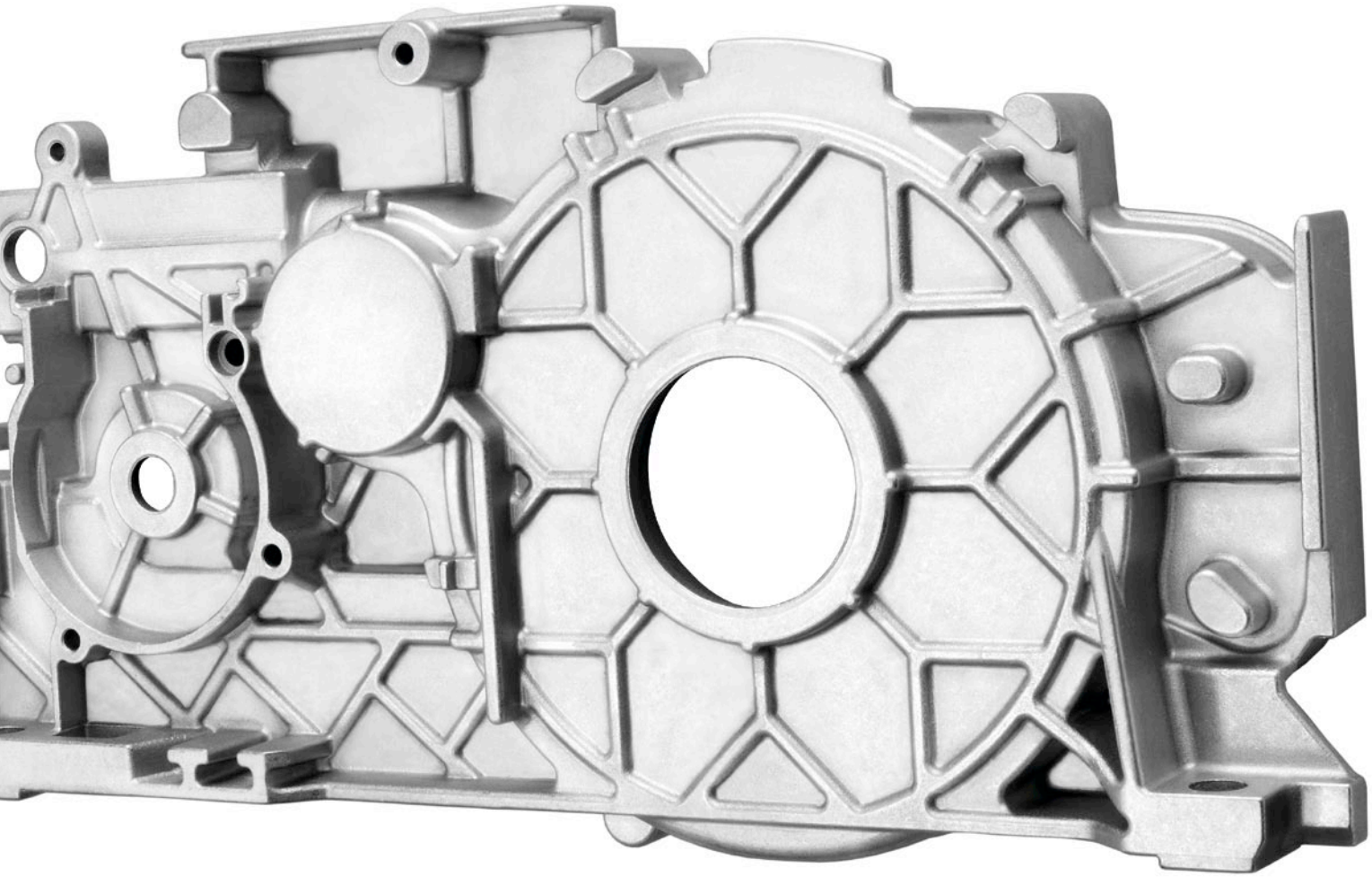
Alterungsvorgänge bei Zinkdruckgusslegierungen



Druckgussteile aus Zinklegierungen lassen sich aufgrund ihrer Werkstoffeigenschaften mit hoher Produktivität herstellen – selbst filigrane Geometrien können problemlos gefertigt werden. Nachteilig sind jedoch Alterungsvorgänge, die selbst bei Raumtemperatur hinsichtlich des späteren Einsatzes nicht unberücksichtigt bleiben können (Teil eines automatischen Türantriebs, DruMeta-Metall GmbH & Co. KG, Velbert).

FOTO: INITIATIVE ZINK

VON WALTER LEIS UND
LOTHAR H. KALLIEN, AALEN

Das Warmkammer-Druckgießverfahren ist ein hoch produktives Fertigungsverfahren, mit dem Bauteile aus Zink- und Magnesiumlegierungen mit hohen Qualitätsanforderungen und filigranster Struktur hergestellt werden können.

Obwohl Zinkdruckgusslegierungen im Vergleich zu Aluminium- und Magnesiumlegierungen eine höhere Dichte von ca. 6,7 g/cm^3 haben, werden Zinkdruckgussteile im Automobilbau in vielen Bereichen eingesetzt. Weitere Hauptabnehmer sind darüber hinaus die Bau- und die Elektronikindustrie, der Maschinenbau sowie die Haushaltsgeräteindustrie.

Die mechanischen Werkstoffkennwerte von Zinkdruckgusslegierungen nehmen unter den Druckgusslegierungen eine Spitzenposition ein. Die niedrige Schmelztemperatur ermöglicht bei der Druckgussfertigung höchste Produktivität, und die Standzeiten der Druckgießwerkzeuge überschreiten hinsichtlich der Schusszahl die Millionengrenze.

Zinkbauteile können äußerst dünnwandig (bis zu 0,3 mm Wanddicke) hergestellt werden und zeichnen sich durch eine hervorragende Oberflächengüte und Beschichtbarkeit aus. Zinkdruckgussteile können zu 100 % recycelt werden. In Deutschland werden im Jahr ca. 75 000 t, in Europa ca. 320 000 t und weltweit ca. 950 000 t Zinkdruckgussteile produziert.

Insbesondere die niedrige Schmelztemperatur von 390 °C begünstigt jedoch ein erhöhtes Kriechverhalten von Zinklegierungen sowie eine Alterung schon bei Raumtemperatur. Abnahmerichtlinien der Automobilindustrie schreiben vor, dass Zinkdruckgussteile vor der Bauteilprüfung einer Warmauslagerung (künstliche Alterung) über 24 h bei 105 °C unterzogen wer-

KURZFASSUNG:

Die mechanischen Werkstoffkennwerte von Zinkdruckgusslegierungen nehmen unter den Druckgusslegierungen eine Spitzenposition ein. Durch die niedrige Schmelztemperatur von ca. 385 °C kann bei der Druckgussfertigung höchste Produktivität erzielt werden und die Standzeiten der Druckgießwerkzeuge überschreiten die Millionengrenze. Zink entfaltet besonders in dünnwandigen Konstruktionen bis zu 0,5 mm beste mechanische Eigenschaften.

Die niedrige Liquidustemperatur von 385 °C führt zu den drei bekannte Phänomenen: Alterung, Maßänderungen und Kriechverformung. Alle drei Phänomene sind thermisch aktivierte Prozesse.

Die Alterung ist ein Diffusionsvorgang, tritt bereits bei Raumtemperatur auf und führt zu Entmischungen von Aluminium und Zink vorwiegend im Eutektoid, der sich in ein kubisch flächenzentriertes Gitter umkristallisiert, das zu Maßänderungen führt. Kupfer verbessert durch Mischkristallbildung die mechanischen Eigenschaften, verhindert die Alterung aber nicht.

Die natürliche Alterung ist nach einem Jahr weitgehend abgeschlossen und kann durch eine künstliche Alterung über 24 h bei 105 °C vorweggenommen werden. Die Zugfestigkeit und die Dehngrenze fallen dabei um ca. 15 % ab, die Bruchdehnung nimmt jedoch um über 50 % zu.

Die Kriechvorgänge sind ebenfalls thermisch aktiviert und führen zur Selbstdiffusion von Zink und damit zu einer plastischen Verformung. Eine Überalterung des Werkstoffs durch eine Wärmebehandlung über 120 °C oder über 24 h erhöht die Kriechgeschwindigkeit merklich.

den müssen. Da im Innenbereich eines Kraftfahrzeuges im Extremfall Temperaturen zwischen -35 und +85 °C auftreten, werden die Bauteile nach dieser künstlichen Alterung im Temperaturbereich von -35 bis +85 °C geprüft.

Bislang waren keine statistisch gesicherten mechanischen Kenndaten für die unterschiedlichen Beanspruchungen im Gusszustand nach künstlicher und natürlicher Alterung im Temperaturbereich von -35 bis +85 °C vorhanden. Daten gab es für Werkstoffe und Bauteile nur im Gusszustand und nur für Temperaturen oberhalb von 0 °C. Darüber hinaus unterschieden sich diese Werte in den einzelnen Literaturquellen stark voneinander. Wanddicke und Gießbedingungen haben einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften, in der Literatur waren diese Größen jedoch nicht dokumentiert.

Der Artikel beschreibt die Ergebnisse aus einem AIF-Forschungsvorhaben, das an der Hochschule Aalen bearbeitet wurde. Im Rahmen des Vorhabens wurden am Fraunhofer Institut IFAM, Bremen, Materialuntersuchungen durchgeführt, die gesondert veröffentlicht werden.

Chemische Zusammensetzung des Gießmetalls

Über die chemische Zusammensetzung des Gießmetalls ist eine spezifische Eigenschaftseinstellung – wie der Fließeigenschaften, des Formfüllungsvermögens, des Speisungsverhaltens und der Gefügeausbildung – möglich.

Für über 90 % der Gussteile aus Zinklegierungen in Deutschland werden die Legierungen ZP0410 (Z410) mit 4 %* Aluminium und 1 % Kupfer sowie ZP0430 (Z430) mit ca. 3 % Kupfer eingesetzt. In den USA wird vorwiegend die kupferfreie Legierung ZP0400 (Z400) verwendet. Alle drei Legierungen haben geringste Beimengungen an Blei, Cadmium, Zinn, Eisen, Nickel und Silicium, um interkristalline Korrosion zu vermeiden. Die Schmelztemperaturen dieser Zinklegierungen liegen etwas unter 400 °C. Der Aluminiumanteil von 4 % verhindert in den Druckgusslegierungen unterhalb von 430 °C die Eisenlöslichkeit des Zinks und verbessert wie Kupfer die mechanischen Eigenschaften.

Das Phasendiagramm Aluminium – Zink (**Bild 1**) zeigt bei Raumtemperatur sowohl eine äußerst geringe Löslichkeit von Aluminium in Zink von ca. 0,05 % sowie auf der Aluminiumseite eine geringe Löslichkeit von Zink in Aluminium. Kupfer erhöht die Löslichkeit von Aluminium in Zink und verbessert so die Mischkristallverfestigung. Durch die niedrige Schmelztemperatur findet auch bei längerem Warmhalten der Schmelze kein Abbrand der Legierungselemente, wie Magnesium, statt.

Ein großer Vorteil von Zinklegierungen ist die niedrige Schmelztemperatur. Bei der Druckgussfertigung können wegen des geringeren Wärmeinhaltes sehr kurze Zykluszeiten eingestellt werden. Die Standzeiten der Druckgießwerkzeuge liegen um den Faktor zehn höher als bei der Verarbeitung von Aluminiumlegierungen.

Als Einschränkung für den Einsatz von Zinkdruckgussteilen müssen die bereits bei Raumtemperatur einsetzenden Kriechvorgänge bei Spannungen von 50 MPa genannt werden, die z. B. zum Lockern von Schraubenverbindungen führen. Die im Gusszustand sehr guten mechanischen Eigenschaften nehmen im Laufe eines Jahres ab, im gleichen Zeitraum treten auch Maßänderungen von ca. -0,1 bis -0,2 % auf.

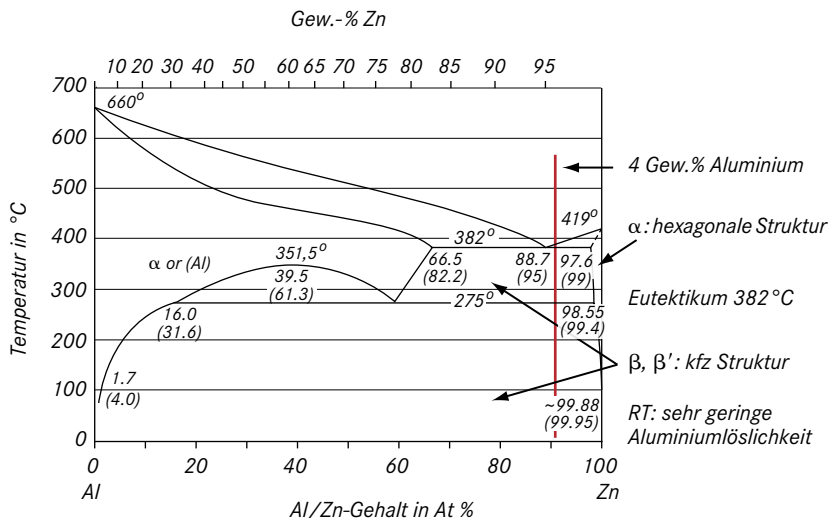


Bild 1: Zustandsdiagramm Zink – Aluminium [1].

Sofern nicht anders erwähnt, handelt es sich bei den prozentualen Angaben zur Zusammensetzung um Massenanteile.

Dagegen spricht die hohe Dichte nicht immer gegen eine Verwendung von Zink, da der hohe Elastizitätsmodul und die Möglichkeit, sehr dünnwandig gießen zu können, diesen Nachteil teilweise ausgleichen.

Literatur zur Alterung von Zinkdruckgusslegierungen

Bis heute existieren nur wenige Untersuchungen zum Thema Zinkalterung, wobei in der Regel nur die Maßänderungen beschrieben werden. So werden in [2] die Löslichkeit von Aluminium in Zink genannt und der eutektoide Zerfall der β-Phase in die β´-Phase, die sich von der eutektischen β-Phase nur durch die Gitterkonstante unterscheidet. Die ablaufenden Kristallumbildungen ziehen starke Volumenänderungen nach sich, wobei der eutektoide Zerfall langsam verläuft. Der Zusatz von Kupfer erhöht die Löslichkeit des Aluminiums in geringem Maße [2]. Die Maßänderungen im Laufe der Alterung hängen in Art und Umfang stark von der Legierungszusammensetzung und den thermischen Belastungen ab [3, 4]. So schwinden Gussteile aus den Legierungen Z400 und Z410 in geringem Maße, solche aus der Legierung Z430 schwinden stärker und hoch Al- und Cu-haltige Legierungen dehnen sich bei Auslagerung unter erhöhten Temperaturen teilweise deutlich aus [3, 5]. Um die Maßänderungen vorwegzunehmen, schreibt die Automobilindustrie vor, Zinkbauteile bei 105 °C für 24 h künstlich zu altern. Man geht davon aus, dass nach dieser künstlichen Alterung nahezu keine natürliche Alterung mehr stattfindet und der Werkstoff seinen „Endzustand" erreicht hat. Manche Hersteller von Druckgussteilen überschreiten diese künstliche Alterung noch, indem sie Temperatur oder Dauer erhöhen.

Zinklegierungen unterliegen der Alterung, die nicht nur geprägt ist durch Maßänderungen [6], sondern auch durch Veränderungen der mechanischen Eigenschaften, wie Zugfestigkeit, Dehngrenze und Härte [7]. Bei den 400er-Legierungen führt die Alterung zu einem Abfall von Zugfestigkeit, Dehngrenze und Härte, die Dehnung nimmt dagegen zu [3]. Ein Vergleich zwischen natürlicher Alterung und künstlicher Alterung in Abhängigkeit des Kupfergehaltes bezüglich der Zugfestigkeit wird in [8] beschrieben. Ein verbesserter Kriechwiderstand kann auf die Anwesenheit der kupferreichen ε-Phase zurückgeführt werden. Untersuchungen über den Einfluss der Fertigungsbedingungen, die eine große Wirkung auf die mechanischen Eigenschaften ausüben, in Verbindung mit der künstlichen Alterung, sind nicht bekannt – allgemein fehlen Angaben zu den Fertigungsbedingungen [9, 10].

Im Jahr 2007 wurde eine Internet-Zinc-Database veröffentlicht. Auch in dieser Datenbank wird nicht ersichtlich, unter welchen Bedingungen und Parametern die Probekörper hergestellt wurden, in welchem Alterungszustand sie zur Zeit der Messung waren und welche Geometrie die Probekörper aufwiesen.

Alterungs- und Kriechvorgänge

Grundsätzlich findet bei fast allen Legierungen eine Alterung statt, da einerseits auf Grund der Erstarrungsvorgänge lokale Konzentrationsunterschiede auftreten und andererseits große Löslichkeitsunterschiede zwischen der flüssigen und der festen Phase vorhanden sind. Da Diffusionsvorgänge bereits bei Raumtemperatur aktiviert werden, findet die Alterung bei Zinklegierungen im Gegensatz zu Aluminiumlegierungen bereits bei Raumtemperaturen statt.

Ein weiterer thermisch aktivierter Prozess ist das Kriechen, das durch eine konstante Krafteinwirkung ausgelöst wird. Kriechen ist kein Alterungsvorgang. Beim Kriechen, dem plastischen Verformen bei Spannungen unterhalb der Dehngrenze, bewegen sich Atome über Leerstellen auf andere Plätze ohne Vorhandensein von Konzentrationsunterschieden. Kriechvorgänge treten nicht nur bei Legierungen auf, sondern auch bei reinen Metallen. Kriechen ist ein Selbstdiffusionsvorgang.

Der technisch wichtige Bereich ist der Bereich des stationären Kriechens, da die Kriechgeschwindigkeit Maß für die Lebensdauer eines kriechverformten Bauteils ist. Diese Kriechgeschwindigkeit des stationären Kriechens ist eine Funktion der angelegten Spannung σ und der Temperatur T sowie der Materialeigenschaften und der Diffusionskonstante. Der Temperatureinfluss wird aufgrund des Selbstdiffusionsmechanismus mit Hilfe des Ansatzes von Arrhenius beschrieben. Dabei kommt es zu einem Kriechen, wenn eine bestimmte Temperatur T in Abhängigkeit von der Schmelztemperatur T_S des Materials (homologe Temperatur T/T_S) erreicht wird.

Die niedrige Schmelztemperatur von Zink von 420 °C (693 K) löst ein langsames Kriechen schon unter 0 °C aus, das bei Raumtemperatur deutlich zunimmt. In Bild 2 wird der Zusammenhang zwischen Temperatur und Kriechverhalten aufgezeigt.

Versuchsdurchführung

Versuchsprogramm

Untersucht wurden die Zinklegierungen ZP0400, ZP0410 und ZP0430 nach DIN EN 12844 hinsichtlich natürlicher und künstlich herbeigeführter Alterungsvorgänge.

Zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften wurden plattenförmige Zinkdruckgussteile mit den Dicken 0,8 mm, 1,5 mm und 3 mm auf einer Warmkammer-Druckgießmaschine vom Typ DAW 80

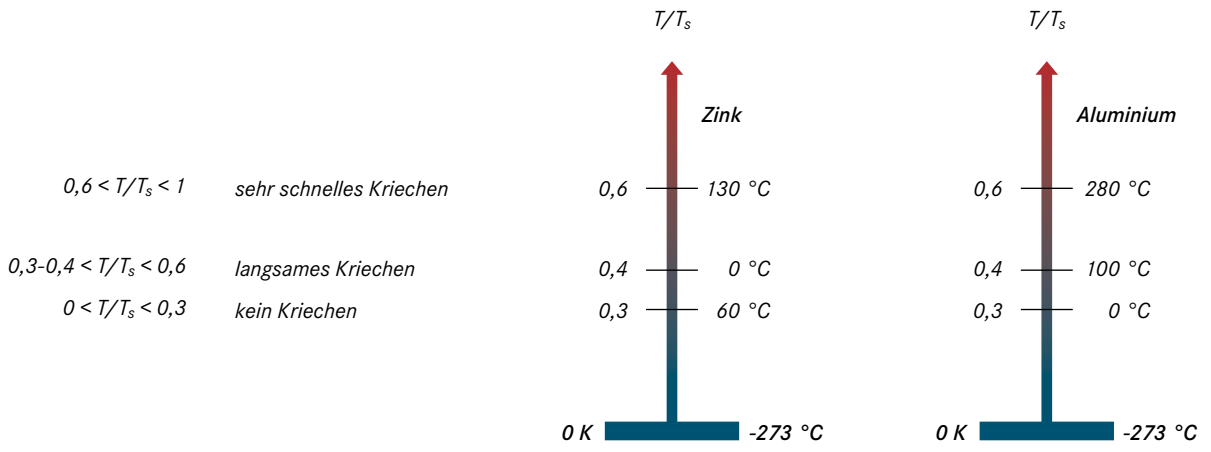


Bild 2: **Homologe Temperatur für Zink und Aluminium.**

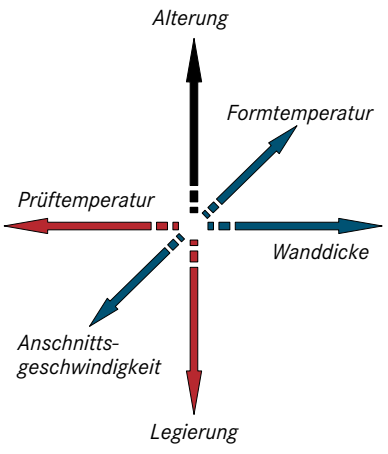


Bild 3: Variierte Prozessgrößen und Parameter bei der Untersuchung der Alterungsprozesse von Zinkdruckgusslegierungen.

(Oskar Frech GmbH + Co. KG, Schorndorf-Weiler) im Gießereilabor der Hochschule Aalen unter konstanten und kontrollierten Bedingungen gegossen. Zur Kontrolle der Fertigungsbedingungen wurden nicht nur die Maschinenparameter überwacht, sondern durch Sensoren für Temperatur und Druck auch die Prozessparameter im Druckgießwerkzeug. Aus den gegossenen Platten wurden Proportionalstäbe nach DIN 50125 herausgearbeitet.

Folgende Werkstoffeigenschaften wurden unter natürlicher und künstlicher Alterung ermittelt:

> Dehngrenze für die Prüftemperaturen: -35 °C, RT (Raumtemperatur) und +85 °C;
> Zugfestigkeit für Prüftemperaturen -35 °C, RT und +85 °C;
> Dehnung für die Prüftemperaturen -35 °C, RT und +85 °C;
> E-Modul für die Prüftemperaturen -35 °C, RT und +85 °C;
> Kriechfestigkeit bei RT und bei 85 °C;
> Schwingfestigkeit bei RT;
> Dichte und
> Härte.

Die Prozessgrößen wurden wie folgt variiert (**Bild 3**):

> drei Wanddicken: 0,8 mm, 1,5 mm und 3,0 mm;
> drei Anschnittgeschwindigkeiten: 25 m/s, 40 m/s und 55 m/s sowie
> drei Formtemperaturen: 120 °C, 160 °C und 200 °C.

Der Einfluss der natürlichen Alterung wurde bei Raumtemperatur nach folgenden Lagerungsdauern ermittelt:

> 3 und 6 Wochen;
> 2, 4 und 6 Monate und
> 1 und 2 Jahre.

Die künstliche Alterung wurde durch ein 24-stündiges Auslagern bei folgenden Temperaturen durchgeführt:

> 65 °C;
> 85 °C und
> 105 °C.

Die Reduzierung dieses extremen Proben- und Messumfangs erfolgte mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung DOE. Es handelte sich hierbei um einen fraktionellen faktoriellen 34-1-Versuchsplan mit Center-Point-Einstellungen bei 1,5 mm Wanddicke, 160 °C Formtemperatur und 40 m/s Anschnittgeschwindigkeit. Insgesamt umfasste der Versuchsplan je 9 Serien in 3 verschiedenen Wanddicken, also insgesamt 27 Versuchsserien. Bei den einzelnen Serien gleicher Dicke wurden die Formtemperaturen 120 °C, 160 °C und 200 °C und unterschiedliche Anschnittgeschwindigkeiten von 25 m/s 40 m/s und 55 m/s eingestellt. Die statische Festigkeit aller Serien wurde bei drei verschiedenen Temperaturen (-35 °C, 20 °C und 85 °C) an jeweils fünf Proben Z410 und jeweils drei Proben Z400 und Z430 ermittelt. Die Lagerung der Proben, die nicht natürlich altern sollten, erfolgte direkt nach der Fräsbearbeitung in einem Tiefkühlschrank bei einer Temperatur von -20 °C. Wie später aufgezeigt wird, entspricht diese Temperatur einer Alterung von 100 Jahren. Fünf Proben jeder Serie wurden bei +65 °C, +85 °C und +105 °C für je 24 Stunden in einem Luftumwälzofen gealtert und anschließend bei der jeweiligen Prüftemperatur statisch geprüft. Die natürliche Alterung erfolgte bei Raumtemperatur in einem klimatisierten Messraum.

Ermittlung der mechanischen Eigenschaften

Statische Festigkeitsprüfung. Die zu prüfende Probe wurde in eine 100-kN-Universal-Prüfmaschine mit modernisierter Steuerung und Messdatenerfassung geprüft. Die künstlich gealterten Proben wurden dem Ofen entnommen und auf Raumtemperatur abgekühlt, natürlich gealterte Proben wurden dem Alterungsschrank entnommen und direkt geprüft. Die Prüfung bei +85 °C und -35 °C wurde in einer Klimakammer durchgeführt. Das Abkühlen der Proben auf -35 °C erfolgte durch expandierendes CO_2-Gas. Ein Thermoelement, direkt an der Zugprobe angebracht, diente der Überwachung und Dokumentation der Temperatur während des Zugversuchs.

Die geprüften Proben wurden im Alterungsschrank archiviert. Von mehr als 3000 Messungen wurden alle Daten wie Kraft, Dehnung, Spannung, Weg und E-Modul gespeichert. Daraus lassen sich alle Spannungs-Dehnungs-Diagramme, wie beispielhaft in **Bild 4** dargestellt, entwickeln.

Das in Bild 4 gezeigte Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist unabhängig vom Alterungszustand typisch für alle Proben der Legierung Z410, die bei Raumtemperatur geprüft wurden. Zinklegierungen haben keine Streckgrenze, daher werden die Dehngrenzwerte $R_{p0,2}$ für eine bleibende Dehnung von 0,2 % angegeben. Für Metalle mit hexagonaler Struktur verläuft die Spannungs-Dehnungs-Kurve oberhalb der Dehngrenze sehr flach, da als Gleitebenen nur die Basisebenen aktiviert werden. Eine Zunahme der Festigkeit durch Kaltverfestigung ist bei den Zinklegierungen geringer als bei kubisch-flächenzentrierten Werkstoffen.

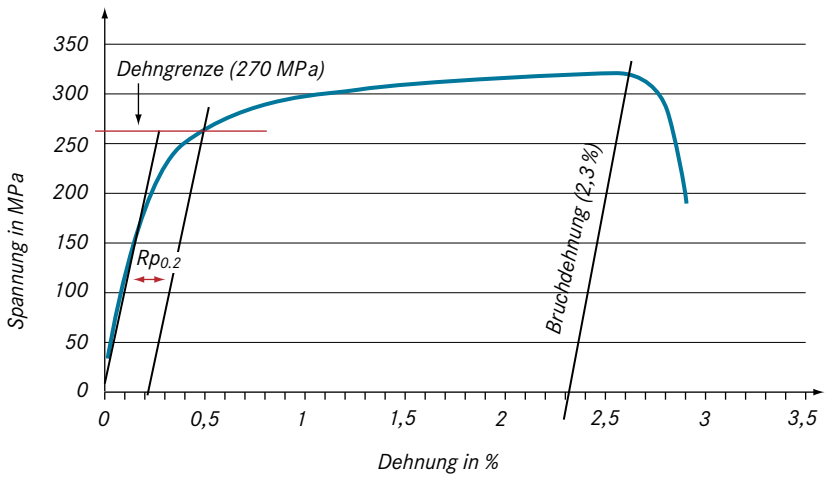


Bild 4: Zugprobe für Z410, Serie 23 (3 mm; 160 °C; 40 m/s) im Gusszustand, bei RT (20 °C) gezogen.

Die Bauteilbeschaffenheit, insbesondere der Porositätsgrad, wirkt sich bei der Zugprüfung im Wesentlichen nur auf die Bruchdehnungswerte aus, die insgesamt einer hohen Schwankung unterliegen und zwar für Z410 bei den Raumtemperaturversuchen zwischen 2 und 12 %. Die Zugfestigkeitswerte zeigen dagegen im Mittel eine Standardabweichung von 5 %. Das Alterungsverhalten kann daher sehr verlässlich aus den Änderungen der Zugfestigkeitswerte ermittelt werden.

Die Prüfung der statischen Festigkeitswerte erfolgte bei den Prüftemperaturen -35 °C und +85 °C. Bei einer Prüftemperatur von -35 °C verläuft die Spannungs-Dehnungs-Kurve wie bei der Prüfung bei Raumtemperatur. Grundsätzlich steigen Streckgrenze und Zugfestigkeit um 5 bis 10 % an, die Bruchdehnungswerte sind jedoch bedeutend niedriger, d. h., der Werkstoff verhält sich bei tiefen Temperaturen erheblich spröder.

Bei einer Prüftemperatur von +85 °C wird das Maximum der Zugfestigkeit nach ca. 4 % Dehnung erreicht und fällt dann kontinuierlich ab. Grundsätzlich fallen die Werte für Streckgrenze und Zugfestigkeit gegenüber denen bei Raumtemperatur um 20 % ab, die Bruchdehnungswerte steigen erheblich an und erreichen fast immer einen Bruchdehnungswert von 20 %, d. h., der Werkstoff verhält sich bei hohen Temperaturen sehr duktil.

Elastizitätsmodul. Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls erfolgte per Software aus den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen, die mittels Feindehnungsmesser aufgenommen wurden. Die Streuung der Werte war sehr hoch, da bereits geringe Rutsch- oder Setzbewegungen des Aufnehmers die Messung verfälschen. Der E-Modul ist weitgehend unabhängig von der Alterung und nur wenig abhängig von der Prüftemperatur. Keinen Einfluss zeigen die Fertigungsparameter Wanddicke, Formtemperatur und Strömungsgeschwindigkeit. **Tabelle 1** enthält typische Mittelwerte.

Zugfestigkeit R_m und Dehngrenze $Rp_{0,2}$. Sowohl die Zugfestigkeit R_m als auch die Dehngrenze $R_{p0,2}$ zeigten statistisch gesicherte Abhängigkeiten von Wanddicke, Formtemperatur, Strömungsgeschwindigkeit und Prüftemperatur. Die höchsten Festigkeitswerte haben dünne Proben im Gusszustand bei hoher Strömungsgeschwindigkeit und niedriger Formtemperatur (**Bild 5**).

Der Einfluss von Wanddicke, Formtemperatur und Strömungsgeschwindigkeit wird von der Varianzanalyse in Design Expert im untersuchten Bereich als linear angegeben. Den größten Einfluss hat die Wanddicke. Eine Verdoppelung der Wanddicke führt bei Zugfestigkeit und Dehn-

Tabelle 1: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Prüftemperatur und Alterung.

	Elastizitätsmodul in GPa		
	Raumtemperatur	*+85 °C*	*-35 °C*
Gusszustand	90 ±8	82 ±8	92 ±8
1 Jahr natürliche Alterung	88 ±8	78 ±8	90 ±8

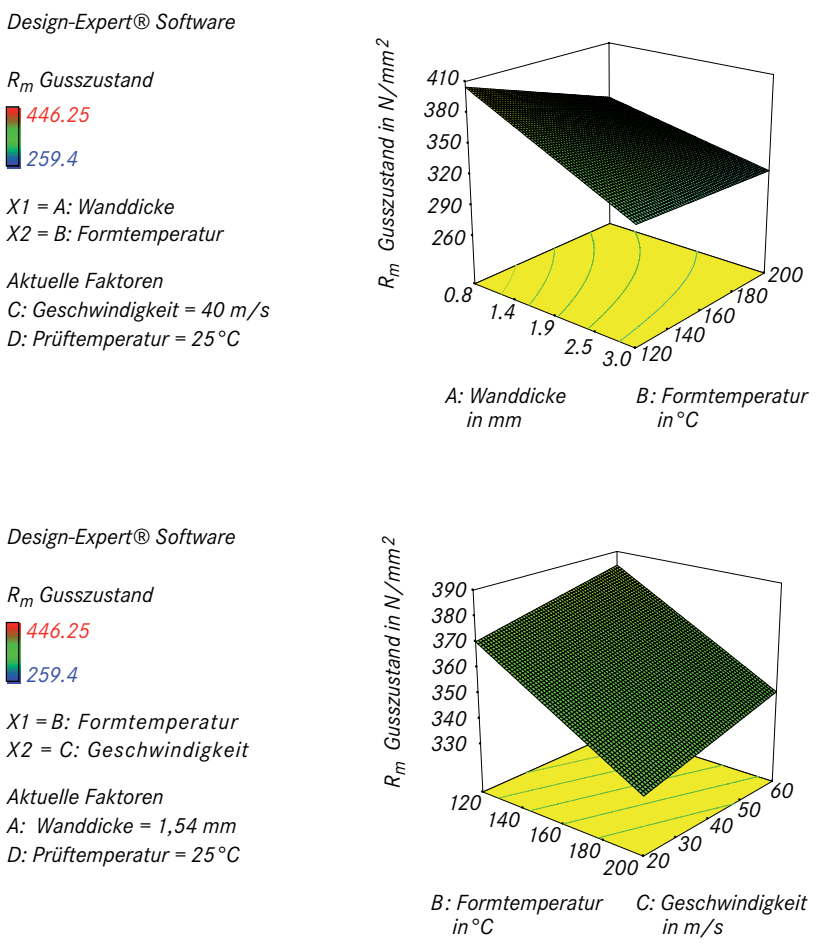


Bild 5: Zugfestigkeit R_m als Funktion der Wanddicke, der Formtemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit im Gusszustand.

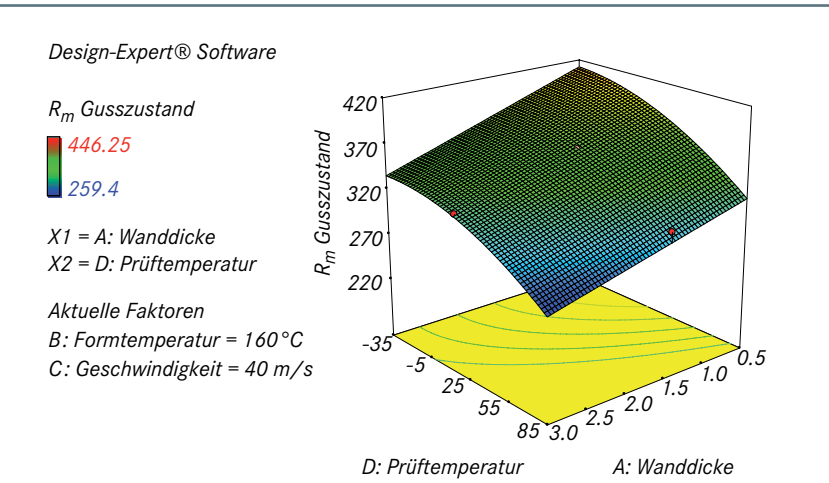


Bild 6: Zugfestigkeit R_m als Funktion der Prüftemperatur und Wanddicke im Gusszustand.

grenze im Gusszustand zu deren Änderung von ca. 8 %.

Eine Änderung der Formtemperatur um 40 °C bewirkt eine Änderung der Festigkeitswerte von ca. 4 %, eine Änderung der Strömungsgeschwindigkeit um 20 m/s führt zu einer Änderung der Festigkeitswerte von ca. 3 %.

Die lineare Abhängigkeit der Messwerte bezüglich Gießgeschwindigkeit und Formtemperatur lässt eine Mittelung aller Messwerte über Geschwindigkeit und Formtemperatur zu. Man erhält so noch genauere Aussagen über das Alterungsverhalten. Die Mittelwerte repräsentieren die Gießbedingungen bei Center-Point-Einstellung von 40 m/s Anschnittgeschwindigkeit und 160 °C Formtemperatur (**Bild 6**).

Als Einfluss der Prüftemperatur auf die Festigkeit wurde ein exponentielles Verhalten gewählt, das zu einer guten Beschreibung des Zusammenhangs führte.

Die künstliche Alterung bei 105 °C über 24 h führte bei der Legierung Z410 zu Festigkeitseigenschaften, die bei natürlicher Alterung nach einem Jahr erreicht werden.

Bild 7 zeigt den Einfluss der Wanddicke und der Formtemperatur auf die Festigkeiten nach der künstlichen Alterung bei 105 °C und 24 h.

Durch die Alterungsvorgänge werden die Einflüsse von Wanddicke und Formtemperatur geringer. Eine Verdoppelung der Wanddicke hat einen Einfluss von ca. 5 %, eine Änderung der Formtemperatur um 40 °C verändert die Werte um 3 % und die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit um 20 m/s verändert die Festigkeitswerte um 3 % (**Bild 8**).

Bruchdehnung für die Legierungen Z400, Z410 und Z430. Die ermittelten Bruchdehnungswerte unterliegen einer großen Streuung. Die niedrigsten Bruchdehnungswerte wurden bei der Prüftemperatur von -35 °C (ca. 1 bis 2 %) ermittelt, die höchsten Bruchdehnungswerte bei der Prüftemperatur +85 °C (ca. 20 bis 25 %) (**Tabelle 2**).

Kriechverhalten

Die Untersuchung des Kriechverhaltens wurde in Abhängigkeit von der Zeit und der Temperatur nach DIN 50118 durchge-

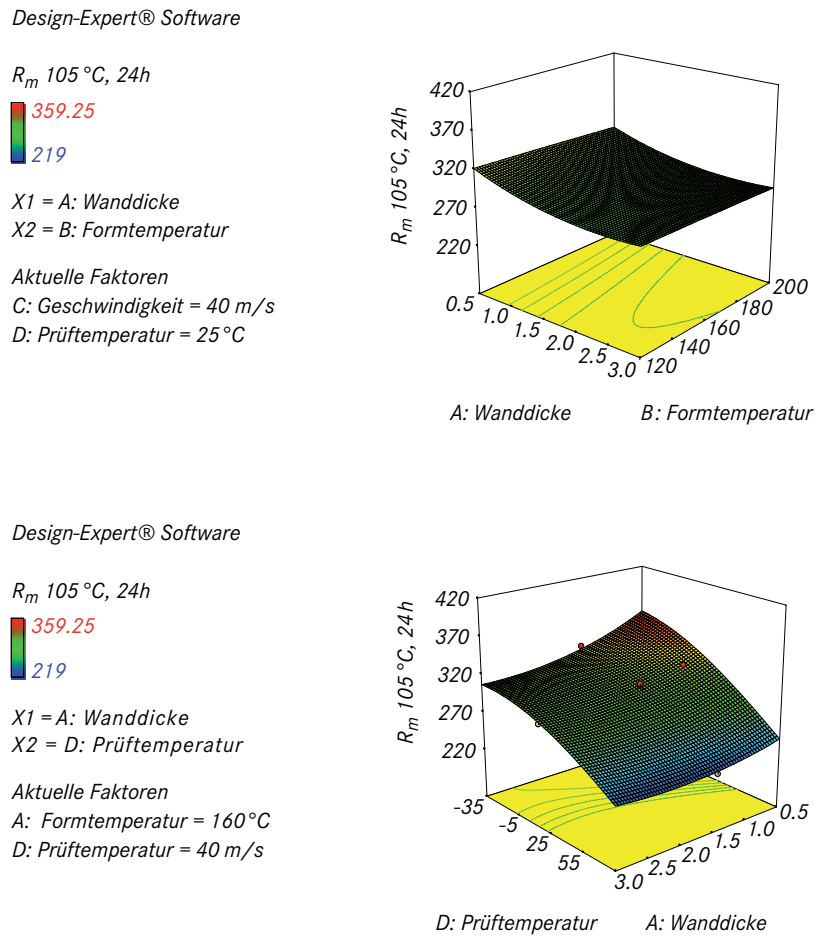


Bild 7: Zugfestigkeit R_m als Funktion der Wanddicke, der Formtemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit nach künstlicher Alterung bei 105 °C über 24 h.

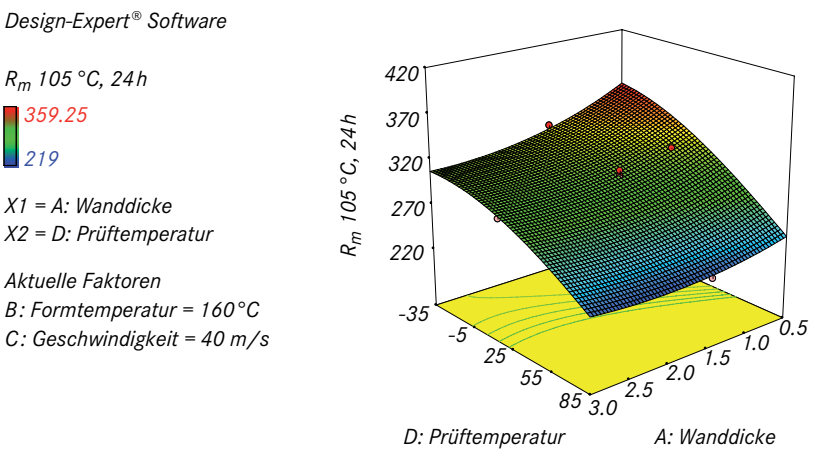


Bild 8: Zugfestigkeit R_m als Funktion der Prüftemperatur und der Wanddicke nach künstlicher Alterung bei 105 °C über 24 h.

ANZEIGE, 1/8, 174 x 30

Tabelle 2: Bruchdehnungswerte in Abhängigkeit der Prüftemperatur und der Alterung.

Legierung/Prüfbedingungen		*Bruchdehnung in %*		
Z400	Prüftemperatur	Raumtemperatur	+85 °C	-35 °C
	Gusszustand	5,0 ±3,0	20 ±8	2,0 ±1,0
	2 Monate nat. Alterung	9,0 ±5,0		
	künstl. Alterung 105 °C/24 h	10 ±5	25 ±5	2,0 ±1,0
Z410	Prüftemperatur	Raumtemperatur	+85 °C	-35 °C
	Gusszustand	2,7 ±1,0	22,7 ±8,6	1,5 ±0,4
	1 Jahr natürliche Alterung	5,5 ±1,7	22,6 ±6,8	2,0 ±0,5
Z430	Prüftemperatur	Raumtemperatur	+85 °C	-35 °C
	Gusszustand	3,0 ±1,0	15 ±8	1,1 ±0,5
	4 Monate nat. Alterung	5,0 ±1,5		
	künstl. Alterung 105 °C/24 h	4,6 ±1,5	24 ±8	1,7 ±0,9

führt. Mit der Versuchsanlage wurde die Verformung induktiv als Längenänderung kontinuierlich mit einer Auflösung von 1 µm bis zu einem Wert von 20 % erfasst.

Für die Kriechversuche wurden praxisrelevante Spannungen und Temperaturen eingestellt – bei Raumtemperatur Spannungen zwischen 40 und 100 MPa und bei der Prüftemperatur von +85 °C Spannungen zwischen 12 und 50 MPa.

Mit diesen Versuchsparametern konnten Spannungsexponent und Aktivierungsenergie berechnet werden. Bei der Legierung Z410 wurde der Einfluss der Alterung auf das Kriechverhalten erfasst. Proben im Gusszustand sowie nach einer künstlichen Alterung bei 120 °C über 15 h und einer Überalterung bei 150 °C von 15 h wurden mindestens 1000 h belastet und das Dehnungsverhalten ermittelt.

Das primäre Kriechen ist bei Zinklegierungen stark ausgeprägt und endet erst bei einer bleibenden Kriechdehnung von 2 % (**Bilder 9** und **10**). Dann bewirkt die Verrin-

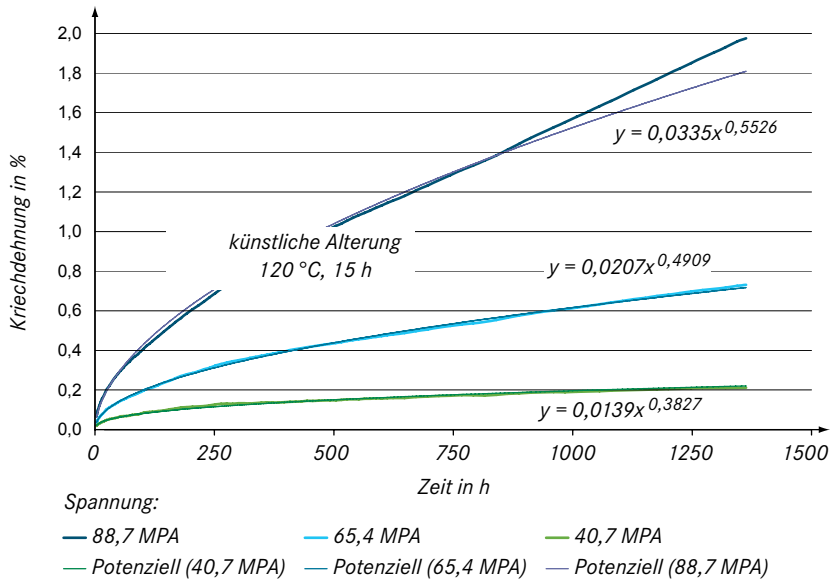


Bild 9: Kriechdehnungsverlauf von Z410 bei Raumtemperatur in Abhängigkeit der Spannung.

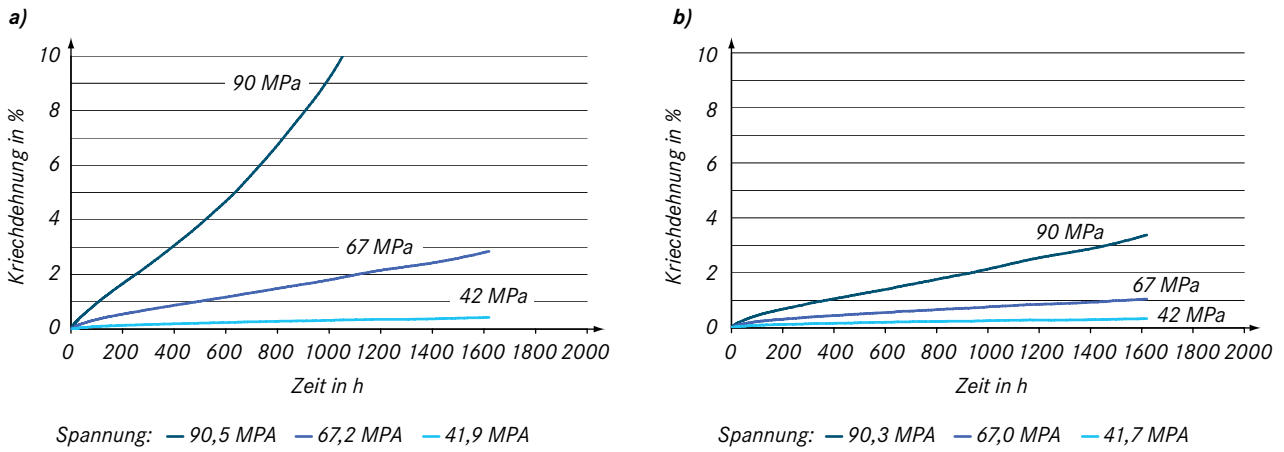


Bild 10: Kriechverhalten der Legierungen Z400 (a) und Z430 (b) bei Raumtemperatur (1,5 mm Wanddicke) im Vergleich.

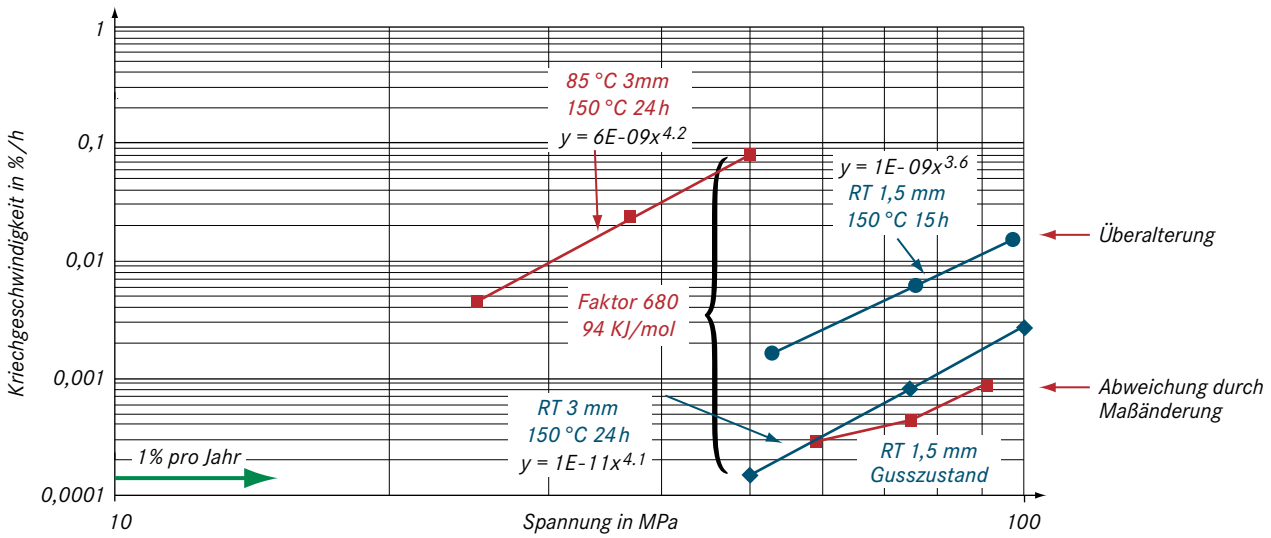


Bild 11: **Sekundäre Kriechgeschwindigkeit bei Raumtemperatur und 85 °C.**

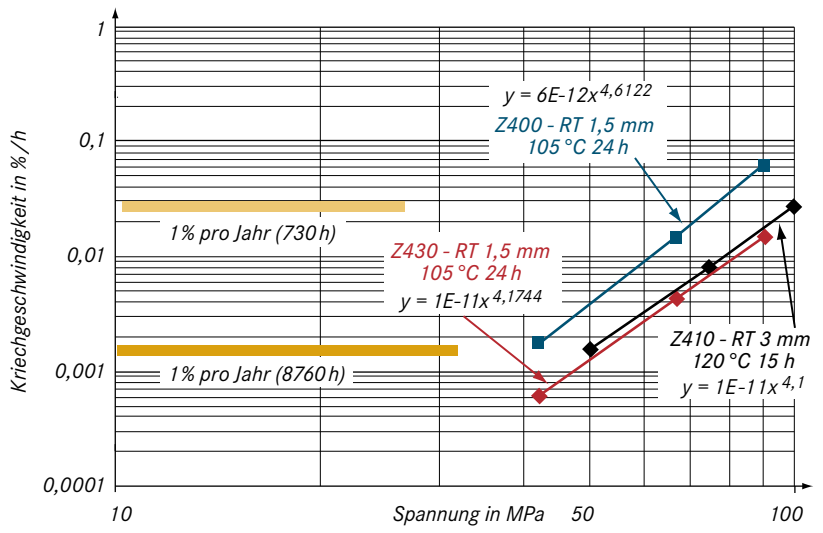


Bild 12: **Auswertung der sekundären Kriechgeschwindigkeit für Z400, Z410 und Z430.**

gerung der Querschnittsfläche eine Zunahme der Spannung und damit der Kriechgeschwindigkeit. Könnte die wahre Spannung konstant gehalten werden, würde die Kriechgeschwindigkeit noch weiter abnehmen, das primäre Kriechen könnte dann bis zu einer Kriechdehnung von 10 % weitergehen.

Proben, die im Gusszustand geprüft wurden, zeigten gegenüber künstlich gealterten Proben eine geringere Kriechgeschwindigkeit, da das Kriechen durch die parallel ablaufende Maßänderung (ca. -0,1 %) teilweise kompensiert wird (**Bild 11**).

Außer der künstlichen Alterung bei 120 °C über 15 h wurden einige Proben bei 150 °C über 15 h überaltert. Die überalterten Proben wiesen eine um den Faktor 5 höhere Kriechgeschwindigkeit gegenüber den bei 120 °C über 15 h künstlich gealterten Proben auf.

In **Bild 12** sind die Kriechwerte der drei Legierungen der Raumtemperaturversuche im Vergleich dargestellt. Der Kupferanteil zwischen 0 und 3 % reduziert die Kriechdehnung um den Faktor 4, bei den Legierungen Z410 und Z430 ist nur noch ein geringer Einfluss des Kupfers nachweisbar. Beide Legierungen zeigen ähnliches Verhalten.

Ermüdungsprüfung

Die Ermittlung der Schwingfestigkeit wurde mittels Wöhlerversuchen bei Raumtemperatur durchgeführt, die Prüffrequenz lag bei 150 Hz. Die Versuche wurden bei zwei unterschiedlichen Spannungszuständen durchgeführt, bei R = -1 (Zug-Druck-Wechselbeanspruchung) und bei R = 0 (Zugschwellbereich). Bei Probendicken bis 2 mm kam es im Druckzustand zum Ausknicken der Proben, bei den Probendicken von 0,8 mm und 1,5 mm konnte daher nur im Zugschwellbereich geprüft werden.

Die Festigkeitswerte bei schwingender Beanspruchung wurden sehr viel stärker von inneren Fehlern wie Porositäten und Einschlüssen beeinflusst als bei der statischen Prüfung. Die Proben wurden daher vor der Prüfung durch eine Röntgenprüfung selektiert.

ANZEIGE, 1/8, 174 x 30

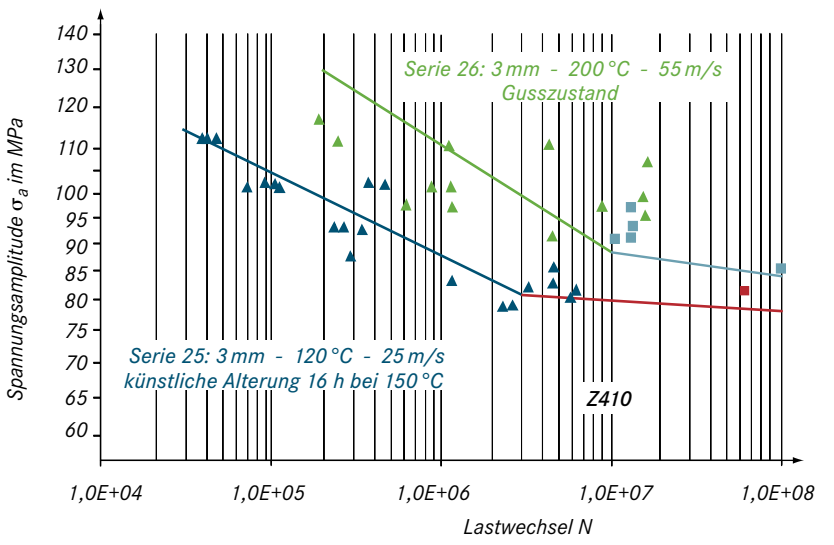


Bild 13: Vergleich der Wöhlerkurven (Zug-Druck-Wechselbeanspruchung) von Proben im Gusszustand mit künstlich gealterten Proben (Überalterung).

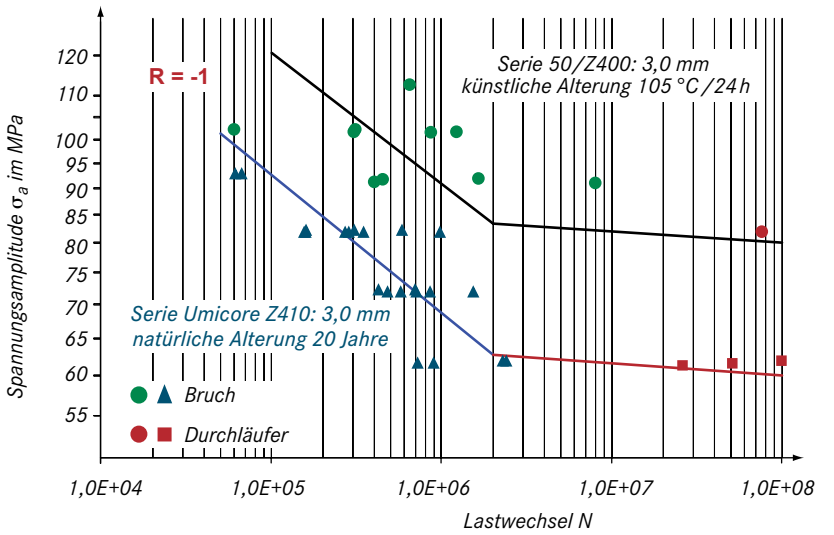


Bild 14: Vergleich der Wöhlerlinien der künstlich gealterten Legierung Z400 mit 20 Jahre alten Proben von Umicore der Legierung Z410, deren Herstellparameter jedoch unbekannt sind.

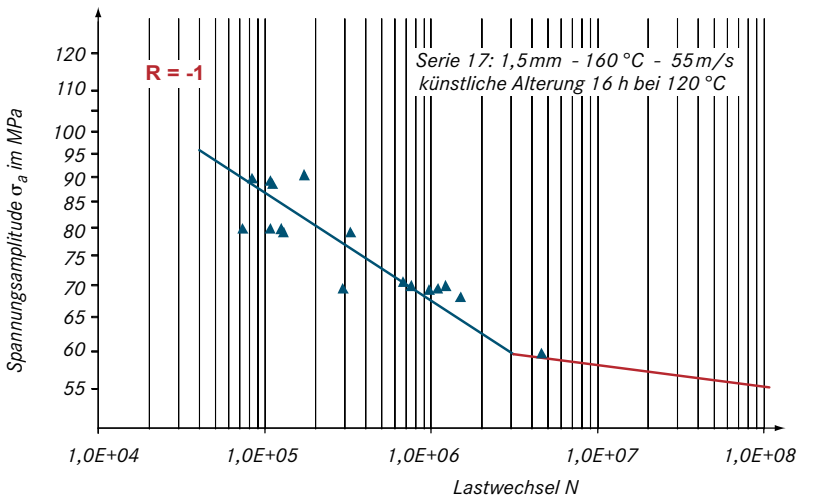


Bild 15: Wöhlerkurve bei Beanspruchung im Zug-Schwell-Bereich von Z410-Proben mit künstlicher Alterung.

Eine Dauerfestigkeit konnte bei der Legierung Z410 nicht ermittelt werden, da die Proben teilweise auch nach 50 Mio. Lastwechseln noch brachen. Die Zinklegierung Z410 zeigte gegenüber anderen Gusswerkstoffen keinen scharfen Übergang vom Zeitfestigkeitsbereich in den Dauerfestigkeitsbereich. Für eine Lastwechselzahl von 10 Mio. kann bei rein wechselnder Belastung (R = -1) im Gusszustand ein Wert von 85 MPa angenommen werden, selbst nach einer künstlichen Überalterung fällt dieser Wert nur auf ca. 80 MPa ab (Bild 13).

Die niedrigeren Zugfestigkeitswerte der Legierung Z400 führen zu einer geringeren Neigung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich, die höhere Duktilität der Legierung Z400 verbessert den Wert der Dauerfestigkeit (Bild 14).

Die Mittelspannungsempfindlichkeit, die sich aus den Festigkeitswerten bei R = -1 und R = 0 ergibt, liegt bei der Legierung Z410 bei ca. 0,45 (Bild 15).

Härteprüfung

Die Härteprüfung wurde im Gusszustand und nach einem Jahr natürlicher Alterung stichprobenartig für alle Serien vorgenommen. Die Härtewerte nach Brinell sind im Gusszustand sehr hoch, im Mittel liegen die Werte bei 110 HB. Da die Härtewerte typischerweise gut mit den Werten der statischen Festigkeit, insbesondere mit der Dehngrenze, korrellieren, kann die Alterung auch mit der Ermittlung von Härtewerten kontrolliert werden. Ein Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Härtewerte ist kaum nachweisbar.

Werden alle Härtewerte (Center-Point-Einstellung) gemittelt, ergibt sich der Zusammenhang zwischen Kupfergehalt und Härte, der vergleichbar mit der Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Kupferanteil ist (Bild 16).

Festigkeitswerte unter dem Einfluss der Alterung

Natürliche Alterung. Generell fallen Zugfestigkeit und Dehngrenze durch die Einwirkung von Zeit und Temperatur ab, die Bruchdehnung nimmt mit fortschreitender Alterung zu. Bei der natürlichen Alterung wurden Werte bei der Legierung Z410 bis zu 2 Jahren ermittelt, bei der Legierung Z400 bis zu 2 Monaten und bei der Legierung Z430 bis 6 zu Monaten.

Die Festigkeitswerte unterliegen zwar einer gewissen Streuung, doch die Versuchsbedingungen mit Center-Point-Einstellung erlauben durch die lineare Abhängigkeit eine Mittelwertbildung über den Einfluss der Formtemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit.

Für die Legierung Z410 verläuft der Zugfestigkeitsabfall bei Raumtemperatur bei

natürlicher Alterung nach **Bild 17**. Prinzipiell ist dieses Verhalten unabhängig von der Prüftemperatur und bei allen drei Legierungen ähnlich. Bei einer Bauteildicke von 3 mm tritt in den ersten sechs Wochen eine leichte Erhöhung der Zugfestigkeit auf, in diesem Zeitraum werden innere Spannungen, die durch die größeren Gefügeunterschiede entstehen, allmählich abgebaut.

Bild 18 zeigt das Alterungsverhalten der Legierung Z410, **Bild 19** den gleichen Sachverhalt bezüglich der Dehngrenze bei der Legierung Z410.

Künstliche Alterung. Die künstliche Alterung erfolgte bei allen Legierungen in folgenden Varianten:

> Alterung bei 65 °C mit einer Dauer von 24 h,
> Alterung bei 85 °C mit einer Dauer von 24 h und
> Alterung bei 105 °C mit einer Dauer von 24 h.

Da bei der Untersuchung der natürlichen Alterung als Ursache der Abnahme der Festigkeitswerte Diffusionsvorgänge von Aluminium und Kupfer in Zink ausschlaggebend sind, kann der Alterungsvorgang durch eine Temperaturerhöhung verkürzt werden. Die Zugfestigkeitswerte nach einer künstlichen Alterung sind für die Legierung Z410 in **Bild 20** in Abhängigkeit der Prüftemperatur und der Wanddicke bei Center-Point-Einstellung dargestellt. Die künstliche Alterung führte zu Festigkeitsänderungen wie die natürliche Alterung, dies ist in **Bild 21** zusammenfassend dargestellt. Für die Legierung Z410 entspricht eine künstliche Alterung bei 65 °C über 24 h demnach einer natürlichen Alterung von ca. 45 Tagen, eine künstliche Alterung

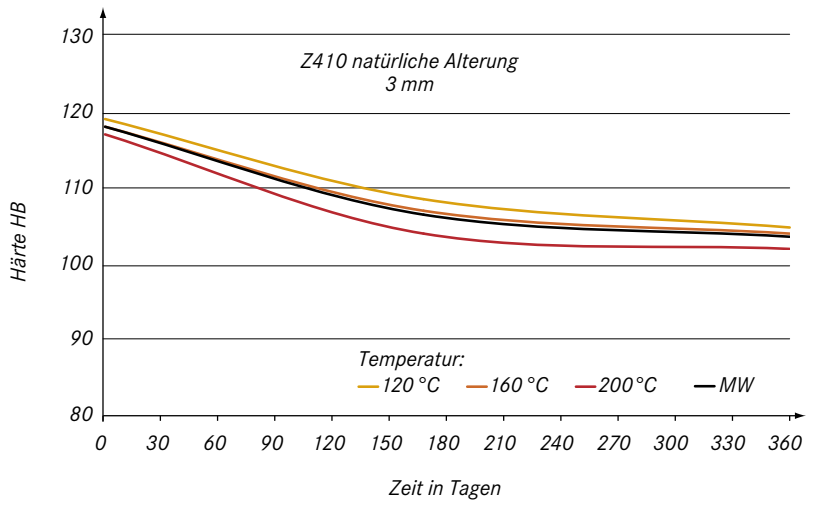


Bild 16: **Härteverlauf durch natürliche Alterung für Z410.**

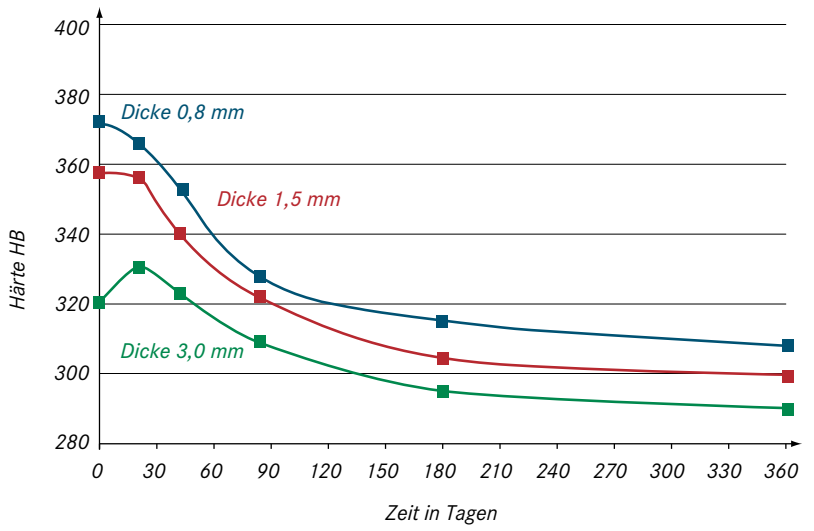


Bild 17: **Abnahme der Zugfestigkeit von Z410 bei Raumtemperatur, ermittelt in Abhängigkeit von Zeit und Wanddicke.**

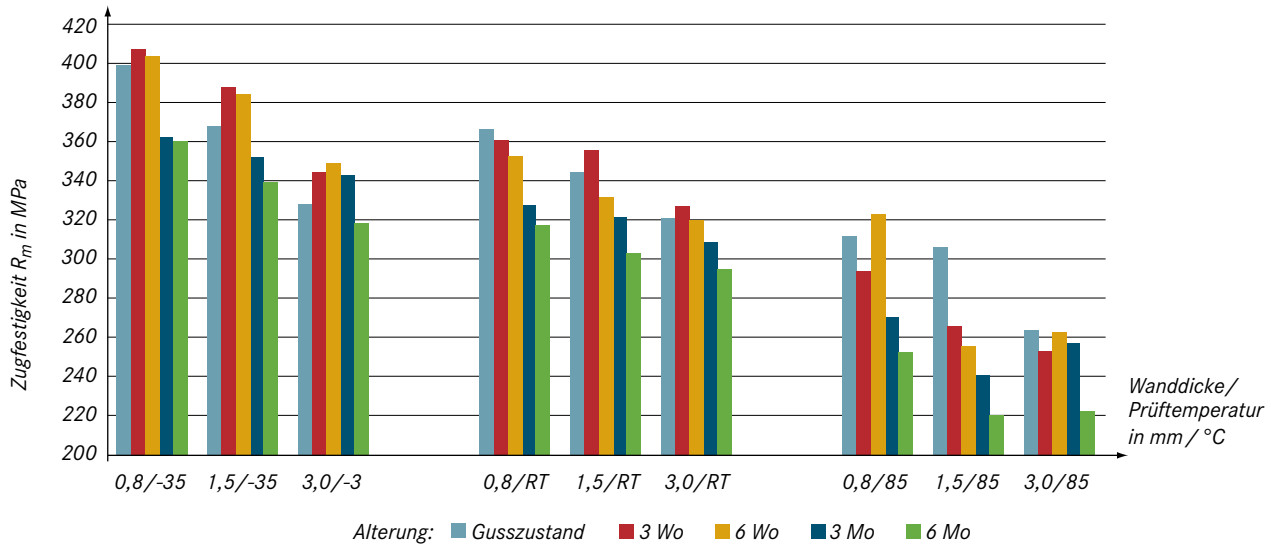


Bild 18: **Einflüsse von Prüftemperatur und Wanddicke auf die Änderung der Zugfestigkeit durch natürliche Alterung für Z410.**

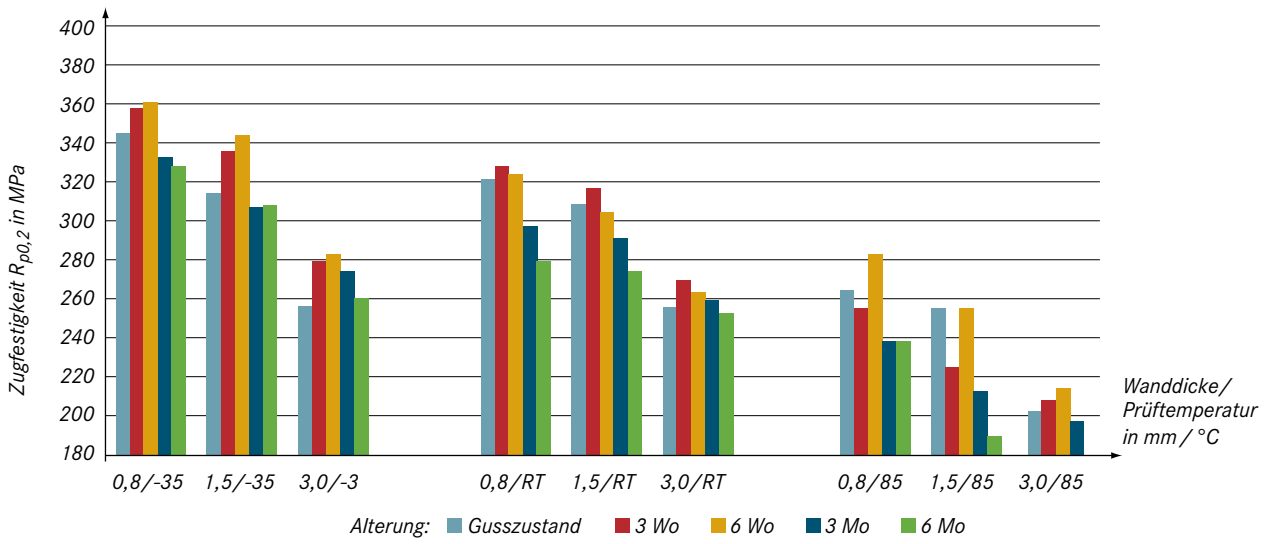


Bild 19: **Einflüsse von Prüftemperatur und Wanddicke auf die Änderung der Dehngrenze durch natürliche Alterung für Z410.**

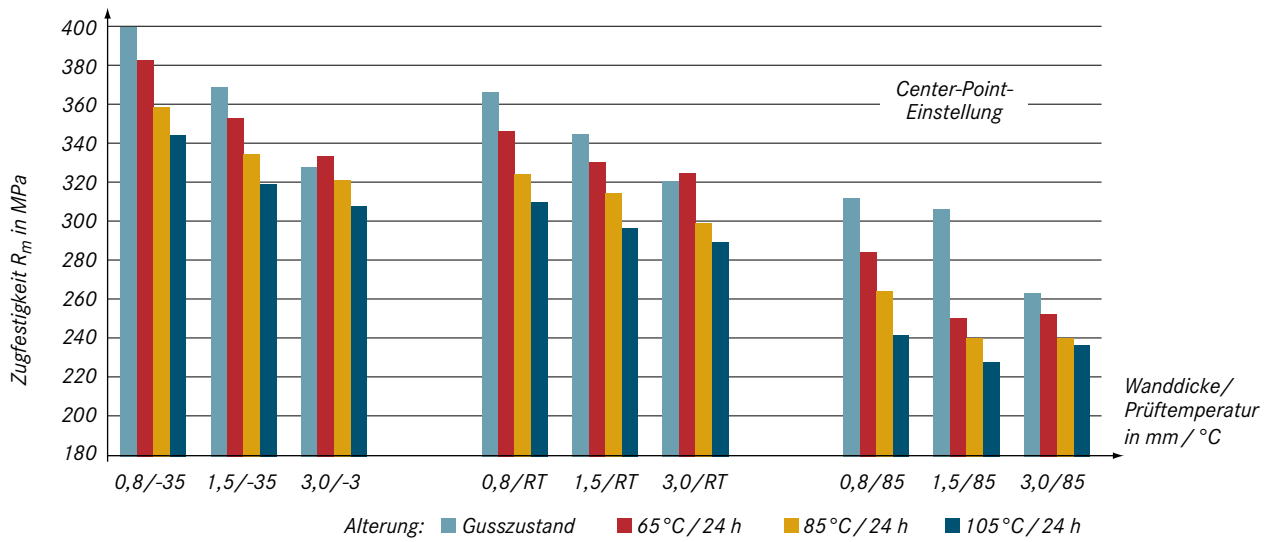


Bild 20: **Änderung der Zugfestigkeit durch künstliche Alterung in Abhängigkeit von Prüftemperatur und Wanddicke für Z410.**

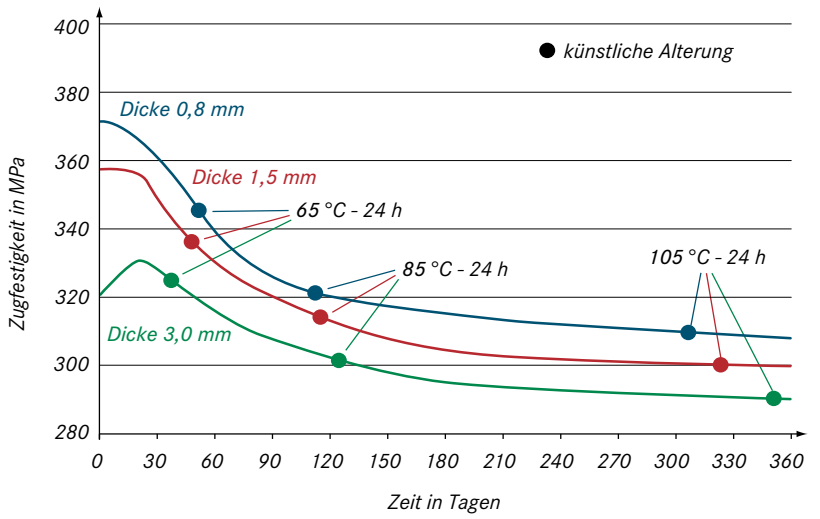


Bild 21: **Vergleich des künstlichen mit dem natürlichen Alterungsverhalten am Beispiel der Zugfestigkeit der Legierung Z410 in Abhängigkeit der Wanddicke.**

bei 85 °C über 24 h entspricht einer natürlichen Alterung von ca. 120 Tagen und eine künstliche Alterung bei 105 °C über 24 h entspricht einer natürlichen Alterung von ca. 360 Tagen.

Die Umkehrung der Darstellung in **Bild 22** zeigt bei einer bestimmten Temperatur die Zeit an, die für eine künstliche Alterung der Zinklegierung Z410 erforderlich ist, um die natürliche Alterung von einem Jahr vorwegzunehmen.

Tabelle 3 enthält einige Zahlenwerte, die diese Bedingung erfüllen. Der berechnete Zusammenhang kann auch für andere Temperaturen angewandt werden. So verhindert eine Lagerung der Proben bei -20 °C weitgehend eine Alterung innerhalb von 2 Jahren. Auf der anderen Seite ist eine künstliche Alterung über 120 °C nicht empfehlenswert (Überalterung), da ab ca. 120 °C weitere Gefügeumwandlungen vor-

nehmlich in der Primärphase auftreten, die zu einem weiteren Abfall der Festigkeit führen.

Aus vorhandenem Probenmaterial der Legierung Z410 mit einer Lagerungszeit von 20 Jahren der Umicore AG & Co. KG, Hanau-Wolfgang, wurden Probestäbe (1,5 mm Dicke) entnommen und geprüft (**Bild 23**). Der Vergleich mit den 20 Jahre alten Proben legt die Vermutung nahe, dass die Alterung nach einem Jahr fast vollständig abgeschlossen ist und für die Zugfestigkeit ein Wert von 300 MPa als unterer Grenzwert verwendet werden kann.

Vergleich der Zugfestigkeitswerte der Legierungen ZP0400, ZP0410 und ZP0430.

Die ergänzende Untersuchung des Alterungsverhaltens bei den Legierungen ZP0400 und ZP0430 sollte den Einfluss des Kupfers aufzeigen.

Kupfer erhöht in Zinkdruckgusslegierungen sowohl die Festigkeit und die äußerst geringe Löslichkeit des Aluminiums, das auch für die Festigkeitssteigerung erforderlich ist.

Bild 24 zeigt einen Vergleich der Legierungen bei einer Wanddicke von 1,5 mm und bei den Center-Point-Einstellungen (Formtemperatur 160 °C und Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s) bezüglich der Zugfestigkeitswerte, gemessen bei Raumtemperatur. Das Bild zeigt, dass alle drei Legierungsvarianten altern. Das Kupfer hat dabei zwei unterschiedliche Wirkungen:

> Kupfer erhöht grundsätzlich die Zugfestigkeit, d. h., die festigkeitssteigernde Wirkung bleibt auch durch das Altern erhalten und

> Kupfer verzögert zwar die Alterung, kann sie aber nicht verhindern.

Bezogen auf die Ausgangsfestigkeit im Gusszustand beträgt die Zugfestigkeit nach einer künstlichen Alterung über 24 h bei 105 °C für die Legierung Z400 noch 83 %, für die Legierung Z410 noch 84 % und für die Legierung Z430 noch 88 %. Da Kupfer die Alterung verzögert, könnte bei der Legierung Z430 durch eine längere Wärmebehandlung noch ein weiterer Festigkeitsverlust auf ebenfalls ca. 85 % erfolgen.

Die kupferfreie Legierung altert nach Bild 24 deutlich schneller und die prozentuale Abnahme ist bei der Legierung Z400 geringfügig höher als bei der Legierung Z410. Dieser Sachverhalt steht im Einklang mit dem Literaturhinweis [2] einer höheren Aluminiumlöslichkeit durch die Anwesenheit des Kupfers. Die kupferreiche Legierung Z430 hat auch nach der Alterung die höchsten Festigkeitswerte und altert deutlich langsamer als Z400 und Z410.

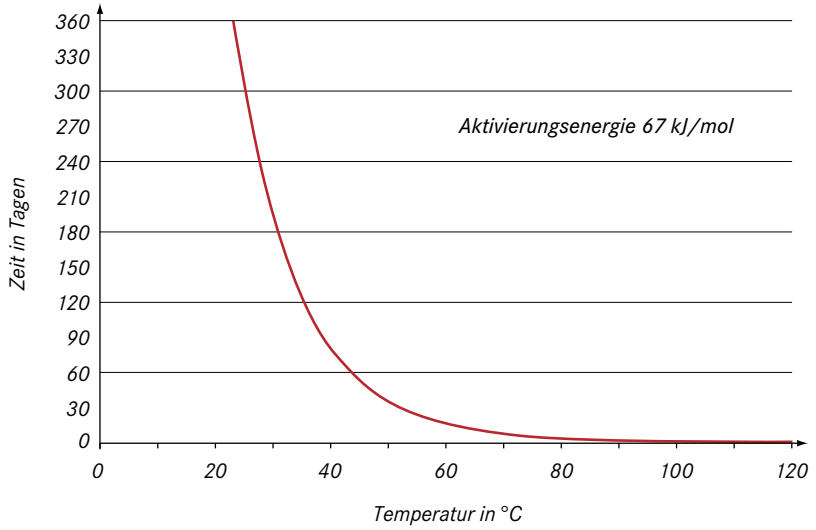


Bild 22: **Zeit in Abhängigkeit der Temperatur, die bei künstlicher Alterung erforderlich ist, um die natürliche Alterung bei Raumtemperatur (23 °C) vorwegzunehmen – ermittelt für Z410.**

Tabelle 3: **Zeit-Temperatur-Verhältnisse für das Alterungsverhalten der Legierung Z410 (-20 °C Lagertemperatur der Proben)**

Temperatur in °C	*-20*	*0*	*23*	*50*	*80*	*105*	*120*
Zeit	*100 Jahre*	*10 Jahre*	*1 Jahr*	*37 Tage*	*4 Tage*	*1 Tag*	*0,4 Tage*

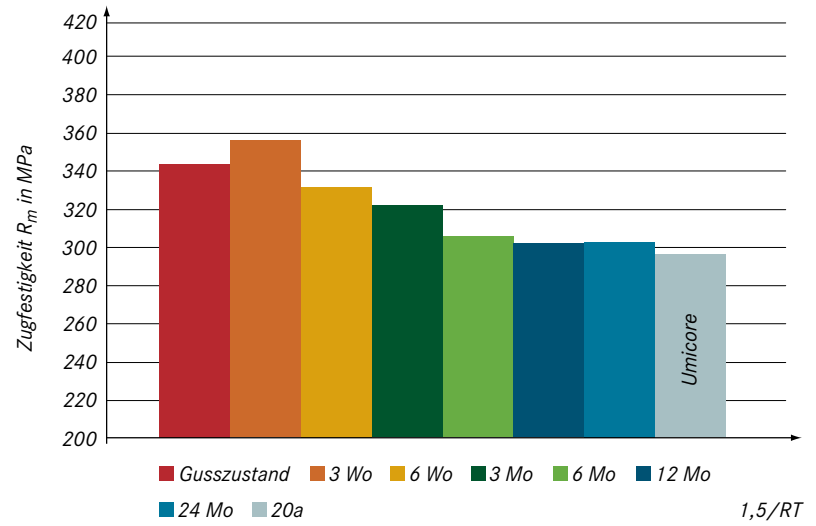


Bild 23: **Ergänzung der Werte für Z410 bei natürlicher Alterung durch Proben mit 20jähriger Alterung (Umicore); Mittelwerte bei Raumtemperatur und 1,5 mm Wanddicke.**

Zusammenfassung

Die mechanischen Werkstoffkennwerte von Zinkdruckgusslegierungen nehmen unter den Druckgusslegierungen eine Spitzenposition ein, die niedrige Schmelztemperatur führt zu höchster Produktivität und die Standzeiten der Druckgießwerkzeuge überschreiten die Millionengrenze. Zink entfaltet besonders in dünnwandigen Konstruktionen bis zu 0,5 mm beste mechanische Eigenschaften.

Die niedrige Liquidustemperatur von 385 °C und die damit verknüpfte hohe homologe Temperatur haben als Folge:

> Alterung, d. h. Festigkeitsabfall im Laufe der Zeit;

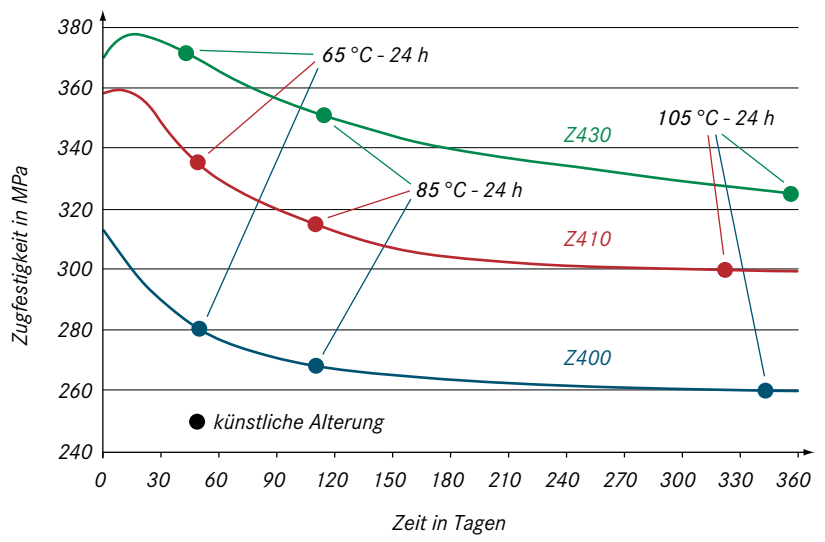


Bild 24: Vergleich der Zugfestigkeitswerte der Legierungen Z400, Z410 und Z430 nach natürlicher und künstlicher Alterung (RT, 1,5 mm Wanddicke, Center-Point-Einstellungen: Formtemperatur 160 °C, Strömungsgeschwindigkeit 40 m/s).

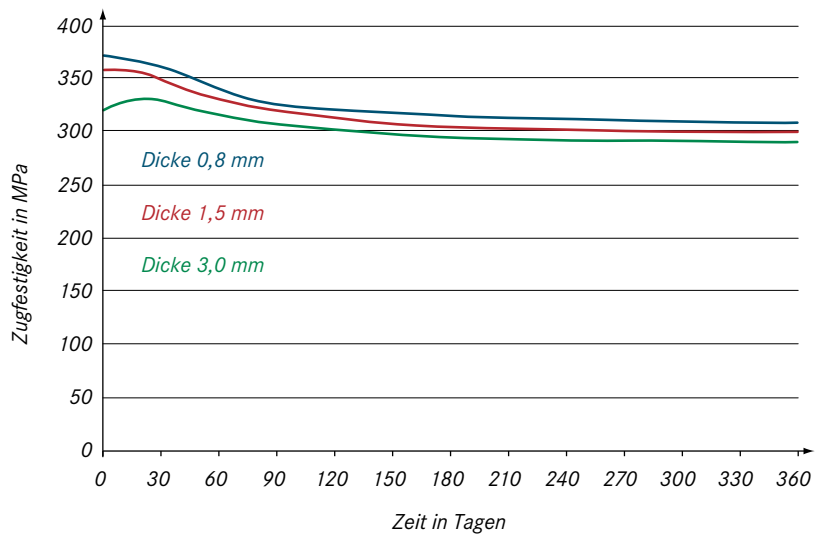


Bild 25: Alterungsverhalten der Legierung Z 410 über 1 Jahr, der Verlauf zeigt den im Vergleich zu den anfänglichen Maximalwerten doch relativ geringen Abfall durch Alterungseinflüsse.

> Maßänderungen bis -0,2 % im Laufe der Zeit und
> Kriechverformung unter Spannungseinfluss.

Die Alterung kann bei Werkstoffen mit einer Liquidustemperatur unter 500 °C bereits bei Raumtemperatur auftreten, da zwangsgelöste Legierungselemente diffundieren können. Bei den Zinklegierungen liegt die Löslichkeit des Aluminiums bei Raumtemperatur bei 0,05 %. Das Aluminium verhindert jedoch die Eisenlöslichkeit von Zink im Tiegel, in der Gießgarnitur sowie im Druckgießwerkzeug und es verbessert durch Mischkristallbildung die mechanischen Eigenschaften. Die Auswertung zeigt eine Abnahme der Zugfestigkeit und der Dehngrenze bei der Legierung Z410 um ca. 16 % (**Bild 25**), wobei alle Einflüsse der Herstellparameter erhalten bleiben. D. h., dünne Proben, bei niedriger Formtemperatur und hoher Strömungsgeschwindigkeit gegossen, haben auch nach der Alterung die höchsten Werte. Die Wanddicke übt in diesem Zusammenhang den stärksten Einfluss aus, die Einflüsse von Strömungsgeschwindigkeit und Werkzeugtemperatur verändern bei allen Legierungen die Festigkeitswerte nur um 3 bis 4 % im Rahmen der im Projekt gewählten Einstellungen. Das Kriechverhalten ist ebenfalls ein thermisch aktivierter Prozess. Die Herstellparameter haben nur einen geringen Einfluss auf die Kriechgeschwindigkeit. Eine Überalterung des Werkstoffs durch eine Wärmebehandlung bei 150 °C über 15 h erhöht die Kriechgeschwindigkeit auf den vier- bis fünffachen Wert. Die ermittelten Werkstoffeigenschaften stellen statistisch gesicherte Werte dar. Die Anlage des Projektes mit Auswahl der Prozessparameter, die DOE-Technik, die Versuchsdurchführung, die Maschinentechnik und insbesondere die Lagerung der Proben hielten die Streuung der Messwerte in sehr engen Grenzen.

Entscheidend für die scharfe Abgrenzung aller Einflüsse ist die geringe Reaktion der Festigkeitswerte von Zinklegierungen auf innere Bauteilfehler. Innere Defekte beeinflussen jedoch deutlich die Bruchdehnung und die Schwingfestigkeit und eignen sich nicht für die Ermittlung der Alterung. Eine künstliche Alterung ist bei Zinkdruckgussbauteilen immer erforderlich, um die Diffusionsvorgänge, die auch bei Raumtemperatur ablaufen, abzuschließen.

Das IGF-Vorhaben AiF Nr. 15421 N der Forschungsvereinigung Gießereitechnik e. V. FVG, Sohnstraße 70, 40237 Düsseldorf, wurde über die AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Dipl.-Phys. Walter Leis und Prof. Dr.-Ing. Lothar Kallien, Hochschule Aalen, Aalen

Literatur:

[1] Gottstein, G.: Physikalische Grundlagen der Materialkunde. 3. Auflage. Springer, 2007. ISBN 978-3-540-71104-9.
[2] Opitz, H.: Allgemeine Werkstoffkunde für Ingenieurschulen. 6. Auflage. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1971.
[3] Metall 42 (1988) Nr. 9, S. 871-874.
[4] Goodwin, F. E.; Ponikwar, A. L.: Engineering Properties. International Lead Zinc Research Organisation, 1989.
[5] Giesserei 29 (1942), Nr. 24, S. 397-403.
[6] Klein, F.; Roos, G.: Maßänderungen der Zinkdruckgusslegierungen in Abhängigkeit vom Kupfergehalt. Vortrag 4. Aalener Giesserei-Symposium, Aalen, 1983.
[7] Schumann, H.: Metallographie. 13. Auflage. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig. VLN: 152-915/3/91.
[8] Klein, F.: Abhängigkeit der 0,2 %-Dehngrenze, Zugfestigkeit, Härte und Dehnung der Zinkdruckgusslegierungen vom Kupfergehalt. Vortrag 5., 3. Aalener Gießereisymposium, Aalen, 1982.
[9] Schaller, Y.: Zink-Druckguss – neue Legierungen, neue Anwendungen. VDI Bericht Nr. 1173. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
[10] Diecasting Engineer 39 (1995) Nr. 3, S. 20, 22.