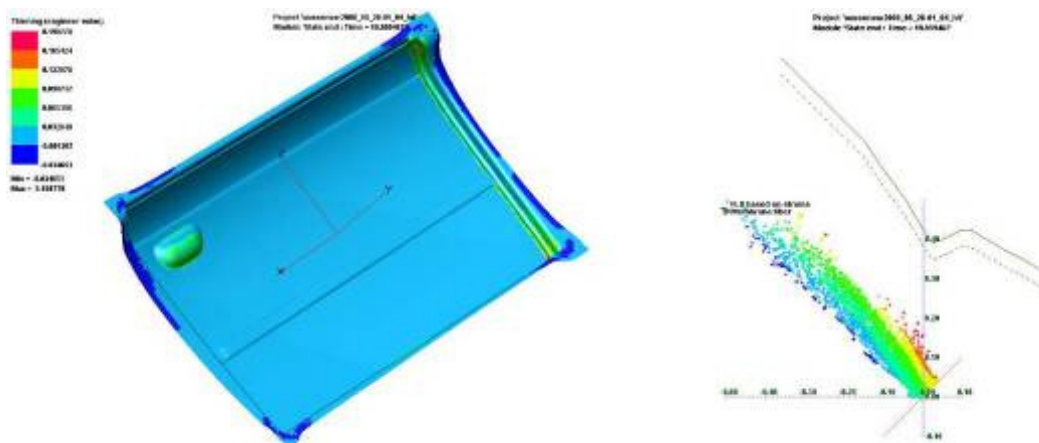


Abb. 17 Tür-Außenteil, Machbarkeitsuntersuchung; Ausdünnung < 20% (links) und Grenzformänderungsschaubild, Dehnungsreserve > 25% (rechts)

Die hier gefundene Gutteilgeometrie birgt allerdings noch Probleme beim Falzprozess in sich, so dass sich für das Außenteil noch einige Optimierungsschleifen anschließen werden.

Bei einer, den Erfordernissen des Falzprozesses angepassten Teilegeometrie sind die Umformreserven geringer als bei der ursprünglich angenommenen Geometrie (vgl. Abb. 18).

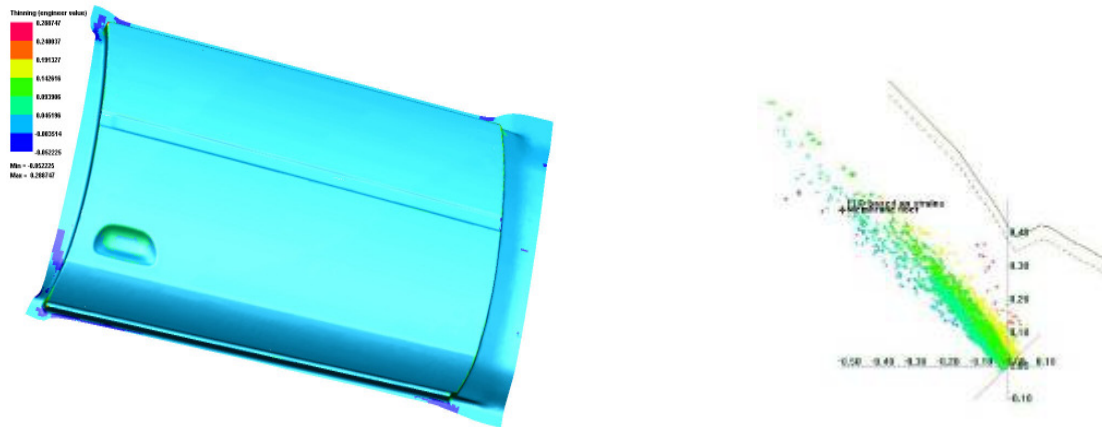


Abb. 18 Tür-Außenteil, Machbarkeitsuntersuchung; Ausdünnung < 30% (links) und Grenzformänderungsschaubild, Dehnungsreserve > 16% (rechts)

Die Umformverhältnisse stellen sich aber auch nicht als grenzwertig dar, so dass nach Abstimmung mit allen betroffenen Projektpartnern die Werkzeuge für Türinnen- und aussenteil im September 08 freigegeben werden konnten.

Im Teilprojekt 3.1.4 „Hydroformen“ wurde eine Konzeption für ein T-IHU-Demonstratorbauteil, in Abstimmung mit dem hierfür erforderlichen T-IHU-Werkzeug mit integrierter induktiver und magnetischer Erwärmung des Halbzeuges in den Umformzonen entwickelt. Es wurde eine komplexe, zu realisierenden Demonstratorbauteilgeometrie ausgewählt (Türrahmensegment) und nach verfahrensspezifischen und technologischen Gesichtspunkten sowie in Abhängigkeit mit der Gesamtkonstruktion der Magnesiumtür, insbesondere mit dem Türinnenblech, zu einer T-IHU-fähigen Bauteilgeometrie inkl. der notwendigen Ankonstruktionen (Werkstoffnachschiebebereiche, Übergangszonen, Erwärmungsbereiche etc.) konstruiert. Im ersten Schritt wurde in den numerischen Simulationen zur Reduzierung der Rechenzeit von den im Teil zu erwartenden Temperaturgradienten abstrahiert und ein isothermer Zustand angenommen. Im Rahmen des in 3.1.4 entwickelten Konzepts soll ein erwärmtes Profil (250 °C) bei dem Schließen der Werkzeuge gebogen und dann mit Innendruck ausgeformt werden. Bei der numerischen Simulation zeigte sich beim Werkzeugschließen der Herausbildung einer Falte (vgl. Abb. 19).

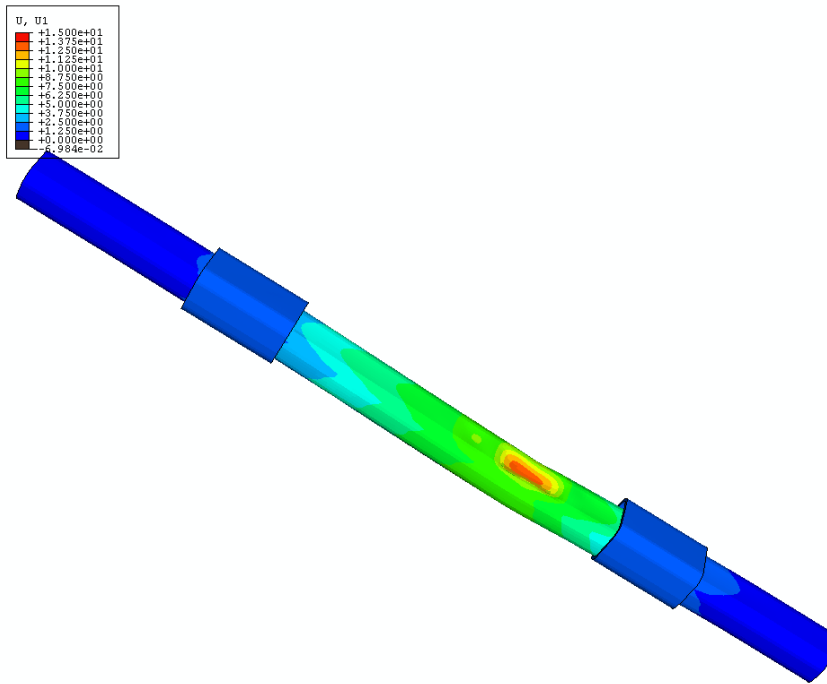


Abb. 19 T-IHU Demonstratorbauteil, Ausbildung einer Falte beim Schließen der Werkzeuge

Diese Falte ist reversibel, allerdings kommt es in diesem Bereich nicht zum Anliegen des Profils an die Werkzeuge (vgl. Abb. 20).

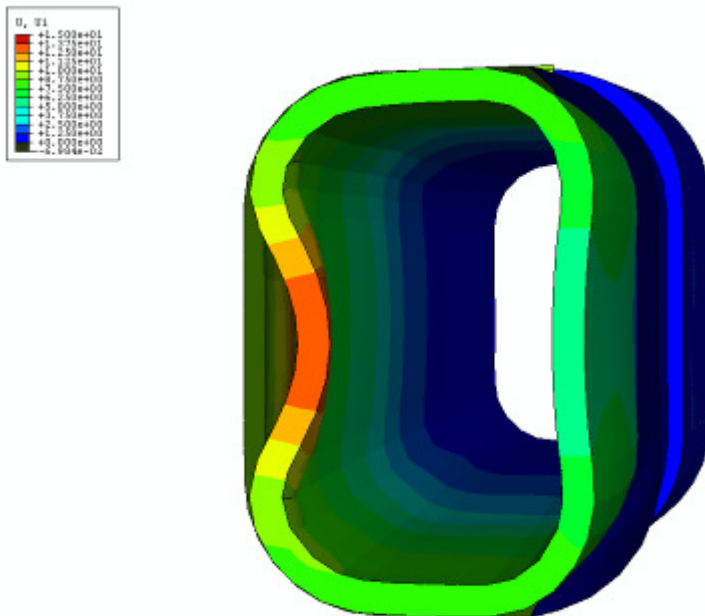


Abb. 20 T-IHU Demonstratorbauteil, Ausbildung einer Falte beim Schließen der Werkzeuge

Bei dem nachfolgenden IHU-Prozess sind plastische Vergleichsdehnungen von bis zu 74% zu verzeichnen,

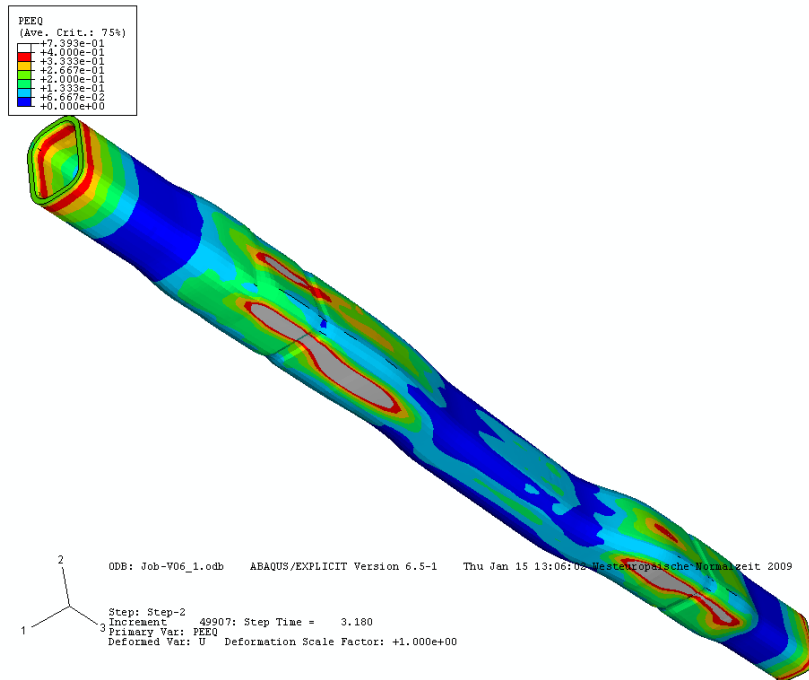


Abb. 21 T-IHU Demonstratorbauteil, Auftreten von Reißern beim Druckaufbau

so dass mit dem Auftreten von Reißern (vgl. Abb. 21, kritische Bereiche weiß markiert) zu rechnen ist. An zwei ausgewählten Schnitten

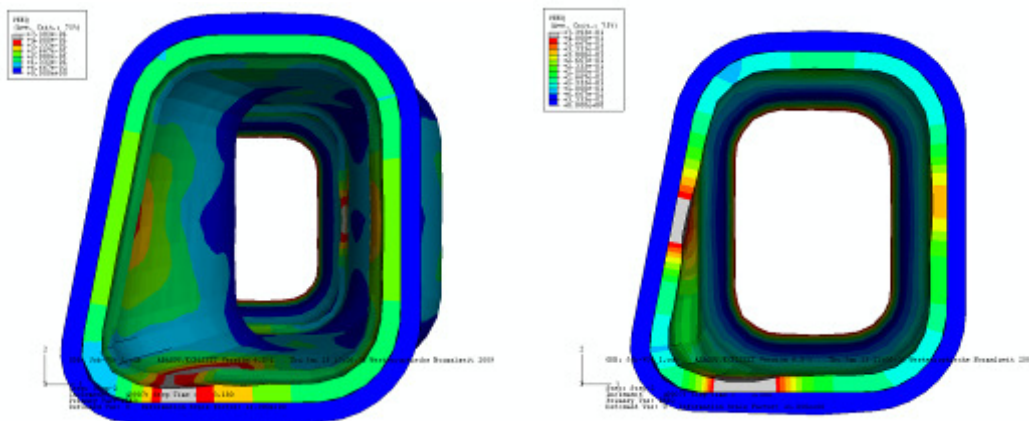


Abb. 22 T-IHU Demonstratorbauteil, Auftreten von Reißern beim Druckaufbau (zwei ausgewählte Schnitte)

ist deutlich eine Wandstärkenreduktion in den kritischen Bereichen zu erkennen (vgl. Abb. 22). Konstruktive Veränderungen mit dem Ziel einer Reduzierung der Umfangserweiterung sind folglich nicht vermeidbar. Ein erster Änderungsversuch hat noch nicht den erwünschten Erfolg gebracht (vgl. Abb. 23),

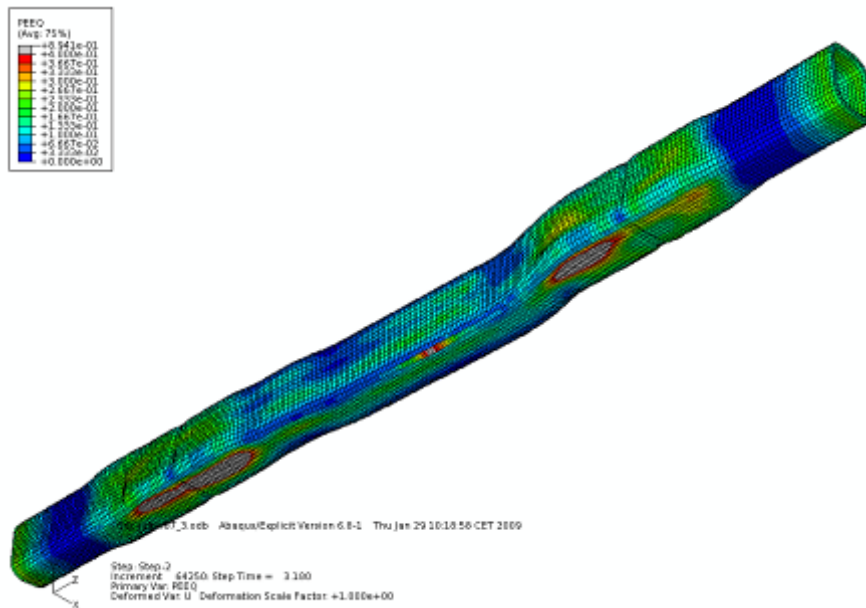


Abb. 23 T-IHU Demonstratorbauteil (neue Werkzeuggeometrie)

zwar treten in den oberliegenden Bereichen keine Reißer mehr auf, die Seitenbereiche bleiben jedoch nach wie vor grenzwertig. Da bei den isothermen Simulationen die Materialzuführung in den Nachschiebebereichen unterbewertet wird, werden die weiteren Iterationsschleifen nicht-isotherm geführt werden.

Die Simulationsergebnisse bildeten die Grundlage der Bauteilkonstruktion in Verbindung mit der Entwicklung der Werkzeugaktivteilflächen im Projekt E2 Bauteilentwicklung.

Die FEM-Simulation des temperierten Innenhochdruck-Umformprozesses erfolgte unter den Temperaturannahmen des Halbzeuges von 250 °C und der Käfige (Halter oben und unten) von 300 °C

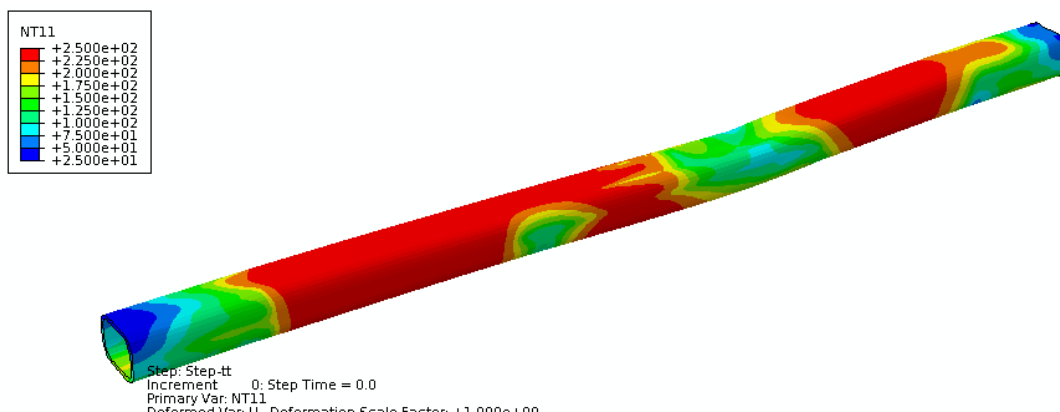


Abb. 24 T-IHU Demonstratorbauteil (Temperaturverteilung nach Schließen der Werkzeuge)

Es wurde davon ausgegangen, dass das Halbzeug mit einer Temperatur von 250°C in Werkzeuge (25°C) eingelegt und dann unter Schließen der Werkzeuge gebogen wird.

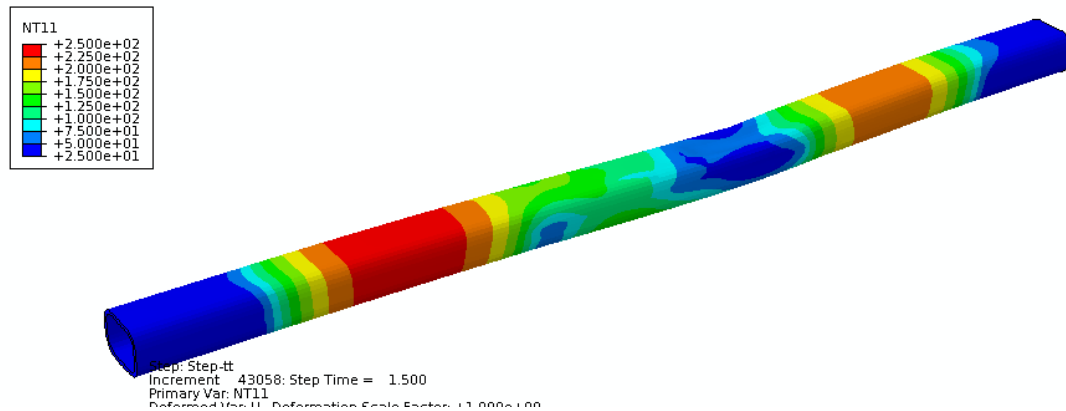


Abb. 25 T-IHU Demonstratorbauteil (Temperaturverteilung nach lokalem Aufheizen)

Das lokale Aufheizen erfolgte anschließend über die Käfige (300°C). Die Temperaturverteilung stellte sich den technologischen Anforderungen gemäß ein. Bei einer nachfolgenden Optimierung der Druck/Nachschiebeweg Verläufe (hier 210 bar bei 20 mm) konnte das Gutteilfenster nicht erreicht werden. Auf Grund der Ergebnisse dieser Simulationen erfolgte eine weitere Optimierung der T-IHU-Bauteilgeometrie, wobei die Umfangserweiterungen des Bauteiles außerhalb der Käfige in Richtung Bauteilmitte noch deutlicher reduziert und die Strecke weiter verkürzt wurde.

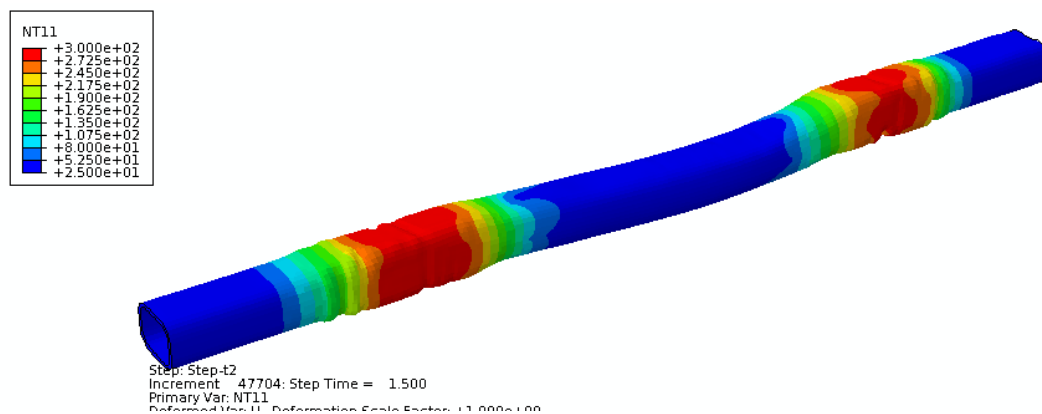


Abb. 26 T-IHU Demonstratorbauteil (Temperaturverteilung am Ende des Nachschiebens)

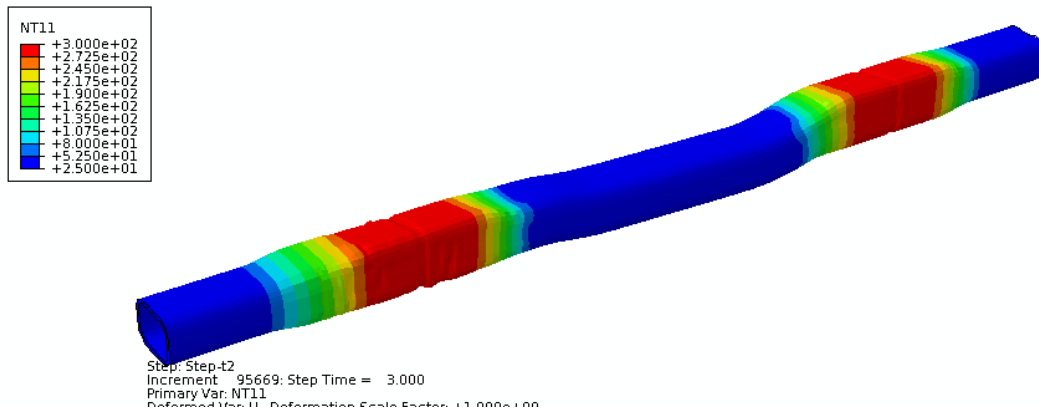


Abb. 27 T-IHU Demonstratorbauteil (Temperturverteilung im ausgeformten Teil)

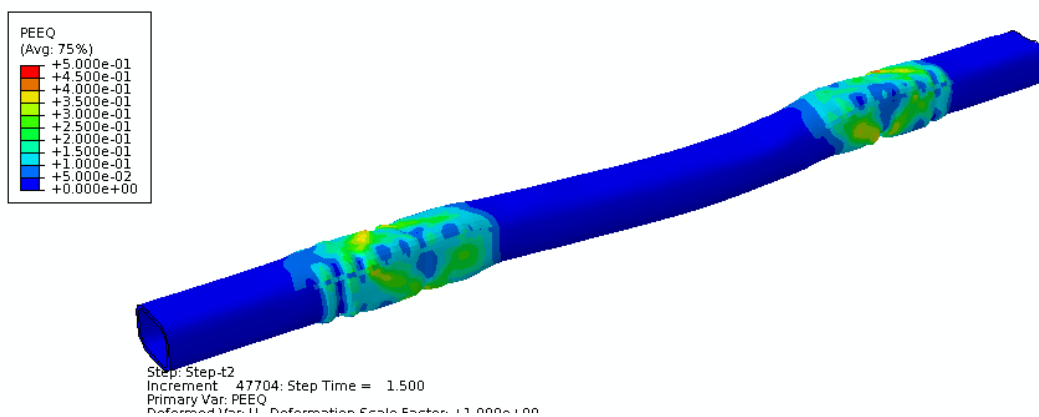


Abb. 28 T-IHU Demonstratorbauteil (plastischer Vergleichsumformgrad am Ende des Nachschiebens)

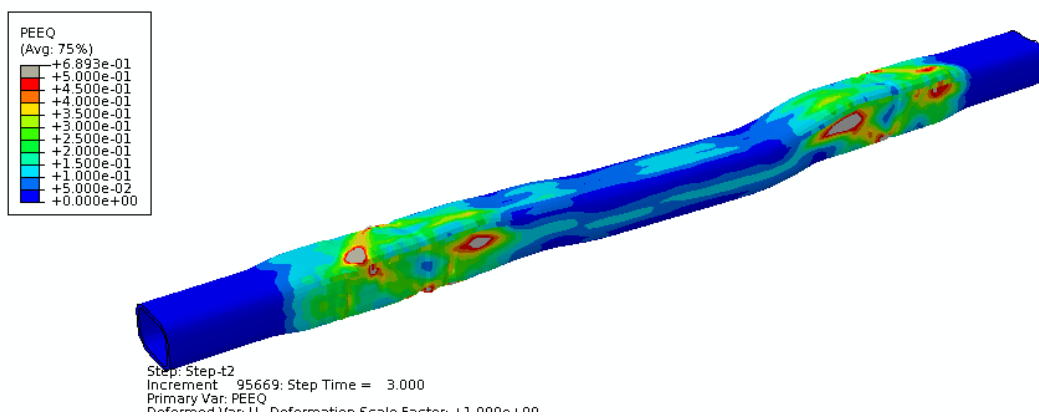


Abb. 29 T-IHU Demonstratorbauteil (plastischer Vergleichsumformgrad im ausgeformten Teil)



Abb. 30 T-IHU Demonstratorbauteil (Temperturverteilung im ausgeformten Teil)

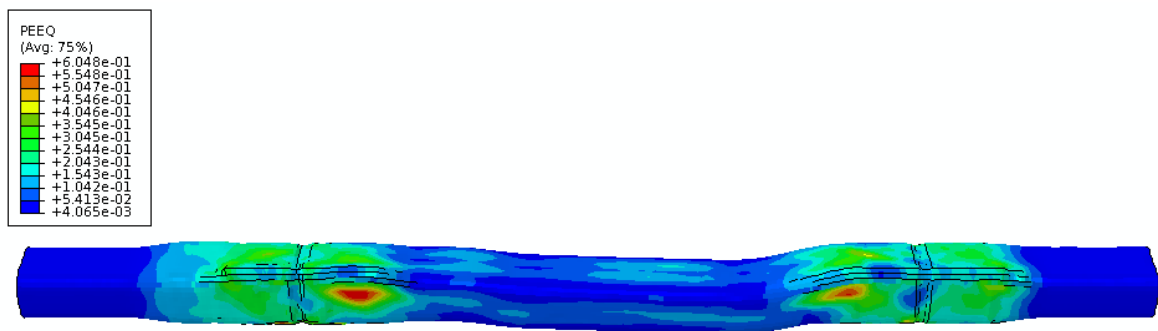


Abb. 31 T-IHU Demonstratorbauteil (plastischer Vergleichsumformgrad im ausgeformten Teil)

Im Ergebnis der Simulation stellt sich der T-IHU Prozess aber weiterhin als kritisch dar.

Die Hexabend-Biegetechnologie ermöglicht die Integration einer werkzeugungebundenen Erwärmung, wodurch die erforderlichen Temperaturgradienten sehr gut einstellbar sind. In der Simulation wurde diese Fragestellung vorerst durch eine Erwärmung von innen approximiert. Das sich einstellende Biegeergebnis zeigt dass die Hexabend-Biegetechnologie prinzipiell mit ABAQUS abgebildet werden kann.

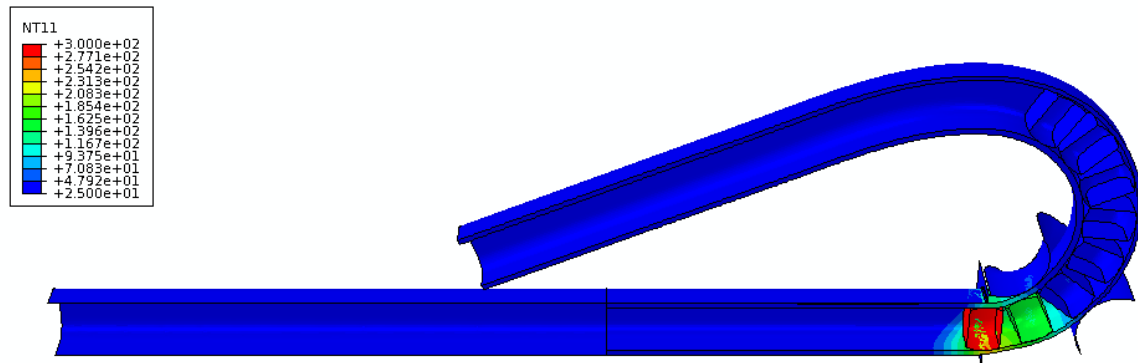


Abb. 32 Biegeteil (Temperaturverteilung)

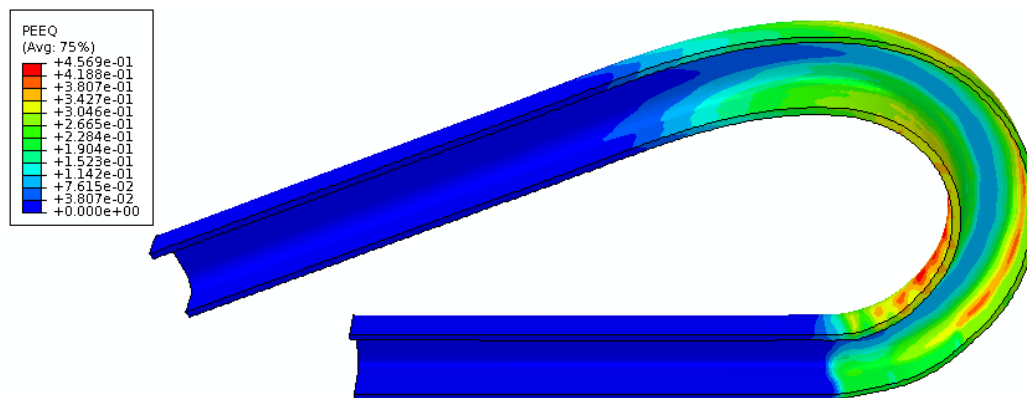


Abb. 33 Biegeteil (plastischer Vergleichsumformgrad)

Ausgehend von der Konstruktion der Biegematrize und der finalen Biegelinie werden anhand der Maschinenkinematik der vorgesehenen HEXABEND-Biegemaschine im Weiteren die Parameter für die Steuerung der Werkzeugbewegung in der Simulation abgeleitet.

Die in Abb. 16 dargestellten Ergebnisse zur Machbarkeit des Tiefziehprozesses für das Tür-Innenteil basieren auf der Annahme isothermer Verhältnisse. Ergänzend dazu wurde eine Simulation dieses Prozesses unter Annahme nicht isothermer Verhältnisse mit einer Niederhalter- und Matrizentemperatur von 250 °C und einer Stempeltemperatur von 25 °C durchgeführt. In Abb. 34 ist die Temperaturverteilung, die sich am Ende des Tiefziehprozesses einstellt visualisiert. Bezüglich der Machbarkeit des Prozesses müssen keine der in der isothermen Simulation gewonnenen Aussagen relativiert werden. Die wie erwartet extrem hohe Rechenzeit (420 Stunden) erlaubt die hier gewählte Modellierung nur für stichprobenartige Tests.

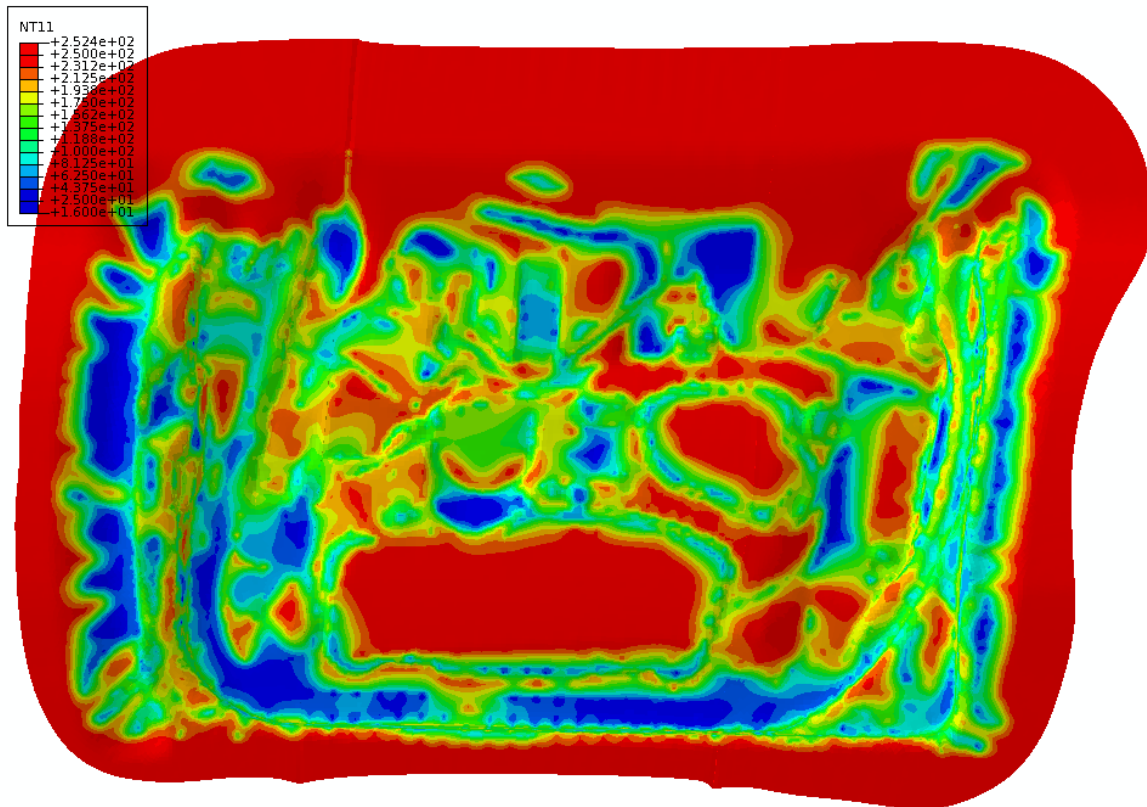


Abb. 34 Tür-Innenteil, Machbarkeitsuntersuchung, Temperaturverteilung am Ende des Ziehprozesses

Zur Berücksichtigung des identifizierten Materialverhaltens von Magnesium-Knetlegierungen in der zum Einsatz kommenden Simulationssoftware wurden ein gemischt elastisch-plastisches / elastisch-viskoplastisches Materialmodell sowie ein effizienter Algorithmus zur Integration der Materialgleichungen aufgestellt und unter Nutzung einer Schnittstelle zu dem eingesetzten kommerziellen Programm (ABAQUS) implementiert. Der gewählte Radial-Return, mit Substepping zur Sicherung einer ausreichenden Genauigkeit zeigte allerdings bei stichprobenhaften Vergleichen mit verfügbaren experimentellen Ergebnissen aus im Rahmen des Verbundprojektes durchgeführten Umformprozessen keinen Gewinn in der Abbildungsgenauigkeit, so dass auch bedingt durch die erforderlichen hohen Rechenzeiten diese Vorgehensweise als nicht zielführend eingeschätzt werden musste, und die standardmäßig implementierten, weniger komplexen Materialmodelle als ausreichend klassifiziert werden konnten.

Die Numerische Simulation von ausgewählten Herstellungsprozessen für Teile aus Magnesiumknetlegierungen wurde mit Untersuchungen zur Ermittlung des für das Umformergebnis optimalen Temperaturgradienten im Halbzeug zum Abschluss gebracht.

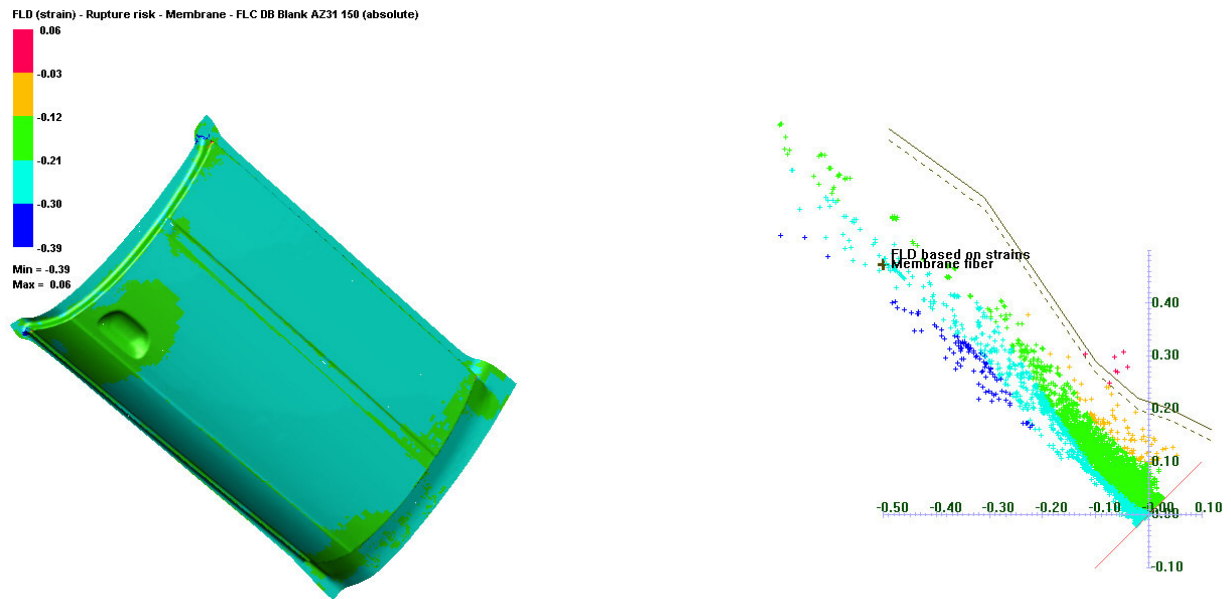


Abb. 35 Tür-Außenteil (150 °C), Machbarkeitsuntersuchung; Dehnungsreserve keine, Grenzformänderungsschaubild (rechts)

Es konnte gezeigt werden, dass bei einer Werkzeugtemperatur von 150 °C kein Gutteil dargestellt werden kann. Bei einer Werkzeugtemperatur von 200 °C sagt die Simulation eine Dehnungsreserve von ca. 7% voraus.

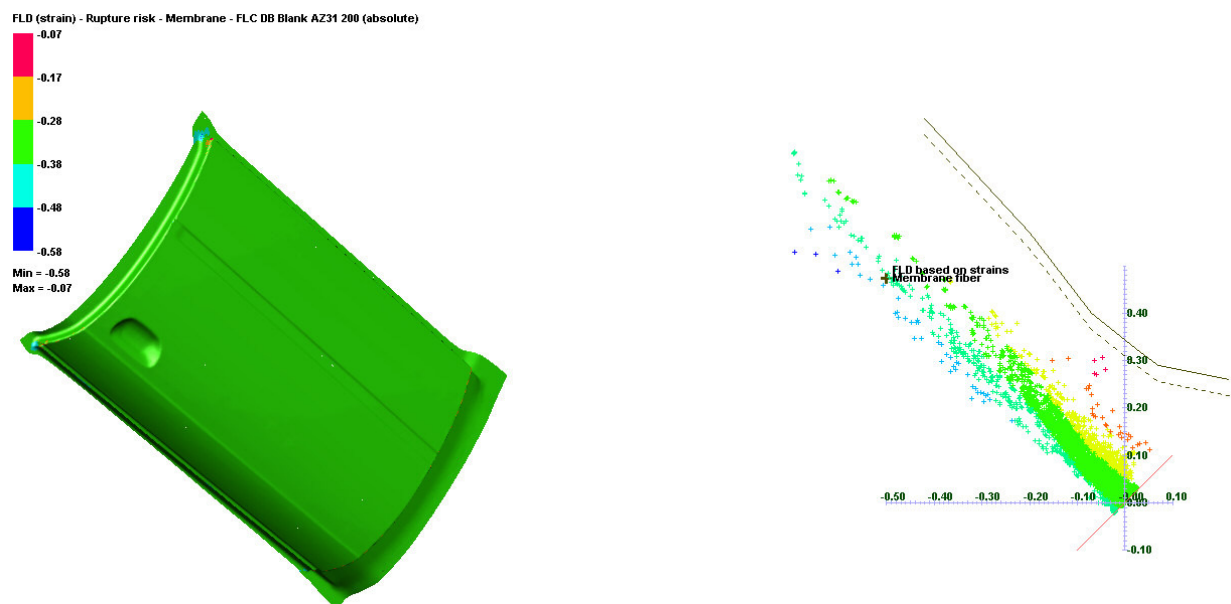


Abb. 36 Tür-Außenteil, Machbarkeitsuntersuchung; Dehnungsreserve ca. 7%, Grenzformänderungsschaubild (rechts)

Diese Prozessparameter sind als kritisch einzuschätzen, im Einklang damit steht auch, dass bei einer im Ziehprozess gemessenen Temperatur von 190 °C keine Gutteile erhalten werden konnten.

Durch die FEM- Simulation des temperierten Umformprozesses im Teilprojekt konnten im Vorfeld der Durchführung der Experimente und auch begleitend dazu der Prozess, die Prozessparameter, das Temperaturregime und das zu erwartende Ergebnis in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie, der Werkzeugtemperatur und der Temperaturverteilung im Werkzeug abgebildet und damit das Prozessfenster eingeschränkt werden. Damit konnte zielgerichteter bei der Versuchsdurchführung vorgegangen und die große Anzahl von Versuchen auf ein realisierbares Maß reduziert werden.

Auswertung und Systematisierung der Ergebnisse

Die numerische Simulation von temperierten Umformprozessen auf der Grundlage eines im Teilprojekt V 3.1.1 „Kennwertermittlung“ entwickelten komplexen Datensystems zur Beschreibung des Werkstoff- und Umformverhaltens von ausgewählten Magnesium-Legierungen erfolgte in der vorgestellten Form erstmalig und ist sowohl aus simulationstechnischer als auch wissenschaftlicher Sicht eine anspruchsvolle Fragestellung.

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einsatz von Mg-Legierungen im Rahmen eines energie- und ressourcenschonenden Leichtbaus im Automobilbau vor allem dann vorangetrieben werden kann, wenn die Prozessoptimierung auf der Basis abgesicherter Materialmodelle und unter Verwendung hochgenau vermessener Materialdaten erfolgen kann.

Durch die FEM- Simulation des temperierten Umformprozesses im Teilprojekt wurden im Vorfeld der Durchführung der experimentellen Versuche der Prozess, die Prozessparameter, das Temperaturregime und das zu erwartende Ergebnis in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie, der Werkzeugtemperatur und der Temperaturverteilung im Werkzeug abgebildet und damit das Prozessfenster eingeschränkt. Damit konnte zielgerichteter bei der Versuchsdurchführung vorgegangen und die z.Z. sehr große Anzahl von Versuchen auf ein realisierbares Maß reduziert werden.

Von den im Verbundprojekt untersuchten am Markt gebräuchlicher Magnesiumumformprozessen wurden das Tief- und Streckziehen (1.3), das Hydroforming (1.4) und das Rohrbiegen (1.5) bezüglich ihrer Anforderungen an die numerische Simulation untersucht. Für die Machbarkeitsuntersuchung des Tür-Innenteils wurden Autoform (Abb. 14), PAM-STAMP (Abb. 16) und ABAQUS (Abb. 34) eingesetzt. Bezüglich Abbildungstreue und erforderlicher Rechenzeit kann auf dieser Basis eingeschätzt werden, dass PAM-STAMP als geeignet erscheint. Bei den Prozessen Hydroforming (Abb. 31) und Rohrbiegen (Abb. 33) erweist sich von den betrachteten FEM-Programmen nur ABAQUS als geeignet.

Zur Gestaltung der Aktivteiflächen der Demonstratorwerkzeuge (Türinnen- und – außenblech) wurden virtuelle Versuchsreihen zur Ermittlung von Gutteilfenstern in Abhängigkeit von der Temperatur, Werkzeugradialen und Prozessgeschwindigkeiten im Zusammenhang mit der Ermittlung umformtechnischer/technologischer Grenzen mit PAM-STAMP durchgeführt. Die Formänderungsuntersuchungen unter Beachtung lokal erzielbarer optimaler Umformgrade bildeten die Basis für die Optimierung der Aktivteilgeometrien. Die erforderlichen Änderungen der Werkzeuggeometrie (Tür-Innenteil) wurden auf der Basis von Tiefziehsimulationen detektiert. Nach mehreren Iterationsschleifen konnte die in Abb. 16 dargestellte Geometrie als ziehbar eingestuft werden. Auch für das Tür-Außenteil konnte auf diese Weise eine ziehbare Geometrie detektiert werden (Abb. 17). Bei einer, den Erfordernissen des Falzprozesses angepassten Teilegeometrie stellten sich die Umformreserven jedoch geringer als bei der ursprünglich angenommenen Geometrie (vgl. Abb. 18) dar. Die Umformverhältnisse erscheinen aber auch nicht als grenzwertig, so dass nach Abstimmung mit allen betroffenen Projektpartnern die Werkzeuge für Türinnen- und aussenteil im September 08 freigegeben werden konnten. Untersuchungen zur Minimierung der erforderlichen Umformtemperaturen zeigten, dass bei einer Werkzeugtemperatur von 150 °C (Abb. 35) kein Gutteil dargestellt werden kann. Bei einer Werkzeugtemperatur von 200 °C (Abb. 36) sagt die Simulation eine Dehnungsreserve von ca. 7% voraus. Diese Prozessparameter sind als kritisch einzuschätzen, im Einklang damit steht auch, dass bei einer im Ziehprozess gemessenen Temperatur von 190 °C keine Gutteile erhalten werden konnten.

Zum Hydroforming erfolgte eine komplexe numerische Bestimmung des Umformverhaltens bei Umform-Temperaturen bis ca. 300 °C. Die Ermittlung des Zeit-Temperaturverlaufs im lokal erwärmten Bauteil erfolgte mit dem Ziel der Bestimmung der minimal anwendbaren Umformtemperatur unter Erfüllung umformtechnischer und funktionaler Forderungen und Randbedingungen. Die Simulationsergebnisse bildeten die Grundlage der Bauteilkonstruktion in Verbindung mit der Entwicklung der Werkzeugaktivteiflächen im Projekt E2 Bauteilentwicklung. Die FEM-Simulation des temperierten Innenhochdruck-Umformprozesses erfolgte unter den Temperaturannahmen des Halbzeuges von 250 °C und der Käfige (Halter oben und unten) von 300 °C. Es wurde davon ausgegangen, dass das Halbzeug mit einer Temperatur von 250 °C in Werkzeuge (25 °C) eingelegt und dann unter Schließen der Werkzeuge gebogen wird. Das lokale Aufheizen erfolgte anschließend über die Käfige (300 °C). Die Temperaturverteilung stellte sich den technologischen Anforderungen gemäß ein. Bei einer nachfolgenden Optimierung der Druck/Nachschiebeweg Verläufe (hier 210 bar bei 20 mm) konnte das Gutteilfenster nicht erreicht werden. Auf Grund der Ergebnisse dieser Simulationen erfolgte eine weitere Optimierung der T-IHU-Bauteilgeometrie, wobei die Umfangserweiterungen des Bauteiles außerhalb der Käfige in Richtung Bauteilmitte noch deutlicher reduziert und die Strecke weiter verkürzt wurde. Im Ergebnis der Simulation stellt sich der T-IHU Prozess aber weiterhin als kritisch dar (Abb. 31).

Die Hexabend-Biegetechnologie ermöglicht die Integration einer werkzeugungebundenen Erwärmung, wodurch die erforderlichen Temperaturgradienten sehr gut einstellbar sind. In der Simulation wurde diese Fragestellung vorerst durch eine Erwärmung von innen approximiert. Das sich einstellende Biegeergebnis zeigt dass die Hexabend-Biegetechnologie prinzipiell mit ABAQUS abgebildet werden kann (Abb. 33).

Mit dem Teilprojekt Simulation konnte ein Beitrag zur Lösung der Probleme von potenziellen Kunden des Bündnisses durch:

- Machbarkeitsstudien für komplexe Blechformteile
- Werkzeug und Prozessoptimierungen
- Untersuchung neuer Technologien auf ihre Anwendbarkeit
 - Temperierte Umformung
 - Temperierte Wirkmedienumformung

mit dem Ziel der Erweiterung der Umformgrenzen von Magnesiumhalbzeugen, wie z.B. Strukturbauteile im Automobilsektor, und die Verfahrensanpassungen für Magnesiumbauteile erbracht werden.

Weiterführender Forschungsbedarf besteht insbesondere auf materialtheoretischem Gebiet. Obwohl die in einer frühen Projektphase untersuchten komplexen Materialmodelle bei stichprobenhaften Vergleichen mit verfügbaren experimentellen Ergebnissen aus im Rahmen des Verbundprojektes durchgeführten Umformprozessen keinen Gewinn in der Abbildungsgenauigkeit zeigten, so dass auch bedingt durch die erforderlichen hohen Rechenzeiten diese Vorgehensweise als vorerst nicht zielführend eingeschätzt werden musste, und die standardmäßig implementierten, weniger komplexen Materialmodelle als ausreichend klassifiziert werden konnten, sind weiterhin speziell für die FEM adäquate Materialmodelle zu entwickeln, um in Zukunft die neuen Materialien der Magnesiumgruppe noch besser abbilden zu können. Hervorgehoben sei auch die Synergie zwischen hochgenauer Materialprüfung, der Verwendung adäquater Materialmodelle und dem breiten Spektrum von prozessorientierten Teilprojekten im Verbundprojekt Magnesium-Einsatz ein hohes Innovationspotential erwächst.

1.3 Teilprojekt V 3.1.3 „Tief und Streckziehen“

Auf Basis eines Literaturstudiums, das wurde zu erwartende Spektrum technologischer Parameter in Zusammenarbeit mit KWD und SZW festgelegt. Diese bestimmten im weiteren Projektverlauf die Auslegung der Werkzeuge und die Konstruktion der Bauteile.

Neben der in der Literatur beschriebenen optimalen Umformtemperatur im Bereich zwischen 200...300 °C, wurde ein minimaler Radius für Bauteilgeometrien von 5 mm festgelegt, der Ziehspalt wurde mit mindestens $1,3 \times s_0$ bestimmt.

Grundlagenuntersuchungen

Für die Grundlagenuntersuchungen wurde am Versuchswerkzeug werkzeugseitig von einer elektrischen Erwärmung ausgegangen, während die Erwärmung Platinen, aufgrund ihrer geringen Größe, in vorhandenen Öfen stattfand.

Das Versuchswerkzeug wurde in Zusammenarbeit mit SWZ entwickelt und gebaut. Um realitätsnahe Bedingungen zu schaffen, wurde das in der folgenden Abbildung dargestellte Werkzeug ausgeführt. Deutlich ist die Erwärmung der Aktivteile durch elektrische Heizpatronen zu erkennen.

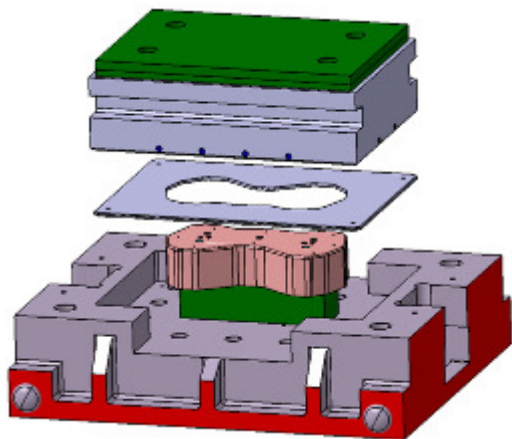


Abb. 37 Konstruktion und ausgeführtes Versuchswerkzeug

Die Aktivteilflächen bildeten die Grundlagen für die FE-Begleitung (V 3.1.2) dieses Arbeitspunktes.

Unter Nutzung der durch MgF zur Verfügung gestellten Charge des Versuchswerkstoffes AZ 31 wurden Versuche zur generellen Umformung durchgeführt. Die Basis bildeten die FEM-Ergebnisse zum Prozess.

Die Ergebnisse sind beispielhaft in Abb. 38 dargestellt.



Abb. 38 Umgeformte Versuchsbauteile

Durch Optimierungen im Prozess gelang es, ein Versuchsbauteil mit einer Ziehtiefe von mehr als 100 mm herzustellen, wichtige Prozessschritte sind in Tab. 7 dargestellt. In Dies erfolgte primär durch Zuschnittsänderungen, während die anderen Versuchsbedingungen konstant beibehalten wurden.

Das optimierte Versuchsteil wurde zum 1. TEMAK Workshop an der WHZ als Ergebnis des Teilprojektes vorgestellt.

F _N gesamt	Ziehtiefe	Stößelkraft	Schmierung	Zuschnitt	90° Ecken	Zustand	Temperatur (°C)		
							Anlage	WZ außen	WZ innen
kN	mm	kN		mm					
56	20	106	SM	370 x 580	-	Reißer	280	240	230
56	33	106	SM + Folie	370 x 580	-	i.O.	280	240	230
56	38	115	SM + Folie	390 x 600	-	i.O.	280	240	230
56	38	115	SM + Folie	390 x 600	-	i.O.	280	240	230
56	48	125	SM + Folie	390 x 600	-	i.O.	280	240	230
56	88	126	SM + Folie	430 x 640	-	i.O.	280	240	230
56	88	125	unbekannt	430 x 640	-	Reißer	280	240	230
56	103	160	SM + Folie	470 x 740	50	i.O.	280	240	230

Tab. 7 Relevante Schritte bei der Herstellung des Versuchsbauteils

Die Gegenüberstellung der FEM-Ergebnisse und der Versuchsbedingungen (Tab. 8) für Rechteckplatten zeigt, dass hier bzgl. der FEM noch Optimierungsbedarf besteht. Durch eine Optimierung des Zuschnittes (90° Ecken, 50 mm) konnte die Ziehtiefe bis auf 103 mm gesteigert werden. Somit kann von Reserven für den realen Prozess bei einer i.O. FEM ausgegangen werden.

	FEM	Versuch
Temperatur (Werkzeug)	250 °C	220 °C
Stempelkraft	86,60 kN	160 kN
Niederhalterkraft	56,42 kN	56 kN
Gegenhalterkraft	4,34 kN	5 kN
erreichte Ziehtiefe	47,1 mm	88 mm

Tab. 8 Gegenüberstellung FEM und Versuch

In Fortführung der Versuche wurden lasergeschweißte Platinen (Bereitstellung durch V4) unter Nutzung der bisherigen Versuchsergebnisse umgeformt. Es gelang ein Bauteil mit einer fehlerfreien Schweißnaht bis auf 88 mm tiefzuziehen.



Abb. 39 Umgeformtes Bauteil mit Laserschweißnaht

Die Ergebnisse der Grundlagenversuche wurden sowohl der FEM zur Verbesserung der verwendeten Modelle als auch der Werkzeugkonstruktion zur Verfügung gestellt und führten zu entsprechenden Änderungen der Konstruktion des Demonstrators (s. E2).

Die Maßhaltigkeit des Ziehtells vor dem Beschnitt ist sehr genau. Abweichungen vom 90°-Zargenwinkel nach Öffnen der Werkzeuges und somit der Freisetzung der inneren Spannungen sind fast nicht vorhanden, was nicht zuletzt auch auf die temperierte Umformung zurückzuführen ist. Gleiches gilt für den umlaufenden Radius am Stempel (R 5), der äußerst genau abgebildet wird ($+s_0 = 1,24 \text{ mm}$). In Abb. 40 sind schematisch die ermittelten Durchschnittswerte beider Messwerte für Versuchsbau- teile mit einer Ziehtiefe über 60 mm dargestellt.

Sinnvolle Aussagen zum Verhalten nach dem Fertigteilbeschnitt können erst nach Ausführung der Demonstratorwerkzeuge und der zugehörigen Bauteile getroffen werden.

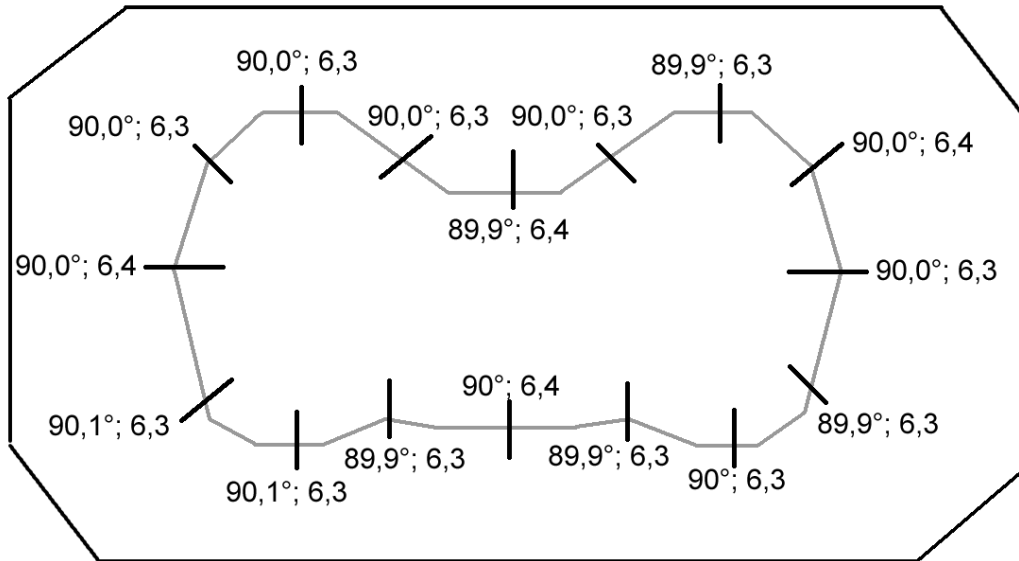


Abb. 40 Maßhaltigkeit der Bauteile

Die Oberflächenqualität ist bedingt durch die eingesetzten Schmierstoffe unmittelbar nach dem Umformprozess nicht für Außenhautteile geeignet. Reinigungsprozesse, wie sie bereits heute im Automobilbau für andere Bauteile üblich sind, können hier Abhilfe schaffen bzw. ist dieser Arbeitspunkt u.a. Bestandteil der Untersuchungen des Projektes V5.

Ein Werkzeugverschleiß konnte während der Grundlagenuntersuchungen bisher nicht festgestellt werden (insgesamt 60 Versuchsteile). Dies ist insbesondere in Bezug auf die unbearbeitet gezogenen Schweißnähte (insgesamt 10 Versuchsteile) interessant. Im Demonstratorwerkzeug werden die verwendeten Formplatinen aber aus Sicherheitsgründen auf Ebenheit der Schweißnaht überprüft und bei Bedarf abgeschliffen. Für Serienwerkzeuge empfiehlt sich die Verwendung von Werkzeugwerkstoffen, die sich für den Bau temperierter Werkzeuge bewährt haben.

Nachdem generell die Machbarkeit tiefgezogener laseregeschweißter Magnesiumblech nachgewiesener wurde (Abb. 39), werden zurzeit Versuche mit Tailored Blanks unterschiedlicher Blechdicken durchgeführt, wie sie später am Innenteil zur Anwendung kommen sollen. Diese beeinflussen die Detaillierung der auszuführenden Werkzeuge im Endstand der Fertigung (Tuschieren) und haben keine Einflüsse auf die Werkzeugfertigung an sich.

Entwicklung Demonstratorwerkzeug

In Zusammenarbeit mit KWD wurde in einer frühen Projektphase eine Analyse des relevanten Teilespektrums durchgeführt. Als Ergebnis wurde als Demonstrator eine Autotür festgelegt, die durch ihren Aufbau die Möglichkeit bietet, innovative Umformtechnologien umzusetzen.

Dieser wurde in Bezug auf die Außenhaut und das Innenteil im Projektverlauf durch Hörmann (s. E2) konstruktiv umgesetzt und entsprechend den Lastfällen ausgelegt.

Die Außenhaut (Abb. 41) wurde dabei als Streckziehteil ausgeführt, wobei aufgrund der beschriebenen geringen Coillbreite eine Schweißnaht horizontal entlang der Zierleiste führt. Die Blechdicke beträgt dabei für beide Blechteile 1,2 mm.

Beachtet wurden bei der Konstruktion Anforderungen aus der Falztechnik, die durch die WHZ zugearbeitet wurden (s. V 3.2).

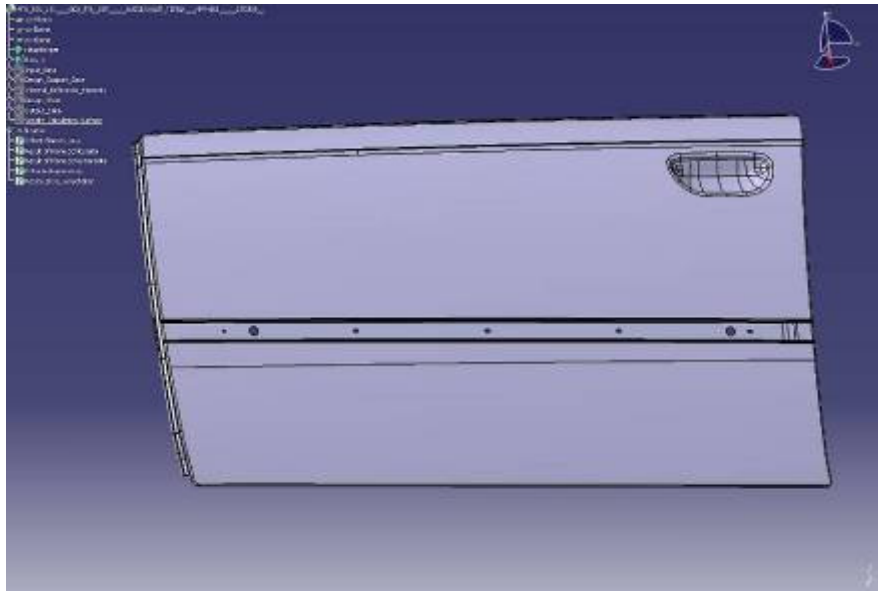


Abb. 41 Tür-Außenhaut (geplante Schweißnahtlage in Bereich der Zierleiste)

Das Innenteil (Abb. 42), welches aufgrund seiner Ziehtiefe und Komplexität sehr hohe Anforderungen an den Umformprozess stellt, wurde ebenfalls als Tailored Blank ausgeführt. Im Gegensatz zur Außenhaut wird hier ein Dicken sprung vorgenommen. Die beiden Bereiche Scharnier- und Schlossseite werden in der Materialstärke 2,0 mm ausgeführt, während der gesamte Innenbereich in 1,2 mm ausgeführt wird.

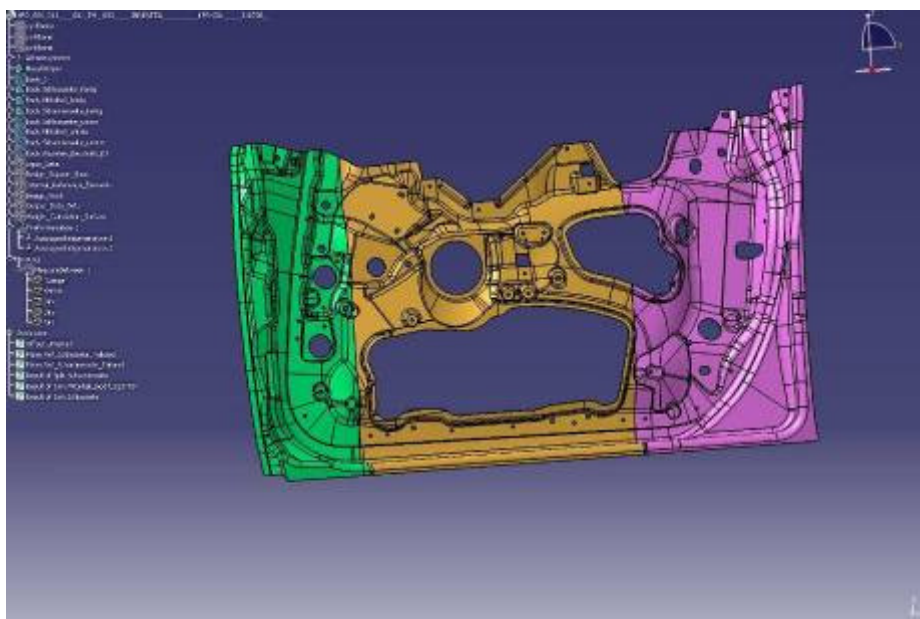


Abb. 42 Tür-Innenteil (mit geplanter Schweißnahtlage)

Das Demonstratorwerkzeug wird lt. derzeitigem Planungsstand durch innenliegende Kanäle stempelseitig erwärmt bzw. gekühlt. Die Matrize wird elektrisch beheizt und erwärmt indirekt durch längeres Schließen des Werkzeuges (entspricht nicht der späteren Serienlösung!) den Niederhalter mit. Dieses Vorgehen hat sich bei den Grundlagenversuchen bewährt und führt zu deutlich geringeren sicherheitstechnischen Aufwendungen im Versuchsfeldbetrieb.

Basierend auf den dargestellten Ergebnissen konnte die Bauteilgeometrie in Verbindung mit den zugehörigen Werkzeugaktivteiflächen (AP E2) für die Werkzeugkonstruktion und den Werkzeugbau freigegeben werden (V 3.4 SWZ).

Die Problematik der Erwärmung der Blechteile bzw. der Werkzeuge erfolgt weiterhin durch die Teilprojekte V 3.6 (induktive Erwärmung) und V 3.7 (elektromagnetische Erwärmung).

Im Projektverlauf wurde in Zusammenarbeit mit KWD und EMA-TEC die Werkzeugkonstruktion bei Siebenwurst Werkzeugbau unterstützt. Ein Zwischenstand vom Dezember 2009 ist in den folgenden Abb. 43 und Abb. 44 dargestellt.

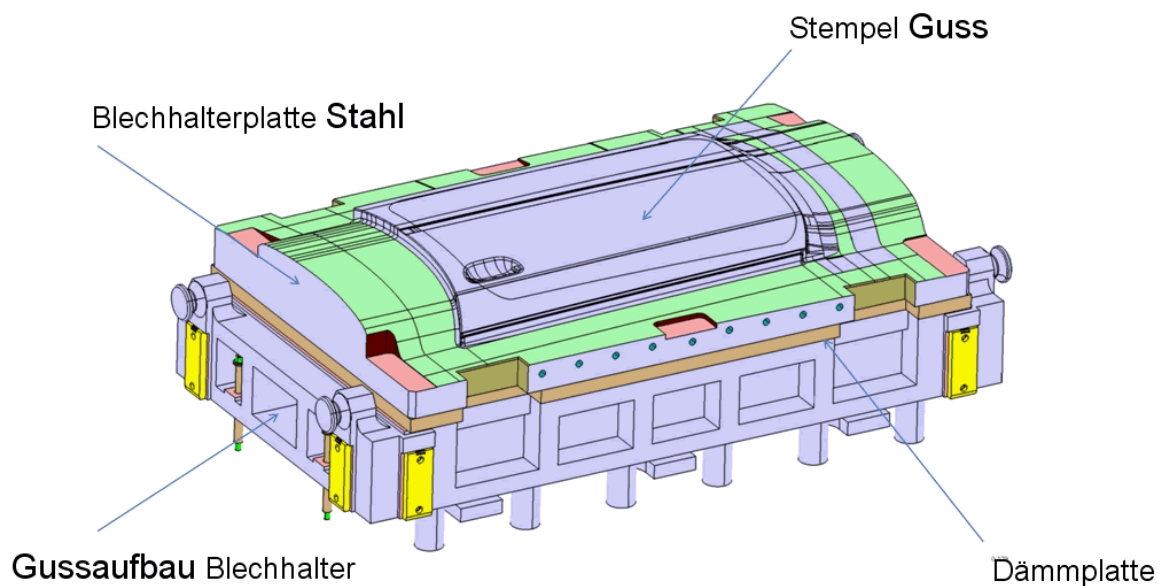


Abb. 43 prinzipieller Werkzeugaufbau Außenhaut

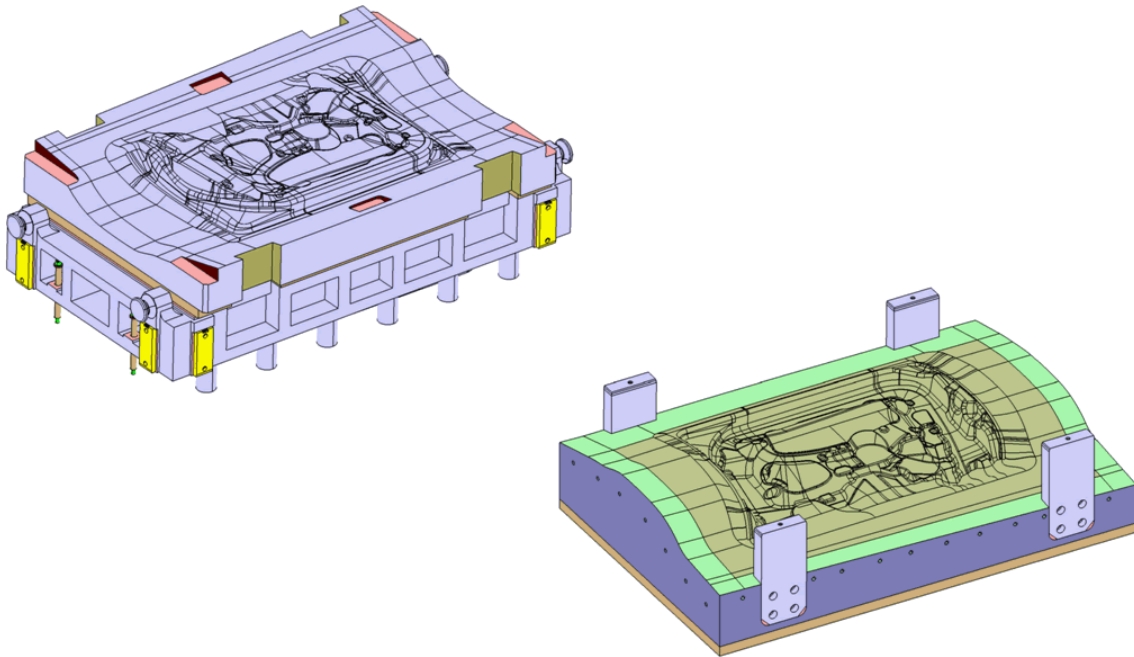


Abb. 44 prinzipieller Werkzeugaufbau Innenteil

Fortführende Grundlagenversuche

Im weiteren Verlauf kam es auf Grund der bisherigen unbefriedigenden Situation bzgl. der Oberflächenqualität zu weiterführende Arbeiten zur Findung eines serientauglichen Schmiermittels.

Auf Grund der im Projektverlauf bereits erlangten Ergebnisse scheidet herkömmliche, in der Kaltumformung genutzte Schmiermittel aus, da diese weder temperaturbeständig unter Serienbedingung nutzbar sind, noch bzgl. der Oberflächenqualität als rückstandsfrei einzuschätzen sind.

Zum Einsatz kamen aus diesem Grund hauptsächlich Neuentwicklungen verschiedener Hersteller im Bereich der Trockenschmierung verschiedener Schmiermittelhersteller, deren Arbeitsbereiche oberhalb 150 °C liegen.

Als besonders geeignet hat sich dabei das Produkt Drylub WA 03 TLT von RAZIOL Zibulla & Sohn GmbH erwiesen. Mit diesem unterhalb von 300 °C ungiftigen Trockenschmiermittel gelang es, bei einem Auftrag von ca. 1..2 g/m² einen kurzfristigen Trocknungsprozess (< 30 sec) an der Luft (!) zu erreichen. Die anschließende Erwärmung der Formplatinen auf Umformtemperatur und die Umformung der Versuchsgeometrien führte zu besseren Ergebnissen gegenüber der Nutzung der Teflonfolien.

Fehlerfreie Bauteile wurden bis zu einer Ziehtiefe von 120 mm ermöglicht, die Begrenzung ergab sich dabei aus der max. möglichen Werkzeugtiefe. Umgeformte Bauteile wurden an das VP 5 (Oberfläche) zur weiteren Auswertung übergeben.

Ebenfalls war durch den Einsatz eine Senkung der Betriebstemperatur des Werkzeuges um 10 °C auf nunmehr 210 °C möglich.

Durch den Projektpartner Benseler wurde dieser Schmierstoff trotz seiner guten umformtechnischen Eignung mittlerweile als nicht praxistauglich eingestuft, da die

enthaltenen Teflonpartikel das KTL-Bad zusetzen und somit durch die OEM abgelehnt wird.

Weitere Untersuchungen zur Findung eines geeigneten Schmierstoffes laufen in Zusammenarbeit mit Raziol.

Versuchsstand:

Die Umformversuche zu den Türblechteilen finden auf der TryOut des IWU Chemnitz statt. Die Presse verfügt über eine Stößelkraft von 16.000 kN und eine Kissenkraft von 5.300 kN. Die Magnesiumumformung erfordert wesentlich geringere Kräfte, zusätzlich wird der Niederhalter im Prozess distanziert gefahren.

Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in der Abb. 45 dargestellt. Neben dem Basiswerkzeug sind die elektrisch beheizten Aktivelemente Matrize und Niederhalter deutlich zu erkennen.



Abb. 45 beheiztes Werkzeug (Außenhaut)

Türaußenhaut:

Es konnten Türaußenteile (Abb. 46) hergestellt werden, die aus umformtechnischen Gesichtspunkten Gutteilen (Riss- und Faltenfrei) entsprechen. Die erkennbaren Verwerfungen der Oberfläche würden einem i.O. Teil in der Serienproduktion nicht genügen, sind jedoch mit den begrenzten Mittel des Projektes nicht eliminierbar. Der durch einen befragten Werkzeugmacher eines OEM geschätzte zeitliche Aufwand hierfür liegt bei ca. 6...12 Monaten incl. mehrerer Korrekturschleifen. Dies entspricht dem normalen Try-Out Prozess bei einem OEM, der im Projekt weder finanziell, noch zeitlich noch personell umsetzbar ist.



Abb. 46 Demonstrator Türaußenhaut (Ziehteil)

Die Schweißnaht, die bedingt durch die Platinengröße integriert werden musste, liegt konstant in der Mitte der Zierleiste. Sie würde im Endzustand durch eine Verkleidung abgedeckt werden. Ebenfalls zu erkennen sind die beiden RPS-Punkte, die im UT des Umformwerkzeuges markiert werden und der definierten Ausrichtung im späteren Falzprozess dienen.

Prozessbedingungen waren:

Matrize: 270 °C

Niederhalter: 275 °C

Stempel: nicht aktiv beheizt,

Oberflächentemperatur > 140 °C durch indirekte Beheizung

Schmiermittel: Teflonfolie

Das Bauteil wurde anschließend auf einer Vorrichtung mittels Laser fertigbeschnitten (s. Abb. 47) und stand in Folge der WHZ für Falzversuche zur Verfügung.

Deutlich zu erkennen sind neben dem in der Zarge beschnitten Falz, die Aussparungen in der Türgriffmulde und in der Zierleiste.



Abb. 47 Demonstrator Türaußenhaut (fertig beschnitten)

Türinnenteil

Wesentlich anspruchsvoller in jeglicher Beziehung (Werkzeugerwärmung, Platinenvorbereitung, Umformung, Beschnitt) ist die Herstellung des Innenteils.

Die Ausführung als 3-teiliges Tailored-Blank führte zu notwendigen Abstufungen im Werkzeug, die wiederum während des Umformprozesses die Schweißnähte mit Zug belasten. Diese führten letztendlich zu den in Abb. 48 sichtbaren Versagen der Schweißnaht und infolge dessen Rissen im inneren Bereich der Tür.



Abb. 48 Türinnenteil (mit nicht optimierter Werkzeuggeometrie gezogen)

Arbeiten an der Geometrie des Werkzeuges (Vergrößerung der Einlaufradien und der Übergänge an den Formelementen) führten zu einer deutlichen besseren Ausformung des Bauteils.

Prozessbedingungen waren:

Matrize: 280 °C

Niederhalter: 230 °C

Stempel: nicht aktiv beheizt,

Oberflächentemperatur > 140 °C durch indirekte Beheizung

Schmiermittel: Teflonfolie

Die unter diesen Bedingungen hergestellten Demonstratoren (Türinnenteil) sind in Abb. 49 dargestellt.

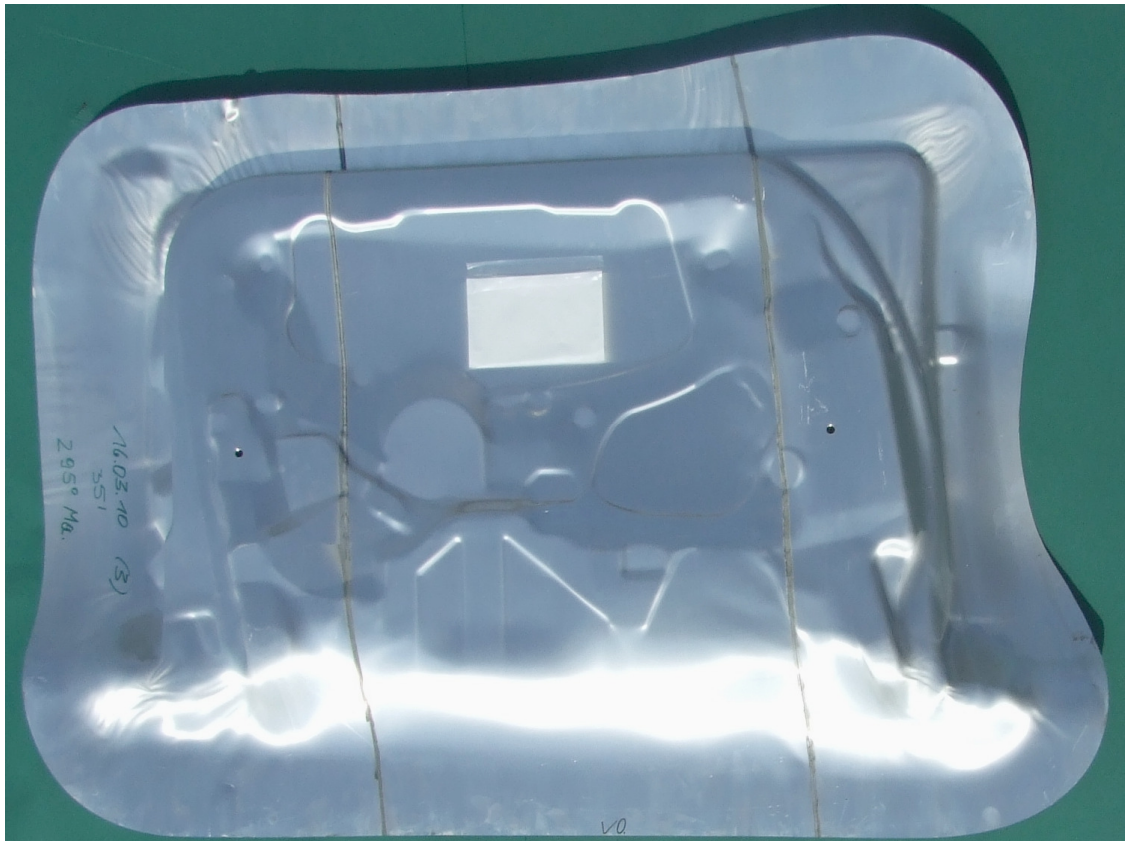


Abb. 49 Demonstrator Türinnenteil - Ziehteil

Das Bauteil wurde anschließend auf einer Vorrichtung mittels Laser fertigbeschnitten (s. Abb. 50) und stand in Folge der WHZ für den Zusammenbau zur Verfügung.



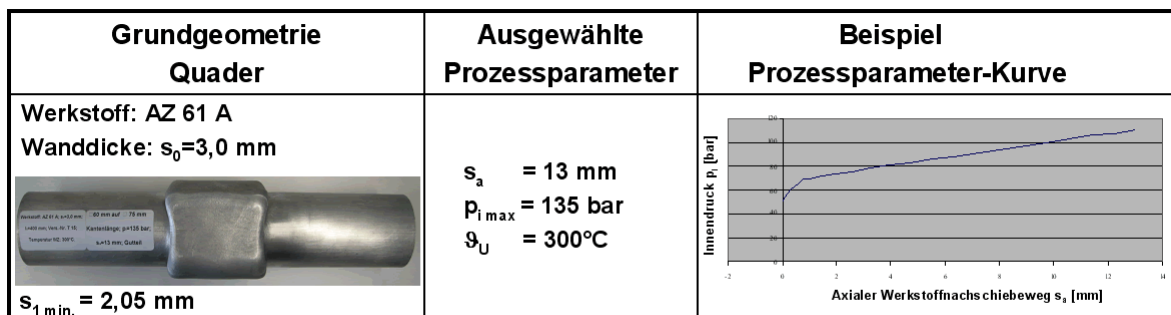
Abb. 50 Demonstrator Türinnenteil (fertig beschnitten)

1.4 Teilprojekt V 3.1.4 „Hydroformen“

Es wurden zwei Versuchsserien, die experimentelle Erprobung der umformtechnischen Verbindung des T-IHU-Bauteiles mit den Befestigungskäfig (für die spätere Montage des Türschlosses etc.), erfolgreich abgeschlossen. Bei diesen Versuchen sollte u. a. erprobt werden, inwieweit sich das Magnesiumausgangsprofil beim T-IHU-Prozess in und um diesen Käfig formen lässt. Weiterhin war für das spätere Demonstratorbauteil von Interesse, ob die formschlüssige Verbindung aufreichend hohe Kräfte aufnehmen kann, ohne dass es zu Positionsveränderungen dieses Halteelementes auf dem Magnesiumprofil kommt und ob und in welcher Höhe lokale Absteckungen im Bereich der „Haltenase“ im Inneren des Käfigs an dem Magnesiumbauteil auftreten.

Es wurden zunächst 60 Stck. kreisrunde Magnesiumausgangsrohre, Werkstoff: Magnesiumknetlegierung AZ 61 A, $d_0 = 60 \text{ mm}$, $s_0 = 3,0 \text{ mm}$, mittels T-IHU zu quaderförmigen Bauteilen mit einer Kantenlänge von 60 mm umgeformt.

Anschließend wurde, nach einem Glühprozess dieser umgeformten Teile, in einer ersten Versuchsserie, diese Quader weiter aufgeweitet, ohne „Käfig“, auf eine Kantenlänge von 75 mm (siehe Abb. 51). Dies entspricht einer Umfangserweiterung in dem quaderförmigen Bauteilbereich von 25%. Selbst bei einer maximalen Medientemperatur von 300°C konnten keine vollständig ausgeformten Bauteile erreicht werden. Der maximal aufbringbare Innendruck betrug 135 bar . Eine weitere Druckerhöhung um 5 bar führte sofort zum Bauteilversagen durch Reißen (siehe Abb. 51). Die Ursachen können in den behinderten axialen Werkstoffnachschub auf Grund der Vorformgeometrie, der Werkstoffverteilung sowie des eingeschränkten Werkstoffflusses in der Umformzone gesehen werden. In Vorstudien konnte mit dieser Bauteilgeometrie, bei Verwendung eines kreisrunden Ausgangsrohres ohne Zwischenformgebungen, Umfangserweiterungen bis 75% nachgewiesen werden. D. h., dass bei dem geplanten Prototyping des T-IHU-Demonstratorbauteiles die Aufweitung des rechteckförmigen Ausgangsprofils auf einen größeren, rechteckigen Querschnitt bei Umfangserweiterungen größer 25%, als kritisch einzustufen ist. Der Einfluss der ggf. veränderten Werkstoffeigenschaften durch den vorher erfolgten temperierten Umformprozess mit dem nachfolgenden Glühprozess wurde nicht näher analysiert.




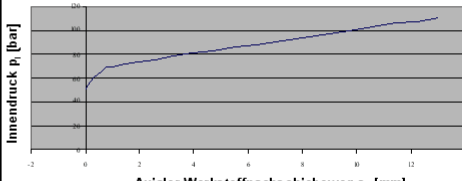
Ergebnis: Umformgrenze erreicht, 5 bar Innendruckerhöhung führt zu Bauteilreißen

Abb. 51 T-IHU-Umformversuche: Aufweitung eines Quaders mit Kantenlänge von 60 mm auf 75 mm , ohne „Käfig“

In einer zweiten Versuchsserie wurden die Quader mit einer Kantenlänge von 60 mm mit den „Käfigen“ (die Kantenlänge dieser betrug 75 mm), mit und ohne innerer „Bauteilhaltenase“ mittels T-IHU aufgeweitet. Hierzu wurden die, aus Vollmaterial mittels Drahterodieren hergestellten „Käfige“ (30 Stck.) in den Abmessungen: 75x75x2,5 mm mit einer Länge von 50 mm mit und ohne innerer „Befestigungsnase“ (Abb. 52), auf das Magnesiumprofil aufgesteckt, zusammen in das T-IHU-Werkzeug eingelegt und anschließend umgeformt.

Die Magnesiumbauteile konnten, auf Grund der geringeren Umfangsdehnung von 16,7% im Bereich des Käfigs, der Stützwirkung dieses Einlegeteiles sowie der Verkürzung der Länge des Umformbereiches der restlichen Umformzone, vollständig, bis zu Innendrücken von 500 bzw. 800 bar, ausgeformt werden. Der sich einstellende Bauteilradius im Inneren des Käfigs lag bei $R = 12$ mm. Bei einer Reduzierung des Radiuses müssten höhere Innendrücke oder höhere Temperaturen (Werkstofffestigung...) zu Verfügung stehen, die jedoch bei dieser Versuchsanlage (T-IHU mit flüssigen Wirkmedien) begrenzt waren.

Bei der geplanten Umformung des Demonstratorbauteiles mittels gasförmigen Umformmediums ist der Innendruck auf maximal 700 bar begrenzt. D. h. für die Umformung des geplanten Demonstratorbauteiles, dass die minimal ausformbaren Eckradien, in Abhängigkeit vom der Umformtemperatur, der Profilausgangswanddicke ($s_0 = 2,5$ mm) und des maximal erzeugbaren Innendruckes (700 bar) auf ca. $R = 9...12$ mm begrenzt sind.

Grundgeometrie Quader	Ausgewählte Prozessparameter	Beispiel Prozessparameter-Kurve
<p>Werkstoff: AZ 61 A Wanddicke: $s_0=3,0$ mm</p>  <p>$s_{1\text{min.}} = 2,05$ mm</p>	<p>$s_a = 13$ mm $p_{i\text{max}} = 135$ bar $\vartheta_U = 300^\circ\text{C}$</p>	

Ergebnis: Umformgrenze erreicht, 5 bar Innendruckerhöhung führt zu Bauteilreißen

Abb. 52 T-IHU-Umformversuche: Aufweitung eines Quaders mit Kantenlänge von 60 mm auf 75 mm mit „Käfig“, mit/ohne innerer umlaufender „Nase“

Eine weitere Erkenntnis aus den Vorversuchen war, dass das Magnesiumprofil außerhalb des Käfigbereiches sich nahezu vollständig an die T-IHU-Werkzeuggravur anlegt und damit den Käfig in axialer Richtung sehr gut positioniert und formschlüssig hält. D. h., dass ggf. bei einer ähnlichen Demonstratorbauteilkonstruktion auf die innere Bauteilhaltenase verzichtet werden könnte. Weiterhin zeigte sich, dass sich das Magnesiumprofil bei der Umformung gut an die innere Nase des Käfigs anlegt, ohne Reißen oder lokale Werkstoffabstreckungen. Dadurch ist gleichfalls eine ausreichende, formschlüssige Positionierung und Halt des Käfigs auf dem umgeformten Bauteil gegeben. Die maximale Wanddickenabstreckung der Versuchsteile lag bei 2,43 mm (19 %) und kann damit aus unkritisch eingeschätzt werden.

waren wird z. Z. versucht, mittels einer induktiven Quersfelderwärmung das Innen liegenden Profils durch das Äußere hindurch auf die gewünschte Temperatur zu erwärmen.

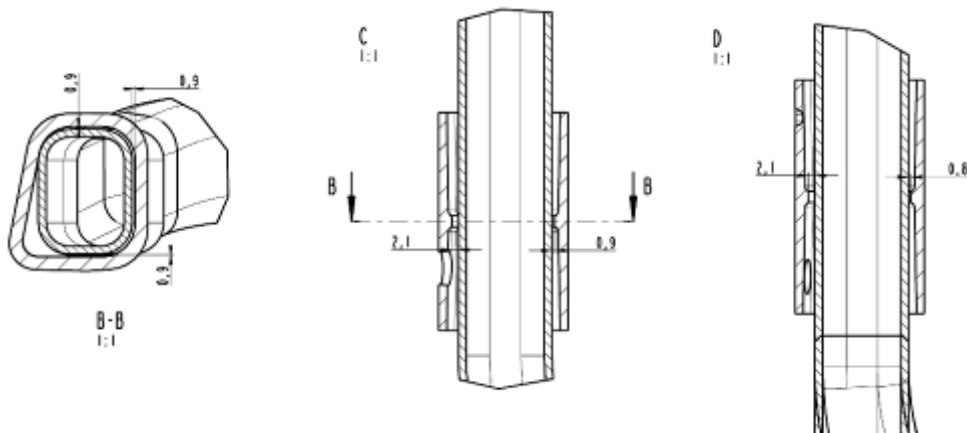


Abb. 54 Ausgangsprofil mit Käfigen, Schnittdarstellungen; Schnitt C: „Halter oben“, Schnitt D: „Halter unten“

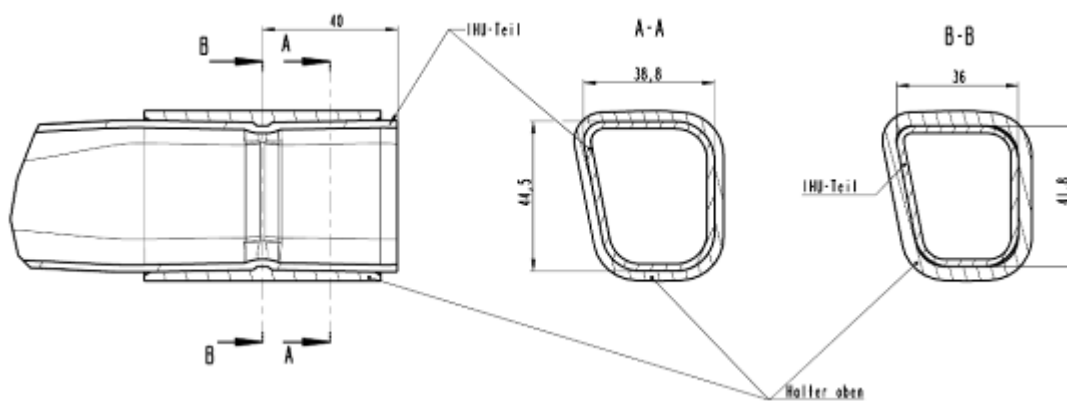


Abb. 55 T-IHU-Bauteil mit Käfig („Halter oben“), Schnittdarstellungen

Bei der konzeptionellen Integration der magnetischen Erwärmung in das T-IHU-Werkzeug in dem Bereich des Käfigs konnten deutliche Fortschritte erzielt werden. U. a. wurde die Gestaltung der Magnetkerne, die Auswahl der benötigten Keramikplatten (aus Zirkonoxid) auf den Magnetkernen auf Grund der thermisch-mechanischen Beanspruchung, die Positionierung der Magnetkernspulen, die Einbettung und elektrische sowie die Schwingungsentkopplung der Magnetkerne im T-IHU-Werkzeug sowie die Randbedingungen (Kabelzuführung, Luftspalte, Kühlung der Spule...) konzipiert.

Im Projektverlauf wurde weiter an der Konzipierung und Optimierung des T-IHU-Demonstratorbauteiles, in Abstimmung mit dem hierfür erforderlichen T-IHU-Werkzeug mit integrierter induktiver und magnetischer Erwärmung des Halbzeuges in den Umformzonen gearbeitet. Die ausgewählte Demonstratorbauteilgeometrie „Türrahmensegment“ wurde weiter nach verfahrensspezifischen und technologischen Gesichtspunkten sowie in Abhängigkeit mit der Gesamtkonstruktion der Magnesiumtür, insbesondere mit dem Türinnenblech, hinsichtlich einer T-IHU-fähigen Bauteilgeometrie inkl. der notwendigen Ankonstruktionen (Werkstoffnachschieberegionen, Übergangszonen, Erwärmungsbereiche etc.) abgestimmt und optimiert.

Parallel erfolgten FEM-Simulationen, zunächst des Vorformprozesses des Ausgangsprofils im T-IHU-Werkzeug unter der Annahme, dass das Halbzeug extern auf 250°C komplett erwärmt wird, anschließend ins T-IHU-Werkzeug eingelegt wird und der Vorformprozess durch die Schließbewegung des T-IHU-Werkzeuges erfolgt (Abb. 56). Eine weitere Annahme war zunächst, dass die Oberflächentemperatur des T-IHU-Werkzeuges gleichfalls komplett 250°C beträgt.

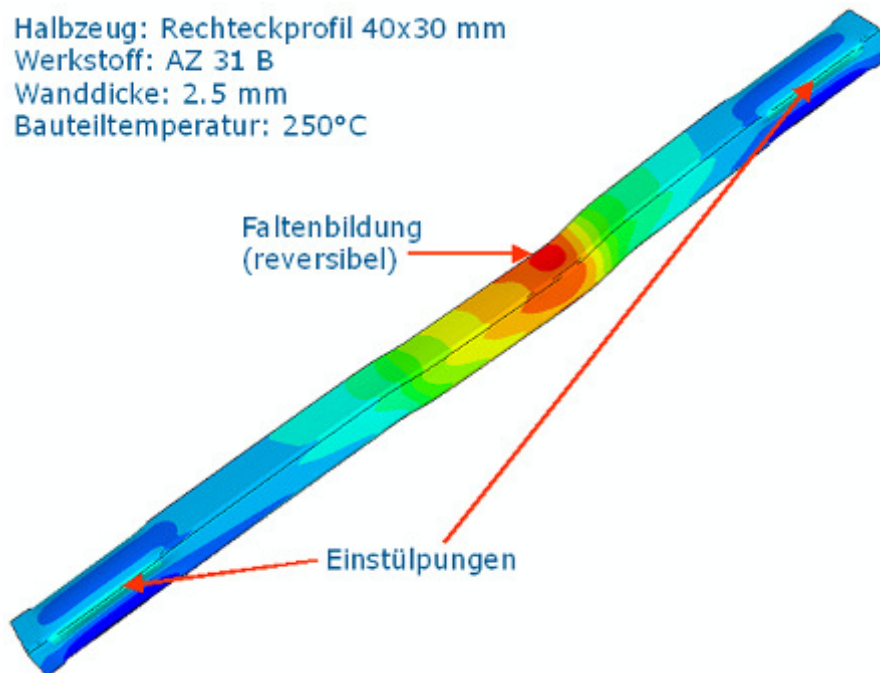


Abb. 56 FEM-Simulation des Vorformprozesses des Ausgangsprofils nach Erwärmung und Einlegen ins T-IHU-Werkzeug durch die Werkzeugschließbewegung

Abb. 56 zeigt, dass asymmetrisch in der Bauteilmitte, durch den Vorformprozess, Faltenbildungen zu verzeichnen sind. Die nachfolgende FEM-Simulation des T-IHU-Prozesses ergab jedoch, dass diese Faltenbildung durch die Wirkung des Innendruckes wieder herausgeformt wird, somit reversibel ist. Weiterhin ergab diese Simulation, dass es im Werkstoffnachschieberegion zu Einstülpungen auf Grund von Materialverdrängung kommt. Diese konnten in der Simulation durch einen angepassten Ausgangsprofilquerschnitt beseitigt werden.

Die FEM-Simulation des temperierten Innenhochdruck-Umformprozesses erfolgte unter den Temperaturannahmen des Halbzeuges von 250°C und der Käfige (Halte oben und unten) von 300°C (siehe Abb. 57 und Abb. 58).

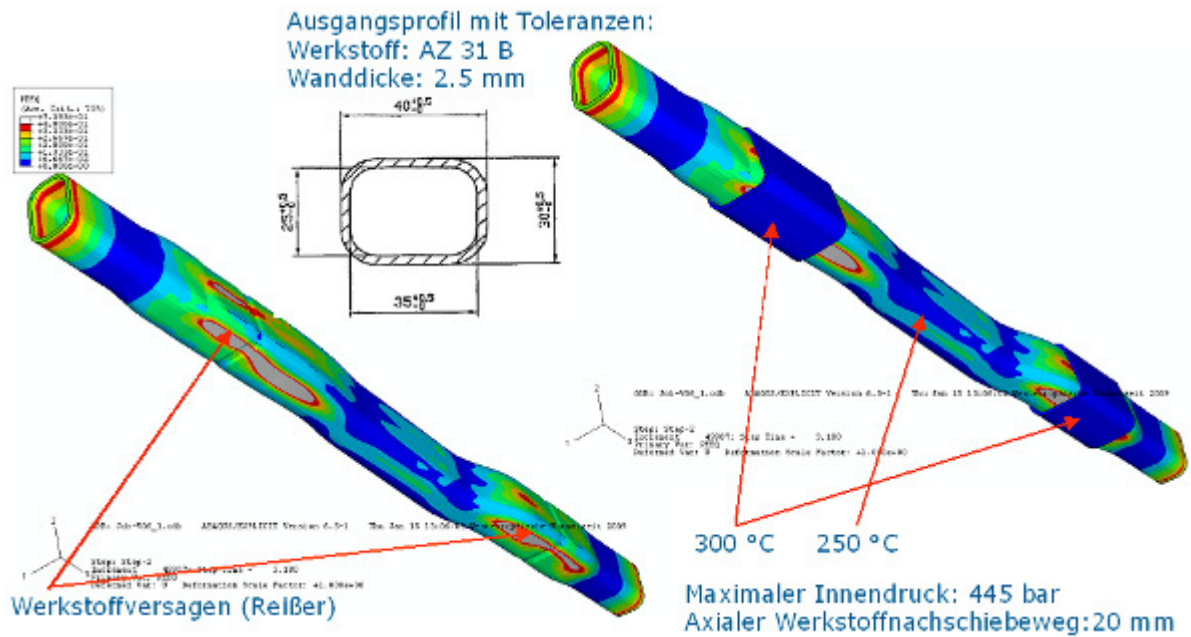


Abb. 57 FEM-Simulation des temperierten Innenhochdruck-Umformprozesses (T-IHU)

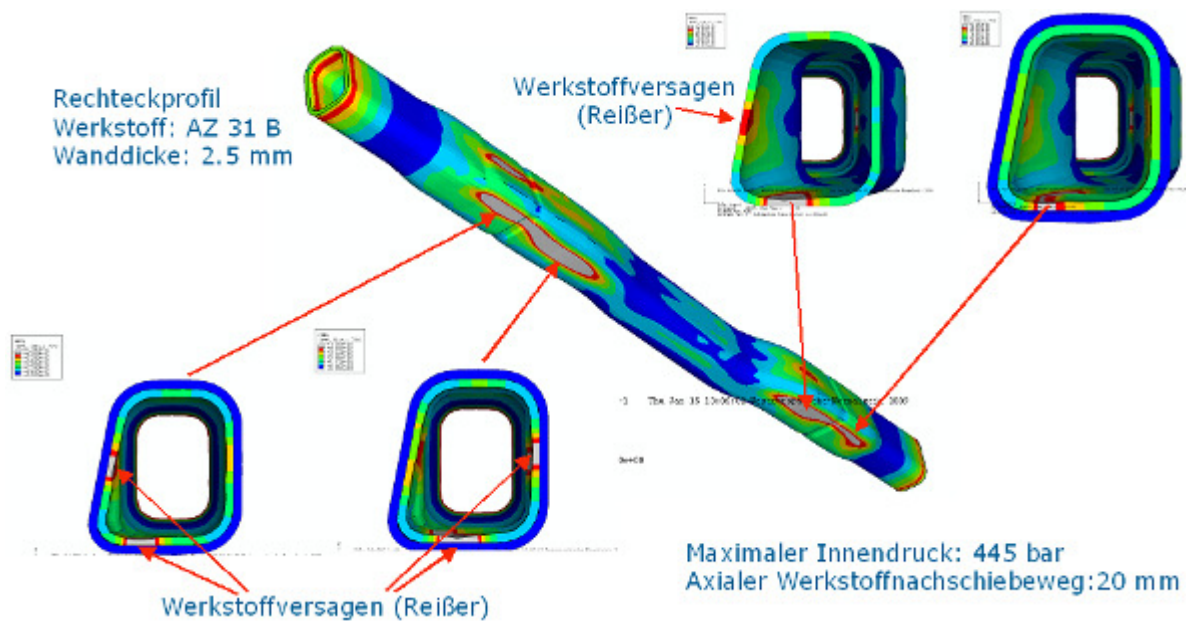


Abb. 58 FEM-Simulation des temperierten Innenhochdruck-Umformprozesses (T-IHU) mit Bauteilschnittdarstellungen

Es wurde davon ausgegangen, dass auf Grund der integrierten induktiven und magnetischen Erwärmung die von Außen durch die Käfige hindurch erfolgen muss, diese eine höhere Temperatur annehmen wie das vorgeformte Ausgangsprofil. Der axiale Werkstoffnachschiebeweg in Abhängigkeit von der Gasdruckkurve wurde zunächst mit 20 mm festgelegt. Die Simulationen zeigen, dass der Gasinnendruck nur bis zu einer Höhe von 445 bar versagensfrei aufgebaut werden konnte. Bei diesem Innendruck treten signifikante Werkstoffeinschnürungen bis hin zu Werkstoffversagen durch Reißen auf. Insbesondere im Bereich der Käfige (Umfangserweiterung ca.

19,5%) sowie nach den Käfigen, bis ca. 30 mm in Richtung Bauteilmitte. Grund hierfür ist neben den auftretenden hohen lokalen Dehnungen u.a., dass durch die in den Käfigen vorhandene unlaufende innere „Nase“ der Werkstoffnachschub und -fluss in diesen Bauteilbereich stark behindert wird.

Auf Grund der Ergebnisse dieser Simulationen erfolgte eine weitere Optimierung der T-IHU-Bauteilgeometrie, wobei die Umfangserweiterungen des Bauteiles außerhalb der Käfige in Richtung Bauteilmitte deutlich reduziert und die Strecke verkürzt wurde (siehe Abb. 59). Weiterhin wurde u.a. die Einförmigkeit für die Auflagefläche des Seitenaufprallschutzes nach Außen gelegt, die T-IHU-Werkzeugteilungsebene weiter optimiert und die Käfige mit neuen Toleranzen versehen. Derzeit laufen weitere Simulationen mit dieser optimierten Bauteilgeometrie. Diese erfolgen nunmehr thermomechanisch gekoppelt. Ziel dabei ist, die realen Bedingungen beim T-IHU-Prozess, insbesondere der Temperaturgradienten, genauer simulativ anzubilden. Nachteilig ist, dass die erforderlichen Rechenzeiten erheblich länger (ein bis mehrere Tage) sind.

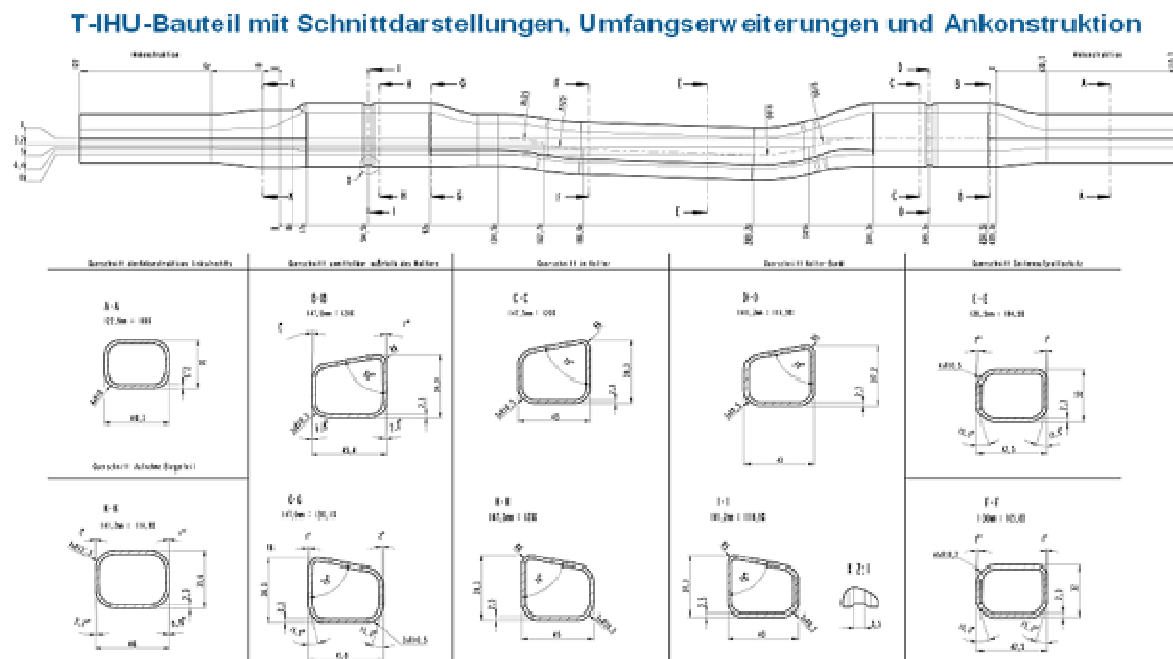


Abb. 59 Optimierte T-IHU-Bauteilgeometrie mit Schnittdarstellungen, Umfangserweiterungen und Ankonstruktion

An der weiteren detaillierten Konzipierung der vorgesehenen lokalen Erwärmungsstrategien in den Käfigbereichen wurde gearbeitet.

Die Auswertung der weiteren Vorversuche bei der Fa. EMA-TEC (induktive Erwärmung) mittels einer induktiven Querfelderwärmung das Innen liegende Profil durch das Äußere hindurch auf die gewünschte Temperatur zu erwärmen ergaben eine deutliche Verbesserung des Temperaturgradienten und der Temperaturhöhe (bis 220 °C (250 °C) bei dem Innen liegenden Rohr). Es wurden hierzu neben dem Magnesiumrohr (Werkstoff AZ 61 A, \varnothing 60 mm) ein Käfig mit 75 mm Kantenlänge (Werkstoff AZ 61 A, Länge ca. 90 mm, Wanddicke ca. 2,6 mm) vom IWU Chemnitz zur Verfügung gestellt. Weitere Vorversuche mit veränderter Frequenz in Abhängigkeit von verschiedenen Stromstärken sind bei der Fa. EMA-TEC geplant, um die

Erwärmungszeit (z.Z. ca. 15 s, Ziel: 5 s) und die Temperaturhöhe (Ziel: ca. 300 °C) weiter zu optimieren. Es wurden im Zuge dieser Vorversuche zwei Induktoren entwickelt, hergestellt und getestet (siehe Abb. 60). Diese wurden derart ausgelegt, dass sie in ein quergeteiltes T-IHU-Werkzeug integriert werden können (siehe hierzu auch Abb. 61), wobei die linke Ausführung bevorzugt wird.

**Konzeption der Integration der induktiven Bauteilerwärmung im T-IHU-Werkzeug:
Induktorauslegung, Vorversuche**

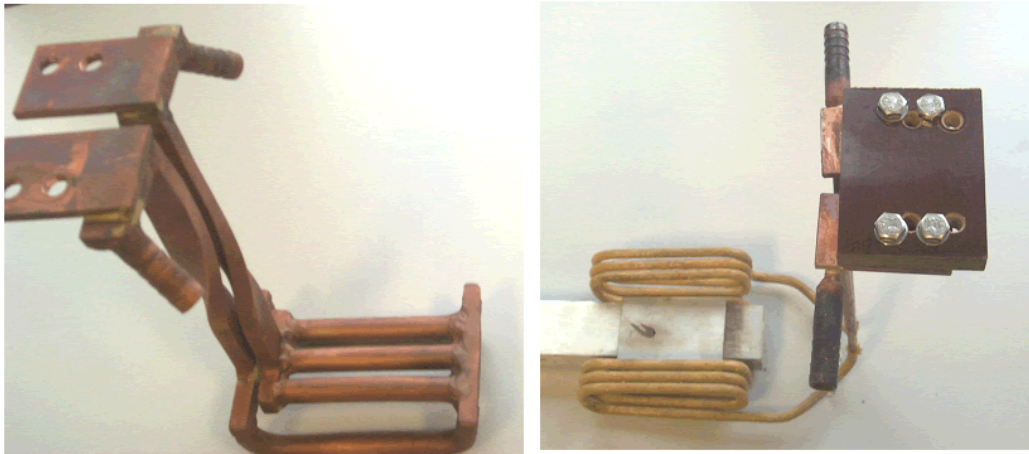


Abb. 60 Auslegung der Induktoren und Vorversuche bzgl. der Integration der lokalen induktiven Bauteilerwärmung ins T-IHU-Werkzeug

Bei der konzeptionellen Integration der induktiven Erwärmung in das T-IHU-Werkzeug im Bereich des Käfigs konnten deutliche Fortschritte erzielt werden (siehe Abb. 61).

Konzeption der Integration der induktiven Bauteilerwärmung im T-IHU-Werkzeug

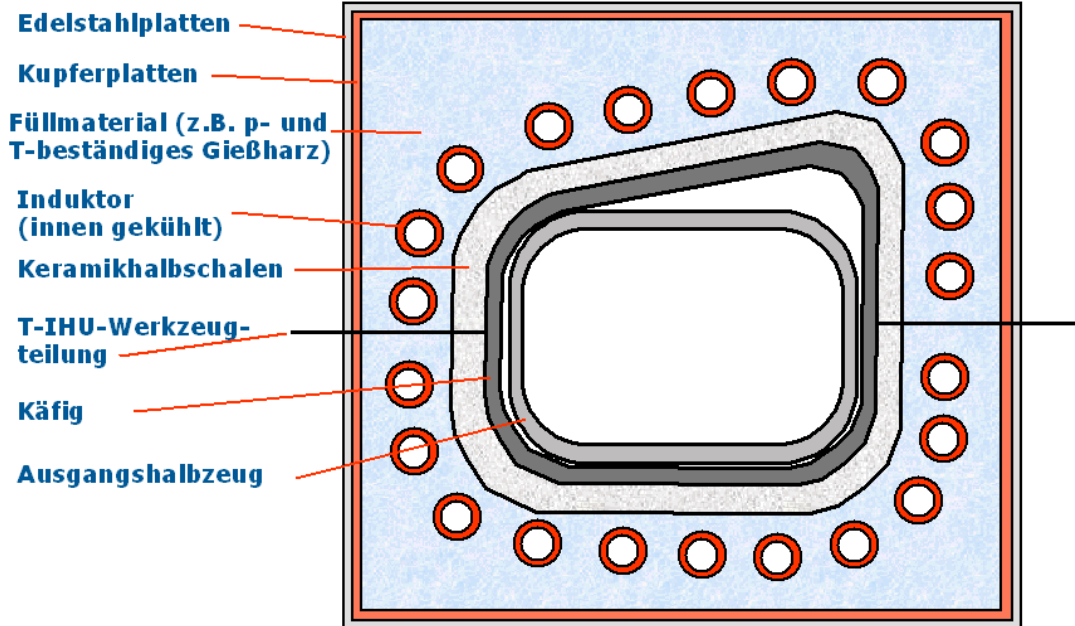


Abb. 61 Konzeption der Integration der lokalen induktiven Bauteilerwärmung in das T-IHU-Werkzeug

U. a. wurde die Gestaltung der Induktoren, die Auswahl und die prinzipielle Geometrie und Abmessungen der benötigten Keramikhalbschalen (Grund: elektrisch nicht leitend, thermisch-mechanische Beanspruchung in dieser Zone...) und die Einbettung der Induktoren und der Keramikhalbschalen in ein elektrisch nicht leitendes und ausreichend druck- und temperaturbeständiges Füllmaterial (z.B. druck- und temperaturbeständiges Gießharz) festgelegt. Weiterhin wurde die elektrische und zum Teil thermische Entkopplung und die Abschirmung der auftretenden Wirbelströme (Edelstahlplatten sowie spezielle Kupferplatten) zum umgebenden Stahlwerkstoff des Werkzeuges sowie die Randbedingungen (Führung der Induktoren aus dem T-IHU-Werkzeug heraus, Spaltmaße, Kühlung der Induktoren...) konzipiert. Weiter wurden die Art und die benötigten Abmessungen für das Ausfräsen der Taschen, für diesen Gesamteinsatz mit den eingegossenen Induktoren, im T-IHU-Werkzeug festgelegt.

Die prinzipielle Konstruktion des T-IHU-Gesamtwerkzeugaufbaus mit den benötigten Grundgestell, bestehend aus den Spannplatten oben und unten, den senkrechten Traversen, den Axialkraftzylindern links und rechts mit den Axialkraftstempeln sowie das eigentlich T-IHU-Werkzeug liegt vor (siehe Abb. 62 links).

T-IHU-Gesamtwerkzeugaufbau mit Grundgestell

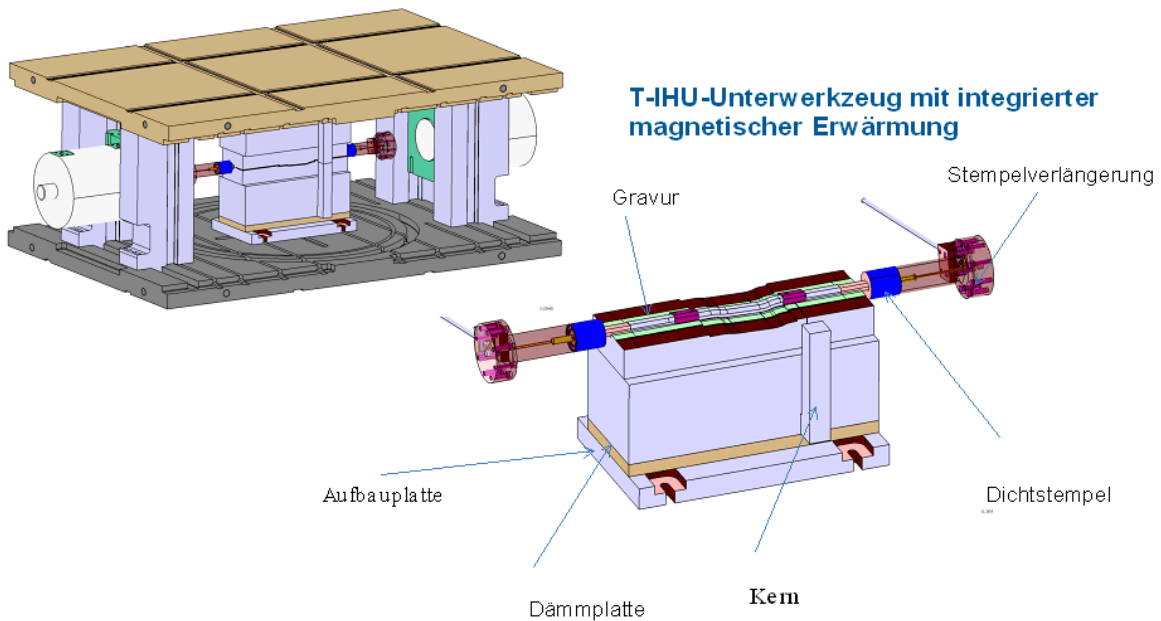


Abb. 62 Konzipierung des T-IHU-Gesamtwerkzeuges inkl. Grundgestell (links) und der Integration der lokalen magnetischen Bauteilerwärmung ins T-IHU-Werkzeug (rechts) und konstruktive Ausführung

Die prinzipielle konstruktive Ausführung der Integration der magnetischen Erwärmung im T-IHU-Werkzeug (im Bereich des Käfigs) konnte abgeschlossen werden (siehe Abb. 62 links und Abb. 63). U. a. wurde die Gestaltung, die Einbettung und elektrische sowie die Schwingungsentkopplung der Magnetkerne, die Auswahl und Abmessung der benötigten Keramikplatten auf den Magnetkernen (auf Grund der thermisch-mechanischen Beanspruchung), die Position und Abmessung der Magnetkernspulen im T-IHU-Werkzeug, die Zugänglichkeit bzgl. der Montage und Demontage bei Reparaturen sowie die Randbedingungen (Kabelzuführung, Luftspalte, Kühlung der Spule...) festgelegt.

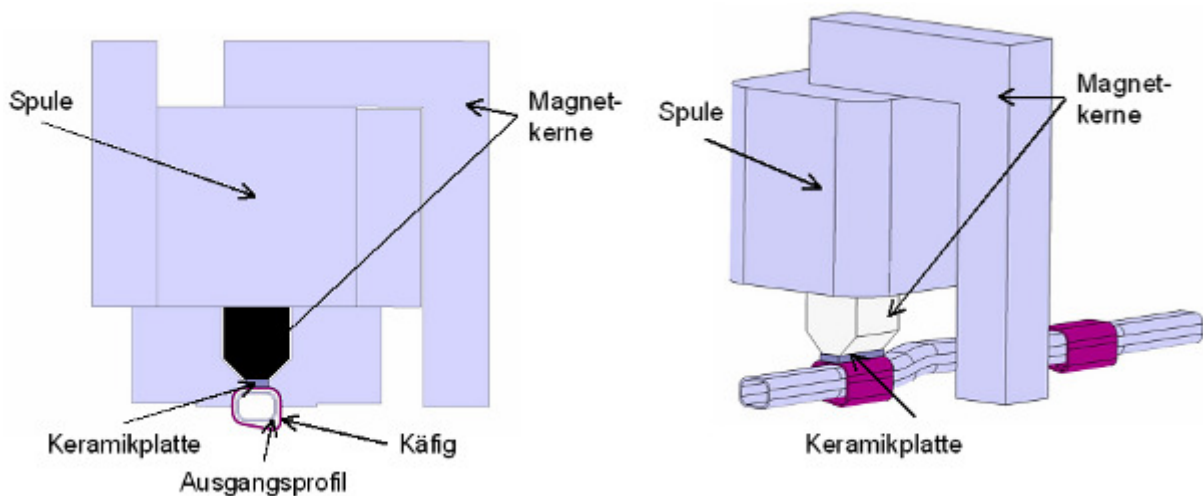


Abb. 63 Konzipierung der Integration der lokalen magnetischen Bauteilerwärmung ins T-IHU-Werkzeug und konstruktive Ausführung

Um die kritischen Umformbereiche zu reduzieren wurde die Ankonstruktion untersucht. Der Nachschiebebereich kann in Bezug zum Bauteil in einem gewissen Umfang verschoben und verdreht werden. Abb. 64 zeigt das Fertigteil und dessen Ankonstruktion (orange eingefärbt) und Konturen des engsten Bauteilquerschnittes (blau) sowie die Außenkontur des Halbzeuges (schwarz).

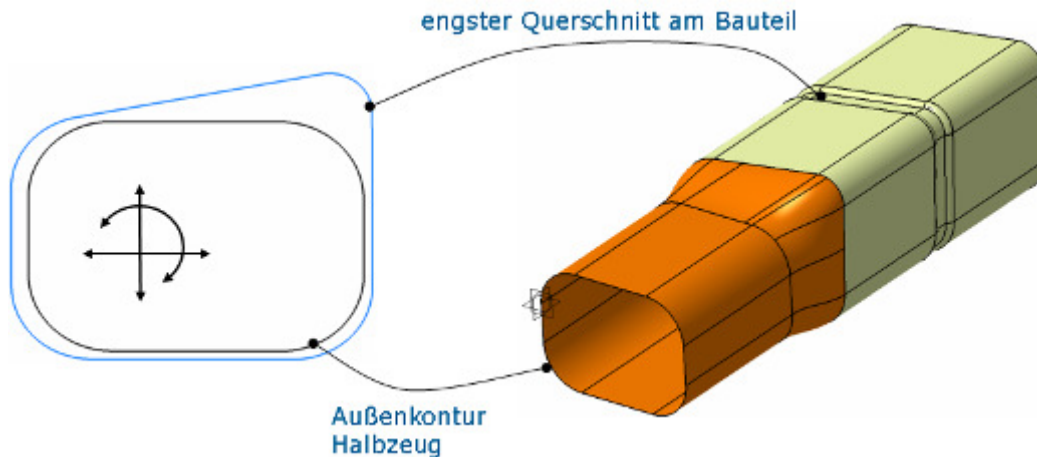


Abb. 64 Lage der Ankonstruktion (Nachschiebebereich) und Variationsmöglichkeit zur Optimierung bzw. Reduzierung kritischer Bereiche

Durch Verschiebung und Verdrehung wurden 11 Varianten erzeugt und unter gleichen Bedingungen mittels FEM simuliert. Die Varianten und die berechneten Ergebnisse sind in Abb. 64 gegenübergestellt. Die günstigste Lage von Ankonstruktion zur Bauteilgeometrie stellt die Variante 10 dar. Diese ist zusammen mit dem Simulationsergebnis in Abb. 66 dargestellt. Durch gezieltes Nachschieben kann die Ausdünnung in den abgebildeten Bereich weiter reduziert werden. Dennoch existieren Bereiche in die durch die Sperrwirkung des umlaufenden Steges des Käfigs kein Material nachgeschoben werden kann, so dass der benötigte Werkstoff nur durch Abstreckung aus der Materialdicke gewonnen werden kann. Diese sind aus umformtechnischer Sicht als kritisch einzustufen.



Abb. 65 Variation der Ausführung der Ankonstruktion sowie die berechnete maximale Ausdünnung

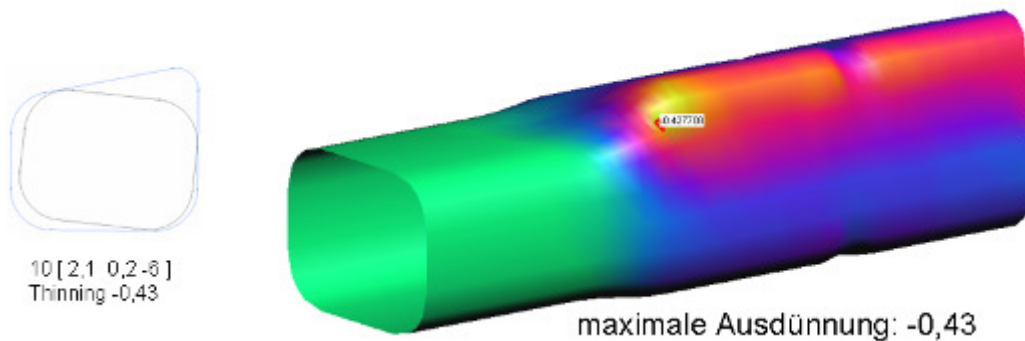


Abb. 66 Optimierte Lage der Ankonstruktion im Bezug zum Bauteil und farbcodierte Verteilung der Ausdünnung mit Angabe des Maximum

Aus dem vorgesehenen Füllmaterial, zum Umgießen des Außeninduktors wurde eine Probe angefertigt und diese einem Belastungstests unterzogen. Auf einer Prüfmaschine wurde ein Druckversuch durchgeführt, um die Belastung und das Verhalten des Materials sowie der umgossenen Induktorwindungen zu ermitteln. Im Diagramm in Abb. 67 sind die Kurven für mehrere Lastzyklen aufgetragen. Bei der ersten Belastung hat sich das Material gesetzt. Die weiteren Druckversuche sind bis auf die Messgenauigkeit gleich, die Kurven hierfür liegen übereinander. Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass das Füllmaterial eine zu hohe Elastizität aufweist und bei Drücken von 50MPa (500 bar) um ca. 1,6 mm nachgibt. In der Diskussion mit den Projektpartnern wurde festgestellt, dass das Füllmaterial nicht geeignet ist und weitere Materialien getestet werden müssen.

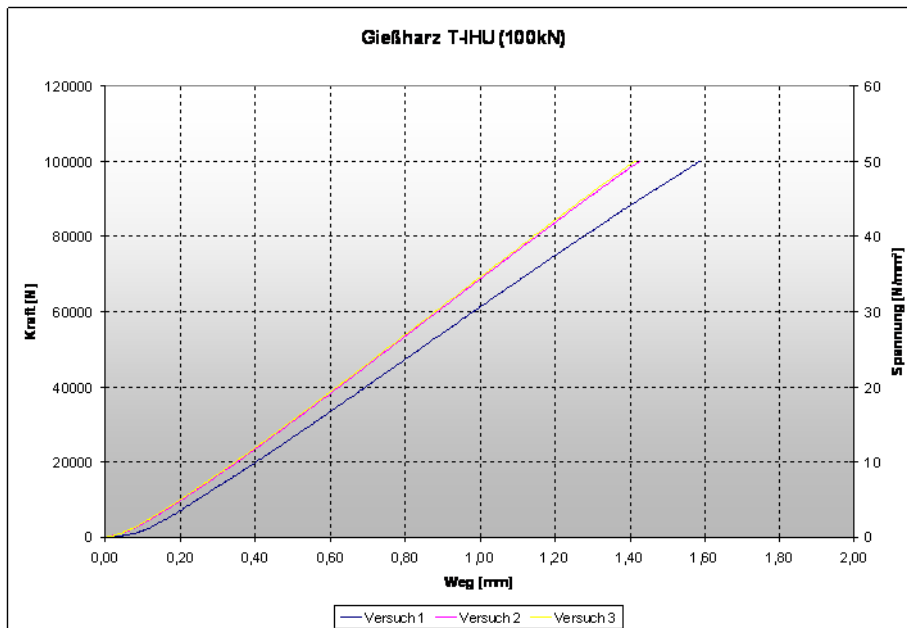


Abb. 67 Ergebnisse der Druckproben des Füllmaterials (Gießharz)

Des Weiteren wurde in Betracht gezogen, die Wanddicke der Käfige zu erhöhen und so auch die notwendige Umfangsdehnung zu reduzieren. In Absprache mit den Projektpartnern wurde die Möglichkeit untersucht und einer Erhöhung der Wanddicke von 2,5 mm auf 3,5 mm zugestimmt. Dabei bleibt die Außenkontur der Käfige bestehen, die Innenkontur wird durch einen Offset von 1 mm nach innen verlagert, wie es in Abb. 68 dargestellt ist.

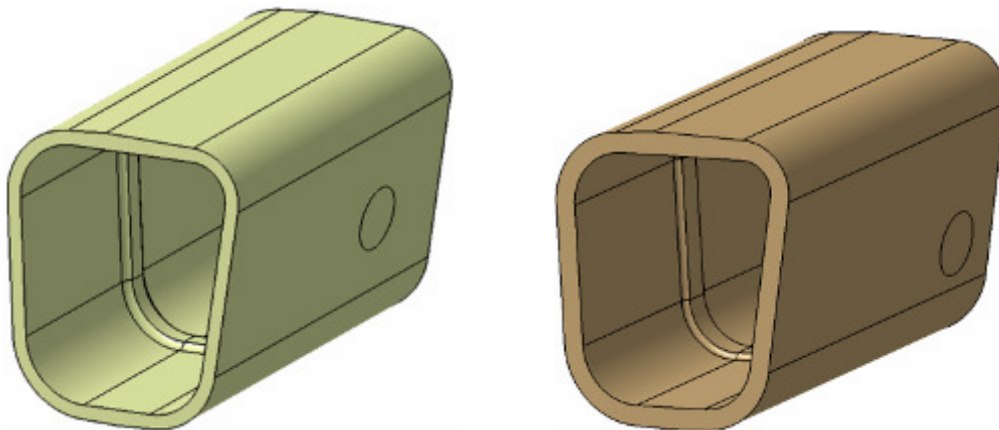


Abb. 68 Käfig, ursprüngliche Wanddicke (links) und erhöhte Wanddicke (links)

Für das IHU-Umformwerkzeug hat diese Änderung keinen Einfluss, die Stempelkontur für das Fließpressen wurden entsprechend angepasst, ebenso die CAD-Daten für die Einzelteile. Bei der Betrachtung der Auswirkungen auf die Erwärmungseinheiten kam man zur Einschätzung, dass für die magnetische Erwärmung eine vernachlässigbare kleine Beeinträchtigung zu erwarten ist, die induktive Erwärmung jedoch sich deutlich verschlechtern dürfte. Dies liegt daran, dass durch den nunmehr dickeren Käfig hindurch eine schlechtere Einkopplung in das Magnesiumprofil stattfindet.

Sowohl die Ergebnisse aus den Druckversuchen mit dem Füllmaterial als auch die Beeinträchtigung der induktiven Erwärmung veranlassten eine Suche nach Möglichkeiten diese Nachteile zu umgehen. In folge dessen wurde die induktive Erwärmung von innen diskutiert und als potentielle Lösung in Betracht gezogen. Die Konstruktion des Inneninduktors, ein Versuchsträger als auch die Wärmeverteilung erster Versuche sind in Abb. 69 dargestellt.

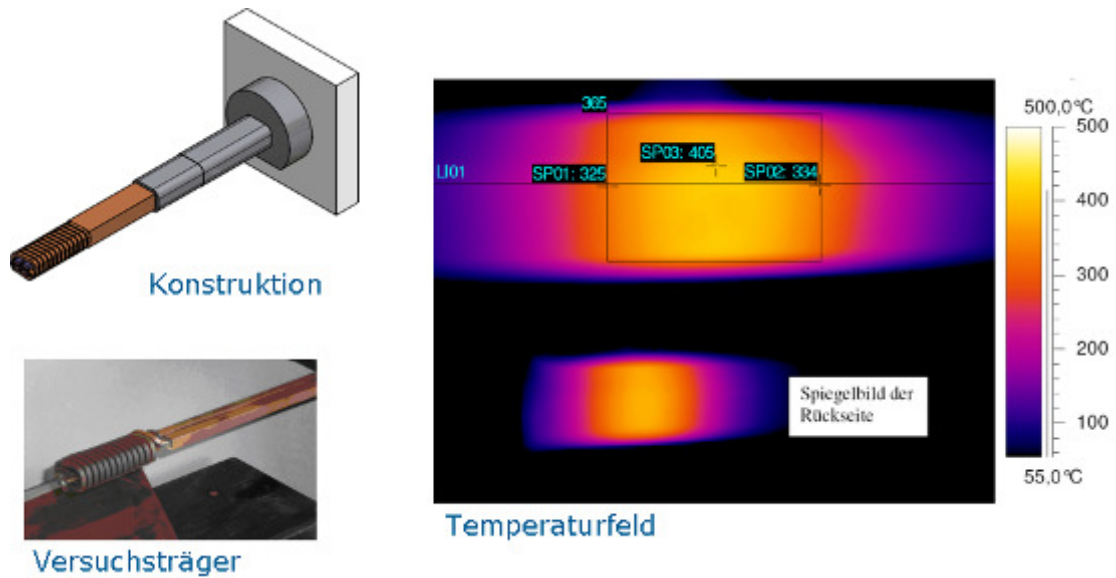


Abb. 69 Konstruktion, Prototyp und Wärmeverteilung des Inneninduktors

In Abb. 70 ist das TeMaK IHU-Werkzeug dargestellt, sowohl im geschlossenen



Abb. 70 TeMaK IHU-Werkzeug (links geschlossen, rechts oben Oberteil, rechts unten Unterteil mit eingelegten Einzelbauteilen)

(links) als auch in geöffneten Zustand (rechts) mit den jeweiligen Gravuren. Nach dem Einbau in die Umformpresse erfolgte die Einarbeitung, das so genannte Try-Out. Im kalten Zustand wurden unter zu Hilfenahme von Dummies für die Umformbereiche der Käfige die ersten Profile umgeformt. Aufgrund der maßlichen Abweichungen der Rechteckprofile mussten die Nachschiebebereiche nachgearbeitet werden, um ein so ein nachschieben und Abdichten zu gewähren. In Abb. 71 sind die nachgearbeiteten und tuschierten Bereiche ersichtlich.

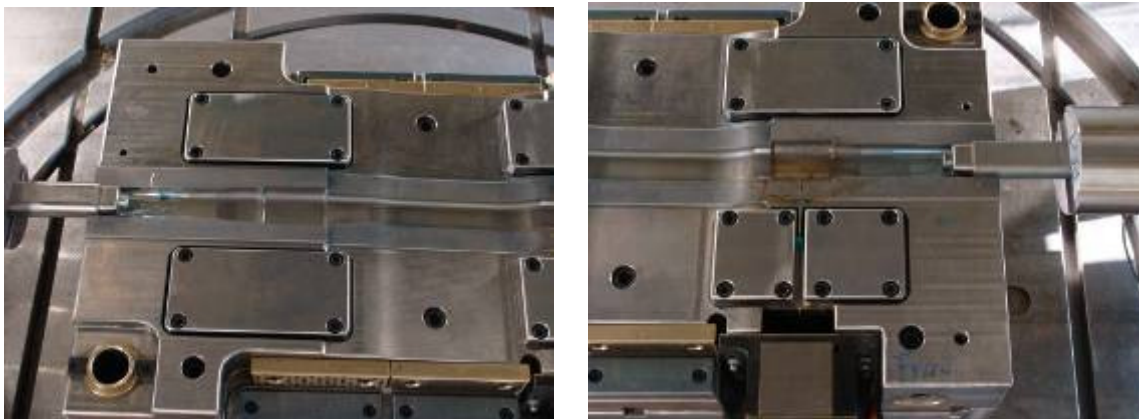


Abb. 71 Nachberarbeitete und eintuschierte Nachschiebebereiche beim Try-Out

Zur Bestimmung der Prozessparameter wurde zunächst ohne Erwärmung der Umformzonen das Nachschieben, Abdichten und der Druckaufbau getestet, wobei die Bauteile bis zur Versagensgrenze umgeformt wurden. Somit konnte gleichzeitig der Nachweis erbracht werden, dass das Umformen und Fügen bei Raumtemperatur nicht erfolgreich realisiert werden kann.

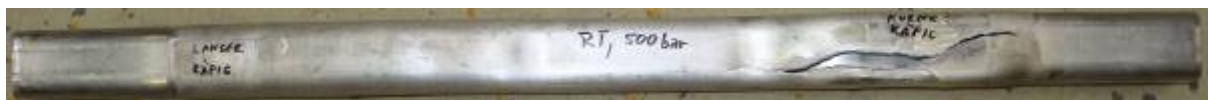


Abb. 72 Bis zum Versagen umgeformtes Bauteil (Raumtemperatur, 50 MPa)

Dem Einfahren des Werkzeuges folgte die Inbetriebnahme der magnetischen Erwärmungseinheit gemeinsam mit den Mitarbeitern der Firma probeam. Nach dem elektrischen Verbinden wurden verschiedene Einstellungen und Erwärmungszeiten getestet. Bei den ersten Erwärmungsversuchen kam es zu Überschlügen und Kurzschlüssen, weswegen die Anlage selbständig abschaltet. Daraufhin wurde die Isolation der Käfige gegenüber den Werkzeuggravuren mittels Teflonfolie vorgenommen. Aufgrund des geringen Spiels zwischen dem Werkzeug und den Käfigen wurde entschieden, diese Bereiche nachzuarbeiten. Dazu wurden die Gravuren als auch die magnetischen Pole demontiert. In ist der Magnetkern links und die Polverlängerung mit Vergussmasse (rechts) abgebildet. Im Bereich des Käfigs, der magnetisch erwärmt wird, wurde umlaufend 0,2 mm aufgefräst. Dadurch konnte die Isolation weiter verstärkt werden und die Gefahr von Überschlügen erfolgreich minimiert werden.

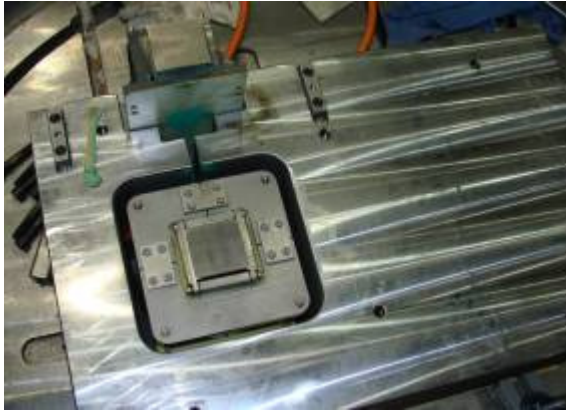


Abb. 73 Demontiertes Werkzeug, magnetischer Kern (links) und Polverlängerung sowie zugehörige Vergussmasse (rechts)

Es folgten weitere Versuche zur Erwärmung des Rechteckrohres ohne dabei die Temperaturänderung im Käfig zu vernachlässigen. Die Parameter wurden so gewählt, dass eine Erwärmung auf 300°C und eine Halten der gleichen Temperatur möglich ist. Zunächst erfolgte die Auslegung am offenen Werkzeug, dann wurden die Versuche am geschlossenen Werkzeug durchgeführt und die Einstellwerte korrigiert. Um nur eine Bauteilseite mit Käfig auszuformen wird der Bereich des Käfigs auf der gegenüberliegenden Seite durch Dummies gefüllt. Die Erwärmung für den Umformprozess wurde zweistufig durchgeführt. 30 Sekunden Erwärmung auf ca. 300°C und 30 Sekunden Temperatur halten mit verminderter Leistung. Auf Basis dieser Einstellung wurden dann Umformversuche mit verschiedenen Nachschiebewegen und unterschiedlichen Kalibrierdrücken als auch unterschiedlich steilen Druckaufbaukurven durchgeführt. In Abb. 74 ist die Bauteilseite mit magnetischer Erwärmung dargestellt. Sowohl die Bauteilgeometrie als auch die Fugestelle sind vollständig ausgeformt und entsprechend fest gefügt.



Abb. 74 Erfolgreich umgeformt und gefügtes Bauteil, Käfig auf der magnetisch erwärmten Seite aus verschiedenen Perspektiven (300°C , 35 MPa)

Zur Integration des Inneninduktors wurde eine weitere Beratung einberufen. Hierbei wurde ein neues Konzept zur Integration des Induktors in die Stempelkappe des Nachschiebezyinders erarbeitet. Die Herausforderungen waren die kraftschlüssige Aufnahme, die Gewährung der Druckdichtheit bei gleichzeitiger Isolation der Zuleitungen, welche aus dem Kraftfluss gelenkt werden müssen. Die ursprünglich flexible Zuleitung vom Zwischentrafo zum Induktor wurde aufgegeben. Stattdessen wurde eine starre Zuleitung gewählt, wobei in diesem Falle der Zwischentransformator fahrbar ausgelegt wurde und die Bewegung mit dem Nachschiebezyinder realisiert wird. In Abb. 75 ist die diskutierte Situation im CAD-Modell dargestellt. Der Induktor ist in Abb. 76 als CAD-Modell links sowohl als reale Baugruppe rechts abgebildet.

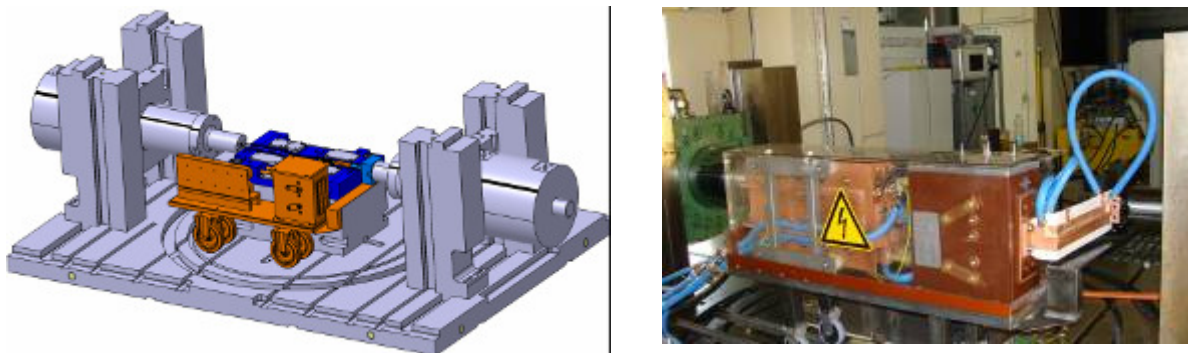


Abb. 75 Links CAD-Modell des Inneninduktors mit verfahrbarem Transformator (orange), Gravur Unterteil (blau) sowie reale Anlagensituation

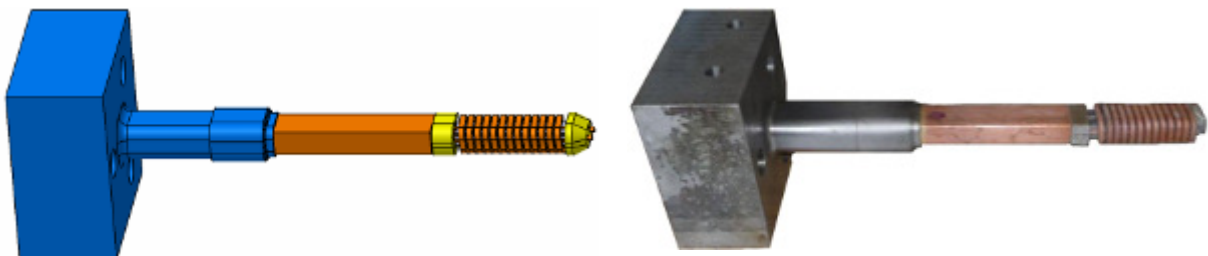


Abb. 76 Links CAD-Modell des Inneninduktors (orange), Führungselemente (gelb), Stempelkappe (blau) sowie realisierte Baugruppe (rechts)

Nach dem Bau des Inneninduktors wurde dieser mit der vorhandenen Anlage gemeinsam mit Mitarbeitern der Firma EMA-Tec in Betrieb genommen. Erfolgreichen Erwärmungstests folgten Versuche mit Umformung. Dabei wurde aufgrund enger Toleranzen und der Materialaufdickung im Nachschiebebereich der Induktor beim Rückhub zerstört. Derzeit wird ein weiterer, in der Bauart modifizierter, Induktor von der Firma EMA-Tec gebaut. Die Erprobung ist für KW 8 vorgesehen.

1.5 Teilprojekt V 3.1.5 „Rohr- und Profilbiegen“

Rohrbiegen

Im Projektverlauf wurde eine Analyse der projektrelevanten Anforderungen an den temperierten Biegeprozess durchgeführt. Die Anwendung der Freiformbiegetechnologie nach dem Hexabendprinzip ermöglicht die Integration einer Erwärmungseinrichtung im Zwischenraum zwischen Biegekopf und Biegematrize. Ausgehend von Erfahrungen mit dem temperierten Umformen von Aluminiumwerkstoffen auf Grundlage von Wirkmedien ist bereits bekannt, dass die Bereiche am Bauteil, in welchen Druckspannungen in die Umformzone hinein übertragen werden müssen, ein deutlich niedrigeres Temperaturniveau gegenüber der eigentlichen Umformzone aufweisen sollten.

Die Hexabend-Biegetechnologie ermöglicht die Integration einer werkzeuggestützten Erwärmung, wodurch die erforderlichen Temperaturgradienten sehr gut einstellbar sind. Die geometrische Analyse der kinematischen Bedingungen für die im Projekt durchzuführenden Biegeoperationen ergab einen theoretischen Aufheizbereich von 100 mm Länge für die Integration der als Heizelement fungierenden Induktionsspule.

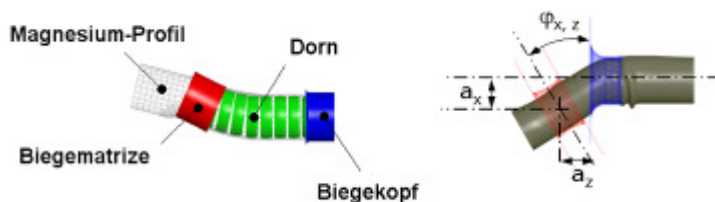


Abb. 77 Ermittlung der geometrischen Bedingungen im Aufheizbereich

Basierend auf der Ausgangsgeometrie für das Biegeteil erfolgte die konstruktive Erstellung der Aktivteile für die FE-Umformsimulation des temperierten Biegeprozesses.

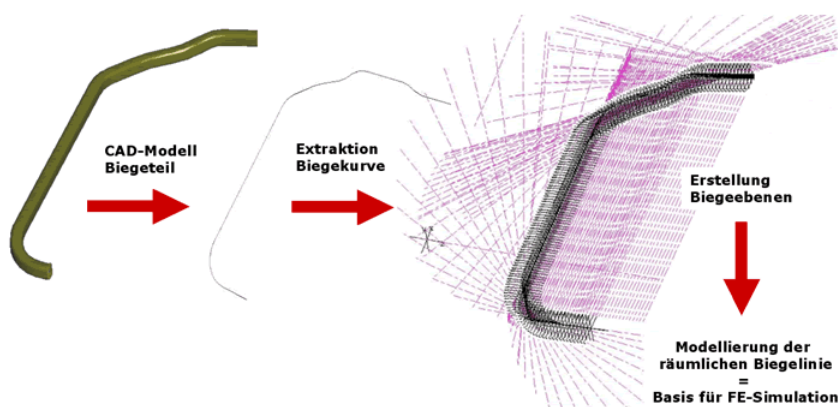


Abb. 78 Erstellung der Biegeebenen im CAD

Gestaltung des Demonstratorwerkzeuges:

Neben der Erstellung der CAD-Daten zu den Biegeebenen war es notwendig, die Datenmodelle für die Umformwerkzeuge „Biegekopf“, „Biegematrize“ sowie „Glieder-

dorn“ zu erarbeiten. Diese CAD-Modelle bilden die Grundlage für die FE-Umformsimulation (siehe Teilprojekt V 3.1.2).

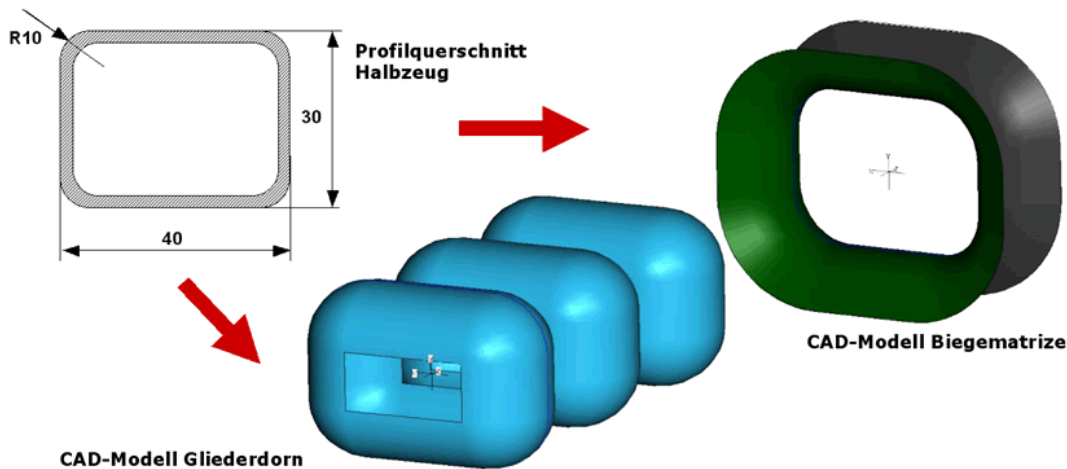


Abb. 79 Modellierung der Biegewerkzeuge im CAD

Neben den geometrischen und thermischen Bedingungen für die Prozessdurchführung hat die Reibung zwischen Magnesium-Halbzeug und den Werkzeugaktivteilen einen wesentlichen Einfluss auf das Biegeergebnis. Bisherige Biegeoperationen bei Raumtemperatur für Stahl- und Aluminiumprofile basierten dabei auf Gleitreibung. Als erster Ansatz wurde auch für das temperierte Biegen von Magnesiumprofilen diese Vorgehensweise gewählt. Zur Vermeidung von Kaltaufschweißungen soll dabei speziell in der Biegematrix sowie dem Gliederdorn eine neuartige CrNi-Beschichtung zur Anwendung kommen. Darüber hinaus wurden konstruktive Lösungen für eine neuartige, auf Rollreibung basierendes Biegematrixkonzept erarbeitet. Im Rahmen der FE-Umformsimulationen soll durch Variation der Reibkoeffizienten der Einfluss der unterschiedlichen Reibungsarten auf das Biegeergebnis untersucht werden. Auf Grundlage der Simulationsergebnisse erfolgt dann die Detailkonstruktion und Fertigung der Biegewerkzeuge.

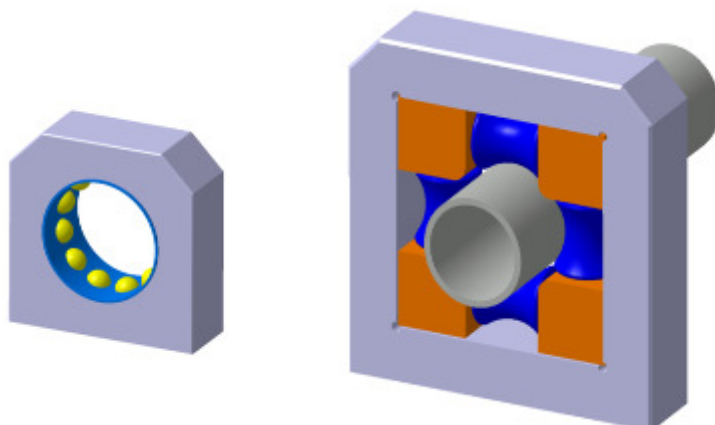


Abb. 80 Prinzipbilder neuentwickelter Biegematrizen auf Basis Rollreibung

Untersuchungen anhand mehrerer FE-Umformsimulation des Biegeprozesses zeigten Vorteile bei der Verwendung einer Biegematrix auf Grundlage von Rollreibung.

Vor allem die Gefahr eines Aufschiebens von Material auf der Bogeninnenseite kann durch eine entsprechende Gestaltung der Biegematrize reduziert werden. Die finale Geometrie des präzisierten Bieeteiles zeigt darüber hinaus die wesentlichen Biegungen nur in der x-z Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems, die Biegungen in der y-z Ebene sind dabei vergleichsweise nur gering und die maximalen Auslenkungen betragen nur $-8,2$ mm bzw. $+30$ mm von der Profilmittelachse. Damit liegt dieser Wert noch innerhalb der Profilbreite von 40 mm. Abb. 81 zeigt Ansichten des Bieeteiles in der x-z Ebene (Mitte) bzw. y-z Ebene (links und rechts).



Abb. 81 Bauteilansichten der finalen Bieegeometrie

Ausgehend von den erforderlichen Biegungen wurde eine Biegematrize mit zwei Rollen konstruktiv ausgelegt. Die spezielle Geometrie der Rollen soll die Übertragung von Querkräften ermöglichen, welche bei der Herstellung der Biegungen in der y-z Ebene auftreten. Durch die konstruktiven Anforderungen an die Rollen sowie die daraus resultierenden räumlichen Ausdehnungen der Biegematrize wird der Einbauraum der induktiven Erwärmungsspule eingeschränkt. Daher war es notwendig, die Biegematrize zuerst zu konstruieren, um daraus dann den verbleibenden Einbauraum für die Dimensionierung der induktiven Erwärmungseinrichtung definieren zu können. Abb. 82 zeigt die Konstruktion der Biegematrize.

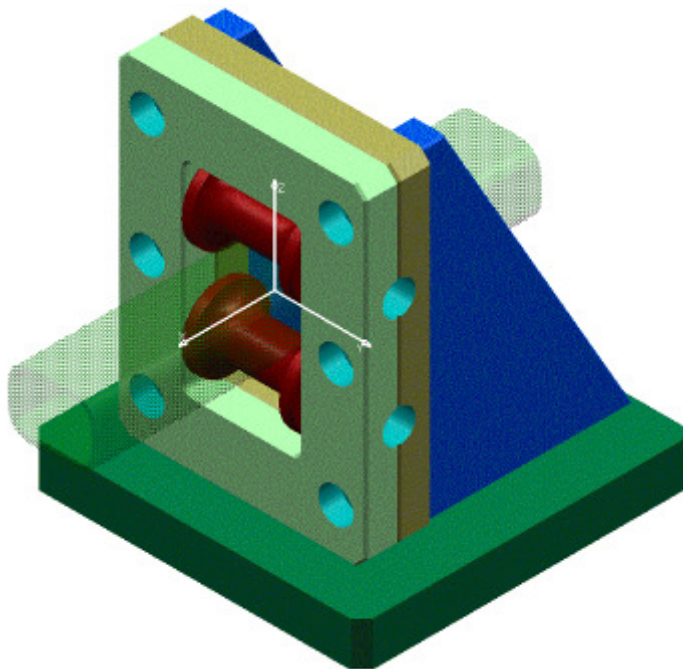


Abb. 82 3D CAD-Konstruktion der Biegematrize (Demonstratorwerkzeug)

Ausgehend von der Konstruktion der Biegematrize und der finalen Biegelinie konnte anhand der Maschinenkinematik der vorgesehenen HEXABEND-Biegemaschine der zur Verfügung stehende Einbauraum für die Induktionsspule definiert werden. Dabei war der wesentliche beschränkende Parameter der kleinste zu biegende Radius von 106,9 mm. Unter Berücksichtigung der für diesen Radius erforderlichen Auslenkung der Biegematrize durch die Parallelkinematik und der damit verbundenen maximalen Annäherung von Matrize und Biegekopf ergibt sich ein geometrischer Einbauraum für die Induktionsspule mit einer Länge von 70 mm.

Der gewählte Bauteilquerschnitt erforderte zwingend eine als Formspule ausgelegte Induktionsspule, die in ihrer Geometrie einem Offset des Bauteilprofils entspricht. Da durch das Freiformbiegekonzept der HEXABEND-Biegemaschine der Biege­radius im Bereich zwischen Biegekopf und Biegematrize erzeugt wird und hier auch die Erwärmungszone für die induktive Erwärmung liegt, musste innerhalb der Induktionsspule ein ausreichender Freiraum vorhanden sein, um eine Berührung von Induktionsspule und Biegeteil in jedem Falle zu vermeiden. Konstruktive Untersuchungen zeigten, dass dabei die Innenkontur der Induktionsspule bei einer Länge von 70 mm umlaufend mindestens 10 mm größer als die Außenkontur des Biegeteiles zu gestalten ist.

Unter diesen Voraussetzungen kann während des Biegevorganges kein homogener Spalt zwischen Bauteil und Induktionsspule gewährleistet werden, was speziell bei der elektrischen Auslegung der Spule berücksichtigt werden musste. Um die Spalt­änderung während des Biegevorganges minimieren zu können, wurde zur Fixierung der Spule ein Konzept erarbeitet, was eine Befestigung direkt am Rahmen der Biegematrize erlaubt und damit eine Nachführung entsprechend der Auslenkung der Matrize durch die Parallelkinematik gewährleisten kann.

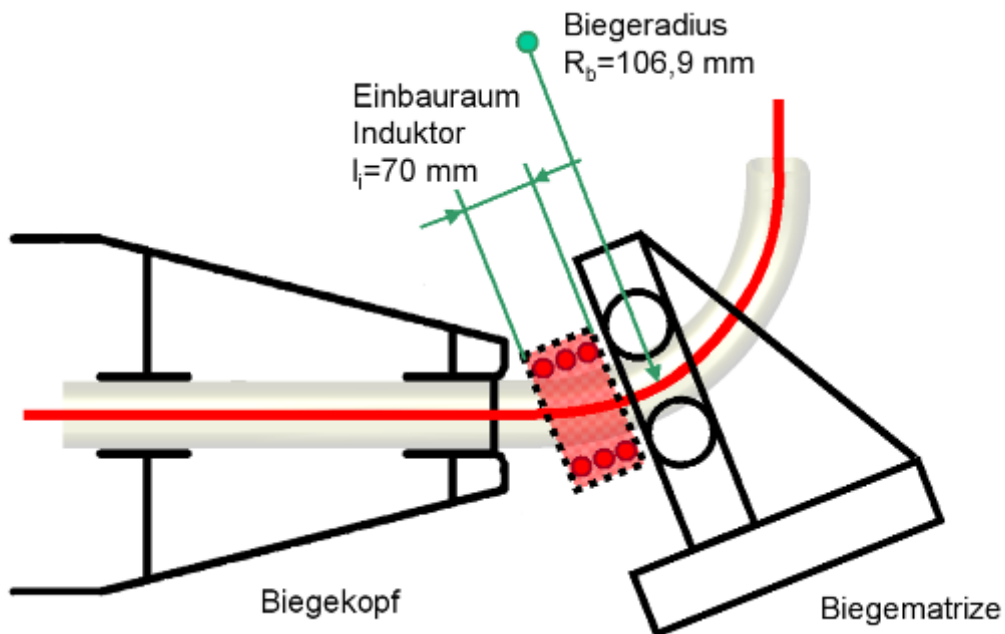


Abb. 83 Schematische Darstellung Einbauraum Induktor

Mit der konstruktiven Auslegung der neuartigen Biegematrize und Ermittlung des verfügbaren Einbauraumes waren die Voraussetzungen für die geometrische Auslegung der Induktionsspule gegeben. In bereits am IWU-Chemnitz durchgeführten temperierten Umformversuchen für Magnesium Rohre der identischen Legierung AZ 31

sind optimale Umformtemperaturen von 250°C ermittelt worden. Als Startwerte für die geplanten Versuche zum Freiformbiegen der Magnesiumhohlprofile wird von einem vergleichbaren Temperaturniveau ausgegangen. Damit kann auch die erforderliche Leistung des Induktors sowie die des zugehörigen Generators incl. des optimalen Frequenzbereiches definiert werden.

Aufgrund der berührungslosen Bauteilerwärmung und der linienförmigen Anlage des Bauteiles in den Rollen der Biegematrize sind diese Bereiche für eine Temperaturkontrolle und Regelung auf Basis einer berührenden Messung ungeeignet. Aus diesem Grund wurde zur sensorischen Überwachung der Erwärmung in der Umformzone die Verwendung eines berührungslos messenden Pyrometers vorgesehen, dass mit dem Generator der Induktionsanlage gekoppelt wird und die Leistung in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur des zu biegenden Bauteiles regelt.

Durch den kontinuierlichen Biegeprozess und die geringe Berührungsfläche zwischen dem Biegeteil und den Rollen der Biegematrize ist nur von einer geringen Erwärmung des Biegewerkzeuges auszugehen. Der Biegedorn innerhalb des Biegeteiles, der ein Einfallen der Profilflanken verhindern soll, ist in Vorschubrichtung als quasistatisch anzusehen, wodurch auch hier von weitestgehend konstanten Bedingungen für die thermische Beeinflussung des Biegeteiles auszugehen ist. Daraus ergibt sich durch die mechanischen Anlagenkomponenten nur ein geringer Einfluss auf die kurzzeitige Änderung der Temperatur während eines Biegezyklus für das vollständige Biegeteil.

Die wesentliche Einflussgröße auf die Temperatur im Biegeteil und deren Überwachung stellt somit die Vorschubgeschwindigkeit des Biegeteiles in der Maschine dar. Die Leistung am Induktor muss somit in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit geregelt werden, um trotz variabler Geschwindigkeiten weitgehend konstante Temperaturen in der Umformzone zu gewährleisten. Im Rahmen der Biegeversuche soll weiterhin untersucht werden, ob, ausgehend von einer Anfangstemperatur und daran gekoppelt einer entsprechenden Induktorleistung, auch eine der Biegesequenz angepasste Leistungsregelung erfolgen kann, wodurch eine individuelle prozessabhängige Anpassung entfällt. Voraussetzung sind hinreichend reproduzierbare und robuste mechanische Biegebedingungen.

Neben der Neuanfertigung der Biegematrize nach dem Prinzip der Rollreibung sind weitere Umrüstungen an der Rohrbiegemaschine erforderlich. Parallel zur Fertigung der neuartigen Biegematrize entsprechend der CAD-Konstruktion erfolgte parallel die Umrüstung der Gleitschienen und des Biegekopfes auf das Rechteck-Profil-Halbzeug sowie die Vorbereitung zur Integration des Induktors (s. Abb. 84). Die erforderlichen Maßnahmen zur Umrüstung der Maschine sowie die Integration der neuartigen Biegematrize und des Induktors wurden vor Beginn der Arbeiten im CAD untersucht.

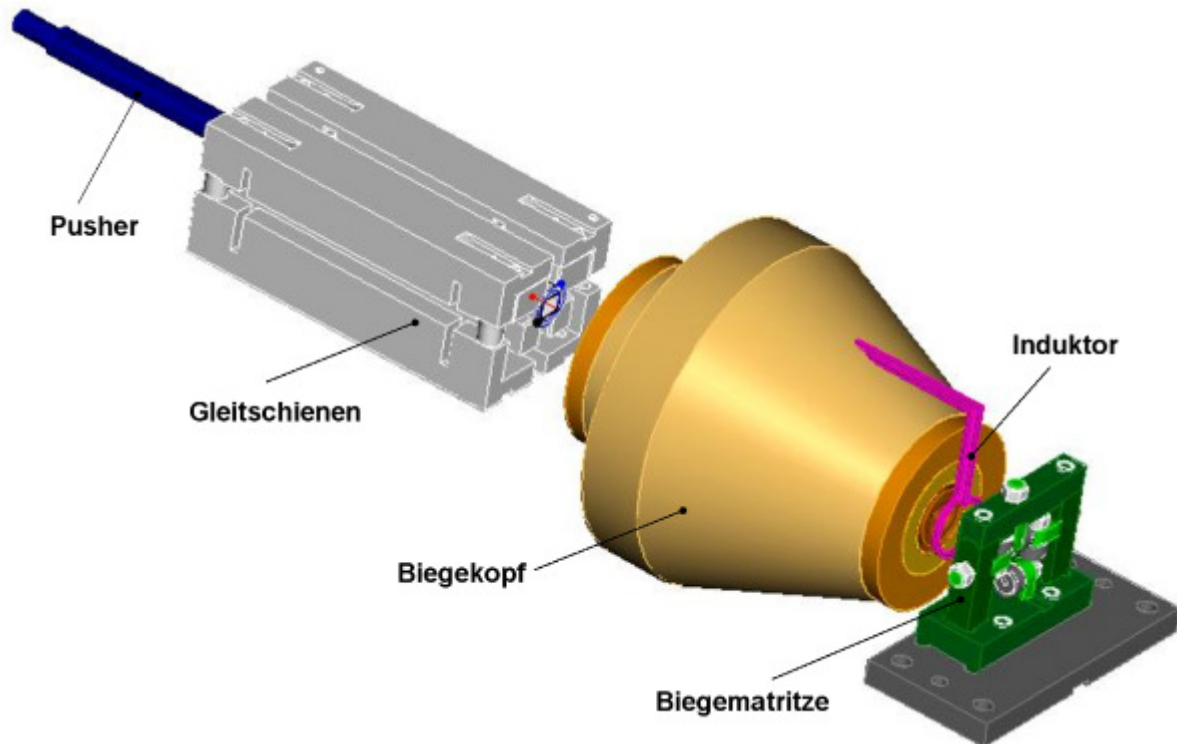


Abb. 84 Umrüstung der Gleitschienen und des Biegekopfs

Aufgrund der Nutzung eines Rechteckprofils anstatt von Rundrohren als Halbzeuge war dazu eine Demontage und Umrüstung der betreffenden Maschinenkomponenten erforderlich. Nachfolgende Abb. 85 zeigt die HEXABEND Biegemaschine während der Umrüstung.



Abb. 85 Umrüstung der Gleitschienen und des Biegekopfs

Gegenüber der ursprünglichen Konzeption wurde die sogenannte Rollenmatrize, welche sich auf der Hexapod-Plattform befindet, mit vier Rollen konstruiert. Die somit veränderte Relativbewegung zwischen Rollen und Profil ist für die seitlichen Biegungen günstiger. In Abb. 86 ist die Konstruktion als auch die realisierte Rollenmatrize abgebildet.

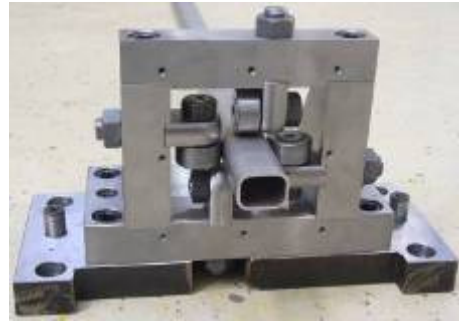
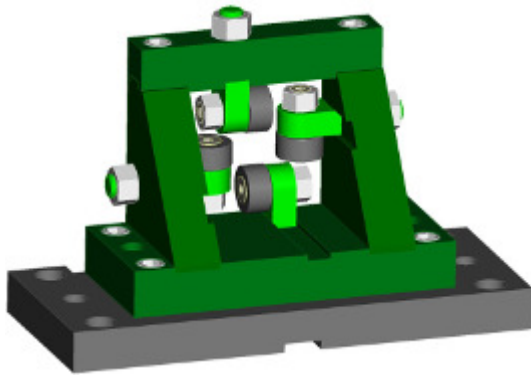


Abb. 86 CAD-Modell der Rollenmatrize und gefertigte Einheit (gedreht) mit Magnesiumprofil

Um die geänderte Bedingung auch simulativ abbilden zu können, wurden neue Aktivteilflächen erstellt. Abb. 87 zeigt die neu gestalteten CAD-Flächen im Schnitt.

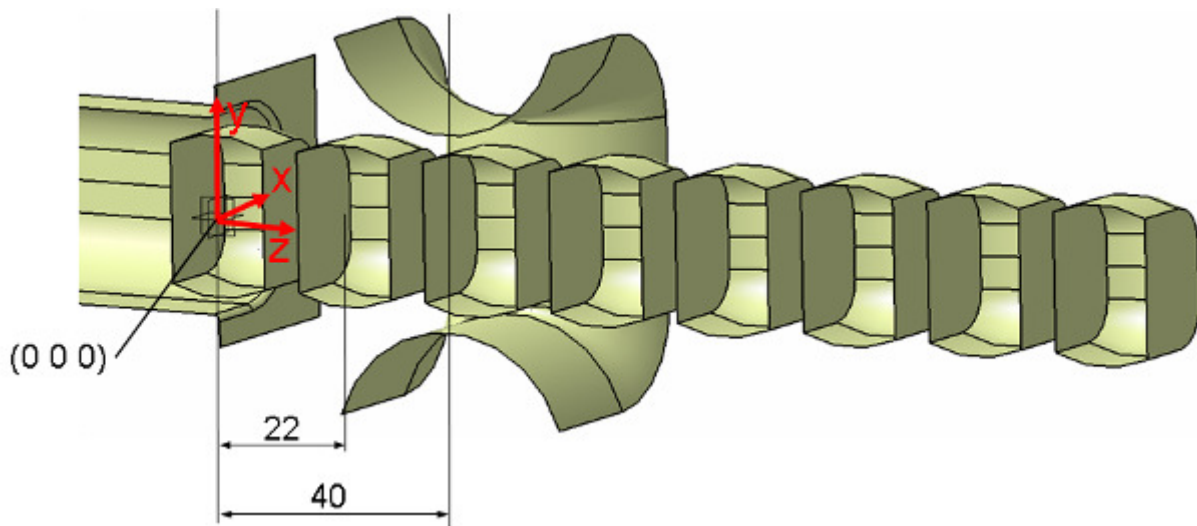


Abb. 87 Aktivteilflächen für die Simulation des Biegevorganges

Der simulierte Biegevorgang sowie der daraus resultierende Vergleichsumformgrad ist in Abb. 88 dargestellt.

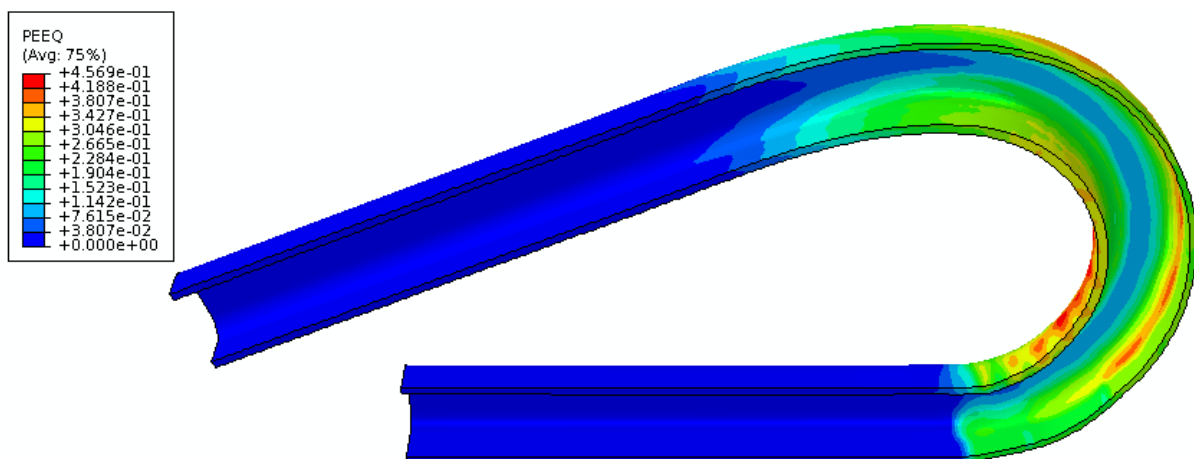


Abb. 88 Vergleichsumformgrad des simulierten Biegevorganges

Durch die kurze Ausführung des Induktors ist es notwendig einen Transformator nahe zur Spule zu installieren. Da der Platz auf der bewegten Plattform beschränkt ist und in diesem Fall alle Zuleitungen (Strom und Kühlwasser) flexibel ausgeführt werden müssen, wurde die Variante gewählt, bei der die Spule am Biegekopf befestigt wird. Abb. 89 zeigt das CAD-Modell mit Spule, Schirmblech und Zwischenscheiben.

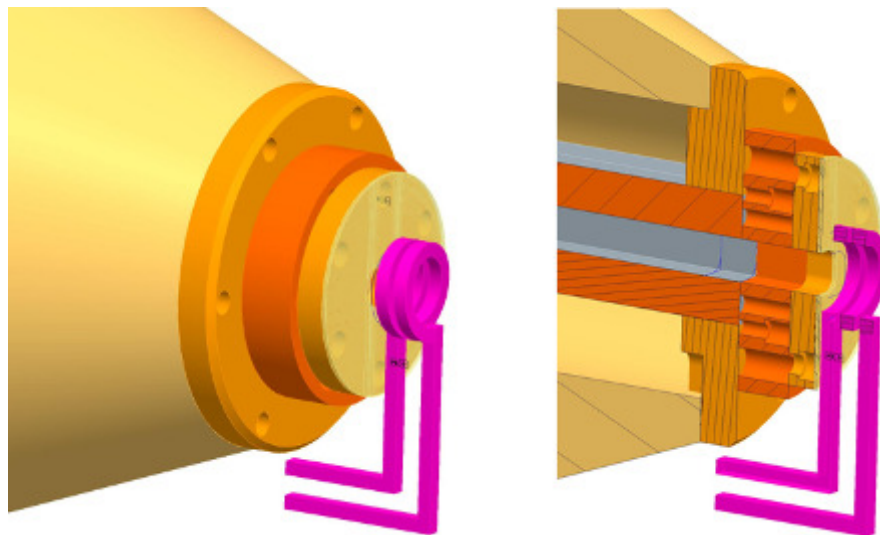


Abb. 89 Biegekopf mit Spule (links), Schnittdarstellung rechts

In Abb. 90 ist die Zusammenbauzeichnung des Biegekopfes dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht die engen Platzverhältnisse beim Biegen der kleinsten Biegeradien.

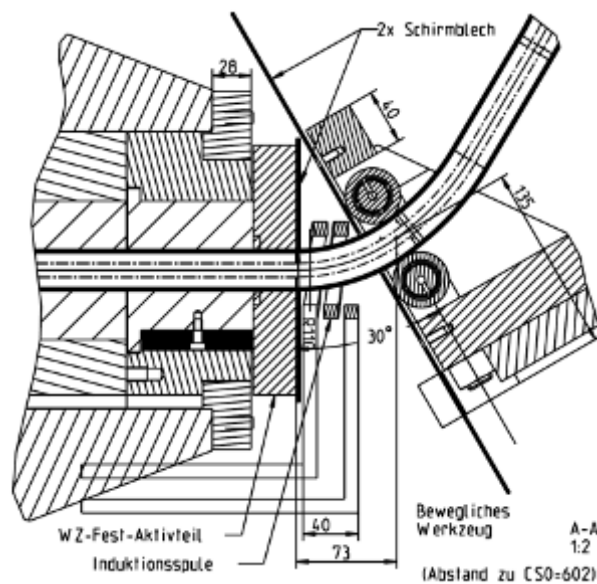


Abb. 90 Zusammenbauzeichnung des Biegekopfes



Abb. 91 Montierter Biegekopf mit und Rollenmatrize

In Abb. 91 ist der montierte Biegekopf mit Adapterplatte für den Induktor (links) sowie die Rollenmatrize (rechts) zu sehen. Nach der Montage der Einzelkomponenten folgte die Inbetriebnahme der Induktionsanlage gemeinsam mit den Mitarbeitern der Firma EMA-Tec. Nach erfolgreichen Tests im Handbetrieb wurde die SPS-Steuerung des Frequenzumrichters in die bestehende CNC-Steuerung der Biegemaschine implementiert. Dadurch ist es möglich den Induktor sowie seine Leistungsparameter für die Erwärmung mittels M-Befehle in den NC-Code zu integrieren. Im Anschluss wurden Temperaturmessungen mittels Thermographie durchgeführt und das Verhalten der Anlage zu erforschen als auch die Parameter zu bestimmen, die eine homogene Erwärmung des Profils für bestimmte Solltemperaturen bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten ermöglichen. In Abb. 92 sind Thermographieaufnahmen für die stationären Fälle bei unterschiedlichen Heizleistungen abgebildet.

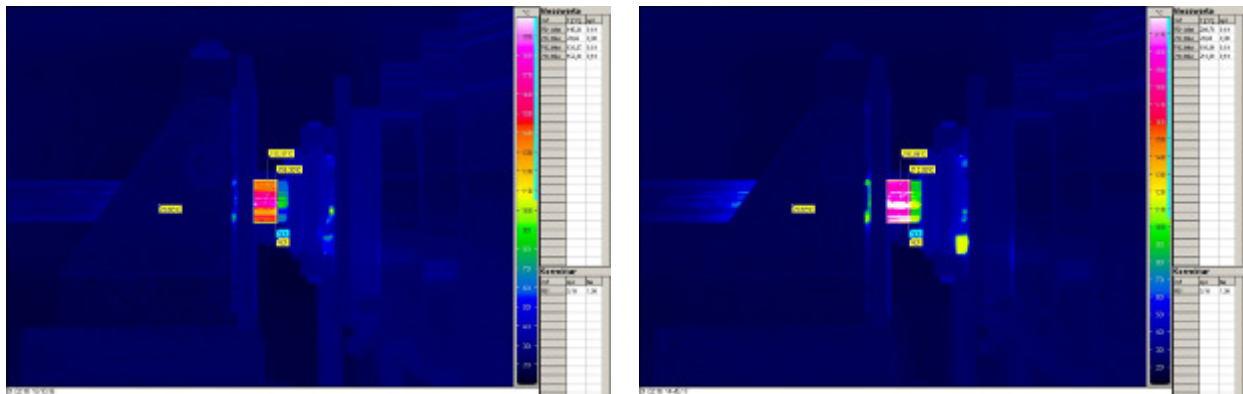


Abb. 92 Thermographische Aufnahmen der Temperaturverteilung im Bauteile bei unterschiedlichen Einstellparametern (links) 20% (rechts) 30% Heizleistung

Im Weiteren wurden Biegeversuche durchgeführt, um die technologischen Grenzen des Freiformbiegens zu bestimmen. Zunächst wurden die Mg-Profile kalt gebogen, wobei unterschiedliche Anstellungen der Rollenmatrize getestet wurden, wodurch unterschiedliche Biegeradien realisiert werden konnten. Auf gleiche Art und Weise wurden Versuche mit erwärmten Mg-Profilen durchgeführt. Hierbei wurden der Vorschub als auch die Heizleistung der Induktion so gewählt, dass sich eine Umformtemperatur von 250 °C einstellte. Die Ergebnisse der Biegeversuche bei

Raumtemperatur sind in Abb. 93 links dargestellt, die Ergebnisse bei 250°C Umformtemperatur rechts. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse NC-Programmen aber unterschiedlicher Umformtemperatur zeigt Abb. 94.



Abb. 93 Versuchsteile mit unterschiedlichen Biegeradien zur Bestimmung der Anstellwinkel sowie der technologischen Grenzen, links kalt gebogen, rechts warm gebogen

Je Bauteilpaar ist das bei Raumtemperatur (ca. 20°C) gebogene Profil vorn, das bei 250°C umgeformte Bauteil ist dahinter dargestellt. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass bei sonst identischen Parametern beim Warmumformen engere Biegeradien realisiert werden können. Der wesentliche Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse ist im Rücksprungverhalten zu sehen. Der elastische Anteil der Biegung ist bei Raumtemperatur größer als bei erhöhten Umformtemperaturen, dem zu Folge ist der plastisch umgeformte Anteil der Biegung geringer.



Abb. 94 Gegenüberstellung von warm (hinteres Bauteil) und kalt (vorn) gebogenen Bauteilen bei sonst identischen kinematischen Bewegungsabläufen

In Abb. 95 sind Bauteile dargestellt, deren Biegung um 90° gedreht zu den bisherigen liegt. Links sind die Ergebnisse mit einer Biegung und unterschiedlichen Parametern dargestellt. Das rechte Bild der Abbildung zeigt eine Wechselbiegung zur Realisierung des Versatzes des Rahmens rechtwinklig zur Türebene.



Abb. 95 Versuchsteile mit Biegungen quer zum größten Widerstandsmoment, einfache Bögen (links) und Wechselbögen (rechts)

Aufgrund der Biegeergebnisse und der minimal erreichbaren Biegeradien wurde als Zwischenschritt ein Demonstratorbauteil entwickelt, das Bögen enthält, die auf der Versuchsanlage umgesetzt werden können. Abb. 96 zeigt links das CAD-Modell und rechts den gebogenen Rahmen in ein Türinnenteil eingelegt.

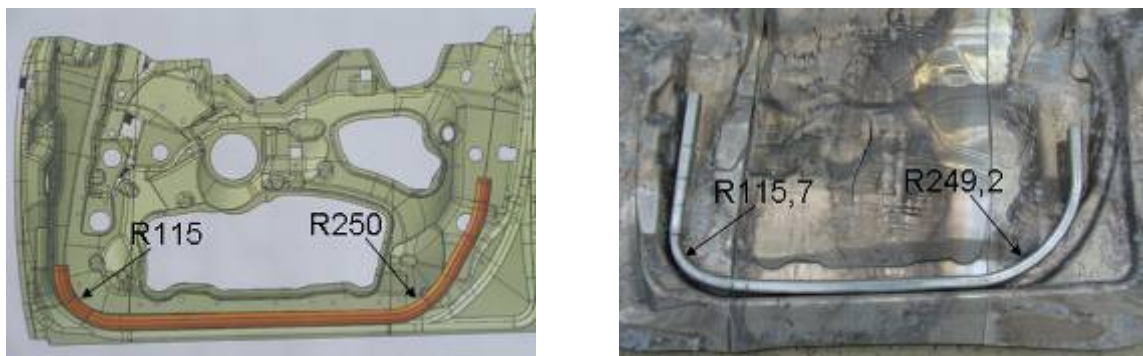


Abb. 96 Vereinfachte CAD-Konstruktion des Rahmenteils (links) und realisiertes Demonstratorbauteil (rechts) im Türinnenteil

Abb. 97 zeigt verschiedene Stellungen der Plattform mit der Rollenmatrize beim Biegen des Rahmens. Links ist die Plattform in angestellter Form und das Rohr wird durch den Pusher kontinuierlich weitergebogen. Rechts ist die Matrize wieder zurück in die Profillängsachse geschwänkt.

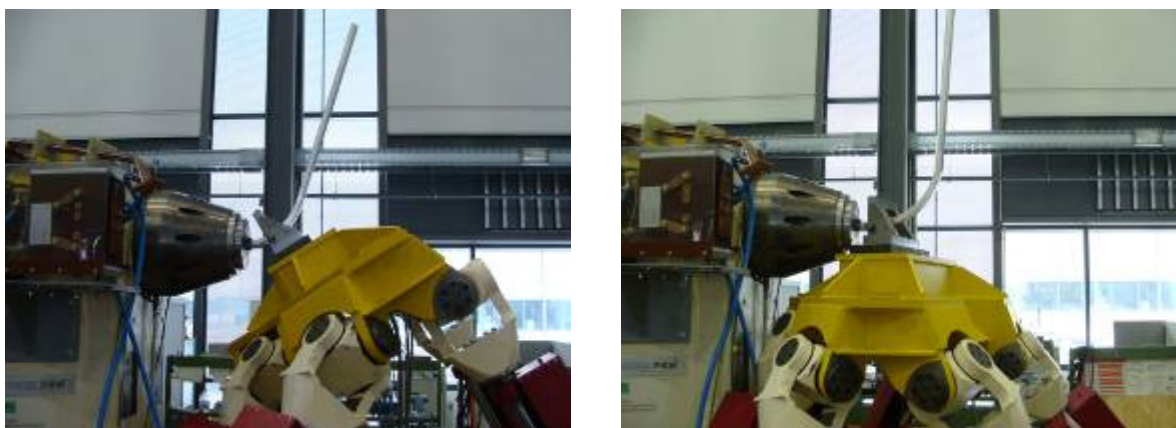


Abb. 97 Verschiedene Stellungen der Plattform beim Biegen, angestellte Position der Matrize (links) und nach Rückhub auf gerade Profilachse (rechts)



Abb. 98 Lage der Messstellen zur Bestimmung der Wanddickenverteilung (links) sowie Bauteil beim Vermessen mittels Faro Messarm (rechts)

Die messtechnische Erfassung der gebogenen Bauteile erfolgte mittels FARO-Arm. Abb. 98 zeigt die Messstellen zur Erfassung der Querschnittsgeometrie und den Wanddickenverläufen. Auf der rechten Seite ist die Messsituation zur Bestimmung der realisierten Biegeradien dargestellt.

Rollbiegen

Die Analyse des Rollbiegeprozesses zur Herstellung von Aluminium- und Stahlrohren zeigte einen wesentlichen Einfluss der Reibung auf die Qualität der hergestellten Rohre. Vor allem durch die induzierte Spannungsüberlagerung zur Einbringung der Druckspannungen im abschließenden Kalibriervorgang bedingt ein sehr hohes Risiko der Kaltaufschweißung auf der Werkzeugoberfläche. Besonders der thermische Einfluss durch die Temperierung des Rollbiegens für den Magnesiumwerkstoff stellt eine weitere Belastung für die Aktivteile des Rollbiegewerkzeuges dar. Der zu erwartende Temperaturbereich von 250 – 300 °C für den Magnesiumwerkstoff erfordert die Verwendung eines Warmarbeitsstahles.

Aufgrund der Prozesskräfte in Kombination mit den Prozesstemperaturen wurde als Werkzeugwerkstoff der Warmarbeitsstahl 1.2343 (X37CrMoV5-1) ausgewählt. Die Warmfestigkeit des Werkstoffes in Kombination mit einer guten und verzugsarmen Härbarkeit sowie die daraus resultierenden Möglichkeiten zum Aufbringen von Verschleißschutzschichten (Vorzugsvariante CrNi-Schichten) macht diesen Werkstoff zur Vorzugsvariante für die Aktivteile des Rollbiegewerkzeuges gegenüber anderen betrachteten Warmarbeitsstählen wie 1.2714 (55NiCrMoV7) bzw. 1.2365 (32CrMoV12-28). Ein weiterer Vorteil ist die gute Wärmeleitfähigkeit des ausgewählten Werkstoffes.

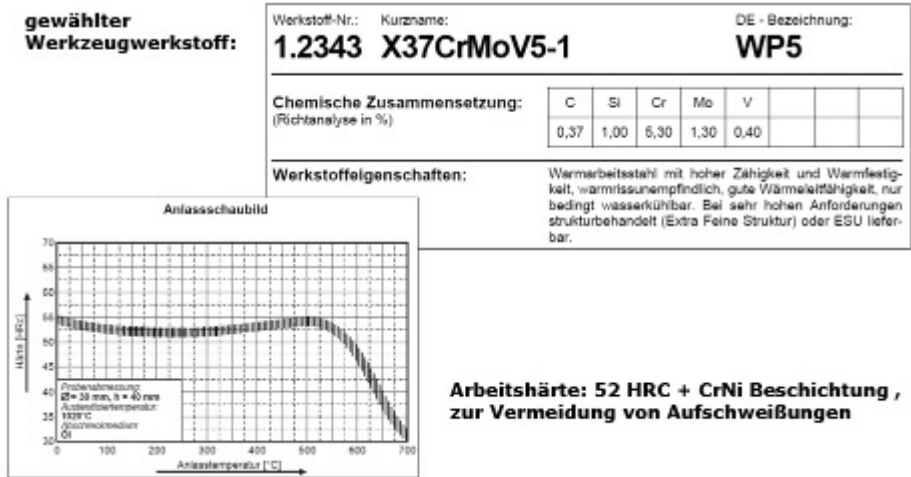


Abb. 99 Werkstoffdatenblatt 1.2343

Bereits vorliegende Erfahrungen mit dem Rollbiegen von Stahlrohren zeigten in Abhängigkeit der geometrischen Bedingungen und der Werkstoffkennwerte unterschiedliche Anforderungen an den Rollbiegeprozess. Zur Gewährleistung der Qualitätsanforderungen an das Rollbiegeteil wurden zwei unterschiedliche Strategien verfolgt, das Rollbiegen mit und ohne Innendorn. Für die geplanten Untersuchungen sollen beide Strategien erprobt werden, wobei zunächst Bauteile ohne Innendorn hergestellt werden sollen. In einer zweiten Versuchsreihe soll dann ein entsprechender Innendorn nachgerüstet werden. Zur Erwärmung des Rollbiegeteiles kann zum einen die Mantelfläche der Biegebacken genutzt werden, zum anderen auch der Biegedorn. Bei einer Vorgehensweise ohne Biegedorn kann eine berührungslose Erwärmungseinrichtung (Induktor) in den entsprechenden Freiraum im Werkzeug integriert werden, bei Verwendung eines Biegedorns muss die Erwärmungseinrichtung in diesen integriert werden.

Speziell die Anforderungen zur Erwärmung des Bauteiles mussten in der Konzeption und Konstruktion der Aktivteile Berücksichtigung finden. Dazu wurden die Aktivteile auf Grundlage einer bestehenden Konstruktion für ein Rollbiegeteil mit einem Durchmesser von 60 mm weiterentwickelt. Die Bauteillänge der Versuchsrohre ist mit 400 mm vorgesehen, damit ist auch die Länge der Erwärmungszone im Rollbiegewerkzeug definiert.

Die Rollbiegetechnologie basiert auf einem zweistufigem Verfahren, bei dem zunächst in einem ersten Schritt mit einem Biegewerkzeug die Bauteilenden angekippt werden und in einem zweiten Schritt, dem eigentlichen Rollbiegen, die Rohrkontur hergestellt wird.

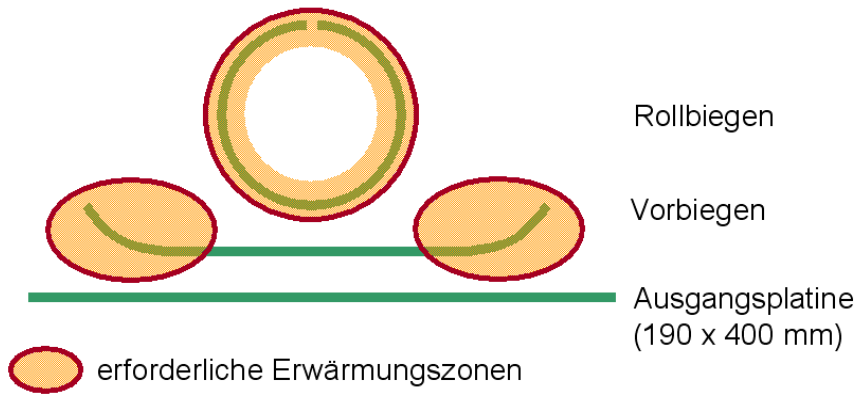


Abb. 100 Schematische Arbeitsfolge beim Rollbiegen

Die optimale Lage für die induktive Erwärmungseinrichtung im Rollbiegewerkzeug ergibt sich für die zentrale Position, die auch für den optionalen Innendorn vorgesehen ist. Durch die Nutzung der Peripherie des Innendorns (Befestigung, Positionierung) kann der werkzeugtechnische Aufwand gering gehalten werden. Beim Einlegen des vorgebogenen Teiles wird zunächst der zentrale Bereich beheizt, da bei Prozessbeginn hier nur ein geringer Abstand zwischen Platine und Rollbiegematrizenelement besteht. Mit der zunehmenden Ausformung der Platine nach unten und der Anlage an die fertigformgebenden seitlichen Matrizenelemente gelangen auch diese Bauteilbereiche zunehmend in die Wärmeeinflusszone, wodurch infolge der thermisch aktivierten verbesserten Umformeigenschaften eine vollständige Anlage in der Rollbiegematrix erreicht wird. Durch die Verwendung eines um ca. 0,8% vergrößerten Blechzuschnittes in Umfangsrichtung des späteren Rollbiegeteiles kann eine vollständige Plastifizierung auf dem Rohumfang induziert werden, was eine deutliche Reduzierung auftretender Rücksprüngeffekte erwarten lässt.

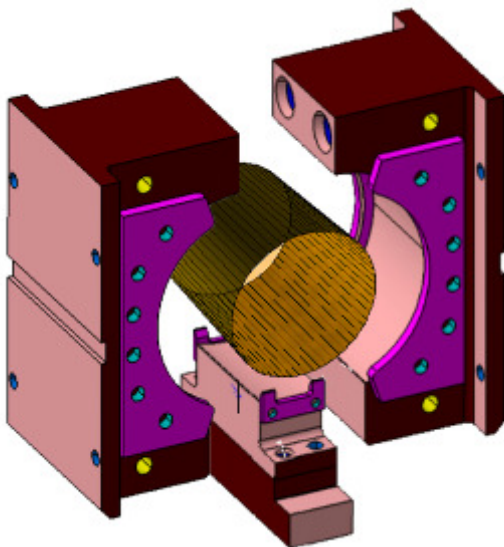


Abb. 101 Lage Innendorn mit Wärmeeinflusszone im Rollbiegewerkzeug

Für das Versuchsprogramm sind neben den temperierten Versuchen auch Versuche bei Raumtemperatur geplant. Letztere werden mit dem gleichen Versuchsaufbau, jedoch deaktivierter Erwärmungseinrichtung durchgeführt.

Entsprechend der Konzeption erfolgte die Konstruktion, Fertigung und Anpassung der Aktivteile des Rollbiegewerkzeuges. Dabei wurde auf größtmögliche Flexibilität

für die Durchführung der Versuche, insbesondere für die nachträgliche Integration, Anpassung und Optimierung der Magnetkerne geachtet. Nachfolgende Abb. 102 zeigt das Rollbiegewerkzeug während der Einarbeitung in der Versuchspresse, zunächst noch ohne integrierte Erwärmungseinrichtung.

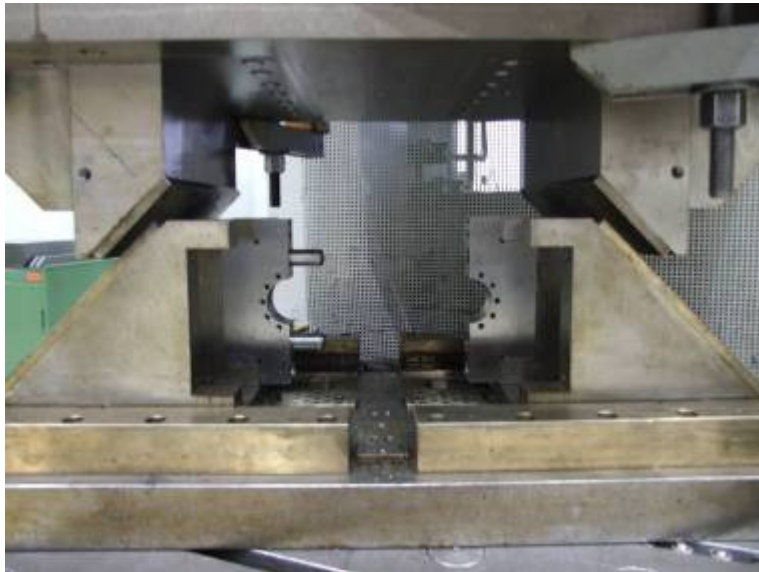


Abb. 102 Rollbiegewerkzeug bei der Einarbeitung

Im Einrichtbetrieb wurde zunächst mit kürzeren Rohrabchnitten gearbeitet, um bei den laufenden Arbeiten zur Ermittlung der optimalen Zuschnittlänge den Materialaufwand zu begrenzen. Nach Erreichung optimaler Halbzeugabmessungen und Prozessbedingungen ist Verifizierung dieser Ergebnisse mit Zuschnitten für die festgelegte Referenzlänge von 400 mm geplant. In nachfolgender Abb. 103 sind erste kaltgeformte Einrichtteile sowohl für die Vorbiege- als auch die Rollbiegeoperation dargestellt.

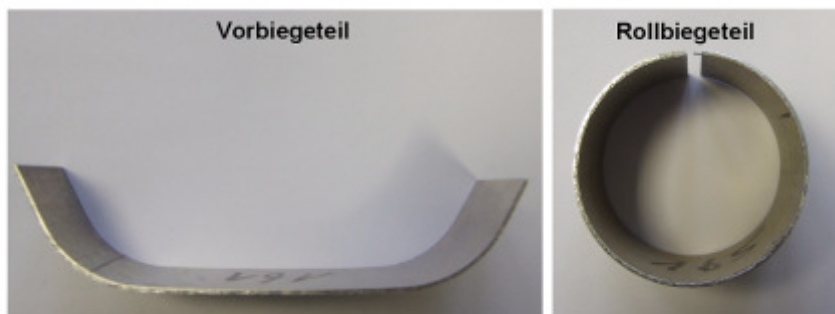


Abb. 103 Einrichtteile zum Rollbiegen bei Raumtemperatur

Die Abb. 104 zeigt eine vereinfachte Übersicht über die realisierten Versuche. In der Matrix sind die variierten Hauptparameter angegeben. Zu jeder Versuchsreihe wurden mehrere Versuche durchgeführt, wobei neben der Temperatur auch die Zuschnittslänge geändert wurde sowie die Ausprägung des Vorbiegens angepasst.

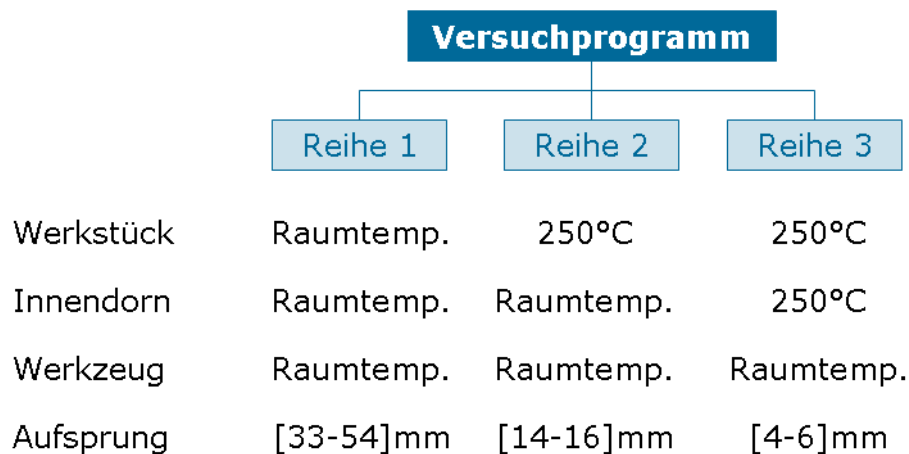


Abb. 104 Übersicht des Versuchprogramm mit matrix der Versuchsparameter

In Abb. 105 ist das Versuchswerkzeug abgebildet und ausgewählte Versuchsteile. Diese repräsentieren das markante Aufsprungverhalten der einzelnen Versuchsreihen und somit den Einfluss der Temperierung auf das Umformergebnis.

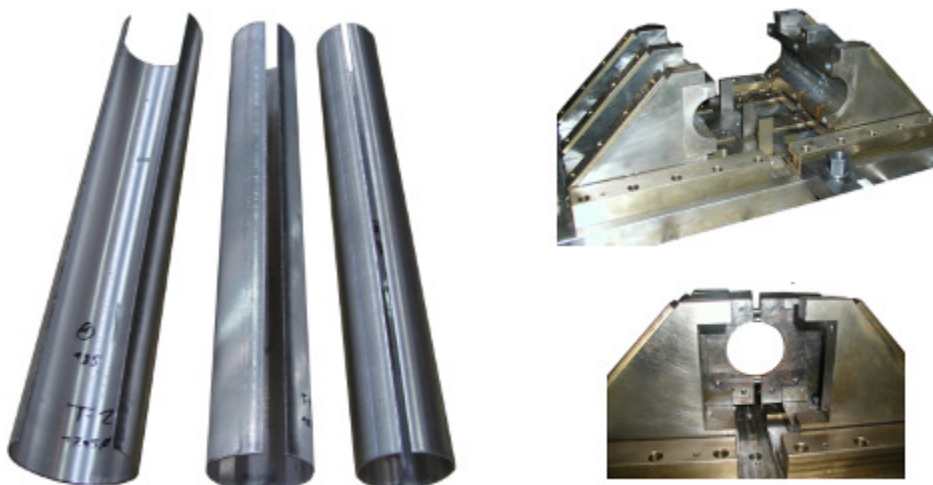


Abb. 105 Versuchteile mit unterschiedlich stark ausgeprägtem Aufsprung (links) sowie das Versuchswerkzeug im geöffneten (rechts oben) und geschlossenem Zustand (rechts unten)

Der Darstellung in Abb. 106 können die Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen entnommen werden. Aus Gründen der Übersicht sind nicht alle Versuche dargestellt, dennoch ist der Zusammenhang deutlich. Durch die Temperierung kann der Aufsprung signifikant verringert werden. Während das Biegen im kalten Zustand Aufsprünge von durchschnittlich 40 mm zur Folge hat, werden mit erwärmtem Blechzuschnitt diese im Mittel auf 14 mm verringert. Durch das Beheizen des Innendorns konnte der Aufsprung auf Werte um 5 mm reduziert werden. Durch sukzessive Erhö

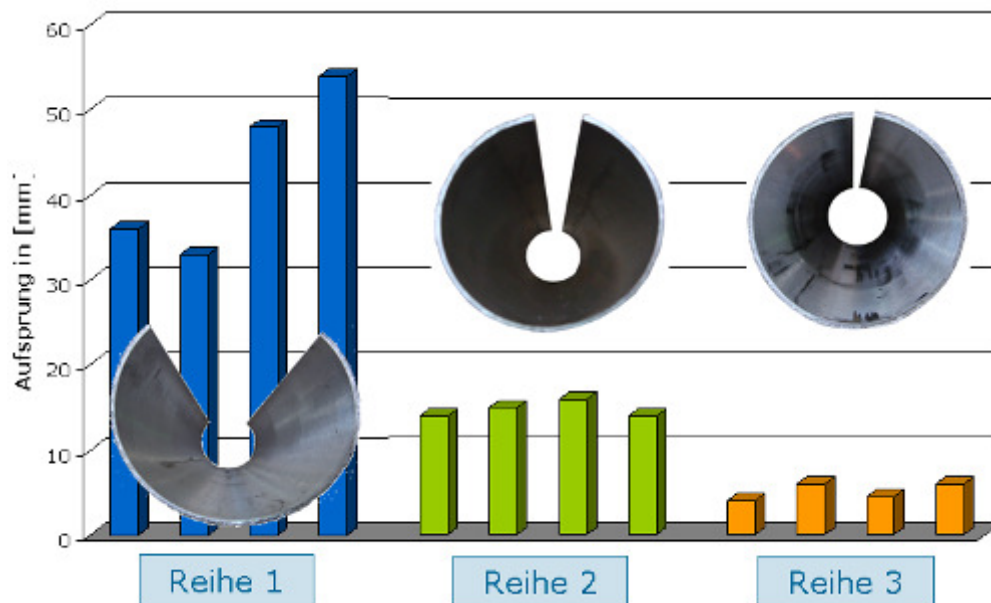


Abb. 106 Versuchergebnisse der einzelnen Versuchreihen

hung der Zuschnittslänge in Umfangsrichtung wurde versucht, die elastische Rückfederung des Materials weiter zu reduzieren. Die vollständige Plastifizierung aufgrund des Materialüberschusses wurde beim Magnesium nicht erreicht bzw. tritt kein im Vergleich zu Stahl bekanntes Verhalten ein.

1.6 Teilprojekt V 3.1.6 „Fließpressen“

Es wurde eine Versuchsanlage zur Untersuchung der technologischen Abläufe und der Werkzeugtechnik konzipiert und gebaut und gemeinsam mit der Fa. Coexal die vorbereiteten Grundlagenversuche mit dem entsprechenden Versuchswerkzeug durchgeführt. Die Zielstellung aus Sicht des Projektes war dabei, die wesentlichen Prozessgrößen zu ermitteln und deren Parameterfelder einzugrenzen.

Aus Gründen der Flexibilität wurden die experimentellen Untersuchungen auf einer hydraulischen Presse durchgeführt, wodurch die Arbeitsgeschwindigkeit des Prozesses variiert werden konnte.



Abb. 107 Hydraulische Presse mit eingebautem Versuchswerkzeug (beheizte Matrize, beheizter Stempel)

Das Versuchswerkzeug ermöglicht durch seinen konstruktiven Aufbau das unabhängige Temperieren von Stempel und Matrize durch entsprechende Heizregelkreise. Die Erwärmung der Rohteile wurde in einem Ofen (Abb. 108) realisiert. Die Rohteiltemperatur konnte dadurch in einem weiten Bereich variiert werden.



Abb. 108 Ofen zum Erwärmen der Ausgangsrohlinge

Zur Erfassung der prozessbeeinflussenden Größen und deren Grenzen wurden unterschiedliche becherförmige Teile mit verschiedenen Wandstärken hergestellt (Abb. 109), wobei sowohl die Verfahren des Rückwärts Napffließpressens und eine Kombination aus Rückwärts- und Vorwärtsfließpressen angewendet wurden.

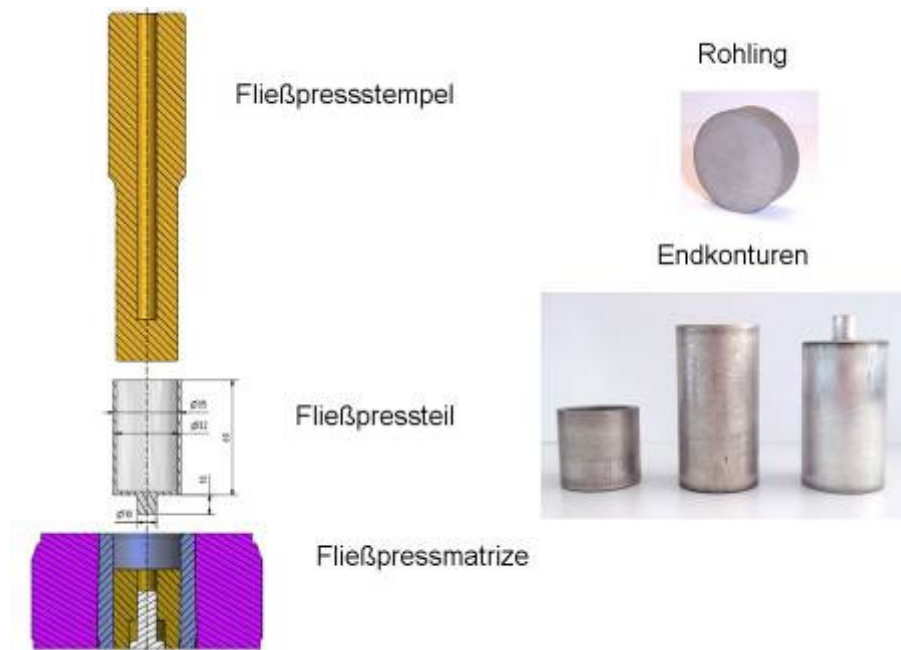


Abb. 109 Versuchswerkzeug mit Versuchsteilen

Die Versuche wurden mit veränderlichen Prozessgrößen durchgeführt, wobei die Teilegeometrie, die Oberfläche, der Formfüllgrad sowie Härte und Gefüge der Werkstücke untersucht wurden. Es wurden die Prozesskraft sowie die reale Prozessgeschwindigkeit experimentell ermittelt (Abb. 110).

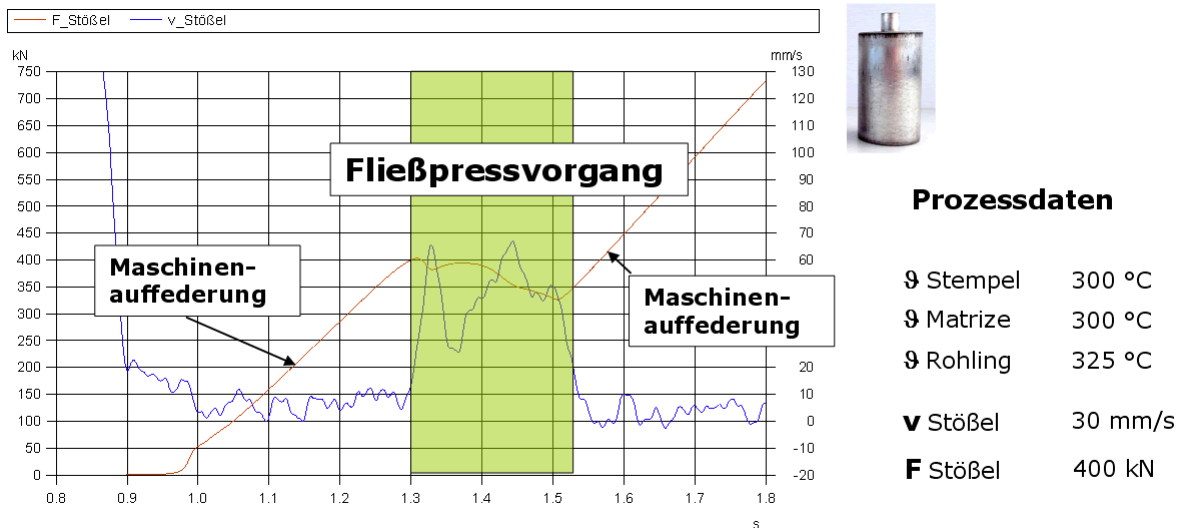


Abb. 110 Typischer Messschrieb von Kraft und Stößelgeschwindigkeit

In der Tabelle (Abb. 111) sind typische Versuchsparameter dargestellt, die noch zusätzlich durch unterschiedliche Stößelgeschwindigkeiten kombiniert wurden. Es wurden Stößelgeschwindigkeiten zwischen 10 mm/s und 60 mm/s an der Presse eingestellt. Die realen gemessenen Stößelgeschwindigkeiten während des Umform-

prozesses sind durch das dynamische Verhalten von Presse, Antrieb und Werkzeug deutlich höher. Sie lagen teilweise bis über 130 mm/s.

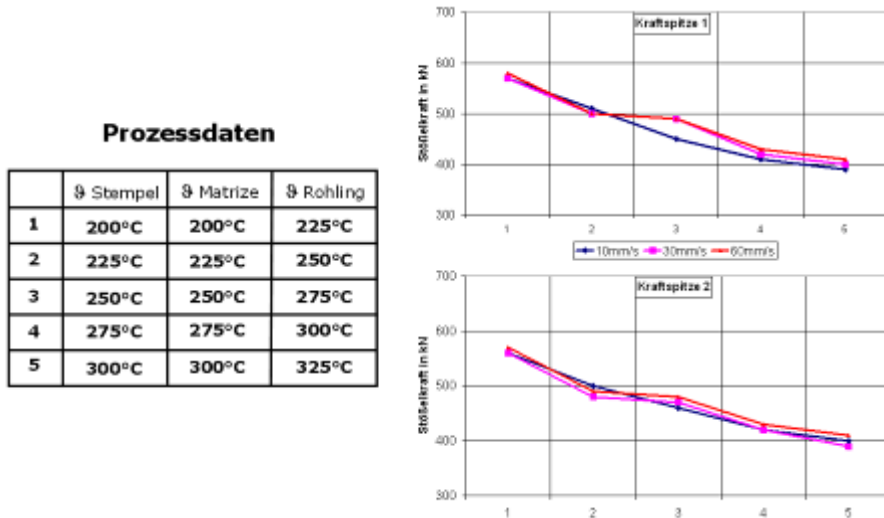


Abb. 111 Darstellung der Umformkräfte in Abhängigkeit von den entsprechenden Prozessdaten

Deutlich erkennbar ist der Kraftbedarf des Fließpressens in Abhängigkeit von der Temperatur (Rohteiltemperatur). Höhere Temperaturen führten zu kleineren Umformkräften und insgesamt zu einem besseren Fließverhalten des Werkstoffs. Allerdings traten bei höheren Temperaturen Probleme mit dem Schmierstoff sowie aufgrund der geringeren Festigkeit Probleme mit dem Auswerfen auf. Die Auswerferkraft führte zum Lochen des Bodens.

Geringe Temperaturen führten zu höheren Umformkräften und bewirkten am Teil eine rissige Oberfläche bzw. ein Versagen des Fließpressprozesses (Abb. 112).



Abb. 112 Rissige Oberfläche am Fließpressteil infolge zu geringer Umformtemperatur

Weiterführende Arbeiten befassten sich mit dem Einfluss unterschiedlicher Umformtemperaturen sowie Abkühlstrategien auf die Härte und Kornverteilung des Werkstückes.

Dabei zeigte sich, dass im untersuchten Temperaturbereich der Rohteiltemperatur von 225 °C bis 325 °C nach dem Umformen keine nennenswerten Unterschiede in der Mikrohärtigkeit am Bauteil auftraten (Abb. 113). Gleiches Verhalten zeigte sich bei unterschiedlichen Abkühlstrategien (Abb. 114). Nach dem Umformen wurden Werkstücke im Wasserbad abgeschreckt bzw. an der Luft abgekühlt, wobei keine nennenswerten Unterschiede in der Mikrohärtigkeit zu verzeichnen waren.

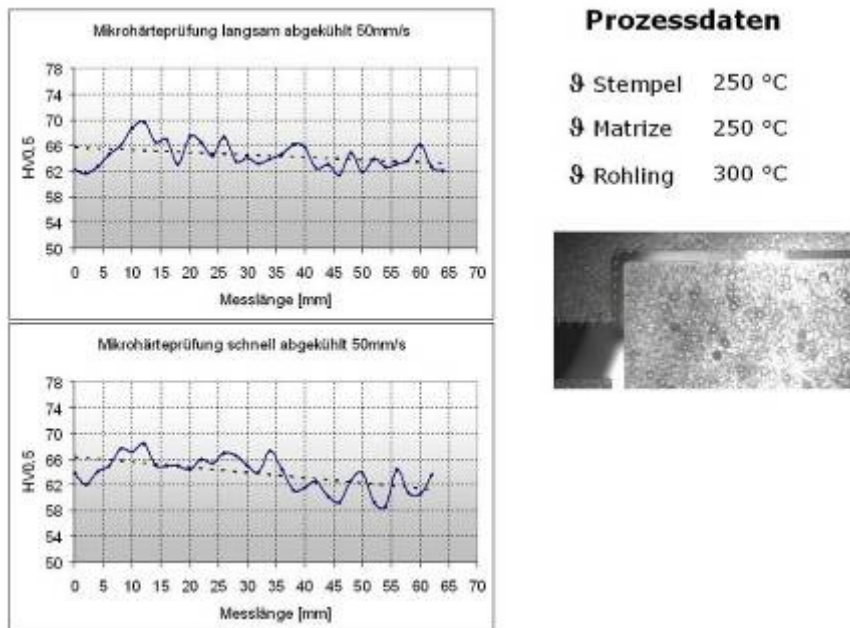


Abb. 113 Ergebnisse der Härteprüfung bei unterschiedlichen Abkühlstrategien

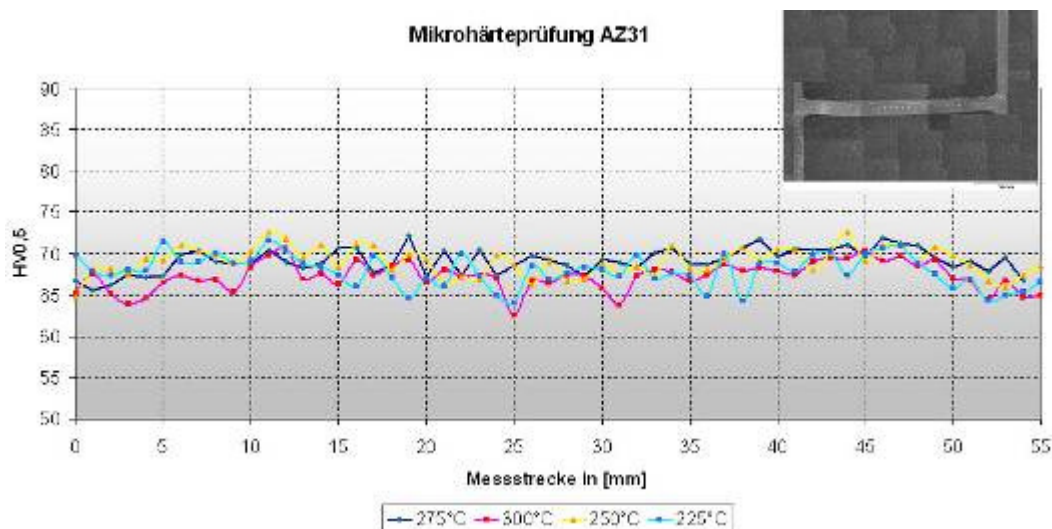


Abb. 114 Ergebnisse der Härteprüfung bei unterschiedlichen Rohteiltemperaturen

Weitere Untersuchungen wurden hinsichtlich des Einflusses der Abkühlstrategie und der Umformtemperatur auf die Kornverteilung durchgeführt. Hierbei konnten keine

signifikanten Unterschiede der Kornverteilung in Abhängigkeit von der Abkühlstrategie festgestellt werden (Abb. 115).

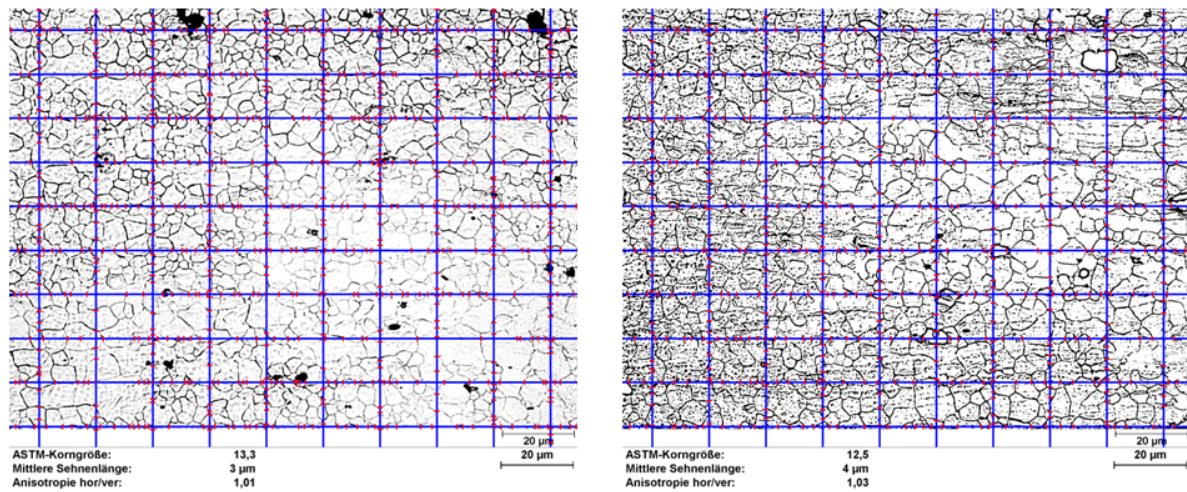


Abb. 115 Kornverteilung im Wandbereich fließgepresster becherförmiger Teile (links langsam abgekühlt, rechts schnell im Wasserbad abgekühlt)

Magnesium besitzt ein sehr gutes Wärmeleitverhalten, was dazu führt, dass die Werkzeugkontaktzeiten kurz gehalten bzw. der Wärmeübergang vom Rohteil ins Werkzeug weitestgehend verhindert werden muss. Für die Versuchsanlage werden Taktzeiten von 1 s – 2 s gefordert, was kurze Werkzeugkontaktzeiten garantiert.

Weiterhin wird durch das Beheizen von Stempel und Matrize ein Wärmeübergang insbesondere von der dünnen Wand in das Werkzeug verhindert.

Prinzipiell können aus den technologischen Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter folgende Schlussfolgerungen für eine entsprechende Prozessüberwachung abgeleitet werden:

- Der Fließpressprozess ist für die untersuchte Magnesiumlegierung AZ31 und den Werkzeuggeometrien (becherförmige Teile mit Wandstärken bis 1 mm) ab Rohteiltemperaturen von 225 °C stabil. Über 300 °C sollte nicht gearbeitet werden, da der Energieeinsatz zu groß wird und die Festigkeit während des Umformens eingeschränkt ist, was insbesondere beim Auswerfen zum Bauteilversagen führen kann.
- Um einen Wärmeübergang weitestgehend vom Werkstück in das Werkzeug zu vermeiden, müssen Matrize und Stempel ebenfalls beheizt werden. Die Temperaturen können dabei aus energetischen Gesichtspunkten unter der Werkstücktemperatur liegen. Die Temperaturen sind zu optimieren, wobei die Stückzahl (Werkzeugkontaktzeit) sowie die Werkstückgeometrie (Dicke des Bechers) wesentliche Einflussfaktoren sind.
- Die experimentellen Untersuchungen für die Musterteile zeigten keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen Umformtemperatur und Mikrohärtigkeit des umgeformten Werkstückes.

- Eine spezielle Abkühlstrategie für die umgeformten Werkstücke ist nach Auswertung der durchgeführten Versuche nicht erforderlich. Es konnten keine wesentlichen Unterschiede in Härte bzw. in der Kornstruktur in Abhängigkeit von der Abkühlstrategie festgestellt werden.
- Die technologischen Untersuchungen wurden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt, wobei keine signifikanten Unterschiede an der Teilegeometrie festgestellt werden konnten.
- Die Fa. Coexal experimentierte mit unterschiedlichen Schmiermitteln und Strategien für den Schmiermittelauftrag. Es zeigten sich Probleme hinsichtlich des Verschleißes der Werkzeugaktivteile, an deren Beseitigung gegenwärtig durch den Einsatz angepasster Schmiermittel gearbeitet wird.

Ausgehend von der Auswertung der praktischen Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses von Prozessparametern auf die Bauteileigenschaften und -qualität kann nachfolgende Strategie zur Prozessüberwachung (Abb. 116) abgeleitet werden.

- Für einen stabilen Prozess sind im Wesentlichen die Temperaturen der Werkzeugteile (Stempel und Matrize) sowie des Rohlings in einem Toleranzfeld konstant zu halten.
- Aufgrund des komplizierten tribologischen Systems, bedingt durch den Werkstoff und den hohen Umformtemperaturen, ist eine Verschleißüberwachung sinnvoll. Diese kann effektiv durch die Überwachung der Prozesskraft mit einer entsprechenden Hüllkurve erfolgen.
- Weitere Maßnahmen hinsichtlich der Überwachung von Prozessgrößen liegen in der Erwärmungsanlage der Rohlinge, wobei eine konstante Rohlingtemperatur unabhängig vom Prozessanlauf und –störung garantiert werden muss.

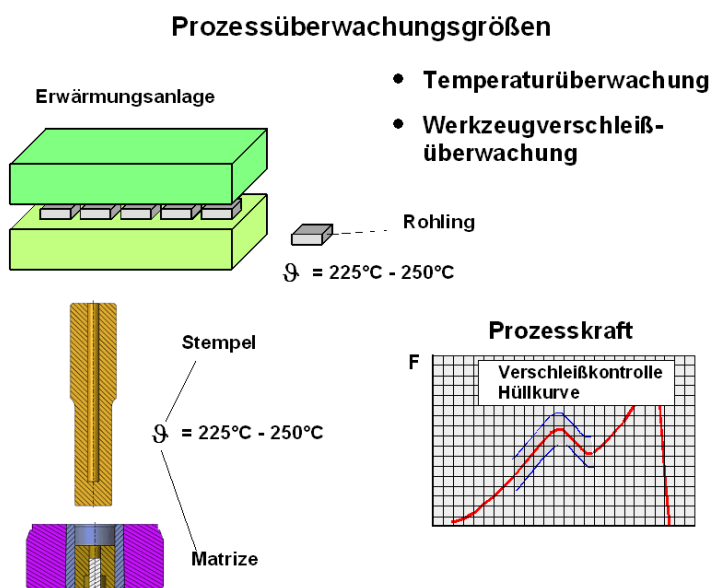


Abb. 116 Prozessüberwachungsstrategie beim Fließpressen

Die Beschaffung des Ausgangsmaterials für die Serienteile erwies sich als problematisch, woraufhin seitens der Fa. Coexal festgelegt wurde, die Ausgangsformen (Butzen) durch ein mehrstufiges Prägeverfahren selbst herzustellen. Dafür wurden die Werkzeuge konstruiert, gebaut und gemeinsam mit dem IWU die Untersuchungen dazu durchgeführt.

In Abb. 117 sind sowohl das Ausgangsmaterial, die Zwischenstufe und das fertig ausgeprägte Teil dargestellt. Die Versuche wurden mit dem bereits dargestellten Versuchsstand (Abb. 107) realisiert.



Abb. 117 Durch Prägen hergestellte Ausgangsgeometrie für das Fließpressen der Demonstratorteile (rechts: Ausgangsmaterial, mitte: Zwischenstufe, links Fertigteil)



Abb. 118 Prägewerkzeuge der 1. und 2. Stufe

Für die einzelnen Prägeoperationen wurde mit den nachfolgenden Prozessparametern gearbeitet:

Werkzeug	\varnothing Matrize in °C	\varnothing Stempel in °C	\varnothing Rohling in °C	v_Stempel in mm/s
WZ 1	250	140	170 - 230	65
WZ 1	250	140	230	65

Tab. 9 Eingestellte Prozessparameter

Es zeigte sich, dass mit den dargestellten Prozessparametern die einzelnen Umformstufen erreicht werden konnten.

Prägevorgang 1

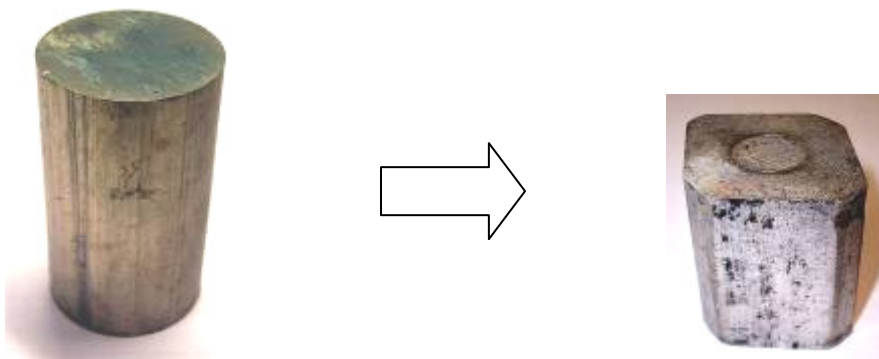


Abb. 119 Ausgangsform und Endform der Prägeoperation 1

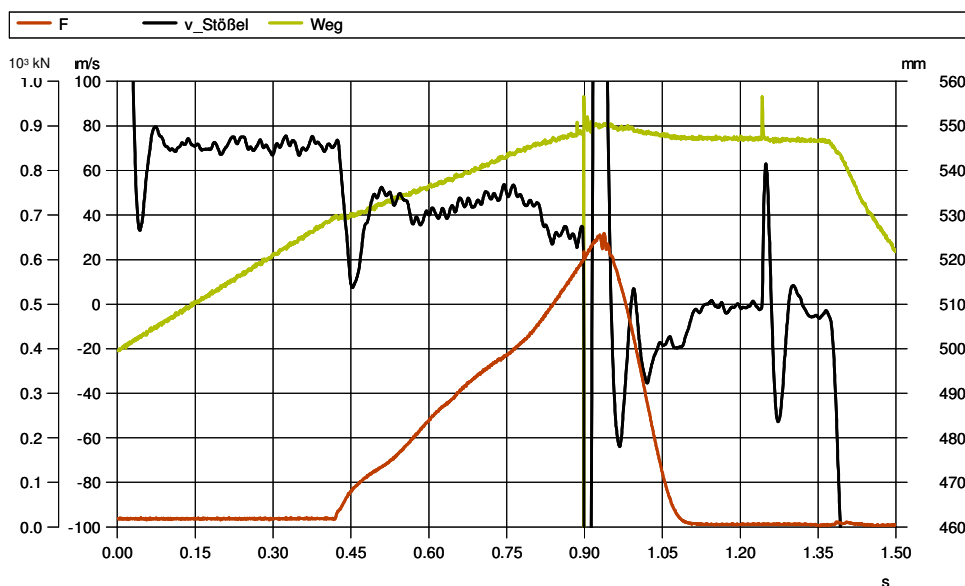


Abb. 120 Typischer Presskraftverlauf beim Prägevorgang der ersten Stufe

Prägevorgang 2

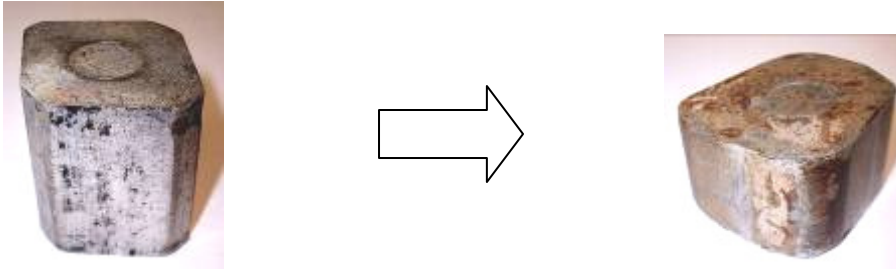


Abb. 121 Ausgangsform und Endform der Prägeoperation 2

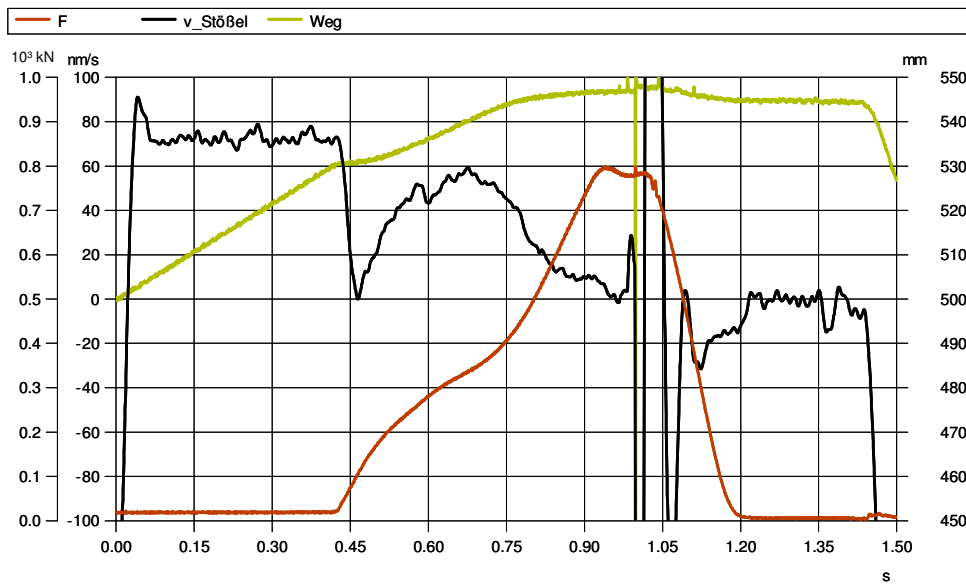


Abb. 122 Typischer Presskraftverlauf beim Prägevorgang der zweiten Stufe

Gegenwärtig laufen die Vorbereitungen für den Bau des Werkzeugs für das Demonstratorerteil.

Parallel zu den Aktivitäten im Werkzeugbau wurde durch die Fa. Pro beam die Erwärmungsanlage konzipiert, konstruiert und gebaut. Diese Erwärmungsanlage wird in Betrieb genommen und danach bei der Fa. Coexal auf die Versuchsmaschine aufgebaut.

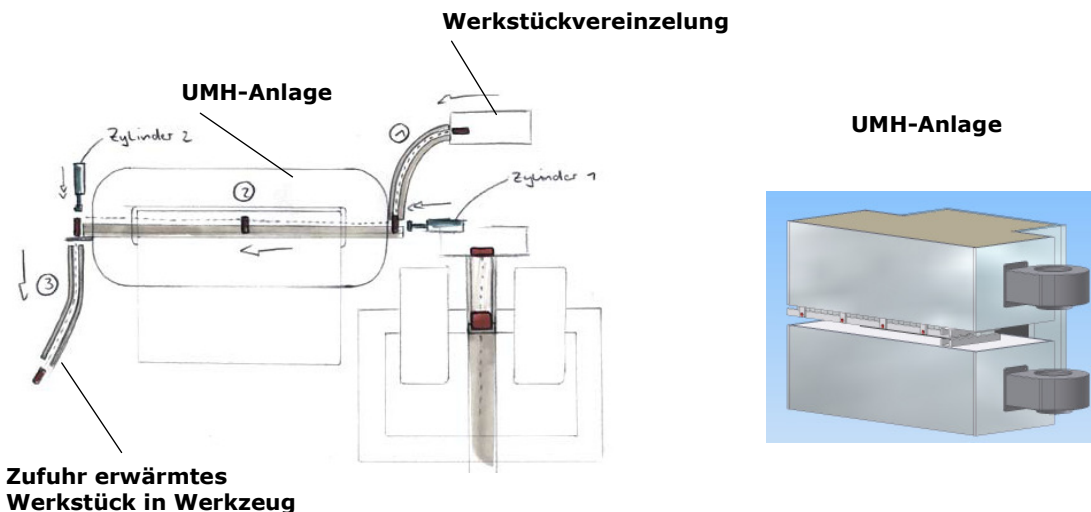


Abb. 123 Entwurf der UMH Anlage zum Erwärmen und Vereinzeln der Rohlinge

Die Rohlinge befinden sich in einem Werkstückmagazin (Vibrationsförderer), werden der UMH Anlage zugeführt und durch die Erwärmungsanlage durchgetaktet. Dadurch verbleiben die Rohlinge die erforderliche Erwärmungszeit in der UMH Anlage. Die Zuführung in das Werkzeug erfolgt über eine Weiche, vor der die aktuelle Werkstücktemperatur geprüft wird. Ist die Temperatur außerhalb des zulässigen Prozessfensters, wird das Teil ausgeschleust.

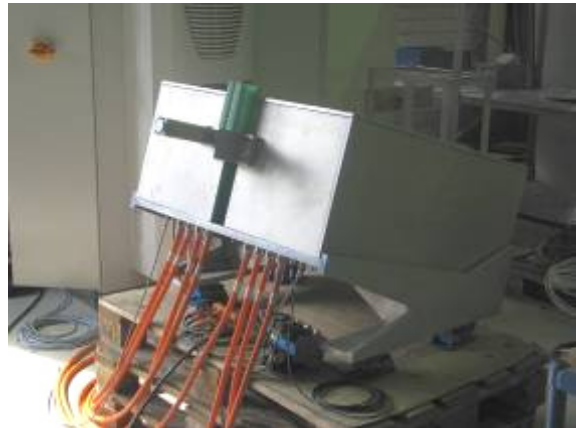
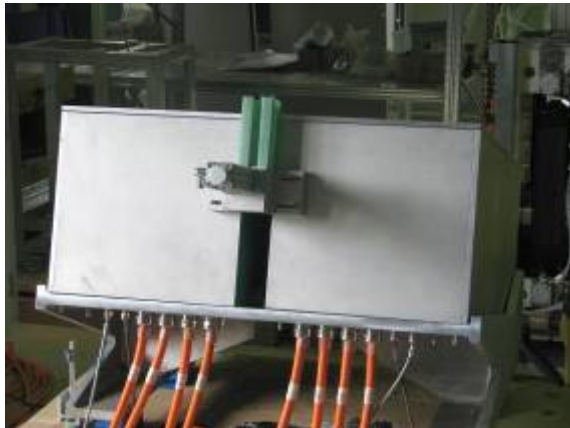


Abb. 124 Erwärmungsanlage

Die UMH Anlage wurde bei der Fa. Pro beam in Betrieb genommen, einer ausführlichen Testreihe unterzogen und anschließend bei Coexal im Versuchstand reinstalled (Abb. 125).



Abb. 125 Versuchstand Coexal

Abschließend kam es zu Herstellung der in Abb. 126 dargestellten Demonstratoren.



Abb. 126 Demonstratoren (Fließpressteile)

2 Demonstrator

Im Folgenden ist der Aufbau des Demonstrators dargestellt.

In Abb. 127 ist der tragende Strukturrahmen – zusammengesetzt aus dem IHU-Rahmen mit den gefügten Fließpressteilen (Scharnieranbindungen) sowie dem Rohrbiegeteil – dargestellt.



Abb. 127 Demonstrator: IHU-Rahmen mit Fließpressteilen und Rohrbiegeteil

Der Rahmen wurde anschließend in das Türinnenteil durch Schweißen integriert (Abb. 128).

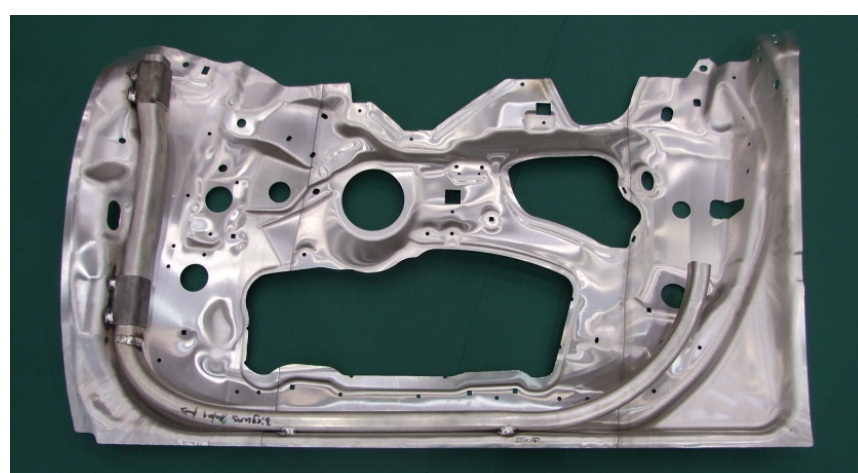


Abb. 128 Demonstrator: Türinnenteil mit gefügten Rahmen

Abschließend kann es zum Fügen durch Falzen der beiden Komponenten Türinnenteil und Außenhaut. Innerhalb des Verbundprojektes wurde durch Benseler die Lackierung übernommen. Der fertige Demonstrator ist in Abb. 129 mit dem Aufbau des Lackschichtsystems dargestellt.

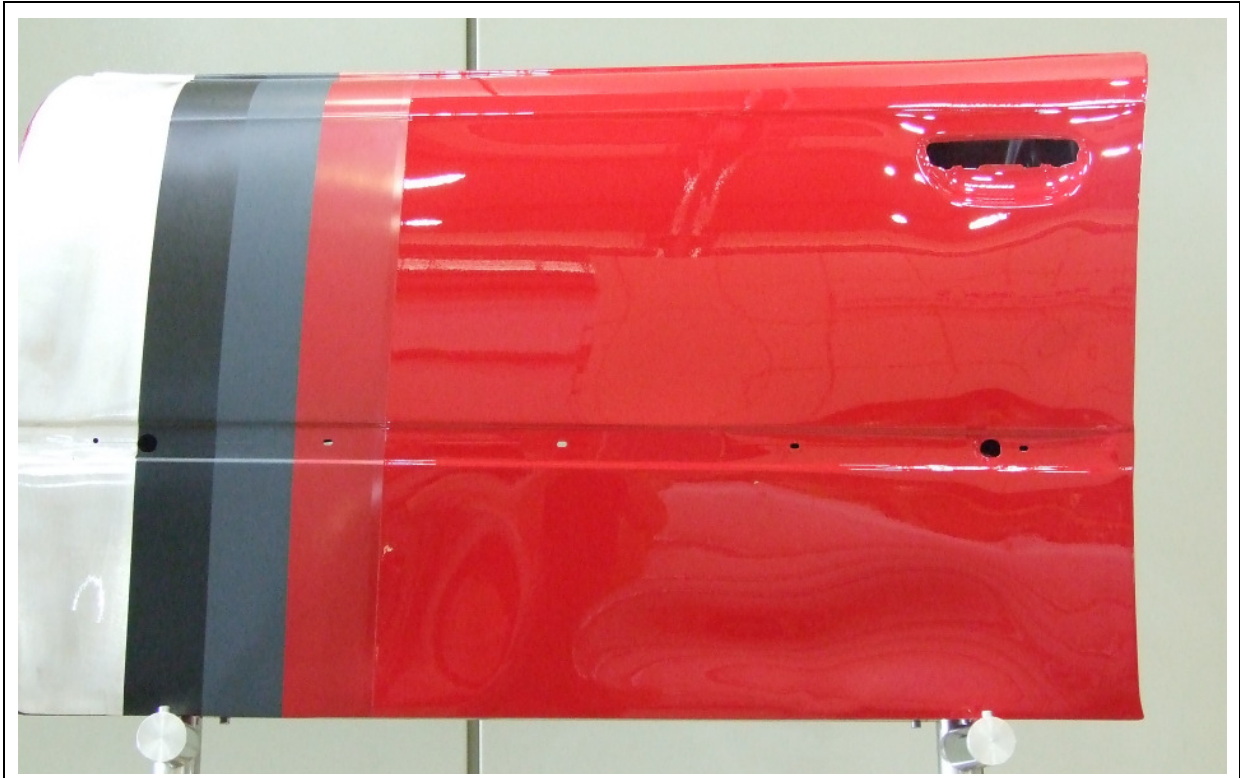


Abb. 129 Demonstrator: Autotür aus Magnesium im Lackschichtaufbau

3 Vergleich Vorhabensstand Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Bedingt durch die zu Projektbeginn getroffene Entscheidung der Verbundpartner, eine Autotür im Maßstab 1:1 als Grundlage für die Umsetzung der einzelnen Technologien zu nutzen, und der dadurch zwingenden Nutzung von geschweißten Platinen, kam und kommt es zu mehreren Verschiebungen und zusätzlichen Aufwendungen im Verbundprojekt.

Hiervon stärker betroffen als anfangs vermutet, waren die Entwicklung der neuen Technologien und deren Einfluss auf die Werkzeugkonstruktion und den –bau.

Hauptsächlich betroffen waren die Teilprojekte „Hydroformen“ und „Tief- und Streckziehen“ (Türinnenteil). Dennoch konnten durch Bereitstellung zusätzlicher Kapazitäten die Verzögerungen bereits innerhalb der Projektlaufzeit aufgeholt werden und der Demonstrator termingerecht fertig gestellt werden. Zusätzliche Aufwendungen wurden durch die Projektpartner übernommen.

4 Aussichten für die Erreichung der Ziele

Alle gesteckten Ziele innerhalb des Verbundprojektes V 3.1 wurden erreicht.

5 Bekanntwerden von FE-Ergebnissen von dritter Seite

Im Projektzeitraum wurden keine neuen Ergebnisse bzw. Veröffentlichungen bekannt, die zum Thema relevant sind.

6 Änderungen in der Zielsetzung

Es waren während der Projektbearbeitung keine Änderungen in der Zielsetzung notwendig.

7 Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplanes

Das im Antrag formulierte Innovationspotential der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse - die Grundlagenentwicklung zum Umformen und Zerteilen von Strukturen aus Magnesium - wurde erreicht und erfolgreich am Beispiel des Demonstrators Autotür umgesetzt.

Zu den dargelegten wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Erfolgsaussichten gibt es keine Änderungen bzw. Ergänzungen.

Planmäßig wurden bereits folgende Punkte des Verwertungsplanes umgesetzt:

- Erarbeitung einer Kennwertdatei für MgK für alle Beanspruchungsarten innerhalb der Blechbearbeitung

Angearbeitet bzw. in Planung sind:

- Erarbeitung eines im Verbund abgestimmten, dennoch institutsspezifisch aufbereiteten Vermarktungskonzeptes für die erzielten Ergebnisse
- Aufbereitung möglicher anzubietender Leistungen, reflektiert und aufbereitet auf die gesamten Teilefamilien des automotiv-Sektors (z.B.: Außenteile, Strukturbauteile, Kleinteile; spezifische Baugruppen)
- Erarbeitung eines Akquiseplanes für wahlweise einzelnes oder verbundgeprägtes Auftreten in den einzelnen Industriezweigen, auch im non-automotive-Bereich
- Erarbeitung einer Kompetenzbroschüre über die Leistungen des Fraunhofer IWU und des TEMAK-Verbundes