

Durchmesser-Dimensionierung von Wellen

Nach Ermittlung des erforderlichen Durchmessers sind die Konstruktionsfaktoren zu bestimmen und mit der Abschätzung zu vergleichen.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{\frac{\pi}{32} \cdot d^3} \quad \Rightarrow \quad d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_b}{\pi \cdot \sigma_b}}$$

$$d_{\text{erf}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_v}{\pi \cdot \sigma_b \cdot d_{\text{zul}}}}$$

Das Biegemoment M_b wird an dieser Stelle durch das angreifende Vergleichsmoment M_v ersetzt. Die Biegespannung σ_b wird mit der zulässigen Spannung $\sigma_{b,zul}$ ersetzt. Zur Ermittlung des erforderlichen Wellenquerschnittes bei überlagerter Belastung gilt:

$$\sigma_{b,zul} = \frac{310 \text{ mm}^2}{4} = 77,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Man erhält für den erforderlichen Querschnitt:

$$d_{\text{erf}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_v}{\pi \cdot \sigma_{b,zul}}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 118850 \text{ Nmm}}{\pi \cdot 77,5 \text{ mm}^2}} = 24,99 \text{ mm}$$

Bei einer Passfedernuttiefe von $d = 4 \text{ mm}$ wird ein Nenndurchmesser von $d = 29 \text{ mm}$ gewählt.

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_D}{S_D}$$

Wiederholung und Vertiefung

- Weiche Bedeutung fällt den Maschinenelementen bei einer Konstruktion zu?
- Worin unterscheiden sich Achsen und Wellen?
- Wie ist die Beanspruchung von Wellen und wie von den Achsen?
- Nennen Sie unterschiedliche Wellenarten.
- Welche Eigenschaften werden bei Hauptspindeln gefordert?
- Wie erreicht man bei Vorschubspindeln eine hohe Steifigkeit?
- Wodurch sind Kurkurbelwellen gekennzeichnet?
- Welche Lagerstellen hat eine Kurbelwelle?
- Wofür benötigt man beispielweise eine Exzenterwelle?
- Was kennzeichnet „gebaute“ Nockenwellen?
- Welche Arten von Zapfen gibt es?
- In welchen Anwendungen sind beispielsweise Hohlwellen notwendig?
- Wie ist grundsätzlich die Formgebung von biegebelasteten Wellen?
- An welchen Stellen haben Wellen Freistütze und weshalb bringt man solche an?
- Nennen Sie Beispiele für Freisticharten.
- Welchem Zweck dienen Einstiche in Wellen?
- Weshalb benötigt man Zentrierbohrungen?

3.3 Naben und Verbindungen zu Wellen

3.3.1 Die Nabe

Die Nabe ist der zentrische Teil eines Rades, welcher die Welle oder Achse umschließt. Im einfachsten Fall ist die Nabe lediglich die Radmitte mit einer zentralen Bohrung, z. B. bei einem scheibenförmigen Zahnräder (Bild 1).

Im Falle einer Fahrradnabe (Bild 2) ist die Nabe bereits ein recht komplexes Gebilde, mit der Aufgabe den Radreifen über Speichen drehbar auf einer Achse zu halten. In diesem Fall muss die Nabe nicht nur radiale Achskräfte aufnehmen, sondern ist auch vielfältigen Biegemomenten ausgesetzt.

Ferner gibt es etliche Zusatzfunktionen, z. B. die konstruktive Einbeziehung eines Getriebes zur Drehmomentübertragung mit schaltbaren Übersetzungsverhältnissen, mit der Funktion „Freilauf“ und mit der Aufgabe auch Bremsmomente beherrschend zu können.

Für die Gestaltung der Naben ist die Form des Nabenumfusses von Bedeutung. Zur Verminderung der Flächenpressung auf die Achse bzw. Welle wird der Nabenumfang, auch wenn nur radiale Belastungen vorkommen, häufig breiter ausgeführt als die Radscheibe dick ist (Bild 3a).

Eine lokal sprunghaft erhöhte Flächenpressung auf einer Welle oder Achse kommt einer Kerbwirkung gleich und bringt die Gefahr eines Dauerbruchs. So ist es zweckmäßig den Nabenumfang zur Welle hin abzuschrägen, also aus axialer Sicht mit sanftem Übergang, als einen torusähnlichen Ring zu gestalten (Bild 3b).

Sind über das gelagerte Rad erhebliche axiale Lasten, insbesondere Wechsellasten und Stoßlasten, aufzunehmen, wie z. B. bei Fahrzeugen, dann ist der Radnabe besondere Aufmerksamkeit in der Dimensionierung und Werkstoffwahl zu schenken. Die Radnabe geht bei Kraftfahrzeugen in einen Flansch mit Zentrierrand über (Bild 4). An diesem Nabeflansch wird das Rad zentriert und verschraubt. So bleibt bei einem Radwechsel die Nabe auf der Welle.

¹ Nabe von indogermanisch *nabha* = Nebel, Mittelteil des Rades

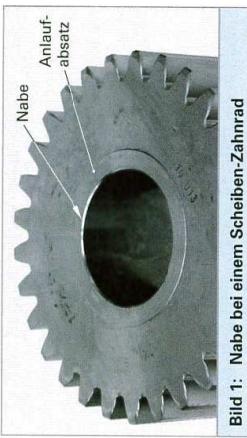


Bild 1: Nabe bei einem Scheiben-Zahnräder

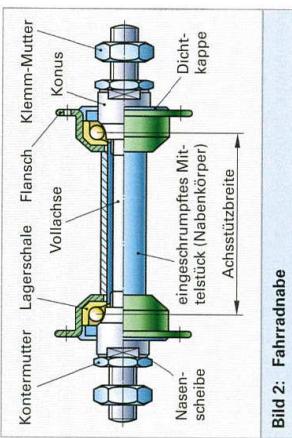


Bild 2: Fahrradnabe

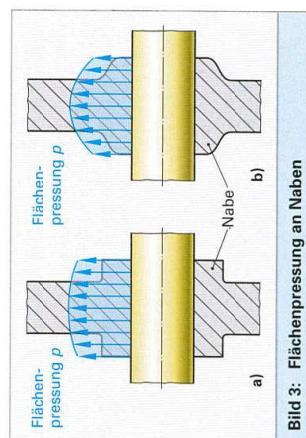


Bild 3: Flächenpressung an Naben

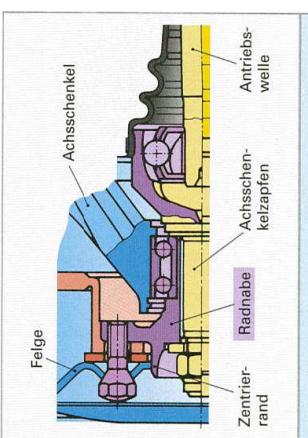


Bild 4: Radnabe bei einem Pkw

3.3.2 Welle-Nabe-Verbindungen (WNV)

In den meisten Fällen werden Räder und Wellen separat gefertigt und somit besteht die Aufgabe Wellen mit Naben zu verbinden (**Bild 1**). Nur in seltenen Fällen werden z. B. Zahnräder mit zugehöriger Welle aus einem Rohling gefertigt (**Bild 2**). Der Vorteil ist, dass eine innige Montage gegeben ist und dass keine Montage anfällt. Von Nachteil ist, dass der Materialverbrauch hoch ist, der Einbau in ein Getriebe schwierig ist und dass Einschränkungen bei der Werkstoffwahl vorliegen.

Die Wirkungsweise der WNV wird unterschieden nach **kraftschlüssiger Verbindung**, nach **formschlüssiger Verbindung** und nach **stanschlüssiger Verbindung** (**Bild 3**). Formschlüssige Verbindungen und auch die meisten kraftschlüssigen Verbindungen sind lösbar. Verbindungen mit der Möglichkeit einer Wiederverwendung der Nabe bzw. der Welle.

Bei kraftschlüssiger Verbindung sind es Reibkräfte, z. B. bei einer Pressverbindung, welche die Nabe auf der Welle fixiert halten. Bei formschlüssigen Formelementen, z. B. Zahntanzen ineinander. Stoffschlüssige Verbindungen erhält man durch eine stoßliche Verbindung, z. B. durch ein Verlöten von Nabe und Welle.

Die Arten der WNV unterscheiden sich wesentlich hinsichtlich des Fertigungsaufwandes, des Montage- und Demontageaufwandes und vor allem hinsichtlich des sichereren Übertragens von Stoßbelastungen.

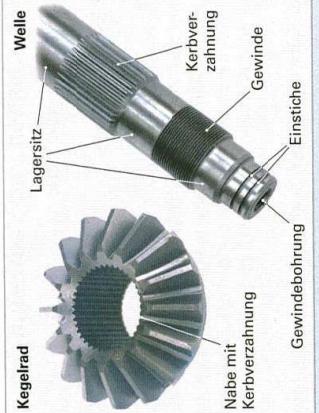


Bild 1: Welle und Rad als zwei Bauteile



Bild 2: Welle und Rad als ein Bauteil



Bild 3: Welle-Nabe-Verbindungen

3.3.2.1 Kraftschlüssige WNV

Die Drehzahl- bzw. Drehmomentübertragung erfolgt hierbei durch die Reibkräfte aufeinandergepresster Flächen.

Klemmverbindung. Klemmverbindungen gehören zu den einfachsten WNV. Grundlagen für Klemmverbindungen sind entweder geteilte oder geschlitzte Naben. Die Klemmkräfte werden mithilfe von Schrauben erzeugt oder durch Eintreiben eines Keils (**Bild 1**). Klemmverbindungen dieser Art sind meist nicht selbstzentrierend und neigen zu Unwucht. Der Vorteil liegt in ihrer Einfachheit und der leichten Lösbartigkeit.

Die konische Schafatklemmung (**Bild 2**) ist selbstzentrierend ebenso die Klemmverbindung mit konischen Spannzangen (**Bild 3**). Letztere ermöglichen eine leicht lösbare und ausgezeichnet zentrierte Verbindung, so dass diese Technik z. B. zum Aufnehmen von Werkzeugen bis zu höchsten Drehzahlen ($> 50\,000\text{ min}^{-1}$) genutzt wird.

Der Reibungsschluss ist bei Klemmverbindungen hinreichend, wenn die Reibungskraft bzw. Haftkraft F_H der Umfangskraft F_u und bei Axiallasten der Axialkraft F_a widersteht (**Bild 4**). Geht man von einer eng anliegenden Nabe (unter Vernachlässigung des Nabenteilungsschlitzes), so erhält man die Haftkraft:

$$\begin{aligned} F_H &= \mu \cdot F_N \\ &= \mu \cdot p \cdot A \\ &= \mu \cdot p \cdot \pi \cdot D \cdot l \end{aligned}$$

Bild 4: Flächenpressung

Die Haftkraft muss größer als die Umfangskraft sein, die einerseits aus dem Widerstand des Radus resultiert und zugleich um Beschleunigungs- und Stöksmomente vergrößert ist. Das übertragbare Drehmoment bzw. Torsionsmoment ist somit:

$$M_t = F_u \cdot \frac{D}{2} < F_H \cdot \frac{D}{2}$$

Die notwendige Anpresskraft bzw. Flächenpressung liefern die vorgespannten Schrauben.

Klemmverbindungen mit konischen Spannzangen haben hervorragende Rundlaufeigenschaften.

3.3 Naben und Verbindungen zu Wellen

Die Drehzahl- bzw. Drehmomentübertragung erfolgt hierbei durch die Reibkräfte aufeinandergepresster Flächen.

Klemmverbindung mit geschlitzter Nabe (**Bild 1**). Nur in seltenen Fällen werden z. B. Zahnräder mit zugehöriger Welle aus einem Rohling gefertigt (**Bild 2**). Der Vorteil ist, dass eine innige Montage gegeben ist und dass keine Montage anfällt. Von Nachteil ist, dass der Materialverbrauch hoch ist, der Einbau in ein Getriebe schwierig ist und dass Einschränkungen bei der Werkstoffwahl vorliegen.

Die Wirkungsweise der WNV wird unterschieden nach **kraftschlüssiger Verbindung**, nach **formschlüssiger Verbindung** und nach **stanschlüssiger Verbindung** (**Bild 3**). Formschlüssige Verbindungen und auch die meisten kraftschlüssigen Verbindungen sind lösbar. Verbindungen mit der Möglichkeit einer Wiederverwendung der Nabe bzw. der Welle.

Bei kraftschlüssiger Verbindung sind es Reibkräfte, z. B. bei einer Pressverbindung, welche die Nabe auf der Welle fixiert halten. Bei formschlüssigen Formelementen, z. B. Zahntanzen ineinander. Stoffschlüssige Verbindungen erhält man durch eine stoßliche Verbindung, z. B. durch ein Verlöten von Nabe und Welle.

Die Arten der WNV unterscheiden sich wesentlich hinsichtlich des Fertigungsaufwandes, des Montage- und Demontageaufwandes und vor allem hinsichtlich des sichereren Übertragens von Stoßbelastungen.

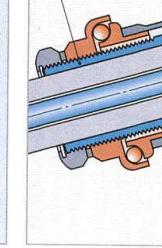
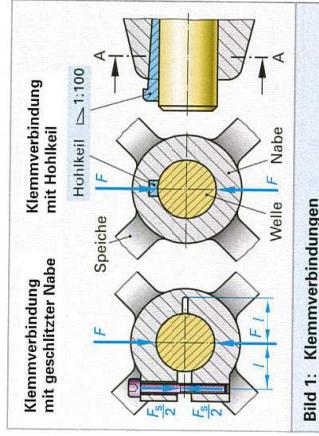


Bild 1: Klemmverbindungen

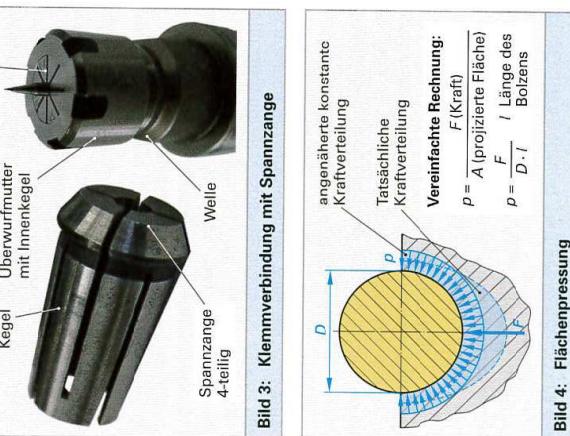
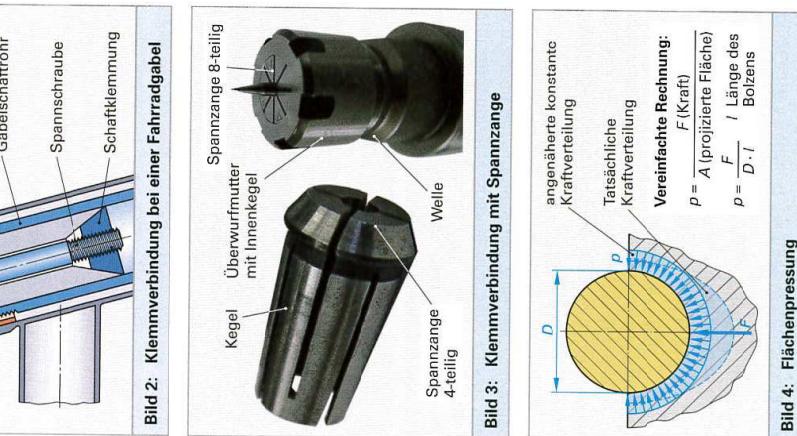


Bild 2: Klemmverbindungen mit Spannzange

3.3 Naben und Verbindungen zu Wellen

Die Drehzahl- bzw. Drehmomentübertragung erfolgt hierbei durch die Reibkräfte aufeinandergepresster Flächen.

Klemmverbindung mit geschlitzter Nabe (**Bild 1**). Nur in seltenen Fällen werden z. B. Zahnräder mit zugehöriger Welle aus einem Rohling gefertigt (**Bild 2**). Der Vorteil ist, dass eine innige Montage gegeben ist und dass keine Montage anfällt. Von Nachteil ist, dass der Materialverbrauch hoch ist, der Einbau in ein Getriebe schwierig ist und dass Einschränkungen bei der Werkstoffwahl vorliegen.

Die Wirkungsweise der WNV wird unterschieden nach **kraftschlüssiger Verbindung**, nach **formschlüssiger Verbindung** und nach **stanschlüssiger Verbindung** (**Bild 3**). Formschlüssige Verbindungen und auch die meisten kraftschlüssigen Verbindungen sind lösbar. Verbindungen mit der Möglichkeit einer Wiederverwendung der Nabe bzw. der Welle.

Bei kraftschlüssiger Verbindung sind es Reibkräfte, z. B. bei einer Pressverbindung, welche die Nabe auf der Welle fixiert halten. Bei formschlüssigen Formelementen, z. B. Zahntanzen ineinander. Stoffschlüssige Verbindungen erhält man durch eine stoßliche Verbindung, z. B. durch ein Verlöten von Nabe und Welle.

Die Arten der WNV unterscheiden sich wesentlich hinsichtlich des Fertigungsaufwandes, des Montage- und Demontageaufwandes und vor allem hinsichtlich des sichereren Übertragens von Stoßbelastungen.

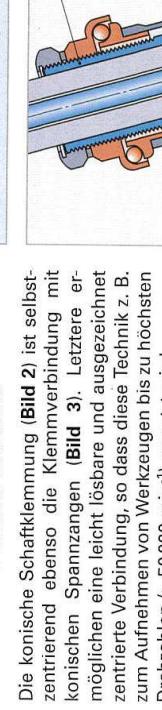
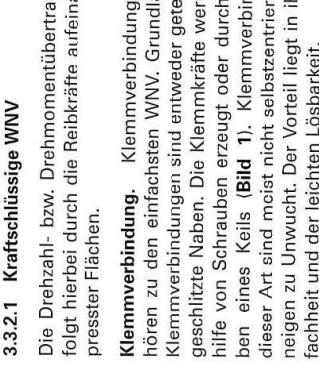


Bild 1: Klemmverbindungen

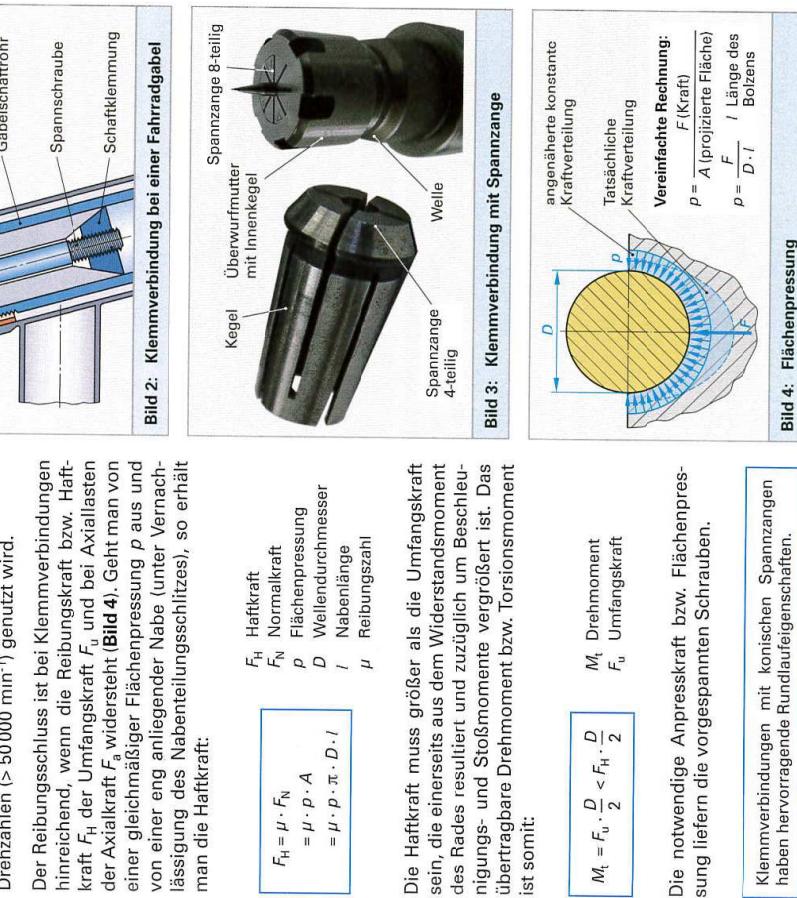


Bild 2: Klemmverbindungen mit geschlitzter Nabe

3.3 Naben und Verbindungen zu Wellen

Die Drehzahl- bzw. Drehmomentübertragung erfolgt hierbei durch die Reibkräfte aufeinandergepresster Flächen.

Klemmverbindung mit geschlitzter Nabe (**Bild 1**). Nur in seltenen Fällen werden z. B. Zahnräder mit zugehöriger Welle aus einem Rohling gefertigt (**Bild 2**). Der Vorteil ist, dass eine innige Montage gegeben ist und dass keine Montage anfällt. Von Nachteil ist, dass der Materialverbrauch hoch ist, der Einbau in ein Getriebe schwierig ist und dass Einschränkungen bei der Werkstoffwahl vorliegen.

Die Wirkungsweise der WNV wird unterschieden nach **kraftschlüssiger Verbindung**, nach **formschlüssiger Verbindung** und nach **stanschlüssiger Verbindung** (**Bild 3**). Formschlüssige Verbindungen und auch die meisten kraftschlüssigen Verbindungen sind lösbar. Verbindungen mit der Möglichkeit einer Wiederverwendung der Nabe bzw. der Welle.

Bei kraftschlüssiger Verbindung sind es Reibkräfte, z. B. bei einer Pressverbindung, welche die Nabe auf der Welle fixiert halten. Bei formschlüssigen Formelementen, z. B. Zahntanzen ineinander. Stoffschlüssige Verbindungen erhält man durch eine stoßliche Verbindung, z. B. durch ein Verlöten von Nabe und Welle.

Die Arten der WNV unterscheiden sich wesentlich hinsichtlich des Fertigungsaufwandes, des Montage- und Demontageaufwandes und vor allem hinsichtlich des sichereren Übertragens von Stoßbelastungen.

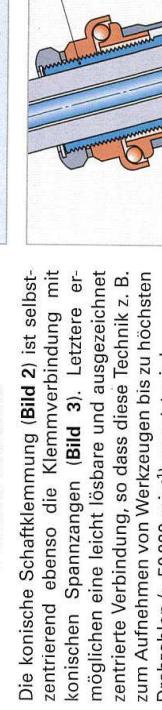
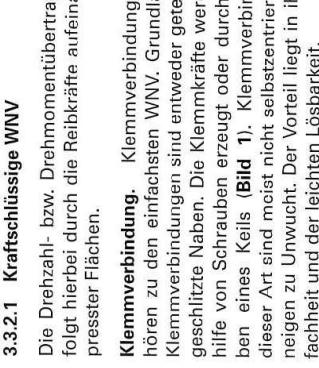


Bild 1: Klemmverbindungen

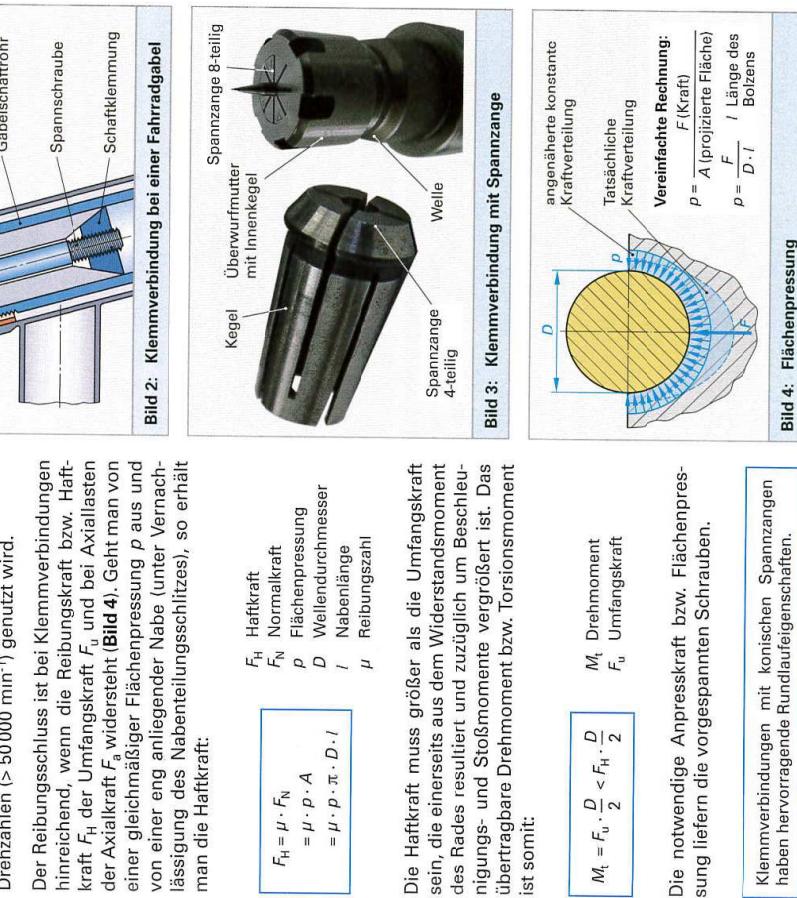


Bild 2: Klemmverbindungen mit geschlitzter Nabe

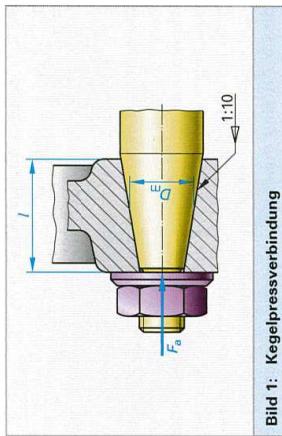


Bild 1: Kegelpressverbindung

$$F_a = 3 \cdot \frac{M}{D_m}$$

F_a Axiale Druckkraft
 M Übertragbares Drehmoment
 D_m Mittlerer Kegeldurchmesser

Kegelpressverbindungen sind selbstzentrierend und sorgen für hohe Laufruhe. Bei der kegelförmigen Welle ist eine axiale Justierung nicht möglich. Kegelpressverbindungen eignen sich vor allem für Nabenaufnahmen an Wellenenden z.B. bei Radnaben oder Schwungscheiben.

Neben Kegelpressverbindungen mit runden Kreiskegeln gibt es auch Kegelspannverbindungen mit **Polygonalprofil** (P3G-Profil). Hier genügen bereits kleine Kräfte für einen spielfreien Haftsitz, bei vergleichsweise kleinen Kegellängen. Diese Verbindungen sind leicht lösbar.

Spannverbindung mit Kegelspannringen. Kegelspannringe (Bild 3, links) bestehen aus zwei gegenüberliegenden konischen Ringen. Diese bilden durch Aufeinanderschieben und anschließendes Gegeneinanderpressen zwischen Welle und Nabe eine kraftschlüssige, lösbare Verbindung.

Ringfederspannverbindung. Ringfenderspannlemente (Bild 3, rechts) sind in ihrer Funktionsweise ähnlich den Kegelspannringen. Diese gibt es als kompakte Kaufteile, bestehend aus zwei Grundkörpern, geschlitzten Kegelspannringen und zugehörigen Spannschrauben. Durch Verschrauben der Grundkörper wird der Außenring gedehnt und der Innenring gestaucht, wobei eine kraftschlüssige Verbindung entsteht.

Sternscheibenverbindung. Sternscheibenelemente (Bild 4) werden durch Spannschrauben axial gestaucht, verändern dadurch ihre Durchmesser und verspannen die Nabe mit der Welle.

Spannbuchsenverbindung. Spannbuchsen sind wellenförmige Spannbüchsen (Bild 5). Durch Verschrauben werden diese axial gestaucht und in radialer Richtung sowohl nach innen als auch nach außen gedrückt. Dadurch werden Welle und Nabe miteinander verspannt.

Kegelpressverbindung. Diese Art der WNV wird durch axiales Aufpressen der Nabe mit Kegelbohrung (Bild 1), auf einer Welle mit kegelförmigem Aufnahmearmschnitt oder bei zylindrischer Welle mit einer Kegelspannbüchse (Ringspannbüchse) realisiert (Bild 2). Die erforderliche Axialkraft ist umgekehrt proportional dem Reibwert μ der Welle-Nabe-Paarung und abhängig von der Kegelgeometrie (Winkel, Breite, Durchmesser). Bei Verwendung eines Normkegels 1:10 (nach DIN), bei einem Reibwert $\mu = 0,1$ und einem mittleren Kegeldurchmesser D_m gilt:

Es ist das Wärmeausdehnungsverhalten des Fluids zu beachten. Zu hohe Betriebstemperaturen können u. U. zu Problemen führen.

Zylindrische Pressverbundung. Presspassungen entstehen dann, wenn Wellen mit Übermaß und Naben mit Untermaß miteinander gefügt werden. Man unterscheidet je nach Art des Fügens zwischen einem

- Längspresssitz (Bild 3) und
- Querpesssitz (Bild 4).

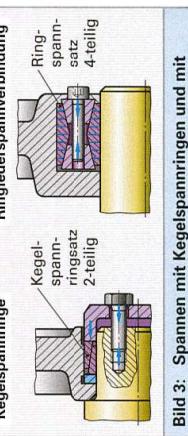


Bild 2: Kegelspannbüchse

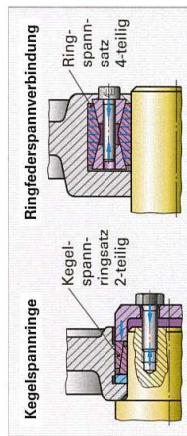


Bild 3: Spann mit Kegelspannringen und mit Ringfeder-Spannlementen

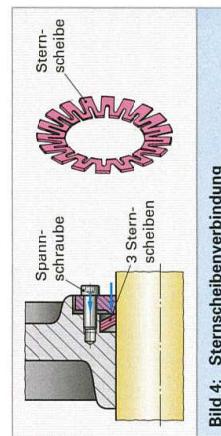


Bild 4: Sternscheibenverbindung

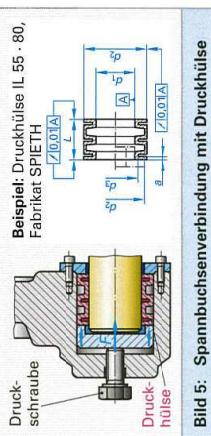


Bild 5: Spannbuchsenverbindung mit Druckhülse

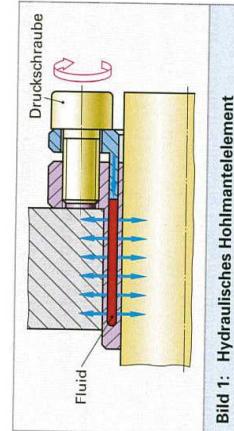


Bild 1: Hydraulisches Hohlmantellement

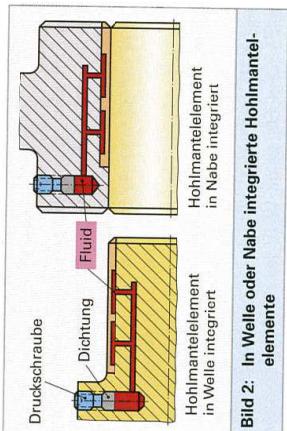


Bild 2: In Welle oder Nabe integrierte Hohlmantellemente

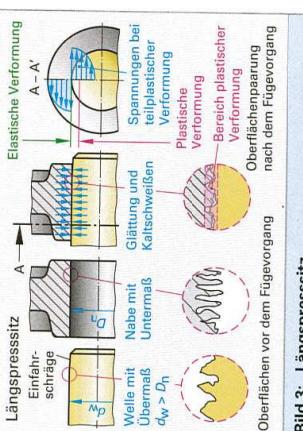


Bild 3: Längspresssitz

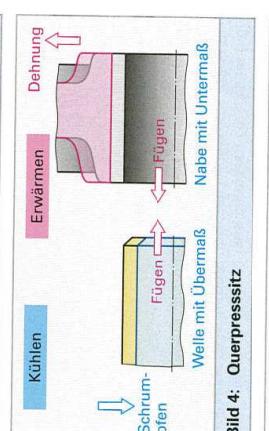


Bild 4: Querpesssitz

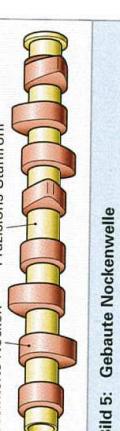


Bild 5: Gebauter Nockenwellen

Bei dem **Längspresssitz** wird eine Nabe mit Untermaß auf eine Welle kalt aufgepresst. Dabei entsteht an den Oberflächen der Bauteilpaarung eine plastische Deformation. Längspresssitz sind nur schwierig wieder lösbar, z. B. mit Hilfe von Drucköl in Taschen oder Ringnuten in der Welle über welche die Nabe geweitet werden kann.

Bei dem **Querpesssitz** wird die Nabe so weit erwärmt, oder die Welle so stark dehnt, dass sich die Teile ohne Zwang fügen lassen. Beim System Einheitsbohrung ist z. B. eine Passung H7 / s6, beim System Einheitswelle z. B. eine Passung h6 / s7 anzustreben. Presspassungen sind dann anzuwenden, wenn eine hohe Rundlaufgenauigkeit verlangt wird.

Beim **Wärmeverfahren** (Schrumpfverbindung) wird die Nabe z. B. auf 140 °C erwärmt, während die Welle bei Raumtemperatur verbleibt. Nach dem Fügevorgang lässt man die Nabe abkühlen. Sie schrumpft. Beim **Kälteverfahren** (Dehnverbindung), wird die Welle gekühlt, z. B. mit flüssigem Stickstoff (-195 °C), während die Nabe bei Raumtemperatur verbleibt. Nach dem Fügevorgang nimmt die Welle die Raumtemperatur wieder an und dehnt die Nabe.

Zylindrische Presspassungen finden in der Werkzeugspanntechnik Anwendung, aber auch z. B. bei gebauten Nockenwellen". In diesem Fall sitzen gesinterte Nocken mit zylindrischer Bohrunglage und winkelgenau auf einem Präzisionsstahlrohr (Bild 5).

Der Festigkeitsnachweis für zylindrische Pressverbindungen ist relativ komplex. So basiert die Dimensionierung vor allem auf betrieblichen Erfahrungen aufgrund von Versuchen.

3.3.2.2 Formschlüssige WNV

Die Drehzahl- und Drehmomentübertragung erfolgt hierbei durch ineinandergehende Formen und Flächen.

Stiftverbindungen. Mit einem Stift kann man ganz einfach eine Welle mit einer Nabe verbinden (Bild 1). Solch einfache Verbindungen verwendet man z. B. für Handräder mit nur geringem Anspruch an Zentrierung und Belastungen.

Der Stift wird an der Übergangsstelle Welle-Nabe auf Scherung beansprucht und überträgt sowohl Kräfte in Umfangsrichtung als auch axiale Kräfte. Stifte mit Kerben als Sollbruchstellen setzen man bei WNV auch zur Drehmomentbegrenzung ein um Schäden zu vermeiden, z. B. wenn der Antriebsstrang blockiert ist.

Passfederverbindung. Die gängigste und bekannteste formschlüssige WNV ist die Passfederverbindung gemäß DIN 6885-1 (Bild 2 und Bild 3). Diese Norm unterscheidet sechs verschiedene Ausführungen einer Passfeder (Bild 4).

Zum Fixieren der Passfeder in der Wellennut können diese Senkkbahnen haben. Am weitesten verbreitet sind die Formen A und E (Bild 4).

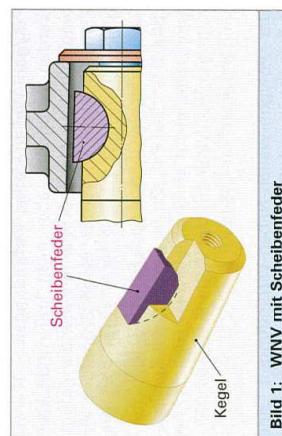


Bild 1: Scheibenfeder mit Kegel

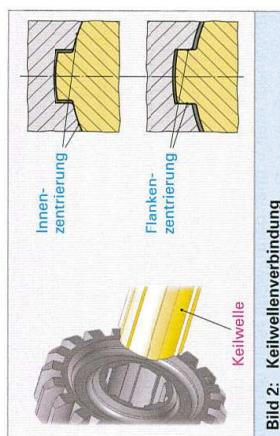


Bild 2: WNV mit Scheibenfeder

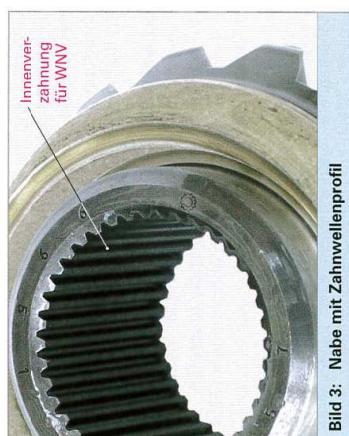


Bild 3: Keilwellenverbindung

WNV mit Scheibenfeder. Scheibenfedern nach DIN 6888 sind halbmondförmige Scheiben (Bild 1), die ähnlich wie Passfedern in eine dafür hergestellte Nut gelegt werden. Sie weisen ähnliche Eigenschaften auf und haben ähnliche Anwendungsbereiche wie Passfederverbindungen. Das Fertigen der Scheibenfeder mit einem Scheibenfräser ist einfacher als das Fertigen einer Passfeder mit einem Schaftfräser.

Scheibenfedern werden überwiegend in Verbindung mit Kegelwellen (Bild 1) eingesetzt. Wird die Nabe aufgezogen, so wippt sich die Scheibenfeder in Position" und ein genauer Sitz ist gewährleistet.

Keilwellenverbindungen. Bei einer gedachten Vielzahl von Passfedern, die gleichmäßig um eine Welle angeordnet sind, ergibt sich das Keilwellenprofil (Bild 2). Hierbei entsteht eine dreistarre Verbindung. Keilwellen werden in DIN ISO 14 als leichte und mittlere Reihe, sowie in DIN 5464 als schwere Reihe geführt. Das zu übertragende Drehmoment verteilt sich auf die Keile am Wellenumfang.

Die Selbstzentrierung der Nabe auf der Keilwelle wird entweder durch Innenzentrierung oder durch Flankenzentrierung erreicht (Bild 2).

Es können wechselnde, schwellende und stoßartige Drehmomente übertragen werden. Für stoßende Drehmomente wird die Flankenzentrierung bevorzugt, für besonders ruhigen Lauf die Innenzentrierung. Keilwellenverbindungen finden sich z. B. in KFZ-Getrieben.

Keilwellenprofile verwenden man als drehstarre und als längsbewegliche WNV.

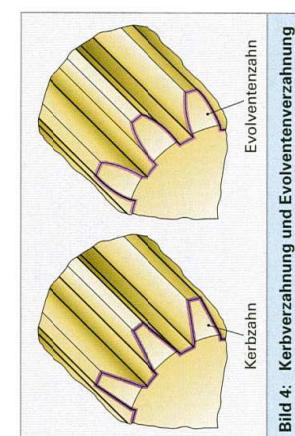


Bild 4: Zahnwellenverbindung

Zahnwellenverbindungen. Bei besonders hohen schwellenden, wechselnden und stoßenden Belastungen werden Zahnwellenverbindungen verwendet (Bild 3). Die Aufnahmefähigkeit der hohen Belastung basiert auf der hohen Anzahl der Zähne und der dadurch großen Flankenfläche mit entsprechend großem Tragfähigkeit. Für die Entwurfsberechnung ist die Flächendruckspannung an den Zähnen maßgeblich.

Zahnwellenprofile sind flankenzentrierte Kerbzahnprofile gemäß DIN 5481 oder Evolventenzahnprofile gemäß DIN 5480 (Bild 4).

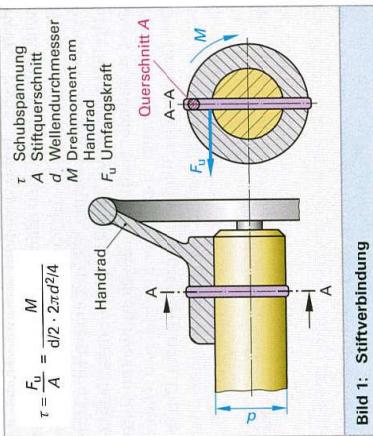


Bild 1: Stiftverbindung

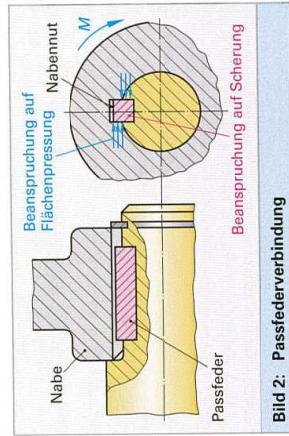


Bild 2: Passfederverbindung



Bild 3: Passfeder bei Elektromotoren

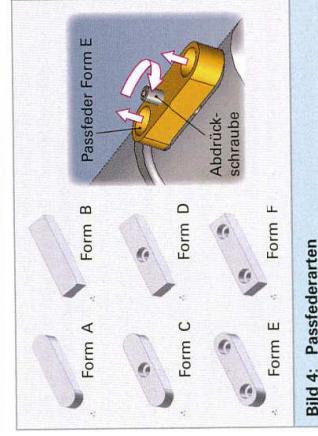


Bild 4: Passfederarten

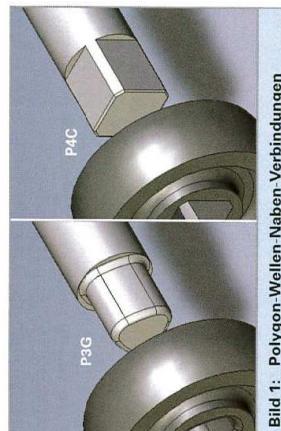


Bild 1: Polygon-Wellen-Naben-Verbindungen



Bild 2: Schiebesitz mit Vierack-Polygonprofil

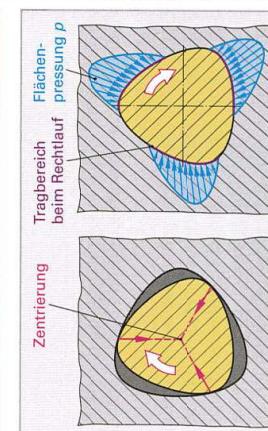


Bild 3: Drei-Seiten-Polygon



Bild 4: Polygon-Wellen-Naben-Verbindungen

Polygon-Wellen-Naben-Verbindungen. Hierbei werden gerundete, aber nicht kreisrunde Wellenprofile bzw. Nabensprofile miteinander gefügt. Es handelt sich um Profile, deren Grundform ein gleichschenkliges Dreieck nach Form P3G DIN 3271 oder ein Quadrat nach Form P4C DIN 3272 (Bild 1) ist. Das P4C-Profil, gefertigt mit Spielpassung, ermöglicht einen spielfarmen Gleitsitz, bei dem sich die Nabe auf der Welle in axialer Richtung bewegen kann (Bild 2).

Die Polygon-Wellen-Naben-Verbindungen sind selbstzentrierend (Bild 3) und weisen sehr hohe Steifigkeit auf. Die Besonderheit ist, dass es nur eine geringe Kerbwirkung gibt: $\beta_{\text{K}} = 1,2 \dots 1,5$.

Bei dem Drei-Seiten-Polygon werden drei Zonen durch eine Normalkraft mit unterschiedlicher Stärke beansprucht (Bild 3, rechts). Die Flächenpressung p beginnt an der „Ecke“, erreicht etwa nach 50° das Maximum und verschwindet nach etwa 50° (in Drehrichtung gesehen). Sie ist also im Vergleich zu einem Presssitz nicht gleichbleibend.

Die Polygon-Wellen-Naben-Verbindungen (Bild 4) verwendet man immer dann, wenn hohe und vor allem stoßartige Drehmomente vorliegen und wenn gleichzeitig hohe Übertragungssteifigkeit in Verbindung mit Spelfreiheit verlangt wird und die Verbindung leicht montierbar und demontierbar sein soll. Man findet Polygon-Wellen-Naben-Verbindungen z. B. bei Werkzeugmaschinen, Kraftfahrzeugen und Flugzeugen.

Schiebewellen realisiert man sehr vorteilhaft mit Polygonprofilwellen. Hier kommen neben den Normprofilen auch Sonderpolygonprofile, wie z. B. solche mit konzentrisch überarbeiteten Ecken zur Anwendung (Bild 2).

Berechnungsbeispiel¹: Zu ermitteln ist das maximal übertragbare Torsionsmoment einer Polygonwelle mit $D_1 = 30$ mm Profil-Innenkreisdurchmesser. Werkstoff C45 E: Streckgrenze $R_e = 370$ N/mm².

$M_t = \tau W_p$	M_t Torsionsmoment
$W_p \approx \frac{\pi \cdot D_1^3}{16}$	τ Torsionsspannung
$\tau \approx 0,7 R_e$	D_1 Profil-Innenkreisdurchmesser
$M_t = 0,7 \cdot 370 \text{ N/mm}^2 \cdot \pi \cdot (30 \text{ mm}^3)/16$	R_e Streckgrenze
$M_t = 1377000 \text{ Nmm} = 1377 \text{ Nm}$	W_p polares Widerstandsmoment

¹ Polygon, von griech. polygona = viereckig, polygonal = viereckig
² Berechnung nach Fa. Polygo (s. Quellenverzeichnis)

Berechnung von Passfederverbindungen

Eine Passfeder wird aufgrund des zu übertragenden Drehmoments auf Sicherung belastet. Bei normgerechter Wahl der Passfedergröße aufgrund des Wellendurchmessers und bei Verwendung zum Übertragen eines ruhenden Drehmoments kann meist auf einen Festigkeitsnachweis verzichtet werden.

1. Berechnung nach dem zu übertragenden Drehmoment

Das zulässige zu übertragende Drehmoment wird in Abhängigkeit der kleinsten Streckgrenze zwischen Welle, Nabe und Passfeder wie folgt bestimmt.

Lösung:

1. nach Faustregel:

$$M_{\text{zul}} \geq \frac{0,9 \cdot R_e \cdot (h - t_1) \cdot l_{\text{tr}} \cdot d}{2}$$

M_{zul} zulässiges zu übertragendes Drehmoment
 R_e minimale Streckgrenze aus Welle, Nabe, Passfeder
 h Passfederhöhe nach DIN 6885
 t_1 Wellennuttiefe nach DIN 6885
 l_{tr} tragende Passfederlänge abzüglich gerundete Stirnflächen
 d Nenndurchmesser der Welle

2. Berechnung nach der minimalen Streckgrenze

Durch Umstellen der Gleichung kann die geringste Streckgrenze aus Naben-, Wellen-, und Passfederwerkstoff bestimmt werden.

$$R_e \geq \frac{2 \cdot M}{0,9 \cdot (h - t_1) \cdot l_{\text{tr}} \cdot d}$$

R_e erforderliche Streckgrenze aus Welle, Nabe, Passfeder
 M zu übertragendes Drehmoment
 h Passfederhöhe nach DIN 6885
 t_1 Wellennuttiefe nach DIN 6885
 l_{tr} tragende Passfederlänge abzüglich gerundete Stirnflächen
 d Nenndurchmesser der Welle

- Welche Belastungen gibt es an einer Passfeder bei einer Passfederverbindung?
- Nennen Sie eine typische Anwendung einer Klemmverbindung beim Fahrrad.
- Welche Art von Klemmverbindung zeichnet sich durch sehr gute Rundlauf Eigenschaften aus?
- Welche Normkegel verwendet man meist bei Keilpressverbindungen?
- Skizzieren Sie den Aufbau einer Spannbuchsenverbindung.
- Wodurch kommt die Kraftübertragung bei einer Sternschalbenverbindung zustande?
- Erklären Sie die Funktionsweise einer hydraulischen Hohlmantelverbindung?

Beispiel:
Eine Welle aus 42CrMo4 mit dem Nenndurchmesser $d = 42$ mm soll ein Drehmoment von $M = 780$ Nm übertragen. Das verwendete Zahnräder ist aus 50CrMo4 gefertigt. Die Passfeder wird nach Norm verwendet und besteht aus E335

Es ist die Mindestlänge der Passfeder nach Faustregel und anschließend nach der Festigkeit zu bestimmen.

Lösung:

1. nach Faustregel:

$$l_{\text{min}} \geq 1,3 \cdot d = 1,3 \cdot 42 \text{ mm} = 54,6 \text{ mm},$$

gewählt wird eine Länge $l = 56$ mm
(nach DIN 6885-1)

2. nach Festigkeit:

Die geringste Streckgrenze besitzt E335 mit

$$R_e = 335 \text{ N/mm}^2$$

Mit $R_e \geq \frac{2 \cdot M}{0,9 \cdot (h - t_1) \cdot l_{\text{tr}} \cdot d}$ erhält man

$$l_{\text{tr}} = \frac{M \cdot 2}{0,9 \cdot R_e \cdot (h - t_1) \cdot d} = \frac{780000 \text{ Nmm} \cdot 2}{0,9 \cdot 335 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot (8 \text{ mm} - 5 \text{ mm}) \cdot 42 \text{ mm}} = 41,06 \text{ mm}$$

Da die abgerundeten Enden nicht tragen, muss die Passfederbreite hinzugerechnet werden.

$$l_{\text{min}} = 41,06 \text{ mm} + 12 \text{ mm} = 53,06 \text{ mm}$$

gewählt wird auch hier die Länge $l = 56$ mm nach DIN 6885-1.

3.3.2.3 Stoffschlüssige WNV

Die Stoffschlüssigkeit erreicht man durch Kleben, Löten oder Schweißen. Beim Löten und Kleben ist eine relativ breite Nabe erforderlich, da diese Verbindungen nur durch Tangentialspannungen belastet werden dürfen.

Löten. Bei der Herstellung der Lötverbindung müssen Welle und Nabe mit einem gleichmäßigen Spalt exakt zentriert werden. Für das Löten muss für die Wahl der Spaltweite die Nabenlänge beachtet werden (0,05 mm bis 0,2 mm), damit das Lot in den Lötspalt durch Kapillarwirkung hineingezogen wird (**Bild 1, links**).

Das Löten ermöglicht auch eine sehr gute Verbindung bei sehr unterschiedlichen Werkstoffpaarungen auch von metallischen Werkstoffen mit Nichtmetallen z. B. für metallische Wellen mit Naben bzw. Rädern aus Keramik, Diamant und Glas. Man verwendet hierbei sogenannte Aktivole mit grenzflächenaktiven Elementen wie Titan und Zirkon. Die Naben und Wellen müssen z. T. vorbehandelt werden. An den Phasengrenzen kommt es zu Interdiffusionsprozessen und Reaktionen mit einer innigen Verbindung.

Kleben. Es können unterschiedliche Werkstoffpaarungen von Wellen und Naben verklebt werden (**Bild 1, rechts**). Eine zentrische Justage ist für den Klebefolg notwendig. Nachteilig können sein:

- Dass die Klebeverbindung weniger lasttragfähig ist als es die Fügepartner sind,
- dass der Klebstoff temperaturabhängig, bei schon relativ geringen Temperaturen (häufig ab 60 °C) sich in seinen Eigenschaften nachhaltig verändert, z. B. zu Kriechen beginnt und dass Lösemittel und UV-Strahlung einen negativen Einfluss auf die Haltbarkeit haben.

Beim Löten und Kleben von Wellen-Naben-Verbindungen müssen Welle und Nabe mit gleichmäßigem Spalt exakt zentriert werden.

Schweißen. An Wellen werden Naben meist durch Reibschweißen stumpf gefügt (**Bild 2**). Das Verfahren wendet man insbesondere bei Stahlbauteilen (**Bild 3**) aber auch bei Kunststoffbauteilen an.

Der Vorgang ist so, dass eine, in Drehbewegung versetzte Welle auf den Nabenzansatz aufgesetzt wird bis der Werkstoff von Nabe und Welle an der Fügestelle durch Reibungswärme aufschmilzt. Sodann wird die Welle abbremsend auf die Nabe gedrückt. Prinzipiell können auch alle anderen Schweißverfahren in Frage kommen, z. B. auch das Laserschweißen (**Bild 4**).

3.4 Drehlager und Führungen

Eine Maschine ist als ein System mit **beweglichen Teilen** definiert und dadurch gekennzeichnet, dass zumindest Teil der Maschine Drehbewegungen oder Schiebebewegungen ausführen.

Drehbewegungen erfolgen allgemein mit Hilfe von Wellen, die gelagert, d. h. aufgenommen werden müssen (**Bild 1**). Für Schiebebewegungen sind es Schlitteinheiten, die in Führungen Aufnahme finden. So gehören die Drehlager, oft nur Lager genannt und die Führungen zu den grundlegenden Elementen einer Maschine. Sowohl die Lager als auch die Führungen bilden die Schnittstellen zwischen den bewegten Teilen und den feststehenden Teilen einer Maschine.

- Wichtigste Zielsetzungen sind in beiden Fällen:
- Die Beweglichkeit der Maschinenteile sollte möglichst leichtgängig sein.
 - Die Abnutzung bzw. der Verschleiß sollte möglichst gering sein und
 - die Genauigkeit der Aufnahme sollte dauerhaft, auch unter Belastung, erhalten bleiben.

Bei Lagern und Führungen unterscheidet man zwischen

- Wälzlagern bzw. Wälzführungen,
- Hydrodynamischen Gleitlagern und Gleitführungen,
- Hydrostatischen Gleitlagern und Gleitführungen, sowie
- Magnetlagern und Magnetführungen (**Tabelle 1**).

Man verwendet auch einen Mix aus diesen Lagern bzw. Führungen um die positiven Eigenschaften der Lagerarten zu kombinieren.

Tabelle 1: Eigenschaften der Lagerarten					
Eigenschaft	Wälz-lager	Hydro-dyn. Gleit-lager	Hydro-stat. Gleit-lager	Aero-stat. Gleit-lager	Magnet-lager
Hoher Drehzahlwert ($D \cdot n$)	gut	befriedigend	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Lebensdauer	hoch	hoch	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt
Reibung	gering	gering	sehr gering	sehr gering	keine
Laufgenauigkeit	gut	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Schwingungsdämpfung	gering	gut	gut	gut	sehr gut
Steifigkeit	hoch	hoch	sehr hoch	hoch	hoch
Kosten inkl. Betriebskosten	sehr günstig	günstig	günstig	günstig	günstig

¹ Leonardo da Vinci (1452 bis 1519), Maler, Bildhauer, Architekt, Mechaniker, Ingenieur, Naturphilosoph und Erfinder

² griech. aer = Luft, Aerostatik = Wissenschaftsgebiet der nichtbewegten Luft

- Wichtige zusätzliche, zu beachtende Eigenschaften der Lager und Führungen sind:
- Das Langzeitverhalten bzw. die Lebensdauer oder Laufleistung,
 - die Nachtigiebigkeit,
 - das Temperaturverhalten,
 - das Drehzahl- bzw. Geschwindigkeitsverhalten,
 - die Empfindlichkeit auf Stöße,
 - die Notlaufeigenschaften,
 - der Raumbedarf,
 - der Kühl- und Schmierbedarf,
 - die Geräuschemission.

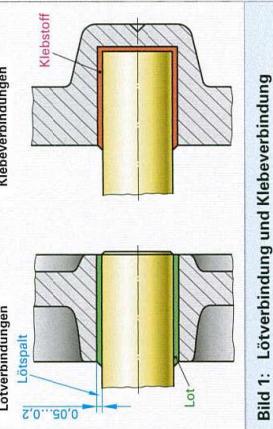


Bild 1: Lötverbindung und Klebeverbindung

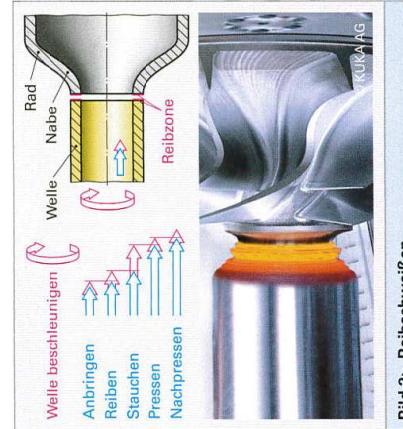


Bild 2: Reibschweißen

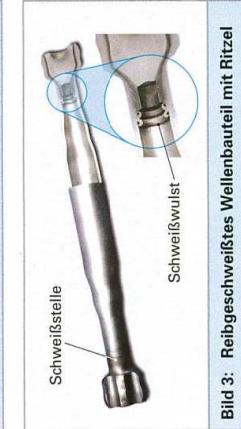


Bild 3: Reibgeschweißtes Wellenbauteil mit Ritzel

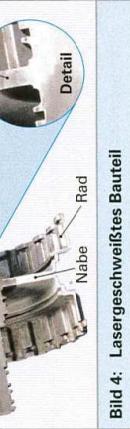


Bild 4: Lasergeschweißtes Bauteil