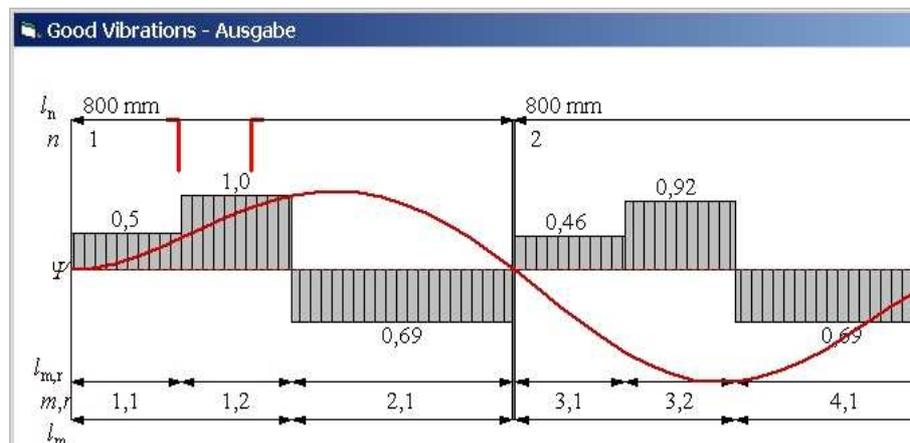


Good Vibrations

Berechnung von
strömungsinduzierten Rohrschwingungen
in Wärmeübertragern



Inhalt

Allgemeine Produktbeschreibung	3
Kurzbeschreibung.....	3
Wesentliche Vorteile des Programms GOOD VIBRATIONS	4
Erweiterungen des Programms GOOD VIBRATIONS.....	4
1. Geometrische Größen (Austrittstutzen)	4
2. Stoffwerte	4
3. Zusätzliche Stützstellen zwischen den Umlenklechen	4
4. Vorgabe von Geschwindigkeitsverteilungen	5
5. Optionale Vorgaben	5
Installation des Programmes	6
Installation	6
Bedienung des Programms	7
Starten des Programms.....	7
Geometrische Größen.....	8
Material- und Stoffwerte	10
Rohrspiegel.....	11
Zwischenstützen	13
Berechnungsvorgaben	14
Optionale Vorgabedaten	16
Starten der Berechnung.....	18
Anzeigen und Drucken der Ergebnisse.....	18
Ausgabebeschreibungen	18
Speichern und Laden eines Projektes.....	19
Literaturangaben	20
Beispiel – LUFT-LUFT-Wärmetauscher	21
Grunddaten	21
Geometrische Größen.....	21
Material und Stoffwerte	23
Rohrspiegel.....	24
Zwischenstützen	25
Berechnungsvorgaben	25
Optionale Vorgabedaten	26
Berechnungsgang	27
Ergebnisse	27
Ergebnis-Ausdruck	28

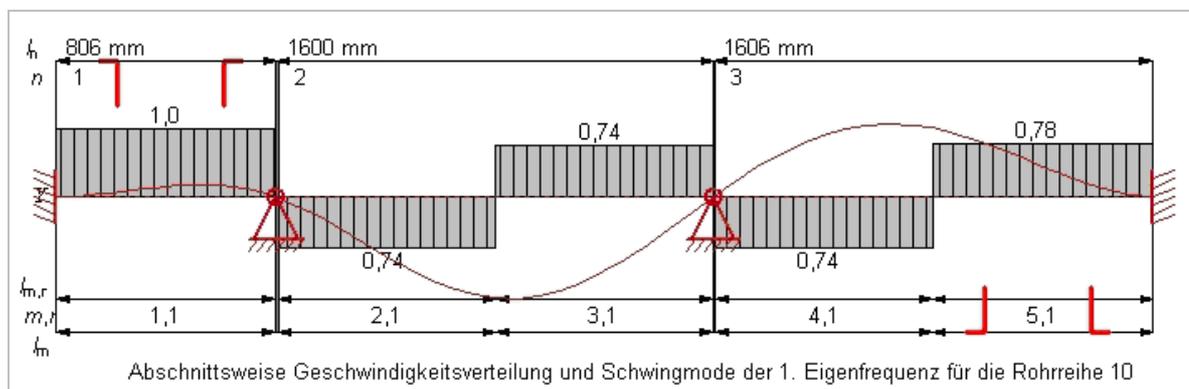
Allgemeine Produktbeschreibung

Kurzbeschreibung

Das Programm **GOOD VIBRATIONS** dient der Auslegung und Überprüfung von Rohrbündel-Wärmeübertragern mit den 4 Standard-Rohranordnungen (30°, 45°, 60° und 90°) hinsichtlich der Vermeidung von Kurzzeitschäden aufgrund strömungsinduzierter Schwingungen im Bündel, die durch fluidelastische Instabilität oder Wirbelerregung bei der Queranströmung verursacht werden. Die maximalen Amplituden aufgrund von Wirbel- und Turbulenzerregung werden zur Abschätzung der Standzeiten infolge von Langzeitschäden ebenfalls berechnet.

Die Berechnungen basieren auf den Auslegungsrichtlinien des VDI-Wärmeatlas, Kap.Oc, 9.Auflage 2002 bzw. 10.Auflage 2006 [1], die wesentliche Verbesserungen gegenüber der 8.Auflage 1997 enthalten. Das Programm ermöglicht dem Anwender, Wärmeübertrager mit den vier Standard-Rohranordnungen nach den Grundgleichungen des Wärmeatlas nicht nur genauer und für komplexere Rohrstützbedingungen auszulegen, sondern liefert auch Variantenrechnungen in kürzester Zeit.

Die Strukturdaten der Rohre können auch mit variablen Massenbelegungen und Stoffdaten berechnet werden. Für die Berechnung der Eigenfrequenzen und der Eigenschwingformen wurde ein analytischer Lösungsalgorithmus für gerade Rohre in die Hauptroutine implementiert. Die kritischen Geschwindigkeiten für Gas- und Flüssigkeitsströme in idealen Bündeln und bei homogener Verteilung werden anhand der Stabilitätsdiagramme im VDI-Wärmeatlas [1,2] berechnet.



Der große Vorteil des Programms liegt in der Berücksichtigung der realen Geschwindigkeitsverteilung und von veränderlichen Stoff- und Strukturdaten längs der Wärmeübertragerachse. Dies ist möglich durch die Implementierung analytischer Modelle zur näherungsweise Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Lage und den Anströmbedingungen der Rohre. Auch die kritischen Geschwindigkeiten werden abschnittsweise für jede Rohrreihe unter Berücksichtigung evtl. Schräganströmung und des Gefährdungsgrades der Rohre durch den Randspalt Mantel/Bündel berechnet [3,4].

Andere Geschwindigkeitsverteilungen und kritische Geschwindigkeiten, z.B. für Zweiphasenströmungen, können optional für jeden Abschnitt frei vorgegeben werden. Eine erhöhte Gefährdung von Randrohren an vertikalen Mittelgassen ohne Verdrängungskörper durch die Gassengeschwindigkeit wird nicht erfasst. Werden keine Vorgaben z.B. für die zu berechnende Rohrreihe bzw. für einen oder mehrere Schwingformen gemacht, berechnet das Programm standardmäßig alle Rohrreihen im Bündel für die ersten 6 Eigenformen.

Das Programm **GOOD VIBRATIONS** hat eine menügeführte Oberfläche, mit der alle notwendigen geometrischen Größen, Stoff-, Material- und Betriebsdaten sowie optionale Werte für vom Standard abweichende Konstruktionen, Mengenströme, Stoffwerte oder Geschwindigkeiten eingegeben werden können. Der Rohrspiegel wird automatisiert erstellt. Der Standard-Rohrspiegel kann durch Herausnehmen oder Verschiebungen von Rohrreihen dem tatsächlichen näherungsweise angepasst werden, wobei vertikale Gassen unberücksichtigt bleiben. Diese sind durch Verdrängungskörper oder Ablenkbleche zu schließen. Die zu berechnenden Rohrreihen werden im Querschnitt hervorgehoben.

Alle vorgegebenen Daten können zusammen mit den Projektangaben (Datum, Name, Projektnummer, Kommentare) gespeichert werden.

Das Ergebnis wird ausgegeben für

- die durch fluidelastische Instabilität gefährdete Rohrreihe und die zugehörige Schwingform; auch die beiden nächst gefährdeten Rohrreihen bzw. Eigenformen werden aufgelistet.
- die durch Wirbel- bzw. Turbulenzerregung gefährdete Rohrreihe

Wesentliche Vorteile des Programms GOOD VIBRATIONS

- Berechnung von Geschwindigkeitsverteilungen in allen Strömungsabschnitten von Querstromapparaten (Ein-, Austritt und Fensterbereich)
- Berechnung aller Rohrreihen im Bündel von Querstromapparaten und die Bestimmung der höchst gefährdeten Rohrreihe
- Berechnung der Schwingformen und Frequenzen durch ein schnelles analytisches Lösungsverfahren
- Berücksichtigung höherer Moden und der entsprechenden Eigenfrequenzen, der Schwingformen, der Energieverhältnisse und der Strouhalzahlen
- Berücksichtigung des Randspalteinflusses (Mantel/Bündel) der jeweiligen Rohrreihe
- Bestimmung der Schwingungsgefährdung durch Turbulenz- und Wirbelerregung für alle Rohrreihen von Querstromapparaten und Bestimmung der höchst gefährdeten Rohrreihe unter Berücksichtigung höherer Moden und unter Angabe der maximalen Amplituden, die ein direktes Maß für den Gefährdungsgrad sind. Dabei werden die axiale Geschwindigkeitsverteilung berücksichtigt und die Anregungskräfte mit dem Schwingmode gewichtet. Bei Wirbelerregung wird auch der längs der Rohrachse variierende Resonanzabstand über das Frequenzverhältnis und den Integralwert einer Amplitudenverstärkungsfunktion berücksichtigt.

Erweiterungen des Programms GOOD VIBRATIONS

Stand 10-2012

1. Geometrische Größen (Austrittsstutzen)

Es werden unterschiedliche Stutzenabmessungen für Ein- und Austrittsstutzen vorgesehen

Für den Normalfall reiner Querströmung ermittelt das Programm die Lage des Austrittsstutzens automatisch (oben oder unten). Für gemischte Quer- und Längsströmung kann die Lage des Austrittsstutzens vorgegeben werden.

Größe und Lage des Austrittsstutzens beeinflussen die Geschwindigkeitsverteilung in den letzten drei Rohrreihen im Austrittsbereich.

2. Stoffwerte

Bei Änderung der Anzahl der Umlenkleche werden die Werte für die drei Stoffdaten (Dichten und Viskosität im Mantelraum und in den Rohren) nicht gelöscht, sondern „konstant“ für alle Strömungsabschnitte auf den Wert des ersten Strömungsabschnitts gesetzt.

3. Zusätzliche Stützstellen zwischen den Umlenklechen

Stützstellen	= Stützgitter oder Teilstützgitter, die nur einige Rohrreihen umfassen
Strömungsabschnitt	= Abschnitt zwischen den Umlenklechen bzw. zwischen Rohrboden und Umlenklech

Stützbleche können nach dem Aufruf des Rohrspiegels, d.h. wenn die Rohrreihenanzahl und -nummerierung bekannt sind, in einem neuen Eingabeblatt für mehrere Rohrreihenblöcke, d.h. jeweils für RR x bis RR y vorgegeben werden. Jeder Strömungsabschnitt, definiert durch die Umlenklechabstände mit der Länge IU, kann in Stützabschnitte mit entweder konstanten Abständen oder durch Vorgabe der Abschnittslängen unterteilt werden. Die Länge des letzten Teilabschnitts mit der höchsten Index-Nummer wird vom Programm automatisch berechnet aus $\sum IU_r = IU$.

Stützbleche oder Stützgitter werden vom Programm bei der Berechnung der Strukturdaten nicht unterschieden. Das Programm kann die unterschiedliche Beeinflussung der Strömung durch Bleche (Querströmung) und durch Gitter (Axialströmung) nicht automatisch berücksichtigen; hierfür sind optionale Vorgaben von Querstromfaktoren bzw. Geschwindigkeitsverteilungen notwendig. Bei nachträglicher Änderung der Rohrreihenanzahl und -nummerierung werden bei sonst gleichem Rohrspiegel (t , τ , α) die eingegebenen Stützdaten nicht zurückgesetzt (Warnmeldung!).

4. Vorgabe von Geschwindigkeitsverteilungen

Das Eingabeblatt „Berechnungsvorgaben“ ermöglicht die Auswahl der Geschwindigkeitsverteilungen innerhalb eines Strömungsabschnitts, entweder als „Programmvorgabe Homogen“ oder als „Eigene Vorgabe“.

4.1 Programmvorgabe „Homogen“:

Das Programm berechnet für jede Rohrreihe und jeden Strömungsabschnitt m die Strömungslänge l_m und teilt diese gegebenenfalls in Teillängen $l_{m,r}$. Werden Stützbleche eingebaut, so ändert sich diese Teillängen nicht. Es wird die Querschnittsverengung in einem Strömungsabschnitt durch eine Verkleinerung der Strömungsfläche mit dem Faktor $(l_m - n_{St} \cdot b) / l_m$ - mit n_{St} = Anzahl und b = Breite der Stützbleche - berücksichtigt.

4.2 „Eigene Vorgabe“:

a. Jeder Strömungsabschnitt kann, wie bei der Festlegung der Stützabstände, in Teillängen von I_U mit konstanten Abständen oder durch Vorgabe der Abschnittslängen $I_{U,m,r}$ unterteilt werden. Die Länge des letzten Teilabschnitts mit der höchsten Index-Nummer wird vom Programm automatisch berechnet aus $\sum I_{U,m,r} = I_U$.

Bei der Eingabe ist die Strömungslänge l_m noch nicht bekannt. Sie ist abhängig von der Rohrreihe und dem Strömungsabschnitt. Daher werden die Teillängen $l_{m,r}$ vom Programm berechnet:

$$l_{m,r} = I_{U,m,r} \cdot l_m / I_U \text{ mit } \sum l_{m,r} = l_m.$$

Bei Vorhandensein von Stützblechen ändern sich die Teillängen nicht. Vielmehr werden die Strömungsflächen entsprechend verkleinert.

b. Alternativ zur Vorgabe des rel. Geschwindigkeitsverhältnisses ψ ist es möglich, den Strömungsanteil k_S für jede Teillänge r vorzugeben. Es muss gelten: $\sum k_{S,r} = 1$.

5. Optionale Vorgaben

Die Korrekturfaktoren „Einströmfaktor k_{ES} “ und „Randspaltfaktor k_{RS} “ können für alle Strömungsabschnitte mit einem konstanten Wert vorbelegt werden oder es kann für jeden Strömungsabschnitt ein beliebiger Wert eingegeben werden.

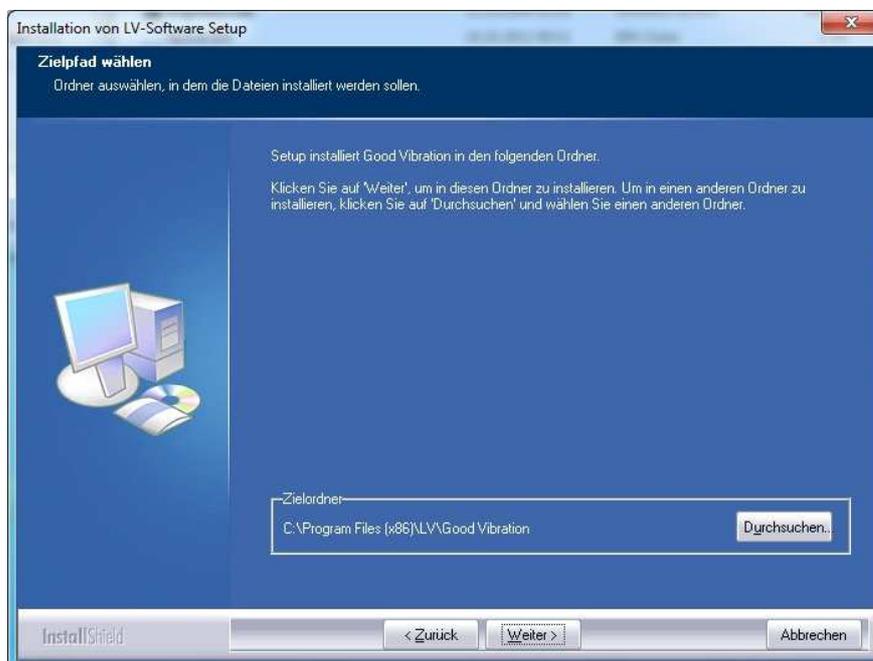
Installation des Programmes

Installation

Das Programm ist lauffähig unter Windows XP / WindowsVista / Windows 7 (32bit/64bit)

Zur Installation von GOOD VIBRATIONS führen Sie das auf der CD mitgelieferte **Setup – Programm** aus.

1. Einlegen der Installations-CD-ROM GOOD VIBRATIONS (Version 2.9) in das CDLaufwerk.
2. Auswählen von Ausführen aus dem Startmenü und Eingeben von „d:\setup“.
(Verwenden Sie den Laufwerksbuchstaben für Ihr CD-Laufwerk.)
3. Das Programm GOOD VIBRATIONS wird standardmäßig installiert im Verzeichnis C:\Programme\LV\Good Vibration\
Die Voreinstellung des Verzeichnisses lässt sich ändern.
4. Folgen Sie den weiteren Anweisungen des Installationsprogrammes.



Bedienung des Programms

Starten des Programms

Das Starten der Anwendung erfolgt durch Ausführen der Datei **Good Vibrations.exe** im Explorer oder durch Auswahl von GOOD VIBRATION aus dem Menü *Start und Programme* mit dem Mauszeiger.



Nach dem Start des Programms wird die grafische Oberfläche angezeigt (**Bild 1**). In einem separaten Fenster ist die Eingabe von projektbezogenen Daten möglich. Die Eingabemaske von GOOD VIBRATIONS besteht aus fünf Registerkarten, in die nacheinander die Eingabedaten einzutragen sind. Durch die Registerkarten sind die Eingabedaten thematisch getrennt nach

- Geometrischen Größen
- Material- und Stoffwerten
- Rohrspiegel
- Zwischenstützen
- Vorgaben zur Berechnung
- Optionale Vorgaben

Die Bezeichnung der einzugebenden Größen erfolgt nach der Nomenklatur des Abschnittes Oc im VDI-Wärmeatlas [1].

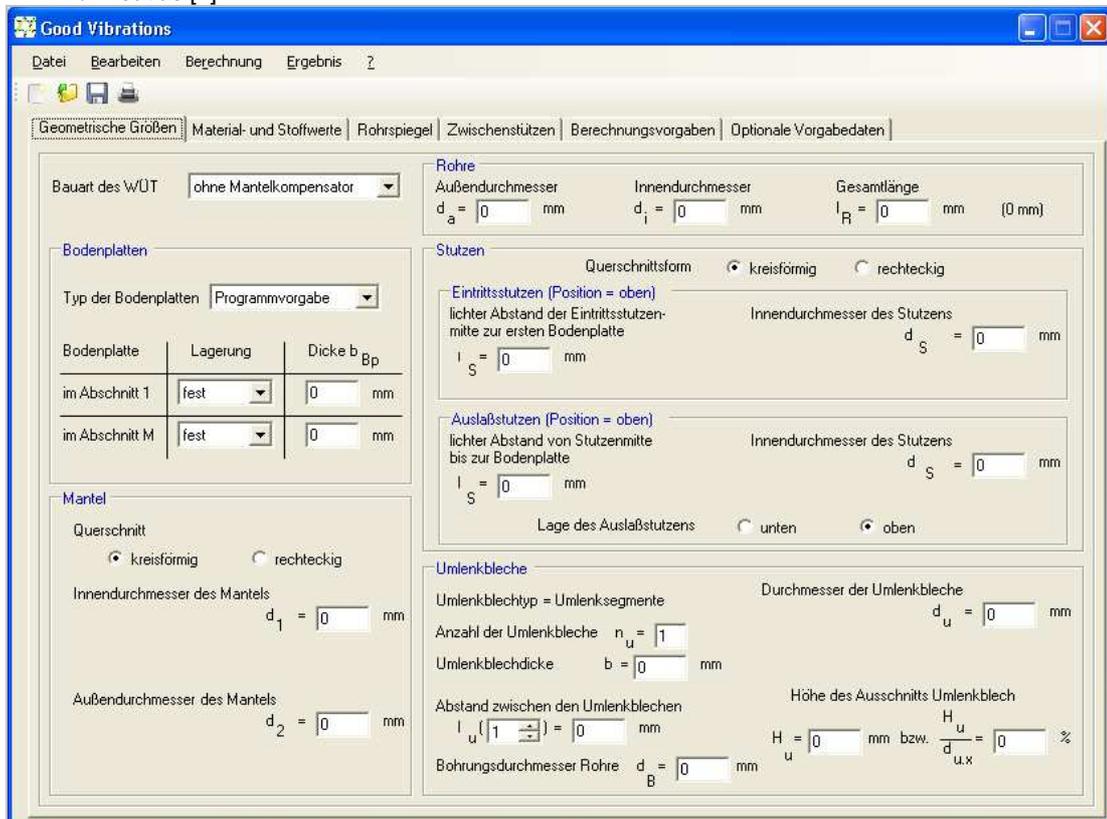


Bild 1: Grundmaske

Geometrische Größen

In der Registerkarte **Geometrische Größen**, in **Bild 2** gezeigt, werden alle Werte zur Geometrie des Mantels, der Rohre, des Stutzens und der Umlenkleche eingetragen und Angaben zur Bauart des Querstromapparates gemacht. Für den Mantel und Stutzen sind kreisförmige oder rechteckige Querschnittsformen möglich. Bei rechteckiger Querschnittsform sind die Maße des Mantels bzw. Stutzens in x und y-Richtung bzw. in y- und z- Richtung anzugeben.

Durch die Angabe der Randlagerungen, die Anzahl der Umlenkleche n_u , den Abstand der Umlenkleche l_u und die Segmentausschnittshöhe H_u werden die Stützbedingungen der einzelnen Rohre und die Strömungsabschnitte festgelegt. Die Gesamtlänge der Rohre muss mit der Summe der Abstände der Umlenkleche und der Bodenplattendicken übereinstimmen.

Good Vibrations

Geometrische Größen | Material- und Stoffwerte | Rohrspiegel | Zwischenstützen | Berechnungsvorgaben | Optionale Vorgabedaten

Bauart des W/ÜT: ohne Mantelkompensator

Rohre

Außendurchmesser $d_a = 25$ mm Innendurchmesser $d_i = 21$ mm Gesamtlänge $l_R = 4100$ mm (4100 mm)

Bodenplatten

Typ der Bodenplatten: Programmvorgabe

Bodenplatte	Lagerung	Dicke b_p
im Abschnitt 1	fest	44 mm
im Abschnitt M	fest	44 mm

Mantel

Querschnitt: kreisförmig rechteckig

Innendurchmesser des Mantels $d_1 = 894$ mm

Außendurchmesser des Mantels $d_2 = 914$ mm

Stutzen

Querschnittsform: kreisförmig rechteckig

Eintrittsstutzen (Position = oben)

lichter Abstand der Eintrittsstutzenmitte zur ersten Bodenplatte $l_S = 420$ mm

Innendurchmesser des Stutzens $d_S = 392,2$ mm

Auslaßstutzen (Position = unten)

lichter Abstand von Stutzenmitte bis zur Bodenplatte $l_S = 420$ mm

Innendurchmesser des Stutzens $d_S = 392,2$ mm

Lage des Auslaßstutzens: unten oben

Umlenkleche

Umlenklechtyp = Umlenkssegmente Durchmesser der Umlenkleche $d_u = 890$ mm

Anzahl der Umlenkleche $n_u = 4$

Umlenklechdicke $b = 10$ mm

Abstand zwischen den Umlenklechen $l_u (1 - \frac{b}{d_u}) = 806$ mm

Höhe des Ausschnitts Umlenklech $H_u = 320,05$ mm bzw. $\frac{H_u}{d_u} = 35,8$ %

Bohrungsdurchmesser Rohre $d_B = 25,4$ mm

Bild 2: Geometrische Größen

Die Lage des ersten Segmentausschnittes ist **unten**. Die Ausschnitte in den weiteren Umlenklechen sind abwechselnd **oben** bzw. **unten**.

Oben bezeichnet die Querschnittshälfte des Wärmeübertragers, an der der Eintrittsstutzen liegt (**Bild 3**).

- Der Eintrittsstutzen liegt immer im Abschnitt 1, der Austrittsstutzen im Abschnitt M.
- Die Segmentausschnittshöhe ist zwischen Umlenklechkante und Innendurchmesser des Mantels definiert.
- Der Abstand der Umlenkleche wird bis zur Mitte der jeweiligen Umlenkleche angegeben. Für das erste und letzte Umlenklech ist der Abstand zwischen Umlenklechmitte bis zur Bodenplattenoberfläche anzugeben. Weiterhin sind der Durchmesser des Umlenklechs, die Umlenklechdicke und der Bohrungsdurchmesser im Umlenklech für die Rohre vorzugeben.

Warnhinweis:

Anzahl der Umlenkleche zuerst eingeben. Bei späterer Änderung von n_u werden alle Werte zurückgesetzt, die von der Nummer des Strömungsabschnittes abhängen.

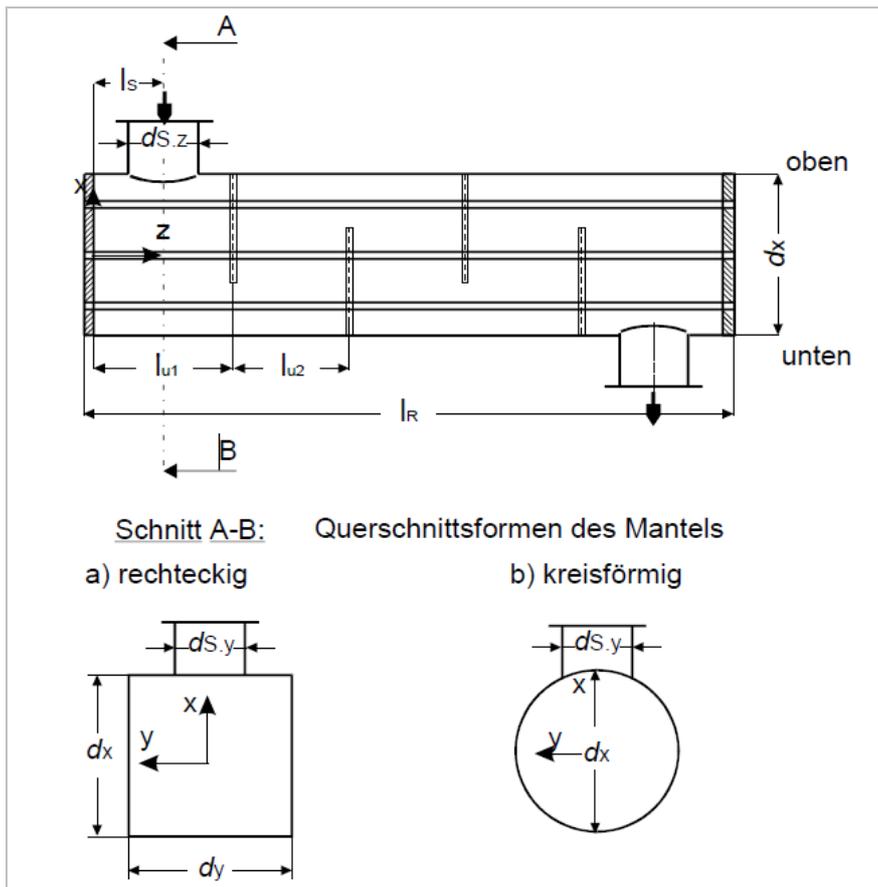


Bild 3: Skizze zu den geometrischen Abmaßen und den Querschnittsformen des Wärmeübertragers



Die Beanspruchung der Rohre infolge Wärmedehnung und Querkontraktion sowie die Rohrkraft durch äußere Kräfte werden durch die Bauart des Rohrbündel-Wärmeübertragers bestimmt.

Die Bauart des Wärmeübertragers kann aus dem Listenfeld ausgewählt werden (**Bild 4**).

Bild 4: Listenfeld **Bauart des Wärmeübertragers**

Die Berechnung der Strukturdaten für U-Rohre ist vorgesehen, jedoch in der gegenwärtigen Version hilfsweise nur mit Strukturdaten für die geraden Rohrabschnitte oder unter Vorgabe optionaler Daten möglich.

In Abhängigkeit vom Typ der Bodenplatten (**Bild 5**) wird im Programm die Plattensteifigkeit, getrennt für Innen- und Außenrohre, näherungsweise zur Berechnung der axialen Rohrkraft [1,Tab.6] ermittelt. Abweichend hiervon können optional die Steifigkeitsfaktoren X_I für Innenrohre und X_A für Außenrohre vorgegeben werden (s. Registerkarte optionale Vorgaben, **Bild 13**).



Bild 5: Listenfeld **Typ der Bodenplatten**



Bild 6: Listenfeld **Lagerung der Rohre an der Bodenplatte**

Die Lagerungsbedingungen der Rohre in den Bodenplatten sind entscheidend für deren Eigenfrequenz und die Schwingform. Die Auswahlmöglichkeiten der Rohrlagerung in den Bodenplatten werden in **Bild 6** gezeigt. Für die Umlenkleche wird eine ideale gelenkige Lagerung angenommen, d.h. ca. 8 – 20 mm Breite, gut abgerundet und mit möglichst kleinem Bohrungsspiel.

Material- und Stoffwerte

Bild 7: Registerkarte **Material- und Stoffwerte**

Die Eingabemaske für die Material- und Stoffdaten des Mantels, der Rohre und der Strömungsmedien wird mit der Registerkarte **Material- und Stoffwerte (Bild 7)** bereitgestellt. Die Dichte ρ der Fluide in den Rohren und im Mantelraum sowie der Aggregatzustand, die Viskosität ν , und bei zweiphasigen Fluiden der Gasvolumenstromanteil ϵ_g im Mantelraum (**Bild 8**) können für alle Strömungsabschnitte separat vorgegeben werden.

Bei konstanten Stoffdaten in allen Abschnitten des Mantelraums ist die Eingabe eines konstanten Wertes für die jeweilige Größe durch Aktivieren *Checkbox konstant* ausreichend. Bei Wahl des Aggregatzustands *zweiphasig* rechnet das Programm derzeit mit den Gleichungen für Flüssigkeitsströme. Genauere kritische Geschwindigkeiten können aus dem VDI-Wärmeatlas ermittelt und optional vorgegeben werden.

Bild 8: Listenfeld **Aggregatzustand**

Rohrspiegel

In der Registerkarte **Rohrspiegel** wird der automatisch erzeugte Rohrspiegel dargestellt (**Bild 9 und 10**). Dazu sind der Rohrteilungswinkel, das Rohrteilungsverhältnis bzw. die Rohrteilung und der gewünschte Hüllkreisdurchmesser anzugeben.

Rohrreihen können folgendermaßen entfernt werden:

- von oben in der oberen Spiegelhälfte
- von unten in der unteren Spiegelhälfte
- in der Bündelmitte.

Die symmetrische Anordnung der Rohrreihen bezüglich der Spiegelmitte ist vorgebar:

Checkbox **„Existiert ein Mittelrohr“** (Bild 9). Beim Laden von Eingabedateien erfolgt das Berechnen und Zeichnen des Rohrspiegels automatisch.

Die hinsichtlich der Schwingungsgefährdung zu berechnenden Rohrreihen sind farblich hervorgehoben. Als Voreinstellung im Programm werden alle Rohrreihen des Wärmeübertragers berechnet. Einzelne Rohrreihen lassen sich berechnen, indem die Checkbox **alle Rohrreihe berechnen** ausgeschaltet wird und im Listenfeld die zu überprüfende Rohrreihe ausgewählt wird. Die Anzahl der Rohrreihen, die Gesamtanzahl der Rohre und evtl. (bei einer zu berechnenden Rohrreihe) die Anzahl der Rohrreihen im betreffenden Fenster und der vertikale Abstand **der zu berechnenden Rohrreihe** zur Bündelmitte werden angezeigt.

Für den Fall, dass der automatisierte Rohrspiegel nicht mit der Realität übereinstimmt, kann die Gesamtanzahl der Rohre korrigiert werden. Der korrigierte Wert wird nur bei der Berechnung der axialen Kräfte berücksichtigt. Die Rohrspiegel-Zeichnung wird in der vorliegenden Version dadurch nicht geändert.

Da für die Schwingungsgefährdung immer von vollständig bis zum Mantel ausgefüllten Rohrreihen, d.h. von der maximal möglichen Belastung des Bündels, ausgegangen wird, ist eine exakte Übereinstimmung zwischen dem berechneten und dem realen Rohrspiegeln nicht entscheidend, solange die Übereinstimmung der Sehnenlängen der betrachteten Rohrreihen gegeben ist.

The screenshot shows the 'Good Vibrations' software interface. The main window displays a circular cross-section of a tube bundle with rows of tubes numbered 1 to 25. Row 22 is highlighted in red. The right-hand panel contains input fields for 'Rohrspiegeleingaben' (tube division angle, ratio, diameter) and 'Rohrspiegelausgaben bzw. -korrekturen' (number of rows, distance from center).

Rohrspiegeleingaben

- Rohrteilungswinkel: 30
- Rohrteilungsverhältnis: $t = 1,3$ \rightarrow Tau = 1,3
- bzw. Rohrteilung: $t = 32,5$ mm \rightarrow $t = 32,5$ mm
- Hüllkreisdurchmesser: $d_H = 875$ mm
- fehlende Rohrreihen Oben: 3
- fehlende Rohrreihen Mitte: 0
- fehlende Rohrreihen Unten: 3
- Existiert ein Mittelrohr:

Rohrspiegelausgaben bzw. -korrekturen

- alle Rohrreihen berechnen:
- zu berechnende Rohrreihe: Nr. $R_r = 22$
- realer Hüllkreisdurchmesser: $d_{H,real} = 1874,99$ mm
- Anzahl der Rohrreihen: $n = 25$
- Anzahl der Rohre: $n_{R_r} = 571$
- vertikaler Abstand zur Bündelmitte: $x_{R_r} = 1253,3$ mm
- Anzahl der Rohrreihen im Fenster der zu berücksichtigenden Spiegelhälfte: $n_{R_r,F} = 7$

Bild 9: Registerkarte **Rohrspiegel, zylindrischer Mantel**

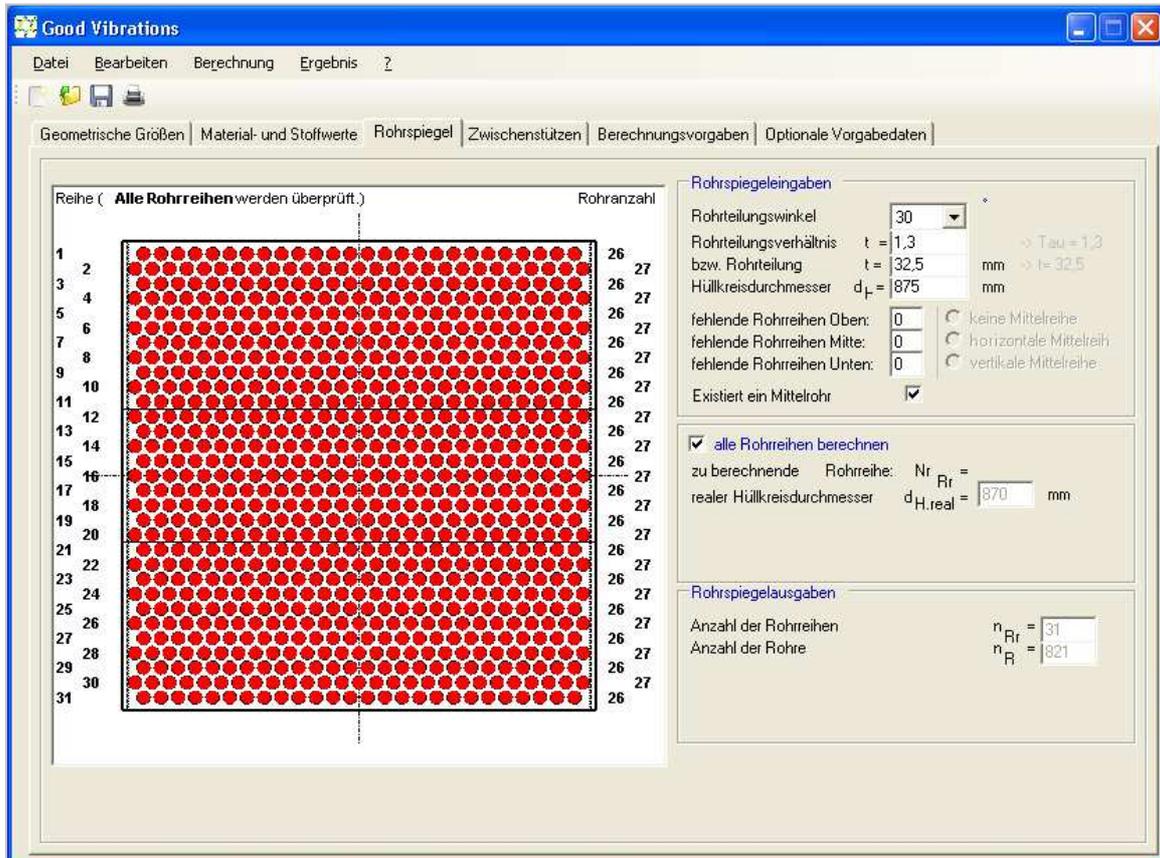


Bild 10: Registerkarte **Rohrspiegel, rechteckiger Mantel**

Zwischenstützen

In **Bild 11** wurden 3 Rohrreihenblöcke definiert.

Der 1. Block RBB(1) umfasst ein Teilstützgitter für die 1. bis 5.Rohrreihe, z.B. für die Rohrreihen unter dem Eintrittsstutzen.

Der 2. Block RBB(2) ist ein Stützgitter, das alle Rohrreihen des Bündels von der 1. bis zur 31.Rohrreihe einschließt.

Der 3. Block RBB(3) umfasst ein Teilstützgitter für die 27. bis 31.Rohrreihe, z.B. für die Rohrreihen unter dem Austrittsstutzen.

Für jeden Rohrreihenblock können in jedem Strömungsabschnitt die Anzahl der Zwischenstützen und die Länge des Stützabschnitts l_u vorgegeben werden. Die Länge des Stützabschnitts bezieht sich immer zum vorherigen Umlenklech oder Rohrboden bzw. auf die vorherige Zwischenstütze. Der Abstand zwischen der letzten Zwischenstütze und dem nächsten Umlenklech kann nicht vorgegeben werden.

Damit die Länge der Stützabschnitte eingegeben werden kann, muss die Checkbox **Konstantabstände** deaktiviert werden.

Im vorliegenden Beispiel wurde der Rohrreihenblock RBB(1) (Teilstützgitter) nur unter dem Eintrittsstutzen platziert, d.h. die Anzahl der Zwischenstützen im 1.Strömungsabschnitt beträgt 1, in allen anderen Strömungsabschnitten ist die Anzahl der Zwischenstützen 0.

Der Rohrreihenblock RBB(2) wurde zwischen den Umlenklechen platziert, d.h. im 1. und 5.Strömungsabschnitt beträgt die Anzahl der Zwischenstützen 0 und in den Strömungsabschnitten 2,3 und 4 jeweils 1.

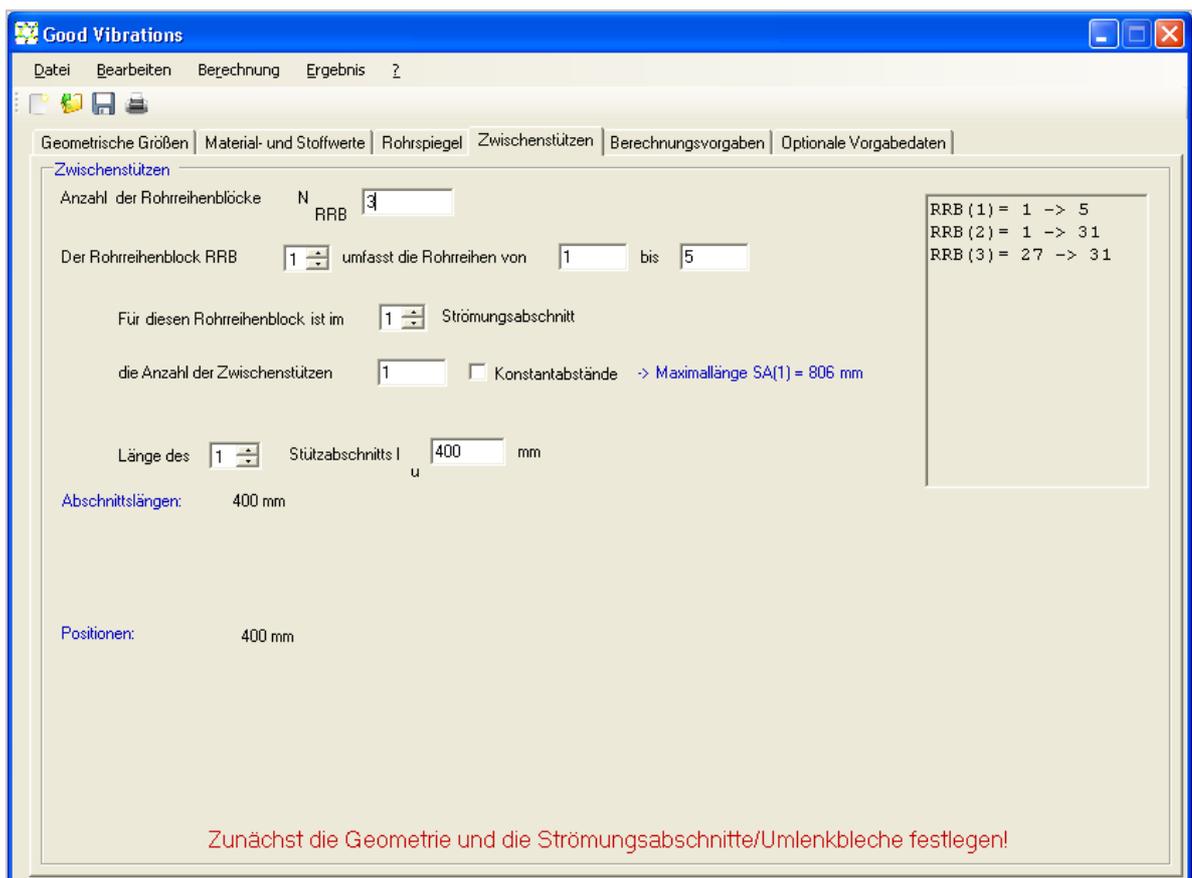


Bild 11 – Registerkarte **Zwischenstützen**

Berechnungsvorgaben

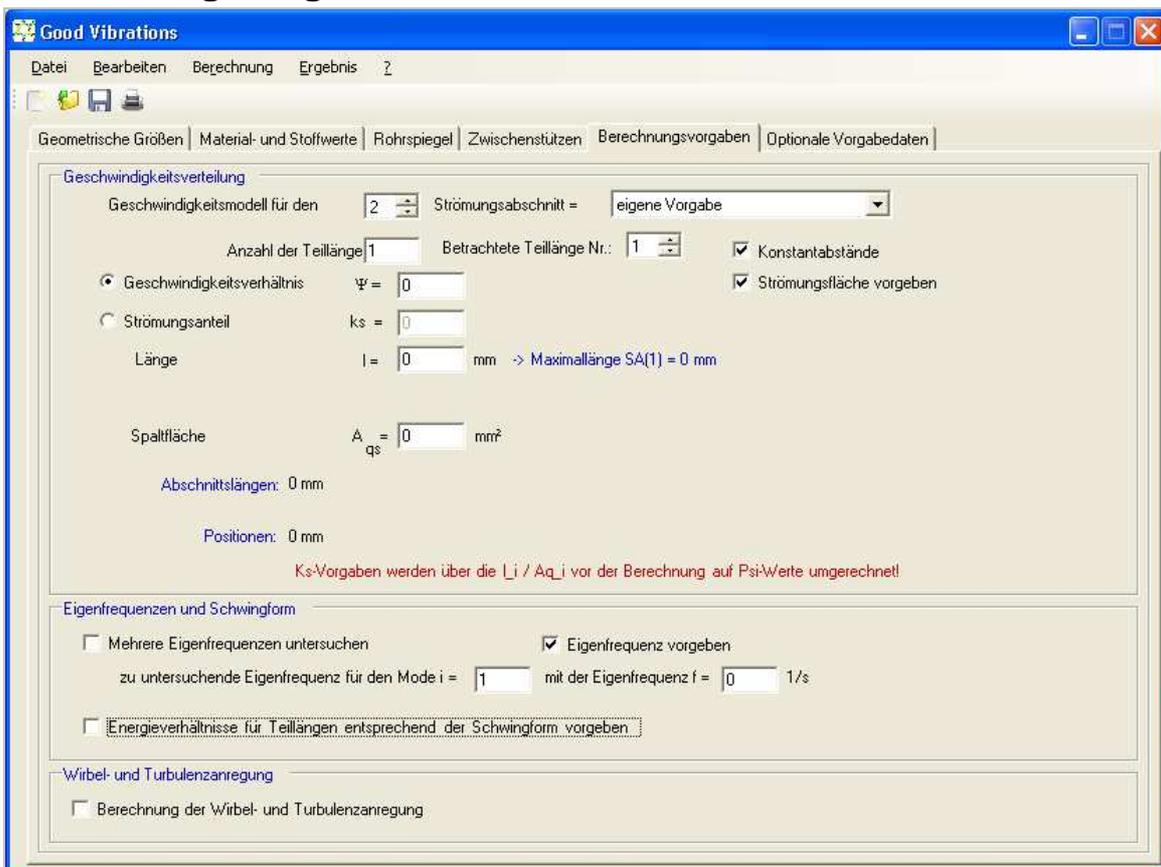


Bild 12: Registerkarte **Berechnungsvorgaben**

In der Registerkarte Berechnungsvorgaben (**Bild 12**) kann die Überprüfung der Schwingungsanregung durch Wirbel- und Turbulenzerregung an- bzw. abgeschaltet werden. Weiterhin ist die Anzahl der zu untersuchenden Eigenfrequenzen einstellbar. Wenn mehrere Eigenfrequenzen berücksichtigt werden, so ist der höchste zu berücksichtigende Mode anzugeben (Standardeinstellung $i=1-6$). Falls nur eine Eigenfrequenz untersucht werden soll, ist der Mode i der Eigenfrequenz einzutragen. Für diesen Mode kann eine eigene Vorgabe für die Eigenfrequenz gemacht werden, der Schwingmode und die Energieverhältnisse werden vom Programm berechnet. Man sollte sich aber überzeugen, dass die vorgegebene Eigenfrequenz und der errechnete Schwingmode kompatibel sind. In der Standard- Voreinstellung wird die Schwingungsanregung infolge von Wirbel- und Turbulenzanregung mitbestimmt; es werden die ersten sechs Eigenfrequenzen für die Bestimmung der Schwingungsgefährdung verwendet.

Die Geschwindigkeitsverteilung kann durch Vorgabe des relativen Geschwindigkeitsverhältnisses ψ oder durch Vorgabe des Strömungsanteils k_S für jede Teillänge definiert werden. Bei Vorgabe des Strömungsanteils k_S für jede Teillänge r muss gelten:

$$\sum k_{S,r} = 1$$

Die Geschwindigkeitsverteilung in den Rohrspalten entlang der Rohrachse kann für jeden Strömungsabschnitt ausgewählt werden. Bei der Standardeinstellung (Programmvorgabe) bestimmt das Programm die Verteilung der äquivalenten Geschwindigkeit automatisch für einen Querstromapparat unter Berücksichtigung der Modelle nach Mohr [3,4]. Diese greift immer, wenn **alle Rohrreihen** im Wärmeübertrager untersucht werden.

Abweichend davon können für **eine vorgegebene Rohrreihe** drei unterschiedliche Geschwindigkeitsmodelle ausgewählt werden:

homogene Verteilung, Strahlanströmung [1] für die erste und evtl. zweite Rohrreihe und das Stutzenmodell nach Mohr [3] für die zweite bzw. dritte Rohrreihe für den Stuzeneintritts- und evtl. den Stutzenaustrittsbereich (**Bild 12a**).

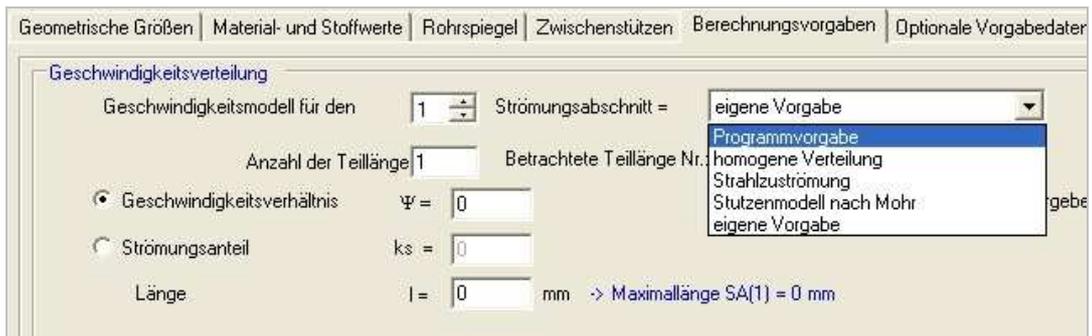


Bild 12a: Registerkarte **Berechnungsvorgaben** / **Geschwindigkeitsmodelle**

Weiterhin lässt sich für eine vorgegebene Rohrreihe die Geschwindigkeitsverteilung in Form einer Treppenfunktion, bei der die Geschwindigkeiten in jedem Teilabschnitt konstant sind, frei vorgeben; dabei ist zu beachten, dass die Summe der Teillängen gleich der Breite des betrachteten Strömungsabschnitts ist.

Bild 13 zeigt die bei der eigenen Vorgabe der Geschwindigkeitsverteilung für eine vorgegebene Rohrreihe notwendigen Angaben, Anzahl und Länge der Strömungsbereiche gleicher Geschwindigkeiten und deren zugehöriger Wert der Verteilungsfunktion. Weiterhin ist die Größe der Strömungsfläche anzugeben. Wird kein Wert für die Strömungsflächen eingesetzt, dann werden automatisch für die Strömungsbereiche die Spaltquerschnittsflächen aus der Länge des Bereichs und aus der Sehnenlänge der betrachteten Rohrreihe d.h. normalerweise zu groß berechnet. Der Verlauf der Verteilungsfunktion in einem Strömungsabschnitt wird durch die Eingabe von relativen Werten angegeben, d.h. es werden nur die Relationen der Werte für den einzelnen Strömungsabschnitt berücksichtigt, die wahren Werte werden über die Kontinuitätsgleichung für den Volumenstrom im Programm berechnet.

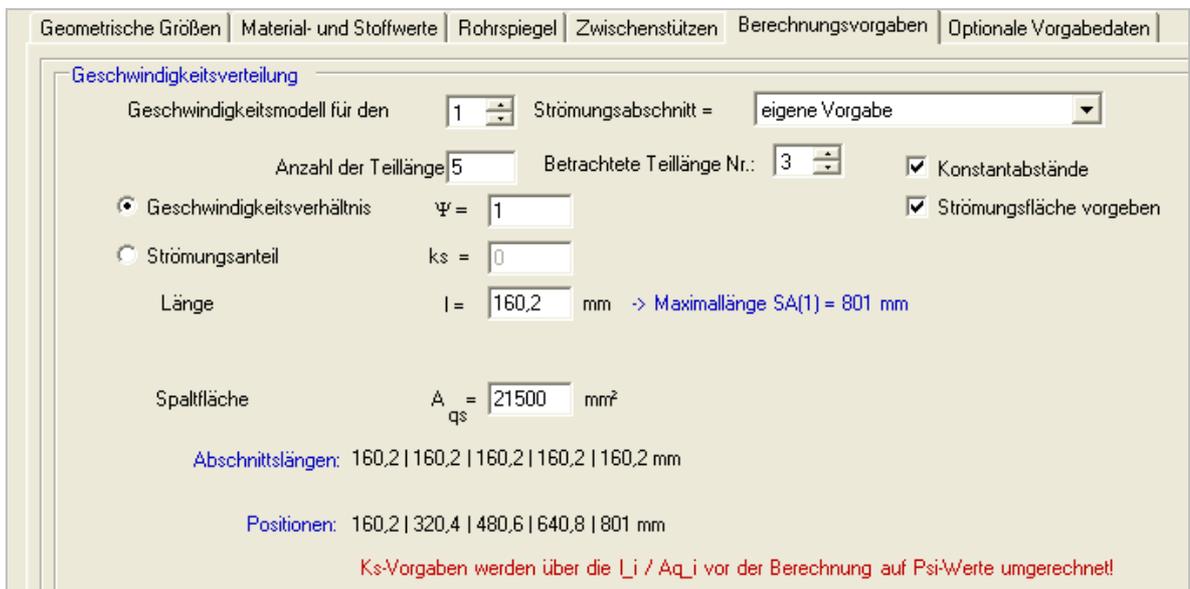


Bild 13: Listenfeld **Geschwindigkeitsverteilung**

Wenn für **alle** Strömungsabschnitte eine eigene Verteilung vorgegeben wurde, besteht weiterhin die Möglichkeit, die Berechnung ohne die automatische Bestimmung der Eigenfrequenz und der Schwingform durchzuführen.

Dazu muss das Kontrollkästchen **„Energieverhältnisse für Teillängen entsprechend der Schwingform vorgeben“** aktiviert werden (**Bild 13a**).

In diesem Falle sind der Mode i , die Eigenfrequenz sowie für jeden Teilabschnitt der Geschwindigkeitsverteilung die Teilenergieverhältnisse vorzugeben. Die Eingabe erfolgt wie bei der Geschwindigkeitsvorgabe, jedoch muss die Eigenfrequenz vorab eingegeben und für jeden Strömungsabschnitt **eigene Vorgabe** der Geschwindigkeitsverteilung ausgewählt sein.

Länge $l =$ mm -> Maximallänge SA(1) = 801 mm

Teilenergieverhältnisse $D =$

Spaltfläche $A_{qs} =$ mm²

Abschnittslängen: 160,2 | 160,2 | 160,2 | 160,2 | 160,2 mm

Positionen: 160,2 | 320,4 | 480,6 | 640,8 | 801 mm

Ks-Vorgaben werden über die l_i / A_{q_i} vor der Berechnung auf Psi-Werte umgerechnet!

Eigenfrequenzen und Schwingform

Mehrere Eigenfrequenzen untersuchen Eigenfrequenz vorgeben

zu untersuchende Eigenfrequenz für den Mode $i =$ mit der Eigenfrequenz $f =$ 1/s

Energieverhältnisse für Teillängen entsprechend der Schwingform vorgeben

Bild 13a: **Teilenergieverhältnisse**

Optionale Vorgabedaten

In der Registerkarte **optionale Vorgabedaten** können die Voreinstellungen im Programm verändert werden (**Bild 14**). Dies kann notwendig werden, wenn abweichende Konstruktionen (z.B. Längsströmer) oder Zustandsänderungen zu berücksichtigen sind.

Bild 14: Registerkarte **optionale Vorgabedaten**

Dabei wird in Vorgabedaten unterschieden, die für **alle Rohrreihen** bzw. **nur für eine vorgegebene Rohrreihe / für einen vorgegebenen Mode** Gültigkeit besitzen.

Für alle Rohrreihen und unabhängig vom Schwingmode können vorgegeben werden:

- Gesamtmassenbelegung m oder der hydrodynamische Massenkoeffizient c_h für variable Massenbelegungen
- Mindestrohranzahl n_{RAO} an Axiallast tragenden Rohren:

Standardwerte für Zylindermäntel siehe [1], genaue Werte durch Zählung der Randrohre im Rohrspiegel, unbedingt notwendig für Rechteckmäntel

- Plattensteifigkeit X_I und X_A

Standardwerte siehe [1, Tab.6.],

und für jeden Strömungsabschnitt:

- Leckstromfaktor k_{LS} erfasst den Querstromanteil (auch > 1 möglich):
Zur Berücksichtigung von sich ändernden Massenströmen, z.B. bei Kondensation oder Verdampfung oder in Längsströmern. Die Spaltverluste der Umlenkleche werden normalerweise automatisch berechnet, durch eine Vorgabe aber überschrieben!

- dimensionslose kritische Geschwindigkeit $u_{sk}^* = u_{sk} / (f_i \cdot d_a)$:

Die kritischen Geschwindigkeiten werden abhängig von der Anordnung, der Rohrreihe und dem Mode i automatisch im Programm berechnet, unter Berücksichtigung der Anströmbedingungen und der Randspaltweiten. Die Schräganströmung ist aber entsprechend [1, Tab.11] im Vorgabewert zu berücksichtigen.

Nur für **eine vorgegebene Rohrreihe** ist es möglich, abweichend von der Standard-Berechnung im Programm folgendes vorzugeben:

- Einströmfaktor k_{ES} :
z.B. bei Vorgabe einer eigenen Einström-Geschwindigkeitsverteilung; Standard-Werte [1, Tab.11],
- Randspalt- Korrekturfaktor k_{RS} ,
der den Einfluss des Randspaltes am Mantel bei beschleunigter Strömung berücksichtigt,

und für **jeden Strömungsabschnitt**:

- Gesamtdämpfung λ_i :
gültig für den vorgegebenen Mode i bzw. konstant für alle Moden
- Teilstromfaktor k_{TS} (< 1):
wird für den Anströmvolumenstrom der Fensterrohre automatisch berechnet,
- Korrelationsfaktor J_i :
für Turbulenzerregung bei einem vorgegebenen Mode; Standard-Werte [siehe 1,5],
- Auftriebskoeffizienten c_y :
für Wirbelerregung, Standard-Werte für Bündel und Einzelrohre ($\tau > 3,5$) siehe [1, Oc17],
- kritische Geschwindigkeit im realen Bündel u_{ski} :
nur für den vorgegebenen Mode i , wird ohne weitere Korrekturen übernommen

Werden keine Werte in den entsprechenden Feldern eingetragen, bestimmt das Programm diese Werte.

Starten der Berechnung

Nach Eingabe sämtlicher Daten kann die Berechnung nun gestartet werden. Dazu wird aus dem Menü **Berechnung** (Bild 15) der Menübefehl **Starten** zum Ausführen der Berechnung mit der Maus ausgewählt. Während der Berechnung wird der Status der Berechnung in einem neuen Fenster angezeigt.

Nach Beendigung der Berechnung wird eine Ergebnisdatei mit der Endung *.gva angelegt.



Bild 15: Menü **Berechnung**

Anzeigen und Drucken der Ergebnisse

Nach Beendigung der Berechnung können die Ergebnisse auf dem Bildschirm dargestellt werden. Dazu ist im Menü **Ergebnis** (Bild 16) das Feld **Anzeigen** mit dem Mauszeiger auszuwählen. Die Ergebnisse werden aus der Ergebnisdatei *.gva gelesen. Es wird ein neues Fenster mit den Ergebnissen geöffnet, die erste Seite enthält eine Zusammenfassung.

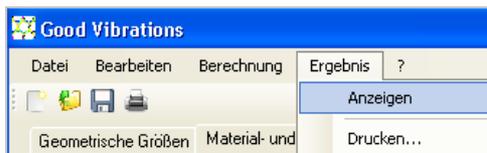


Bild 16: Menü **Ergebnis**

Mit dem Befehl **Drucken** im Menü **Ergebnis** (Bild 16) wird die Ergebnisdatei auf dem Drucker ausgegeben. Der Anhang enthält Beispiele. Zur Bearbeitung und Speicherung des Ausdrucks werden Programme wie Adobe Acrobat oder MSOD Image Writer empfohlen, die über den Befehl Drucken aufgerufen werden.

Ausgabebeschreibungen

Auf der ersten Ausdruckseite zeigt **Bild 1** den Rohrspiegel und farbig hervorgehoben die überprüfte(n) Rohrreihe(n) bzw. alle berechneten Rohrreihen. Der höchste berechnete Gefährdungsgrad für fluidelastische Instabilität und die maximalen Amplituden für stochastische und periodische Anregungen werden mit den zugehörigen Rohrreihen, Eigenfrequenzen sowie kritischen Volumenströmen und Geschwindigkeiten zusammenfassend aufgelistet und bewertet. Dann folgen die Eingabedaten und die daraus berechneten Geometriedaten, Material- und Stoffwerte, Struktur- und Betriebsdaten.

Im ersten Teil werden die Detail-Ergebnisse hinsichtlich der Schwingungsgefährdung durch **fluidelastische Instabilität** beschrieben. Zunächst werden die Lagerungsbedingungen sowie die Struktur-, Stoff- und kritischen Daten für die untersuchte bzw. die gefährdete Rohrreihe aufgelistet. In der **Tabelle 1** des Ausdrucks werden die Zwischenergebnisse der Berechnung abschnittsweise für die vorgegebene bzw. die kritische Eigenfrequenz ausgegeben. Die Summe von Spalte 8 in Tabelle 1 bestimmt den Gefährdungsgrad, so dass aus den Größen der Anteile in Spalte 8 die dominierenden Teilabschnitte ersichtlich sind, bei denen u. U. konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung durchzuführen wären. Aus der Summe von Spalte 8 ergeben sich die maximale kritische Geschwindigkeit und der kritische Eintrittsvolumenstrom des Wärmeübertragers für die untersuchte Rohrreihe. Weiterhin wird der Gefährdungsgrad - das Stabilitätsverhältnis K^* des Bündels - ausgegeben, der sich aus dem Verhältnis von Betriebsvolumenstrom zu kritischem Volumenstrom ergibt.

Die programmintern berechnete bzw. vorgegebene Geschwindigkeitsverteilung ist zusammen mit dem kritischen Schwingmode im **Bild 2** des Ausdrucks dargestellt. Die Vorgaben können vom Anwender auf ihre Realitätsnähe geprüft und eventuell in einer erneuten Berechnung verändert werden. Das Ergebnis wird anschließend bewertet und die Gefährdungsgrade für die beiden nächst gefährdeten Rohrreihen bzw.

Eigenformen aufgelistet. Weitere Hinweise und Warnungen, z.B. bezüglich des Gültigkeitsbereiches der verwendeten Gleichungen folgen.

Im zweiten Teil werden die Ergebnisse hinsichtlich der **stochastischen und periodischen Anregungen** beschrieben, sofern dies gewünscht wird. Es werden die Ergebnisse für die vorgegebene bzw. für die durch Turbulenz- und Wirbelerregung höchstgefährdete Rohrreihe gezeigt, die von der höchstbelasteten Rohrreihe durch fluidelastische Instabilität abweichen kann.

Zunächst werden die von der Lagerungsbedingungen abhängigen Daten: Eigenfrequenzen für die betrachteten Moden (s.a. Tabelle 3 im Ausdruck), die Strouhal-Zahlen und die kritischen Resonanzgeschwindigkeiten aufgelistet, für die eine Anregung in Frage kommen könnten. Dabei werden der Resonanzabstand als auch die Reynoldszahl-Grenzen und die Gültigkeitsbereiche für die Strouhal-Zahlen berücksichtigt (z.B. die Gültigkeit von $St_{w,2}$ nur im Eintrittsbereich für $m=1$).

Tabelle 2 im Ausdruck enthält die Geschwindigkeitsverteilung und die Betriebsgeschwindigkeit für die betrachtete Rohrreihe sowie als Zwischenergebnisse die gewichteten Wirbelanregungen in den Teilabschnitten für die sechs Moden mit den höchsten Gefährdungsgraden. Die Wurzel aus den Summen der Spalten 5 bis 10, u.U. unter Berücksichtigung des Korrelationsfaktors $J_{w,i,m}$ [1] ergeben die Amplituden-Maximalwerte $A_{w,i}/d_a$ in **Tabelle 3**. Daher wird aus den Größen der Anteile in den Spalten 5-10 von **Tabelle 2** ersichtlich, in welchen Teilabschnitten die größten periodischen Anregungen erfolgen.

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse für Wirbel- und Turbulenzerregung zusammen. Sie enthält Darstellungen der untersuchten Schwingmoden und der zugehörigen maximalen Amplitudenwerte für Wirbel- als auch für Turbulenzerregung sowie als Gefährdungsgrad die Maximalwerte aus den summierten Moden, die ebenfalls dargestellt sind.

Die Ergebnisse werden bewertet und die Gefährdungsgrade für die beiden nächst gefährdeten Rohrreihen werden unter Hinweisen aufgelistet.

Speichern und Laden eines Projektes

In der Symbolleiste sind die Schaltflächen für den Schnellzugriff auf die Befehle **Neue** Datei anlegen, Datei **Öffnen**, und Datei **Speichern** enthalten.

Im Menü **Datei** (Bild 17) der Menüleiste sind die Menüelemente zur Dateiverwaltung angeordnet und ermöglichen das Neuanlegen, Öffnen und Speichern einer Datei mit den Eingabedaten. Mit den Verweisen auf die zuletzt geöffneten Dateien können diese sofort geöffnet werden. Die Anwendung wird mit dem Befehl **Beenden** geschlossen.

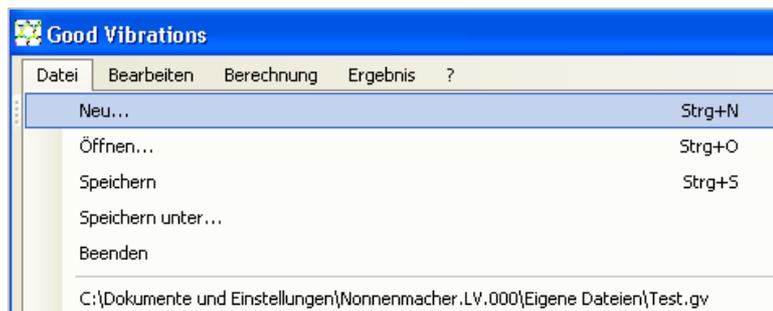


Bild 17: Menü **Datei**

Mit dem Befehl **Speichern** werden die Eingabedaten in einer Datei mit der Endung *.gv abgelegt. Auf diese Dateien kann mit dem Befehl **Öffnen** später wieder zugegriffen werden. Es werden alle eingegebenen Daten und Informationen gespeichert. Durch den Befehl **Neu** wird ein neues Projekt angelegt und alle Werte werden auf die Default-Einstellung zurückgesetzt.

Literaturangaben

[1] GELBE, H.†, SCHRÖDER, K.†, ZIADA, S., (2006) „Schwingungen in Wärmeübertrager- Rohrbündeln“, VDI - Wärmeatlas, Kap. Oc, 10. Auflage, Springer – Verlag, Berlin (bzw. 9. Auflage 2002)

[2] SCHRÖDER, K.†, GELBE, H.† (1999) „New design recommendations for fluidelastic instability in heat exchanger tube bundles“, Journal of Fluid and Structures 13, 3, pp. 355-381

[3] MOHR, U., GELBE, H.† (2000): „Velocity Distribution and VIBRATIONS Excitation in Tube Bundle Heat Exchangers“, Intern. Journal of Thermal Sciences Vol. 39, pp. 414-421

[4] MOHR, U. (2001) „Einfluss von Geometrie und Geschwindigkeitsverteilung auf die Schwingungsanregung von Rohrbündel-Wärmeübertragern“, (Dissertation, TU Berlin, 2001), Fortschritt-Berichte VDI Reihe 11, Nr. 304, Düsseldorf; VDI-Verlag 2001.

Beispiel – LUFT-LUFT-Wärmetauscher

Grunddaten

Geometrische Größen

Bauart		<i>ohne Mantelkompensator</i>
Bodenplatten	Typ der Bodenplatte	<i>Programmvorgabe</i>
	im Abschnitt 1:	
	Lagerung	<i>fest</i>
	Dicke	<i>44 mm</i>
	im Abschnitt M:	
	Lagerung	<i>fest</i>
	Dicke	<i>44 mm</i>
Mantel	Querschnitt	<i>kreisförmig</i>
	Innendurchmesser d_1	<i>894 mm</i>
	Außendurchmesser d_2	<i>914 mm</i>
Rohre	Außendurchmesser d_a	<i>25 mm</i>
	Innendurchmesser d_i	<i>21 mm</i>
	Gesamtlänge l_R	<i>4100 mm</i>
Stutzen	Querschnitt	<i>kreisförmig</i>
Eintrittsstutzen	lichter Abstand der Eintrittsstutzenmitte zur ersten Bodenplatte l_S	<i>420 mm</i>
	Innendurchmesser d_S	<i>392,2 mm</i>
Auslassstutzen	lichter Abstand von Stutzenmitte bis zur Bodenplatte l_S	<i>420 mm</i>
	Innendurchmesser d_S	<i>392,2 mm</i>
	Lage des Auslassstutzens	<i>unten</i>
Umlenkbleche	Durchmesser d_U	<i>890 mm</i>
	Anzahl n_U	<i>4</i>
	Dicke b	<i>10 mm</i>
	Höhe des Ausschnitts Umlenkblech / Mantel H_U	<i>320,05 mm</i>
	bzw. $d_{u,x}$	<i>35,8 %</i>
	Abstände zwischen den Umlenkblechen	
	$l_U(1)$	<i>806 mm</i>
	$l_U(2)$	<i>800 mm</i>
	$l_U(3)$	<i>800 mm</i>
	$l_U(4)$	<i>800 mm</i>
	$l_U(5)$	<i>806 mm</i>
	Bohrungsdurchmesser für die Rohre	<i>25,4 mm</i>

Good Vibrations

Datei Bearbeiten Berechnung Ergebnis ?

Geometrische Größen | Material- und Stoffwerte | Rohrspiegel | Zwischenstützen | Berechnungsvorgaben | Optionale Vorgabedaten

Bauart des W/ÜT: ohne Mantelkompensator

Rohre
 Außendurchmesser $d_a = 25$ mm
 Innendurchmesser $d_i = 21$ mm
 Gesamtlänge $l_R = 4100$ mm (4100 mm)

Bodenplatten
 Typ der Bodenplatten: Programmvorgabe

Bodenplatte	Lagerung	Dicke b_{Bp}
im Abschnitt 1	fest	44 mm
im Abschnitt M	fest	44 mm

Stützen
 Querschnittsform: kreisförmig rechteckig

Eintrittsstützen (Position = oben)
 lichter Abstand der Eintrittsstützenmitte zur ersten Bodenplatte $l_S = 420$ mm
 Innendurchmesser des Stützens $d_S = 392,2$ mm

Auslaßstützen (Position = unten)
 lichter Abstand von Stützenmitte bis zur Bodenplatte $l_S = 420$ mm
 Innendurchmesser des Stützens $d_S = 392,2$ mm
 Lage des Auslaßstützens: unten oben

Mantel
 Querschnitt: kreisförmig rechteckig

Innendurchmesser des Mantels $d_1 = 894$ mm

Außendurchmesser des Mantels $d_2 = 914$ mm

Umlenkbleche
 Umlenkblechtyp = Umlenksegmente
 Anzahl der Umlenkbleche $n_u = 4$
 Umlenkblechdicke $b = 10$ mm
 Durchmesser der Umlenkbleche $d_u = 890$ mm

Abstand zwischen den Umlenkblechen $l_u (1 - \frac{b}{d_u}) = 806$ mm
 Höhe des Ausschnitts Umlenkblech $H_u = 320,05$ mm bzw. $\frac{H_u}{d_{u,x}} = 35,8$ %
 Bohrungsdurchmesser Rohre $d_B = 25,4$ mm

Material und Stoffwerte

Mantel

Elastizitätsmodul E_M	20000 N/mm ²
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient γ_M	16 · 10 ⁻⁶ /K
Querkontraktionszahl	0,28
Differenz aus mittlerer Wandtemperatur im Betrieb und im spannungslosen Einbauzustand	-2 K

Rohre

Elastizitätsmodul E_R	20000 N/mm ²
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient γ_R	15,5 · 10 ⁻⁶ /K
Dichte ρ_R	7980 kg/m ³
Querkontraktionszahl	0,28
Differenz aus mittlerer Wandtemperatur im Betrieb und im spannungslosen Einbauzustand	5 K

Fluid im Mantelraum

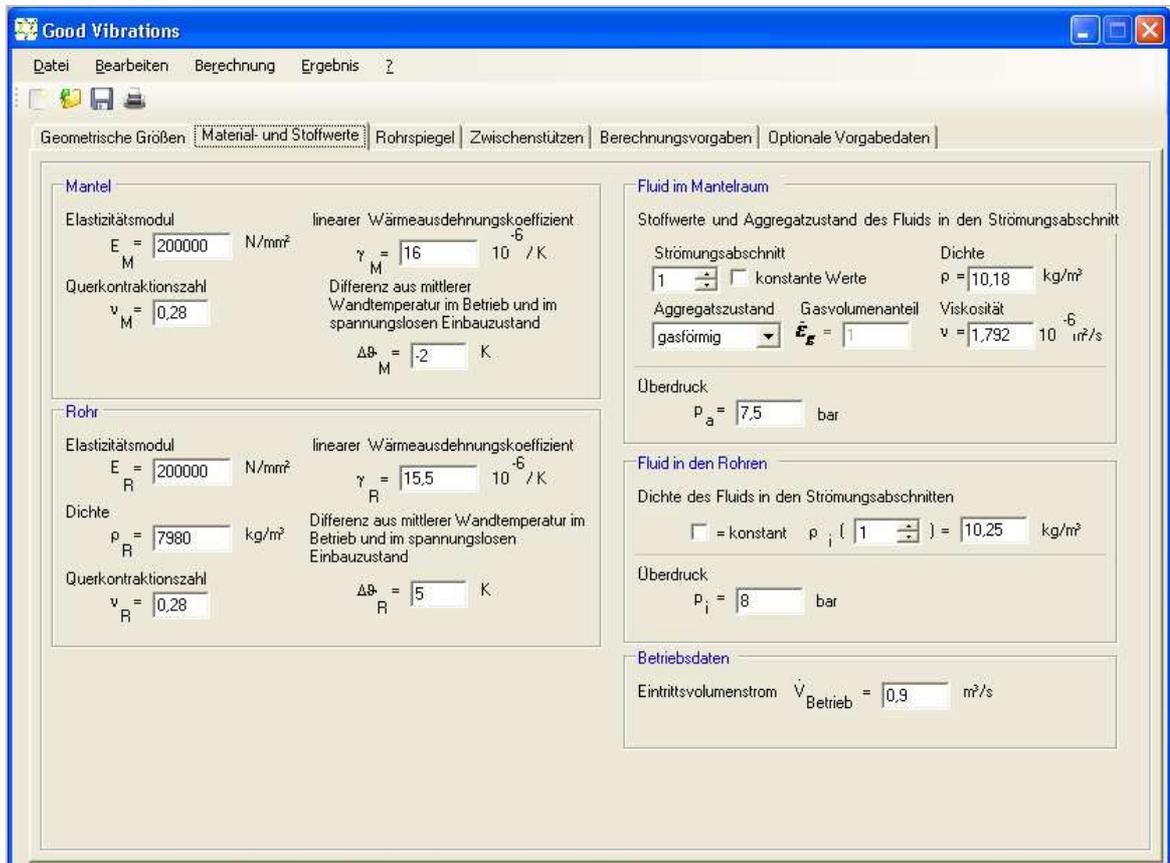
Strömungsabschnitte 1 – 5	konstant
Dichte ρ	10,18 kg/m ³
Aggregatzustand	gasförmig
Gasvolumenanteil	1
Viskosität	1,792 · 10 ⁻⁶ m ² /s
Überdruck p_a	7,5 bar

Fluid im Rohr

Strömungsabschnitte 1 – 5	konstant
Dichte ρ	10,25 kg/m ³
Überdruck p_i	8 bar

Betriebsdaten

Eintrittsvolumenstrom	0,9 m ³ /s
-----------------------	-----------------------



Rohrspiegel

Rohrspiegeleingabe

Rohrteilungswinkel	30°
Rohrteilungsverhältnis t	1,3
bzw. Rohrteilung	32,5 mm
Hüllkreisdurchmesser	875 mm
fehlende Rohrreihen oben	0
fehlende Rohrreihen mitte	0
fehlende Rohrreihen unten	0
existiert ein Mittelrohr	angehakt
alle Rohrreihen berechnen	angehakt

The screenshot shows the 'Good Vibrations' software interface. The main window displays a circular tube bundle layout with red circles representing tubes. The layout is labeled 'Reihe (Alle Rohrreihen werden überprüft.)' and 'Rohranzahl'. The layout is symmetric about a horizontal centerline, with rows numbered 1 to 31 on the left and 4 to 31 on the right. The tubes are arranged in a staggered pattern within a circular shell.

The 'Rohrspiegeleingabe' (Tube Bundle Input) section contains the following parameters:

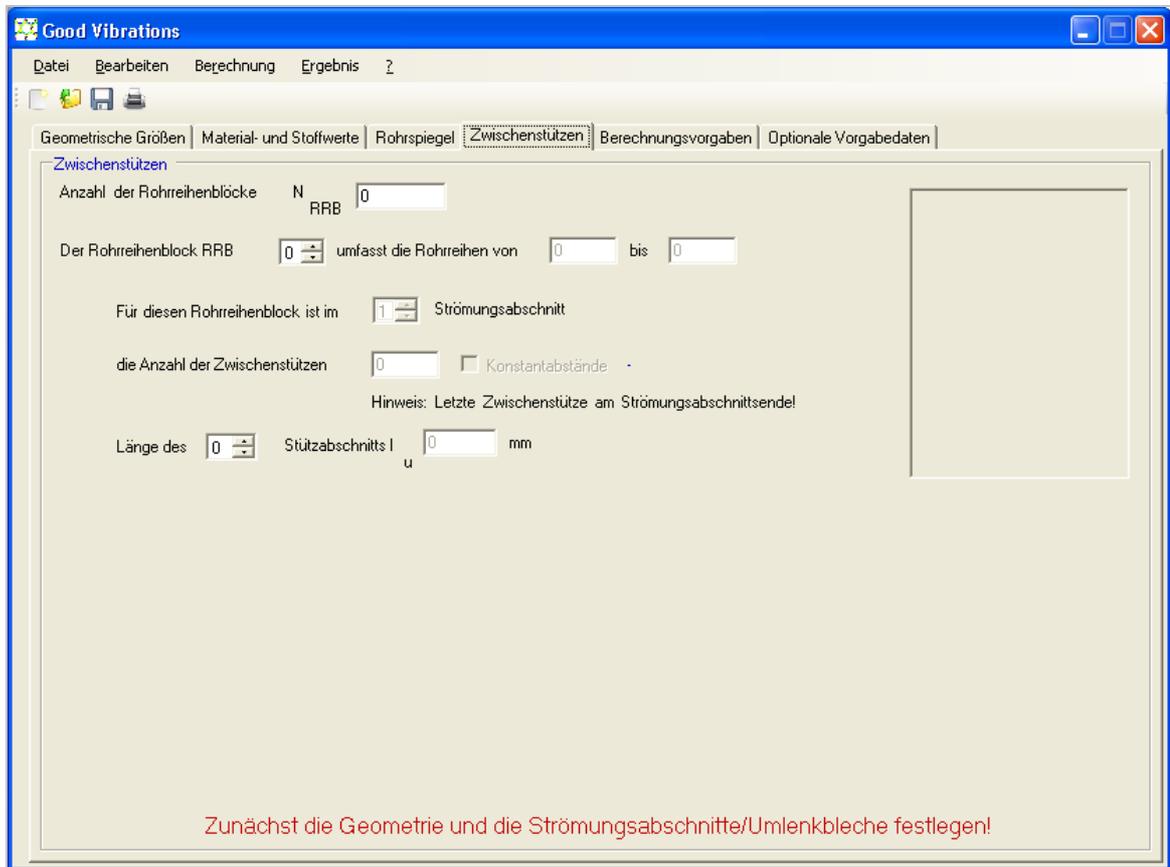
- Rohrteilungswinkel: 30
- Rohrteilungsverhältnis: $t = 1,3$ (Tau = 1,3)
- bzw. Rohrteilung: $t = 32,5$ mm ($t = 32,5$)
- Hüllkreisdurchmesser: $d_p = 875$ mm
- fehlende Rohrreihen Oben: 0 (keine Mittelreihe)
- fehlende Rohrreihen Mitte: 0 (horizontale Mittelreihe)
- fehlende Rohrreihen Unten: 0 (vertikale Mittelreihe)
- Existiert ein Mittelrohr:

The 'Rohrspiegelausgaben' (Tube Bundle Output) section shows the following results:

- alle Rohrreihen berechnen
- zu berechnende Rohrreihe: $N_{Rr} =$
- realer Hüllkreisdurchmesser: $d_{H,real} = 874,99$ mm
- Anzahl der Rohrreihen: $n_{Rr} = 31$
- Anzahl der Rohre: $n_R = 1625$

Zwischenstützen

Es wurden keine Stützgitter oder Teilstützgitter vorgesehen.



Berechnungsvorgaben

Geschwindigkeitsverteilung

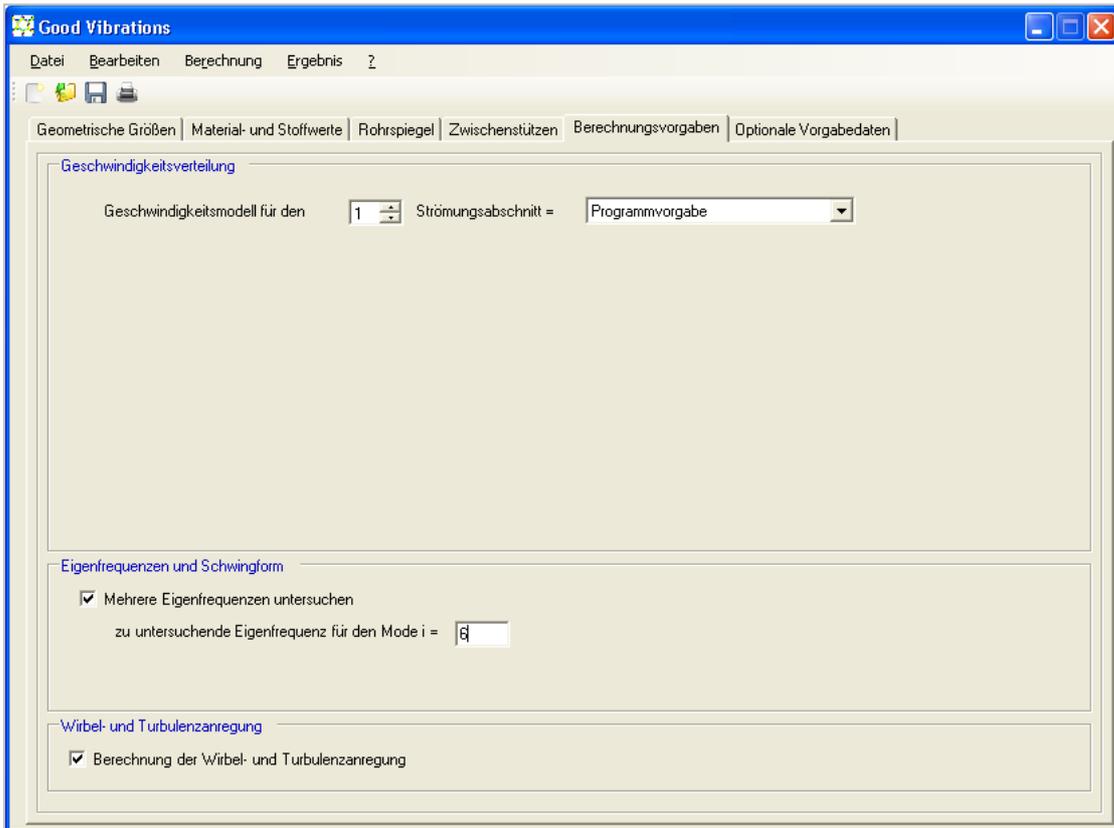
Geschwindigkeitsmodell für alle Strömungsabschnitte *Programmvorgabe*

Eigenfrequenz und Schwingform

Mehrere Eigenfrequenzen untersuchen *angehakt*
zu untersuchende Eigenfrequenz für Mode i 6

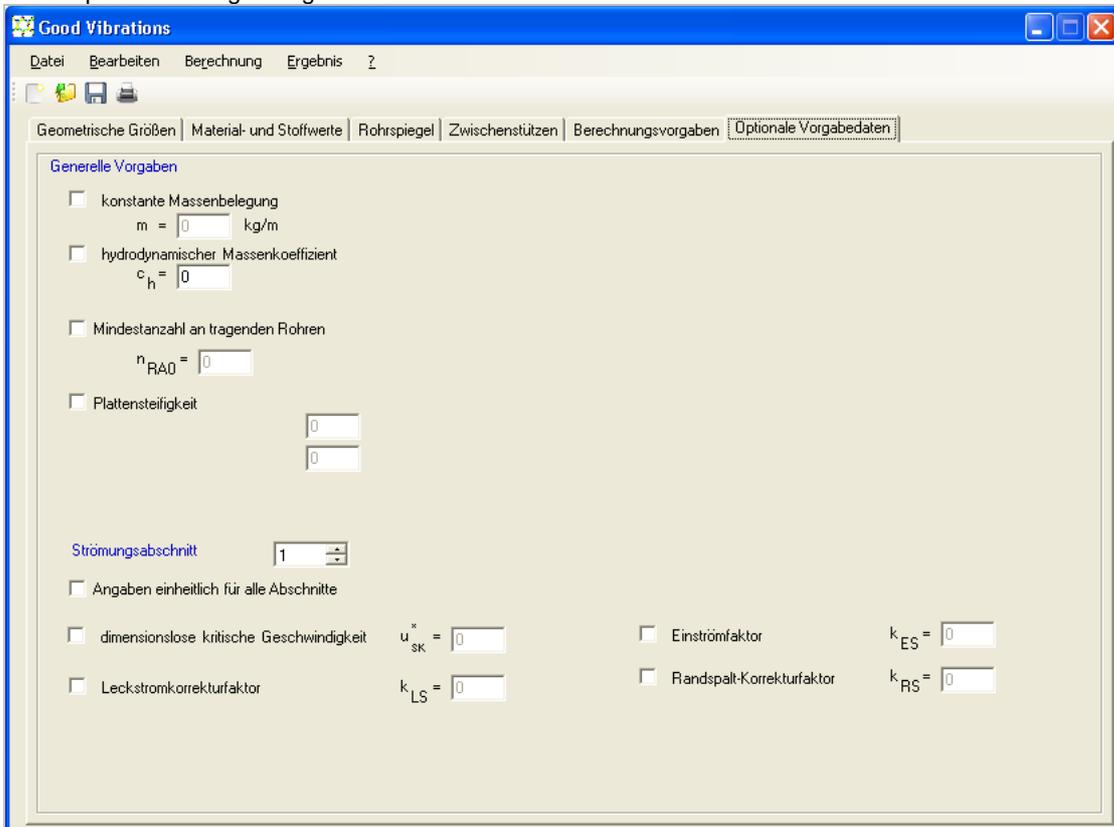
Wirbel- und Turbulenzanregung

Berechnung der Wirbel- und Turbulenzanregung *angehakt*



Optionale Vorgabedaten

Keine optionalen Vorgaben gewählt.



Berechnungsgang

Start der Berechnung durch Auswählen des Menüs „**Berechnung / Starten**“ (STRG-R)



Ergebnisse

Start der Berechnung durch Auswählen des Menüs „Berechnung / Starten“ (STRG-R)
Es wird ein neues Fenster mit den Ergebnissen geöffnet, die erste Seite enthält eine Zusammenfassung.



Zur Interpretation der Ergebnisse siehe Ausgabebeschreibungen . In diesem Beispiel ist das Bündel schwingungsgefährdet durch fluidelastische Instabilität. Gefährdungsgrad 114,3 %.

Ergebnis-Ausdruck

Projektangaben:

Datum: Mittwoch, 24.10.2012
 Bearbeiter:
 Abteilung:
 Projekt-Nr.:
 Kommentar:

Ergebnis-Zusammenfassung:

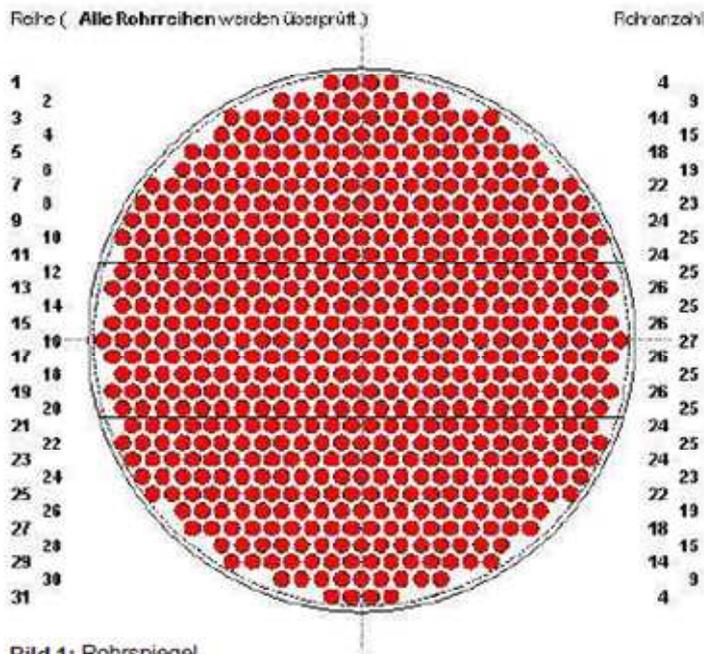
Alle Rohrreihen und die ersten 6 Eigenfrequenzen wurden überprüft. Die gefährdetsten Rohrreihen sind aufgelistet. (Ausführliche Bewertungen im Anschluß an Bild 2)

1. Fluidelastische Instabilität:

Ergebnisse für die Rohrreihe $N_{RR} = 10$
 Eigenfrequenz $f_1 = 29,1 \text{ 1/s}$
 max. krit. Spaltgeschwindigkeit ($\psi = 1$) $\hat{\Delta}_{sk,1} = 5,1 \text{ m/s}$
 krit. Eintritts-Volumenstrom: $\hat{V}_k = 2835,488 \text{ m}^3/\text{h}$
 Gefährdungsgrad: $K = 114,3 \%$ **Das Rohrbündel ist gefährdet: $K^* > 85\%$.**

2. Stochastische und periodische Anregung:

Ergebnisse für die Rohrreihe $N_{RR} = 1$
 Wirbelerregung-Amplitude $\hat{A}_W/d_2 = 0,0 \%$ (Siehe auch Tabelle 3)
 Turbulenzerregung-Amplitude $\hat{A}_{T, RMS}/d_2 = 0,22 \%$ **Das Rohrbündel ist nicht gefährdet.**



Ergebnis-Details

Geometriedaten:

Querschnittsform des Mantels = kreisförmig
Innendurchmesser des Mantels $d_1 = 894$ mm
Außendurchmesser des Mantels $d_2 = 914$ mm
Querschnittsfläche des Mantels $A_M = 28400,0$ mm²
Außendurchmesser der Rohre $d_3 = 25$ mm
Innendurchmesser der Rohre $d_4 = 21$ mm
Querschnittsfläche der Rohre $A_R = 144,5$ mm²
Rohranordnung $\alpha = 30^\circ$
Rohrteilung $\tau = 1,3$
freier Abstand zwischen den Umlenkblechen $l_u(1) = 801$ mm
freier Abstand zwischen den Umlenkblechen $l_u(2) = 790$ mm
freier Abstand zwischen den Umlenkblechen $l_u(3) = 790$ mm
freier Abstand zwischen den Umlenkblechen $l_u(4) = 790$ mm
freier Abstand zwischen den Umlenkblechen $l_u(5) = 801$ mm
Umlenkblechedicke $b = 10$ mm
Bohrungsdurchmesser fuer die Rohre $d_b = 25,4$ mm
Hoehe des Ausschnitts Umlenkblech/Mantel $H_u = 320,052$ mm
Buendel/Stutzen-Abstand $h = -20,499$ mm
Buendel/Mantel-Abstand (1. Rohrreihe) $H_1 = 24,813$ mm
Buendel/Mantel-Abstand (letzte Rohrreihe) $H_L = 24,813$ mm
Umlenkblechdurchmesser $d_u = 890$ mm
Huellkreisdurchmesser $d_H = 874,985$ mm
Gesamtrohranzahl $n_R = 625$
Querschnittsform des Stutzens = kreisförmig
Eintrittsstutzendurchmesser $d_s = 392,2$ mm
Abstand Bodenplatte / Stutzenmitte $l_s = 420$ mm
Querschnittsfläche des Stutzens $A_{qS} = 120810,6$ mm²
Austrittsstutzendurchmesser $d_s = 392,2$ mm
Abstand Bodenplatte / Stutzenmitte $l_s = 420$ mm
Querschnittsfläche des Stutzens $A_{qS} = 120810,6$ mm²

Material- und Stoffwerte:

Dichte des Rohrmaterials $\rho_R = 7980$ kg/m³
Elastizitaetsmodul der Rohre $E_R = 2,0 \cdot 10^{11}$ N/m²
Elastizitaetsmodul des Mantels $E_M = 2,0 \cdot 10^{11}$ N/m²
Querkontraktionszahl der Rohre $\nu_R = 0,28$
Querkontraktionszahl des Mantels $\nu_M = 0,28$
linearer Waermeausdehnungskoeffizient der Rohre $\gamma_R = 1,55 \cdot 10^{-5}$ 1/K
linearer Waermeausdehnungskoeffizient des Mantels $\gamma_M = 1,6 \cdot 10^{-5}$ 1/K
Dichte des Fluids in den Rohren $\rho_f(1 - 5) = 10,25$ kg/m³
Dichte des Fluids im Mantelraum $\rho_f(1 - 5) = 10,18$ kg/m³
Aggregatzustand des Fluids im Mantelraum *Aggregatzustand*(1 - 5) = gasförmig
Viskositäet des Fluids im Mantelraum $\nu_f(1 - 5) = 1,792 \cdot 10^{-6}$ m²/s

Strukturdaten:

Rohr-Randlagerung: fest / fest
Apparatetyp / Bauart: zwei feste Rohrplatten ohne Mantelkompensator
Plattensteifigkeit, innen $X_I = 0,5$
Plattensteifigkeit, außen $X_A = 1$
Massenbelegung des Rohres $m_R(1 - 5) = 1,157$ kg/m
hydrodynamischer Massenkoeffizient $c_h = 3,075$
hydrodynamische Massenbelegung $m_h(1 - 5) = 0,015$ kg/m

Gesamtmassenbelegung $m(1-5) = 1,172 \text{ kg/m}$
 Flächenträgheitsmoment $I = 9,628 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$
 Differenz aus mittlerer Wandtemperatur im Betrieb und im spannungslosen Einbauzustand fuer die Rohre $\Delta \vartheta_R = 5 \text{ K}$
 Differenz aus mittlerer Wandtemperatur im Betrieb und im spannungslosen Einbauzustand fuer den Mantel $\Delta \vartheta_M = -2,0 \cdot 10^0 \text{ K}$
 Mindestanzahl der lasttragenden Außenrohre $n_{RA0} = 55,65$
 lasttragende Außenrohre $n_{RA}^* = 126,81$
 lasttragende Innenrohre $n_{RI}^* = 576,31$
 axiale Rohrkraft infolge Dehnbehinderung, Außenrohre $F_{R,0-v\Delta} = -2864,25 \text{ N}$
 axiale Rohrkraft infolge Dehnbehinderung, Innenrohre $F_{R,0,vI} = -686,45 \text{ N}$
 axiale Rohrkraft durch äußere Kräfte, Außenrohre $F_{R,PA} = 503,79 \text{ N}$
 axiale Rohrkraft durch äußere Kräfte, Innenrohre $F_{R,PI} = 346,09 \text{ N}$
 axiale Rohrkraft, Außenrohre $F_{RA} = -2360,47 \text{ N}$
 axiale Rohrkraft, Innenrohre $F_{RI} = -340,35 \text{ N}$
 axiale Rohrkraft $F_R = -2360,47 \text{ N}$

Betriebsdaten:

Betriebsvolumenstrom $V_{\text{Betrieb}} = 3,24 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{h}^{-1}$
 ueberdruck im Mantelraum $p_a = 7,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
 ueberdruck in den Rohren $p_i = 8,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$

Fluidelastische Instabilität

untersuchte Rohrreihe $N_{RR} = 10$:

Schwingmode Nr. $i = 1$

Anzahl der Stroemungsabschnitte $M = 5$

Anzahl der Stuetzabschnitte $N = 3$

Fensterquerschnitt der Rohrreihe $A_{qF,RR} = 87772,3 \text{ mm}^2$

gesamter Fensterquerschnitt $A_{qF} = 105210,2 \text{ mm}^2$

Sehnenlaenge der Rohrreihe $s_{RR} = 827,74 \text{ mm}$

mittlere Stuetzlaenge $l_{sm} = 1337,33 \text{ mm}$

maximale Knicklaenge $l_k = 1600 \text{ mm}$

Eigenfrequenz $f_1 = 35,23 \text{ 1/s}$

kritische axiale Rohrkraft fuer das Ausknicken $F_{R,k} = 7423,94 \text{ N}$

maximal zulaessige Temperaturdifferenz fuer das Ausknicken $\vartheta_{\text{max}} = \vartheta_R - \vartheta_M = 24,86 \text{ K}$

korrigierte Eigenfrequenz $f_1(F_R) = 29,09 \text{ 1/s}$

Material- und Lagerdaempfung $\Delta_M(1-5) = 0$

viskose Daempfung $\Delta_{V,1}(1-5) = 5,061 \cdot 10^{-4}$

Strukturdaempfung $\Delta_{S,1}(1-5) = 1,811 \cdot 10^{-2}$

Gesamtdaempfung $\Delta_1(1-5) = 3,0 \cdot 10^{-2}$

Massendaempfungparameter $\Delta_1(1-5) = 5,5267$

kritische Geschwindigkeit fuer ideale 30°-Anstroemung $u_{sk,1}(1-5) = 4,788 \text{ m/s}$

kritische Geschwindigkeit fuer ideale 60°-Anstroemung $u_{sk,1}(1-5) = 4,468 \text{ m/s}$

kritische Geschwindigkeit bei Schraeganstroemung $u_{sk,1}(1-5) = 4,788 \text{ m/s}$

Spalte		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Abschnitt		$l_{m,r}$	\tilde{u}_{sk}	A_{qs}	k_{LS}	k_{TS}	$\psi_{m,r}$	$\Delta S_{m,r}$	$\frac{S_{m,r}}{\tilde{u}_{sk}^2}$	$\Delta_{sk} \cdot \psi_{m,r}$	u_{sB}
m,r	n	m	ms^{-1}	m^2					m^{-2}s^2	ms^{-1}	ms^{-1}
1,1	1	0,8010	4,79	0,1530	1,000	1,000	1,000	0,00428	$0,0187 \cdot 10^{-2}$	5,15	5,88
2,1	2	0,7950	3,33	0,1519	0,903	0,819	0,745	0,29232	$1,4633 \cdot 10^{-2}$	3,83	4,38
3,1	2	0,7950	4,79	0,1519	0,903	0,819	0,745	0,37878	$0,9170 \cdot 10^{-2}$	3,83	4,38
4,1	3	0,7950	3,33	0,1519	0,903	0,819	0,745	0,21971	$1,0998 \cdot 10^{-2}$	3,83	4,38
5,1	3	0,8060	4,79	0,1540	0,952	0,819	0,775	0,10492	$0,2750 \cdot 10^{-2}$	3,99	4,56
							$\sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^R$	1,0000	$3,7737 \cdot 10^{-2}$		

Tabelle 1: Berechnung der fluidelastischen Instabilität in der 10. Rohrreihe fuer die 1. Eigenfrequenz

$$\dot{v}_{sk,1} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \frac{S_m}{\dot{v}_{sk}^2}}} = 5,148 \text{ m/s} \quad \text{maximale kritische Spaltgeschwindigkeit für } \psi = 1$$

$$\dot{V}_k = 2835,488 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{kritischer Eintritts-Volumenstrom für fluidelastische Instabilität}$$

$$K = \frac{\dot{V}_{\text{Betrieb}}}{\dot{V}_k} = 1,143 \quad \text{Gefährdungsgrad für fluidelastische Instabilität}$$

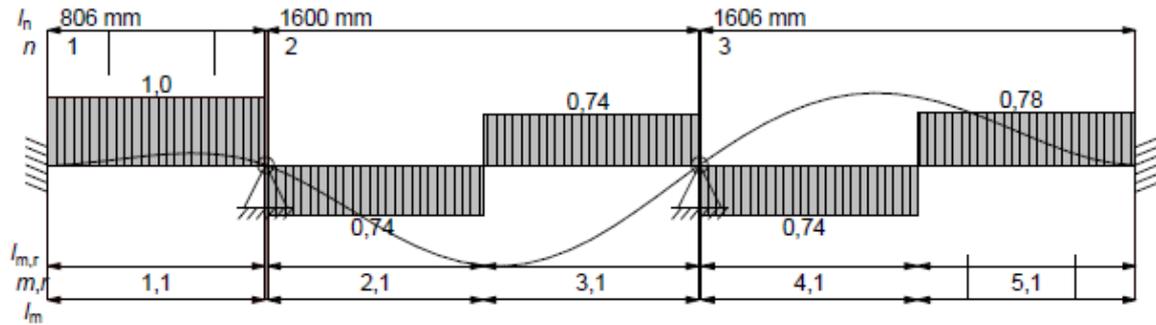


Bild 2: Abschnittsweise Geschwindigkeitsverteilung und Schwingmode der 1. Eigenfrequenz für die Rohrreihe 10

Bewertung:

Es wurden **alle Rohrreihen** untersucht. Hierbei wurden die ersten 6 Eigenfrequenzen berücksichtigt. Die **10. Rohrreihe** ist durch Schwingungen in der 1. Eigenfrequenz aufgrund **fluidelastischer Instabilität** am höchsten beansprucht. Die Rohre in der **10. Rohrreihe** versagen aufgrund **fluidelastischer Instabilität**. Der angegebene Betriebsvolumenstrom ist zu hoch! Maßnahmen zur Reduzierung des Gefährdungspotentials, das in der 8. Spalte in Tabelle 1 dokumentiert ist, sind im VDI-Wärmeatlas beschrieben.

Hinweise:

1. Beim Anfahren oder bei wechselnden Betriebszuständen kann der kritische Volumenstrom aufgrund höherer Druckspannungen auf die Rohre (Reduzierung der Eigenfrequenz) kleiner sein als der berechnete. Die Temperaturdifferenz zwischen der mittlerer Wandtemperatur der Rohre und dem Mantel $\vartheta_R - \vartheta_M$ sollte für den angegebenen Betriebsvolumenstrom und die Betriebsdrücke kleiner als der kritische Wert (für $K = 1$) $\Delta \vartheta_k = 1 \text{ K}$ sein! Für diese Temperaturdifferenz würde sich eine Druckkraft auf die Rohre von $F_R = -813 \text{ N}$ ergeben.
2. Rohrreihen und Eigenfrequenzen für die nächstgefährdeten Rohre aufgrund fluidelastischer Instabilität sind
Rohrreihe 22 mit $K = 1,14$ in der 1. Eigenfrequenz
Rohrreihe 31 mit $K = 1,12$ in der 5. Eigenfrequenz.

Stochastische und periodische Anregung

untersuchte Rohrreihe $N_{RR} = 1$:

Anzahl der Stuetzabschnitte $N = 3$

korrigierte Eigenfrequenz $f_1(F_R) = 29,09$ 1/s

korrigierte Eigenfrequenz $f_2(F_R) = 43,4$ 1/s

korrigierte Eigenfrequenz $f_3(F_R) = 94,26$ 1/s

korrigierte Eigenfrequenz $f_4(F_R) = 119,82$ 1/s

korrigierte Eigenfrequenz $f_5(F_R) = 154,98$ 1/s

korrigierte Eigenfrequenz $f_6(F_R) = 211,46$ 1/s

kritische Resonanzgeschwindigkeiten in ms^{-1} $u_{sw,1}$ $u_{sw,2}$ $u_{sw,3}$ $u_{sw,4}$ $u_{sw,5}$ $u_{sw,6}$
 Strouhal-Zahl $Sr_{c,w,1} = 0,475$ 1,53 2,28 4,96 6,31 8,16 11,13
 Strouhal-Zahl $Sr_{c,w,2} = 0,68$ 1,07 1,6 3,47 4,41 5,7
 maximale Resonanzgeschwindigkeit $u_{sw,max} = 1,26 \cdot u_{sb,max} = 42,73 \text{ ms}^{-1}$

Bewertung:

Es wurden alle Rohrreihen untersucht. Hierbei wurden die ersten 6 Eigenfrequenzen berücksichtigt. Die 1. Rohrreihe ist durch Schwingungen aufgrund von periodischen und stochastischen Anregungen am höchsten beansprucht. Eine Gefährdung durch Turbulenz- oder Wirbelerregung ist bei dem vorgegebenen Betriebsvolumenstrom für die 1. Rohrreihe nicht zu erwarten.

Hinweise:

- Bei hoher Turbulenz in der Anströmung kann die Amplitude $\hat{A}_{t,RMS}$ im Eintrittsbereich um bis zu 2,5 höher sein als berechnet.
- Die theoretischen Maximalwerte der Turbulenzamplitude betragen für die Korrelationsfaktoren $J_i = J_j$: $\hat{A}_{t,RMS}/d_a = 0,26\%$, $J_i = 1$: $\hat{A}_{t,RMS}/d_a = 0,37\%$.
- Die nächstgefährdeten Rohrreihen durch stochastische und periodische Anregungen sind
 Rohrreihe 2 mit $\hat{A}_w/d_a = 0,00\%$ und $\hat{A}_{t,RMS}/d_a = 0,13\%$
 Rohrreihe 31 mit $\hat{A}_w/d_a = 0,00\%$ und $\hat{A}_{t,RMS}/d_a = 0,12\%$
- Der Betriebsvolumenstrom ist größer als der kritische Volumenstrom. Es sollte eine Nachrechnung mit $2410,16 \text{ m}^3/\text{h}^{-1}$ (85 % des kritischen Volumenstroms) erfolgen.

Spalte		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Abschnitt		$l_{m,r}$	A_{qs}	$\psi_{m,r}$	u_{sb}	$\Delta S_1 \frac{A_w^2}{d_a^2}$	$\Delta S_2 \frac{A_w^2}{d_a^2}$	$\Delta S_3 \frac{A_w^2}{d_a^2}$	$\Delta S_4 \frac{A_w^2}{d_a^2}$	$\Delta S_5 \frac{A_w^2}{d_a^2}$	$\Delta S_6 \frac{A_w^2}{d_a^2}$
m,r	n	m	m^2		ms^{-1}						
1,1	1	0,2239	$1,667 \cdot 10^{-2}$	0	0	$0,5483 \cdot 10^{-15}$	$0,1909 \cdot 10^{-14}$	$0,2964 \cdot 10^{-11}$	$0,7119 \cdot 10^{-11}$	$1,8451 \cdot 10^{-10}$	$3,4334 \cdot 10^{-11}$
1,2	1	0,0784	$0,558 \cdot 10^{-2}$	0,880	29,84	0	0	0	0	0	0
1,3	1	0,2353	$1,673 \cdot 10^{-2}$	1,000	33,91	0	0	0	0	0	0
1,4	1	0,0784	$0,558 \cdot 10^{-2}$	0,880	29,84	0	0	0	0	0	0
1,5	1	0,1849	$1,377 \cdot 10^{-2}$	0	0	$5,3887 \cdot 10^{-15}$	$1,7458 \cdot 10^{-14}$	$1,6313 \cdot 10^{-11}$	$2,5524 \cdot 10^{-11}$	$2,7949 \cdot 10^{-10}$	$0,3255 \cdot 10^{-11}$
2,1	2	0,7950	$5,389 \cdot 10^{-2}$	0,016	0,56	0	0	0	0	0	0
3,1	2	0,7950	$5,389 \cdot 10^{-2}$	0,016	0,56	0	0	0	0	0	0
4,1	3	0,7950	$5,389 \cdot 10^{-2}$	0,016	0,56	0	0	0	0	0	0
5,1	3	0,8080	$5,463 \cdot 10^{-2}$	0,017	0,58	0	0	0	0	0	0

Tabelle 2: Geschwindigkeitsverteilung und gewichtete Wirbelanregungen in den Teilabschnitten der 1. Rohrreihe für $\dot{V}_B = 3240 \text{ m}^3/\text{h}$ und Mode 1-6.

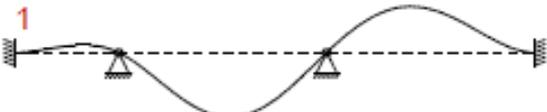
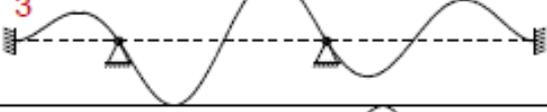
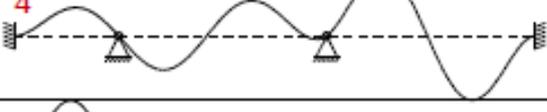
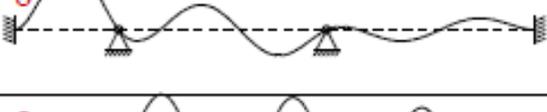
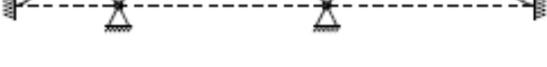
Schwingmode	f_i [Hz]	$\hat{A}_{w,i}/d_a$ [%]	$\hat{A}_{t,RMS,i}/d_a$ [%]
	29,1	0,0	0,1062
	43,4	0,0	0,0549
	94,3	0,0004	0,0584
	119,8	0,0006	0,0412
	155,0	0,0022	0,0858
	211,5	0,0006	0,0177
	Aus $A_t(z) = \sum_{i=1}^6 [\hat{A}_{t,i} \cdot \phi_i(z)]$: $\hat{A}_{t,RMS}/d_a = 0,219\%$		

Tabelle 3: Schwingformen und bezogene Amplituden für Wirbel- und Turbulenz-Anregung in der 1. Rohrreihe für $\dot{V}_B = 3240 \text{ m}^3/\text{h}$.