

**DAS PYTHONX®-HANDBUCH FÜR PLASMASCHNEIDEN
IN VORSCHRIFTEN UND NORMEN**

PYTHONX®

**LINCOLN
ELECTRIC**

Inhaltsverzeichnis

Kundendienstrichtlinien	5
Aktualisierungen der Dokumente.....	5
Zweck und Verwendung dieses Handbuchs	5
PythonX-System	7
Plasmaschneiden.....	9
Vorschriften und Normen	9
USA	10
Kanada	11
Europa	12
Australien und Neuseeland	13
Japan	13
Belastungsarten	14
Statische Belastung	14
Dynamische Belastungen.....	15
Seismische Belastungen	15
Stoßbelastung	15
Schraubverbindungen.....	16
Passgenaue Verbindungen	17
Vorgespannte Verbindungen	17
Schlupfkritische Verbindungen	18
Bolzenlöcher.....	19
Standard-Bolzenlöcher (STD)	19
Überdimensionierte Bolzenlöcher (OVS - Oversized Bolt Holes)	19
Bolzenlöcher mit kurzem und langem Schlitz	19
Plasmageschnittene Bolzenlöcher	20
Amerikanische Normen	21
Kanadische Normen.....	24
Europäische Normen.....	25
Australische und Neuseeländische Normen	25
Japanische Normen	26

Plasmaschneidkanten.....	27
Freie Kanten	27
Amerikanische Normen.....	28
Kanadische Normen.....	28
Europäische Normen.....	29
Australische und Neuseeländische Normen	30
Japanische Normen	31
Stegdurchführungen und Wiedereintrittsecken	31
Amerikanische Normen.....	32
Europäische Normen.....	33
Kanadische Normen.....	33
Australische und Neuseeländische Normen	33
Japanische Normen	33
Trägerausklinkungen	33
Amerikanische Normen.....	35
Kanadische Normen.....	36
Europäische Normen.....	36
Australische und Neuseeländische Normen	37
Japanische Normen	37
Schweißnahtzugangslöcher.....	37
Amerikanische Normen.....	37
Kanadische Normen.....	41
Europäische Normen.....	43
Australische und Neuseeländische Normen	43
Japanische Normen	43
Schneiden reduzierter Trägerprofile	43
Materialermüdung und Plasmaschneiden.....	45
American Institute of Steel Construction (Amerikanisches Institut für Stahlbau).....	45
Thermische Schnittkanten.....	45
Wiedereintrittsecken, Schweißnahtzugangslöcher und Trägerausklinkungen.....	46
Bolzenlöcher	47

Kanada	48
Thermische Schnittkanten.....	48
Bolzenlöcher	49
Europa	49
Thermische Schnittkanten.....	49
Bolzenlöcher	51
Australien / Neuseeland	53
Thermische Schnittkanten.....	53
Bolzenlöcher	54
Plasma-Kennzeichnung.....	55
Qualitätskriterien für plasmageschnittene Schnittflächen	59
Oberflächengüte.....	59
Werkzeuge zur Messung der Oberflächengüte.....	61
Australien / Neuseeland - Messung der Schnittoberflächengüte	62
Kontakt-Oberflächenrauheitsmessgeräte/Profilmessgeräte.....	63
Zitierte Normen und Bibliographie	65
Zusammenfassung und Haftungsausschluss	67

Kundendienstrichtlinien

Die Lincoln Electric Company verkauft Schneid- und Schweißverbrauchsmaterialien sowie zugehörige Ausrüstung. Mitunter können Käufer das Unternehmen um Empfehlungen oder Informationen zur Benutzung unserer Produkte bitten. Unsere Mitarbeiter reagieren im Rahmen unseres Kundenservices kostenlos auf Grundlage der bereitgestellten Informationen und ihres Wissens über Lincoln Electric-Produkte. Lincoln Electric gewährt für diese Informationen oder Empfehlungen keine Garantie oder Gewährleistung und übernimmt keine Haftung. Dies gilt auch für die Aktualisierung oder Korrektur derartiger Informationen oder Empfehlungen, nachdem diese weitergegeben wurden. Die Bereitstellung von Informationen oder Empfehlungen begründet, erweitert oder ändert keine Garantien in Bezug auf den Verkauf der Produkte des Unternehmens. Lincoln Electric lehnt ausdrücklich jegliche Gewährleistung gleich welcher Art, einschließlich der Gewährleistung der Eignung für einen bestimmten Zweck, in Bezug auf solche Informationen oder Empfehlungen ab. Die Auswahl und die Verwendung von Produkten, die von Lincoln Electric verkauft werden, erfolgt ausschließlich unter Kontrolle des Kunden und verbleibt in seiner alleinigen Verantwortung.

Aktualisierungen der Dokumente

Es wird davon ausgegangen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen zum Zeitpunkt der Drucklegung korrekt waren und möglichen Änderungen unterliegen können, wenn zusätzliche Informationen und Daten verfügbar werden. Beispiele für solche Änderungen umfassen die Einbeziehung zusätzlicher Produktdaten und Änderungen aufgrund von aktualisierten Normen, sind jedoch nicht darauf beschränkt. Dem Benutzer dieses Handbuchs wird empfohlen, die Website von Lincoln Electric regelmäßig auf Aktualisierungen zu überprüfen (www.lincolnelectric.com). In diesem Handbuch wird auf andere Dokumente verwiesen, die nicht von Lincoln Electric veröffentlicht wurden. Diese Dokumente können Änderungen unterliegen. Der Benutzer dieses Handbuchs sollte die neueste Ausgabe der genannten Dokumente auf Änderungen, die sich auf den Inhalt dieses Handbuchs auswirken können, überprüfen.

Zweck und Verwendung dieses Handbuchs

In diesem Handbuch werden technische Probleme im Zusammenhang mit drei Funktionen behandelt, die sich auf mit PythonX-Systemen hergestellte Teile beziehen:

- ▶ Thermisch geschnittene Löcher, die Teil von Schraubverbindungen sein werden
- ▶ Thermisch geschnittene Oberflächen, die keine Bolzenlöcher darstellen, wie Teilekanten, Stegdurchführungen, Trägerschweißungen, Schweißnahtzugangslöcher und reduzierte Trägerprofilansätze
- ▶ Kennzeichnung von Montagepunkten, Schweißsymbole und dauerhafte Teilekennzeichnungen

Tabelle 1 ist als Kurzanleitung für die schnelle Bestimmung, ob Plasmaschneiden für eine bestimmte Anwendung zulässig ist oder nicht, gedacht und soll den Benutzer dieses Handbuchs auf die entsprechenden Abschnitte im Handbuch mit den entsprechenden Informationen verweisen. Die Tabelle und dieser Leitfaden sollten nicht alleine verwendet werden, ohne die Vorschriften und Normen für die kodifizierten Anforderungen zu beachten.

TABELLE 1. ZULASSUNG VON PLASMAGESCHNITTENEN BOLZENLÖCHERN UND FREIEN KANTEN SOWIE TEILEKENNZEICHNUNG							
Anwendung	Belastung	USA	Kanada	Europa	Japan	Australien	Neuseeland
Bolzenlöcher	Statisch	Ja	Ja	Ja	Anwendungs-abhängig ¹	Ja	Ja
	Zyklisch	Anwendungs-abhängig ²	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
	Seismisch	Anwendungs-abhängig ³	Nein	In den Vorschriften nicht behandelt ⁴	Nein	In den Vorschriften nicht behandelt ⁴	In den Vorschriften nicht behandelt ⁴
	Siehe Seiten 19 - 26						
Freie Kanten	Statisch	Ja	Ja	Ja	Anwendungs-abhängig ¹	Ja	Ja
	Zyklisch	Ja	Ja	Anwendungs-abhängig ¹	Anwendungs-abhängig ¹	Ja	Ja
	Seismisch	Ja	Ja	In den Vorschriften nicht behandelt ⁴	Anwendungs-abhängig ¹	In den Vorschriften nicht behandelt ⁴	In den Vorschriften nicht behandelt ⁴
	Siehe Seite 26 - 53						
Plasma-Kennzeichnung	Die Vorschriften behandeln nicht Siehe Seite 53 – 58						

Hinweise 1. Siehe zutreffenden Text.

2. RCSC 2014 und AISC 360-16 weichen leicht von den Anforderungen ab und AISC 360-16, Anhang 3, enthält einige Einschränkungen bei Lochtypen für Schraubverbindungen.

3. AISC 358-16 enthält Anforderungen für verschiedene Drehmoment-Verbindungsarten, bei denen die Zulassung von plasmageschnittenen Löchern von der Verbindung abhängig ist. Siehe Seite 22 - 23 in diesem Handbuch.

4. Die europäischen, australischen und neuseeländischen Normen behandeln diese Anwendung nicht spezifisch. Es wird daher empfohlen, dass der Benutzer dieses Handbuchs den Ingenieur oder eine andere technische Autorität des Projekts um Hilfestellung bittet.

Das PythonX-System ist beliebt bei der Herstellung von Stahlbauteilen für den Hochbau, die in der Regel durch Baunormen geregelt sind. Aus diesem Grund gelten für viele PythonX-Anwendungen auch die gesetzlichen Regelungen. In einigen Fällen wurde die Verwendung des Plasmaschneidens für Bolzenlöcher, freie Kanten oder Kennzeichnungen durch geltende gesetzliche Bestimmungen

eingeschränkt. Für derartige Einschränkungen kann es viele Gründe geben. Vorschriften und Normen können die Verwendung des Verfahrens für einige bekannte Leistungsprobleme bei Verbindungen bewusst ausschließen. In anderen Situationen sind die Anforderungen möglicherweise nicht auf dem neuesten Stand. Eine häufig vorkommende Situation ist, dass die Vorschriften die Verwendung des Plasmaschneidens zulassen, jedoch ein Missverständnis der Normen vorliegt und der Prozess unangemessen abgelehnt wird. Dieses Handbuch enthält Informationen darüber, wann das Plasma-lichtbogenschneiden und -kennzeichnen zulässig ist, nicht zulässig ist und wann Vorschriften und Normen das Thema nicht ansprechen.

In einigen Fällen verwenden regulatorische Normen den Begriff „Autogenschneiden“ anstelle des umfassenderen Begriffs „thermisches Schneiden“. „Thermisches Schneiden“ schließt das Plasmaschneiden ein, während „Autogenschneiden“ es ausschließt. In vielen, wenn nicht in den meisten Fällen wurde die Verwendung des restriktiveren Begriffs „Autogenschneiden“ nicht gewählt, um das Plasmaschneiden auszuschließen, sondern es wurde nur die ältere Technologie identifiziert, die vor dem Plasmaschneiden verwendet wurde oder bekannt war.

Wenn die Anforderungen im Zusammenhang mit der Verwendung von Plasmaschneiden nicht verstanden werden, wenn für ein Projekt ältere Normen angewendet werden oder die Normen die Verwendung von Plasmaschneiden nicht direkt ansprechen, muss der Ingenieur oder ein anderer technischer Sachverständiger, der das Projekt beaufsichtigt, dieses Verfahren genehmigen oder verbieten. Wenn in den geltenden Normen keine Angaben zum Plasmaschneiden gemacht werden, kann der Ansatz, der von anderen Normen verwendet wird (wie in diesem Handbuch beschrieben), den Sachverständigen bei der Entscheidung über die Eignung des Verfahrens unterstützen. Aus diesem Grund wird der Benutzer dieses Handbuchs aufgefordert, die in diesem Handbuch enthaltenen Informationen dem/den zuständigen Kontrollorgan(en) zur Prüfung und Zulassung von Plasmaschneiden gegebenenfalls vorzulegen.

Bei einigen Anwendungen, in denen das PythonX-System verwendet werden könnte, unterliegen die Arbeiten nicht den gesetzlichen Vorschriften oder Normen. Für diese Anwendungen unterstützen die Informationen in diesem Handbuch den technischen Sachverständigen bei der Beurteilung der Eignung von thermisch geschnittenen Löchern und Kanten sowie thermischer Kennzeichnungen für nicht regulierte Anwendungen.

PythonX-System

Das PythonX-System ist eine praktische und wirtschaftliche Maschine zum Plasmaschneiden von Bolzenlöchern, Stegdurchführungen, Trägerschweißnähten, Schweißnahtzugangsöffnungen und anderen thermischen Schneidänderungen für gewalzte Profile und vormontierte Bauteile. Zusätzlich kann das PythonX-System verwendet werden, um Identifikations- und Montagemarkierungen oder -buchstaben auf der Oberfläche des Stahls anzubringen. Das System wird zur Herstellung von Teilen, die in Gebäudetragwerken und in anderen Bauteilen, die für verschiedene Stahlkonstruktionen verwendet werden, eingesetzt.

Das Plasmaschneiden kann für die meisten Materialien, einschließlich Platten aus Kohlenstoffstahl und niedrig legierten Stählen mit einer Dicke von bis zu 50 mm (2 Zoll), mit hochwertigen Schnitten verwendet werden. Das Plasmaschneiden sorgt für ein ausgewogenes Verhältnis der Kapitalkosten und bietet im Vergleich zu anderen Schneidemethoden eine hervorragende Schneidequalität, hohe Schneidegeschwindigkeiten, höhere Produktivität und niedrige Betriebskosten.

Die mit einem PythonX System hergestellten Teile werden normalerweise mit anderen Teilen verschweißt oder verschraubt. In einigen Fällen werden sowohl Schweißnähte als auch Bolzen verwendet. Viele der thermischen Schnitte des PythonX werden in Tragwerksverbindungen eingesetzt. Die Integrität solcher Schnitte kann die Leistung der Verbindung in der Anwendung beeinflussen.

Einer der vielen Vorteile des PythonX-Systems ist die Konsistenz, mit der thermisches Schneiden im Vergleich zur üblichen Alternative, dem manuellen Brennschneiden, durchgeführt werden kann. Spezifisch erforderliche oder bevorzugte Größen und Abmessungen bestimmter geometrischer Anordnungen, wie z. B. Schweißnahtzugangslöcher, können programmiert und automatisch sowie konsistent geschnitten werden. Durch die Nutzung eines PythonX-Schneidsystems können die Herstellungskosten reduziert und die Qualität verbessert werden.

Das PythonX-System kann runde und geschlitzte Bolzenlöcher, auch Langlöcher genannt, schneiden. Langlöcher ermöglichen eine größere Flexibilität bei der Ausrichtung, wenn Schraubverbindungen montiert werden, wobei in einigen Fällen die Verwendung von Langlöchern nicht erlaubt ist.

Das PythonX-System nutzt das Plasmaschneiden zum „Bohren“ von Löchern und Schneiden von Oberflächen. Wie bei allen thermischen Schneidverfahren erzeugt das Plasmaschneiden neben dem Schnitt eine Wärmeeinflusszone (HAZ – Heat affected Zone) und induziert einige Restspannungen (die ebenfalls bei den meisten thermischen Schneide- und Schweißprozessen auftreten). Ferner gibt es bei thermisch geschnittenen Oberflächen eine entsprechende Oberflächengüte. Unter den meisten Belastungsbedingungen und wenn sie in die meisten Schraub- und Schweißverbindungen eingebaut werden, sind diese Eigenschaften nicht nachteilig.

In einigen Kombinationen von Belastungs- und Schraubverbindungsarten können diese Eigenschaften jedoch zu Leistungsproblemen führen. In ähnlicher Weise bestehen Einschränkungen bei mechanisch hergestellten Löchern bei einigen Schraubverbindungstypen und Lastbedingungen. Lochungen sind mitunter in Bauvorschriften verboten. Wenn dies der Fall ist, können gebohrte Löcher oder gestanzte und gefräste Löcher erforderlich sein. Aus diesem Grund sind die Einschränkungen bei der Herstellung von Bohrungen für einige Schraubverbindungen und Belastungsarten nicht auf thermisch geschnittene Oberflächen beschränkt.

Plasmaschneiden

Das Plasmaschneiden ist ein thermisches Lichtbogenschneidverfahren und stellt eine effiziente Methode zum Trennen von Material dar. Das Plasmaschneiden bietet gegenüber dem Autogenschneiden wesentliche Vorteile in Bezug auf Produktivität, Geschwindigkeit und Kosten sowie eine höhere Schnittoberflächenqualität, bessere mechanische Eigenschaften und eine bessere Einhaltung von geforderten Toleranzen. Das Verfahren ist definiert als „Ein Lichtbogenschneidverfahren, das einen verengten Bogen verwendet und geschmolzenes Metall mit einem Hochgeschwindigkeitsstrahl aus ionisiertem Gas, der aus der Verengungsöffnung austritt, entfernt“ (AWS A3.0, 2010).

Die Plasmabogenbildung beginnt, wenn ein Gas wie Sauerstoff, Stickstoff, Argon oder sogar Werkstattdruckluft durch eine kleine Düsenöffnung im Brenner gepresst wird. In diesem, unter hohem Druck stehenden Gasstrom, wird ein von einer externen Stromversorgung erzeugter Lichtbogen eingeführt, wodurch ein sogenannter „Plasmastrahl“ entsteht. Der Plasmastrahl erreicht sofort Temperaturen von bis zu 22.000 °C (40.000 °F), durchstößt schnell das Werkstück und bläst das geschmolzene Material weg.

Mit reduzierter thermischer Energie des Plasmabrenners ist es möglich, die Oberfläche des Stahls zu kennzeichnen oder zu ätzen. Diese Art von Kennzeichnung wird Plasmakennzeichnung genannt.

Vorschriften und Normen

Vorschriften und Normen regeln die Herstellung und den Bau von Gebäuden, Brücken und anderen Stahlkonstruktionen in der ganzen Welt.. Diese von verschiedenen Ausschüssen entwickelten Dokumente basieren auf globalen und lokalen Praktiken und Erfahrungen. Vorschriften oder Normen können für eine bestimmte Belastung spezifisch sein, z. B. für seismische Lasten, oder sie können allgemeine Herstellungspraktiken bestimmen.

Jede wichtige Stahlbaunorm erlaubt den Einsatz von Plasmaschneiden für einige, wenn nicht alle Schneidaufgaben bei der Herstellung von Baustahl. Diese Aufgaben schließen ein:

- ▶ Herstellen von Bolzenlöchern für Schraubverbindungen
- ▶ Herstellen von Löchern für Ankerstangen und andere Verankerungen
- ▶ Schneiden von Bauteilen und Bauteilkanten, einschließlich Beschneiden von Schnittkanten und gewalzten Kanten
- ▶ Schneiden der Nutvorbereitung von Schweißverbindungen
- ▶ Schneiden von spezifischen Details wie Stegzugangsöffnungen und Trägerschlingungen
- ▶ Schneiden von Bauteildurchführungen

- ▶ Schneiden von Flanschen für Verbindungen mit reduziertem Trägerprofil (eine Art Verbindung mit seismischem Moment)

Die Anwendungen und Einschränkungen sowie die Qualitätsanforderungen variieren je nach Baunorm. Da dieses Handbuch nur Zusammenfassungen der Normen enthält, sollte der Benutzer dieses Handbuchs die geltenden Normen überprüfen und die spezifischen Anforderungen ermitteln. Ebenso können neuere Versionen der genannten Normen die in diesem Handbuch beschriebenen Anforderungen ändern. Im Allgemeinen spiegeln die neuesten Versionen der Normen die neuesten technologischen Entwicklungen und Forschungsergebnisse wider.

Wenn für ein Projekt ältere Normen angegeben werden oder wenn die anwendbaren Normen die Verwendung des Plasmaschneidens nicht direkt behandeln, wird der Benutzer dieses Handbuchs gebeten, die bereitgestellten Informationen der zuständigen verantwortlichen oder leitenden Stelle oder den zuständigen Stellen zur Prüfung von Plasmaschneiden für die jeweilige Anwendung oder das Projekt und für die zukünftige Überarbeitung der anwendbaren Norm(en) vorzulegen.

Es folgen kurze Erklärungen zu ausgewählten Vorschriften und Normen, die für das Plasmaschneiden und -kennzeichnen für ein bestimmtes Land gelten.

USA

Das Amerikanische Institut für Stahlbau (AISC - American Institute of Steel Construction) gibt mehrere Normen heraus, die sich auf bestimmte Kategorien des Stahlbaus beziehen. Die wichtigste Norm für Gebäude mit Stahlrahmen und andere Tragwerke ist die *Specification for Structural Steel Buildings (Spezifikation für Gebäude aus Baustahl)*, die AISC 360. Zum Zeitpunkt der Herausgabe dieses Handbuchs war die neueste Ausgabe der AISC 360 die Ausgabe aus dem Jahr 2016, die AISC 360-16.

Für Gebäudesysteme aus Baustahl und aus Baustahl/Stahlbeton, die speziell auf Erdbebensicherheit ausgelegt sind, gelten zusätzlich zur AISC 360-16 die Anforderungen der *Seismischen Bestimmungen für Stahlbaukonstruktionen (Seismic Provisions for Structural Steel Buildings)*, die 2016 unter AISC 341-16 herausgegeben wurden. Die AISC 341 ergänzt und modifiziert die Anforderungen der AISC 360 und wenn in AISC 341 keine Abweichungen von der AISC 360 aufgeführt werden, gelten die Anforderungen der AISC 360.

Eine zusätzliche Norm, *Vorqualifizierte Verbindungen für spezielle und Zwischen-Stahl-Momentrahmen für seismische Anwendungen (Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications)*, die 2016 als AISC 358-16 herausgegeben wurde, spezifiziert Entwurf, Detaillierung, Herstellung und Qualitätskriterien für Momentverbindungen, welche gemäß AISC 341-16 die Voraussetzungen erfüllen.

Eine 4. AISC-Norm ist die *Spezifikation für sicherheitsrelevante Stahlkonstruktionen für kerntechnische Anlagen* (*Specification for Safety-Related Steel Structures for Nuclear Facilities*), die sich auf die Planung, Herstellung und Errichtung sicherheitsbezogener Stahlkonstruktionen für kerntechnische Anlagen bezieht und AISC 360 ergänzt. Die aktuelle Version wurde 2012 als AISC N690-12 herausgegeben. 2015 wurde eine Ergänzung, die AISC N690s1-15, herausgegeben.

Die vorgenannten AISC-Normen können kostenlos von der AISC-Website heruntergeladen werden: www.aisc.org.

AISC-Normen beziehen sich auf die Normen der American Welding Society (Amerikanische Schweißervereinigung) (AWS) für die meisten Schweiß- und Schneidanforderungen. Die AISC 360-16 verweist im Hochbau auf AWS D1.1/D1.1M-*Structural Welding Code - Steel* (Code für das Schweißen von Tragwerken), im Jahr 2015 als AWS D1.1/D1.1M:2015 herausgegeben.

Für Tragwerke, die für seismische Beständigkeit zur Anwendung kommen, verweist die AISC 341-16 auf die AWS D1.8/D1.8M *Structural Welding Code - Seismic Supplement* (Code für das Schweißen von Tragwerken - Ergänzung Erdbebensicherheit), wodurch die Anforderungen der AWS D1.1/D1.1M:2015 ergänzt und geändert werden. Die jüngste Ausgabe ist die AWS D1.8/D1.8M:2016.

AISC-Normen beziehen sich auf die RCSC-Norm (Research Council on Structural Connections) für Montage- und Prüfanforderungen für die meisten Tragwerkverschraubungen. Diese Norm ist die *Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolt* (Spezifikation für Strukturverbindungen mit hochfesten Bolzen). Die AISC 360-16 verweist auf die Ausgabe 2014 und wird im Allgemeinen als RCSC Spezifikation 2014 bezeichnet. Im April 2015 wurde ein Erratum zu dieser Norm herausgegeben, welches die Kriterien für Bolzenlöcher jedoch nicht ändert.

Autobahnbrücken werden in der Regel entsprechend den AASHTO-Normen (American Association of State Highway and Transportation Officials) konstruiert und gebaut, die auf AASHTO/AWS D1.5/D1.5M-*Bridge Welding Code* (Brückenschweißvorschriften) für Schweiß- und Schneidanforderungen verweisen. Eisenbahnbrücken unterliegen in der Regel den Bestimmungen der AREMA-Spezifikation (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association), die sich auf AASHTO/AWS D1.5/D1.5M bezieht und bestimmte Absätze ändert. Zusätzlich zu diesen Landesnormen können einzelne Bundesstaaten oder Eisenbahngesellschaften zusätzliche Anforderungen an Brücken stellen.

Kanada

Das Kanadische Institut für Stahlbau (Canadian Institute of Steel Construction - CISC) veröffentlicht selbst keine Norm, die der AISC 360 entspricht. Vielmehr wird die Norm *Design of Steel Structures* (Gestaltung von Stahlkonstruktionen) als CSA-Standard (Canadian Standards Association/Kanadischer Normenverband) unter der Bezeichnung CSA S16 mit starker Beteiligung der CISC herausgegeben. Zum Zeitpunkt der Entwicklung dieses Handbuchs wurde die jüngste Version im Jahr 2014 als CSA S16-14 herausgegeben. Das CISC veröffentlichte im Jahr 2016 den CISC-Kommentar zur CSA S16-14, der in der 11. Ausgabe des *Handbook of Steel Construction* (Handbuchs für Stahlbau) enthalten ist.

Die CSA 16 verweist auf *Welded steel construction (metal arc welding)* (Geschweißte Stahlkonstruktion (Lichtbogenschweißen)), herausgegeben im Jahr 2013 als CSA W59-13, für die meisten Anforderungen im Zusammenhang mit dem Schweißen und Schneiden. Im Jahr 2018 wurde jedoch eine neue Ausgabe der CSA W59, die CSA W59-18 *Welded steel construction (Geschweißte Stahlkonstruktion)* herausgegeben, die für die Zwecke dieses Handbuchs verwendet wird. Die nächste Version der CSA S16, die 2019 erscheinen soll, wird auf die CSA W59-18 verweisen.

Im Gegensatz zur AISC 360-16 verweist die CSA S16 nicht auf die RCSC-Spezifikation für Anforderungen bei Verschraubungen.

Europa

Die Konstruktion von Tragwerken in Europa wird durch eine Reihe von europäischen Normen (EN), die auch Eurocodes genannt werden und vom CEN (Europäisches Komitee für Normung) entwickelt wurden, geregelt. Bezug auf Stahlkonstruktionen nehmen:

- ▶ EN 1990, *Grundlagen der Tragwerksplanung*
- ▶ EN 1991, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke*
- ▶ EN 1993, *Eurocode 3: Entwurf von Stahlkonstruktionen*
- ▶ EN 1994, *Eurocode 4: Entwurf von Verbundstrukturen aus Stahl und Beton*
- ▶ EN 1998, *Eurocode 8: Entwurf von erdbebensicheren Tragwerken*

In Eurocode 3 befasst sich Teil 1.8, bezeichnet als EN 1993-1-8 *Entwurf von Verbindungen*, mit dem Entwurf von Schraub- und Schweißverbindungen zwischen Tragwerkteilen.

Ein länderspezifischer Anhang (NA) zu einer Europäischen Norm kann von einem bestimmten europäischen Land angenommen werden, wenn die Genehmigung für einen NA innerhalb des Eurocodes erteilt wird. Diese dienen häufig dazu, Entwurfswerte oder eine Gleichung anzugeben oder zu ändern oder erfordern eine bestimmte Entwurfsmethode oder die Verwendung eines informativen oder normativen Anhangs.

Keines der zuvor aufgelisteten Dokumente befasst sich direkt mit Fertigungsthemen wie Schneiden und Lochung (Herstellung von Löchern für Bolzen), sondern verweisen auf die EN 1090-2 *Ausführung von Stahlkonstruktionen und Aluminiumkonstruktionen - Teil 2: Technische Anforderungen für Stahlkonstruktionen*, eine separate Norm, entwickelt aus der CEN/TC 135 *Ausführung von Stahlkonstruktionen und Aluminiumkonstruktionen*. Diese Norm befasst sich mit den spezifischen Anforderungen an die Ausführung von Stahlkonstruktionen für Hoch- und Tiefbauarbeiten, einschließlich der Vorschriften für das Qualitätsmanagement, Materialien, Fertigung, Montage und Inspektion sowie spezifischen Anforderungen für das Schneiden, Schweißen und Verschrauben. Diese Norm wurde im Jahr 2018 aktualisiert und herausgegeben (EN 1090-2:2018).

Australien und Neuseeland

Australien und Neuseeland haben mehrere gemeinsame Normen, wobei Neuseeland für erdbebensichere Konstruktion und Bau seine eigenen Normen anwendet. Die Normen werden von Standards Australia (AS) und Standards New Zealand (NZS) verwaltet und herausgegeben. Das Australian Steel Institute (ASI), Weld Australia (WA), früher als Welding Technology Institute of Australia (WTIA) bekannt, die Steel Construction New Zealand (SCNZ) und Neuseelands Heavy Engineering Research Association (HERA) sind maßgeblich an der Entwicklung von Weld Australia (WA) AS/NZS-Normen, die sich auf Stahlbau, Schweißen und Schneiden beziehen, beteiligt.

Für die Konstruktion von Stahlbauten verwendet Australien die Norm AS 4100-1998 (R2016) *Steel Structures (Stahlkonstruktionen)*. Sie wurde ursprünglich im Jahr 1998 angenommen, im Jahr 1999 ergänzt und im Jahr 2016 bestätigt. In Neuseeland wird die NZS 3404.1: *Steel Structures Standard (2007) (Norm für Stahlbau)* verwendet. Die aktuelle Version dieser Norm ist die Version 2007 mit den zwei folgenden Änderungen.

Sowohl Australien als auch Neuseeland verwenden die AS/NZS 5131:2016, *Structural Steel Work—Fabrication and Erection (Stahlkonstruktionen - Fertigung und Montage)*. Diese Norm basiert auf vielen Hauptthemen der EN 1090-2 *Ausführung von Stahl- und Aluminiumkonstruktionen, Teil 2: Technische Anforderungen an Stahlkonstruktionen*, mit Änderungen, die auf den für die Entwicklung von ISO 17067 geleisteten Arbeiten basieren.

Für das Schneiden und Schweißen beziehen sich sowohl die australischen als auch die neuseeländischen Normen auf die Serie AS/NZS 1554 *Structural steel welding (Schweißen von Baustahl)*. Die aktuellen Versionen dieser Normen sind:

AS/NZS 1554.1:2014 *Structural steel welding, Part 1 (Schweißen von Baustahl, Teil 1): Welding of Steel Structures (Schweißen von Stahlkonstruktionen)*, 9. Ausgabe 2014

AS/NZS 1554.4:2014 *Structural steel welding, Part 4 (Schweißen von Baustahl, Teil 1): Schweißen von hochfesten Vergütungsstählen*, 4. Auflage 2014

AS/NZS 1554.5:2014 *Structural steel welding, Part 5 (Schweißen von Baustahl, Teil 1): Schweißen von Stahlkonstruktionen mit hoher Dauerbeanspruchung*, 5. Auflage 2014

Japan

Das Architecture Institute of Japan (AIJ) gibt Konstruktionsnormen und Ausführungsspezifikationen für den Stahlbau heraus. Eine weitere für die Stahlproduktion relevante Organisation ist die Japan Society of Steel Construction (JSSC). Die japanische Gesellschaft für Schweißingenieure (JWES - Japan Welding Engineering Society) befasst sich mit Normen für Schweißen und Schneiden.

Die *Japanese Architectural Standard Specification (Japanische Architekturstandardspezifikation) 6 (JASS 6) für Stahlkonstruktionen für den Hochbau* ist in englischer Sprache verfügbar. Eine aktualisierte Ausgabe von JASS 6 wurde im Jahr 2018 als 11. Ausgabe herausgegeben. Eine englische Übersetzung der jüngsten Ausgabe liegt zurzeit nicht vor.

Alle anderen Normen sind nur auf Japanisch verfügbar, weshalb die Anforderungen dieser Normen nicht in diesem Handbuch enthalten sind.

Belastungsarten

Verschiedene Arten von Tragwerken werden auf verschiedene Arten belastet. Die vier Hauptbelastungsarten sind statisch, zyklisch, seismisch und Stoß. Es gibt zwar weitere Belastungsarten, die aber für die Zwecke dieses Handbuchs hier nicht angesprochen werden. Die Konstruktionsanforderungen für jede Belastungsart müssen unterschiedlich behandelt werden. Darüber hinaus können die Anforderungen für die Behandlung von Bolzenlöchern, Schneidkanten und plasmagekennzeichneten Teilen für jede Belastungsart unterschiedlich sein. Beispielsweise ist ein Gebäude vom Typ her einer statischen Belastung und eine Brücke einer dynamischen Belastung ausgesetzt, weshalb unterschiedliche Anforderungen an die Konstruktion bestehen.

Statische Belastung

Die statische Belastung umfasst das Eigengewicht der Konstruktion, aber auch Belastungen, die auf Wind- oder Schneebelastungen beruhen. Die meisten Gebäude sind nur statischen Belastungen ausgesetzt, mit Ausnahme der seismischen Belastung durch Erdbeben, auf die später eingegangen wird. Da Wind- und Schneelasten langsam aufgebracht werden und sich die Struktur langsam verformt, ist die Dehnungsrate niedrig, weshalb derartige Belastungen als statische Lasten erachtet werden.

Wenn zyklische oder seismische Belastungen einbezogen werden, erhöhen oder ändern die Normen im Allgemeinen die Anforderungen für statische Belastungsanwendungen, wodurch die Anforderungen in der Regel strenger werden. Dementsprechend bilden die Anforderungen für statische Anwendungen eine Basisspezifikation, die für alle Arten von Belastungsbedingungen gilt. Für Situationen, in denen keine zusätzlichen Anforderungen für dynamische Anwendungen bestehen, gelten die statischen Anforderungen weiter. Bei seismischen Anwendungen ist die Situation ähnlich.

Dynamische Belastungen

Die dynamische Belastung beinhaltet eine sich wiederholende Belastung, die auf die Struktur einwirkt. Sie kann auch Dauerbeanspruchung oder Materialermüdungsbelastung genannt werden. AISC 360-16, Anhang 3, definiert Materialermüdung als „Grenzzustand der Rissauslösung und des Risswachstums infolge wiederholter Anwendung von Lasten“. AISC stellt außerdem in Abschnitt B3.11 fest, dass „Materialermüdung nicht für seismische Auswirkungen oder für die Auswirkungen von Windlasten auf typische Gebäudesysteme, die Lateralkräften standhalten, und Komponenten der Gebäudehülle in Betracht gezogen werden muss.“ (AISC 360, 2016). Tragwerke mit Bolzenlöchern, thermisch geschnittenen Kanten und Kennzeichnungen, die einer dynamischen Belastung ausgesetzt sind, müssen evtl. höhere Anforderungen als ein statisch belastetes Tragwerk erfüllen.

Seismische Belastungen

Die seismische Belastung tritt bei Erdbeben auf. Diese Belastungsart kann als starre Belastung bezeichnet werden, da erwartet wird, dass lokalisierte Teile der Struktur in einem Maß beansprucht werden, dass eine dauerhafte Verformung während schwerer Erdbeben auftritt. Die seismische Belastung kann, weil die Anzahl der Zyklen des seismischen Ereignisses gering ist, auch als „Kurzzeitschwingfestigkeit“ bezeichnet werden. Die Anforderungen an Bolzenlöcher, thermisch geschnittene Kanten und Plasmakennzeichnungen können bei einem Tragwerk, das für Erdbeben ausgelegt ist, verglichen mit einem Tragwerk, das für statische Belastungen ausgelegt ist, anspruchsvoller sein. Dies beinhaltet auch sicherzustellen, dass die Oberflächengüte innerhalb der Grenzen liegt und Kerben an thermisch geschnittenen Bolzenlöchern oder Kanten minimiert werden. Diese anspruchsvolleren Anforderungen können auf Teile und Verbindungen angewendet werden, die der seismischen Belastung standhalten müssen, sind jedoch nicht auf Teile und Verbindungen anwendbar, die nur der Schwerkraftbelastung widerstehen müssen.

Stoßbelastung

Stoßbelastungen, manchmal auch dynamische Belastung genannt, beinhalten die schnelle Einführung von Lasten und die entsprechende Wirkung höherer Dehnraten. Eine solche Belastung wird häufig durch große Trägheitskräfte verursacht, denen eine erhebliche Masse und Steifigkeit widerstehen, um einen schnellen Auslauf zu bewirken. Ebenfalls in dieser Kategorie enthalten sind Belastungen durch Druckwellen bei Explosionen. Da es sich bei der Druckwellenfestigkeit um eine spezielle Konstruktionsanwendung handelt, werden in diesem Handbuch weder dieses Thema noch andere Formen von Stoßbelastungen behandelt.

Schraubverbindungen

Die Anforderungen an die Festigkeit, Montage und die Prüfung einer Tragwerk-Schraubverbindung hängen von der vom Ingenieur ausgewählten Art der Schraubverbindung ab. Der Ingenieur gibt die Art der Schraubverbindung in den Konstruktionsunterlagen an, wobei die Art der Schraubverbindung zusätzlich auf den Zeichnungen und Montageplänen für die Werkstatt angegeben wird.

Schraubverbindungsbezeichnungen stellen die für die Montage und Überprüfung der Schraubenbaugruppen benötigten Informationen bereit und definieren nicht den Lastübertragungsmechanismus. Es gibt drei Arten von Schraubverbindungen: Passgenau (ST - Snug-Tightened), Vorgespannt (PT - Pretensioned) und Schlupfkritisch (SC - Slip-Critical), wie in Tabelle 2 beschrieben.

TABELLE 2. ARTEN VON SCHRAUBVERBINDUNGEN

Art der Verbindung ¹	Verbindungsfunktion
Passgenau (ST)	Widerstand gegen Scherbelastung durch Scherung/Lager.
Vorgespannt (PT)	Widerstand gegen Scherbelastung durch Scherung/Lager. Es ist eine Bolzenvorspannung erforderlich, jedoch nicht aus Gründen der Rutschfestigkeit.
Schlupfkritisch (SC)	Es ist ein Widerstand gegen Scherbelastung durch Reibung an den Schlagflächen erforderlich.

¹ Diese Begriffe werden vom American Institute of Steel Construction (AISC) und vom Research Council on Structural Connections (RCSC) verwendet. Die Begriffe in anderen Normen können davon abweichen.

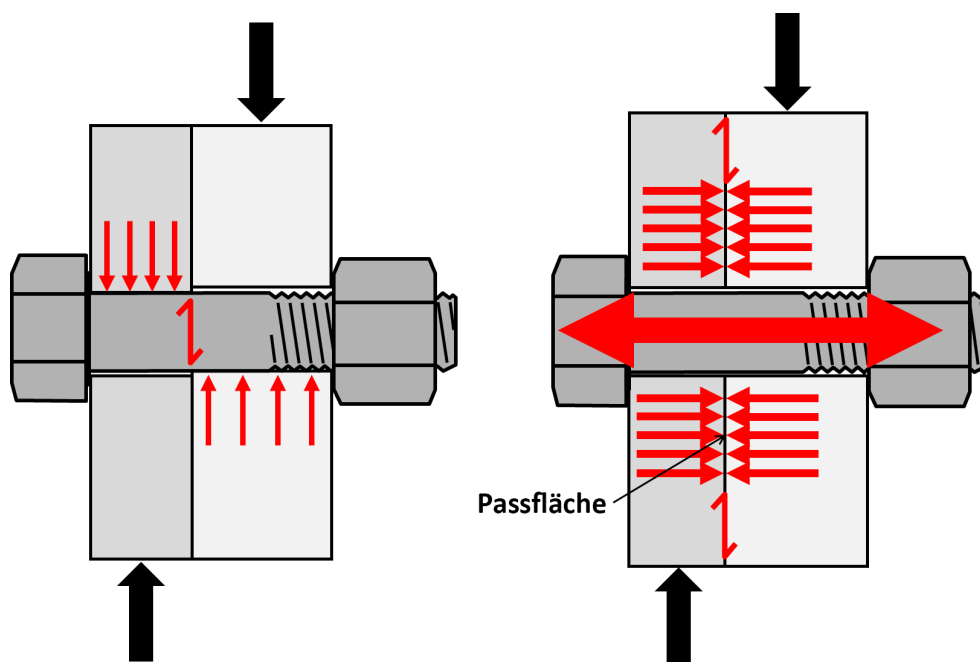


Abbildung 1. Beispiel für eine passgenaue (links) versus schlupfkritische (rechts) Schraubverbindung

Passgenaue Verbindungen

Passgenaue Verbindungen sind die gebräuchlichsten Schraubverbindungen in Gebäudetragwerken. Da die Last durch Scherung über den Bolzen, der am Rand der Bolzenlöcher anliegt, übertragen wird, braucht der Bolzen nicht mit einer hohen Spannung festgezogen zu werden. Vielmehr werden die Stahllagen der Verbindung einfach durch die Bolzen selbst mit der notwendigen Spannung zusammengezogen, um die erforderliche Bolzenspannung zu erzeugen, damit die Lagen in festem Kontakt stehen (Abbildung 1).

Die RCSC-Spezifikation 2014 definiert eine passgenaue Verbindung als „Verbindung, bei der die Bolzen gemäß Abschnitt 8.1 montiert wurden. Der passgenaue Zustand ist die Dichtheit, die mit ein paar Schlägen eines Schlagschraubers oder der vollen körperlichen Anstrengung eines Stahlbauers erreicht wird, der einen normalen Schraubenschlüssel verwendet, um die Lagen in festen Kontakt zusammenzuschrauben.“ (RCSC, 2014).

Wenn passgenaue Verbindungen verwendet werden, sind gemäß RCSC nur Standard- und Langlöcher erlaubt, die quer zur Schlitzlänge belastet werden. Überdimensionierte Löcher, sowie Langlochbohrungen, die in eine andere als normale Richtung (zwischen 80 und 100 Grad) belastet werden, sind nicht erlaubt, weil sie zu viel Bewegung in der Verbindung erlauben, entweder während der Bauarbeiten oder während der Nutzung unter Belastungen.

Passgenaue Verbindungen sind für Anwendungen mit Materialermüdung gemäß RCSC nicht zulässig. Wenn die wiederholten Belastungen dazu führen würden, dass die Verbindungslagen wiederholt aneinander reiben, kann es zu einer Materialermüdung des Reibbandes auf der Oberfläche der Stahllagen selbst kommen. Wenn der Bolzen mit einer zyklischen Spannung belastet wird, kann er bei Zugmaterialermüdung versagen.

In anderen Teilen der Welt verwenden Stahlbaunormen Begriffe, die dasselbe Konzept beschreiben, z. B. „nicht vorgespannte“ Verbindungen.

Vorgespannte Verbindungen

Vorgespannte Verbindungen unterscheiden sich von passgenauen Verbindungen dadurch, dass die Bolzen so angezogen werden, dass sie eine vorgeschriebene Vorspannung erreichen. Der Begriff Vorspannung wird verwendet, weil die Spannung im Bolzen von der Montage und nicht von der aufgetragenen Last herrührt. Die Lastübertragung ist die gleiche wie bei passgenauen Verbindungen: Scherung über den Bolzenschaft und Lager an den Seiten der Bolzenlöcher.

Die RCSC-Spezifikation 2014 definiert eine vorgespannte Verbindung als „eine Verbindung, die Scher- und/oder Zuglasten überträgt, bei denen die Bolzen gemäß Abschnitt 8.2 montiert wurden, um eine Vorspannung im montierten Bolzen zu erreichen“. In der RCSC-Spezifikation gibt es derzeit vier Montagemethoden.

Wenn vorgespannte Verbindungen verwendet werden, sind nur Standard- und Langlöcher erlaubt, die quer zur Schlitzlänge belastet werden. Überdimensionierte Löcher, sowie Langlochbohrungen, die in eine andere als normale Richtung (zwischen 80 und 100 Grad) belastet werden, sind nicht erlaubt, weil sie zu viel Bewegung in der Verbindung erlauben, entweder während der Bauarbeiten oder während der Nutzung unter Belastungen.

Obwohl die Bolzen in einer vorgespannten Verbindung stark vorgespannt sind und der Stahl fest aneinander geklemmt ist, lassen sich die Art der Passflächen und die der Kontaktflächen der Stahllagen innerhalb der Verbindung nur schwer kontrollieren. Daher könnte, falls die Stahloberfläche mit einem Material mit einem niedrigen Reibungskoeffizienten beschichtet wird oder wenn der Stahl nicht richtig vorbereitet ist, um ein bestimmtes Maß an Rutschfestigkeit bereitzustellen, eine dichte Verbindung immer noch verrutschen.

Verbindungen, bei denen die Bolzen unter Zugspannung stehen und Dauerbeanspruchungen ausgesetzt sind, sind so ausgelegt und vorgespannt, dass der Bolzen selbst nicht direkt den Zugspannungsbereich erfährt. Die durch Bolzen verbundenen Teile werden zusammengeklemt. Die Klemmkraft wird sich unter Last ändern, wohingegen die Spannung der Bolzen im Wesentlichen unverändert bleibt.

In anderen Teilen der Welt verwenden Stahlbaunormen Begriffe, die dasselbe Konzept beschreiben, z. B. „vorgespannte“ Verbindungen.

Schlupfkritische Verbindungen

Die schlupfkritische Verbindung verwendet ebenfalls vorgespannte Bolzen, verfügt jedoch über zusätzliche Steuerelemente an den Passflächen, den Kontaktflächen der Stahllagen innerhalb der Verbindung. Um sicherzustellen, dass die Passflächen die erforderliche Rutschfestigkeit gewährleisten, werden, unabhängig davon, ob der Stahl blank oder beschichtet ist, Kriterien angewendet (Abbildung 1).

Bei schlupfkritischen Verbindungen wird die Last durch Reibung von einem Element auf das andere und nicht auf die Scherlager von passgenauen und vorgespannten Verbindungen übertragen. Für eine gemeinsame Bewegung besteht nur eine geringe Chance, und falls dies der Fall ist, würde die Last durch ein Scherlager übertragen. Die Rutschfestigkeit wird durch die Klemmkraft der Bolzen, der kontrollierten Passflächen, den überdimensionierten Löchern und Langlöchern in einer Richtung, die von der normalerweise erlaubten abweichen, und zusätzlich zu Standardlöchern und quer belasteten Langlöchern bereitgestellt.

Die RCSC-Spezifikation 2014 definiert eine schlupfkritische Verbindung als „Verbindung, die Scherlasten oder Scherlasten in Kombination mit Zuglasten überträgt, bei denen die Bolzen gemäß Abschnitt

8.2 montiert wurden, um eine Vorspannung im montierten Bolzen (Klemmkraft auf die Passflächen) und mit Passflächen, die für eine berechenbare Rutschfestigkeit vorbereitet sind, bereitzustellen“.

Schlupfkritische Verbindungen wurden in älteren nordamerikanischen Normen als „Reibungsschluss“ bezeichnet. In anderen Teilen der Welt verwenden Stahlbaunormen Begriffe, die dasselbe Konzept beschreiben, z. B. „gleitfeste“ Verbindungen.

Bolzenlöcher

Standard-Bolzenlöcher (STD)

In allen Lagen von passgenauen, vorgespannten und schlupfkritischen Verbindungen sind Norm-Bolzenlöcher zulässig. Der Durchmesser des zulässigen Bolzenlochs hängt vom Bolzendurchmesser, der geltenden Norm und davon ab, ob für die Bolzen, Löcher oder beide US-amerikanische Standardeinheiten oder SI-Einheiten verwendet werden.

Überdimensionierte Bolzenlöcher (OVS - Oversized Bolt Holes)

Überdimensionierte Löcher ermöglichen zusätzlichen Freiraum für die Montage der Bolzen und geringfügige Anpassungen an den Verbindungen, um die Teile auszurichten. Überdimensionierte Löcher eignen sich besonders für dicke Stahllagen in der Verbindung, da das Ausreiben von Löchern zum Einsetzen von Bolzen schwierig und zeitaufwändig ist. Bei überdimensionierten Bolzenlöchern ist es jedoch schwieriger, die Bauschicht, die Ausrichtung und die Lotrechte zu gewährleisten. Wo Spezifikationen überdimensionierte Lochabmessungen angeben, sollten die Werte in den Tabellen als Maximalwerte betrachtet werden.

Bolzenlöcher mit kurzem und langem Schlitz

Langlöcher ermöglichen zusätzlichen Freiraum für die Montage der Bolzen und für Anpassungen an den Verbindungen, um die Teile auszurichten oder das Gebäude innerhalb der Toleranz für die Lotrechte zu halten (Abbildung 2). Bei Langlöchern ist es jedoch schwieriger, das Gebäude auszurichten und die Lotrechte zu gewährleisten. Die in den Tabellen der anwendbaren Spezifikationen angegebenen Längen der kurzen Schlitz (SSL - Short Slot) und der langen Schlitz (LSL - Long Slot) sind Maximallängen. Auf Wunsch können auch kürzere Längen verwendet werden.



Abbildung 2. Beispiele für Langlöcher

Plasmageschnittene Bolzenlöcher

Alle zuvor genannten Stahlbaunormen für Gebäude erlauben die Verwendung von mit Plasma geschnittenen Bolzenlöchern bis zu einem gewissen Grad. Davon ausgenommen ist die japanische Norm JASS 6 (2007). Einige geben Qualitätskriterien für die Schnittfläche des Lochs, einschließlich Oberflächengüte und Kerben an. Kriterien für die Neigung innerhalb des Loches enthält nur die europäische Norm.

Mit Ausnahme von JASS 6 erlauben Normen die Verwendung von thermischem Schneiden, um Schlitz zwischen gebohrten oder gestanzten Löchern für die Schlitzenden herzustellen. Wenn thermisch geschnittene Löcher erlaubt sind, reduziert das Plasmaschneiden die Zeit und den Aufwand für das gesamte Langloch. Weiterhin erhöht es die Qualität und Genauigkeit, da das Ausrichten der thermischen Schnittfläche auf den Tangentialpunkt des gestanzten oder gebohrten Lochs und das anschließende erforderliche Schleifen vermieden wird.

Mit der Genauigkeit der Position der Bolzenlöcher befassen sich nur drei Normen: die europäische Norm EN 1090-2, die australisch/neuseeländischen Norm AS/NZS 5131 und die japanische Norm JASS 6. Gemäß den nordamerikanischen Normen wird die Lochposition als ausreichend erachtet, wenn sich die verbundenen Teile innerhalb der angegebenen Toleranzen bewegen.

Das thermische Schneiden von Bolzenlöchern an bestimmten Stellen von Stahlbauteilen ist je nach Anwendung und Position im Tragwerk eingeschränkt. Diese Positionen können Bolzenlöcher in Bereichen einschließen, die hohe nicht dehnbare Beanspruchungen erfahren sollen (sie werden auch als Kunststoffscharnierbereiche bezeichnet), von denen erwartet wird, dass sie bei großen seismischen Ereignissen entstehen. Diese Einschränkung schließt nicht alle seismisch beständigen Tragwerke und auch nicht alle seismischen Verbindungen ein. Bei einigen Verbindungen können Plasmaschneidlöcher in einem Teil der Verbindung zulässig sein, nicht jedoch in einem anderen. Weitere Informationen finden Sie in der entsprechenden Norm.

Untersuchungen in Europa (Bannister, et al., 2016, Abschnitt 8.6 Plastische Zugspannungsfestigkeit von Laser- und Plasmaschneidkanten) an 15 mm [19/32 Zoll] dicken Stahlplatten zeigen, dass mit Plasma geschnittene Löcher, bei denen das Loch in der Mitte beginnt und an einer Stelle im Loch parallel zur Dehnungsrichtung fertiggestellt wird, ein ausreichendes Dehnungsvermögen bei Temperaturen von -50 °C [-60 °F] von 355 MPa und 460 MPa [50 und 65 ksi] Streckgrenze von Stahl und ein angemessenes Dehnungsvermögen von Stahl mit höherer Festigkeit bei -20 °C [0 °F] ermöglichen. Es muss jedoch beachtet werden, dass es sich um Einzelzugversuche handelte und die Spannungen und wiederholten Zyklen, die bei seismischen Belastungen auftreten können, nicht berücksichtigt wurden.

Bei einigen Normen können Einschränkungen für thermisch geschnittene Löcher gelten, die sehr häufigen Dauerbelastungen ausgesetzt sind. Mit Plasma geschnittene Löcher für Schraubverbindungen werden häufig für derartige Anwendungen verwendet, wobei für die Schraubverbindung geeignete Dauerbelastungsauslegungskategorien vorgesehen sind. Die entsprechende Norm muss auf Einschränkungen für den spezifischen Fall überprüft werden.

Amerikanische Normen

Statisch belastete Anwendungen

In AISC 360-16, Kapitel M, *Herstellung und Montage (Fabrication and Erection)*, Abschnitt M2.5, heißt es:

„Bolzenlöcher müssen den Bestimmungen der RCSC-Spezifikation für Tragwerkverbindungen mit hochfesten Bolzen (*Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts*), Abschnitt 3.3, nachstehend als RCSC-Spezifikation bezeichnet, entsprechen, mit der Ausnahme, dass thermisch geschnittene Löcher mit einem Oberflächengüteprofil von nicht mehr als 1.000 µZoll zugelassen sind. (25 µm), wie in ASME B46.1 definiert, zulässig sind.“

Während die AISC 360-16 thermisch geschnittene Löcher als Ausnahme angibt, enthält die RCSC-Spezifikation eine ähnliche Formulierung, die thermisch geschnittene Löcher zulässt. Solange die Anforderungen an die Oberflächengüte erfüllt sind, können thermisch geschnittene Löcher, auch Plasmaschneiden, verwendet werden, vorausgesetzt, es sind keine Furchen vorhanden, die 1/16 Zoll [2 mm] überschreiten.

Das PythonX-System kann 1.000 µZoll erreichen. (25 µm) Anforderungen, mit einem typischen Oberflächengütwert von 75 µZoll. (2 µm) um ein Vielfaches besser als die Anforderungen.

Abschnitt M2.2 der AISC 360-16 befasst sich mit dem thermischen Schneiden im Allgemeinen. Darin heißt es, dass die Anforderungen der AWS D1.1/D1.1M:2015, Absätze 5.14.5.2, 5.14.8.3 und 5.14.8.4, erfüllt werden müssen. Absatz 5.14.5.2 behandelt Reparaturverfahren. In Absatz 5.14.8.3 werden die Anforderungen an die Oberflächengüte von thermischen Schnittlöchern behandelt, wobei angegeben wird, dass die Oberflächengüte nicht größer sein darf als in Muster 3 in AWS C4.1-77, *Kriterien für die Beschreibung des Sauerstoffschnittes von Oberflächen- und Messung der Oberflächengüte beim Sauerstoff-*

schneiden. In Absatz 5.14.8.4 sind die Einschränkungen für Kerben und Furchen enthalten, die eine Oberflächengüte von besser als der in Muster 3 dargestellten Größe erfordern, wobei Kerben von mehr als 3/16 Zoll [5 mm] durch maschinelle Bearbeitung oder Schleifen repariert werden müssen. In AISC 360-16, Abschnitt M2.2, heißt es weiterhin, dass freie Kanten, die nicht von Materialermüdung betroffen sind, keine Furchen von mehr als 3/16 Zoll [5 mm] Tiefe aufweisen dürfen und dass jegliche Kerben von mehr als 3/16 Zoll [5 mm] durch Schleifen oder Reparaturschweißen entfernt werden müssen.

Bei einem PythonX-System, das sich in einem guten Betriebszustand befindet, sollten Reparaturen von Furchen nicht erforderlich sein.

Die RCSC-Spezifikation 2014, Abschnitt 3.3, erlaubt das thermische Schneiden von Löchern in statisch belasteten Verbindungen, sofern sie mit mechanisch geführten Mitteln hergestellt werden, wobei die Oberflächengüte 1.000 µZoll [25 µm] nicht überschreiten darf. Die RCSC beschränkt auch „gelegentlich auftretende Kerben“ auf höchstens 1/16 Zoll [2 mm] Tiefe. Freihändig thermisch geschnittene Löcher und thermisch geschnittene Löcher für zyklische Anwendungen sind zulässig, „wenn sie vom Ingenieur genehmigt werden“. Für freihändig geschnittene Löcher heißt es im RCSC-Kommentar, dass das Loch normalerweise geschliffen werden muss, um die maximale Oberflächengüte von 1.000 µZoll [25 µm] zu erreichen.

Da es sich beim PythonX-System um ein mechanisiertes System handelt, sind diese Bestimmungen bei Schneiden von Hand nicht anwendbar.

Zyklisch belastete Anwendungen

Das AISC 360-Kriterium für zyklisch belastete Verbindungen wird in erster Linie in Anhang 3 dieser Norm behandelt. Der Rest der AISC 360 gilt für zyklisch belastete Verbindungen, außer es wurden Änderungen gemäß dem Anhang vorgenommen. Anhang 3 enthält keine Einschränkungen für Herstellungsverfahren von Bolzenlöchern, die über die in AISC 360 beschriebenen hinausgehen. Wie im zuvor erwähnten RCSC-Kommentar erläutert, ist es wichtig zu erkennen, dass die Art der Schraubverbindung (d. h. ob ein Schlupf auftritt oder nicht) den Punkt des möglichen Beginns eines Materialermüdungsrissses bestimmt. Die in Anhang 3 erläuterten Schraubverbindungen müssen mit hochfesten Bolzen, die den schlupfkritischen Anforderungen entsprechen, hergestellt werden.

Ein PythonX-System sollte, wenn die richtige Art der Schraubverbindung angegeben wird, für die Herstellung von Löchern für zyklisch belastete Tragwerke geeignet sein.

Im RCSC-Kommentar zu Abschnitt 3.2.2 heißt es:

„Für zyklisch belastete Verbindungen haben Testergebnisse gezeigt, dass, wenn kein großer Schlupf in der Verbindung auftritt, ein Reibungsmaterialermüdungsversagen gewöhnlich im Gesamtquerschnitt vor einem Materialermüdungsversagen im Nettoquerschnitt auftritt (Kulak et al., 1987, S. 116, 117). Umgekehrt tritt, wenn in zyklisch belasteten Verbindungen Schlupf auftritt, gewöhnlich ein Versagen im Nettoquerschnitt auf, und die Kante eines Bol-

zenlochs wird zum Ausgangspunkt der Rissbildung (Kulak et al., 1987, S. 118). Daher sollte bei zyklisch belasteten Verbindungen, die als schlupfkritisch ausgelegt sind, die Methode zur Herstellung von Bolzenlöchern (entweder thermisches Schneiden oder Bohren) die endgültige Bruchlast nicht beeinflussen, da ein Ausfall normalerweise im Gesamtquerschnitt auftritt, wenn kein großer Schlupf vorhanden ist.“

Das thermische Schneiden von Bolzenlöchern mit einem PythonX-System ist mit Zustimmung des Ingenieurs gemäß den RCSC-Spezifikationen zulässig. Der Kommentar gibt die Begründung für die Verwendung von thermisch geschnittenen Löchern, wenn schlupfkritische Verbindungen verwendet werden.

Seismisch belastete Anwendungen

AISC 358-16 listet neun Momentrahmenverbindungen auf, die in einem Gebäude ohne zusätzliche Tests verwendet werden dürfen und daher als vorqualifiziert eingestuft werden. Die allgemeinen Anforderungen für die vorqualifizierten Verbindungen werden in den Kapiteln 1 bis 4 beschrieben. Die spezifischen Anforderungen für einzelne vorqualifizierte Verbindungen werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. Allgemeine Anforderungen an die Verschraubung für vorqualifizierte Momentverbindungen finden Sie in Kapitel 4 dieser Spezifikation. Hier werden keine Einschränkungen für plasmageschnittene Löcher aufgeführt.

Plasmageschnittene Löcher können für folgende in AISC 358-16 aufgelistete vorqualifizierte Momentverbindungen verwendet werden:

- ▶ Verbindung mit reduziertem Trägerprofil (RBS)
- ▶ Geschraubte, nicht versteifte und versteifte verlängerte Endplatten-Momentverbindungen
- ▶ Geschweißte, unverstärkte Flanschsteg-Momentverbindung (WUF-W - Welded Unreinforced Flange-Welded)
- ▶ Seitenplatte für Momentverbindung
- ▶ Simpson Strong-Tie feste Rahmenmomentverbindung

Bei der vorqualifizierten Doppel-T-Momentverbindung müssen die Bolzenlöcher in den T-Stumpf und die Trägerflansche gebohrt oder gestanzt und gerieben werden, wodurch ein thermisches Schneiden ausgeschlossen wird. Die Bolzenlöcher in der Scherlasche und dem Trägersteg können jedoch thermisch geschnitten werden. In AISC 358-16 werden keine Einschränkungen für das thermische Schneiden von Löchern in der Säule genannt.

Die Momentverbindung für reduzierte Trägerprofile (RBS) enthält keine Einschränkungen für plasmageschnittene Löcher. Mit PythonX können die Stegbolzenlöcher, die Schweißnahtzugangslöcher und die reduzierten Trägerprofile, die diesem Verbindungsdetail zugeordnet sind, geschnitten werden.

Die geschweißte, nicht verstärkte Flanschsteg-Momentverbindung (WUF-W) unterliegt keinen Einschränkungen für plasmageschnittene Löcher und die PythonX kann verwendet werden, um die Stegbolzenlöcher sowie die speziellen Schweißnahtzugangslöcher, die als Teil des vorqualifizierten Zustands der Verbindung erforderlich sind, zu schneiden.

Zusätzlich zu den seismischen Verbindungen, bei denen thermisch geschnittene Löcher zulässig sind, beschränkt die AISC 358-16 die Methode der Lochherstellung für diese Verbindungen auf Bohren bzw. das Stanzen und Reiben:

- ▶ Momentverbindung der geschraubten Flanschplatte (BFP - Bolted Flange Plate)
- ▶ Verschraubte Kaiser-Halterung (KBB - Kaiser Bolted Bracket) Momentverbindung
- ▶ CONXTECH CONXL-Momentverbindung

Bei dieser Art dieser Verbindungen ist es unwahrscheinlich, dass Bauteile für die verschraube Kaiser-Halterungs- oder die CONXTECH CONXL-Momentverbindung mit einem PythonX System hergestellt werden. Obwohl es wünschenswert wäre, die Löcher für geschraubte Flanschplatten-Momentverbindungen thermisch zu schneiden, wurden keine Tests durchgeführt, um die Eignung der auf diese Weise hergestellten Löcher zu überprüfen.

Für seismische Momentverbindungen, die nicht in AISC 341 aufgeführt sind, können Tests gemäß Abschnitt K der AISC 358-16 durchgeführt werden. Danach ist das Verfahren zur Herstellung von Löchern eine vorqualifizierte Variable (siehe AISC 358-16, Abschnitt K1.4 f(e)). Wenn Löcher für Muster thermisch geschnitten werden, können in der Produktion thermisch geschnittene Löcher verwendet werden. Wenn für das Muster Bohrungen verwendet werden, können thermisch geschnittene Bohrungen in der Produktion nicht verwendet werden.

Kanadische Normen

Statisch belastete Anwendungen

Die CSA S16:2014 behandelt thermisch geschnittene Löcher in Abschnitt 28.4.3 wie folgt:

„Thermisch geschnittene Löcher, die durch geführte Maschinen hergestellt werden, können in statisch belasteten Konstruktionen verwendet werden, wenn die tatsächliche Lochgröße die Nennlochgröße um nicht mehr als 1 mm überschreitet. Längs der Ränder der thermisch geschnittenen Schlitzte können Kerben mit einer Tiefe von höchstens 1,5 mm zugelassen werden. Von Hand geschnittene Befestigungslöcher dürfen nur mit Zustimmung des Konstrukteurs zugelassen werden.“

Die PythonX ist gemäß CSA S16:2014 für die Herstellung von Löchern für statisch belastete Anwendungen geeignet.

Zyklisch belastete Anwendungen

Es werden keine zusätzlichen Anforderungen genannt.

Seismisch belastete Anwendungen

Die CSA S16:2014, Absatz 28.4.2, Löcher an Kunststoffscharnieren, besagt, dass Löcher, die sich in einem Kunststoffscharnierbereich befinden, „... entweder gestanzt und gerieben oder in voller Größe gebohrt werden müssen.“ Um sicherzustellen, dass die Löcher gestanzt und gerieben oder gebohrt werden, verlangt Abschnitt 28.4.2 zusätzlich: „Diese Anforderung muss in Konstruktionszeichnungen und in den Spezifikationen für die Werkstatt angegeben werden.“

Europäische Normen

Statisch belastete Anwendungen

In den europäischen Normen wird das Schneiden von Bolzenlöchern als „Lochung“ bezeichnet. EN 1090-2:2018 Abschnitt 6.6.3 erlaubt das Lochen und „... es kann durch ein beliebiges Verfahren (z. B. Bohren, Stanzen, Laser-, Plasma- oder anderes thermisches Schneiden)... ausgeführt werden.“ In Abschnitt 6.6.3 sind zwei Hauptanforderungen für eine zu verwendende Technik aufgeführt. Die Härte- und Qualitätsanforderungen in Abschnitt 6.4 müssen erfüllt werden und das freie Einpassen der Befestigungselemente muss durch die Löcher der zusammengebauten Teile ermöglicht werden.

EN1090-2 listet eine Anzahl von Maßtoleranzen in Bezug auf Lochgröße, Position und Schnittwinkel auf. Diese Toleranzen müssen vor Beginn der Lochherstellung gemäß EN1090-2 überprüft werden.

Das PythonX-System kann gemäß EN 1090-2 zur Herstellung von Bolzenlöchern verwendet werden, vorausgesetzt, das Schneidverfahren ist qualifiziert (siehe EN 1090-2 Anhang D) und die Testergebnisse erfüllen die erforderliche Härte (falls zutreffend), Oberflächengüte und Keganforderungen.

Zyklisch belastete Anwendungen

Es werden keine zusätzlichen Anforderungen genannt.

Seismisch belastete Anwendungen

Es werden keine zusätzlichen Anforderungen genannt.

Australische und Neuseeländische Normen

Statisch belastete Anwendungen

Die kombinierten australischen und neuseeländischen Normen sind den europäischen Normen ähnlich und bezeichnen das Schneiden von Löchern als „Lochen“. Abschnitt 6.7.1 der AS/NZS 5131:2016, Verfahren zur Herstellung von Löchern, ermöglicht „... entweder Maschinenschneiden...“ oder eine Reihe anderer Stanz-, Bohr- und Reiboptionen zur Herstellung von Bolzenlöchern. Maschinenschneiden umfasst thermische Schneidmethoden, wie in Abschnitt 6.5.1 beschrieben, in dem es heißt:

„Die Stahlteile können entweder durch Sägen, Scheren, Zuschneiden, Maschinenbearbeitung, thermisches Schneiden (einschließlich Laserschneiden und Plasmaschneiden) oder durch Wasserschneiden zugeschnitten werden, es sei denn, bestimmte Verfahren sind anders als in der Konstruktionsspezifikation oder an anderer Stelle in dieser Norm angegeben, ausgeschlossen.“

Das PythonX-System kann verwendet werden, um Löcher herzustellen, wenn gemäß den australischen und neuseeländischen Normen gebaut wird.

Zyklisch belastete Anwendungen

Es werden keine zusätzlichen Anforderungen genannt.

Seismisch belastete Anwendungen

Nur für Neuseeland verlangt die AS/NZS 5131:2016 Absatz 6.13.2, dass die Bolzenlöcher in nachgiebigen Bereichen der Kategorien 1, 2 oder 3 eine maximale Rauheit (CLA) von 12 µm aufweisen müssen. Bolzenlöcher in nachgiebigen Bereichen von Eisenbahnbrücken dürfen nicht ein „Maschinenbrennschnitt“ in voller Größe sein.

Japanische Normen

Statisch belastete Anwendungen

Aufgrund der hohen Erdbeben­tätigkeit in Japan werden die Gebäude so gebaut, dass sie seismischen Belastungen standhalten. Es gibt keine speziellen Bestimmungen für statische Anwendungen.

Seismisch belastete Anwendungen

Wie bereits erwähnt, sind Gebäude angesichts der hohen Erdbeben­tätigkeit in Japan so gebaut, dass sie seismischen Belastungen standhalten. In Abschnitt 4.9 der JASS 6 (2007) müssen alle Bolzenlöcher, mit einigen Ausnahmen von gestanzten Löchern, gebohrt werden. Typische Stahlgebäude in Japan verwenden eine Schraubverbindung, bei der viele ihrer Bolzenlöcher in Kunststoffscharnierbereichen platziert werden, bei denen thermisch geschnittene Löcher im Allgemeinen nicht zulässig sind.

Eine Ausnahme wird in Abschnitt 4.9 *Bohren* erläutert:

„Das Zuschneiden mit Gas kann für Löcher mit einem Durchmesser von mindestens 30 mm, für Ankerbolzen, Trennbleche und Rohrleitungen für Ausrüstung sowie für Löcher für Metallbefestigungen, Innen- und Außenabschlussarbeiten, Betonarbeiten usw. verwendet werden. Die Rauigkeit der durch Gasschneiden hergestellten Löcher darf 100 µmRz nicht überschreiten, und die Genauigkeit des Lochdurchmessers muss innerhalb von ±2 mm liegen.“

Es ist nicht geklärt, ob diese Ausnahme für Bohrungen, die für das „Gasschneiden“ gewährt wurde, sich auf das Plasmaschneiden erstrecken könnte. Der Benutzer dieses Handbuchs sollte den Ingenieur oder einen anderen technischen Sachverständigen bezüglich der Anwendbarkeit dieser Ausnahme befragen, wenn das Schneiden auf der PythonX durchgeführt werden sollte.

Zyklisch belastete Anwendungen

Englische Übersetzungen von japanischen Anforderungen für zyklisch belastete Anwendungen sind derzeit nicht verfügbar und werden daher nicht in diesem Handbuch behandelt.

PythonX-Benutzer sollten sich bezüglich der Akzeptanz von plasmageschnittenen Löchern für zyklisch belastete Anwendungen an den Ingenieur oder einen anderen technischen Sachverständigen wenden.

Plasmaschneidkanten

Schneidkanten müssen aus verschiedenen Gründen getrennt von Löchern betrachtet werden. Kanten haben nichts mit Schraubverbindungen zu tun. Wie aus der vorangegangenen Beschreibung hervorgeht, gibt es viele anwendbare Regeln für plasmageschnittene Löcher, zum Teil, weil Schraubverbindungen zuerst mit Anforderungen an gebohrte oder gestanzte Löcher bewertet wurden. Das Plasmaschneiden von Löchern für Schraubverbindungen stellt eine neuere Entwicklung dar. Beim Thema plasmageschnittene Kanten ging es bei der älteren Technologie nicht um mechanisches Schneiden, sondern um Autogenschneiden, einem anderen thermischen Schneidverfahren. Die Zulassung des Plasmaschneidens als Alternative zum Autogenschneiden ist weniger komplex und wird im Allgemeinen von den meisten Normen bewilligt. Die Qualitätsstandards werden durch verschiedene Normen vorgegeben und geometrische Anordnungen können spezifiziert sein (z. B. Mindestradienabmessungen).

Plasmageschnittene Kanten fallen in verschiedene Kategorien. Für die Zwecke dieses Handbuchs werden sie in vier Kategorien unterteilt: freie Kanten, Stegdurchführungen, Schweißnahtzugangs-löcher und Trägerausklinkungen. Es wird weiterhin einen separaten Abschnitt zum thermischen Schneiden von reduzierten Trägerprofilen geben, ein Detail, das normalerweise bei seismischen Anwendungen auftritt.

Freie Kanten

Der Begriff „freie Kante“ wird verwendet, um die Positionen zu identifizieren, die eine Kante an dem Teil bilden, unabhängig davon, ob es sich um einen Steg oder um einen Flansch, und um eine Position, die nicht Teil einer Schweißverbindung ist, handelt. Teilekanten, die thermisch auf Breite oder Form zugeschnitten werden oder einfach abgeschnitten werden, um bei Bedarf abgeschernte und gewalzte Kanten zu entfernen, müssen den Qualitätsanforderungen der geltenden Norm entsprechen.

Amerikanische Normen

AISC 360-16, Abschnitt M2.2, Thermisches Schneiden, schreibt vor, dass die Anforderungen von AWS D1.1/D1.1M:2015, Absätze 5.14.5.2, 5.14.8.3 und 5.14.8.4, mit folgenden Ausnahmen gelten: Thermisch geschnittene freie Kanten, die nicht Materialermüdung ausgesetzt sind, müssen frei von runden Kerben mit einer Tiefe von mehr als 5 mm [3/16 Zoll] und ohne scharfe V-förmige Kerben sein. Größere Kerben, als zugelassen, müssen durch Schleifen oder Schweißen repariert/korrigiert werden.

AWS D1.1/D1.1M:2015, Absatz 5.14.8, erkennt „elektrische Lichtbogenschneid- und Fugenhobelverfahren (einschließlich Plasmaschneiden und Fugenhobeln)...“ an. Die Schnitte müssen glatt und frei von Rissen und Kerben sein. Bei zyklisch belasteten Tragwerken ist das freie Schneiden von Hand nur zulässig, wenn der Ingenieur dies genehmigt.

AWS D1.1/D1.1M:2015, Absatz 5.14.8.3, enthält Grenzwerte für die Oberflächengüte, siehe Tabelle 3.

TABELLE 3. AWS D1.1/D1.1M:2015: 2015 MAXIMALE OBERFLÄCHENGÜTE FÜR THERMISCH GESCHNITTENE KANTEN

Materialdicke		Maximale Oberflächengüte AWS C4.1-77 Beispiel
Zoll	mm	
bis zu 4	bis zu 100	3
4 bis 8	100 bis 200	2
Enden der Bauteile (Unterliegen nicht der Berechnung der Spannung an den Enden)		2

Der Benutzer dieses Handbuchs wird hinsichtlich weiterer Anforderungen an die Zulässigkeit von Kerben auf Absatz 5.14.8.4 der AWS D1.1/D1.1M:2015 verwiesen.

Ein PythonX-System in einwandfreiem Betriebszustand erfüllt die Kriterien gemäß AWS D1.1. Für zyklisch belastete Tragwerke ist keine Genehmigung des Ingenieurs erforderlich, weil die PythonX kein „freihändiges Schneiden“ verwendet.

Kanadische Normen

In CSA S16-14, Absatz 28.2, Thermisches Schneiden, ist ein maschinengeführtes thermisches Schneiden zulässig, wobei die Schnittkanten die Anforderungen von CSA W59 erfüllen müssen. CSA S16-14, Absatz 28.3.1, fährt fort mit der Aussage, dass das Nachschneiden oder Schlichten (d.h. Bearbeiten oder Schleifen) von thermisch geschnittenen Kanten nicht erforderlich ist, außer es wird in den Zeichnungen angegeben oder für die Kantenvorbereitung für das Schweißen festgelegt.

CSA W59-18, Abschnitt 5.3.3, enthält Grenzwerte für die Oberflächengüte gemäß Tabelle 4.

TABELLE 4. CSA W59-18 MAXIMALE OBERFLÄCHENGÜTE FÜR THERMISCH GESCHNITTENE KANTEN

Materialdicke		Maximale Oberflächengüte	
mm	Zoll	µm	µZoll
bis zu 100	bis zu 4	25	1000
100 bis 200	4 bis 8 Zoll	50	2000
Enden der Bauteile (Unterliegen nicht der Berechnung der Spannung an den Enden)		50	2000

Der Benutzer dieses Handbuchs sollte in Bezug auf zusätzliche Anforderungen für die Zulässigkeit von Kerben Absatz 5.3.4 der CSA W59-18 beachten.

Ein PythonX-System in einwandfreiem Betriebszustand erfüllt die Kriterien von CSA S16 und CSA W59.

Europäische Normen

EN 1090-2:2018, Abschnitt 6.4.1, schreibt vor, dass das Schneiden freier Kanten den Anforderungen an Oberflächengüte, geometrische und maximale Härte entsprechen muss. Darin heißt es: „Bekannte und anerkannte Schnittmethoden sind Sägen, Scheren, Schneiden mit Trennscheiben, Wasserstrahltechniken und thermisches Schneiden.“ Das thermische Schneiden von Hand ist auf Situationen beschränkt, in denen das thermische Schneiden mit der Maschine nicht praktikabel ist.

EN 1090-2:2018, Tabelle 9, enthält die Anforderungen an die Oberflächengüte, die gemäß ISO 9013:2017, Abschnitt 7.2.3, wie in Tabelle 5 dargestellt, zu bewerten sind.

TABELLE 5. EN 1090-2:2018 ANFORDERUNGEN AN DIE OBERFLÄCHENGÜTE FÜR FREIE KANTEN

Ausführungsklasse	Kriterien
EXC1	Schnittkanten müssen frei von erheblichen Unregelmäßigkeiten sein und Schlacke muss entfernt werden
EXC2, EXC3 und EXC4	Mittlere Höhe des Profils, Rz5 = Bereich 4 $110 + [1,8 a]$, wobei a = Werkstückdicke in mm ist

EN 1090-2:2018, Tabelle 9, enthält weiterhin Abnahmekriterien für die Rechteckigkeit oder Rechtwinkligkeit einer thermischen Schnittkante, wobei auf die Norm ISO 9013: 2017 Unterabschnitt 7.2.2., verwiesen wird. Tabelle 7 enthält die erforderliche Rechtwinkligkeit oder Winkeltoleranz, u. Siehe Tabelle 6 für die angegebene Ausführungsklasse.

TABELLE 6. EN 1090-2:2018 RECHTWINKLIGKEIT ODER WINKELTOLERANZ

Ausführungsklasse	Kriterien
EXC1	Schnittkanten müssen frei von erheblichen Unregelmäßigkeiten sein und Schlacke muss entfernt werden
EXC2	Bereich 5
EXC3 und EXC4	Bereich 4

TABELLE 7. ISO 9013: 2017, TABELLE 4 RECHTWINKLIGKEIT ODER WINKELTOLERANZ, U

Bereich	Tabelle 4 - Rechtwinkligkeit oder Winkeltoleranz, u [mm]
1	$0,05 + 0,003 a$
2	$0,15 + 0,007 a$
3	$0,4 + 0,01 a$
4	$0,8 + 0,02 a$
5	$1,2 + 0,035 a$

a = Werkstückdicke

Das Autogenschneiden wird im Allgemeinen einen Kantenrand von nahezu 90° erzeugen. Beim herkömmlichen Plasmaschneiden kann eine quadratische Kante von $\pm 2^\circ$ erzielt werden. Diese $\pm 2^\circ$ können durch ein verbessertes Plasmaschneiden und eine präzise Steuerung des Brennerwinkels verbessert werden. Die geringe Abweichung vom Quadrat führt selten zu Problemen.

Das PythonX-System kann die Verjüngung unter 1° , bei einem Mittelwert von $0,5^\circ$ beibehalten. Da beim Plasmaschneiden normalerweise eine leichte Schräge auf einer Schnittfläche und eine relativ quadratische Kante auf der anderen Schnittfläche erzeugt wird, führt PythonX alle seine Schnitte im Uhrzeigersinn oder von links nach rechts aus und passt den Brennerwinkel mit einem patentierten Verfahren an, um die Senkrechte der Löcher zu verbessern. Eine globale Einstellung auf der PythonX ermöglicht die Umkehrung der Schneidrichtung.

EN 1090-2:2018 begrenzt die Oberflächenhärte für Kohlenstoffstähle mit einer Streckspannung von 460 MPa oder höher (65 ksi oder höher) auf maximal 450 (HV10). Im Falle, dass die Härte dieser freien Kantenflächen diese Grenze überschreitet, wird empfohlen, den Stahl vor dem Schneiden vorzuwärmen. Die Prüfmethode wird in ISO 6507 beschrieben.

Bei der zyklischen Belastung warnt EN 1090-2:2018 davor, dass einige Schneidmethoden bei Teilen, die Materialermüdung unterliegen, ungeeignet sein können. Falls Bedenken hinsichtlich der Anwendbarkeit von thermischen Schnittkanten in Situationen mit Materialermüdung bestehen, sollten andere Vorschriften und Normen als Orientierungshilfe herangezogen werden, und der Ingenieur oder ein anderer technischer Sachverständiger sollte befragt werden.

Australische und Neuseeländische Normen

Die nach AS/NZS 5131:2016, Absatz 6.5.1, zulässigen Schneidmethoden sind „Sägen, Scheren, Zuschneiden, Bearbeiten, thermisches Schneiden (einschließlich Laserschneiden und Plasmaschneiden) oder Wasserschnidverfahren, es sei denn, bestimmte Verfahren sind anders als in der Konstruktionsspezifikation oder an anderer Stelle in dieser Norm angegeben, ausgeschlossen.“

In der AS/NZS 1554.1:2014, *Schweißen von Baustählen*, wird in Absatz 5.1.2, AS 3990 *Mechanische Ausrüstung - Stahlarbeiten*, darauf verwiesen, dass AS 4100 *Stahlkonstruktionen* aufgrund der Anforderungen

an die Kanten nicht in eine Schweißverbindung eingebaut werden dürfen. Tabelle 8. zeigt die Anforderungen an die Oberflächengüte in AS / NZS 4100. Die AS/NZS 1554.4:2014, *Schweißen von hochfesten Vergütungsstählen und Schweißen von Stahlkonstruktionen mit hoher Dauerbeanspruchung*, enthält in Bezug auf Oberflächen von thermisch geschnittenen Kanten, die nicht in eine Schweißnaht integriert sind, dieselbe Beschreibung, wie die AS/NZS 1554.1:2014.

TABELLE 8. AS 4100 TABELLE 14.3.3 MAXIMALE OBERFLÄCHENGÜTE DES SCHNITTS

Anwendung	Maximale Rauheit (CLA) (μm)
Normale Anwendungen, d. h. wenn die Oberflächen und die Kanten im geschnittenen Zustand oder mit geringfügigem Abrichten verbleiben	25
Materialermüdungsanwendungen (Detailkategorien)	
– Detailkategorie ≥ 80 MPa	12
– Detailkategorie < 80 MPa	25

Hinweise

- 1 Rauheitswerte können durch Vergleich mit Oberflächenreplikaten wie den WTIA-Flame Cut-Oberflächenrepliken geschätzt werden.
- 2 Geeignete Brennschneidtechniken werden in der WTIA Technical Note 5 angegeben.
- 3 CLA = Mittellinien-Durchschnittsmethode (Centre-line average method) [siehe AS 2382].

Japanische Normen

JASS 6 (2007), Abschnitt 4.6, Schneiden und Bearbeiten, Punkt (1), ermöglicht das Schneiden mit folgenden Methoden: „... die am besten geeignete Methode, wie z. B. Maschinenschneiden, Gasschneiden oder Plasmaschneiden,...“, Abschnitt 4.6, Punkte (3) und (4) fordern, dass die Oberflächengüte nicht größer als $100 \mu\text{mRz}$ und die Kerbtiefe nicht mehr als 1 mm [1/32 Zoll] beträgt. Wenn die Oberflächengüte oder Kerbtiefe diese Anforderungen nicht erfüllen, können die Kanten durch Schleifen bearbeitet werden.

Stegdurchführungen und Wiedereintrittsecken

Stegdurchführungen sind häufig erforderlich, um Heizungs-, Lüftungs- und Klimakanäle (HVAC - Heating, Ventilation and Air Conditioning) in einem Gebäude unterzubringen, aber auch um Zugang zu anderen mechanischen, wasserführenden und elektrischen Systemen zu erlangen. In einigen Konstruktionen werden Stegdurchführungen für architektonische Zwecke, zur Gewichtsreduzierung und für die Konstruktion unter Verwendung von individuellen Träger- oder Bodenrahmensystemen verwendet.

Durchführungen müssen genau auf die geforderten Maße zugeschnitten werden, ohne dass mehr Material als nötig entfernt wird, denn das übermäßige Entfernen von Material schwächt das Teil. Die Ecken müssen glatt und abgerundet sein, um Spannungskonzentrationen zu reduzieren, und sie müssen frei von Kerben sein.

Viele der Anforderungen, die für Durchführungen und Wiedereintrittsecken gelten, wurden, mit einigen Ausnahmen, die hier erläutert werden, in den Anforderungen für freie Kanten genannt.

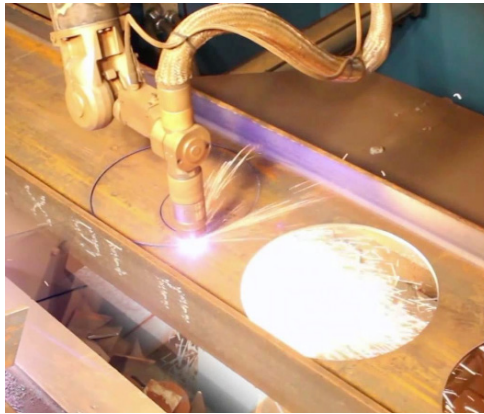


Abbildung 3. Beispiele für Stegdurchführungen

Amerikanische Normen

Die zuvor in AISC 360-16 M2.2 beschriebenen Anforderungen gelten für Stegdurchführungen und Wiedereintrittsecken. Wiedereintrittsecken müssen einen gekrümmten Übergang haben, wobei jedoch keine Mindestradiusanforderungen angegeben werden. Es wird empfohlen, bei statischen Lasten einen Radius von 1/2 bis 3/8 Zoll (13 bis 10 mm) für Wiedereintrittsecken zu verwenden.

In Abschnitt 5.15 von AWS D1.1/D1.1M:2015 wird speziell auf Wiedereintrittsecken eingegangen. Thermisches Schneiden ist zulässig und der Radius der Wiedereintrittsecke muss, mit Ausnahme von Ecken im Verbindungsmaterial und in Trägersausklinkungen, 25 mm (1 Zoll) oder mehr betragen. Der größere Radius sorgt für einen sanfteren Übergang des Spannungsflusses im Teil. Die thermisch geschnittene Oberfläche muss nicht geschliffen werden, obwohl das Schleifen erforderlich ist, um die Anforderungen an die Oberflächengüte zu erfüllen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass AISC 360-16 die Ausnahme von AWS D1.1/D1.1M:2015, Absätze 5.14 und 5.15, enthält.

Für zyklisch belastete Teile bietet AISC 360-16, Anhang 3, zwei Radiusabmessungen mit jeweils unterschiedlichen Materialermüdungskategorien (siehe AISC 360-16, Tabelle A-3.1, Beispiel 1.3). Wiedereintrittsecken mit einem Radius größer oder gleich 1 Zoll [25 mm], geschliffen auf blankes Metall, werden der Materialermüdungskategorie C zugeordnet, während ein Radius größer oder gleich 3/8 Zoll [10 mm] ein Detail der Kategorie E' darstellt. Im Falle des Details der Kategorie E' muss die Oberfläche nicht geschliffen werden, und die maximale Oberflächengüte beträgt 1.000 µZoll. (25 µm), AWS C4.1, Muster 3.

Kanadische Normen

Wie die amerikanischen Normen erlaubt auch der Absatz 28.2 der CSA S16:2014 thermisches Schneiden für Wiedereintrittsecken. Der Radius dieser Wiedereintrittsecken muss mit einem Mindestradius von 14 mm [9/16 Zoll] so groß wie möglich sein und muss frei von Kerben sein. Dies wird auch von CSA W59-18, Abschnitt 5.3.6, verlangt.

Europäische Normen

Für EN1090-2:2018 gilt die vorherige Beschreibung in diesem Handbuch für freie Kanten bei Wiedereintrittsecken und Stegdurchführungen. Gemäß Abschnitt 6.7, Ausschnitte, gelten zusätzliche Radiusanforderungen. Alle zwei Flächen, die sich unter Winkeln von weniger als 180° schneiden, werden als Wiedereintrittsecken erachtet. Der minimale Radius der Ecken beträgt 5 mm [3/16 Zoll]. Die Ecke muss abgerundet sein und ein Überschneiden ist nicht erlaubt.

Australische und Neuseeländische Normen

In AS/NZS 5131:2016, Absatz 6.5.3, wird ein Mindestradius von 10 mm [3/8 Zoll] festgelegt und es wird vorgeschrieben, dass die Wiedereintrittsecken frei von Kerben sein müssen. Eventuelle Kerben, die beim Schneiden entstehen, müssen repariert werden. Für AS 4100, Absatz 14.3.3, ist der gleiche Mindestradius von 10 mm vorgeschrieben.

Japanische Normen

JASS 6 (2007) enthält keine zusätzlichen Bestimmungen für das Schneiden von Stegdurchführungen, die über die für thermische Schnittkanten hinausgehen.

Trägerausklinkungen

Eine Trägerausklinkung ermöglicht, dass ein Träger in einen tragenden Balken passt. Eine Ausklinkung wird erzeugt, indem der Trägerflansch und ein Teil des Trägerstegs abgeschnitten werden.

Das AISC Steel Construction Manual (Handbuch für den Stahlbau), 15. Auflage, Abbildung 9-10 (siehe Abbildung 4), empfiehlt, zuerst den Steg zu schneiden und danach den Flansch an einer Phase zu schneiden, um zu vermeiden, dass eine solche Kerbe an der Kreuzung von zwei Schnitten zurückbleibt. Ein Radius sollte, obwohl kein Mindestradius angegeben ist, in der Ecke verbleiben.

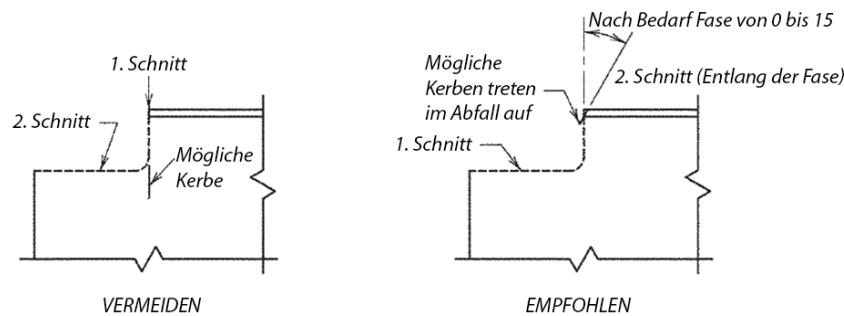
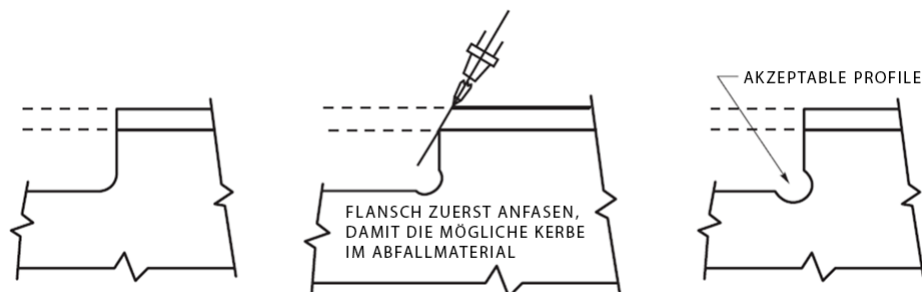


Abb. 9.9 Empfohlene Zuschneidepraktiken.

Mit freundlicher Genehmigung des American Institute of Steel Construction, Steel Construction Manual (Handbuch für den Stahlbau), Abbildung 9-10

Abbildung 4. AISC Steel Construction Manual (Handbuch für den Stahlbau), Abbildung 9-10

Auf der anderen Seite zeigt die Abbildung C-5.2 in AWS D1.1/D1.1M:2015 Beispiele für bewährte Verfahren zum Schneiden von Ausklinkungen, bei denen der Flansch zuerst mit einer schärferen Fase geschnitten wird. Dadurch wird die Gefahr einer Kerbe reduziert, weil mehr Stegmaterial weggeschnitten werden muss, um die Position des horizontalen Trägerstegausschnitts zu erhalten. Diese Abbildung zeigt auch die Verwendung eines Kreuzungsbereichs mit großem Radius zwischen dem Flanschabschnitt und dem Stegausschnitt, was insbesondere dann von Nutzen ist, wenn eine durch Schneiden hinterlassene Kerbe repariert wird (siehe Abbildung 5).



Mit freundlicher Genehmigung der American Welding Society, AWS D1.1/D1.1M:2015, Abbildung C-5.2

Abbildung 5. AWS D1.1/D1.1M:2015, Abbildung C-5.2

Die Ergebnisse mangelhafter Praxis und Technik beim Schneiden einer Trägersausklinkung mit Autogenschneiden werden in Abbildung 6 dargestellt.

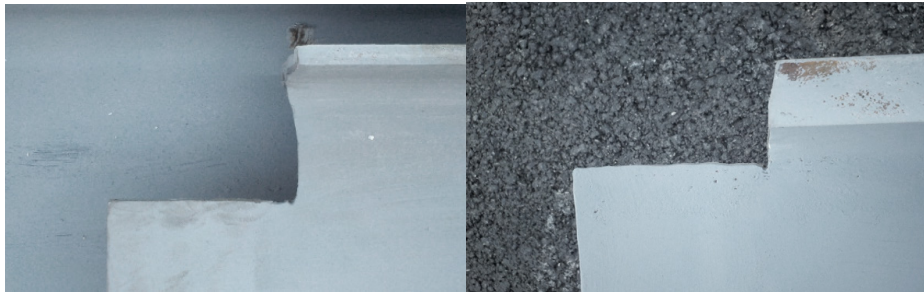


Abbildung 6. Schlechte Praktiken beim Schneiden von Trägersauklinkungen

Die Schnitte von schlechter Qualität in Abb. 6 können mit dem gesteuerten Trägerschnitt in Abb. 7, der unter Verwendung von numerisch gesteuertem, verbessertem Plasmaschneiden ausgeführt wird, verglichen werden. Ein zusätzlicher Vorteil eines derartig gesteuerten Schneidens besteht darin, dass die Tiefe der Trägersauklung minimiert werden kann und die maximale Materialstärke des Trägerstegs für die Festigkeit beibehalten wird. Dadurch wird die Notwendigkeit von verstärkten Stegen reduziert und der gewünschte Abstand der Bolzenlochkanten eingehalten werden.



Abbildung 7. Gesteuerter Zuschnitt einer Trägersauklung

Amerikanische Normen

Für Trägersauklungen schreibt die AISC 360-16 die allgemeinen Anforderungen für das thermische Schneiden von freien Schnittkanten und Wiedereintrittsecken, wie in den vorangehenden Abschnitten beschrieben, vor, mit zwei Ergänzungen:

- 1) Für gewalzte Profile mit einer Flanschstärke von nicht mehr als 2 Zoll (50 mm) darf die maximale Oberflächengüte 2.000 μ Zoll nicht überschreiten. (50 μ m) (AWS C4.1 Muster 2).
- 2) Für gewalzte Profile mit einer Flanschstärke von mehr als 2 Zoll (50 mm) und geschweißte zusammengesetzte Profile mit einer Materialdicke von mehr als 2 Zoll (50 mm) ist vor dem thermischen Schneiden eine Vorwärmtemperatur von mindestens 66 °C (150 °F) erforderlich.

Durch das Vorwärmen unmittelbar vor dem Schneiden soll die Härte der Oberflächenschicht reduziert werden.

AWS D1.1/D1.1M:2015, Absatz 5.15, Wiedereintrittsecken, befreit Trägersausklinkungen von der für andere Wiedereintrittsecken geltenden Mindestradiusgröße von 1 Zoll [25 mm]. Ausgenommen von dieser Bestimmung ist der Abschnitt M2.2 in AISC 360-16.

Gemäß AWS D1.1/D1.1M:2015, Absatz 5.16.3, Grobe Formen für Trägersausklinkungen, die an geschweißten Teileverbindungen verwendet werden, muss die Schnittfläche der Trägersausklinkung zu blankem Metall geschliffen und mit einem der Magnetfeld-Partikelprüfverfahren (MT) oder einer zerstörungsfreien Prüfung (PT) vor dem Auftragen der Schweißverbindungsnahte geprüft werden. Diese Anforderung wird in AISC 360-16 für Trägersausklinkungen nicht genannt. Bei allen anderen Formen und an anderen Positionen als an Verbindungsstellen von Teilen müssen die Ausklinkungen nicht geschliffen und durch PT- oder MT-Verfahren geprüft werden.

Für zyklisch belastete Teile bietet AISC 360-16, Anhang 3, zwei Radiusabmessungen mit jeweils unterschiedlichen Materialermüdungskategorien (siehe AISC 360-16, Tabelle A-3.1, Beispiel 1.3). Ausklinkungen mit einem Radius größer oder gleich 1 Zoll [25 mm], geschliffen zu blankem Metall, werden der Materialermüdungskategorie C zugeordnet, während ein Radius größer oder gleich 3/8 Zoll [10 mm] ein Detail der Kategorie E' darstellt. Im Falle des Details der Kategorie E' muss die Schnittoberfläche nicht geschliffen werden, und die maximale Oberflächengüte beträgt 1.000 µZoll. (25 µm), AWS C4.1, Beispiel 3.

Kanadische Normen

Die CSA S16-14 enthält außer für zyklisch belastete Anwendungen (Materialermüdung) keine spezifischen Kriterien für Trägersausklinkungen. CSA W59-18, Absatz 5.3.7, Trägersausklinkungen und Schweißnahtzugangslöcher, setzt voraus, dass die Radien der Trägersausklinkungen einen glatten Übergang, frei von Kerben oder Nuten an den Tangentialpunkten ermöglichen. Die Oberflächengüte muss die gleichen Kriterien erfüllen wie die für freie Kanten.

Für zyklisch belastete Teile schreibt die CSA S16-14 in Tabelle 9 eine Detailkategorie E1 für Wiedereintrittsecken von Ausklinkungen mit einem Radius von 35 mm [1-3/8 Zoll] oder größer vor. Diese müssen glatt geschliffen sein.

Europäische Normen

Die EN 1090-2: 2018 enthält keine zusätzlichen spezifischen Anforderungen für Trägersausklinkungen. Der Begriff „Ausklinkung“ wird in der Norm verwendet, bezieht sich jedoch auf ein Detail zwischen der Rippe und den Querträgern, die für orthotrope Fahrbahnplatten verwendet werden.

Australische und Neuseeländische Normen

Die AS.NZS 5131:2016 enthält in Tabelle F2.2, Elemente für die Fertigung von Bauteilen und Teilen, Toleranzen für die Genauigkeit der Trägersausklinkungen in Teilen, einschließlich der Tiefe und Länge der Ausklinkung. Es gibt keine Beschränkungen für „wesentliche Toleranzen“, die über diejenigen hinausgehen, welche erforderlich sind, um die Konstruktionsannahmen für das Tragwerk hinsichtlich Konstruktionskapazität und Stabilität zu erfüllen. Für „funktionale Toleranzen“, die für die Anpassung und das Aussehen erforderlich sein können, ist die Standardbedingung für Klasse 1 (typisch für die Konstruktionskategorien 1 und 2) mit einer Toleranz für die Tiefe und Länge der Ausklinkung +0, -3 mm. Für Klasse 2, die für die Bauklassen 3 und 4 empfohlen wird, aber nicht erforderlich ist, beträgt die Toleranz für Tiefe und Länge der Ausklinkung +0, -2 mm.

Japanische Normen

Die JASS 6 (2007) enthält keine Anforderungen an thermisch geschnittene Ausklinkungen, die über die zuvor beschriebenen allgemeinen Anforderungen an das thermische Schneiden hinausgehen.

Schweißnahtzugangslöcher

Schweißnahtzugangslöcher sollen einen ausreichenden Zugang bieten, um qualitativ hochwertige Schweißnähte über den gesamten Flansch eines Träger- oder Säulenprofils herzustellen und Störungen durch den Steg zu minimieren. Es ist bekannt, dass kleine oder fehlende Schweißnahtzugangslöcher zu erheblichen Schweißfehlern in der Nähe des Flansch-/Steg-Schnittpunkts beitragen.

Amerikanische Normen

AISC 360-16, Abschnitt J1.6, Schweißnahtzugangslöcher, enthält zehn Anforderungen einschließlich der,

- ▶ dass das Zugangsloch frei von Kerben und scharfen Ecken sein muss (Punkt e),
- ▶ Bohrungen einen Radius von 10 mm [3/8 Zoll] oder mehr haben (Position f) und
- ▶ dass bei groben Formen die Schnittfläche zu blankem Metall (Position i) geschliffen werden muss.

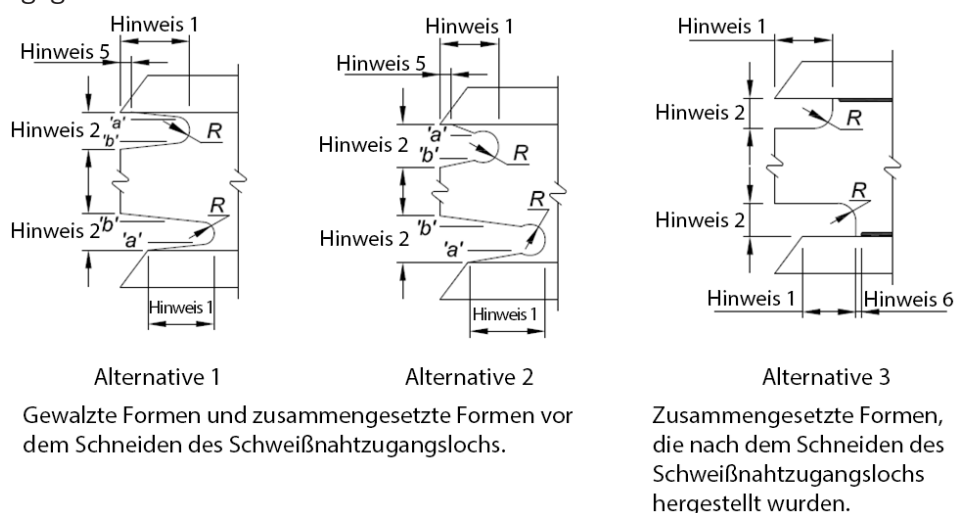
Für Schweißnahtzugangslöcher in Profilen mit Flanschdicken bis 2 Zoll [50 mm] ist die Oberflächen-güte der thermisch geschnittenen Kante auf maximal 2.000 µZoll [50 µm] begrenzt.

In AISC 360-16, Abschnitte A3.1 (c) und (d), werden grobe Formen, wie warmgewalzte Formen mit Flanschdicken von mehr als 50 mm [2 Zoll] und zusammengesetzte Formen mit Platten von mehr als 50 mm [2 Zoll] definiert. Für diese groben Platten und Formen muss gemäß Abschnitt M2.2 vor dem thermischen Schneiden eine Vorerhitzung auf mindestens 66 °C [150 °F] erfolgen. Nachdem die groben Formen für die Zugangslöcher oder Ausklinkungen geschnitten wurden, muss ihre Oberfläche zu blankem Metall geschliffen werden.

Um diese Anforderungen bei der Verwendung von PythonX zu erfüllen, kann der Stahl vor dem Schneiden manuell vorgewärmt werden. Nach dem Schneiden können die Zugangslöcher manuell zu blankem Metall geschliffen werden.

Bei thermisch geschnittenen Teilen, die feuerverzinkt werden sollen, sind zusätzliche Anforderungen zu berücksichtigen. Es können Schritte unternommen werden, um die durch Flüssigmetall unterstützte Rissbildung (LMAC - Liquid Metal Assisted Cracking), auch bekannt als Flüssigmetallversprödung (LME - Liquid Metal Embrittlement), zu mildern.

Im Kommentar zu AISC 360-16, Abb. C-J1.2., Geometrie der Schweißnahtzugangslöcher, werden typische Details für Schweißnahtzugangslöcher für Trägersäulenverbindungen, wie in Abbildung 8 dargestellt, angegeben.



Hinweise: Dies sind typische Details für Schweißverbindungen, die von einer Seite an den Stahlträger geschweißt werden.

Alternative Details werden im Kommentar erläutert.

1. Länge: Größer als $1,5t_w$ oder 1-1/2 Zoll. (38 mm)
2. Höhe: Größer als $1,0t_w$ oder 3/4 Zoll. (19 mm), aber nicht größer als 2 Zoll. (50 mm)
3. R: 3/8 Zoll min. (10 mm). Schleifen Sie die thermisch geschnittenen Oberflächen der Schweißnahtzugangslöcher in groben Formen gemäß Abschnitt A3.1 (c) und (d).
4. Die Neigung „a“ bildet einen Übergang vom Steg zum Flansch. Die Neigung „b“ kann horizontal sein.
5. Die Unterseite des oberen Flansches muss konturiert sein, um den engen Sitz der Verstärkungsstreben dort zu ermöglichen, wo sie verwendet werden.
6. Die Steg-zu-Flansch-Schweißnaht der zusammengebauten Teile ist um den Abstand von mindestens der Schweißnahtgröße von der Kante des Zugangslochs entfernt zu halten.

Mit freundlicher Genehmigung des American Institute of Steel Construction AISC 360-16 Abb. C-J1.2

Abbildung 8. AISC 360-16 Geometrie des Schweißnahtzugangslochs

Die AWS D1.1/D1.1M:2015, Absatz 5.14.8, ermöglicht das Plasmaschneiden von Material „... zum Vorbereiten, Schneiden oder Beschneiden von Material“. Abschnitt 5.16 befasst sich mit der Form und den Abmessungen von Schweißnahtzugangslöchern. Dieser Abschnitt verbietet, wie Abschnitte in

anderen Normen auch, Nuten. Schweißnahtzugangs Löcher müssen für einen reibungslosen Übergang sorgen. Abbildung 5.2 in AWS D1.1 / D1.1M: 2015 veranschaulicht, wie in Abbildung 9 dargestellt, die verschiedenen zulässigen Geometrien für Schweißnahtzugangs Löcher.

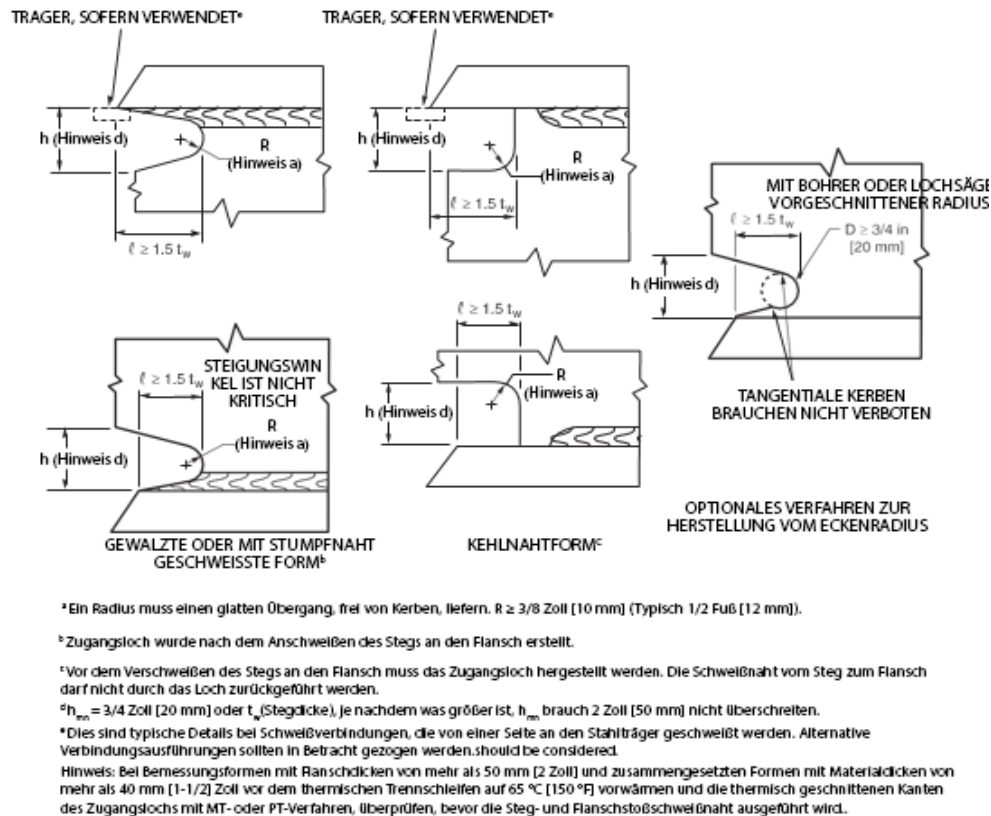


Abbildung 5.2 - Geometrie der Schweißnahtzugangs Löcher (siehe 5.16.1.2)

Nachdruck mit freundlicher Genehmigung der American Welding Society, AWS D1.1/D1.1M:2015, Abbildung 5.2

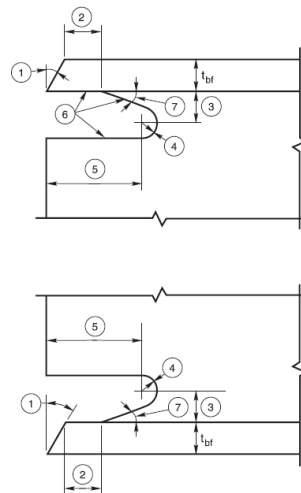
Abbildung 9. AWS D1.1/D1.1M:2015 Geometrien von Schweißnahtzugangs Löchern

Gemäß AWS D1.1/D1.1M:2015, Absatz 5.16.3, muss eine Vorwärmtemperatur von 65 °C [150 °F] verwendet werden, wenn Zugangs Löcher in grobe Formen als gewalzte Formen mit Flanschen größer als 50 mm [2 Zoll] und geschweißte Abschnitte mit Platten größer als 50 mm [2 Zoll] geschnitten werden. Die Schnittfläche muss ebenfalls zu blankem Metall geschliffen und entweder mit MT oder PT geprüft werden. Diese Anforderung gilt nicht für andere Formen, wie dünneres Material.

Um diese Anforderungen bei der Verwendung von PythonX zu erfüllen, kann der Stahl vor dem Schneiden manuell vorgewärmt werden. Nach dem Schneiden können die Zugangs Löcher manuell zu blankem Metall geschliffen werden.

Für hohe seismische Belastungen müssen gemäß AISC 341-16, Abschnitt A4.2(1), Konstruktionszeichnungen und Spezifikationen für die Konstruktion der Form des Schweißnahtzugangslochs angegeben werden, sofern eine andere Form als die in AISC 360-16 vorgeschriebenen zu verwenden ist. In Abschnitt A4.2 (l) wird erläutert, dass „Analysen und Untersuchungen zur Verwendung von Schweißnahtzugangslochern gezeigt haben, dass die Form des Schweißnahtzugangslochs das Verhalten von Momentverbindungen erheblich beeinflussen kann.“ OMF-Systeme (Ordinary Moment Frame - Normaler Momentrahmen) erfordern, dass die Form und Abmessungen des Schweißnahtzugangslochs mit AWS D1.8 übereinstimmen müssen. Der Abschnitt J6.2d in AISC 341-16 fordert, wenn die Flanschdicke 38 mm [1-1/2 Zoll] überschreitet, auch die Prüfung der thermisch geschnittenen Ausklinkungen und Zugangslöcher mit Magnetpartikel- oder Eindringprüfung.

AWS D1.8:2016 befasst sich nicht direkt mit dem Verfahren, mit dem ein Zugangsloch hergestellt werden kann. Weil aber AWS D1.8 eine Ergänzung zu AWS D1.1 ist, gilt AWS D1.1/D1.1M:2015, Absatz 5.14.8, und erlaubt Plasmaschneiden. Der Absatz 6.11.1 in AWS D1.8 enthält eine zusätzliche Option für die Schweißnahtzugangslöcher, die der Auftragnehmer anstelle der in AWS D1.1/D1.1M: 2015 oder AISC 360 enthaltenen Geometrien verwenden kann. Ein Nachdruck von AWS D1.8, Abbildung 6.2, veranschaulicht diese Option (siehe Abbildung 10).



- Hinweis:
1. Für WPS nach Bedarf ansetzen.
 2. t_{bf} oder 1/2 Zoll (12 mm), je nachdem, was länger ist (+1/2 t_{bf} oder -1/4 t_{bf}).
 3. Das Mindestmaß muss 3/4 t_{bf} oder 3/4 Zoll (20 mm) betragen, je nachdem was größer ist. Die Maß sollte maxima t_{bf} (+1/4 in (6 mm)) groß sein.
 4. 3/8 in (10 mm) Mindestradius (-0, +unbeschränkt).
 5. 3 t_{bf} (±1/2 Zoll (12 mm)).
 6. Siehe 6.11.2.1 für Anforderungen an die Oberflächengüte.
 7. Die Toleranzen dürfen sich nicht in dem Umfang kumulieren, dass der Winkel des Zugangslochs zur Flanschfläche 25° überschreitet.

Abbildung 6.2 - Alternative Geometrie - Detailsicht der Trägerflanschschweißnaht
(siehe 6.11.1.2)

Nachdruck mit freundlicher Genehmigung der American Welding Society, AWS D1.8/D1.8M:2016, Abbildung 6.2

Abbildung 10. AWS D1.8 Alternative Geometrie des Schweißnahtzugangslochs

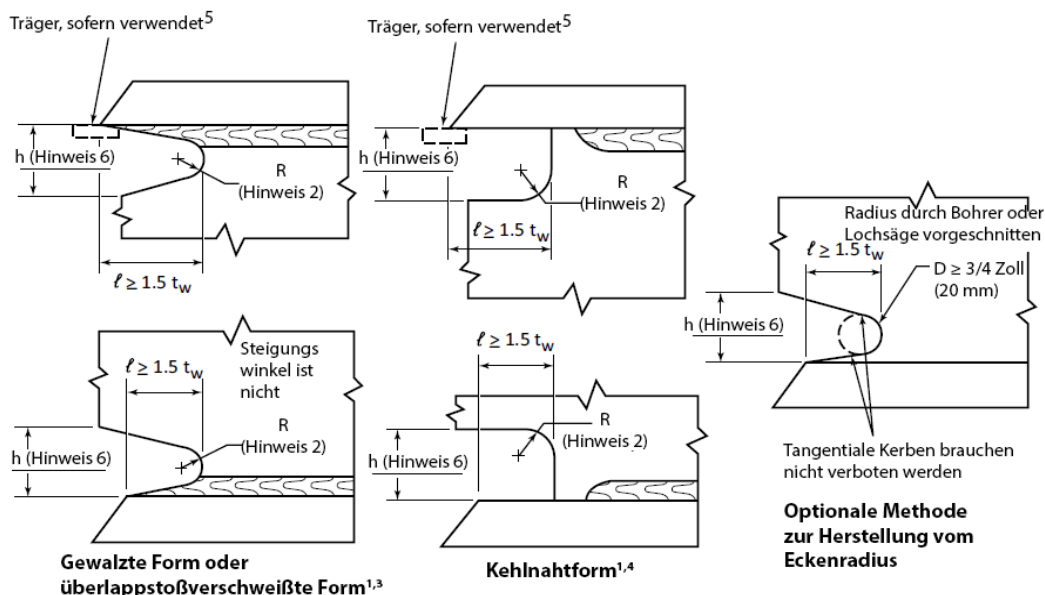
Die AWS D1.8, Abschnitt 6.11.2, Anforderungen an Qualität von Schweißnahtzugangsöffnungen, erfordert eine Oberflächengüte von nicht mehr als 500 μZoll [$13\text{ }\mu\text{m}$] außer für Zugangsöffnungen, die nur der Geometrie AWS D1.1 entsprechen müssen. Beispiel 4 von AWS C4.1 kann als Richtlinie für eine Oberflächengüte von 500 μZoll [$13\text{ }\mu\text{m}$] benutzt werden. Die Abschnitte 6.11.2.2 und 6.11.2.3 ermöglichen das Schleifen zum Entfernen von Kerben mit einer Neigung von nicht mehr als 1:5 oder, wenn sie sich im gekrümmten Abschnitt des Schweißnahtzugangslochs befinden, mit einem Radius von mindestens 10 mm [$3/8\text{ Zoll}$]. Große Kerben, die nicht durch Schleifen repariert werden können, dürfen durch Schweißen repariert werden, vorausgesetzt, es wird ein ordnungsgemäßes Vorwärmen und nachfolgend ein Reparaturschweißverfahren durchgeführt. Nach der Reparatur durch Schweißen muss die gesamte Fläche glatt geschliffen werden.

Kanadische Normen

Die CSA W59-18, Abschnitt 5.3.7, Trägerschweißungen und Schweißnahtzugangsöffnungen, fordert, dass die Schnittfläche der Schweißnahtzugangsöffnungen frei von Nuten oder Kerben ist, der Radius einen glatten Übergang bietet und die Oberflächenanforderungen von Abschnitt 5.3.3 die Kriterien für freie Kanten erfüllen muss. Darüber hinaus wird in Abschnitt 5.3.8, Schweißnahtzugangslochmaße, die Anforderung wiederholt, dass es frei von Kerben sein muss und keine scharfen Ecken aufweisen darf, außer die Kehlnaht-Steg-zu-Flansch-Schweißnähte werden in zusammengesetzten Formen verwendet und die Zugangsöffnungen enden senkrecht zum Flansch. In diesem Fall dürfen die Kehlnähte nicht durch das Schweißnahtzugangsloch zurückgeführt werden.

Die Abmessungen der Schweißnahtzugangsöffnungen werden in Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 5.1
Abmessungen der Schweißnahtzugangslöcher
(Siehe Absatz 5.3.8)



Hinweise:

- 1) Gemäß ASTM A6/A6M und CSA G40.20 Gruppe 4 und 5 Formen und zusammengeschweißte Formen mit Stegdicken von mehr als 38 mm (1-1/2 Zoll) vor dem thermischen Schneiden auf 65 °C (ISO °F) vorwärmen und thermisch geschnittene Kanten des Zugangslochs unter Verwendung von Magnetpartikel- oder Farbstoffdurchdringungsverfahren prüfen, bevor Steg- und Flanschverbindungsschweißnähte ausgeführt werden.
- 2) Der Radius muss einen glatten, kerbfreien Übergang aufweisen. $R \geq 10 \text{ mm}$ (3/8 Zoll) [typisch 12 mm (1/2 Zoll)].
- 3) Das Zugangsloch wurde nach dem Anschweißen des Stegs an den Flansch erstellt.
- 4) Das Zugangsloch wurde vor dem Anschweißen des Stegs an den Flansch erstellt. Die Schweißnaht wurde nicht durch die Öffnung zurückgeführt.
- 5) Dies sind typische Details für Schweißverbindungen, die von einer Seite an den Stahlträger geschweißt werden. Alternative Verbindungsausführungen sollten in Betracht gezogen werden.
- 6) $h_{\min} = 20 \text{ mm}$ (3/4 Zoll) oder t_w (Stegdicken), je nachdem was größer ist.

CSA W59-18, Abbildung 5.1, mit freundlicher Genehmigung der Canadian Standards Association

Abbildung 11. CSA W59-18 Geometrie des Schweißnahtzugangsl Lochs

CSA W59-18, Absatz 5.3.9, behandelt Formen der Gruppen 4 und 5 und besagt, dass bei CSA G40.20- und ASTM A6/A6M-Formen der Gruppen 4 und 5 sowie zusammengesetzten Elemente aus Stegmaterial mit einer Dicke von mehr als 38 mm [1-1/2 Zoll] die thermischen Schnittkanten glatt geschliffen und mit Magnetpartikel- oder Farbstoffeindringprüfung geprüft sein müssen. Diese Anforderung zum Schleifen und Prüfen gilt nicht für das Schweißen von Schweißnahtzugangslöchern in anderen Formen.

Europäische Normen

Die EN 1090-2:2018 enthält keine Anforderungen für Schweißnahtzugangslöcher, die über die zuvor beschriebenen allgemeinen Schneideanforderungen hinausgehen.

Australische und Neuseeländische Normen

Die AS/NZS 5131:2016, AS 4100-1998 (R2016) und NZS 3404.1 (2007) enthalten keine Anforderungen für Schweißnahtzugangslöcher, die über die zuvor beschriebenen allgemeinen thermischen Schneideanforderungen hinausgehen.

Japanische Normen

Japanische Normen bezeichnen Schweißnahtzugangslöcher als „Bogen“. Gemäß Abschnitt JASS 6, Abschnitt 4.5, müssen bei Bögen keine besonderen Hinweise gegeben werden, weil der Bogen nur bestimmte Maßanforderungen erfüllen muss. Der Gesamtradius des Zugangslochs muss ungefähr 35 mm [1-3/8 Zoll] betragen und der kleinere Radius der Zugangslochspitze muss größer oder gleich 10 mm [3/8 Zoll] sein. Besondere Hinweise gibt es in Vertragsdokumenten, die alternative oder zusätzliche Anforderungen an die Vorbereitung oder die Abmessungen der Bogenkante enthalten können.

Die Bögen können mit einer Fräsmaschine oder einem „manuellen Gasflammschneider mit Anbaugerät“ geschnitten werden. Beim manuellen Brennschneiden mit Gas muss die Schnittfläche glatt geschliffen werden. An anderer Stelle in JASS 6 wird explizit auf das Plasmaschneiden Bezug genommen. Da das Plasmaschneiden nicht ausdrücklich als akzeptables Verfahren für das Bogenschneiden bezeichnet wird, sollte der Benutzer dieses Handbuchs den für ein Projekt verantwortlichen Ingenieur oder einen anderen technischen Sachverständigen befragen und beantragen, dass das Plasmaschneiden anstelle des Brennschneidens mit Gas zugelassen wird.

Schneiden reduzierter Trägerprofile

Reduzierte Trägerprofile, auch bekannt als RBS (Reduced Beam Sections) und „Dogbones“, sind speziell geschnittene Trägerflansche, die in speziellen seismischen Momenten widerstehenden Rahmen verwendet werden. Das Reduzierte Trägerprofil ist eine der Verbindungen, deren Status als Momentverbindung in AISC 358-16 vorqualifiziert ist. Reduzierte Trägerprofile werden in einigen Anwendungen auch verwendet, um die Teile- und Verbindungsduktilität für Sprenglasten zu verbessern, sofern für diesen Zweck seismische Verbindungen ausgewählt wurden.



Abbildung 12. Beispiel einer Schnittkante eines reduzierten Trägerprofils

Das gesamte System wird in Kapitel 5, Abschnitt Reduziertes Trägerprofil (RBS - Reduced Beam Section), in AISC 358-16 beschrieben und Abbildung 5.1 der Norm veranschaulicht die in Abbildung 13 dargestellten Details.

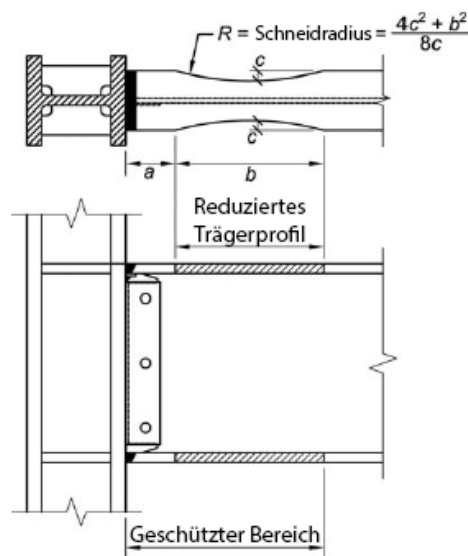


Abb. 5.1 Verbindung mit reduzierten Trägerprofilen.

Mit freundlicher Genehmigung des American Institute of Steel Construction, AISC 358-16, Abb. 5.1

Abbildung 13. RBS-Verbindungsdetail

Die AISC 358-16, Abschnitt 5.7, Herstellung von Flansch-Schnitten, nennt die detaillierten Anforderungen, einschließlich eines Ra-Profiles mit einer maximalen Oberflächengüte von 500 μZoll [13 μm], Einschränkungen bei Rillen und Toleranzen bei der Genauigkeit der Schnittmaße.

Materialermüdung und Plasmaschneiden

Die Konstruktion von Bauteilen mit thermisch geschnittenen Kanten wurde in den wichtigsten Stahlbaunormen berücksichtigt. Die spezifischen Ausdrücke, die in diesen Normen verwendet werden, sind unterschiedlich, wobei jedoch die Überlegungen für das Autogenschneiden, Plasmaschneiden oder ein anderes thermisches Schneidverfahren ähnlich sind und einige, aber nicht alle Normen Unterschiede machen.

American Institute of Steel Construction (Amerikanisches Institut für Stahlbau)

Thermische Schnittkanten

Zur Materialermüdung bei Gebäuden und ähnlichen Tragwerken gemäß AISC 360-16, Anhang 3, Materialermüdung, Abschnitt 3.5, Anforderungen an die Herstellung und Montage bei Materialermüdung, müssen folgende Anforderungen erfüllt werden: „Die Oberflächengüte von thermisch geschnittenen Kanten, die zyklischen Beanspruchungen, einschließlich Spannungen unterliegen, darf 1.000 µZoll [25 µm] nicht überschreiten.“ Die ASME B46.1, Oberflächentextur, Oberflächengüte, Welligkeit und Schicht, wird als Referenznorm für die Messung der Oberflächengüte angegeben, wobei jedoch üblicherweise die AWS C4.1, Muster 3, zur Beurteilung der Oberflächengüte als Grundlage herangezogen wird.

Anhang 3, Tabelle A-3.1, Konstruktionsparameter für Materialermüdung, verwendet den historischen Begriff „brenngeschnittene Kanten“ anstelle von thermisch geschnittenen Kanten. In anderen Teilen der Spezifikation und im Anhang wurde jedoch darauf hingewiesen, dass „brenngeschnittene Kanten“ plasmageschnittene Kanten einschließt. Abschnitt 1, Flachmaterial entfernt von Schweißungen, ordnet in Punkt 1.1 einem Grundwerkstoff ohne Wiedereintrittsecken die Beanspruchungskategorie A zu. Eine Ausnahme bildet unbeschichteter witterungsbeständiger Stahl mit „brenngeschnittenen Kanten“ mit einer Oberflächengüte von höchstens 25 µm [1.000 µZoll] oder weniger, der in die gleiche Beanspruchungskategorie wie gewalzte oder gereinigte Oberflächen fällt. Wenn das Grundmetall unbeschichteter witterungsbeständiger Stahl ist, erfolgt die Zuordnung der Beanspruchungskategorie gemäß Punkt 1.2 B. Siehe Abbildung 14.

Bei Autobahnbrücken sollte anstelle von AISC die AASHTO LRFD Bridge Design Specification (Brückenbauspezifikation), Abschnitt 6, Stahlkonstruktionen, verwendet werden. Für Eisenbahnbrücken sollte das AREMA Manual for Railway Engineering (Handbuch für Eisenbahntechnik), Kapitel 15, Stahlkonstruktionen, verwendet werden. Sowohl AASHTO als auch AREMA verwenden den Begriff „Brennschnitt“ anstatt des thermischen Schneidens.

Tabelle 9 enthält Empfehlungen aus einer von Hobbacher (Hobbacher, 2016) und Garcia und Cicero (Garcia und Cicero, 2016) durchgeführten Studie zu Materialermüdungsauslegungswerten für plasmageschnittene Kanten für die AASHTO-Spezifikationen. Diese Empfehlungen schlagen vor, die oben erwähnte Belastungskategorie A entweder auf Belastungskategorie B oder B' zu reduzieren.

TABELLE 9. EMPFEHLUNGEN VON HOBACHER UND VON GARCIA UND CICERO

	Aktuelle Kategorie	Vorgeschlagene Kategorie
Mit Brennschneiden geschnittene Kanten (Autogenschneiden) Oberflächengüte 25,4µm [1000 µZoll] oder niedriger	A	
Mit Brennschneiden geschnittene Kanten (Autogenschneiden) Oberflächengüte 45 µm [1780 µZoll] oder niedriger		B'
Mit Plasma geschnittene Kanten Dicke 25 mm [1 Zoll] oder weniger, Rz5 ≤ 10 µm		B

Wiedereintrittsecken, Schweißnahtzugangs Löcher und Trägersausklinkungen

Bei Anwendungen mit Materialermüdung erlaubt Anhang 3 in Abschnitt 3.5 der AISC 360-16 das thermische Schneiden von Schweißnahtzugangs Löchern: „Wiedereintrittsecken an Schnitten, Ausklinkungen und Schweißnahtzugangs Löcher müssen einen Radius bilden, der nicht unter dem in Tabelle A-3.1 vorgeschriebenen Radius liegt, indem ein Loch vorgebohrt oder gestanzt und gerieben oder der Schneidradius durch thermisches Schneiden geformt wird.“ Im Kommentar zu Anhang 3.5 werden die Gründe für die Anforderung 1.000 µZoll [25 µm] erläutert:

„Experimentelle Studien an aufgeschweißten Trägern haben gezeigt, dass, wenn die Oberflächengüte des Brennschneidens weniger als 1.000 µZoll [25 µm] beträgt, Materialermüdungsrisse sich nicht von der mit Brennschneiden geschnittenen Kante entwickeln, sondern von den Längsnuten, welche die Trägerflansche mit dem Steg verbinden. (Fisher et al., 1970, 1974). Dadurch ist die Materialermüdungsbeständigkeit der Beanspruchungskategorie B gegeben, ohne dass mit Brennschneiden geschnittene Kante geschliffen werden müssen.“

Wiedereintrittsecken an Schnitten und Ausklinkungen, einschließlich Sperren und anderer geometrischer Diskontinuitäten, ob durch thermisches Schneiden oder auf andere Weise hergestellt, müssen einen Radius haben, der mindestens dem vorgeschriebenen Radius in AISC 360-16, Anhang 3, Tabelle A-3.1, entspricht. Für Beanspruchungskategorie C muss der Radius mindestens 25 mm [1 Zoll] betragen und die thermische Schnittfläche muss zu blankem Metall geschliffen werden. Ohne Schleifen auf blankes Metall ist die Beanspruchungskategorie E' mit einem Mindestradius von 10 mm [3/8 Zoll] für diesen Fall (siehe Punkt 1.3) erlaubt. Für Schweißnahtzugangs Löcher gemäß Abschnitt J1.6 in gewalzten Profilen gelten die gleichen Bestimmungen (siehe Punkt 1.4). Wenn das Schweißnahtzugangsloch jedoch in zusammengesetzten statt in gewalzten Profilteilen verwendet wird, wird die Belastungskategorie D anstelle der Belastungskategorie C verwendet (siehe Punkt 3.3).

Es ist zu beachten, dass in Tabelle A-3.1, Abschnitt 6, Grundmetall an geschweißten Querträgerverbindungen, das Abschleifen der Schweißnahtenden gefordert wird und dass Abschleifen der thermischen Schnittkante des Ansatzstücks nicht erforderlich ist (siehe Punkte 6.1 bis 6.4). Ebenso muss für Punkt 7.2 in Abschnitt 7, Grundmetall bei kurzen Ansatzstücken, nur das Schweißnahtende geschliffen werden.

Bolzenlöcher

Die durch RCSC bestimmte Toleranz für thermisch geschnittene Schraubenlöcher für zyklisch beanspruchte Anwendungen wurde zuvor beschrieben (siehe Seite 21 - 22).

AISC 360-16, Anhang 3, Materialermüdung, Tabelle A-3.1, Bemessungsparameter für Materialermüdung, behandelt Schraubverbindungen in Abschnitt 2, Verbundenes Material in mechanisch befestigten Verbindungen. Wenn hochfeste Schrauben verwendet und vorgespannt werden und die Passflächen mit einer Rutschfestigkeit der Klasse A oder B vorgesehen sind, wird die Beanspruchungskategorie B für das Grundmetall um das Schraubenloch verwendet (siehe Punkte 2.1 und 2.2). Diese Bedingung umfasst plasmageschnittene Schraubenlöcher, die den AISC-Anforderungen für thermisch geschnittene Löcher (AISC 360-16, Abschnitt M2.5) entsprechen.

Wenn die Schraube vorgespannt ist, die Passfläche jedoch nicht für eine Rutschfestigkeit gemäß Klasse A oder B vorbereitet ist und das Loch gebohrt oder aufgeraut ist, wird die Belastungskategorie C verwendet (siehe Punkt 1.5).

Wenn das Loch gebohrt oder aufgeraut wird und keine Schraube im Loch platziert ist, wird die Belastungskategorie D verwendet (siehe Punkt 1.5).

Wenn die Schraube nur passgenau montiert wird, bedeutet der Hinweis zu den Abbildungen in Punkt 2.3, dass die Belastungskategorie C, die ursprünglich für Nietverbindungen verwendet wurde, zur Anwendung kommen kann. In der Beschreibung von Punkt 2.3 sind nur genietete Verbindungen enthalten. Der Einbezug von passgenauen Verbindungen, die hinsichtlich der Lochherstellungsmethode als Beanspruchungskategorie C keine Vorschriften enthalten, wie für vorgespannte Schrauben in gebohrten oder gefrästen Löchern, erscheint als nicht konservativ. Bis zur Lösung dieses Themas wird empfohlen, eine Verbindung mit einer Schraube, die nur passgenau angezogen ist, zu betrachten als:

- 1) ein offenes Loch, das den Augenstablöchern in Punkt 2.4 ähnelt und das Belastungskategorie E verwendet wird oder
- 2) eine geometrische Diskontinuität mit einem Radius von mehr als 10 mm [3/8 Zoll], die nicht zu blankem Metall geschliffen (gerieben) wurde, wie in Abschnitt 1.3 beschrieben, weshalb die Belastungskategorie E' angewendet wird.

Die letzte Empfehlung stimmt mit den Empfehlungen aus der Forschung mit 12,7 mm [1/2 Zoll] dicken Platten (nicht bis zum Zeitpunkt dieser Ausgabe veröffentlicht) überein, wonach die Belastungskategorie E' für nicht vorgespannte Schrauben in Scherlagergelenken mit hochwertigen, plasmageschnittenen Löchern verwendet wird. Wie unten erwähnt, wurde in anderen Untersuchungen die Belastungskategorie E für diesen Zustand empfohlen.

Bei Autobahnbrücken sollte anstelle von AISC die AASHTO LRFD Bridge Design Specification (Brückenspezifikation), Abschnitt 6, Stahlkonstruktionen, angewendet werden. Forschungen von Garcia und Cicero (Garcia und Cicero, 2016) haben die Auslegung für Materialermüdung in Tabelle 10 für thermisch geschnittene Schraubenlöcher für die AASHTO-Spezifikationen empfohlen. Es muss jedoch beachtet werden, dass diese Werte für offene Löcher ohne Schrauben gelten und sich auf offene Löcher und Verbindungen mit nicht vorgespannten Schrauben beziehen könnten.

TABELLE 10. EMPFOHLENE MATERIALERMÜDUNGSKATEGORIEN FÜR OFFENE LÖCHER UND FÜR LÖCHER MIT PASSGENAU MONTIERTEN SCHRAUBEN

	Aktuelle Kategorie	Vorgeschlagene Kategorie
Gebohrte oder gestanzte und aufgebohrte Löcher	D	Keine Änderung vorgeschlagen
Brenngeschnittene (Autogenschnitten) Löcher Dicke 25 mm [1 Zoll] oder weniger	Nicht beschrieben	C
Plasmageschnittene Löcher Dicke 25 mm [1 Zoll] oder weniger	Nicht beschrieben	E

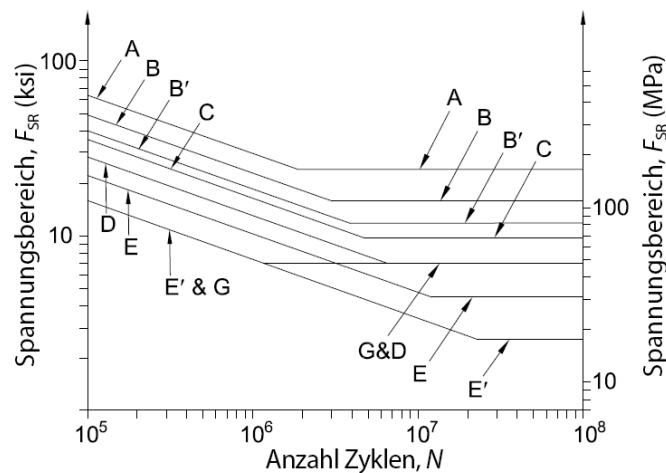


Abb. C-A-3.1 Ermüdungsbeständigkeitskurven.

Mit freundlicher Genehmigung des American Institute of Steel Construction AISC 358-16, Abb. C-A-3.1.

Abbildung 14. AISC 360 Materialermüdungskurven

Kanada

Thermische Schnittkanten

CSA S16-14, Absatz 26, Materialermüdung, stellt Anforderungen hinsichtlich der Materialermüdung. Tabelle 9 in CSA S16, Detailkategorien für lastbedingte Materialermüdung, enthält Detailkategorien, die den in AISC verwendeten Belastungskategorien entsprechen. Bei thermischen Schnittkanten sind die Klassifizierungen mit denen von AISC identisch.

Bolzenlöcher

CSA S16-14, Unterabschnitt 28.4.3, Thermisch geschnittene Löcher, begrenzt thermisch geschnittene Löcher auf statisch belastete thermisch geschnittene, weshalb mit Plasma geschnittene Löcher nicht bei Anwendungen mit Materialermüdung verwendet werden dürfen. Bei Anwendungen mit Materialermüdung können Löcher (innerhalb von Grenzen) gestanzt, gebohrt und gerieben oder in Übereinstimmung mit Abschnitt 28.4.1 gebohrte und gestanzte Löcher verwendet werden.

Europa

Thermische Schnittkanten

Eurocode 3, EN 1993 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-9: Materialermüdung bietet sogenannte „Detailkategorien“, oft als FAT-Kategorien (Fatigue Categories) bezeichnet, Kurzform von Materialermüdungskategorien. Je höher der Wert, der auf dem zulässigen Spannungsbereich (in MPa) bei 2.000.000 Zyklen basiert, desto größer ist der zulässige Spannungsbereich.

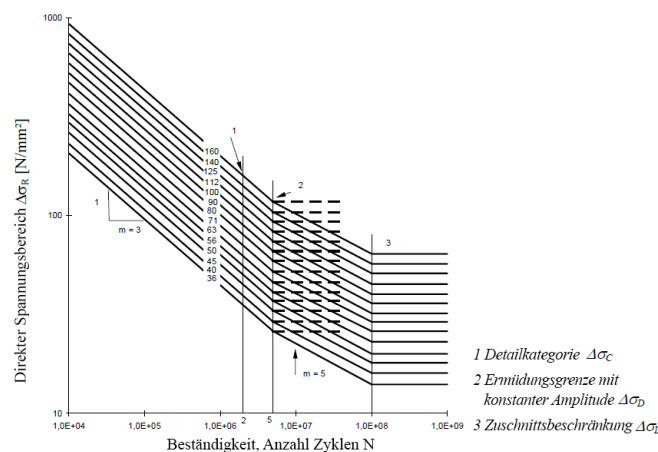


Abbildung 7.1: Ermüdungsbeständigkeitskurven für direkte Spannungsbereiche

Mit freundlicher Genehmigung aus der EN 1993-1-9: 2005, Abbildung 7.1

Abbildung 15. EN 1993-1-9:2005 Materialermüdungskurven

Es gibt zwei FAT-Kategorien für maschinell autogen geschnittene Kanten:

- FAT140: Material mit maschinell autogen geschnittenen Kanten mit flachen und regelmäßigen Schleiflinien, wobei alle sichtbaren Anzeichen von Kantenunterbrechungen entfernt wurden. Die Schnittflächen müssen bearbeitet oder geschliffen und alle Grate entfernt werden. Bearbeitungskratzer, zum Beispiel durch Schleifvorgänge, dürfen nur parallel zu den Spannungen angeordnet sein. Wiedereintrittsecken sind durch Schleifen (Steigung $\leq 1/4$) zu verbessern oder zu bewerten. Bei witterungsbeständigem Stahl auf FAT125 herabstufen.
- FAT125: Material mit maschinell autogen geschnittenen Kanten mit flachen und regelmäßigen Schleiflinien oder manuell autogen geschnittenes Material, anschließend nachbehandelt, um alle Kantenunterbrechungen zu entfernen. Maschinell autogen geschnitten mit Schnittqualität nach EN 1090. Wiedereintrittsecken sind durch Schleifen (Steigung $\leq 1/4$) zu verbessern oder zu bewerten. Bei witterungsbeständigem Stahl auf FAT112 herabstufen.

Zum Vergleich: Zu FAT160 gehören gewalzte und extrudierte Produkte, bestehend aus Platten und Flachteilen, gewalzten Profilen und nahtlosen Hohlprofilen, die entweder rechteckig oder kreisförmig sind. Scharfe Kanten, Oberflächen und Walzfehler müssen durch Schleifen nachgebessert werden, bis sie entfernt sind und ein glatter Übergang erzielt wird.

Geschweißte Anbauteile, bei denen ein Radius geschnitten wird, um Übergangsspannungen in das Ansatzstück zu übertragen, ähnlich wie AISC 360-16, Tabelle A-3.1, Abschnitt 6, sind in EN 1993 dargestellt: Tabelle 8.4 Geschweißte Anbauteile und Versteifungen. Die Werte reichen, abhängig von den Abmessungen und dem Typ der Schweißnaht, von FAT90 bis FAT50. Für diese Details kann der glatte Übergangsradius durch Bearbeiten oder Autogenschneiden der Knotenplatte vor dem Schweißen hergestellt werden, gefolgt vom Schleifen des Schweißbereichs, so dass der Schweißnahtübergang am Ende des Ansatzstücks entfernt wird.

Es wurden Forschungen in Europa durchgeführt, um neue Schneidmethoden, einschließlich Plasmaschneiden, zu untersuchen und Empfehlungen für die Aktualisierung und Einbeziehung dieser Methoden in die Stahlbaunormen zu ermöglichen, die zu einer Aktualisierung derselben führten. Dabei wurde das Plasmaschneiden von Baustählen im Bereich von 345 MPa [50 ksi] bis 890 MPa [120 ksi] mit Dicken von 15 und 25 mm [0,59 und 1 Zoll] untersucht (Bannister et al., 2016).

Bei geraden Plasmaschnitten empfiehlt die Studie die weitere Anwendung von FAT125, wie in Eurocode 3 verwendet. Die Anwendung von FAT140 für plasmageschnittene Kanten, die fertiggestellt wurden, wird nicht behandelt, da sich die Studie auf Schnittflächen konzentrierte.

In der Studie wird die Anwendung der Klasse B in der britischen Norm BS 7608, *Guide to Fatigue Design and Assessment of Steel Products (Handbuch für Materialermüdungsplanung und -bewertung von Stahlprodukten)*, empfohlen, die bei geschnittenen Plasmaschneidflächen eine Verbesserung gegenüber dem, was als Klasse C eingestuft wäre, darstellt. Klasse B ist definiert als „nachträglich bearbeitete mit Brennschneiden geschnittene Kante oder glatt geschliffen. Alle sichtbaren Anzeichen von Schleiflinien sollten durch Schleifen oder maschinelle Bearbeitung von der brenngeschnittenen Kante entfernt werden.“ Klasse C ist definiert als „Schneiden von Kanten durch Hobeln oder maschinelles Brennschneiden mit kontrolliertem Verfahren.“ In der Norm gibt es keine Klasse A.

Die Norm BS 7608 verwendet einen einzigartigen Satz von Materialermüdungskurven ohne Kniepunkt. Klasse B hat eine ähnliche S-N-Linie wie die Belastungskategorie B in AISC 360-16, außer für den AISC-Kniepunkt (Abbildung 16).

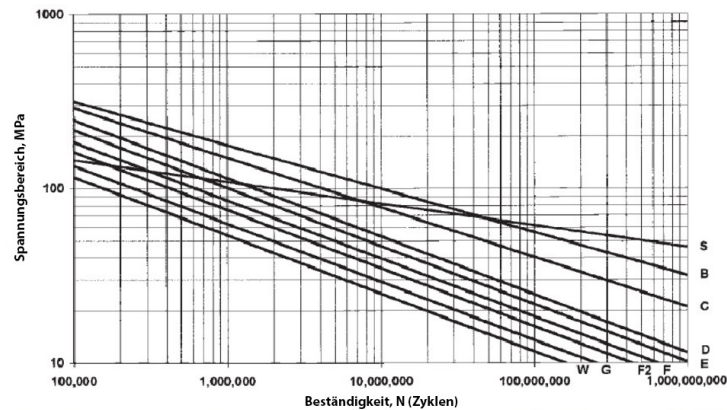


Abbildung 16. Materialermüdungskurven aus BS 7608

Die IIW-Materialermüdungsempfehlungen (Hobbacher, 2016) bieten vier FAT-Klassen für thermische Schnittkanten, zwei für den Maschinenschnitt und zwei für den manuellen Schnitt:

- FAT140 Autogengeschnittenes oder geschertes Material mit anschließendem Abrichten, keine Rissbildung, keine sichtbaren Mängel, durch Inspektion festgestellt. Alle sichtbaren Anzeichen von Kantenunvollkommenheiten sind zu entfernen. Von den zu bearbeitenden oder zu schleifenden Schnittflächen müssen alle Grate entfernt werden. Keine Reparatur durch Auftrag von Schweißnähten. Kerbwirkungen aufgrund der Kantenform sind zu berücksichtigen.
- FAT125 Maschinell thermisch geschnittene Kanten, Ecken entfernt, keine Risse nach Inspektion festgestellt. Kerbwirkungen aufgrund der Kantenform sind zu berücksichtigen.
- FAT100 Manuell thermisch geschnittene Kanten, frei von Rissen und starken Kerben. Kerbwirkungen aufgrund der Kantenform sind zu berücksichtigen.
- FAT80 Manuell von Hand geschnitten, nicht kontrolliert, keine Kerbe tiefer als 0,5 mm. Kerbwirkungen aufgrund der Kantenform sind zu berücksichtigen.

Die IIW-Materialermüdungsempfehlungen enthalten auch FAT-Klassen für geschweißte angebaute Teile.

Innerhalb der begrenzten Materialermüdungslebensdauer weisen autogengeschnittene und plasmageschnittene Kanten ein ähnliches Materialermüdungsverhalten auf. Die Materialermüdungslebensdauer nimmt mit zunehmender Materialstärke leicht ab, was auf eine höhere statistische Wahrscheinlichkeit der Rissbildung bei dickeren Materialien zurückzuführen ist. Schlackenbildung und Kantenzustände beeinflussen das Materialermüdungsverhalten stärker als die Oberflächengüte der Schnittfläche. Da Plasmaschneiden eine minimale Menge Schlacke hinterlässt, würde die Rissbildung an der oberen oder unteren Eckkante erfolgen.

Bolzenlöcher

Schraubenlöcher in Materialermüdungsanwendungen dürfen, wie in Abschnitt 1 der EN 1090-2, Absatz 6.6.3, Ausführung der Lochung, angegeben, mit akzeptablen Lochungsverfahren wie Bohren, Stanzen, Laser, Plasma- oder anderen thermalen Schneidverfahren hergestellt werden, vorausgesetzt, das Loch erfüllt die Anforderungen an die lokale Härte und die Schnittfläche die Qualität gemäß Abschnitt 6.4, Schneiden.

Das Materialermüdungsdesign für Teile mit Schraubenlöchern wird in EN 1993-1-9, Tabelle 8.1, beschrieben. EN 1993-1-9 berücksichtigt neben der Schraubenvorspannung (Vorspannung) auch die Anordnung der Schraubverbindung bei der Bestimmung der FAT-Klasse. Es wird kein Hinweis auf den Zustand der Passfläche bezüglich der Rutschfestigkeit gegeben.

- FAT112 Doppelte verdeckte symmetrische Verbindung mit vorgespannten hochfesten Schrauben, am Gesamtquerschnitt geprüft
- FAT90 Doppelte verdeckte Verbindung mit eingepassten Schrauben, am Nettoquerschnitt geprüft
Einseitige Verbindung mit vorgespannten hochfesten Schrauben, am Gesamtquerschnitt geprüft
Stahlbauelement mit gebogenen und axialen Kräften, am Nettoquerschnitt geprüft
- FAT80 Einseitige Verbindung mit eingepassten Schrauben, am Nettoquerschnitt geprüft
- FAT50 Einseitig oder doppelt abgedeckte symmetrische Verbindung mit nicht vorgespannten Schrauben in normalen Durchgangslöchern, ohne Lastumkehrungen, am Nettoquerschnitt geprüft

Die IIW-Materialermüdungsempfehlungen enthalten keine FAT-Klassen für Löcher.

Die umfangreichen Untersuchungen von Bannister an thermisch geschnittenen Schraubenlöchern erfolgten ohne den Einfluss von Schrauben (Bannister et al., 2016). Für offene Löcher gelten folgende Empfehlungen aus Tabelle 11 für plasmageschnittene Löcher:

TABELLE 11. EMPFOHLENE MATERIALERMÜDUNGSKATEGORIEN FÜR PLASMAGESCHNITTENE SCHRAUBENLÖCHER

	BS 7608	EN 1993-1-9
Mit Brennschneiden geschnittene Schraubenlöcher (Autogenschnneiden) Dicke 25 mm [1 Zoll] oder weniger	F	90
Plasmaschneiden von Schraubenlöchern Dicke 25 mm [1 Zoll] oder weniger	G	63

Die meisten Materialermüdungsrissoausgangspunkte liegen in der Schnittfläche. Daher sind der Durchstoßpunkt und/oder der Endpunkt am Ende des Lochdurchmessers parallel zur Belastungsrichtung anzuordnen. Der Beginn von Brüchen in der Plasmageschnittfläche unterscheidet sich von den Rissausgangspunkten für gerade Schnittkanten, die sich an der oberen oder unteren Ecke der Schnittfläche befinden.

Im Bereich der endlichen Materialermüdungslebensdauer zeigte das Autogenschneiden das beste Materialermüdungsverhalten bei Löchern. Es wird angenommen, dass dies mit der thermischen Erwärmung während des Schneidens zusammenhängt. Beim Autogenschneiden sind die zum Durchstechen des Materials sowie zum Schneiden erforderliche Wärme und Zeit größer als beim Plasmaschneiden. Die größere Hitze verlangsamt die Abkühlung, wodurch die Gefahr einer spröden Wärmeeinflusszone verringert wird.

Australien / Neuseeland

In AS 4100-1998 (R2016) werden für die Materialermüdung Detailkategorien verwendet, die denen der europäischen EN 1993-1-9 entsprechen. In Abschnitt 14.3.3 wird der Begriff „thermisches Schneiden“ verwendet. Für Autobahn- und Eisenbahnbrücken ist der geltende Standard AS 5100.6:2016 Bridge Design (Brückenbau), Teil 6: Stahl und Verbundbauweise.

Thermische Schnittkanten

In AS 4100-1998 (R016) sind in Tabelle 11.5.1 (1), Klassifizierung der Detailkategorie - Gruppe 1 - nicht geschweißte Details - zwei FAT-Kategorien für thermische Schnittkanten enthalten (siehe unten). Der verwendete Begriff ist „Brennschneiden“, obwohl in Abschnitt 14.3.3 v, Schneiden, festgelegt wird, dass „das Schneiden gegebenenfalls durch Sägen, Scheren, Zuschneiden, Bearbeiten, thermisches Schneiden (einschließlich Laserschneiden und Plasmaschneiden) oder durch Wasserschneiden möglich ist.“

FAT140 Material mit autogen geschnittenen oder gescherten Kanten ohne Schleiflinien. Das gesamte gehärtete Material und sichtbare Anzeichen von Kantenunebenheiten werden durch spanende Bearbeitung oder Schleifen in Richtung der aufgetragenen Spannung entfernt.

FAT125 Material mit maschinellen durch Brennschneiden hergestellten Kanten mit Schleiflinien oder Material mit manuellem Brennschneiden. Ecken und sichtbare Anzeichen von Kantenunebenheiten werden durch Schleifen in Richtung der aufgetragenen Spannung entfernt.

Bei witterungsbeständigem Stahl wird keine Reduzierung vorgenommen, wie dies bei anderen Normen der Fall ist. In Unterabschnitt 11.1.1 heißt es, dass „die Reduzierung der Materialermüdungsdauer durch Korrosion oder Eintauchen“ nicht angesprochen wird.

In AS 5100.6:2016 gibt es zwei FAT-Kategorien für thermische Schnittkanten, ähnlich wie in EN 1993-1-9:

FAT140 Maschinell brenngeschnittenes oder geschertes Material mit anschließendem Abrichten. Alle sichtbaren Anzeichen von Kantenbrüchen müssen entfernt werden. Die Schnittflächen sind zu bearbeiten oder zu schleifen und alle Grate müssen entfernt werden. Etwaige Bearbeitungskratzer, zum Beispiel durch Schleifvorgänge, können nur parallel zu den Spannungen angeordnet sein. Wiedereintrittssecken können durch Schleifen verbessert (Steigung $\leq 1/4$) oder anhand des entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktors bewertet werden. Keine Reparatur durch Auftrag von Schweißnähten. Bei witterungsbeständigem Stahl auf FAT125 herabstufen.

FAT125 Material mit maschinell autogen geschnittenen Kanten mit flachen und regelmäßigen Schleiflinien oder manuell autogen geschnittenes Material, anschließend nachbehandelt, um alle Kantenunterbrechungen zu entfernen. Maschinell brenngeschnitten mit Schnittqualität gemäß Anhang F. Wiedereintrittsecken müssen durch Schleifen (Steigung $\leq 1/4$) verbessert oder anhand des entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktors bewertet werden. Keine Reparatur durch Auftrag von Schweißnähten. Bei witterungsbeständigem Stahl auf FAT112 herabstufen.

In AS 5100.6:2016 ermöglicht der Unterabschnitt F3.3, Schneiden, das Schneiden „durch Sägen, Scheren, Zuschneiden, maschinelle Bearbeitung oder thermisches Schneiden.“ Tabelle F3.3, Maximale Schnittoberflächengüte, bietet zwei Kriterien für die maximale Oberflächengüte in Anwendungen mit Materialermüdung für Detailkategorien ≥ 80 MPa, 12 μm CLA und für Detailkategorien < 80 MPa, 25 μm CLA. Bei normalen Anwendungen, d. h., wenn die Oberflächen und die Kanten im geschnittenen Zustand verbleiben oder einen geringfügigen Verband aufweisen, beträgt die maximale Oberflächengüte 25 μm CLA. Schnittoberflächengüten, die über den in Tabelle F3.3 angegebenen Werten liegen, müssen durch Schleifen verbessert werden, wobei die Schleifmarken parallel zur Schnitttrichtung liegen.

Bolzenlöcher

In AS 4100-1998 (R2016) bezieht sich Tabelle 11.5.1(1), Detailkategorie-Klassifizierung - Gruppe 1, Nicht geschweißte Details, auf Schraubverbindungen mit der Schraubkategorie 8.8/TF (hochfeste vorgespannte Schrauben in Reibungsverbindungen mit ausgewiesener Rutschfestigkeit) gemäß FAT140, am Gesamtquerschnitt überprüft. Wenn nicht mit 8.8/TF ausgewiesen, verbleibt es Detailkategorie 140, wird jedoch im Nettoquerschnitt überprüft. Es wird die Warnung hinzugefügt, dass „nicht unterstützte einseitige Abdeckplattenverbindungen zu vermeiden sind oder die Auswirkung der Exzentrizität bei der Berechnung der Spannungen berücksichtigt werden muss.“ Es gibt keine spezielle Detailkategorie für offene Löcher. Gemäß Abschnitt 14.3.5.1, der sich auf Lochung bezieht, können runde Löcher für eine Schraube „mit einer Brennschneidmaschine hergestellt, vollgebohrt, mit 3 mm [1/8 Zoll] Untermaß gestanzt und auf Maß gerieben werden oder in voller Größe gestanzt werden.“

In AS 5100.6:2016, Abschnitt F3.5, Lochen, Unterabschnitt F3.5.1, Allgemein, heißt es: „Ein rundes Loch für eine Schraube muss entweder mit der Brennschneidmaschine geschnitten, in voller Größe gebohrt oder mit 3 mm [1/8 Zoll] Untermaß gestanzt und auf Maß gerieben werden oder in voller Größe gestanzt werden. Bei Eisenbahnbrücken sind Löcher, die mit einer Brennschneidmaschine hergestellt oder in voller Größe gestanzt werden, nicht zulässig.“

Die 5100.6:2016, Tabelle 13.10.1(B), Teile und mechanisch befestigte Verbindungen, hat die Anforderungen der EN 1993-1-9, Tabelle 8.1, die zuvor für Europa für Detailkategorien für Schraubverbindungen beschrieben wurden, übernommen.

Plasma-Kennzeichnung

Plasmaschneidanlagen können auch verwendet werden, um Kennzeichnungsfunktionen mit demselben Schneidkopf, aber mit verringerter Leistung (Stromdichte) auszuführen. Dies kann nicht nur die Kennzeichnung und Beschriftung von Teilen umfassen, sondern auch die genaue Fixierung von Positionen auf dem Stahlbauteil, an denen die Teile montiert werden sollen, das Identifizieren der an dieser Stelle anzubringenden Teile, Bereitstellung des Schweißsymbols, das Markieren der Positionen für geschweißte Schraubenbefestigungen, das „Körnen“ von Lochpositionen, die mit anderen Lochungsverfahren hergestellt werden können, und auf andere spezielle Arbeiten hinweisen.

Solche Markierungen müssen mit einer ausreichenden Leistung hergestellt werden, um die Sichtbarkeit während der Herstellung zu gewährleisten und permanente Sichtbarkeit von Teilmarken und anderen Montageanweisungen zu gewährleisten, falls sie nach einer Oberflächenvorbereitung und dem Aufbringen von Beschichtungen verwendet werden. Im Fall von architektonisch freilegendem Baustahl kann es wünschenswert sein, die Sichtbarkeit von bleibenden Markierungen zu minimieren, die aus der Nähe betrachtet sichtbar sind.

Die derzeitigen Normen erlauben oder verbieten die Verwendung von Plasma-Kennzeichnungen auf Baustahl nicht ausdrücklich. Jüngste Forschungen haben einige Informationen zu den Auswirkungen der Plasma-Kennzeichnung auf die Leistung von Baustählen in statischen und zyklischen Anwendungen geliefert.

HINWEIS: Probleme, die nicht in einer bestimmten Bauvorschrift oder Spezifikation enthalten sind, sollten mit dem Ingenieur oder einem anderen technischen Sachverständigen besprochen werden.

Wagner et al. (Wagner, 2010) testete 345 MPa [50 ksi]- Baustähle, die mit Argon-Schutzgas bei Strömen von 6, 10 und 14 Ampere gekennzeichnet wurden. Die Schnitttiefen der Linien betrugen jeweils 9, 130 und 240 μm [0,00035, 0,005 und 0,0094 Zoll], für andere Positionen als die Startpunkte und Schnitttiefen von jeweils 130, 310 und 870 μm [0,005, 0,012 und 0,034 Zoll] an den Startpunkten und an Positionen, an denen der Schnitt über eine zuvor gekennzeichnete Stelle geführt wurde (Abbildung 17).

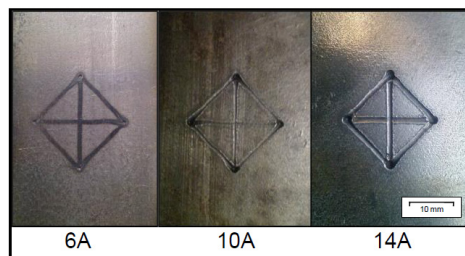


Abbildung 3. Plasmamarkierung mit Plasmagas Argon mit einer Intensität des Markierungsstroms von 6 A, 10 A, 14 A

Abbildung 17. Plasma-Kennzeichnungen bei 6 A, 10 A und 14 A

Bei vorwiegend statischer Belastung wurde bei der Plasma-Kennzeichnung keine Verringerung der Zugfestigkeit festgestellt.

Materialermüdungstests wurden mit relativ dünnen rohrförmigen Proben mit einer Dicke von 3, 5 und 10 mm [1/8, 3/16 und 3/8 Zoll] durchgeführt. Die Materialermüdungslebensdauer bei hohen Zyklen wurde nicht wesentlich durch die Materialstärke beeinflusst, sondern durch die Tiefe der Plasmamarkierung. Tests zeigten eine ziemlich flache Steigung der S-N-Kurve mit geringen Unterschieden zwischen den 6- und 10-Ampere-Abschnitten und einer merklichen Abnahme bei einem 14-Ampere-Schnitt. Tests mit einem mechanischen Markierstempel zeigten eine ähnliche Leistung wie der 14-A-Schnitt, jedoch mit einer etwas steileren Neigung der S-N-Kurve.

Unter Verwendung der SN-Kurven der IIW-Materialermüdungsempfehlungen würde ein Schnitt von 6 oder 10 Ampere als 144 N/mm² klassifiziert und der Schnitt von 14 Ampere bei 128 N/mm². Die Forschung schlug vor, dass eine FAT-Klasse von 125 verwendet wird, welche dieselbe FAT-Klasse für thermisch geschnittene Kanten ist (Abbildung 18).

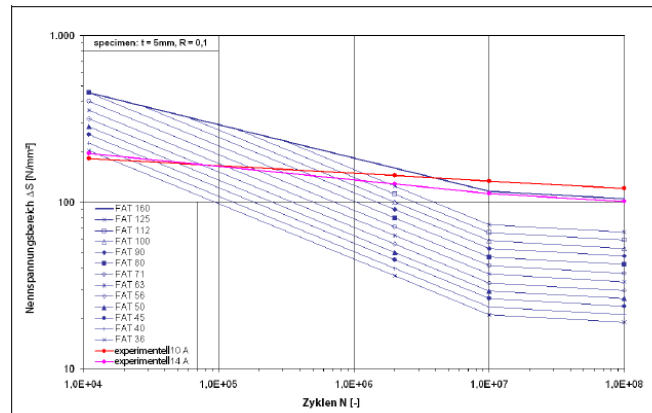


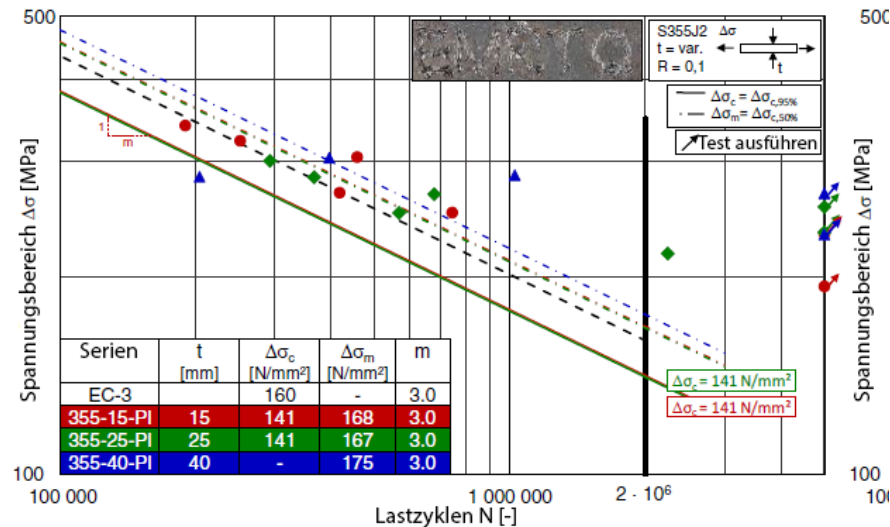
Abbildung 12. IIW-Ergebnisse netto von S-N-Kurven

Abbildung 18. Experimentelle Ergebnisse für die Materialermüdungslebensdauer mit Plasmamarkierung (Wagner, 2010)

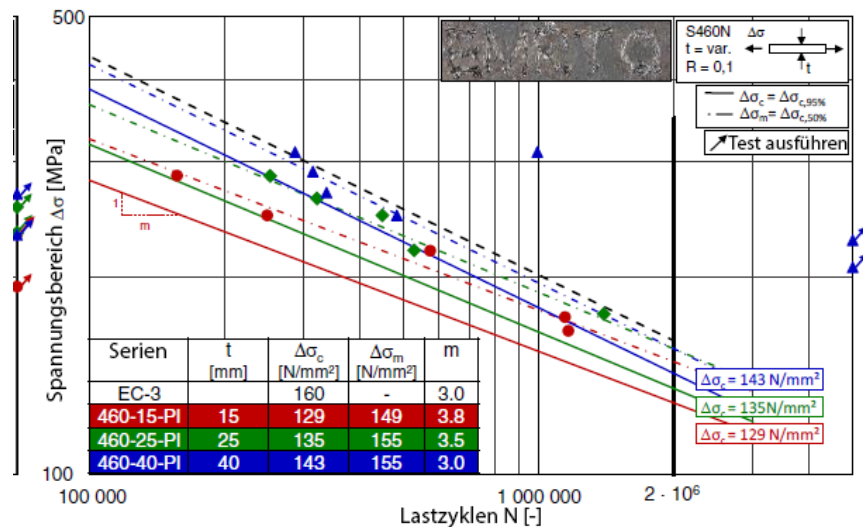
Stranghörer und Jungbluth (Stranghörer und Jungbluth, 2015) führten Materialermüdungstests mit 345 MPa [50 ksi] und 460 MPa [65 ksi] an Baustahlplatten mit Dicken von 15 mm, 25 mm und 40 mm [0,59, 1,0 und 1,57 Zoll] durch. Die Markierungen waren herkömmliche Buchstaben und Zahlen und nicht das von Wagner verwendete Rautenmuster.

Wenn Markierungen mit einem Strom von 6 A vorgenommen wurden, hatte dies keinen Einfluss auf die Materialermüdungslebensdauer im Vergleich zum Grundmetall. Bei einem Strom von 10 Ampere hatten die Plasmamarkierungen sogar eine abgerundete Form mit einer maximalen Markierungstiefe an den Anfangs- oder Kreuzungspunkten zwischen 400 µm und 500 µm [0,016 bis 0,020 Zoll], etwas mehr als von Wagner berichtet. Die S-N-Kurven, aufgetragen gegen die Kurven der IIW-Materialermüdungsempfehlungen (ähnlich EN 1993-1-9), sind in Abbildung 19 dargestellt. Die Ergebnisse für die 15 mm- und 25 mm-Platten (0,59 und 1 Zoll) waren denen von Wagner, die das Diamantmus-

ter verwendeten, ähnlich, und zeigten eine bessere Materialermüdungslebensdauer als diejenigen Proben, die hartes Stempeln verwendeten. Es wurde kein Einfluss der Stahlfestigkeit aufgrund der Materialermüdungsleistung festgestellt. Materialermüdungsversuche an 40 mm-Platten (1,57 Zoll) waren für beide Stahlsorten unregelmäßig, so dass weitere Tests geplant waren.



(a)



(b)

Abb. 12 S-N-Kurven von plasmagekennzeichneten Proben von (a) S355J2 und (b) S460N

Abbildung 19. S-N-Kurven für plasmagekennzeichnete Proben

Manuel et al. (Manuel, 2014) testeten eine witterungsbeständige Stahlplatte mit 50 ksi [345 MPa], ASTM A709, Güteklasse 50 W, mit einer Dicke von 1/4 Zoll [6 mm]. Es wurden Plasmamarkierungen mit einer Tiefe von ungefähr 150 µm [6 µZoll] hergestellt. Unter der Oberfläche der Markierung lag eine Wärmeeinflusszone (HAZ) von ca. 200 µm [8 µZoll], und es wurden Härteprüfungen und der daraus resultierende Spannungskonzentrationsfaktor betrachtet. Es wurden 14 Proben getestet, bei denen die gezeigten Ergebnisse unter Verwendung von S-N-Kurven der Normen AISC/AWS/AASHTO aufgezeichnet wurden (siehe Abbildung 20). Die Materialermüdungslebensdauer der Proben mit Plasmamarkierungen unterschied sich nicht messbar von der Materialermüdungslebensdauer von Normalmaterial. Die Autoren erklärten jedoch, dass mehr Proben getestet werden müssten, bevor endgültige Schlussfolgerungen gezogen werden können.

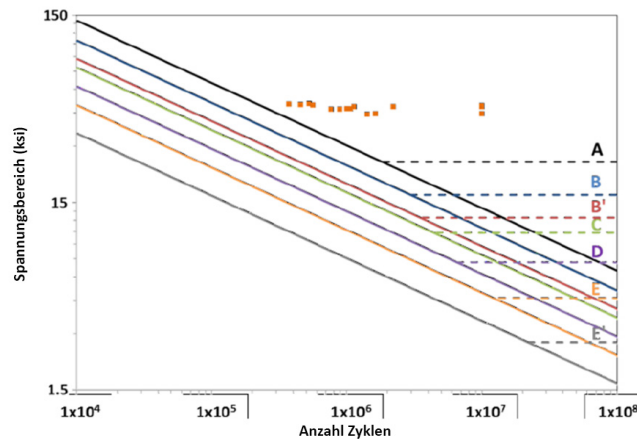


Abbildung 5-9. S-N-Kurve für plasmamarkierten 50W-Stahl.

Abbildung 20. S-N-Kurve für plasmamarkierten 50W-Stahl

Basierend auf den obigen Studien sollten Markierungen, die mit bis zu 10 Ampere und möglicherweise bis zu 15 Ampere hergestellt wurden, für statische Belastungsanwendungen als akzeptabel angesehen werden. Für Anwendungen mit Materialermüdung sollten Markierungen, die mit bis zu 10 Ampere hergestellt wurden, als akzeptabel angesehen werden, wenn bei der Ausführung Gebrauch von Materialermüdungswerten für thermische Schnittkanten gemacht wird, und Markierungen, die im Bereich von 5 Ampere bis 6 Ampere hergestellt wurden, können als annehmbar angesehen werden, wobei die Ausführungswerte ähnlich dem Grundmetall sind. Diese Bedingungen wurden jedoch noch nicht festgelegt und die Forschung ist noch nicht abgeschlossen. Beachten Sie, dass Positionen, die im Brückenbau als bruchkritisch gelten, möglicherweise weitere Einschränkungen erforderlich machen. Es sollten keine Markierungen an Positionen, deren Bruch als kritisch gilt, erfolgen.

Zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung wurden keine bekannten Tests an Stählen durchgeführt, die Anwendungen mit Materialermüdung mit hoher Beanspruchung und niedrigem Zyklus ausgesetzt sind, wie z. B. in den Schutzzonen seismischer Strukturen. Bis zu einem solchen Test sollten keine Markierungen innerhalb des Bereichs angebracht werden, die einer plastischen Belastung ausgesetzt sind.

Qualitätskriterien für plasmageschnittene Schnittflächen

Die Qualität einer thermischen Schnittfläche hängt von vielen Variablen ab, darunter:

- (1) Materialdicke
- (2) Zustand der Materialoberfläche
- (3) Schneidvorgang einschließlich Auswahl des Gases
- (4) Zustand und Ausführung der Schneidemaschine einschließlich der Schneidköpfe
- (5) Vibrationen von Geräten in der Nähe und
- (6) Bewegung des Werkstücks durch thermische Ausdehnung und Kontraktion

Für die Qualitätsanforderungen an eine thermische Schneidkante gelten mehrere Qualitätskriterien. Dazu gehört die Oberflächengüte (das häufigste Kriterium für die Qualität). Für bestimmte Anwendungen und Normen sind jedoch möglicherweise spezifischere Kriterien wie die Rechtwinkligkeit und die Oberflächenhärte der Wärmeeinflusszone (HAZ) zu berücksichtigen.

Oberflächengüte

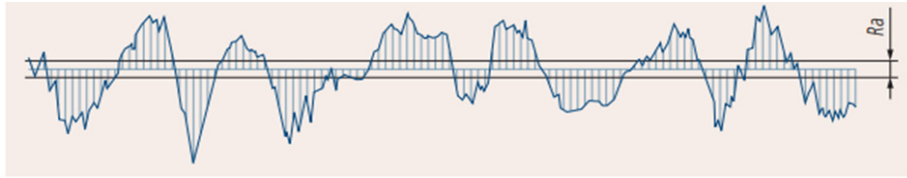
Die Messung der Oberflächengüte, einschließlich allgemeiner Terminologie, Definitionen der meisten Messparameter, Messverfahren, Datenfilterung und verwandter Informationen, wird in drei Hauptnormen behandelt:

- ▶ ISO 4287:1997, *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) — Oberflächentextur: Profilmethode — Begriffe, Definitionen und Oberflächentexturparameter*
- ▶ ISO 4288:1996 *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) — Oberflächentextur: Profilmethode - Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächentextur*
- ▶ ASME B46.1:2009, *Oberflächentextur (Oberflächengüte, Welligkeit und Lage)*

Zwei Kriterien, Ra und Rz, sind die am häufigsten verwendeten Kriterien für die Oberflächengüte. Die beiden Kriterien stehen nicht in direktem Zusammenhang und können nicht mathematisch von einem Kriterium in das andere übertragen werden. Ra- und Rz-Messungen werden in Einheiten von μZoll in US-amerikanischen Standardeinheiten und μm in SI-Einheiten angegeben.

μZoll — Mikrozoll, ein Millionstel Zoll (0,000001 Zoll), 1 μZoll entspricht 0,0254 μm

μm - Mikrometer, ein Millionstel Meter (0,000001 m), 1 μm entspricht 39,37 μZoll



> **Abbildung 6:** Arithmetischer mittlerer Rauheitswert Ra

Quelle: Mitutoyo-Kurzanleitung zur Messung der Oberflächengüte

Abbildung 21. Arithmetischer mittlerer Rauheitswert Ra

Ra (Roughness Average - Mittlere Rauheit) ist definiert als „arithmetischer Durchschnitt der absoluten Werte der Profilhöhen über die Auswertungslänge“ und ist gleich der Summe der schattierten Bereiche des Profils geteilt durch die Auswertungslänge L , die im Allgemeinen mehrere Abtastlängen oder Abtastungen umfasst. Für die grafische Bestimmung der Rauheit werden die Höhenabweichungen normal zur Mittellinie des Diagramms gemessen.

Ra ist auch als Mittellinien-Arithmetik-Durchschnitt (AA - Arithmetic average) und Mittellinien-Durchschnitt (CLA - Centerline average) bekannt.

Der andere gemeinsame Parameter, die durchschnittliche maximale Höhe des Profils R_z , wird in ASME B46.1 als „Durchschnitt der aufeinanderfolgenden Werte von R_t , über die Auswertungslänge berechnet“ und in Abbildung 22 dargestellt. Oberflächenprofil mit zwei Probenlängen, l_1 und l_2 , wobei auch die Parameter R_{p_i} und R_{t_i} angezeigt werden. R_{t_i} ist „der vertikale Abstand zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Punkt des Profils innerhalb eines mit l bezeichneten Abtastlängensegments.“ R_{z5} zeigt an, dass fünf Probenlängen (Cutoffs) verwendet werden (siehe Abbildung 23).

Abb. 1-10 Oberflächenprofil enthält 2 Probenlängen, l_1 und l_2 , die R_{p_i} und R_{t_i} Parameter werden ebenfalls angezeigt

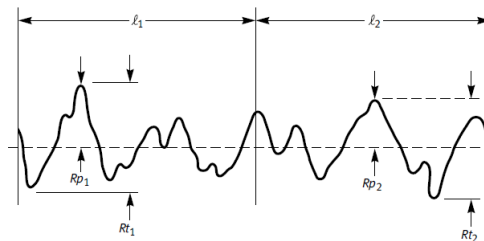


Abbildung 22. ASME B46.1, Abbildung 1-10, Oberflächenprofilmessung

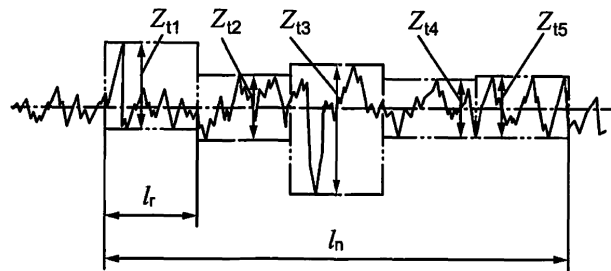


Abbildung 23. ISO 9013:2017, Abbildung 7 - Mittlere Höhe des Profils Rz5

Werkzeuge zur Messung der Oberflächengüte

AWS C4.1-77 (R2010), Kriterien für die Beschreibung von Sauerstoffschnittflächen und Sauerstoffschnittflächen-Rauheitsmessgeräte, wurde ursprünglich 1977 veröffentlicht und 2010 erneut bestätigt. In dieser Norm werden Text und eine separate Nachbildung der Oberflächengüte für Kunststoffe für das Sauerstoffschneiden verwendet, in der vier Proben von mit Sauerstoff geschnittenen Flächen mit unterschiedlichen Qualitätsstufen dargestellt sind. Obwohl die Überschrift der Norm- und Kunststoffabdrucke „Sauerstoffschneiden“ enthält, wird sie üblicherweise auch für das Plasmaschneiden angewendet (siehe Abbildung 24).

Die Verwendung des Plastikabdrucks soll als visuelles Vergleichsmuster und nicht als taktiler Vergleichsmuster dienen, indem es in die Nähe des zu untersuchenden thermischen Schnittes gehalten wird und dann der repräsentativste Wert für die Oberflächengüte ausgewählt wird.

Auf dem Norm- und Kunststoffabdruck ist der spezifische Oberflächengütewert nicht angegeben, er wurde jedoch verifiziert und es wird allgemein akzeptiert, dass die Proben für die folgenden Ra-Werte der Oberflächengüte verwendet werden:

TABELLE 12. RA OBERFLÄCHENGÜTE FÜR JEDE AWS-PROBENNUMMER

Probennummer	Oberflächengüte Ra	
	μZoll	μm
1	4000	100
2	2000	50
3	1000	25
4	500	12,5

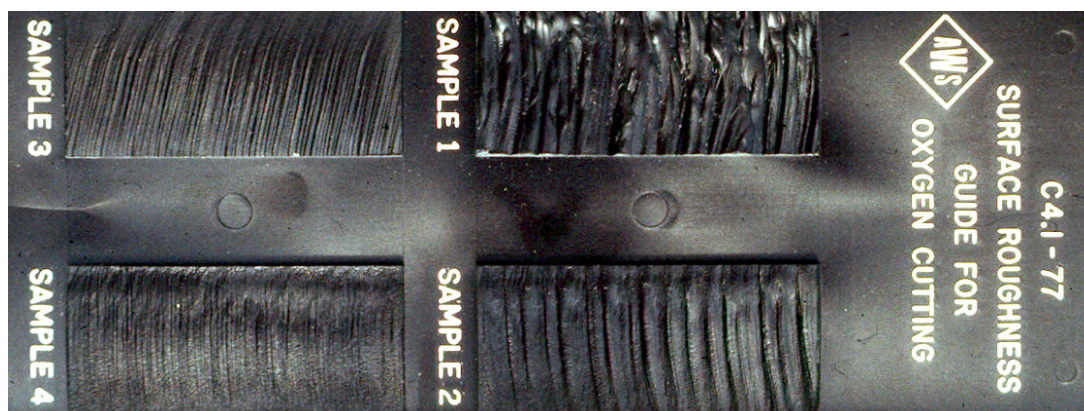


Abbildung 24. AWS C4.1-77 Oberflächengüte

Australien / Neuseeland - Messung der Schnittoberflächengüte

Die Oberflächengüte kann durch Sichtprüfung beurteilt werden, die durch Vergleich mit der Oberfläche von Polyesterharznachbildungen unterstützt wird. Diese Nachbildungen stellen 3 Klassen der Oberflächengüte dar, wie in Abb. 25 beschrieben, die von WTIA Technical Note (Technischer Hinweis) 5 - Brennschneiden von Stahl, veröffentlicht im April 1975 (WTIA, 1975), stammen.

Die durch Brennen geschnittenen Abdruckoberflächen wurden von der AWRA (Australian Welding Research Association, Vorgängerorganisation des Welding Technology Institute of Australia oder WTIA), jetzt Weld Australia (WA) genannt, hergestellt. Sie wurden durch maschinelles Brennschneiden mit Standardausrüstung in einem gepflegten Zustand entwickelt.

Tabelle 11 - AWRA Oberflächengüteklassen bei Brennschneiden

Schneidklassen Hinweis 1	Rauheit (CLA) AS 1100 Teil II – 1974 (Mikrometer) Hinweise 2, 3, 4, 5	Rauheit (CLA) AS B131 – 1962 (Mikrometer-Zoll) Hinweise 2, 3, 4, 5
1	< 6.3	< 250
2	6.3 – 12.5	250 – 500
3	12.5 – <25	500 – < 1000

Hinweise

- 1 Alle drei Klassen des Brennschneidens sind mit hochwertigen Geräten und korrekten Techniken leicht erreichbar.
- 2 AS B131-1962 „Mittellinien-Durchschnittshöhenmethode (M-System) zur Beurteilung der Oberflächentextur“ und AS 1100, Teil 11-1974 „Zeichnungsangabe der Oberflächentextur“.
- 3 Diese Normen definieren die Oberflächengüte in Bezug auf den Mittelwert der Mittellinie (CLA). Beim Brennschneiden beträgt die durchschnittliche Höhe der Oberfläche vom Tiefpunkt zur Spitze das Vierfache der angegebenen CLA-Höhen.
- 4 1 Mikrometer = 0,001 mm, und 1 Mikrometer-Zoll = micro-inch = 0,000001 Zoll
0,025 Mikrometer
- 5 Die tatsächliche Rauigkeit der AWRA-Abdrücke beträgt 3, 6,3 und 19 Mikrometer für die Klassen 1, 2 und 3.

Abbildung 25. Abdruck der AWRA Oberflächengüteklassen bei Brennschneiden

Tabelle 13 vergleicht den plastischen Abdruck gemäß AWS C4.1-77 (R2010), *Handbuch für die Oberflächengüte für Sauerstoffschneiden*, mit den obigen WA/WTIA-Klassen:

TABELLE 13. VERGLEICH DES WTIA-ABDRUCKS MIT DEM AWS-ABDRUCK					
WTIA-Abdruck mit tatsächlicher Rauigkeit μm	WTIA-Klasse- Rauheitsbereich μm	WTIA-Klasse	AWS C4.1-Beispiel	AWS-Rauheitsabdruck	
				μm	μZoll
3	< 6,33	1	Keine	—	—
6,3	6,3 - 12,5	2	4	12,5	500
19	$12,5 \leq 25$	3	3	25	1000
—	—	Keine	2	50	2000
—	—	Keine	1	100	4000

Der AWS-Abdruck kann verwendet werden, um die Einhaltung der WTIA-Klasse 2 unter Verwendung von Probe 4 als maximale Oberflächengüte und die Einhaltung der WTIA-Klasse 3 unter Verwendung von Probe 3 als maximale Oberflächenrauheit zu überprüfen. Zur Überprüfung der WTIA-Klasse 1 muss ein anderes Oberflächengütemessgerät verwendet werden, z. B. diejenigen, die für die maschinelle Bearbeitung angewandt werden.

Kontakt-Oberflächenrauheitsmessgeräte/Profilmessgeräte

Es gibt zahlreiche Hersteller und Ausführungen von Kontakt-Oberflächenrauheitsmessgeräten. Diese Instrumente verwenden eine Stiftspitze, die direkten Kontakt mit der Oberfläche einer Probe hat. Die Stiftspitze verfolgt die Oberfläche der Probe und erfasst die vertikale Bewegung des Stifts elektrisch. Die elektrischen Signale werden einschließlich der Filterung verarbeitet und es werden digitale Aufzeichnungen erstellt.

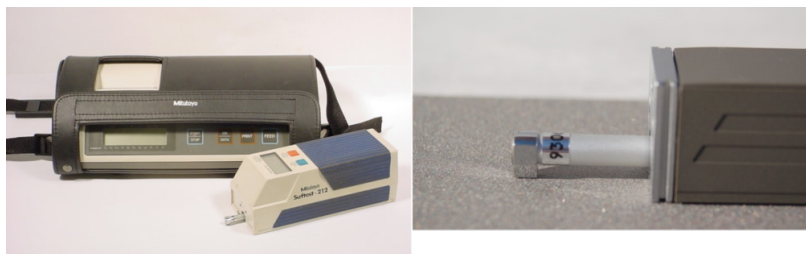


Abbildung 26. Kontakt-Oberflächenrauheitsmessinstrument

Oberflächenhärte

EN 1090-2:2018 enthält Annahmekriterien für die maximale Härte einer thermischen Schnittkante, angegeben in 6.4.4, Härte der freien Kantenflächen.

Die thermischen Schnittkanten von Kohlenstoffstahl mit 460 MPa [65 ksi] Streckgrenze dürfen eine maximale Härte von 450, gemessen mit der HV10-Skala, nicht überschreiten. Außerdem wird in einem Vermerk darauf hingewiesen, dass zusätzliche Anforderungen erforderlich sein können, wenn die Kante gegenüber Wasserstoffversprödung empfindlich ist, die freie Kante Materialermüdungs- oder Stoßkräften ausgesetzt ist, oder sichergestellt werden muss, dass die Kante für die Oberflächenvorbereitung geeignet ist, bevor Farben und damit verbundene Produkte aufgetragen werden.

Darüber hinaus sollte besonders berücksichtigt werden, dass freie Kanten feuerverzinkt werden.

Zitierte Normen und Bibliographie

American Institute of Steel Construction [Amerikanisches Institut für Stahlbau]		www.aisc.org
AISC 360-16	Spezifikation für Stahlkonstruktionen	2016
AISC 341-16	Seismische Bestimmungen für Stahlkonstruktionen	2016
AISC 358-16	Vorqualifizierte Verbindungen für spezielle und mittlere Stahlmomentrahmen für seismische Anwendungen	2016
	Steel Construction Manual (Handbuch für den Stahlbau), 15. Ausgabe	2016
American Welding Society [Amerikanische Schweißer Gesellschaft]		www.aws.org
AWS D1.1/D1.1M:2015	Structural Welding Code (Code für das Schweißen von Tragwerken) - Stahl	2015
AWS D1.8/D1.8M:2016	Structural Welding Code (Code für das Schweißen von Tragwerken) - Seismische Ergänzung	2016
AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2015	Brückenschweißnorm	2015
AWS C4.1-77	Kriterien für die Beschreibung von Sauerstoffschnittflächen und das Rauheitsmessgerät für Sauerstoffschnittflächen	1977
Forschungsrat für Tragwerksverbindungen		www.boltcouncil.org
	Spezifikation für Tragwerksverbindungen mit hochfesten Schrauben	2014
American Association of State Highway and Transportation Officials		www.aashto.org
	AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (Spezifikationen für AASHTO LRFD-Brückenkonstruktion)	
Canadian Standards Association [Kanadischer Normenverband]		https://www.csagroup.org/
CSA S16-14	Design of Steel Structures (Entwurf von Stahlkonstruktionen)	2014
CSA W59-18	Welded steel construction (Geschweißte Stahlkonstruktion)	2018
Europäisches Komitee für Normung (CEN)		https://shop.bsigroup.com [Britische Version]
EN 1090-2:2018	Ausführung von Stahl- und Aluminiumkonstruktionen - Teil 2: Technische Anforderungen an Stahlkonstruktionen	2018
EN 1993-1-9:2005	Eurocode 3, EN 1993 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-9: Materialermüdung	2005

Australische und neuseeländische Normen		https://infostore.saiglobal.com
AS 4100-1998 [R2016]	Steel structures (Stahlbau)	2016
NZS 3404.1 [2007]	Steel Structures Standard (Norm für Stahlbau)	2007
AS/NZS 5131:2016	Stahlbau - Fertigung und Montage	2016
AS/NZS 1554,1:2014	Structural steel welding (Schweißen von Baustahl), Teil 1: Welding of Steel Structures (Schweißen von Stahlkonstruktionen), 9. Auflage	2014
AS/NZS 1554,4:2014	Structural steel welding (Schweißen von Baustahl), Teil 4: Schweißen von hochfesten Vergütungsstählen, 4. Auflage	2014
AS/NZS 1554,5:2014	Structural steel welding (Schweißen von Baustahl), Teil 5: Schweißen von Stahlkonstruktionen mit hoher Dauerbeanspruchung, 5. Auflage	2014
Japanisches Institut der Architekten		https://www.aij.or.jp/eng/publish/index.htm
JASS 6 [2007]	Stahlbauspezifikation für den Hochbau (auf Englisch)	2007
JASS 6 [2018]	Stahlbauspezifikation für den Hochbau, 11. Ausgabe (auf Japanisch)	2018
International Organization for Standardization		www.iso.org
ISO 9013:2017	Thermisches Schneiden - Klassifizierung von thermischen Schnitten – Geometrische Produktspezifikation und Qualitätstoleranzen	2017
British Standards Institution (Britisches Normungsinstitut)		www.bsigroup.com
BS 7608:2014 + A1:2015	Handbuch für Materialermüdungsplanung und Bewertung von Stahlprodukten	2015

1. Bannister et al., 2016; Hochleistungsschnittkanten in Stahlblechen für anspruchsvolle Anwendungen (HIPERCUT), EUR 28092EN, Generaldirektion Forschung und Innovation, 2016, <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a0290b88-9ac8-11e6-868c-01aa75ed71a1/language-en> ISSN 1831-9424, ISBN 978-92-79-61683-9, DOI 10.2777/525963
2. Hobbacher, 2016; Empfehlungen zum Materialermüdungsdesign von Schweißverbindungen und -komponenten, 2. Ausgabe, Internationales Institut für Schweißen, IIW-2259-15, <https://www.springer.com/us/book/9783319237565>, ISBN 978-3-319-23756-5, DOI 10.1007/978-3-319-23757-2
3. Garcia und Cicero, 2016, Vorschlag der AASHTO-detaillierten Materialermüdungskategorien für Baustähle mit thermisch geschnittenen Kanten und Löchern, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 28 (12), 2016, [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001643](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001643) DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001643
4. Wagner et al., 2010, Einfluss der Plasmakennzeichnung auf die statische und Materialermüdungsbeständigkeit von Baustählen, 63. Jahresversammlung & Internationale Konferenz des Internationalen Instituts für Schweißtechnik, AWST-10/36,
5. Stranghöner und Jungbluth, 2015; Materialermüdungsbeständigkeit gekennzeichnete Stahlkomponenten, 6. Fatigue Design Conference, Fatigue Design 2015, Procedia Engineering 133 (2015) 282 - 293, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
6. Manuel, 2014, Experimentelle Untersuchung zum Einfluss von Oberflächenmarkierungen auf die mechanische Integrität witterungsbeständiger Brückenbaustähle: Abschlussbericht, FDOT-Vertragsnummer: BDV31-977-02, 2014, http://www.fdot.gov/research/Completed_Proj/Summary_SMO/FDOT-BDV31-977-02-rpt.pdf

Zusammenfassung und Haftungsausschluss

Das Plasmaschneiden und -kennzeichnen ist ein effizientes und weit verbreitetes Verfahren. Häufig werden die Bestimmungen von Vorschriften oder Normen nicht verstanden und das Plasmaschneiden und -kennzeichnen wird für eine Anwendung unnötig eingeschränkt. In diesem Dokument wurde versucht, geltende Kodexbestimmungen, die sich mit dem Plasmaschneiden in der Stahlbaubranche befassen, zu erörtern.

Nr. 1

ROBOTER- FERTIGUNGSSYSTEM FÜR STAHLBAU IN DER WELT



500+ PYTHONX-SYSTEME IN BETRIEB

PYTHONX[®]

Burlington Automation
8 Enterprise Crescent
Waterdown, ON
Kanada L8B 0Y2
Gebührenfrei: 1-833-PYTHONX
Tel: +1 905 689 7771
Fax: +1 905 689 7773
info@pythonx.com
www.PythonX.com

Verbindung mit PythonX:



The Lincoln Electric Company
22801 Saint Claire Avenue
Cleveland, OH 44117-1199 USA