



J. Ruge

Handbuch der Schweißtechnik

Band IV

Berechnung der Verbindungen

Unter Mitarbeit von K. Thomas

Mit 428 Abbildungen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo 1988

Dr.-Ing. JÜRGEN RUGE

Universitätsprofessor, Geschäftsführender Leiter des Instituts für Schweißtechnik
und Werkstofftechnologie der TU Braunschweig

Dipl.-Ing. KARL THOMAS

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an diesem Institut

ISBN 978-3-642-86972-3 ISBN 978-3-642-86971-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-86971-6

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Ruge, Jürgen:

Handbuch der Schweißtechnik/J. Ruge.

Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer

Teilweise mit den Erscheinungsorten

Berlin, Heidelberg, New York

Bd. IV. Berechnung der Verbindungen

unter Mitarbeit von K. Thomas. – 1988.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. Sep- tember 1965 in der Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zu- widerhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1988

Soft cover reprint of the hardcover 2nd edition 1988

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Rich- tigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Vorwort zu Band IV

Mit dem vorliegenden vierten Band wird das Handbuch abgeschlossen. Wie die drei vorausgegangenen Bände soll es dem Ingenieur und insbesondere dem Konstrukteur in Entwicklung und Betrieb als Informationsquelle dienen und zur Auseinandersetzung mit neueren Arbeits- und Berechnungsmethoden anregen. Obgleich nicht als Lehrbuch konzipiert, wurden an vielen Stellen Ableitungen mit aufgenommen, so daß es sich auch als Nachschlagewerk für Studenten des Maschinenbaus, der Verfahrenstechnik und des Bauingenieurwesens eignet, wenn sie sich mit geschweißten, gelöteten oder geklebten Verbindungen beschäftigen.

Unsere Zeichnerin, Frau Cornelia Gries, hat in vorzüglicher Weise die zahlreichen Bilder vorbereitet. Ihr sei an dieser Stelle dafür ebenso gedankt wie den Damen des Sekretariats, die die Reinschrift des Manuskripts erstellten. Herrn Dipl.-Ing. Robert Linnemann gebührt Dank für seinen Beitrag über die Berechnung von Spannungsintensitätsfaktoren in der linear-elastischen Bruchmechanik.

Braunschweig, im Juni 1988

J. Ruge

Inhaltsverzeichnis

Einführung

35 Berechnung von Schweißverbindungen	1
35.1 Statische Beanspruchung	1
35.1.1 Zulässige Spannungen	1
35.1.1.1 Zulässige Spannungen für den Stahlbau	4
35.1.1.2 Zulässige Spannungen für Kräne, Eisenbahnbrücken und Aluminiumkonstruktionen	8
35.1.1.3 Zulässige Spannungen für den allgemeinen Maschinenbau	11
35.1.2 Für die Bemessung maßgebliche Nahtabmessungen	18
35.1.3 Schweißnahtfläche und Flächenmomente	23
35.1.4 Berechnungsrichtlinien	28
35.1.4.1 Ermitteln der angreifenden Kräfte	29
35.1.4.2 Berechnen der Nennspannungen in den Schweißnähten und Anschlußquerschnitten	29
35.1.4.3 Festigkeitshypothesen, Haupt- und Vergleichsspannungen	41
35.1.4.4 Berechnungsbeispiele	47
35.1.5 Sonderfragen aus dem Stahlbau	73
35.1.5.1 Bemessung der Gurte von Kranbahnträgern	73
35.1.5.2 Aussteifungen an Krafteinleitungsstellen	75
35.1.5.3 Kontaktwirkung zwischen Auflagerplatten und Stützen	77
35.1.5.4 Lochschweißverbindungen	78
35.1.6 Berechnungsregeln im Druckbehälter-, Druckgasbehälter-, Rohrleitungsbau und für Dampfkesselanlagen	78
35.1.6.1 Innen- und außendruckbelastete Bauteile	80
Zylindrische Mäntel und Kugeln unter innerem Überdruck	87
Kegelförmige Mäntel unter innerem und äußerem Überdruck	94

	Gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck	98
	Rohrkrümmer	102
	Rohrbogen für Druckleitungen	102
	Glatte zylindrische Mäntel unter äußerem Überdruck	105
	Ebene Böden und Platten nebst Verankerungen .	114
	Flansche	131
	Ausschnitte und Verstärkungen	136
	Einwandige Balgkompensatoren	142
35.1.6.2	Abgrenzung der Berechnung bei ruhender gegenüber der bei dynamischer Beanspruchung ...	143
35.1.6.3	Sonderfragen aus dem Behälterbau	148
	Berücksichtigung von Zusatzkräften in Druckbehälterwandungen	148
	Berechnung von Mehrlagenbehältern	149
	Berechnung von durch formgebendes Schweißen hergestellten Behältern	152
35.1.6.4	Berechnungsbeispiele	152
35.1.6.5	Dampfkesselanlagen	156
	Zylinderschalen	163
	Kugelschalen und gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck	177
	Ebene Wandungen, Verankerungen und Versteifungsträger	185
	Rohrleitungen	191
35.1.7	Stabilitätsfälle	197
35.1.7.1	Knickung	199
35.1.7.2	Kippung	210
35.1.7.3	Beulung	212
35.1.7.4	Einfluß des Schweißens auf die Stabilität von Bauteilen	215
35.1.8	Schubmittelpunkt, drillungsfreie Querkraftbiegung	219
35.1.9	St. Vénantsche Torsion und Wölbkrafttorsion	222
35.1.10	Berechnung von Punktschweißverbindungen	231
35.1.11	Traglastberechnung von Schweißverbindungen	238
35.2	Dynamische Beanspruchung	245
35.2.1.	Einstufenbelastung	246
35.2.1.1	Schwingversuch und Dauerfestigkeitsschaubild ...	251
35.2.1.2	Größeneinfluß	264
35.2.1.3	Einfluß von Eigenspannungen auf die Schwing- festigkeit von Stumpfschweißverbindungen	266
35.2.1.4	Das Dehnungsfeld als Dimensionierungskenngröße	267
35.2.1.5	Bruchmechanische Bewertung der Dauerschwingfestigkeit	270
35.2.1.6	Kerbfälle und Wöhler-Linien	273

35.2.1.7	Berechnungsvorschriften und zulässige Spannungen	278
	Berechnung von Druckbehältern	279
	Berechnung längsnahtgeschweißter Rohre	287
	Berechnung von Dampfkesseln bei Beanspruchung durch schwellenden Innendruck bzw. durch kombinierte Innendruck- und Temperaturänderungen	289
35.2.2	Mehrstufenbelastung, Betriebsfestigkeit	290
35.2.2.1	Beanspruchungskollektiv	291
35.2.2.2	Betriebsfestigkeitsversuch	293
35.2.2.3	Rechnerische Lebensdauervorhersage	295
35.2.2.4	Kerbfälle und Betriebsfestigkeitsrechnung, zulässige Spannungen	299
	Betriebsfestigkeitsnachweis nach DIN 15018	299
	Betriebsfestigkeitsnachweis nach DS 804, Geschweißte Eisenbahnbrücken	305
35.2.3	Zusammengesetzte Spannungen	308
35.2.4	Synchrone und phasenverschobene mehrachsige Schwingbeanspruchung	309
35.2.5	Bemessung im Gebiet niedriger Schwingspielzahlen	310
35.2.6	Berechnungsbeispiele	314
35.2.7	Berechnung von Punktschweißverbindungen	344
35.2.8	Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen aus Aluminium und Aluminiumlegierungen	350
35.2.9	Zuverlässigkeit schwingbeanspruchter Bauteile	361
36	Berechnung von Lötverbindungen	365
36.1	Statische Beanspruchung	365
36.1.1	Weichlötverbindungen	365
36.1.2	Hartlötverbindungen	368
36.2	Dynamische Beanspruchung	370
37	Berechnung von Klebverbindungen	374
37.1	Statische Beanspruchung	374
37.1.1	Bindefestigkeit	375
37.1.2	Spannungsverteilung in einer einschnittigen Klebverbindung	376
37.1.3	Dimensionierung mit Gestaltfaktoren	376
37.1.4	Dimensionierung einer einschnittigen Klebverbindung nach zulässiger Grenzverformung	378
37.2	Dynamische Beanspruchung	381
38	Anwendung programmierbarer Taschenrechner	384
38.1	Überblick	384
38.2	Programmierung	386
38.2.1	Anforderungen an den Rechner	386

38.2.2	Vorbereitung der Programmierung	386
38.2.3	Elemente der Programmierung	387
38.2.4	Programmablaufplan	389
38.2.5	Aufschreiben des Programms	392
38.2.6	Gestaltung der Ausgabe	393
38.2.7	Programmprüfung	398
38.2.8	Programmdokumentation	399
38.3	Beispiele	399
38.3.1	Hybridträger mit I-Profil	399
38.3.2	Axiale Flächenträgheitsmomente	399
38.3.3	Transformation axialer Flächenträgheitsmomente	403
38.3.4	Rohranschluß mit Kehlnaht	414
38.3.5	Berechnung einschnittiger Klebverbindungen	417
38.4	Programme anderer Autoren	421
39	Rechnerunterstütztes Konstruieren	423
39.1	Begriffe und Ziele	423
39.2	CAD-Hardware	424
39.3	CAD-Software	428
39.3.1	Programmiersprachen	428
39.3.2	Einteilung und Aufgaben der Software	430
39.3.2.1	Überblick	430
39.3.2.2	Kommandointerpreter und Kommandofunktionen	431
39.3.2.3	Ein- und Ausgabesoftware	431
39.3.2.4	Graphische Grundsoftware zur Darstellung	431
39.3.2.5	Mathematische Grundsoftware	431
39.3.2.6	Geometrische Grundsoftware	432
	Zwei- und dreidimensionale Systeme	432
	Linien-, Flächen- und Volumenmodelle	435
	Oberflächen	436
	Sichtbarkeitsanalyse	440
	Symbole, Prozeduren und Programm-Makros ..	444
39.3.2.7	Datenhandhabungssoftware	445
	Datenarten und rechnerinterne Darstellung	445
	Datenhaltung und -verwaltung	448
39.3.2.8	Anwendersoftware	451
	Einteilung nach Aufgaben	451
	Informationsbeschaffung und -verarbeitung	451
	Software für die Neu- und Anpassungs- konstruktion	470
	Software für die Variantenkonstruktion	474
	Software für die Betriebsmittelkonstruktion	477
	Software für die Berechnung	480
	Software für die Simulation	488
39.3.2.9	Software für die Kopplung mit Arbeitsplanung und Fertigung	490

39.4 Schlüsselfertige und ganzheitliche Systeme	496
39.5 Expertensysteme	498
39.6 Wirtschaftlichkeit und Einführung von CAD-Systemen	502
39.7 Ausblick	505
40 Methode der Finiten Elemente	508
40.1 Grundgedanken und Begriffe	508
40.2 Grundgleichung der Verschiebungsmethode	511
40.2.1 Virtuelle Arbeit und Gleichgewicht	511
40.2.2 Verschiebung und Verzerrung eines finiten Elements	512
40.2.3 Spannungsvektor und Elastizitätsmatrix	516
40.2.4 Knotenkräfte und Elementsteifigkeitsmatrix	520
40.2.5 Gesamtsteifigkeitsmatrix	523
40.2.6 Ermittlung der Verschiebungen und Spannungen	535
40.2.7 Elementtypen	537
40.3 Nichtlineare Berechnungen	540
40.4 Beispiele	540
40.4.1 Berechnungsbeispiel	540
40.4.2 Anwendungsbeispiel	558
40.5 Anwendung der Finiten Elemente zur Bestimmung von Spannungsintensitätsfaktoren in der linear-elastischen Bruchmechanik	565
40.5.1 Bestimmung von Spannungsintensitätsfaktoren aus Spannungen und Verschiebungen durch lineares Extrapolieren	565
40.5.2 Bestimmung von Spannungsintensitätsfaktoren aus der Energiefreisetzungsrate	567
40.5.3 Bestimmung von Spannungsintensitätsfaktoren mit dem J-Integral	568
40.5.4 Besondere Rißspitzenelemente zur Erfassung der Singularitäten an der Rißspitze	570
40.5.5 Dreidimensionale Aufgabenstellungen	570
40.5.6 Beispiele für mit der Finite-Elemente-Methode berechnete Spannungsintensitätsfaktoren	571
41 Boundary Element-Methode	577
Literaturverzeichnis	578
Sachverzeichnis	591

Inhaltsübersichten

Band I (Werkstoffe)

- 1 Begriff der Schweißbarkeit
- 2 Werkstoffbeeinflussung durch den Schweißprozeß
- 3 Unlegierte Stähle
- 4 Niedriglegierte Stähle
- 5 Hochlegierte Stähle
- 6 Plattierte Stähle und Schweißplattierungen
- 7 Eisen-Gußwerkstoffe
- 8 Nichteisenmetalle
- 9 Nichtmetallische Werkstoffe

Band II (Verfahren und Fertigung)

- 10 Verfahren zum Schweißen von Metallen
- 11 Verfahren zum thermischen Schneiden
- 12 Verfahren zum Schweißen und Schneiden von Kunststoffen
- 13 Löten
- 14 Sonderverfahren
- 15 Kleben von Metallen und nichtmetallischen Werkstoffen
- 16 Technische Unterlagen für die Fertigung
- 17 Werkstätten und Werkstatteinrichtung
- 18 Nahtvorbereitung
- 19 Mechanisierung und Automatisierung von Schweißprozeß
und Qualitätskontrolle
- 20 Ausbildung und Prüfung von Schweißern und Aufsichtspersonal
- 21 Gütesicherung und Betriebszulassung
- 22 Prüfung und Abnahme des Erzeugnisses
- 23 Fehler, ihre Ursachen, ihre Vermeidung und ihre Beseitigung
- 24 Arbeits- und Brandschutz
- 25 Sonderfragen
- 26 Wirtschaftlichkeit

Band III (Konstruktive Gestaltung der Bauteile)

- 27 Der Auftrag
- 28 Indikationen für die geschweißte, gelötete und geklebte Konstruktion
- 29 Gestaltung von Schweißkonstruktionen
- 30 Detailgestaltung von Schweißverbindungen
- 31 Detailgestaltung von Lötverbindungen
- 32 Detailgestaltung von Klebverbindungen
- 33 Anwendungsbedingte Besonderheiten der Bauteilgestaltung
- 34 Konstruktionsbedingte Schadensfälle

Einführung

Ein zum Schweißen geeigneter Werkstoff (Band I), die Wahl des Fügeverfahrens sowie der wirtschaftlichsten Fertigungsmethode (Band II) und eine schweißgerechte Gestaltung (Band III) sind die Voraussetzungen zur Erstellung einer Schweißkonstruktion. Mit der Berechnung geschweißter Verbindungen befaßt sich der vierte Band des Handbuchs. Die Berechnungsmethoden beruhen auf den Regeln der Festigkeitslehre, die selbst nicht Gegenstand des Handbuchs sein konnte. Hier sollen dagegen die Besonderheiten herausgestellt werden, die für die geschweißte Konstruktion von Bedeutung sind. Die Ansichten, wie dabei am besten vorzugehen ist, haben sich in den vergangenen Jahren etwas geändert. Dies gilt für vorwiegend ruhende Beanspruchung, bei der man von der Berücksichtigung der verschiedenen Einflußgrößen durch Beiwerte abrückte und stattdessen die zulässigen Spannungen in Abhängigkeit von Beanspruchungsart und Nahtqualität festlegte. Ein weiterer Wandel kündigt sich insofern an, als man im Stahlbau dazu übergehen will, Spannungen aus γ -fachen Gebrauchslasten zu berechnen und diese dem Festigkeitskennwert gegenüberzustellen. In DIN 18800 wird jedoch von dieser Möglichkeit noch kein Gebrauch gemacht. Bei dynamischer Beanspruchung geht man zunehmend auf den Betriebsfestigkeitsnachweis über (Kräne, Eisenbahnbrücken usw.), was in diesem Band berücksichtigt wird.

Der für die Berechnung von vorwiegend ruhend beanspruchten Verbindungen aus Aluminiumwerkstoffen veröffentlichte Normentwurf DIN E 4113 T2 wurde zurückgezogen. Bis zur Einführung einer neuen Ausgabe der DIN 4113 T2 gilt für den Bereich des Bauwesens die „Richtlinie zum Schweißen von tragenden Bauteilen aus Aluminium“ — Fassung Oktober 1986¹. Da hierin keine Berechnungsformeln enthalten sind, wurden die in diesem Band vorgestellten Beispiele vorwiegend ruhend beanspruchter Aluminiumverbindungen nach den in der DINE 4113 T2 aufgeführten Beziehungen berechnet, die offenbar ohne wesentliche Änderungen in die neue Ausgabe der DIN 4113 T2 übernommen werden sollen.

Bereits durch programmierbare Taschenrechner kann die Rechenarbeit im Konstruktionsbüro wesentlich erleichtert werden. Aus diesem Grund und um den Einstieg in die Rechentechnik zu fördern, wurde die Anwendung der Taschenrech-

¹ Mitteilungen IfBt 4/1987. S. 113–117, zu beziehen vom Institut für Bautechnik, Reichpietsch-
ufer 74–76, 1000 Berlin 30

ner für die Bemessung geschweißter und geklebter Verbindungen etwas eingehender behandelt. Der nächste Schritt, der hier nicht vollzogen aber angeregt wird, ist dann der Übergang zum Personal Computer. Zwei Kapitel weisen in die nahe Zukunft: Die rechnergestützte Konstruktion (CAD) beginnt sich durchzusetzen, die Entwickler der entsprechenden Programme haben aber bisher das besondere Merkmal Schweißverbindung noch wenig beachtet. Um hier den Weg zu ebnen, wird eine Einführung in CAD gegeben, die beispielhaft einen Konstruktionskatalog für Schweißverbindungen enthält. Es geht darum, in dieser Richtung Anregungen zu vermitteln, was um so wichtiger zu sein scheint, als die ursprünglich für den Bereich der Flug- und Wehrtechnik entwickelten und dann von Großunternehmen anderer Fachgebiete genutzten CAD-Systeme allmählich auch in Mittel- und Kleinbetrieben Eingang finden. Ein ähnliches Ziel wird mit der Aufnahme einer einführenden Betrachtung der Finite-Elemente-Methode verfolgt, die sich in vielen Fällen eignet, schwierige Probleme auf dem Gebiet der Schweißtechnik wie die Bestimmung von Dehnungs-, Spannungs- und Temperaturfeldern auch im Zusammenhang mit bruchmechanischen Fragestellungen zu lösen.