

**White Paper**

## **PCBolt** **Dimensionierung von Mehrschraubenverbindungen**

15.05.2005  
TEDATA GmbH

**TEDATA GmbH**  
Königsallee 45  
44789 Bochum  
**FAX: +49 234 30 70 3-99**

Zuordnung von Berechnungsverfahren zu einzelnen Arten von Schraubenverbindungen .....	3
Einteilung der Schraubenverbindungen nach geometrischen Kriterien .....	3
Untersuchung der Belastungsverhältnisse bei den einzelnen Verbindungsgeometrien .....	4
Zuordnung von Berechnungsalgorithmen zu den Schraubenverbindungsarten .....	5
Standardwerte .....	6
DIN-Schrauben .....	7
Auslegung von Schraubenverbindungen .....	9
Modul Balkenverbindung .....	11
Festlegung des Geltungsbereiches .....	11
Zur Theorie des Berechnungsmodells .....	12
Modul Apparateflansch .....	14
Festlegung des Geltungsbereiches .....	14
Betrachtungen zum Berechnungsalgorithmus .....	15
Modul Mehrschraubenverbindung .....	19
Festlegung des Geltungsbereiches .....	19
Theorie der Modellvorstellung .....	19
Berechnungsmodul Blindflansch und Kreisplatte (2 Platten) .....	24
Blindflansche .....	24
Kreisplatte (2 Platten) .....	25
Berechnungsmodul rechteckige Mehrschraubenverbindungen .....	26
Allgemeines zum Berechnungsmodul .....	26
Unterm modul rechteckige Kragflansche .....	28
Programmstruktur des Berechnungsmoduls .....	29
Hinweise zu den Eingaben .....	29

# Zuordnung von Berechnungsverfahren zu einzelnen Arten von Schraubenverbindungen

Bei Sichtung der Literatur über Schraubenverbindungen tritt eine Vielzahl von unterschiedlichen Verbindungsgeometrien in Erscheinung. Es sollen zunächst die für die Konstruktionspraxis wichtigsten Schraubenverbindungen aufgeführt werden.

Galwelat stellte die bisher vorliegenden Berechnungsalgorithmen, die das Verhalten der Gesamtverbindung befriedigend erfassen, dem Spektrum der Verbindungsgeometrien gegenüber. Von Grote stammt eine Untersuchung, die das Tragverhalten von Mehrschraubenverbindungen zum Gegenstand hat.

Bei der Analyse der Kriterien für die Zuordnung von Verfahren zur Verbindung ist neben der Geometrie die Betriebsbelastung das bestimmende Element.

## Einteilung der Schraubenverbindungen nach geometrischen Kriterien

Vor der Klassifizierung von Verbindungsgeometrien stellt sich zunächst die Frage nach gültigen Ordnungskriterien. In der hier vorgenommenen Untergliederung (Bild 1.1) werden die Klassifizierungskriterien von den in Betracht kommenden Berechnungsverfahren abgeleitet.

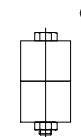
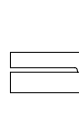
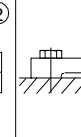
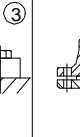
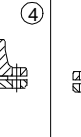
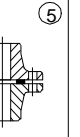
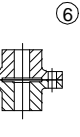
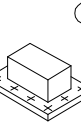

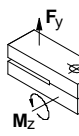
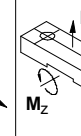


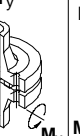
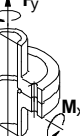
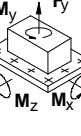
Einschraubenverbindungen		Mehrschraubenverbindungen						Schraubenv.
zentrisch oder exzentrisch		in einer Ebene	rotationssymmetrisch			symmetrisch		Schraubenachsen
Zylinder oder prismatischer Körper	Balken	Balken	Blindflansch	Flansch mit Dichtring	Flansch mit Flächenauflage	rechteckige Mehrschraubenverbindung	Kragflansch	
① 	② 	③ 	④ 	⑤ 	⑥ 	⑦ 	⑧ 	Geometrie in Ebene
								Belastung relevante Lasten
Axialkraft $F_A$ Querkraft $F_Q$ Moment $M_B$	Axialkraft $F_A$ Querkraft $F_Q$ Moment in der Balkenhauptebene $M_z$	Axialkraft $F_A$ Querkraft $F_Q$ Moment in der Balkenhauptebene $M_z$	Axialkraft $F_A$ (Rohrkraft) Moment $M_B$ Innendruck $P$	Axialkraft $F_A$ (Rohrkraft) Moment $M_B$ Innendruck $P$	Axialkraft $F_A$ Torsionsmoment $M_T$ Moment $M_B$	Axialkraft $F_A$ Querkraft $F_Q$ Torsionsmoment $M_T$ Moment $M_B$	Axialkraft $F_A$ Querkraft $F_Q$ Torsionsmoment $M_T$ Moment $M_B$	Kräfte und Momente
VDI 2230		Bedingt nach VDI 2230		DIN 2505 AD-Merkbl. B7 VDI 2230	Bedingt nach VDI 2230			
Balkenbiegetheorie (VDI 2230) mit Zusatzbedingungen			Plattentheorie		Bedingt nach Ersatzmodellen			Berechnung
Finite Elemente Methode (FEM)								

Bild 1.1: Einleitung der Schraubenverbindung

Die Ordnung (Bild 1.1) erhebt nicht den Anspruch, alle Verbindungsgeometrien zu erfassen, sie ist vielmehr als ein Ordnungsschema von Grundelementen zu betrachten, in die eine vorhandene Verbindungsgeometrie, oft unter der Annahme von Idealisierungen, eingegliedert werden kann. Eine umfangreiche Literaturdurchsicht und häufiger Kontakt mit Industriefirmen haben bestätigt, dass der größte Teil der anfallenden Auslegungsprobleme auf Geometrien zurückgeführt werden kann, die der vorgenommenen Einteilung entsprechen.

Grundsätzlich wird bei allen Verbindungen Parallelität der Schraubenachsen im unbelasteten Zustand zueinander vorausgesetzt, und es wird ebenfalls von Parallelität der Schraubenachsen zu den Trennfugenormalen ausgegangen. Plastische Verformungen werden nur im mikrogeometrischen Bereich in Form der Setzkraftverluste berücksichtigt und im makrogeometrischen Raum ausgeschlossen. Es wird Isotropie der Werkstoffe zugrunde gelegt und eine ideale Makrogeometrie angenommen.

- Verbindung 1, Zylinder: Die Hauptausdehnungsrichtung liegt senkrecht zur Trennfuge zwischen den verspannten Teilen. Die Außenkonturen dieser Haupttrennfuge müssen innerhalb eines Kreises mit dem Durchmesser  $G = dk + h_{\min}$  liegen. Dies entspricht dem Modell der Richtlinie VDI 2230.
- Verbindung 2, Balkenverbindung: Für die Einschraubenverbindung gelten sinngemäß die gleichen Aussagen wie sie bei der Verbindung 1 gemacht wurden. Die Hauptausdehnung verläuft parallel zur Trennfuge. Siehe Modul Balkenverbindung.
- Verbindung 3, Balken: Die Schraubenachsen (zwei oder mehrere) liegen in einer Ebene, welche die Symmetrieebene der Verbindung ist. Es wird eine Balkenverbindung vorausgesetzt, die auf einer starr definierten Grundplatte oder mit einem symmetrisch zur Trennfuge gestalteten zweiten Balken verschraubt ist. Die maximale Balkenbreite ist auf  $G = dk + h_{\min}$  begrenzt. Siehe Balkenverbindung.
- Verbindung 4 Blindflansch: Flansch mit Dichtring, abgeschlossen durch eine Kreisplatte und Kreisplatte: Hierzu werden rotationssymmetrische Deckplatten konstanter Dichte gerechnet. Ein Sonderfall stellt der Blindflansch bestehend aus 2 Kreisplatten dar. Siehe Modul Blindflansch und Kreisplatte (2 Platten).
- Verbindung 5, Flansch mit Dichtung: Alle Flanschverbindungen, die einen Dichtring oder einen angearbeiteten Ansatz haben, über die ein Stülpen des Flansches hervorgerufen wird, zählen zu dieser Gruppe. Siehe Modul Apparateflansch.
- Verbindung 6 Flansch mit Flächenauflage: Unter diese Gruppe sollen kraftschlüssige, rotationssymmetrische Kupplungsverbindungen eingeordnet werden. Dabei wird von einem relativ starren Anschlussquerschnitt ausgegangen. Siehe Modul rotationssymmetrische Mehrschraubenverbindungen.
- Verbindung 7/8, rechteckige Mehrschraubenverbindung: Dieser Gruppe sollen alle nichtrotationssymmetrischen Mehrschraubenverbindungen wie Gestellverschraubungen, Maschinenfußverschraubungen, Rechteckflansche usw. untergeordnet werden. Siehe rechteckige Mehrschraubenverbindungen.

Für die folgenden Betrachtungen werden oben genannte Verbindungsgeometrien die Grundbausteine darstellen. Weitere denkbare Modifizierungen der einzelnen Geometrien sollen erst bei der Erläuterung der Berechnungsmoduln zur Sprache kommen.

#### **Untersuchung der Belastungsverhältnisse bei den einzelnen Verbindungsgeometrien**

Hauptkriterien für die Auswahl eines Berechnungsverfahrens sind die Verbindungsgeometrien und die Belastungsverhältnisse. Weitere Gesichtspunkte, wie die Berücksichtigung der Kontaktsteifigkeit, Erfassung des Verhaltens der Verbindung bei Temperaturänderung usw., sind sekundärer Natur und sollen im einzelnen bei den Berechnungsalgorithmen diskutiert werden.

Wenn die Belastungsverhältnisse als ordnendes Kriterium genannt werden, so müssen wir die Belastungen bei allen Schraubenverbindungen unterteilen in:

- Belastungen durch Vorspannkräfte der Schrauben, die durch die Lage der Schraubenachsen und die Schraube selbst bestimmt sind.
- Betriebsbelastungen der Verbindungen.

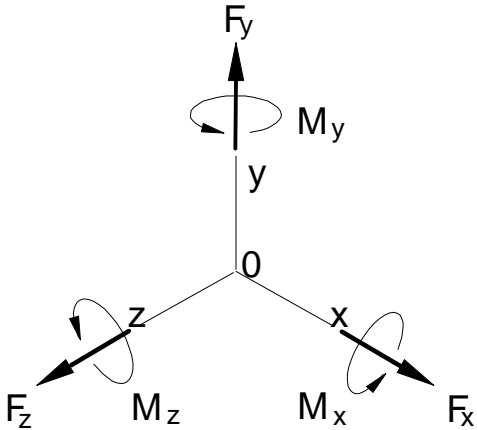


Bild 1. 2: Koordinatenkreuz mit Betriebsbelastungen

Für die Zuordnung der Berechnungsverfahren sind die Betriebsbelastungen entscheidend, wobei Kräfte, Momente und der Innendruck betrachtet werden. Eine Untergliederung in dynamische oder statische Belastungen soll hier noch nicht vorgenommen werden. Auftretende Streckenlasten lassen sich vorerst durch eine äquivalente Einzelkraft ersetzen und so in die Überlegungen einbeziehen.

Um festzustellen, welche Betriebsbelastungen bei den einzelnen Verbindungsgeometrien von Bedeutung sind, wurden in einem Ordnungsschema über alle sieben Geometrien die in Bild 1.2 angegebenen Kräfte und Momente variiert.

Zusätzlich ist der Innendruck vorgegeben worden.

Im folgenden Arbeitsschritt wurden dort alle Kräfte, Momente sowie der Innendruck gestrichen, wo eingeschätzt werden konnte, dass die Belastung in der Praxis nicht auftreten wird oder wo die Belastung den Prinzipien der Kraftleitung widerspricht.

### Zuordnung von Berechnungsalgorithmen zu den Schraubenverbindungsarten

Im ersten Arbeitsschritt sollen die wichtigsten Berechnungsansätze, die aus der Literatur bekannt sind, den Geometrien entsprechend Bild 1.1 zugeordnet werden.

Von den jeweiligen Berechnungsmethoden soll dann jene ausgewählt werden, welche für den Einsatz in einem Berechnungsprogramm am zweckmäßigsten erscheint.

### 2 - Balken (Einschraubenverbindung)

Betrachtet eine stabartige Verbindung bestimmter Biegesteifigkeit, für die bei exzentrischer Belastung eine Ersatzfeder im Abstand  $s_{sym}$  vom Flächenschwerpunkt gesetzt wird. Das Klaffen wird durch Reduzierung des Querschnitts erfasst.

In der VDI-Richtlinie 2230 wird im exzentrisch belasteten Fall eine notwendige Klemmkraft ermittelt, die dem klassischen Berechnungsansatz überlagert wird und ein Aufklaffen der Trennfuge verhindert. Weiterhin wird ein Faktor  $k_{pt}$  eingeführt, der das Ansteigen der Schraubenzusatzkraft analytisch erfasst, wenn die Verbindung zu klaffen beginnt.

Das schon beschriebene kommt in gleicher Weise bei Ein- und Mehrschraubenverbindungen zum Einsatz.

### 3 - Balken / 2 Kreisplatten (Mehrschraubenverbindung)

Für eine Balkenverbindung wird ein elastischer Balken angesetzt, der durch Federelemente in Höhe der Schraubenachsen und an den von ihm definierten Stützpunkten gelagert ist.

Dabei wurde ein Berechnungsmodell erarbeitet, welches die Verbindung in finite Balkenelemente zerlegt und die Steifigkeit der aufliegenden Elemente mit Hilfe der Differentialgleichung der Balkenbettung bestimmt.

### 4/5 - Blindflansch mit Dichtung / Flansche mit Dichtung

Hier soll primär auf die DIN 2505 verwiesen werden, wo vor allem die Spannungen in den kritischen Flanschquerschnitten Gegenstand der Betrachtungen sind.

In der VDI-Richtlinie 2230 wird analog der Vorgehensweise bei der Einschraubenverbindung ein Kraftverhältnis ermittelt, das die Schraubenzusatzkraft bestimmt.

### 6 - Flansch mit Flächenauflage

Es wird auf Pkt. 3 aufmerksam gemacht, wo auf die im folgenden aufgezählten Rechenmodelle näher eingegangen wird:

### 7/8 - Rechteckige Mehrschraubenverbindung / Kragflansch

Plock hat in seinem Modell eine starre Platte vorausgesetzt. Er ermittelt die Normalkräfte für jede Schraubenachse, die von einem System aus Schraube, Flanschsegment und Kontaktzone übertragen wird.

## Standardwerte

Für viele Einflussparameter, die bei der Berechnung der Verbindungen berücksichtigt werden müssen, bietet das Programm die Festlegung von Standardwerten an. Diese sind entweder global für alle Verbindungen, z. B. Allgemeine Daten, oder speziell für einzelne Verbindungen vorgesehen. Für folgende Gruppen sind Vorgaben möglich:

**Allgemeine Daten  
Schrauben (DIN-Nr.) und Parameter  
Schraubenwerkstoff  
Mutterwerkstoff  
Apparate- und/oder Blindflansch**

### Allgemeine Daten

<i>Parameter</i>	<i>Bedeutung</i>
Bohrungstoleranz nach ISO 273	fein mittel grob
Fase an der Bohrung	keine Fase Fase vorhanden
Endbehandlung der Schraube	normal schlußgerollt
Verbindungsart	Sackloch Mutter
Unterlegscheiben	keine Kopf (+ Mutter bei Mutternv.) nur mutternseitig
Betriebslast	statisch dynamisch
Auslastung der Streckgrenze beim Vorspannen	
Anziehverfahren ALPHA nach Tabelle A8, VDI 2230, Entwurf 98	

Anziehungsfaktor in Ausnahmen vorgeben <= 4.0	
Montagetemperatur	
Betriebstemperatur	
Montagetemperatur Schraube	
Betriebstemperatur Schraube	
Reibzahl Haupttrennfuge	
Setzbetrag (sonst Berechnung)	
Bettungsfaktor (nur Balken und Rundflansch)	

Tabelle – Standardwerte - Allgemeine Daten

### Schraubentyp (DIN-Nr.) div. Parameter

Parameter	Bedeutung
Verwendete Schrauben	DIN 931 T1/T2 Sep 87 DIN EN 24014 Feb 92 DIN 931 T2 Sep 87 DIN 912 Dez 83 Stiftschraube DIN 938 Feb 95 Stiftschraube DIN 939 Feb 95 Stiftschraube DIN 835 Feb 95 Stiftschraube DIN 940 Feb 95 Kopfschraube frei gewählt Innensechskant-Schraube frei gewählt Stiftschraube frei gewählt Bundschraube frei gewählt
Reibzahl im Gewinde	
Reibzahl im Gewinde, unterer Grenzwert	
Reibzahl der Kopfauflagefläche	
Reibzahl der Kopfauflagefläche, unterer Grenzwert	
Federnder Anteil des eingeschr. Gewindes	
Federnder Mutteranteil	
Federnder Anteil des Sacklochgewindes	
Federnder Kopfanteil	

Tabelle Standardwerte – Schraubentyp (DIN-Nr.) div. Parameter

### Schraubenwerkstoff/Güte

Parameter	Bedeutung
Festigkeitsklasse (8.8 10.9 12.9)	
Montagetemperatur Schraube	
Betriebstemperatur Schraube	
Werkstoffbezeichnung	
Zugfestigkeit	
Streckgrenze	
Scherfestigkeit	
E-Modul	
Ausdehnungskoeffizient N	
E-Modul bei TB	
Ausdehnungskoeffizient TB	
Streckgrenze bei TB	

Tabelle Standardwerte – Schraubenwerkstoff / Güte

### DIN-Schrauben

Das Programm beinhaltet eine Datenbank mit Normschrauben, aus der bei der Berechnung die notwendigen Daten gelesen werden. Gespeichert sind die Normen der in der **Tabelle Standardwerte – Schraubentyp** angegebenen Schrauben.

Da die DIN EN 24014 nur genormte Schraubendurchmesser bis M60 mm enthält, wurden die Daten um die Angaben der DIN 931 Teil 2 bis M160 ergänzt. Zusätzlich wurden Informationen über Bohrungsdurchmesser (DIN 273), Fasendurchmesser der Bohrung (DIN 74), Mutternhöhe und Fasendurchmesser der Muttern (DIN EN 24032) und Unterlegscheiben (DIN 125) aufgenommen.

Im Berechnungsteil der Module erfolgt dann der Zugriff auf die intern gespeicherten Schraubendaten, wobei geprüft wird, ob der vorgegebene Gewindedurchmesser dem Durchmesser einer genormten Schraube entspricht. Ist dies der Fall, wird programmintern die Schraube als Normschraube behandelt.

# Auslegung von Schraubenverbindungen

Im folgenden sind die an das Programmsystem angeschlossenen Berechnungsmodule aufgeführt. Die Eigenschaften gehen aus den *Bildern 3.2 bis 3.8* hervor.

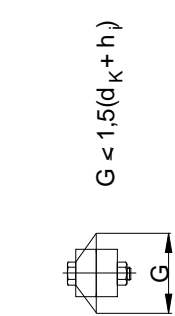
<b>Modul: Balkenverbindung</b>	
<b>Theorie</b>	Neuendorf, K.: Ein Balkenmodell ... Diss. TU Berlin
<b>Geometrie</b>	 <p>Balken</p> <p><math>G \leq 1,5(d_K + h)</math></p>
<b>Schraubenzahl</b>	eine oder mehrere (max. 9)
<b>Betriebslasten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kräfte</li> <li>- Momente</li> <li>- Streckenlasten</li> </ul>
<b>Schraubenvorgabe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachrechnen, Abmaße extern vorgeben</li> <li>- Nachrechnen einer Normschraube</li> </ul>
<b>Ergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nichtlineares Verhalten</li> <li>- Schraubenkraft</li> <li>- Biegelinie, Klaffpunkt im Vorspann- und Lastfall</li> <li>- Flächenpressung</li> <li>- Dauerfestigkeit</li> <li>- Streckgrenzenauslastung der Schraube im Vorspann- und Lastfall</li> <li>- Sicherheiten</li> </ul>
<b>Besonderheiten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wahlweise 2 Balken oder Balken auf Unterlage</li> </ul>

Bild 3.3

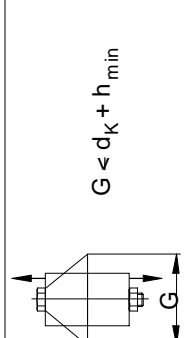
<b>Modul: Zylinderverbindung VDI 2230</b>	
<b>Theorie</b>	VDI - Richtlinie 2230 Juli 1986 VDI - Richtlinie 2230 Oktober 2001
<b>Geometrie</b>	 <p>Zylinder</p> <p><math>G \leq d_K + h_{min}</math></p>
<b>Schraubenzahl</b>	eine
<b>Betriebslasten</b>	Betriebskraft $F_A$ und Exzentrizität $a$ oder Betriebsmoment $M_B$
<b>Schraubenvorgabe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachrechnen, Abmaße extern vorgeben</li> <li>- Nachrechnen einer Normschraube</li> <li>- Dimensionieren und Optimieren</li> </ul>
<b>Ergebnisse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lineares Verhalten</li> <li>- Schraubenkräfte</li> <li>- Flächenpressung</li> <li>- Dauerfestigkeit</li> <li>- Streckgrenzenauslastung der Schraube im Vorspann- und Lastfall</li> <li>- Sicherheiten</li> </ul>
<b>Besonderheiten</b>	Die Abmaße des Zylinders in der Trennfugen-ebene sind auf $G$ begrenzt. $G$ = Schraubenkopfdurchmesser + Höhe des kleineren Zylinders

Bild 3.2

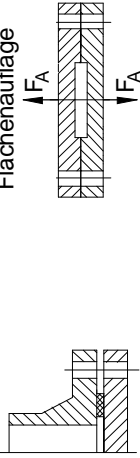


Modul: Blindflansch und Kreisplatte	
<b>Theorie</b>	Plattentheorien VDI 2230 DIN 2505 AD Merkblatt B7
<b>Geometrie</b>	Blindflansche mit Dichtung Zwei Platten mit Flächenauflage 
<b>Schraubenzahl</b>	beliebig ( allg. durch 4 ganzzahlig teilbar )
<b>Betriebslasten</b>	- Innendruck - Axialkräfte ( - Rohrzugkräfte ) ( - Temperatur )
<b>Schraubenvorgabe</b>	- Nachrechnen, Abmaße extern vorgeben - Nachrechnen einer Normschraube - Dimensionieren
<b>Ergebnisse</b>	Je nach Verbindungsart - Ermittlung des kritischen Flanschquerschnitts - Ermittlung der max. Vergleichsspannung - Prüfen auf Dichtheit - Haltbarkeit der Dichtung - Schraubenkräfte - Sicherheiten - Flächenpressung - Dauerfestigkeit - Streckgrenzenauslastung 
<b>Besonderheiten</b>	

Bild 3.6

Sc

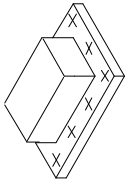


Modul: Rechteckflansch	
<b>Theorie</b>	Balkenbiegung, FEM (teilweise noch unveröff.)
<b>Geometrie</b>	Rechteckflansch mit Flächenauflage 
<b>Schraubenzahl</b>	beliebig, (ganzzahlig durch 4 teilbar)
<b>Betriebslasten</b>	- Biegemoment ( - Axiallast vorher. )
<b>Schraubenvorgabe</b>	- Nachrechnen, Abmaße extern vorgeben - Nachrechnen einer Normschraube
<b>Ergebnisse</b>	- Schraubenkräfte der max. und min. belasteten (-entlasteten) Schraube der gewählten Symmetrieachse mit - Biegelinie im Vorspann- und Lastfall - Sicherheiten - Flächenpressung - Dauerfestigkeit - Streckgrenzenüber- schreitung 
<b>Besonderheiten</b>	- Starre Unterlage 

Bild 3.7

B€

Sc

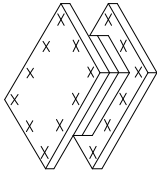


Modul: Kragflansch	
Theorie	
Geometrie	 <p>Kragflansch mit Flächenauflege max. 4 Zwischenkörper</p>
Schraubenzahl	max 20, (ganzzahlig durch 4 teilbar)
Betrieblasten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biegemoment um die Quer-, Längs- und Diagonalachse</li> <li>- ( Zug- Druckbelastung )</li> </ul>
Schraubenvorgabe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachrechnen, Abmaße extern vorgeben</li> <li>- Nachrechnen einer Normschraube</li> </ul>
Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schraubenkräfte der max. und min. belasteten (-entlasteten) Schraube der gewählten Symmetrieachse mit</li> <li>- Biegelinie im Vorspann- und Lastfall</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sicherheiten</li> <li>- Flächenpressung</li> <li>- Dauerfestigkeit</li> <li>- Streckgrenzenüberschreitung</li> </ul> 
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Symmetrie von Deckplatten und Zwischenkörpern</li> </ul>

Bild 3.8

## Modul Balkenverbindung

Ein häufig vorkommendes geometrisches Grundelement bei Schraubenberechnungen stellen Balkenverbindungen dar (*Bild 1.1*). Dabei können Balkenverbindungen mit ein oder mehreren Schrauben (max. 9) berücksichtigt werden.

### Festlegung des Geltungsbereiches

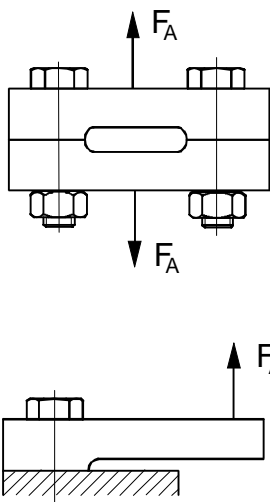


Bild 5.1: Grundarten der Balkengeometrie

Es lassen sich Mehrschraubenverbindungen berechnen, die balkenähnlichen Charakter haben. Die Verbindungsgeometrie kann aus einer Zahl (maximal 24) von Balkenelementen mit unterschiedlichen Abmaßen zusammengesetzt sein. Die Schraubenachsen (1 bis 9) sind zueinander parallel und befinden sich in einer Ebene. Auf die Balkenverbindung können Kräfte, Momente und Strecklasten gebracht werden. Zwei grundsätzliche Geometrie-Varianten sind berechenbar:

Gruppe 1:

Die Verbindung besteht aus zwei völlig symmetrischen Balken und wird symmetrisch belastet (Bild 5.1)

Gruppe 2:

Ein Balken ist auf eine unendlich starr angenommene Platte geschraubt (Bild 5.1)

Dabei sind folgende grundlegende Voraussetzungen gemacht worden:

Isotrope Eigenschaften der Werkstoffe.

Nur elastische Verformung (Setzerscheinungen der Oberflächenrauigkeit werden bei der Ermittlung der Vorspannkraft berücksichtigt).  
Statisches Temperaturverhalten.

Das Kriechen der Werkstoffe wird ausgeschlossen.

Quasistatisches Verhalten der Bauteile.

Definierte Lasten für den Vorspann- und Betriebslastfall.

Voraussetzung einer idealen Makrogeometrie.

Nur minimale Verformungen sind zugelassen.

Die Balkenbreite soll den Grenzwert  $G = dk + h_{\text{Balken}}$  (Schraubkopfdurchmesser + Balkenhöhe) nicht überschreiten. Oberhalb  $G = 1,5 (dk + h_{\text{Balken}})$  bricht das Programm ab, da dann der Fehler zu groß wird.

Es sind nur minimale Höhenunterschiede zwischen den Balkenelementen sinnvoll und sie sollen 100 % nicht überschreiten.

Die zulässigen Betriebsbelastungen (Kräfte parallel zu den Schraubenachsen, Momente und Strecklasten) dürfen nur in der Ebene der Schraubenachsen angreifen.

Bei der Abschätzung der minimal und maximal zulässigen Abmaße soll der kleinste Balken noch mit einer Normalschraube M 3 (DIN 931 oder DIN 912) und der größte Balken mit einer Schraube M 39 vorspannbar sein, wobei die obere Grenze nicht eindeutig festgelegt ist und auch Verbindungen mit Sonderschrauben (oberhalb M 39) berechnet werden können, solange der Balkencharakter eingehalten wird.

## Zur Theorie des Berechnungsmodells

Eine vorliegende Balkenverbindung wird in einzelne, finite Balkenelemente untergliedert. Bei der Beschreibung der Balkenverbindung wird an jede Stelle, wo eine Belastung eingeleitet oder eine Geometrieänderung auftritt, ein Knoten gesetzt. Für den aufliegenden Teil des Balkens lassen sich Steifigkeiten aus den bekannten Gleichungen des elastisch gebetteten Balkens ableiten.

Es wird von der Annahme ausgegangen:  $q(x) = -B \cdot p(x) = K_B \cdot w(x)$

Damit ergibt sich die Differentialgleichung:  $w^{(4)} + \frac{K_B}{E \cdot I} \cdot w = 0$

Ihre Lösung lautet:  $w(x) = e^{-\frac{x}{L}} \left( C_1 \cdot \cos \frac{x}{L} + C_2 \cdot \sin \frac{x}{L} \right) + e^{\frac{x}{L}} \left( C_3 \cdot \cos \frac{x}{L} + C_4 \cdot \sin \frac{x}{L} \right)$

Bereiche des Balkens, die nicht gebettet sind, werden durch Steifigkeiten in der Balkenstruktur ersetzt, die über die Differentialgleichung des Balkens errechnet werden.

Grundlage des Lösungsverfahrens ist das Formänderungsgrößenverfahren. Es wird ein Gleichungssystem aufgebaut, das Steifigkeitsmatrizen beinhaltet und doppelt so viele Gleichungen wie Knotenpunkte hat. In

einigen Zusatzgleichungen werden die Schrauben berücksichtigt. Das nichtlineare Verhalten entsteht durch das Aufklaffen der Trennfuge und wird iterativ erfasst. Nach der Lösung des Gleichungssystems wird abgefragt, an welcher Stelle die Durchsenkung größer Null ist, und bei der nächsten Rechnung wird dieser Bereich als aufgeklafft angesehen. Es wurde ein völlig neues Iterationsverfahren entwickelt, welches sich auch eignet für die Berechnung von Geometrie- und Belastungskombinationen, bei denen die bisher zur Lösung eingesetzten bekannten Iterationsverfahren ungeeignet sind, da sie nicht konvergieren. Nach der Berechnung des Vorspannungsfalls wird der Fall Betriebsbelastung dem ersten überlagert. Bei den bisherigen Versionen war die Vorgabe von bestimmten Geometrien möglich, bei denen der Iterationsvorgang instabil werden kann.

Hier wurde jedoch intern die Prüfung der Nullstellenverschiebung so gestaltet, dass das Verfahren mit großer Wahrscheinlichkeit zu einem positiven Abschluss kam. Die Nullstellengenauigkeit wurde programmintern festgelegt. Bei Geometrien, die kaum der einer Balkenstruktur entsprachen, konnten Ergebnisse berechnet werden mit kleiner Nullstellengenauigkeit oder es kam zu einem Programmabbruch.

Die zulässige Breite der zu berechnenden Balkenverbindung ist auf  $d_k + h_{\min}$  (Schraubenkopfdurchmesser plus Balkenhöhe) begrenzt.

Mit den bisher erläuterten theoretischen Grundlagen des Rechenmodells wird der Anwender dieses Moduls nicht konfrontiert. Das Programm erwartet von ihm die Beschreibung der Balkengeometrie, die Vorgabe einer Schraube, die Angabe der Betriebsbelastung und einige Kennziffern, die den Rechenlauf bestimmen.

**Allgemeine Kenngrößen.** Der Aufbau geht aus der *Tabelle – Standardwerte - Allgemeine Daten* hervor.

**Schraubendaten.** Der Aufbau geht aus der *Tabelle Standardwerte – Schraubentyp (DIN-Nr.) div. Parameter* hervor.

**Geometrie - Längen.** Maximal sind 24 Balkenabschnitte zulässig. Die Länge eines Abschnittes wird immer von 0 an gerechnet, so dass der letzte Abschnitt gleichzeitig die Gesamtlänge des Balkens ergibt. Die Länge eines Folgeabschnittes muss immer größer sein als der vorhergehende Abschnitt. Das Entfernen eines Abschnittes (verkürzen eines vorhandenen Balkens) ist ebenfalls möglich, wobei immer nur der letzte Abschnitt entfernt werden kann.

**Geometrie - Breiten und Höhen** Beim ersten Abschnitt eines Balkens ist die Angabe der Breite und der Höhe unbedingt erforderlich.

**Geometrie - Auflage, Schraubenpunkte** Die Angaben für die Auflage in einem Punkt bezieht sich immer auf den links davon liegenden Balkenabschnitt. Ist die Auflage eines Folgeabschnittes identisch, so ist keine Eingabe erforderlich. Schrauben können sich immer nur am Ende eines Abschnittes befinden, wobei am Balkenende selbst keine Schraube zulässig ist.

**Belastung - Axialkräfte, Momente.** Axialkräfte und Momente können in jedem Punkt eines Abschnittes angegeben werden, also auch am Anfang und Ende eines Balkens.

**Belastung - Strecklasten.** Strecklasten können über mehrere Balkenabschnitte gehen, wobei die Last immer rechts von einem Punkt beginnt und links von einem Punkt endet.

## Modul Apparateflansch

Im *Bild 1.1* (Verbindung 5) ist der Flansch mit Dichtung dargestellt. Verbindungsgeometrien dieser Art, die vorwiegend im Rohrleitungs- und Apparatebau Anwendung finden, können mit dem Modul Apparateflansch berechnet werden. Der Berechnungsmodul basiert auf der Vornorm DIN 2505 vom Oktober 1964. Soweit wie möglich wurden hier ebenfalls die neuen Erkenntnisse betreffend VDI 2230 (Februar 2003) eingearbeitet.

Weiterhin finden das AD-Merkblatt B 7 und die Technischen Regeln für Dampfkessel TRD 309 Berücksichtigung. Aus dem Entwurf der DIN 2505 vom November 1972 der im Juli 1978 ersatzlos gestrichen wurde, sind einzelne Gedanken entnommen und dem Programmbaustein integriert worden. Zusätzlich sind die bei Schwaigerer modifizierten Algorithmen im Berechnungslauf eingearbeitet worden.

Bei der Erarbeitung des Moduls wurde eine Verknüpfung der Spannungsanalyse in der Rohrflanschverbindung mit den spezifischen Aspekten der Schraubenberechnung vorgenommen. Offen ist die Frage nach der Notwendigkeit und Zweckmäßigkeit des Verknüpfens der Ansätze nach der VDI-Richtlinie 2230 und der DIN 2505. Für den eingeschlagenen Weg lassen sich folgende Kriterien aufführen:

- Beschränkt man sich auf die Berechnung nach DIN 2505, so werden nur unbefriedigende Werte über das Verhalten der Schraubenzusatzkraft FSA gewonnen. Weiterhin basiert die Berechnung der Momente, die auf die Flansche wirken, auf der Schraubenbetriebskraft FSB (GL. A 6) die vorhanden sein muss, um ein Abdichten zu gewährleisten. Die sich wirklich einstellende Betriebskraft bleibt bei der Ermittlung der Flanschbelastung unberücksichtigt.
- Eine nur auf die VDI-Richtlinie 2230 konzentrierte Vorgehensweise würde die ausführliche Berechnung der Spannungen in den verschiedenen Flanschebenen vernachlässigen.

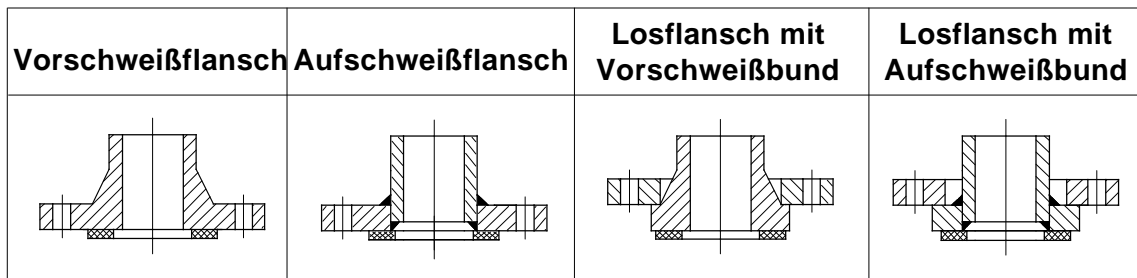
Erst bei einer Verkettung beider Verfahren können Aussagen mit befriedigender Sicherheit über die Flansch- und Schraubenbeanspruchungen getroffen werden.

Bei der Erarbeitung des Moduls wurde im wesentlichen auf die Berechnungsmethoden der genannten Verfasser zurückgegriffen. Der eigene Beitrag ist vor allem in der Verknüpfung beider Verfahren zu sehen. Weiterhin ist im Modul Apparateflansch der Anziehungsfaktor berücksichtigt worden. Damit werden geringere Sicherheiten bei der Spannungsanalyse bei  $\alpha_A > 1$  auftreten, was aber den wirklichen Gegebenheiten näher kommt.

### Festlegung des Geltungsbereiches

Mit dem Berechnungsmodul lassen sich Flanschverbindungen berechnen, die aus zwei rotationssymmetrischen Flanschteilen bestehen und die über einen Dichtring und Schrauben miteinander kraftschlüssig verbunden sind. Die Vorschriften gelten laut DIN 2505 für Nennweiten bis zu einem Durchmesser von 2000 mm. Zu dieser Gruppe gehören nicht Verbindungen, die bis zum Außenrand aufeinander aufliegen. Charakteristisch ist die Stülpung der Flanschblätter über die Dichtung.

Grundsätzlich werden immer zwei Flanschteile betrachtet. Sie können aus allen Kombinationen der vier in *Bild 6.1* gezeigten Flanschgeometrien bestehen.



*Bild 6.1: Darstellung der vier berechenbaren Verbindungstypen*

Es können Weichstoff-, Metall-Weichstoff- und Metaldichtungen bei der Berechnung über eine Kennziffer vorgegeben werden. Zusätzlich zum Innendruck und der Betriebstemperatur werden eine Vorspannung im Rohrsystem, sowie Kräfte und Momente im Einbau- und Betriebszustand berücksichtigt.

### Betrachtungen zum Berechnungsalgorithmus

Das Programm arbeitet als Nachrechnungsbaustein. Für den Schraubendurchmesser nach DIN 2505 erfolgt eine eigenständige Dimensionierung, der gefundene Durchmesser wird bei den Zwischenergebnissen ausgedrückt. Für den normalen Rechenlauf wird jedoch eine Schraubenvorgabe erwartet.

- Ermittlung der auftretenden Belastungen

Die gesamte Rohrkraft  $F_{RB}$  setzt sich aus der Rohrinndruckkraft  $F_{RP}$ , der Rohrzugkraft  $F_{RZ}$  und Rohrkraft aufgrund eines auftretenden Biegemoments  $F_{RM}$  zusammen.

$$F_{RB} = F_{RP} + F_{Rz} + F_{RM} \quad (A1)$$

Die Innendruckkraft  $F_p$  wird aus der Rohrinndruckkraft und der Ringflächenkraft  $F_{FP}$  berechnet.

$$F_p = F_{RP} + F_{FP} \quad (A2)$$

- Bestimmung der Dichtungskräfte

Es wird die notwendige Vorverformungskraft der Dichtung  $F_{DV}$  berechnet, die notwendig ist, um die Dichtung den Unebenheiten der Flansche anzupassen und die Poren zu schließen.  $F_{DV}$  ist unabhängig vom Betriebsdruck.

$$F_{DV} = \pi \cdot d_D \cdot K_0 \cdot K_{DV} \quad (A3)$$

Im Betriebsfall entlastet der auftretende Druck (bzw. Prüfdruck) die Dichtung. Es muss eine notwendige Betriebsdichtungskraft  $F_{DB}$  noch vorhanden sein, um die Abdichtung zu garantieren.

$$F_{DB} = \pi \cdot d_D \cdot p \cdot k_B \cdot s_D \quad (A4)$$

Weiterhin muss die Standkraft der Dichtung  $F_{Dg}$  ermittelt werden. Da laut DIN 2505 nur für Metaldichtungen die Berechnung von  $F_{Dg}$  vorgesehen ist, wird in diesem Fall nach dem Entwurf der DIN 2505 verfahren bzw. nach Schwaigerer.

- Schraubenkräfte

Für den Einbauzustand muss die Schraubenkraft  $F_{S0}$  die Rohrzugkraft und die notwendige Vorverformungskraft aufbringen.

$$F_{S0} = F_{DV} + F_{R0} \quad (A5)$$

Im Betriebszustand gilt:

$$F_{SB} = F_{DB} + F_{RB} + F_{Fp} \quad (A6)$$

- Interne Dimensionierung der Schraube

Unter Berücksichtigung der nach den Gleichungen A1 - A6 ermittelten Schraubenkräfte wird nach DIN 2505 der Kerndurchmesser der Schraube ermittelt.

$$d_3 = \sqrt{\frac{4}{\pi n} \cdot \frac{F_S}{K}} + c \quad (A7)$$

Spannungsanalyse, Berechnung der Widerstandsmomente in beiden Flanschen

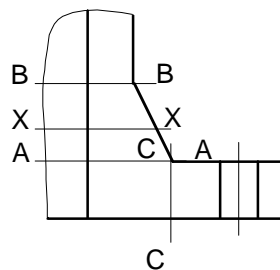


Bild 6.2.2: Kritische Ebene

Für die sich anschließende Spannungsanalyse werden zuerst Widerstandsmomente in den kritischen Ebenen für beide Flansche im Einbau und Betriebszustand berechnet. Das jeweils minimale Widerstandsmoment kommt dann in der sich anschließenden Festigkeitsbetrachtung zum Tragen. Wird ein Modul durch die entsprechende Kennziffer nur nach der DIN 2505 gerechnet, so erfolgt sofort die Festigkeitsbetrachtung und anschließend die Ausgabe der Ergebnisse. Im Berechnungsbaustein schließt sich jetzt die Berechnung nach der VDI-Richtlinie 2230 an.

- Ermitteln der Flanschnachgiebigkeiten

Es werden die Nachgiebigkeiten  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  und  $\delta_3$  nach den in der VDI-Richtlinie 2230 erläuterten Wegen für den Einbau und Betriebszustand für beide Flansche berechnet.

- Kraftverhältnis

Im Modul sind alle Verbindungskombinationen der vier Verbindungstypen Bild 6.1 zugelassen. Damit wird für die Berechnung des Kraftverhältnisses eine gegenüber der VDI-Richtlinie 2230 modifizierte Formel angegeben:

$$\Phi_{FL} = \frac{\delta_p - (\delta_{3o} + \delta_{3u})}{\frac{\delta_s}{m} + \delta_p + (\delta_{2o} + \delta_{2u}) - (\delta_{3o} + \delta_{3u})} \quad (A8)$$

Der Index "o" bezieht sich auf den oberen und "u" auf den unteren Flansch.

- Schraubenkräfte nach VDI 2230

Die notwendige Vorspannkraft  $F_{M \min}$  berechnet sich:

$$F_{M \min} = F_{DB} + (1 - \Phi_{FL})(F_{RB} + F_{FP}) + F_{ZD} \quad (A9)$$

Wir berechnen nach Gleichung A9 den Wert  $F_{M \min}$  für den Einbau- und Betriebszustand. Der Setzkraftverlust der Dichtungen im Betriebszustand  $F_{ZD}$  muss von außen vorgegeben werden. Die Schraubenzusatzkraft  $F$  ist dann:

$$F_{SA} = \Phi_{FL}(F_{RB} + F_{FP}) \quad (A10)$$

- Vergleich der zulässigen und notwendigen Schraubenkräfte - Verknüpfung von DIN 2505 und VDI-Richtlinie 2230

**1. Kontrolle:** Wird durch die nach VDI-Richtlinie 2230 berechnete Vorspannkraft (der untere Grenzwert, also ohne  $\alpha_A$ ) eine Kraft ermittelt, die oberhalb der Schraubenkraft  $F_{S0}$  liegt?

$$F_{M \min E} \geq F_{S0} \quad (A11)$$

Gilt die Beziehung A11, so garantiert die nach VDI 2230 errechnete Vorspannkraft, dass die notwendige Vorverformungskraft  $F_{DV}$  aufgebracht wird. Ist die Bedingung A11 nicht erfüllt, wird  $F_{M \min E}$  auf den Wert von  $F_{S0}$  gesetzt und die notwendige Vorspannkraft im Betriebsfall wird über das Verhältnis der Elastizitätsmodule neu berechnet.

**2. Kontrolle:** Für den Betriebszustand muss untersucht werden, ob die nach DIN 2505 ermittelte Kraft  $F_{SB}$  erreicht wird, die ein Abdichten im Betriebsfall garantiert.

$$F_{M \min B} + F_{SA} \geq F_{SB} \quad (A12)$$

Falls die Abfrage A12 positiv ist, wird auch die Forderung der DIN 2505 erfüllt. Da aber in Abhängigkeit von den Nachgiebigkeiten  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  und  $\delta_3$  das Kraftverhältnis  $\Phi_{FL}$  negativ werden kann, sind auch negative Schraubenzusatzkräfte denkbar. Ist die Bedingung A12 nicht erfüllt, so wird mit  $F_{SB}$  weiter unten das wirksame

Betriebsmoment errechnet. Der jeweils größere Teil der Gleichung A12 wird mit dem Anziehungsfaktor multipliziert, um den maximal möglichen Belastungswert zu erhalten.

- Bestimmen der wirksamen Momente und Sicherheiten, Abschließend wird die Festigkeitsbedingung für

den kritischen Flanschquerschnitt geprüft: 
$$\frac{M_{\max}}{W_{\text{krit}}} \leq \frac{K}{S} \cdot \frac{1}{z} \quad (\text{A13})$$

Für den Festigkeitswert K wird normalerweise die Streckgrenze des Flanschwerkstoffes  $R_{p0,2}$  gesetzt (bei Beachtung der Betriebstemperatur). Zusätzlich werden in der Festigkeitsbedingung A13 noch ein Sicherheitsbeiwert S und der Fließfaktor z eingesetzt.

**Allgemeine Kenngrößen.** Der Aufbau geht aus der *Tabelle – Standardwerte - Allgemeine Daten* hervor.

**Schraubendaten.** Der Aufbau geht aus der *Tabelle Standardwerte – Schraubentyp (DIN-Nr.) div. Parameter* hervor.

**Geometriedaten.** In Abhängigkeit von der ausgewählten Flanschverbindung werden für die oberen bzw. unteren Geometriedaten unterschiedliche Menüs angezeigt. Die Anzahl der Schrauben muss durch 4 ganzzahlig teilbar sein.

**Dichtungsdaten.** In einer programminternen Datei sind Dichtungsdaten der DIN 2505 gespeichert. Entsprechend der DIN werden die Dichtungen nach der Art, der Form und dem Werkstoff unterschieden. Die Kennziffer für die Dichtung setzt sich aus den Ziffern der einzelnen Bereiche zusammen.

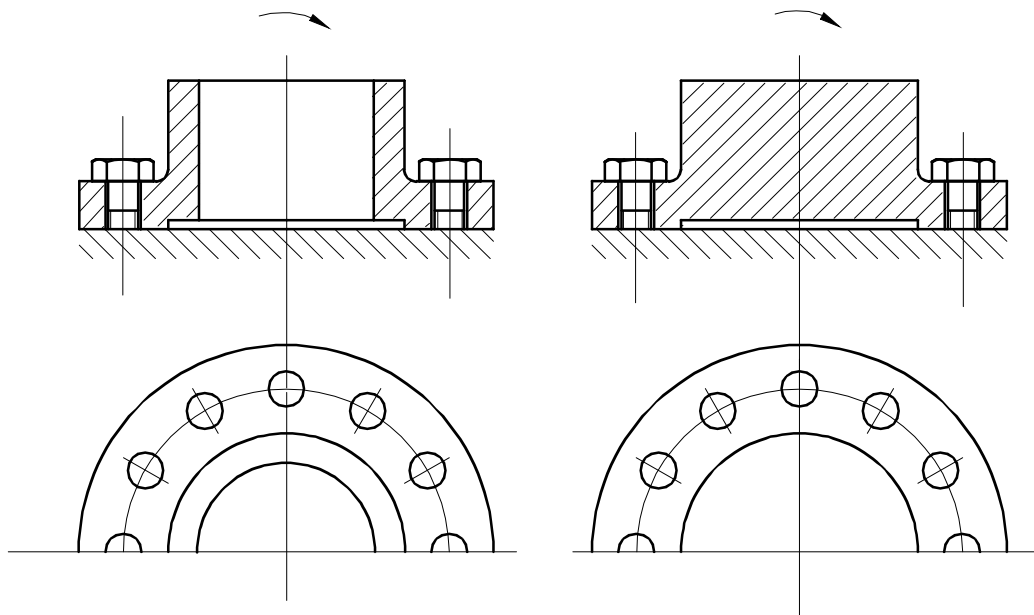
**Belastungsdaten.** Eine Flanschverbindung kann durch die aufgeführten Belastungen beansprucht werden. Die Betriebstemperatur kann hier, oder bei den Allgemeinen Kenngrößen vorgegeben bzw. verändert werden.

## Modul Mehrschraubenverbindung

Der Berechnungsmodul Mehrschraubenverbindung basiert auf einer Analyse bisher bekannter Berechnungsansätze, die kritisch untersucht und gegenüber gestellt werden. Die hohen Differenzen in der Aussage (etwa 200 %) unterstreichen die Notwendigkeit der Erarbeitung eines neuen Ersatzmodells für ein Berechnungsverfahren. Auf Grund von statischen Messungen an Stahlflanschen von Grote konnte eine Modellvorstellung erarbeitet werden, die das Flanschverhalten in bestimmten Bereichen sehr gut erfasst.

### Festlegung des Geltungsbereiches

Der vorgestellte Modul gilt für rotationssymmetrische Mehrschraubenverbindungen, die mit einem Biegemoment belastet werden. Die grundsätzlich in Frage kommenden Geometrien sind in *Bild 7.1* dargestellt. Für beide dort abgebildeten Verbindungssysteme (Anschluss voll oder Rohranschluss) sind jeweils die symmetrisch aufgebaute Verbindung, bestehend aus zwei gleichen Flanschelementen, und ein Flansch, der auf eine starr angenommenen Platte geschraubt ist, zugelassen (analog zur Darstellung der zulässigen



*Bild 7.1: Grundgeometrien der rotationssymmetrischen Mehrschraubenverbindung*

Balkenverbindungen).

### Theorie der Modellvorstellung

Der Aufbau eines Ersatzmodells zur Berechnung von rotationssymmetrischen Schraubenverbindungen wurde von vornherein auf eine in der Praxis einsetzbare Modellvorstellung orientiert.

Nach Auswertung der Versuchsergebnisse konnten die einzelnen Einflussgrößen ermittelt werden, von denen vor allem die Anschlusssteifigkeit die Höhe der Schraubenzusatzkraft bestimmt (*Bild 7.2.2*).

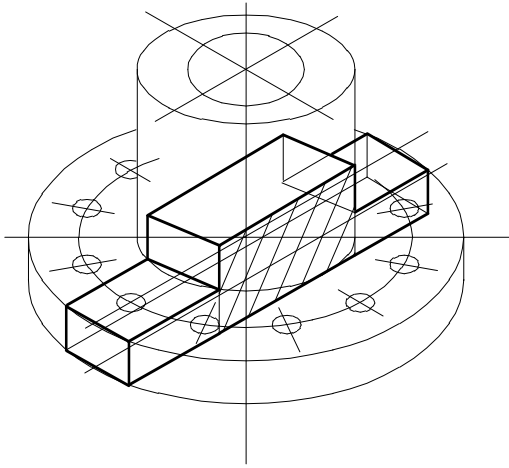


Bild 5.2.1: Struktur des Ersatzmodells

Offensichtlich wird aufgrund unterschiedlicher Anschlusssteifigkeiten das Biegeverhalten am Übergang vom Flanschblatt zum Flanschanschluss beeinflusst. Betrachtet man eine rotationssymmetrische Flanschverbindung, aus der ein Balkenelement in der Breite des Lochabstandes der Bohrlöcher geschnitten wird, so werden entsprechend den oben angestellten Überlegungen die beiden Teile des Flanschblattes durch Balkenelemente ersetzt.

Es stellt sich die Frage nach der Idealisierung des Rohranschlusses. Da bei konstanten Lasten eine Variation des Anschlussquerschnittes (z.B. Einbringen verschiedener Bohrungen) unterschiedliche Schraubenbelastungen ergeben hat, treten

offensichtlich verschiedene Kopplungsgrade auf, die das Biegeverhalten des Flanschblattes verändern. Dieses Übergangsverhalten lässt sich im Balkenmodell mit einem Ersatzmodell Balkenelement ersetzen, das je nach Anschlusssteifigkeit verschiedene Balkenhöhen hat, Bild 7.2.1. Der schraffierte Teil des Balkens muss derart beschaffen sein, dass die Balkenelemente des Flanschblattes in gleicher Weise wie das Gesamtmodell verformt werden.

Für die Erarbeitung des Ersatzmodells wurde zunächst die Breite der Struktur über den Lochabstand definiert:

$$b_{ers} = d_t \cdot \sin\left(\frac{180}{z}\right)$$

Der nächste Schritt ist die Festlegung der Betriebsbelastung für die Ersatzstruktur. Hier wird von der Krafftflussvorstellung ausgegangen, nach der sich die Momentenbelastung gleichmäßig über die Teilquerschnitte verteilen wird. Damit wird der Momentenanteil der Einzelstrukturen der jeweiligen Balkenbreite proportional. Für den Berechnungsmodul ergibt sich ein Momentenanteil, der sich aus dem Quotienten der Ersatzbreite zum Teilkreis berechnet.

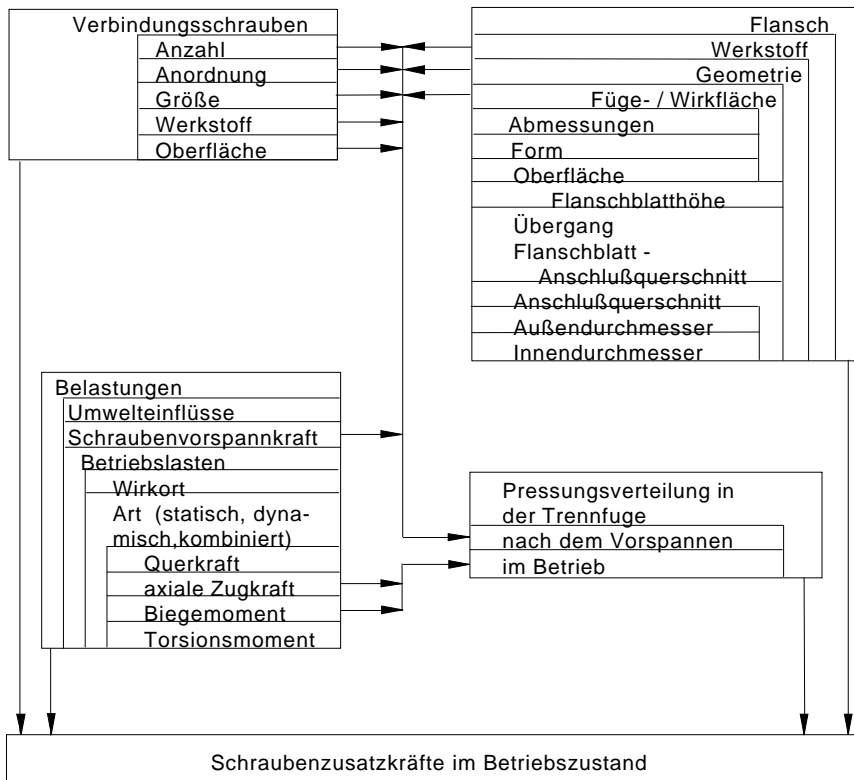
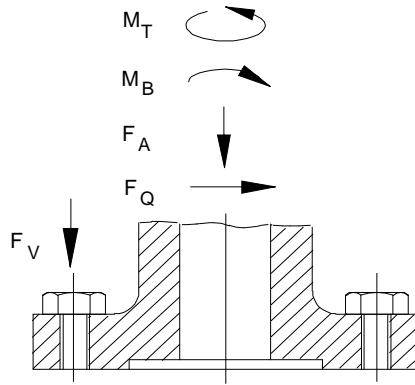


Bild 5.2.2: Trageverhalten von Mehrschraubenverbindungen, Einflußgrößen und Wechselwirkungen

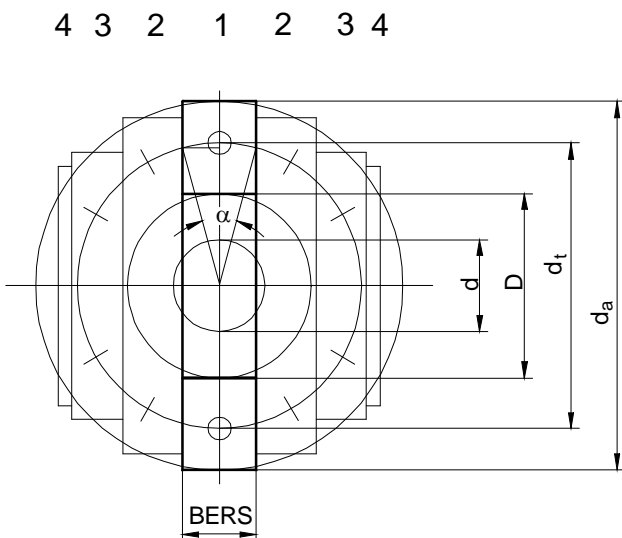


Bild 5.2.3: Modellvorstellung zur Ermittlung des Teilmomentes

Während für die Ermittlung der Ersatzbreite und des Momentenanteiles für die Ersatzstruktur eindeutige Festlegungen für deren Berechnung getroffen wurden, musste die Ersatzhöhe für das Modell empirisch ermittelt werden. Nachdem für einen Punkt einer vorgegebenen Flanschgeometrie die Schraubenzusatzkraft mit dem Modell bestimmt war, konnte man mit dieser Ersatzhöhe sofort alle weiteren Punkte für verschiedene Vorspannkraft, Betriebsmomente und Schraubenzahlen berechnen. Mit diesem Verhalten ist die vorangestellte Behauptung, dass sich das Steifigkeitsverhalten des

Anschlussquerschnittes durch ein Balkenelement ersetzen lässt, bestätigt.

Zusammenfassend kann zum vorgestellten Berechnungsmodell bemerkt werden:

- Es wurde ein Berechnungsmodell erarbeitet, das das Betriebslastverhalten biegemomentenbelasteter, rotationssymmetrischer Mehrschraubenverbindungen in guter Näherung erfasst. Das grundsätzlich nichtlineare Anwachsen der Schraubenzusatzkraft bei Betriebslast kommt bei den Berechnungen zum Ausdruck.
- Das Modell setzt die Kenntnis einer Ersatzhöhe voraus, die die Steifigkeitsverhältnisse des Anschlussquerschnitts auf einen Ersatzbalken transformiert. Bei den vorgenommenen Berechnungen wurde die Höhe des Ersatzbalkens empirisch anhand der Versuchsergebnisse bestimmt: Für Flanschgeometrien und Belastungen für die gesicherte Messergebnisse vorliegen, wird die Ersatzhöhe HERS programmintern bestimmt.
- Durch die bisher gewonnenen experimentellen Ergebnisse lassen sich noch keine allgemeingültigen Funktionen aufstellen, die es gestatten, für das in der Praxis übliche Verbindungsspektrum die notwendige Ersatzhöhe exakt zu bestimmen.
- Der linear zu bezeichnende Verlauf der Kurven zur Bestimmung der Ersatzhöhe HERS ermöglicht die Berechnung von Flanschverbindungen auch außerhalb der Proportionen der gemessenen Geometrien zumindest bei Kenntnis von zwei Messwerten durch Interpolation der Verbindungsgeraden.
- Zum gegenwärtigen Zeitpunkt können bei Verbindungen, die etwa den Proportionen der Serie der Messflansche entsprechen, folgende Empfehlungen für das Festlegen der Ersatzhöhe gegeben werden: Bei vollen Anschlussquerschnitten gilt  $HERS=1,5x_s$  (1,5 mal Flanschblattdicke) und bei Rohranschlussquerschnitten  $HERS=s$ . Wird die Ersatzhöhe kleiner gewählt, so werden größere Schraubenzusatzkräfte berechnet. Sehr große Werte für HERS ergeben zu kleine Sicherheiten bei Betriebslast.
- Bei niedrigen Belastungen kommt der Wahl der Ersatzhöhe keine große Bedeutung zu. In diesen Fällen kann die Ersatzhöhe gleich der Flanschblatthöhe gesetzt werden.
- Der Anwender dieses Moduls kann gesicherte Ergebnisse bei seinen Berechnungen erwarten, wenn die Proportionen seiner Verbindung etwa denen der Messflansche der Versuchsreihe entsprechen. Bei größeren Abweichungen der betrachteten Geometrie von den experimentell untersuchten Verbindungen hat man trotz einer gewissen Unsicherheit bei der Festlegung der Ersatzhöhe die Möglichkeit, seine Verbindung zu berechnen und durch Variation einzelner Parameter (neben der Ersatzhöhe: Blattdicke, Vorspannkraft, Überstand, Schraubenzahl, Anziehverfahren usw.) im Sinne einer Minimierung der Schraubenzusatzkraft, die Verbindung optimal zu gestalten.

**Allgemeine Kenngrößen.** Der Aufbau geht aus der *Tabelle – Standardwerte - Allgemeine Daten* hervor.

**Schraubendaten.** Der Aufbau geht aus der *Tabelle Standardwerte – Schraubentyp (DIN-Nr.) div. Parameter* hervor.

**Geometriedaten.** Besondere Erläuterungen für die Eingabe der Geometriedaten sind nicht erforderlich. Liegen die Geometrie- und Belastungsdaten innerhalb der unter diesem Kapitel angegebenen Grenzen, wird HERS

programmintern berechnet. Ist die Berechnung nicht möglich, erhält der Benutzer einen entsprechenden Hinweis und der Wert für HERS muss extern vorgegeben werden.

**Belastungsdaten.**Die Verbindung kann nur durch ein reines äußeres Biegemoment beansprucht werden. Es besteht die Möglichkeit, die Schraubenvorspannkraft FVOR extern vorzugeben.

## Berechnungsmodul Blindflansch und Kreisplatte (2 Platten)

Im Berechnungsmodul sind zwei unterschiedliche Berechnungsverfahren verwirklicht. Zum einen lassen sich Blindflansche (Flansch als Los- oder Festflansch mit jeweils Aufschweiß- oder Anschweißbund nach DIN 2505) berechnen, aber auch zwei direkt miteinander verschraubte Kreisplatten.

### **Blindflansche**

Das Berechnungsverfahren basiert im wesentlichen auf dem von S. Schwaigerer in "Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-Behälter- und Rohrleitungsbau" beschriebenen Formelwerk. Es wurde versucht, diese Berechnungsbeziehungen mit dem Formelwerk der VDI 2230 (Februar 2003) und den in DIN 2505 dargelegten Verfahren zu kombinieren. Inwieweit die Ergebnisse der Berechnungsverfahren auf die vom Anwender genutzten Geometrien und Lasten zu übertragen sind, sollte im Einzelfall anhand der angegebenen Literaturstellen sowie eventuellen Vergleichsmessungen geklärt werden. Zum Formelwerk sowie den Erläuterungen der DIN 2505 etc. wird auf den Modul Apparateflansch verwiesen, dessen Berechnungsprogramme in modifizierter Form (Last- und Momentverteilung) auch im Modul Blindflansch zur Anwendung kommen.

**Allgemeine Kenngrößen.** Der Aufbau geht aus der *Tabelle – Standardwerte - Allgemeine Daten* hervor.

**Schraubendaten.** Der Aufbau geht aus der *Tabelle Standardwerte – Schraubentyp (DIN-Nr.) div. Parameter* hervor.

**Geometriedaten.** Der Aufbau des oberen Flansches und die damit verbundenen unterschiedlichen Anforderungen gehen aus den Auswahlmenü hervor. Bei Losflanschen werden die erforderlichen Angaben mit den Angaben für den Bundflansch zusammen angefordert.

Bei der Kreisplatte wird die Höhe der Fase nicht angegeben, da sie programmintern immer als minimal angenommen wird. Die Anzahl der Schrauben muss durch 4 ganzzahlig teilbar sein.

**Dichtungsdaten.** In einer programminternen Datei sind Dichtungsdaten der DIN 2505 hinterlegt. Entsprechend der DIN werden die Dichtungen nach der Art, der Form und dem Werkstoff unterschieden. Die Kennziffer für die Dichtung setzt sich aus den Ziffern der einzelnen Bereiche zusammen.

**Belastungsdaten.** Die Blindflanschverbindung kann durch die aufgeführten Belastungen beansprucht werden. Die Betriebstemperatur kann hier, oder bei den Allgemeinen Kenngrößen vorgegeben bzw. verändert werden.

### Kreisplatte (2 Platten)

Von der Blindflanschverbindung völlig abgekoppelt ist die Berechnung von zwei direkt miteinander verschraubten Kreisplatten. Das Berechnungsverfahren basiert auf dem von Agatonovic vorgeschlagenen und begründeten Formelwerk. Abgeleitet wird dieses aus einem einfachen Beispiel, dessen Verhältnisse eindeutig sind. Die Verbindung wird in der Form eines elastischen Balkens dargestellt, entsprechend *Bild 8.3.1* gelagert und belastet.

Davon ausgehend wird die Berechnung der praxisrelevanten Zylinderdeckelverbindung als Kreisplattenschraubenverbindung verallgemeinert aus dem obigen Ansatz abgeleitet.

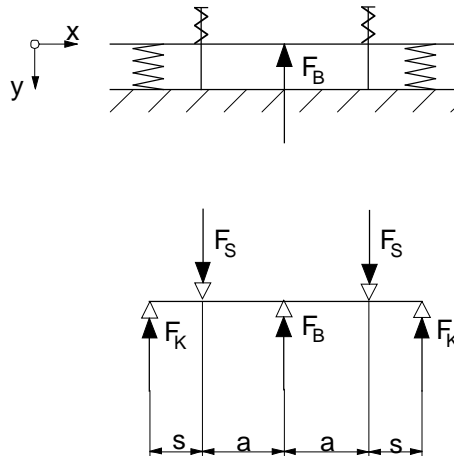


Bild 6.2.1: Verbindung mit zwei Schrauben

Der Ansatz ist erweitert und mit der VDI-Richtlinie 2230 kombiniert worden, um vollständige Berechnungsergebnisse zu erzielen. Auch hier sollte in Einzelfällen die angegebene Literatur herangezogen werden.

**Allgemeine Kenngrößen.** Der Aufbau geht aus der *Tabelle – Standartwerte - Allgemeine Daten* hervor.

**Schraubendaten.** Der Aufbau geht aus der *Tabelle Standartwerte – Schraubentyp (DIN-Nr.) div. Parameter* hervor.

**Geometriedaten.** Im Gegensatz zum Blindflansch werden bei der Kreisplatte nur wenige Geometrieangaben benötigt. Der Bohrungsdurchmesser kann in dem Menü der Schraubendaten verändert werden. Die Höhe der Fase wird nicht angegeben, da sie programmintern immer als minimal angenommen wird. Die Anzahl der Schrauben muss immer durch 4 ganzzahlig teilbar sein.

**Belastungsdaten.** Die Kreisplatte kann nur durch eine axialwirkende Kraft beansprucht werden. In besonderen Fällen kann zusätzlich die Vorspannkraft für die Schrauben vorgegeben werden.

## Berechnungsmodul rechteckige Mehrschraubenverbindungen

### Allgemeines zum Berechnungsmodul

Der Berechnungsmodul rechteckige Mehrschraubenverbindungen wird aus zwei Untermodulen gebildet. Es sind dies der Modul zur Berechnung rechteckiger Flansche mit Flächenauflage und der Modul zur Berechnung rechteckiger Kragflanschverbindungen. Der erstgenannte Untermodul gliedert sich wiederum in zwei Submodule. Der erste Submodul beruht auf der Theorie der Platten nach der Theorie von Kirchhoff, bei diesem ist die Schraubenanzahl auf maximal 12 begrenzt. Der zweite hat ein Balkenmodell als Grundlage, die Schraubenanzahl ist nicht beschränkt, muss aber ganzzahlig durch vier teilbar sein.

Beim Aufbau des Berechnungsmoduls für rechteckige Mehrschraubenverbindungen wurde aufgrund der durchgeführten Messreihen ein weiterführender Ansatz programmiert, der alle beteiligten Verbindungsschrauben berücksichtigt und auch die unterschiedlichen Lastfälle und Biegeachsen verarbeitet. Dieser Ansatz, der auf Plattentheorien basiert, soll näher beschrieben werden.

Bei Rechteckflanschen liegen die Schraubenachsen räumlich zueinander, so dass ein dreidimensionaler Spannungs- und Deformationszustand entsteht. Mit abgewandelten Berechnungsverfahren, die auf der eindimensionalen Balkentheorie basieren, sind diese Effekte nur bedingt nachvollziehbar.

Bei der Konzipierung des Berechnungsverfahrens wurde von folgenden Grundforderungen und Annahmen ausgegangen:

- Berücksichtigung der räumlichen Flanschstruktur,
- Klaffen der Verbindung möglich,
- Berücksichtigung des Einflusses des Anschlussquerschnitts,
- Berechnung unterschiedlicher Schraubenanordnungen,
- Vorgabemöglichkeit unterschiedlicher Belastungen, speziell Biegeachsen,
- Eindringen des Flansches in den Kontaktpartner nicht möglich.

Zusätzlich wurden für das Flanschmodell folgende Annahmen gemacht:

- Isotroper Werkstoff mit linear elastischem Verhalten (Gültigkeit des Hook'schen Gesetzes),
- Infinitesimal kleine Verformungen,
- quasistatische Lastaufbringung,
- Kraftangriff nur in der Mittelfläche des Flanschblattes,
- keine Berücksichtigung der Höhe des Anschlussquerschnitts,
- Vernachlässigung der Schraubenlöcher, was nach /7/ zulässig ist und durch Messwerte belegt wurde,
- Lagerung des Flanschblattes frei drehbar längs den Rändern auf einer unnachgiebigen Unterlage, d. h. kein Klaffen am Verbindungsrand.

Die angewendete Modellvorstellung als Grundlage des Berechnungsalgorithmus soll hier kurz erläutert werden. Die Verbindung wird auf ein Plattenbiegungsproblem zurückgeführt, es wird die Differentialgleichung aus der Kirchhoff'schen Plattentheorie herangezogen werden. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die angezogenen Schrauben eine von der Höhe der Vorspannkraft abhängige Einspannung des Flanschblattes darstellen. In erster Näherung wird der Einfluss der Höhe der Schraubenvorspannkraft vernachlässigt und als sehr groß gegenüber den auftretenden Schraubenzusatzkräften angenommen. Die Schrauben werden als gelenkige Auflagen betrachtet, mit einer Fläche, die den Schraubenköpfen entspricht.

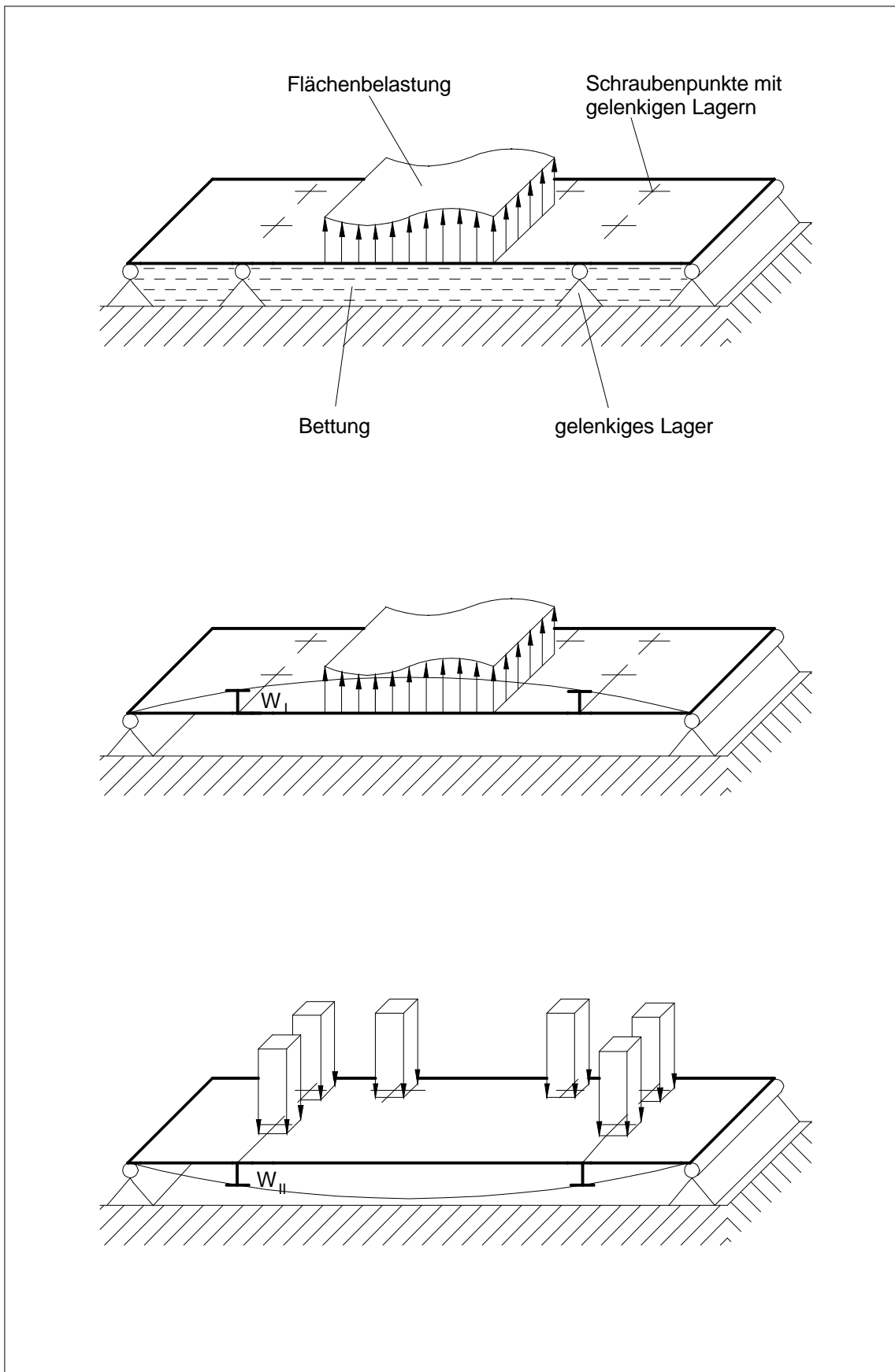


Bild 7.1: Modell der rechteckigen Schraubenverbindung

Im *Bild 7.1* (im oberen Teil) ist das mechanische, statisch unbestimmte Modell der rechteckigen Mehrschraubenverbindung im oberen Bildteil dargestellt. Mit dem Superpositionsverfahren wird dieses durch zwei statisch bestimmte Tragwerte (unterer Bildteil) ersetzt.

Mit dem Mehrstellenverfahren wird zunächst das Flanschmodell (*Bild 9.1* mittlerer Bildteil) ohne Bettung berechnet. Im zweiten Schritt wird dann bei Biegebelastung die Bettung durch zusätzliche Belastungen simuliert. Schließlich werden an den Schraubenpunkten die Flächenlasten eingepägt und erneut die Durchbiegungen berechnet. Es wird nun solange iteriert, bis die Durchbiegungen an den Schraubenpunkten zu 0 werden, womit die Schraubenkräfte und Schraubenzusatzkräfte bekannt werden (*Bild 9.1* unterer Bildteil).

Es sind Berechnungen der Schraubenanordnungen bei Zug- und Biegebelastung um die Symmetrieachsen der Flansche und um die Diagonale zulässig. Bei der Auswahl der Schraubenanordnung ist folgendes zu beachten. Es können Flansche mit maximal 12 Schrauben mit diesem Berechnungsmodul berechnet werden. Sind mehr als 12 Schrauben vorhanden, bieten sich zwei Möglichkeiten.

1. Wahl des anderen Berechnungsmoduls für rechteckige Flansche mit flächenhafter Auflage. Dieser Modul basiert auf einem Balkenmodell, ähnlich dem des Moduls rotationssymmetrische Mehrschraubenverbindungen. Es muss auch hier eine Ersatzhöhe des Balkens HERS vom Anwender, nach den für die rotationssymmetrischen Flansche geltenden Maßgaben, vorgegeben werden. Die Schraubenanzahl kann beliebig sein aber durch 4 teilbar. Es können entweder Biegemoment- oder Axialbelastungen berücksichtigt werden.

2. Die wirkliche Schraubenanzahl wird für die Berechnung auf maximal 12 Schrauben reduziert. Der Schraubenquerschnitt sollte dann so gewählt werden, dass die 12 Schrauben in Summe die gleiche Vorspannkraft erzeugen können wie die Schrauben des realen Flansches. Die Summe der Querschnittsfläche der 12 Schrauben muss also gleich der Summe der Querschnittsfläche der realen Schrauben sein.

### **Untermodul rechteckige Kragflansche**

Die Berechnung im Programm verläuft nach dem zu Beginn dieses Kapitels beschriebenen Verfahren. Dabei übernimmt das Mehrstellenverfahren die Bestimmung der Flanschblattnachgiebigkeit und der Kräfte im Schraubenpunkt. Auf Grundlage der VDI Richtlinie 2230 wird dann die Berechnung der Schraubenzusatzkräfte durchgeführt. Die Berücksichtigung verschiedener Belastungen (Zug/Druck und Biegung) erfolgt nach dem Superpositionsprinzip. Der Flansch wird im Programm mit einem Raster überzogen. Für einen quadratischen Flansch ergibt sich ein Netz mit 12x12 Knoten. Eine Aufstellung der Gleichungen für alle Gitterpunkte erfolgt im Programmabschnitt MATRIE. Die Belastungen des Flansches durch den Anschlussquerschnitt und der Schrauben müssen vorher den Geometriedaten entsprechenden Punkten zugeordnet werden. Die gesamte Matrixstruktur entspricht einer Bandmatrix mit der Bandbreite:

$$BB = 2a - 5 \quad (R1)$$

wobei a die Anzahl aller Koeffizienten des größten quadratischen Mehrstellenformelsterns beinhaltet. Bei den hier verwendeten Formelsternen ergibt sich eine maximale Bandbreite von  $BB = 101$ .

### Programmstruktur des Berechnungsmoduls

Nach dem Prüfen der Eingabedaten auf logische und syntaktische Richtigkeit verzweigt das Programm zum Berechnungsmodul. Dem Berechnungsmodul werden vom Gesamtsystem berechnete charakteristische Daten der Schrauben wie z. B. Schraubensteifigkeit und Spannungsquerschnitt übergeben. Das Programm übernimmt dann selbsttätig die Erstellung einer zur Geometrie des Flanschblattes passenden Netzstruktur. Die Implementierung der vorgegebenen Belastungen und Stützpunkte in die entsprechenden Knotenpunkte des Netzes erfolgt dann in den anschließenden Unterprogrammen.

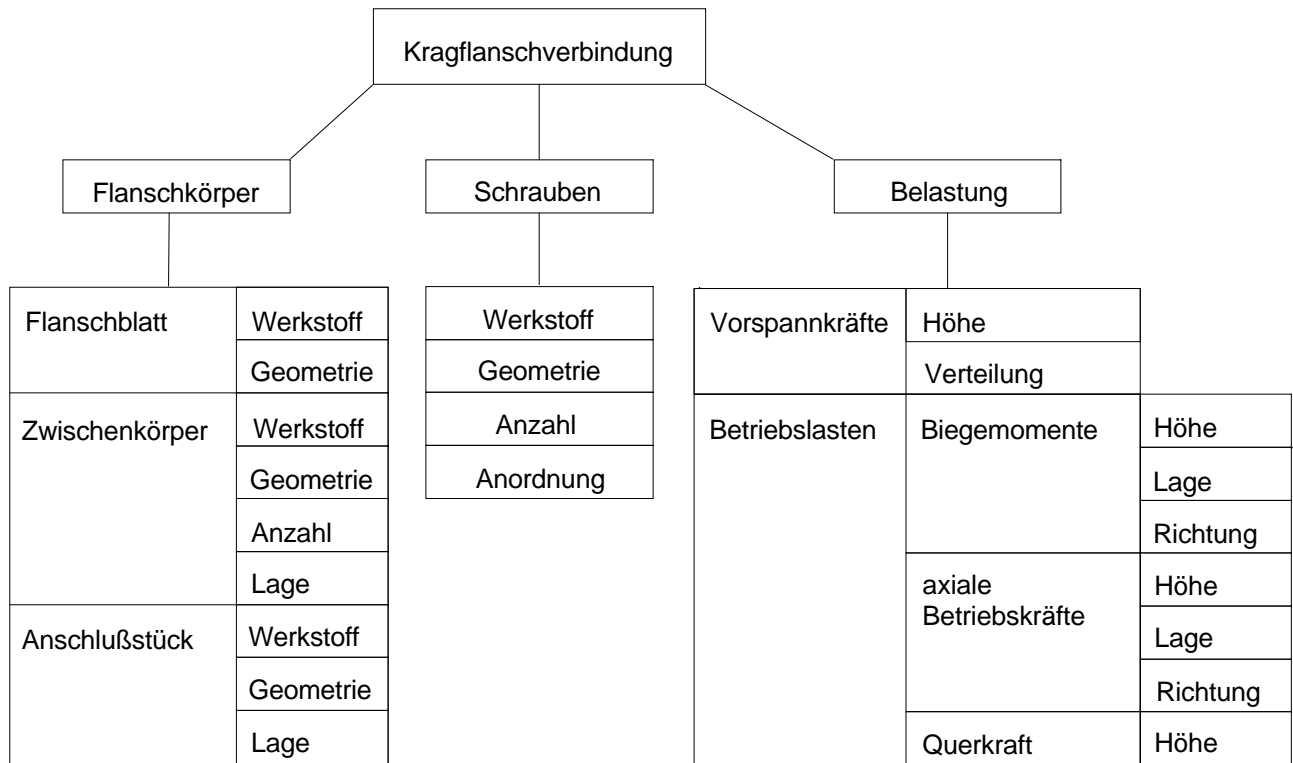


Bild 7.4.1.1: Mögliche Parameterkombination

Bei einem Zusammenfallen von Schraubenpunkten und Stützpunkt bricht das Programm die Berechnung ab und gibt eine Fehlermeldung aus. In der Fehlermeldung ist dann mit dem Hinweis einer Schraubenpunktverschiebung auch der Betrag der nötigen Verschiebung in mm angegeben. Ein Zusammenfallen der I, J Koordinaten der Netzstruktur (vom Programm erstellt) von Schraubenpunkt und Stützpunkt kann auch bei unterschiedlichen X, Y Koordinaten an den nächstliegenden Knotenpunkten der Netzstruktur nicht vermieden werden. Bild 9.4.1.1 beinhaltet eine Übersicht vorhandener Kombinationsmöglichkeiten einzelner Parameter im Berechnungsmodul, die über bestimmte Funktionen mit dem Ergebnis der Schraubenzusatzkraft FSA verbunden sind.

### Hinweise zu den Eingaben

Die Eingabevorbereitung sollte unbedingt nach den hier genannten Schritten durchgeführt werden. Es erleichtert die Arbeit der Eingabe und minimiert mögliche Eingabefehler, und es verschafft dem Anwender einen Überblick über die vom Modell gegebenen Optimierungsmöglichkeiten der Flanschverbindung.

## **Flanschblatt und Anschlussstück**

Zunächst können nur rechteckige Flanschblätter und Anschlussstücke gleicher Form und Fläche, jedoch unterschiedlicher Höhe und Werkstoffwahl berücksichtigt werden. Die Form und Höhe des Anschlussstückes bleibt unberücksichtigt. Die Fläche des Anschlussstückes entspricht der Belastungsfläche. Die Eingabe einer Durchgangsbohrung in Flanschblattmitte ist möglich. Weiterhin ist eine beliebige Eingabe von symmetrischer oder asymmetrischer Schraubenanordnung, Lage des Anschlussstückes und des Zwischenkörpers möglich. Der Anwender sollte eine Skizze von seinem zu berechnenden Flanschproblem anfertigen. Die Einführung des Koordinatensystems in der linken oberen Ecke des Flanschblattes kann beliebig gewählt werden. Mit der Festlegung des Koordinatensystems erfolgt eine bindende Eingabevorschrift aller Parameter. Die Eingabe der Schraubenkoordinaten kann in beliebiger Reihenfolge geschehen, sollte aber der Überschaubarkeit wegen stets mit einer bestimmten Systematik, z. B. im Uhrzeigersinn, erfolgen. Die Eingabe aller Ortkoordinaten der Schrauben, des Anschlussstückes und des Stützkörpers erfolgen in mm. Ebenso werden alle Geometrie beschreibenden Angaben in mm eingegeben. Die Eingabe der Bohrlochdurchmesser der Schraube kann wahlweise von Hand vorgegeben werden oder mit Hilfe der Schraubendatei bei Auswahl einer Normschraube ermittelt werden. Als oberes Flanschblatt gilt dasjenige, auf dem der Schraubenkopf bzw. die Mutter bei einer Stiftschraube aufliegt.

## **Zwischenkörper**

Die Eingabe von rechteckigen Zwischenkörpern und Dichtungen unterschiedlicher Höhe und E-Modul ist möglich (z. Zt. auf vier Zwischenkörper begrenzt).

Die Eingabe der Parameter zur Bestimmung der Höhe der einzelnen Zwischenkörperelemente erfolgt getrennt und unabhängig von Nachbarelementen. Alle Parameter zur Bestimmung eines Elementes werden durch einen gemeinsamen Index erfasst, wobei die Reihenfolge der Elementeingabe beliebig sein kann.

Die Eingabe der Parameter für die Stützung des Flanschblattes erfolgt einmalig und richtet sich nach dem unmittelbar am Flanschblatt anschließenden Zwischenkörperelement. Die für die Berechnung der Zwischenkörpernachgiebigkeit relevante Auflagefläche entspricht der sich gemeinsam überdeckenden Fläche aller Zwischenkörper.

Aus der sich ergebenden gemeinsamen Fläche, der jeweiligen Zwischenkörperhöhe und dem E-Modul wird dann die Nachgiebigkeit errechnet. Die Nachgiebigkeit eines jeden einzelnen Zwischenkörpers kann auch separat eingegeben werden.

## **Schraubendaten**

Die Eingabedaten der Schraubengeometrie, der Festigkeitswerte und der Werkstoffauswahl entsprechen den Daten in den anderen Modulen. Die manuelle Eingabe von Schraubenspezifikationen zur Berechnung von Schraubennachgiebigkeiten ist ebenfalls möglich.

## **Belastungsdaten**

Berücksichtigt werden Biegemomente um die Quer-, Längs- und Diagonalachse sowie Zug- und Druckbelastung einzeln oder in beliebiger Kombination. Die Implementierung von Flächen- und Punktlasten in symmetrischer und asymmetrischer Anordnung erfolgt über die Vorgabe der Anschlussstücklage. Bei Eingabe

einer Querkraft und eines Haftreibungswertes in einer beliebigen Trennfuge wird überprüft, ob die errechnete Restklemmenkraft noch ausreichend Sicherheit gegen Rutschen bietet.