

→ Bemessung von Aluminiumkonstruktionen: Werkstoffwahl

Beitrag zur Bemessung nach Eurocode 9: Wesentliche Werkstoffeigenschaften und Hintergrundinformationen

R. Gitter^{*)}, GDA – Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., Düsseldorf

Diese Ausarbeitung ^{**)} wurde am 20. Februar bei einem Workshop der EU in Brüssel vorgetragen:
EUROCODES - Background and Applications- Session EN 1999 - Eurocode 9: Design of Aluminium Structures

Zusammenfassung

Aluminium hat sich in den vergangenen hundert Jahren als durchaus geeignetes Material für tragende Konstruktionen erwiesen. Zur Bemessung ist jedoch ein gewisses Grundwissen über Aluminium und dessen Verarbeitung unerlässlich. In Verbindung mit den in EUROCODE 9:EN 1999 aufgeführten Werkstoffen und Werkstoffregelungen soll diese Ausarbeitung die wesentlichen werkstofflichen Aspekte behandeln, die für die Bemessung von Aluminiumkonstruktionen wichtig sind. Behandelt werden die bemessungstechnisch wichtigsten unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften im Vergleich zu Stahl. Insbesondere wird auf den Einfluss von Wärme auf die mechanischen Eigenschaften von Aluminium eingegangen. Behandelt werden auch die wichtigsten metallkundlichen Aspekte, die nötig sind um die Nomenklatur für die Werkstoffe und deren Zustände zu begreifen. Es werden allgemeine Hintergrundinformationen zu den Legierungen gegeben sowie Ratschläge für deren Wahl und konstruktive Anwendung. Das Thema "Entwurf von Strangpreßprofilen und Werkstoffwahl" wird in einem speziellen Abschnitt behandelt. Im Anhang C findet sich eine Aufstellung von Anwendungsfeldern für die der Eurocode 9 die Grundlage der Bemessung ist, bzw. wo als er Bemessungsgrundlage dient oder dienen kann.

^{*)} Dipl.-Ing. Reinhold Gitter, AluConsult, Kirchstrasse 19, D 78244 Gottmadingen/Germany
eMail: gitter.aluconsult@t-online.de ;

^{**)} in englisch - hier mit Korrekturen und Ergänzungen vom August 2008

1. Einführung
2. Mechanismen der Festigkeitssteigerung
 - 2.1 Allgemeines
 - 2.2 Legierungsverfestigung
 - 2.3 Kaltverfestigung/Verformungsverfestigung
 - 2.4 Aushärtung
3. Legierungen
 - 3.1 Allgemeines
 - 3.2 Bezeichnungen der Knetlegierungen
 - 3.3 Bezeichnungen der Gusslegierungen
 - 3.4 Numerische und chemische Legierungsbezeichnungen
4. Zustände und Zustandsbezeichnungen
 - 4.1 Allgemeines
 - 4.2 Zustände bei nichtaushärtbaren Legierungen
 - 4.3 Zustände bei aushärtbaren Legierungen
5. Im EC 9 aufgeführte Legierungen und Zustände
 - 5.1 Allgemeines
 - 5.2 Knetlegierungen
 - 5.3 Gusslegierungen
6. Praktische Gesichtspunkte zur Materialwahl
 - 6.1 Bleche, Platten und Strangpressprofile
 - 6.2 Guss- und Schmiedestücke
7. Entwurfsbeeinflussende physikalische Eigenschaften
 - 7.1 Allgemein wichtige Eigenschaften
 - 7.2 Einfluss von Wärme
8. Die Aluminiumverwendung in der Zukunft

Anhang A:

Erläuterungen zu Materialeigenschaften und werkstofflichen Regelungen in EN 1999-1-1

A.1 Knetlegierungen

A.1.1 Allgemeines

A.1.2 Tabellierte Werte für Blechmaterial, Tabelle 3.2a

A.1.3 Tabellierte Werte für Strangpressmaterial, Tabelle 3.2b

A.1.4 Tabellierte Werte für Schmiedematerial, Tabelle 3.2c

A.1.5 Sonstige Festlegungen

A.2 Gusslegierungen

A.2.1 Allgemeines

A.2.2 Tabellierte Werte für Gussmaterial, Tabelle 3.3

A.2.3 Regelungen für Bemessung und Qualität

Anhang B:

Entwerfen von Strangpressprofilen und Legierungswahl

B.1 Allgemeine Regeln für das Entwerfen von Strangpressquerschnitten

B.2 Regeln für Rundrohre und rundrohrähnliche Querschnitte

B.3 Materialfragen

Anhang C:

Anwendungsfelder des Eurocode 9

Literatur

1. Einführung

Befassen sich Ingenieure, die mit Stahl konstruieren, zum ersten Mal mit dem Entwurf einer Aluminiumkonstruktion, werden sie mit zwei Besonderheiten konfrontiert: Einmal mit der großen Anzahl von Aluminiumlegierungen in Verbindung mit den sogenannten "Zuständen". Zum anderen mit der Tatsache, und dies mag oft vielleicht ein Problem sein, dass nur eine begrenzte Anzahl von Legierungen als Bleche oder Standard-Profile ab Lager erhältlich sind. Damit verbunden ist außerdem der Umstand, dass die Palette von Lagerprofilen meist sehr begrenzt ist und sich auf kleinere Querschnitte beschränkt. Nur wenige Händler haben auch mittelgroße Profile ab Lager. Der Grund hierfür ist, dass Profile aus Stahl vorzugsweise durch Walzen hergestellt werden, während dies beim Aluminium üblicherweise durch Strangpressen geschieht. Walzprozesse sind immer mit hohen Werkzeugkosten und großen Rüstzeiten verbunden, daher sind für die wirtschaftliche Herstellung eines Querschnitts jeweils große Abnahmemengen erforderlich. Die Kosten für Strangpresswerkzeuge sind dagegen sehr gering bei kleinen Querschnitten, aber auch noch moderat bei Großprofilen. Ebenso sind die Abnahmemengen für eine bereits wirtschaftliche Produktion klein und liegen zwischen 200 kg und 3000 kg. Die Folge hiervon ist, dass viele Firmen und Ingenieure sich ihre eigenen Querschnitte entwerfen, die bei oft noch hoher Funktionalität gewichtlich der Konstruktion angepasst sind. Neunzig Prozent aller produzierten Strangpressquerschnitte sind so entwickelt worden und werden demzufolge auch nur an den Entwickler bzw. Erstbesteller geliefert. Das erklärt die besondere Situation, die für Aluminiumprofile gilt und weshalb es keine Normen mehr für Standardquerschnitte (FLUTZ) gibt.

Dem erfahrenen Ingenieur fällt indes die Wahl von Legierung und Zustand nicht sehr schwer, insbesondere dann nicht, wenn folgende Fragen geklärt sind:

- Welches Festigkeitsniveau wird benötigt (ist ausreichend!)?
- Sind hohe Schweißnahtfestigkeiten wirklich notwendig? (Oder ist es möglich das Schweißen an bestimmten Stellen zu vermeiden - das kann z.B. vom verfügbaren Blechformat abhängen!)
- Welche Halbzeuge werden benötigt: Bleche/Platten/Strangpressprofile?
- Welche Mengen werden benötigt und sind diese ab Lager erhältlich?
- Sind die benötigten Mengen von gegebenenfalls individuell gestalteten Profilen ausreichend für deren Produktion?
- Sind dünnwandige oder Profile mit mehreren Kammern vorteilhaft oder notwendig?
- Sollte das Material eine hohe Dehnfähigkeit besitzen?
- Müssen die Querschnitte gebogen oder sonstwie verformt werden?
- Muss Blechmaterial abkantet oder sonstwie verformt werden?
- Sollen Oberflächen dekorativ anodisiert werden?
- Ist eine außergewöhnlich gute Korrosionsbeständigkeit gefordert (z.B. für spezielle Anwendungen)?
- Gibt es Anforderungen im Hinblick auf den Einsatz bei erhöhten Temperaturen?

Nicht zuletzt aber die Frage: Was wird das Material kosten? Dabei kann es beträchtliche Unterschiede zwischen den einzelnen Legierungen und Halbzeugformen geben, so dass der Planer oft genötigt ist aus Kostengründen seinen Entwurf nochmals zu überarbeiten.

Dies alles erklärt, warum der mit Aluminium planende Ingenieur im Vergleich zu Stahl viel mehr über "sein" Material Aluminium wissen muss. Dies betrifft auch noch einige physikalische Eigenschaften, bei denen Unterschiede bestehen. Vorliegende Ausarbeitung behandelt all diese Fragen und gibt Hintergrundinformationen zu den Werkstoffen und damit verbundenen Regelungen des EUROCODE 9. In EN 1999-1-1 finden sich im Anhang C zwar ebenfalls Informationen über Werkstoffe, doch sind diese für den Konstrukteur nicht immer umfassend genug.

2. Mechanismen der Festigkeitssteigerung

2.1 Allgemeines

Aluminium an sich ist ein Metall mit einer relativ geringen Festigkeit. In reiner Form weist es eine Zugfestigkeit von etwa 40 N/mm^2 auf und eine Streckgrenze von etwa 10 N/mm^2 , was jedoch für die meisten technischen Anwendungen zu wenig ist. Es sind daher Aluminiumlegierungen entwickelt worden, deren mechanische Eigenschaft die des Basismaterials bei weitem übertreffen.

Bei allen Metallen basiert die plastische Verformung des einzelnen Kristalls auf Abgleitvorgängen entlang bestimmter Gleitebenen. Diese Gleitebenen weisen gegenüber Scherspannungen ein Minimum an Widerstand auf und die Scherverformung erfolgt im atomaren Größenbereich ohne Trennung des Materials. Wird ein Metall über seine elastische Grenze hinaus beansprucht, so beginnt es zu fließen und ist dann bleibend verformt. Ein Prüfstab, der auf Zug über seine Elastizitätsgrenze hinaus beansprucht wird, wird somit länger und dünner. Im Inneren des Materials ist das mit vielen Gleitvorgängen verbunden. Da die technischen Werkstoffe allgemein sehr feinkörnig sind und daher makroskopisch betrachtet als isotrop angesehen werden können, sind die Gleitebenen dabei unter einem Winkel von etwa $\pm 45^\circ$ geneigt, entsprechend der Ebene mit den größten Scherspannungen.

Der Ingenieur der gewohnt ist in mechanischen Modellen zu denken, kann sich leicht vorstellen, dass mit einer Vergrößerung der Scherfestigkeit auch eine allgemeine Vergrößerung der Materialfestigkeit verbunden sein sollte. Die Vorstellung, dass dies erreicht werden kann, wenn in den Gleitebenen dübelartig wirkende Elemente aktiv werden, ist gar nicht so falsch und eine Hilfe die verschiedenen unterschiedlichen Methoden zur Verfestigung von Aluminium zu verstehen.

2.2 Legierungsverfestigung

Ein sehr wirksames Mittel Gitterstörungen zu erzeugen besteht im Einbringen geeigneter Fremdelemente in die Aluminiummatrix. Zu einem bestimmten Grad hängt deren Wirksamkeit von den Unterschieden der Atomradien zwischen dem Fremdatom und dem Aluminium ab. Die Beziehung zwischen der Menge an eingebrachtem Legierungselement und der dadurch erzielten Verfestigung verläuft allerdings nicht linear, wie aus **Bild 1** zu ersehen ist.

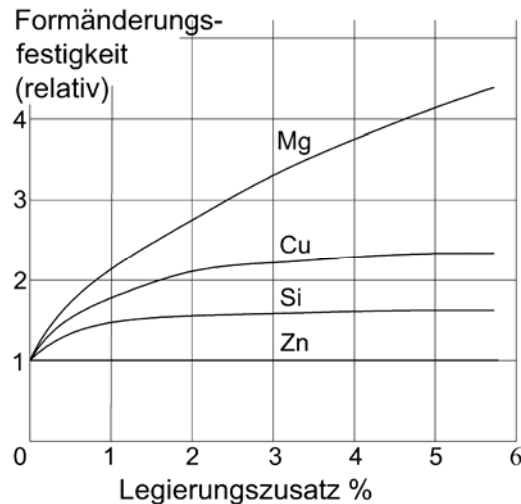


Bild 1: Verfestigung als Funktion der Menge an vorhandenem Legierungselement

Magnesium ist eines der wirksamsten Elemente um die Festigkeit zu erhöhen. Daher waren vor über hundert Jahren – aber auch noch später – Aluminium-Magnesium-Legierungen die dominierenden Legierungen bei konstruktiven Anwendungen. Legierungen bis zu einem Magnesiumgehalt von 10 % waren in Gebrauch. Jedoch führten Probleme bei der Herstellung und Verarbeitung der Legierungen mit derart hohen Magnesiumgehalten und die damit verbundene nicht sehr optimale Korrosionsbeständigkeit zu Legierungen mit niedrigeren, maximal mittleren Magnesiumgehalten unter Zufügung von Mangan.

In **Bild 1** ist die Kurve für das an sich sehr häufig benutzte Legierungselement Mangan nicht eingezeichnet. Mangan hat als einzelnes Legierungselement nur einen begrenzten Einfluss auf die Verfestigung. In Verbindung mit Magnesium ist es sehr viel wirksamer. Darüber hinaus hat noch es einen sehr günstigen Einfluss auf das Korrosionsverhalten.

2.3 Kaltverfestigung/Verformungsverfestigung

Plastische Verformungen rufen Gitterstörungen hervor indem sie in großem Maße die Zahl der sogenannten Versetzungen in den Gleitebenen vergrößern. Mit steigender Beanspruchung und Verformung bilden sich ständig zusätzliche Gleitebenen, so dass mit steigender Versetzungsdichte die mechanische Festigkeit des Materials ebenfalls größer wird. Mit dem Ansteigen der Festigkeit sinkt jedoch die Verformungsfähigkeit bis letztendlich der Verformungsprozess beendet werden muss. Beim Kaltwalzen kann diese Kaltverfestigung so weit getrieben werden, bis das Material Risse zeigt, vorzugsweise zuerst an den Kanten. Das Phänomen kann auch leicht an einer Büroklammer demonstriert werden. Bei mehrfachem Hin- und Herbiegen steigt der Widerstand bis schließlich der Draht bricht. Mit Hilfe von Wärme kann diese Verfestigung aber wieder rückgängig gemacht werden. Abhängig von der Höhe der Temperatur und deren Einwirkungsdauer verliert das Material seinen Gewinn an Festigkeit bis es schließlich wieder seine Festigkeit vor Beginn der Kaltverformung erreicht. Dabei gewinnt es auch seine ursprüngliche Umformbarkeit wieder. Der Prozess, um den sogenannten "Zustand 0"¹⁾ zu erreichen, wird "Weichglühen" genannt. Danach kann mit dem Kaltverformen erneut begonnen werden.

¹⁾ Zustand 0 = "0", nicht "Null"

Bei der industriellen Produktion von Walzhalbzeug muss dieser Prozess mehrfach durchlaufen werden um z.B. aus einem Walzbarren von 30 cm Höhe zu Material von wenigen μm Dicke (Folien) zu kommen.

Bild 2 zeigt den Prozess der Kaltverfestigung und des Rückglühens, hier als Funktion der Zeit bei konstanter Temperatur. In der Literatur findet man oft auch Diagramme, die die Auswirkung des Rückglühens in Abhängigkeit von der Höhe der Temperatur darstellen. Es ist typisch für die Kaltverfestigung, dass sich in der Anfangsphase der Umformung die größten Gewinne an Festigkeit zeigen.

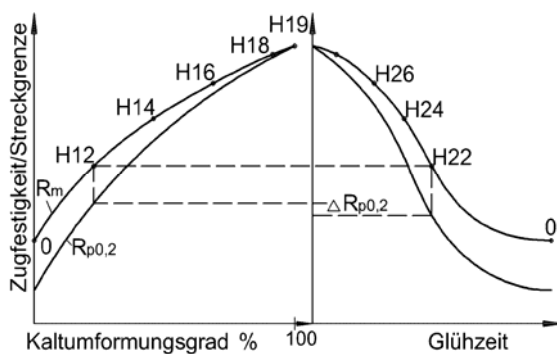


Bild 2: Festigkeit in Abhängigkeit vom Umformgrad bzw. der Dauer der Glühzeit

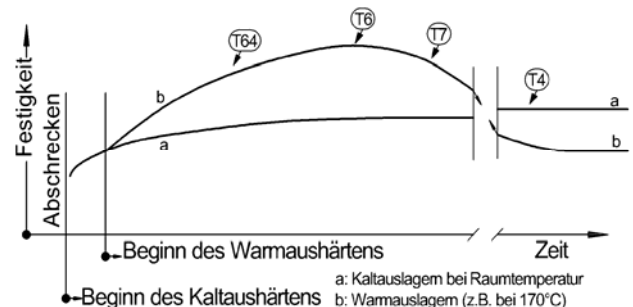


Bild 3: Festigkeit in Abhängigkeit von der Zeit bei Umgebungstemperatur und bei erhöhter Temperatur.

2.4 Aushärtung/Ausscheidungshärtung

Der Effekt der Ausscheidungshärtung wurde 1906 von Wilm entdeckt und umgehend auch in der Praxis genutzt. Er beruht auf dem Umstand, dass ein oder mehrere Elemente miteinander oder auch zusammen mit dem Matrixmaterial Aluminium spezielle Partikel bilden können, sogenannte intermetallische Phasen. Diese bilden ebenfalls Gitterstörungen und begründen so, abhängig von ihrer Größe und der Gleichmäßigkeit ihrer Verteilung, einen bemerkenswerten Zuwachs an Festigkeit. Der ganze Prozess beginnt mit dem Lösungsglühen, also einer Wärmebehandlung, die alle Legierungselemente in Lösung bringt (feste Lösung). Danach ist ein Abschrecken erforderlich, um alle Legierungselemente auch noch bei Raumtemperatur gleichmäßig verteilt zu haben. Nun beginnen die Elemente in der Aluminiummatrix zu wandern, sie vereinigen sich zu intermetallischen Phasen, die mit der Zeit wachsen. Das geschieht bereits bei Raumtemperatur, jedoch viel wirksamer bei erhöhten Temperaturen (Kaltaushärten und Warmaushärten). Wichtig ist dabei zu wissen, dass die Effekte der Ausscheidungshärtung wieder zurückgehen wenn zu hohe Temperaturen einwirken, und sei dies auch nur für kurze Zeit, oder wenn etwas moderatere Temperaturen sehr lange auf das Material einwirken. (Näheres siehe Abschnitt 7.2.)

Bild 3 zeigt die Verläufe beim Aushärten. Die Kaltaushärtung beginnt unmittelbar nach dem Abschrecken typischerweise sehr rasch, schwächt sich dann ab und nähert sich asymptotisch einem Endwert (T_4). Das kann bei manchen Legierungen einige Wochen dauern, bei den meisten Legierungen kann man aber nach einer Woche den Prozess praktisch als abgeschlossen betrachten. In der Regel wird aber nach einer Zeit der Zwischenlage-

rung (Stunden, wenige Tage) - abhängig von den Fertigungsbedingungen – das Material in einen Ofen gebracht, wobei durchaus unterschiedliche Temperaturführungen zur Anwendung kommen. Hier ist nun typisch, dass nach einem anfangs rascheren Ansteigen der Festigkeit ein Maximum, also ein Gipfelpunkt erreicht wird (T6), der je nach Temperaturführung sehr flach sein kann. Wirken die Temperaturen darüber hinaus ein, verliert das Material wieder an Festigkeit und wir erhalten den sogenannten "überhärteten" Zustand (T7). In diesem Zustand weist das Material einige verbesserte physikalische Eigenschaften auf: bessere Verformbarkeit, bessere Korrosionsbeständigkeit (speziell bei kupfer- und/oder zinkhaltigen Legierungen) und bessere elektrische Leitfähigkeit. Zu dem Diagramm muss noch gesagt werden, dass die Achsen absichtlich keine Maßzahlen aufweisen und die Abszisse auf keinen Fall als linear angesehen werden darf. Die Länge der einzelnen Phasen, aber auch die relativen Festigkeiten können in weiten Bereichen schwanken, abhängig von der Legierung und der Temperaturführung.

Hier ist anzumerken, dass heute die ausscheidungshärtenden Legierungen in vielen Bereichen dominieren (z.B. Strangpressprofile). Sie setzen dem (Warm-!) Umformprozess einen deutlich geringeren Widerstand entgegen und erhalten ihre oft beachtlichen Festigkeiten erst danach durch den Aushärtprozess.

3. Legierungen

3.1 Allgemeines

In der Praxis haben sich nur einige wenige Elemente als geeignet und sinnvoll erwiesen als legierende Elemente bei konstruktiv anzuwendenden Knet- und Gußlegierungen eingesetzt zu werden. Es sind dies:

Magnesium (Mg) ---- Silizium (Si) ---- Mangan (Mn) ---- Kupfer (Cu) ---- Zink (Zn)

Sie werden als Einzelelemente und in Kombination eingesetzt. Die daraus resultierenden, wenigen Legierungsfamilien zeigt die **Tabelle 1** für Knetwerkstoffe und die **Tabelle 2** für Gußwerkstoffe, wobei sehr unterschiedliche Legierungsfamilien dominieren

Will man mit Aluminium arbeiten, so ist es wichtig die mit den Werkstoffen verbundene Nomenklatur zu kennen. Dies gilt sich nicht nur für die Legierungen, sondern auch für deren Zustände, wie sie genormt sind und wie sie auf dem Markt angeboten werden.

| | Mn | Mg | Si | Zn |
|----|----------------|----------------------------|----------------|----|
| Mn | AlMn 3xxx | | | |
| Mg | AlMgMn 5xxx | AlMg 5xxx | AlMgSi 6xxx | |
| Si | | AlSiMg 6xxx | AlSi 4xxx | |
| Zn | | AlZnMg AlZnMgCu 7xxx | | |
| Cu | | AlCuMg 2xxx | | |

Tabelle 1: Die Familien der Knetlegierungen

| | Mn | Mg | Si | Zn | Cu |
|----|----|-----------------|---------------|----|-----------------|
| Mn | | | | | |
| Mg | | AlMg 5xxxx | | | |
| Si | | AlSiMg 4xxxx | AlSi 44xxx | | AlSiCu 4xxxx |
| Zn | | AlZnMg 7xxxx | | | |
| Cu | | | | | AlCu 2xxxx |

Tabelle 2: Die Familien der Gußlegierungen

3.2 Bezeichnungen der Knetlegierungen

Das Bezeichnungssystem der Aluminium Association (AA) der USA ist heute das meistverbreitete System. Auch die europäischen Normen haben diese Nomenklatur übernommen. Verwendet werden für die einzelnen Legierungen vierzifferige Zahlen, denen in besonderen Fällen noch ein Buchstabe folgen kann (A, B, C,...). Die Familie bzw. das dominierende Legierungselement kommt durch die erste Ziffer zum Ausdruck. Tabelle 1 zeigt unter der chemischen Bezeichnung der Familien die entsprechende numerische Charakterisierung.

Die Familien mit den Bezeichnungen 1xxx, 8xxx und 9xxx finden sich in Tabelle 1 allerdings nicht. Dabei handelt es sich bei den Bezeichnungen

1xxx um unlegiertes Aluminium, wobei vor allem der Reinheitsgrad unterscheidendes Merkmal ist

8xxx um Legierungen verschiedenster Art (z.B. Fe als Legierungselement), die in die anderen Familien nicht hineinpassen

9xxx um (noch?) nicht genutzte Bezeichnungen

Die erste Ziffer gibt nun die Information über die Hauptlegierungselemente:

| | | | |
|---------------|--------|-----------|------------------------|
| 2xxx: | Kupfer | 5xxx | Magnesium |
| 3xxx | Mangan | 6xxx | Magnesium und Silizium |
| 4xxx Silizium | | 7xxx Zink | |

Das System sagt aber auch etwas über die bevorzugte Art der Verfestigung, die bei den einzelnen Familien zur Anwendung kommt.

Bei den Familien 1xxx, 3xxx und 5xxx handelt es sich um sogenannte nichtaushärtbare^{*)} oder naturharte Legierungen, die ihre Festigkeit durch die Menge der Legierungselemente (z.B. durch höheren Magnesiumgehalt) oder durch Kaltverfestigung gewinnen.

Die Familien 2xxx, 6xxx und 7xxx umfassen Legierungen, deren Festigkeit zwar auch über die Menge an Legierungselement beeinflusst wird, in weit höherem Maße aber durch Aushärten, d.h. Ausscheidungsverfestigung. Verfahren der Kaltverfestigung kommen bei diesen Legierungen normalerweise nicht zur Anwendung.

Legierungen der 4xxx- und 8xxx-Familien können diesbezüglich nicht so pauschal charakterisiert werden. Legierungsabhängig werden alle möglichen Verfestigungsmethoden angewendet.

3.3 Bezeichnungen der Gußlegierungen

Bei Gussprodukten werden völlig andere Legierungen bevorzugt. Die Gießler geben hier den 4xxx-Legierungen mit hohem Siliziumgehalt den Vorzug, da mit diesen Legierungen gute Qualitäten relativ einfach herstellbar sind.

Die Bezeichnungen der Gußlegierungen beginnen mit dem Präfix "EN AC-" um sie deutlich von Knetwerkstoffen zu unterscheiden. Außerdem sind sie fünfzifferig. Dieses System ist europäischen Ursprungs und kommt nicht aus den USA.

Die erste Ziffer hat die gleiche Bedeutung wie bei den Knetwerkstoffen, d.h. sie charakterisiert das Hauptlegierungselement. Es gibt jedoch einen Unterschied bei den Legierungen, die sowohl Magnesium und Silizium als Hauptelemente aufweisen um durch Aushärtung, also durch gezielte Ausscheidung von Mg-Si-Phasen, höhere Festigkeitswerte zu erzielen. Bei Gusslegierungen sind nämlich hohe Siliziumgehalte von Vorteil, da dadurch die Gefahr von Schrumpfrissen deutlich verringert wird. Aus diesem Grund wird in Magnesium-Silizium-Gusslegierungen das Silizium mit großem Überschuss dazugegeben. Die Logik des Bezeichnungssystems verlangt dann aber, dass diese Legierungen eine "4" als erste Ziffer erhalten im Unterschied zu den ausscheidungsgehärtenden Aluminium-Magnesium-Knetlegierungen, die eine "6" als erste Ziffer aufweisen.

Unter den Legierungen der 4xxxx-Familie finden wir überwiegend aushärtbare Legierungen. Die Legierungen der Untergruppe 44xxx sind nicht aushärtbar, da sie ausschließlich Silizium als Hauptlegierungselement enthalten. Eine zweite Gruppe von nichtaushärtbaren Legierungen sind die Legierungen der 5xxxx-Gruppe, die Magnesium als einziges Hauptlegierungselement enthalten. Verfestigung durch Kaltumformung spielt bei Gusstücken keine Rolle.

3.4 Numerische und chemische Legierungsbezeichnungen

In früheren Zeiten waren in Normen vieler Länder Bezeichnungssysteme gebräuchlich, die auf chemischen Symbolen basierten. Für den Ingenieur, der mit Aluminium weniger vertraut war, stellte dies einen Vorteil dar. Mit diesen Bezeichnungen konnte er in etwa die Festigkeit beurteilen, die dominierenden Verfestigungsmethoden, die Schweißbarkeit und das Verhalten der Legierung unter verschiedenen Umgebungsbedingungen.

^{*)} heute die bevorzugte Bezeichnung

| Numerische Bezeichnung | Chemische Bezeichnung | | | |
|---------------------------|--------------------------|--------|---------|----------------------|
| EN AW- | EN AW- | Bleche | Profile | Schmiede- stücke. |
| 3004 | AlMn1Mg1 | X | | |
| 3005 | AlMn1Mg0,5 | X | | |
| 3103 | AlMn1 | X | | |
| 5005/5005A | AlMg1(B)/(C) | X | | |
| 5049 | AlMg2Mn0,8 | X | | |
| 5052 | AlMg2,5 | X | | |
| 5083 | AlMg4,5Mn0,7 | X | X | X |
| 5454 | AlMg3Mn | X | X | |
| 5754 | AlMg3 | X | X | X |
| 6060 | AlMgSi | | X | |
| 6061 | AlMg1SiCu | X | X | |
| 6063 | AlMg0,7Si | | X | |
| 6005A | AlSiMg(A) | | X | |
| 6082 | AlSi1MgMn | X | X | X |
| 6106 | AlMgSiMn | | X | |
| 7020 | AlZn4,5Mg1 | X | X | |
| 8011A | AlFeSi | X | | |

Tabelle 3a: In EN 1999-1-1 aufgeführte Knetlegierungen und Formen genormter Halbzeuge (Tabellen 3.2a-c)

| EN AW- | EN AW_ |
|--------|--------------|
| 3003 | AlMn1Cu |
| 3004 * | AlMn1Mg1 |
| 3005 * | AlMn1Mg0,5 |
| 3103 * | AlMn1 |
| 3105 | AlMn0,5Mg0,5 |
| 5005 * | AlMg1(B) |
| 5052 * | AlMg2,5 |
| 5251 | AlMg2Mn0,3 |

Tabelle 3b: In EN 1999-1-4 (Tab. 3.1) aufgeführte Knetlegierungen
(* : Leg. auch in EN 1999-1-1 aufgeführt)

| EN AC- | EN AC- |
|--------|-------------|
| 42100 | AlSi7Mg0,3 |
| 42200 | AlSi7Mg0,6 |
| 43000 | AlSi10Mg(a) |
| 43300 | AlSi9Mg |
| 44200 | AlSi12(a) |
| 51300 | AlMg5 |

Tabelle 3c: In EN 1999-1-1 aufgeführte Gusslegierungen (Tab. 3.3)

Dies ist der Grund, weshalb die Europäischen Aluminium-Normen immer noch zwei unterschiedliche Bezeichnungssysteme pflegen: numerische und chemische Bezeichnungen.

Tabelle 3a führt die Legierungen auf die nach EN 1999-1-1 für konstruktive Anwendungen vorgesehen sind, **Tabelle 3b** jene für kaltgeformte Profiltafeln in EN 1999-1-4 und **Tabelle 3c** die für tragende Gussteile geeigneten Legierungen.

Die Zahlen bei den chemischen Bezeichnungen stellen den typischen Anteil des legierenden Elements in Prozent dar. Die korrekte Bezeichnung gemäß den europäischen Normen verlangt immer den Gebrauch des Präfixes "EN AW-". Zwar ist im täglichen Umgang dessen Nennung oft nicht gebräuchlich, im geschriebenen Text, z.B. in Bestellungen ist es wichtig um Verwechslungen mit anderen vierzifferigen Bezeichnungssystem zu vermeiden, die es immer noch gibt, insbesondere intern bei den Halbzeugwerken.

4. Zustände und Zustandsbezeichnungen

4.1 Allgemeines

Typisch für Aluminium und eine neue Erfahrung für den nur mit Stahl vertrauten Ingenieur ist die Tatsache, dass die einzelnen Legierungen mit verschiedenen mechanischen Eigenschaften auf dem Markt sind, d.h. in verschiedenen Zuständen. Dabei erweist sich in der Praxis nicht immer die höchste Festigkeitsstufe als die beste für eine bestimmte Anwendung. Wird Material benötigt, das gebogen oder abgekantet werden soll, oder das stoßartiger Beanspruchung unterliegt, ist eine niedrigere Festigkeit wegen der damit verbundenen höheren Dehnung oft von Vorteil.

Die Zustandsbezeichnungen für Gussstücke sind grundsätzlich die gleichen wie für Halbzeuge. Da aber an Gussstücken keine Verformungen zur Kaltverfestigung vorgenommen werden, entfallen in der Praxis die H- und O-Zustandsbezeichnungen.

Der sogenannte Zustand F stellt jedoch eine Besonderheit dar. Die Halbzeugnorm EN 515 definiert ihn als "*Herstellungszustand (keine Grenzwerte für mechanische Eigenschaften festgelegt)*" und insofern ist dies eine Zustandsbezeichnung vorzugsweise für Material, das weiterverarbeitet und nicht direkt für Konstruktionen verwendet wird. Bei Strangpressprodukten ist dies der Werkstoffzustand direkt nach dem Verpressen und dieses Halbzeug könnte u.U. in diesem Zustand auch Verwendung finden. Bei nichtaushärtbaren Werkstoffen ist dies sogar wirtschaftliche Notwendigkeit. Diese Werkstoffe können ohnehin nicht ausgehärtet werden und liegen nach dem Verpressen praktisch im Zustand O vor. Solches Material kann daher ohne weiteres konstruktiv verwendet werden, selbst wenn die Norm die damit verbundenen Festigkeitswerte nur als Information kennzeichnet. Bei Blechen ist diese Folgerung nicht erlaubt, weil es sich hier beim Zustand F auch um sehr hartes Material handeln kann, was nicht generell einsetzbar wäre.

Bei Gussteilen ist die Situation etwas anders. Der Zustand F ist definiert als "Gusszustand", d.h. ein Zustand ohne weitere thermische Nachbehandlung, also wie bei Halbzeug. Im Gegensatz zu Halbzeugnormen, definiert jedoch EN 1706 für solches Material (aushärtbar oder nichtaushärtbar) bindende technologische Werte.

4.2 Zustände bei nichtaushärtbaren Legierungen

Viele Jahrzehnte lang und in vielen Ländern, benutzte man zur Charakterisierung des Lieferzustandes bei nichtaushärtbaren/naturharten Legierungen Begriffe wie: "weich", "viertelhart", "halbhart", etc.. Diese Bezeichnungen waren leicht zu verstehen und zu behalten. Dieses "System" wurde aber verlassen. Mit Hilfe von **Bild 2** soll das aktuelle System erläutert werden. Mit steigendem Umformgrad steigen Festigkeit und damit auch die Streckgrenze. Der normalerweise als härteste Umformstufe produzierte Zustand erhält nun die Bezeichnung H18 und der früher als ½-hart bezeichnete die Bezeichnung H14. Die Zustände H16 und H12 liegen entsprechend dazwischen. Wie zuvor schon angedeutet, können auch naturharte Legierungen wärmebehandelt werden, wenn auch nur im Sinne des Rückglühens (Weichglühens). Das ist in Walzwerken auch tägliche Praxis. Daher sind bei Material, das nicht im völlig harten Zustand ist (also H19 =extrahart), jeweils zwei Zustandsvarianten auf dem Markt, bezeichnet mit H1x bzw. H2x, z.B. also H14 und H24. Materialien in diesen beiden Zuständen haben jeweils die gleiche Festigkeit, jedoch hat H2x-Material eine etwas geringere Streckgrenze, jedoch höhere Dehnungswerte. Ähnlich sind die Verhältnisse bei den H3x-Zuständen. Diesen Zuständen ist eigen, dass nach dem Walzen auf die gewünschte Festigkeit (H1x) eine Stabilisierungsglühung erfolgt. Innere Spannungen sind daher kleiner als bei H1x-Zuständen. Die H4x-Zustände wurden für kaltverfestigtes

Material eingeführt, das eine gewisse Entfestigung durch eine nachfolgende Einbrennlackierung erleidet. Die technologischen Werte für die H4x-Zustände müssen mit denen der H2x/H3x-Zustände nicht übereinstimmen. Legierungsabhängig kann es geringfügige Unterschiede geben.

Mit zusätzlichen Zahlen (dritte und weitere) werden Materialeigenschaften charakterisiert, die für den konstruktiven Ingenieur von untergeordneter Bedeutung sind. **Tabelle 4** enthält beispielhaft Zustandsdefinitionen für nichtaushärtbare Werkstoffe.

| Zustands- bezeichnung | Bedeutung |
|--------------------------|--|
| O | Weichgeglüht |
| H 111 | Geglüht und durch anschließende Arbeitsgänge, z.B. Recken oder Richten, geringfügig kaltverfestigt |
| H12 | Kaltverfestigt - 1/4 hart |
| H22 | Kaltverfestigt und rückgeglüht - 1/4 hart |
| H32 | Kaltverfestigt und stabilisiert, 1/4 hart |
| H42 | Kaltverfestigt und einbrennlackiert - 1/4 hart |
| H14 | Kaltverfestigt - 1/2 hart |
| H18 | Kaltverfestigt - 4/4 hart (voll durchgehärtet) |

Table 4: Gebräuchliche Zustände bei der konstruktiven Anwendung nichtaushärtbarer Knetlegierungen (Halbzeuge) (typische Beispiele zur Erläuterung des Systems)

4.3 Zustände bei aushärtbaren Legierungen

Die vollständige Wärmebehandlung besteht aus einem Lösungsglühen, dem Abschrecken und dem nachfolgenden Aushärten (Auslagern). Hier muss noch erwähnt werden, dass Aluminium nicht wie Stahl durch Abschrecken hart wird.

Um die höchstmögliche Festigkeit bei einer Legierung zu erzielen, ist es wichtig das Material ausreichend lange auf optimaler Lösungsglühtemperatur zu halten und danach korrekt, d.h. legierungsabhängig, innerhalb vorgeschriebener Zeit abzuschrecken. Je nach Werkstoff kann/muss das mit Hilfe von Wasser oder Luft bewerkstelligt werden ¹⁾. Abschrecken mit Wasser führt zu Verzug und inneren Spannungen. Legierungen, die mit Luft abgeschreckt werden dürfen, haben technische und wirtschaftliche Vorteile. Die meisten höherfesten Legierungen müssen indes wasserabgeschreckt werden. Werden Lösungsglühen und Abschrecken nicht optimal durchgeführt, hat dies negative Auswirkungen auf Festigkeit und Dehnverhalten.

Halbzeuge aus aushärtbaren Legierungen werden in einer Vielzahl von Zuständen hergestellt. Für den konstruktiven Ingenieurbau ist jedoch nur eine begrenzte Anzahl wichtig, siehe **Tabelle 5**. Der Ausdruck "lösungsgelüht" in der rechten Spalte schließt hier grundsätzlich das Abschrecken mit ein. Der Aushärteprozess selber ist in Verbindung mit **Bild 3** leicht zu erklären, wobei dort der Zustand T5 allerdings nicht eingetragen ist. T5 ist ein spezieller Zustand, der jedoch nicht zwischen T4 und T6 liegt, wie man meinen möchte. Er ist da-

¹⁾ z.B. darf EN AW-7020 nur mit Luft abgeschreckt werden, außer bei sehr großen Wanddicken

durch charakterisiert, dass das Material möglicherweise nicht optimal lösungsgeglüht (z.B. zu niedrige Temperatur), möglicherweise aber auch nicht optimal abgeschreckt wurde¹⁾. Als Ergebnis weist solches Material geringere Festigkeiten und geringere Dehnungswerte (verringerte Umformbarkeit!). Mit T6 bezeichnet man den Zustand mit maximal möglicher Festigkeit. Zum Zustand T66 wird auf die Ausführungen in Abschnitt A.1.3 verwiesen.

| Zustandsbezeichnung | Bedeutung |
|----------------------------|--|
| T4 | Lösungsgeglüht und kaltausgelagert |
| T5 | Abgeschreckt aus Warmumformungstemperatur und warmausgelagert |
| T6 | Lösungsgeglüht und warmausgelagert |
| T61 T64 | Lösungsgeglüht und zur Verbesserung der Formbarkeit nicht vollständig warmausgelagert (T64 liegt zwischen T61 und T6) |
| T66 | Lösungsgeglüht und warmausgelagert – bessere mechanische Eigenschaften als T6 durch spezielle Kontrolle des Verfahrens (Legierungen der 6xxx-Reihe) |
| T7 | Lösungsgeglüht und überhärtet (warmausgelagert) |
| Tx51 Tx510 Tx511 | Lösungsgeglüht, durch kontrolliertes Recken entspannt und warmausgelagert. (Mit diesen nachgestellten Ziffern ("51") wird kontrolliertes Recken zum Abbau produktionsbedingter innerer Spannungen charakterisiert. Mit der weiteren Ziffer werden Varianten unterschieden: nicht nachgerichtet bzw. nachgerichtet-ohne nennenswerten Einfluss auf Festigkeitseigenschaften.) |

Table 5: Wichtigste Zustände bei der konstruktiven Anwendung aushärtbarer Knetlegierungen (Halbzeuge) (T7 lediglich zur Erklärung des Systems aufgeführt)

5. Im EC 9 aufgeführte Legierungen und Zustände

5.1 Allgemeines

Mit den Halbzeugnormen EN 755-2 (Strangpressprofile) und EN 485-2 (Bleche) sowie in den Normen EN 586-2 (Schmiedestücke) und EN 1706 (Gussstücke) ist eine große Anzahl von Werkstoffen in ihren technologischen Eigenschaften genormt worden. Viele davon werden nur für ganz spezielle Zwecke benötigt. Ein Grund für diese große Anzahl an Legierungen ist sicher der für Aluminium typische Umstand, dass das "Schaffen" einer neuen Aluminiumlegierung nicht sonderlich schwierig ist und oft nur in der genaueren Definition von Begleitelementen, bei an sich kaum geänderter Legierungszusammensetzung, besteht. Die Vorteile, die man dabei gewinnt, liegen in der Regel in der optimalen Anpassung von Legierungseigenschaften an eine spezielle Anwendung, z.B. Festigkeit, Verfestigungsverhalten, Verformbarkeit, Oberfläche. Da zudem die wirtschaftlich erforderlichen Mengen für das gegossene Vormaterial (Walzbarren, Pressbolzen) nicht besonders groß sind, ist es kein Wunder, dass so viele Legierungen auch tatsächlich in Gebrauch sind. So sind in EN 755-2 (Ausgabe

¹⁾ Man beachte den Unterschied zwischen "lösungsgeglüht" und "abgeschreckt aus Warmumformtemperatur"

2008) 57 Legierungen aufgeführt, in EN 485-2 (Ausgabe 2007) 47, in EN 586-2 (Ausgabe 1987) 6 und in EN 1706 (Ausgabe 1998) 37 Legierungen aufgeführt.

Neben normalen Strangpressprodukten sind in Tabelle 3.2b von EN 1999-1-1 noch gezogene Rohre aufgeführt, für die z.T. andere technologische Eigenschaften gelten und die in einer eigenen Normenreihe genormt sind, nämlich in EN 754 (Gezogene Stangen und Rohre). Die Zahl der dort aufgeführten Legierungen ist mit 32 deutlich kleiner als die in EN 755, produktionstechnisch bedingt müssen aber alle diese Legierungen auch in EN 755 aufgeführt sein.

Es hat wenig Sinn, konstruktiven Anwendungen derartig viele Möglichkeiten zu eröffnen. Der entwerfende Ingenieur ist i.d.R. auch gar nicht in der Lage, sich die technisch beste Legierung herauszusuchen. Eine zweite wichtige Frage wäre dann für ihn ebenso schwer zu beantworten, nämlich die nach der Beschaffbarkeit von Legierung bzw. Halbzeug im Markt. Es gibt aber noch eine Reihe technischer Aspekte, wo sich Fragen oder Probleme auftun könnten, z.B. in Bezug Schweißbarkeit, in Bezug auf die für die Bemessung anzunehmenden Festigkeitswerte der WEZ oder in Bezug auf die Korrosionsbeständigkeit in der Praxis. Daher war es klar, dass nur eine begrenzte Anzahl von Legierungen und Zustände im EC 9 aufgeführt werden sollten und konnten. Ebenso klar war aber die Tatsache, dass deren Zahl größer sein würde als die, welche in den einzelnen Ländern bisher bestand, da in den einzelnen Ländern – historisch begründet – durchaus unterschiedliche Legierungen im allgemeinen Gebrauch sind. Gar nicht so wenige Legierungen kamen aber auch in vielen Ländern in gleichem Maße zur Anwendung. Das hat natürlich die Aufgabe der Auswahl in Bezug auf Aufnahme in den Eurocode 9 erleichtert. Grundsätzlich wurden aber Legierungen mit ungünstigem Korrosionsverhalten, z.B. solche mit hohem Kupfergehalt, für das Bauwesen und ähnliche Anwendungen als nicht geeignet angesehen.

Die Situation bei Gusslegierungen war einfacher, weil bislang die meisten nationalen europäischen Bemessungsnormen keine Regelungen für Gussteile enthielten.

Um im Einzelnen die Eigenschaften der aufgeführten Werkstoffe und damit verbundene Regelungen mit Hintergrundinformationen zu erläutern, erschien es vernünftiger, dies in einem Anhang konzentriert zu tun. Daher befasst sich der Hauptteil dieser Ausarbeitung mehr mit den allgemein interessierenden Fragen für die Werkstoffwahl.

5.2 Knetlegierungen

In der ENV¹⁾ 1999-1-1, Ausgabe 1998 waren 11 Legierungen aufgeführt und offensichtlich war dies auch eine gute Auswahl. Es gab nämlich nur wenige Einsprüche zu diesem Thema und nur drei "konstruktive" Legierungen wurden nachträglich hinzugefügt: EN AW-5049 (AlMg2Mn0,8), EN AW-6106 (AlMgSiMn) and EN AW-8011A (AlFeSi(A)). Wenn die Gesamtzahl trotzdem auf insgesamt 17 Legierungen gestiegen ist, dann war die Ursache der neue Teil des Eurocode 9, die EN 1999-1-4, die sich mit kaltgeformten Profiltafeln befasst und die für diese spezielle Anwendung eine Reihe geeigneter Legierungen aufführt. Drei dieser Legierungen wurden dann auch in die EN 1999-1-1 übernommen, weil sie sich auch für allgemeine Anwendungen eignen. Drei weitere blieben aber auf Anwendungen des EN 1999-1-4 beschränkt: EN AW-3003 (AlMn1Cu), -3105 (AlMn0,5Mg0,5), -5251 (AlMg2). Es mag vom technischen Standpunkt aus gesehen berechnete Zweifel daran geben, ob so viele Legierungen überhaupt notwendig sind. Die Erklärung dafür ist, dass sich auf dem Markt eine Reihe seit langem eingeführter Produkte mit amtlichen Zulassungen befindet. Hier Werkstoffwechsel herbeizuführen hätte si-

¹⁾ ENV = Europäische Vornorm

cher nicht nur Aufwand bedeutet, sondern auch Probleme mit sich gebracht.

Eine ähnliche Situation wie im vorigen Abschnitt schon behandelt, besteht in Bezug auf die aufzunehmenden Zustände von Legierungen. Alle möglichen Zustände aufzunehmen würde den entwerfenden Ingenieur in die gleiche Situation bringen, als würde man zu viele Legierungen erlauben. Daher wurden nur solche Zustände aufgenommen, die in der Vergangenheit regelmäßig zur Anwendung kamen. Dies sind neben den Zuständen O/H111, die Zustände H12 und H14, sowie die entsprechenden rückgeglühten Zustände bei den nichtaushärtbaren Werkstoffen. Zustände höherer Festigkeitsstufen wie H16 und H18 wurden vermieden, weil in der Regel auch ein noch gutes Umformverhalten erwünscht ist. Die Zustände H16/H26/H36 finden sich daher nur bei den Legierungen, die in erster Linie für kaltgeformte Profiltafeln verwendet werden.

Die Bemessungsregeln für kaltgeformte Profiltafeln basieren auf Blechmaterial, das eine Mindeststreckgrenze von 165 N/mm² aufweist. Dies bedeutet für einige der in EN 1999-1-4 aufgeführten Legierungen, dass sie hier nur im Zustand H18 oder den Zuständen H28/H38/H48 zum Einsatz kommen dürfen. Da die Verwendung derartig harten Materials nicht allgemein empfohlen werden kann, finden sich diese Zustände im Hauptteil des Eurocode 9 nicht. Hingegen gibt es kein Problem bei der Verwendung für kaltgeformte Profiltafeln, weil die vorhandenen Maschinen solches Material verarbeiten können ohne es zu schädigen (z.B. Rollformen von Trapezblechen).

In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass es Legierungen gibt, bei denen verbindliche technologische Werte ausschließlich für Bleche und Platten bzw. Strangpressprodukte genormt worden sind. Es gibt daher im EC 9 nur eine begrenzte Anzahl von Legierungen, die sowohl als Walzhalbzeug als auch als Strangpresshalbzeug genormt sind und bei denen auch beide Halbzeugformen konstruktiv als sinnvoll anwendbar angesehen werden. Dies sind die Legierungen: EN AW-5454, EN AW-5754, EN AW-5083, EN AW-6061, EN AW-6082 und EN AW-7020 (also 6 von insgesamt 17 Legierungen). Da aber die Umformbarkeit zu Strangpressprofilen bei den Legierungen EN AW-5083, -5454 und -5754 sehr eingeschränkt ist und nur relativ dickwandige offene Profile und Rohre über "Dorn", auf keinen Fall aber Mehrkammerprofile möglich sind, geht die Anzahl der "Universal"-Legierungen auf drei zurück. In den meisten Fällen ist es aber auch nicht nötig, sich bei einer Konstruktion auf eine einzige Legierung zu beschränken. "Misch"-Konstruktionen finden sich daher beim Aluminium sehr häufig.

Nach allem bietet nun die EN 1999-1-1 eine breite Palette an Legierungen und Zuständen, die für die konstruktive Anwendung in Frage kommen. Bei den Festigkeiten i.S. von Streckgrenze reicht sie von EN AW-5005 mit 35 N/mm² hinauf bis zu EN AW-7020 mit 290 N/mm². Die Qualitäten mit so niedrigen Festigkeiten spielen zwar im Normalfall beim konstruktiven Einsatz keine große Rolle, können aber interessant werden, wenn speziell umgeformte Teile als tragende Elemente benötigt werden. Mit Werten von 290 N/mm² bei EN AW-7020, 260 N/mm² bei EN AW-6082 und 280 N/mm² bei EN AW-5083 liegen einige Aluminium-Konstruktionslegierungen mit ihrer Streckgrenze über der des Baustahls S235. Wichtig für den entwerfenden Ingenieur sind noch die Werte von EN AW-6060 und -6063. Es sind dies die gängigsten Strangpresslegierungen, da sie ausgesprochen kosteneffizient sind. Die für diese Legierungen typischen Streckgrenzenwerte von 140-160 N/mm² scheinen zwar auf den ersten Blick gering zu sein, reichen aber bei den meisten Konstruktionen völlig aus.

Die Frage warum die EN 1999-1-1 nicht so bekannte hochfeste Legierungen wie EN AW-7075 (AlZn5,5MgCu) oder EN AW-2024 (AlCu4Mg1) mit $R_{p0,2} = 560 \text{ N/mm}^2$ bzw. 450 N/mm^2 aufgenommen hat, wie sie im Flugzeugbau verwendet werden, kann einfach beantwortet werden. Die EN 1999-1-1 ist in erster Linie eine Norm zur

Bemessung und Erstellung von Baukonstruktionen, wenn sie auch auf vielen anderen Gebieten angewendet werden kann. In vielen Ländern wird sie aber Teil gesetzlicher Regelungen sein und daher müssen mit ihr auch noch andere Aspekte berücksichtigt werden, z.B. die Dauerhaftigkeit oder die Tatsache, dass die wenigsten Gebäude und Tragwerke regelmäßig inspiziert und entsprechend unterhalten werden. Die Korrosionsempfindlichkeit dieser hochfesten Legierungen, speziell wenn sie Kupfer als Legierungselement enthalten, bedeutet eben, dass sie nicht für den allgemeinen Gebrauch erlaubt werden sollten.

Ein Blick in Tabelle 3.1a von EN 1999-1-1 zeigt, dass mit einer Ausnahme bezüglich der Dauerhaftigkeit alle Legierungen zu den Klassen A und B gehören. EN AW-7020 stellt die Ausnahme dar und daher soll hier etwas über deren Korrosionsbeständigkeit gesagt werden. Langzeitkorrosionsversuche (Helgoland) aber auch die Erfahrung zeigen, dass EN AW-7020 und Legierungen mit ähnlicher Zusammensetzung hinsichtlich Oberflächenkorrosion sich mindestens so gut verhalten wie die AlMgSi-Legierungen. Wenn in dieser Tabelle EN AW-7020 mit Klasse C niedriger eingestuft wird, dann deshalb, weil sich infolge Schweißwärme Schichtkorrosion ausbilden kann - abhängig von Umgebungsbedingungen und konstruktiver Gestaltung (Wassersäcke etc.). Dieses gute Oberflächenverhalten zeigen indes andere 7xxx-er Legierungen nicht und auch nicht die 2xxx-Legierungen, was auf deren hohe Kupfergehalte zurückzuführen ist.

Eine ähnliche Situation wie bei EN AW-7020 liegt in der Praxis auch für EN AW-5083 vor, da diese Legierung in manchen Zuständen oder infolge ungünstiger thermischer Einflüsse eine gewisse Empfindlichkeit im Hinblick auf interkristalline Korrosion zeigen kann. Wir finden deshalb in Tabelle 3.1a von EN 1999-1-1 auch eine auf den Abschnitt C.2.2.2(2) verweisende Fußnote, wo nähere Informationen über dieses Phänomen zu finden sind. Jedoch wurde EN AW-5083 nicht wie EN AW-7020 bezüglich der Dauerhaftigkeit auf die Klasse B oder gar C zurückgestuft.

Die im konstruktiven Ingenieurbau meistverwendeten Legierungen sind nun:

EN AW-6082, EN AW-6061 und EN AW-7020 (weniger häufig)
für aus einheitlichem Material aus Blechen und Profilen gefertigte Tragwerke und Bauteile

EN AW-5083 und EN AW-5754
für i.w. aus Blechen gefertigte Tragwerke und Bauteile
(auch in Mischbauweise mit Profilen aus anderen Werkstoffen)

EN AW-6060 and EN AW-6063
für i.w. aus Profilen gefertigte Tragwerke und Bauteile
(auch in Mischbauweise mit Blechen aus anderen Werkstoffen)

Dazu im Einzelnen:

EN AW-6082 und EN AW-6061 sind die klassischen Legierungen, die mit ihrer Streckgrenze mit normalem Baustahl vergleichbar sind und daher von den Ingenieuren für konventionelle stahlbauähnliche Tragwerke bevorzugt werden. Halbzeuge daraus sind sowohl für Walzprodukte als auch für Strangressprodukte genormt. EN AW-6082 ist eine europäische Legierung, während EN AW-6061 vorzugsweise in den Vereinigten Staaten und deren Einflussbereich verwendet wird. EN AW-6061 enthält mehr Kupfer, das kann -abhängig vom tatsächlich vorhandenen Kupfergehalt - das Erscheinungsbild von Oberflächen und die Schweißbarkeit beeinflussen.

Bei EN AW-7020 sind ebenfalls Walzhalbzeug und Strangpresshalbzeug genormt. Von den in EN 1999-1-1 aufgeführten Legierungen weist sie die höchsten Festigkeiten auf. Da diese Legierung eine geringe Abschreckempfindlichkeit aufweist (d.h. niedrige Abschreckgeschwindigkeit), zeigt diese Legierung nach dem Schweißen infolge Kaltaushärtung bessere Festigkeitswerte als andere Legierungen. Halbzeuge aus dieser Legierung sind in Relation allerdings teurer. Sie wird vorzugsweise für militärische Brücken eingesetzt, aber auch für Krane und bei Teleskop-Arbeitsbühnen. Abhängig vom Einsatz der Konstruktionen wird nach dem Schweißen eine nachgängige Wärmebehandlung empfohlen.

EN AW-6060 und die sehr verwandte EN AW-6063 sind die typischen Strangpresslegierungen. Bleche sind in dieser Legierung nicht genormt und werden auch nicht produziert. Die beiden Legierungen haben mittlere Festigkeiten und sind dekorativ anodisierbar. Sie erlauben filigrane und komplexe Querschnitte zu mäßigen Kosten, da hohe Pressgeschwindigkeiten und Luftabschrecken typisch für die Fertigung sind. In den Vereinigten Staaten und deren Einflussgebiet ist EN AW-6060 praktisch unbekannt. In Europa sind beide Legierungen gängig. Die Legierung EN AW-6106 gehört ebenfalls zu dieser Unterfamilie. Sie hat vergleichsweise eine höhere Schweißnahtfestigkeit, eine dekorative Anodisierbarkeit kann indes nicht gewährleistet werden.

EN AW-5083 und EN AW-5754 sind die üblichen Legierungen für konventionelle, aus Blechen gefertigte Tragwerke. Strangpressprodukte aus diesen Legierungen sind zwar genormt, finden sich aber auf kaum auf dem Markt. Der hohe Umformwiderstand, der auch bei höheren Temperaturen noch vorhanden ist, erlaubt nur einfache Querschnitte mit relativ großen Wanddicken und keine Hohlprofile über Kammermatrizen. Nahtlose Rohre sind indes möglich und sind auch auf dem Markt erhältlich.

EN AW-5049, -5052, -5454 und EN AW-6005A werden konstruktiv viel weniger häufig eingesetzt. Ihr Einsatz beschränkt sich auf bestimmte Anwendungen und Verarbeiter/Branchen. Die erstgenannten drei Legierungen sind eine gute Kombination zwischen Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit. EN AW-6005A verbindet gute Festigkeit mit guter Strangpressbarkeit. Das ist der Grund, weshalb sie beim Bau von Eisenbahnwagen häufig zur Anwendung kommt.

Die Legierungen EN AW-3004, -3005, -3103, -5005 und -8011 sind die typischen Legierungen für die Herstellung kaltgewalzter Profiltafeln. Sehr dünnwandig werden sie als rollgeformte Profiltafeln für Dach und Wand verwendet. Etwas dickwandiger kommen Legierungen dieser Gruppe auch für spezielle Fassaden zum Einsatz (anodisiert oder mit organischer Beschichtung). Werden für die angeführten Zwecke größere Mengen benötigt empfiehlt sich frühzeitige Kontaktaufnahme mit dem Halbzeugwerk um die wirtschaftlich günstigste Lösung, d.h. die optimale Legierung zu finden.

5.3 Gusslegierungen

In der 1998 erschienenen Vornorm des Eurocode waren lediglich 5 Legierungen aufgeführt und auch dies war wohl eine gute Auswahl. Es gab Einsprüche gegen die Legierung EN AC-43200 wegen des mit 0,65 % relativ hohen erlaubten Gehalts an Eisen und den von Kupfer mit 0,35 %. Sie wurde in der EN-Version durch EN AC-43300 ersetzt, eine Legierung mit praktisch gleichen Legierungsgehalten aber mit geringeren erlaubten Beimengungen an Eisen und Kupfer (bei höherer Festigkeit und besseren Dehnungswerten). Aus dem gleichen Grund wurde EN AC-44100 durch EN AC-44200 ersetzt, bei welcher der Eisen- insbesondere aber der Kupfergehalt niedriger sind. Neu aufgenommen wurde EN AC-43000 im Zustand F, eine sehr kostengünstige und daher sehr häufig gebrauchte Legierung.

In Verbindung mit dem Gießverfahren (Kokillen- oder Sandguß) wurden nur Zustände aufgenommen, bei denen die Gießereien die besondere Forderung nach 2% Dehnung (A_5 , gemessen am Proportionalstab) ohne Probleme sollten einhalten können.

In Bezug auf die Anwendung von Gusstücken als tragende Teile hatte die Vornorm ENV 1999-1-1 Festlegungen getroffen, die sich deutlich von denen der überarbeiteten und nun gültigen Norm EN 1999-1-1 unterscheiden. Hierzu ist Näheres im Anhang A.2.1 zu finden.

6. Praktische Gesichtspunkte zur Materialwahl

6.1 Bleche, Platten und Strangpressprofile

Wer eine Stahlkonstruktion entwirft muss sich im Allgemeinen keine Gedanken über die Verfügbarkeit der Stahlhalbzeuge machen, die er verwenden möchte. Er kann ziemlich sicher sein, dass er - solange er normale Baustähle wie S235 oder S355 verwenden will - keine Probleme bei der Beschaffung haben wird, weil die meisten Händler eine breite Palette an Blechen und Standardprofilen auf Lager haben.

Das ist beim Aluminium anders. Bleche im Klein- und Mittelformat bis 1500x3000 mm sind noch leicht zu erhalten. Bei komplexeren Legierungen und Zuständen gibt es sehr bald Grenzen. Üblicherweise sind EN AW-5083, -5754 und -6082 auf Lager. Einige Händler, die sich z.B. als Lieferanten für Werften spezialisiert haben, verfügen auch über größere Abmessungen. Die meisten anderen Legierungen oder spezielle Blechformate müssen eigens bestellt werden und haben dann entsprechende Lieferzeiten. Bei den zuvor erwähnten üblichen Werkstoffen liegen die Mindestabnahmemengen bei 10 t. Bleche aus unüblicheren Legierungen werden bei Abnahmemengen zwischen 30 und 50 t gefertigt (Größe von Gießlosen).

Die Situation bei Profilen ist anders. Der Grund hierfür liegt darin, dass Aluminiumprofile stranggepresst und Stahlprofile (meistens) warmgewalzt werden. Der Werkzeugwechsel geht rasch vor sich und daher können die Mindestbestellmengen auch klein sein und liegen daher, je nach Querschnittsgröße, zwischen 200 und 3000 kg. Das führt dazu, dass die meisten Ingenieure ihre eigenen Profile entwerfen, die dann optimal an die speziellen Anforderungen der Anwendung angepasst sind. Das bringt große Vorteile: die Kosten, d.h. das Gewicht, sind reduziert, der Querschnitt kann so eine hohe Funktionalität aufweisen und oft können auch Bearbeitungskosten eingespart werden.

Dieser durch das Strangpressen ermöglichte Individualismus hat dem Aluminium enorme Vorteile verschafft – allerdings auch gewisse Nachteile. Die Palette an gelagerten Profilen bei den Händlern ist sehr begrenzt und erstreckt sich auf einfache und meist kleine Querschnitte. An Legierungen werden üblicherweise EN AW-6060 und EN AW-6082 angeboten. Einige Händler führen allerdings auch größere Profile. Bei Rohren sieht es jedoch deutlich besser aus. Jeder Ingenieur, der sich zum ersten Mal mit einer Aluminiumkonstruktion befasst, ist gut beraten zu untersuchen welche Halbzeuge er ab Lager erhalten kann. Er sollte aber auch die Möglichkeiten und Grenzen studieren, die sich im Zusammenhang mit für eigene Zwecke entworfenen Querschnitten ergeben.

Im konstruktiven Ingenieurbau ist es oft wichtig zu wissen, wo die geometrischen Grenzen der Halbzeugfertigung liegen.

Bleche und Platten können bis zu Breiten von mehr als 3 m und in Längen bis zu 22 m hergestellt werden. Die genauen Grenzen hängen aber von der Blechdicke und von der Legierung ab. Bei Längen bis 10 m und bei

Breiten bis etwa 2 m gibt es eine größere Anzahl von Herstellern. Für das Konstruieren mit Blechen sind oft auch die Grenzen beim Abkanten wichtig. Abkantpressen bis 16 m Länge finden sich nicht sehr häufig, es gibt aber auch Einrichtungen mit mehr als 20 m Länge.

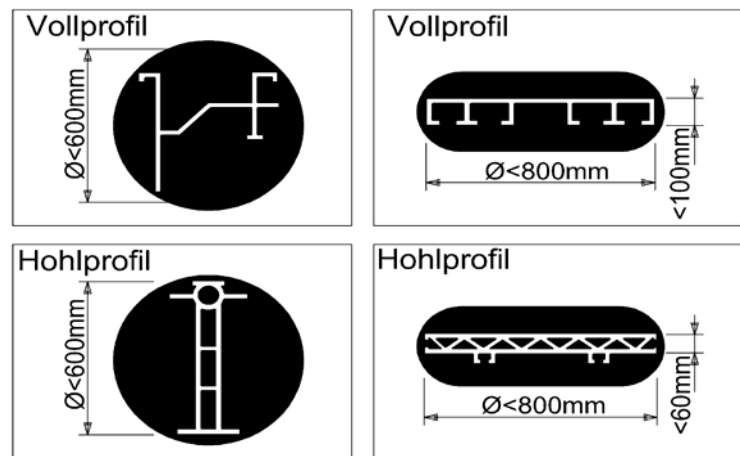


Bild 4: Grenzen in der Herstellung von Großprofilen (Europa)

Strangpressprofile können bis 30 m Länge geliefert werden, vorausgesetzt sie haben die notwendige Steifigkeit um sie auch transportieren zu können. Die üblichen Lieferlängen liegen zwischen 6 und 10 m, bei Lagerprofilen sind es 6 m. **Bild 4** zeigt die geometrischen Grenzen der Querschnittsabmessungen (größte Presse in Europa).

Wie bereits erwähnt, ist es weit verbreitet, dass die Ingenieure individuell gestaltete, ihnen gehörende Profile selbst entwerfen. Hier ist es dann wichtig die wesentlichen Regeln für die Gestaltung zu kennen, aber auch welche Legierungen sich in Bezug auf Machbarkeit und Kosten empfehlen. Da der Hauptteil dieser Ausarbeitung sich auf allgemein interessierende Fragen beschränkt, wird das hier angesprochene spezielle, aber durchaus wichtige Thema detailliert in einem Anhang (Anhang B) behandelt.

Bei der Gestaltung eigener Profile spielen die Querschnittstoleranzen oft eine wichtige Rolle. Da sie deutlich kleiner sind als die warmgewalzter Profile, werden viele Querschnitte nicht nur mit Hinblick auf deren Tragfähigkeit entwickelt, sondern man überträgt ihnen auch funktionelle Aufgaben. Dann werden oft noch engere Toleranzen gewünscht und für diese Zwecke wurde auch eine Norm geschaffen: EN 12020, die reduzierte Toleranzen für Profile aus EN AW-6060 und -EN AW-6063 im Vergleich zur allgemeinen Toleranznorm EN 755-9 definiert, die für alle Legierungen gilt. Vielfach werden aber auch spezielle Toleranzen zwischen Planer und Halbzeugwerk direkt vereinbart.

6.2 Guss- und -Schmiedestücke¹⁾

Guss- und Gesenkschmiedestücke werden eigentlich fast immer individuell für einen bestimmten Zweck entworfen und direkt beim Hersteller bestellt (falls es sich nicht um Teile von Bausystemen handelt, die über den Handel vertrieben werden). Hat man in der Gestaltung solcher Teile wenig Erfahrung, sollte der entwerfende

¹⁾ gemeint sind hier Gesenkschmiedestücke

Ingenieur unbedingt mit einem leistungsfähigen Hersteller Kontakt aufnehmen um hinsichtlich Werkstoff und Form die optimale Lösung zu finden. Dabei sind die Konstruktionsregeln für Guss- und Schmiedestücke unterschiedlich.

Um einen Begriff über die Mengen zu geben, die nötig sind um eine rationelle Fertigung durchzuführen, soll für Schmiedestücke die Zahl 1000 als Mindestgröße für ein Produktionslos genannt werden. Werden die oft sehr hohen Werkzeugkosten pauschal und im Voraus übernommen, akzeptieren einzelne Hersteller auch geringere Losgrößen. Es mag für diese manchmal ein Problem sein das Vormaterial vom Halbzeuglieferanten in Bezug auf Menge und Qualität zu bekommen. Allerdings sind die in EN 1999-1-1 für Schmiedestücke aufgeführten Legierungen sehr gängige Legierungen.

Bei Gussstücken ist die Lage ähnlich. Abhängig von Legierung, Gießerei und Größe des Gussstücks werden Abnahmemengen zwischen 500 und 1000 Stück verlangt, in speziellen Fällen auch weniger. Bei Sandguss werden aber deutlich geringere Mengen akzeptiert, hier ebenfalls abhängig von Größe und Legierung. Produktionslose von 10 oder 50 Stück sind nicht unüblich. Die Beschaffung des Gießvormaterials für die im Eurocode aufgeführten Legierungen ist kein Problem, so dass von daher gesehen auch kleine Mengen geliefert werden können. Die am häufigsten vergossenen Legierungen sind EN AC-42100, -43000 und -44200. Von den Gießern wegen guter Gießbarkeit bevorzugte Legierungen sind EN AC-43000, -43300 und -44200. Die Legierung EN AC - 5100 ist schwierig zu vergießen und daher bei den Gießern nicht sehr beliebt. Dementsprechend wird sie seltener eingesetzt, obwohl Ingenieure sie an sich wegen der hellen Oberfläche und dekorativen Anodisierbarkeit bevorzugen (die anderen Legierungen erscheinen mehr oder weniger grau, insbesondere wenn die Teile anodisiert worden sind).

7. Entwurfsbeeinflussende physikalische Eigenheiten

7.1 Allgemein wichtige Eigenschaften

Die wichtigste Eigenschaft von Aluminium ist sein spezifisches Gewicht, das mit $2,7 \text{ g/cm}^3$ nur ein Drittel so groß ist, wie das von Stahl.

Die zweitwichtigste Eigenschaft ist dessen gute Korrosionsbeständigkeit, obwohl das Aluminium als solches kein sehr edles Metall ist. Das ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass Aluminium und seine Legierungen mit dem Sauerstoff und Wasserdampf der Luft reagieren und so ein dichter Film gebildet wird, der das darunterliegende Metall vor weiteren Angriffen schützt. Daher erweisen sich Aluminium und die meisten kupferfreien Legierungen als sehr beständig solange der pH-Wert eines die Oberfläche benetzenden oder bedeckenden Elektrolyten zwischen 5 und 8 liegt. Damit sind aber die meisten atmosphärischen oder auch sonstigen Umgebungsbedingungen abgedeckt.

Mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten $24 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ von dehnt sich Aluminium zweimal so stark aus wie Stahl. Das muss bei Konstruktionen berücksichtigt werden, bei denen die freie Ausdehnung nicht behindert werden darf oder kann. Ist die Ausdehnungsmöglichkeit völlig behindert, so sind die Spannungen wegen des kleineren Elastizitätsmoduls lediglich $2/3$ mal so groß wie in einer vergleichbaren Stahlkonstruktion.

Der E-Modul ist mit 70 000 N/mm² dreimal kleiner als der von Stahl. Das hat auf die Abmessungen des Entwurfs einen wesentlichen Einfluss, weil die Durchbiegung von Balken, die Tragfähigkeit von Stützen, d.h. Knicken und auch das Beulen direkt vom E-Modul abhängigen. Und in vielen Fällen ist die Steifigkeit eines Bauteils eine entscheidende Bemessungsgröße. Soll ein Querschnitt aus Stahl durch einen gleichwertigen Aluminiumquerschnitt ersetzt werden, ist ein Vergrößern aller Wanddicken um den Faktor 3 nicht gerade effizient, da die Verhältniszahlen beim spezifischen Gewicht ebenfalls bei 3 liegen. Gewicht einzusparen ist aber bei der Umstellung auf Aluminium das eigentliche Ziel, sei dies aus physikalischen oder auch aus ökonomischen Gründen. Es gibt dafür aber eine sehr praktische Regel: Vergrößert man alle Abmessungen eines Querschnitts, mit Ausnahme der Breite, um den Faktor 1,4, erhält man einen Querschnitt, dessen Trägheitsmoment drei mal so groß ist, d.h. einen Querschnitt mit der gleichen Steifigkeit (E-I), und spart etwa 50 % an Gewicht ein.

Bei Anwendung dieser Regel hat man allerdings etwas an Steifigkeit in Bezug auf das lokale Beulen verloren. Allerdings zeigt die Erfahrung, dass man so trotzdem sehr brauchbare Querschnitte erhält, weil die genormten Stahlquerschnitte oft nicht optimal ausgenutzt werden können. Dies wird mit **Bild 5** gezeigt. Hat man keine Begrenzungen bezüglich der Bauhöhe und ist Beulen kein Kriterium, so kann mit bis zu 60 % an Gewicht sparen. Ist auch die Steifigkeit keine Kriterium und die Stahlfestigkeit ist ähnlich wie beim Aluminium, dann lassen sich sogar 70 % an Gewicht einsparen. Letzteres ist allerdings selten der Fall und stellt die äußerste Grenze dar.

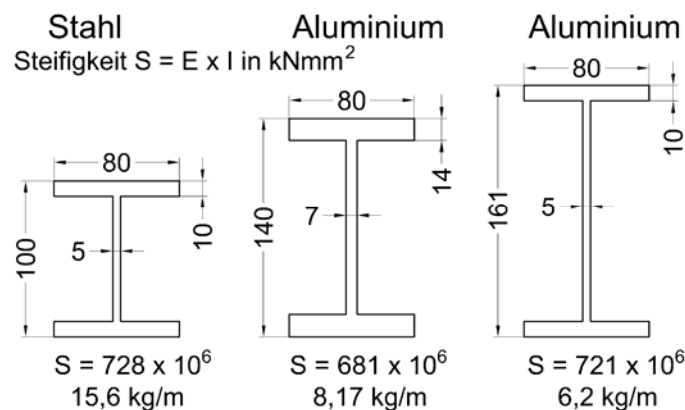


Bild 5: Vergleich von Steifigkeit und Metergewicht zwischen Stahl- und Aluminiumquerschnitten

Die vorstehenden Betrachtungen führen zu einer zweiten wichtigen Folgerung. Vergrößert man das Trägheitsmoment um den Faktor 3 und die Höhe nur um den Faktor 1,4, dann steigt das Widerstandsmoment auf das 2,14-fache, d.h. dass dann die Spannungen im Aluminium-Ersatzquerschnitt unter der halben Stahlspannung liegen. Nun versteht man, dass der entwerfende Ingenieur nicht zuerst nach Legierungen mit höchster Festigkeit suchen sollte und erklärt weiter, warum die AlMgSi-Legierungen EN AW-6060, -6063 so erfolgreich angewendet werden können.

7.2 Einfluss von Wärme

Wie bei anderen Materialien sinkt die Festigkeit von Aluminium mit steigender Temperatur. Bis zu gewissen Temperaturen ist diese Erscheinung reversibel, das heißt nach dem Abkühlen hat das Material wieder die gleiche Festigkeit wie zuvor. Bis zu etwa 80 °C ist der Abfall an Festigkeit bei allen Legierungen und Zuständen praktisch vernachlässigbar. Bei (Dauer-) Temperaturen über 80 °C muss je nach den Gegebenheiten ein Kriechen berücksichtigt werden. Aushärtbare Legierungen beginnen ab Temperaturen über 110 °C bleibend und abhängig von der Einwirkungszeit Festigkeit zu verlieren. Bei nichtaushärtbaren Legierungen beginnt dieser Prozess ab etwa 150 °C, wobei der Festigkeitsverlust ebenfalls von der Einwirkungsdauer abhängt. Im Zustand O erleiden die nichtaushärtbaren Legierungen keine bleibende Festigkeitseinbuße.

Kurzzeitige Erwärmungen wie z.B. beim Einbrennlackieren verändern die Festigkeitseigenschaften im Allgemeinen nicht nennenswert. Die erlaubten Prozessdaten sind jedoch mit dem Halbzeuglieferanten abzustimmen. Manche Legierungstypen reagieren nämlich etwas empfindlicher (z.B. EN AW-7020).

Gravierend ist jedoch der Verlust an Festigkeit durch Schweißwärme. Beim Schweißen sind die Temperaturen wegen des örtlichen, völligen Aufschmelzens so hoch, dass der Abfall der Festigkeit in der unmittelbaren Nähe berücksichtigt werden muss, was oft zu einem wichtigen Aspekt bei der Bemessung führt, s. Bild 6. Die nichtaushärtbaren Werkstoffe verlieren dabei ihre durch Kaltumformung gewonnene Festigkeit und kehren in den Zustand O zurück.

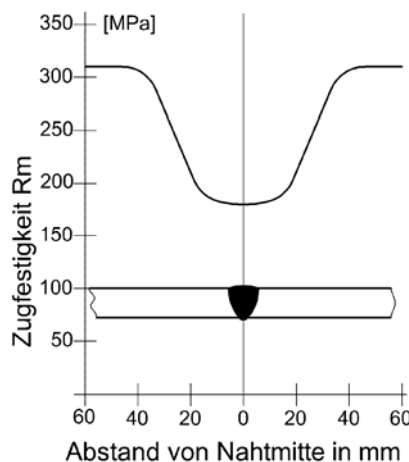


Bild 6: Festigkeitsabfall in der wärmebeeinflussten Zone (WEZ)
(hier typisch für EN AW-6082)

Die aushärtbaren Legierungen verlieren im Zustand T6 etwa 40 % ihrer Festigkeit mit Ausnahme von EN AW-7020, wo der Verlust nur ca. 20% beträgt. Alle diese Legierungen gehen nie auf den völlig weichen Zustand zurück, weil stets ein gewisser Abschreckeffekt vorhanden ist. Daher können bei diesen Legierungen die Festigkeitswerte für die wärmebeeinflussten Zonen nur über Versuche festgelegt werden.

8. Die Aluminiumverwendung in der Zukunft

Mit einem Anteil von 8% ist – nach Sauerstoff und Silizium – Aluminium das dritthäufigste Element in der Erdkruste. Heute wird Aluminium noch ausschließlich aus Bauxit gewonnen, es ist aber auch in vielen anderen Mineralien vorhanden. Jedoch reichen allein die bekannten Reserven an Bauxit noch für tausend Jahre – die jetzige Abbaurate vorausgesetzt. Aluminium ist aber auch ein Material mit ausgezeichneter Rezyklierbarkeit. So sind die Gewichtsverluste beim Umschmelzen, aber auch die Qualitätsverluste beim Rezyklieren sehr gering. Daher und auch wegen des relativ hohen Preises ist die Rezyklierrate sehr hoch. Das alles wird eines Tages dazu führen, dass die Abbaurate an Bauxit sinken wird, obwohl die Anwendungen von Aluminium steigen. Somit ist die Verfügbarkeit von Aluminium praktisch unbegrenzt.

Oft wird der hohe Energieverbrauch beklagt, der mit der Gewinnung eines Kilogramms von Aluminium verbunden ist. Das ist aber nur einer Seite der Medaille. Ganz abgesehen von der Tatsache, dass im Verlauf der letzten 50 Jahre die Energiemenge für die Erzeugung eines Kilogramms Aluminium um 50 % vermindert werden konnte, wird in unserer überaus technisierten Welt mit Aluminium Energie gespart. Die Gewichtsvermindierungen bei unseren modernen Eisenbahnwagen, bei Autos und anderen Transportsystemen, die durch Aluminium erst möglich wurden, haben zu solchen Treibstoffeinsparungen geführt, so dass nicht nur die (manchmal) höheren Fertigungskosten sondern auch die für die Herstellung von Aluminium aufgewendete Energie kompensiert wird. Berücksichtigt man noch die im Vergleich kleinen Energiemengen, die für das Umschmelzen anfallen, werden die oft genannten Nachteile gegenstandslos.

Im konstruktiven Ingenieurbau ist allerdings das geringe Gewicht nicht der Hauptgrund für die Verwendung von Aluminium, wenn es auch hierfür eine Reihe von Beispielen gibt:

- Krane, bei deren Betrieb Energie eingespart wird, bei denen eine kostengünstigere Unterkonstruktion möglich ist oder wenn bei belassener Unterkonstruktion die Tragfähigkeit erhöht werden soll;
- Großzelte, wo das leichte Gewicht ein schnelleres und leichteres Aufbauen ermöglicht und die Unfallgefahr reduziert wird;
- Tragwerke in abgelegenen Gebieten, wo nur ein Transport durch die Luft in Frage kommt;
- Konstruktionen, wie Gerüste, wo wegen des geringen Gewichts mehr Gerüstmaterial auf Fahrzeuge geladen werden kann und der Gerüstaufbau wesentlich schneller geht.

Der Hauptgrund für die Verwendung von Aluminium im Bauwesen ist immer noch seine gute Korrosionsbeständigkeit, d.h. dass unter den meisten Umgebungsbedingungen kein Oberflächenschutz notwendig ist und diesbezüglich werden die Kosten und die Umweltprobleme beim Erneuern organischer Beschichtungen vielfach immer noch unterschätzt. Diese Problematik wird aber mehr und mehr in den Gemeinden gesehen und das erklärt z.B. die große Anzahl an Fußgängerbrücken aus Aluminium, die in den letzten Jahren Deutschland gebaut worden sind. Die Tendenz ist steigend.

Neben den zuvor genannten Vorteilen gibt es noch eine ganze Reihe von konstruktiven Aluminiumanwendungen, bei denen wegen der durch die Strangpresstechnik möglichen Funktionalität unmittelbar ökonomische Konkurrenzfähigkeit gegeben ist.

Anhang A

Erläuterungen zu Materialeigenschaften und werkstofflichen Regelungen in EN 1999-1-1¹⁾

A.1 Knetlegierungen

A1.1 Allgemeines

Die meisten in den Tabellen 3.2a, 3.2b und 3.2c des EN 1999-1-1 aufgeführten Materialkennwerte sind charakteristische Werte und somit die Basis für die Bemessung von Aluminiumkonstruktionen.

A.1.2 Tabellierte Werte für Blechmaterial, Tabelle 3.2a

Die Werte für f_u und f_o entstammen direkt aus EN 485-2, wo sie als R_m und $R_{p0,2}$ als die untere Grenze für Zugfestigkeit und Streckgrenze definiert sind und so eingehalten und auch vom Hersteller bestätigt werden müssen. Oft gelten sie nur bis zu einer gewissen Materialdicke oder für einen Dickenbereich, der je nach Zustand unterschiedlich definiert sein kann. Der Grund hierfür ist in den Fertigungsbedingung zu suchen. Oft stellt sich dabei die Frage wie zu verfahren ist, wenn Bleche benötigt werden, die dicker sind als in der Norm spezifiziert. Dazu kann folgende differenzierende Antwort gegeben werden. Werkstoffe, die nur für sehr geringe Dickenbereiche genormt ist, sind in der Regel auch nur für Dünnblechanwendungen konzipiert worden und daher besteht auch kein Bedarf für größere Materialdicken. Bei Werkstoffen, die für konstruktive Anwendungen eingesetzt werden, ist auch der genormte Dickenbereich i.d.R. entsprechend groß und ausreichend. Sollte aber trotzdem dickeres Material benötigt werden, sollte dies kein Problem sein, solange der Halbzeughersteller die technologischen Werte des angrenzenden Dickenbereichs bestätigen kann. Sollte das nicht möglich sein, hängt die Verwendbarkeit von baurechtlichen Bedingungen ab, d.h. die zuständigen Baubehörden haben dann ihre Zustimmung zu geben.

Der Wert A für die Bruchdehnung beim Zugversuch ist hier in Tabelle 3.2.a des EC 9 überwiegend als A_{50} -Wert angegeben. Das heißt, dass die Messlänge konstant ist, also unabhängig von der Querschnittsfläche der Zugprobe. Nun führen die Messungen bei konstanter Bezugslänge und Probenbreite dazu, dass die erhaltenen Dehnwerte bei dünnerem Material kleiner sind als bei dickem Material, was ganz einfach mit der Definition der Dehnung zusammenhängt. Daher definiert die EN 485 verschiedene Bruchdehnungswerte, jeweils abhängig von der Materialdicke. Der Eurocode führt aber von allen diesen Werten immer nur die kleinsten auf um die Tabellen nicht zu überladen. Die bei dieser Messung erhaltenen Dehnwerte können beim entwerfenden Ingenieur doch einige Irritationen verursachen, selbst wenn die Dehngröße A kein charakteristischer Bemessungswert ist. Aber oft bevorzugt man eben doch Material mit guter Dehnfähigkeit. Will nun also der entwerfende Ingenieur etwas über das tatsächliche Dehnverhalten erfahren, dann sollte er sich in EN 485 über die spezifischen Dehnwerte informieren und vor allem jenen A-Wert betrachten, der sich auf den Proportionalitätsstab bezieht. Diesen Wert kann man dann mit den Dehneigenschaften anderer Legierungen und Zustände vergleichen.

Anhand der Tabellen A.1 und A.2 soll die Sachlage am Beispiel der Legierung EN AW-5454 (AlMg3Mn) erläutert

¹⁾ Die werkstofflichen Regelung in EN 1999-1-4 -Kaltgeformte Profiltafeln- sind wesentlich weniger umfassend als jene in der Hauptnorm EN 1999-1-1. In EN 1999-1-4 werden in der dortigen Tabelle 3.1 lediglich Angaben zum Grundmaterial gemacht, da bei diesen Anwendungen Schweißen nicht vorgesehen ist. Ebenfalls entfällt die Spalte für BC. Die Erläuterungen im obigen Abschnitt A.1.2 gelten entsprechend gleich für die in EN 1999-1-4 gelisteten Materialien.

werden. Bis zu einem Dickenmaß von 12,5 mm wird in EN 485-2 der A_{50} -Wert angegeben, der an einem Prüfstab mit Originalwanddicke gemessen wird und der mit steigender Wanddicke immer größer wird. Bei Dicken größer 12,5 mm wird dann aber nach der Norm aus dem Material ein Proportional-Rundstab herausgearbeitet, für den dann der A-Wert gilt, der legierungsabhängig/zustandsabhängig gleich oder etwas kleiner ist als der festgelegte A_{50} -Wert für 12,5 mm Dicke. Der A-Wert ist aber der Bruchdehnungswert, der am genormten Proportionalstab gemessen wird, also $A=A_{5,65\sqrt{A_0}} = A_5$. Die Breite des genormten 50-mm-Prüfstabes beträgt immer (unabhängig von der Dicke) 12,5 mm. Bei einer Wanddicke von $6,28^{*1}$ mm entspricht die Länge von 50 mm genau der Proportionalstabslänge, d.h. man kann bei 6,28 mm Dicke, praktisch also bei 6 mm Dicke (theoretisch) erwarten, dass A_{50} und A_5 gleich groß sind. Bei größeren Dicken werden die A_{50} -Werte in steigendem Maße größer als die A_5 -Werte. Da aber in EN 485-2 die Dehnwerte bereichsweise festgelegt wurden, gilt konsequenterweise für den Bereich von 6 -12,5 mm noch der zur Dicke 6 mm gehörende A_{50} -Wert. Da aber die Beziehungen zwischen Prüfstäben mit Rechteckquerschnitt und solchen mit Rundquerschnitt nicht ganz so einfach sind, wie es die Proportionalstabsformel vermuten lässt, liegen die allgemeiner geltenden A_5 -Werte in den meisten Fällen etwas unter den Dehnungswerten des 6 mm Rechteckstabes.

Für Schweißungen sind die Werte $f_{o,haz}$ und $f_{u,haz}$ die charakteristischen Werte für die Festigkeit der wärmebeeinflussten Zone (WEZ). Bei ausscheidungshärtenden Legierungen basieren sie auf Messungen, denen eine Bezugslänge von 100 mm zugrunde lag.

Bei den nichtaushärtbaren (naturharten) Legierungen entspricht der Bruchfestigkeitswert $f_{u,haz}$ stets, d.h. bei allen Materialzuständen, dem des Zustandes O (weichgeglüht). Der Streckgrenzenwert $f_{o,haz}$ basiert bei den kaltverfestigten und den teilweise rückgeglühten Zuständen auf einer Konvention. Er beträgt das 1,25-fache des Streckgrenzenwertes des Zustandes O. Aufgrund der Tatsache, dass die Streckgrenze bei allen verfestigten Zuständen immer deutlich höher ist als die des weichgeglühten Zustandes, fließt nämlich beim Zugversuch nur das Material in der Wärmeeinflusszone, der Bereich außerhalb dehnt sich nicht. Damit wird der nach der Auswertevorschrift ermittelte Streckgrenzenwert größer als der des Zustandes O und ist quasi unabhängig vom Grad der Verfestigung. Bei Material im Zustand O gibt es in diesem Sinne keine Wärmeeinflusszone und daher sind die charakteristischen Werte $f_{o,haz}$ und $f_{u,haz}$ identisch mit den charakteristischen Werten des Zustandes O.

Die Spalte für den WEZ-Faktor ist lediglich eine Hilfe für den entwerfenden Ingenieur, da diese Werte sich einfach aus den weiter links stehenden Werten ergeben indem $f_{u,haz}$ durch f_u dividiert wird etc. Übersteigt allerdings die Dicke des zu schweißenden Materials die in der Fußnote 2) definierten Werte müssen $p_{o,haz}$ und $p_{u,haz}$ entsprechend für jeden Einzelfall berechnet werden.

Mit der Knickklasse BC werden mit "B" Legierungen bzw. Zustände mit einer niedrigen Proportionalitätsgrenze charakterisiert und mit "A" solche mit hoher Proportionalitätsgrenze. Diese Unterscheidung muss beim Knicknachweisen gemacht werden und bei der Berechnung von effektiven Dicken (mitwirkende Breiten) bei Querschnitten der Klasse 4 gemäß Abschnitt 6.1.5 EN 1999-1-1. Alle Materialien mit einem genormten f_o -Wert von 230 N/mm² und weniger wurden als "B-Material" klassifiziert, mit Ausnahme von ausscheidungsgehärtetem Material im Zustand T6x. Diese und alle anderen Materialien mit $f_o \rightarrow 230$ N/mm² wurden "A-Material".

n_p ist ein Wert der für Berechnungen im plastischen Bereich benötigt wird, wenn dabei eine gewisse, mit der plastischen Verformung verbundene Verfestigung berücksichtigt werden soll. Diese Werte sind, wie bei Nor-

^{*1} $= [50/5,65]^2 / 12,5$

men üblich, entsprechend konservativ. Wegen der in der Praxis zu beobachtenden großen Streuung dürfen diese Werte nicht als typische Werte angesehen werden und sind für Verfestigungsberechnungen mit sonstiger Zielrichtung nicht geeignet. Das erklärt auch den Text der Fußnote 5), dass n_p nur in Verbindung mit den angegebenen Streckgrenzenwerten benutzt werden darf

| Legie- rung EN AW- | Zustand ¹⁾ | Dicke mm ¹⁾ | f_o ¹⁾ | f_u | A_{50} ^{1) 6)} | $f_{o,haz}$ ²⁾ | $f_{u,haz}$ ²⁾ | WEZ-Faktor ²⁾ | | BC ₄₎ | n_p 1), 5) |
|--------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------|
| | | | N/mm ² | | | % | N/mm ² | | $\rho_{o,haz}$ ¹⁾ | | |
| 3004 | H14 24/H34 | ≤ 6 3 | 180 170 | 220 | 1 3 | 75 | 155 | 0,42 0,44 | 0,70 | B | 23 18 |
| | H16 26/H36 | ≤ 4 3 | 200 190 | 240 | 1 3 | | | 0,38 0,39 | 0,65 | B | 25 20 |
| 5005/ 5005A | O/H111 | ≤ 50 | 35 | 100 | 15 | 35 | 100 | 1 | 1 | B | 5 |
| | H12 22/H32 | ≤ 12,5 | 95 80 | 125 | 2 4 | 44 | 100 | 0,46 0,55 | 0,80 | B | 18 11 |
| | H14 24/H34 | ≤ 12,5 | 120 110 | 145 | 2 3 | | | 0,37 0,40 | 0,69 | B | 25 17 |
| | O/H111 | ≤ 80 | 85 | 215 | 12 | 85 | 215 | 1 | 1 | B | 5 |
| 5454 | H14 H24/H34 | ≤ 25 | 220 200 | 270 | 2 4 | 105 | 215 | 0,48 0,53 | 0,80 | B | 22 15 |
| | T4 / T451 | ≤ 12,5 | 110 | 205 | 12 | 125 | 185 | 0,91 | 0,78 | B | 8 |
| T61/T6151 | ≤12,5 | 205 | 280 | 10 | 0,61 | | | 0,66 | A | 15 | |
| T6151 | 12,5↵100 | 200 | 275 | 12 ³⁾ | 0,63 | | | 0,67 | A | 14 | |
| T6/T651 | ≤ 6 | 260 | 310 | 6 | 0,48 | | | 0,60 | A | 25 | |
| | 6↵12,5 | 255 | 300 | 9 | 0,49 | | | 0,62 | A | 27 | |
| T651 | 12,5↵100 | 240 | 295 | 7 ³⁾ | 0,52 | | | 0,63 | A | 21 | |

1) Wenn zwei (drei) Zustände in einer Zeile angegeben werden, haben die durch „|“ getrennten Zustände unterschiedliche technologische Werte, wenn sie durch „/“ getrennt sind, haben sie die gleichen Werte. (Die Zustände weisen dann gegebenenfalls Unterschiede bei f_o , A und n_p auf).

2) Die WEZ-Werte gelten für MIG-Schweißen und Dicken bis zu 15 mm. Beim WIG-Schweißen kaltverfestigter Legierungen (3xxx, 5xxx und 8011A) bis zu 6 mm gelten die gleichen Werte, beim WIG-Schweißen ausscheidungsgehärteter Legierungen (6xxx und 7xxx) und Dicken bis zu 6 mm müssen die WEZ-Werte und damit auch die Beiwerte ρ mit einem Faktor 0,8 multipliziert werden. Bei größeren Dicken müssen –wenn keine anderen Werte vorliegen –die WEZ-Werte und die Beiwerte ρ bei ausscheidungsgehärteten Legierungen (6xxx und 7xxx) weiter mit einem Faktor von 0,8 und bei kaltverfestigten Legierungen (3xxx, 5xxx und 8011A) mit einem Faktor von 0,9 abgemindert werden. Diese Abminderungen gelten nicht für den Zustand O.

3) Auf der Grundlage von $A = A_{5,65\sqrt{A_0}}$, nicht A_{50}

4) BC = Knickklasse, siehe 6.1.4.1, 6.1.5 und 6.3.1.

5) Exponent n für das Ramberg-Osgood-Gesetz für die plastische Berechnung. Er gilt nur in Verbindung mit dem aufgeführten f_o -Wert.

6) Die angegebenen Mindestwerte der Bruchdehnung gelten nicht für den gesamten Dickenbereich sondern im Wesentlichen für geringe Dicken. Einzelheiten hierzu siehe EN 485-2.

Tabelle A.1: Ausschnitt aus Tabelle 3.2a der EN 1999-1-1: Charakteristische Werte der 0,2 %-Dehngrenze f_o und der Zugfestigkeit f_u (ungeschweißt und für WEZ), Mindestwerte der Bruchdehnung A , Abminderungsfaktoren $\rho_{o,haz}$ und $\rho_{u,haz}$ in der WEZ, Knickklasse und Exponent n_p für Aluminiumknetlegierungen – Bleche, Bänder und Platten

| Zustand | Nennstärke | | R _m | R _{p0,2} | Bruchdehnung (min) | |
|---------|------------|------|----------------|-------------------|--------------------|----|
| | über | bis | | | A ₅₀ | A |
| O/H111 | 0,2 | 0,5 | 215 | 85 | 12 | -- |
| | 0,5 | 1,5 | 215 | 85 | 13 | -- |
| | 1,5 | 3,0 | 215 | 85 | 15 | -- |
| | 3,0 | 6,0 | 215 | 85 | 17 | -- |
| | 6,0 | 12,5 | 215 | 85 | 18 | -- |
| | 12,5 | 80,0 | 215 | 85 | -- | 16 |
| H14 | 0,2 | 0,5 | 270 | 220 | 2 | |
| | 0,5 | 1,5 | 270 | 220 | 3 | |
| | 1,5 | 3,0 | 270 | 220 | 3 | |
| | 3,0 | 6,0 | 270 | 220 | 4 | |
| | 6,0 | 12,5 | 270 | 220 | 5 | |
| | 12,5 | 25 | 270 | 220 | -- | 4 |
| H24/H34 | 0,2 | 0,5 | 270 | 200 | 4 | |
| | 0,5 | 1,5 | 270 | 200 | 5 | |
| | 1,5 | 3,0 | 270 | 200 | 6 | |
| | 3,0 | 6,0 | 270 | 200 | 7 | |
| | 6,0 | 12,5 | 270 | 200 | 8 | |
| | 12,5 | 25,0 | 270 | 200 | -- | 7 |

Tabelle A.2 : Ausschnitt aus Tafel 35 der EN 485-2: : EN AW-5454 [AlMg3Mn] (die Spalten für Biegegradienten, Härte HBW und die Maximalwerte von R_m und R_{p0,2} wurden weggelassen).

Zu Fußnote 2) von Tabelle A.1, d.h. Tabelle 3.2.a von EN 1999-1-1, noch eine spezielle Anmerkung: Der Text besagt, dass bei größeren Wändicken auch der Bruchfestigkeitswert bei den kaltverfestigten Werkstoffen für die WEZ mit dem Faktor 0,9 abgemindert werden soll. Das ist metallkundlich nicht einzusehen, weil für alle kaltverfestigten bzw. rückgeglühten Zustände der Bruchfestigkeitswert identisch ist mit dem des Zustandes O. Damit liegt die Regelung auch im Widerspruch mit dem letzten Satz dieser Fußnote. Hier scheint eine Verbesserung im Normtext angebracht. - Dasselbe gilt natürlich auch für die identische Fußnote 4) von Tabelle 3.2.b von EN 1999-1-1.

A1.3 Tabellierte Werte für Strangpressmaterial: Tabelle 3.2.b

Die meisten der Anmerkungen zu Tabelle 3.2a des EC 9 (siehe voriger Abschnitt) gelten auch hier, jedoch gibt es einige Unterschiede zwischen den zwei Tabellen, d.h. zwischen den beiden Halbzeugformen (Profile und Bleche, d.h. zwei verschiedene Normenausschüsse!).

Die Werte für f_u und f_o entstammen direkt aus EN 755-2, wo sie als R_m und R_{p0,2} als die untere Grenze für Zugfestigkeit und Streckgrenze definiert sind und so eingehalten und auch vom Hersteller bestätigt werden müssen. Die Differenzierung bei den Werten bezüglich Dicke, Erzeugnisform (runde und rechteckige Rohre, Stangen, offene oder Hohl-Profile) ist ausgeprägter als dies bei Blechen und Platten der Fall ist. Alle diese Einzel-

heiten aus EN 755-2 aufzunehmen hätte allerdings zur Unleserlichkeit der Tabelle geführt. Die Lösung bestand nun darin Werte in fatter Schrift einzuführen. Ein fette Maßzahl bei der Wanddicke bedeutet, dass dies die Grenze des engsten Gültigkeitsbereichs ist, d.h. er ist gültig für alle Produktformen (Stange, Rohr, voll- und Hohlquerschnitt), es gibt aber Produktformen für die die technologischen Werte auch für größere Dicken gelten. Eine fette Maßzahl bei einem Festigkeitswert ist ähnlich zu deuten, d.h. es gibt Produktformen, für die für den gleichen oder einen weiteren Geltungsbereich höhere Festigkeitswerte festgelegt sind. Will der entwerfende Ingenieur diese Möglichkeiten im Einzelnen ausnutzen, muss er die genauen Werte direkt der EN 755-2, bzw. EN 754-2 entnehmen¹⁾. Durch Vergleichen der **Tabellen A.3 und A.4** lässt sich diese Vorgehensweise beispielhaft an EN AW-6060 leicht verstehen.

Wie bei Blechen gilt für den Fall, wenn die Dicke des zu schweißenden Materials die in der Fußnote 4) von Tabelle 3.2b definierten Werte überschreitet, dass die Werte $\rho_{o,haz}$ und $\rho_{u,haz}$ für jeden Einzelfall berechnet werden müssen. Das Gleiche gilt, wenn die im vorigen Absatz erwähnten, für bestimmte Zustände bestehenden höheren Festigkeitswerte in der Bemessung ausgenutzt werden sollen – siehe Fußnote 1) dieser Tabelle.

In diesem Zusammenhang ist noch wichtig zu wissen, dass unter "Rohr" nicht nur runde Formen verstanden werden. Es wird daher die Definition für "Rohr" aus EN 755-1 wiederholt, die aber ihrerseits auf EN 12258-1 Bezug nimmt: *"Hohles Knetzeugnis mit gleichmäßigem Querschnitt mit nur einem geschlossenen Hohlraum und mit gleichmäßiger Wanddicke über die ganze Länge.....Die Querschnittsformen sind kreisförmig, oval, quadratisch, gleichseitig dreieckig oder regelmäßig vieleckig und können über die gesamte Länge abgerundete Kanten haben..."*

Es gibt in EN 755-2 noch eine weitere Festlegung, über die der entwerfende Ingenieur stolpern kann. Für die im EC 9 aufgeführten Legierungen EN AW-6005A, -6060, -6061, -6063 and -6082 gilt dort nämlich gemäß Fußnote 3): *"Wenn der Querschnitt eines Profils sich aus unterschiedlichen Dicken zusammensetzt, denen verschiedene Werte der mechanischen Eigenschaften zugeordnet sind, gelten jeweils die niedrigsten festgelegten Werte für den ganzen Querschnitt."*

Das Problem besteht nun darin, dass der Ingenieur im ersten Entwurfsstadium noch nicht sicher weiß, welche Festigkeitswerte er für seinen Entwurf annehmen soll, denn er weiß ja noch nicht, wie der zu wählende oder zu entwickelnde Querschnitt (Wanddicke eines Querschnittsdetails) schlussendlich aussehen wird. Ist indes der Entwurf schließlich praktisch fertig, dann könnte das Hinzufügen oder Ändern eines (kleinen) Elements einen Einfluss auf die Festigkeitswerte haben, die der Lieferant bestätigt und somit seine statische Berechnung beeinflussen. Um diese Probleme zu vermeiden, wurde der der Fußnote von Tabelle 3.2b noch die Anmerkung angefügt: *"Abweichend davon kann der größte Wert verwendet werden, wenn der Hersteller diesen Wert durch eine geeignete Bescheinigung der Qualitätssicherung belegen kann"*. In der Praxis bereitet eine derartige Bestätigung für die meisten Hersteller keine Schwierigkeiten.

Wie man der Tabelle entnehmen kann, sind die Festigkeitswerte bei größeren Wanddicken meistens kleiner. Das hängt unmittelbar mit der Abschreckgeschwindigkeit und/ oder dem Umformprozess zusammen. Bei EN AW-6082 sieht man allerdings das Gegenteil und es liegt kein Druckfehler vor. Es hat zu tun mit einem Strangpresseffekt, nachdem sich in Bereichen mit geringer Wanddicke oder bei den Innenpartien eines Querschnitts eher ein gröberes Korn einstellt, was mit einem geringen Abfallen von Festigkeit und Bruchdehnung verbunden sein kann.

¹⁾ Bezüglich der dann geltenden ρ -Werte ist Fußnote 1 zu beachten.

| Legierung EN-AW | Produktform | Zustand | Dicke t mm 1) 3) | $f_o^{1)}$ | $f_u^{1)}$ | $A^{5) 2)}$ | $f_{o,haz}^{4)}$ | $f_{u,haz}^{4)}$ | WEZ-Faktor ⁴⁾ | | BC 6) | n_p 7) |
|--------------------|-----------------|----------------------|----------------------------|-------------------|------------|-------------|-------------------|------------------|--------------------------|----------------|----------|-------------|
| | | | | N/mm ² | | % | N/mm ² | | $\rho_{o,haz}$ | $\rho_{u,haz}$ | | |
| 5083 | ET, EP,ER/B | O / H111, F, H112 | $t \leq 200$ | 110 | 270 | 12 | 110 | 270 | 1 | 1 | B | 5 |
| | DT | H12/22/3 2 | $t \leq 10$ | 200 | 280 | 6 | 135 | 270 | 0,68 | 0,96 | B | 14 |
| | | H14/24/3 4 | $t \leq 5$ | 235 | 300 | 4 | | | 0,57 | 0,90 | A | 18 |
| 6060 | EP,ET,ER/B | T5 | $t \leq 5$ | 120 | 160 | 8 | 50 | 80 | 0,42 | 0,50 | B | 17 |
| | EP | | $5 \leftarrow t \leq 25$ | 100 | 140 | 8 | | | 0,50 | 0,57 | B | 14 |
| | ET,EP,ER/B | T6 | $t \leq 15$ | 140 | 170 | 8 | 60 | 100 | 0,43 | 0,59 | A | 24 |
| | DT | | $t \leq 20$ | 160 | 215 | 12 | | | 0,38 | 0,47 | A | 16 |
| | EP,ET,ER/B | T64 | $t \leq 15$ | 120 | 180 | 12 | 60 | 100 | 0,50 | 0,56 | A | 12 |
| | EP,ET,ER/B | T66 | $t \leq 3$ | 160 | 215 | 8 | 65 | 110 | 0,41 | 0,51 | A | 16 |
| | EP | | $3 \leftarrow t \leq 25$ | 150 | 195 | 8 | | | 0,43 | 0,56 | A | 18 |
| 6082 | EP,ET,ER/B | T4 | $t \leq 25$ | 110 | 205 | 14 | 100 | 160 | 0,91 | 0,78 | B | 8 |
| | EP/O, EP/H | T5 | $t \leq 5$ | 230 | 270 | 8 | 125 | 185 | 0,54 | 0,69 | B | 28 |
| | EP/O,EP/H ET | T6 | $t \leq 5$ | 250 | 290 | 8 | | | 0,50 | 0,64 | A | 32 |
| | | | $5 \leftarrow t \leq 15$ | 260 | 310 | 10 | | | 0,48 | 0,60 | A | 25 |
| | ER/B | T6 | $t \leq 20$ | 250 | 295 | 8 | | | 0,50 | 0,63 | A | 27 |
| | | | $20 \leftarrow t \leq 150$ | 260 | 310 | 8 | | | 0,48 | 0,60 | A | 25 |
| | DT | T6 | $t \leq 5$ | 255 | 310 | 8 | | | 0,49 | 0,60 | A | 22 |
| | | | $5 \leftarrow t \leq 20$ | 240 | 310 | 10 | | | 0,52 | 0,60 | A | 17 |

Legen

| | | | | |
|-----|------|-------------------------------|------|---------------------------------|
| de: | EP | - stranggepresste Profile | EP/O | - stranggepresste offen Profile |
| | EP/H | - stranggepresste Hohlprofile | ET | - stranggepresste Rohre |
| | ER/B | - stranggepresste Stäbe | DT | - gezogene Rohre |

1): Wo die Werte **fett** angegebenen sind, können in einigen Ausführungsformen größere Dicken und/oder größere Festigkeitswerte zugelassen werden, siehe die in 1.2.1.3 aufgeführten ENs und prENs. In diesem Fall können die Werte für $R_{p0,2}$ und R_m als f_o und f_u angesetzt werden. Wenn diese größeren Werte verwendet werden, müssen die entsprechenden WEZ-Beiwerte ρ gemäß den Ausdrücken (6.13) und (6.14) mit denselben Werte für $f_{o,haz}$ und $f_{u,haz}$ berechnet werden.

2): Wo die Mindestwerte der Bruchdehnung **fett** angegeben sind, gelten für einige Ausführungsformen oder Dicken größere Mindestwerte.

3): Nach EN 755-2 gilt folgende Regel: "Wenn der Querschnitt eines Profils sich aus unterschiedlichen Dicken zusammensetzt, denen verschiedene Werte der mechanischen Eigenschaften zugeordnet sind, gelten jeweils die niedrigsten festgelegten Werte für den gesamten Querschnitt des Profils." Abweichend davon kann der größte Wert verwendet werden, wenn der Hersteller diesen Wert durch eine geeignete Bescheinigung der Qualitätssicherung belegen kann.

Tabelle A.3 : Ausschnitt aus Tabelle 3.2b der EN 1999-1-1: Charakteristische Werte der 0,2 %-Dehngrenze f_o und der Zugfestigkeit f_u (ungeschweißt und für WEZ), Mindestwerte der Bruchdehnung A , Abminderungsfaktoren $\rho_{o,haz}$ und $\rho_{u,haz}$ in der WEZ, Knickklasse und Exponent n_p für Aluminiumknetlegierungen – Strangpressprofile, stranggepresste Rohre, stranggepresste Stangen und gezogene Rohre (die Fußnoten 4) bis 7) wurden weggelassen – siehe aber Tabelle A.1)

In Tabelle 3.2b des EC 9 finden wir noch einen Zustand T66. Dieser ist eine Besonderheit in der europäischen Normung und ihn gibt es in den US-Normen nicht. Gemäß EN 515 ist er ein Zustand mit "*besseren mechanischen Eigenschaften als T6 durch spezielle Kontrolle des Verfahrens (Legierungen der Reihe 6000)*". Tatsächlich wird etwas anders verfahren. Die T66-Werte können nämlich – verglichen mit einer für T6 geeigneten chemischen Zusammensetzung – nur erreicht werden, wenn der Magnesium und/oder der Siliziumgehalt etwas höher sind. Und dieses ist der eigentlich Grund, warum bei EN AW-6060 und EN AW-6063 die WEZ-Festigkeitswerte für T66 etwas höher liegen als für T6. Dieser Vorteil ist für die Bemessung von Aluminium wichtig und deshalb hat er auch in den entsprechenden Normwerten seinen Niederschlag gefunden.

| Zustand | Maße mm | R _m MPa | R _{p0,2} MPa | A % | A _{50mm} % |
|------------------------------|------------|-----------------------|--------------------------|--------|------------------------|
| Stranggepresste Rohre | | | | | |
| T4 | ≤15 | 120 | 60 | 16 | 14 |
| T5 | ≤15 | 160 | 120 | 8 | 6 |
| T6 | ≤15 | 190 | 150 | 8 | 6 |
| T64 | ≤15 | 180 | 120 | 12 | 10 |
| T66 | ≤15 | 215 | 160 | 8 | 6 |
| Strangpressprofile | | | | | |
| T4 | ≤25 | 120 | 60 | 16 | 14 |
| T5 | ≤5 | 160 | 120 | 8 | 6 |
| | 5<d≤25 | 140 | 100 | 8 | 6 |
| T6 | ≤3 | 190 | 150 | 8 | 6 |
| | 3<d≤25 | 170 | 140 | 8 | 6 |
| T64 | ≤15 | 180 | 120 | 12 | 10 |
| T66 | ≤3 | 215 | 160 | 8 | 6 |
| | 3<e≤25 | 195 | 150 | 8 | 6 |

Tabelle A.4 : Ausschnitt aus Tafel 36 der EN 755-2 (2008): : EN AW-6060 [AlMgSi] (die Spalten für Maximalwerte und für die Härte HBW wurden weggelassen).

Die Grauhinterlegungen einzelner Kästchen dienen dem Zweck das "System der fetten Zahlen" durch Vergleich der Tabellen A.3 und A.4 anhand eines Beispiels zu erleichtern.

Bezüglich der Bruchdehnungswerte hat EN 755-2 (von den "Strangpressern verfasst) im Vergleich zu denen der EN 485 (verfasst von den Walzhalbezeugherstellern) eine andere Auffassung. Tatsächlich hat auch die EN 755-2 mit ihrer Ausgabe von 1997 noch die Angabe von A₅₀-Werten bis zu Wanddicken von 12,5 mm bevorzugt, hat aber parallel noch A'-Werte aufgeführt (identisch mit dem A_{5,65√A0}-Wert oder A₅-Wert). Letztere sind aber ausschließlich in den EC 9 aufgenommen worden, weil sie für den Ingenieur eine größere Aussagekraft haben. Jetzt ist nun in der revidierten Fassung der EN 755-2 von 2008 der A₅-Wert wieder die bevorzugte Messgröße und sie soll gemäß Normtext auch bescheinigt werden, falls keine andere Vereinbarung besteht.

1.4 Tabellierte Werte für Schmiedematerial, Tabelle 3.2.c

Verglichen mit den Erläuterungen zu den Tabellen 3.2a (Bleche) und 3.2b (Strangpressprofile) sind hier keine zusätzlichen Anmerkungen notwendig. Die charakteristischen Werte entsprechen den unteren Grenzwerten von EN 586-2 (Ausgabe 1994). Die Werte für die WEZ bei den Werkstoffen EN AW-7554 und -5083 sind mit den Werten des Basiswerkstoffs identisch. Bei EN AW-6082 entsprechen sie den Werten von Aluminiumhalbzeug – siehe Tafel 3.2.a von EN 1999-1-1.

| Legierung EN-AW | Zustand | Dicke bis zu mm | Richtung | f_o | f_u | $f_{o,haz}^{1)}$ | $f_{u,haz}^{1)}$ | $A^{3)}$ | Knick- klasse |
|--|---------|-----------------------|-----------------|-------------------|-------|-------------------|-------------------|----------|------------------|
| | | | | N/mm ² | | | | % | |
| 5754 | H112 | 150 | Längsl (L) | 80 | 180 | 80 | 180 | 15 | B |
| 5083 | H112 | 150 | Längs (L) | 120 | 270 | 120 | 270 | 12 | B |
| | | | Transversal (T) | 110 | 260 | 110 | 260 | 10 | B |
| 6082 | T6 | 100 | Längs (L) | 260 | 310 | 125 ²⁾ | 185 ²⁾ | 6 | A |
| | | | Transversal (T) | 250 | 290 | | | 5 | A |
| 1) $\rho_{o,haz}; \rho_{u,haz}$ Berechnung gemäß Gleichung (6.13) und (6.14) | | | | | | | | | |
| 2) Bei Dicken über 15 mm (MIG-Schweißen) oder 6 mm (WIG-Schweißen) siehe Tabelle 3.2.b Fußnote 4). | | | | | | | | | |
| 3) $A=A_{5,65}/A_0$ | | | | | | | | | |

Tabelle A.5 : Wiedergabe der Tabelle 3.2c EN 1999-1-1: Charakteristische Werte für die 0,2%- Dehngrenze f_o , Zugfestigkeit f_u (ungeschweißt und für WEZ), Mindestwert A der Bruchdehnung und Knickklasse für Aluminiumknetlegierungen – Schmiedeerzeugnisse

A1.5 Sonstige Festlegungen

In Tabelle 3.2a von EN 1999-1-1 ist wie in der Zeile von EN AW-5005 (AlMg1(B)) noch die Legierungen EN AW-5005A (AlMg1(C)) aufgeführt. Diese beiden Werkstoffe haben fast die gleiche chemische Zusammensetzung und identische mechanische Werte. (Letzteres ist aber keinesfalls ein Muss für Legierungen, deren Bezeichnungen sich lediglich im Suffix also durch den Zusatz A, B bzw. C unterscheiden.) Der Grund weshalb beide Legierungen in der Norm aufgeführt sind, liegt bei den erlaubten Beimengungen/Verunreinigungen für die Elemente Fe und Cu, welche bei EN AW-5005A geringer sind. Damit wird die dekorative Anodisierbarkeit verbessert, was bei Fassaden oft sehr wichtig ist.

A.2 Gusslegierungen

A2.1 Allgemeines

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 3.2.3.1 EN 1999-1-1 ist die Anwendbarkeit des EC 9 auf Gussstücke sehr begrenzt. Tatsächlich ist sie auch nur dann gegeben, wenn die Bemessungsregeln des informativen Anhangs C im Hauptteil des EC 9 angewendet werden bzw. angewendet werden dürfen. Das heißt diese müssen über den Nationalen Anhang verbindlich gemacht werden. In der ENV-Vornorm waren überhaupt keine Bemessungsregeln enthalten. Festgelegt war, dass Gussstücke nur verwendet werden sollten, wenn sie für die Anwendung geeignet waren, ihre Tragfähigkeit bestimmt werden konnte und die Qualitätskontrolle den Vorstellungen des verantwortlichen Planers entsprach. In Tabelle 3.3 waren dann noch Gusslegierungen aufge-

führt, d.h. diese waren mehr oder weniger zur Verwendung empfohlen. Es war natürlich sehr rasch klar, dass solche, weitgehend offenen Festlegungen nicht mit den strengen Regeln einer europäischen Bemessungsnorm in Bezug auf Sicherheit und Anwendungsregeln zu vereinbaren waren. Daher wurden das Gussthema mit der Formulierung "*EN 1999-1-1 kann im allgemeinen nicht auf Gusserzeugnisse angewandt werden.*" grundsätzlich geändert. Um nun dem entwerfenden Ingenieur doch eine einfache Möglichkeit zu verschaffen, Gusstücke als tragende Elemente zu verwenden, wurden im Anhang C der EN 1999-1-1 Bemessungsregeln und auch Regeln zu Qualitätssicherstellung formuliert – Einzelheiten hierzu siehe A.2.3.

Da das Gießverfahren ganz entscheidend die Qualität eines Gusstücks bestimmt, unterscheidet Tabelle 3.3 der EN 1999-1-1 zwischen Kokillenguss und Sandguss. Andere Gießverfahren werden nicht als allgemein anwendbare Verfahren zur Herstellung tragender Bauteile angesehen.

A2.2 Tabellierte Werte für Gussmaterial, Tabelle 3.3

Tabelle 3.3. der EN 1999-1-1 ist- verglichen mit den Tabellen 3.2a und 3.2b - leicht zu überblicken. Es gibt keine Angaben für wärmebeeinflusste Zonen, weil mangels belegbarer Daten das Schweißen von Gusstücken nicht vorgesehen ist¹⁾. Es gibt auch keine Angaben bezüglich der Knickklasse, da angenommen wird, dass Gusstücke kompakt sind und daher kein Knicken auftritt. Ebenso fehlen Angaben über η_p , weil bei Guss wegen der relativ geringen Bruchdehnungswerte ein plastisches Verformen nicht zugelassen wird. Die Werte für f_o und f_u sind 70 % der in EN 1706 aufgeführten Werte, weil die dort genormten Mindestwerte Werte sind, die an einem getrennt gegossenen Probestück ermittelt werden, wobei die im Gusstück selbst vorhandenen Werte bis auf 70% abfallen dürfen. Eine ähnliche Situation besteht bei den Bruchdehnungswerten. Ein dem Gusstück entnommener Prüfstab braucht nur 50 % der Dehnung aufzuweisen wie sie am getrennt gegossenen Probestab als Mindestwert ermittelt wird. Damit ist klar, dass nur diese reduzierten Werte als charakteristische Werte für die Bemessung herangezogen werden können. Was die Mindestdehnung anbelangt, so hat die EN 1999-1-1 noch eine zusätzliche Forderung aufgestellt: Die dem Gusstück zu entnehmenden Prüfstäbe müssen einen auf die Messlänge $5,65\sqrt{A_0}$ ($=A_5$) bezogenen Bruchdehnungswert von 2 % aufweisen.

¹⁾ Das bedeutet nicht, dass Guss grundsätzlich nicht schweißbar ist.

| Legierung | Gießprozess | Zustand | $f_o \{f_{oc}\}$ N/mm ² | $f_u \{f_{uc}\}$ N/mm ² | A_{50} % ¹⁾ |
|--|--------------|---------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| EN AC-42100 | Kokillenguss | T6 | 147 | 203 | 2,0 |
| | Kokillenguss | T64 | 126 | 175 | 4 |
| EN AC-42200 | Kokillenguss | T6 | 168 | 224 | 1,5 |
| | Kokillenguss | T64 | 147 | 203 | 3 |
| EN AC-43000 | Kokillenguss | F | 63 | 126 | 1,25 |
| EN AC-43300 | Kokillenguss | T6 | 147 | 203 | 2,0 |
| | Sandguss | T6 | 133 | 161 | 1,0 |
| | Kokillenguss | T64 | 126 | 175 | 3 |
| EN AC-44200 | Kokillenguss | F | 56 | 119 | 3 |
| | Sandguss | F | 49 | 105 | 2,5 |
| EN AC-51300 | Kokillenguss | F | 70 | 126 | 2,0 |
| | Sandguss | F | 63 | 112 | 1,5 |
| 1) Bezüglich der Anforderungen an die Bruchdehnung von Gussstücken, siehe C.3.4.2 (1). | | | | | |

Tabelle A.6 : Wiedergabe von Tabelle 3.3 EN 1999-1-1: Charakteristische Werte der 0,2- Dehngrenze f_o und der Zugfestigkeit f_u von Aluminiumgusslegierungen – Sand- oder Kokillenguss

A2.3 Regelungen für Bemessung und Qualität

Im Anhang C der EN 1999-1-1 wurden für die Bemessung von Aluminiumgussstücken folgende spezifische Regeln festgelegt:

- Die Bemessung muss auf der linearen Elastizitätstheorie beruhen, plastisches Fließen darf nicht in Anrechnung gebracht werden.
- Für den Nachweis ausreichender Tragfähigkeit müssen zwei Kriterien erfüllt sein: Ausreichende Sicherheit gegenüber Fließen und ausreichende Sicherheit gegenüber Bruch. Entsprechende Teilsicherheitswerte können im Nationalen Anhang festgelegt werden. Vorgeschlagen sind aber $\gamma_{Mo,c} = 1,1$ (wie bei Knetwerkstoffen) und $\gamma_{Mu,c} = 2,0$, ein deutlich höherer Wert, um die Wahrscheinlichkeit unbeabsichtigter plastischer Verformungen gering zu halten
- Die Spezifikationen für Gussstücke müssen für die einzelnen Abschnitte des Gussstücks (Zonen) auch Aufschluss über deren Ausnutzungsgrad U geben, der festgelegt ist als das Verhältnis zwischen Bemessungsspannung und Bemessungswiderstand:
 U = größer 70% bei Zugbeanspruchung (Zonen H)
 U = zwischen 70 and 30 % bei Zugbeanspruchung (Zonen M)
 U = zwischen 100% and 30% bei Druckbeanspruchung (Zonen M)
 U = unter 30 % (Zonen N).

Um ausreichende Qualität zu sicherzustellen sind folgende Regeln zu beachten:

- Die Stelle(n) der maximalen Beanspruchung muss/müssen vermerkt sein und auch deren Richtung zum entsprechenden Heraustrennen des Prüfstabes.
- Die Anforderungen an die Qualität basieren auf dem Ausnutzungsgrad, d.h. sie sind in den einzelnen markierten Zonen unterschiedlich. Jedoch ist generell eine 100 %ige Prüfung gefordert. Diese Festlegung scheint sehr streng zu sein, sie entspricht aber dem was bei Automobilteilen üblich ist und auch dort nicht zu unnötig hohen Kosten führt.

Der Grund für all diese Maßnahmen ist darauf zurückzuführen, dass die Qualität z.B. die Porosität in weiten Grenzen schwanken kann – auch innerhalb eines einzelnen Gießloses – jeweils anhängig von der von der Form des Gussstücks, des Gießprozesses und der technischen/maschinellen Ausrüstung der Gießerei.

Anhang B

Entwerfen von Strangpressprofilen und Legierungswahl

B.1 Allgemeine Regeln für das Entwerfen von Strangpressquerschnitten

Im Prinzip funktioniert das Strangpressen ähnlich wie das Ausdrücken einer Zahnpastatube (siehe **Bild B.1**), d. h. nach einem Prozess, den wir tagtäglich selbst in Gang setzen. Beim Aluminium sind lediglich die Temperaturen höher, die Presskräfte größer und es ist auch eine etwas kompliziertere Maschinerie nötig.



Bild B.1: Strangpressen von Zahnpasta

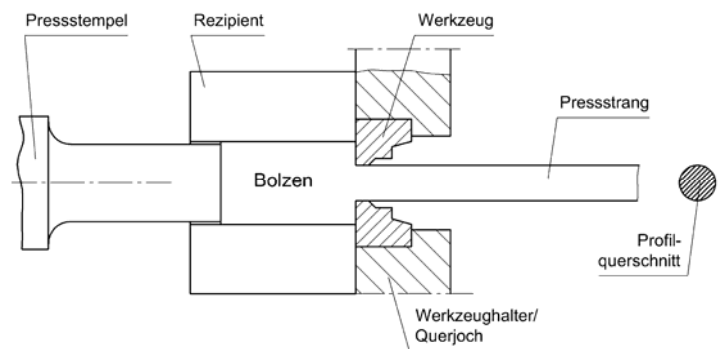


Bild B.2: Strangpressen einer Stange aus Aluminium

Nach diesem plastischen Beispiel ist der Prozess an sich einfach zu erklären. Ein vorgewärmter Barren/Pressbolzen (400°C-550°C – abhängig von der Legierung) wird in einen ebenfalls vorgewärmten Rezipienten/Blockaufnahme eingebracht. Unter der Kraft des Stempels beginnt das Material durch das Werkzeug zu fließen und erhält dabei die Querschnittsform, die durch das sogenannte Werkzeug bestimmt wird.

Dieses Werkzeug ist eigentlich das wichtigste bei diesem Prozess. In seiner einfachsten Ausführung ist dies eine Stahlplatte mit einem Ausschnitt, der der Kontur des zu erzeugenden Profils entspricht (siehe **Bild B.2**). Strangpresswerkzeuge bei Aluminium haben aber nicht nur formgebende Aufgaben. Sie sind darüber hinaus auch die tragende Struktur, die den gesamten Pressdruck aufnehmen und in die Pressenlager übertragen muss. Das sind dann je nach Pressengröße bis zu 10 000 to (in Europa) bei Drücken bis zu 8000 bar. Die Werkzeuge bestehen daher aus hochfesten, warmfesten Werkzeugstählen. Je größer und komplexer ein Werkzeug ist, umso größer ist die im Allgemeinen vorwiegend statische Beanspruchung des Werkzeugstahls. Bei großen Werkzeugen in Verbindung mit schwerpressbaren Legierungen beobachtet man aber in Verbindung mit den beim Strangpressen herrschenden Temperaturen häufig bereits Setzungen und Brüche im Low-Cycle-Fatigue Bereich. (Ein Pressbolzen stellt dann einen Lastwechsel dar.)

Moderne Hohlprofilwerkzeuge sind bei komplexen Mehrkammer-Querschnitten ein verwirrendes Gebilde von Dornen, welche die Innenkonturen bilden und speisenden Kanälen, durch die das Material unter hohem Druck hindurch gepresst wird. Dazwischen muss die tragende Struktur noch ausreichende Tragfähigkeit und Steifigkeit besitzen. Fehlt es an Festigkeit, so geht das Werkzeug rasch zu Bruch, fehlt es an Steifigkeit, so haben die Verformungen des Werkzeugs Auswirkungen auf die Form des Querschnitts (Toleranzen). Es versteht sich daher von selbst, dass sich hierdurch auf die Gestaltungsmöglichkeiten des Querschnitts Einschränkungen ergeben.

Es ist daher fast unmöglich dem werkzeugtechnischen Laien verbindliche Konstruktionsregeln für die Querschnittgestaltung an die Hand zu geben. Mit **Bild B.3** wird versucht an einer Reihe von Beispielen ein Gefühl für die Gestaltung von Querschnitten unter Berücksichtigung werkzeugtechnischer Belange zu vermitteln. Die Beispiele in diesem Bild vermitteln aber auch einen Überblick, welche konstruktiven Möglichkeiten die Strangpresstechnologie an sich bietet.



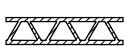
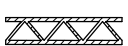
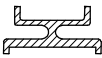
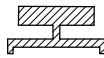


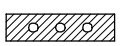
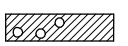
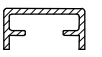
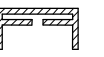



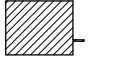
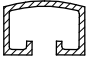
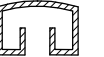



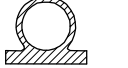
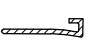
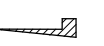


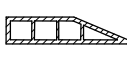
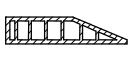
















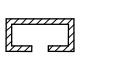
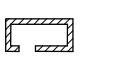
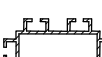







| günstig | ungünstiger | | günstig | ungünstiger | | günstig | ungünstiger | |
|---|---|--------|---|---|---------|---|---|---------|
|  |  | 1 * |  |  | 10 |  |  | 19 * |
|  |  | 2 |  |  | 11 |  |  | 20 * |
|  |  | 3 |  |  | 12 * |  |  | 21 |
|  |  | 4 |  |  | 13 * |  |  | 22 |
|  |  | 5 * |  |  | 14 |  |  | 23 |
|  |  | 6 * |  |  | 15 |  |  | 24 |
|  |  | 7 * |  |  | 16 |  |  | 25 |
|  |  | 8 * |  |  | 17 |  |  | |
|  |  | 9 * |  |  | 18 * |  |  | |

Bild B.3: Beispiele für grundlegende empirische Regeln bei der Gestaltung von Strangpressquerschnitten [1]

*) Die nachstehenden Anmerkungen in Bezug auf mögliche Herstellprobleme gelten bei diesen Beispielen vor allem für große Querschnitte.

Zu Bild B.3 gehören die folgenden Erläuterungen:

- 1) Hohlräume (= Werkzeugdorne) möglichst symmetrisch anordnen
- 2) Offene Schraubkanäle haben bessere Maßhaltigkeit zueinander; längere Werkzeugstandzeiten
- 3) Spitzen abrunden (Füllprobleme beim Querschnitt; höhere Pressgeschwindigkeiten)
- 4) Abgerundete Ecken sind strangpresstechnisch allgemein von Vorteil
- 5) Schmale Schlitz nur dann, wenn unbedingt nötig, sonst zur Verbesserung der Öffnungsmaßtoleranzen Zwischensteg(e) (→Hohlprofil) anordnen.
- 6) Wechselnd unterschiedlich hohe bzw. konische Kühlrippen erhöhen die Werkzeugstandzeiten.
- 7) Fließtechnisch ungünstige Formen verlangsamen die Produktion und ergeben oft Toleranzprobleme (in Bezug auf Querschnitt wie auch auf Geradheit und Verwindung).

- 8) wie 7)
- 9) Bei vielfach abgeknickten offenen Querschnitten lassen sich enge Toleranzen durch zusätzliche Elemente und Umgestaltung zum Hohlprofil (Werkzeugkosten) oft besser einhalten.
- 10) Bei Hohlachslattenprofilen haben Formen mit leicht trapezförmigen Kammern (anstatt ideal dreieckförmig = Fachwerk) den Vorteil deutlich höherer Werkzeugstandzeiten.
- 11) Bohrungen sollten stets symmetrisch vom Material umflossen werden und gleichmäßig über den Querschnitt verteilt sein. (Werkzeugstandzeiten und Toleranzen der Lochpositionen).
- 12) Schmale Fortsätze an massigen Querschnitten sind nur schwer (oder gar nicht) zu füllen.
- 13) Massenanhäufungen sind zu vermeiden (Einfluss auf Formtreue, d.h. Querschnittstoleranzen).
- 14) Kammern möglichst gleich groß und über den Querschnitt gleichmäßig verteilt anordnen.
- 15) Bei weiten, gekrümmten Konturen lassen sich sogar "normale" Toleranzen nur schwer einhalten (richtproblematisch). Fixieren von Eckpunkten verbessert die Situation deutlich.
- 16) Ziehharmonikaartige Querschnitte sind schwierig in geforderten Toleranzen zu halten (Breite und Ebenheit).
- 17) Halbhohlprofile mit unsymmetrischen Kammern haben kürzere Werkzeugstandzeiten und sind schwieriger in Bezug auf Toleranzen.
- 18) Zu schmale bzw. zu tiefe Schlitz in massigen Querschnitten müssen vermieden werden.
- 19) Die Verteilung der Massen (Wanddicken) längs der linearen Profilkontur sollte möglichst gleichmäßig sein.
- 20) Die auskragenden Werkzeugpartien bei zu schmalen bzw. zu breiten eingeschlossenen Flächen von Halbhohlprofilen sind stark bruchgefährdet.
- 21) Konturen, welche die Tragfähigkeit der auskragenden Werkzeugpartien von Halbhohlprofilen zu stark schwächen, sind zu vermeiden.
- 22) Gleichmäßiger Fließwiderstand entlang der Profilkontur ist anzustreben (Spitze Partien ergeben Füllprobleme; massige Partien eilen vor und ergeben Toleranzprobleme).
- 23) Die Kombination dünner und dicker Querschnittspartien ist zu vermeiden.
- 24) Zu dünne bzw. zu breite Wandungen bei Hohlprofilen vermeiden (Einfallen dieser Partien vor allem bei Legierungen, die mit Wasser abgeschreckt werden müssen; Toleranzproblematik; ggf. erhöhter Ausschuss, da Fehler nicht korrigierbar): Zwischenunterstützungen anordnen.
- 25) Ziehharmonikaeffekte bei Hohlprofilen vermeiden; durchlaufende Wandpartien gewähren bessere Maßhaltigkeit und ggf. auch bessere Richtbarkeit.

B.2 Regeln für Rundrohre und rundrohrähnliche Querschnitte

Rundrohre (und ähnlich einfache Querschnitte) können auch nahtlos ("Fertigung über Dorn") hergestellt werden. Das geschieht entweder, weil die Anwendung nahtlose Rohre fordert oder weil aus technologischen Gründen (hochfeste Werkstoffe) deren Fertigung nur über Dorn möglich ist. Einen Überblick über die Fertigungsmöglichkeiten bei dieser speziellen Situation gibt **Tabelle B.1**. Die Tabelle enthält neben den Angaben für naht-

lose Rohre auch Angaben über die Fertigungsmöglichkeiten von Rohren mit Pressnähten, die mittels sogenannter Spezialwerkzeuge/ Kammerwerkzeuge hergestellt werden. Diese Methode wird in der Praxis auch vorzugsweise angewendet, weil sie die größere Formenvielfalt ermöglicht und wirtschaftlicher ist.

| Legierungstyp | Legierungen Bezeichnung nach EN 573 | | Abschreck- medium | Wanddicken bei Ferti- gung über Dorn | | | | Wanddicken bei Ferti- gung mit Spezialmatrize | | | |
|--------------------------------------|--|-----------------------|---|---|-----|----------|-----|--|-----|----------|-----|
| | num. EN AW- | chem. symb. EN AW- | | als Beispiel für | | | | als Beispiel für: | | | |
| | | | | Øa = 200 | | Øa = 400 | | Øa = 200 | | Øa = 400 | |
| | | | | min | max | min | max | min | max | min | max |
| mittelfest, aushärtbar | 7020 | AlZn4,5Mg1 | Luft | 5 | | 8 | | 5 | 20 | 8 | 20 |
| | 6082 | AlSi1MgMn | Wasser | 5 | 75 | 8 | 160 | 5 | 28 | 8 | 28 |
| | 6060/6063 | AlMgSi/ AlMg0,7Si | Luft | 5 | | 7 | | 3 | 30 | 7 | 30 |
| hochlegiert, nicht aushärtbar | 5083 | AlMg4,5Mn | Legierungen werden nicht abgeschreckt | 5 | | 8 | | -- | -- | -- | -- |
| | 5754 | AlMg3 | | 5 | 75 | 10 | 160 | -- | -- | -- | -- |
| | 5454 | AlMg3Mn | | 5 | | 10 | | | | | |
| niedrig legiert, nicht aushärtbar | 5051A *) | AlMg2(B) *) | Legierungen werden nicht abgeschreckt | 5 | | 8 | | 5 | 20 | 8 | 20 |
| | 3103 | AlMn1 | | 5 | 75 | 10 | 160 | 5 | 22 | 10 | 22 |
| | 1050A *) | Al99,5 *) | | 5 | | 12 | | 5 | 30 | 12 | 30 |

Tabelle: B.1: Herstellmöglichkeiten von Rohren in Abhängigkeit von Legierung und Strangpresstechnologie [2]. Zur allgemeinen Information sind hier auch Legierungen aufgeführt, die nicht in EN 1999-1-1 aufgeführt sind.

Rohre sind nicht nur Mittel zum Leiten von Flüssigkeiten und Gasen oder das Ausgangsmaterial für tragende Konstruktionen. Sie sind häufig auch Ausgangsmaterial für maschinenbauliche Anwendungen: sie werden bearbeitet, Teile werden angeschweißt. Hier kann das Aluminiumprofil in vielen Fällen mit dem Stahl konkurrieren, da die konstruktiven Zusatzelemente bereits mit dem Rohr verbunden sind (**Bild B.4**). Damit wird Arbeit eingespart, und da nicht geschweißt werden muss (Schweißverzug), sind die Fertigungstoleranzen wesentlich kleiner.

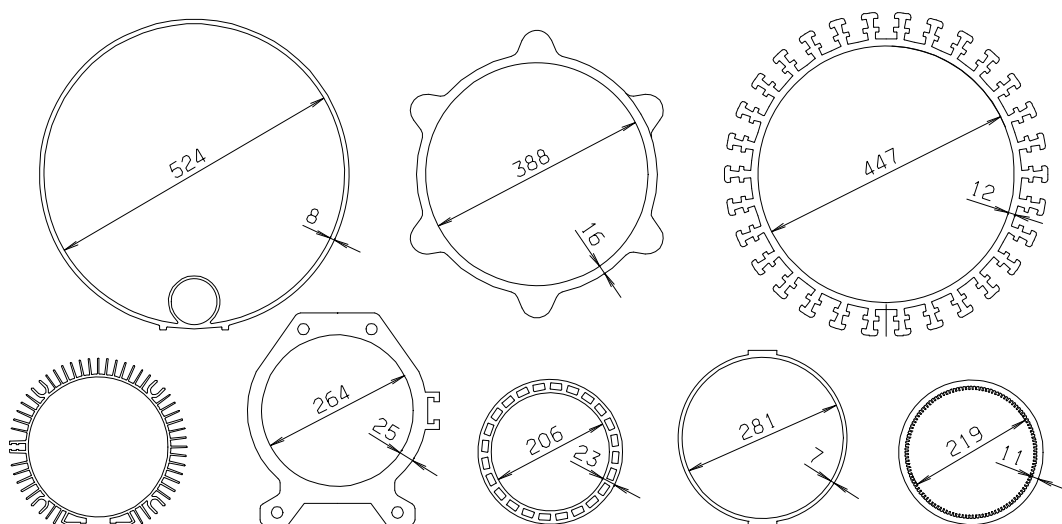


Bild B.4: Rohrquerschnitte mit integrierten Zusatzelementen [1]

B.3 Materialfragen

Das Kapitel Legierungswahl ist für den Anwender eng verbunden mit den Begriffen Festigkeit und Wärmebehandlung, mit dem Begriffen Formgenauigkeit und (seltener) Spannungsarmut der Profile und letztlich allumfassend mit dem Begriff der Wirtschaftlichkeit, d.h. dem Preis. Die Frage der Korrosionsbeständigkeit darf aber auch nicht vergessen werden.

Die nachfolgende **Tabelle B.2** zeigt eine Übersicht über die Palette der Legierungen, wobei der Übersichtlichkeit halber lediglich typische Vertreter aufgeführt sind. Neben den Festigkeitswerten sind hier eine Reihe anderer Legierungseigenschaften aufgeführt, wie Umformverhalten und Art der Abschreckung aus Lösungsglüh-temperatur. Diese Eigenschaften sind in vielen Fällen entscheidend für die Wahl einer Legierung. So steigt der Umformwiderstand mit der Festigkeit. Damit steigen aber auch die strangpresstechnisch erforderlichen Mindestwanddicken und es muss die Profilkomplexität abnehmen. Falls nicht gerade Beulprobleme vom Konstrukteur zu bewältigen sind, wären bei hohen Festigkeiten aus rein statischen Gründen oft nur geringe Wanddicken erforderlich, damit so Gewicht eingespart werden kann. Ist das aber aus fertigungstechnischen Gründen nicht möglich, so ist es auch nicht sinnvoll einen höherfesten Werkstoff auszuwählen.

Interessant sind Vergleiche der typischen Pressgeschwindigkeiten - das hat direkt etwas mit Kosten zu tun. Hier liegen die niedrig legierten AlMgSi-Varianten (EN AW-6060, EN AW-6063, EN AW-6106) ganz vorne. Betrachtet man weiterhin bei diesen Legierungen noch die Machbarkeit von Hohlprofilen und die minimalen Wanddicken (Umformwiderstand), dann wundert es nicht, dass diese Legierungen in der Anwendung dominieren. Dazu kommen noch die relativ gute Korrosionsbeständigkeit und die im Allgemeinen gute Anodisierbarkeit. Mit der Tatsache, dass diese Legierungen nur mittelfest sind, wird man im Allgemeinen leicht fertig, falls das überhaupt von Belang ist. Nötigenfalls muss eben konstruktiv entsprechend umgestaltet werden, d.h. es wird eine größere Bauhöhe gewählt.

Der Konstrukteur muss also immer Kompromisse zwischen Festigkeit, Wanddicke und Kosten treffen. Es gibt allerdings Fälle, bei denen die Forderung nach extremem Leichtbau Priorität hat. Dann kann es sinnvoll sein, hochfeste Werkstoffe mit größerer Wanddicke zu pressen und danach spanend die Wandungen auf die vorgesehenen, geringeren Maße zu bringen.

| | Bezeichnung gem. EN 753 | | Frühere Bez. (DIN 1725) | Zu-stand gem. EN 515 | R _m /R _{p0,2} A ₅ | | mittl. Press-temp. °C | rel. Um-form-wider-stand ¹⁾ | Press-geschw. | Hohl-profile über Spezial-matrize | Luftab-schreck-bar |
|-----------|-------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|--|----|-----------------------|--|---------------|-----------------------------------|--------------------|
| | Num. Schreibw. EN AW- | Symb. Schreibw. EN AW- | | | gem. EN 755-2 N/mm ² | % | | | | | |
| a | 6060 | AlMgSi | AlMgSi0,5 | T6 | 170/140 | 8 | 480 | 0,9 | (a) | (a) | (a) |
| | 6063 | AlMg0,7Si | AlMgSi0,5 | T6 | 215/160 | 10 | 480 | "1" | (a) | (a) | (a) |
| | 6005A | AlSiMg(A) | AlMgSi0,7 | T6 | 270/225 | 8 | 510 | 1,3 | (b) | (b) | (b) |
| | 6082 | AlSi1MgMn | AlMgSi1 | T6 | 310/260 | 10 | 520 | 1,6 | (c) | (c) | Nein (c) |
| | 7020 | AlZn4,5Mg1 | AlZn4,5Mg1 | T6 | 350/290 | 10 | 480 | 2,3 | (d) | (e) | (a) |
| | 2017A | AlCu4Mg1 | AlCuMg1 | T4 | 380/260 | 10 | 420 | 3,3 | (e) | Nein | Nein |
| | 7075 | AZn5,5MgCu | AlZnMgCu1,5 | T6 | 530/460 | 7 | 420 | 3,8 | (e) | Nein | Nein |
| na | 5051(A) | AlMg2(B) | AlMg1,8 | H112 | 150/60 | 15 | 480 | 2,0 | (c) | (e) | |
| | 5754 | AlMg3 | AlMg3 | H112 | 180/80 | 14 | 460 | 2,9 | (d) | Nein | Ent-fällt |
| | 5083 | AlMg4,5Mn0,7 | AlMg4,5Mn | H112 | 270/125 | 12 | 440 | 3,5 | (e) | Nein | |
| | 1050A | Al99,5 | Al99,5 | H112 | 60/20 | 38 | 420 | 0,6 | (a) | (b) | |

1) k_f -Wert bezogen auf k_f von EN AW-6063 ($\varphi = 1 \text{ s}^{-1}$);

Erläuterungen:
a: aushärtbare Werkstoffe; **na:** nicht aushärtbare Werkstoffe;

Typ. Pressgeschwindigkeit: **(a):** sehr hoch; **(b):** hoch; **(c):** mittel; **(d):** gering; **(e):** sehr gering

Hohlprofile mittels Spezial-/Kammermatrizen: **(a):** fast unbegrenzte Formenvielfalt; **(b):** wenig eingeschränkte Formenvielfalt; größere Wanddicken; **(c):** eingeschränkte Formenvielfalt; größere Wanddicken; **(d):** wie (c) jedoch höhere Metergewichte; **(e):** deutlich eingeschränkte Formenvielfalt; größere Wanddicken, größere Metergewichte; **Nein:** Spezialmatrizen nicht anwendbar; Hohlprofile mit 1 Kammer u.U. über Dornfertigung

Luftabschreckbar: **(a):** fast immer möglich, nur bei sehr dicken Wandungen Wasser erforderlich
(b): fast immer möglich, nur bei mittleren Wandungen Wasser erforderlich
Nein (c): Nur in Ausnahmefällen möglich
Nein: Für eine vollwertige Wärmebehandlung ist stets Abschrecken mit Wasser erforderlich.
Entfällt: Naturharte Legierungen erfahren keine Wärmebehandlung; Abschrecken mit Wasser allenfalls aus betrieblichen Gründen

Tabelle B.2 Technologische Eigenschaften von Aluminiumlegierungen . [1] [Die grau hinterlegten Legierungen sind keine EC 9-Legierungen, wurden aber zum besseren Verständnis des Systems mit aufgelistet.]

Neben diesen Restriktionen aus den Festigkeiten und damit Formänderungswiderständen sind Probleme zu beachten, die aus der Wärmebehandlung resultieren. Die letzte Tabellenspalte der **Tabelle B.2** gibt Aufschluss über die Abschrecknotwendigkeiten. Beim Abschrecken mit Wasser ist mit erhöhtem Verzug, mit größeren Herstelltoleranzen sowie mit für spanende Bearbeitung nicht zu vernachlässigenden inneren Spannungen zu rechnen. Alles Konsequenzen, die in der Praxis von großem Nachteil sein können, die aber meist vermeidbar sind, wenn ihnen rechtzeitig bei der Planung Rechnung getragen wird.

Anhang C

Anwendungsfelder des Eurocode 9

Nachdem konstruktive Aluminiumanwendungen viel weniger in's Auge fallen als Konstruktionen aus Beton, Stahl oder Holz wird vielfach die Frage gestellt, wo denn die Konstruktionen zu finden sind, für die der Eurocode geschaffen wurde. Dabei gibt es sehr viele Beispiele, wo nach offiziellen Vorschriften, also künftig nach dem Eurocode, bemessen wird und sei es nur in Ermangelung spezieller Vorschriften, wie im Übergangsgebiet vom konstruktiven Ingenieurbau zum konstruktiven Maschinen und Gerätebau. Bezeichnend für viele Anwendungsfelder sind dabei scheinbar untergeordnete Aluminiumanwendungen, wie Schalungen, Gerüstbauteile etc., für die aber recht interessante Mengen an Aluminium verbraucht werden.

Nachstehende Tabelle vermittelt einen Überblick über konstruktive Anwendungen und Anwendungsfelder von Aluminium.

| K | K + L | L |
|--|--|--|
| Apparate/Behälter Beleuchtungsmaste Dachprofilbleche Fahrleitungsmaste Fußgänger-Fachwerkbrücken Hallen für Klärtechnik Lärmschutzwände Leitplanken Räumerbrücken Silos Schilderbrücken Schilderpfosten Umspannstationen | Brücken Fahnenmaste Fluggastbrücken Hochspannungsmaste Inspektionsstege Off-Shore-Konstruktionen (Wohnmodule, Brücken) Tankdecken Zollhäuschen (mobil) | Auslegerkrane Autoladekrane Bergbaustempel Brückenkrane Brückenuntersuchungsgerät Gerüste Leitern Pionierbrücken Steiger Teleskop-Hebebühnen Zeltmaste |
| | K + F + L Abdeckungen Berührungsschutz Helikopterdecks | |

| K + F | F | F + L |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Abdeckungen f. Klärbecken | Fertigbalkone | Auffahrrampen |
| Bootsstege | Förderbandkonstruktionen | Baustützen |
| Dachstege | Hängbahnschienen | Behelfsstraßen |
| Dammbalken | Roboterportale | Dachschrägaufzüge |
| Fassadenpfosten | Säulenschalungen | Gerüstbohlen |
| Fassadenunterkonstruktion | Tunnelschalungen | Grabenverbaue |
| Geländer | | Grabverschalungen |
| Gewächshäuser | | Hängekranschienen |
| Hallen für Hühnerzucht | | Laderampen |
| Holztrockenhallen | | Landebahnen |
| Kuppelbauten | | Landgänge |
| Lawinenverbauungen | | Lehrgerüstträger |
| Pavillonkonstruktionen | | Sendemaste |
| Schwimmballenüberdachun- gen | | Mobile Sendemaste (telesk.) |
| Vordächer | | Schalungen |
| Wartehäuschen | | Teleskopförderanlagen |
| Wintergärten | | Tribünen |
| | | Vertikal-Bauaufzüge |
| | | Zelthallen |

Tabelle C.1: Konstruktive Anwendungen und Anwendungsfelder von Aluminium:

Einteilung nach Hauptgründen für die Verwendung von Aluminium:

K Korrosionsverhalten L geringe Masse (Gewicht) F Funktionalität bei Strangpressprodukten

Literatur:**Normen:**

EN 1999-1-1: Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken, Teil 1-1 Allgemeine Bemessungsregeln

EN 1999-1-4: Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken, Teil 1-4 Kaltgeformte Profiltafeln

ENV 1999-1-1: Eurocode 9; Mai 1998: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten– Teil 1-1 Allgemeine Regeln- Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau

EN 485-2 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Bänder Bleche und Platten – Teil 2: Mechanische Eigenschaften

EN 515 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Halbzeug – Bezeichnungen der Werkstoffzustände

EN 754-2 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Gezogene Stangen und Rohre – Teil 2: Mechanische Eigenschaften

EN 755-2 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile – Teil 2: Mechanische Eigenschaften

EN 755-9 Aluminium und Aluminiumlegierungen - Stranggepresste Stangen, Rohre und Profile – Teil 9: Profile, Grenzabmaße und Formtoleranzen

EN 573-1 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 1: Numerisches Bezeichnungssystem

EN 573-2 Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 2: Bezeichnungssystem mit chemischen Symbolen

EN 586-2 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Schmiedestücke – Teil 2: Mechanische Eigenschaften und zusätzliche Eigenschaftsanforderungen

EN 1090-3 Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 3: Technische Anforderungen an Aluminiumtragwerke

EN 1706 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Gussstücke – Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften

EN 12020-2 Aluminium und Aluminiumlegierungen –Stranggepresste Präzisionsprofile aus Legierungen EN AW-6060 und EN AW-6063 – Teil 2: Grenzabmaße und Formtoleranzen.

EN 12258 -1 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Begriffe und Definitionen – Teil 1: Allgemeine Begriffe

Sonstige:

[1] Beiträge des Autors im Aluminium-Taschenbuch; Band 3; Düsseldorf 2003; (S. 383-419)

[2] Gitter, R., A. Ames, A. Fellhauer; Stranggepreßte Aluminiumgroßrohre und ihre spanende Bearbeitung; wt Werkstattstechnik 90 (2000) H. 9 und H.10