

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURESystematische Berechnung hochbeanspruchter
Schraubenverbindungen
Mehrschraubenverbindungen
Systematic calculation of highly
stressed bolted joints
Multi bolted jointsVDI 2230
Blatt 2 / Part 2Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English*Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.**The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite
Vorbemerkung	3
Einleitung	3
1 Anwendungsbereich	3
2 Normative Verweise	5
3 Begriffe	5
3.1 Grundlagen	5
3.2 Arten von Schraubenfeldern	7
4 Formelzeichen und Abkürzungen	8
5 Berechnungsverfahren und Lösungsansätze	14
5.1 Einführung	14
5.2 Verfahren der Starrkörpermechanik	15
5.3 Verfahren der Elastomechanik	16
5.4 Numerische Methoden	17
6 Analytische Berechnungen	18
6.1 Lastverteilung und Schraubenbelastung	18
6.2 Vorgehensweise	19
6.3 Starrkörpermechanik	20
6.3.1 Nicht rotationssymmetrische Schraubenfelder	20
6.3.2 Rotationssymmetrische Schraubenfelder: Kreisflansch	29
6.4 Elastomechanik	32
6.4.1 Grundsätzliches Vorgehen	33
6.4.2 Beispiele	34
6.4.3 Lagerung von Struktur und SV	36
6.4.4 Elastomechanische Modelle für Struktur und Schraubenfeld	38
6.4.5 Lastverteilung bei MV bei Modellierung als elastisch gebetteter Biegebalken	39
6.4.6 Näherungsverfahren nach <i>Ritz</i>	45
6.4.7 Höchstbelastete SV	46
6.4.8 Abstand <i>a</i>	46
6.5 Herauslösen einer einzelnen Verbindung	46

Contents	Page
Preliminary note	3
Introduction	3
1 Scope	3
2 Normative references	5
3 Terms and definitions	5
3.1 Fundamentals	5
3.2 Types of bolt array	7
4 Symbols and abbreviations	8
5 Calculation methods and approaches to solutions	14
5.1 Introduction	14
5.2 Methods of rigid body mechanics	15
5.3 Methods of elastomechanics	16
5.4 Numerical methods	17
6 Analytical calculations	18
6.1 Load distribution and bolt loading	18
6.2 Procedure	19
6.3 Rigid body mechanics	20
6.3.1 Non-rotationally symmetrical bolt arrays	20
6.3.2 Rotationally symmetrical bolt arrays: circular flange	29
6.4 Elastomechanics	32
6.4.1 Basic procedure	33
6.4.2 Examples	34
6.4.3 Support of structure and BJ	36
6.4.4 Elastomechanical models for structure and bolt array	38
6.4.5 Load distribution in MBJs when modelled as an elastically bedded bending beam	39
6.4.6 The Ritz approximative method	45
6.4.7 Most highly loaded BJ	46
6.4.8 Distance <i>a</i>	46
6.5 Separation of an individual joint	46

VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (GPP)

Fachbereich Getriebe und Maschinenelemente

VDI-Handbuch Produktentwicklung und Konstruktion

	Seite		Page		
6.6	Schraubenreihe unter momentenfreier Querbela st ung	47	6.6 Bolt row under momentless transverse loading	47	
6.6.1	Beschreibung des Bela st ungsfall.....	47	6.6.1 Description of the loading case	47	
6.6.2	Bela st ungsverteilung bei Querla ⁿ gsbela st ung.....	48	6.6.2 Load distribution with transverse longitudinal loading	48	
6.6.3	Berechnungsmodell.....	50	6.6.3 Calculation model.....	50	
6.6.4	Sonderfall Pass-Schrauben- Verbindungen.....	54	6.6.4 Special case of close-fitting bolt joints	54	
6.6.5	Gestaltungshinweise	55	6.6.5 Design information	55	
7	Anwendung der Finite-Elemente- Methode	57	7 Application of finite element method	57	
7.1	Grundlegende Vorgehensweise.....	57	7.1 Basic procedure	57	
7.2	Modellierung.....	58	7.2 Modelling.....	58	
7.2.1	Modellklassen	58	7.2.1 Model classes.....	58	
7.2.2	Spezifische Modelleigenschaften.....	60	7.2.2 Specific model properties	60	
7.3	Ableitung der Berechnungsgrößen aus der FE-Rechnung	75	7.3 Derivation of the calculation quantities from the FE calculation	75	
7.3.1	Nachgiebigkeiten	76	7.3.1 Compliances	76	
7.3.2	Schraubennennbeanspruchung Montagezustand	79	7.3.2 Nominal bolt loading in the assembly state	79	
7.3.3	Schraubenzusatzbeanspruchung durch äußere Betriebslasten	79	7.3.3 Additional bolt load from external operating loads.....	79	
7.3.4	Flächenpressung.....	83	7.3.4 Surface pressure.....	83	
7.3.5	Abheben, Klaffen, Rutschen	84	7.3.5 Lifting off, opening up, sliding..	84	
7.4	Tragfähigkeitsnachweis von Ein- und Mehrschraubenverbindungen in Anlehnung an die Richtlinie VDI 2230 Blatt 1.....	85	7.4 Load-carrying capacity analysis of single- and MBJs adapted from standard VDI 2230 Part 1	85	
Anhang	Korrigierte analytische Berechnungen unter Beachtung des elastischen Verhaltens der Struktur	90	Annex	Corrected analytical calculations taking into account the elastic behaviour of the structure.....	90
A1	Schraubenfelder unter Torsionsbela st ung	90	A1 Bolt arrays under torsional loading	90	
A2	Schraubenfeld unter Zugbela st ung.....	92	A2 Bolt arrays under tensile load	92	
	Schrifttum	93	Bibliography	93	

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser VDI-Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser VDI-Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter www.vdi.de/2230.

Einleitung

Die Richtlinie VDI 2230 Blatt 1 ist national und international als Standardwerk zur Berechnung hochfester Schraubenverbindungen (SV) anerkannt. Sie setzt dabei die Kenntnis der Belastungs- und Geometriegrößen voraus und gilt für Einschraubenverbindungen (EV). Dies bedeutet, dass vor der eigentlichen Berechnung im Regelfall aus mehreren Schrauben innerhalb eines Verbindungsbereichs (Mehrschraubenverbindung – MV) die höchstbelastete SV mit ihren Belastungsgrößen zu ermitteln und virtuell herauszulösen ist.

Diese Aufgabe behandelt die vorliegende Richtlinie. Es werden darin zum einen Möglichkeiten der analytischen Berechnung von MV (Starrkörpermechanik, Elastomechanik) zur Ermittlung der Lastverteilung und der Belastungsgrößen aufgezeigt, ohne dass ein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden kann. Zum anderen wird die Anwendung numerischer Verfahren für die Berechnung von SV behandelt, mit Konzentration auf die Finite-Elemente-Methode (FEM). Für alle Verfahren zur Bewertung von Mehrschraubenverbindungen werden die Anknüpfungspunkte für den Nachweis nach VDI 2230 Blatt 1 beschrieben. Dabei können insbesondere bei der Verwendung der FEM-Rechenschritte ersetzt oder erweitert und die Qualität der Berechnungsergebnisse verbessert werden.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie gilt analog VDI 2230 Blatt 1 für hochfeste Schraubenverbindungen aus Stahl mit Befestigungsgewinde, das heißt für Festigkeitsklassen 8.8 bis 12.9 bzw. 70 und 80 und einer kraftschlüssigen Übertragung der Betriebsbelas-

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the Internet at www.vdi.de/2230.

Introduction

Standard VDI 2230 Part 1 is recognized both nationally and internationally as a standard work for calculating high-strength bolted joints (BJs). It assumes a knowledge of the relevant loading and geometrical parameters and applies to single-bolt joints (SBJ). This means that before the actual calculation, which usually concerns several bolts within a contact area (multi bolted joint – MBJ), it will be necessary to determine the most highly loaded BJ together with its stress levels and separate it out virtually.

This is the task which the present standard tackles. First of all, it presents a method involving an analytic calculation of MBJs (rigid body mechanics, elastomechanics) in order to determine the load distribution and stress levels but cannot make any claim to completeness. Secondly, it deals with the application of numerical methods for calculating BJs, concentrating on the finite element method (FEM). For all methods of evaluating MBJs, it describes the points of reference for verification in accordance with VDI 2230 Part 1. Here calculation steps can be replaced or added, especially when the finite element method is used, and the quality of calculation results improved.

1 Scope

This standard, analogously to VDI 2230 Part 1, applies to high-strength bolted joints made of steel with screw thread, in other words, to strength grades 8.8 to 12.9 or 70 and 80 and with a frictional transmission of the working load which basically

tung, die grundsätzlich an den verspannten Bauteilen bzw. der Struktur angreift. Für Schrauben aus anderen Werkstoffen, bei niedrigeren Festigkeitsklassen oder bei von DIN ISO 898-1 abweichenden Festigkeiten kann die Richtlinie sinngemäß angewendet werden.

Grundsätzlich befreit die Richtlinie nicht von experimentellen sowie bei Anwendung analytischer Methoden gegebenenfalls numerischen Untersuchungen zur Verifizierung der Berechnungsergebnisse. Dies ist insbesondere bei kritischen Mehrschraubenverbindungen und bei Berechnungsansätzen, die das System sehr stark vereinfacht betrachten (z. B. das Starrkörpermodell), anzuraten.

Das Hauptziel der Richtlinie besteht darin dem Konstrukteur oder Berechnungsingenieur Hilfestellung bei der Ermittlung und Separation der höchstbelasteten EV innerhalb eines Schraubenfelds (MV) zu geben. Dies erfolgt durch die Beschreibung unterschiedlicher Berechnungsansätze sowie deren systematischer Darstellung in Bezug auf die Vorgehensweise und die Möglichkeiten und Grenzen. Mit den dabei errechneten Belastungs- und Berechnungsgrößen wird die Qualität der sich anschließenden funktions- und betriebssicheren Auslegung nach VDI 2230 Blatt 1 verbessert.

Bei den analytischen Näherungsberechnungen liefern Verfahren der Starrkörpermechanik bei vergleichsweise geringem Aufwand Ergebnisse, die für eine Reihe von Fällen der Praxis ausreichend genau sein können. Allerdings können keine allgemeingültigen Kriterien dafür angegeben werden. Letztlich liegt es in der Verantwortung des Konstrukteurs oder Berechnungsingenieurs, seine Ergebnisse zu verifizieren. Unter Beachtung praktischer Erfahrungen wurden bei einigen Fällen Korrekturen zur besseren Annäherung an die realen Verhältnisse vorgenommen.

In den Fällen, in denen eine genauere Berechnung erforderlich ist und FE-Ergebnisse nicht vorliegen, bieten sich die analytischen Verfahren der Elastomechanik an. Allerdings sind diese aufwendiger und nicht bei allen Berechnungsproblemen nutzbar.

Mit den softwareunabhängigen Hinweisen zur FE-Anwendung wird zum einen das Ziel verfolgt, dem Konstrukteur oder Berechnungsingenieur, in Abhängigkeit vom Ziel der FE-Berechnung, sinnvolle Modellierungsvarianten vorzuschlagen. Zur Reduzierung der Variantenvielfalt wurden unterschiedliche Modellklassen definiert, die die Entwicklung eines realitätsnahen und trotzdem im Aufwand vertretbaren Berechnungsmodells ermöglichen.

Zum anderen soll durch Vorgaben zur Auswertung der FE-Ergebnisse hinsichtlich der höchstbelasteten

acts on the clamped components or on the structure. As regards bolts made of other materials, or with lower strength grades or with strengths which deviate from DIN ISO 898-1, the standard can be applied *mutatis mutandis*.

This standard does not in principle do away with the need for experimental tests or where applicable, when analytical methods are used, for numerical analyses to verify the results of calculations. This is in particular advisable in the case of critical MBJs and also with analytical approaches which examine the system with a marked degree of simplification (such as, for example, the rigid body model).

The principle aim of the standard is to provide design engineers with assistance in determining and separating out the most highly loaded SBJ within a bolt array (MBJ). This is done by describing different calculation methods and also by their systematic presentation with respect to procedure and to possibilities and limits. With the loading and calculation quantities thus obtained by calculation an improvement is achieved in the quality of the subsequent functionally and operationally safe design as specified in VDI 2230 Part 1.

With approximative analytical calculations, methods of rigid body mechanics will, with comparatively little effort, yield results which can be precise enough for a series of practical cases. However it is not possible to provide criteria of universal application for this. Ultimately it is the responsibility of the design engineer to verify his results. While paying due regard to practical experience, corrections have been made in some cases to give a closer approximation to real situations.

In cases requiring a more precise calculation and where FE results are not available, the analytic methods of elastomechanics are a possibility. However these are more complex and are not suitable for use with all calculation problems.

The aim of the software-independent information regarding FE application is firstly to provide the engineer with useful modelling variants depending on the objective of the FE calculation. In order to reduce the number of variants, different classes of model have been defined which make it possible to develop a realistic computational model which nevertheless does not involve an unacceptable level of effort.

Secondly, the closeness of the results to reality should be ensured by requirements relating to eval-

ten Schraube und zur Ermittlung der für die Berechnung nach VDI 2230 Blatt 1 benötigten Belastungs- und Berechnungsgrößen die Realitätsnähe der Ergebnisse abgesichert werden. Somit ergänzen sich VDI 2230 Blatt 1 und Blatt 2.

2 Normative Verweise

Das folgende zitierte Dokument ist für die Anwendung dieser Richtlinie erforderlich:

VDI 2230 Blatt 1:2014-12 Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen; Zylindrische Einschraubenverbindungen

uation of the FE results for the most highly loaded bolt and relating to determination of the loading and calculation quantities required for calculations in accordance with VDI 2230 Part 1. In this way VDI 2230 Part 1 and Part 2 supplement each other.

2 Normative references

The following referenced document is indispensable for the application of this standard:

VDI 2230 Part 1:2014-12 Systematic calculation of high-duty bolted joints; Joints with one cylindrical bolt