

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

29/05/2019

Projekttitle: KryoAlu2

**Kryogene Umformung von Aluminium-
Außenhautbauteilen für automobiler
Anwendungen**

Projektnummer: 853560

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Autor/in:

Florian Grabner (LKR), Belinda Gruber (MUL).

Ausschreibung	2. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/01/2016
Projektende	31/12/2018
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	36 Monate
Projektnehmer (Institution)	LKR Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH
Ansprechpartner	Dipl.-Ing. Florian Grabner
Postadresse	Lamprechtshausenerstraße 61 5282 Braunau am Inn - Ranshofen
Telefon	+43 50550-6924
Fax	+43 50550-6901
E-Mail	florian.grabner@ait.ac.at
Website	www.ait.ac.at www.lkr.at

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	3
2	Einleitung.....	4
2.1	Aufgabenstellung:	4
2.2	Schwerpunkte des Projektes	4
2.3	Einordnung in das Programm.....	5
2.4	Verwendete Methoden	5
2.5	Aufbau der Arbeit	5
3	Inhaltliche Darstellung.....	5
3.1	Methoden	6
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	8
5	Zusammenfassung und Ausblick	13
6	Literaturverzeichnis.....	14
7	Anhang	15
8	Kontaktdaten.....	15

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung:

Nach wie vor werden und müssen erhebliche Anstrengungen unternommen werden, um im Sinne einer weiteren Kraftstoffminimierung und einer Verringerung der Schadstoffemissionen, das Gewicht von Fahrzeugen zu reduzieren. Neben dem Fertigungs-, Konzept- und Formleichtbau besteht die Möglichkeit der Gewichtsreduktion durch die Strategie des Werkstoffleichtbaus. Vor diesem Hintergrund erfährt der Anteil an Aluminium in der Karosseriestruktur eine stetige Zunahme. Insbesondere bei Kleinserienfahrzeugen des Mittel- und Premiumsegments werden heute Türen, Heckklappen, Motorhauben, etc. bereits überwiegend aus Aluminiumblechen gefertigt. Es bestehen jedoch werkstoffbedingte Grenzen der Aluminiumbleche. Dabei stellen die Umformbarkeit und Kaltverfestigung zwei sehr wichtige Werkstoffcharakteristika dar. Hohe Umformbarkeit ist in der Umformung notwendig, um vor allem die Bauteile mit komplexen Geometrien herstellen zu können.

Aluminiumbleche weisen eine im Vergleich zu Stahlblechen geringere Umformbarkeit bei Raumtemperatur auf und zusätzlich, im Falle von AA5xxx, treten Imperfektionen (Fließfiguren bzw. Portevin-Le-Chatelier Phänomen) an der Oberfläche auf. Warmumformung verbessert die Umformbarkeit von Aluminiumlegierungen, wobei durch die Temperatureinwirkung Veränderungen in der Mikrostruktur auftreten, die die Festigkeit reduziert. Daher entstand die Idee, Aluminiumlegierungen bei kryogenen Temperaturen umzuformen. Dadurch verbessert sich die Umformbarkeit, und durch Veränderungen in der Mikrostruktur wird die Kaltverfestigung verbessert. Sowohl die Umformbarkeit, als auch die Kaltverfestigung bei kryogenen Temperaturen hängen wesentlich von der Legierungszusammensetzung ab. In diesem Projekt werden zwei verschiedene Aluminiumlegierungen betrachtet. Einerseits AA5xxx und andererseits AA6xxx, welche für kryogene Umformprozesse angepasst und optimiert werden können.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

- Ausgehend von am Markt etablierten 5xxx- und 6xxx- Aluminiumwerkstoffen, ist eine Entwicklung von Legierungssystemen mit optimierten Eigenschaften hinsichtlich kryogener Umformbarkeit durchzuführen.
- Der qualitative und quantitative Nachweis hinsichtlich kryogener Umformbarkeit optimierter Legierungspotentiale soll durch ein geometrisch komplexes Bauteil erfolgen. Der Fokus des, durch numerische Simulation optimierten, Werkzeugbaus liegt daher auf der Erreichung

möglichst tiefer Temperaturen, um das kryogene Umformpotential der Aluminiumlegierungen auszureizen.

- Automatisierung der Kühlprozesslinie zum Nachweis der Serientauglichkeit des gesamten kryogenen Umformprozesses.

2.3 Einordnung in das Programm

Einer der Schwerpunkte des Energieforschungsprogramms liegt bei Forschung und Entwicklung innovativer Mobilitäts- und Verkehrstechnologien im Bereich Leichtbau/Werkstoffe. Das Projekt beschäftigt sich mit der Optimierung von Leichtbauwerkstoffen (bestimmte Aluminiumlegierungen) hinsichtlich Umformbarkeit und Kaltverfestigung.

2.4 Verwendete Methoden

Zur Anwendung kamen mechanische Umformversuche von Aluminiumwerkstoffen bei tiefen Temperaturen, und zwar ein- und mehrachsige Zugversuche (Tiefziehen) sowie gekerbte Zugproben und Erichsen-Tests – siehe Kapitel 3.1.

2.5 Aufbau der Arbeit

In der Einleitung wird grundsätzlich auf die Herausforderungen der Aluminiumverarbeitung eingegangen und anschließend auf Literaturstellen zur kryogenen Aluminiumumformung eingegangen. Im Methodenteil erfolgt die Beschreibung der durchgeführten Versuche. Im Kapitel Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden die generierten Ergebnisse ausführlich diskutiert. Abschließend erfolgt eine kurze Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten und ein Ausblick zu offenen Themen der kryogenen Blechumformung.

3 Inhaltliche Darstellung

Aluminium-Legierungen sind die wichtigsten Konstruktionswerkstoffe in der Luftfahrtindustrie, mit einem Gewichtsanteil von z. B. 60% im Airbus A380 [1] und einem immer größer werdenden Anwendungsspektrum in der Automobilindustrie aufgrund der Notwendigkeit von Gewichtssenkungen in Fahrzeugen [2]. Aufgrund des für komplexe Bauteile zum Teil nicht ausreichenden Umformvermögens von Aluminiumlegierungen bei Raumtemperatur (RT) müssen neue Umformprozesse entwickelt werden.

Es ist bekannt, dass die mechanischen Eigenschaften von gewalzten und gegossenen Aluminiumlegierungen bei sehr tiefen Temperaturen günstiger sind als bei RT [1, 3]. Wie

aktuelle Untersuchungen [4, 5] zeigen, ist das erhöhte Verfestigungspotential vorteilhaft bei Umformvorgängen. Ein weiterer, sehr interessanter Effekt bei der Tieftemperaturumformung von 5xxx Aluminiumlegierungen konnte von Schneider et. al. [6, 7] beobachtet werden, und zwar die Minimierung bzw. Eliminierung des sog. Portevin-LeChatelier Effekts (PLC). Der PLC-Effekt ist ein thermisch und dehnraten-abhängiges Phänomen, das vor allem in der 5xxx Aluminiumlegierungsklasse, aufgrund des hohen Mg-Gehalts, auftritt und Dehnungsmarken auf der umgeformten Bauteiloberfläche hinterlässt [8]. Diese Dehnungsmarken machen somit die 5xxx-Legierungsklasse für Außenhautanwendungen von PKWs unbrauchbar. Durch die kryogene Umformung könnte sich das ändern und die 5xxx-Legierungsklasse für Außenhautanwendungen attraktivieren.

Der positive Effekt auf die mechanischen Eigenschaften von Aluminiumlegierungen bei tiefen Temperaturen konnte auch im Bereich des Blechwalzens gezeigt werden. J. Manette et al. [9] zeigten, dass Bleche, welche unter kryogenen Bedingungen gewalzt wurden, eine Festigungssteigerung, quer zur Walzrichtung, von 30 % gegenüber bei RT gewalzten Blechen erreichten. Auch Huang et. al. [10] konnten eine deutliche Steigerung, nach einer Wärmebehandlung, der Streckgrenze ($R_{p0,2}$) und Zugfestigkeit (R_m) von kryogen gewalzten EN AW 6061 Blechen, gegenüber bei RT gewalzten Blechen, feststellen.

Dieser vorliegende Bericht basiert auf mechanischen Laborversuchen zur Feststellung des Umformverhaltens von verschiedenen Legierungen bei kryogenen Bedingungen, sowie bei RT. Weiters wurden Umformversuche mit miniaturisierten B-Säulen aus dem KFZ-Karosseriebau im kleinindustriellen Maßstab durchgeführt.

3.1 Methoden

Die verwendeten Aluminiumlegierungen aus dieser Untersuchung sind Industriestandard und weit verbreitet in der Automobilindustrie. Die Legierungen, der Wärmebehandlungszustand und deren chemische Zusammensetzung sind in Tabelle 1 aufgelistet. Zustand O bedeutet weichgeglüht, bei T4 wird das Blech lösungsgeglüht und kaltausgelagert, und T4-FH stellt einen stabilisierten T4-Zustand dar.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung (Gewichts-%) der verwendeten Legierungen.

Legierung	Zustand	Si [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cu [%]	Fe [%]	Cr [%]	Zn [%]	Ti [%]	Blechdicke [mm]
5083	O	0,03	4,60	0,86	0,02	0,16	0,09	0,01	0,01	1,20
5182	O	0,10	4,70	0,42	0,20	0,21	0,07	0,03	0,01	1,25
6016	T4	1,07	0,35	0,08	0,07	0,15	0,004	0,02	0,02	1,05
6016	T4-FH	1,09	0,35	0,07	0,07	0,15	0,006	0,01	0,01	1,15

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Zur Ermittlung des Umformpotentials bei tiefen Temperaturen wurden zahlreiche mechanische Versuche mit den ausgewählten Legierungen durchgeführt. Zunächst erfolgten einachsige Zugversuche bei RT und -170 °C mit einer Dehnrage von $0,0067\text{ s}^{-1}$ und einer Anfangslänge $l_0 = 25\text{ mm}$, angelehnt an die Prüfnorm EN-ISO 6892-1Bn. Beim Tiefziehen von Blechwerkstoffen ist der Werkstoff unterschiedlichen (mehrachsigen) Spannungszuständen ausgesetzt [12], daher wurden weitere Versuche durchgeführt, um einen Umformprozess darzustellen. Zum einen war das die gekerbte Zugprobe zur Abbildung der ebenen Dehnung und zum anderen Erichsen-Tests, gemäß DIN EN ISO 20482, für den äquivalent, axialen Spannungszustand. Bei beiden genannten Versuchen erfolgte die Prüfung unter flüssigem Stickstoff (LN_2). Dieser hat unter atmosphärischem Druck eine Temperatur von -196 °C . Die gekerbten Zugproben wurden mit derselben Anfangslänge und Dehnrage wie die ungekerbten Zugversuche durchgeführt. Abbildung 1 zeigt den, für kryogene Bedingungen, modifizierten Erichsen-Versuchsaufbau, der die Versuchsdurchführung auf einer Zugprüfmaschine Zwick Z100 ermöglicht. Die Stempelgeschwindigkeit beim Erichsen-Test betrug 20 mm/min . Die Fixierung der Versuchsbleche erfolgte mit sechs Schrauben, um ein Nachfließen des Werkstoffes zu verhindern. Anschließend wurde die Einhausung mit LN_2 geflutet, und nachdem das Werkzeug die Temperatur erreicht hatte (das kann visuell überprüft werden, indem der LN_2 aufhört zu *kochen*), erfolgte die Versuchsdurchführung. Bei der Versuchsdurchführung wurden Stempelweg und -kraft aufgezeichnet und mit den Werten bei RT verglichen. Durch die unterschiedlichen Blechdicken ist ein Vergleich der Absolutwerte nicht sinnvoll, daher wird die relative Änderung der Werte angeführt.

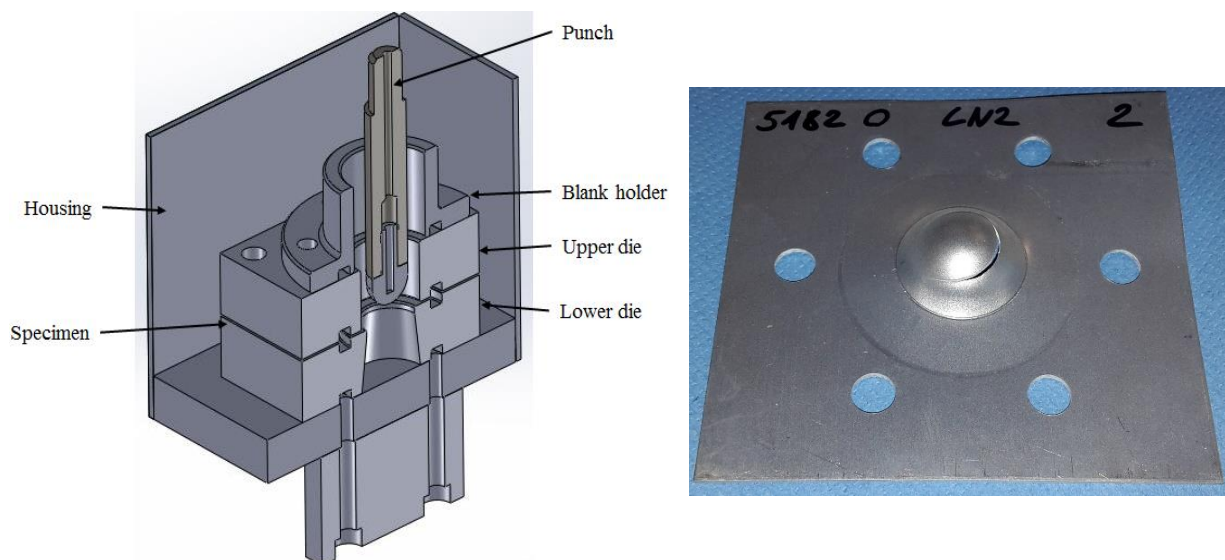


Abbildung 1: /Links/ CAD Modell des Erichsen-Tests unter kryogenen Bedingungen, /rechts/ getestetes Versuchsblech mit einer Kantenlänge von 90 mm.

Die Durchführung der Umformversuche erfolgte auf einer NEFF DZP 160 Tonnen Hydraulikpresse mit einem miniaturisierten B-Säule-Werkzeug, das in Abbildung 2 als CAD-Modell dargestellt ist. Aufgrund der tiefen Temperaturen ist der Einsatz von Öl-basierten Schmierstoffen nicht möglich, stattdessen wurde Molybdänsulfid (MoS_2) in Pulverform zum Schmieren der Blechplatten verwendet. Eine Blechhalterkraft von ca. 60 kN war notwendig, um übermäßige Faltenbildung zu vermeiden. Die Stempelgeschwindigkeit betrug 10 mm/s. Sämtliche Hauptteile des Umformwerkzeugs (Matrize, Blechhalter, Stempel) wurden mit LN_2 gekühlt und so eine finale Werkzeugtemperatur von ca. -150 °C erreicht. In Stempel und Matrize sind austauschbare Designelemente eingefügt, um die Schwierigkeit des Tiefziehvorgangs weiter steigern zu können. Die Ausgangsplatinen wurden vor dem Einlegen in das Werkzeug in LN_2 vorgekühlt, um eine Erwärmung im Werkzeug zu verhindern und den Umformvorgang zu beschleunigen.

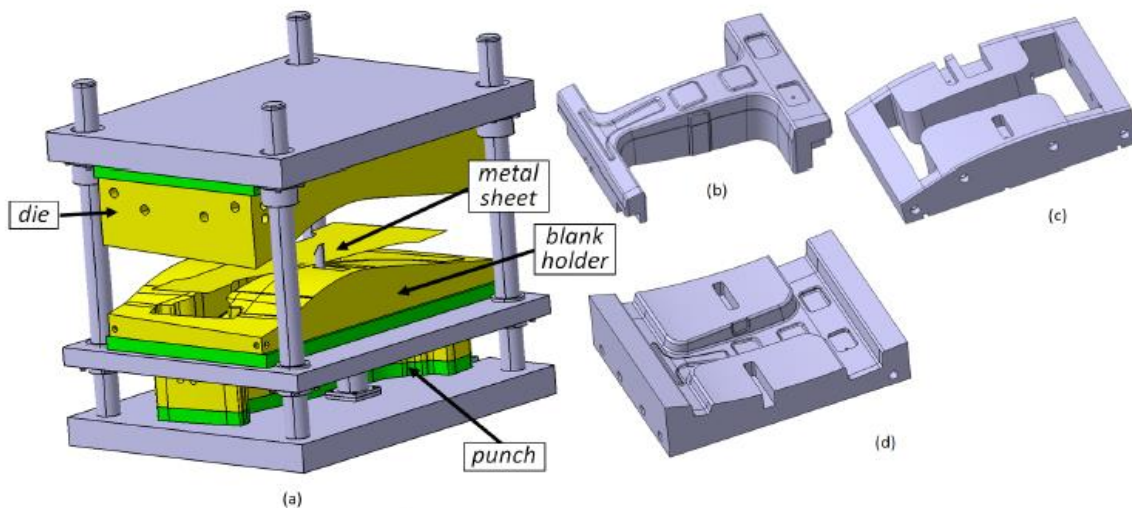


Abbildung 2: CAD Modell des B-Säulenwerkzeugs; a: Gesamtmodell, b: Stempel, c: Blechhalter, d: Matrize Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.]

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Abbildung 3 zeigt die Resultate des einachsigen Zugversuchs bei RT und bei -170 °C . Es ist ersichtlich, dass bei allen Legierungen sowohl $R_{p0,2}$ und R_m sowie die Gleichmaßdehnung (A_g) und die Bruchdehnung signifikant, bei einer Temperatur von -170 °C im Vergleich zu RT, steigen. Weiters ist zu beobachten, dass das Verfestigungspotential (bzw. n-Wert), welches über die Steigung im plastischen Bereich der Zugkurve bestimmt wird, deutlich zunimmt. Einen Überblick des Verbesserungspotentials, bei kryogenen Umformbedingung, von $R_{p0,2}$, R_m und A_g gibt Tabelle 2. Im Vergleich mit RT steigt R_m bei den 5xxx Legierungen um ca. 28 % und bei den 6xxx Legierungen um ca. 33 %. A_g steigt um bis zu 70 % bei den 5xxx Legierungen und zwischen 30 und 40 % bei den 6xxx Legierungen. Eine Steigerung von A_g und des n-Werts bedeuten eine Erhöhung des Umformpotential, was wiederum komplexere

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Bauteilgeometrien ermöglicht, da die Gefahr der lokalen Einschnürung reduziert wird. Die Standardabweichung der gemessenen Spannungen ($R_{p0,2}$ und R_m) liegt, für beide Temperaturen, unter 2 %, wohingegen diese für A_g zwischen 1,5 und 13 % variiert.

Bei den RT-Kurven der 5xxx Legierungen ist im plastischen Bereich der PLC-Effekt erkennbar, der durch das sägezahnartige Variieren der Spannung auffällt. Dieses Verhalten wird hauptsächlich durch gelöste Mg – Atome in der Legierung hervorgerufen und erhöht sich mit steigendem Mg Gehalt [14]. Da der PLC-Effekt auch ein thermisch aktiviertes Phänomen [8] ist, kann bei den -170 °C Zugversuchs-ergebnissen, in Abbildung 3, ein Verschwinden des gezackten plastischen Bereichs beobachtet werden. Picu et al. [15] beobachteten ein ähnliches Verhalten beim Testen von EN AW 5182 O bei einer Temperatur von -120 °C . Zahlreiche Zugversuchskurven von EN AW 5182 O bei unterschiedlichen Temperaturen sind auch in [4] zu finden, wo ein Verschwinden des PLC-Effekts ab -100 °C beobachtet wird.

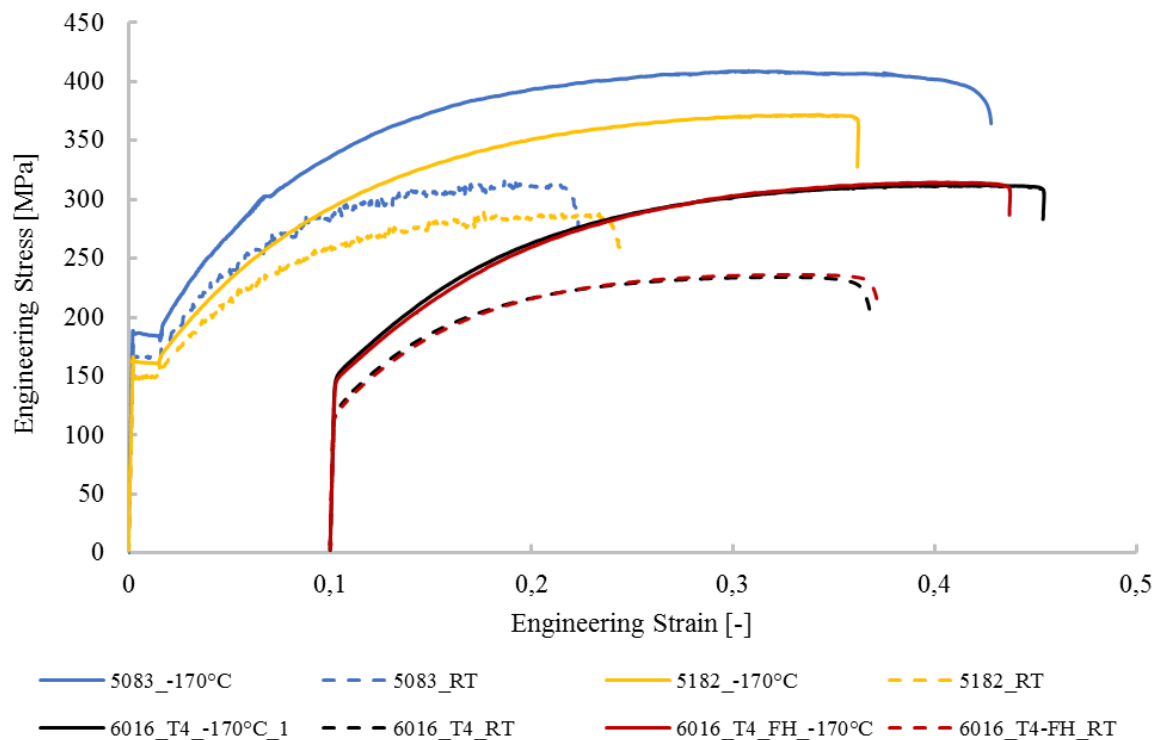


Abbildung 3: Spannungs-Dehnungskurven aus den einachsigen Zugversuchen von verschiedenen Legierungen, getestet bei unterschiedlichen Temperaturen. Ein Versatz der 6xxx Kurven um 0,1 ist zur besseren Übersicht beabsichtigt.

Table 2: Streckgrenze ($R_{p0,2}$), Zugfestigkeit (R_m) und Gleichmaßdehnung (A_g) der gewählten Legierungen, getestet bei RT und -170 °C .

Legierung	Zustand	RT			-170 °C			Zuwachs	Zuwachs	Zuwachs
		$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	$R_{p0,2}$ [%]	R_m [%]	A_g [%]
5083	O	165,9	316,5	18,8	183,6	404,7	31,8	10,67	27,87	69,15
5182	O	148,7	288,5	20,2	162,1	370,9	33,7	9,01	28,56	66,83
6016	T4	120,9	233,6	22,1	149,7	309,8	31,1	23,82	32,62	40,72
6016	T4-FH	118,8	235,9	22,8	148,5	315,0	29,6	25,00	33,53	29,82

Die gekerbten Zugversuche (Testergebnisse und Probengeometrie sind in Abbildung 4 zu sehen) wurden durchgeführt, um das Werkstoffverhalten unter ebener Dehnung, ein sehr kritischer Spannungs-Dehnungszustand bei der Blechumformung bzw. beim Tiefziehen zu untersuchen. Die Kerben im Probenkörper verhindern, dass es Werkstofffluss aus der Probenbreite gibt, daher muss dieser aus der Probendicke erfolgen, was natürlich nur sehr eingeschränkt möglich ist. Daher gibt dieser Test einen suffizienten Hinweis zu den Tiefzieheigenschaften der gewählten Legierung.

Wie in Abbildung 4 erkennbar ist, sind die RT Ergebnisse der getesteten 5182 O und 6016 T4-FH annähernd auf einem Niveau. Bei -196 °C zeigt sich jedoch, dass das Umformpotential von 5xxx Legierungen jenem von 6xxx Legierungen überlegen ist, was am Verfestigungsverlauf der jeweiligen Kurve zu sehen ist.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

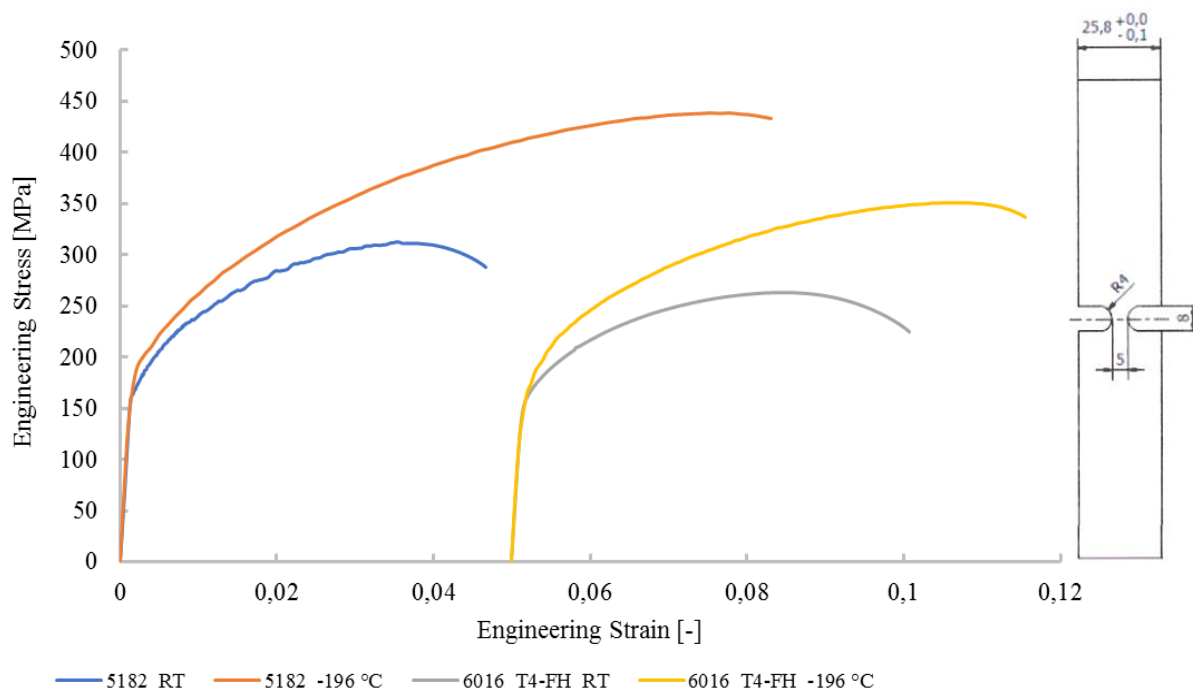


Figure 4: Spannungs-Dehnungskurven der gekerbten Zugversuche bei Raumtemperatur und -170 °C. Ein Versatz der 6xxx Kurven um 0,05 zur besseren Übersicht ist beabsichtigt.

Tabelle 3 zeigt den Indice Erichsen (IE) Wert, der mit der maximalen Stempelverschiebung bei Rissbeginn im Probenkörper, während des Versuchs, korrespondiert. Zusätzlich ist die Standardabweichung σ der jeweiligen Messung angegeben. Wie auch bei den vorhergehenden mechanischen Prüfungen zu beobachten war, ist das Umformpotential der 5xxx Legierung bei kryogenen Temperaturen deutlich höher als das der 6xxx Legierungen. Der Zuwachs des IE-Werts bei den getesteten 5xxx Legierungen ist mehr als doppelt so hoch wie bei den 6xxx Legierungen.

Tabelle 3: Ergebnisse des Erichsen-Test bei Raumtemperatur und -196 °C.

Legierung	Zustand	RT		-196 °C		Zuwachs IE [%]	Blechdicke [mm]
		IE [mm]	σ [mm]	IE [mm]	σ [mm]		
5083	O	9,25	0,03	11,51	0,15	24,43	1,20
5182	O	9,68	0,04	12,22	0,01	26,24	1,25
6016	T4	9,48	0,02	10,60	0,17	11,81	1,05
6016	T4-FH	9,59	0,03	10,52	0,21	9,70	1,15

In Abbildung 5 sind die finalen, rissfrei tiefgezogenen Bauteile zu sehen. Das linke Foto zeigt die B-Säule aus EN AW 5083 und das rechte jene aus EN AW 5182. Diese Geometrie wurde

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

gewählt, dass sie für einen einstufigen Tiefziehvorgang sehr herausfordernd ist. Durch wechselbare Einlegeelemente im Fußbereich der B-Säule, dem scharfen Übergangsradius zwischen Flansch und Zarge, der auftretenden Faltenbildung konnten nur mit der tiefsten erreichbaren Werkzeugtemperatur von etwa -150 °C und den 5xxx Legierungen, rissfreie Bauteile gefertigt werden. Bei den 6xxx Legierungen scheint das plastische Verfestigungspotential bei -150 °C nicht ausreichend zu sein, um diese herausfordernden B-Säulen rissfrei herstellen zu können. Abbildung 6 zeigt ein Bauteil aus 5182 links und eine 6016 T4-FH B-Säule auf der rechten Seite, die bei RT umgeformt wurden und, mit Pfeilen angezeigt, die typische Region, wo im Bauteil Risse auftraten. Die Einlegeelemente waren für beide Temperaturen 8 mm hoch.



Abbildung 5: Rissfreie, tiefgezogene Miniatur-B-Säulen, umgeformt bei -150 °C ; links: EN AW 5083, rechts: EN AW 5182.

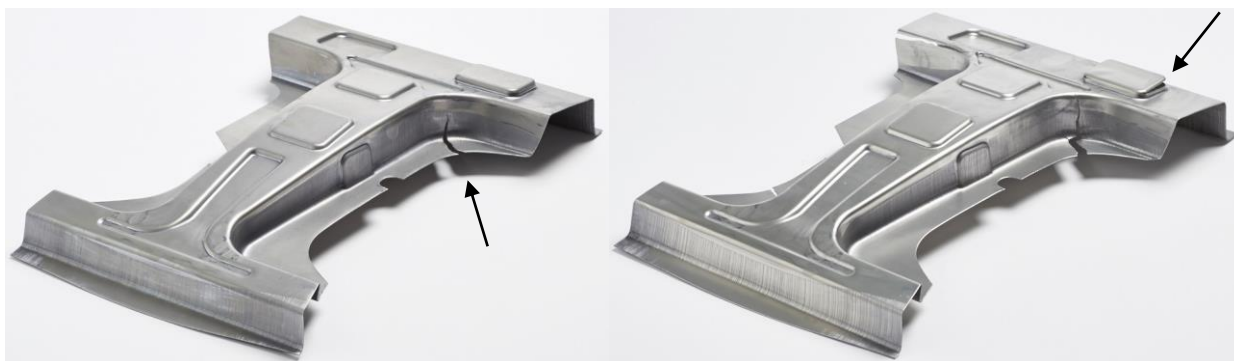


Abbildung 6: B-Säulen Bauteile umgeformt bei Raumtemperatur; links: EN AW 5182, rechts: EN AW 6016 T4-FH; die Pfeile zeigen die typischen Regionen für Rissbildung im Flanscbereich (links) und im wechselbaren Einlegeelement (rechts).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Eine umfassende mechanische Testreihe, zur Ermittlung des kryogenen Umformpotentials, an kommerziellen Aluminiumlegierungen wurde durchgeführt. Einachsige Zugversuche bei einer Temperatur von -170 °C zeigten eine deutliche Steigerung des Verfestigungspotentials im Vergleich zu den Versuchen bei Raumtemperatur. Dieser Umstand ist von Vorteil für Blechtiefziehoperationen. Zusätzliche Versuche mit unterschiedlichen Spannungs- und Dehnungszuständen bestätigen die Resultate aus den einachsigen Zugversuchen. Gekerbte Zugproben repräsentieren die ebene Dehnung – der kritischste Zustand für das Tiefziehen von Blechen – und Erichsen-Tests den äquivalenten, biaxialen Zugspannungszustand. Beide Tests wurden bei Raumtemperatur und -196 °C durchgeführt und zeigen ein deutlich gesteigertes Umformvermögen bei kryogenen Temperaturen. Schlussendlich wurden auch im semi-industriellen Maßstab Bauteile, eine miniaturisierte B-Säule, unter kryogenen Bedingungen gefertigt. Aufgrund der komplexen Geometrie der B-Säule konnten nur mit 5xxx Legierungen und unter kryogenen Bedingungen (-150 °C) rissfreie Bauteile produziert werden.

Die wichtigsten Ziele für weiterführende Untersuchungen im Bereich der kryogenen Blechumformung sind das Verständnis des zugrundeliegenden mikrostrukturellen Mechanismus‘ des Kryoeffektes und damit die Optimierung von Legierungssystemen speziell für die kryogene Blechumformung. Ein weiteres Ziel ist es, möglichst tiefe Temperaturen im Werkzeug zu erreichen, um das volle kryogene Potential der Al-Legierungen ausnützen zu können.

Zusätzliche Ergebnisse aus dem Projekt können in [16] nachgeschlagen werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] F. Ostermann, Anwendungstechnologie Aluminium, 3. Auflage, Springer Vieweg, 2014, Kapitel 2.5 und 6.1.5.
- [2] H. E. Friedrich, Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Springer Vieweg, 2013, Kapitel 6.2.1.
- [3] C. Kammer, Aluminium Taschenbuch 1 16. Auflage, Aluminium-Verlag Düsseldorf, 2002, Kapitel 5.1.5.
- [4] N. Sotirov, G. Falkinger, F. Grabner, G. Schmid, R. Schneider, R.J. Grant, Improved formability of AA5182 aluminium alloy sheet at cryogenic temperatures, *Materials Today Proceedings* 2 (2015) 113–118.
- [5] M. Kumar, N. Sotirov, F. Grabner, R. Schneider, G. Mozdzen, Cryogenic forming behaviour of AW-6016-T4 sheet, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 27 (2017) 1257–1263.
- [6] R. Schneider, B. Heine, R. J. Grant, R. Kelsch, F. Gerstner, T. Hägle, Mechanical behaviour of automobile relevant aluminium wrought alloys at low temperatures, *International Aluminium Journal* 88 (2012) 77-82.
- [7] R. Schneider, R.J. Grant, B. Heine, R. Börret, S. Burger, Z. Zouaoui, An analysis of the surface quality of AA5182 at different testing temperatures, *Materials and Design* 64 (2014) 750–754.
- [8] M. Abbadi, P. Hähner, A. Zeghloul, On the characteristics of Portevin Le Chatelier bands in aluminium alloy 5182 under stress-controlled and strain-controlled tensile testing, *Materials Science and Engineering A337* (2002) 194-201.
- [9] J. Marnette, M. Weiss, P.D. Hodgson, Roll-formability of cryo-rolled ultrafine aluminium sheet, *Materials and Design* 63 (2014) 471–478.
- [10] Y.C Huang, X.Y. Yan, T. Qiu, Microstructure and mechanical properties of cryo-rolled AA6061 Al alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 26 (2016) 12–18.
- [11] R. Cobden, Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys, TALAT Lecture 1501 (1994), EAA – European Aluminium Association.
- [12] E. Doege, B.-A. Behrens, Handbuch der Umformtechnik – Grundlagen, Technologie, Maschinen, Springer, Berlin - Heidelberg - New York, 2006, pp. 262 - 265.

Energieforschungsprogramm - 2. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG

[13] Ch. Reichl, R. Schneider, W. Hohenauer, F. Grabner, R.J. Grant, A numerical simulation of thermodynamic processes for cryogenic metal forming of aluminium sheets and comparison with experimental results, Applied Thermal Engineering 113 (2017) 1228-1241.

[14] W. Wen, Y. Zhao, J.G. Morris, The effect of Mg precipitation on the mechanical properties of 5xxx aluminum alloys, Materials Science and Engineering A 392 (2005) 136–144.

[15] R.C. Picu, G. Vincze, F. Ozturk, J.J. Gracio, F. Barlat, A.M. Maniatty, Strain rate sensitivity of the commercial aluminum alloy AA5182-O, Materials Science and Engineering A 390 (2005) 334–343.

[16] F. Grabner, J. A. Österreicher, B. Gruber, N. Papenberg, F. Gerstner, S. Kirnstötter, and C. M. Schlägl, Cryogenic Forming of Al-Mg Alloy Sheet for Car Outer Body Applications, Advanced Engineering Materials 2019, 1900089

7 Anhang

Keiner.

8 Kontaktdaten

Projektleiter	Dipl.-Ing. Florian Grabner
---------------	----------------------------

Institut/Unternehmen	LKR Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH
----------------------	---

Postadresse	Lamprechtshausenerstraße 61 5282 Braunau am Inn - Ranshofen
Telefon	+43 50550-6924
Fax	+43 50550-6901
E-Mail	florian.grabner@ait.ac.at
Website	www.ait.ac.at www.lkr.at

Weitere Projekt- bzw. Kooperationspartner:

voestalpine Polynorm GmbH & Co. KG
AMAG rolling GmbH
FILL GESELLSCHAFT M.B.H
Montanuniversität Leoben