



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für metalltechnische Berufe

Fachwissen Technische Produktdesigner 2

1. Auflage

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 15167

Autoren:

Marcus Gompelmann	OStR, Dipl.-Ing.	Düren
Volker Menges	OStR, Dipl.-Ing.	Lichtenstein
Hermann Meyer	StD	Bielefeld
Gabriele Mols	Dipl.-Ing.	Dortmund
Bernhard Schilling	StR, Dipl.-Ing.	Attenweiler
Mikko Soiniemi	StR	Eningen
Andreas Stenzel	OStR, Dipl.-Ing.	Balingen
Norbert Trapp	Ausbildungsleiter Technische Berufe, SSI Schäfer – Fritz Schäfer GmbH	Neunkirchen

Unter Mitwirkung von:

H.-P. Wissen, BFW Koblenz

Melanie Grobholz, Erkelenz

Autorenteams der Lehrwerke „Fachkunde Metall“ (Europa-Nr. 10129), „Konstruktionslehre Maschinenbau“ (Europa-Nr. 14009), „Tabellenbuch Metall“ (Europa-Nr. 10609), „Industrielle Fertigung“ (Europa-Nr. 53510), „Rechenbuch Metall“ (Europa-Nr. 10307) und „Fachkunde Zerspantechnik“ (Europa-Nr. 15655) durch das Beisteuern technischer Illustrationen

Verlagslektorat:

Dr. Astrid Grote-Wolff

Bildbearbeitung:

Zeichenbüro des Verlages Europa-Lehrmittel, Ostfildern

1. Auflage 2021

Druck 5 4 3 2

Alle Drucke der selben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern identisch sind.

ISBN 978-3-8085-1516-7

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2021 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: Satz+Layout Werkstatt Kluth GmbH, 50374 Ertstadt

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Umschlagbild: nach einer Vorlage von Gabriele Mols

Druck: Himmer GmbH, 86167 Augsburg

VORWORT

Mit „**Fachwissen Technische Produktdesigner 2**“ liegt der zweite Band der Europa-Fachbuchreihe für die **Ausbildung zum Technischen Produktdesigner/zur Technischen Produktdesignerin der Fachrichtungen Maschinen- und Anlagenkonstruktion (MAK) und Produktgestaltung und -konstruktion (PGK)** vor. Der Titel baut auf „**Fachwissen Technische Produktdesigner 1**“ auf.

Das Lehrwerk wurde für **Auszubildende zum Technischen Produktdesigner/zur Technischen Produktdesignerin** im 3. und 4. Ausbildungsjahr konzipiert. Es vermittelt die Fachinhalte der **Lernfelder 9 bis 12 des Rahmenlehrplans** sowie die im **Ausbildungsrahmenplan** verankerten Fertigkeiten, Kenntnisse und Fähigkeiten der Fachrichtung MAK. Die Inhalte der Ausbildung in der Fachrichtung PGK werden zum größten Teil vermittelt. Dementsprechend ist das Kapitel zu Lernfeld 12 der Fachrichtung MAK in der Weise ausgearbeitet, dass auch die wesentlichen Inhalte der Lernfelder 10 und 12 der Fachrichtung PGK vermittelt werden.

Darüber hinaus kann „**Fachwissen Technische Produktdesigner 2**“ von allen Berufsgruppen, Vollzeitbildungsgängen und Studierenden, die in der Produktentwicklung tätig sind und **3D-CAD-Modelle** sowie technische Zeichnungen erstellen, im Selbststudium eingesetzt und als aktueller Wissensspeicher genutzt werden.

I Inhalte:

Das Lehrwerk ist **lernfeldsystematisch** strukturiert und wird durch ein lernfeldübergreifendes **Kapitel zur qualitäts- und kundenorientierten Produktentwicklung** abgerundet. Der wesentliche Schwerpunkt ist die **funktions- und fertigungsgerechte Gestaltung** von Baugruppen und deren normgerechte Darstellung in technischen Zeichnungen. Hierbei wird besonders auf die konstruktive Gestaltung von **Verbindungs- und Maschinenelementen** und die Integration von **Kaufteilen** eingegangen. Darüber hinaus werden **pneumatische und elektropneumatische Steuerungen** sowie die **gestaltungstechnischen Vorgaben** im Konstruktionsprozess praxisgerecht anhand zahlreicher Beispiele dargestellt.

Der **aktuelle Normenstand** inklusive des Normensystems zur **Geometrischen Produktspezifikation (ISO GPS)** wird berücksichtigt.

Englische Fachtexte, Illustrationen und Aufgabenstellungen sowie Fachvokabular zu den Lernfeld-Kapiteln regen zur **fremdsprachlichen Kommunikation** an.

I Didaktische Besonderheiten:

Der Europa-Fachbuchreihe für die Ausbildung zum Technischen Produktdesigner/zur Technischen Produktdesignerin liegt ein einheitliches didaktisches Konzept zugrunde.

Die **sachlogische Darstellung der Fachinhalte**, die reichhaltige Bebilderung, übersichtliche Tabellen und Merksätze ermöglichen einen systematischen Wissensaufbau im Rahmen des Lernfeld-Unterrichts, aber auch im Selbststudium und zur Prüfungsvorbereitung. **Lernsituationen** sowie zahlreiche **praxisorientierte Aufgaben** regen zur Wiederholung, Vertiefung und Anwendung der Fachinhalte an und sichern den Lernerfolg.

I Digitales Zusatzmaterial:

Alle Bilder und Tabellen des Lehrwerks sind für die Übernahme in eigenes Material digital zugänglich. Ergänzend stehen die **technischen Zeichnungen** zu Lernsituationen als pdf-Dokumente zur Verfügung (s. Informationen zur EUROPATHEK auf der Umschlaginnenseite).

I Ihr Feedback ist uns wichtig!

Wir freuen uns auch weiterhin auf Ihre Anregungen und Unterstützung durch Kritik, die Sie uns unter lektorat@europa-lehrmittel.de oder unter der Verlagsadresse zukommen lassen, und wünschen Ihnen viel Erfolg mit „**Fachwissen Technische Produktdesigner 2**“.

Sommer 2021

Autorenteam und Verlag

INHALTSVERZEICHNIS

9	3D-DATENSÄTZE VON BAUGRUPPEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON FÜGEVERFAHREN UND MONTAGETECHNIKEN ERSTELLEN UND MODIFIZIEREN	9
9.1	Lernsituationen	10
9.2	Funktionsanalyse von Bauteilen und Baugruppen	13
9.2.1	Gesamt- und Teilfunktionen	13
9.2.2	Teil- und Nebenfunktionen	13
9.3	Wirkprinzipien der Verbindungen	14
9.3.1	Kraftschlüssige Verbindungen	14
9.3.2	Formschlüssige Verbindungen	15
9.3.3	Stoffschlüssige Verbindungen	15
9.4	Schraubenverbindungen	16
9.4.1	Reibung am Gewinde	17
9.4.2	Anziehen einer Schraubenverbindung	18
9.4.3	Berechnungen von Schraubenverbindungen	19
9.4.4	Schraubensicherungen	22
9.4.5	Konstruktive Gestaltungsmerkmale von Schraubenverbindungen	25
9.4.6	Bewegungsgewinde	27
9.5	Welle-Nabe-Verbindungen	30
9.6	Kraftschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	31
9.6.1	Pressverbindungen	32
9.6.2	Kegelpressverbindungen	33
9.6.3	Spannverbindungen	34
9.6.4	Klemmverbindungen	35
9.7	Formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	36
9.7.1	Stift- und Bolzenverbindungen	37
9.7.2	Passfederverbindungen	38
9.7.3	Scheibenfederverbindungen	42
9.7.4	Profilwellenverbindungen	43
9.8	Vorgespannt formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	46
9.8.1	Keilverbindungen	46
9.8.2	Stirnverzahnungen	47
9.9	Elemente zur Lagesicherung	47
9.9.1	Splinte, Federstecker und Federklappstecker	47
9.9.2	Achshalter	48
9.9.3	Sicherungsring, Sicherungsscheibe, Sprengring ..	48
9.9.4	Nutmutter mit Sicherungsblech ..	49
9.9.5	Stellring	50
9.10	Nietverbindungen	52
9.11	Schweißen	53
9.11.1	Schweißbarkeit	53
9.11.2	Schweißbarkeit der Werkstoffe ..	54
9.11.3	Schweißverfahren	54
9.11.4	Schmelzschweißverfahren	54
9.11.5	Lichtbogenschmelzschweißen ..	54
9.11.6	Gasschmelzschweißen	56
9.11.7	Strahlschweißen	57
9.11.8	Pressschweißverfahren	58
9.11.9	Kennzeichnung der Schweißnähte in technischen Zeichnungen	59
9.11.10	Gestalten von Schweißverbindungen	64
9.12	Löten	67
9.12.1	Grundlagen des Lötens	67
9.12.2	Lötverfahren	68
9.12.3	Lötvorgang	69
9.12.4	Gestalten von Lötverbindungen ..	69
9.13	Kleben	71
9.13.1	Funktion und Wirkung von Klebeflächen	71
9.13.2	Klebstoffe	72
9.13.3	Gestalten von Klebeverbindungen ..	73
9.14	Form- und Lagetoleranzen	75
9.14.1	Formtoleranzen	76
9.14.2	Lagetoleranzen	77
9.14.3	Modell für geometrische Spezifikation und Prüfung – ISO 17450	79
9.14.4	Zeichnungseintragung und Symbole (ISO 1101:2017)	80

9.14.5	Ebenen- und Geometrieangaben mit Indikatoren	83	9.14.11	Geometrische Produktspezifikationen (GPS)	93
9.14.6	Anforderungen an Bezugselemente	86	9.14.12	PMI – Ausblick, Industrie 4.0	99
9.14.7	Anwendungsbeispiel	87	9.15	Technical English	100
9.14.8	Toleranzzonen	89	9.15.1	Connections	100
9.14.9	Tolerierungsgrundsätze	90	9.15.2	Shaft-hub connections	100
9.14.10	Material-Bedingungen	92	9.15.3	Positive shaft-hub connections	101
			9.15.4	Feather key connection	101

10 SYSTEME DER AUTOMATISIERTEN FERTIGUNG – DATENSÄTZE UND DOKUMENTATIONEN ERSTELLEN UND MODIFIZIEREN 102

10.1	Lernsituationen	103	10.7.1	Schließer, Öffner und Wechsler	148
10.2	Automatisierung und Industrie 4.0	108	10.7.2	Benennungen in der Elektronik	149
10.3	Steuern und Regeln	109	10.7.3	Sensoren	150
10.3.1	Steuerungstechnik	109	10.7.4	Relais und Schütz	152
10.3.2	Regelungstechnik	111	10.7.5	Stromlaufplan und Pneumatikplan mit Relais	153
10.4	Pneumatische Steuerungen	112	10.7.6	Schritt看ette in der Elektropneumatik	157
10.4.1	Grundlagen der Pneumatik	112	10.8	Hydraulik	161
10.4.2	Drucklufterzeugung	113	10.8.1	Hydraulikflüssigkeiten und Viskosität	161
10.4.3	Druckluftaufbereitung	114	10.8.2	Druckerzeugung	161
10.4.4	Pneumatische Arbeitselemente	115	10.8.3	Wegeventile	163
10.4.5	Wegeventile	118	10.8.4	Hydraulische Arbeitselemente	164
10.4.6	Benennungen nach DIN EN 81346	125	10.8.5	Hydraulischer Kreislauf (offen, geschlossen)	165
10.4.7	Weitere Komponenten	126	10.8.6	Volumenstrom	166
10.4.8	Vakuumtechnik	129	10.8.7	Kolbenkräfte	167
10.4.9	Verknüpfung von Signalen	130	10.8.8	Kolbengeschwindigkeiten	168
10.4.10	Anwendung der Signalverknüpfung	132	10.8.9	Elektrohydraulische Steuerung	169
10.4.11	Pneumatischer Schaltplan (Pneumatikplan)	133	10.9	Speicherprogrammierbare Steuerungen	173
10.4.12	GRAFSET	136	10.9.1	Programmiersprache Funktionsplan FUP (Funktionsbausteinsprache)	174
10.5	Kolbenkräfte und Luftverbrauch	141	10.10	Technical English	178
10.5.1	Kolbenkräfte	141	10.10.1	Linking of signals and programmable logic controllers (PLC)	178
10.5.2	Luftverbrauch	142	10.10.2	Automation and Industry 4.0	179
10.6	Schrittketten	144			
10.6.1	Aufbau von Schrittketten	144			
10.7	Elektropneumatische Steuerungen	148			

11	3D-DATENSÄTZE VON BAUGRUPPEN UNTER VERWENDUNG VON MASCHINENELEMENTEN SOWIE KAUFTEILEN ERSTELLEN UND MODIFIZIEREN	180		
11.1	Lernsituationen	181	11.4.1	Nicht schaltbare Kupplungen ... 259
11.2	Getriebetechnik	184	11.4.2	Schaltbare Kupplungen 261
11.2.1	Physikalische Grundlagen	184	11.4.3	Kupplungen für Sonderzwecke . 262
11.2.2	Drehbewegungen	187	11.5	Dichtungen
11.2.3	Übersetzungsverhältnisse von Getrieben	190	11.5.1	Statische Dichtungen
11.2.4	Zahnradtriebe	194	11.5.2	Dynamische Dichtungen
11.2.5	Zugmittelgetriebe	207	11.6	Wärmebehandlungsverfahren ..
11.2.6	Kettentriebe	212	11.6.1	Härteverfahren
11.3	Lagerungen und Führungen	221	11.6.2	Härteprüfverfahren
11.3.1	Reibung	221	11.6.3	Härteangaben in technischen Zeichnungen
11.3.2	Lagerungen	224	11.7	Federn
11.3.3	Gleitlager	224	11.7.1	Federarten
11.3.4	Wälzlager	227	11.7.2	Darstellung von Federn
11.3.5	Gestaltung von Lagerungen	232	11.8	Technical English
11.3.6	Linearführungen	243	11.8.1	Physical basics
11.3.7	Berechnung und Dimensionierung von Lagerungen	244	11.8.2	Gear boxes
11.4	Kupplungen	259	11.8.3	Bearings
12	3D-DATENSÄTZE VON BAUTEILEN UND BAUGRUPPEN NACH GESTALTUNGSTECHNISCHEN VORGABEN ERSTELLEN UND MODIFIZIEREN .	283		
12.1	Lernsituationen	284	12.5	Der Designprozess
12.2	Komponenten des Technischen Produktdesigns	286	12.5.1	Designorientierte Aktivitäten im Produktentwicklungsprozess ...
12.2.1	Nutzerorientierung und Ästhetik in der Produktgestaltung	286	12.5.2	Bewertung von Designkonzepten und Designentwürfen
12.3	Anforderungen und Vorgaben in der Produktgestaltung	291	12.6	Medien, Werkzeuge und Modellierungstechniken
12.3.1	Gestaltungsgrundregeln	291	12.6.1	Skizzen und Renderings
12.3.2	Gestaltungsprinzipien	294	12.6.2	Konzeptmodelle
12.3.3	Gestaltungsrichtlinien, Design for X	294	12.6.3	Freiformflächenmodellierung im CAD
12.3.4	Weitere designbestimmende Einflussfaktoren	298	12.6.4	Digitale Visualisierung
12.4	Grundlagen der Produktgestaltung	301	12.6.5	Designmodelle
12.4.1	Gestaltungsmittel Form	301	12.7	Beispiel einer Designentwicklung
12.4.2	Gestaltungsmittel Farbe	304	12.7.1	Klärung der Aufgabe
12.4.3	Gestaltungsmittel Material	306	12.7.2	Entwicklung des Funktionskonzepts
12.4.4	Gestaltungsmittel Oberfläche ..	307	12.7.3	Entwicklung des Formkonzepts .

12.7.4	Ausarbeitung des Entwurfs und des CAD-Modells	337	12.9.1	Design of technical products ...	341
12.8	Checkliste für den Designprozess	339	12.9.2	Criteria for good industrial design	341
12.9	Technical English	341	12.9.3	Media and modelling techniques in product design ..	342

13 QUALITÄTS- UND KUNDENORIENTIERTE PRODUKTENTWICKLUNG 343

13.1	Grundlagen des Qualitätsmanagements	344	13.3.3	Methoden des Qualitätsmanagements	358
13.1.1	Qualität – was ist das?	344	13.4	Statistische Auswertung	366
13.1.2	Qualitätsarten	344	13.4.1	Normalverteilung	366
13.1.3	Qualitätsanforderungen	345	13.4.2	Prozesskennwerte aus Stichprobenprüfungen	368
13.1.4	Qualitätsmerkmale	345	13.4.3	Six Sigma	371
13.1.5	Qualität und deren Einflussfaktoren	346	13.4.4	Statistische Prozessregelung (SPC)	372
13.2	Funktionen des Qualitätsmanagements	347	13.5	Normen zum Qualitätsmanagement	374
13.2.1	Qualitätspolitik	347	13.5.1	Normenreihe DIN EN ISO 9000 ..	374
13.2.2	Qualitätsziele	349	13.5.2	Auditierung und Zertifizierung ..	377
13.2.3	Qualitätsbezogene Kosten	349	13.6	Integriertes Qualitätsmanagementsystem ..	379
13.3	Techniken des Qualitätsmanagements	350			
13.3.1	Elementare QM-Werkzeuge	350			
13.3.2	Neue QM-Werkzeuge	355			

14 SACHWORTVERZEICHNIS 381

9.1 | LERNSITUATIONEN

LERNSITUATION 1 | Konstruktionen von Welle-Nabe-Verbindungen

Ihre Firma plant, Versuche mit unterschiedlichen Welle-Nabe-Verbindungen durchzuführen. Hierzu liegen die technischen Zeichnungen des Wellenzapfens (Wellenteil) und des Zahnrads (Nabenteil) vor.

Ihre Aufgabe ist es, verschiedene Welle-Nabe-Verbindungen unter Verwendung der gegebenen Einzelteile zu konstruieren.

Die Maße für den Wellenzapfen sind aus **Bild 1** zu entnehmen, die Maße für das Zahnrad (Nabe) aus **Bild 1, Seite 11**. Der Bohrungsdurchmesser d richtet sich nach der verwendeten Welle-Nabe-Verbindung.

Die in den Zeichnungen der Einzelteile angegebenen Abmessungen und Oberflächenangaben von Wellenzapfen und Zahnrad stellen Richtwerte dar, sie können bei Bedarf an die Erfordernisse der entsprechenden Welle-Nabe-Verbindung angepasst werden. Dies gilt auch für die Eindrehungen ($\varnothing 62$ mm und $\varnothing 64$ mm) des Zahnrads.

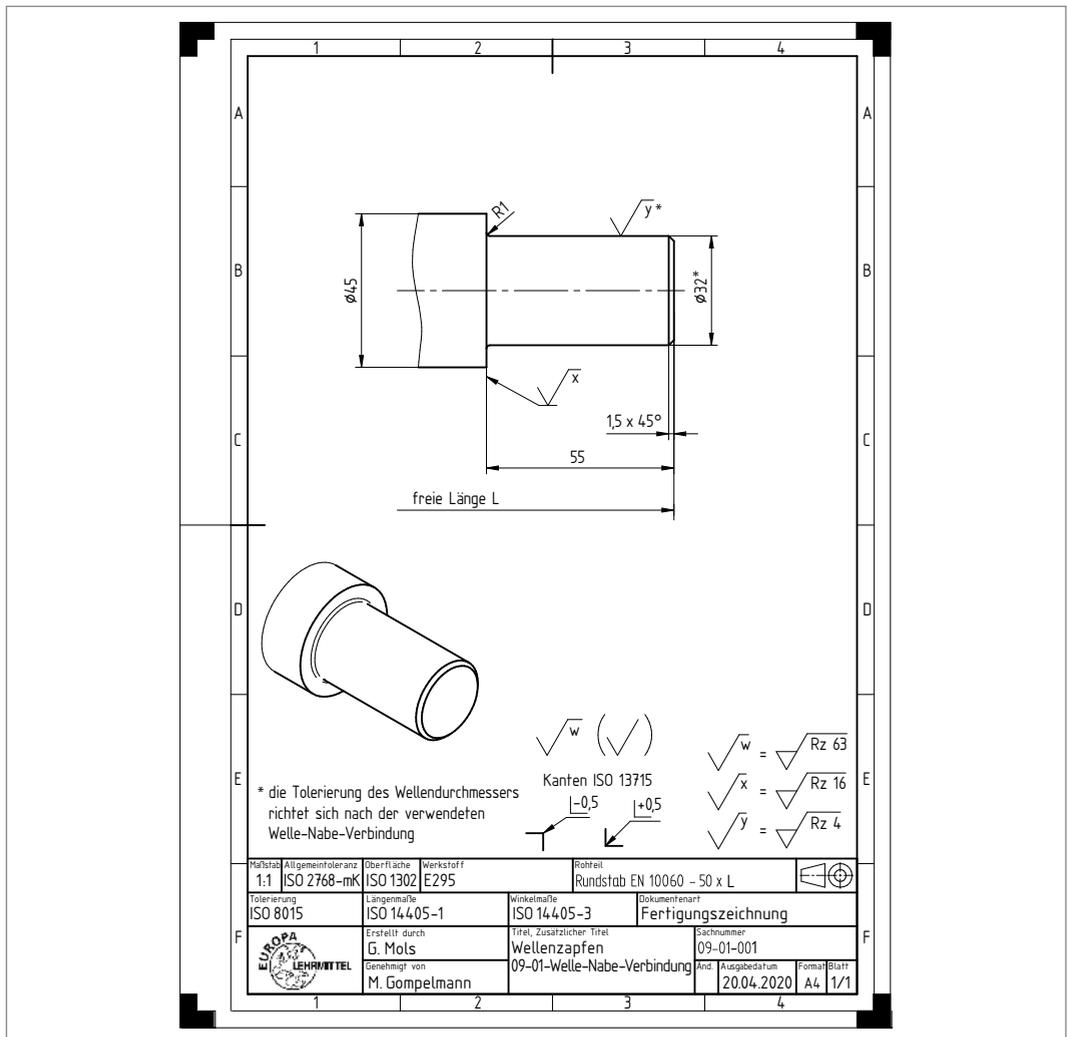


Bild 1: Wellenzapfen

LERNSITUATION 2 | Wandkonsole als Schweißkonstruktion

In der Fertigung wird ein Elektromotor ausgetauscht. Der Motor soll auf einer an der Wand befestigten Konsole aufgestellt werden. Die dazu benötigte Konsole soll im Ausbildungsbereich konstruiert und gefertigt werden.

Der Fertigungsleiter übergibt Ihnen eine Maßskizze (Bild 1) zu den örtlichen Gegebenheiten und ein Maßblatt des zu montierenden Motors (Bild 2).

Die Abmessungen für die Breitenmaße sind selbst zu wählen. Beachten Sie, dass das Wellenende zur Befestigung einer Riemenscheibe frei über die Konsole hinausragt.

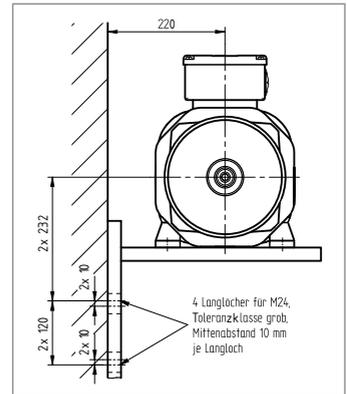


Bild 1: Maßskizze der Konsole

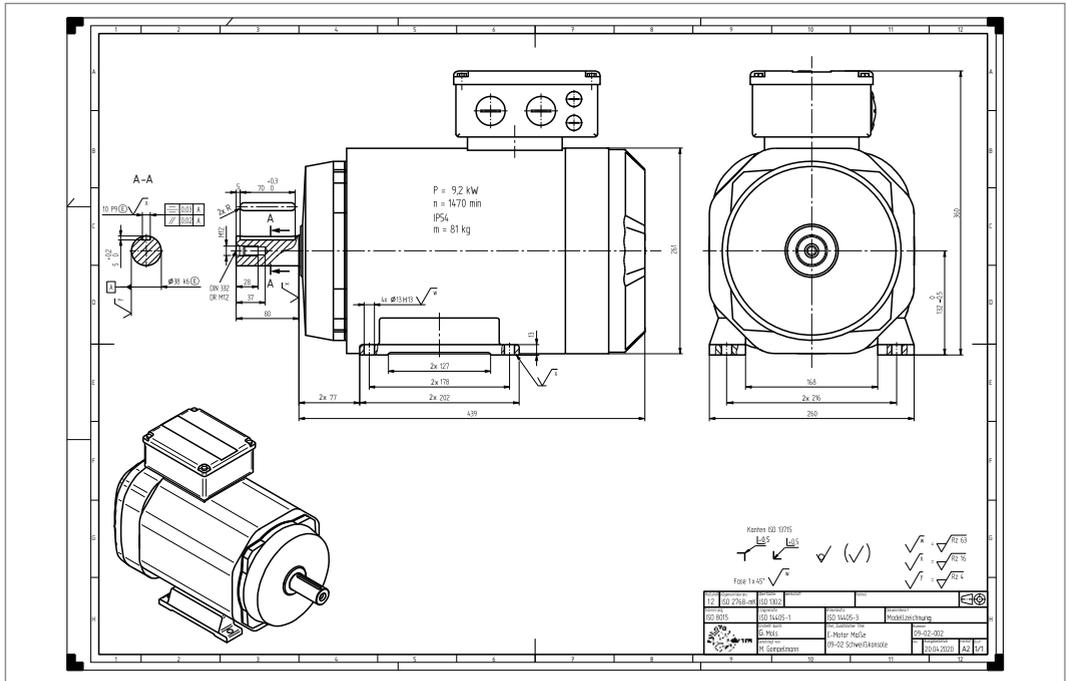


Bild 2: Maße des Elektromotors

Aufgabenstellung

- 2.1 Erstellen Sie zwei unterschiedliche Entwurfsskizzen der Schweißkonstruktion der Konsole.
- 2.2 Besprechen Sie die Entwurfsskizzen mit Ihrem Ausbilder, entscheiden Sie sich für eine Ausführung und legen Sie die Schweißnahtdicke in Absprache mit ihm fest.
- 2.3 Erstellen Sie für die geschweißte Konsole eine Schweißgruppenzeichnung mit Stückliste.
- 2.4 Erstellen Sie die Fertigungszeichnungen der Einzelteile.
- 2.5 Erstellen Sie eine Baugruppenzeichnung der Konsole und tragen Sie die Maße für die spanende Bearbeitung ein.

9.2 | FUNKTIONSANALYSE VON BAUTEILEN UND BAUGRUPPEN

Viele Produkte sind in ihrem Aufbau und ihrer Funktionsweise sehr komplex. Um eine Produktentwicklung sinnvoll zu beginnen, wird im ersten Schritt eine **Funktionsanalyse** erstellt.

9.2.1 | GESAMT- UND TEILFUNKTIONEN

Funktionen definieren den Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems. Die Funktionsanalyse ermöglicht eine Untersuchung und Beurteilung komplexer technischer Systeme. Zur Bildung der **Funktionsstruktur** wird die **Gesamtfunktion** in **Teilfunktionen** aufgegliedert. Die Teilfunktionen stehen im logischen Zusammenhang mit der Gesamtfunktion (**Bild 1**, am Beispiel eines Bürolochers). Die Funktionsstruktur ist vorläufig lösungsneutral.

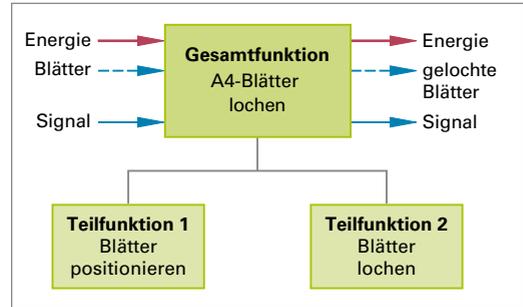


Bild 1: Gesamt- und Teilfunktionen am Beispiel eines Bürolochers

Eine umfassende konstruktive Aufgabenstellung wird durch die **Funktionsanalyse** in mehrere einfache Aufgaben unterteilt. Anschließend werden die Teilaufgaben nacheinander gelöst.

Das gleiche Prinzip kann bei einer vorhandenen Konstruktion einer größeren Baugruppe angewendet werden. Sie kann in Teilfunktionen untergliedert werden, um z. B. Teile zu modifizieren oder um Teile in anderen Aufgabenstellungen mit gleicher Teilfunktion wiederzuverwenden. So kann eine Kupplung in einer Antriebseinheit an veränderte Betriebsbedingungen angepasst werden. Oder eine vorhandene Kupplung wird für eine andere Antriebseinheit verwendet, weil die Betriebsbedingungen passen.

Bauteile und Baugruppen bestehender Konstruktionen lassen sich nach ihren Funktionen in **Teilfunktionen** unterteilen.

Nicht alle Bauteile einer Gesamtkonstruktion besitzen zwingend eine Teilfunktion, ihnen kann aber im Zusammenwirken mit anderen Bauteilen in einer Baugruppe eine entsprechende Funktion zugewiesen werden.

9.2.2 | TEIL- UND NEBENFUNKTIONEN

Teilfunktionen sind meist in **Nebenfunktionen** weiter unterteilbar. So entsteht ein hierarchisches Gefüge aus der Gesamtfunktion und den Teil- und Nebenfunktionen (**Bild 2**).

Teilfunktionen erfüllen unmittelbar die Gesamtfunktion. Bei einfachen Strukturen kann dies nur eine einzige Funktion sein, wie z. B. das Lochen der Blätter mit einem Bürolocher. Nebenfunktionen tragen nicht unmittelbar zur Gesamtfunktion bei, sondern unterstützen oder ergänzen die Ge-

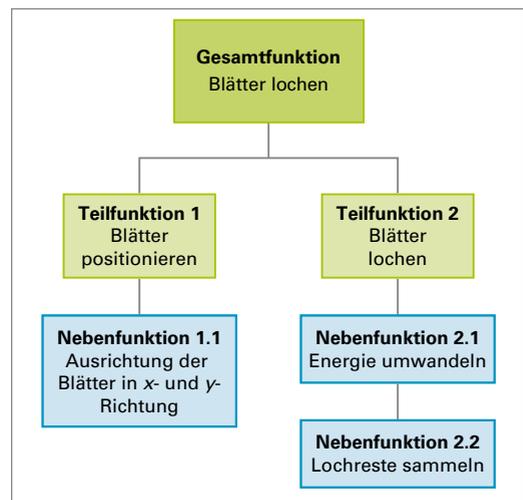


Bild 2: Teil- und Nebenfunktionen des Bürolochers

samtfunktion. Oft ergeben sie sich als Wunsch aus der Anforderungsliste, z. B. das Ausrichten der Blätter im Beispiel Bürolocher.

Teilfunktionen stehen in einem direkten Zusammenhang mit der Gesamtfunktion der Baugruppe. **Nebenfunktionen** unterstützen oder ergänzen die entsprechende Gesamtfunktion.

9.3 | WIRKPRINZIPIEN DER VERBINDUNGEN

Verbindungselemente dienen zur Herstellung von Konstruktionen und technischen Systemen aus einzelnen Elementen. Sie lassen sich gemäß ihren Wirkprinzipien systematisch unterteilen (**Bild 1**).

Unter dem Begriff **Wirkprinzip einer Verbindung** versteht man den Zusammenhang zwischen den Verbindungspartnern. Dies kann entweder der physikalische Zusammenhang, z. B. der **Kraftschluss** bei der Reibung, der stoffliche Zusammenhang, z. B. der **Stoffschluss** beim Schweißen, oder der geometrische Zusammenhang, z. B. der **Formschluss** bei einer Stiftverbindung, sein.

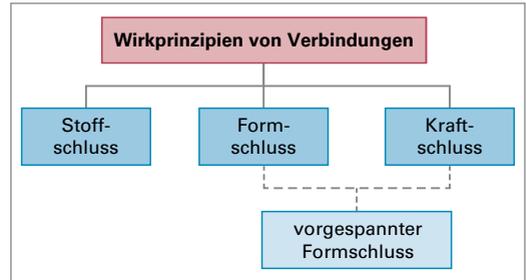


Bild 1: Wirkprinzipien von Verbindungen

Bei manchen Verbindungsarten sind zwei Wirkprinzipien gleichzeitig wirksam. Dies ist z. B. bei **Keilverbindungen** der Fall, hier wirken gleichzeitig **Formschluss** und **Kraftschluss**, weshalb sie auch als **vorgespannte Formschlussverbindung** bezeichnet werden. Da das hauptsächliche Wirkprinzip in diesem Fall der **Kraftschluss** ist, werden Keilverbindungen allgemein zu den kraftschlüssigen Verbindungen gezählt. Bei Welle-Nabe-Verbindungen wird die kombinierte Verbindungsart als vierte Unterteilung mit aufgegriffen.

Verbindungen lassen sich auch in lösbare und unlösbare Verbindungen unterteilen. So zählen z. B. Schraubverbindungen zu den lösbaren Verbindungen und geschweißte Bauteile zu den unlösbaren Verbindungen. Für die Betrachtung der Wirkungsweise von Verbindungen ist jedoch die Unterteilung nach den drei grundlegenden Wirkprinzipien sinnvoll.

Verbindungen werden entsprechend ihrer **grundlegenden Wirkprinzipien** eingeteilt in:

- kraftschlüssige Verbindungen
- formschlüssige Verbindungen
- stoffschlüssige Verbindungen

9.3.1 | KRAFTSCHLÜSSIGE VERBINDUNGEN

Bei **kraftschlüssigen Verbindungen** werden die zu verbindenden Teile an den Trennfugen oder Trennflächen durch Klemmen oder Pressen so zusammengeführt, dass kein Spiel zwischen den Bauteilen vorhanden ist. Die wirksame Reibung zwischen den Bauteilen überträgt die im Betrieb auftretenden Kräfte. Die Reibungskraft muss an den Wirkstellen stets größer sein als die größte im Betrieb auftretende Verschiebekraft, damit die Verbindung hält. Zu den kraftschlüssigen Verbindungen zählen Schrauben-, Kegel-, Klemm- und Pressverbindungen (**Bild 2**).

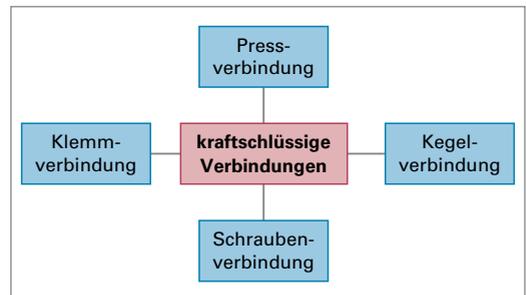


Bild 2: Kraftschlüssige Verbindungen

Am anschaulichsten ist das Prinzip einer kraftschlüssigen Verbindung bei der Schraubenverbindung. Eine Schraubenverbindung überträgt die Kräfte durch Kraftschluss. Dieser entsteht beim Zusammenpressen der Bauteiloberflächen durch das Anziehen von Schraube und Mutter oder beim Einziehen der Schraube in die Gewindebohrung eines Bauteils.

9.3.2 | FORMSCHLÜSSIGE VERBINDUNGEN

Bei **formschlüssigen Verbindungen** wird die Kraft durch Formschluss übertragen, d.h., die Verbindung wird durch die Form, z.B. Keilwellen, oder durch zusätzliche Mitnehmerelemente, z.B. Passfedern, bestimmt (Bild 1). Die Kraftübertragung erfolgt an den Wirkflächen durch Flächenpressung. An den Bauteilen tritt oft erhöhte Kerbwirkung auf. Als Zusatzfunktion ist die Realisierung von Relativbewegungen außerhalb der Belastungsrichtung möglich. Ein Beispiel für Relativbewegungen bei formschlüssigen Verbindungen sind Verschieberäder in Getrieben.

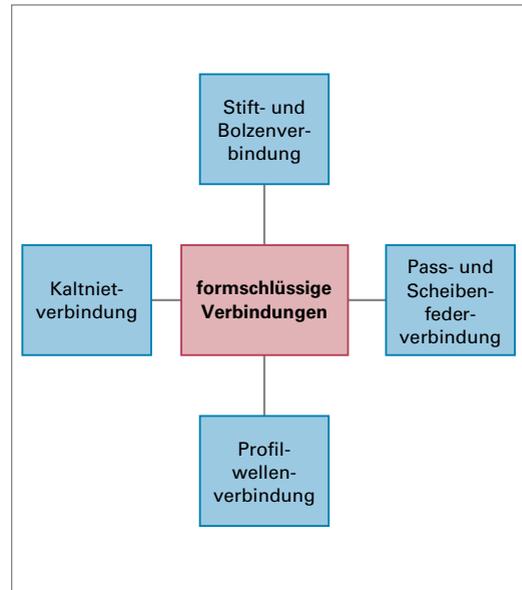


Bild 1: Formschlüssige Verbindungen

9.3.3 | STOFFSCHLÜSSIGE VERBINDUNGEN

Von **stoffschlüssigen Verbindungen** spricht man, wenn mit oder ohne Zuhilfenahme eines **Zusatzwerkstoffs** die Teile an den Stoßstellen zu einer unlösbaren Einheit vereinigt werden. Der Stoffschluss kann durch Kleben, Löten oder Schweißen hergestellt werden (Bild 2). Schweißen zählt mit zu den wichtigsten Fertigungsverfahren im Maschinen- und Apparatebau. Auch im Stahlbau hat das Schweißen den Einsatz von Nietverbindungen weitestgehend verdrängt.

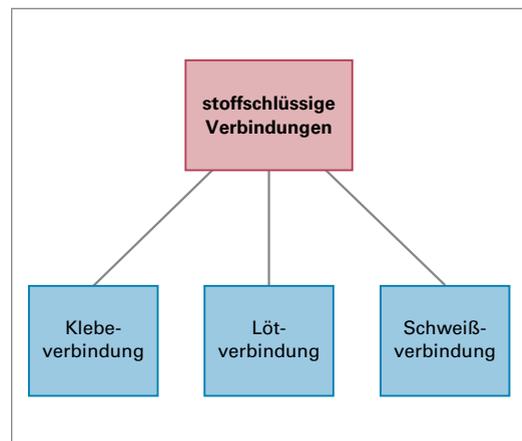


Bild 2: Stoffschlüssige Verbindungen

AUFGABEN | WIEDERHOLUNG UND VERTIEFUNG

1. Erläutern Sie, was man unter einer Funktionsanalyse versteht.
2. Erläutern Sie, wie die Funktionalität einer Baugruppe unterteilt wird.
3. Erläutern Sie den Unterschied zwischen Teilfunktionen und Nebenfunktionen.
4. Erstellen Sie das Funktionsschema einer Kaffeemaschine.
5. Nennen Sie die drei Wirkprinzipien von Verbindungen und erklären Sie das jeweilige Wirkprinzip anhand von Beispielen aus Ihrem Ausbildungsunternehmen.

9.4 | SCHRAUBENVERBINDUNGEN

Schraubenverbindungen sind die am häufigsten verwendeten kraftschlüssigen Verbindungen. Sie lassen sich ohne Zerstörung lösen und erneut montieren. Daher zählen sie zu den **lösbaaren Verbindungen**. Zusätzlich zur Befestigung dienen Schrauben zum Einstellen, Messen oder Spannen. Entsprechend der bestehenden Normung wird eine große Vielfalt an Formen und Arten von Schrauben angeboten. Kein anderes Verbindungselement ist so zahlreich in der Normung vertreten wie die Schraube mit ihren zugehörigen Elementen (Muttern, Scheiben usw.).

Schrauben werden hinsichtlich ihrer Kopfform, ihres Gewindeprofils, ihres Gewindeendes oder des Schraubenantriebs unterteilt. Weitere Merkmale wie der Drehsinn (rechts- oder linkssteigend) bzw. die Gewindegänge (ein-, zwei- oder mehrgängig) werden ebenfalls zur Kennzeichnung verwendet. **Bild 1** zeigt gängige Kopfformen von Schrauben.

Schrauben für den Innenbereich sind unbehandelt oder phosphatiert. Im Außenbereich werden galvanisch verzinkte oder vernickelte Schrauben verwendet. Rostfreie Edelstahlschrauben kommen in einer chemisch aggressiven Umgebung oder in Bereichen mit einer hohen Luftfeuchtigkeit zum Einsatz. Schrauben aus CuZn-Legierungen und CuSn-Legierungen finden z.B. im Sanitärbereich oder in der Bauklempnerei Verwendung. Werden Schrauben und Bauteile aus artgleichen Werkstoffen verwendet, wird der Korrosion vorgebeugt.

Schraubenverbindungen werden nach ihrer Befestigungsart in Durchsteckschraube, Einziehschraube und Stiftschraube unterteilt (**Bild 2**).

Allen Befestigungsarten gemeinsam ist, dass mehrere Bauteile, z. B. Platten, über die Schraubenverbindung miteinander verspannt werden. Hierdurch wird eine Relativbewegung der Bauteile an den Trennfugen verhindert. Als **Trennfuge** bezeichnet man die Kontaktflächen zweier sich berührender Bauteile (**Bild 2**).

Neben dem klassischen Maschinenbau gibt es weitere Bereiche, in denen spezielle Schrauben verwendet werden. So gibt es z.B. Schnellbauschrauben zur Befestigung von Gipskarton oder von Bauteilen aus Kunststoff, Holz und Aluminium oder auch Allzweckschrauben für den Holzbau. Einschlägige Kataloge der jeweiligen Hersteller geben hier umfassende Informationen.



Bild 1: Kopfformen von Schrauben

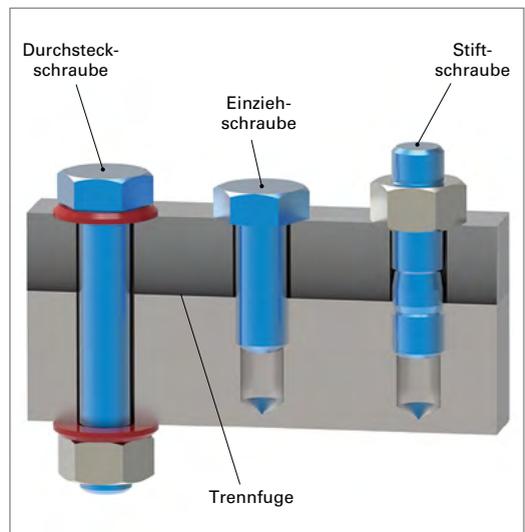


Bild 2: Befestigungsarten von Schraubenverbindungen

- **Schraubenverbindungen** zählen zu den **kraftschlüssigen** und **lösbaaren Verbindungen**.
- Schrauben werden hauptsächlich nach ihrer **Kopfform** unterteilt.
- Schraubenverbindungen werden nach ihrer **Befestigungsart** unterteilt in:
 - Durchsteckschraube
 - Einziehschraube
 - Stiftschraube

9.4.1 | REIBUNG AM GEWINDE

Sobald Bauteile durch Schrauben und Muttern mit einem Anziehdrehmoment M_A angezogen werden, entsteht Reibung.

Bild 1 zeigt die Reibung zwischen der anzuziehenden Mutter und dem Bauteil. Zusätzlich zeigt es die Reibung im Gewinde, die entsteht, wenn sich die Gewindeflanken vom Außengewinde der Schraube und vom Innengewinde der Mutter gegeneinanderpressen. Dieser Reibwiderstand muss beim Anziehen überwunden werden.

Um die nachfolgenden Betrachtungen zu vereinfachen, wird zunächst von einem Flachgewinde ausgegangen, sodass der Flankenwinkel keinen Einfluss hat (**Bild 2a**). Außerdem ist nur ein kleiner Teil der Mutter abgebildet, um die Kräfte darstellen zu können, die auf die Gewindeflanke wirken. Unter Vernachlässigung der Reibung erzeugt das Anziehdrehmoment M_A an der Mutter eine **tangentiale Umfangskraft** F_u und in der Schraube eine Kraft F_a in axialer Richtung. Bei einer Befestigungsschraube entspricht die **Schraubenlängskraft** F_a der **Vorspannkraft** F_V .

Stellt man sich nun einen Gewindegang am Flankendurchmesser abgewickelt vor, ergibt sich aus dem Umfang U und der Steigung P eine schiefe Ebene mit dem **Steigungswinkel** φ (**Bild 2b**). Die resultierende Kraft F_{Res} , die sich aus F_u und F_a ergibt, entspricht der **Normalkraft** F_N und steht senkrecht auf der Gewindeflanke.

In **Bild 3a** wird die Reibung an den Gewindeflanken mitberücksichtigt, wenn die Mutter nach unten gedreht wird.

Bild 3b zeigt, dass die **Reibungskraft** F_R entgegen der Drehrichtung der Mutter wirkt und sich durch Multiplikation der **Reibungszahl** μ mit der Normalkraft F_N berechnen lässt.

Da die Kräfte im Gleichgewicht sein müssen, kann die resultierende Kraft F_{Res} aus der Normalkraft F_N und der Reibungskraft F_R ermittelt werden oder alternativ aus der Umfangskraft F_u und der Schraubenlängskraft F_a .

Werden diese Zusammenhänge auf das Spitzgewinde übertragen, verändert sich der **Reibungswinkel** ρ .

Bei metrischen Gewinden mit einem Flankenwinkel von 60° entsteht bei gleicher Schraubenlängskraft F_a eine größere Reibungskraft F_R als beim hier dargestellten Flachgewinde. Somit ist ein metrisches Gewinde selbsthemmend. Es wird vorwiegend als Befestigungsgewinde verwendet.

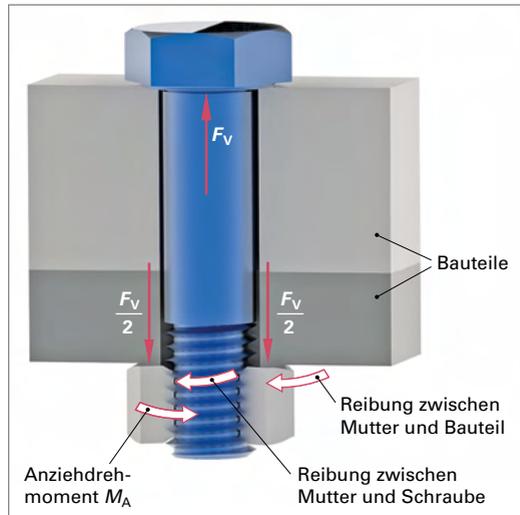


Bild 1: Reibung am Gewinde

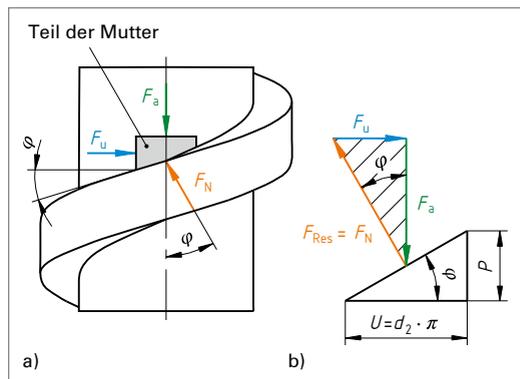


Bild 2: Kräfte an den Gewindeflanken ohne Reibung (Mutter bewegt sich nach oben)

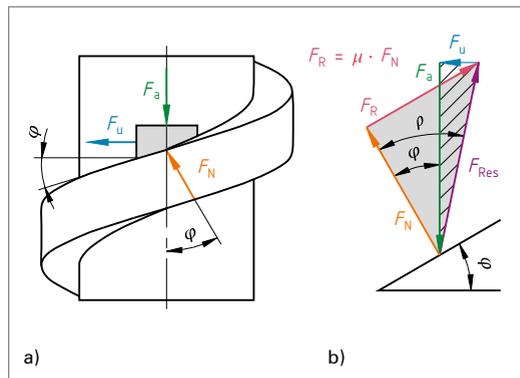


Bild 3: Kräfte an den Gewindeflanken mit Reibung (Mutter bewegt sich nach unten)

9.4.2 | ANZIEHEN EINER SCHRAUBENVERBINDUNG

Beim Anziehen von Schrauben oder Muttern mit einem Anziehdrehmoment M_A wird der Schraubenschaft durch eine axiale Längskraft auf Zug beansprucht. Man nennt diese Kraft **Vorspannkraft** F_V . Die entstehende Vorspannkraft F_V hängt vom Steigungswinkel φ und damit von der Steigung P ab (**Bild 1**). Durch den Einfluss der Vorspannkraft längt sich die Schraube im elastischen Bereich (ΔL).

Auf die Bauteile wirkt die entgegengesetzt gerichtete Reaktionskraft der Vorspannkraft, die **Stauchkraft** F_S . Sie drückt die Bauteile aufeinander, staucht sie dabei (Δs) und verspannt sie so gegeneinander.

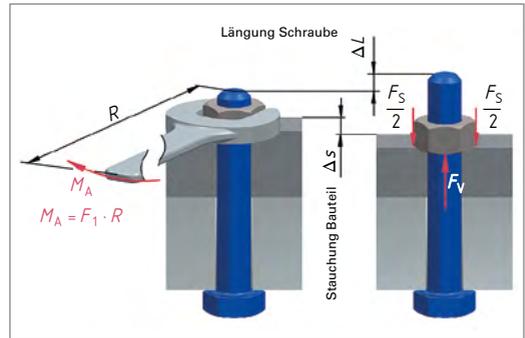


Bild 1: Anziehen der Schraubenverbindung

Die Schraube wird nicht nur auf Zug, sondern auch auf Verdrehung beansprucht. Das bedeutet, dass mit zunehmender Reibung die zur Verfügung stehende Vorspannkraft F_V immer kleiner wird. Dem Anziehdrehmoment M_A wirkt das Reibmoment entgegen. Das Reibmoment setzt sich aus der Reibung an den Gewindeflanken und der Reibung unter der Kopf- bzw. Mutteraufnahme zusammen. Diese Reibungsverluste mindern die Vorspannkraft erheblich, sie können bis zu 90% betragen und werden durch den **Wirkungsgrad** η berücksichtigt.

Nach dem Energieerhaltungssatz geht in einem geschlossenen System keine Energie verloren. Die aufgewendete und die abgegebene Arbeit (Energie) sind somit gleich. Auf dieser Grundlage lassen sich die Verhältnisse beim Anzug einer Schraubenverbindung berechnen.

Die aufgewendete Arbeit resultiert aus der Anzugskraft F_1 und dem zurückgelegten Weg s , der in diesem Fall eine Kreisbahn ($s = 2 \cdot \pi \cdot R$) mit dem Radius R als Hebelarm ist. Die abgegebene Arbeit ergibt sich aus der Vorspannkraft F_V und der Steigung P des Gewindes, vermindert durch den Wirkungsgrad η , der die Reibung berücksichtigt.

$$F_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \eta = F_V \cdot P$$

F_1	R	F_V	P	π	η
N	mm	N	mm	1	1

Da sich das Anziehdrehmoment M_A aus dem Produkt der Anzugskraft F_1 und dem wirksamen Hebelarm R berechnet, kann die Formel auch über das Anziehdrehmoment M_A ausgedrückt werden.

$$M_A \cdot 2 \cdot \pi \cdot \eta = F_V \cdot P$$

M_A	F_V	P	π	η
Nmm	N	mm	1	1

BEISPIEL 9.1 | Berechnung der Schraubenvorspannkraft

Wie groß ist die Vorspannkraft F_V , wenn eine Schraube M10 mit einem Drehmoment von $M_A = 48 \text{ Nm}$ angezogen wird und ein Wirkungsgrad von $\eta = 0,12$ vorliegt?

Lösung:

$$\text{M10: } P = 1,5 \text{ mm} \quad F_V = \frac{M_A \cdot 2 \cdot \pi \cdot \eta}{P} = \frac{48000 \text{ Nmm} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,12}{1,5 \text{ mm}} = 24127 \text{ N}$$

9.4.3 | BERECHNUNGEN VON SCHRAUBENVERBINDUNGEN

Schrauben sind mit ihrer Festigkeitsklasse gekennzeichnet. Die Zahl auf einem Schraubenkopf kennzeichnet die Zugfestigkeit R_m und die Streckgrenze R_e bzw. die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ des Schraubenwerkstoffes. Unterhalb der Festigkeitsklasse 8.8 rechnet man mit der Streckgrenze R_e , ab der Festigkeitsklasse 8.8 mit der 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$. Eine Schraube der Festigkeitsklasse 8.8 hat eine Zugfestigkeit von $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$ (erste Zahl $\cdot 100$) und eine 0,2%-Dehngrenze von $R_{p0,2} = 640 \text{ N/mm}^2$ (erste Zahl \cdot zweite Zahl $\cdot 10$).

Schrauben mit Betriebskraft F_B in Achsrichtung

Durch das **Anziedrehmoment** $M_A = F_1 \cdot R$ wird der **Spannungsquerschnitt** S der Schraube mit der Vorspannung σ_V auf Zug beansprucht. Zwischen der Schraubenkopfauflage und dem Bauteil entsteht eine Flächenpressung p_V . Im Betriebszustand erhöhen sich diese Belastungen durch die wirkende Betriebskraft F_B (**Bild 1**).

In der Montage werden die **Schrauben einfacher Verbindungen** oft von Hand angezogen. Damit können die Werte für die Flächenpressung, die Vorspannkraft und die Vorspannung nicht ermittelt werden. Es liegen jedoch Erfahrungswerte zur Vorspannung σ_V für das Anziehen von Hand vor (**Tabelle 1**).

Die Berechnung des erforderlichen Gewinde-Nenndurchmessers erfolgt mithilfe der wirkenden Betriebskraft F_B , des Spannungsquerschnitts S und der Streckgrenze R_e . Wegen der überschläglichen Berechnung der Schraubengesamtkraft wird als Sicherheit $\nu = 2,5$ gewählt.

Erforderlicher Spannungsquerschnitt

$$S = \frac{F_B}{\sigma_{zul}} \quad \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \sigma_{zul} & F_B & S & \\ \hline \text{N/mm}^2 & \text{N} & \text{mm}^2 & \\ \hline \end{array}$$

Zulässige Spannung

$$\sigma_{zul} = \frac{R_{emin}}{\nu} \quad \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \sigma_{zul} & R_{emin} & \nu & \\ \hline \text{N/mm}^2 & \text{N/mm}^2 & 1 & \\ \hline \end{array}$$

Erforderliche Mindest-Streckgrenze R_{emin}

$$R_{emin} = 1,5 \cdot \sigma_V \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline R_{emin} & \sigma_V & \\ \hline \text{N/mm}^2 & \text{N/mm}^2 & \\ \hline \end{array}$$

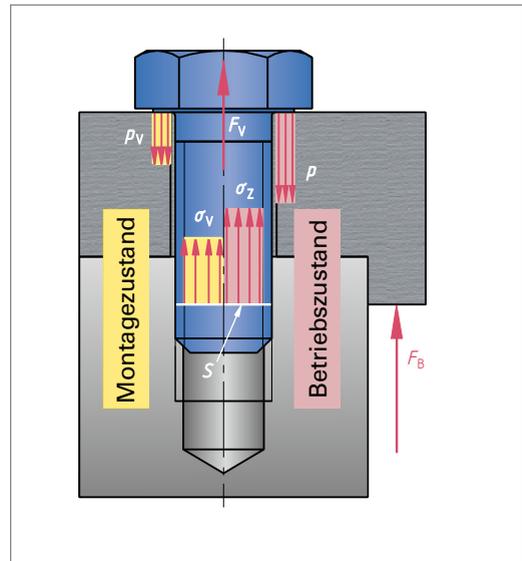


Bild 1: Schraubenverbindung mit Betriebskraft F_B in Achsrichtung

Tabelle 1: Vorspannung σ_V

Gewinde-Nenndurchmesser	Vorspannung σ_V in N/mm^2
M4 ... M6	350
M8 ... M12	280
M16 ... M20	180

Die **Berechnung des erforderlichen Schrauben-Gewinde-Nenndurchmessers d** bei einfachen Verbindungen, die von Hand angezogen werden, erfolgt durch:

- Ermittlung der Streckgrenze R_e aus der Festigkeitsklasse der Schrauben
- Berechnung der zulässigen Spannung aus der Streckgrenze R_e und der Sicherheit ν ($\nu \geq 2,5$)
- Berechnung des erforderlichen Spannungsquerschnitts S
- Bestimmung des Gewinde-Nenndurchmessers d

Für **hochbeanspruchte Schrauben** ist es erforderlich, dass die Verbindungen drehmomentengesteuert montiert werden. Daher sind in VDI 2230 (**s. Tabellenbuch**) die maximalen Vorspannkkräfte und Anziehdrehmomente für Schrauben ab Festigkeitsklasse 8.8 angegeben. Sie stellen Anhaltswerte dar und ersetzen nicht die genaue Berechnung.

Schrauben mit Betriebskraft F_B quer zur Achsrichtung

Schrauben, die quer zur Achsrichtung beansprucht werden, z. B. durch ein Drehmoment, übertragen die Betriebskraft über Kraftschluss. Die Bauteile sollen sich nicht relativ zueinander bewegen, daher dürfen die in den Trennfugen wirksamen Querkkräfte nicht größer als die wirksamen Reibkräfte werden (**Bild 1**).

Aus dem Drehmoment M_t berechnet sich die **Schraubenbetriebskraft F_B** , aufgeteilt auf die Anzahl z der Schrauben auf dem Teilkreisdurchmesser D und die Anzahl der Trennfugen n :

$F_B = \frac{2 \cdot M_t}{n \cdot z \cdot D}$	F_B	M_t	D	n	z
	N	Nmm	mm	1	1

Die **erforderliche Vorspannkraft F_{Verf}** berechnet sich aus der Schraubenbetriebskraft F_B , der Reibungszahl μ und dem Rutschsicherheitswert φ . Die erforderliche Vorspannkraft muss kleiner sein als die zulässige Vorspannkraft F_{Vzul} (**s. Tabellenbuch**). Die Schrauben werden dann nur auf Zug beansprucht.

$F_{Verf} = \frac{F_B \cdot \varphi}{\mu} \leq F_{Vzul}$	F_V	F_B	μ	φ	F_{Vzul}
	N	N	1	1	N

Verspannungsschaubild einer Schraube

Das **Verspannungsschaubild (Bild 2)** dient zur bildlichen Darstellung der Kraft- und Längenverhältnisse bei Schraubenverbindungen. Auf der x-Achse wird die Längenänderung f der Schraube und der Bauteile, die durch die Schraube zusammengedrückt werden, abgetragen, auf der y-Achse die Kraft F .

Beim Festdrehen der Schraube werden die Bauteile um den Betrag f_T zusammengedrückt. Die Schraube wird um den Betrag f_S verlängert (**Bild 2**). Durch die Verlängerung (Längung bzw. Streckung) der Schraube entsteht die **Vorspannkraft F_V** . Die **Klemmkraft F_{Kl}** der Teile entsteht durch das Zusammendrücken der Teile. Im montierten Zustand, ohne Einfluss einer Betriebskraft, ist die Vorspannkraft F_V gleich der Klemmkraft F_{Kl} :

$$F_V = F_{Kl}$$

Unter dem Einfluss einer Betriebskraft F_B wird die Schraube zusätzlich verlängert und die Stauchung der verspannten Teile wird verringert. Da die Elastizität der Bauteile und der Schraube unterschiedlich ist, ergeben sich unterschiedliche Anteile für

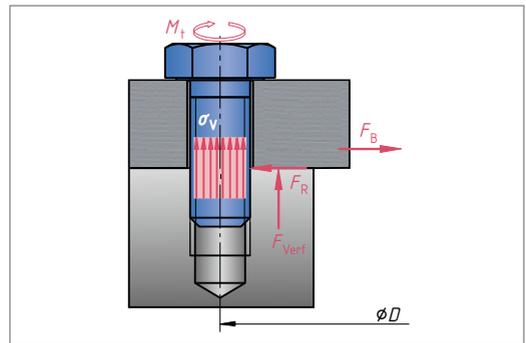


Bild 1: Betriebskraft quer zur Achsrichtung

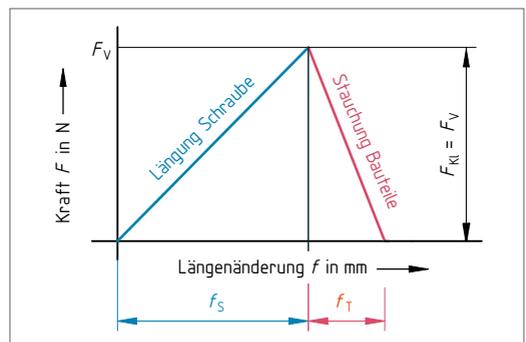


Bild 2: Verspannungsschaubild ohne Betriebskraft