Vorwort

DIN 4113 ist seit 1958 die zuständige Norm-Bezeichnung für Entwurf, Berechnung, Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauwerken im Konstruktiven Ingenieurbau. Die erste Norm von 1958, unter Leitung von Prof. Weinhold in Hannover entwikkelt, war der Anfang und die Grundlage bis zum Jahr 1980. Schon damals war das nicht lineare Werkstoffverhalten von Aluminium ein Punkt besonderer Untersuchungen, und es ist so geblieben bis heute. Seit 1980 gibt es die DIN 4113 Teil 1 für Entwurf, Berechnung, Bemessung und Konstruktion von ungeschweißten Konstruktionen aus Aluminium. Sie entstand unter der Obmannschaft von Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. h.c. Dr.-Ing. E.h. Otto Steinhardt von der Technischen Hochschule in Karlsruhe und vielen weiteren Fachleuten aus Karlsruhe, Darmstadt, Stuttgart, Düsseldorf, Singen und anderswoher.

Mit zunehmendem Interesse an dem Werkstoff und aufgrund der verstärkten nationalen und internationalen Forschung gab es zwei wichtige Neuerungen, die sich darin äußerten,

1. daß neben dem Teil 1 der DIN 4113 für ungeschweißte Aluminium-Konstruktionen auch ein Teil 2 für geschweißte Aluminium-Konstruktionen mit ihren festigkeitsreduzierten Wärmeeinflußzonen im Bereich von Schweißnähten vorbereitet wurde und
2. daß zum erstenmal in einer deutschen Norm der Traglastgedanke und die Nachweise mit Hilfe von Interaktionsformeln neben den herkömmlichen Nachweisformaten im zul σ-Niveau gleichberechtigt nebeneinander standen.

Eine starke Beeinflussung erhielt die deutsche Normungsarbeit durch die internationale Zusammenarbeit in der Technischen Kommission TC 2 „Aluminium Alloys Structures" der Europäischen Konvention der Stahlbauverbände, in der im Jahr 1978 unter dem Vorsitz von Prof. Dr.-Ing. Federico M. Mazzolani von der Universitá di Napoli Federico II in Neapel in langjähriger Arbeit die „European Recommendations for Aluminium Alloys Structures" geschaffen wurden. Diese Recommendations sind übrigens der Vorläufer des heutigen Eurocode 9 (ENV 1999-1-1) für Bauwerke in Aluminium. Durch die Mitgliedschaft von Prof. Steinhardt und mir in diesem Gremium seit 1973 bzw. 1974 war der internationale Einfluß auf die deutsche Normung für Aluminium gewaltig. Die DIN 4114 für Stahlbau, die mit ihrem ω-Verfahren für die Berechnung von Knickstäben seit 1952 und vorher sehr großen Impakt auf die Normungsarbeit in den anderen europäischen Ländern hatte, wurde langsam durch andere wissenschaftliche Entwicklungen, die Interaktionsnachweise im Traglastniveau in den Vordergrund stellten, abgelöst. Hierbei spielten die Forscher Massonet und Campus in Belgien eine überragende Rolle. Aus dieser internationalen Zusammenarbeit erwuchs die Idee, auch in Deutschland für die Stabilitätsberechnungen von Druckstäben Interaktionsnachweise aufzunehmen. Traditionell jedoch behielt das bewährte ω-Verfahren für die Stabilitätsberechnungen von Druckstäben als Grundidee der DIN 4114 von Klöppel parallel seine wichtige Stellung. Die große Schwierigkeit, zwei Berechnungsverfahren aufzunehmen, war, daß sich bei Fallberechnungen nach dem einen und nach dem anderen Verfahren nicht zwei nennenswert von einander

verschiedene Belastbarkeiten ergeben durften. Man erzielte schließlich Einigkeit, das Berechnungsverfahren I und das Berechnungsverfahren II zum Nachweis von Druckstäben parallel aufzunehmen.

Der beabsichtigte Teil 2 der Norm DIN 4113 enthielt sehr viele Neuerungen zu den Festigkeiten einer Schweißnaht und der benachbarten Wärmeeinflußzone, die ganz frisch und erst in einem gewissen Rahmen durch entsprechende nationale und internationale Forschungen aufgeschlossen waren und die deshalb nicht wie in der sonstigen Normung, wo bewährte Vorgehensweisen normmäßig festgeschrieben werden, allgemein anerkanntes technisches Wissen waren. Zudem mußten alle Stabnachweise auf das Phänomen der Entfestigung in Schweißnahtbereichen umgestellt werden. Dies bewirkte, daß der Teil 2, mehrfach als Gelbdruck (Normentwurf) verbessert, der Öffentlichkeit vorgelegt und beraten wurde. Er blieb schließlich lange Gelbdruck und wurde durch die entsprechende amtliche Richtlinie des damaligen Instituts für Bautechnik für geschweißte Aluminium-Konstruktionen, für Schweißnahtfestigkeiten und für Schweißerprüfungen ergänzt.

Mit dem Teil 1, dem Gelbdruck des Teiles 2 und der IfBt-Richtlinie konnten Aluminium-Konstruktionen in Deutschland nach gültigen Vorschriften erstellt werden. Die Menge der Aluminium-Bauten blieb aber klein und auf bestimmte Aufgabenfelder begrenzt gegenüber Bauwerken aus Stahl oder anderen Baustoffen.

Mittlerweile sind auch im Zuge der Erarbeitung anderer nationaler und europäischer Aluminium-Vorschriften zahlreiche Neuerungen bekannt geworden, die durch Neubearbeitung der DIN 4113 dem Anwender zugänglich gemacht werden sollten. Hierunter fällt die Umstellung der Werkstoffbezeichnungen auf das amerikanische Dezimalsystem; dennoch werden die bisherigen deutschen Bezeichnungen, die sich auf die chemische Zusammensetzungen beziehen und die Legierungsanteile enthalten, parallel beibehalten. Darüber hinaus handelt es sich ganz wesentlich um die Ergänzung und Erweiterung der Werkstoffe, ihrer Festigkeitsangaben und ihrer zulässigen Spannungen für Bauteile und Lochleibungsdrücke bei hochfesten stählernen Schrauben. Mit dem Änderungsblatt A1 zu DIN 4113-1:1980-05, das 22 Seiten umfaßt und im Jahr 2002 herauskommen wird, und der endgültigen DIN 4113-2 „Berechnung geschweißter Aluminiumkonstruktionen", die ebenfalls im Jahre 2002 herauskommen wird, sind die Neuerungen verfügbar. Der zuständige NABau 08.07.00 hat sich entschieden, keine Umstellung der DIN 4113 auf das semiprobabilistische Sicherheitskonzept vorzunehmen, da zu erwarten ist, daß die zuständige Euro-Norm EN 1999 mit ihren Untergliederungen bald fertiggestellt sein wird. Aus DIN 4113-1 mit dem Änderungsblatt A1 und aus DIN 4113-2 wurden sämtliche Regelungen zu Herstellung und Ausführung herausgenommen, diese Angaben werden in einem weiteren Normenblatt DIN 4113-3 zusammengefaßt, das sich eng an die DIN 18800-7:2002-09 des Stahlbaus anlehnt und gleichzeitig auch Vorlage für die zuständige Arbeitsgruppe der europäischen Kommission CEN/TC 135 sein soll.

Auf internationalem Sektor wurde in der Unterkommission CEN/TC250/SC9 nach relativ kurzer und zügiger Bearbeitungszeit im Jahr 1997 der Eurocode 9 für Aluminium-Bauwerke fertiggestellt und 1998 als europäische Vornorm die ENV 1999-1-1, ENV 1999-1-2 und ENV 1999-2 in englisch, deutsch und französich herausgegeben. Die Vornorm ENV 1999-1-1 gilt allgemein für Aluminium-Bauwerke (Design of Structures), die Vornorm ENV 1999-1-2 gilt für Nachweise der Feuerwiderstandsdauern von Aluminium-Bauwerken (Fire Design) und die Vornorm ENV 1999-2 gilt für

ermüdungsbeanspruchte Aluminium-Bauwerke (Structures Susceptible to Fatigue). Diese Vorschriften sind im Gegensatz zu den Eurocodes 2, 3 und 4 für Massivbau, Stahlbau und Verbundbau nicht als mit den deutschen Normen gleichrangige und verwendbare Bemessungsnormen eingestuft. Daher gab es in der Erprobungsphase auch keine effektiven Vergleichsanwendungen.

Dennoch hat jetzt nach einer dreijährigen Gültigkeitsdauer die sogenannte „conversion phase" begonnen, in der die Umschreibung der ENV in eine EN-Norm erfolgen muß. Diese conversion phase läuft zur Zeit. Darüber hinaus steht international im CEN/TC 135 die Schaffung einer europäischen Vorschrift „Execution and Erection" an, so daß aus der jetzigen ENV 1999-2 (Structures Susceptible to Fatigue) der umfangreiche Anteil über Herstellung und Ausführung herausgenommen werden kann.

Ich habe festgestellt, daß fortschrittliche Bauvorschriften heute nur noch international im Austausch und in Zusammenarbeit zwischen Herstellern, Anwendern, Wissenschaftlern und Bauaufsicht entstehen können. Auf dem Gebiet des Aluminiums ist dies in geradezu klassischer Weise erfolgt. Das vorliegende Buch soll für Anwender und Studierende den heutigen gesicherten Kenntnisstand der Aluminium-Bauweise darstellen sowie Hilfen bei Entwurf, Berechnung und Konstruktion geben. Es stellt einige Ausführungsbeispiele zusammen, aus welchen erkannt werden kann, daß nicht einfach die Übertragung der Stahlbaudenkweise auf den Entwurf mit Aluminium das Optimum ist, sondern daß durch das Aussehen, die Korrosionsfestigkeit, den nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf, die Aushärtbarkeit und die Entfestigung im engen Bereich von Schweißnähten etc. immer wieder Ideen gefragt sind, um die besonderen Vorteile dieses Werkstoffes zu nutzen und seine Nachteile zu beherrschen. Viele Architekten haben dies erkannt und überzeugen Bauherren von der vielseitigen Verwendbarkeit, der Individualität, der Schönheit und von den reduzierten Wartungserfordernissen von Bauwerken und Bauteilen aus Aluminium, selbst wenn dieser Werkstoff etwas teurer ist.

Meine wissenschaftliche Mitarbeiterin, Frau Dipl.-Ing. Ulrike Eberwien, hat die Völligkeitsmethode zur Ermittlung der nichtlinearen Momenten-Krümmungs-Beziehungen und des Tragmomentes von symmetrischen Aluminium-Querschnitten entwickelt und im Abschnitt 4.4 niedergelegt. Damit können für ungeschweißte und geschweißte, symmetrische Querschnitte der Klassen 1 und 2 relativ einfach und genau auch plastische Tragreserven nutzbar gemacht werden. Ich möchte ihr für diese Mithilfe beim Gelingen des Werkes bestens danken. Die technischen Zeichnungen wurden zum großen Teil von Frau Gudrun Hesse von der TUHH in sorgfältiger Ausführung erstellt, dafür danke ich ihr bestens. Ich danke auch den Firmen, die mir bei der Zusammenstellung des Bildmaterials von ausgeführten Bauwerken behilflich waren, und den Gesprächspartnern für ihre wertvollen Anregungen und Diskussionsbeiträge.

Hamburg, im Herbst 2002 Günther Valtinat

Inhaltsverzeichnis

1	**Einführung**	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Aluminium im Ingenieurbau	2
1.3	Überblick über Werkstoffe und Bezeichnungen	4
1.4	Wärmeeinflußzonen	4
1.5	Korrosionsfestigkeit	5
2	**Werkstoffe**	7
2.1	Aluminium-Legierungen	7
2.2	Werkstoff-Gesetze	12
2.3	Aluminium-Gußlegierungen	19
2.4	Werkstoffe für Verbindungsmittel	19
2.4.1	Schrauben, Muttern, Scheiben und Niete	19
2.4.2	Schweißzusatzwerkstoffe	22
2.4.3	Werkstoffgesetze der Wärmeeinflußzone (WEZ) und der Schweißnähte	22
2.4.4	Kleben	27
3	**Grundlagen der Berechnung und Bemessung**	29
3.1	Vorbemerkungen	29
3.2	Das moderne Bemessungskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten und Kombinationsfaktoren	30
3.2.1	Nachweis der Tragsicherheit	30
3.2.2	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit, Teilsicherheitsbeiwerte, Kombinationsbeiwerte	32
4	**Bauteile**	35
4.1	Zugstäbe	35
4.2	Druckstäbe ohne Knickgefahr	38
4.3	Biegestäbe	38
4.3.1	Vorbemerkungen	38
4.3.2	Klasseneinteilung der Querschnitte	41
4.3.3	Elastische Grenzlast	42
4.3.4	Plastische Grenzlast	43
4.3.5	Dünnwandige Querschnitte mit lokaler Beulgefahr	44
4.3.6	Biegemoment und Querkraft	45
4.3.7	Versagen durch lokales Ausbeulen oder durch Instabilität	45
4.4	Die Völligkeitsmethode: Ein direktes Verfahren zur Ermittlung der Momenten-Krümmungs-Beziehung und des Tragmomentes eines symmetrischen Aluminiumquerschnittes	46
4.4.1	Einleitung	46
4.4.2	Biegemoment am Rechteckquerschnitt	46

4.4.3 Vereinfachte Berechnung von I-Querschnitten 48
4.4.4 Gültigkeit für andere symmetrische Querschnitte 51
4.4.5 Geschweißte Querschnitte 54
4.4.6 Zusammenfassung 58
4.5 Stabilitätsnachweise für Druckstäbe nach DIN 4113 Teil 1 und Teil 2 59
4.5.1 Einführung und Grundlagen. 59
4.5.2 Spannungs-Dehnungs-Gesetz der DIN 4113 als dreiteiliger Sekantenzug. 59
4.5.3 Tragmodell für die nichtlineare Spannungsverteilung in einem Querschnitt und Ermittlung des Widerstandes. 61
4.5.4 Übergang auf den steglosen Querschnitt (Sandwich-Querschnitt) . . 64
4.5.5 Interaktionsformeln für den Knicknachweis nach DIN 4113 Teil 1, Rechnungsgang I 69
4.5.6 Biegedrillknicken 70
4.6 Druckstäbe 73
4.6.1 Allgemeines 73
4.6.2 Allgemeine Nachweisformel für das Stabilitätsversagen des planmäßig mittig gedrückten Stabes nach ENV 1999-1-1 75
4.6.3 Biege-Knicknachweis für den planmäßig mittig gedrückten Stab nach ENV 1999-1-1 75
4.6.4 Biege-Knicknachweis für den planmäßig außermittig gedrückten Stab nach ENV 1999-1-1 76
4.6.5 Biegedrillknicknachweis für den planmäßig mittig gedrückten Stab nach ENV 1999-1-1 79
4.6.6 Biegedrillknicknachweis für den planmäßig außermittig gedrückten Stab nach ENV 1999-1-1 79

5 Lokales Beulen und Plattenbeulen 81
5.1 Schlankheitsparameter β und Grenzwerte für die Einstufung in Querschnittsklassen 81
5.2 Nachweis einer dünnwandigen Stütze aus einem Rechteckhohlprofil unter Normalkraft- und Biegebeanspruchung nach DIN V ENV 1999-1-1: 1998 82
5.2.1 System, Querschnitt, Belastung und Nachweisformate. 82
5.2.2 Zuordnung der Querschnitte zur Querschnittsklasse. 84
5.2.3 Bemessungswiderstand auf Knicken um die y-y-Achse (starke Achse) für die reine Normalkraft N_{Ed} 87
5.2.4 Bemessungswiderstand auf Knicken um die y-y-Achse (starke Achse) für die kombinierte Einwirkung von Normalkraft N_{Ed} und Biegemoment $M_{y,Ed}$ 88
5.2.5 Bemessungswiderstand auf Knicken um die z-z-Achse (schwache Achse) für die Einwirkung einer reinen Normalkraft N_{Ed} 89
5.2.6 Nachweis der Tragsicherheit des Stützenquerschnitts im Bereich der Schweißnähte an der Kopf- und Fußplatte. 90

6	**Verbindungen**	91
6.1	Allgemeines	91
6.2	Geschraubte und genietete Verbindungen	93
6.2.1	Einführung und Wirkungsweise	93
6.2.2	Loch- und Randabstände	94
6.2.3	Scherverbindungen mit Kraftübertragung senkrecht zur Schraubenachse bzw. zur Nietachse	95
6.2.4	Zugverbindungen mit Kraftübertragung in Richtung der Schraubenachse bzw. der Nietachse	97
6.2.5	Kombinierte Beanspruchung von Schraubenverbindungen	98
6.2.6	Gleitfeste vorgespannte Verbindungen (GV-Verbindungen mit HV-Schrauben)	98
6.2.7	Kombinierte Beanspruchung vorgespannter Schraubenverbindungen durch Zug- und Scherkräfte	99
6.2.8	Kontaktkräfte	100
6.2.9	Lange Schraubenanschlüsse	101
6.2.10	Anschlüsse mit kombinierter Abscher- und Längskraftwirkung	102
6.2.11	Einschnittige Schraubenverbindungen	103
6.3	Augenstäbe und Bolzenverbindungen	104
6.4	Schweißverbindungen	106
6.4.1	Allgemeines	106
6.4.2	Schweißverfahren und Schweißnahtvorbereitungen für Verbindungen in Aluminium-Konstruktionen	106
6.4.3	Die Wärmeeinflußzone WEZ bei Schweißungen von Aluminium	108
6.4.4	Bemessungsformeln für Schweißverbindungen	111
6.4.4.1	Stumpfnähte	111
6.4.4.2	Kehlnähte	112
6.4.4.3	Tragsicherheitsnachweise in der WEZ bei Zugbeanspruchung	115
6.4.4.4	Tragsicherheitsnachweise in der WEZ bei Schubbeanspruchung	116
6.4.4.5	Kombinierte Scher- und Zugbeanspruchungen	118
7	**Konstruktive Hinweise**	119
7.1	Gewichtsvergleich zwischen Aluminium- und Stahlquerschnitten	119
7.2	Aluminiumkonstruktionen	125
7.2.1	Konstruktionen mit Schrauben- und Steckverbindungen	125
7.2.2	Aluminiumkonstruktionen mit Schweißverbindungen	132
Anhang	**Nichtlineare Momenten-Krümmungs-Beziehungen und plastische Momente von nicht geschweißten und geschweißten Aluminium-Profilen**	145
A.1	Einführung	145
A.2	Spannungs-Dehnungs-Diagramme für nicht geschweißten und geschweißten Aluminium-Werkstoff AlMgSi 1 (6062)	146
A.3	Momenten-Krümmungs-Beziehungen von nichtgeschweißten und geschweißten Aluminium-Querschnitten	152

A.4 Einfaches plastisches Moment M_{pl}, elastisches Moment M_{el} und Momente, die sich infolge Durchbiegungsbeschränkungen und Dehnungsbegrenzungen ergeben 155
A.5 Schlußfolgerungen 161

Literaturverzeichnis 163

Stichwortverzeichnis 167

4 Bauteile

4.1 Zugstäbe

Zugstäbe existieren in der Regel nicht alleine für sich selbst, sondern die durch sie zu übertragenden Kräfte müssen durch Anschlüsse in den Zugstab eingeleitet werden. Die Anschlüsse können als Einleitungskonstruktion Schraubenverbindungen mit Scher-Lochleibungs-Wirkung mit Schrauben mit Lochspiel oder mit Paßschrauben (SL-Verbindungen oder SLP-Verbindungen), gleitfeste vorgespannte Schraubenverbindungen mit HV-Schrauben mit Lochspiel oder mit HV-Paßschrauben (GV-Verbindungen oder GVP-Verbindungen), Nietverbindungen, Schweißverbindungen, Klebverbindungen, Klemmverbindungen, Steckverbindungen und dergleichen sein. In den meisten Fällen der Einleitung größerer Kräfte in den Zugstab schwächen die Verbindungen den Bruttoquerschnitt entweder durch Querschnittsreduktionen infolge Lochabzuges oder durch festigkeitsreduzierte Wärmeeinflußzonen (WEZ) infolge Schweißens. Klebverbindungen, Klemmverbindungen, Steckverbindungen und sehr oft auch GV- bzw. GVP-Verbindungen besitzen nur geringe oder keine Beeinträchtigungen im Anschlußbereich.

Das Versagen eines Zugstabes kann wie folgt definiert werden:

- Versagenszustand 1: Durch Plastizieren des Bruttoquerschnittes in denjenigen Stabbereichen, wo der Bruttoquerschnitt vorliegt.
- Versagenszustand 2: Durch Bruchversagen in den geschwächten Anschlußbereichen.

Der Versagenszustand 1 ist mit ausreichender Duktilität verbunden, was in statisch unbestimmten, redundanten Systemen Kraftumlagerungen und/oder Systemumlagerungen ermöglicht. Vor einem Versagen treten im allgemeinen große Verformungen auf. Der Versagenszustand 2 ist in der Regel weniger bis erheblich weniger duktil als der Versagenszustand 1. Wenn der verbleibende Nettoquerschnitt in einem geschraubten Anschluß oder der verbleibende wärmebeeinflußte Querschnitt in einem geschweißten Anschluß erheblich geringere Festigkeiten hat als der Bruttoquerschnitt des Stabes, dann wird hier nach Überwinden der lokalen Plastizitätsgrenze die Bruchfestigkeit erreicht, bevor es im restlichen Zugstab zu Plastizierungen gekommen ist. Dann tritt schon nach sehr geringen Verformungen Bruchversagen ein. Gelingt es dagegen, das Verhältnis von Nettoquerschnitt eines geschraubten Anschlusses zum Bruttoquerschnitt des Stabes bzw. das Verhältnis des wärmebeeinflußten Querschnittes eines geschweißten Anschlusses zum Bruttoquerschnitt des Stabes so groß zu machen, daß vor dem Bruchversagen im Nettoquerschnitt bzw. im wärmebeeinflußten Querschnitt auch im Bruttoquerschnitt des Stabes deutliche Plastizierungen auftreten, dann sind vor dem Bruchversagen größere Duktilitäten gegeben, mit welchen Kraftumlagerungen und/oder Systemumlagerungen ermöglicht werden. Solche Fälle können noch als duktil angesehen werden. Nachfolgend soll hier das vorgenannte Prinzip an zwei Beispielen erläutert werden:

1. Beispiel: Geschraubter Anschluß eines Flachbleches (siehe Bild 4-1)

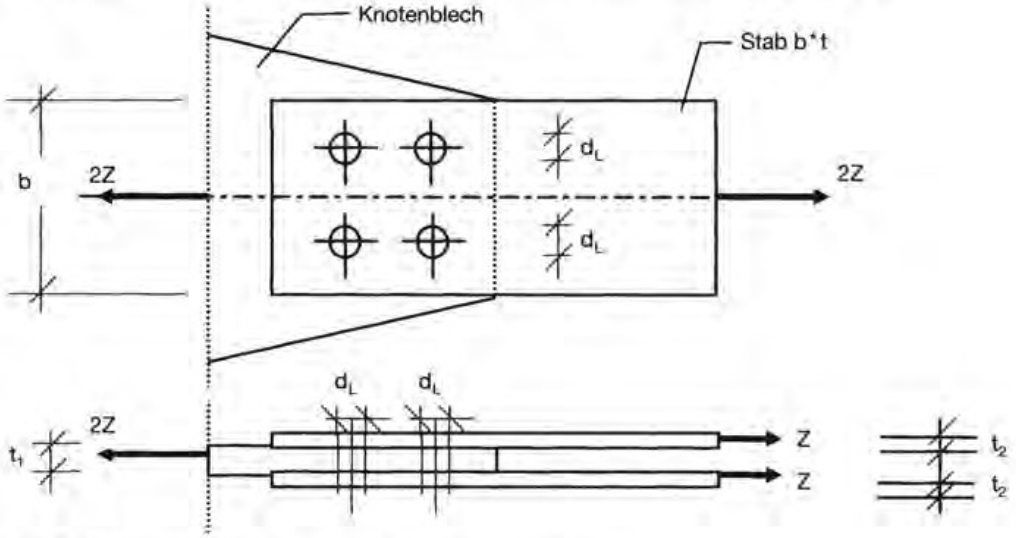

Bild 4-1 Geschraubter Anschluß eines Flachbleches

Bruttoquerschnitt $A = b \cdot t$
Lochabzug $\Delta A = 2 \cdot d_L \cdot t$
Nettoquerschnitt $A_{net} = A - \Delta A$

Die vorgenannte Duktilitätsforderung kann in folgender Gleichung ausgedrückt werden.

$$A_{net} f_u > A \cdot f_{0,2}$$

Daraus resultiert das erforderliche Verhältnis Nettoquerschnitt/Bruttoquerschnitt gemäß

$$\frac{A_{net}}{A} > \frac{f_{0,2}}{f_u}$$

2. Beispiel: Schweißanschluß eines Flachbleches mit Flankenkehlnähten (siehe Bild 4-2)

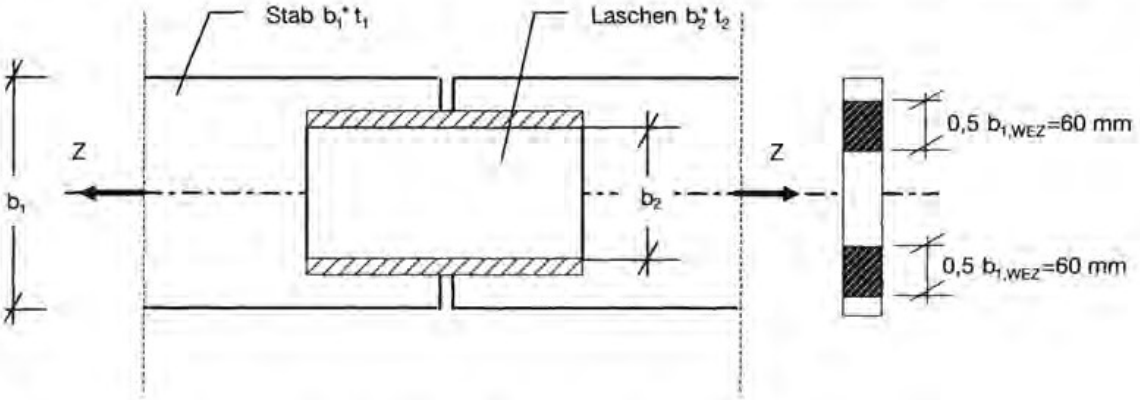

Bild 4-2 Geschweißter Anschluß eines Flachbleches mit Flankenkehlnähten

Bruttoquerschnittsfläche	$A_l = b_l \cdot t_l$
Querschnittsfläche mit WEZ	$A_{l,\varkappa} = b_l \cdot t_l - (1 - \varkappa_{WEZ})\, b_{l,WEZ} \cdot t_l$
Reduktionsfaktor	$\varkappa_{WEZ} = f_{0,2\,WEZ}/f_{0,2}$ oder $f_{WEZ,\varepsilon_{gr}}/f_{\varepsilon_{gr}}$

Die oben genannte Duktilitätsforderung führt hier zu folgender Forderung:

$$A_{l,\varkappa} \cdot f_{\varepsilon_{gr}} > A_l \cdot f_{0,2}$$

Daraus ergibt sich das Verhältnis der Querschnittsfläche in der wärmebeeinflußten Zone zur Bruttoquerschnittsfläche wie folgt:

$$\frac{A_{l,\varkappa}}{A_l} > \frac{f_{0,2}}{f_{\varepsilon_{gr}}} \Rightarrow \frac{b_l - 4 \cdot 30 \cdot (1 - \varkappa)}{b_l} > 0{,}85 \text{ für den Werkstoff 6082T6}$$

Damit muß b_l mindestens 400 mm breit sein, um diese Forderung zu erfüllen. Man erkennt daran, daß es kaum möglich sein wird, bei Werkstoffen, die durch Schweißen stark entfestigen, d.h. die einen kleinen $\varkappa_{WEZ}$-Wert haben, diese Forderung zu erfüllen.

Um Kompatibilität und ausreichende Sicherheit zu haben, ist es für den Fall, daß Grundmaterial, wärmebeeinflußtes Material und Schweißnaht in ein und demselben Querschnitt gleichzeitig auftreten, erforderlich, eine für alle Werkstoffe gültige Grenzdehnung ε_{gr} festzulegen, bei der die verschiedenen Spannungs-Dehnungs-Gesetze des Grundwerkstoffes, der Wärmeeinflußzone und der Schweißnaht noch weit genug von ihrem jeweiligen Bruchversagen ε_u entfernt sind. Es ergeben sich dann die folgenden Grenzwerte der Spannungen für

- den Grundwerkstoff: $f_{\varepsilon_{gr}}$
- die Wärmeeinflußzone: $f_{WEZ,\varepsilon_{gr}}$
- die Schweißnaht: $f_{w,\varepsilon_{gr}}$

Als Grenzdehnung ε_{gr} wurden von Mazzolani [1, 14] die Werte $5\,\varepsilon_{0,2}$ bis $10\,\varepsilon_{0,2}$ vorgeschlagen. Hier kann auf keinen Fall für die drei Materialien jeweils ihr f_u eingesetzt werden, weil bei diesen Werten sehr unterschiedliche Bruchdehnungen ε_u erreicht werden.

Für die Bemessung des Zugstabes ist die Kenntnis der Beanspruchung N_{Ed} (Bemessungsstabkraft) und der Beanspruchbarkeit $N_{t,Rd}$ erforderlich; die Nachweisformel lautet:

$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd}$$

Hierin ist, wenn der Nachweis im Stabbruttoquerschnitt geführt wird

$$N_{t,Rd} = A\, f_0/\gamma_{M1}$$

und es bedeuten weiter:

A	Bruttoquerschnitt
f_0	Grenzspannung $f_{0,2}$
$\gamma_{M1} = 1{,}1$	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand für Bauteile

Im Nettoquerschnitt von Schraubenanschlüssen ist die Beanspruchbarkeit außerdem mit dem folgenden Wert nachzuweisen:

$$N_{t,Rd} = N_{tnet,Rd} = A_{net} \cdot f_u/\gamma_{M2}$$

Hierin bedeuten:

A_{net} die Nettoquerschnittsfläche, die sich aus der Bruttoquerschnittsfläche durch Abzug der Lochquerschnittsflächen in der kritischen Rißlinie ergibt

$f_u = f_{\varepsilon_{gr}}$ Grenzfestigkeit des Bauteilwerkstoffes bei einer festgelegten Grenzdehnung

$\gamma_{M2} = 1{,}25$ Teilsicherheitswert für den Widerstand bei Verbindungen

Bei Querschnitten, die durch Schweißnähte beeinflußt sind, ist die Beanspruchbarkeit außerdem mit folgendem Wert nachzuweisen:

$$N_{t,Rd} = N_{tw,Rd} = A_\varkappa \cdot f_{\varepsilon_{gr}}/\gamma_{M2}$$

Hierin bedeuten:

$A_\varkappa = A - A_{WEZ}(1 - \varkappa_{gr})$

$\varkappa_{gr} = \min\left(f_{WEZ,gr}/f_{\varepsilon_{gr}};\ f_{w,\varepsilon_{gr}}/f_{\varepsilon_{gr}}\right)$

ε_{gr} Festgelegte Grenzdehnung, bei der sowohl im Grundwerkstoff als auch im wärmebeeinflußten Material als auch in der Schweißnaht noch kein Bruch erfolgt, im allgemeinen zwischen $5\,\varepsilon_{0,2}$ und $10\,\varepsilon_{0,2}$.

$f_{\varepsilon_{gr}}$ die für den Grundwerkstoff sich bei der Grenzdehnung ε_{gr} ergebende Spannung, $f_{0,2}$ ist konservativ

$f_{WEZ,\varepsilon_{gr}}$ die sich im wärmebeeinflußten Werkstoffbereich bei der Grenzdehnung ε_{gr} ergebende Spannung, $f_{WEZ,0,2}$ ist konservativ

$f_{w,\varepsilon_{gr}}$ die sich in der Schweißnaht bei der Grenzdehnung ε_{gr} ergebende Spannung, $f_{WEZ,0,2}$ ist konservativ

$\gamma_{M2} = 1{,}25$ Teilsicherheitsbeiwert für Verbindungen

4.2 Druckstäbe ohne Knickgefahr

Die Berechnung und Bemessung von Druckstäben ohne Knickgefahr ist nach den gleichen Grundsätzen durchzuführen wie für Zugstäbe. Folgende Änderungen dürfen berücksichtigt werden:

- Bei Schraubenverbindungen ist ein Abzug der Schraubenlochquerschnitte im Anschluß nicht erforderlich, wenn Druckplastizierungen im Nettobereich hingenommen werden können. In diesem Falle ist der Nachweis wie für Bruttoquerschnitte zu führen.
- Bei Schweißverbindungen können die Nachweisformen für den Zugstab übernommen werden.

4.3 Biegestäbe

4.3.1 Vorbemerkungen

Die Tragsicherheit von Biegestäben aus Aluminium kann durch folgende Versagenszustände bedingt sein:

1. Überschreiten des elastischen Grenzmomentes
2. Überschreiten der elastischen Querkraft

3. Überschreiten der elastischen Grenzspannung durch die Vergleichsspannung
4. Überschreiten des plastischen Grenzmomentes
5. Überschreiten der plastischen Querkraft
6. Überschreiten des Interaktionstragverhaltens
7. Überschreiten des Stabilitätstragvermögens des Gesamtstabes (Gesamtstabilität)
8. Überschreiten der lokalen Stabilität durch lokales Beulen
9. Überschreiten der Tragfähigkeiten von Anschlüssen und Stößen

Die elastische Traggrenze (Versagenszustände 1, 2 und 3) ist dadurch gekennzeichnet, daß in der meistbeanspruchten Faser des Querschnittes die elastische Grenzspannung $f_{0,2}$ erreicht wird. Diese elastische Grenzlast ist eine fiktive rechnerische Grenzlast, die gegenüber der plastischen Grenzlast immer auf der sicheren Seite liegt. Die Berechnung der elastischen Grenzlast erfolgt nach der linearen Elastizitätstheorie 1. oder 2. Ordnung. In beiden Fällen geht man von der Hypothese aus, daß ein Bauwerk oder ein Bauteil nach Entlasten voll in den ursprünglichen Zustand ohne bleibende Deformationen zurückgeht. Bei der elastischen Grenzlast gemäß obiger Definition werden rechnerisch keinerlei Querschnittsreserven oder Systemreserven, die sich entwickeln können, wenn plastische Spannungen aktiviert werden, in Anspruch genommen.

Die plastischen Grenzlasten gemäß den obigen Versagenszuständen 4, 5 und 6 nutzen Querschnittsreserven und Systemreserven durch Inanspruchnahme der Plastizierungsfähigkeit des Werkstoffes. Nur duktile Werkstoffe besitzen eine plastische Tragfähigkeit. Die plastische Grenzlast ist ebenfalls eine fiktive rechnerische Grenzlast, die sich von der sicheren Seite her an die wirkliche Traglast annähert. Sie liegt höher als die elastische Grenzlast.

Das plastische Moment wird im Stahlbau auf der Basis des Modells eines voll durchplastizierten Querschnittes berechnet. Die Widersinnigkeit hierbei liegt darin, daß in der Intersektionslinie Druckfließen und Zugfließen direkt nebeneinanderliegen, was physikalisch unmöglich ist. Darüber hinaus steigern sich die Randdehnungen für diesen Spannungszustand theoretisch über alle Maßen, was physikalisch ebenfalls unmöglich ist. Bei Stahl S235(St37) und S355(St52) kann das plastische Moment dennoch mit diesem Spannungszustand berechnet werden, weil in dem dabei zugrundegelegten bilinearen Werkstoffgesetz die Eigenschaft zu erheblicher Verfestigung, die schon nach einem relativ kurzen Fließbereich einsetzt, nicht berücksichtigt wird. Große Dehnungen in Randfaserbereichen treten deshalb bei Stahl nicht auf, auch keine Bruchdehnungen, demgegenüber überschreiten jedoch die Spannungen in Verfestigungsbereichen erheblich die Fließspannung und steigern sich bis zur jeweiligen Verfestigungsspannung. Bei Aluminium gibt es nicht einen gleichgearteten Verfestigungsbereich in den σ-ε-Verläufen wie bei Stahl. Deshalb ist die Fließgelenkmethode mit einem oder mehreren Fließgelenken mit Behutsamkeit anzuwenden. Nähern sich die Dehnungen in hochbeanspruchten Bereichen – z. B. in Randfasern – der Bruchdehnung, so haben diese Fasern Spannungen, die die 0,2 %-Grenze nur relativ wenig überschreiten. Dies gleicht nicht den Fehlbedarf an Tragkapazität der null-liniennahen Querschnittsbereiche aus, das volle plastische Spannungsdiagramm kann dann nicht aktiviert werden. Deshalb ist eine entscheidende Bedingung bei der rechnerischen Ermittlung des plastischen Momentes die Forderung, daß die Dehnung in der meistbeanspruchten Faser beschränkt bleibt. Die Grenze wurde von Mazzolani [1, 14] auf etwa $10\,\varepsilon_{0,2}$ festgesetzt. Das zugehörige plastische Moment heißt ultimate bending moment M_u. Das Verhältnis von M_u/M_{pl} liegt damit in der Regel um 1,0, es kann bei Material

ohne nennenswerte Verfestigung jenseits von $\varepsilon_{0,2}$ unter 1,0, bei Material mit Verfestigung über 1,0 liegen. Für einen I-Querschnitt mit den Abmessungsverhältnissen

Höhe h in mm
Flanschbreite $b = 0{,}5\,h$
Flanschdicke $t = h/20$
Stegdicke $s = h/25$

ergeben sich die in Tabelle 4-1 zusammengestellten Faktoren, mit welchen der Formbeiwert α_{pl} zu multiplizieren wäre, um das Fließzonentragmoment M_u bei einer maximalen Dehnung der meistgedehnten Faser von $\varepsilon_{gr} = 10\,\varepsilon_{0,2}$ zu erreichen.

Tabelle 4-1
Reduktionsfaktoren für den Formbeiwert α_{pl}

Werkstoff	$f_{0,2}$ N/mm²	I-Querschnitt, Höhe h in mm b = h/2, t = h/20, s = h/25					
		100	150	200	250	300	400
7020 T6	280	0,949 (1,12)	0,949 (1,12)	0,949 (1,12)	0,949 (1,12)	0,949 (1,12)	0,949 (1,12)
6082 T6	250	0,949 (1,13)	0,949 (1,13)	0,949 (1,13)	0,949 (1,13)	0,949 (1,13)	0,949 (1,13)
6063 T6	170	0,949 (1,18)	0,949 (1,18)	0,949 (1,18)	0,949 (1,18)	0,949 (1,18)	0,949 (1,18)
6060 T6	140	0,949 (1,22)	0,949 (1,22)	0,949 (1,22)	0,949 (1,22)	0,949 (1,22)	0,949 (1,22)
5754 H24/H34	250	0,949 (1,13)	0,949 (1,13)	0,949 (1,13)	0,949 (1,13)	0,949 (1,13)	0,949 (1,13)
5454 H24/H34	200	0,949 (1,16)	0,949 (1,16)	0,949 (1,16)	0,949 (1,16)	0,949 (1,16)	0,949 (1,16)

Die Tabellenwerte sind das Verhältnis des teilplastischen Momentes $M_{10\varepsilon_{0,2}}$ auf der Basis eines bilinaren σ-ε-Gesetzes mit

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad \text{für } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{0,2}$$

und

$$\sigma = f_{0,2} = \text{const.} \quad \text{für } \varepsilon_{0,2} < \varepsilon \leq \varepsilon_{gr} = 10\,\varepsilon_{0,2}$$

und des rechnerischen vollplastischen Momentes M_{pl}. Die Klammerwerte sind das Verhältnis des Momentes M_u auf der Basis des Ramberg-Osgood-Gesetzes für M1 nach Tabelle 2-12 bis zu einer Grenzdehnung von

$$\varepsilon_{gr} = 10\,\varepsilon_{0,2}$$

und des rechnerischen vollplastischen Momentes M_{pl}. Die zugehörigen Momente M_u basieren nicht auf der Fließgelenktheorie, sondern auf der Fließzonentheorie und kom-

men der wirklichen Traglast am nächsten. Man erkennt hieran, daß dieses M_u für die hier geprüften Querschnitte immer größer ist als das klassische M_{pl} mit vollem Spannungsdiagramm $f_{0,2}$. Dies gilt für Klasse 1- und Klasse 2-Querschnitte (siehe Abschnitt 4.3.2).

Eine analytische Vorgehensweise zur Berechnung der kompletten Momenten-Krümmungs-Beziehungen für symmetrische Querschnitte der Klasse 1 ohne und mit Schweißung wird im Abschnitt 4.4 dargestellt. Diese Beziehung wäre für eine genauere nichtlineare Berechnung der Deformationen von Trägern und Rahmen sowie der Schnittgrößen in statisch unbestimmten Systemen anzuwenden.

Die plastische Querkraft kann für Querschnitte mit Flanschen ohne weitere Überlegungen unter der Annahme ermittelt werden, daß der gesamte Steg durch Schubspannungen zum Fließen gebracht wird.

Die Interaktionsbeziehungen wurden auf der Basis von Dehnungsbegrenzungen von Valtinat/Dangelmaier in [15] behandelt.

4.3.2 Klasseneinteilung der Querschnitte

Die Klassifizierung teilt die Biegequerschnitte in vier Klassen ein, Grundlage für diese Einteilung ist die Sicherheit gegen lokales Ausbeulen von abstehenden Flanschen ohne und mit Randverstärkungen, oder von beidseitig gehaltenen Flanschen, z. B. in Kastenquerschnitten und von Stegen [5, 16]. Die vier Klassen sind wie folgt definiert:

Klasse 1: Zur Klasse 1 gehören Querschnitte, die nicht nur das volle plastische Gelenk ausbilden, sondern zusätzlich ohne lokales Ausbeulen noch so viel Rotationskapazität haben, daß sich weitere plastische Gelenke ausbilden können und eine Umlagerung der Schnittgrößen nach Fließgelenktheorie möglich ist.

Klasse 2: Querschnitte der Klasse 2 können das volle plastische Gelenk bilden, haben aber nur eine begrenzte Rotationskapazität, Systemreserven können nicht in Anspruch genommen werden.

Klasse 3: Querschnitte der Klasse 3 können in der meistbeanspruchten Faser des Vollquerschnitts auf der Druckseite maximal die 0,2 %-Grenze $f_{0,2}$ entwickeln, doch verhindert die Schlankheit aus den Querschnittsabmessungen infolge lokalen Beulens die Ausbildung von plastischen Widerständen.

Klasse 4: Querschnitte der Klasse 4 haben so schlanke Querschnittsteile, daß auf der Druckseite lokales Ausbeulen vor Erreichen der 0,2 %-Grenze $f_{0,2}$ auftritt, diese Querschnitte können nicht einmal den vollen elastischen Widerstand ausbilden, sondern für sie sind je nach Berechnungsmethode zur Ermittlung des Bemessungswiderstandes entweder bei vollen Spannungen Querschnittsreduktionen erforderlich, oder es müssen bei Ansatz des vollen Querschnitts die Spannungen reduziert werden.

Die Klassifizierung der Querschnitte hängt von den Abmessungen der einzelnen Querschnittsteile, die im Druckbereich liegen, ab. Verschiedene Querschnittsbereiche wie z. B. Flansche und Stege können unterschiedlichen Klassen zugeordnet sein. Entschei-

dend für die Einstufung der einzelnen Querschnittselemente sind die Dicke und die Abmessung rechtwinklig zur Längsspannung (Breite). Ferner haben die Lagerungen der Ränder besonderen Einfluß auf das lokale Beulen, so sind Flansche z.B. abstehende Querschnittselemente, die nur an einem Rand gelagert sind, während Stege an beiden Längsrändern gelagerte Querschnittselemente sind. Randverstärkungen oder Lippen oder angepreßte bzw. angeschweißte Längssteifen können die Klasse eines Querschnittes bis zur Klasse 1 anheben.

Der Abschnitt 5.2 enthält ein ausführliches Beispiel zur Handhabung der Klasseneinteilung beim Tragsicherheitsnachweis einer Stütze.

4.3.3 Elastische Grenzlast

Der Nachweis des elastischen Grenztragvermögens eines Biegequerschnittes der Klassen 1, 2 und 3 unter Biegebeanspruchung ist mit der Bedingung

$$\sigma = \frac{M_d}{W} \leq f_{0,2d} = f_{0,2k}/\gamma_{M1}$$

zu erbringen.

Hierbei sind:

M_d das Bemessungsmoment aus den Bemessungslasten
W das Widerstandsmoment des Querschnittes und
$\gamma_{M1} = 1,1$

Wenn neben dem Biegemoment eine Normalkraft vorhanden ist, lautet die Nachweisformel

$$\sigma = \frac{N_d}{A} \pm \frac{M_d}{W} \leq f_{0,2d} = f_{0,2k}/\gamma_{M1}$$

Hierin bedeuten weiterhin:

N_d die Bemessungsnormalkraft
A die maßgebende Querschnittsfläche

Bei zweiachsiger Biegung mit Normalkraft lautet die Nachweisformel

$$\sigma = \frac{N_d}{A} \pm \frac{M_{yd}}{W_y} \pm \frac{M_{zd}}{W_z} \leq f_{0,2d} = f_{0,2k}/\gamma_{M1}$$

Hierbei bedeuten:

M_{yd} sowie M_{zd} die Bemessungsmomente um die jeweiligen Hauptachsen des Querschnittes
W_y und W_z die Widerstandsmomente um die entsprechenden Hauptachsen des Querschnitts

Der Nachweis der elastischen Grenzquerkraft ist mit der folgenden Gleichung zu führen

$$\tau = \frac{Q_d \cdot S}{I \cdot s} \leq \tau_{0,2d} = \frac{f_{0,2d}}{\sqrt{3}} = \frac{f_{0,2k}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

Hierin bedeuten:

Q_d die Bemessungsquerkraft
S das statische Moment des abgeschnittenen Querschnittsteils bezogen auf die Querschnittshauptachse
I das Trägheitsmoment des Querschnitts
s die Stegdicke

Diese Formel kann bekanntlich bei Querschnitten mit Flanschen wie z. B. I-, U- und Kastenquerschnitten durch den vereinfachten Nachweis

$$\tau = \frac{Q_d}{A_{Steg}} \leq \tau_{0,2d} = \frac{f_{0,2d}}{\sqrt{3}} = \frac{f_{0,2k}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}}$$

ersetzt werden.

Hierin bedeutet:

A_{Steg} die Querschnittsfläche des Steges

Beim Zusammentreffen von Normalspannungen und Schubspannungen im Querschnitt ist der Vergleichsspannungsnachweis zu führen.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}} \leq f_{0,2d} = f_{0,2k}/\gamma_{M1}$$

Hierin bedeuten:

σ_x die Normalspannung aus Normalkraft und Biegemoment im Bemessungszustand,
τ_{xy} die Schubspannung aus der Bemessungsquerkraft

Die oben genannten Formeln können für Druckbeanspruchungen so verwendet werden, wenn Querschnitte der Klassen 1 bis 3 vorliegen. Liegt ein Querschnitt der Klasse 4 vor, so sind die oben genannten Bedingungen für die Spannungsnachweise auf die kritische Druckspannung $\sigma_{cr,d}$ zu reduzieren, um lokales Ausbeulen zu vermeiden.

Bei Quernähten gelten die vorgenannten Formeln, wobei für $f_{0,2}$ der Wert $f_{0,2,WEZ}$ einzusetzen ist.

Für geschweißte Querschnitte mit Längsnähten können die gleichen Formeln angewendet werden, wenn man die Querschnittsfläche A durch

$$A_\varkappa = A - (1 - \varkappa) \sum_{i=1}^{n} A_{WEZ,i}$$

und das Trägheitsmoment I durch

$$I_\varkappa = I - (1 - \varkappa)\left(\sum_{i=1}^{n} A_{WEZ,i} \cdot z_i^2\right)$$

ersetzt und mit der ungeschwächten Werkstoffspannung rechnet.

4.3.4 Plastische Grenzlast

Die plastische Grenzlast auf Biegung kann nur von Querschnitten der Klassen 1 und 2 erreicht werden. Bei Querschnitten der Klasse 1 ist es nach Abschnitt 4.3.1 auch möglich, höhere als die plastischen Momente als Grenzlasten zu erreichen, wenn nicht die