



# Diplomarbeit

Wellenberechnung von Radialventilatoren auf kritische Spannungen und  
kritische Drehzahl in Visual Basic für Excel

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
Master of Science unter der Leitung von

A.o.Univ.Prof. Dr.techn. Manfred Grafinger

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik  
FB Maschinenbauinformatik und Virtuelle Produktentwicklung

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von  
Hossein Zokaei  
Matrikelnummer:1329377  
Eslarngasse1/64-1030 Wien

# Vorwort

An dieser Stelle möchte ich Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Grafinger für die Möglichkeit zur Abfassung dieser Diplomarbeit am Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik danken.

Ganz besonders für die hervorragende Betreuung, die wesentlich dazu beitrug, die Arbeit in die richtigen Bahnen zu lenken und erfolgreich abzuschließen.

Der Firma Sirocco „LUFT UND UMWELTTECHNIK“ GmbH in Adamovichgasse 3 A-1230 Wien sei gedankt für die zur Verfügungsstellung der benötigten Unterlagen.

Mein Dank gilt auch den vielen anderen Mitarbeitern und Diplomanden des Instituts, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen und für das sehr angenehme Arbeitsklima.

Gewidmet sei diese Arbeit meinen Eltern und Partnerin, die mich in jeder Situation unterstützen und durch die das Studium erst möglich wurde.

# Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Wellenberechnung von Radialventilatoren auf kritische Spannungen und kritische Drehzahl in Visual Basic für Excel.

Die untersuchten Modelle basieren auf zwei Radialventilatoren der Firma Sirocco „LUFT UND UMWELTTECHNIK“ GmbH.

Die Berechnungen werden mit dem PTC Mathcad Prime v4.0 durchgeführt und in Visual Basic für Excel als Userform für die Firma Sirocco programmiert.

Mittels Berechnungsmethoden werden verschiedene Betriebspunkte programmiert und aus den Ergebnissen die entsprechenden Kriterien errechnet und mit den vom Hersteller vorgegebenen Konstruktionen und Kriterien verglichen.

# Inhaltsverzeichnis

<i>Vorwort</i> .....	1
<i>Kurzfassung</i> .....	2
<i>Einleitung</i> .....	8
1.1 Aufgabenstellung.....	8
1.2 Begriffsbestimmung .....	8
1.3 Ventilatorbauarten .....	8
1.3.1 Axialventilatoren.....	9
1.3.2 Querstromventilatoren .....	9
1.3.3 Diagonalventilatoren.....	10
1.3.4 Radialventilatoren .....	10
1.4 Hauptbetriebsdaten von Ventilatoren .....	12
1.4.1 Volumenstrom.....	12
1.4.2 Druckerhöhung.....	13
1.4.3 Leistung.....	14
1.4.4 Wirkungsgrad.....	15
1.5 Kennzahlen .....	16
<i>Beschreibung der Radialventilatoren</i> .....	18
2.1 Bauformen und Anordnungen .....	18
2.1.1 Direktantrieb (DA).....	18
2.1.2 Riemen-Antrieb (RA) .....	18
2.1.3 Kupplung-Antrieb (KA).....	19
2.1.4 Beidseitige Lagerung (BL).....	19
2.1.5 Bauteile eines Kupplungs-Antriebes.....	20
2.1.6 Bauteile eines Direkt-Antriebes .....	21
2.1.7 Bauteile eines Riemen-Antriebes .....	21
<i>Wellenberechnung</i> .....	23
3.1 Allgemeines .....	23
3.1.1 Anwendungsgrenzen.....	24
3.2 Überschlag und genaue Berechnung nach DIN 743.....	26
3.2.1 Überschlagsberechnung auf Torsion und auf Biegung.....	26
3.2.2 Genaue Wellenauslegung nach DIN 743 .....	28
3.3 Rechnerische Ermittlung der kritischen Drehzahl.....	34
3.3.1 Berechnung des mittleren Trägheitsmoments.....	35
3.4 Passfederberechnung nach DIN 6892-Methode C .....	37
3.4.1 Kupplung-Welle-Verbindung .....	38
<i>Wälzlager</i> .....	40
4.1 Wälzlager-Anordnungen in Ventilatoren .....	40
4.1.1 Fliegende Anordnung.....	40
4.1.2 Zwischen zwei Lagern .....	42
4.2 Wälzlagerberechnung .....	43

<i>VBA in Excel</i> .....	47
5.1 Allgemeines .....	47
5.1.1 Programmentwicklung mit Visual Basic .....	47
5.1.2 Aufbau eines Visual Basic - Programms .....	48
5.2 Die wichtigsten Bedienungselemente .....	48
5.2.1 Die Oberfläche .....	48
5.2.2 Das Projektfenster .....	49
5.2.3 Das Formularentwurfsfenster .....	49
5.2.4 Das Eigenschaften - Fenster .....	49
5.2.5 Die Werkzeugsammlung / Toolbox .....	50
5.2.6 Die Menü- und Symbolleiste .....	50
5.2.7 Das Farbpaletten - Fenster .....	51
5.2.8 Das Menüentwurfs - Fenster .....	51
5.2.9 Das Programmcode - Fenster .....	51
5.3 Formularentwurf .....	53
5.3.1 Einfügen von Steuerelementen in ein Formular .....	53
5.3.2 Steuerelemente beschriften .....	54
5.3.3 Formulareigenschaften setzen .....	54
5.3.4 Der Menüentwurf .....	54
5.3.5 Den Programmcode schreiben .....	56
5.3.6 Ereignisprozeduren .....	57
5.3.7 Programmaufruf .....	60
5.3.8 EXE-Datei erstellen .....	60
5.3.9 Grundeigenschaften .....	61
5.3.10 Formularsteuerelemente .....	61
5.4 Programmbeispiel von Modellwelle .....	65
5.4.1 Festigkeitsberechnung .....	65
5.4.2 Userform der Berechnungen .....	67
<i>Zusammenfassung und Ausblick</i> .....	74
<i>Literaturverzeichnis</i> .....	75
<i>Abbildungsverzeichnis</i> .....	76
<i>Tabellenverzeichnis</i> .....	77

# Nomenklatur

---

$\dot{V}$	Volumenstrom
$\dot{m}$	Massenstrom
$D_q$	Spezifischer Durchmesser
$p_0$	Atmosphärendruck
$p_{st}$	Statischer Druck
$P_d$	Dynamischer Druck
$P_t$	Total Druck
$Y_t$	Totale Förderarbeit
$Y_f$	Förderarbeit
$n_q$	Spezifische Drehzahl
$P$	Leistung
$m_L$	Laufradgewicht
$m_k$	Kupplungsgewicht
$m_W$	Wellengewicht
$f_Z$	Zuschlagfaktor für Frischluftgebläse
$R_Z$	Oberflächenrauheit
$n$	Drehzahl
$K_S$	Stoßfaktor
$K_A$	Anwendungsfaktor
$M_{nenn}$	Nenntorsionsmoment
$M_t$	Äquivalenter Torsionsmoment
$d_{min.t}$	Minimum-Durchmesser bei reiner Torsionsbeanspruchung
$G_F$	Gewichtskraft des Laufrades
$F_U$	Unwuchtkraft
$L_{abs}$	Absatzabstand
$r_{abs}$	Kerbradius
$t_{abs}$	Kerbtiefe
$F_b$	Lagerreaktion am Lager B
$F_a$	Lagerreaktion am Lager A
$M_{bmax}$	Maximaler Biegemoment
$M_{GEH}$	Moment bei Gestaltsänderungsenergie Hypothese (GEH)
$d_{GEH}$	Ermittelter Durchmesser nach GEH
$\sigma_B(d_B)$	Zugfestigkeit von Probestab
$\sigma_S(d_B)$	Streckgrenze von Probestab
$\sigma_{zdw}(d_B)$	Zug/Druck Wechselfestigkeit von Probestab
$\sigma_{bw}(d_B)$	Biegewechselfestigkeit von Probestab
$\tau_{tw}(d_B)$	Torsionswechselfestigkeit von Probestab
E-Modul	Elastizitätsmodul
$M_{abs}$	Maximale Biegung an der Kerbstelle
$W_b$	Widerstandsmoment bei Biegung
$W_\tau$	Widerstandsmoment bei Torsion
$\sigma_{ba}$	Biegespannungsamplitude
$\tau_{ta}$	Torsionsspannungsamplitude
$K_{1(eff)S}$	Technologischer Größeneinflussfaktor für Streckgrenze
$K_{1(eff)B}$	Technologischer Größeneinflussfaktor für Zugfestigkeit

$d_B$	Bezugsdurchmesser
$\sigma_s(d)$	Bauteil Streckgrenze
$\sigma_B(d)$	Bauteil Zugfestigkeit
$K_{2(d)}$	Technologischer Größeneinflussfaktor
$K_{F\sigma,\tau}$	Einflussfaktor der Oberflächenrauheit
$K_V$	Verfestigungsfaktor
$\alpha_\sigma$	Formzahl für Biegung
$\alpha_\tau$	Formzahl für Torsion
$G'_\sigma$	Spannungsgefälle für Biegung
$G'_\tau$	Spannungsgefälle für Torsion
$n_\sigma$	Stützzahl für Biegung
$n_\tau$	Stützzahl für Torsion
$\beta_\sigma$	Kerbwirkungszahl für Biegung
$\beta_\tau$	Kerbwirkungszahl für Torsion
$K_\sigma$	Gesamteinflussfaktor für Biegung
$K_\tau$	Gesamteinflussfaktor für Torsion
$\sigma_{bWK}$	Bauteil Biege-wechselfestigkeit
$\tau_{tWK}$	Bauteil Torsions-wechselfestigkeit
$\varphi_{\sigma k}$	Mittlempfindlichkeit Biegung
$\varphi_{tk}$	Mittlempfindlichkeit Torsion
$\sigma_{mv}$	Vergleichsmittelspannung
$\sigma_{bADK}$	Ertragbareamplitude Biegung
$\tau_{tADK}$	Ertragbareamplitude Torsion
$S_{mind}$	Sicherheit gegen Dauerbruch
$\sigma_{FK}$	Fließgrenze Biegung
$\tau_{FK}$	Fließgrenze Torsion
$S_{ming}$	Sicherheit gegen Gewaltbruch
$J_M$	Mittlerer Trägheitsmoment
$f$	Durchbiegung
$n_k$	Kritische Drehzahl
$i_{pf}$	Anzahl der Passfeder
$L_{pf}$	Passfederlänge
$h_{pf}$	Passfederhöhe
$t_{pf}$	Wellennuttiefe
$b_{pf}$	Passfederbreite
$l_{tr.pf}$	Tragende Länge der Passfeder
$\varphi_{pf}$	Traganteil
$M_{zul.pf}$	Zulässiger Torsionsmoment
$f_L$	Lastspitzenhäufigkeitsfaktor
$C_r$	Dynamische Tragzahl
$P_{ur}$	Ermüdungsgrenzbelastung
$d_{innen}$	Bohrungsdurchmesser
$D_{Außen}$	Außendurchmesser
$D_{ml}$	Mittlerer Lager Durchmesser
$M_{spitz.pf}$	Spitzentorsionsmoment
$L_{10}$	Nominelle Lebensdauer
$a_1$	Lebensdauerbeiwert

$\eta_c$	Verunreinigungsbeiwert
$\nu_1$	Erforderliche kinematische Viskosität
$\nu_{tat}$	Tatsächliche Betriebsviskosität
$\kappa$	Viskositätsverhältnis
$\delta$	Durchmesserzahl
$\sigma$	Laufzahl
$\rho$	Dichte
$\rho_m$	Mittlere Dichte

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen folgende Aufgaben bearbeitet werden:

- Einarbeitung in die Konstruktion und Bauformen des Herstellers
- Erarbeitung einer Methode zur Vorauslegung der Wellen für kritische Drehzahl
- Erarbeitung der Vorauslegung auf kritische Spannungen
- Programmierung der Auslegungsmethoden in VisualBasic für Excel

Für den Radialventilator liegen vom Hersteller die technischen Zeichnungen und Daten vor. Die Berechnung der Ventilatorwelle ist mit PTC Mathcad Prime v4.0 und Visual Basic durchzuführen. Ziel dieser Diplomarbeit ist die Berechnungen als Userform in Visual Basic zu programmieren.

### 1.2 Begriffsbestimmung

Ventilatoren sind ein bedeutender Bestandteil aller Lüftungstechnischen Anlagen und dementsprechend wichtig für deren Funktion und Aufgabenerfüllung. Sie gehören nach der heutigen Definition zu den Strömungsmaschinen, wobei mechanische Energie in Strömungsenergie umgewandelt wird. Ventilatoren werden hauptsächlich zur Förderung von Luft oder anderen, im wesentlichen gasförmigen Medien verwendet, wobei sie sich durch eine relativ geringe Druckerhöhung (Druckverhältnis  $p_2/p_1 \leq 1,3$ ) von den Verdichtern abgrenzen.

### 1.3 Ventilatorbauarten

Die Einteilung der Ventilatorbauarten erfolgt nach ihrer äußeren geometrischen Gestalt ,d.h. den Konturen von Laufrad und Gehäuse, sowie nach der Durchströmung, d.h. der Bewegungsrichtung des Fördermediums im Laufrad, in Axial-, Querstrom-, Diagonal-, und Radialventilatoren. Ventilatoren sind jedoch auch nach anderen Gesichtspunkten klassifizierbar, z.B. nach Anschluss, Antrieb, Druckbereich, Betriebsbedingungen, usw. Üblich sind auch spezielle Bezeichnungen für die verschiedenen oft branchentypisch vorkommenden Einsatzfälle, womit meist auch die Bauart der Typ und die konstruktiven Besonderheiten gekennzeichnet sind.

### 1.3.1 Axialventilatoren

Beim Axialventilator wird das Laufrad in axialer, d.h. in Richtung der Drehachse, durchströmt. Die Zuströmung zum Laufrad erfolgt entweder in einer Einlaufdüse, einem Rohr oder einem Saugkasten. In Abbildung 1.1 ist ein Axialventilator mit Einlaufdüse und Vorleitrad dargestellt.

Das Laufrad besteht aus einer Nabe, die in radialer Richtung die Schaufeln enthält.

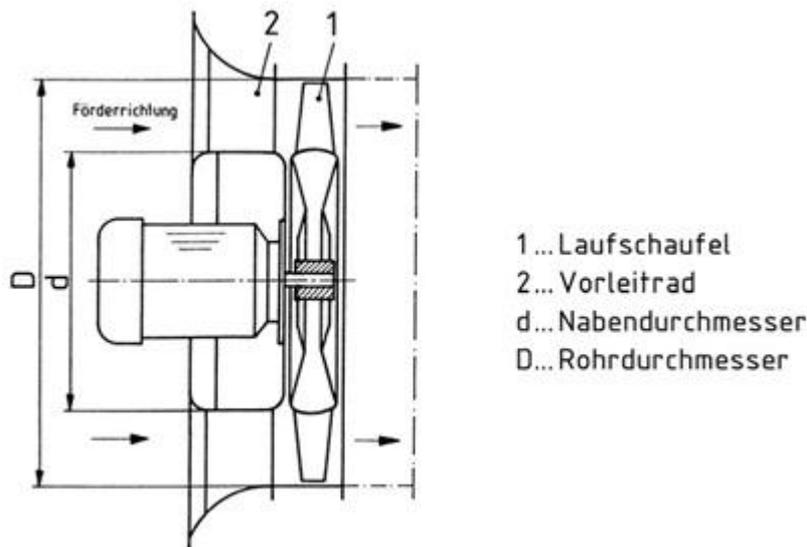


Abbildung 1.1: Axialventilator mit Vorleitrad [9]

Innerhalb der Axialbauarten gibt es verschiedene Typen, die sich neben unterschiedlichen Laufschaufelwinkel im wesentlichen durch das Nabenverhältnis  $d/D$  unterscheiden. Ventilatoren mit gleichem Nabenverhältnis, aber unterschiedlichen Schaufelstellungen werden auch als Typenfamilien bezeichnet.

Ganz allgemein gilt: Mit dem Nabenverhältnis steigt das Verhältnis von Gesamtdruckerhöhung zum Volumenstrom.

### 1.3.2 Querstromventilatoren

Die Querstromventilatoren sind sogenannte Gleichdrucklaufräder, d.h. sie erzeugen im wesentlichen Geschwindigkeit, die durch einen Austrittsdiffusor in statischen Druck umgewandelt wird. Dem Diffusor kommt hier aufgrund der Geschwindigkeits- Druckumwandlung eine sehr wesentliche Rolle zu. Der Querstromventilator besteht aus einem trommelförmigen Laufrad in radialer Bauform mit zahlreichen vorwärtsgekrümmten Schaufeln und dem Gehäuse, das sich aus dem Einlaufkanal und dem Diffusor zusammensetzt. Die prinzipielle Wirkungsweise ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

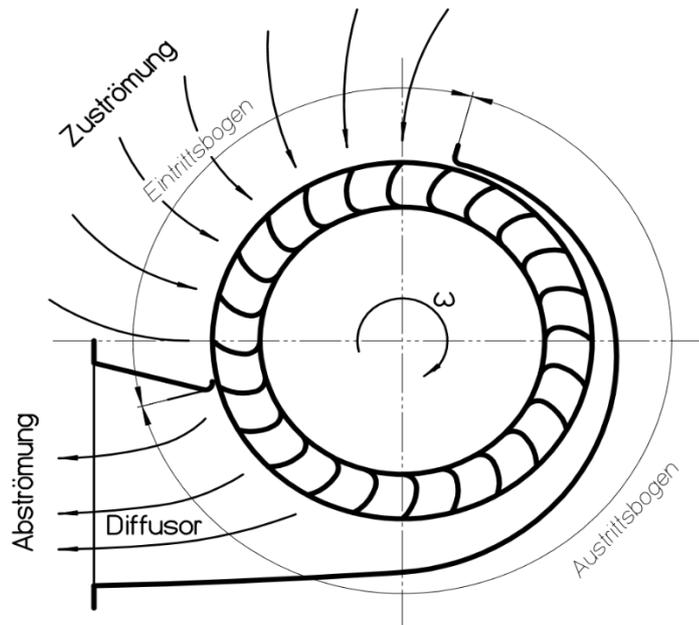


Abbildung 1.2: Querstromventilator

### 1.3.3 Diagonalventilatoren

Diagonalventilatoren liegen in Ihrer Charakteristik zwischen Axial- und Radialventilatoren. Das Laufrad wird in einer axialen und radialen Komponente durchströmt. Sie besitzen eine axiale Zuströmung und eine diagonale Laufradaustrittsströmung, die durch ein Gehäuse in eine axiale oder radiale Abströmung umgelenkt werden kann. Diagonalventilatoren erbringen im allgemeinen eine größere Druckerhöhung als ein Axialventilator und mehr Volumenstrom als ein Radialventilator.

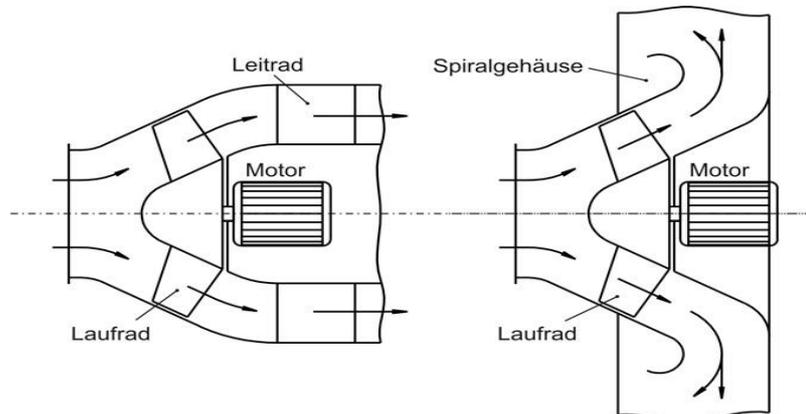


Abbildung 1.3: Diagonalventilator

### 1.3.4 Radialventilatoren

Bei den Radialventilatoren strömt die Luft dem Laufrad im allgemeinen drallfrei zu und zunächst ebenfalls axial durch den Ansaugstutzen ein. Anschließend wird sie in die radiale Richtung umgelenkt. Bei der zentrifugalen Durchströmung des Radialrades entsteht durch die unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten zwischen dem Eintrittsdurchmesser  $d$  und dem Austrittsdurchmesser  $D$  des Schaufelgitters eine Beschleunigung, welche zu einem zusätzlichen Druckanstieg führt.

Dieser ist meist so groß, dass der Volumenstrom in gleicher Richtung wie im Auslegungsfall auch bei umgekehrter Drehrichtung des Laufrades, also radial nach außen, strömt. Auf richtige Drehrichtung muss deshalb bei Radialventilatoren besonders geachtet werden. Sonst fehlt es bei einer falschen Polung des Antriebsmotors meist an Volumenstrom und Druckerhöhung, der Wirkungsgrad sinkt stark ab, die Leistungsaufnahme steigt an, und es besteht die Gefahr einer Motorüberlastung [9].

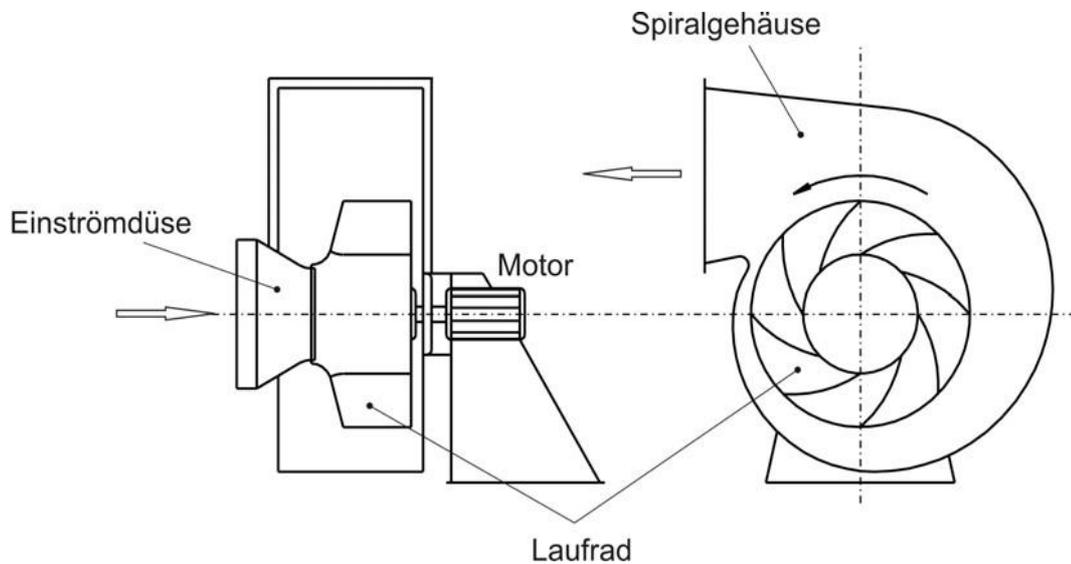


Abbildung 1.4: Skizze Radialventilator

Der schaufelfreie Raum bis zum Laufradeintritt einschließlich Spaltausführung ist sorgfältig zu gestalten, so dass eine ungestörte Zuströmung zum Laufrad erfolgen und eine Ablösung der Wandgrenzschicht von der Raddecke und vom Radboden vermieden wird. Das setzt auch bei den Radialventilatoren eine ungestörte Zuströmung zum Ventilator voraus, wie sie zwar auf Prüfständen, in der Praxis aber nicht oft vorkommt. Der Anlagenbauer muss deshalb Störungen, wie Verzögerungen, Umlenkungen und Drosseleinrichtungen vor einem Ventilator vermeiden. Einbaufehler ausgeschlossen, muss das Radialrad in die gleiche Richtung drehen, wie das Spiralgehäuse ausbläst. Als Sammelgehäuse umschlingt es das Laufrad und erweitert sich mit zunehmendem Umschlingungswinkel  $\varphi$ , beginnend bei der Gehäusezunge. Aus fertigungstechnischen Gründen werden vorwiegend eckige Gehäusequerschnitte mit parallelen Seitenwänden verwendet. Je nach Betriebspunkt des Ventilators hat das Gehäuse nicht nur eine Sammelfunktion. Es wirkt bei kleinen Volumenströmen auch als Diffusor, indem es die Strömung hinter dem Laufrad verzögert. Bei großen Volumenströmen hingegen beschleunigt es mitunter und arbeitet dann unter den Bedingungen des freien Ausblasens als Drosseleinrichtung. Ähnlich wie bei den Axialventilatoren unterscheidet man bei den Radialventilatoren die einzelnen Typen bzw. Typenfamilien durch das Durchmesser Verhältnis  $d/D$ , dem ein bestimmter Bereich des Radbreitenverhältnisses  $b/D$  und des Gehäusebreitenverhältnisses  $b_{sp}/D$  zugeordnet ist. Durch unterschiedliche Form der Schaufeln können die Typen innerhalb einer Typenfamilie noch variiert und damit Einfluss auf den Verlauf und die Lage der Kennlinie genommen werden.

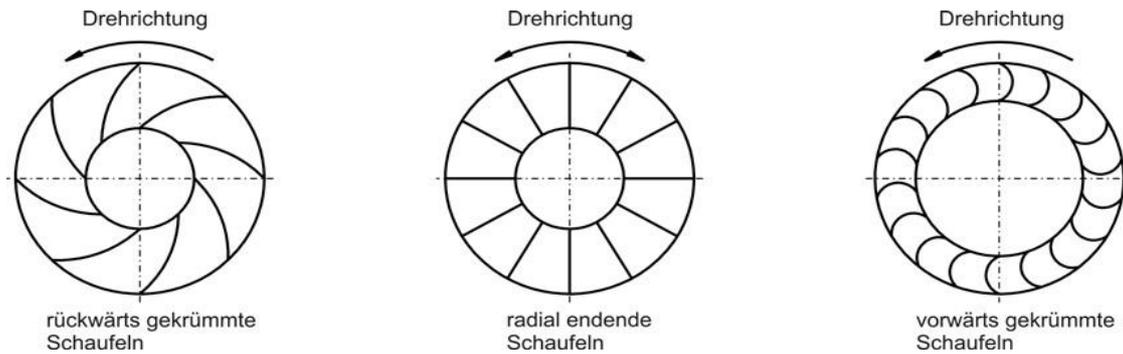


Abbildung 1.5: Laufradformen von Radialventilatoren

Schaufeln mit kleineren Austrittswinkeln  $\beta_2 < 90^\circ$  nennt man rückwärts gekrümmt. Mit ihnen sind im allgemeinen höhere Wirkungsgrade möglich. Mit zunehmendem Schaufelaustrittswinkel  $\beta_2$  nimmt grundsätzlich das Verhältnis von statischer Druckerhöhung im Laufrad zur Gesamtdruckerhöhung, auch Reaktionsgrad genannt, ab und der Anteil der Geschwindigkeitsenergie zu. Die Umsetzung dieser Energie in Druck ist wieder nur durch eine verlustbehaftete Verzögerung möglich [3].

Radial endende Schaufeln haben einen Austrittswinkel von  $\beta_2 = 90^\circ$ . Laufräder mit geraden, radialstehenden Schaufeln haben für beide Drehrichtungen (ohne Spiralgehäuse) gleiche Förderströme und gleiche Druckerhöhung. Sie haben weiterhin den Vorteil, weniger empfindlich gegen Verschmutzung, Verklebung und Anbackungen bei Staub- und Späneförderung zu sein.

Man spricht von vorwärts gekrümmten Schaufeln, wenn der Schaufelaustrittswinkel  $\beta_2 > 90^\circ$  ist. Die Schaufel ist dann stark gekrümmt, und die Schaufelaustrittskante zeigt in Drehrichtung.

## 1.4 Hauptbetriebsdaten von Ventilatoren

Bei der Auslegung bzw. Auswahl eines Ventilators sind die Hauptbetriebsdaten von entscheidender Bedeutung. Diese sind der Volumenstrom, Druckerhöhung, spezifische Förderarbeit, Leistung und der Wirkungsgrad [3].

Aus diesen Größen werden die Kennlinien berechnet und die dimensionslosen Kennzahlen abgeleitet.

### 1.4.1 Volumenstrom

Der Volumenstrom  $\dot{V}$  eines Ventilators ist das zeitlich durch den Ventilator strömende Volumen, bezogen auf den Ansaugzustand, d.h. auf den Druck  $P_1$  und die Temperatur  $T_1$  am Ventilatoreintritt. Da der Volumenstrom druck- und temperaturabhängig ist, wird manchmal auch mit dem Begriff des Massenstroms  $\dot{m}$  gearbeitet, wobei zwischen Massenstrom und Volumenstrom der bekannte Zusammenhang besteht. Hierbei ist  $\rho$  die von Druck und Temperatur abhängige Dichte des Arbeitsmediums im Ansaugzustand [3].

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (1.1)$$

## 1.4.2 Druckerhöhung

Bei der Druckerhöhung eines Ventilators unterscheidet man die Begriffe:

- Totaldruckerhöhung (Gesamtdruckerhöhung)  $\Delta p_t$
- Druckerhöhung (freiblasend)  $\Delta p_f$

Die Totaldruckerhöhung eines in einer Anlage eingebauten Ventilators dient zur Überwindung der Widerstände in einer Anlage.

Beim Druck werden folgende Begriffe unterschieden [3]:

- Atmosphärendruck  $p_0$
- Statischer Druck  $p_{st}$
- Dynamischer Druck

$$P_d = \frac{\rho}{2 \cdot c^2} \quad (1.2)$$

- Totaldruck

$$P_t = p_{st} + P_d \quad (1.3)$$

Die gleichen Begriffe werden auch zur Bezeichnung von Druckdifferenzen verwendet, wobei für die einzelnen Anordnungen von Ventilatoren die Definition der Druckerhöhung unterschiedlich ist. 1.4.3 Spezifische Förderarbeit

Die spezifische Förderarbeit eines Ventilators ist als auf die Masse bezogene nutzbare Energiedifferenz zwischen Ein- und Austrittsstutzen definiert :

$$Y = \int_1^2 \frac{dp}{d\rho} \quad (1.4)$$

Unter der Annahme, dass die Zustandsänderung zwischen Ventilatoreintritt 1 und Ventilatoraustritt 2 (siehe Abbildung 1.6) entsprechend der Gleichung der Polytropen  $p \cdot v^n = \text{konst.}$  erfolgt, kann obiges Integral analytisch gelöst werden:

$$P_d = \frac{P_1}{\rho_1} \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (1.5)$$

Es wird folgende Näherungsgleichung zur Berechnung der spezifischen Förderarbeit Y von Ventilatoren vorgeschlagen:

$$Y = \frac{\Delta p}{\rho_m} \quad (1.6)$$

Hierin ist  $\Delta p$  für die verschiedenen Einbauformen von Ventilatoren festgelegt, wobei wiederum zwischen Totaldruckerhöhung  $\Delta p_t$  und „freiblasender“ Druckerhöhung  $\Delta p_f$  unterschieden wird.

spezifische totale Förderarbeit  $Y_t$  [3]:

$$Y_t = \frac{\Delta p}{\rho_m} = Y_f + \frac{C_2^2}{2} \quad (1.7)$$

spezifische Förderarbeit  $Y_f$  („freiblasend“):

$$Y_f = \frac{\Delta p_f}{\rho_m} \quad (1.8)$$

Die mittlere Dichte  $\rho_m$  ist dabei das arithmetische Mittel aus der Dichte am Ventilatoreintritt 1 und der Dichte am Ventilatoraustritt 2:

$$\rho_m = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \quad (1.9)$$

### 1.4.3 Leistung

Bei der Leistung eines Ventilators unterscheidet man zwischen der Förderleistung der Maschine als Produkt aus Massenstrom und spezifischer Förderarbeit und der Antriebsleistung bezogen auf die Ventilatorwelle (Kupplung, Riemenscheibe oder Laufradeingang) oder den Motoreingang [3].

Totale Förderleistung  $P_t$  :

$$P_t = \dot{m} \cdot Y_t \quad (1.10)$$

Förderleistung  $P_f$  („freiblasend“):

$$P_f = \dot{m} \cdot Y_f \quad (1.11)$$

Antriebsleistung – Eingang Laufrad:

$$P_L = \frac{P_t}{\eta_{tL}} \quad \text{bzw} \quad P_f = \frac{P_f}{\eta_{fL}} \quad (1.12)$$

Antriebsleistung – Eingang Kupplung bzw. Riemenscheibe:

$$P_W = \frac{P_t}{\eta_{tW}} \quad \text{bzw} \quad P_W = \frac{P_f}{\eta_{fW}} \quad (1.13)$$

Antriebsleistung – Eingang Motor:

$$P_M = \frac{P_t}{\eta_{tM}} \quad \text{bzw} \quad P_W = \frac{P_f}{\eta_{fM}} \quad (1.14)$$

wobei  $\eta$  der jeweils entsprechend definierte Wirkungsgrad des Ventilators ist. In Abbildung 1.6 sind die verschiedenen Leistungsbegriffe veranschaulicht.

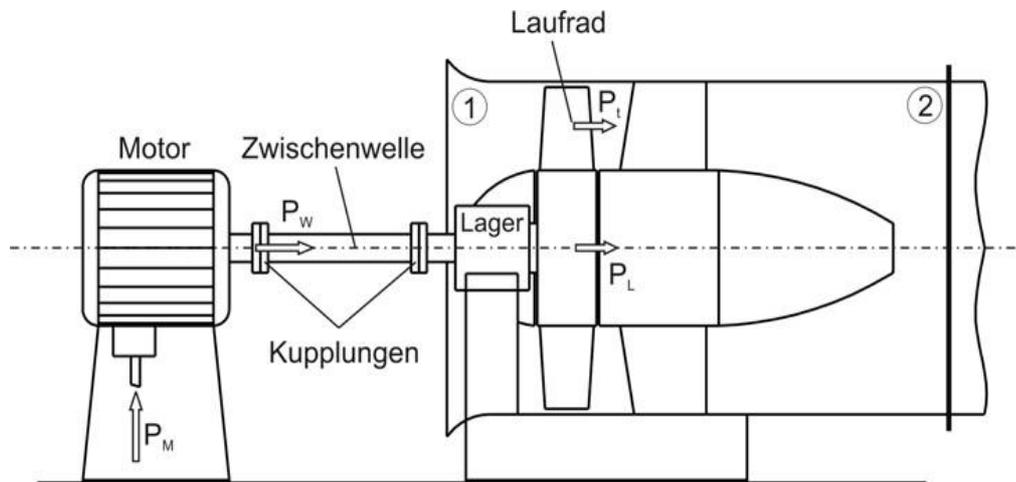


Abbildung 1.6: Leistungsbegriffe am Ventilator

#### 1.4.4 Wirkungsgrad

Auf Grund der verschiedenen Leistungsdefinitionen sind auch verschiedene Wirkungsgrade notwendig.

Gesamtwirkungsgrad des Ventilators:

$$\eta_{tW} = \frac{P_t}{P_W} \quad \text{bzw} \quad \eta_{fW} = \frac{P_f}{P_W} \quad (1.15)$$

Innerer wirkungsgrad des Ventilators:

$$\eta_{tW} = \frac{P_t}{P_W} \quad \text{bzw} \quad \eta_{fW} = \frac{P_f}{P_W} \quad (1.16)$$

Der innere Wirkungsgrad setzt sich zusammen aus:

- dem *hydraulischen Wirkungsgrad*  $\eta_h$ , der die Strömungsverluste im Ventilator berücksichtigt,
- dem *volumetrischen Wirkungsgrad*  $\eta_v$ , der die Spaltverluste erfasst und
- dem *Radreibungswirkungsgrad*  $\eta_r$ , der den Einfluss der Radseitenreibung berücksichtigt.

Der volumetrische Wirkungsgrad lässt sich laut [6] über die Spaltströme abschätzen.

$$\eta_v = \frac{\dot{V}}{V + \dot{V}_{sp}} = \left[ 1 + \frac{4 \cdot \alpha}{\varphi} \cdot \sqrt{r^* \cdot \psi} \cdot \left( \frac{D_1}{D_2} \right) \cdot \frac{s}{D_1} \right]^{-1} \quad (1.17)$$

Der Unterschied zwischen dem Gesamtwirkungsgrad und dem inneren Wirkungsgrad entspricht dem mechanischen Wirkungsgrad  $\eta_r$  :

$$\eta_m = \frac{\eta_{tW}}{\eta_{tL}} \quad \text{bzw} \quad \eta_m = \frac{\eta_{fW}}{\eta_{fL}} \quad (1.18)$$

Der Gesamtwirkungsgrad des Antriebsmotors ist analog als Quotient aus Wellenleistung und aufgenommener elektrischer Leistung definiert:

$$\eta_{Mot} = \frac{P_W}{P_M} \quad (1.19)$$

bei Vorhandensein einer Welle mit Kupplung oder Riementrieb oder

$$\eta_{Mot} = \frac{P_L}{P_M} \quad (1.20)$$

bei direkt auf der Motorwelle aufgebrachtem Laufrad.

Der innere Wirkungsgrad  $\eta_i$  (gleichbedeutend mit  $\eta_{tL}$  oder  $\eta_{fL}$  ) wird physikalisch richtig als polytroper Wirkungsgrad definiert und nicht - wie im Verdichterbau üblich – als isentroper Wirkungsgrad

$$\eta_i = \frac{Y}{\Delta_h} = \frac{Y}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{Y}{C_p \cdot (T_2 - T_1)} \quad (1.21)$$

wobei Y in Formel 1.21 sowohl totale Förderarbeit ( $Y_t$ ) als auch Förderarbeit ( $Y_f$ ) sein kann.  $T_1$  ist die Temperatur des Arbeitsmediums am Ventilatoreintritt 1,  $T_2$  am Ventilatoraustritt 2.

## 1.5 Kennzahlen

Für die Auslegung, den Vergleich und die kritische Beurteilung aller Ventilatoren benötigt man dimensionslose Kennzahlen. Diese Zahlen müssen dimensionslos sein, damit feste Zahlenwerte entstehen, die unabhängig von der jeweiligen Druckerhöhung, dem Durchsatz und ähnlichen Größen sind.

Zur Bestimmung eines optimal geeigneten Ventilortyps für die gegebenen Hauptbetriebsdaten

- Volumenstrom  $\dot{V}$
- Totaldruckerhöhung  $\Delta p_h$
- Dichte  $\rho$  des Fördermediums

benützt man am besten den von Cordier angegebenen Zusammenhang zwischen Laufzahl  $\sigma$  bzw. spezifischer Drehzahl  $n_q$  und Durchmesserzahl  $\delta$  bzw. spezifischem Durchmesser  $D_q$ .

Die Kennzahlen sind wie folgt definiert :

Laufzahl  $\sigma$ :

$$\sigma = n \cdot \frac{\sqrt{\dot{V}}}{(2 \cdot Y_t)^{3/4}} \cdot 2 \cdot \sqrt{\pi} \quad (1.22)$$

Spezifische Drehzahl  $n_q$  :

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{\dot{V}}}{\left(\frac{Y_t}{9,81}\right)^{3/4}} \quad (1.23)$$

Zwischen Laufzahl  $\sigma$  und spezifischer Drehzahl  $n_q$  besteht dabei folgender Zusammenhang:

$$n_q = 157,8 \cdot \sigma \quad (1.24)$$

Durchmesserzahl  $\delta$ :

$$\delta = D \cdot \sqrt[4]{\frac{2 \cdot Y_t}{\dot{V}^2}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (1.25)$$

Spezifischer Durchmesser  $D_q$  :

$$D_q = D \cdot \frac{\sqrt[4]{Y_t/9,81}}{\sqrt{\dot{V}}} \quad (1.26)$$

Dabei sind Durchmesserzahl  $\delta$  und spezifischer Durchmesser  $D_q$  wie folgt miteinander verknüpft:

$$D_q = 0,536 \cdot \delta \quad (1.27)$$

Alle aufgeführten Kennzahlen beziehen sich auf den Optimalpunkt des Ventilators, d.h. den Betriebspunkt mit dem besten Wirkungsgrad.

# Kapitel 2

## Beschreibung der Radialventilatoren

### 2.1 Bauformen und Anordnungen

Die Bauform eines Radialventilators wird hauptsächlich durch die geometrischen Rahmenbedingungen der Anlage definiert. Im Folgenden eine Übersicht über die gängigsten Bauformen. In dieser Arbeit wird nur auf KA und BL Bauformen fokussiert.

#### 2.1.1 Direktantrieb (DA)

Bauform DA durch einen am Gehäuse befestigten Motor ist die am häufigsten genutzte Bauform. Der Direktantrieb ist kompakt, hat weniger Teile, die Wartung benötigen und ist meistens günstiger zu realisieren als andere Bauformen. Durch die Verwendung eines Flanschmotors kann man außerdem eine sehr kompakte und relativ leichte Konstruktion erzielen.

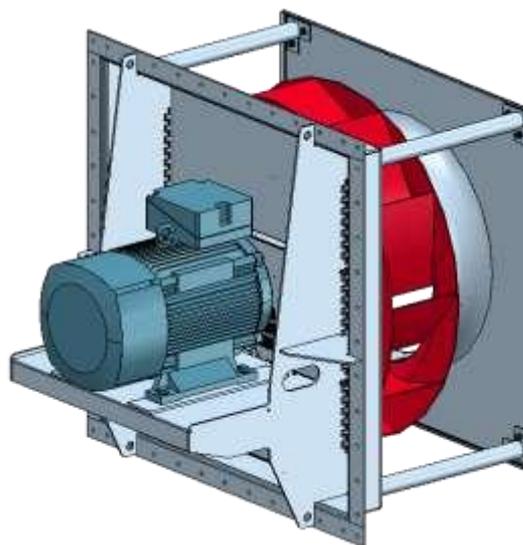


Abbildung 2.1: Direktantrieb Radialventilator [16]

#### 2.1.2 Riemen-Antrieb (RA)

In vielen Fällen ist man aufgrund der notwendigen Drehzahlen oder anderen Gegebenheiten der Anlage gezwungen, den Ventilator mit Keilriemenantrieb auszulegen. Der Motor kann auf verschiedene Weise angeordnet werden.

Durch die Befestigung des Motors auf einem gemeinsamen Fundament bzw. am Motorbock erreicht man bei der Bauform RA trotzdem eine kompakte Konstruktion [16].

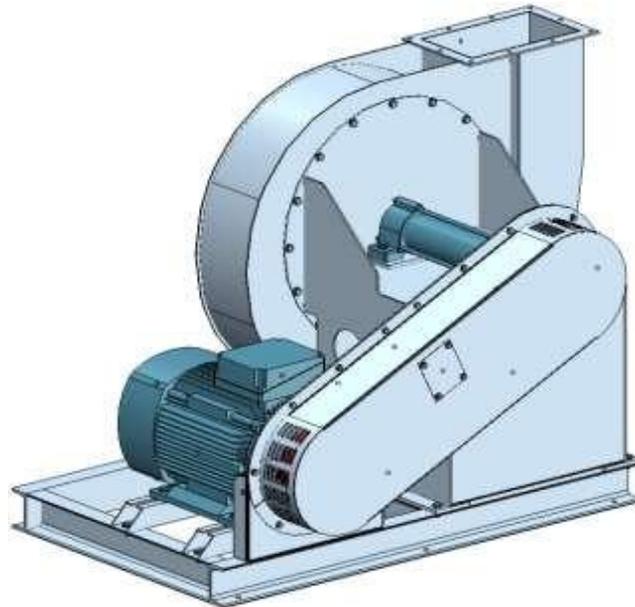


Abbildung 2.2: Riemen-Antrieb Radialventilator [16]

### 2.1.3 Kupplung-Antrieb (KA)

Häufig wird ein Antrieb über eine elastische Kupplung gewählt. Dadurch können Anlaufstöße, z. B. bei Materialförderventilatoren, gut abgefedert werden, ohne den Motor zu beschädigen.

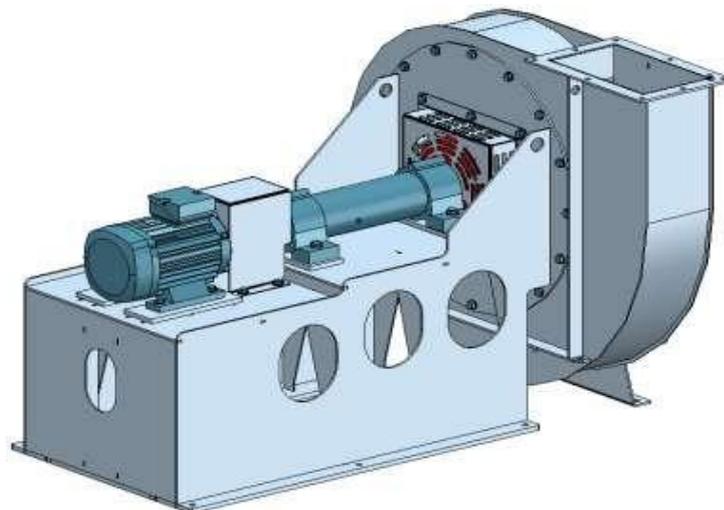


Abbildung 2.3: Kupplung-Antrieb Radialventilator [16]

### 2.1.4 Beidseitige Lagerung (BL)

Zweiseitig gelagerte Rotoren werden über Saugtaschen angeströmt. Die Drosselorgane sind als mehrflügelige Regeljalousieklappen vor den Saugtaschen oder als Drallregler hinter den Saugtaschen angeordnet.

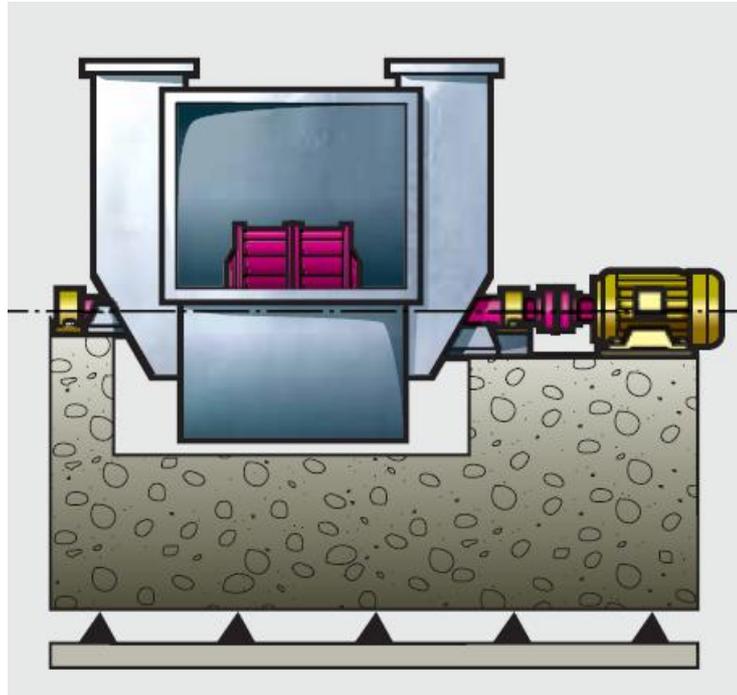


Abbildung 2.4: Beidseitige Lagerung Radialventilator

### 2.1.5 Bauteile eines Kupplungs-Antriebes

Wie in Abbildung 2.5 ersichtlich ist, sind die wichtigsten Bauteile Welle, Lagerungen, Kupplung, EC-motor, Gehäuse und Laufrad. Die biegekritische Drehzahl, Sicherheiten gegen Dauerbruch und Fließgrenze sind die wichtigsten Themen bei Wellenberechnungen, die im nächsten Kapitel beschrieben werden.

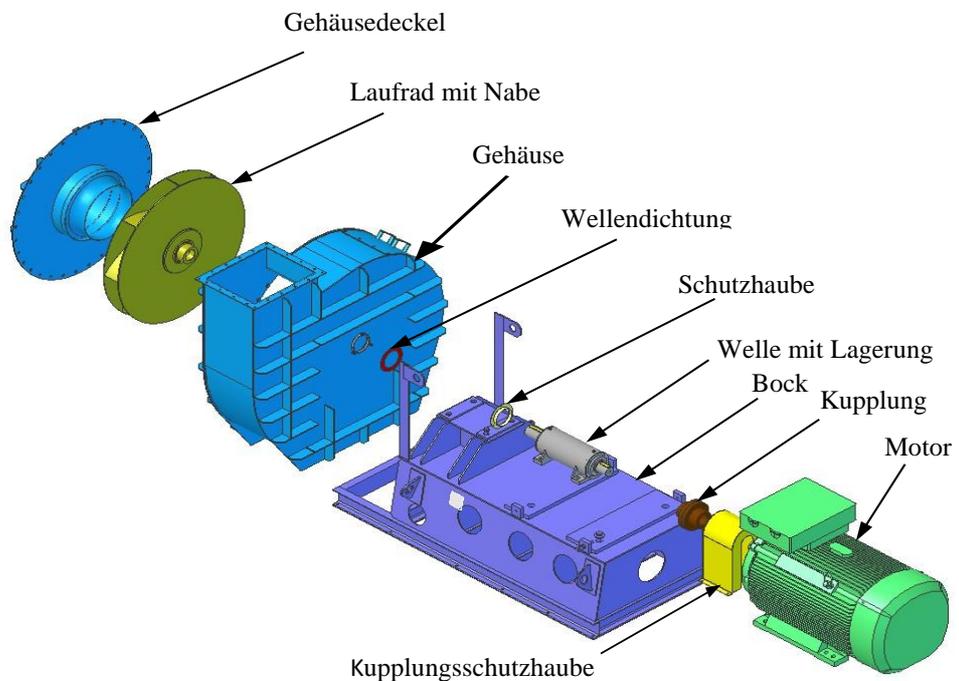


Abbildung 2.5: Einzelteile von Kupplung-Antrieb

## 2.1.6 Bauteile eines Direkt-Antriebes

Sehr kompakt werden die Ventilatoren, wenn ein EC-Motor (electronically commutated Motor) direkt im Laufrad integriert ist. Dadurch ist ein Riemenantrieb oder eine Kupplung zwischen dem AC-Motor (Wechselstrom-Elektromotor) und dem Laufrad nicht notwendig. Das reduziert das Einbauvolumen und den Montageaufwand.

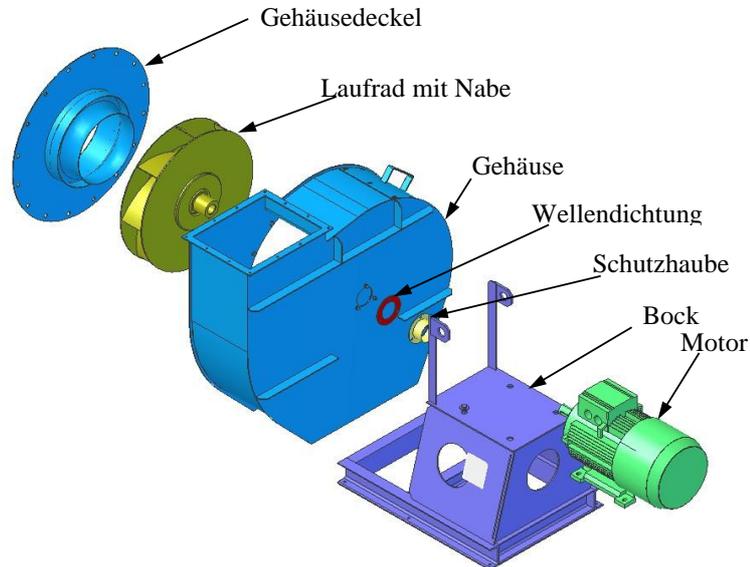


Abbildung 2.6: Bauteile eines Direkt-Antriebes

## 2.1.7 Bauteile eines Riemen-Antriebes

Riemenantrieb-Ventilatoren bestehen immer aus einem Ventilatorlaufrad, das auf eine Achse mit Lagerung und Riemenscheibe montiert wurde. Damit ist der gesamte rotierende Pumpenbereich vom Antrieb getrennt und auch separat ausgewuchtet. Ein Vorteil des Riemenantrieb-Ventilators ist dementsprechend, dass die Schwingungen und der Schall des Antriebsmotors vom Ventilator entkoppelt sind.

Das Ventilatorlaufrad wird somit nicht zum Resonanzkörper der Motorgeräusche. Der Keilriemenantrieb bietet außerdem die Möglichkeit, das Übertragungsverhältnis zwischen Motor und Ventilator spezifisch auszulegen. Mit einer optimalen Drehzahl werden Anwendung und Ventilator den höchsten Wirkungsgrad erreichen. Geringfügige Änderungen hinsichtlich der Fördermenge lassen sich relativ leicht durch eine Anpassung des Motors und der Ventilator-Riemenscheibe durchführen. Die Steigerung der Ventilator-Drehzahl hat gemäß physikalischen Grundlagen eine starke Zunahme des Volumenstroms, des Drucks und der Leistung zur Folge. Dabei werden Temperatur- und Wirkungsgradschwankungen außer Betracht gelassen [17].

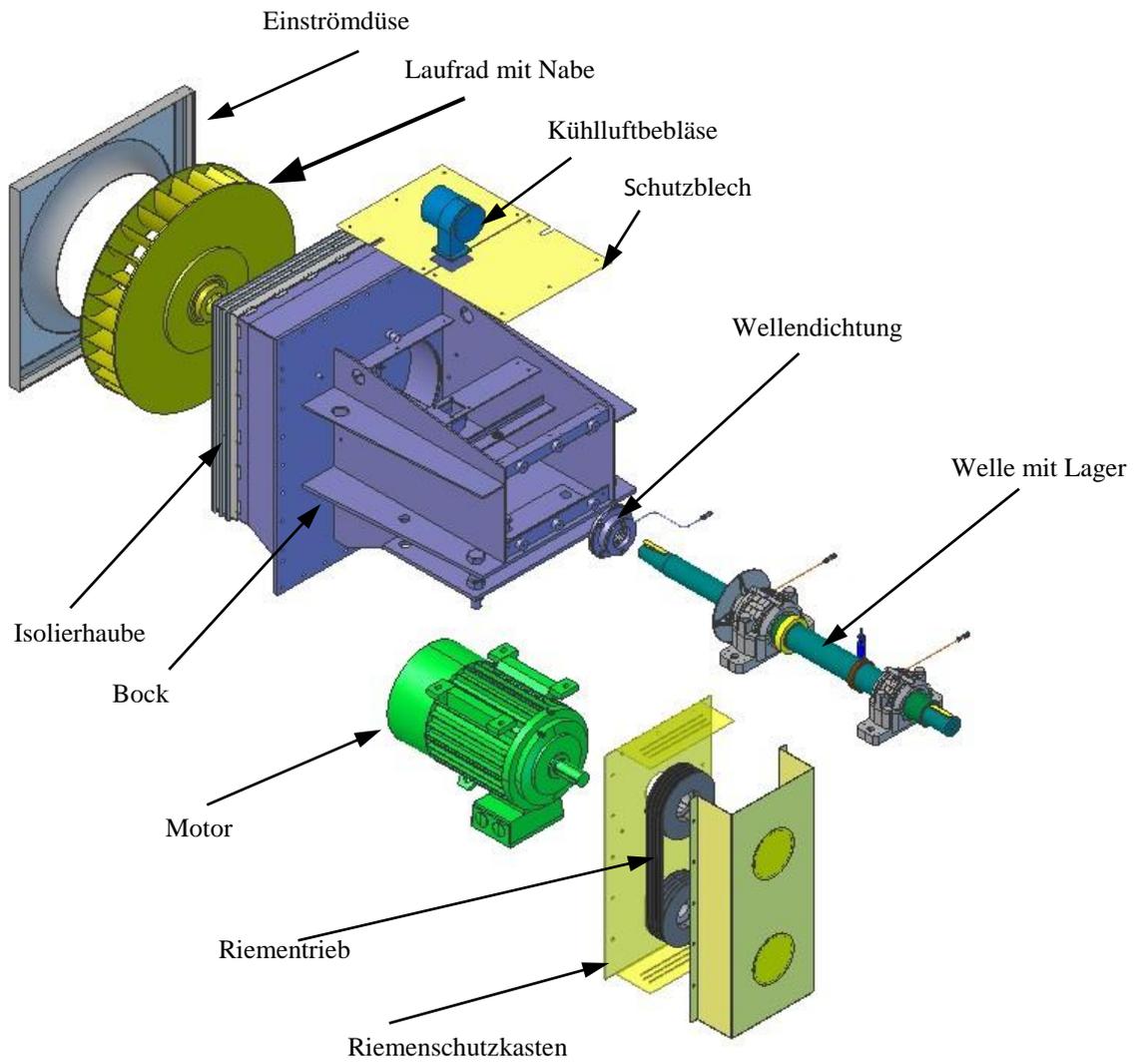


Abbildung 2.7: Bauteile eines Riemen-Antriebes

# Kapitel 3

## Wellenberechnung

### 3.1 Allgemeines

Eine große Anzahl von Ausfällen im Maschinenbau ist auf Schäden an Achsen und Wellen zurückzuführen. Die häufigste Ursache hierfür sind Dauerbrüche (Ermüdungsbrüche, Schwingungsbrüche). Neben der optimalen konstruktiven Gestaltung stellt die Berechnung der Sicherheit gegen das Auftreten von Dauerbrüchen und Schäden infolge Maximalbelastung (bleibende Verformung, Anriss) eine erforderliche Maßnahme dar.

DIN 743 enthält die Grundgleichungen und das methodische Vorgehen beim Tragfähigkeitsnachweis für Wellen und Achsen. Dieser Nachweis erfolgt durch die Ermittlung einer (rechnerischen) Sicherheit (Sicherheit gegen Dauerbrüche und Schäden infolge Maximalbelastung). Durch diese Sicherheit sollen sowohl die Unsicherheiten in den Berechnungsgrundlagen und Lastannahmen als auch die Bedeutung der Anlage und Folgeschäden berücksichtigt werden [7].

Diese Norm gilt für den Sicherheitsnachweis von Wellen und Achsen gegen:

- Ermüdungsbruch (Dauerbruch, Schwingungsbruch) bei Überschreitung der Dauerfestigkeit;
- bleibende Verformung (oder Anriss oder Gewaltbruch).

Bei der Berechnung der Sicherheit gegen Ermüdungsbruch werden konstante schädigungsäquivalente Spannungsamplituden zugrunde gelegt. Diese ergeben sich aus den vereinbarten Belastungen oder sind mit geeigneten Schädigungshypothesen zu bestimmen. Bei der Berechnung der Sicherheit gegen bleibende Verformung ist die maximal auftretende Spannung maßgebend. Diese ergibt sich aus der vereinbarten oder ermittelten maximalen Belastung. In dieser Arbeit wird maximale Gewicht- und ungewichtskraft des Laufrades betrachtet.

Der Anwendungsbereich ist auf Stähle begrenzt. Geschweißte Bauteile sind gesondert nachzurechnen.

Beim Nachweis der Ermüdungsfestigkeit wird angenommen, dass die Amplituden der einzelnen Beanspruchungsarten (Zug/Druck, Biegung, Torsion) zum gleichen Zeitpunkt auftreten.

Die Eigenspannungen sind beim rechnerischen Nachweis nicht explizit erfasst. Ihre Berücksichtigung erfolgt bei harten Randschichten global durch die Stützzahl  $n$  und den Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung  $K_V$ .

Die Änderung der Ermüdungsfestigkeit durch Eigenspannung infolge örtlicher Verformungen ist noch nicht ausreichend erforscht, so dass dieser Einfluss rechnerisch noch nicht erfasst werden kann.

In Grenzfällen (Bauteile, bei denen das Versagen zu großen Folgeschäden führt) sollten gegebenenfalls experimentelle Untersuchungen bzw. durch Inspektionen eine Überwachung erfolgen, insbesondere wenn Überlastungen Zugeigenspannungen herbeiführen.

Bei duktilen Werkstoffen wurde bisher kein wesentlicher Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit durch örtlich plastische Verformungen und dadurch bedingte Eigenspannungen festgestellt.

Wenn im Folgenden nur von Wellen gesprochen wird, gelten die Ausführungen sinngemäß auch für Achsen.

### 3.1.1 Anwendungsgrenzen

Der Tragfähigkeitsnachweis gilt für:

- Zug/Druck, Biegung, Torsion als Einzelbeanspruchung und kombiniert im Wechsel- oder Schwellbereich; kein dominierender Querkraftschub; kein Knicken (infolge Druckspannung);
- Temperaturbereich  $-40\text{ °C} \leq \vartheta \leq 150\text{ °C}$ ;
- Umlaufbiegung und Flachbiegung werden nicht unterschieden (da die Festigkeitswerte in DIN 743-3 für die Biegebeanspruchung durch Umlaufbiegeversuche ermittelt wurden, liegt damit den Angaben der ungünstigere Fall zugrunde);
- korrosionsfreie Umgebungsmedien (Luft, säurefreies Öl).

Die Festigkeitswerte für die Sicherheit gegen Dauerbruch sind für die Grenzlastspielzahl  $N_G = 10^7$  ermittelt und kommen als Dauerfestigkeitswerte zum Ansatz. Neuere Versuche zeigen, dass bei sehr hohen Lastwechselzahlen ein weiterer Abfall der Dauerfestigkeit auftreten kann. Dieser wird auf die Wirkung von Mikroeinschlüssen zurückgeführt. Die Zusammenhänge sind noch nicht ausreichend erforscht. Es wird empfohlen, bei Bauteilen deren Versagen zu hohen Folgeschäden führt, höhere Sicherheiten zu vereinbaren [7].

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Wellenberechnungen erforderlich:

- DIN 743-1, Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen – Teil 1: Grundlagen
- DIN 743-2, Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen — Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen
- DIN 743-3, Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen — Teil 3: Werkstoff-Festigkeitswerte
- DIN EN ISO 18265, Metallische Werkstoffe — Umwertung von Härtewerten

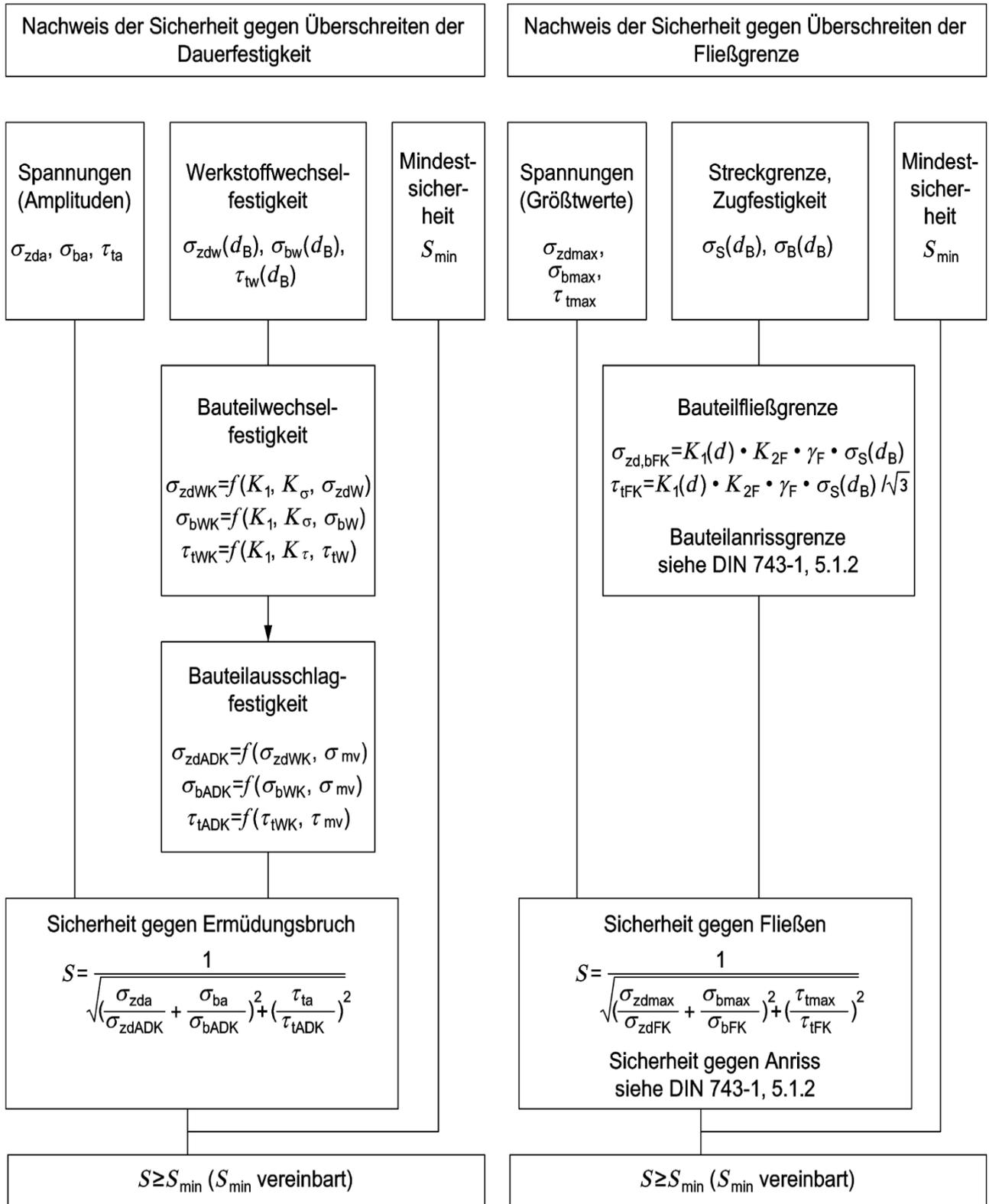


Abbildung 3.1 :Schematischer Ablauf der Sicherheitsnachweise [7]

## 3.2 Überschlagn und genaue Berechnung nach DIN 743

SIROCCO ist seit über 100 Jahren führend auf dem Gebiet der industriellen Lufttechnik. von Beginn an wurden Lösungen für unterschiedlichste lufttechnische Probleme erarbeitet. Durch die stetige Weiterentwicklung der Fachkompetenz am Luft- und Umweltsektor ist es SIROCCO gelungen, zu einem Produktionsunternehmen internationalen Formates heranzuwachsen. Umfassendes Know-how, individuelle Maßarbeit und höchste Qualität sind Spezialitäten des Hauses [13].

Der vorliegende Radialventilator wurde für folgende Hauptbetriebsdaten ausgelegt.

Volumenstrom	$\dot{V}=61,98 \frac{m^3}{s}$
Drehzahl	$n=1490 \text{ min}^{-1}$
Motorleistung	$P_m = 210 \text{ kW}$
Lauftrad Gewicht	$m_L = 1700 \text{ kg}$
Kupplungsgewicht	$m_k = 145 \text{ kg}$
Wellengewicht	$m_W = 230 \text{ kg}$
Stoßfaktor	$K_s = 1,25$
Anwendungsfaktor	$K_A = 1,25$
Zuschlagfaktor für Frischluftgebläse	$f_Z = 0,5$
Oberflächenrauheit der Welle	$R_Z = 25 \mu\text{m}$
Werkstoff der Welle	S355JO - St 52-3

Tabelle 3.1 : Hauptbetriebsdaten Modellventilator

### 3.2.1 Überschlagnberechnung auf Torsion und auf Biegung

$\sigma_B(d_B)$	490 Mpa
$\sigma_S(d_B)$	355 Mpa
$\sigma_{zdw}(d_B)$	205 Mpa
$\sigma_{bw}(d_B)$	255 Mpa
$\tau_{tw}(d_B)$	150 Mpa
E-Modul	210000 Mpa
G-Modul	79230 Mpa
Dichte	$7850 \frac{kg}{m^3}$

Tabelle 3.2 : Materialeigenschaften

Abschätzung des Wellendurchmessers bei reiner Torsion.

Nenntorsionsmoment  $M_{nenn}$ :

$$M_{nenn} = \frac{P_M}{\omega} = 1345,87 \text{ N.m} \quad (3.1)$$

Torsionsmoment für dynamische Beanspruchung  $M_t$ :

$$M_t = K_A \cdot M_{nenn} = 1682,342 \text{ N.m} \quad (3.2)$$

Torsionsmoment für statische Beanspruchung  $M_{ts}$ :

$$M_{ts} = K_S \cdot M_{nenn} = 1682,342 \text{ N.m} \quad (3.3)$$

Minimum Durchmesser bei reiner Torsionsbeanspruchung  $d_{min.t}$ :

$$d_{min.t} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_t}{\pi \cdot \tau_{tw}}} = 38,512 \text{ mm} \quad (3.4)$$

Biegemoment Berechnung:

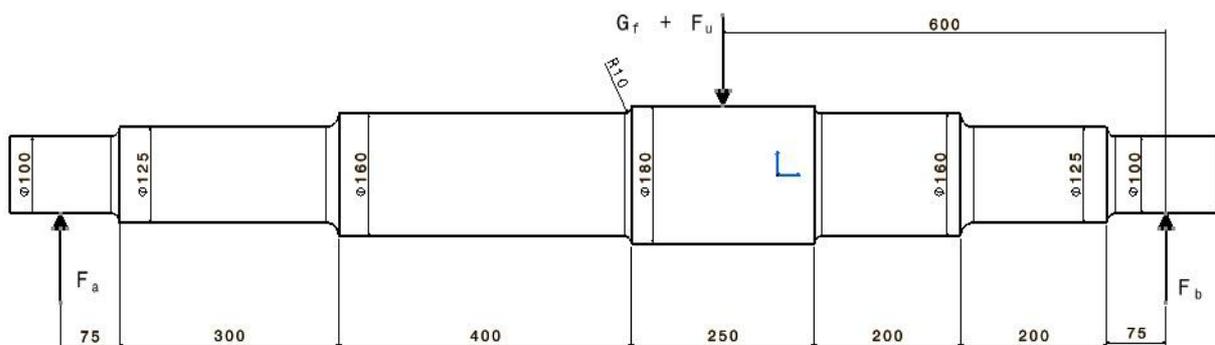


Abbildung 3.2: Modellwelle mit wirkenden Kräften

Gewichtskraft des Laufrades  $G_F$ :

$$G_F = m_L \cdot g = 16,671 \text{ kN} \quad (3.5)$$

Unwuchtkraft von Laufrad  $F_U$ :

$$F_U = f_z \cdot G_F = 8,336 \text{ kN} \quad (3.6)$$

Geometriedaten der Welle:

$L_{abs}$	475 mm
$L_b$	600 mm
$L_a$	900 mm
$r_{abs}$	10 mm
$t_{abs}$	10 mm

Tabelle 3.3 : Geometriedaten der Welle

Lagerreaktion am Lager B (Festlager)  $F_b$ :

$$F_b = 15,004 \text{ kN}$$

Lagerreaktion am Lager A (Loslager)  $F_a$ :

$$F_a = 10,002 \text{ kN}$$

Maximaler Biegemoment  $M_{bmax}$ :

$$M_{bmax} = F_a \cdot L_a = 9,002 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (3.7)$$

Gestaltsänderungsenergie Hypothese (GEH):

$$M_{GEH} = \sqrt{(K_A \cdot M_{bmax})^2 + 3 \cdot (K_A \cdot M_{nenn})^2} = 11,623 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (3.8)$$

Ermittelter Durchmesser nach GEH:

$$d_{GEH} = \sqrt[3]{\frac{M_{GEH} \cdot 32}{\pi \cdot \sigma_{bw}}} = 77,433 \text{ mm} \quad (3.9)$$

### 3.2.2 Genaue Wellenauslegung nach DIN 743

Modellwelle nach Abbildung 3.4 ist in CATIA V5 konstruiert. Maximaler Durchmesser ist  $d_G = 180 \text{ mm}$  und Minimaler Durchmesser an der Kerbstelle ist  $d_m = 160 \text{ mm}$ .

Maximale Biegung an der Kerbstelle  $M_{abs}$ :

$$M_{abs} = F_b \cdot L_{abs} = 7126 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.10)$$

Wirkende Biegespannung am Absatz  $\sigma_{bmax}$ :

$$W_b = \frac{\pi \cdot d_m^3}{32} = 4,021 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \quad (3.11)$$

$$\sigma_{bmax} = \frac{K_A \cdot M_{abs}}{W_b} = 22,151 \text{ Mpa} \quad (3.12)$$

$$W_t = \frac{\pi \cdot d_m^3}{16} = 8,042 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \quad (3.13)$$

$$\tau_{tmax} = \frac{M_t}{W_t} = 2,0918 \text{ Mpa} \quad (3.14)$$

Es wird angenommen, dass der Biegemoment rein wechselnd und der Torsionsmoment rein schwellen auftritt. Der Absatzradius ist immer die Differenz zwischen dem größten und kleinsten Durchmesser der Welle dividiert durch zwei.

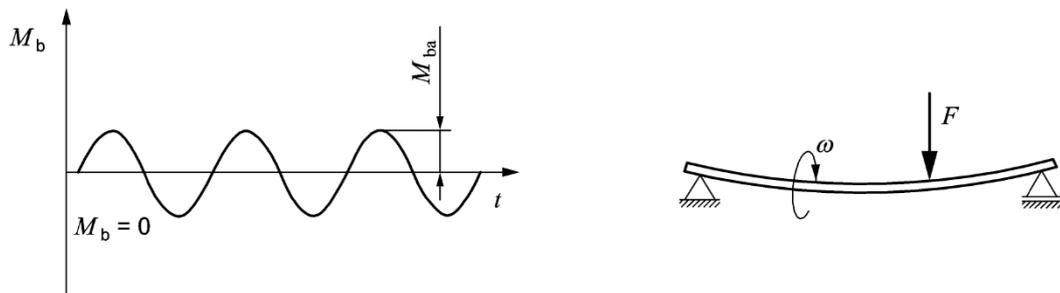


Abbildung 3.3: Wechselnde Beanspruchung

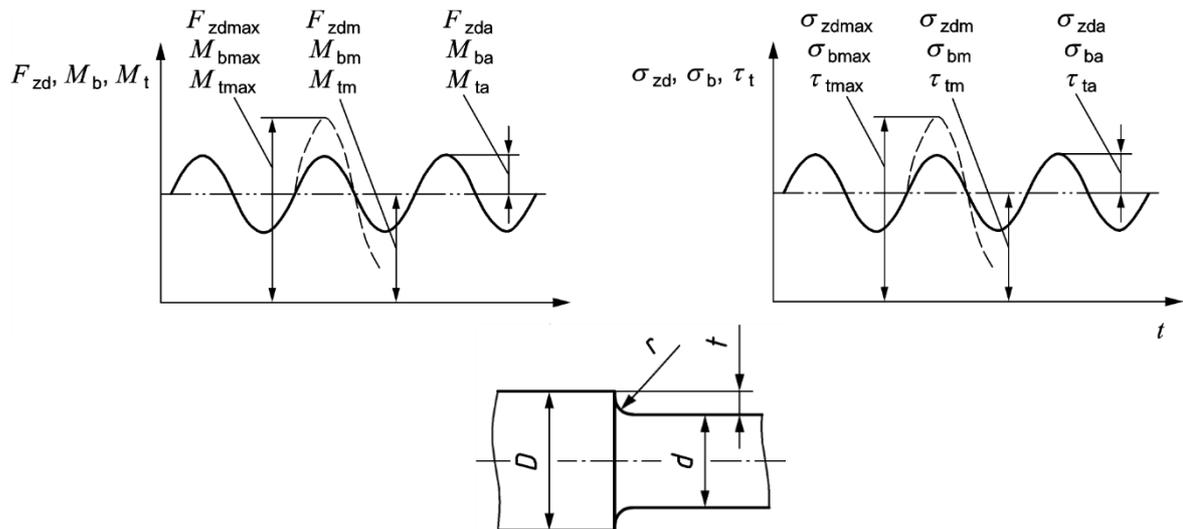


Abbildung 3.4: Erläuterungen zum Belastungs- bzw. Spannungsverlauf und Abmessungen für Querschnittskenngrößen [7]

$$\sigma_{ba} = \sigma_{bmax} = 22,151 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{bm} = 0 \text{ Mpa}$$

$$\tau_{tm} = \frac{M_{nenn}}{W_{\tau}} = 1,673 \text{ Mpa}$$

$$\tau_{ta} = \tau_{tm}(K_A - 1) = 0,418 \text{ Mpa} \quad (3.15)$$

Technologischer Größeneinflussfaktor  $K_{1(eff)S}$ :

Die Streckgrenze für allgemeine und höherfeste Baustähle sowie für andere Baustähle im nicht vergüteten Zustand ist mit  $K_{1(eff)S}$  nach Gleichung (11) abzumindern (siehe Bild 13).  $K_{1(eff)S}$  ist anzuwenden, wenn die wirkliche Festigkeit des Bauteils nicht bekannt ist, sondern für einen Bezugsdurchmesser z.B.  $d_B = 16 \text{ mm}$  den Normen entnommen wurde. Es ist anzustreben, von der wirklichen Festigkeit des Bauteils an der betrachteten Stelle auszugehen [7].

$$32 \text{ mm} < d_{(eff)} = 180 \text{ mm} < 300 \text{ mm}$$

$$d_B = 16 \text{ mm}$$

Die Streckgrenze für allgemeine und höherfeste Baustähle sowie für andere Baustähle im nicht vergüteten Zustand:

$$K_{1(eff)S} = 1 - 0.26 \cdot \log\left(\frac{d_{(eff)}}{2 \cdot d_B}\right) = 0,805 \quad (3.16)$$

$$\sigma_s(d) = K_{1(eff)S} \cdot \sigma_s(d_B) = 285,775 \text{ Mpa} \quad (3.17)$$

Für Nitrierstähle und die Zugfestigkeit allgemeiner und höherfester Baustähle sowie anderer Baustähle im nicht vergüteten Zustand:

$$K_{1(eff)B} = 1 - 0.23 \cdot \log\left(\frac{d_{(eff)}}{100\text{mm}}\right) = 0,941 \quad (3.18)$$

$$\sigma_B(d) = K_{1(eff)B} \cdot \sigma_B(d_B) = 461,23 \text{ Mpa} \quad (3.19)$$

Geometrischer Größeneinflussfaktor  $K_{2(d)}$ :

Der Unterschied zwischen (größerer) Biege-Wechselfestigkeit und der Zug- / Druck-Wechselfestigkeit von glatten Stäben bei gleichem Probedurchmesser kann mit der makroskopischen Stützwirkung auf die äusseren Fasern durch die weniger belasteten inneren Fasern begründet werden.

Bei Biegung existiert im Gegensatz zu Zug-/Druckbeanspruchung ein solches Spannungsgefälle, sodass die Stützwirkung eintritt und die Wechselfestigkeit erhöht wird. Mit dieser Begründung ist es nahe liegend, dass die Dauerfestigkeit allgemein vom Gradient der Spannung abhängig ist [7].

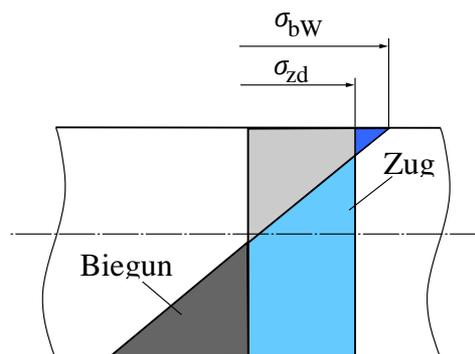


Abbildung 3.5: Makroskopische Stützwirkung

$$150\text{mm} < d_m = 160 \text{ mm}$$

$$K_{2(d)} = 0,8$$

Einflussfaktor der Oberflächenrauheit  $K_{F\sigma}$  und  $K_{F\tau}$  :

$$K_{F\sigma} = 1 - 0,22 \cdot \left[ \frac{R_z}{1\mu\text{m}} \right] \cdot \left[ \log \left( \frac{\sigma_B(d)}{20 \text{ Mpa}} \right) - 1 \right] = 0,888 \quad (3.20)$$

$$K_{F\tau} = 0,575 \cdot K_{F\sigma} + 0,425 = 0,936 \quad (3.21)$$

Verfestigungsfaktor :

$$K_V = 1$$

Formzahl für Biegung  $\alpha_\sigma$ :

$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{1}{\sqrt{\left(0,62 \cdot \frac{r_{abs}}{t_{abs}}\right) + \left(11,6 \cdot \frac{r_{abs}}{d_m}\right) \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r_{abs}}{d_m}\right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{r_{abs}}{t_{abs}}\right)^3 \cdot \frac{d_m}{d_G}}} = 1,764 \quad (3.22)$$

Formzahl für Torsion  $\alpha_\tau$ :

$$\alpha_\tau = 1 + \frac{1}{\sqrt{\left(3,4 \cdot \frac{r_{abs}}{t_{abs}}\right) + \left(38 \cdot \frac{r_{abs}}{d_m}\right) \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r_{abs}}{d_m}\right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{r_{abs}}{t_{abs}}\right)^3 \cdot \frac{d_m}{d_G}}} = 1,37 \quad (3.23)$$

Bezogenes Spannungsgefälle  $\phi$  :

$$\frac{d_m}{d_G} = 0,889 > 0,67 \text{ und } r_{abs} > 0$$

$$\phi = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{\frac{t_{abs}}{r_{abs}} + 2}} = 0,167 \quad (3.24)$$

Spannungsgefälle für Biegung  $G'_\sigma$ :

$$G'_\sigma = \frac{2,3 \cdot (1 + \phi)}{r_{abs}} = 0,267 \frac{1}{\text{mm}} \quad (3.25)$$

Spannungsgefälle für Torsion  $G'_\tau$ :

$$G'_\tau = \frac{1,15}{r_{abs}} = 0,115 \frac{1}{\text{mm}} \quad (3.26)$$

Stützzahl für Biegung  $n_\sigma$ :

$$n_\sigma = 1 + \sqrt{G'_\sigma \cdot 10mm}^{-\left(0,33 + \frac{\sigma_s(d)}{712 \text{ Mpa}}\right)} = 1,096 \quad (3.27)$$

Stützzahl für Torsion  $n_\tau$ :

$$n_\tau = 1 + \sqrt{G'_\tau \cdot 10mm}^{-\left(0,33 + \frac{\sigma_s(d)}{712 \text{ Mpa}}\right)} = 1,063 \quad (3.28)$$

Kerbwirkungszahl für Biegung  $\beta_\sigma$ :

$$\beta_\sigma = \frac{\alpha_\sigma}{n_\sigma} = 1,609 \quad (3.29)$$

Kerbwirkungszahl für Torsion  $\beta_\tau$ :

$$\beta_\tau = \frac{\alpha_\tau}{n_\tau} = 1,289 \quad (3.30)$$

Gesamteinflussfaktor für Biegung

$$K_\sigma = \left( \frac{\beta_\sigma}{K_{2(d)}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V} = 2,137 \quad (3.31)$$

Gesamteinflussfaktor für Torsion:

$$K_\tau = \left( \frac{\beta_\tau}{K_{2(d)}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V} = 1,68 \quad (3.32)$$

Ertragbareamplitude nach Fall 1  $\sigma_{bADK}$ ,  $\tau_{tAKK}$ :

$$\sigma_{bWK} = \frac{\sigma_{bW} \cdot K_B}{K_\sigma} = 112,338 \text{ Mpa} \quad (3.33)$$

$$\tau_{tWK} = \frac{\tau_{tW} \cdot K_B}{K_\tau} = 84,046 \text{ Mpa} \quad (3.34)$$

$$\varphi_{\sigma k} = \frac{\sigma_{bWK}}{2 \cdot \sigma_B(d) - \sigma_{bWK}} = 0,139 \quad (3.35)$$

$$\varphi_{tk} = \frac{\tau_{tWK}}{2 \cdot \sigma_B(d) - \tau_{tWK}} = 0,1 \quad (3.36)$$

Vergleichsmittelspannung  $\sigma_{mv}$ :

$$\sigma_{mv} = \sqrt{(\sigma_{bm})^2 + 3 \cdot (\tau_m)^2} = 2,898 \text{ Mpa} \quad (3.37)$$

$$\tau_{mv} = \frac{\sigma_{mv}}{\sqrt{3}} = 1,673 \text{ Mpa} \quad (3.38)$$

Ertragbare Amplitude:

$$\sigma_{bADK} = \sigma_{bWK} - \varphi_b \cdot \sigma_{mv} = 111,935 \text{ Mpa} \quad (3.39)$$

$$\tau_{tADK} = \tau_{tWK} - \varphi_t \cdot \tau_{mv} = 83,878 \text{ Mpa} \quad (3.40)$$

Sicherheit gegen Dauerbruch  $S_{mind}$ :

$$S_{mind} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{ba}}{\sigma_{bADK}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{ta}}{\tau_{tADK}}\right)^2}} = 5,05 > 1,2 \text{ minimale Sicherheit} \quad (3.41)$$

Sicherheit gegen Fließgrenze  $S_{minG}$ :

$$K_{2F} = 1,2$$

Erhöhungsfaktor der Fließgrenze ( $2 < \alpha_\tau < 3$ ):

$$Y_{Fb} = 1,1$$

$$\sigma_{FK} = \sigma_s(d) \cdot K_{2F} \cdot Y_{Fb} = 377,208 \text{ Mpa} \quad (3.42)$$

$$\tau_{FK} = \frac{\sigma_s(d)}{\sqrt{3}} \cdot K_{2F} \cdot Y_{Fb} = 197,983 \text{ Mpa} \quad (3.43)$$

Maximale Torsionsspannung:

$$\tau_{tmax} = \frac{K_S \cdot M_{nenn}}{W_\tau} = 2,0918 \text{ Mpa} \quad (3.44)$$

$$\sigma_{bmax} = \frac{K_S \cdot M_{abs}}{W_\sigma} = 22,151 \text{ Mpa} \quad (3.45)$$

$$S_{mind} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{bmax}}{\sigma_{FK}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{tmax}}{\tau_{FK}}\right)^2}} = 16,759 > 1,2 \quad (3.46)$$

### 3.3 Rechnerische Ermittlung der kritischen Drehzahl

Zur Berechnung der kritischen Drehzahl für abgesetzte Wellen kann das DUNKERLEYSCHES Verfahren nicht unmittelbar angewandt werden. Mit ihm ist eine näherungsweise Lösung nur noch möglich bei Bestimmung eines mittleren Trägheitsmomentes  $J_M$ .

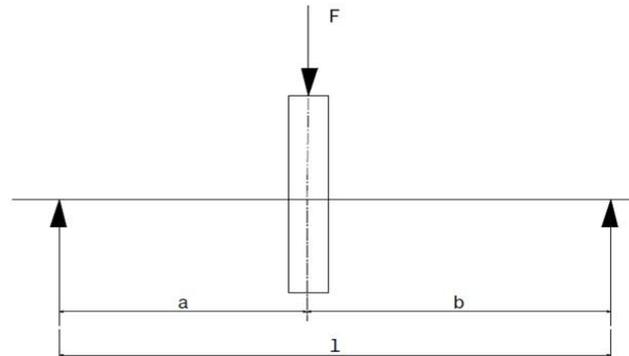


Abbildung 3.6 :Welle mit gleichem Querschnitt und einer Scheibe

Wird in Formel 3.47  $\frac{a^2}{l^2} = \alpha^2$  und  $\frac{b^2}{l^2} = \beta^2$  eingesetzt, so entsteht mit  $J_M$  wie in Formel 3.48 [2]:

$$f = \frac{l^3 \cdot F}{3EJ} \cdot \frac{\alpha^2}{l^2} \cdot \frac{\beta^2}{l^2} \quad (3.47)$$

$$f = \frac{l^3 \Sigma(G + F) \alpha^2 \beta^2}{3EJ_M} \quad (3.48)$$

Das mittlere Trägheitsmoment  $J_M$  wird gefunden, wenn man sich die Welle in der Mitte eingespannt vorstellt und dann jede Hälfte mit der Auflagerkraft belastet. Die Durchbiegung  $f$  der abgesetzten Wellenhälfte mit  $J_1, J_2, \dots$  wird der Durchbiegung  $f$  einer glatten Welle mit entsprechendem  $J_M$  gleichgesetzt

Allgemein gilt :

$$f = \int_0^l \frac{M(x)}{EJ_M} dx \quad (3.49)$$

und damit

$$f_1 = \int_0^{l_1} \frac{F \cdot X^2}{EJ_1} dx \quad \text{bzw} \quad f_2 = \int_0^{l_2+l_1} \frac{F \cdot X^2}{EJ_2} dx$$

für  $f'$  ergibt sich dann

$$f' = \frac{Fl^3}{3EJ_M} \quad (3.50)$$

und für die Summe

$$f_1 + f_2 + \dots = f = f'$$

Nach Integration, wobei F und E wegfallen, erhält man schließlich für das mittlere Trägheitsmoment der linken Seite:

$$J_{Ml} = \frac{(l_1 + l_2 + \dots)^3}{\frac{l_1^3}{J_1} + \frac{(l_1 + l_2)^3 - l_1^3}{J_2} + \dots} = \frac{(\Sigma l)^3}{\Sigma[\Delta(\Sigma l)^3]/J} \quad (3.51)$$

Das Mittel aus dem linken und rechten Trägheitsmoment  $J_M$

$$J_M = \frac{J_{M1} + J_{M2}}{2} \quad (3.52)$$

wird in Formel von kritische Drehzahl (Formel 3.53) eingesetzt.

Kritische Drehzahl

$$n_k = 300 \sqrt{\frac{1}{f \text{ (cm)}}} = \sqrt{\frac{3EJ_M}{l^3 \Sigma F \alpha^2 \beta^2}} \quad (3.53)$$

Diese näherungsweise Berechnung der kritischen Drehzahl liefert aber nur brauchbare Werte bei unwesentlicher Abweichung der mittleren Seiten trägheitsmomente. Ausreichende Näherungswerte für kritische Drehzahlen abgesetzter Wellen erhält man mit dem graphischen Verfahren nach MOHR. Es wird die Linie der Durchbiegung für Eigen gewicht und Gewichte der rotierenden Körper gezeichnet und die größte Durchbiegung  $f_{max}$  bestimmt. Damit kann nach Gl. (3.53) die kritische Drehzahl berechnet werden, die auch etwa 5% zu niedrig liegt [2].

### 3.3.1 Berechnung des mittleren Trägheitsmoments

Der mittlere Trägheitsmoment der linken Seite der Welle in Abbildung 3.2 wird mit den Werten der Tabelle 3.4, derjenige der rechten Seite mit den Werten der Tabelle 3.5 berechnet.

d cm	$\Sigma l$ cm	$(\Sigma l)^3$ cm <sup>3</sup>	$\Delta(\Sigma l)^3$ cm <sup>3</sup>	J cm <sup>4</sup>	$\frac{\Delta(\Sigma l)^3}{J}$ cm <sup>-1</sup>
10	7.5	422	422	491	0,86
12,5	37,5 <sup>1</sup>	52734	52312 <sup>2</sup>	1198	43,70
16	75	421875	369141	3217	112,50
					$\Sigma$ 157,06

Tabelle 3.4: zur Berechnung des mittleren Trägheitsmomentes der linken Seite

<sup>1</sup>  $l_1 = 7,5 \text{ cm}, l_2 = 30 \text{ cm}, \Sigma l = 7,5 \text{ cm} + 30 \text{ cm} = 37,5 \text{ cm}$

<sup>2</sup>  $52312 = 52734 - 422$

$$J_{M1} = \frac{(\Sigma l)^3}{\Sigma[\Delta(\Sigma l)^3]/J} = 2680 \text{ cm}^4$$

d cm	$\Sigma l$ cm	$(\Sigma l)^3$ cm <sup>3</sup>	$\Delta(\Sigma l)^3$ cm <sup>3</sup>	J cm <sup>4</sup>	$\frac{\Delta(\Sigma l)^3}{J}$ cm <sup>-1</sup>
10	7,5	422	422	491	0,86
12,5	27,5	20797	20375	1198	17,00
16	47,5	107172	86375	3217	26,80
18	72,5	381078	273906	5153	53,15
16	75	421875	40797	3217	12,66
					$\Sigma=110,47$

Tabelle 3.5: Zur Berechnung des mittleren Trägheitsmomentes der rechten Seite [2].

$$J_{M_r} = \frac{421875}{110,47} = 3820 \text{ cm}^4$$

Das arithmetische Mittel aus dem mittleren Trägheitsmoment der linken und rechten Wellenhälfte ergibt das mittlere Trägheitsmoment der gesamten Welle, wenn man sich dieselbe glatt mit einheitlichem Durchmesser vorstellt [2].

$$J_M = \frac{(2680 + 3820) \text{ cm}^4}{2} = 3250 \text{ cm}^4$$

Im Sinne der Darstellung nach Abbildung 3.2 werden die Abstände  $a$  und  $b$  für die jeweils durch  $G$  (Gewichtskraft der Welle) bzw.  $G + F$  belastete Stelle festgestellt. Also muß  $a + b$  hier stets  $l = 150 \text{ cm}$  ergeben. Damit lassen sich die Werte für  $\alpha^2$  und  $\beta^2$  ermitteln, wenn für  $\Sigma l = 150 \text{ cm}$  eingesetzt wird [2].

d cm	L cm	G kg	F kg	G + F kg	a cm	b cm	$\alpha^2 = \frac{a^2}{\Sigma l^2}$	$\beta^2 = \frac{b^2}{\Sigma l^2}$	$(G + F) \cdot \alpha^2 \beta^2$ kg
10	7,5	4,6	--	4,6	3,75	146,25	0,0006	0,9560	--
12,5	30	28,8	--	28,8	22,50	127,50	0,0225	0,7230	0,47
16	40	63,4	--	63,4	57,50	92,50	0,1463	0,3800	3,52
18	25	50,0	1700	1750	90,00	60,00	0,3600	0,1600	100,8
16	20	31,7	--	31,7	112,50	37,50	0,5600	0,0625	1,10
12,5	20	19,2	--	19,2	132,50	17,50	0,7780	0,0135	0,201
10	7,5	4,6	--	4,6	146,25	3,75	0,9560	0,0006	--

Tabelle 3.6: Zur Berechnung der kritischen Drehzahl

$$\Sigma l = 150 \text{ cm}$$

$$\Sigma(G + F)\alpha^2\beta^2 = 106,091 \text{ kg}$$

Mit dem in Tabelle 3.6 errechneten Wert  $\Sigma(G+F)\alpha^2\beta^2$  sowie mit der Gesamtlänge der Welle und dem oben errechneten mittleren Trägheitsmoment  $J_M$  ergibt sich die Maximale Durchbiegung  $f$  nach Gleichung 3.48:

$$f = \frac{l^3 \Sigma(G + F)\alpha^2\beta^2}{3EJ_M} = \frac{150^3 \cdot 106,091}{3 \cdot 2100000 \cdot 3250} = 0,0174 \text{ cm}$$

$$n_k = 300 \sqrt{\frac{3EJ_M}{l^3 \Sigma(G + F)\alpha^2 \beta^2}} = 300 \sqrt{\frac{3 \cdot 2100000 \cdot 3250}{150^3 \cdot 106,109}} = 2268,6 \text{ U/min}$$

Und mit 5% Aufschlag [2].

$$n_k = 2382,025 \text{ U/min}$$

### 3.4 Passfederberechnung nach DIN 6892-Methode C

Aus bisherigen Untersuchungen an Passfederverbindungen geht hervor, dass meist die Welle das kritische Bauteil der Verbindung darstellt. Abscheren der Passfeder kommt sehr selten und dann nur bei Überlasten vor. Der in zahlreichen Dauerversuchen mit Passfederverbindungen nachgewiesene Schwingungsverschleiß infolge Umlaufbiegung und/oder schwingender Torsion ist meist der entscheidende Schädigungsmechanismus, der zum Versagen der Welle-Nabe-Verbindung führt. Von daher sind Ergebnisse aus Untersuchungen allein an genuteten Wellen nicht für eine Berechnung verwendbar (teilweise besteht noch nicht einmal tendenzielle Übereinstimmung) [6].

Beim Festigkeitsnachweis von Passfederverbindungen ist es erforderlich, folgende Kriterien zu überprüfen:

- Flächenpressung an Welle, Passfeder und Nabe
- Gestaltfestigkeit der Welle für
- Torsionsbeanspruchung, in der Regel (quasi-)statisch
- Biegebeanspruchung, in der Regel dynamisch
- Gestaltfestigkeit der Nabe

Festigkeitsnachweise für Passfederverbindungen können nach verschiedenen Methoden geführt werden. Gemäß der Genauigkeit (im Sinne der Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren) bzw. Zuverlässigkeit des Verfahrens werden die Methoden A, B und C unterschieden. Die umfassendere Methode ist gegenüber der weniger genauen maßgebend.

#### **Methode A:**

Es handelt sich hierbei um einen experimentellen Festigkeitsnachweis am Bauteil unter Praxisbedingungen und/oder um eine umfassende rechnerische Beanspruchungsanalyse der kompletten Passfederverbindung bestehend aus Welle, Passfeder und Nabe.

#### **Methode B:**

Die Auslegung erfolgt aufgrund einer genaueren Berücksichtigung der auftretenden Flächenpressungen. Außerdem wird ein Festigkeitsnachweis für die Welle nach dem Nennspannungskonzept durchgeführt.

#### **Methode C:**

Überschlägige Berechnung der Flächenpressungen und daraus resultierende Abschätzung für die Wellenbeanspruchung.

Abweichungen von diesen Berechnungsmethoden sind in begründeten Fällen zulässig.

In dieser Arbeit wird Welle-Nabe-Verbindung nach Methode C berechnet und in VBA programmiert [6].

### 3.4.1 Kupplung-Welle-Verbindung

Gewählte Passfeder ist **DIN 6885-A-16-10-63** :

Kleinste Streckgrenze von Welle, Kupplung und Passfeder:

$$\sigma_s = 355 \text{ Mpa}$$

Maximale tragende Passfederlänge:

$$L_{tr.max} = 1.3 \cdot d_{Kupplung} = 110.5 \text{ mm}$$

Anzahl der Passfeder:

$$i_{pf} = 1$$

Passfederlänge:

$$L_{pf} = 63 \text{ mm}$$

Passfederhöhe:

$$h_{pf} = 10 \text{ mm}$$

Wellennuttiefe

$$t_{pf} = 6 \text{ mm}$$

Passfederbreite:

$$b_{pf} = 16 \text{ mm}$$

Tragende Länge der Passfeder

$$l_{tr.pf} = L_{pf} - b_{pf} = 47 \text{ mm}$$

Traganteil bei einer Passfeder:

$$\varphi_{pf} = 1$$

Zulässige Flächenpressung

$$P_{zul.pf} = 0.9 \cdot \sigma_s = 319.5 \text{ MPa}$$

Zulässiger Torsionsmoment:

$$M_{zul.pf} = P_{zul.pf} \cdot (h_{pf} - t_{pf}) \cdot l_{tr.pf} \cdot \frac{d_{Kupplung} = 100mm}{2} \cdot i_{pf} \cdot \varphi_{pf} \quad (3.54)$$

Zulässiger Torsionsmoment ist größer als äquivalenter Torsionsmoment ( $M_{zul.pf} > M_t$ ), daher ist Passfeder korrekt gewählt.

Berechnung des maximalen Spitzentorsionsmomentes:

Lastspitzenhäufigkeitsfaktor für Duktile Werkstoffe:

$$f_L = 1.2$$

Spitzentorsionsmoment:

$$M_{spitz.pf} = f_L \cdot M_{zul.pf} = 3.063 \text{ kN.m}$$

Dauerfestigkeitsabschätzung:

$$\frac{L_{pf}}{d_{Kupplung}} = 0.741$$

Für  $\frac{L_{pf}}{d_{Kupplung}} < 1.3$  kann lt. DIN 6892 erwartet werden, dass die Verbindung dauerfest ist [6].

# Kapitel 4

## Wälzlager

### 4.1 Wälzlager-Anordnungen in Ventilatoren

Bei Ventilatoren kann das Laufrad entweder mittig zwischen zwei Lagern oder fliegend zu den beiden Lagerstellen angeordnet werden. Bei mittiger Anordnung erhält jedes der beiden Lager ein gesondertes Gehäuse. Zum Ausgleich von Fluchtfehlern sind dann Pendelkugel oder Pendelrollenlager erforderlich. Die mittige Anordnung des Laufrades wird bei großen Ventilatoren sowie bei Großgebläsen bevorzugt [18].

#### 4.1.1 Fliegende Anordnung

Bei kleinen und mittelgroßen Ventilatoren ist die fliegende Lagerung des Laufrades üblich. Hierbei ist ebenfalls eine Abstützung der Lüfterwelle in zwei getrennten Stehlagergehäusen möglich. Besonders bei hochtourigen Anlagen muß man jedoch aus Gründen der Betriebssicherheit solche Lagerbauarten wählen, die sich für höhere Drehzahlen eignen. In Frage kommen vor allem Rillenkugellager, paarweise eingebaute Schrägkugellager und Zylinderrollenlager; diese Lagerbauarten setzen aber gut fluchtende Gehäusebohrungen voraus. Diese Forderung läßt sich konstruktiv dadurch erfüllen, dass beide Lager in einem gemeinsamen Gehäuse aufgenommen werden. Solche Stehlagergehäuse in der Form einer Rohrkonstruktion werden heute von den Lagerherstellern speziell für Ventilatoren angeboten. (Abbildung 4.1)

Bei der fliegenden Anordnung des Ventilatorrads entsteht jedoch ein Kippmoment aus dem Flügelradgewicht und der Unwucht. Die aus diesem Moment resultierenden Radialkräfte an den Lagerstellen sind gering, wenn der Abstand zwischen den Lagerstellen im Verhältnis zum Abstand zwischen Flügelrad und erster Lagerstelle groß gewählt werden kann. Diese Bedingung erfüllen speziell für Ventilatoren entwickelte Stehlagergehäuse aus der Reihe FAG VR(E) (Fettschmierung) oder FAG VOS (Ölschmierung). Da die Betriebsdrehzahl relativ hoch ist, werden Wälzlager mit hoher Drehzahleignung verwendet, z. B. Zylinderrollenlager zur Aufnahme von Radialkräften und Schrägkugellager für kombinierte, d. h. axiale und radiale Belastungen [18].

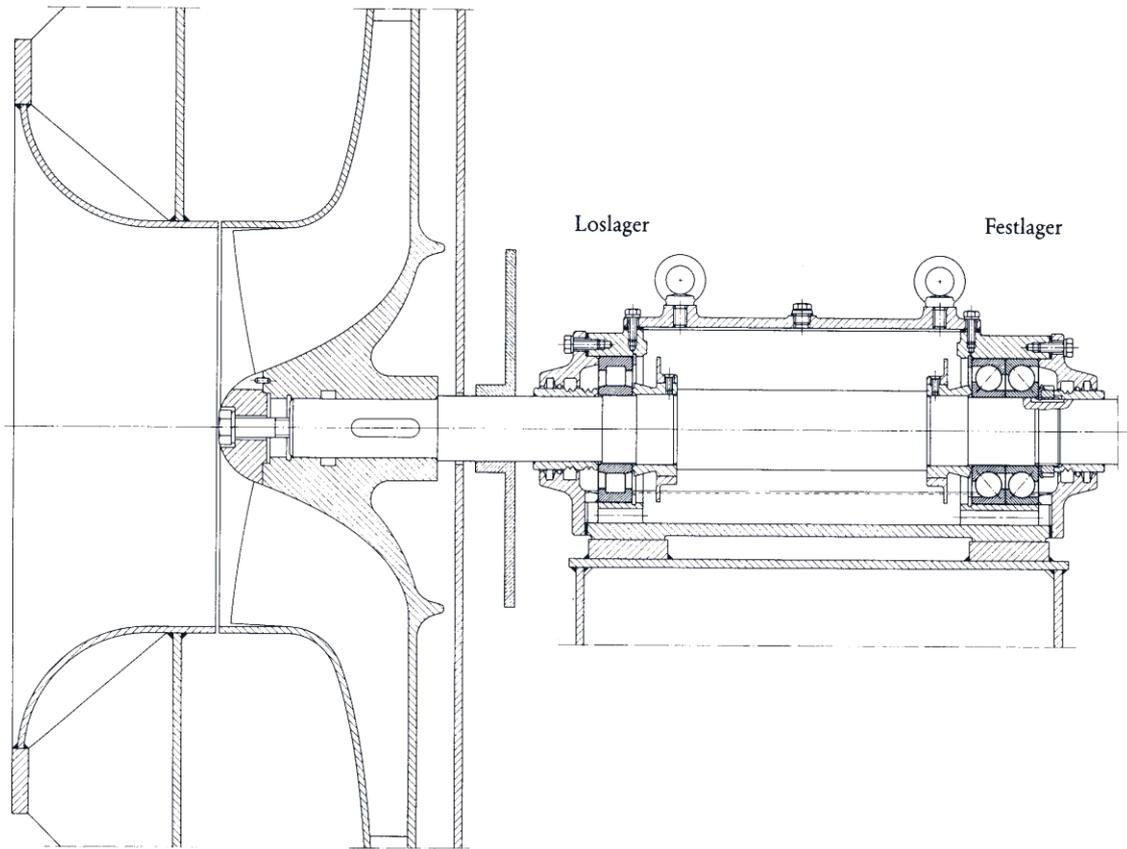


Abbildung 4.1: Rotorlagerung eines Heißgasventilators [18]

## Technische Daten

Das Gebläse ist zweiflutig, Rotorgewicht 2,2 t, Drehzahl 1200 U/min, Rauchgastemperatur ca. 180 °C.

## Lagerwahl

Die Lagerung der Gebläsewelle mit Stehlagern ist einfach und wirtschaftlich. Der Durchmesser der Gebläsewelle ist durch die Festigkeitsrechnung gegeben. Damit liegen auch die Gehäusegröße und die Lagergröße fest.

Gewählt wurde ein Stehlagergehäuse (Grundreihe VOS) für Ölschmierung FAG VOB317. Auf der Ventilatorseite ist ein Zylinderrollenlager FAG NU317E.M1.C3 als Loslager, auf der Antriebsseite zwei Universal-Schräggelager FAG 7317B.MP.UA paarweise in O-Anordnung eingebaut.

Das Nachsetzzeichen UA bedeutet, dass die Lager beliebig zu Tandem-, O- oder X-Anordnung zusammengesetzt werden können; in der X- und O-Anordnung hat das Lagerpaar geringe Axialluft. Durch die Axialluft und die Ölschmierung wird eine übermäßige Erwärmung im Lager und somit eine Vorspannung verhindert. Ferner wurden zur Begrenzung der Lagertemperatur Kühleisen eingebaut. Die Gehäuse sind aus GG 20. Sie sind geteilt; das erleichtert die Montage. Die Ölschmierung im Gehäuse erfolgt durch ein Ölbad mit ca. 4 Liter Inhalt. Ölschleuderscheiben fördern das Öl zu den Lagern. In den Büchsen, die auf der Welle sitzen, sind Spritzrillen eingedreht. Die Gehäusedeckel haben Ölfangnuten und nachschmierbare Fettkammern [18].

Die Dichtungen verhindern das Eindringen von Verunreinigungen sowie das Austreten von Schmierstoff. Es treten nur geringe Reibungsverluste auf. Das Dichtsystem besteht aus Filzringen in den Nuten der beiden Deckel sowie zwei außen anliegenden V-Ringen aus NBR.

#### 4.1.2 Zwischen zwei Lagern

##### Lagerwahl

Die Lagerung soll einfach und billig sein. Man ordnet daher auf jeder Seite des Gebläserades ein einfaches Stehlagergehäuse FAG SN 611 R mit einem Pendelkugellager 2311 K.C3 an. Ein winkeleinstellbares Lager ist erwünscht, weil es schwierig ist, zwei unabhängig voneinander aufgestellte Gehäuse so auszurichten, dass die Bohrungen exakt fluchten. Das Nachsetzzeichen R hinter der Gehäusebezeichnung bedeutet, dass das Stehlager mit Fettridgeleiche ausgerüstet ist. Die Reglerscheibe sorgt dafür, dass auch bei häufigem Nachschmieren der Lagerraum nicht überschmiert wird. Das überschüssige Fett wird in den freien Gehäuseraum neben der Reglerscheibe gefördert. Von dort kann es durch eine Öffnung im Gehäuseunterteil austreten.

Eine Nachrechnung der Ermüdungslebensdauer zeigt, dass die Lager sehr sicher dimensioniert sind. Infolge von Gleitbewegungen (Schlupf) im Lager kann es aber zu vorzeitigem Verschleiß kommen, der die Gebrauchsdauer der Lager beendet, bevor die errechnete Ermüdungslebensdauer erreicht ist [18].

##### Bearbeitungstoleranzen für Welle und Gehäuse

Solange das Gebläserad gut ausgewuchtet ist, haben die Lagerinnenringe Umfangslast. Sie sind mit Spannhülsen FAG H 2311 auf der Welle befestigt. Bei größerer Unwucht des Gebläserades erhält jedoch der Außenring Umfangsast. Er sollte daher nicht zu lose gepasst werden.

Welle: Durchmesser h9, Unrundheit und Kegeligkeit IT6; Gehäuse J6. Zur Abdichtung reichen Filzringe aus [18].

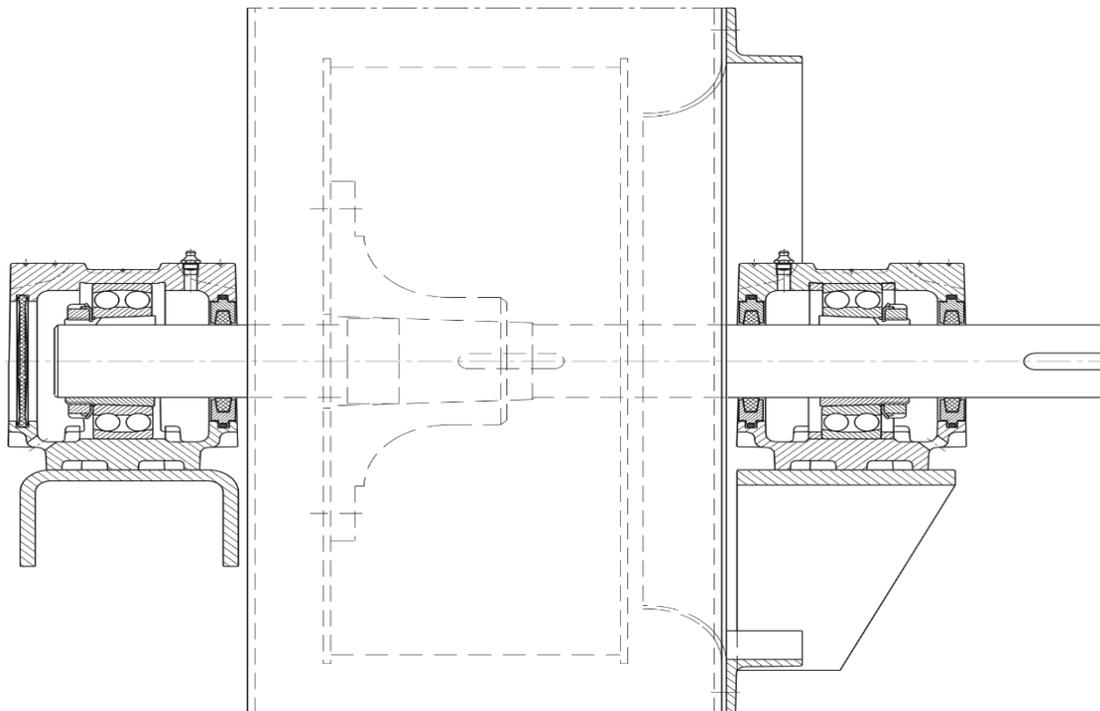


Abbildung 4.2: Rotorlagerung eines Frischluftgebläses [18].

## 4.2 Wälzlagerberechnung

Berechnung der Lager erfolgt anhand des SKF Wälzlager-Katalogs angelehnt an ISO 281:1990. Die im Kapitel 3 angewendeten Wälzlager der Ventilatorwelle werden hier berechnet.

Berechnung des Festlagers (Lager B) 23122 CCK/W33 + H 3122 Pendelrollenlager:

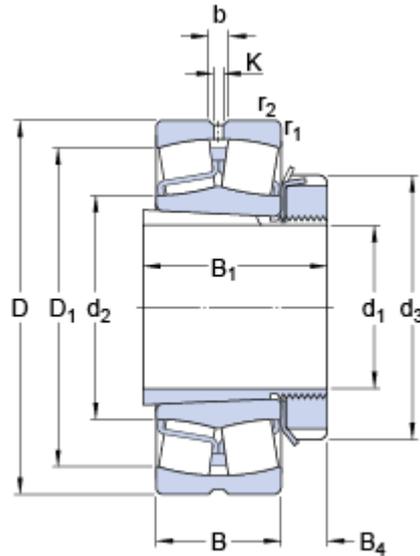


Abbildung 4.3: 23122 CCK/W33 + H 3122 Pendelrollenlager [8]

Belastung des Lagers (Axialkräfte werden nicht berücksichtigt):

$$F_b = 15,004 \text{ kN}$$

Dynamische Tragzahl:

$$C_r = 450 \text{ kN}$$

Ermüdungsgrenzbelastung:

$$P_{ur} = 61 \text{ kN}$$

Bohrungsdurchmesser:

$$d_{innen} = 100 \text{ mm}$$

Außendurchmesser:

$$D_{Außen} = 180 \text{ mm}$$

Mittlerer Lager Durchmesser:

$$D_{ml} = \frac{d_{innen} + D_{Außen}}{2} = 140 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Nominelle Lebensdauer :

$$L_{10} = \left(\frac{C_r}{F_b}\right)^{\left(\frac{10}{3}\right)} = 83820,747 \cdot 10^6 \text{ Millionen Umdrehungen} \quad (4.2)$$

Nominelle Lebensdauer in Stunden:

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{n \cdot 60} = (8,37592 \cdot 10^5) \text{ hr} \quad (4.3)$$

### **Berechnung der erweiterten Lebensdauer:**

#### **Hinweis:**

In VBA für Excel wurde nur die nominelle Lebensdauer nach Rücksprache mit der Firma Sirocco programmiert ( $a_1 = 1$  und  $a_{skf} = 1$ ). In der schriftlichen Arbeit wird die erweiterte Lebensdauer zusätzlich berechnet.

Lebensdauerbeiwert (10% Ausfallwahrscheinlichkeit):

$$a_1 = 1$$

Verunreinigungsbeiwert für mittleren Durchmesser größer als 100 mm und normale Sauberkeit:

$$\eta_c = 0,7$$

Betriebstemperatur:

$$T_{\text{Betrieb}} = 60 \text{ °C}$$

Erforderliche kinematische Viskosität nach DIN 289 ( $n > 1000$  U/min):

$$v_1 = 4500 \cdot n^{-0.5} \cdot D_{ml}^{-0.5} = 9,852 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \quad (4.4)$$

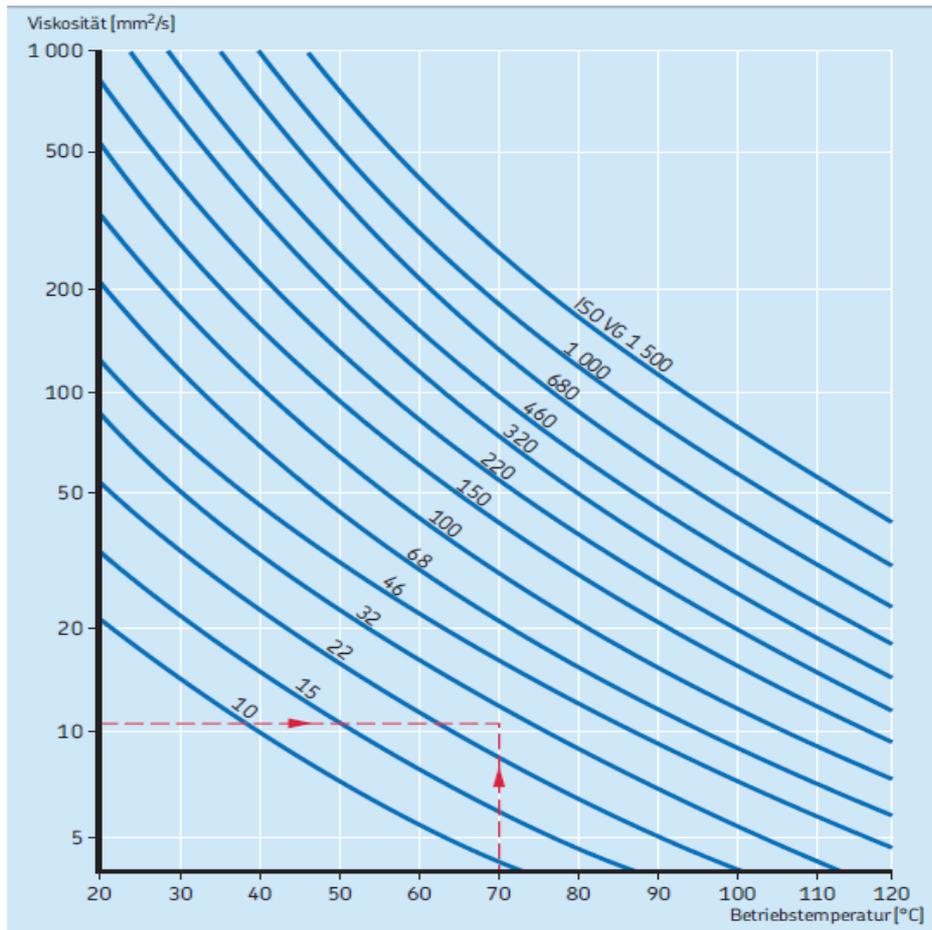


Abbildung 4.4: Viskositäts-Temperatur-Diagramm für ISO Viskositätsklassen [8].

Tatsächliche Betriebsviskosität nach Abbildung 4.12 für Schmieröl ISOVG 68 ( $v = 68 \frac{mm^2}{s}$ ) und Betriebstemperatur  $60^\circ$ :

$$v_{tat} = 30 \frac{mm^2}{s}$$

Viskositätsverhältnis:

$$k = \frac{v_{tat}}{v_1} = 3,044 \quad (4.5)$$

$$Q_1 = \frac{\eta_c \cdot P_{ur}}{F_b} = 2,845 \quad (4.6)$$

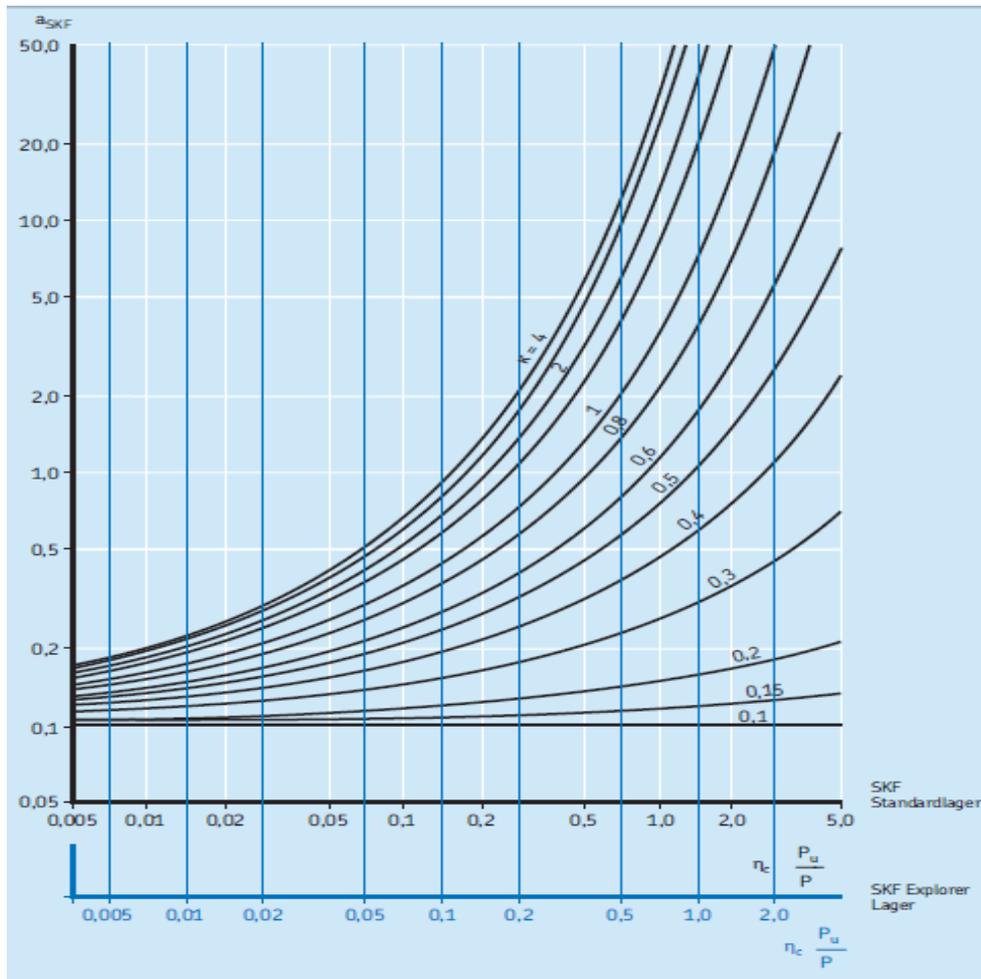


Abbildung 4.5 :Lebensdauerbeiwert  $a_{skf}$  für Radial-Rollenlager

Nach Abbildung 4.13 gibt es kein  $a_{skf}$  für  $k = \frac{v_{tat}}{v_1} = 3,044$  und  $Q_1 = \frac{\eta_c \cdot P_{ur}}{F_b} = 2,845$ , daher wird der maximale Wert des Lebensdauerbeiwertes ( $a_{skf} = 50$ ) eingesetzt [18].

Erweiterte Lebensdauer:

$$L_{10m} = a_{skf} \cdot a_1 \cdot L_{10} = 41,910 \cdot 10^{11} \text{ Millionen Umdrehungen} \quad (4.7)$$

Erweiterte Lebensdauer in Stunden:

$$L_{10mh} = a_{skf} \cdot a_1 \cdot \frac{L_{10m}}{n} = (46,879 \cdot 10^6) \text{ hr} \quad (4.8)$$

# Kapitel 5

## VBA in Excel

### 5.1 Allgemeines

Basic (**B**eginners **A**ll Purpose **S**ymbolic **I**nstruction **C**ode) entstand in den sechziger Jahren als Einsteigerprogrammiersprache [13].

Nach dem Erfolg des 1990 auf dem Markt erschienenen Windows 3.0 wurde aus der bis dahin weiter entwickelten einfachen Programmiersprache mit mittlerweile eigener Entwicklungsumgebung parallel zu Turbo Pascal für Windows und Quic C für Windows das einfach zu handhabende Programmiersystem für die grafische Benutzeroberfläche - Visual Basic entwickelt.

Im Laufe der letzten 15 Jahre ist aus dem anfangs von professionellen Entwicklern noch mitleidig belächelten Werkzeug, ein anerkannt sehr mächtiges und universell verwendbares Entwicklungssystem für Windows - Anwendungen geworden, das nicht nur einfache Applikationen, sondern auch professionelle und umfangreiche kommerzielle Anwendungen erstellen kann.

Die hohe Akzeptanz von Visual Basic liegt in seiner Unkompliziertheit bei der Erstellung von Windows - Applikationen und der relativ leichten Erlernbarkeit seiner Sprache - sowohl für den Fortgeschrittenen, den Umsteiger als auch für Neueinsteiger ohne Programmierkenntnisse.

Die vorliegende Masterarbeit führt in die Grundprinzipien der Arbeit mit Visual Basic ein. Sie beschreibt die Grundelemente der Sprache, einfache Methoden und Verfahren der Arbeit mit Visual Basic und stellt eine Reihe von einfachen Engineering Problemlösungen vor. Die Erstellung von Oberflächen und einfachen Anwendungen wird an Prozedur und Programmbeispielen erläutert.

#### 5.1.1 Programmentwicklung mit Visual Basic

Die Entwicklung eines Programms in Visual Basic umfaßt zwei Hauptschritte:

- die visuelle Programmierung
- die Code - Programmierung

Visual Basic unterscheidet sich von anderen Programmiersprachen in einigen wesentlichen Punkten:

- es existiert kein Hauptprogramm im wesentlichen Sinne
- Visual Basic ist ereignisgesteuert
- es existiert ein 64 KB - Limit für Zeichenketten und Felder
- über DLL - Funktionen besitzt Visual Basic einen direkten Zugriff auf alle Funktionen des Betriebssystems [13].

In der Komponente visuelle Programmierung wird unter Verwendung von Visual Basic-Werkzeugen ohne Eingabe eines Codes der Entwurf eines grafischen Userinterface mit Hilfe der Maus und der Tastatur erstellt.

Bei der Code-Programmierung werden unter Verwendung eines Texteditors Programmkomponenten in der Programmiersprache Visual Basic erstellt. Die Code-Programmierung ist der Programmierung in anderen Programmiersprachen ähnlich, jedoch sehr viel einfacher.

### 5.1.2 Aufbau eines Visual Basic - Programms

Ein Visual Basic - Programm besteht aus mindestens einem Formular mit verschiedenen Bedienungselementen (Buttons, Options-, Textfelder usw.). Die Bedienungselemente werden Steuerelemente genannt und dienen den Eingaben des Benutzers.

Die Reaktion auf die Eingaben erfolgt durch die den Steuerelementen zugeordnete Ereignisprozeduren.

Die Ereignisprozeduren unterteilen sich in:

- generelle Prozeduren, die nur innerhalb eines Formulars verwendet werden (auch lokale Prozeduren genannt)
- globale Prozeduren, die im gesamten Programm verwendet werden können (auch allgemeine Prozeduren genannt).

## 5.2 Die wichtigsten Bedienungselemente

### 5.2.1 Die Oberfläche

Nach dem Start von Visual Basic erscheint die folgende Oberfläche [13]:

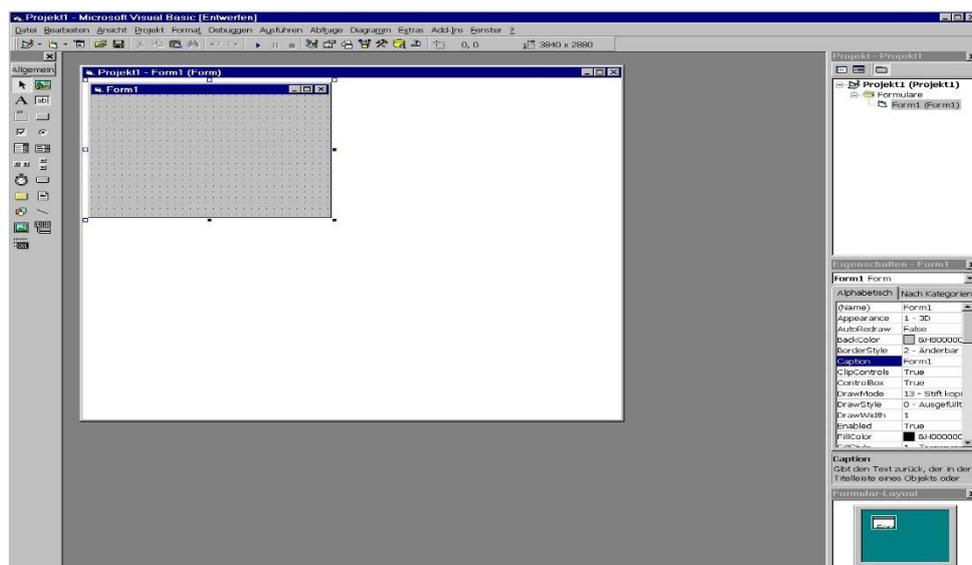


Abbildung 5.1: Die VBA Oberfläche [13]

Diese ist in einzelne Fenster unterteilt, deren Funktion nachstehend kurz erläutert wird.

## 5.2.2 Das Projektfenster

Ein in Visual Basic zu generierendes Programm wird als Projekt verwaltet. Ein Projekt setzt sich aus mehreren Dateien zusammen, die im Projektfenster



Abbildung 5.2: Fenster des Projekt – Explorers

dargestellt werden. Dieses enthält eine Liste sämtlicher Formulardateien, Quelltextmodule und Steuerelementdateien.

## 5.2.3 Das Formularentwurfswfenster

Zu jedem Projekt gibt es mindestens ein Fenster für den Formularentwurf. Beim Starten eines neuen Projekts wird auf dem Bildschirm automatisch ein erstes Entwurfsformular angezeigt:

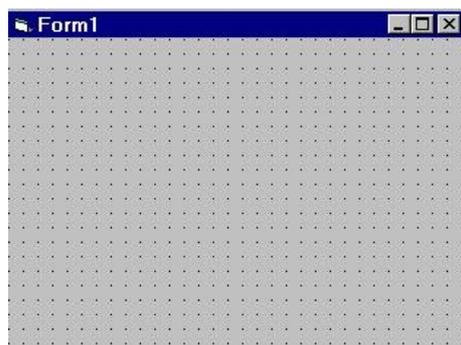


Abbildung 5.3: Das Formularfenster

Das Entwurfsformular besteht aus Rahmen und Titelleiste (Name = Form1), im Arbeitsbereich wird üblicherweise ein Raster bzw. Entwurfsgitter eingeblendet.

Formular ist die Bezeichnung eines Visual Basic - Entwurfswfensters. Das Formular wird in vielen Visual Basic - Programmen als Platzhalter für Steuerelemente verwendet.

## 5.2.4 Das Eigenschaften - Fenster

Jedes Formular und seine Elemente werden durch eine Vielzahl von Parametern (z.B. Position, Höhe, Breite, Hintergrundfarbe usw.) definiert. Diese werden in Visual Basic Eigenschaften genannt und in einem eigenen Fenster als Liste geführt [13].

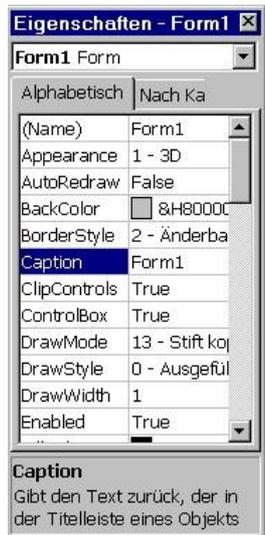


Abbildung 5.4: Das Eigenschaftsfenster

Über diese Liste werden sämtliche Eigenschaften von Formen und Steuerelementen, die zu einem Projekt gehören, in der Entwurfsphase festgelegt und / oder geändert.

### 5.2.5 Die Werkzeugsammlung / Toolbox

Prinzipiell stellt FORM1 schon ein Visual Basic - Programm dar: ein leeres Fenster, welches mit Windows - Grundfunktionen (Vergrößern, Verkleinern, Schließen) manipuliert werden kann.

Eine solche Anwendung löst allerdings noch kein konkretes Anwenderproblem. Daher muß dieses Fenster noch mit Steuerelementen, die bestimmte Aktionen ausführen, gefüllt werden.

Alle Steuerelemente, die zur Ausstattung von Visual Basic gehören, finden sich in der Werkzeugsammlung (Toolbox) am linken Bildschirmrand:



Abbildung 5.5: Die Werkzeugsammlung

Es wird unterschieden zwischen Steuerelementen, die standardmäßig zu Visual Basic gehören und solchen, die über zusätzliche Steuerelementdateien eingebunden werden können.

### 5.2.6 Die Menü- und Symbolleiste

Allen Fenstern übergeordnet ist das Steuerungsfenster von Visual Basic. Von hier aus werden alle vorhandenen Fenster verwaltet.



Abbildung 5. 6: Die Menü- und Symbolleiste

Das Steuerungsfenster setzt sich aus der Menüleiste und der Symbolleiste zusammen. Einige Befehle der Menüleiste werden durch ein Symbol in der Symbolleiste repräsentiert.

## 5.2.7 Das Farbpaletten - Fenster

Formulare und Steuerelemente können in Visual Basic farblich gestaltet werden. Über das Farbpaletten - Fenster:

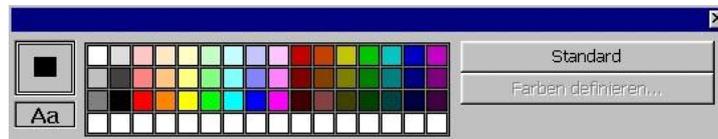


Abbildung 5.7: Die Farbenpalette

können Vorder- und Hintergrundfarben im Entwurfsmodus gesetzt werden. Dabei kann entweder aus der vorhandenen Farbpalette gewählt werden oder es können eigene Farben definiert werden.

## 5.2.8 Das Menüentwurfs - Fenster

Für Formulare können individuelle Menüleisten definiert werden. Für die Definition von Menüleisten steht ein eigenes Fenster zur Verfügung.



Abbildung 5.8: Der Menü – Editor

Ein zu definierendes Menü besteht aus einem Hauptmenü, das einen oder mehrere Einträge enthält. Die Anwahl eines Hauptmenüpunktes öffnet ein evtl. vorhandenes Untermenü mit weiteren Einträgen. Visual Basic unterstützt bis zu 6 Menüebenen (eine Haupt- und 5 Untermenüebenen).

## 5.2.9 Das Programmcode - Fenster

Steuerelemente mit den ihnen zugeordneten Eigenschaften müssen zu einem lauffähigen Programm verbunden werden. Dies geschieht über Programmanweisungen, die in einer festgeschriebenen Codierung geschrieben werden müssen. Für die Eingabe des Quelltextes gibt es in Visual Basic das Codefenster:



Abbildung 5.9: Das Programmcode – Fenster

Dieses Fenster arbeitet prozedurorientiert, d.h. es wird immer nur der Teil des Fensters angezeigt, der zu der ausgewählten Prozedur gehört [13].

## Zwei Beispielprogramme

### Beispiel 1

```
Private Sub Form_Paint ()  
'Erstes Beispielprogramm  
Cls  
Print "Das erste Beispielprogramm"  
End
```



Abbildung 5.10: Ergebnis des zweiten Beispiels

Für das Formular Form 1 tritt das PAINT – Ereignis, wenn das Formular das erste Mal oder wiederholt auf dem Bildschirm angezeigt wird.

Die PRINT - Methode wird zur Ausgabe von Zahlenwerten und Texten direkt ins Formular (nicht in Felder) verwendet.

Die CLS - Methode löscht den Formularinhalt und setzt den Startpunkt für Textausgaben in die obere linke Ecke.

### Beispiel 2

```
Private Sub Command1_Click()  
'Zweites Beispielprogramm  
'Ausgabe einer Meldung im Meldungsfenster Titel = "Zweites  
Beispielprogramm"  
Meldung = "Mein zweites Beispielprogramm"  
MsgBox Meldung, , Titel  
End Sub
```

Hier wurde in das Formular eine Schaltfläche eingefügt. Die obige Prozedur wird ausgeführt, wenn diese Schaltfläche aktiviert (angeklickt) wird. Ausgegeben wird der Inhalt der Variablen Meldung. Die Ausgabe erfolgt in einer Meldungs-Box (MSGBOX). Diese Box erhält in der Titelleiste den in der Variablen Titel gespeicherten Text.

Die MsgBox wird über die vor der Anweisung END SUB stehende Anweisung ausgegeben. Das Formular bleibt in der Oberfläche sichtbar (in der nachfolgenden Abbildung wurde es ausgeschnitten) [13].



Abbildung 5.11: Ergebnis des zweiten Beispiels

## 5.3 Formularentwurf

Am Beispiel eines einfachen Formulars wird im folgenden an Einzelschritten der Weg zum lauffähigen Visual Basic - Programm erläutert. Demonstriert werden zwei Lösungsalternativen:

- Formular mit Befehlsschaltflächen
- Formular mit Menübedienung

### 5.3.1 Einfügen von Steuerelementen in ein Formular

- Visual Basic starten oder, falls schon vorher gestartet und gearbeitet wurde, die Funktionskombination Datei / Neues Projekt auswählen.
- Aus der Werkzeugsammlung (Toolbox) das Textfeld wählen (Bildsymbol ) und dreimal in der Form platzieren (siehe unten stehende Abbildung).
- Vor jedes Textfeld ein Bezeichnungsfeld (Bildsymbol ) platzieren.
- Im unteren Bereich der Form drei Befehlsschaltflächen (Bildsymbol ) einfügen.

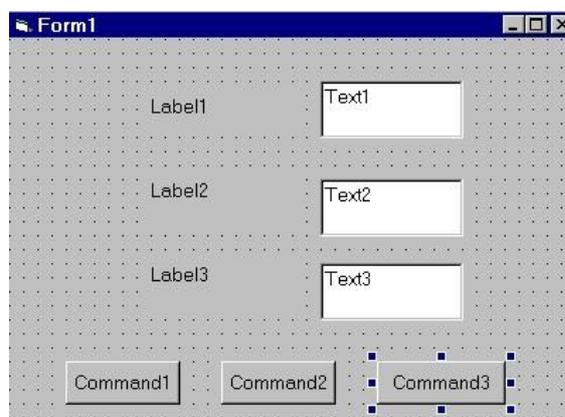


Abbildung 5.12: Formular Version 1

### 5.3.2 Steuerelemente beschriften

- Nacheinander die Bezeichnungsfelder Label1, Label2, Label3 markieren und im Eigenschaftsfenster die Eigenschaft CAPTION in die Werte Seite a:, Seite b: und Seite c: ändern.
- Nacheinander die Befehlsschaltflächen Command1, Command2 und Command3 markieren und im Eigenschaftsfenster die Eigenschaft CAPTION auf Rechnen, Werte löschen und Beenden setzen.
- Die Texte innerhalb der Textfelder löschen, indem im Eigenschaftsfenster die Werte der Eigenschaft TEXT gelöscht werden [13].

### 5.3.3 Formulareigenschaften setzen

- Auf das Entwurfsformular klicken und im Eigenschaftsfenster die Eigenschaft CAPTION in Quader - Volumen und Oberfläche ändern
- Die Eigenschaften MINBUTTON und MAXBUTTON auf FALSE setzen - bewirkt das Ausblenden der Minimierungs- und Maximierungsfelder der Titelleiste nach dem Programmstart.
- Die Eigenschaft BORDERSTYLE auf den Wert 3-FESTER DIALOG setzen - damit kann die Formgröße während der Laufzeit nicht verändert werden.



Abbildung 5.13: Formular Version 2

### 5.3.4 Der Menüentwurf

Formulare können eigene Menüleisten mit Funktionen zur Ablaufsteuerung enthalten. So können beispielsweise die im Kap. 6.1 definierten Befehlsschaltflächen durch Menüeinträge ersetzt werden. Die Menüentwicklung für das hier beschriebene Musterformular wird in folgenden Schritten durchgeführt:

- Menüentwurfswindow öffnen (Funktionskombination EXTRAS / MENÜEDITOR ), um die Menüpositionen Rechnen, Werte löschen und Beenden zu definieren.
- Zuerst den Hauptmenüeintrag Quader definieren. Hierzu im Menüentwurfswindow für CAPTION den Text &Quade8 und als Elementnamen (NAME) MNU\_Quader eingeben.

- Zweite Menüebene einrichten - dazu die Schaltfläche Nächstes und danach die Schaltfläche betätigen. Im Listenfeld des Menüentwurfsfensters erscheinen vier Punkte in einer neuen Zeile.
- Der erste Untermenüpunkt wird definiert, indem für CAPTION der Text &Rechnen und als Steuerelementname MNU\_Rechnen eingetragen wird.
- Die Schaltfläche Nächstes betätigen, um den nächsten Untermenüeintrag zu definieren.
- Analog den Untermenüeintrag Ende definieren (CAPTION = &Ende, NAME = MNU\_End).
- Das Menüentwurfsfenster mit OK verlassen [13].

Für CAPTION &Werte löschen und für den Steuerelementnamen MNU\_Löschen eintragen.



Abbildung 5.14: Menüdefinition

Das Menü mit dazugehörigen Unterfunktionen ist damit eingerichtet und kann unmittelbar im Entwurfsmodus überprüft werden:

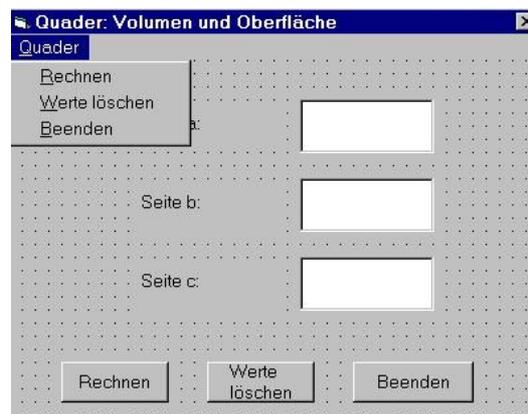


Abbildung 5.15: Fertiges Formular mit Menüleiste

Damit ist die Programmoberfläche des Musterprogramms fertiggestellt und kann mit dem noch fehlenden Programmquelltext versehen werden.

Bevor dieses geschieht, werden zuerst noch einige Grundregeln des Programmierens mit Visual Basic erklärt.

### 5.3.5 Den Programmcode schreiben

In Formulare eingesetzte Steuerelemente mit den ihnen zugeordneten Eigenschaften werden durch Programmanweisungen zu einem Visual Basic - Programm zusammengebunden.

Ein Programm ist eine Aneinanderreihung von Anweisungen.

Eine Anweisung ist eine syntaktische Code - Einheit, die eine bestimmte Art von Operation, Definition oder Deklaration ausdrückt. Eine Anweisung kann ausführbar oder nicht ausführbar sein. Ist sie nicht ausführbar, setzt sie den logischen Ablauf des Programms nicht fort - sie definiert oder deklariert Elemente von Projekten. In einer Programmzeile steht in der Regel eine Anweisung. Sollen in einer Zeile mehrere Anweisungen stehen, müssen diese durch einen Doppelpunkt voneinander getrennt sein.

Visual Basic - Programmanweisungen werden im Codefenster geschrieben. Aus einem Formfenster läßt sich ein Codefenster öffnen durch:

- einen Doppelklick auf die Form
- einen Doppelklick auf ein Steuerelement
- den Befehl Code im Menü Ansicht
- die Taste F7

Aus einem Projektfenster öffnet man das Codefenster durch:

- Markieren des gewünschten Moduls
- anschließendes Anklicken der Schaltfläche Code anzeigen

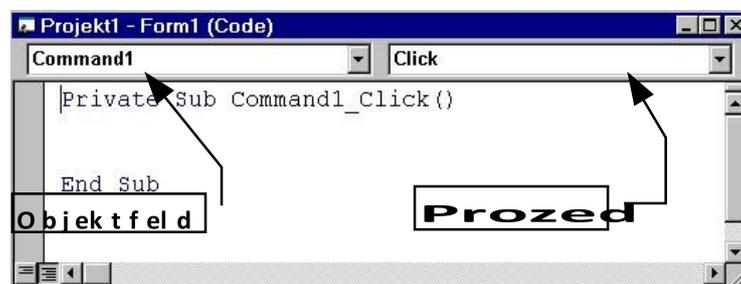


Abbildung 5.16: Das Programmcode - Fenster

Jedem Objekt sind bestimmte Ereignisse zugeordnet, die mit der Einrichtung des Objekts verfügbar gemacht werden. Ereignisse sind Aktionen des Benutzers oder der Systemkomponenten, die von einem Objekt erkannt werden.

Jeder Form und jedem Objekt steht eine vordefinierte Gruppe von Ereignissen zur Verfügung, denen jeweils eine Ereignisprozedur zugeordnet sind. Diese Ereignisprozedur ist nach dem Erstellen des Objekts noch leer und stellt nur einen formellen Rahmen dar. Wird sie mit einem Programmcode versehen, reagiert das Objekt beim Erkennen eines Ereignisses mit der Ausführung des dazugehörigen Codes.

In der traditionellen Programmierung übt das Programm die Kontrolle darüber aus, welcher Programmteil wann ausgeführt wird. Die Ausführung beginnt mit der ersten Zeile des

Hauptprogramms und folgt dann einem bei der Programmerstellung definierten Weg durch das Programm.

Im Visual Basic, als einer ereignisgesteuerten Anwendung, bestimmen die Aktionen (Ereignisse) auf den Objekten die Ausführung dazugehöriger Ereignisprozeduren, wobei die Reihenfolge der Ausführung von der Reihenfolge der Ereignisse bestimmt wird und diese ist beliebig.

Es muß daher jedem gewünschten Ereignis eine Prozedur zugeordnet werden. Über das Objektfeld erhält man eine Liste, in der neben der Form selbst alle in ihr enthaltenen Steuerelemente enthalten sind (in alphabetischer Anordnung).

Das Prozedurfeld ist eine Liste aller Ereignisse, die im Zusammenhang mit einem Steuerelement während der Programmausführung auftreten können. Die Auswahl eines Ereignisses läßt die dazugehörige Ereignisprozedur im Codefenster erscheinen.

Visual Basic ordnet jeder Prozedur ein eigenständiges Unterprogramm zu.

Ein solches Unterprogramm beginnt mit der Anweisung sub und endet mit End Sub. Hinter Sub steht der Unterprogrammname, der sich aus dem Objektnamen und dem zugeordneten Ereignis zusammensetzt. Objektname und Ereignis sind durch einen Unterstrich (\_) verbunden.

Zwischen den Anweisungen SUB und END SUB wird der Programmcode eingefügt [13].

#### **Beispiel:**

```
Sub Ende_Click()  
Beep `Tonausgabe  
End `Programmende  
End Sub
```

Ergebnis: wird auf die Schaltfläche Ende geklickt, so wird ein Ton (Beep) ausgegeben und der Programmablauf beendet.

Der Programmeditor prüft beim Verlassen einer Zeile deren Inhalt. Ist die Anweisung fehlerfrei, bleibt die Farbe der geprüften Anweisung bei schwarz. Ist die Anweisung nach dem Verlassen der Zeile rot, ist sie fehlerhaft. Sollte zusätzlich eine Fehlermeldung auf dem Bildschirm erscheinen, enthält sie in der Regel einen kurzen Kommentartext zur Fehlerart.

Bei der Programmentwicklung ist es empfehlenswert, dem Programmtext dokumentierende Hinweise (Kommentare) beizufügen. Diese können sowohl in eigenen Zeilen als auch zusammen mit den Anweisungen in einer Zeile stehen.

Kommentare beginnen mit einem Hochkomma (siehe obiges Beispiel).

### **5.3.6 Ereignisprozeduren**

Für das im Kapitel 6 erstellte Musterformular sollen nun die Ereignisprozeduren für die Steuerelemente erstellt werden. Da das Formular sowohl über Befehlsschaltflächen als auch über Menüfunktionen gesteuert werden kann, werden im folgenden beide Alternativen berücksichtigt.

## Steuerung über Befehlsschaltflächen

Für die drei im Formular enthaltenen Schaltflächen können die dazugehörigen Ereignisprozeduren die nachfolgenden dargestellten Inhalte haben. Öffnen des Code - Fensters. Ist der Prozedurtext komplett, wird das Code Fenster über die entsprechende Fenster - Schaltfläche geschlossen.

Schaltfläche Beenden:

```
Private Sub Ende_Click()  
    End  
End Sub
```

Schaltfläche zum Löschen der Inhalte der Textfelder:

```
Private Sub Löschen_Click()  
    Text1.Text = ""  
    Text2.Text = ""  
    Text3.Text = ""  
End Sub
```

Schaltfläche zum Berechnen der Werte von Oberfläche und Volumen:

```
Private Sub Rechnen_Click()  
    'Werte ausrechnen ohne Fehleroutine  
    a = Val(Text1.Text)  
    b = Val(Text2.Text)  
    c = Val(Text3.Text)  
    Volumen = a * b * c  
    Flaeche = (2 * a * b) + (2 * b * c) + (2 * a * c)  
    Ergebnis = "Fläche: " + Str(Flaeche) + Chr$(13) + Chr$(10)  
    Ergebnis = Ergebnis + "Volumen: " + Str$(Volumen)  
    MsgBox Ergebnis, 64, "Ergebnis" End  
Sub
```

## Steuerung über Menüleiste

Die Menüfunktion Quader mit Ihren Unterfunktionen Rechnen, Werte löschen und Beenden erhält analog zu den Schaltflächen eigene Ereignisprozeduren. Die Code - Fenster der Unterfunktionen werden durch einen Mausklick auf die jeweilige Unterfunktion im Entwurfsmodus des Formulars geöffnet. Die Prozeduren haben fast den gleichen Inhalt, wie die für die Schaltflächen - der einzige Unterschied liegt im Objektnamen.

In der Bedienung besteht allerdings ein Unterschied zur Bedienung über die Schaltflächen:

- Die Ausführung ist sowohl über einen Mausklick auf die gewünschte Funktion oder Unterfunktion, als aber auch über die Tastatur abrufbar. Dabei ist folgendes zu beachten:
- Bei der Generierung der Menüeinträge wurde durch die Art der Benennung (&Quader, &Ende, &Rechnen usw.) erreicht, dass die hinter dem Zeichen „&“ stehenden Buchstaben im Menü unterstrichen sind [13].

Dieses ermöglicht den Aufruf der Menüfunktionen über die Tastatur:

Die Hauptfunktion (Quader) über die Tastenkombination Alt + Q.

Die Unterfunktionen über die Eingabe des unterstrichenen Buchstabens.

Menüfunktion Beenden:

```
Private Sub MNU_Ende_Click()  
    End  
End Sub
```

Menüfunktion zum Löschen der Inhalte der Textfelder:

```
Private Sub MNU_Löschen_Click()  
    Text1.Text = ""  
    Text2.Text = ""  
    Text3.Text = "" End  
Sub
```

Menüfunktion zum Berechnen der Werte von Oberfläche und Volumen:

```
Private Sub MNU_Rechnen_Click() 'Werte ausrechnen ohne  
Fehlerroutine  
a = Val(Text1.Text)  
b = Val(Text2.Text)  
c = Val(Text3.Text)  
  
Volumen = a * b * c  
Flaeche = (a * c + b * c + a * c) * 2  
  
Ergebnis = "Fläche: " + Str(Flaeche) + Chr$(13) + Chr$(10)  
Ergebnis = Ergebnis + "Volumen: " + Str$(Volumen)  
MsgBox Ergebnis, 64, "Ergebnis" End Sub
```

### **Hinweis:**

Die Menüfunktionen können in der Praxis auch noch wesentlich einfacher belegt werden.

Da es für die Aktionen Rechnen, Löschen und Beenden schon fertige Prozeduren für die Schaltflächen gibt, können diese benutzt werden, indem man sie in den Menüprozeduren aufruft.

Damit reduzieren sich die Prozeduren für die Menüpunkte zu:

```
Private Sub MNU_Ende_Click()  
    End  
End Sub  
  
Private Sub MNU_Löschen_Click()  
    Löschen_Click  
End Sub  
  
Private Sub MNU_Rechnen_Click()  
    Rechnen_Click  
End Sub
```

### 5.3.7 Programmaufruf

Nach der Durchführung bisher beschriebener Schritte zur Formular- und Prozedurerstellung ist das Beispielprogramm komplett und kann ausgeführt werden. Dieses kann entweder über die Funktionskombination AUSFÜHREN / STARTEN oder über die Schaltfläche  geschehen. Nach dem Start können in die Textfelder beliebige numerische Werte eingetragen werden, für die dann das Volumen und die Oberfläche des Quaders ausgerechnet werden. Die Ergebnisse werden in einer MESSAGE - BOX ausgegeben:



Abbildung 5.17: Formular nach Programmdurchlauf

Die Bedienung der Oberfläche kann über Schaltflächen oder Menüfunktionen erfolgen. Beide Alternativen führen zu gleichen (auch optischen) Ergebnissen [13].

### 5.3.8 EXE-Datei erstellen

Um das Projekt (Visual Basic - Programm) unabhängig von Visual Basic direkt aus Windows starten zu können, muß es noch in eine ausführbare Datei (EXE - Datei) umgewandelt werden. In dieser werden die Formmodule, Standardmodule, Klassenmodule und Ressourcdateien eines Projekts zusammengefaßt.

Eine ausführbare Datei ist lauffähig, ohne dass Visual Basic geöffnet oder gestartet werden muß. Zur Ausführung einer ausführbaren Datei muß sich die Laufzeitdatei VB40032.DLL (für 32-Bit Betriebssysteme) im Verzeichnis \WINDOWS\SYSTEM oder in einem Verzeichnis im Standardpfad des Benutzers befinden. Je nach Anforderungen der Projekt - .EXE-Datei benötigt man ggf. noch weitere .DLL-Dateien.

Die Erstellung einer EXE - Datei hat keine Wirkung auf die Projektdateien. Der Projektstand wird in der .EXE „konserviert“, so dass man weiter mit den Originaldateien arbeiten oder diese verändern kann, ohne dass die ausführbare Datei von den Änderungen betroffen wird [13].

### Formulargestaltung

Für die Entwicklung von Formularen steht in Visual Basic mindestens ein Formularfenster (Form 1) zur Verfügung. Form 1 ist das Hauptformular eines Visual Basic - Programms. Dieses (und jedes andere Formular) besitzt Standardeigenschaften, die im Eigenschaftsfenster im Entwurfsmodus definiert oder verändert werden können.

Die Position und Größe eines Formulars während der Ausführungszeit entspricht den Werten im Entwurfsmodus, es sei denn die Standardwerte werden per Programmanweisung verändert.

### 5.3.9 Grundeigenschaften

- **Name** eine Eigenschaft, die dem Formular einen Namen zuweist, unter dem es im Programmtext angesprochen werden kann. Prinzipiell spricht nichts gegen die vom System vergebenen Standardnamen (Form 1, Form 2 usw.), jedoch sollte der Übersichtlichkeit wegen einem Formular ein spezifischer Name zugeordnet werden. Beim Abspeichern des Formulars wird der vergebene Name auch der dazugehörigen Datei zugeordnet (Namenserweiterung FRM).
- **Caption**

eine Eigenschaft, die den Text der Titelleiste eines Formulars festlegt

- **BorderStyle** eine Eigenschaft, die festlegt, ob das Fenster während der Laufzeit eines Programms durch Rahmenanwahl mit der Maus oder über die Option Größe ändern des Systemmenüs in seiner Größe verändert werden kann.
- **Max- / MinButton** eine Eigenschaft, die die Generierung des Vergrößerungs- bzw. Verkleinerungsfeldes eines Fensters beeinflusst.

Über das Vergrößerungsfeld kann ein Formularfenster zur Laufzeit auf Vollbildgröße gezoomt werden.

Das Verkleinerungsfeld setzt ein Formularfenster in Symbolgröße.

Soll in einem Formular zur Laufzeit weder das Verkleinerungs- noch das Vergrößerungssymbol generiert werden, ist die Eigenschaft MaxButton bzw. MinButton auf den Wert False zu setzen [13].

### 5.3.10 Formularsteuerelemente

Die Erstellung einer Visual Basic - Anwendung beginnt i.d.R. damit, dass aus einem Formular und Steuerelementen eine Benutzeroberfläche generiert wird. Alle Objekte erhalten im nächsten Schritt definierte Eigenschaften und werden dann durch einen Visual Basic - Code so aktiviert, dass sie die Ihnen im Programmkonzept zugewiesenen Funktionen erfüllen können.

Steuerelemente dienen dazu, Eingaben der Benutzer entgegenzunehmen und Informationen an die Benutzer auszugeben. Jedes Steuerelement verfügt, ebenso wie Formulare, über Eigenschaften, Ereignisse und Methoden. Die verfügbaren Steuerelemente sind in einem eigenem Fenster - der Werkzeugsammlung untergebracht.

Um ein Steuerelement in ein Formular einzufügen, wird es in der Werkzeugleiste entweder doppelt angeklickt, oder einfach angeklickt und anschließend im Formular bezüglich Position und Größe definiert (mit der Maus „gezeichnet“). Das Anklicken eines Steuerelements in einem Formular, erlaubt dessen nachträgliche Bearbeitung.

Wird ein Steuerelement im Formular angeklickt und die linke Maustaste gehalten, kann das Element an beliebige Positionen im Formular verschoben werden.

Die Anwahl des Rahmens eines Steuerelements (linke Maustaste gehalten) ermöglicht die nachträgliche Größenänderung des Elements [13].

Das Verhalten, Aussehen und Form eines Elements kann über das Eigenschaftsfenster oder über Anweisungen im Programmtext definiert und / oder verändert werden.

### **Zeiger**



Ein standardmäßig aktiviertes Bedienungselement (Werkzeug). Einziges Werkzeug, mit dem kein Steuerelement erzeugt wird; es dient lediglich dazu, bereits erstellte Steuerelemente bezüglich ihrer Größe und Position im Formular zu verändern bzw.

### **Linie**



Das Liniensteuerelement zum Zeichnen unterschiedlicher Arten von Linien

(horizontal, vertikal, diagonal) im Entwurfsmodus eines Formulars, um optische Strukturierungen der Formulare zu erreichen (z.B. Begrenzungen von Formularbereichen).

### **Figur**



Ein Steuerelement zum Zeichnen geometrischer Grundformen (Rechtecke, Quadrate, Kreise und Ellipsen) zur Entwurfszeit. In der Regel werden diese Elemente zum Eingrenzen von Formularbereichen benutzt (siehe auch Linie).

### **Bezeichnungsfeld**



Das Bezeichnungsfeld wird zur Anzeige von Texten (Informationsausgabe), die der Benutzer zur Ausführungszeit i.d.R. nicht verändert, verwendet. Oft wird es für Beschriftungen von Steuerelementen benutzt. Bezeichnungsfelder besitzen insbesondere drei Eigenschaften, die das Erscheinungsbild ihrer Beschriftungen entscheidend bestimmen:

Alignment - bestimmt die Ausrichtung des Textes:

Wert	Bedeutung
0	links ausgerichtet (left justify - Voreinstellung)
1	rechts ausgerichtet (right justify)
2	zentriert (center)

AutoSize - automatische Anpassung der Elementgröße an den Inhalt (Größe) des anzuzeigenden Textes:

Wert	Bedeutung
True	Größe automatisch anpassen
False	keine automatische Größenanpassung (Voreinstellung), überschüssiger Text wird abgeschnitten.

WordWrap - Anpassung der Größe des Bezeichnungsfeldes in horizontaler bzw. vertikaler Richtung durch Textumbruch, wenn AutoSize auf True gesetzt ist:

Wert	Bedeutung
True	Anpassung in der Höhe, mit Textumbruch
False	Anpassung in der Breite, kein Textumbruch (Voreinstellung)

## Textfeld



Das Steuerelement Textfeld wird zur Anzeige von Texten, als Eingabefeld oder Abfragefeld für Benutzereingaben verwendet (Werte- bzw. Texteingabe oder -änderung).

Textfelder können einzeilig oder mehrzeilig sein. Zum Einsatz kommen sie hauptsächlich im Bereich von Dialogfeldern und Eingabemasken.

Textfelder werden insbesondere durch zwei Eigenschaften entscheidend beeinflusst:

- **MultiLine** - legt fest, ob ein Textfeld bei der Ein- bzw. Ausgabe von Werten mehrere Zeilen akzeptieren soll:

Wert	Bedeutung
True	mehrere Zeilen möglich
False	nur eine Zeile zulässig (Voreinstellung)

- **ScrollBars** - definiert vertikale und /oder horizontale Bildlaufleisten für das Textfeld:

Wert	Bedeutung
0	(Voreinstellung) None - keine Laufleisten
1	horizontale Laufleiste (Horizontal)
2	vertikale Laufleiste (Vertical)
3	beide Laufleisten (Both)

Ist die definierte Größe des Textfeldes bei gesetztem Wert TRUE der Eigenschaft MULTILINE für die Anzeige oder Eingabe des Textes zu klein, wird der Text umbrochen und nach oben verschoben (oberer Textteil verschwindet aus der Anzeige). Der verschwundene Textteil ist nicht mehr einsehbar (besonders ungünstig bei Textausgabe). Um diesen Nachteil zu vermeiden, sollte eine entsprechende Laufleiste über die Eigenschaft SCROLLBARS definiert werden. Soll der Inhalt eines Textfeldes zentriert werden (ALIGNMENT - Eigenschaft), muß MULTILINE auf TRUE gesetzt werden, auch wenn nur eine Zeile im Textfeld dargestellt wird.

Mit zwei weiteren Eigenschaften lassen sich Textfelder zusätzlich beeinflussen:

- **MaxLength** - beschränkt die Anzahl Zeichen in einem Textfeld auf einen vom Benutzer definierten Wert. Wird die Obergrenze überschritten, wird der Benutzer akustisch gewarnt. Die Voreinstellung 0 bedeutet dabei, dass die Zeichenzahl nicht beschränkt ist in der Praxis heißt es - unter z.B WINDOWS 7 nur durch den verfügbaren Systemspeicher begrenzt.
- **PasswordChar** - eine Eigenschaft, die oft mit MAXLENGTH kombiniert wird, um Paßwortabfragen zu ermöglichen. Sie bestimmt ein Platzhalterzeichen (meistens ein Stern \*), welches bei der Texteingabe im Textfeld erscheint. Diese Eigenschaft ist nur bei einzeiligen Textfeldern möglich (MULTILINE=FALSE) [13].

## Befehlsschaltfläche

 Die Befehlsschaltfläche ist das Abbild einer Funktionstaste, die nach der Betätigung die Ausführung definierter Funktionen auslöst. Es existieren mehrere Möglichkeiten, eine Befehlsschaltfläche zur Laufzeit zu aktivieren:

- Anklicken mit der linken Maustaste
- Tastenkombination ALT + unterstrichener Buchstabe der Tastenbeschriftung.
- Aktivieren der Schaltfläche mittels der TAB - Taste und Betätigen der ENTER- Taste
- Falls die Schaltfläche eine Standard - Abbruch - Schaltfläche ist - Betätigen der ESCAPE Taste.
- Falls die Schaltfläche eine Standard - Befehlsschaltfläche ist - Betätigen der ENTER Taste
- Setzen der VALUE - Eigenschaft im Programmcode.
- Alle genannten Aktionen aktivieren die zur Befehlsschaltfläche dazugehörige CLICK Ereignisprozedur, die den die dazugehörige Operation aktivierenden Programmcode enthält. Ohne den dazugehörigen Programmcode bleibt eine in ein Formular eingebrachte Schaltfläche ohne Wirkung.

## 5.4 Programmbeispiel von Modellwelle

In diesem Teil wird alle Formel von Kapitel 3 bezüglich Festigkeitsberechnung, kritische Drehzahl Berechnung, Wälzlager und Passfeder Berechnung in VBA Programmiert und als Userform zu Verfügung steht.

### 5.4.1 Festigkeitsberechnung

Es soll ein Formular zur Berechnung der Sicherheit gegen Dauerbruch und Gewaltbruch erstellt werden. Zuerst werden alle Kurzbeschreibungen mit einem bekannten Symbol gekennzeichnet, welche im Userform-Fenster genau gekennzeichnet werden sollen (Abbildung 5.18).

Hinweis:

Es wird nur ein Teil von den gesamten Quellcodes aufgrund Geheimhaltung in dieser Arbeit beschrieben.

```
Private Sub CommandButton1_Click()

    'Inputs

    m1 = t1.Text           Laufradgewicht
    mk = t2.Text           Kupplungsgewicht
    E = t3.Text            Elastizitätsmodul
    n_an = t4.Text         Antriebsdrehzahl
    p = t5.Text            antriebsleistung
    D1 = t6.Text           Laufraddurchmesser
    k = t7.Text            Anwendungsfaktor
    Ks = t8.Text           Stoßfaktor
    lha = t10.Text         Lebensdauer in Stunde von Lager A
    lhb = t11.Text         Lebensdauer in Stunden von Lager B
    a_1 = t12.Text         Länge a_1 = 75 mm
    a_2 = t13.Text         Länge a_2 = 375 mm
    a_3 = t14.Text         Länge a_3 = 775 mm
    a_4 = t15.Text         Länge a_4 = 900 mm
    b_1 = t16.Text         Länge b_1 = 75 mm
    b_2 = t17.Text         Länge b_2 = 275 mm
    b_3 = t18.Text         Länge b_3 = 475 mm
    b_4 = t19.Text         Länge b_4 = 600 mm
    Lk = t20.Text          Länge L_k
    da1 = t21.Text         Durchmesser da_1 = 100 mm
    da2 = t22.Text         Durchmesser da_2 = 125 mm
    da3 = t23.Text         Durchmesser da_3 = 160 mm
    da4 = t24.Text         Durchmesser da_4 = 180 mm
    db1 = t25.Text         Durchmesser db_1 = 100 mm
    db2 = t26.Text         Durchmesser db_2 = 125 mm
    db3 = t27.Text         Durchmesser db_3 = 160 mm
    db4 = t28.Text         Durchmesser db_4 = 180 mm
    Lw = t29.Text          Länge L_w
    bw = t34.Text          Biegewechselfestigkeit b_w
    tw = t35.Text          Torsionswechselfestigkeit t_w
    Re = t36.Text          Streckgrenze der Welle Re
    RB = t37.Text          Zugfestigkeit der Welle RB
    Rz = t38.Text          Oberflächenrauigkeit Rz
    ro = t46.Text          Wellendichte ro
```

Im nächsten Schritt werden die Festigkeitsformeln beschrieben. In diesem Beispiel wird der Festigkeitsnachweis an der Stelle b\_3 durchgeführt. Um die Berechnungen zu vereinfachen, wird der Kerbradius als Differenz zwischen zwei Durchmessern herangezogen.

'Festigkeitberechnung an der Stelle b\_3

```

mbb_3 = Fb_fest * b_3 Biegemoment
Bie_Spb_3 = (mbb_3) / (3.141592 * (db3 ^ 3) / 32) Biegespannung
M_tor = (p) / ((2 * 3.141592 * n_an) / (60)) Torsionsmoment
Tor_Sp_Mittb_3 = (k * M_tor / ((3.141592) * ((db3 / 1000) ^ 3) / (16))) /
1000000 Torsionsspannung

If db4 > db3 Then
D1b_3 = db4 / 32
D2b_3 = db4 / 100
D3b_3 = db3 / 7.5
tb_3 = (db4 - db3) / 2
Else
D1b_3 = db4 / 32
D2b_3 = db4 / 100
D3b_3 = db4 / 7.5
tb_3 = (db3 - db4) / 2 Kerbtiefe
End If

rb_3 = tb_3 Kerbradius

f1b_3 = 0.26 * Log(D1b_3) / Log(10)
K1sb_3 = 1 - f1b_3 Technologischer größeneinflußfaktor
If db4 < 100 And db3 < 100 Then
K1Bb_3 = 1 Technologischer größeneinflußfaktor
Else
K1Bb_3 = 1 - (0.23 * Log(D2b_3) / Log(10))
End If

Re_sb_3 = K1sb_3 * Re Bauteilstreckgrenze
RB_Bb_3 = K1Bb_3 * RB Bauteiltzugfestigkeit
V1b_3 = rb_3 / tb_3
V2b_3 = rb_3 / db3
V3b_3 = db3 / db4
D4b_3 = RB_Bb_3 / 20

Formzahl_Biegb_3 = 1 + (1 / (((0.62 * V1b_3) + ((11.6 * V2b_3) * ((1) + (2 *
V2b_3)) ^ 2)) + (0.2 * (V1b_3 ^ 3) * (V3b_3)))) ^ 0.5)
Formzahl_Torb_2 = (1) + ((1) / ((3.4 * V1b_3) + ((38 * V2b_3) * ((1) + (2 *
V2b_3)) ^ 2) + ((V1b_3 ^ 2) * (V3b_3)))) ^ 0.5)
Pfib_3 = (1) / ((4 * ((1 / V1b_3) ^ 0.5)) + (2))

Sgefälle_Bb_3 = (2.3 * (1+Pfib_3)) / rb_3 Sapnungsgefälle Biegung
Sgefälle_Tb_3 = 1.15 / rb_3
Sfaktorb_3 = -1 * (0.33 + (Re_sb_3 / 712))
Stützzahl_Bb_3 = 1 + ((Sgefälle_Bb_3 ^ 0.5) * (10 ^ Sfaktorb_3))
Stützzahl_Tb_3 = 1 + ((Sgefälle_Tb_3 ^ 0.5) * (10 ^ Sfaktorb_3))
Kerbwirkungszahl_Bb_3 = Formzahl_Biegb_3 / Stützzahl_Bb_3
Kerbwirkungszahl_Tb_3 = Formzahl_Torb_3 / Stützzahl_Tb_3

```

```

If 7.5 < db3 < 150 And 7.5 < db4 < 150 Then
f3b_3 = 0.2 * Log(D3b_3) / Log(10)
f4b_3 = Log(20) / Log(10)
k2b_3 = 1 - (f3b_3 / f4b_3)
Else
k2b_3 = 0.8
End If

f5b_3 = Log(Rz) / Log(10)
f6b_3 = Log(D4b_3) / Log(10)

Oberflächenrauheit_Bb_3 = 1 - ((0.22) * ((f5b_3) * ((f6b_3) - 1)))
Oberflächenrauheit_Tb_3 = (0.575 * Oberflächenrauheit_Bb_3) + (0.425)
Gesamteinflussfaktor_Bb_3 = (Kerbwirkungszahl_Bb_3 / k2b_3) + (1 /
Oberflächenrauheit_Bb_3) - (1)
Gesamteinflussfaktor_Tb_3 = (Kerbwirkungszahl_Tb_3 / k2b_3) + (1 /
Oberflächenrauheit_Tb_3) - (1)
Wechselfestigkeit_bwkb_3 = (bw * K1Bb_3) / (Gesamteinflussfaktor_Bb_3)
Wechselfestigkeit_twkb_3 = (tw * K1Bb_3) / (Gesamteinflussfaktor_Tb_3)
empf_bb_3 = (Wechselfestigkeit_bwkb_3) / ((2 * RB_Bb_3) -
(Wechselfestigkeit_bwkb_3))
empf_tb_3 = (Wechselfestigkeit_twkb_3) / ((2 * RB_Bb_3) -
(Wechselfestigkeit_twkb_3))
Tor_sp_ampb_3 = Tor_Sp_Mittb_3 / 2
Vergleichsmittelspannung_Bb_3 = (3 * Tor_sp_ampb_3 ^ 2) ^ 0.5
Vergleichsmittelspannung_tb_3 = Vergleichsmittelspannung_Bb_3 / (3 ^ 0.5)
Amp_ADKBb_3 = Wechselfestigkeit_bwkb_3 - (empf_bb_3 *
Vergleichsmittelspannung_Bb_3)
Amp_ADKtb_3 = Wechselfestigkeit_twkb_3 - (empf_tb_3 *
Vergleichsmittelspannung_tb_3)
Sicherheit_Dauerbruchb_3 = (1) / (((Bie_Spb_3 / Amp_ADKBb_3) ^ 2) +
((Tor_sp_ampb_3 / Amp_ADKtb_3) ^ 2)) ^ 0.5
Bie_Sp_flb_3 = 1.32 * Re_sb_3
Tor_Sp_flb_3 = (Re_sb_3 / (3 ^ 0.5)) * 1.2
Sicherheit_Fließb_3 = 1 / (((Bie_Spb_3 * Ks) / (Bie_Sp_flb_3)) ^ 2) +
(((Tor_Sp_Mittb_3 * (Ks / k)) / (Tor_Sp_flb_3)) ^ 2)) ^ 0.5

```

## 5.4.2 Userform der Berechnungen

Da die Formeln in Userform einfach benützt werden können, werden alle Dateien in einem Userinterface zusammengefasst und zu Verfügung gestellt. Der Unterschied zwischen dem Programm und der Beispielwelle von Kapitel 3 ist, dass das Kupplungsgewicht auch berücksichtigt worden ist. In Abbildung 5.18 ist das fertige Programm von der Modellwelle dargestellt.

The image shows a VBA Userform for shaft calculation. It consists of a technical drawing on the left and input/output fields on the right. The drawing shows a shaft with various diameters (da1, da2, da3, da4, db1, db2, db3, db4) and distances (a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3, b4, Lk, LS). Forces FA, FB, FL, and FK are applied. The input fields include: Lafradgewicht (kg), Kupplungsgewicht (kg), E\_modul (N/mm^2), Antriebsdrehzahl (1/min), Antriebsleistung (W), Lafraddurchmesser (mm), Anwendungsfaktor K\_A, Stoßfaktor K\_S, Lagerlebensdauer A (Stunden), Lagerlebensdauer B (Stunden), Biegewechselfestigkeit (N/mm^2), Torsionswechselfestigkeit (N/mm^2), Zugstreckgrenze (N/mm^2), Zugfestigkeit (N/mm^2), Oberflächenrauigkeit (µm), and Wellendichte (kg/m^3). The output fields include: Gewicht der Welle (kg), Maximale Durchbiegung (mm), Kritische Drehzahl (1/min), Mindest Sicherheit gegen Dauerbruch nach DIN 743, Mindest Sicherheit gegen Fließgrenze nach DIN 743, Dynamische Tragzahl des Lagers A (kl), and Dynamische Tragzahl des Lagers B (kl). A 'Calculate' button is located between the input and output sections.

Abbildung 5.18: VBA Userform für Wellenberechnung

Die kleinste Mindestsicherheit wurde in acht verschiedenen Kerbstellen anhand der folgenden Formeln dargestellt:

```

Range("a1") = "DB b_1"   Sicherheit gegen Dauerbruch an der Stelle b_1
Range("a2") = "DB b_2"   Sicherheit gegen Dauerbruch an der Stelle b_2
Range("a3") = "DB b_3"   Sicherheit gegen Dauerbruch an der Stelle b_3
Range("a4") = "DB a_1"   Sicherheit gegen Dauerbruch an der Stelle a_1
Range("a5") = "DB a_2"   Sicherheit gegen Dauerbruch an der Stelle a_2
Range("a6") = "DB a_3"   Sicherheit gegen Dauerbruch an der Stelle a_3
Range("a7") = "GB b_1"   Sicherheit gegen Gewaltbruch an der Stelle b_1
Range("a8") = "GB b_2"   Sicherheit gegen Gewaltbruch an der Stelle b_2
Range("a9") = "GB b_3"   Sicherheit gegen Gewaltbruch an der Stelle b_3
Range("a10") = "GB a_1"  Sicherheit gegen Gewaltbruch an der Stelle a_1
Range("a11") = "GB a_2"  Sicherheit gegen Gewaltbruch an der Stelle a_2
Range("a12") = "GB a_3"  Sicherheit gegen D Gewaltbruch an der Stelle a_3

```

```

Range("b1").Value = Sicherheit_Dauerbruchb_1
Range("b2").Value = Sicherheit_Dauerbruchb_2
Range("b3").Value = Sicherheit_Dauerbruchb_3
Range("b4").Value = Sicherheit_Dauerbrucha_1
Range("b5").Value = Sicherheit_Dauerbrucha_2
Range("b6").Value = Sicherheit_Dauerbrucha_3
Range("b7").Value = Sicherheit_Fließb_1
Range("b8").Value = Sicherheit_Fließb_2
Range("b9").Value = Sicherheit_Fließb_3
Range("b10").Value = Sicherheit_Fließa_1
Range("b11").Value = Sicherheit_Fließa_2
Range("b12").Value = Sicherheit_Fließa_3

```

```

Set Rng = Sheet1.Range("b1:b6")
Set Rng2 = Sheet1.Range("b7:b12")
'Worksheet function MIN returns the smallest value in a range
dblMin = Application.WorksheetFunction.Min(Rng)
Gblmin = Application.WorksheetFunction.Min(Rng2)

```

### 5.4.3 Vergleich der Ergebnisse mit eAssist (the engineering Assistant)

GWJ Technology, mit Sitz in Braunschweig, ist in den Bereichen Maschinenbausoftware, eBusiness und e-Engineering tätig. Sie verfügen über langjährige Erfahrungen in der Berechnung und Softwareentwicklung im Maschinenbau. Umfangreiches Fachwissen sowie ein hoher Qualitätsanspruch fließen in den eAssistant ein .

Es stehen verschiedene Berechnungsmodule, wie z.B. für Wellen, Welle-Nabe Verbindungen, Federn oder Zahnriementriebe, zur Verfügung.

Die anerkannten Berechnungsmethoden sind umfassend und praxisgerecht umgesetzt. Ein Beispiel hierfür ist die Wellenfestigkeitsberechnung nach DIN 743 in ihrer aktuellen Fassung. Die Berechnungsmodule zeichnen sich durch eine einfache Bedienung und Auslegungsfunktionen aus. Besonders hervorzuheben ist die interaktive Grafik in der Wellenberechnung. Hier kann die Wellengeometrie mit den verschiedenen Kraftelementen und Lagern aufgebaut werden. Der Anwender kann während der Arbeit Standardwerte bequem aus angebotenen Werkstoff- oder Geometriedatenbanken auswählen und wird somit optimal unterstützt.

Ergebnisse werden zur besseren Anschauung grafisch dargestellt. Dabei sind die Diagramme interaktiv. Durch Mausklick werden entsprechende Diagrammwerte angezeigt.

Für die Dokumentation wird am Ende jeder Berechnung ein entsprechendes Protokoll erstellt.

Die Berechnungsprotokolle beinhalten alle relevanten Eingabedaten, die Angabe der Berechnungsmethode sowie die detaillierten Ergebnisse, anhand derer die Berechnung für den Anwender nachvollziehbar wird [15].

In dieser Arbeit wurden alle technischen und geometrischen Daten in eAssist eingetragen, wie in den Abbildungen 5.19 bis 5.22 gezeigt wird.

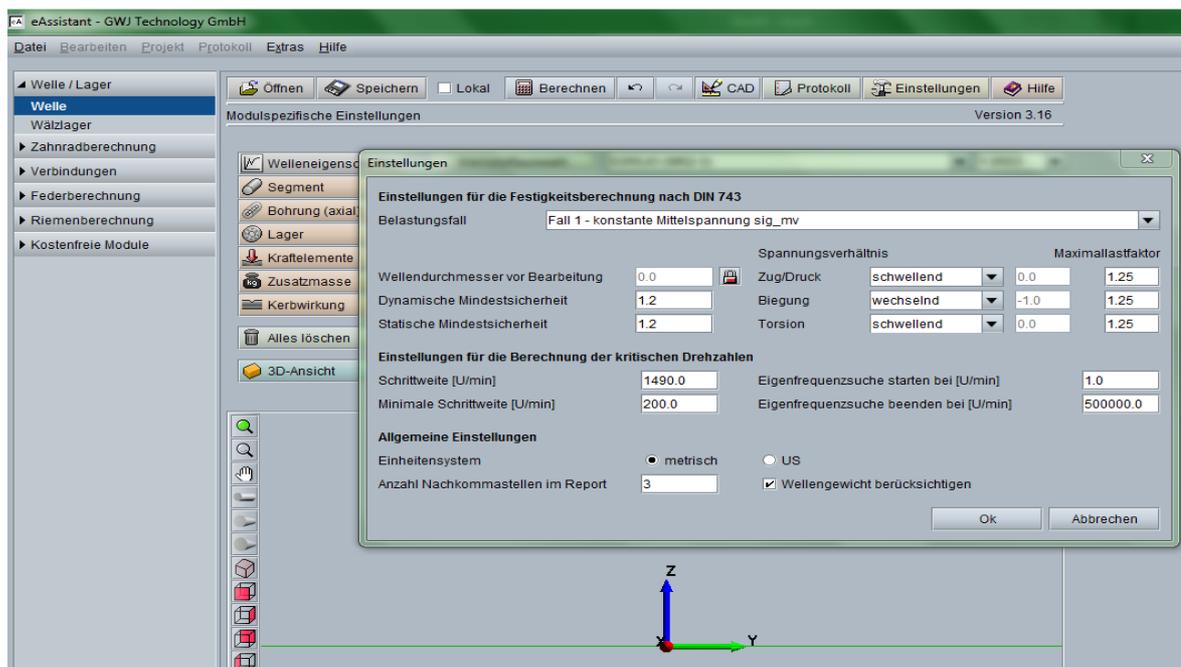


Abbildung 5.19: Einstellungen bei eAssistant (Beanspruchungsart wie in Kapitel 3)

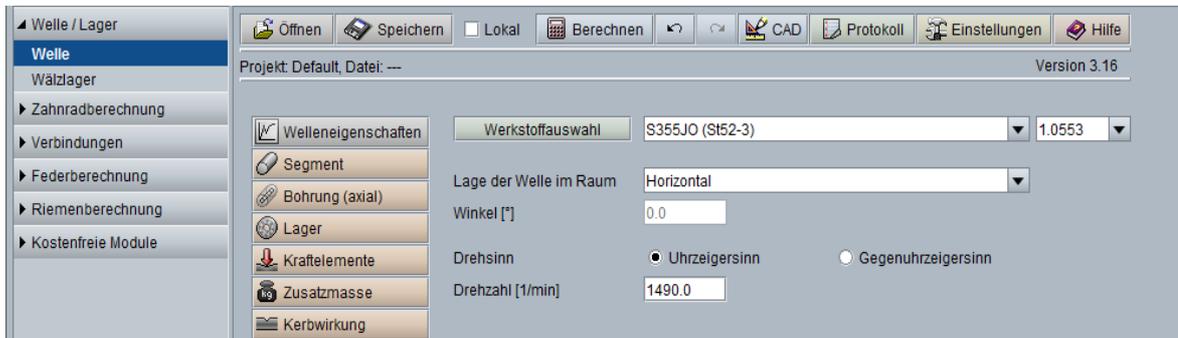


Abbildung 5.20: Einstellungen bei eAssistant (Wellendrehzahl und Material)

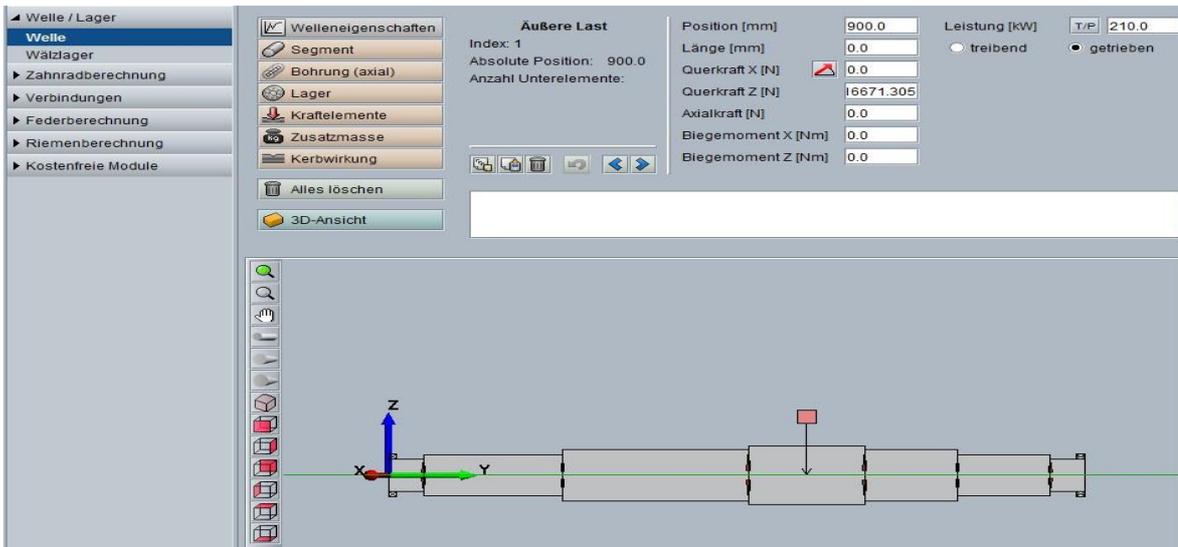


Abbildung 5.21: Kraft und Geometrie der Welle wie Modellwelle in Kapitel 3

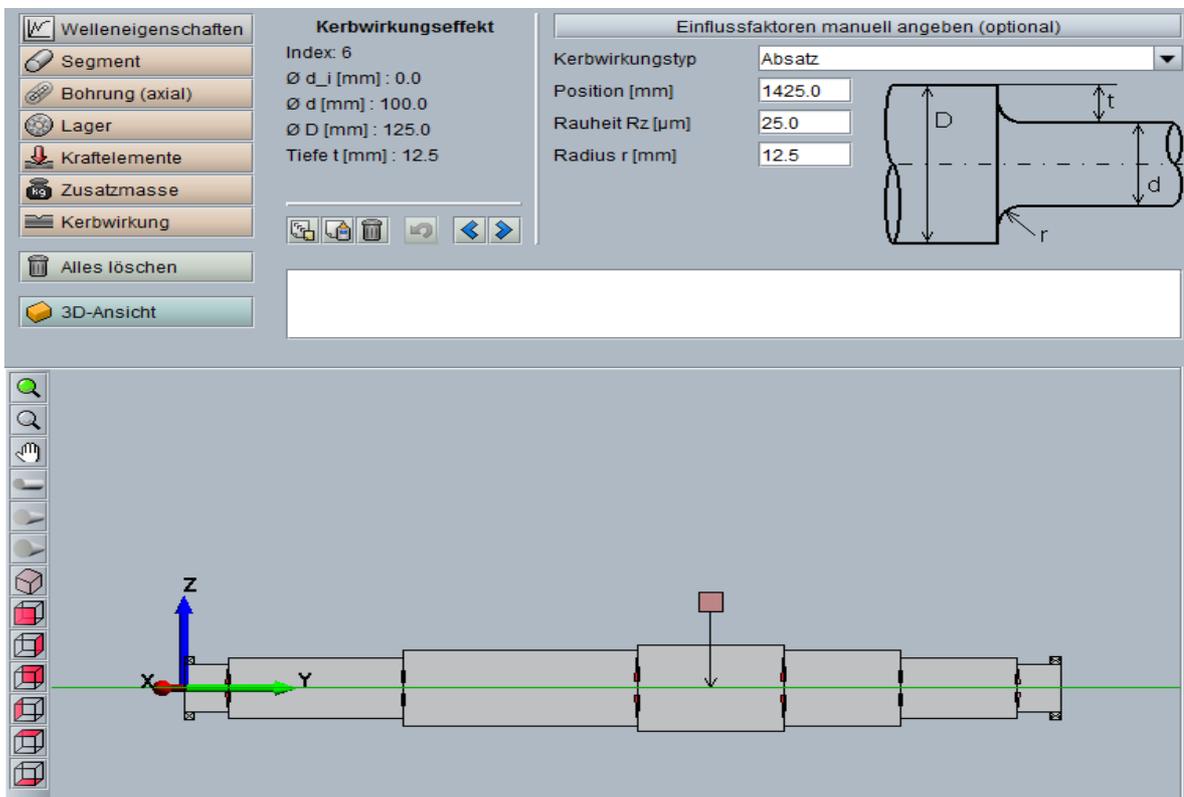


Abbildung 5.22: Absatzdefinition (Nullstelle am Koordinatensystem)

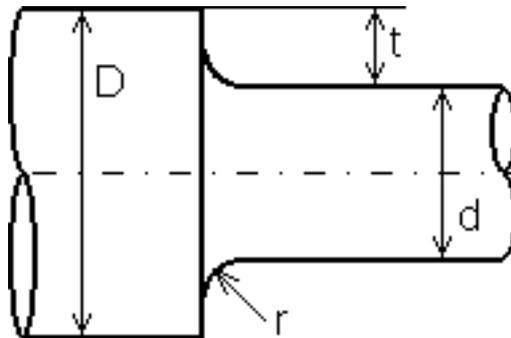
Der Absatz an der Kerbstelle  $b_3$  ist in Position 1025 mm (Abbildung 5.22). Die Ergebnisse der Berechnungen wurden als HTML Protokoll erstellt:

## Protokoll von Der Berechnungen

Kerbwirkung Absatz an Pos.: 1025.0 mm

• für  $d$  größer 150 mm wird  $K_2 = 0,8$  verwendet.

Abbildung 5.23: Wellenabsatz



Kerbwirkungstyp:	Absatz
Belastungsart:	Fall 1 - konstante Mittelspannung
	sig_mv
Werkstoff:	S355JO (St52-3)
Werkstoffkennnummer:	1.0553
Datenherkunft:	DIN 743, DIN EN 10025, Datenbank FORMAT, VDI 2230
Werkstofftyp:	Baustahl nicht vergütet
Werkstoffbehandlungsart:	keine
E-Modul (E):	210000.0 N/mm <sup>2</sup>
G-Modul (G):	79230.0 N/mm <sup>2</sup>
Streckgrenze ( $\sigma_S$ ):	355.0 N/mm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit ( $\sigma_B$ ):	490.0 N/mm <sup>2</sup>
Dichte ( $\rho$ ):	7.85 kg/dm <sup>3</sup>
Bezugsdurchmesser ( $d_B$ ):	16.0 mm
Position abs. zur Welle:	1025.0 mm
Kerbgrunddurchmesser ( $d$ ):	160.0 mm
Kerbgrundradius ( $r$ ):	10.0 mm
Tiefe ( $t$ ):	10.0 mm
Rauigkeit ( $R_z$ ):	25.0 $\mu\text{m}$
Innendurchmesser ( $d_i$ ):	0.0 mm
Außendurchmesser ( $D$ ):	180.0 mm
Wirksamer Außendurchmesser ( $d_{\text{eff}}$ ):	180.0 mm
Größeneinflussfaktor für Zugfestigkeit ( $K_{1B}$ ):	0.941
Größeneinflussfaktor für Streckgrenze ( $K_{1S}$ ):	0.805
Zugfestigkeit für Durchmesser ( $\sigma_{B,dB}$ ):	490.0 N/mm <sup>2</sup>
Zugfestigkeit für Durchmesser ( $\sigma_{B,d}$ ):	461.231 N/mm <sup>2</sup>
Streckgrenze für Durchmesser ( $\sigma_{S,dB}$ ):	355.0 N/mm <sup>2</sup>

Streckgrenze für Durchmesser ( $\sigma_{s,d}$ ):

285.764 N/mm<sup>2</sup>

	<b>Biegung</b>	<b>Torsion</b>
Formzahl (alpha):	1.764	1.37
bezogenes Spannungsgefälle (G'):	0.268	0.115
Stützzahl (n):	1.096	1.063
Kerbfaktor ( $\beta$ ):	1.609	1.289
Größeneinflussfaktor für ungekerbte Probe ( $K_2$ ):	0.8	0.8
Einflussfaktor der Oberflächenrauheit ( $K_F$ ):	0.888	0.936
Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung ( $K_V$ ):	1.0	1.0
Gesamteinflussfaktor (K):	2.137	1.68
	<b>Biegung</b>	<b>Torsion</b>
Bauteil Wechselfestigkeit ( $\#_{wk}$ ):	112.338 N/mm <sup>2</sup>	84.046 N/mm <sup>2</sup>
Einflussfaktor der Mittelspannungsempfindlichkeit ( $\psi_{ik}$ ):	0.139	0.1
Statische Stützwirkung ( $K_{2F}$ ):	1.2	1.2
Erhöhungsfaktor der Fließgrenze ( $\gamma_{Mf}$ ):	1.05	1.0
Dynamische Sicherheit ( $S_D$ ):	5.05	
Statische Sicherheit ( $S_G$ ):	16.76	

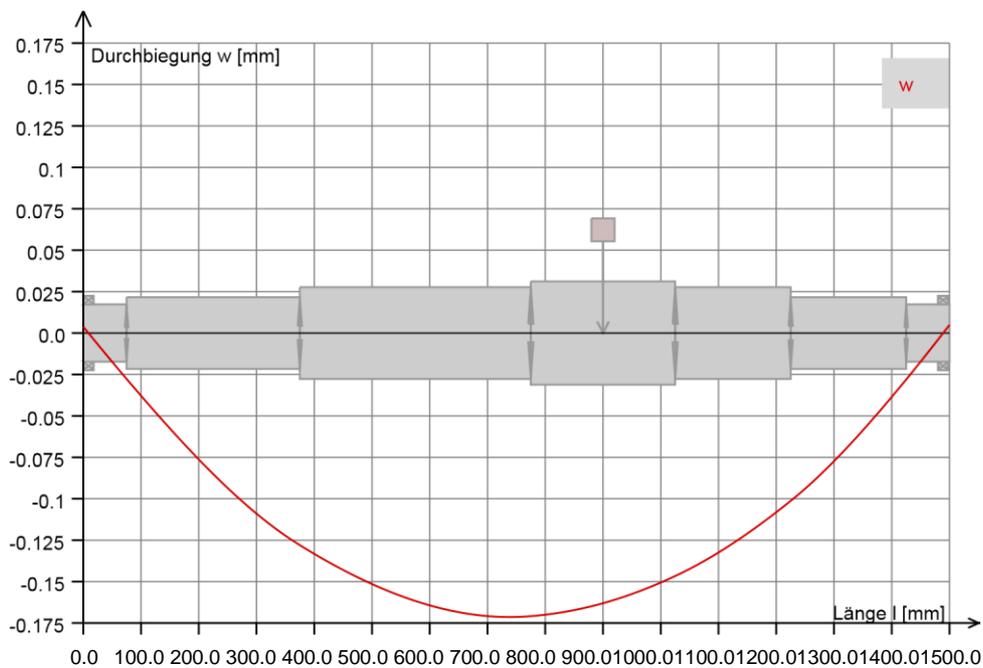


Abbildung 5.24: Durchbiegung w [mm] Z-Y Ebene 90.0° nach eAssistant

Vergleich mit VBA Programm zeigt ca. 3 bis 5%ige Abweichungen bei der Berechnung der kritischen Drehzahl:

**Inputs**

Laufradgewicht (kg)	1700	a1 (mm)	75	da1 (mm)	100
Kupplungsgewicht (kg)	0	a2 (mm)	375	da2 (mm)	125
E_modul (N/mm <sup>2</sup> )	210000	a3 (mm)	775	da3 (mm)	160
Antriebsdrehzahl (1/min)	1490	a4 (mm)	900	da4 (mm)	180
Antriebsleistung (W)	210000	b1 (mm)	75	db1 (mm)	100
Laufradurchmesser (mm)	1580	b2 (mm)	275	db2 (mm)	125
Anwendungsfaktor K_A	1,25	b3 (mm)	475	db3 (mm)	160
Stoßfaktor K_S	1,25	b4 (mm)	600	db4 (mm)	180
Lagerlebensdauer A (Stunden)	28000	LK (mm)	0	LS (mm)	600
Lagerlebensdauer B (Stunden)	28000				

**Materialialeigenschaften**

Biegeelastizitätsmodul (N/mm <sup>2</sup> )	255
Torsionselastizitätsmodul (N/mm <sup>2</sup> )	150
Zugstreckgrenze (N/mm <sup>2</sup> )	355
Zugfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	490
Oberflächenrauigkeit (µm)	25
Wellendichte (kg/m <sup>3</sup> )	7850

**Outputs**

Gewicht der Welle (kg)	202,054763793945
Maximale Durchbiegung (mm)	0,157574988055229
Kritische Drehzahl (1/min)	2509,781
Mindest Sicherheit gegen Dauerbruch nach DIN 743	4,29750204086304
Mindest Sicherheit gegen Fließgrenze nach DIN 743	12,4862632751465
Dynamische Tragzahl des Lagers A (kN)	173,815
Dynamische Tragzahl des Lagers B (kN)	260,7225

**Calculate**

Abbildung 5.25: VBA Programm (Vergleich der Ergebnisse)

# Kapitel 6

## Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Wellenberechnungen von Radialventilatoren auf kritische Spannungen und kritische Drehzahl zuerst in PTC Mathcad berechnet und mit händischen Berechnungen verglichen.

Nach Betrachtung der Berechnungsergebnisse wurden alle Formeln in Visual Basic für Excel programmiert und als Userform-Model dargestellt. Im nächsten Schritt wurden alle Berechnungen mit den Ergebnissen von eAssist verglichen und stimmten überein. Visual Basic eignet sich hervorragend zur Programmierung, da diese Software in vielen Unternehmen Anwendung findet. Im Rahmen der Berechnungen wurden folgende Annahmen berücksichtigt, welche das Programmieren und damit auch die Verwendung dieser Software für den Vertrieb einfacher macht:

1. Kerbradius ist die Differenz zwischen zwei Durchmessern dividiert durch zwei.
2. Bei den Festigkeitsberechnungen wurde Fall 1 von DIN 743 verwendet.
3. Der größte Wellendurchmesser ist immer  $d_4$ .
4. Bei der Berechnung der kritischen Drehzahl wurde das Wellengewicht berücksichtigt.
5. Bei den Wälzlagerberechnungen ist nur die nominelle Lebensdauer maßgeblich.

Im Rahmen dieser Arbeit könnte man weitere Berechnungen wie Schaufelkonstruktionen von Ventilatoren, Strömungsberechnungen, Resonanz und Schwingungen programmieren und in Visual Basic darstellen. Es können auch grafische Darstellungen wie der Biegemomentverlauf, Querkraftverlauf, Durchbiegung u.s.w. in Excel dargestellt werden.

Die Dokumentation der Berechnungen spielt heutzutage eine große Rolle, daher VBA in Excel bietet sich dazu sehr gut an.

In allen CAD-Softwares gibt es Module, mit denen Visual Basic-Codes als Makro verknüpft werden können. Diese Eigenschaften erlauben, die Geometrie-Dateien von VBA-Userform in 3D-Form umzuwandeln und eine grobe Auslegung in 3D Umgebung zu haben.

Die Materialkennwerte können gleichzeitig von anderen VBA-Programmen aufgerufen und verwendet werden. Diese Eigenschaften erlauben der Firma mehrere Materialeigenschaften in Berechnungsprogrammen zu integrieren.

# Literaturverzeichnis

---

[1] Fronius H.: *Maschinenelemente Antriebsselemente*, VEB Verlag Technik Berlin VLN 201.Dg.Nr.370/31/71

[2] Bauer R.: *Achsen. Wellen. Lager. Kupplungen* VEB Fachbuchverlag Leipzig 1964

[3] Bohl W.: *Ventilatoren*, 1. Auflage, Vogel-Buchverlag Würzburg 1983

[4] Roloff-Matek - *Maschinenelemente* (20. Auflage, 2011)

[5] Bommes L., Fricke J., Klaes K.: *Ventilatoren*, 2. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 2003

[6] DIN 6892: *Mitnehmerverbindungen ohne Anzug – Passfedern – Berechnung und Gestaltung*  
August 2012

[7] DIN 743: *Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen*, Teil 1 bis 3, Dezember 2012

[8] SKF *Wälzlager Katalog*

[9] Schlender F., Klingenberg G.: *Ventilatoren im Einsatz*, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf  
1996

[10] VDI 2044: *Abnahme- und Leistungsversuche an Ventilatoren (VDI-Ventilatorregeln)*

[11] Bommes L.: *Problemlösung bei der Gestaltung von Radialventilatoren*, *Heizung-Lüftung-Haustechnik* 25 (1974) Nr.12 [1] B. Eck: *Ventilatoren*, 5. Auflage, Springer-Verlag ·  
Berlin · Heidelberg · New York 1972

[12] Wulff D.: *Experimentelle Untersuchungen zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Radialventilatoren*. Dr.-Ing. Diss. TU-Braunschweig, 1984

[13] [www.sirocco.at](http://www.sirocco.at): *Firmeninternetseite*

[14] *Visual Basic Grundlagen*, FernUniversität Hagen, November 1999

[15] [www.eassistant.eu](http://www.eassistant.eu)

[16] [www.zenner-ventilatoren.de](http://www.zenner-ventilatoren.de)

[17] [www.wittfan.de](http://www.wittfan.de)

[18] [www.schaeffler.com](http://www.schaeffler.com)

# Abbildungsverzeichnis

---

- Abbildung 1.1: Axialventilator mit Vorleitrad
- Abbildung 1.2: Querstromventilator
- Abbildung 1.3: Diagonalventilator
- Abbildung 1.4: Skizze Radialventilator
- Abbildung 1.5: Laufradformen von Radialventilatoren
- Abbildung 1.6: Leistungsbegriffe am Ventilator
- Abbildung 2.1: Direktantrieb Radialventilator
- Abbildung 2.2: Riemen-Antrieb Radialventilator
- Abbildung 2.3: Kupplung-Antrieb Radialventilator
- Abbildung 2.4: Beidseitige Lagerung Radialventilator
- Abbildung 2.5: Einzelteile von Kupplung-Antrieb
- Abbildung 2.6: Bauteile eines Direkt-Antriebes
- Abbildung 2.7: Bauteile eines Riemen-Antriebes
- Abbildung 3.1 :Schematischer Ablauf der Sicherheitsnachweise
- Abbildung 3.2: Modellwelle mit wirkenden Kräften
- Abbildung 3.3: Wechselnde Beanspruchung
- Abbildung 3.4: Erläuterungen zum Belastungs- bzw. Spannungsverlauf und Abmessungen für Querschnittskenngrößen
- Abbildung 3.5: Makroskopische Stützwirkung
- Abbildung 3.6: Welle mit gleichem Querschnitt und einer Scheibe
- Abbildung 4.1: Rotorlagerung eines Heißgasventilators
- Abbildung 4.2: Rotorlagerung eines Frischluftgebläses
- Abbildung 4.3: 23122 CCK/W33 + H 3122 Pendelrollenlager
- Abbildung 4.4: Viskositäts-Temperatur-Diagramm für ISO Viskositätsklassen
- Abbildung 4.5: Lebensdauerbeiwert  $a_{skf}$  für Radial-Rollenlager
- Abbildung 5.1: Die VBA oberfläche
- Abbildung 5.2: Fenster des Projekt – Explorers
- Abbildung 5.3: Das Formularfenster
- Abbildung 5.4: Das Eigenschaftsfenster
- Abbildung 5.5: Die Werkzeugsammlung
- Abbildung 5.6: Die Menü- und Symbolleiste
- Abbildung 5.7: Die Farbenpalette
- Abbildung 5.8: Der Menü – Editor
- Abbildung 5.9: Das Programmcode – Fenster
- Abbildung 5.10: Ergebnis des zweiten Beispiels
- Abbildung 5.11: Ergebnis des zweiten Beispiels
- Abbildung 5.12: Formular Version 1
- Abbildung 5.13: Formular Version 2
- Abbildung 5.14: Menüdefinition
- Abbildung 5.15: Fertiges Formular mit Menüleiste
- Abbildung 5.16: Das Programmcode - Fenster
- Abbildung 5.17: Formular nach Programmdurchlauf
- Abbildung 5.18: VBA Userform für Wellenberechnung
- Abbildung 5.19: Einstellungen bei eAssistant (Beanspruchungsart wie kapitel 3)
- Abbildung 5.20: Einstellungen bei eAssistant (Wellendrehzahl und Material)
- Abbildung 5.21: Kraft und Geometrie der Welle wie Modellwelle in Kapitel 3
- Abbildung 5.22: Absatzdefinition (Nullstelle am Koordiantensystem)
- Abbildung 5.23: Wellenabsatz
- Abbildung 5.24: Durchbiegung w [mm] Z-Y Ebene 90.0° nach eAssistant
- Abbildung 5.25: VBA Programm (Vergleich der Ergebnisse)

# Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 3.1 : Hauptbetriebsdaten Modellventilator

Tabelle 3.2 : Materialeigenschaften

Tabelle 3.3 : Geometriedaten der Welle

Tabelle 3.4: zur Berechnung des mittleren Trägheitsmomentes der linken Seite

Tabelle 3.5: Zur Berechnung des mittleren Trägheitsmomentes der rechten Seite

Tabelle 3.6: Zur Berechnung der kritischen Drezahl