

Bachelor-Thesis  
im  
Studiengang  
Energie- und Umwelttechnik (EUT)

**Bauraumoptimierte Auslegung von Radialventilatoren  
basierend auf  
Ansätzen nach Bommes in MATLAB**

Judith Thönnissen  
Matrikelnummer 800158

Düsseldorf  
Mai 2022

**Erster Prüfer**

Dr.-Ing. Till Biedermann  
Strömungstechnik und Akustik  
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
Münsterstr. 156  
40476 Düsseldorf  
[till.biedermann@hs-duesseldorf.de](mailto:till.biedermann@hs-duesseldorf.de)

**Zweiter Prüfer**

Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier  
Strömungstechnik und Akustik  
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
Münsterstr. 156  
40476 Düsseldorf  
[frank.kameier@hs-duesseldorf.de](mailto:frank.kameier@hs-duesseldorf.de)



Thema einer Bachelor-Thesis

für

Frau Judith Thönnissen  
Matrikel-Nr. 800158

**Bauraumoptimierte Auslegung von Radialventilatoren basierend auf  
Ansätzen nach Bommes in MATLAB**

Leonhard Bommes hat bereits in den 80er und 90er Jahren des letzten Jahrtausends eine Methodik zur Dimensionierung von leisen und effizienten Industrieventilatoren entwickelt. Um diese in eine zeitgemäße 3-D Umgebung zu übertragen existiert ein unter Microsoft Excel programmiertes Verfahren und eine parametrisierte Konstruktion (Autodesk Inventor) aus einem in 2011 abgeschlossenen BMBF FHprof-Unt-Forschungsprojekt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, aufbauend auf dem vorhandenen Excel-Tool eine Matlab-Routine zu entwickeln, welche selbige Funktionen ermöglicht, darüberhinausgehend jedoch weitere, zuvor identifizierte, Fehler und Unstimmigkeiten abfängt sowie eine verbesserte Visualisierung und Handhabbarkeit der Auslegung bietet. Auch die für eine Bauraumoptimierung notwendigen umfangreichen iterativen Berechnungen und Optimierungsfunktionen sind auf eine stabilere Basis zu stellen, sodass ein verbessertes Endprodukt entwickelt wird.

In einem weiteren Schritt soll die numerische Berechnung der automatisiert dimensionierten Strömungsmaschinen erfolgen. Hier werden basierend auf dem Cordier-Diagramm und dem für Radialventilatoren prädestinierten Bommes-Bereich, zwei exemplarische Varianten ausgelegt und numerisch mittels OpenFOAM berechnet (Strömungstopologie/ aerodynamisches Kennfeld). Ziel ist es, das grundsätzliche Vorgehen zu erproben, um eine Einschätzung zu geben, welche Wege hinsichtlich einer vollständigen numerischen Abbildung des Ventilators erfolgversprechend sind.

Dr.-Ing. Till Biedermann



**Zeitplan:**

- Literaturstudie zu leisen effizienten Radialventilatoren 1 Wochen
- Einarbeitung in die Werkzeuge unter Excel und Inventor 1 Wochen
- Übertragung der Berechnungsphilosophie in MATLAB 4 Wochen
- Entwurf typischer Maschinen im Bommies-Bereich 1 Woche
- Analyse Prognosegüte und Reproduzierbarkeit der Auslegung 1 Woche
- numerische Berechnung zweier Strömungsmaschinen 2 Wochen
- Dokumentation 2 Wochen

# Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Strömungstechnische Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1 Ventilatorbetriebswerte .....	5
2.2 Kennlinien .....	6
2.3 Ähnlichkeitstheorie .....	6
2.4 Schallquellen von Strömungsmaschinen .....	8
<b>3 Geometrie des untersuchten Radialventilators</b> .....	<b>10</b>
<b>4 Vorgänger: Bommers-Tool in Excel</b> .....	<b>13</b>
<b>5 Bommers-Tool in Matlab</b> .....	<b>17</b>
5.1 Bestimmung der polynomischen Druckzahl .....	20
5.2 Berechnung Laufrad und Einlaufdüse.....	22
5.3 Bestimmung der Schaufeleigenschaften.....	25
5.4 Gehäuse.....	26
5.5 Anpassung der Vier-Radien- Spirale an die logarithmischen Spirale .....	29
5.6 Breitenoptimierung der logarithmischen Spirale.....	31
<b>6 Prognosegüte und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse</b> .....	<b>33</b>
6.1 Prognosegüte der dimensionslosen Kennzahlen .....	33
6.2 Prognosegüte bei der Spiralanpassung .....	35
6.3 Prognosegüte bei der Breitenoptimierung.....	39
6.4 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus Matlab untereinander .....	48
<b>7 Numerische Berechnung von Strömungsmaschinen</b> .....	<b>51</b>
7.1 Durchführung der numerischen Berechnung mittels OpenFoam.....	51
7.2 Bewertung der Konvergenz .....	55
7.3 Auswertung der Simulationsergebnisse.....	58
7.3.1 Kennlinien.....	58
7.3.2 Strömungsverhältnisse im Laufrad und im Gehäuse .....	64
<b>8 Zusammenfassung</b> .....	<b>69</b>
<b>9 Fazit und Ausblick</b> .....	<b>71</b>

---

<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>72</b>
	<b>Anhang A: Bedienungsanleitung für das Bommes-Tool in Matlab.....</b>	<b>74</b>
	<b>Anhang B: Matlab-Codes.....</b>	<b>76</b>
	Matlab-Code des Hauptprogramms ohne Eingabefenster .....	76
	Matlab-Code des Hauptprogramms mit Eingabefenster .....	80
	Unterprogramm zur Berechnung .....	85
	Unterprogramm zur grafischen Darstellung .....	91
	<b>Anhang C: Tabellen.....</b>	<b>96</b>
	Prognosegüte Spiralanpassung.....	96
	Prognosegüte Breitenoptimierung .....	99
	Reproduzierbarkeit der Ergebnisse .....	105
	<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>116</b>

# Symbolverzeichnis

## Lateinische Symbole

$A_{aus}$	$m^2$	Austrittsfläche des Impellers
$A_{ein}$	$m^2$	Eintrittsfläche des Impellers
$A_{inlet}$	$m^2$	Fläche des Eintritts in das Gehäuse
$A_{outlet}$	$m^2$	Fläche des Austritts aus dem Gehäuse
$a$	$m/s$	Schallgeschwindigkeit
$B$	$m$	Gehäusebreite
$B_{4-Radi}$	$m$	Spiralbreite nach der Vier-Radien-Methode
$B_{festgelegt}$	$m$	Vom Benutzer festgelegte Spiralbreite
$B_{log}$	$m$	Spiralbreite nach der logarithmischen Methode
$b_1$	$m$	Schaufeleintrittsbreite
$b_2$	$m$	Schaufelaustrittsbreite
$C$	$m$	Höhe des Ausstromkanals
$c$	$m/s$	Strömungsgeschwindigkeit
$c_{im}$	$m/s$	Meridionale Strömungsgeschwindigkeit am Punkt $i$
$D_1$	$m$	Laufgradinnendurchmesser
$D_2$	$m$	Laufgradaußendurchmesser
$D_A$	$m$	Saugstutzendurchmesser
$F_B$	-	Faktor für die Gehäusebreite
$F_{DA}$	-	Faktor für den Saugstutzen
$i$	-	Zählvariabel für Vier-Radien-Methode
$k$	-	Beiwert nach Mode
$K_{LB}$	-	Faktor für die Laufgradbreite
$\dot{m}$	$kg/s$	Massenstrom
$n$	$s^{-1}$	Drehzahl
$P_n$	$W$	Nutzleistung
$P_W$	$W$	Antriebsleistung

---

$\Delta p$	Pa	Druckänderung
$\Delta p_d$	Pa	Dynamische Druckänderung
$\Delta p_{st}$	Pa	Statische Druckänderung
$\Delta p_t$	Pa	Totaldruckänderung
$R_1$	m	Spiralradius des 1. Quadranten
$R_2$	m	Spiralradius des 2. Quadranten
$R_3$	m	Spiralradius des 3. Quadranten
$R_4$	m	Spiralradius des 4. Quadranten
$R_{Sch}$	m	Schaufelkrümmungsradius
$r'$	m	Radien an den Polwinkeln der Gehäusespirale
$r_1$	m	Schaufelinnenradius
$r_2$	m	Schaufelaußenradius
$r_D$	m	Krümmungsradius Deckscheibenwinkel
$r_E$	m	Krümmungsradius Einlaufdüse
$r_{Zunge}$	m	Zungenradius
$s_1$	-	Schaufeldicke
$s_l$	m	Spaltlänge
$s_W$	m	Spaltweite
$u_2$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom
$x$	m	X-Koordinate des Mittelpunktes des jeweiligen Quadranten
$X_{log}$	m	Logarithmische X-Koordinaten für das Spiralgehäuse
$Y_{log}$	m	Logarithmische Y-Koordinaten für das Spiralgehäuse
$Y_t$	-	Förderarbeit
$z$	-	Anzahl der Schaufeln

## Griechische Symbole

$\alpha_{Steig}$	°	Steigungswinkel Deckscheibe
$\beta_1$	°	Schaufeleintrittswinkel
$\beta_2$	°	Schaufelaustrittswinkel
$\gamma$	°	Deckscheibenwinkel
$\delta$	-	Durchmesserzahl
$\delta_p$	-	Polynomische Durchmesserzahl
$\eta$	-	Wirkungsgrad
$\eta_{ip}$	-	Polynomischer innerer Wirkungsgrad
$\vartheta$	°	Polwinkel
$\kappa_4 / \kappa_1$	-	Koeffizient zur Anpassung der Vier-Radien an die log. Spirale
$\kappa_{cm}$	-	Meridionale Verzögerungszahl
$\kappa_{cm_p}$	-	Polynomische meridionale Verzögerungszahl
$\lambda$	-	Lieferzahl
$\xi_1$	°	Verengungsfaktor am Laufradeintritt
$\xi_2$	°	Verengungsfaktor am Laufradaustritt
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Mittlere Dichte
$\sigma$	-	Schnelllaufzahl
$\varphi$	-	Lieferzahl
$\varphi_p$	-	Polynomische Lieferzahl
$\Psi$	-	Druckzahl
$\Psi_p$	-	Polynomische Druckzahl
$\omega$	s <sup>-1</sup>	Winkelgeschwindigkeit
$\omega_{pi}$	°	Kreiswinkel

# 1 Einleitung

Industrielle Ventilatoren sollen vor allem leise und effizient sein. Dafür hat Leonhard Bommers eine Berechnungsmethodik entwickelt, mit der ein idealer Ventilator ausgelegt werden kann. Er war unter anderem Professor für Strömungsmaschinen und Strömungsmechanik an der Fachhochschule Düsseldorf und prägt die Auslegung für Radiallaufräder in aerodynamischer und akustischer Hinsicht bis heute.

Radialventilatoren werden beispielsweise in Staubsaugern, Küchenabzugshauben oder auch zur Belüftung von Tunneln angewendet. Die Einsatzgebiete sind sehr vielfältig, wobei die Aufgaben der Ventilatoren grundsätzlich der Aufbau von Druck oder das Erreichen eines benötigten Volumenstrom sind. Besonders die großen Ventilatoren sind meist durchgehend im Betrieb, weshalb die Effizienz der Ventilatoren von großer Bedeutung ist. Der Energieverbrauch für elektrisch angetriebene Ventilatoren in der EU wurde von dem *Umweltbundesamt* (Umweltbundesamt 2012) für 2020 mit 560 TWh berechnet. Nach den Zahlen des statistischen Amt der Europäischen Union *Eurostat* (*Eurostat 2022*) macht dies einen Anteil von 19 % am Gesamtstromverbrauch der EU aus (Kommission 30.03.2011). Mit einer hohen Energieeffizienz der Ventilatoren könnte viel Strom und somit auch CO<sub>2</sub> eingespart werden.

Auf den Berechnungsmethoden von Bommers wurde an der Fachhochschule Düsseldorf bis zum Jahre 2011 ein Tool entwickelt, welches mithilfe des Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel funktioniert. Dieses BMBF FHprofUnt-Forschungsprojekt wurde von Igor Horvat und Professor Dr.-Ing. Frank Kameier durchgeführt. Mithilfe weniger Eingaben wie dem Volumenstrom mit der gewünschten Druckdifferenz, der Drehzahl und der Dichte lassen sich die dimensionslosen Kennzahlen und die genauen Maße der Geometrie des Laufrades und des Gehäuses bestimmen. Des Weiteren wird für das Gehäuse eine logarithmische Spirale berechnet, die den Verlauf einer reibungsfreien Strömung darstellt. Da diese jedoch schwer zu konstruieren ist, kann eine Vier-Radien-Spirale an diese angepasst werden. Die Geometriemaße können bei diesem Tool zusätzlich noch auf eine bestimmte Gehäusebreite optimiert werden, da die logarithmische Spirale meist zu groß ist und nicht realisiert werden kann. Nachdem die Geometriemaße und Kennzahlen des Ventilators berechnet wurden, kann das Modell mittels Computer-Aided Design (CAD) in der Software Autodesk Inventor als dreidimensionales Modell aufgerufen und bearbeitet werden.

Über die Jahre haben sich die Software-Programme und somit die Möglichkeiten zur Programmierung und Darstellung rasant weiterentwickelt. Somit wurde in Folge dieser Arbeit das Tool aus dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel in das Programm Matlab des

Unternehmens MathWorks konvertiert. Dieses Programm wird zur Lösung von mathematischen Problemen benutzt. Neben den grundlegenden Berechnungen für den optimierten Ventilator wurde die Visualisierung verbessert, sodass der Nutzer direkt einen guten Überblick über das Aussehen des berechneten Ventilators erhält. Des Weiteren weist das Tool in Excel Schwachstellen und nicht definierte Bereiche auf, wobei beispielsweise das Laufrad aus dem unteren Teil des Gehäuses herausragt, was bei dem hier erarbeiteten Matlab-Tool behoben wird. Außerdem kann die Datei manchmal nicht mehr richtig geöffnet und somit nicht mehr verwendet werden, da das Programm in einer ältere Excel-Version erstellt wurde. Zusätzlich weist auch das bisher existente Konzept der Breitenoptimierung Verbesserungspotential auf. Zusätzliche wichtige Faktoren wie die Einhaltung der meridionalen Verzögerungszahl oder des Verhältnisses zwischen der Ein- und Austrittsfläche des Laufrades wurden bislang nicht berücksichtigt, sollen dem Nutzer nun aber die gewünschte Schwerpunktsetzung bei der Optimierung in dem neuen Tool in Matlab ermöglichen.

Um die Prognosegüte der Matlab-Anwendung mit der Excel-Anwendung vergleichen zu können, wurden die Ausgaben beider Programme an sechs verschiedenen Fällen validiert. Dabei wurde sowohl die Breitenoptimierung als auch allein die Spiralanpassung betrachtet. Obwohl die Optimierungen mit dem Iterationsverfahren nach Newton mithilfe eines anderen Werkzeuges in den unterschiedlichen Programmen berechnet wurde, sollen die Ergebnisse generalisierbar sein, also keine großen relativen Abweichungen aufweisen. Des Weiteren ist eine Analyse der Reproduzierbarkeit notwendig, da sich bei einer iterativen Berechnung das Ergebnis an die Lösung nur annähert und eine solche Berechnung folglich auch immer vom Startpunkt abhängig sein kann. Ziel ist, dass diese Lösungen, bei identischen Eingabewerten, nur geringe Abweichungen voneinander aufweisen.

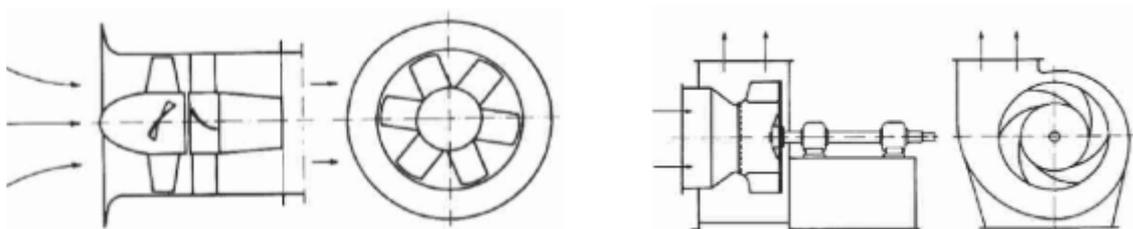
Zum Schluss werden noch drei Fälle numerisch im Rahmen einer CFD-Analyse berechnet und in Hinsicht auf die Erwartungswerte geprüft. Damit kann die Richtigkeit der Berechnungen des Matlab-Tools und der Auslegungspunkt geprüft werden. Zur numerischen Simulation wurde das Simulationssoftwarepaket OpenFoam verwendet, welches frei erhältlich (open source) ist. Die graphischen Strömungsergebnisse lassen sich mithilfe des Visualisierungsprogramm ParaView darstellen, welches ebenfalls eine Open-Source-Anwendung ist.

## 2 Strömungstechnische Grundlagen

Ventilatoren sind Arbeitsmaschinen, was bedeutet, dass sie dem Fluid Energie hinzufügen. Mithilfe eines Motors wird ein Drehmoment auf das Laufrad gegeben, das dann einen Totaldruck auf das Arbeitsmedium erzeugt. Bei einer Totaldruckerhöhung von  $\frac{p_2}{p_1} < 1,3$  ist die Strömungsmaschine ein Ventilator oder Gebläse, ansonsten handelt es sich um ein Verdichter (Neifach und Czeckay 2018/19). Ventilatoren sind hydraulische Strömungsmaschinen, die bei einer inkompressiblen Strömung betrieben werden. Die Machzahl  $Ma$  ist dabei kleiner als 0,3. Sie ist das Verhältnis aus der Strömungsgeschwindigkeit  $c$  und der Schallgeschwindigkeit  $a$ , die 343,2 m/s beträgt. (Schade et al. 2013; Biedermann 2021b)

$$Ma = \frac{c}{a} \quad 2-1$$

Es wird zwischen axialen, halbaxialen und radialen Ventilatoren unterschieden. Bei Radialventilatoren erfolgt der Eintritt in axialer und der Austritt in radialer Richtung. Dieser wird mit einem mittleren bis hohen Druck bei einem niedrigen bis mittleren Volumenstrom im Vergleich zu einem Axialventilator betrieben. Dahingegen ist bei einem Axialventilator sowohl der Eintritt als auch der Austritt axial. Er wird benutzt, wenn ein niedriger Druck und ein hoher Volumenstrom benötigt werden. Das halbaxiale Laufrad ist für mittlere Volumenströme und Druckerhöhungen prädestiniert. Der Axial- und der Radialventilator sind in Abbildung 2-1 dargestellt. (Neifach und Czeckay 2018/19; Horvat und Kameier 2009; Biedermann 2021b)



**Abbildung 2-1: Bauform eines axialen Ventilators (links) und eines radialen Ventilators (rechts) (Biedermann 2021c)**

Die Konstruktion üblicher Schaufeln von Radiallaufrädern ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Die Schaufeln können rückwärts gekrümmt (1), radial endend (2) oder vorwärts gekrümmt (3) sein. Des Weiteren können Schaufeln eine logarithmische Kontur haben (4) oder aus einer ebenen Platte bestehen, die entweder radial stehend (5) oder rückwärts geneigt (6) sein kann. Maschinen mit Schaufeln, die kreisbogenförmig und rückwärts gekrümmt sind, erzielen einen hohen Wirkungsgrad mit einem guten akustischen Verhalten. Radial endende Schaufeln haben dagegen einen niedrigeren Wirkungsgrad, erreichen dafür aber höhere Druckzahlen und haben eine relativ steile Druckkennlinie. Die höchsten

Druckzahlen werden mit den vorwärts gekrümmten Schaufeln erreicht, jedoch haben diese Laufräder nur niedrige Wirkungsgrade und eine hohe Schallabstrahlung (bspw. Schaufelrad). Das Ziel der Schaufelform ist die verlustfreie Umlenkung des Fluids. (Carolus 2020; Biedermann 2021a)

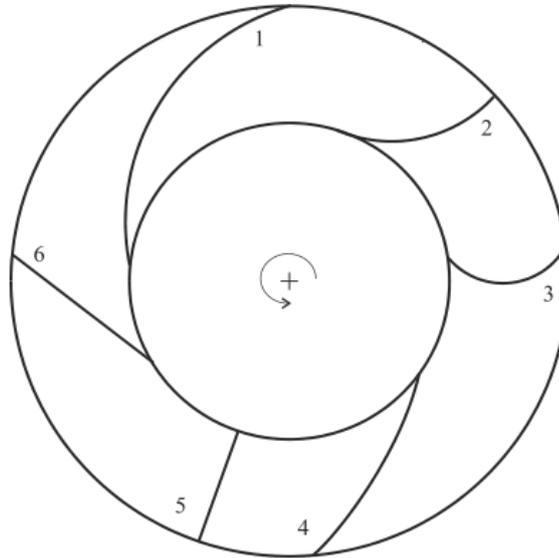


Abbildung 2-2: Schaufelformen beim Radialrad (Carolus 2020)

In der Matlab-Anwendung werden nur Radialventilatoren betrachtet. Dabei handelt es sich um Industrieradialventilatoren, die mit rückwärts gekrümmten, nichtlogarithmischen Schaufeln ausgestattet sind. Die Geschwindigkeit an den Schaufeln kann mithilfe des Geschwindigkeitsdreieckes berechnet werden, was in Abbildung 2-3 zu sehen ist. Dabei sind die meridionalen Geschwindigkeiten  $c_{im}$  von dem Volumenstrom abhängig.

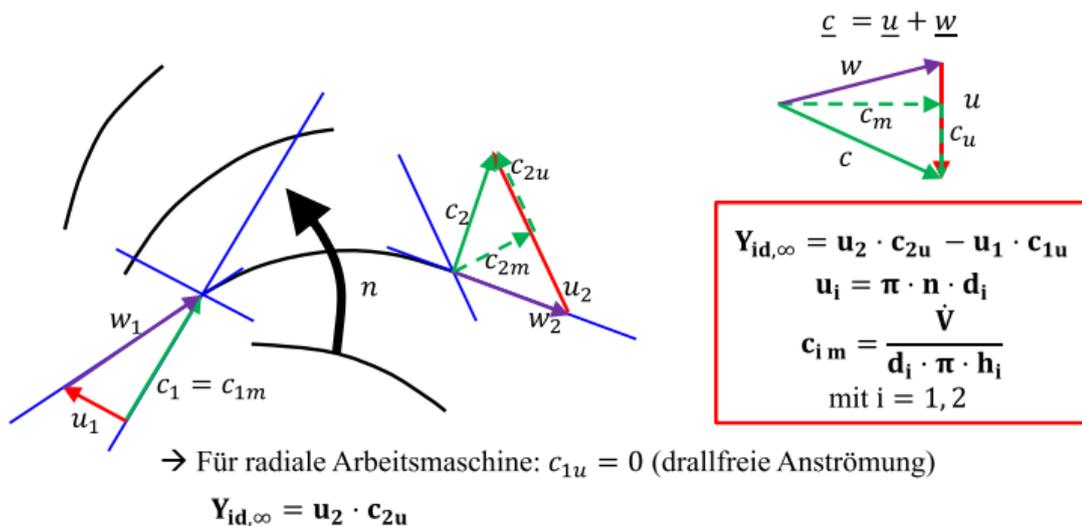


Abbildung 2-3: Berechnungen der Geschwindigkeiten am Ein- und Austritt der Schaufeln (Biedermann 2021b)

## 2.1 Ventilatorbetriebswerte

Bei Ventilatoren gehören zu den wichtigsten aerodynamischen Betriebswerten der Volumen- oder Förderstrom  $\dot{V}$  [m<sup>3</sup>/s] und die Totaldruckerhöhung  $\Delta p_t$  [Pa]. Mit der Dichte  $\rho$  kann der Massenstrom  $\dot{m}$  und die spezifische Förderarbeit  $Y_t$  berechnet werden. (Carolus 2020)

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad [\text{kg/s}] \quad 2-2$$

$$Y_t = \frac{\Delta p_t}{\rho} \quad [\text{J/kg}] \quad 2-3$$

Durch die Differenz der Totaldrücke von dem Eintrittsstutzen  $p_{t,E}$  und Austrittsstutzen  $p_{t,A}$  des Ventilators ergibt sich die Totaldruckerhöhung. Diese lässt sich auch über die Summe des statischen Druckes  $p_s$  und des dynamischen Druckes  $p_d$  berechnen. (Carolus 2020)

$$\Delta p_t = p_{t,A} - p_{t,E} = \Delta p_s + \Delta p_d = (p_{st,A} - p_{st,E}) + (p_{d,A} - p_{d,E}) \quad [\text{Pa}] \quad 2-4$$

Der dynamische Druck  $\Delta p_d$  kann mithilfe der Fluidgeschwindigkeit  $c$  berechnet werden und ergibt sich durch die kinetische Energie der strömenden Fluidelemente. (Carolus 2020; Schade et al. 2013)

$$\Delta p_d = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \quad [\text{Pa}] \quad 2-5$$

Durch das Wellendrehmoment  $M_W$  und die Drehzahl  $n$  ergibt sich die Antriebsleistung  $P_W$ . (Carolus 2020)

$$P_W = M_W \cdot 2\pi \cdot n = M_W \cdot \omega \quad [\text{W}] \quad 2-6$$

Die Nutzleistung dahingegen wird mit der Förderarbeit und dem Massenstrom berechnet (Bommers et al. 2002):

$$P_n = \dot{m} \cdot Y_t = \dot{m} \cdot \frac{\Delta p_t}{\rho} = \dot{V} \cdot \Delta p_t \quad [-] \quad 2-7$$

Das Verhältnis der Nutzleistung zu der Antriebsleistung eines Ventilators ergibt den Gesamtwirkungsgrad (Carolus 2020):

$$\eta = \frac{P_n}{P_W} = \frac{\dot{m} \cdot Y}{P_W} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p_t}{P_W} \quad [-] \quad 2-8$$

## 2.2 Kennlinien

Eine Kennlinie beschreibt das Betriebsverhalten eines Ventilators als Funktion des Förderstroms. Sie wird mit der Drosselung von unterschiedlichen Förderströmen erreicht. Aus dem Schnittpunkt der Anlagenkennlinie mit der Drosselkennlinie des Ventilators ergibt sich der Betriebspunkt. Im idealen Fall liegt der Betriebspunkt auf dem Optimalpunkt. Der Optimalpunkt ist dort, wo die Wirkungsgradkennlinie ihr Maximum hat und wo somit der Ventilator am effizientesten arbeitet (vgl. Abbildung 2-4). Kleiner Volumenströme charakterisieren den Teillastbereich, wohingegen höhere Volumenströme den Überlastbereich abbilden. (Bommes et al. 2002; Carolus 2020)

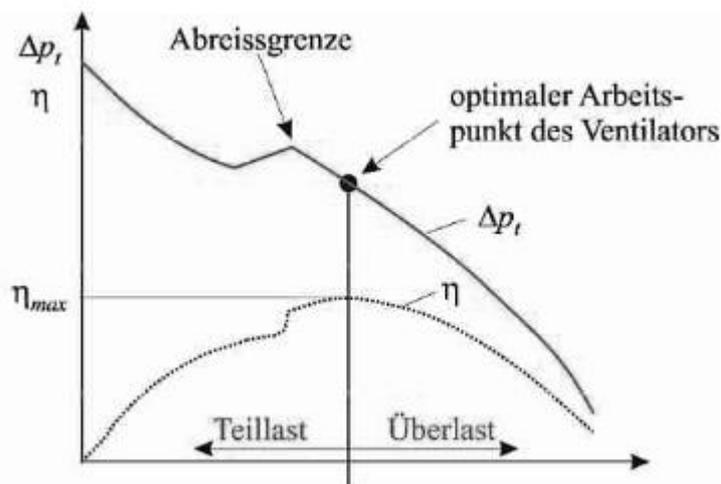


Abbildung 2-4: Darstellung der Ventilator- und der Wirkungsgradkennlinie mit Optimalpunkt (Carolus 2020)

## 2.3 Ähnlichkeitstheorie

Die dimensionslosen Kennzahlen werden bei der Dimensionsanalyse benutzt, um die Anzahl von Variablen eines Problems zu reduzieren. Statt in problemunabhängige Einheiten wird eine Größe in problembezogenen Einheiten gemessen, indem diese dimensionslos gemacht wird. Mit dimensionslosen Kennzahlen können Strömungsmaschinen unterschiedlicher Laufraddurchmesser miteinander verglichen und das Verhalten von Strömungsmaschinen dargestellt werden. (Schade et al. 2013)

Die Lieferzahl  $\phi$  ist der dimensionslose Volumenstrom, der sich aus dem geförderten Volumenstrom  $\dot{V}$  und dem Volumenstrom auf der Kreisfläche des Laufrades zusammensetzt und wird wie folgt berechnet (Schade et al. 2013; Bommes et al. 2002):

$$\varphi = \frac{\dot{V}}{A \cdot u_2} = \frac{\dot{V} \cdot 4}{\pi \cdot D^2 \cdot u_2} = \frac{\dot{V} \cdot 4}{\pi^2 \cdot D^3 \cdot n} \quad [-] \quad 2-9$$

Die Druckzahl  $\psi$  ist die dimensionslose Druckerhöhung und somit das Verhältnis der spezifischen Förderarbeit und der spezifischen Energie des Ventilators am Umfang (Schade et al. 2013; Bommers et al. 2002):

$$\psi = \frac{\Delta p \cdot 2}{\rho \cdot u_2^2} = \frac{Y \cdot 2}{u_2^2} = \frac{Y \cdot 2}{\pi^2 \cdot n^2 \cdot D^2} \quad [-] \quad 2-10$$

Zu den dimensionslosen Kennzahlen gehört unter anderem auch die Schnelllaufzahl  $\sigma$ , die sich nach Cordier aus der Druckzahl und der Lieferzahl ableiten lässt. Dafür werden diese nach dem Durchmesser umgestellt und gleichgesetzt (Horvat und Kameier 2009):

$$\frac{Y^{\frac{1}{2}} \cdot 2^{\frac{1}{2}}}{\pi \cdot n \cdot \psi^{\frac{1}{2}}} = \frac{(\dot{V} \cdot 4)^{\frac{1}{3}}}{\pi^{\frac{2}{3}} \cdot \varphi^{\frac{1}{3}} \cdot n^{\frac{1}{3}}} \quad 2-11$$

Diese Gleichung wird dann nach dem Quotienten aus der Druckzahl und der Lieferzahl umgestellt, was die Schnelllaufzahl  $\sigma$  ergibt, die auch als spezifische Drehzahl bekannt ist. (Horvat und Kameier 2009; Bommers et al. 2002)

$$\sigma = \frac{\varphi^{1/2}}{\psi^{3/4}} = n \cdot \frac{(\dot{V} \cdot 4)^{1/2} \cdot \pi^{1/2}}{(Y \cdot 2)^{3/4}} = n \cdot \frac{\sqrt{\dot{V}}}{Y^{3/4}} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{\pi}}{2^{3/4}} \quad [-] \quad 2-12$$

Die Durchmesserzahl kann nach Cordier auch über die Druckzahl und die Lieferzahl berechnet werden. Dafür werden die Kennzahlen nach der Drehzahl umgestellt und Gleichgesetzt. Es ergibt sich (Horvat und Kameier 2009):

$$\frac{Y^{\frac{1}{2}} \cdot 2^{\frac{1}{2}}}{\pi \cdot D \cdot \psi^{\frac{1}{2}}} = \frac{\dot{V} \cdot 4}{\pi^2 \cdot \varphi \cdot D^3} \quad 2-13$$

Mit dem Quotienten aus Druck- und Lieferzahl ergibt sich die Durchmesserzahl  $\delta$  (Horvat und Kameier 2009; Bommers et al. 2002):

$$\delta = \frac{\psi^{\frac{1}{4}}}{\varphi^{\frac{1}{2}}} = D \cdot \frac{(Y \cdot 2)^{\frac{1}{4}} \cdot \pi^{\frac{1}{2}}}{(\dot{V})^{\frac{1}{2}} \cdot 2} = D \cdot \sqrt[4]{\frac{Y \cdot 2}{\dot{V}^2}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad [-] \quad 2-14$$

Im Cordier-Diagramm sind einstufige Ventilatoren im Optimalpunkt über die Schnelllaufzahl und die Durchmesserzahl doppellogarithmisch aufgetragen (vgl. Abbildung 2-5). Es wurde 1953 unter dem Namen *Kennfelder für Strömungsmaschinen* das erste Mal von Cordier (Cordier 1953) erstellt. Mit diesem Diagramm kann bei gegebenem Volumenstrom und spezifischer Stutzenarbeit der optimale Rotordurchmesser bei festgelegter

Drehzahl oder die optimale Drehzahl bei festem Rotordurchmesser bestimmt werden. (Horvat und Kameier 2009; Neifach und Czeckay 2018/19)

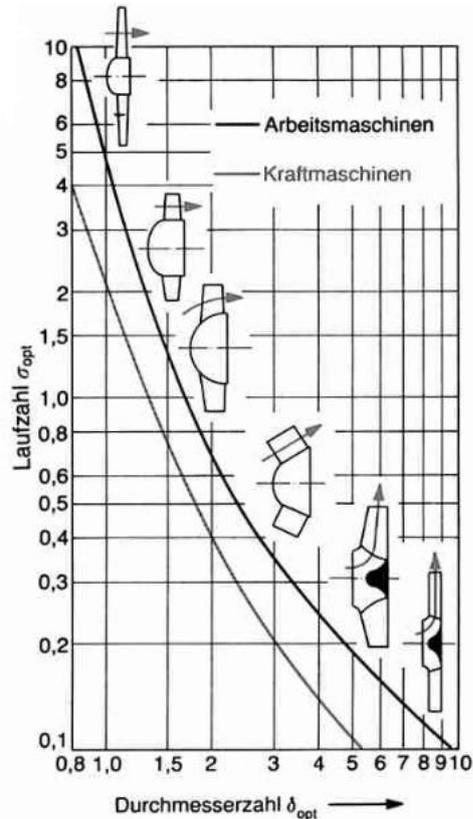


Abbildung 2-5: Cordier-Diagramm (Horvat und Kameier 2009)

## 2.4 Schallquellen von Strömungsmaschinen

Nach Neise entstehen Ventilatorgeräusche durch die Schaufeldicke, die Schaufelkräfte und die turbulente Scherspannungen, was in Abbildung 2-6 schematisch dargestellt ist. Dabei bildet das aerodynamische Geräusch, was durch turbulente Strömungsvorgänge im Ventilator hervorgerufen wird, den dominierenden Anteil. Die Hauptursache für den aerodynamischen Lärm sind bei Ventilatoren mit einer deutlich kleineren Laufrad-Umfangsgeschwindigkeit als der Schallgeschwindigkeit die instationären Kräfte. Diese werden von der Strömung auf das Laufrad und das Gehäuse ausgeübt. (Bommes et al. 2002)

Bei industriellen Ventilatoren ist sowohl ein hoher Wirkungsgrad als auch eine möglichst geringe Schallabstrahlung wichtig. Die meisten Geräusche entstehen, wenn die Gehäusezunge sehr nah am Laufrad platziert ist, jedoch ist diese Position aerodynamisch günstig. Da die rotierenden Schaufeln mit der feststehenden Gehäusezunge interagieren, sind die Lärmpegel bei den drehzahlbezogenen Frequenzen (Grunddrehfrequenz und ganzzahlige

Vielfache = Harmonische) und der Blattfolgefrequenz hoch. Die Blattfolgefrequenz entsteht durch die Interaktion der rotierenden Schaufeln mit der Gehäusezunge und ergibt sich durch die Drehzahl multipliziert mit der Schaufelzahl. Bei einem Laufrad mit deutlich mehr als zehn Schaufeln kommt es zu einer Minderung der Geräusche, da die Amplitude der Blattfolgefrequenz reduziert wird. (Horvat und Kameier 2009)

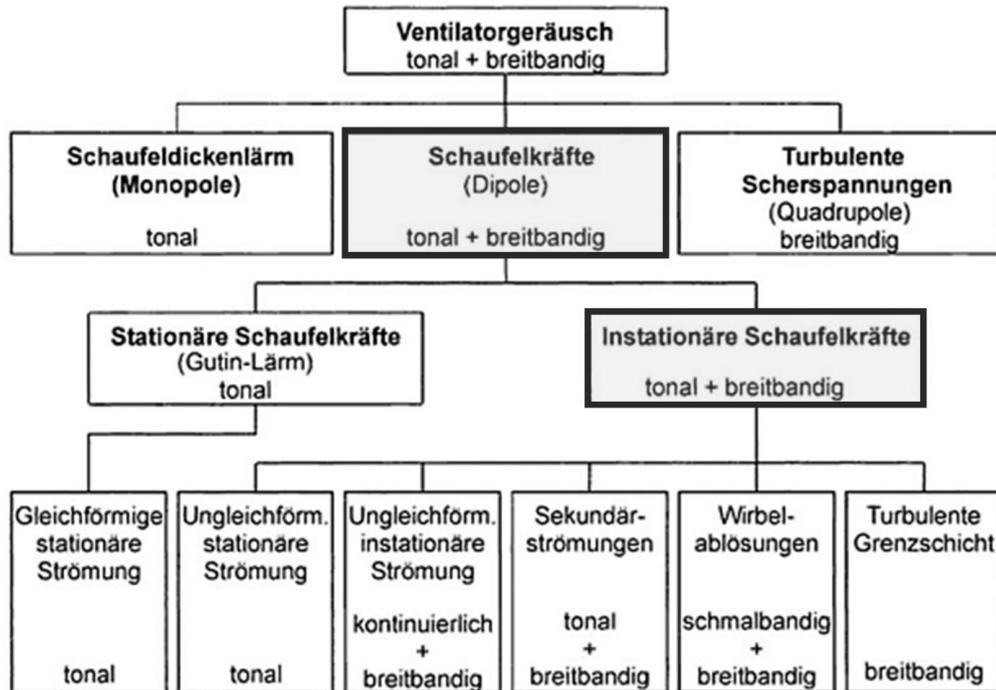
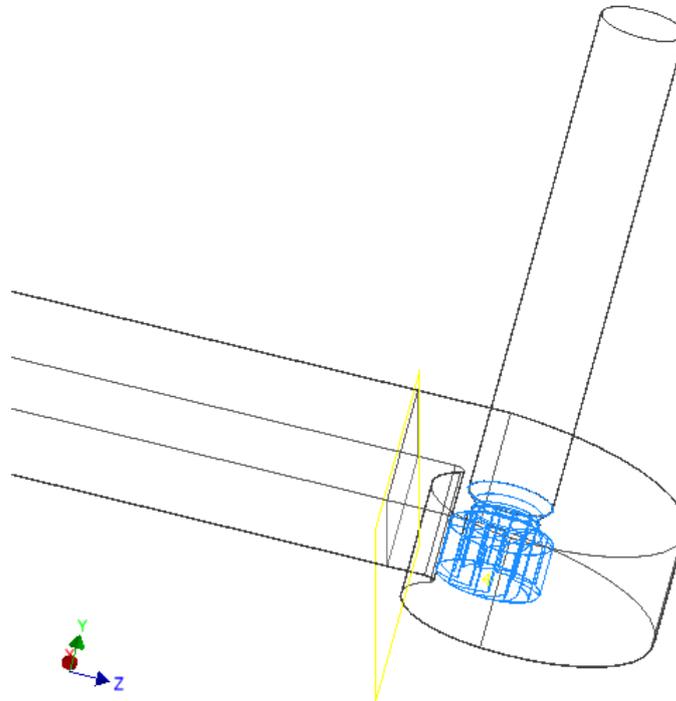


Abbildung 2-6: Übersicht der Geräusentstehungsmechanismen bei Strömungsmaschinen (Bommes et al. 2002)

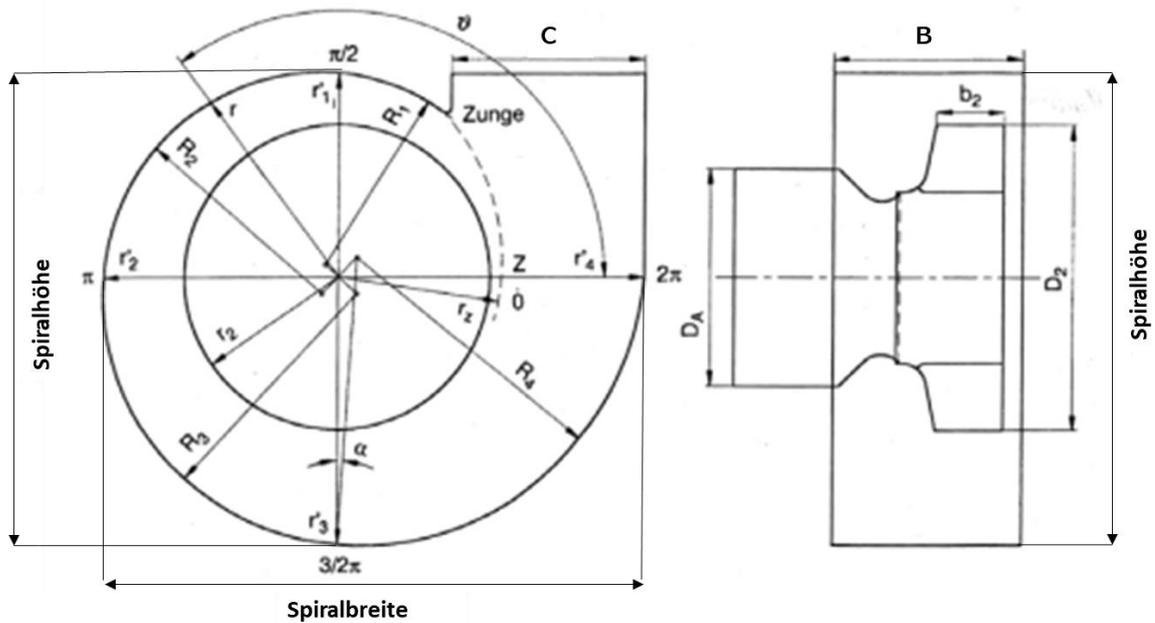
### 3 Geometrie des untersuchten Radialventilators

Der in dem Tool untersuchte Radialventilator besteht aus einem Laufrad, einem Gehäuse und einer Einlaufdüse, die als Baugruppe in Abbildung 3-1 dargestellt sind.



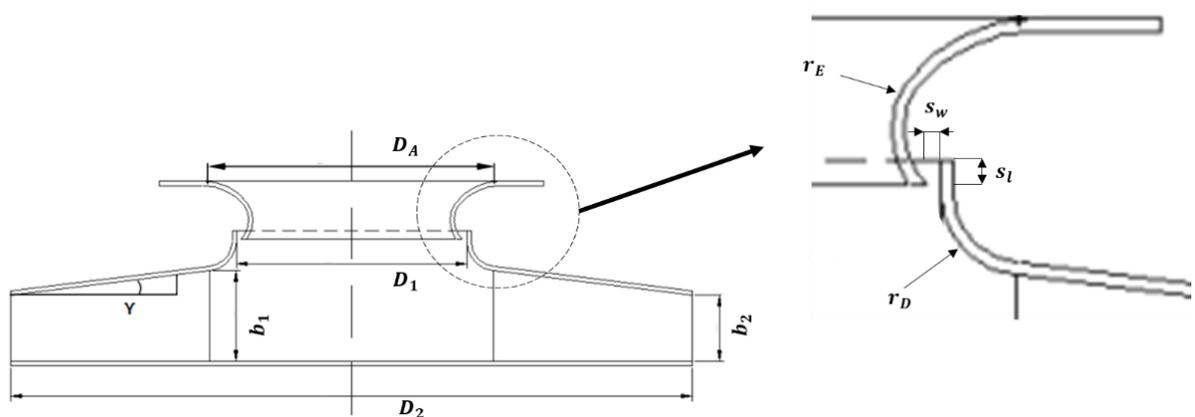
**Abbildung 3-1: Untersucher Radialventilator bestehend aus Gehäuse (schwarz) und Laufrad mit Einlaufdüse (blau)**

Das Gehäuse des Radialventilators wird mithilfe der Vier-Radien-Methode konstruiert. Die Bemaßung ist in Abbildung 3-2 links dargestellt. Die Gehäusespirale besteht aus vier Radien, die als  $R_1, R_2, R_3$  und  $R_4$  gekennzeichnet sind. Der Abstand der jeweiligen Radien zu dem Mittelpunkt sind die Abmaße  $r_1', r_2', r_3'$  und  $r_4'$ . Zusätzlich gibt es noch den Abstand von dem Mittelpunkt zu Zunge, der mit  $r_z'$  gekennzeichnet ist. In der Abbildung sind die Spiralhöhe und die Spiraltiefe eingezeichnet, die mithilfe der Abmaße  $r_1', r_2', r_3'$  und  $r_4'$  berechnet werden. Bei der Spiralanpassung werden die Radien an eine logarithmische Spirale angepasst. Die Vier-Radien-Spirale soll an ausgewählten Punkten somit auf der logarithmischen Spirale liegen. Somit werden die zuvor aufgezählten Abmaße alle bei der Spiralanpassung verändert und angepasst. Die Gehäusebreite  $B$ , die in Abbildung 3-2 auf der rechten Seite zu finden ist, wird bei der Spiralanpassung nicht verändert.



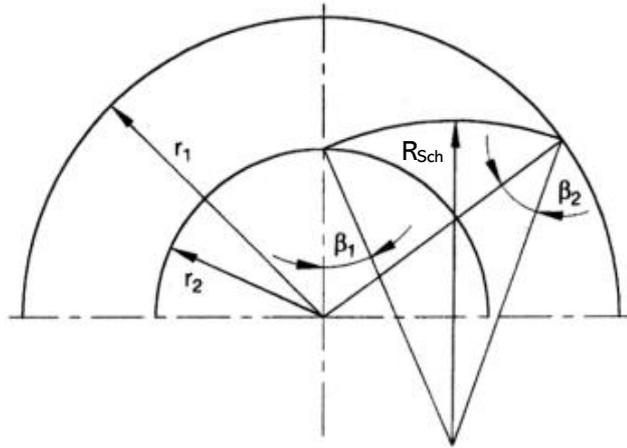
**Abbildung 3-2: Relevante Abmaße zur Konstruktion des Gehäuses mit der Vier-Radien-Methode (Horvat und Kameier 2009)**

Bei der Breitenoptimierung legt der Nutzer die Spiralbreite selbst fest. Die Anwendung optimiert die Parameter Deckscheibenwinkel  $\gamma$  und einen Faktor für die Laufradbreite  $K_{LB}$ , sodass die gewünschte Breite für den angegebenen Fall erreicht wird. Neben den genannten Optimierungsparametern hat die Breitenoptimierung Auswirkungen auf die Schaufeleintrittsbreite  $b_1$  und die Schaufelaustrittsbreite  $b_2$ , die in Abbildung 3-3 zu finden sind. Bei einer Vergrößerung der Laufradbreite muss auch die Gehäusebreite größer werden.



**Abbildung 3-3: Relevante Abmaße zur Konstruktion des Laufrades mit der Einlaufdüse**

Die genaue Vorgehensweise für die Berechnung der Maße und die Funktionsweise der Optimierer wird im weiteren Verlauf noch genauer erklärt.



**Abbildung 3-4: Konstruktion einer einfachen Kreisbogenschaufel (Horvat und Kameier 2009)**

Die Maße, die durch die Auslegung auch bei einer nachfolgenden Optimierung nicht mehr verändert werden, sind bei dem Laufrad der Laufradaußendurchmesser  $D_2$ , der Laufradinnendurchmesser  $D_1$ , der Schaufeleintrittswinkel  $\beta_1$ , der Schaufelaustrittswinkel  $\beta_2$ , der Krümmungsradius der Deckscheibe  $r_D$  und der Schaufelkrümmungsradius  $R_{Sch}$ . Diese Maße sind in den Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 eingezeichnet. Bei der Einlaufdüse bleiben bei einer Optimierung alle Maße unverändert. Zu der Einlaufdüse gehört der Saugstutzendurchmesser  $D_A$ , die Spaltweite  $s_w$ , die Spaltlänge  $s_l$  und der Krümmungsradius der Einstromdüse  $r_E$ .

## 4 Vorgänger: Bommes-Tool in Excel

Wegen dem großen Einsparpotenzial von Radialventilatoren, die wegen Produktionsschwankungen und Umwelteinflüssen nicht in ihrem optimalen Bereich betrieben werden, wurde ursprünglich ein Exceltool aus den Auslegevorschriften nach Bommes entwickelt. Es sollte für die effiziente und leise Auslegung von Radialventilatoren benutzt werden. Das Verfahren beruht auf den Erfahrungen, die in der Fachhochschule Düsseldorf, die heute die Hochschule Düsseldorf ist, über viele Jahre gesammelt hat und die im Wesentlichen von Leonhard Bommes veröffentlicht wurden (Bommes und Reinartz 1997a; Bommes et al. 2002). Dabei übernimmt das Programm die komplexen Berechnungen, sodass selbst für Konstrukteure ohne besondere Spezialisierung die Auslegung von Strömungsmaschinen zugänglich ist. Es müssen als Eingaben nur die Betriebsparameter Volumenstrom, Druckerhöhung und Drehzahl bekannt sein, damit der automatisierte Prozess ablaufen kann. Der Nutzer erhält neben den optimalen Ausgabewerten noch CAD-Konstruktionen des Laufrades und des Gehäuses. Des Weiteren verfügt das Programm über eine Optimierungsfunktion, um den Ventilator an gewünschte Baugrößen anpassen zu können. Das Programm in Excel wurde als eine Alternative zu den kommerziellen Softwaretools entwickelt, wie beispielsweise der Centrix Fan Software (FanMechanics 2018). Im Gegensatz zu dieser Software erzeugt das Bommes-Tool neue Geometrien, statt auf Vorhandene aus einer Datenbank zuzugreifen. Außerdem konnte die kommerzielle Software keine 3D-Geometrien zu Verfügung stellen. (Horvat und Kameier 2009)

Da die Entwicklung dieses Programms jedoch schon 2011 abgeschlossen wurde, hat sich die Technik und die Möglichkeiten der Umsetzung bis heute stark weiterentwickelt.

Der Nutzer des Excel-Tools in Matlab kann das Tool entweder über die Excel-Tabelle oder über eine separate GUI steuern. Zuerst werden die wichtigsten Größen des Ventilators festgelegt, um die dazugehörigen Kenngrößen und Geometrien zu erhalten. Die Grundgrößen sind der Volumenstrom, die Druckerhöhung, die mittlere Dichte und die Drehzahl.

Als Ergebnis gibt das Programm die dimensionslosen Kennzahlen und Geometrie Größen aus. Dazu gehören der Laufradaußen- und Laufradinnendurchmesser, die Schaufeleintritts- und Schaufelaustrittsbreite, die Gehäusebreite und der Schaufelaustrittswinkel. Außerdem wird die erforderliche Umfangsgeschwindigkeit, die Strömungsgeschwindigkeit am Ein- und Austritt und die Strömungsgeschwindigkeiten in und aus dem Gehäuse bestimmt. Der Auslegungspunkt des Ventilators wird außerdem in einem Cordier-Diagramm dargestellt. Zu den Geometrien gibt es eine zweidimensionale Darstellung des Gehäuses mit dem Laufrad. Die Benutzeroberfläche aus Excel ist in Abbildung 4-1 zu sehen.

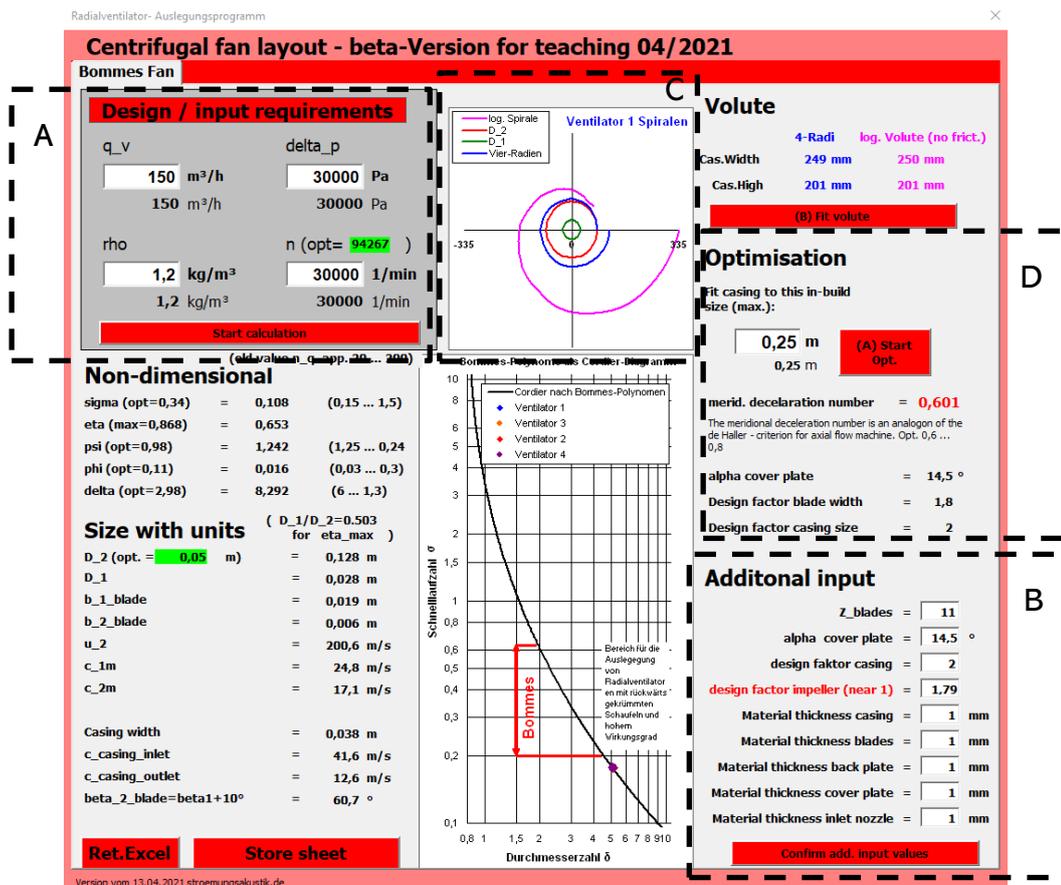
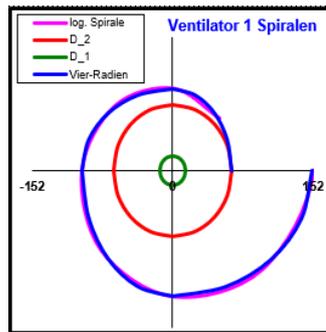


Abbildung 4-1: Benutzeroberfläche des aktuellen Bommers-Tools in Excel (Horvat und Kameier 2011)

Neben den Haupteingaben (vgl. Abbildung 4-1 Markierung A) kann auch die Anzahl der Schaufeln, der Deckscheibenwinkel, die Materialstärken, ein Faktor für das Gehäuse und einer für das Laufrad festgelegt werden. Das Eingabefenster dazu ist in der Abbildung 4-1 bei der Markierung B zu sehen.

Die logarithmische Spirale gilt nach Mode (Mode 1972) als Optimierungsindikator und stellt den verlustfreien und reibungsfreien Strömungsfall dar. Diese ist in der Abbildung 4-1 bei der Markierung C in der Farbe magenta dargestellt.



**Abbildung 4-2: Angepasste Vier-Radien-Spirale an die logarithmische Spirale (Horvat und Kameier 2011)**

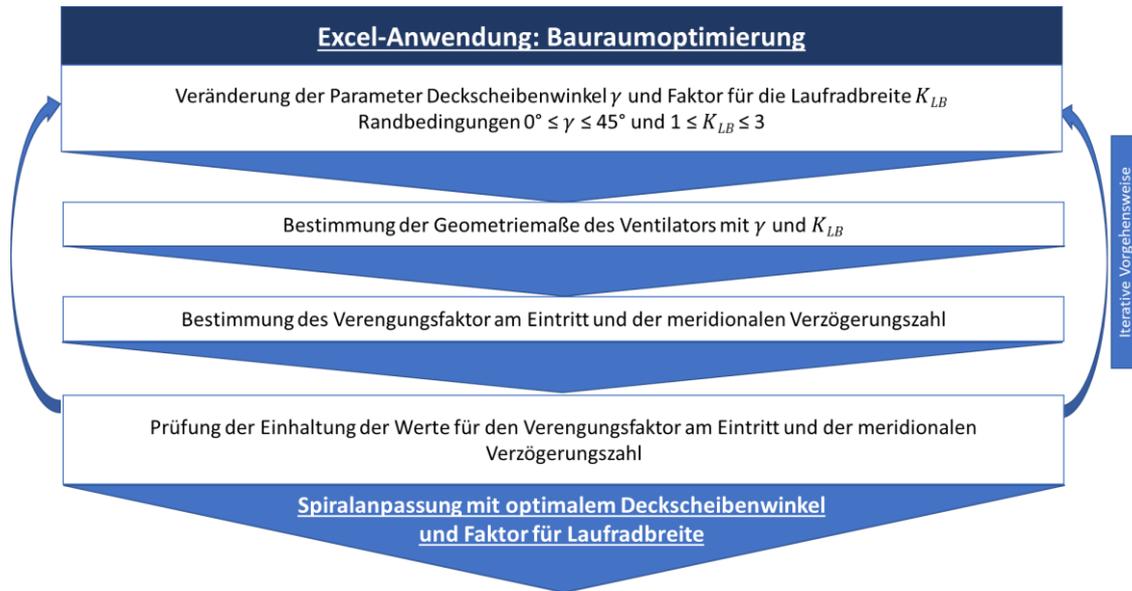
Nachdem die Vier-Radien-Spirale an die logarithmische Spirale angepasst wurde, ist diese wie in Abbildung 4-2 in blau in dem Tool eingezeichnet. Die Vier-Radien-Methode ist eine gängige Methode zur Bestimmung von Spiralgewänden, da Vier-Radien-Spiralen einfach zu Fertigen sind. (Horvat und Kameier 2009)



**Abbildung 4-3: Prinzip der automatischen Anpassung der Vier-Radien-Spirale nach der Excel-Anwendung**

Mit dem Button „Fit Volute“ erfolgt eine automatische Anpassung der Vier-Radien-Methode an die logarithmische Spirale nach dem in Abbildung 4-3 dargestellten Prinzip. Dabei wird mit dem numerischen Iterationsverfahren nach Newton in Excel gearbeitet. Die Vier-Radien-Spirale wird mithilfe der Einheitssilhouette nach Bommes (Bommes und Reinartz 1997a) bestimmt. Dabei beinhaltet die Formel für die Einheitssilhouette variable Koeffizienten, die sich auf den Abstand von Gehäusezunge zu dem Laufradaustritt beziehen. Diese werden mithilfe des Iterationsverfahren so lange verändert, bis zwei Punkte der logarithmischen Spirale mit den dazu passenden Punkten auf der Vier-Radien-Spirale übereinstimmen. Die Variablen sind dabei begrenzt, sodass sich günstige Abmessungen für die Spirale ergeben. Ein genaueres Vorgehen mit den dazugehörigen Formeln

wird in dem nächsten Kapitel *Bommies-Tool in Matlab* weiter beschreiben. (Horvat und Kameier 2009; Horvat und Péus 2005)



**Abbildung 4-4: Prinzip der Bauraumoptimierung in Excel**

Wenn eine Breitenoptimierung erwünscht ist, kann die gewünschte Breite für die reibungsfreie logarithmische Spirale unter dem Abschnitt „Optimisation“ (vgl. Abbildung 4-1 Markierung D) in der GUI angeben werden. Auch diesmal findet die Anpassung über das numerische Iterationsverfahren nach Newton statt. Das Prinzip hierfür ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Die meridionale Verzögerungszahl, bei der die Eintrittsfläche mit der Austrittsfläche in Verhältnis gesetzt wird, repräsentiert die Größe der Verzögerungen im Schaufelkanal. Das Einhalten dieser Zahl im optimalen Bereich stellt sicher, dass das Gehäuse und das Laufrad optimale Werte für die gewünschte Optimierung in Bezug auf den zu Verfügung stehenden Bauraum und den Strömungsfall annehmen. Die meridionale Verzögerungszahl soll Werte zwischen 0,6 und 0,8 annehmen, sodass trotz des verkleinerten Spiralgehäuse die gewünschten Eingabewerte erreicht werden. Des Weiteren soll der Verengungsfaktor, der ein Maß für die Verblockung der Flächen am Ein- und Austritt darstellt, größer als 0,92 sein. Als Variablen bei der Breitenoptimierung werden zur Einhaltung der Bedingungen der Deckscheibenwinkel und ein Faktor für die Laufradbreite genommen. Der Deckscheibenwinkel kann dabei Werte von  $0^\circ$  bis  $45^\circ$  annehmen. (Horvat und Kameier 2009)

Auch dieses Vorgehen wird in dem Kapitel *Bommies-Tool in Matlab* näher erläutert.

Das Excel-Programm schreibt die berechneten Werte für die Geometrie des Laufrades und des Gehäuses dann in die Exceltabelle. Diese ist mit der CAD-Software Inventor von dem Unternehmen Autodesk verknüpft, worüber die dreidimensionalen Geometrien betrachtet und weiterverarbeitet werden können.

## 5 Bommes-Tool in Matlab

Um das Excel-Tool in eine neue moderne Umgebung umzusetzen sowie zu optimieren, wurde in Rahmen dieser Bachelor-Thesis das Bommes-Tool in Matlab entwickelt. Das Programm ist ähnlich aufgebaut wie sein Vorgänger in Excel, da die grundlegenden Ansätze und Berechnungen übernommen wurden und es ebenso über eine Breitenoptimierung und eine Spiralanpassung verfügt. Kleine Fehler des Bommes-Tools konnten im Rahmen der Neuimplementierung jedoch behoben werden. Des Weiteren werden zusätzliche Aspekte der Visualisierung eingebunden.

Die Anleitung der Matlab-Anwendung ist im Anhang A zu finden.

Die Vorgehensweise in dem Matlab-Skript lässt sich in verschiedene Bereiche einteilen. Diese lassen sich auch Abbildung 5-1 entnehmen. Nach der Eingabe der Betriebswerte werden bei keiner gewünschten Breitenoptimierung direkt die geometrischen Laufradparameter und das logarithmische Gehäuse berechnet. Danach erst findet die eigentliche Spiralanpassung statt, wo die Vier-Radien-Spirale an die berechnete logarithmische Spirale angenähert wird. Das ist in Abbildung 5-1 der bei der Markierung B dargestellt. Zum Schluss werden die Geometriewerte in die Excel-Tabelle für Autodesk Inventor übertragen. Bei einer gewünschten Breitenoptimierung (vgl. Markierung A) wird diese noch vor der Berechnung der geometrischen Laufradparameter durchgeführt. Dabei werden die Parameter Deckscheibenwinkel und der Faktor für die Laufradbreite iterativ bestimmt, bis die festgelegten Bedingungen eingehalten werden. Diese sind die Einhaltung der gewünschten Spiralbreite, die Einhaltung der meridionalen Verzögerungszahl in einem Toleranzbereich von 5 % und das Verhältnis zwischen Ein- und Austrittsfläche des Impellers zwischen 1,8 bis 2. Die meridionale Verzögerungszahl ist eine Größe, um die Verzögerung im Schaufelkanal zu zeigen. Sie wird polynomisch und mit reellen Größen berechnet und ist das Verhältnis der meridionalen Strömungsgeschwindigkeiten zwischen Eintrittsfläche und Austrittsfläche des Schaufelkanals. Die polynomischen meridionalen Verzögerungszahl  $\kappa_{cm_p}$  und die meridionale Verzögerungszahl  $\kappa_{cm}$  werden wie folgt berechnet:

$$\kappa_{cm_p} = \frac{0,54 \cdot \sigma^{1/6} \cdot \left(1,279 \cdot \psi^{1/2} \cdot \sigma^{5/6}\right)^2 \cdot \frac{\xi_1}{\xi_2}}{0,686 \cdot \psi^{1/2} \cdot \sigma - 0,5 \cdot \left(1 - 1,279 \cdot \psi^{1/2} \cdot \sigma^{5/6}\right) \cdot \tan(\gamma)} \quad 5-1$$

$$\kappa_{cm} = \frac{c_{2m}}{c_{1m}} = \frac{b_1 \cdot D_1 \cdot \xi_1}{b_2 \cdot D_2 \cdot \xi_2} \quad 5-2$$

Die meridionale Verzögerungszahl sollte nach der Breitenoptimierung nicht mehr als 5 % von dem ursprünglich berechneten abweichen, da eine zu starke Verzögerung zu Ablösungen und somit zu einer ungleichmäßigen Strömung führt (Horvat und Kameier 2009).

Die Ein- und Austrittsflächen am Impeller lassen sich wie folgt bestimmen:

$$A_{ein} = D_1^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad [m^2] \quad 5-3$$

$$A_{aus} = D_2 \cdot \pi \cdot b_2 \quad [m^2] \quad 5-4$$

Das Verhältnis dieser liegt im optimalen Fall zwischen 1,8 und 2, um so die Verzögerung der Strömung und somit die Ablösungen auf einem möglichst geringen Maß zu halten. Dieses Flächenverhältnis wird in der Auslegung dazu genutzt den optimalen Deckscheibenwinkel zu steuern und mehr Konstanz zu liefern.

Nach dieser iterativen Berechnung werden die geometrischen Laufradparameter und die Werte für die logarithmische Spirale ausgegeben. Danach verläuft das Programm weiter wie bei der Spiralanpassung.

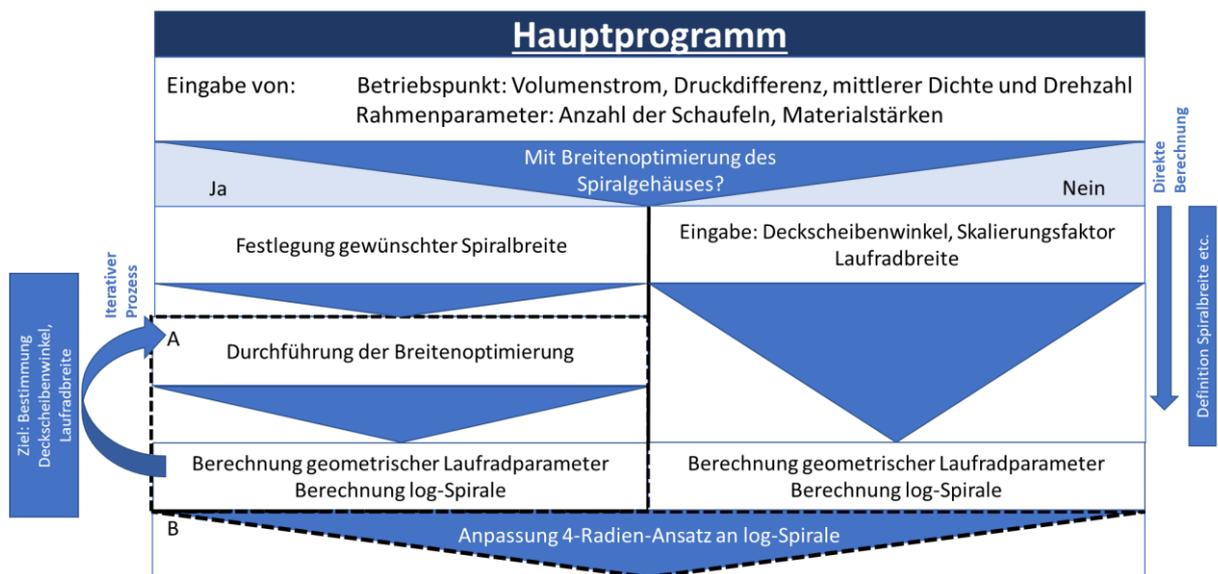


Abbildung 5-1: Ablaufplan des Hauptprogramm in Matlab

Sowohl bei einer Breitenoptimierung als auch bei lediglich einer Spiralanpassung werden zuerst die umgesetzte Leistung  $P_n$ , die theoretische Stufenarbeit  $Y_t$  und die Schnelllaufzahl  $\sigma$  berechnet. Die Formeln dazu sind im Kapitel *Strömungstechnische Grundlagen* unter den Nummern 2-7, 2-3 und 2-12 zu finden. Ob die Strömungsmaschine mithilfe eines Radialventilators realisiert werden kann, lässt sich mit der Schnelllaufzahl  $\sigma$  ermitteln. (Horvat und Kameier 2009)

Die Eingabefenster der Matlab-Anwendung sind in Abbildung 5-2 zu sehen. Links ist das erste Fenster dargestellt, wo die Grundgrößen und die Materialstärken angegeben werden. Das mittlere Eingabefenster erscheint, wenn eine Breitenoptimierung gewünscht ist und das rechte, wenn lediglich eine Spiralanpassung stattfinden soll.

**Abbildung 5-2: Eingabefelder des Bommes-Tools mit Standarteingabewerten**

Nachdem die Anwendung den passenden Ventilator berechnet und die Geometriedaten an die CAD-Software weitergegeben hat, erhält der Nutzer das Ausgabefenster aus Abbildung 5-3. Dort ist das Gehäuse mit dem Laufrad von der Seite und von oben dargestellt, sodass der Nutzer einen guten Überblick über die Verhältnisse beider bekommt. Des Weiteren ist der Betriebspunkt des Ventilators in das Cordier-Diagramm eingezeichnet und die wichtigsten Kenndaten sind angegeben.

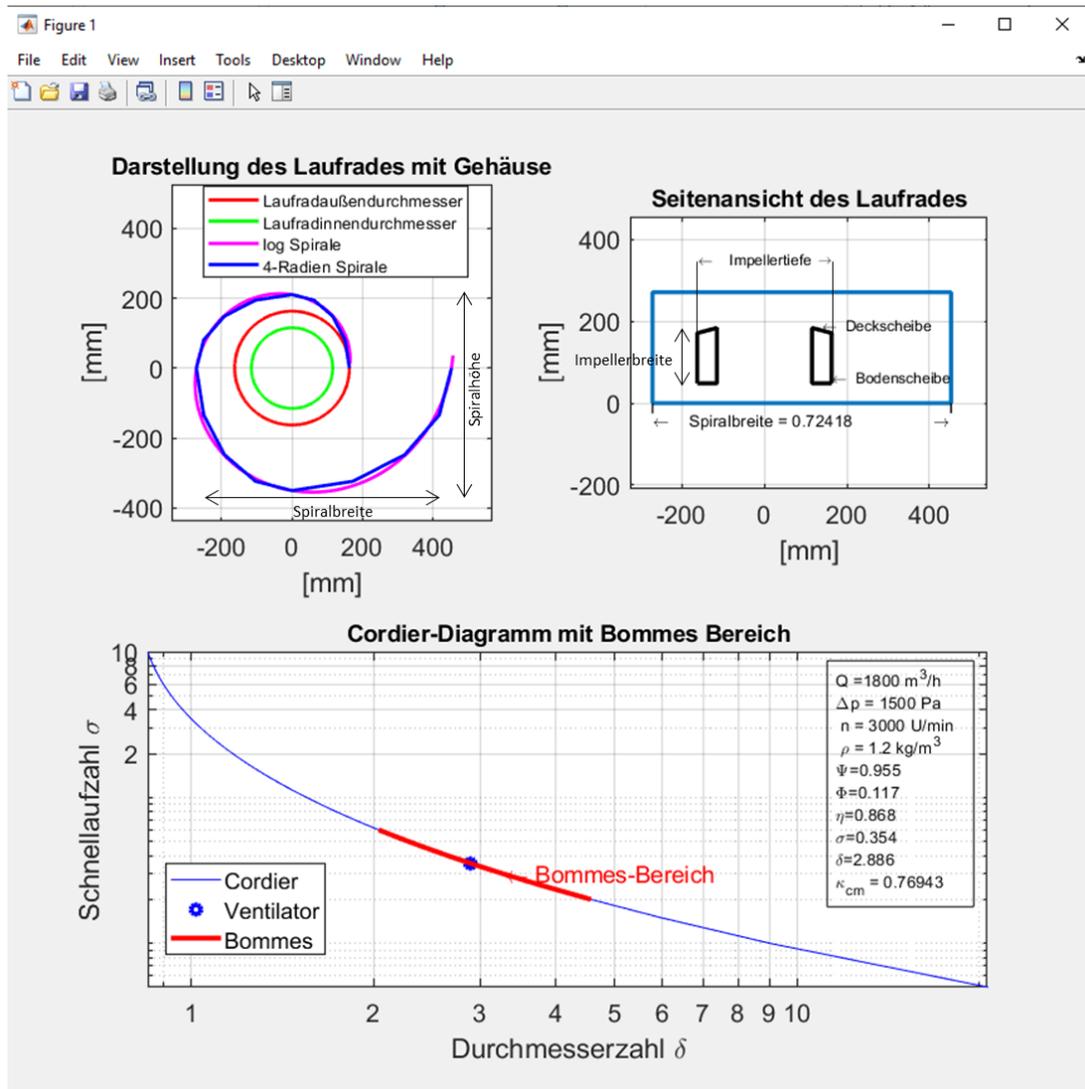


Abbildung 5-3: Grafische zweidimensionale Darstellung der Geometrien und Einordnung des berechneten Ventilators in das Cordier-Diagramm durch das Matlab-Tool

## 5.1 Bestimmung der polynomischen Druckzahl

Neben der Schnelldrehzahl werden weitere dimensionslose Größen bestimmt. Dazu zählt die polynomische Druckzahl, die nach Bommes und Reinartz (Bommes und Reinartz 1997b) in dem Werk „Polynomisches Verfahren zur optimalen Gestaltung von Radiallaufrädern“ zu finden ist. Die polynomischen Kennzahlen nach Bommes wurden durch empirisch ermittelte Entwurfspolynome konstruiert. In dem Bommes-Bereich im Cor-

dier-Diagramm wurde eine gute Übereinstimmung des Bommes-Polynoms mit den Cor-dier-Kurven nachgewiesen, weshalb dieses in der Anwendung benutzt wird. (Horvat und Kameier 2009)

Mithilfe der Druckzahl können die dimensionslosen Kennzahlen bestimmt werden. Au-ßerdem wird diese in der Matlab-Anwendung zur Berechnung der erforderlichen Um-fangsgeschwindigkeit und des Laufradinnendurchmessers verwendet, die bei der Berech-nung der restlichen Laufradparameter Einfluss finden.

In der Matlab-Anwendung werden die polynomischen Kennzahlen in dem Ablaufschema in Abbildung 5-1 bei der Berechnung der geometrischen Laufradparameter berechnet. Diese sind zwar unabhängig von der Spiralanpassung und der Breitenoptimierung und bleiben somit gleich, jedoch werden sie für die Berechnung von den Geometriedaten be-nötigt und befinden sich deshalb in demselben Matlab-Skript wie diese.

Die polynomische Druckzahl ist eine Funktion der Schnelllaufzahl und wird wie folgt berechnet (Bommes und Reinartz 1997b):

$$\begin{aligned} \lg \psi_p & & & 5-5 \\ & = -0,0381488 - 1,04357(\lg \sigma) - 0,502523(\lg \sigma)^2 \\ & \quad + 0,0704883(\lg \sigma)^3 \end{aligned}$$

$$\psi_p = 10^{-0,0381488-1,04357(\lg \sigma)-0,502523(\lg \sigma)^2+0,0704883(\lg \sigma)^3} \quad 5-6$$

Die polynomische Durchmesserzahl ergibt sich durch das Koppeln der Schnelllaufzahl und der Durchmesserzahl (Horvat und Kameier 2009; Bommes und Reinartz 1997b):

$$\delta_p = \frac{1}{\psi_p^{1/2} \cdot \sigma} \quad 5-7$$

$$\delta_p = \frac{1}{(10^{-0,0381488-1,04357(\lg \sigma)-0,502523(\lg \sigma)^2+0,0704883(\lg \sigma)^3})^{1/2} \cdot \sigma} \quad 5-8$$

Die polynomische Lieferzahl kann mithilfe der Schnelllaufzahl und der polynomischen Druckzahl berechnet werden:

$$\varphi_p = \sigma^2 \cdot \psi_p^{3/2} \quad 5-9$$

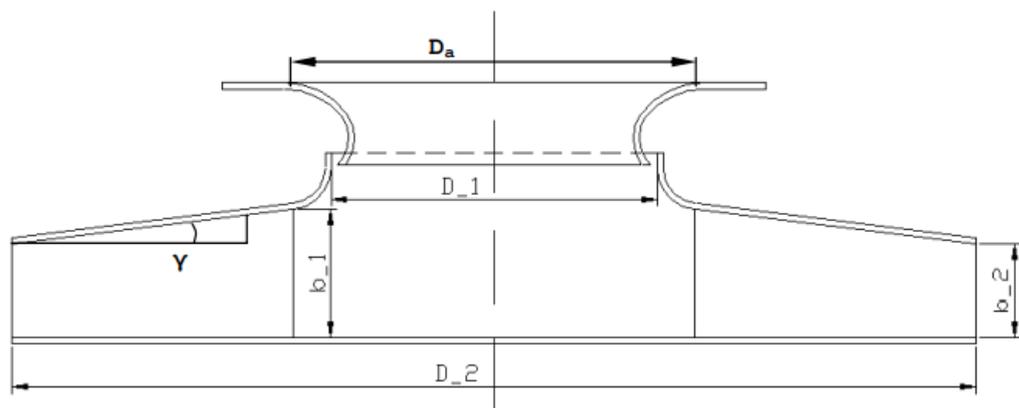
Auch der polynomische innere Wirkungsgrad ist abhängig von der Schnelllaufzahl und wird folgendermaßen berechnet (Horvat und Kameier 2009; Bommes und Reinartz 1997b):

$$\lg \eta_{ip} = -0,097358 - 0,0800538(\log \sigma) + 0,151771(\log \sigma)^2 + 0,340467(\log \sigma)^3 \quad 5-10$$

$$\eta_{ip} = 10^{-0,097358 - 0,0800538(\log \sigma) + 0,151771(\log \sigma)^2 + 0,340467(\log \sigma)^3} \quad 5-11$$

## 5.2 Berechnung Laufrad und Einlaufdüse

Des Weiteren werden das Laufrad und die Einlaufdüse berechnet. Diese sollten zusammen betrachtet werden, da die Einlaufbedingungen entscheidend für einen hohen Wirkungsgrad sind. In der Matlab-Anwendung findet die Berechnung der geometrischen Parameter sowohl bei der Spiralanpassung (vgl. Abbildung 5-1 Markierung B) als auch bei der Breitenoptimierung (vgl. Abbildung 5-1 Markierung A) statt. Die Spiralanpassung führt zu keinen Änderungen der Parameter des Laufrades und der Einlaufdüse, da dabei nur die Vier-Radien-Spirale an die logarithmische Spirale angepasst wird und das Laufrad dabei unverändert bleibt. Die Laufrad- und Einlaufdüsenparameter sind lediglich von den Eingaben des Benutzers abhängig. Bei der Breitenoptimierung ändert sich die Breite des Laufrades, da die Gehäusespirale kleiner wird. Betroffen sind Maße wie der Deckscheibenwinkel  $\gamma$ , die Schaufeleintrittsbreite  $b_1$  und die Schaufelaustrittsbreite  $b_2$ . Die Berechnungen sind in einem Unterskript zu finden, das von dem Hauptskript bei der jeweiligen Anwendung ausgeführt wird. In Abbildung 5-4 ist der Querschnitt eines Laufrades mit Einlaufdüse und die Bezeichnungen der Hauptmaße dargestellt. (Horvat und Kameier 2009)



**Abbildung 5-4: Schnittdarstellung eines Radiallaufrades mit den Hauptabmessungen (Horvat und Kameier 2009)**

Die Umfangsgeschwindigkeit  $u_2$  kann in die Formel für den Laufraddurchmesser  $D_2$  eingesetzt werden (Horvat und Kameier 2009).

$$u_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_t}{\psi_p \cdot \rho_m}} \quad [\text{m/s}] \quad 5-12$$

$$D_2 = \frac{u_2}{\pi \cdot n} = \frac{1}{\pi \cdot n} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_t}{\psi_p \cdot \rho_m}} \quad [\text{m}] \quad 5-13$$

Das Durchmesser Verhältnis kann dann nach dem Laufradinnendurchmesser  $D_1$  umgestellt werden:

$$\frac{D_1}{D_2} = 1,27 \cdot \psi_p^{1/2} \cdot \sigma^{5/6} \quad 5-14$$

$$D_1 = 1,27 \cdot \psi_p^{1/2} \cdot \sigma^{5/6} \cdot D_2 \quad [\text{m}] \quad 5-15$$

Die Schaufeleintrittsbreite  $b_1$  wird über die relative Schaufeleintrittsbreite  $b_1/D_1$  erhalten (Horvat und Kameier 2009):

$$\frac{b_1}{D_1} = 0,54 \cdot \sigma^{1/6} \quad 5-16$$

$$b_1 = 0,54 \cdot \sigma^{1/6} \cdot D_1 \quad [\text{m}] \quad 5-17$$

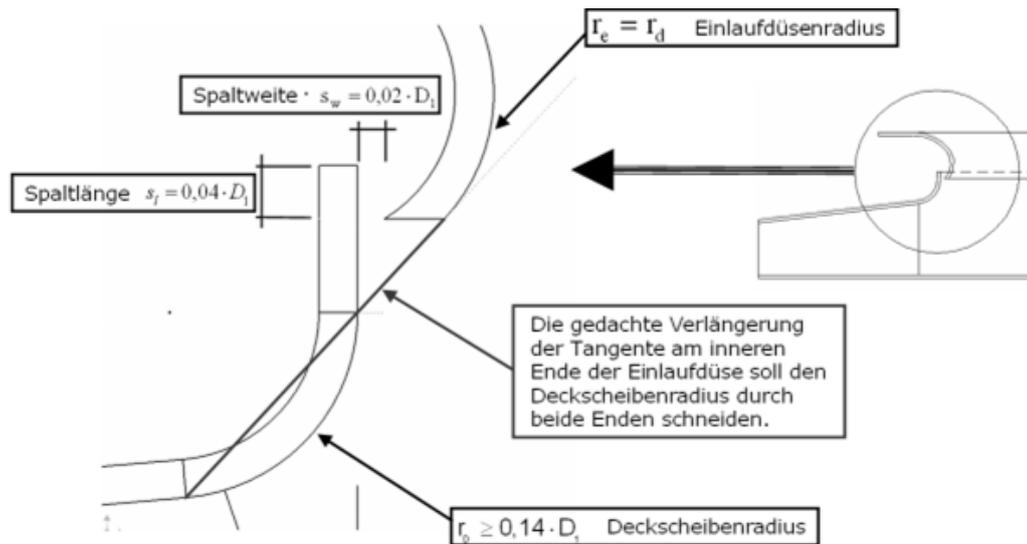
In der Matlab-Anwendung wird auf die Schaufeleintrittsbreite noch ein Faktor für die Laufradbreite  $K_{LB}$  multipliziert. Dieser hat somit auch Auswirkungen auf die Schaufelaustrittsbreite und die Gehäusebreite. Mit diesem Faktor kann das Laufrad breiter gemacht werden, was bei der Breitenoptimierung von großer Bedeutung ist.

Ebenso wird die Schaufelaustrittsbreite  $b_2$  über die relative Schaufelaustrittsbreite  $b_2/D_2$  erhalten.

$$\frac{b_2}{D_2} = \frac{b_1}{D_1} \cdot \frac{D_1}{D_2} - 0,5 \cdot \left(1 - \frac{D_1}{D_2} \cdot \tan(\gamma)\right) \quad 5-18$$

$$b_2 = b_1 - 0,5 \cdot (D_2 - D_1) \cdot \tan(\gamma) \quad [\text{m}] \quad 5-19$$

In Abbildung 5-5 sind die Spaltweite  $s_w$ , die Spatllänge  $s_l$ , der Radius der Deckscheibe  $r_D$  und die Einlaufdüse  $r_E$  an einem stark vergrößerten Querschnitt des Übergangs zwischen der Einlaufdüse und des Laufrades dargestellt.



**Abbildung 5-5: Vergrößerung des Übergangs zwischen Einlaufdüse und Laufrad (Horvat und Kameier 2009)**

Der Krümmungsradius der Deckscheibe  $r_D$ , sowie der Krümmungsradius der Einlaufdüse  $r_E$  sollten mindestens 14 % des Laufradinnendurchmessers betragen, damit die Schaufelkanäle optimal mit dem Medium gefüllt werden können. (Bommes et al. 2002)

$$r_D \geq 0,14 \cdot D_1 \quad [\text{m}] \quad 5-20$$

$$r_E \geq 0,14 \cdot D_1 \quad [\text{m}] \quad 5-21$$

Die Spaltweite  $s_w$  wird mit 2 % des Laufradinnendurchmessers und die Spaltlänge  $s_l$  mit 4 % des Laufradinnendurchmessers berechnet (Horvat und Kameier 2009).

$$s_w = 0,02 \cdot D_1 \quad [\text{m}] \quad 5-22$$

$$s_l = 0,04 \cdot D_1 \quad [\text{m}] \quad 5-23$$

Die Einhaltung der Werte für den Spalt zwischen der Einlaufdüse und dem Laufrad sind wichtig, damit die Strömung an der Deckscheibe anliegt und es zu weniger Ablösungen kommt. Ein abgedichteter Spalt führt zwar zu einem höheren Wirkungsgrad und einer höheren Kennlinie, jedoch führt dieser auch zu einem höheren Geräuschpegel.

Des Weiteren wird der Saugstutzendurchmesser  $D_a$  nach Bommes und Reinartz (Bommes und Reinartz 1997a) mit einem Faktor  $F_{D_a}$  zwischen 1,21 und 1,41 des Laufradinnendurchmessers berechnet, um diesen an gängige Rohrdurchmesser anpassen zu können. (Horvat und Kameier 2009)

$$D_a = F_{D_a} \cdot D_1 \quad [\text{m}] \quad 5-24$$

### 5.3 Bestimmung der Schaufeleigenschaften

Die Berechnung des Schaufeleintrittswinkel  $\beta_1$  erfolgt iterativ, da dieser von dem Verengungsfaktor  $\xi_1$  abhängig ist, der aber wiederum mithilfe des Schaufeleintrittswinkel berechnet wird. In Matlab kann dies mit einer Schleife realisiert werden.

Die Formel des Schaufeleintrittswinkel lautet:

$$\beta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{0,233}{\xi_1} \cdot \sigma^{-2/3} \right) \quad [^\circ] \quad 5-25$$

Der Verengungsfaktor  $\xi$  gibt die Blockierung an der Laufradeintritt- und Laufradaustrittsfläche an und ist auch unter der Namen Versperrungsfaktor bekannt.

Der Verengungsfaktor am Eintritt  $\xi_1$  gibt das Verhältnis der ursprünglichen meridionalen Geschwindigkeit zu der am Eintritt der Schaufeln an. (Bommes und Reinartz 1997a)

$$\xi_1 = \frac{c_{0m}}{c_{1m}} = 1 - \frac{s_1 \cdot z}{\pi \cdot D_1 \cdot \sin(\beta_1)} \quad 5-26$$

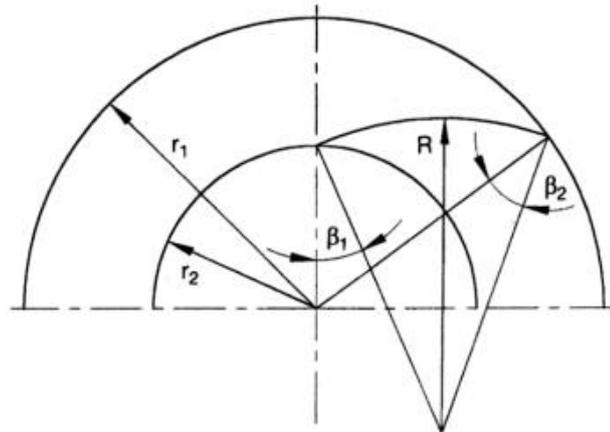
Er sollte mindestens 0,92 betragen, da es sonst zu einer Verblockung oder Verengung der Flächen führt, wodurch ein niedriger Wirkungsgrad resultiert. Durch den Verengungsfaktor wird die meridionale Verzögerungszahl bestimmt, die für die Breitenoptimierung in der Matlab-Anwendung wichtig ist. (Horvat und Kameier 2009; Bommes und Reinartz 1997b)

Der Schaufelaustrittswinkel ist je nach Durchmesser Verhältnis 5-15° größer als der Schaufeleintrittswinkel. In dem Matlab-Tool wird der Einfachheit ein Winkel von 10° festgelegt, da dieser Mittelwert oft bei Radialventilatoren mit einem hohen Wirkungsgrad genommen wird. (Horvat und Kameier 2009)

$$\beta_2 = \beta_1 + 10^\circ \quad [^\circ] \quad 5-27$$

Analog zu dem Verengungsfaktor am Laufradeintritt, kann dieser ebenfalls am Laufradaustritt berechnet werden. Auch dieser wird für die Berechnung der meridionalen Verzögerungszahl benötigt (Formeln 5-1 und 5-2). (Horvat und Kameier 2009)

$$\xi_2 = 1 - \frac{s_1 \cdot z}{\pi \cdot D_2 \cdot \sin(\beta_2)} \quad 5-28$$



**Abbildung 5-6: Konstruktion einer einfachen Kreisbogenschaufel (Horvat und Kameier 2009)**

Außerdem wird noch der Schaufelkrümmungsradius  $R_{Sch}$  berechnet, der auch in Abbildung 5-6 dargestellt wird. Dieser gibt die Krümmung der Schaufel an und wird zur Konstruktion der Schaufeln im Laufrad benötigt und wird deshalb an die CAD-Software übergeben. Die Formel dazu lautet:

$$R_{Sch} = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot (r_2 \cdot \cos(\beta_2) - (r_1 \cdot \cos(\beta_1)))} \quad [m] \quad 5-29$$

Die Anzahl der Schaufeln wird von dem Benutzer festgelegt. Der normalerweise in der Literatur angewandte Minderleistungsansatz für die Berechnung der Schaufeln findet hier keine Anwendung, da in der realen Ausführung mehr Schaufeln verbaut werden, um akustische Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Im Allgemeinen führen mehr als zehn Schaufeln zu einem geringeren Schauffellärm und einer höheren Festigkeit des Laufrades. (Horvat und Kameier 2009)

## 5.4 Gehäuse

In dem Bommes-Tool wird die Gehäuseform sowohl logarithmisch als auch mit der Vier-Radien-Methode berechnet. Die logarithmische Spirale beschreibt die optimale und reibungsfreie Strömung, weshalb diese in ihrer Größe unangepasst meist nicht realisiert werden kann.

Um die Koordinaten auf der logarithmischen Spirale zu erhalten, wird mit Winkelfunktionen gearbeitet. Die logarithmische Spirale nimmt mit steigendem Kreiswinkel  $\omega_{pi}$  ausgehend von dem Außenschaufelradius exponentiell zu. Neben dem Außenschaufelradius

ist die Funktion von dem Volumenstrom, der Schaufelaustrittsbreite und dem Beiwert nach Mode (Mode 1972) abhängig. (Horvat und Kameier 2009)

Für die x-Koordinate ergibt sich:

$$X_{log}(i) = \frac{D_2}{2} \cdot e^{\left(\omega_{pi(i)} \cdot \frac{\dot{V}}{2 \cdot \pi \cdot b_2 \cdot k}\right)} \cdot \cos(\omega_{pi}(i)) \quad [\text{m}] \quad 5-30$$

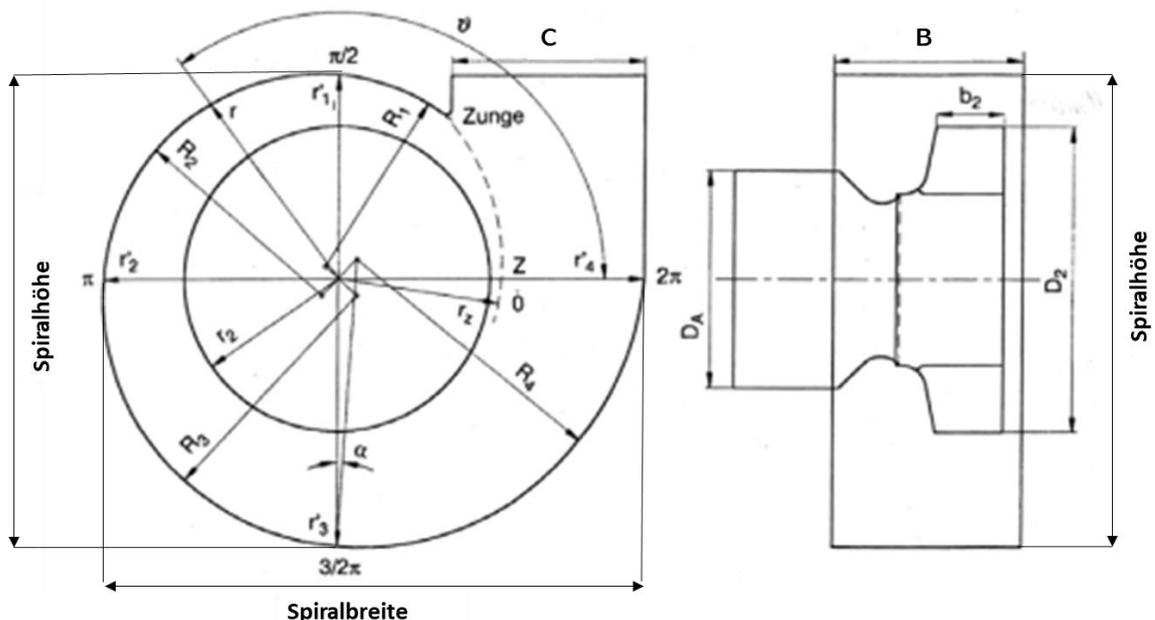
Analog folgen für die y-Koordinaten:

$$Y_{log}(i) = \frac{D_2}{2} \cdot e^{\left(\omega_{pi(i)} \cdot \frac{\dot{V}}{2 \cdot \pi \cdot b_2 \cdot k}\right)} \cdot \sin(\omega_{pi}(i)) \quad [\text{m}] \quad 5-31$$

Der Beiwert k nach Mode wird wie folgt berechnet:

$$k = \Delta p \cdot \frac{r_2}{\rho \cdot u_2} \quad [\text{kg/s}] \quad 5-32$$

Die Vier-Radien-Spirale hat den Vorteil, dass diese einfacher zu konstruieren und zu fertigen ist. In Abbildung 5-7 sind die wichtigsten Parameter zur Konstruktion der Vier-Radien-Spirale dargestellt. (Horvat und Kameier 2009)



**Abbildung 5-7: Wichtige Parameter zur Konstruktion des Gehäuses mit der Vier-Radien-Methode (Horvat und Kameier 2009)**

Zur Berechnung der Vier-Radien-Spirale wird zuerst die Einheitssilhouette nach Bommes und Reinartz ermittelt. Diese lautet wie folgt (Bommes und Reinartz 1997b):

$$\frac{r}{r_z} = e^{(\tan(\alpha)) \cdot \vartheta} = e^{\left(\frac{2}{3\pi}\right) \cdot \log\left(\frac{\kappa_4}{\kappa_1}\right) \cdot \vartheta} \quad 5-33$$

Die Koeffizienten  $\kappa_1$  und  $\kappa_4$  beziehen sich auf den Abstand von der Gehäusezunge zu dem Laufradaustritt und sollten wegen Drehtonlärms nicht zu klein gewählt werden. Dabei darf der Koeffizient  $\kappa_1$  Werte ab  $2/3$  und der Koeffizient  $\kappa_4$  Werte von  $0,9$  bis  $1,1$  annehmen, damit günstige Spiralabmessungen erhalten werden. Im Bommes-Tool in Matlab sind die Werte von  $\kappa_4$  zwischen  $0,001$  und  $2$  und für  $\kappa_1$  zwischen  $0,001$  und  $1$  begrenzt. Die Polwinkel  $\vartheta$  sind an den Stellen  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3}{2}\pi$  und  $2\pi$  festgelegt. Mit der Einheitssilhouette an den Polwinkeln und dem Zungenradius ergeben sich die Radien  $r_z', r_1', r_2', r_3'$  und  $r_4'$ . (Horvat und Péus 2005; Bommes und Reinartz 1997a)

$$r' = \frac{r}{r_z} \cdot r_{Zunge} \quad [\text{m}] \quad 5-34$$

Die zu den Radien gehörenden Spiralradien ergeben sich folgendermaßen:

$$R_1 = \frac{r_z' + r_1'}{2 \cdot \cos \alpha} \quad [\text{m}] \quad 5-35$$

$$R_2 = \frac{r_1' + r_2'}{2 \cdot \cos \alpha} \quad [\text{m}] \quad 5-36$$

$$R_3 = \frac{r_2' + r_3'}{2 \cdot \cos \alpha} \quad [\text{m}] \quad 5-37$$

$$R_4 = \frac{r_3' + r_4'}{2 \cdot \cos \alpha} \quad [\text{m}] \quad 5-38$$

Als nächstes werden die Mittelpunkte für die Radien in den vier Quadranten bestimmt. Diese werden mit den Radien zur Bestimmung der x- und y- Koordinaten benötigt.

Dabei ist  $\alpha$  der Steigungswinkel, der bei den Berechnungen konstant gehalten wird und im Matlab-Skript mit einem festen Wert festgelegt ist. Der Steigungswinkel kann jedoch auch mit folgender Formel abgeschätzt werden. (Horvat und Kameier 2009)

$$\tan \alpha = \frac{b_2}{B} \cdot \frac{\varphi}{\psi} \cdot \frac{D_2}{2 \cdot b_2} \quad [^\circ] \quad 5-39$$

Neben der Gehäusespirale muss noch die Gehäusebreite bestimmt werden. Diese wurde ursprünglich mit einem vom Nutzer festgelegten Faktor für die Breite  $F_B$  und der Außenschaufelbreite  $b_2$  bestimmt.

$$B = F_B \cdot b_2 \quad [\text{m}] \quad 5-40$$

In Abbildung 5-8 ist die Abhängigkeit der Gehäusebreite auf den inneren Wirkungsgrad nach Bommes dargestellt. Der optimale Wirkungsgrad wird mit einem Faktor für den Wirkungsgrad von  $2 \leq B \leq 3$  erreicht. Dieser Faktor kann gemäß Bommes bis 5 erhöht werden, was jedoch zu Einbußen des Wirkungsgrades führt. (Bommes et al. 2002)

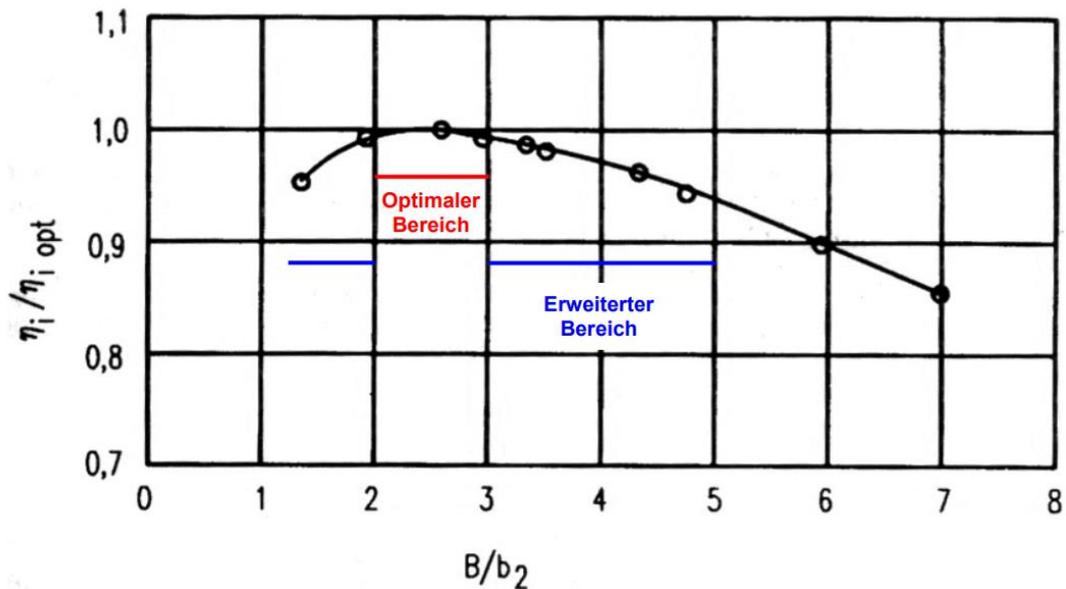


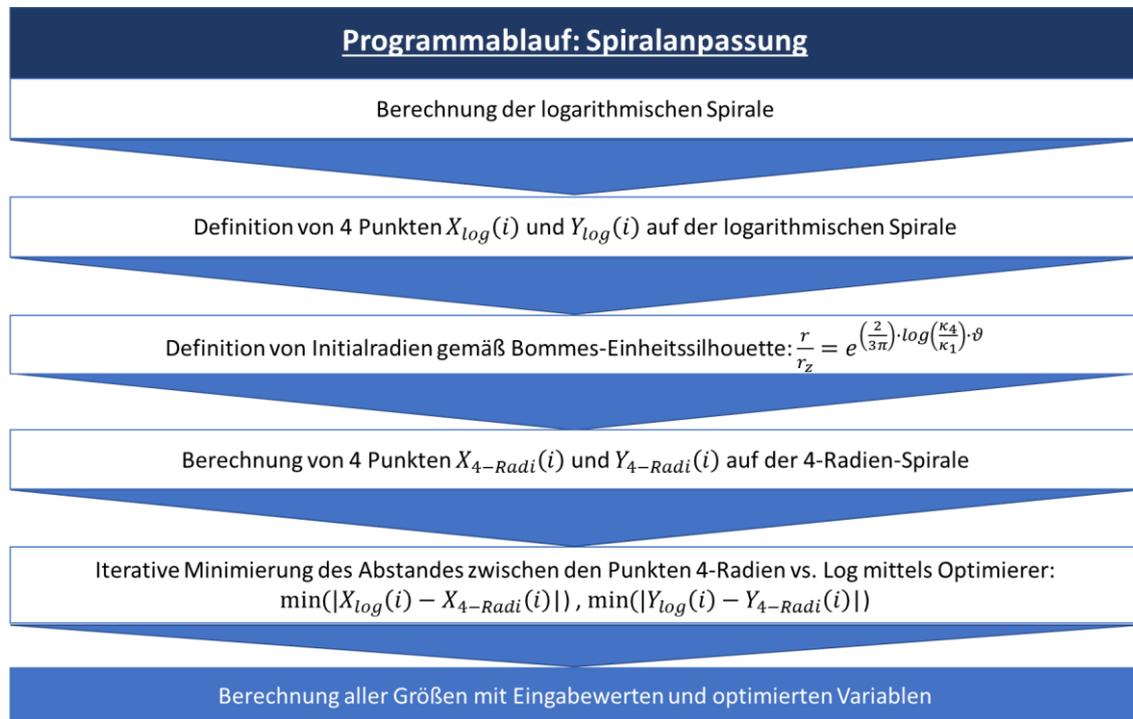
Abbildung 5-8: Abhängigkeit der Gehäusebreite auf dem inneren Wirkungsgrad (Horvat und Kameier 2009)

Der frei zu wählende Faktor  $F_B$  (Formel 5-40) in Excel führte dazu, dass das Laufrad manchmal breiter als das Gehäuse wurde und deshalb aus diesem herausragte. In dem Matlab-Tool kann der Benutzer zwar auch einen Faktor festlegen, jedoch wird dieser automatisch nach oben korrigiert, falls es zu einem nicht realisierbaren Ergebnis kommt. In diesem Fall fällt die obere Grenze weg. Diese Fehlerkorrektur wurde in Matlab mithilfe einer Schleife implementiert.

## 5.5 Anpassung der Vier-Radien- Spirale an die logarithmischen Spirale

Die Vier-Radien-Methode ist leichter anzufertigen und wird deshalb für das CAD-Modell in Inventor benutzt. Dafür wird die Vier-Radien-Spirale an die logarithmische Spirale angepasst. Die Berechnungen mit der Vier-Radien-Methode wurden im vorherigen Abschnitt beschrieben.

Bei der aktuellen Implementierung wird zum iterativen Anpassen der Vier-Radien an die log-Spirale mit einem Optimierer nach Newton gearbeitet, dessen Vorgehensweise in Abbildung 5-9 beschrieben wird.



**Abbildung 5-9: Programmablauf für die Anpassung der Vier-Radien-Spirale an die logarithmische Spirale**

Nachdem die logarithmische Spirale berechnet wurde und Punkte auf dieser definiert wurden, wird zuerst im Hauptprogramm eine Funktion des Unterprogrammes erstellt. Diese ist abhängig von dem empirischen Quotienten  $\kappa_4/\kappa_1$ , welcher sich auf den Abstand zwischen Gehäusezunge und Laufradaustritt bezieht. Sie werden für die Berechnung der Initialradien gemäß der Bommes-Einheitssilhouette benötigt und steuern die Größe der Gehäusespirale. Aufgrund des Drehtonlärms sollen diese nicht zu klein gewählt werden.

In dem Unterprogramm werden die Koordinaten der Punkte auf der Vier-Radien-Spirale mit den variablen Koeffizienten  $\kappa_4$  und  $\kappa_1$  berechnet. Die Koeffizienten werden durch die Optimierung angepasst, sodass die Koordinaten der Vier-Radien-Spirale möglichst nah an denen der logarithmischen Spirale liegen. Dafür werden die Abstände der Koordinatenpunkte zwischen beiden Spiralen mit einem Faktor gewichtet und addiert. Dieser Fehlerterm wird minimiert, sodass der Abstand der Punkte auf der Vier-Radien- und der logarithmischen Spirale möglichst gering ist.

Nach der Bestimmung der Variablen, können damit die Werte für die Geometrien berechnet werden. Diese werden dann in eine Tabelle in Excel geschrieben, die mit den Geometrien in Inventor verknüpft ist.

## 5.6 Breitenoptimierung der logarithmischen Spirale

Mithilfe der Breitenoptimierung der logarithmischen Spirale kann diese an einen vom Nutzer angepasste Breite  $B_{festgelegt}$  angepasst werden. Das Ablaufschema der Breitenoptimierung ist in Abbildung 5-10 zu sehen. Ähnlich wie bei der Spiralanpassung wird das Unterprogramm für die Berechnungen als Funktion definiert. Diesmal sind jedoch der Deckscheibenwinkel  $\gamma$  und der Faktor für die Laufradbreite  $K_{LB}$  variabel. Der Deckscheibenwinkel kann Werte zwischen  $0^\circ$  und  $45^\circ$  annehmen und der Faktor für die Laufradbreite schwankt zwischen 1 und 3. Dieser wird in der Matlab-Anwendung als Aufdickung auf die Schaufeleintrittsbreite drauf gerechnet. Das untere Limit liegt bei 1, da die Spiraltiefe bei der Breitenoptimierung verkleinert wird und sich deshalb die Breite des Laufrades lediglich vergrößern kann, um die gewünschten Betriebsdaten trotzdem einhalten zu können.

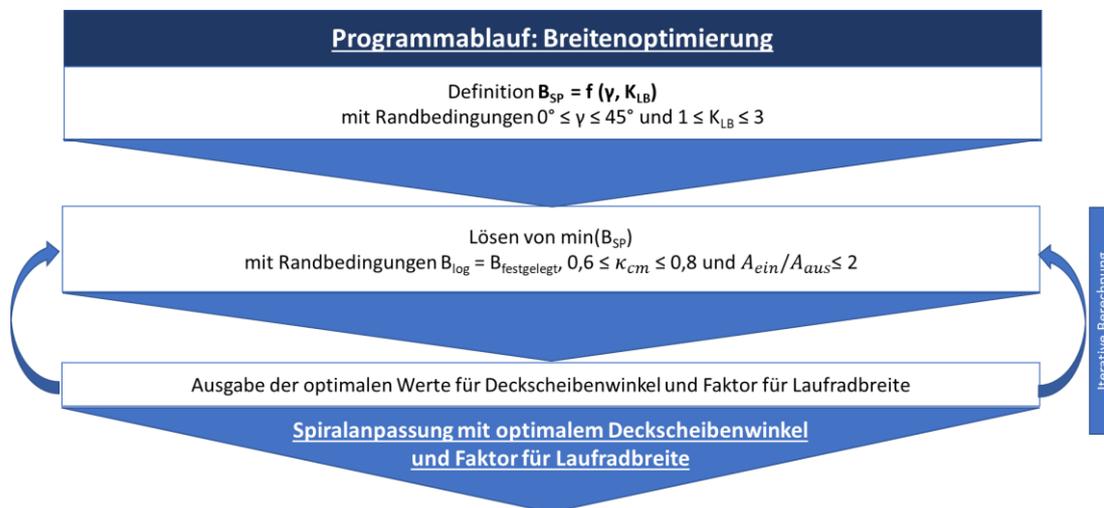


Abbildung 5-10: Programmablauf für die Breitenoptimierung

Das Unterprogramm des Bommes-Tools endet mit einem Fehlerterm. Dieser besteht aus der gewichteten Differenz aus der gewünschten Spiraltiefe und der tatsächlichen Spiraltiefe, der Einhaltung der meridionalen Verzögerungszahl und der Einhaltung des Flächenverhältnisses zwischen Eintritt und Austritt. Die meridionale Verzögerungszahl des optimierten Ventilators sollte von der meridionalen Verzögerungszahl nach Bommes (Formel 5-2) höchstens um 5 % abweichen (Horvat und Kameier 2009). Diese ist abhängig von den Durchmesserhältnissen des Laufradaußen- und Laufradinnendurchmessers und wird wie folgt berechnet:

$$\kappa_{cm_{des}} = \frac{0,2}{0,6} \cdot \frac{D_1}{D_2} + 0,5333 \quad 5-41$$

Das Flächenverhältnis zwischen dem Ein- und Austritt sollte im Optimalfall Werte zwischen 1,8 und 2,0 annehmen, was zu einer möglichst geringen Verzögerung der Strömung von Eintritt zu Austritt führen soll. (Bommes et al. 2002)

$$1,8 \leq \frac{A_{aus}}{A_{ein}} \leq 2,0 \quad 5-42$$

Die Gewichtungen der jeweiligen Einflussfaktoren werden, wie anfangs schon erwähnt, vom Anwender im Hauptskript festgelegt. Der verwendete Optimierer (Newton-Optimierer) minimiert diesen Fehlerterm, indem die Variablen Deckscheibenwinkel und Faktor für die Gehäusebreite variiert werden.

Danach werden die Werte für die Variablen an das Hauptprogramm übergeben, sodass danach die Anpassung der Vier-Radien-Spirale an die logarithmische Spirale erfolgen kann. Diese Spiralanpassung ist unvermeidbar, da die Geometriewerte der Vier-Radien-Spirale an die Exceltabelle und somit an das CAD-Modell in Inventor übergeben werden. Das Vorgehen wurde in dem vorherigen Abschnitt *Anpassung der Vier-Radien- Spirale an die logarithmischen Spirale* genau beschrieben.

## 6 Prognosegüte und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Um die Aussagefähigkeit des implementierten Bommies-Tools zu prüfen, wurde es mit dem Altmodell unter Excel verglichen. Sowohl bei der Spiralanpassung als auch bei einer zusätzlichen Breitenoptimierung, wurden drei Fälle aus dem Bommies-Bereich im Cordier-Diagramm gewählt. Die Eingabewerte in Form des Volumenstroms, der Druckdifferenz, der Drehzahl und der Dichte der jeweiligen Fälle sind Tabelle 6-1 zu entnehmen.

Tabelle 6-1: Input, Schnelllaufzahl und Durchmesserzahl der drei getesteten Ventilatoren

	1	2	3
Volumenstrom [ $m^3/h$ ]	1800	600	1500
Druckdifferenz [Pa]	1500	400	1750
Drehzahl [U/min]	3000	2900	2100
Dichte [ $kg/m^3$ ]	1,2	1,2	1,2
Schnelllaufzahl [-]	0,354	0,533	0,202
Durchmesserzahl [-]	2,886	2,192	4,533

### 6.1 Prognosegüte der dimensionslosen Kennzahlen

Der erste Fall ist in Abbildung 6-1 in das Cordier-Diagramm eingezeichnet. Der Ventilator befindet sich mittig in dem Bommies-Bereich.

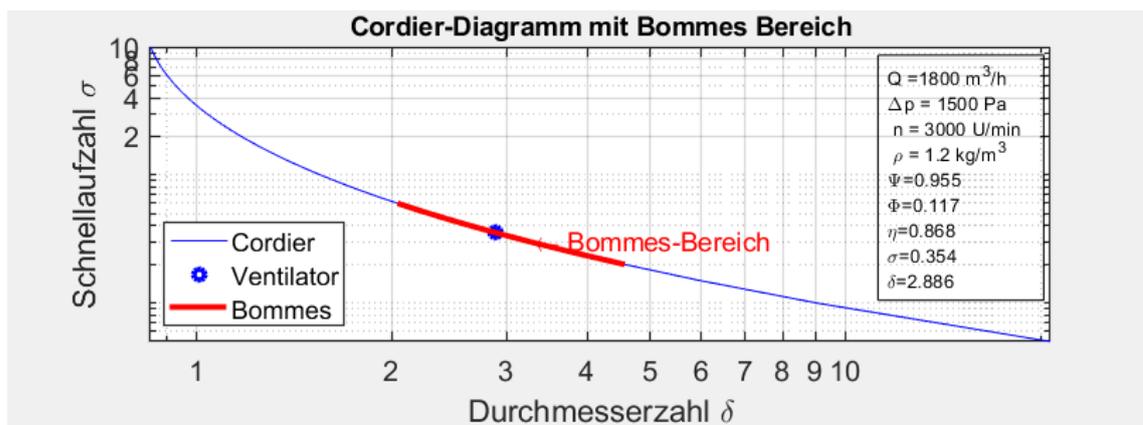


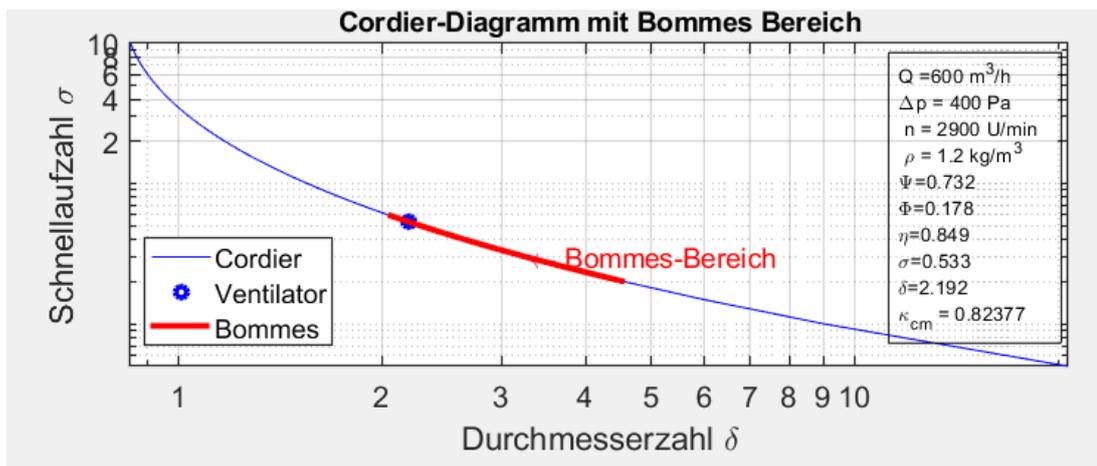
Abbildung 6-1: Einordnung des 1. Fall in das Cordier-Diagramm und Ausgabe der dimensionslosen Kennzahlen

In Tabelle 6-2 ist der Vergleich der dimensionslosen Kennzahlen des 1. Fall zu entnehmen. Diese haben keine Abweichung voneinander, da dieselben Formeln mit denselben Eingabewerten benutzt wurden.

**Tabelle 6-2: Vergleich der dimensionslosen Kennzahlen bei Matlab und Excel bei Fall 1**

	Excel	Matlab	Abweichung
$\psi$	0,955	0,955	0%
$\phi$	0,117	0,117	0%
$\eta$	0,868	0,868	0%
$\sigma$	0,354	0,354	0%
$\delta$	2,886	2,886	0%

Die Schnelllaufzahl des 2. Fall befindet sich an der oberen Grenze des Bommies-Bereichs, wie in Abbildung 6-2 gesehen werden kann.



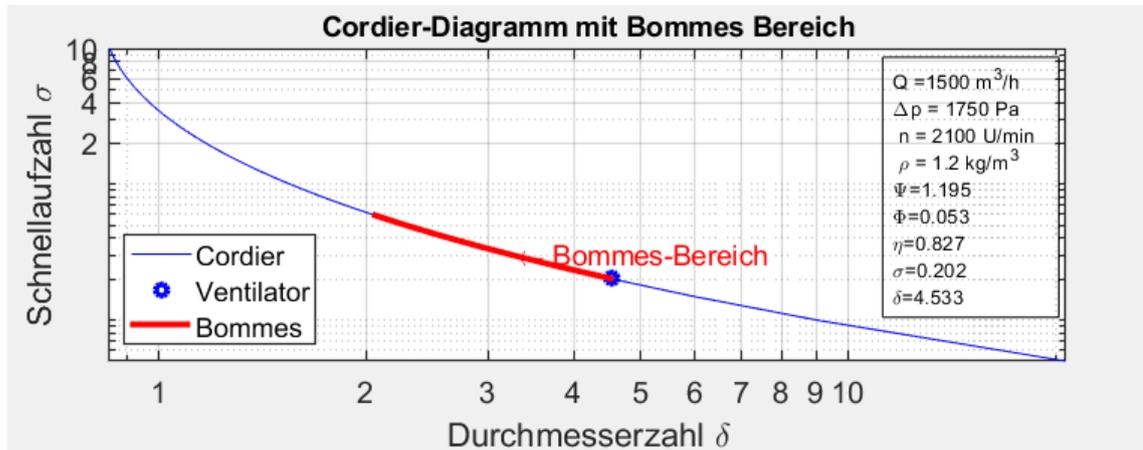
**Abbildung 6-2: Einordnung des 2. Fall in das Cordier-Diagramm und Ausgabe der dimensionslosen Kennzahlen**

Ebenso wie bei dem ersten Fall, sind auch bei diesem die dimensionslosen Kennzahlen identisch (vgl. Tabelle 6-3).

**Tabelle 6-3: Vergleich der dimensionslosen Kennzahlen bei Matlab und Excel bei Fall 2**

	Excel	Matlab	Abweichung
$\psi$	0,732	0,732	0%
$\phi$	0,178	0,178	0%
$\eta$	0,849	0,849	0%
$\sigma$	0,533	0,533	0%
$\delta$	2,192	2,192	0%

Bei Fall 3 befindet sich die errechnete Schnelllaufzahl im unteren Bommes Bereich. Das dazugehörige Cordier-Diagramm mit den errechneten dimensionslosen Kennzahlen ist in Abbildung 6-3 zu sehen.



**Abbildung 6-3: Einordnung des 3. Fall in das Cordier-Diagramm und Ausgabe der dimensionslosen Kennzahlen**

Die dimensionslosen Kennzahlen von dem Tool in Excel und dem in Matlab sind in Tabelle 6-4 gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass es zu keiner Abweichung kommt.

**Tabelle 6-4: Vergleich der dimensionslosen Kennzahlen bei Matlab und Excel bei Fall 3**

	Excel	Matlab	Abweichung
$\psi$	1,195	1,195	0%
$\phi$	0,053	0,053	0%
$\eta$	0,827	0,827	0%
$\sigma$	0,202	0,202	0%
$\delta$	4,533	4,533	0%

## 6.2 Prognosegüte bei der Spiralanpassung

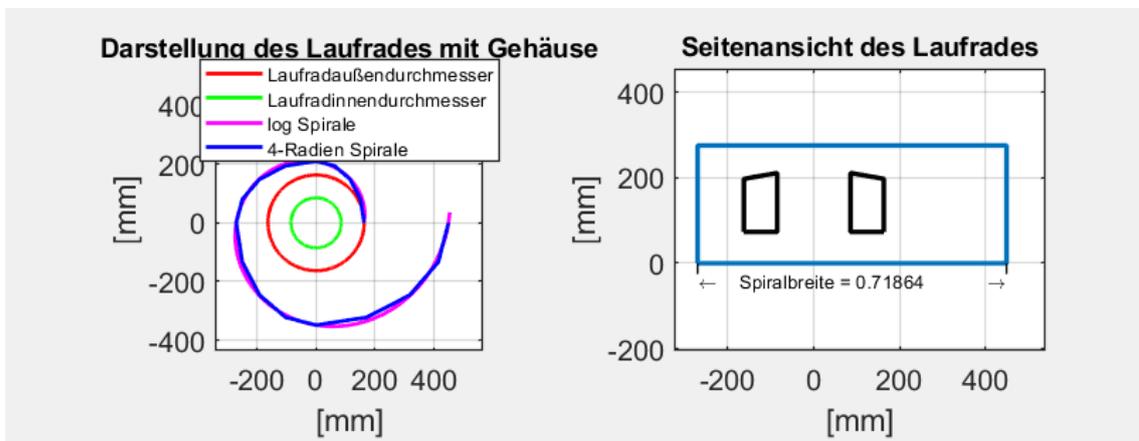
Für die Spiralanpassung wurden die drei Fälle aus Tabelle 6-1 einmal im Matlab-Skript und einmal in Excel durchgeführt. Hierbei wurde lediglich die Vier-Radien-Spirale an die logarithmische Spirale angepasst und die Geometriewerte miteinander verglichen. Die Tabellen allen Geometriedaten sind im Anhang zu finden.

Ausgewählte Werte für die Geometrie des ersten Falls sind in der Tabelle 6-5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen meist nur gering sind und höchstens 1 % betragen.

**Tabelle 6-5: Vergleich ausgewählter Geometriemaße zwischen Excel und Matlab für den 1. Fall**

		Ausgaben Excel	Ausgaben Matlab	Abweichung
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,326	0,326	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,170	0,170	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,139	0,138	1%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,125	0,124	1%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	10,0	10,0	0%
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	25,9	25,9	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,277	0,275	1%
<i>R_1quad</i>	m	0,186	0,186	0%
<i>R_2quad</i>	m	0,239	0,240	0%
<i>R_3quad</i>	m	0,307	0,309	1%
<i>R_4quad</i>	m	0,395	0,398	1%
<i>kappa4/ kappa1</i>		0,471	0,468	1%

Die Ausgabe der Geometrien aus Matlab ist als Seiten- und Draufsicht des Laufrades in Abbildung 6-4 zu sehen. Dabei liegt die Vier-Radien-Spirale genau auf der Logarithmischen.



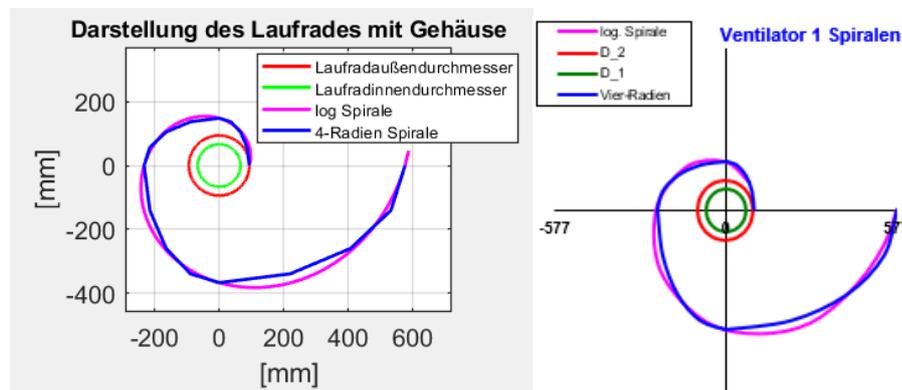
**Abbildung 6-4: Ausgabe der Draufsicht und Seitenansicht des Ventilators aus Fall 1**

Auch bei dem zweiten Fall gibt es kaum Unterschiede zwischen den Geometriedaten zwischen Matlab und Excel (vgl. Tabelle 6-6). Diese sind sogar bei allen Maßen unter 1 % und somit sind die Abweichungen noch geringer als bei dem ersten Fall.

**Tabelle 6-6: Vergleich ausgewählter Geometriemaße zwischen Excel und Matlab für den 2. Fall**

		Ausgaben Excel	Ausgaben Matlab	Abweichung
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,188	0,188	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,133	0,133	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,119	0,119	0%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,112	0,112	0%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	15,0	15,0	0%
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	18,5	18,5	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,238	0,238	0%
<i>R_1quad</i>	m	0,121	0,121	0%
<i>R_2quad</i>	m	0,190	0,190	0%
<i>R_3quad</i>	m	0,300	0,299	0%
<i>R_4quad</i>	m	0,472	0,471	0%
<i>kappa4/kappa1</i>		3,906	3,901	0%

Auch bei diesem Fall wurden zum Vergleich die Draufsichten beider Ventilatoren dargestellt (vgl. Abbildung 6-5). Es ist zu erkennen, dass die Proportionen gleich aussehen und die Vier-Radien-Spirale bei beiden Tools gleichermaßen auf die logarithmische Spirale angepasst wurde.



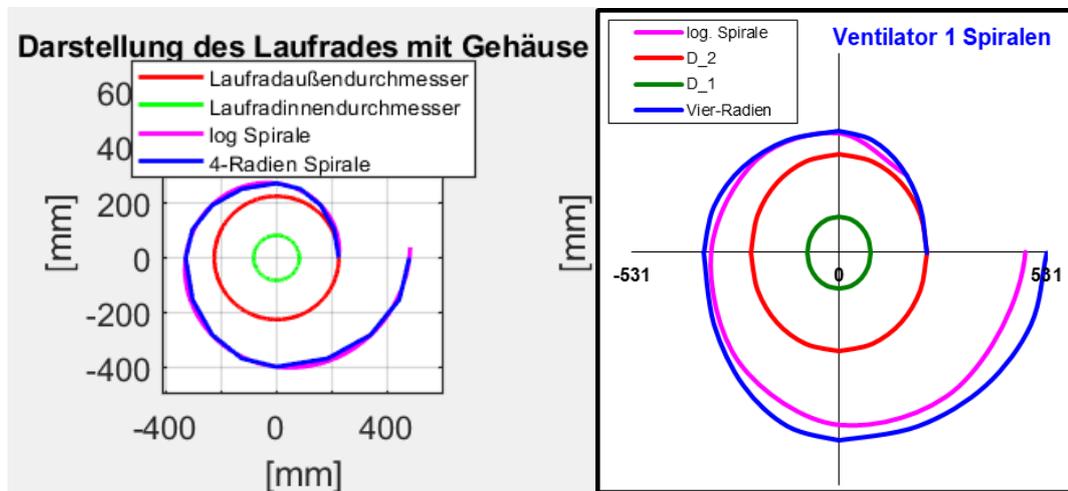
**Abbildung 6-5: Darstellung des Laufrades mit Gehäuse von dem 2. Fall in Matlab (links) und in Excel (rechts)**

Die Abweichungen der Ergebnisse zu dem letzten Fall sind Tabelle 6-7 zu entnehmen. Auch hier gibt es maximal Abweichungen von 1 %, weshalb auch hierbei die Ergebnisse beide Tools gleichermaßen akzeptabel sind.

**Tabelle 6-7: Vergleich ausgewählter Geometriemaße zwischen Excel und Matlab für den 3. Fall**

		Ausgaben Excel	Ausgaben Matlab	Abweichung
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,449	0,449	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,164	0,164	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,122	0,121	1%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,084	0,083	1%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	15,0	15,0	0%
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	35,1	35,1	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,243	0,242	1%
<i>R_1quad</i>	m	0,248	0,248	0%
<i>R_2quad</i>	m	0,299	0,300	0%
<i>R_3quad</i>	m	0,360	0,363	1%
<i>R_4quad</i>	m	0,434	0,438	1%
<i>kappa4/ kappa1</i>		1,765	1,766	0%

Obwohl es kaum Unterschiede zwischen den Maßen der Gehäusespirale zwischen Matlab und Excel gibt, weisen die Ansichten von oben auf dem Ventilator Unterschiede auf. Diese sind in Abbildung 6-6 zu sehen. Bei dem Excel-Tool liegt die Vier-Radien-Spirale nicht genau auf der logarithmischen.



**Abbildung 6-6: Darstellung des Laufrades mit Gehäuse von dem 3. Fall in Matlab (links) und in Excel (rechts)**

Schlussfolgernd gibt es nur sehr geringe Abweichungen der Geometriemaße bei der Spiralanpassung. Da bei der Spiralanpassung lediglich die Funktion nach einer Variabel auf-

gelöst wird, gibt es wenig Spielraum für die Berechnung. Die Ergebnisse sind somit nahezu gleich. Das Matlab-Tool liefert bei der Spiralanpassung genauso gute Ergebnisse wie das Tool in Excel.

### 6.3 Prognosegüte bei der Breitenoptimierung

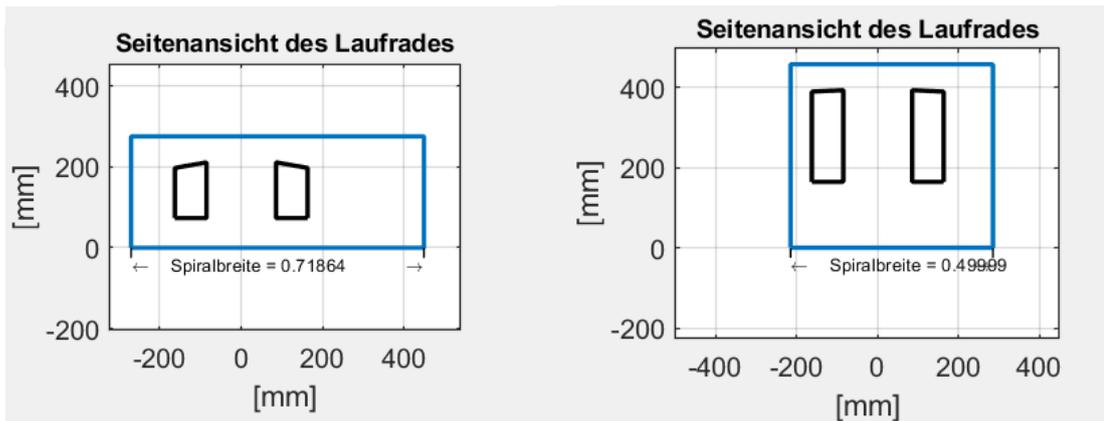
Die Abweichung der Ergebnisse bei der Spiralanpassung wird an den Fällen in Tabelle 6-8 geprüft, wobei die ersten drei auch schon in Hinblick auf die Spiralanpassung durchgeführt wurden. Nach einer Breitenoptimierung erfolgt immer eine Spiralanpassung. Jedoch wurde in dem vorherigen Abschnitt nachgewiesen, dass die Abweichungen der Geometrien zwischen Excel und Matlab bei der Spiralanpassung sehr gering sind, weshalb die hier aufgelisteten Abweichungen fast ausschließlich auf die Breitenoptimierung zurückzuführen sind.

Um die Ergebnisse der Breitenoptimierung aus Matlab mit denen aus Excel vergleichen zu können, muss die Gewichtung in Matlab allein auf der Einhaltung der gewünschten Breite liegen. Der Optimierer in Excel berücksichtigt weder genau die Grenzen der meridionalen Verzögerungszahl noch die Flächenverhältnisse zwischen dem Ein- und dem Austritt.

**Tabelle 6-8: Verschiedene Fälle für die Breitenoptimierung**

	1	2	3	4	5	6
<i>Volumenstrom [m<sup>3</sup>/h]</i>	1800	600	1500	1800	600	1500
<i>Druckdifferenz [Pa]</i>	1500	400	1750	1500	400	1750
<i>Drehzahl [U/min]</i>	3000	2900	2100	3000	2900	2100
<i>Dichte [kg/m<sup>3</sup>]</i>	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
<i>Schnelllaufzahl [-]</i>	0,354	0,533	0,202	0,267	0,189	0,159
<i>Durchmesserzahl [-]</i>	2,886	2,192	4,533	3,587	4,807	5,625
<i>Gewünschte Breite [m]</i>	0,5	0,7	0,7	0,7	2,6	0,12

Bei dem ersten Fall betrug die ursprüngliche Spiralbreite des reibungsfreien logarithmischen Gehäuses 0,7 m. Mithilfe der Breitenoptimierung wurde die Spiralbreite auf 0,5 m verkleinert, wie es in Abbildung 6-7 dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass durch die kleinere Spirale das Laufrad und somit das Gehäuse breiter wird, damit die eingegebenen Werte eingehalten werden können.



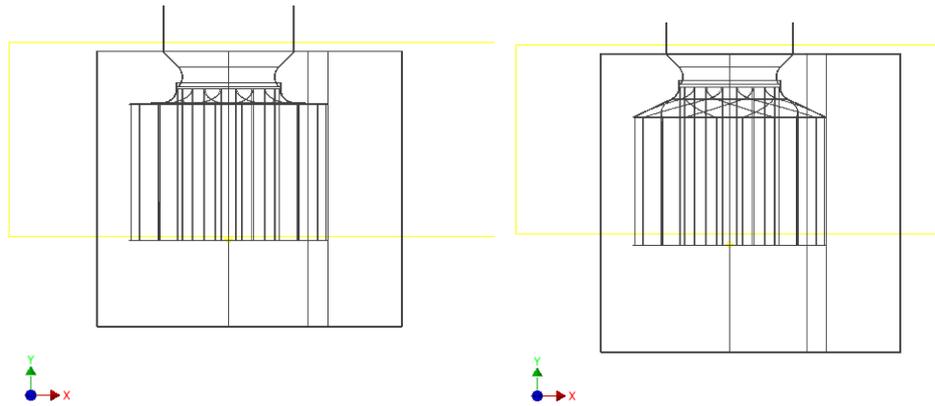
**Abbildung 6-7: Vergleich der Seitenansichten ohne (links) und mit Breitenoptimierung auf 0,5 m (rechts) aus Matlab beim 1. Fall**

Ein Ausschnitt der Geometriemaße ist in Tabelle 6-9 zu sehen. Die vollständigen Tabellen für den Vergleich der Breitenoptimierung sind im Anhang zu finden. Im Vergleich zu dem Excel-Tool gibt es Abweichungen um circa 10 % bei der Schaufeleintrittsbreite und der Gehäusebreite. Dies lässt sich mit einem unterschiedlich optimierten Deckscheibenwinkel begründen. Da die Ventilatoren genau gleich viel fördern sollen, muss bei einem steileren Deckscheibenwinkel auch die Schaufeleintrittsbreite und somit muss auch der Faktor für die Breite größer werden. Damit wird auch das Gehäuse breiter. Im Allgemeinen gibt es nicht nur eine richtige Lösung, da iterativ vorgegangen wird. Beide Geometrien können somit richtig sein und zu guten Ergebnissen für den vorgegebenen Fall führen.

**Tabelle 6-9: Vergleich der Maße zwischen Excel und Matlab bei einer Breitenoptimierung bei Fall 1**

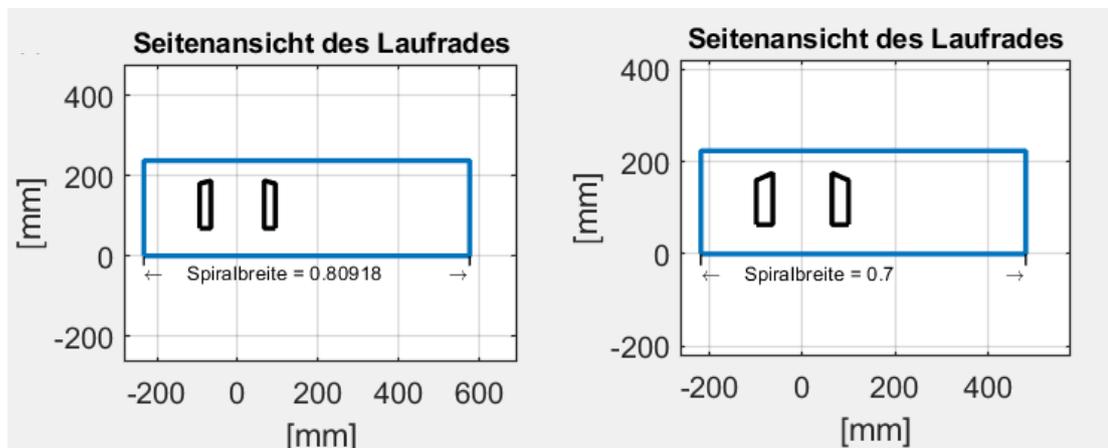
		<i>Matlab</i>	<i>Excel</i>	<i>Abweichung</i>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,326	0,326	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,170	0,170	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,228	0,255	10%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,225	0,217	3%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,457	0,509	10%
<i>4-Radien-Spirale Breite</i>	m	0,500	0,505	1%
<i>4-Radien-Spirale Höhe</i>	m	0,435	0,438	1%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	2,609	25,6	90%
<i>Faktor Spiralbreite</i>		2,952	3,289	10%

In Abbildung 6-6 sind die Geometrien der Ventilatoren aus Inventor für die Breitenoptimierung des 1. Fall aus dem Matlab-Tool und dem Excel-Tool gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass das Laufrad und das Gehäuse aus Excel breiter sind, da der Deckscheibenwinkel deutlich steiler als bei dem Laufrad aus Matlab verläuft.



**Abbildung 6-8: Vergleich der Geometrien aus Inventor für die Breitenoptimierung des 1. Fall aus Matlab (links) und aus Excel (rechts)**

Der zweite Fall wurde von einer Spirallbreite bei einer reibungsfreien Strömung von circa 0,809 m auf 0,7 m reduziert. Die neue Geometrie aus Matlab ist der alten mit nur einer Spiralanpassung in Abbildung 6-9 gegenübergestellt. Im Gegensatz zu dem 1. Fall ist die Verringerung der Spirallbreite mit nur 0,1 m gering, weshalb auch die Gehäusebreite nur geringfügig größer wird.



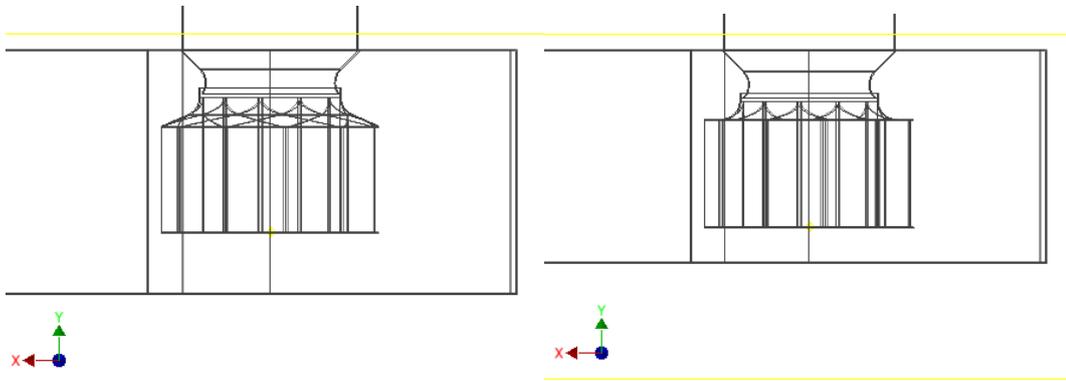
**Abbildung 6-9: Vergleich der Seitenansichten ohne (links) und mit Breitenoptimierung auf 0,7 m (rechts) aus Matlab beim 2. Fall**

In der Tabelle 6-10 sind die Differenzen der neuen Geometriemaße durch die Breitenoptimierung gegenübergestellt. Auch hierbei gibt es Abweichungen der Maße bei der Schaufeleintrittsbreite und der Gehäusebreite, was durch den unterschiedlichen Deck-scheibenwinkel zustande kommt. Im Gegensatz zu dem ersten Fall ist diesmal der Deck-scheibenwinkel aus Excel kleiner als der aus Matlab.

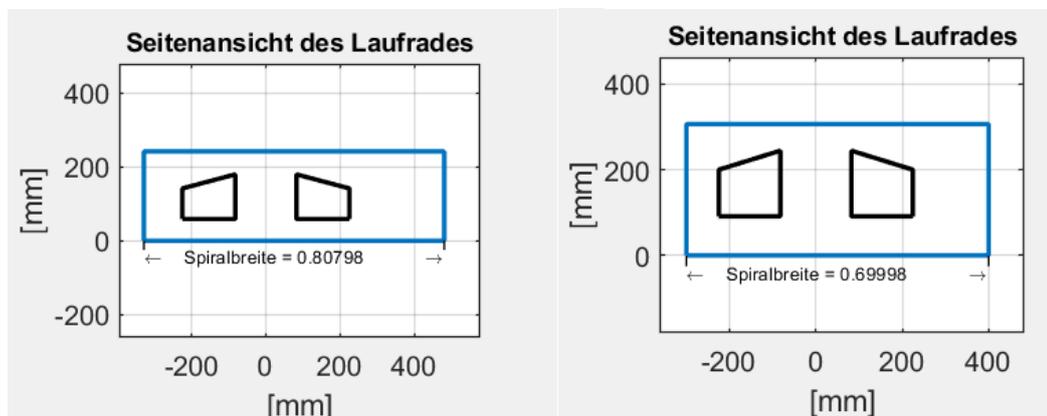
**Tabelle 6-10: Vergleich der Maße zwischen Excel und Matlab bei einer Breitenoptimierung bei Fall 2**

		<i>Matlab</i>	<i>Excel</i>	<i>Abweichung</i>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,199	0,199	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,128	0,128	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,112	0,096	16%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,096	0,096	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,224	0,192	16%
<i>4-Radien-Spirale Breite</i>	m	0,700	0,701	0%
<i>4-Radien-Spirale Höhe</i>	m	0,472	0,472	0%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	23,74	0,00	
<i>Faktor Spiralbreite</i>		1,79	1,55	16%

Die Geometrien aus Inventor in Abbildung 6-10 zeigen das Verhalten aus der Tabelle, da die Breite des Laufrades aus Matlab größer und der Deckscheibenwinkel steiler als die der Geometrie aus Excel sind.



**Abbildung 6-10: Vergleich der Geometrien aus Inventor für die Breitenoptimierung des 2. Fall aus Matlab (links) und aus Excel (rechts)**



**Abbildung 6-11: Vergleich der Seitenansichten ohne (links) und mit Breitenoptimierung auf 0,7 m (rechts) aus Matlab beim 3. Fall**

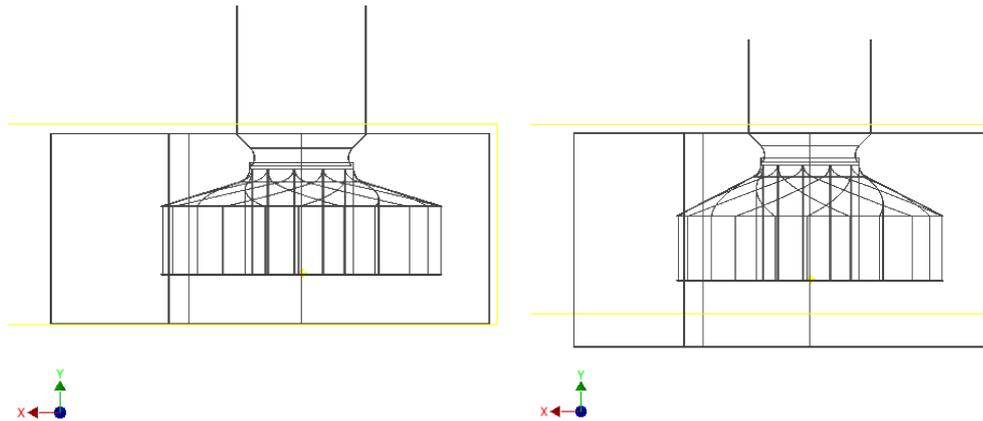
Bei dem dritten Fall wurde die gewünschte Spiralbreite auf 0,7 m eingestellt, sodass diese sich im Vergleich zu dem reibungsfreien Fall um circa 0,1 m verkleinert. Der Vergleich der Geometrien vor und nach der Breitenoptimierung sind in Abbildung 6-11 abgebildet. Durch die verkleinerte Spiralbreite des Gehäuses, wurde die Breite des Gehäuses größer.

Tabelle 6-11 zeigt die Abweichung der Maße zwischen den Geometrien aus Matlab und Excel für den 3. Fall mit Breitenoptimierung. Wieder sind Abweichungen bei der Schaufeleintrittsbreite und der Gehäusebreite zu erkennen, die durch den unterschiedlichen Deckscheibenwinkel zustande kommen.

**Tabelle 6-11: Vergleich der Maße zwischen Excel und Matlab bei einer Breitenoptimierung bei Fall 3**

		<i>Matlab</i>	<i>Excel</i>	<i>Abweichung</i>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	<i>m</i>	0,449	0,449	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	<i>m</i>	0,164	0,164	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	<i>m</i>	0,153	0,182	16%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	<i>m</i>	0,109	0,108	0%
<i>Gehäusebreite</i>	<i>m</i>	0,306	0,364	16%
<i>4-Radien-Spirale Breite</i>	<i>m</i>	0,700	0,697	0%
<i>4-Radien-Spirale Höhe</i>	<i>m</i>	0,606	0,604	0%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	<i>°</i>	17,3	27,3	37%
<i>Faktor Spiralbreite</i>		2,25	2,68	16%

Ein Ausschnitt der Geometrien in Inventor ist in Abbildung 6-12 dargestellt. Auch hier sind die Unterschiede des Deckscheibenwinkels und die daraus resultierende Veränderung der Breite zu erkennen. Während beide Laufräder dieselbe Spiralbreite aufweisen, sind die Maße für die Gehäusebreite und die Laufradbreite aus Excel größer.



**Abbildung 6-12: Vergleich der Geometrien aus Inventor für die Breitenoptimierung des 3. Fall aus Matlab (links) und aus Excel (rechts)**

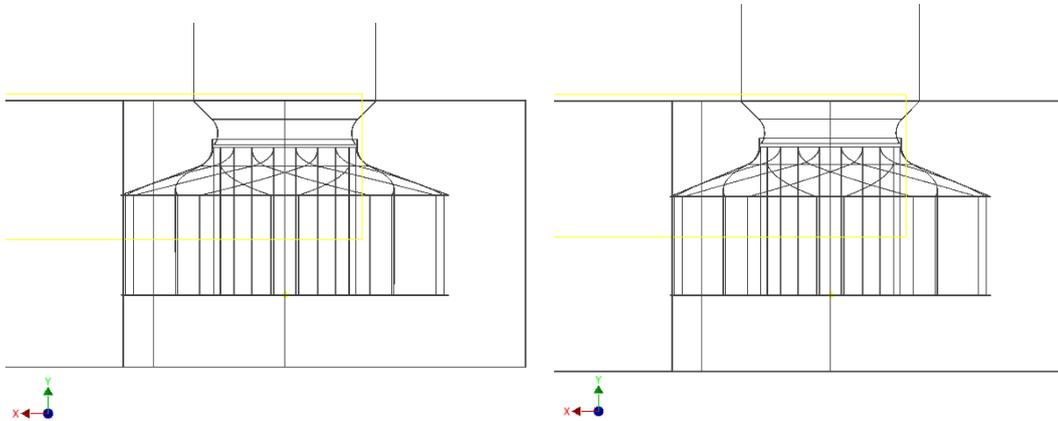
Nachdem zuvor drei beliebige Fälle aus Bommes-Bereich zwischen Matlab und Excel getestet wurden, wird das Matlab-Tool nun für sogenannte Extremfälle geprüft. Die Kenndaten dieser drei Extremfälle sind auch in Tabelle 6-8 aufgezeigt.

Bei Fall 4 handelt es sich um das Referenzgebläse RV720, wo das Laufrad im Vergleich zu den anderen getesteten Ventilatoren breit ist. Somit ist die Eintrittsgeschwindigkeit ungefähr gleich der Austrittsgeschwindigkeit. Die Ergebnisse der Maße für die Ventilatorgeometrie aus Matlab wurden in Tabelle 6-12 denen aus Excel gegenübergestellt. Hier gibt es lediglich wieder Abweichungen bei der Gehäusebreite und der Schaufelaustrittsbreite.

**Tabelle 6-12: Vergleich der Geometriemaße zwischen Matlab und Excel für den Fall 4**

		<i>Matlab</i>	<i>Excel</i>	<i>Abweichung</i>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,720	0,720	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,318	0,318	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,295	0,306	3%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,221	0,222	1%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,591	0,612	3%
<i>4-Radien-Spirale Breite</i>	m	1,300	1,289	1%
<i>4-Radien-Spirale Höhe</i>	m	1,074	1,068	1%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	20,3	22,6	10%
<i>Faktor Spiralbreite</i>		2,14	2,22	3%

Die Seitenansicht der Geometrien aus Inventor für Matlab und Excel sind in Abbildung 6-13 dargestellt. Anhand der Geometrien sind nur leichte Abweichungen zu sehen, da der Deckscheibenwinkel einen Unterschied von gerade  $2^\circ$  aufweist.



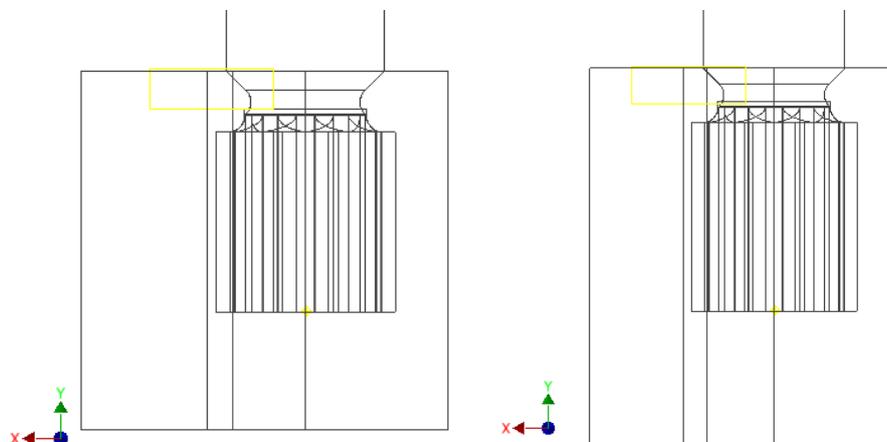
**Abbildung 6-13: Vergleich der Geometrien aus Inventor für die Breitenoptimierung des Fall 4 aus Matlab (links) und aus Excel (rechts)**

Bei Extremfall 5 handelt es sich um einen Windkanal, dessen Schnelllaufzahl mit circa 0,6 gerade noch im Bommies-Bereich liegt. Die Geometriemaße aus Matlab und Excel sind in Tabelle 6-13 aufgezeigt, wobei die Abweichungen höher als bei dem vorherigen Fall sind. Die Schaufeleintrittsbreite, die Schaufelaustrittsbreite, der optimierte Faktor für die Spirallbreite, die 4-Radien-Spirallbreite und die Gehäusebreite weisen Abweichungen um die 10 % auf, obwohl diesmal der Deckscheibenwinkel gleich groß ist. Der Grund dafür ist die unterschiedlich optimierte Gehäusebreite. Während das Excel-Tool diese mit 2,6 m einhält, erreicht das Matlab-Tool nur eine Spirallbreite von gerade 2,9 m. In dem Matlab Tool wurde der Faktor für die Laufradbreite stärker begrenzt, weshalb die vorgegebenen Werte nicht eingehalten werden können.

**Tabelle 6-13: Vergleich der Geometriemaße zwischen Matlab und Excel für den Fall 5**

		<i>Matlab</i>	<i>Excel</i>	<i>Abweichung</i>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	1,409	1,409	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,953	0,953	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	1,417	1,608	12%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	1,417	1,608	12%
<i>Gehäusebreite</i>	m	2,834	3,217	12%
<i>4-Radien-Spirale Breite</i>	m	2,865	2,615	10%
<i>4-Radien-Spirale Höhe</i>	m	2,281	2,142	6%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	0,0	0,0	
<i>Faktor Spiralbreite</i>		3,00	3,41	12%

Auch anhand der Geometrien in Abbildung 6-14 können die Unterschiede sowohl in der Breite als auch an der Höhe gesehen werden. Da das Matlab-Tool die gewünschte Spiralbreite von 2,6 m um circa 10 % verfehlt, verändern sich auch die anderen Geometriewerte. Das Excel-Tool dahingegen presst den Ventilator genau in das gewünschte Maß, was jedoch einen hohen optimierten Faktor für die Spiralbreite und somit nach Abbildung 5-8 zu einem schlechteren Wirkungsgrad führt.



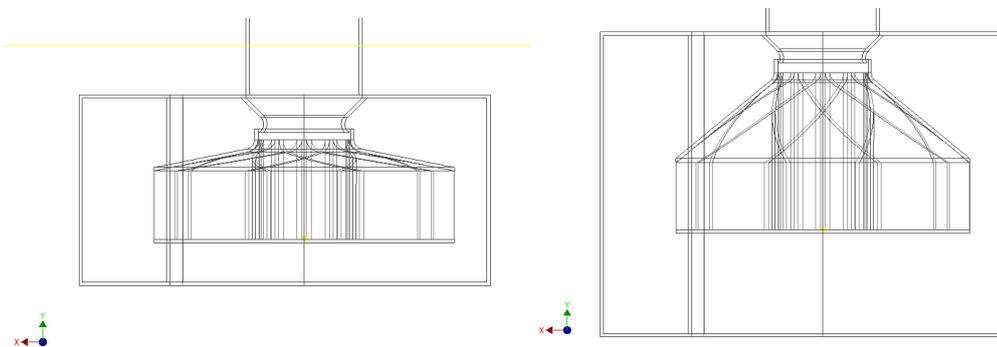
**Abbildung 6-14: Vergleich der Geometrien aus Inventor für die Breitenoptimierung des Fall 5 aus Matlab (links) und aus Excel (rechts)**

Der Fall 6 liegt mit einer sehr niedrigen Schnelllaufzahl von 0,159 noch unter dem Bomes-Bereich. Mit einer Spiralbreite von 0,12 m handelt es sich um einen kleinen Ventilator. Die genauen Maße der Geometrien sind in Tabelle 6-14 abgebildet. Der Ventilator weist zwischen Excel und Matlab Unterschiede bei der Schaufeleintrittsbreite und der

Gehäusebreite auf, was wieder durch den unterschiedlich optimierten Deckscheibenwinkel begründet werden kann. Dieses Verhalten wurde bei den meisten hier getesteten Ventilatoren beobachtet. In Abbildung 6-15 ist der unterschiedliche Winkel der Deckscheibe und die daraus resultierenden Geometrieänderungen gut zu erkennen.

**Tabelle 6-14: Vergleich der Geometriemaße zwischen Matlab und Excel für den Fall 6**

		<b>Matlab</b>	<b>Excel</b>	<b>Abweichung</b>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,089	0,089	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,027	0,027	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,027	0,046	42%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,020	0,020	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,053	0,092	42%
<i>4-Radien-Spirale Breite</i>	m	0,120	0,121	1%
<i>4-Radien-Spirale Höhe</i>	m	0,109	0,110	1%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	11,3	39,6	71%
<i>Faktor Spiralbreite</i>		2,45	4,23	42%



**Abbildung 6-15: Vergleich der Geometrien aus Inventor für die Breitenoptimierung des Fall 6 aus Matlab (links) und aus Excel (rechts)**

Insgesamt sind die Abweichungen zwischen den berechneten Maßen für die Geometrien gering. Die höchste Abweichung zeigt der Deckscheibenwinkel auf, der zusammen mit dem Faktor für die Spiralbreite die variablen Parameter für die Breitenoptimierung sind. Mit einem höheren Deckscheibenwinkel muss die Schaufeleintrittsbreite größer werden, um dieselben Ansprüche erfüllen zu können und die gleichen Ergebnisse für den jeweiligen Volumenstrom mit der Druckerhöhung und der Drehzahl zu ergeben. Mit höherer Schaufeleintrittsbreite wird somit das Laufrad breiter, weshalb auch die Gehäusebreite größer wird. Somit gibt es wegen dem unterschiedlichen Deckscheibenwinkel vor allem

Abweichungen bei der Schaufeleintrittsbreite und der Gehäusebreite. Bei der Breitenoptimierung wird iterativ vorgegangen, weshalb es nicht nur eine richtige Lösung gibt und sowohl die Berechnungen aus Matlab als auch die aus Excel passende Geometrien liefern.

Bei einer großen Verkleinerung der Spiralbreite im Vergleich zu der logarithmischen Spiralbreite gibt es starke Abweichungen der Geometrien. Während das Excel-Tool die gewünschte Spiralbreite auch in diesem Fall genau einhält, weicht die Breite des Matlab-Tools stärker ab. Das Matlab-Tool hat einen begrenzten Faktor für die Spiralbreite, da es sonst zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades kommt.

## **6.4 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus Matlab untereinander**

Da die Berechnungen der Breitenoptimierung in Matlab iterativ ablaufen, kommen trotz denselben Eingabewerten nicht genau dieselben Geometriemaße bei mehrmaligen Abläufen heraus. Bei einer iterativen Berechnung nähert sich das Ergebnis immer mehr der Lösung an und stoppt, wenn eine bestimmte Anzahl an Iterationsschritten erreicht wurde oder das Ergebnis sich nur noch minimal ändert und sich somit ein stabiler Verlauf eingestellt hat. Durch die in Schritten erfolgende Annäherung an die Lösung kommt es zu Iterationsfehlern. (Neifach 2020)

Wie an der Breitenoptimierung im ersten Fall in Tabelle 6-15 dargestellt, wurden für alle sechs Fälle aus Tabelle 6-8 die Geometrien für jeweils 10 Durchläufe getestet (siehe Anhang). Dabei wurde die Einhaltung der gewünschten Spiralbreite fünfmal so hoch wie die Einhaltung der meridionalen Verzögerungszahl und die der Flächenverhältnisse gewichtet. Die meisten Abweichungen untereinander gibt es bei dem Deckscheibenwinkel, der auch zu einer unterschiedlichen Gehäusebreite und Schaufeleintrittsbreite führt. Des Weiteren gibt es leichte Abweichungen bei der meridionalen Verzögerungszahl.

**Tabelle 6-15: Vergleich der Ergebnisse von drei Durchläufen des 1. Fall**

		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Vergleich 2 zu 1</b>	<b>Vergleich 3 zu 1</b>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,326	0,326	0,326	0%	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,170	0,170	0,170	0%	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,139	0,133	0,138	5%	1%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,100	0,100	0,100	0%	0%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	26,5	22,6	26,0	15%	2%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,292	0,279	0,291	5%	1%
<i>R<sub>1quad</sub></i>	m	0,193	0,193	0,193	0%	0%
<i>R<sub>2quad</sub></i>	m	0,264	0,264	0,264	0%	0%
<i>R<sub>3quad</sub></i>	m	0,360	0,360	0,360	0%	0%
<i>R<sub>4quad</sub></i>	m	0,492	0,492	0,492	0%	0%
<i>K<sub>1</sub>/K<sub>4</sub></i>		0,391	0,391	0,391	0%	0%
<i>K<sub>cm</sub></i>		0,706	0,673	0,702	5%	1%

Dieselben Auffälligkeiten sind bei dem 2. Fall zu beobachten, der in Tabelle 6-16 dargestellt ist. Der Grund für die Abweichungen ergibt sich auch hier aus dem variablen Deckscheibenwinkel und dem Faktor für die Breite, die iterativ ermittelt werden. Wenn der Deckscheibenwinkel sich erhöht, muss die Schaufeleintrittsbreite und die Gehäusebreite auch höher werden, damit der gleiche Volumenstrom bei demselben Druck gefördert werden kann. Wie auch schon bei dem Vergleich zwischen den Ergebnissen aus Matlab und Excel erwähnt wurde, gibt es nicht nur ein richtiges Ergebnis.

**Tabelle 6-16: Vergleich der Ergebnisse von drei Durchläufen des 2. Fall**

		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Vergleich 2 zu 1</b>	<b>Vergleich 3 zu 1</b>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,199	0,199	0,199	0%	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,128	0,128	0,128	0%	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,099	0,101	0,097	2%	1%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,083	0,083	0,083	0%	0%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	23,3	26,4	21,3	13%	9%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,166	0,166	0,166	0%	0%
<i>R<sub>1quad</sub></i>	m	0,128	0,128	0,128	0%	0%
<i>R<sub>2quad</sub></i>	m	0,202	0,202	0,202	0%	0%
<i>R<sub>3quad</sub></i>	m	0,319	0,319	0,319	0%	0%
<i>R<sub>4quad</sub></i>	m	0,503	0,503	0,503	0%	0%
<i>K<sub>1</sub>/K<sub>4</sub></i>		0,255	0,255	0,255	0%	0%
<i>K<sub>cm</sub></i>		0,728	0,745	0,717	2%	1%

Der Vergleich von drei Durchläufen von Fall 3 ist in Tabelle 6-17 aufgeführt. Im Gegensatz zu Fall 1 und 2 gibt es hier kaum Abweichungen, die maximal 1 % betragen.

**Tabelle 6-17: Vergleich der Ergebnisse von drei Durchläufen des 3. Fall**

		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Vergleich 2 zu 1</b>	<b>Vergleich 3 zu 1</b>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,449	0,449	0,449	0%	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,164	0,164	0,164	0%	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,101	0,101	0,102	0%	1%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,052	0,052	0,053	0%	1%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	18,9	18,8	19,0	0%	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,212	0,211	0,213	0%	1%
<i>R<sub>1quad</sub></i>	m	0,264	0,264	0,264	0%	0%
<i>R<sub>2quad</sub></i>	m	0,357	0,357	0,356	0%	0%
<i>R<sub>3quad</sub></i>	m	0,482	0,483	0,480	0%	0%
<i>R<sub>4quad</sub></i>	m	0,650	0,653	0,647	0%	1%
<i>K<sub>1</sub>/ K<sub>4</sub></i>		0,406	0,405	0,408	0%	0%
<i>K<sub>cm</sub></i>		0,688	0,688	0,688	0%	0%

Insgesamt ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei dem Durchlauf mit denselben Eingabewerten gut. Zwar gibt es zwischendurch vor allem Abweichungen bei dem Deckscheibenwinkel, was jedoch nicht zu einem schlechteren Ergebnis führt.

## 7 Numerische Berechnung von Strömungsmaschinen

Für die Fälle 1 bis 3 aus Tabelle 6-8 wurde nach der Auslegung mit Breitenoptimierung und Spiralanpassung durch das Bommes-Tool in Matlab eine numerische Berechnung durchgeführt. Damit soll die Aussagekraft des Matlab-Tools in Hinsicht auf die Einhaltung der Druckdifferenz und des Wirkungsgrades validiert werden. Des Weiteren kann geprüft werden, ob der Ventilator mit dem vorgegeben Auslegungspunkt im optimalen Bereich betrieben wird.

### 7.1 Durchführung der numerischen Berechnung mittels OpenFoam

Um eine numerische Berechnung durchführen zu können, muss zuerst die aus Matlab ausgegebene Geometrie aufbereitet werden. In Abbildung 7-1 ist die ausgegebene Geometrie aus den Berechnungen des Matlab-Tools in der Simulationssoftware „Inventor“ am Beispiel des ersten Falls CAD-Modell dargestellt. Die vorgegebenen Betriebswerte sind dabei ein Volumenstrom von  $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ , einer Druckdifferenz von  $1500 \text{ Pa}$  und einer Drehzahl von  $3000 \text{ U}/\text{min}$ . Die Gewichtung für die Breitenoptimierung liegt bei diesem Fall nur auf der Einhaltung der Spiraltiefe und ist in Tabelle 6-8 zu finden. Außerdem wurden die numerischen Berechnungen auch bei Fall 2 und Fall 3 durchgeführt.

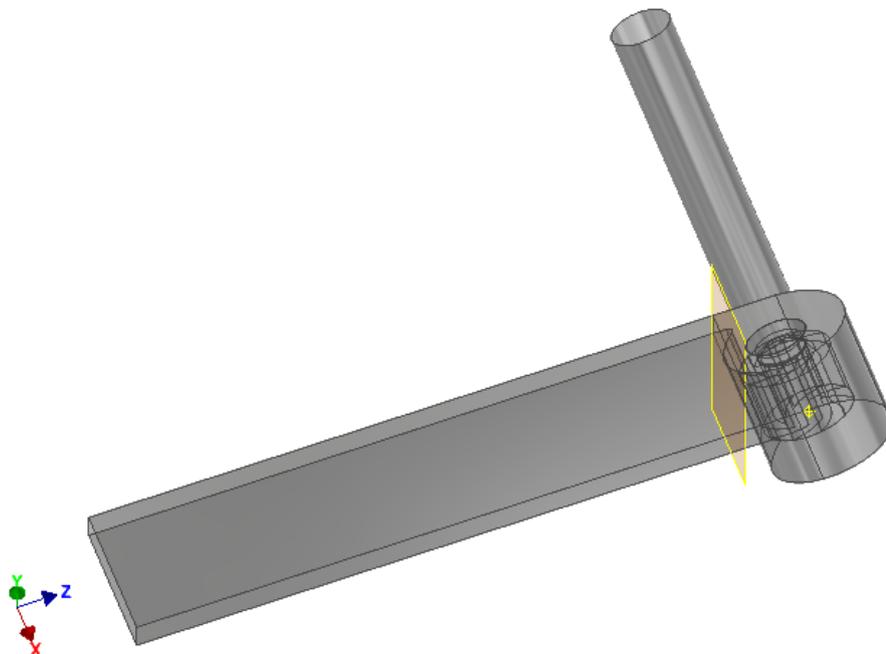
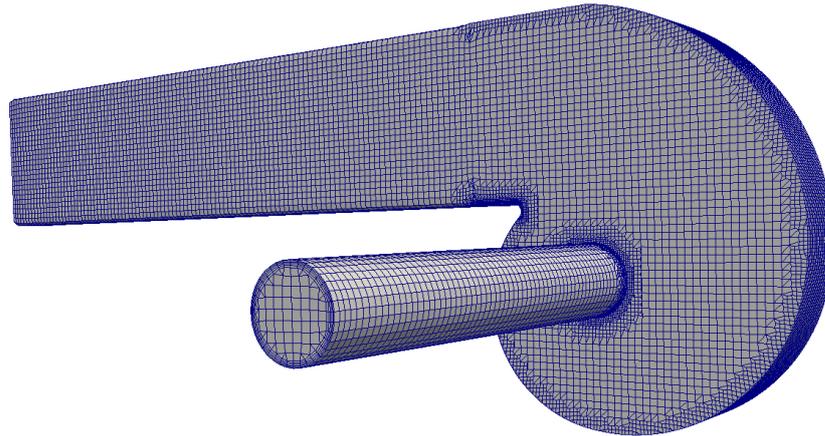


Abbildung 7-1: CAD-Darstellung des ersten Falls mit Geometriemaßen aus dem Bommes-Tool in Matlab

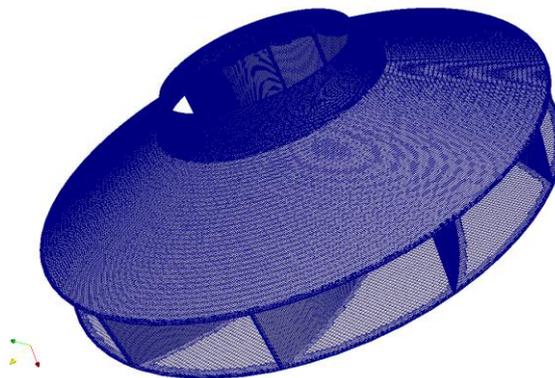
Im Gegensatz zu der Ausgabe des Excel-Tools sind bei dem CAD-Modell neben dem Gehäuse und dem Laufrad direkt der Ein- und Austrittsdurchmesser mit dargestellt. Diese sind wichtig, damit die Strömung vor und nach dem Ventilator mitberücksichtigt werden kann. Bei einem frei ausblasenden Ventilator kann die Energie des Austrittsstrahl nicht genutzt werden, weshalb andere Ergebnisse zustande kommen würden.

Um das CAD-Modell weiter verarbeiten zu können, wird dieses von einer Baugruppe aus mehreren Komponenten in ein Bauteil abgeleitet und in eine Parasolid-Textdatei importiert. Mit einer Vernetzungssoftware namens „Icem“ wird jede Fläche des Ventilators einzeln benannt und dabei die Freiheitsgrade für die spätere Vernetzung festgelegt. Dabei ist es wichtig, dass Flächen, wo die Strömung viele Veränderungen aufweist, fein vernetzt werden. Das ist beispielsweise bei der Gehäusezunge oder bei Stirnflächen wichtig. Dagegen benötigt der Ein- und Austrittskanal keine Verfeinerung des Netztes, da an diesen Stellen strömungstechnisch nicht viel passiert. Eine Ausnahme bildet die Wandgrenzschicht, welche entsprechend mit einer wachsenden Prismenschicht (Inflation Layer) abgebildet wird. Aus ICEM werden zwei Dateien im STL-Format exportiert, wobei die eine nur die rotierenden Elemente des Laufrades enthält und die andere die statischen, die zu dem Gehäuse gehören.

Für die Durchführung der Strömungsberechnung wurde die Simulationssoftware „OpenFoam“ angewendet, die frei erhältlich ist. OpenFoam setzt sich aus einer Ordnerstruktur zusammen. Mithilfe von Matlab-Routine werden die OpenFoam-Skripte und der Vernetzer der Software gesteuert und befüllt. Nachdem die STL-Dateien an die passende Stelle in diese eingefügt wurden, kann in einem Ordner namens „FOAM“ die Geometrie mithilfe eines Matlab-Skriptes vernetzt werden. Die Vernetzung des ersten Falls wurde mithilfe der Open-Source-Anwendung „ParaView“ in Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 dargestellt, die zu Visualisierung genutzt wurde. Es ist zu erkennen, dass das Netz relativ strukturiert ist und vornehmlich aus Hexaedern besteht (Hex Dominant).



**Abbildung 7-2: Vernetzung des Stators für den ersten Fall mit einem Volumenstrom von 1800 m<sup>3</sup>/s, einer Druckdifferenz von 1500 Pa, einer Drehzahl von 3000 U/min und einer Dichte von 1,2 kg/m<sup>3</sup>**



**Abbildung 7-3: Vernetzung des Rotors für den ersten Fall mit 1800 m<sup>3</sup>/s Volumenstrom, 1500 Pa Druckdifferenz, 3000 U/min Drehzahl und 1,2 kg/m<sup>3</sup> Dichte**

An den Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 ist zu erkennen, dass das Gehäuse sehr grob vernetzt ist, während das Laufrad ein deutlich feineres Netz aufweist. An dem Rotor ist die Feinheit des Netzes besonders an den Stirnflächen und am Laufradeintritt zu erkennen.

Die Anzahl der Elemente des ersten Ventilators, der für einen Volumenstrom von 1800 m<sup>3</sup>/s, einer Druckdifferenz von 1500 Pa, einer Drehzahl von 3000 U/min und einer Dichte von 1,2 kg/m<sup>3</sup> ausgelegt wurde, beträgt 5607876 Zellen und 17442540 Oberflächen. Bei der Patch-Topologie für mehrfachverbundene Flächen ergeben sich für die Rotorebene eine Anzahl von 625564 Flächen und für die Statorebene eine Anzahl von 106198 Flächen. Sowohl die maximale Offenheit der Flächen als auch das maximale Flächenverhältnis sind in Ordnung. Bei Orthogonalität des Netzes gibt es zwar 3696 Flächen, die

stark nicht orthogonal sind, was aber auch in Ordnung ist. Jedoch gibt es 5676 schiefe Flächen, die die Qualität der Ergebnisse beeinträchtigen können. Die Qualitätskriterien der Simulationen für die Netze stammen aus den OpenFoam Dokumentationen.

Der zweite getestete Ventilator wurde für einen Volumenstrom von  $600 \text{ m}^3/\text{h}$ , einer Druckerhöhung von  $400 \text{ Pa}$  und einer Drehzahl von  $3000 \text{ U}/\text{min}$  ausgelegt. Das Netz dieses Ventilators besteht nach der Prüfung durch OpenFoam aus  $5079744$  Zellen und  $15772279$  Oberflächen. Die Prüfung der Patch-Topologie für mehrfachverbundene Oberflächen ergibt für den Stator  $134717$  Zellen und für den Rotor  $515372$ . Die Qualitätskriterien maximale Öffnung der Zellen, maximale Flächenverhältnisse, maximale und minimale Flächengröße und Volumen sind in Ordnung. Auch hierbei gibt es stark nicht orthogonale Flächen, aber auch das stellt kein Problem dar. Die Qualität der Ergebnisse kann jedoch durch  $7263$  schiefe Flächen, wobei diese maximal  $11,2$  beträgt, beeinträchtigt werden.

Das Netz des dritten Ventilators, der einen Volumenstrom von  $1500 \text{ m}^3/\text{h}$ , eine Druckerhöhung von  $1750 \text{ Pa}$  mit einer Drehzahl von  $2100 \text{ U}/\text{min}$  erreichen soll, hat  $9510483$  Zellen und  $29593068$  Oberflächen. Die Anzahl der Zellen bei der Patch-Topologie betragen bei dem Rotor  $1071032$  und bei dem Stator  $147278$ . Das maximale Flächenverhältnis ist mit  $39,23$  in Ordnung und auch bei der minimalen und maximalen Flächengrößen, den Volumina und der Öffnung der Zellen treten keine Fehler auf. Es gibt  $2213$  nicht orthogonale Flächen, die über  $70$  Grad liegen, was jedoch auch keine Probleme macht. Jedoch liegen  $4625$  Flächen über dem Kriterium für die maximalen Schiefe, was auch hier das Ergebnis beeinträchtigen kann.

Wenn dieses Netz in dem Command-Window mit dem Befehl `checkMesh` anhand der aufgeführten Qualitätskriterien geprüft wurde, kann der Ordner vervielfältigt und durch das passende Skript in Matlab an verschiedene Volumenströme angepasst werden. Dabei werden die Randbedingungen und das Simulationssetup festgelegt. Danach können die iterativen Berechnungen mit OpenFoam durchgeführt werden, die bei diesen Fällen nach  $1500$  Iterationen stoppen.

Nachdem die numerischen Berechnungen durchgelaufen sind, können die Ergebnisse abgerufen werden. Mit einem Matlab-Skript, indem beispielsweise die Dichte, die Drehzahl und der Innen- und Außendurchmesser eingetragen werden, können die Volumenstromdifferenzen, die statische Druckerhöhung und Rotorleistung ausgegeben werden. Die dimensionslosen Kennzahlen müssen jedoch mit dem Totaldruck berechnet werden. Dieser setzt sich wie in der Formel 2-4 gezeigt aus der Summe der statischen und der dynamischen Druckdifferenz am Ein- und Austritt zusammen. Während der dynamische Druck durch die Geschwindigkeiten der Fluidelemente zustande kommt, wirkt der stati-

sche Druck in alle Raumrichtungen gleich (Schade et al. 2013). An dem Eintritt des Ventilators wurde lediglich der Eintrittsvolumenstrom definiert (frei einsaugend), weshalb der statische Druck dort 0 Pa beträgt. Der dynamische Druck wird mit der Formel aus 2-5 berechnet, wobei die Geschwindigkeit durch die Querschnittsfläche und den Volumenstrom berechnet werden kann.

$$\Delta p_d = \frac{\rho}{2} \cdot \left( \frac{\dot{V}}{A} \right)^2 \quad [\text{Pa}] \quad 7-1$$

Die Eintrittsfläche ist kreisförmig, weshalb diese mit folgender Formel berechnet werden kann:

$$A_{Inlet} = D_{inlet}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad [\text{m}^2] \quad 7-2$$

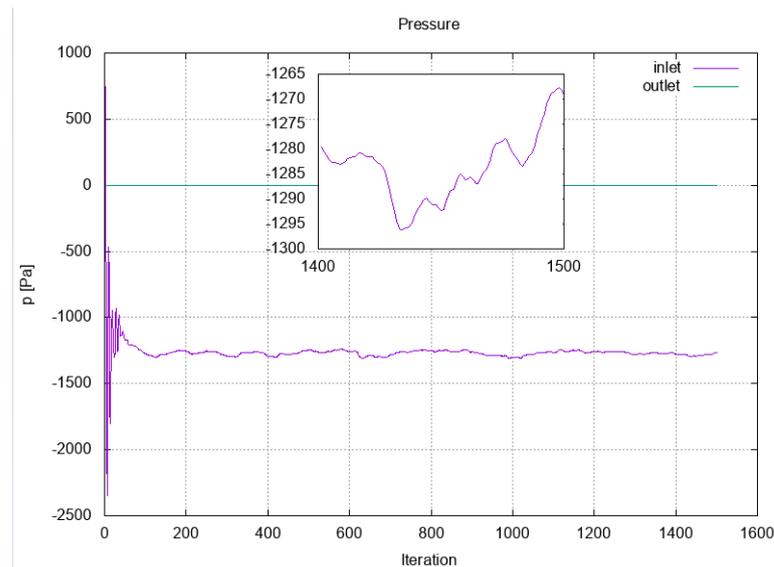
Die Austrittsfläche wird mit der Gehäusebreite  $B$  und der Höhe des Austrittskanal  $C$  berechnet.

$$A_{outlet} = B \cdot C \quad [\text{m}^2] \quad 7-3$$

Die dimensionslosen Kennzahlen werden nach den Formeln 2-9, 2-10 und 2-8 berechnet. Durch die Volumenströme und den errechneten Werten für die Druckdifferenz und dem Wirkungsgrad lassen sich die Kennlinien für die Ventilatoren darstellen.

## 7.2 Bewertung der Konvergenz

Um die Aussagekraft der Ergebnisse aus der numerischen Berechnung zu prüfen, wurde für alle Volumenströme die Konvergenz bestimmt. Dazu wurde die prozentuale Abweichung des maximalen und des minimalen Drucks aus den letzten 100 Iterationsschritten bestimmt.



**Abbildung 7-4: Veränderung der Druckdifferenz über die Anzahl der Iterationsschritte an dem ersten Fall bei einem Volumenstrom von 0,1 m<sup>3</sup>/s**

Abbildung 7-4 zeigt ein Diagramm, in dem die berechnete Druckdifferenz für den dazugehörigen Iterationsschritt aufgetragen ist. In dem oberen Ausschnitt ist eine Vergrößerung der letzten 100 Iterationsschritte dargestellt. Hier ist bei einem Volumenstrom von 0,1 m<sup>3</sup>/s des ersten Falls beispielhaft zu erkennen, dass der Druck bei den letzten 100 Iterationsschritten noch zwischen -1270 Pa und -1295 Pa schwankt, was eine relative Abweichung von 2 % bedeutet. Die Formeln für die absolute und relative Druckdifferenz lauten wie folgt:

$$\Delta p = |p_{max} - p_{min}| \quad [\text{Pa}] \quad 7-4$$

$$\frac{\Delta p}{\bar{p}} = \frac{|p_{max} - p_{min}|}{\bar{p}} \quad [\%] \quad 7-5$$

Da die Abweichung sehr gering ist, wird keine weitere Iteration benötigt und das Ergebnis hat sich eingependelt. Die restlichen Abweichungen der Konvergenz für Fall 1 sind in Tabelle 7-1 zu entnehmen. Während bei den Volumenströmen von 0,1 m<sup>3</sup>/s bis 0,9 m<sup>3</sup>/s die relativen Abweichungen sehr gering sind, kommt es vor allem bei dem Volumenstrom von 1,3 m<sup>3</sup>/s zu einer starken Abweichung von 90 %. Bei hohen Volumenströmen wird der Druck kleiner und die Kennlinie fällt ab. Aus diesem Grund wird die relative Abweichung im Vergleich zu der Absoluten höher. Jedoch steigt auch die absolute Abweichung. Somit ist davon auszugehen, dass bei den Volumenströmen bis 1,1 m<sup>3</sup>/s genug Iterationsschritte durchgeführt wurden und sich selbst bei Weiteren das Ergebnis kaum weiter ändern würde und somit hinreichend genau ist. Bei dem letzten Volumenstrom mit 1,3 m<sup>3</sup>/s müssten noch weitere Iterationsschritte durchgeführt werden, jedoch ist dieser für die Kennlinie nicht entscheidend, da diese Volumenströme weit von dem Optimalpunkt entfernt sind.

**Tabelle 7-1: Konvergenz der Volumenströme der letzten 100 Iterationsschritte des Fall 1**

<i>Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]</i>	<i>Max Druck [Pa]</i>	<i>Min Druck [Pa]</i>	<i>Abweichung [Pa]</i>	<i>Relative Abweichung</i>
0,1	-1270	-1295	25	2%
0,2	-1270	-1295	25	2%
0,3	-1250	-1280	30	2%
0,5	-1240	-1315	75	6%
0,7	-1270	-1315	45	3%
0,9	-1130	-1180	50	4%
1,1	-470	-530	60	12%
1,3	-80	-210	130	90%

In Tabelle 7-2 sind die Konvergenzen für den Druck der Volumenströme des 2. Falls dargestellt. Bei den Volumenströmen in der Nähe des Optimalpunktes ist auch hier die relative Abweichung der minimalen und maximalen Druckdifferenz gering und somit final. Bei dem Volumenstrom von 0,4 m<sup>3</sup>/s ist die relative Abweichung mit 43 % am höchsten, was sich mit den niedrigen Drücke zwischen -40 Pa und -62 Pa begründen lässt.

**Tabelle 7-2: Konvergenz der Volumenströme der letzten 100 Iterationsschritte des Fall 2**

<i>Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]</i>	<i>Max Druck [Pa]</i>	<i>Min Druck [Pa]</i>	<i>Abweichung [Pa]</i>	<i>Relative Abweichung</i>
0,1	-335	-370	35	10%
0,15	-358	-378	20	5%
0,17	-375	-358	17	5%
0,2	-345	-370	25	7%
0,3	-278	-303	25	9%
0,4	-40	-62	22	43%

Bei dem Fall 3 stellt sich bei der Prüfung der Konvergenz eine maximale Abweichung von 10 % bei den höchsten Volumenströmen heraus, was in Tabelle 7-3 zu entnehmen ist. Bei diesem Fall ist auch keine Erweiterung der Iterationsschritte notwendig, da die Abweichungen gering sind. Die geringsten Abweichungen befinden sich auch bei diesem Fall in der Nähe des Optimalpunktes.

**Tabelle 7-3: Konvergenz der Volumenströme der letzten 100 Iterationsschritte des Fall 3**

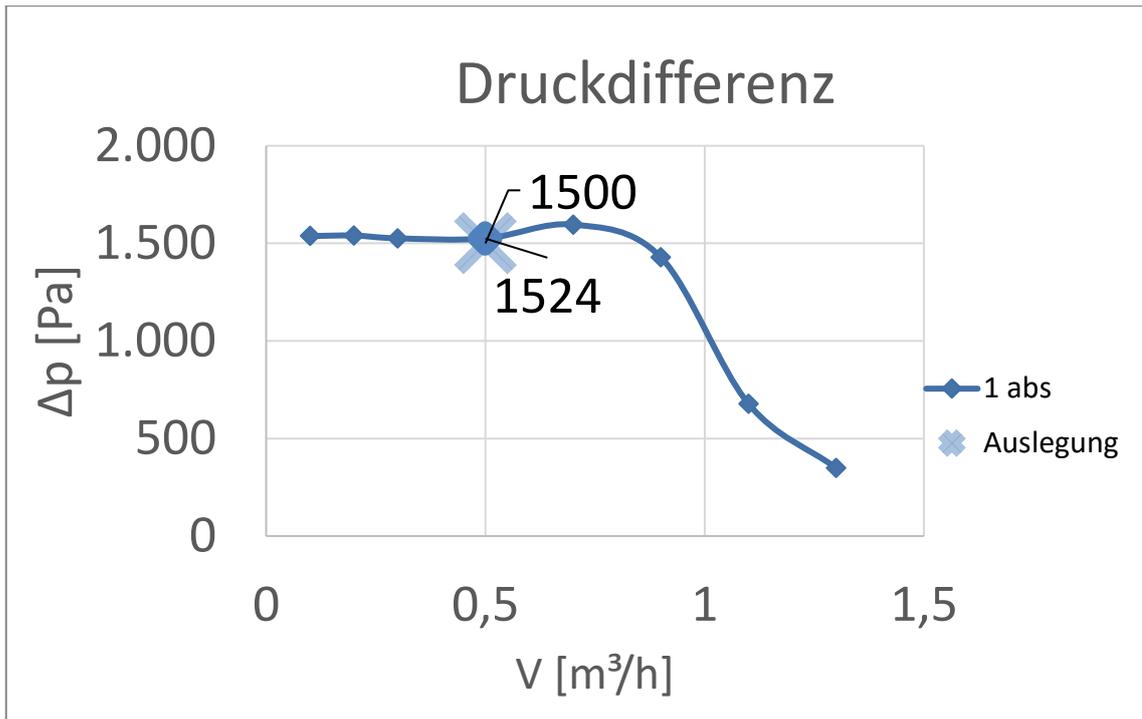
<i>Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]</i>	<i>Max Druck [Pa]</i>	<i>Min Druck [Pa]</i>	<i>Abweichung [Pa]</i>	<i>Relative Abweichung</i>
0,1	-1230	-1290	60	5%
0,2	-1250	-1262	12	1%
0,3	-1195	-1235	40	3%
0,42	-1270	-1295	25	2%
0,5	-1265	-1295	30	2%
0,7	-1170	-1200	30	3%
0,9	-680	-750	70	10%
1	-680	-750	70	10%

Bei allen drei Simulationen wurden somit genug Iterationsschritte durchgeführt und die Werte der letzten Iterationen konvergieren jeweils zu einem Ergebnis. Lediglich bei hohen Volumenströmen sind die Abweichungen höher und somit das Ergebnis ungenauer. Da diese Volumenströme jedoch nicht für die Kennlinie entscheidend sind, müssen auch hierbei keine weiteren Iterationsschritte durchgeführt werden.

## 7.3 Auswertung der Simulationsergebnisse

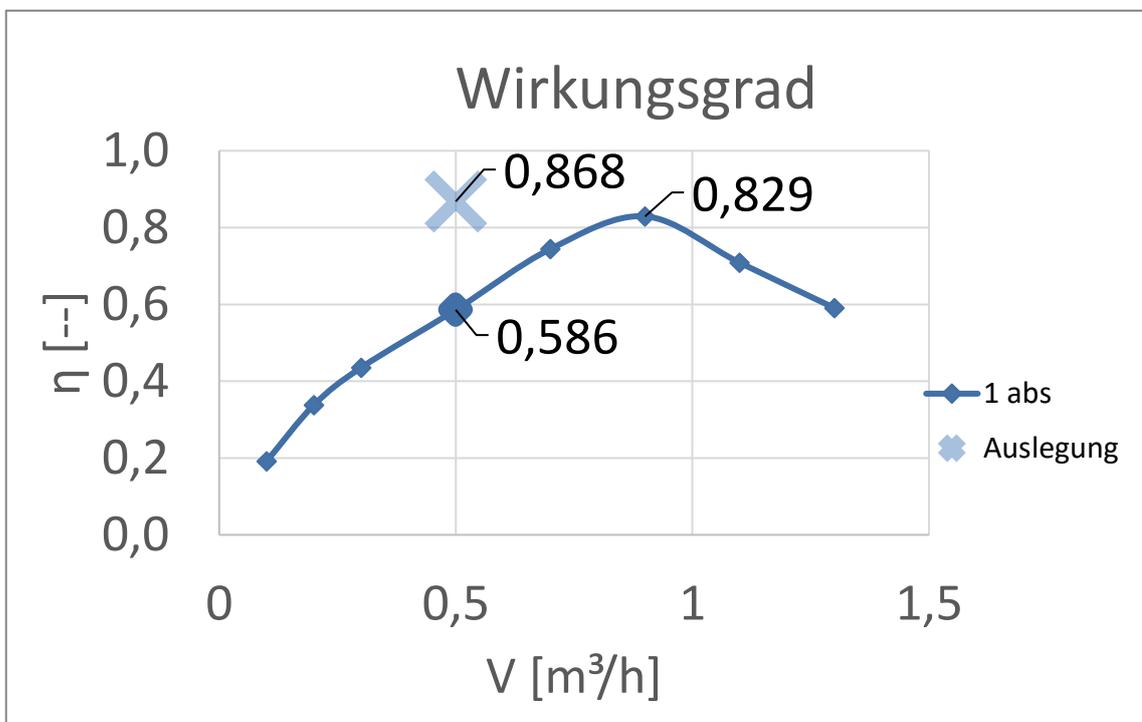
### 7.3.1 Kennlinien

Bei dem ersten Fall sollte mit einem Volumenstrom von 1800 m<sup>3</sup>/h und einer Drehzahl von 3000 U/min eine Druckerhöhung von 1500 Pa erreicht werden. Die numerisch berechnete dimensionsbehaftete Kennlinie dieses Falls mit dem erwarteten Betriebspunkt ist in Abbildung 7-5 und in Abbildung 7-6 dargestellt.



**Abbildung 7-5: Dimensionsbehaftete Kennlinie des Druckes aus dem ersten Fall mit erwartetem Auslegungspunkt**

Während bei einem Volumenstrom von  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , was umgerechnet  $1800 \text{ m}^3/\text{h}$  sind, die festgelegte Druckerhöhung aus dem Matlab-Tool bei  $1500 \text{ Pa}$  liegt, weicht die numerisch Berechnete mit  $1524 \text{ Pa}$  nur leicht ab.



**Abbildung 7-6: Dimensionsbehaftete Kennlinie des Wirkungsgrades aus dem ersten Fall mit erwartetem Auslegungspunkt**

Dahingegen kommt es bei demselben Volumenstrom beim Wirkungsgrad zu höheren Abweichungen. Dieser wurde von dem Matlab-Tool mit 86,8 % berechnet, während der Wirkungsgrad bei der numerischen Simulation gerade mal 58,6 % erreicht. Außerdem ist dieser Wirkungsgrad nicht maximal und somit nicht der Optimalpunkt. Der maximale Punkt dieser Kennlinie liegt bei einem Volumenstrom von  $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$  mit einem Wirkungsgrad von 83 %. Während das Matlab-Tool den Wirkungsgrad bei einer reibungsfreien Strömung im Gehäuse berechnet, wurde bei der numerischen Berechnung der Wirkungsgrad der neuen optimierten Geometrie ermittelt.

Des Weiteren werden nur stationäre Simulationen durchgeführt, sodass keine zeitlich abhängigen Effekte berücksichtigt werden. Das kann jedoch gerade im Teillastbereich zu deutlichen Unterschieden bei den Simulationsergebnis führen. Insgesamt sollte der reale Wirkungsgrad unterhalb dem theoretischen Optimum nach Bommers liegen. Es wird insbesondere die aufgenommene Wellenleistung zu stark bewertet.

Mit dem zweiten Fall wurde ein Volumenstrom von  $600 \text{ m}^3/\text{h}$  mit einer Druckerhöhung von 400 Pa und einer Drehzahl von 3000 U/min vorgegeben. In Abbildung 7-7 ist die Druckerhöhung über dem Volumenstrom aufgezeigt. Bei dem vorgegebenen Volumenstrom, der umgerechnet  $0,167 \text{ m}^3/\text{s}$  ergibt, beträgt die Druckerhöhung der numerischen Berechnung 447 Pa. Somit ergibt sich lediglich eine Differenz von 47 Pa.

Der Wirkungsgrad weicht wie auch bei dem ersten Fall stark ab, was in Abbildung 7-8 dargestellt ist. Auch hier wurde mit dem Matlab-Tool der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von dem Volumenstrom, der Drehzahl und der theoretischen Stufenarbeit berechnet. Es wurden somit keine Verluste und keine Einwirkungen der neuen optimierten Geometrie mit in die Berechnung eingeschlossen. Der Volumenstrom mit einem maximalen Wirkungsgrad von circa 85 % liegt laut der Kennlinie bei circa  $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ . Der maximale Wirkungsgrad bei  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$  entspricht dem der Matlab-Anwendung bei  $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bei der Matlab-Anwendung wurden zu stark vereinfacht, sodass jedoch nicht die Volumenströme bei beiden gleich sind.

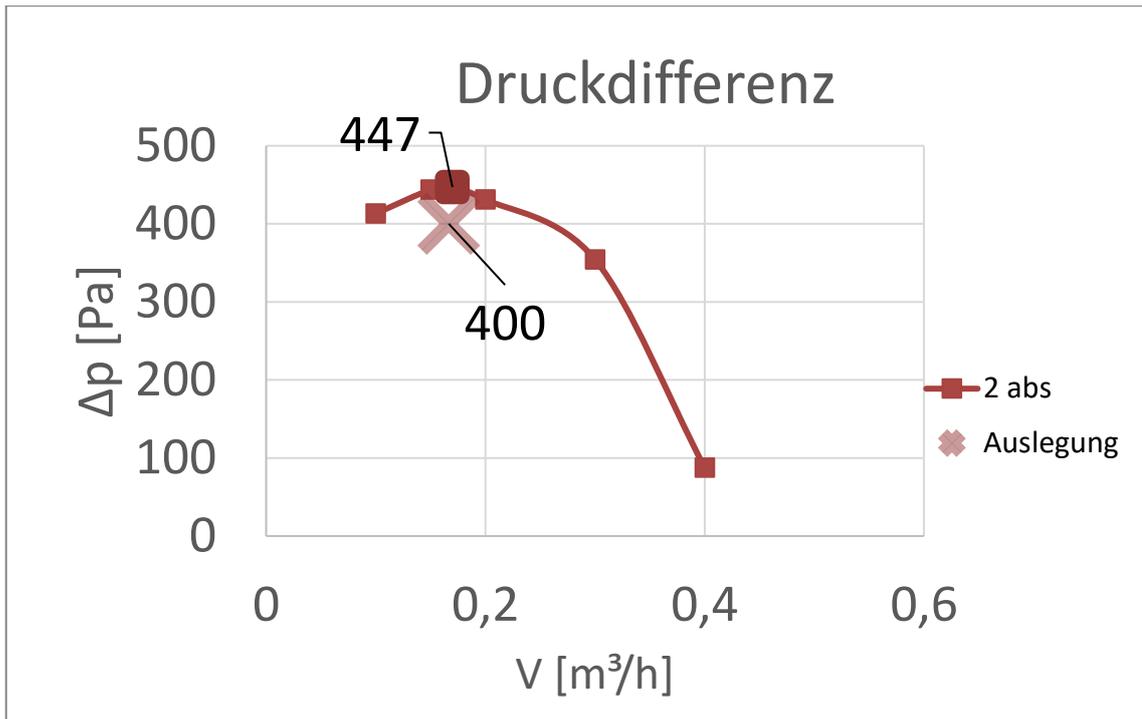


Abbildung 7-7: Dimensionsbehaftete Kennlinie des Druckes aus dem zweiten Fall mit erwartetem Auslegungspunkt

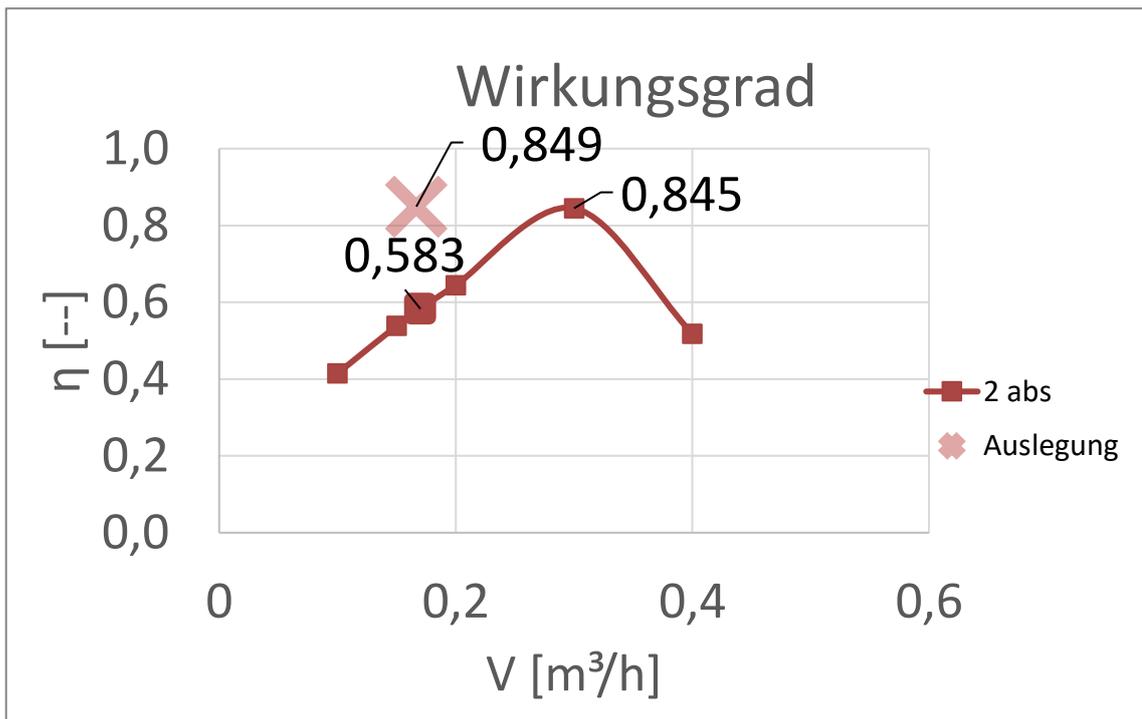
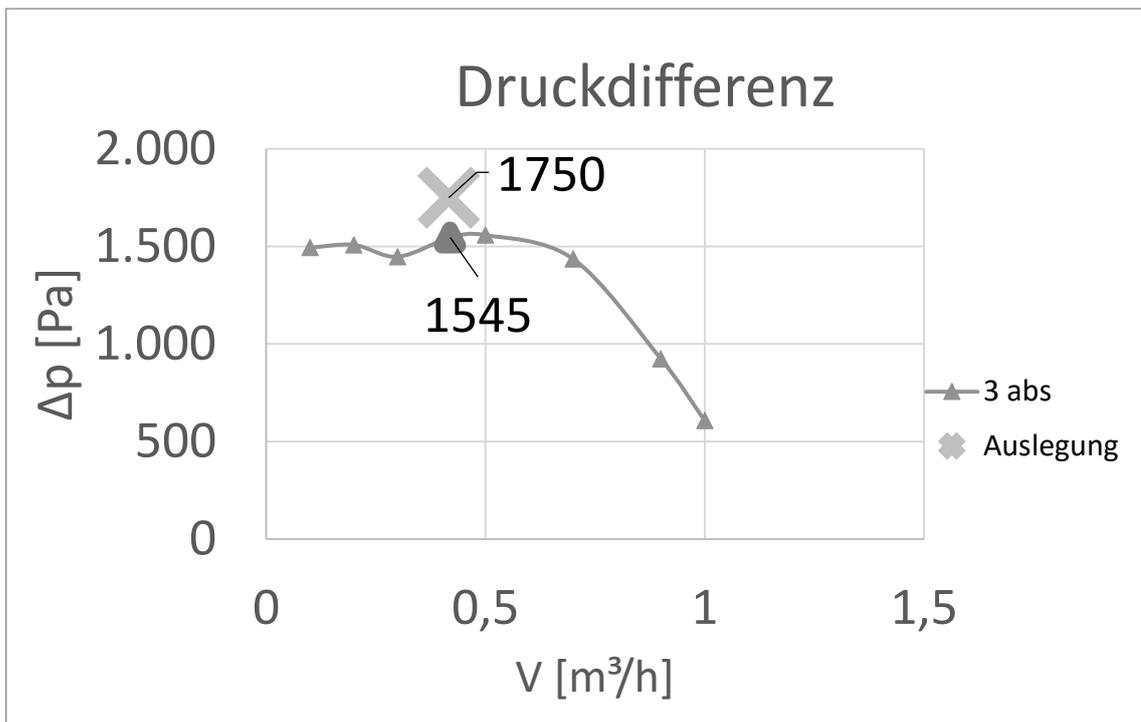


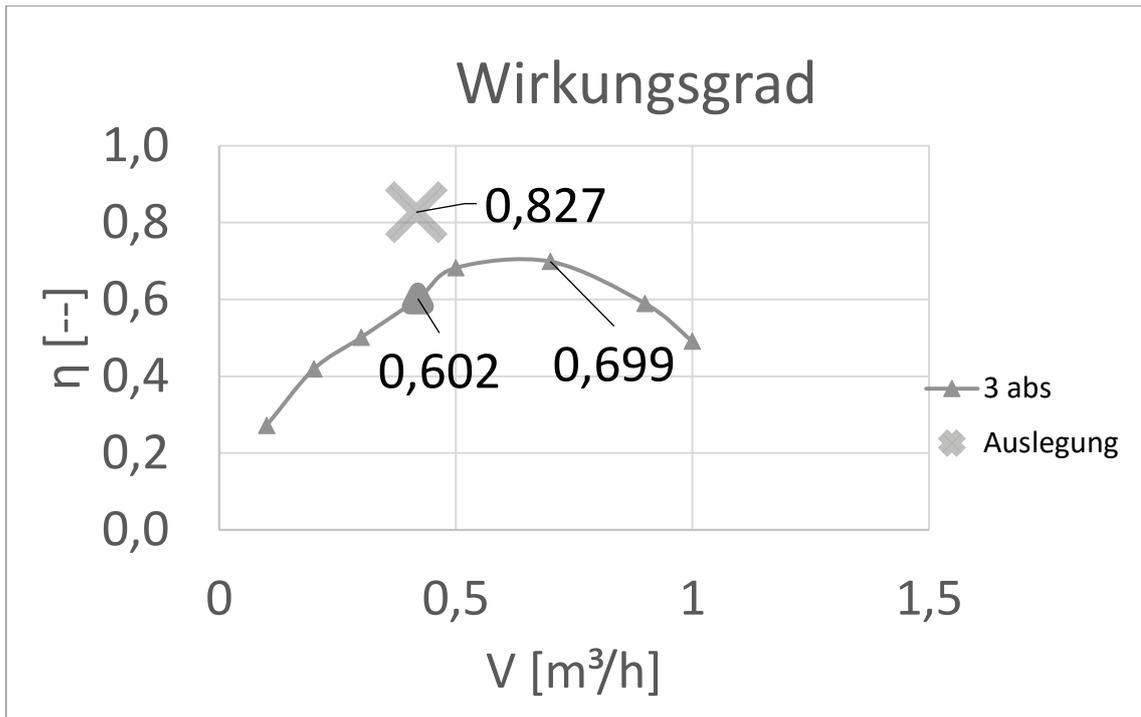
Abbildung 7-8: Dimensionsbehaftete Kennlinie des Wirkungsgrades aus dem zweiten Fall mit erwartetem Auslegungspunkt

In Abbildung 7-9 ist die dimensionsbehaftete Kennlinie der Druckerhöhung für den dritten Fall für eine Auslegung bei einem Volumenstrom von  $1500 \text{ m}^3/\text{h}$  und einer Druckerhöhung von  $1750 \text{ Pa}$  dargestellt. Im Gegensatz zu den Fällen eins und zwei gibt es hierbei einen größeren Unterschied zwischen der numerisch bestimmten Kennlinie und des Auslegungspunktes. Während die Druckerhöhung für die Auslegung  $1545 \text{ Pa}$  beträgt, sollte diese nach der Auslegung eigentlich  $1750 \text{ Pa}$  betragen. Der Ventilator könnte somit nicht für seine eigentliche Auslegung betrieben werden.



**Abbildung 7-9: Dimensionsbehaftete Kennlinie des Druckes aus dem dritten Fall mit erwartetem Auslegungspunkt**

Die Wirkungsgrade des dritten Falls haben an dem Auslegungspunkt wie auch bei den anderen Fällen eine hohe Abweichung (vgl. Abbildung 7-10). Die Differenz zwischen dem aus Matlab berechneten und dem aus den numerischen Daten berechneten Wirkungsgrad beträgt  $22,5 \%$ . Der Hochpunkt der Wirkungsgradkennlinie befindet sich wie auch bei den anderen Fällen bei einem höheren Volumenstrom. Bei  $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$  weist die Kennlinie einen Wirkungsgrad von circa  $70 \%$  auf. Dieser ist geringer als der von der Matlab-Anwendung, der bei einem Volumenstrom von  $0,42 \text{ m}^3/\text{s}$  fast  $83 \%$  betragen soll.



**Abbildung 7-10: Dimensionsbehaftete Kennlinie des Wirkungsgrades aus dem dritten Fall mit erwartetem Auslegungspunkt**

Zusammenfassend werden die Druckerhöhungen zu den vorgegebenen Volumenströmen meistens erreicht und es kommt nur zu geringen Abweichungen. In den ersten beiden Fällen sind diese bei der numerischen Simulation größer als die aus der Matlab-Anwendung.

Bei den Wirkungsgraden kommt es zu großen Unterschieden. Die Wirkungsgrade der numerischen Berechnung sind deutlich geringer als die von dem Matlab-Tool vorhergesagten und die maximalen Wirkungsgrade werden erst bei einem höheren Volumenstrom erreicht. Die maximalen Wirkungsgrade entsprechen bei den ersten beiden Fällen fast denen aus Matlab, jedoch stimmt der Volumenstrom nicht überein. Es ist davon auszugehen, dass bei der Matlab-Anwendung zu stark vereinfacht wurde. Ein weiterer Grund dafür ist, dass der Wirkungsgrad aus dem Tool unabhängig von den Geometrieigenschaften berechnet wurde und deshalb die Verluste nicht mit einbezogen wurden. Somit kann die Energie aus dem Laufrad nicht komplett genutzt werden. Für die neue angepasste Spirale müsste somit ein neuer Wirkungsgrad berechnet werden. Durch das optimierte Gehäuse kommt es zu Verlusten, die beispielsweise durch Rückströmungen oder Staupunkte entstehen können. Bei einer Rückströmung kann die kinetische Energie des Fluids den statischen Druck in die Strömungsrichtung nicht mehr überwinden. Staupunkte entstehen, wenn die kinetische Energie in nicht mehr nutzbare Druckenergie umgewandelt wird. Außerdem wurden keine zeitlich abhängigen Effekte berücksichtigt, was besonders im Teillastbereich zu großen Unterschieden der Ergebnisse führen kann.

### 7.3.2 Strömungsverhältnisse im Laufrad und im Gehäuse

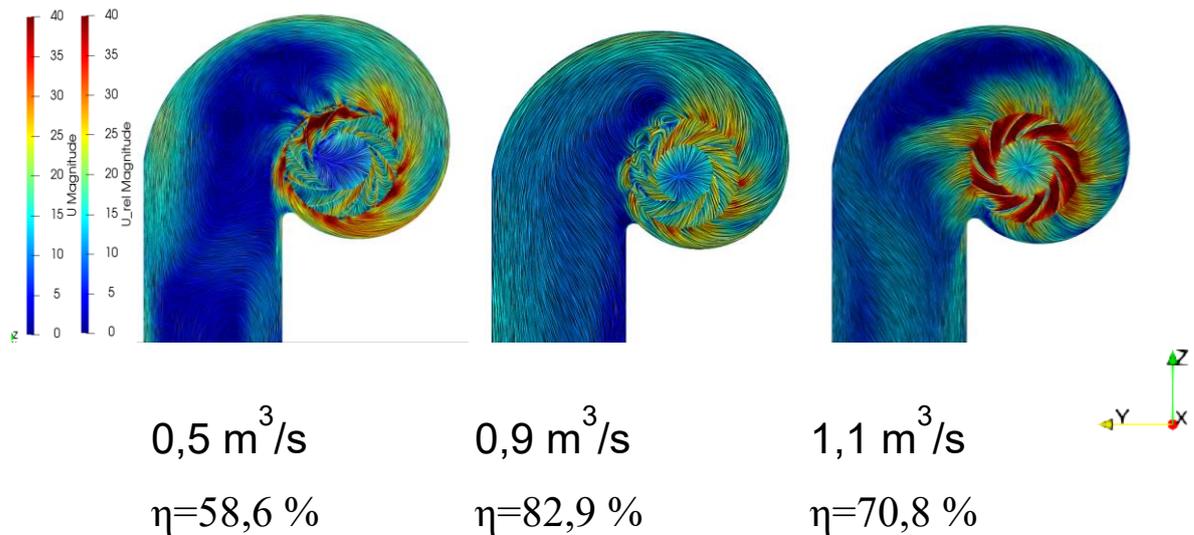
Um die verschiedenen Wirkungsgrade zu begründen, werden in diesem Abschnitt Querschnitte des Laufrades und des Gehäuses mit den jeweiligen Strömungslinien dargestellt.

Beim Teillastbetrieb eines Ventilators ist im Normalfall ein großer Totwasserbereich am Gehäuseaustritt, der durch den geringeren Volumenstrom zustande kommt. An den Schaufeln hat die Geschwindigkeit einen geringeren Austrittswinkel als beispielsweise bei dem Optimalpunkt, wodurch das Fluid weniger in radiale Richtung strömt. Somit ist der Staupunkt in Richtung des Kanals verschoben. An den Saugseiten der Schaufeln gibt es viele Ablösungen. Der Druckaufbau ist kontinuierlich mit dem Spiralgehäuse, sodass eine ungleichmäßige und asymmetrische Schaufellast über den Umfang zustande kommt. Somit kommt es zu instationären Betriebsbedingungen und deshalb ist der Ventilator im Teillastbetrieb anfällig für Betriebsschwingungen. (Biedermann 2021b)

Im Vollastbetrieb tritt der Staupunkt im Normalfall noch im Spiralgehäuse vor der Gehäusezunge auf. Der Austrittswinkel der Strömung an den Schaufeln steigt in diesem Bereich mit steigendem Volumenstrom, da die meridionale Geschwindigkeit durch den höheren Volumenstrom größer wird. An der Austrittsfläche treten durch den steileren Austrittswinkel an den Schaufeln hohe Geschwindigkeiten in radialer Richtung auf.

Bei dem Optimalpunkt kommt es zu weniger Verlusten als in dem Teil- oder Vollastbetrieb. Am Gehäuseaustritt sollte es zu einem gleichmäßigeren Geschwindigkeitsprofil kommen, da die Schaufeln ideal und sauber umströmt werden. Der Staupunkt befindet sich im idealen Fall an der Zungenspitze. Die Schaufellast über dem Umfang des Impellers sollte näherungsweise gleichmäßig sein. Deshalb ist bei dem Optimalpunkt der Betrieb stabil und stationär. Im Gegensatz zu dem Teillastbetrieb treten kaum Schwingungen auf. (Biedermann 2021b)

Bei dem ersten Fall wurden in Abbildung 7-11 von drei Volumenströmen der Querschnitt mit den dazugehörigen Fluidbewegungen dargestellt. Für den Schaufelbereich wurde die relative Geschwindigkeit aus der absoluten berechnet, damit die dort dargestellte Strömung nur von der Schaufelform abhängig ist und nicht zusätzlich von der Umfangsgeschwindigkeit. Für die restliche Fluidbewegung wurde die Absolutgeschwindigkeit verwendet. In der Abbildung 7-11 ist links der aus Matlab errechnete Volumenstrom bei  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  dargestellt, der nach der numerischen Berechnung jedoch nicht der Optimalpunkt ist. Der Optimalpunkt der numerischen Berechnung liegt ungefähr bei  $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$  und ist mittig dargestellt. Zum Schluss wird noch ein Vollastbetrieb bei  $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$  aufgezeigt.



**Abbildung 7-11: Strömungsgeschwindigkeit des Laufrades aus Fall 1 bei 0,5 m<sup>3</sup>/s, 0,9 m<sup>3</sup>/s und 1,1 m<sup>3</sup>/s**

Bei dem Teillastbetrieb ist zu erkennen, dass es eine ungleichmäßige Schaufellast gibt, die durch den Druckaufbau mit dem Radius der Spirale zustande kommt. Das ungleichmäßige Umströmen der Schaufeln zeigt, dass es sich hierbei nicht um den optimalen Betriebspunkt handelt. Das Totwassergebiet ist zwar bei allem Volumenströmen sehr stark ausgeprägt, jedoch ist es beim Teillastbetrieb am stärksten zu erkennen. Grund für die starken Totwassergebiete bei allen Darstellungen sind die großen Spiralgeläuse mit großen Austrittskanälen. Somit ist die Sammel- und Diffusorwirkung dieses Gehäuse gering und die Geschwindigkeiten am Austritt niedrig.

In der Nähe des Optimalpunktes sollte die Schaufellast gleichmäßiger sein, was bei der Darstellung bei 0,9 m<sup>3</sup>/s nicht zu erkennen ist. Die Stromlinien am Schaufelaustritt verlaufen jedoch wegen des höherem Volumenstroms steiler als in Teillastbetrieb und sind etwas weiter in radiale Richtung ausgeweitet.

Bei dem Überlastbereich bei 1,1 m<sup>3</sup>/s kommt es durch den höheren Volumenstrom zu höheren meridionalen Geschwindigkeiten, die sowohl an der Färbung um die Schaufeln als auch an den steileren Austrittswinkeln der Stromlinien zu erkennen sind. Vor der Zunge befindet sich ein Totwassergebiet und in radialer Richtung sind die Geschwindigkeiten langsamer als in der Nähe des Optimalpunktes.

Auch bei dem zweiten Fall sind von drei verschiedenen Volumenströmen Querschnitte mit den dazugehörigen Strömungsgeschwindigkeiten angefertigt worden, die in Abbildung 7-12 zu sehen sind. Das Gehäuse ist im Vergleich zum Laufrad sehr groß, weshalb die Strömung nahezu reibungsfrei ist. Bei dem ersten Querschnitt wurde der eigentlich berechnete Optimalpunkt bei  $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$  dargestellt, der sich nach den numerischen Berechnungen jedoch im Teillastbereich befindet. Der maximale Wirkungsgrad bei circa  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$  ist mittig aufgezeigt. Des Weiteren wurde der Betrieb bei einem Volumenstrom von  $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$  dargestellt.

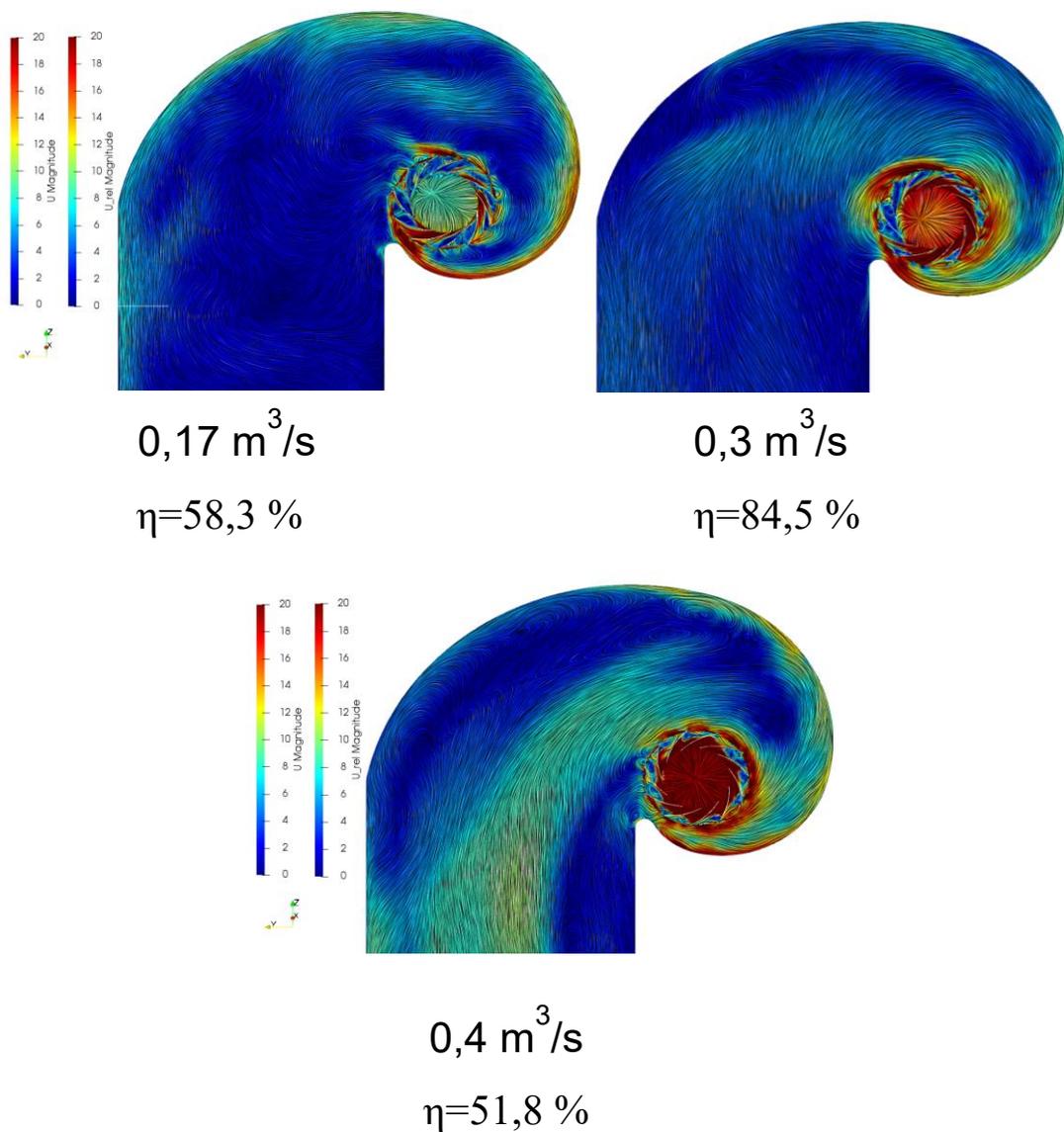


Abbildung 7-12: Strömungsgeschwindigkeit des Laufrades aus Fall 2 bei  $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$

Nachdem die Strömung das Laufrad verlassen hat, sind bei dem eigentlich ausgelegten Punkt starke Rückströmungen und Wirbel zu erkennen. Somit kann die meridionale Geschwindigkeit den statischen Druck nicht überwinden und die erzeugte Energie kann nicht genutzt werden.

Auch bei  $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$  baut sich lediglich ein Druck und eine Geschwindigkeit von der Zunge her auf. Die Stromfäden gehen entlang des Spiralgehäuses, bis deren Geschwindigkeit in dem Gehäuse stark abnimmt.

Durch den höheren Volumenstrom beim letzten Querschnitt wird allgemein eine höhere meridionale Strömungsgeschwindigkeit erzeugt. Jedoch wird auch hier ein Großteil der Geschwindigkeiten hinter der Zunge aufgebaut, die mit dem Verlauf der Stromlinie immer mehr abnehmen.

Die Form der Gehäuseführung entspricht nicht dem Optimum, da die aufgebrauchte kinetische Energie den statischen Druck nur schwer überwinden kann und diese deshalb nicht komplett genutzt werden kann.

Bei dem dritten Fall lag der Auslegungspunkt bei  $0,42 \text{ m}^3/\text{s}$ , während sich der maximale Wirkungsgrad bei circa  $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$  befindet. Die Schaufellast ist bei dem Volumenstrom von  $0,42 \text{ m}^3/\text{s}$  ungleichmäßig. Auch bei diesem Ventilator geht kinetische Energie verloren, da es zu Verlusten kommt. Noch im Gehäuse bilden sich Wirbel und es kommt zu Rückströmungen, da der statische Druck nicht überwunden werden kann. Hinter der Zunge bildet sich ein Staupunkt, der sich jedoch schlecht von dem stark ausgeweitetem Totwassergebiet abgrenzen lässt.

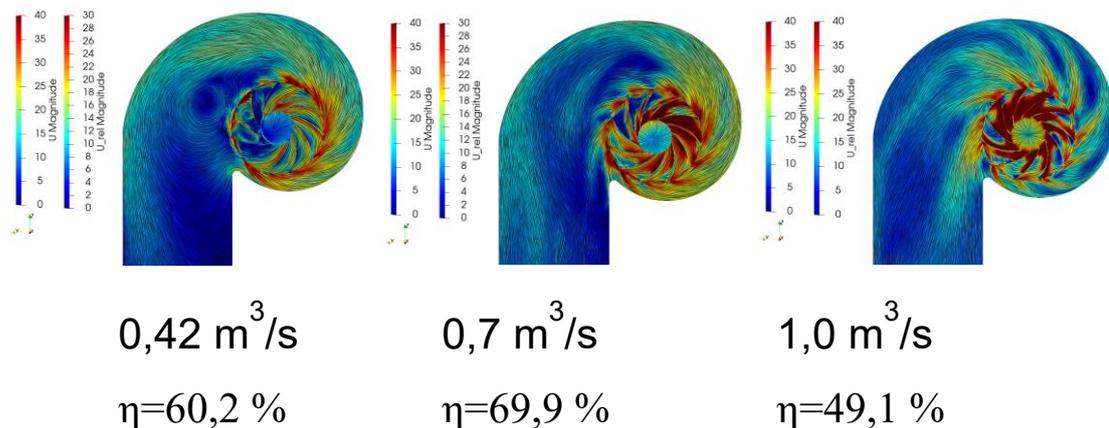


Abbildung 7-13: Strömungsgeschwindigkeit des Laufrades aus Fall 3 bei  $0,42 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$

Bei dem Optimalpunkt ist die Schaufellast etwas gleichmäßiger und der Totwasserbereich am Austritt etwas geringer geworden. Des Weiteren ist der Staupunkt mehr an die Spitze der Gehäusezunge verschoben worden und die Stromlinien am Austritt der Schaufeln verlaufen steiler.

Der Volumenstrom von  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  befindet sich bei dem Ventilator aus Fall 3 deutlich im Überlastbereich. Der Austrittswinkel der Stromlinien an den Schaufeln ist sehr steil. An den Schaufeln wird ein sehr unregelmäßiger Druck aufgebaut.

An den durch die Matlab-Anwendung vorgegebenen Betriebspunkten kommt es zu Verlusten und die kinetische Energie kann den statischen Druck nicht überwinden. Anhand der Stromlinien ist zu erkennen, dass die Ventilatoren im Teillastbereich betrieben werden. Somit kann dort nicht der maximale Volumenstrom erreicht werden. An den Schaufeln ist bei allen Volumenströmen eine unregelmäßige Umströmung zu erkennen, weshalb auch nicht die berechneten Wirkungsgrade erreicht werden können. Die Schaufellast ist bei keinem getesteten Punkt gleichmäßig, was auf ein ungünstiges Gehäuse zurückgeführt werden kann. Es ist davon auszugehen, dass der vom Matlab-Tool berechnete Wirkungsgrad nicht erreicht werden kann, da Verluste durch die Geometrie nicht mit in diesen einfließen. Die Matlab-Anwendung vereinfacht zu stark, sodass die Ventilatorgeometrie nicht für den vorgegebenen Volumenstrom ideal ist.

## 8 Zusammenfassung

Das Bommies-Tool in Matlab erfüllt die gleichen Voraussetzungen wie sein Vorgänger in Excel, wobei Fehler wie das Herausstehen des Laufrades aus dem Gehäuse behoben wurden. Das neue Tool verfügt ebenso über eine Spiralanpassung, in der die Vier-Radien-Spirale an die logarithmische Spirale angepasst wird, sowie über eine wahlweise mögliche Breitenoptimierung, bei der die logarithmische Spirale auf eine bestimmte Spiraltiefe verringert wird. Des Weiteren wurde die graphische Darstellung erweitert und dem Benutzer weitere Möglichkeiten für die Gewichtung bei der Anpassung der Spiraltiefe gegeben. Neben der Anpassung dieser an eine gewünschte Tiefe kann der Fokus mehr auf die Einhaltung der meridionalen Verzögerungszahl oder das Verhältnis zwischen dem Ein- und Austrittsquerschnitt des Impellers gelegt werden.

Die Prognosegüte des Matlab-Tools im Vergleich zu dem Excel-Tool wurde anhand ausführlicher Testungen nachgewiesen. Dabei ergeben sich gleiche dimensionslose Kennzahlen, da dieselben grundlegenden Rechnungen nach Bommies verwendet wurden. Bei lediglich einer Spiralanpassung kam es zu minimalen Abweichungen der Geometrien, da ein anderer Solver zum Lösen des Problems genutzt wurde, aber die Variationsmöglichkeiten gering sind. Die Breitenoptimierung mit nachgeschalteter Spiralanpassung führt teilweise zu höherer Abweichung. Ein Newton-Optimierer variiert in Matlab so lange den Deckscheibenwinkel und den Faktor für die Laufradbreite, bis ein zu minimierender Fehlerterm den kleinstmöglichen Wert annimmt. Dahingegen wird in Excel ein anderes Werkzeug für das Iterationsverfahren nach Newton angewandt, was manchmal zu einem anderen Deckscheibenwinkel führt. Sobald dieser steiler ist, muss auch das Laufrad größer werden. Das bedingt dann eine höhere Schaufeleintrittsbreite und ein breiteres Gehäuse. Jedoch ist der Deckscheibenwinkel nicht immer beim Tool in Matlab geringer. Ein steilerer Deckscheibenwinkel führt nicht zu einem schlechteren Ergebnis, da es bei einem iterativen Verfahren nicht nur eine Lösung gibt und dieser durch ein breiteres Laufrad und Gehäuse ausgeglichen wird. Somit steht das Tool in Matlab dem in Excel in keiner Weise nach und liefert mindestens genauso gute Ergebnisse in einer zeitgemäßen neuen Umgebung.

Die Visualisierung der neuen Anwendung wurde im Vergleich zu der Excel-Anwendung verbessert. Neben den Querschnitt von der Vorderseite des Ventilators gibt es nun auch einen von der Seite. Eine manuelle Einstellung des Faktors für die Gehäusebreite ist nicht mehr nötig, da dieser bei der neuen Anwendung automatisch verändert wird, falls das Laufrad nicht in das Gehäuse passt. Somit gibt es eine Zeitersparnis, da die Umsetzbarkeit der Ergebnisse nicht immer separat in dem CAD-Programm geprüft werden müssen und das Programm nicht mehrfach für die manuelle Anpassung des Faktors durchlaufen wer-

den muss. Außerdem presst die Matlab-Anwendung bei der Breitenoptimierung das Gehäuse nicht genau in die gewünschte Spiraltiefe, falls diese zu gering eingestellt ist. Somit erhält der Nutzer trotz einer zu klein eingestellten Spiraltiefe noch realistische Ergebnisse.

Die numerischen Berechnungen von einigen Fällen zeigen prinzipiell den gewünschten Betriebspunkt (Druckerhöhung bei Auslegungsvolumenstrom) mit geringen Abweichungen zwischen Auslegung und numerischer Validierung in Abhängigkeit der Designparameter. Jedoch wurden in allen Fällen die prognostizierten Wirkungsgrade stark verfehlt. Begründet liegt dies zum einen in dem reibungsfreien Ansatz der Auslegung aber auch in numerischen Unsicherheiten bzgl. nicht berücksichtigter transienter Effekte und zu stark gewichteter mechanischer Energieaufnahme. Des Weiteren befindet sich der maximale Wirkungsgrad der numerisch berechneten Kennlinie nicht bei dem Auslegungspunkt. Alle geprüften Fälle werden in Teillast betrieben, was das Ziel Energie durch eine optimale Betriebsweise zu sparen verfehlt. Jedoch sind die getesteten Fälle nicht optimal, weshalb die numerische Berechnung nochmal an geeigneten schon existierenden Ventilatoren geprüft und mit den dazu vorhandenen Kennlinien verglichen werden sollte.

## 9 Fazit und Ausblick

Um die Aussagekraft des Tools zu validieren, müssen weitere numerische Berechnungen durchgeführt werden. Somit kann geprüft werden, ob die gewünschten Druckerhöhungen auch bei anderen Fällen beim angegebenen Volumenstrom eingehalten werden und ob sich die Art der Abweichungen der Wirkungsgrade fortsetzt. Die Berechnungen in dem Programm müssen dementsprechend angepasst und verbessert werden, sodass die zu starken Vereinfachungen nicht mehr zu geringen Wirkungsgraden an dem Auslegungspunkt und einem verschobenen maximalen Wirkungsgrad führen.

In Zukunft könnte das Bomes-Tool in Matlab noch weiter automatisiert werden, sodass bei einer nachfolgenden numerischen Berechnung nur noch wenige Arbeitsschritte des Benutzers notwendig sind. Zwar werden die errechneten Geometriedaten direkt in die passende Baugruppe in Inventor weitergegeben, jedoch müssen vor allem bei der numerischen Berechnung mittels OpenFoam viele einzelne zeitaufwendige Arbeitsschritte durchgeführt werden. Nachdem alle einzelnen Flächen benannt wurden, müssen diese in einem weiteren Arbeitsschritt vernetzt werden, das Netz geprüft werden, die Randbedingungen für jeden einzelnen Volumenstrom festgelegt und schließlich die Berechnung gestartet werden. Die Möglichkeiten der Automatisierung müssen dafür für die Software geprüft werden. Falls es dabei zu Schwierigkeiten kommt, kann als Alternative das Programm Ansys zur numerischen Berechnung benutzt werden. Dieses ist keine freie Software, jedoch ist diese benutzerfreundlich aufgebaut.

Des Weiteren kann die Matlab-Anwendung noch benutzerfreundlicher gemacht werden. Beispielsweise könnte diese in eine Software implementiert werden, wo der Benutzer nur eine Schaltfläche für die Ein- und Ausgaben hat. Somit hätte dieser nur als Experte Zugriff auf den Code und könnte somit auch keine unerwünschten Änderungen vornehmen.

## 10 Literaturverzeichnis

Biedermann, Till (2021a): Industrienähe Auslegung und Berechnung von Strömungsmaschinen. Allgemeine Auslegung von Radialmaschinen. Hochschule Düsseldorf. ISAVE.

Biedermann, Till (2021b): Industrienähe Auslegung und Berechnung von Strömungsmaschinen. Einführung. Hochschule Düsseldorf. ISAVE.

Biedermann, Till (2021c): Industrienähe Auslegung und Berechnung von Strömungsmaschinen. Grundlagen. Hochschule Düsseldorf. ISAVE.

Bommes, Leonhard; Fricke, Jürgen; Grundmann, Reinhard (2002): Ventilatoren: Vulkan-Verlag GmbH.

Bommes, Leonhard; Reinartz, Dieter (1997a): Entwurfspolynome zur optimalen Auswahl und Bemessung von Industrieventilatoren radialer Bauart. In: *Wissenschaftlich-Technische Konferenz Industrieventilatoren*.

Bommes, Leonhard; Reinartz, Dieter (1997b): Polynomisches Verfahren zur optimalen Gestaltung von Radialventilatoren. In: *HLH Bd. 48 Nr.4*.

Carolus, Thomas (2020): Ventilatoren. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Cordier, Otto (1953): Ähnlichkeitsbedingungen für Strömungsmaschinen.

Eurostat (2022): Final energy consumption by product. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00123/default/table?lang=en>, zuletzt aktualisiert am 03.05.2022, zuletzt geprüft am 03.05.2022.

FanMechanics (2018): Centrix: Centrifugal Fan selection and design software. Online verfügbar unter <http://www.fanmechanics.com/Centrix.html>, zuletzt aktualisiert am 14.07.2018, zuletzt geprüft am 13.04.2022.

Horvat, Igor; Kameier, Frank (2009): CAE für Radialventilatoren unter dem Gesichtspunkt des Umweltschutzes – Energieeffizienz, Haltbarkeit, Lärm.

Horvat, Igor; Kameier, Frank (2011): Bommes-Tool. centrifugal fan design ISAVE. Version 2016: ISAVE.

Horvat, Igor; Péus, Andy (2005): Auslegung und aeroakustische Optimierung eines Radialventilators. Bachelor Thesis. Fachhochschule Düsseldorf, Düsseldorf. Labor für Strömungstechnik und Akustik.

Kommission (30.03.2011): EU-Direktive Nr. 327/2011.

Mode, F. (1972): Ventilatorenanlagen. Berlin: de Gryter Verlag.

Neifach, Igor (2020): Strömungstechnik und Lärmschutz. Vorlesung 4: CFD.

Neifach, Igor; Czeckay, Pasquale (2018/19): Grundlagen Strömungstechnik. Vorlesung 7: Strömungsmaschinen, Kennlinien. Hochschule Düsseldorf. Institute of Sound and Vibration Engineering.

Schade, Heinz; Kunz, Heinz; Kameier, Frank; Paschereit, Christian Oliver (2013): Strömungslehre. 4., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter (De Gruyter Studium).

Umweltbundesamt (2012): Ökodesign-Richtlinie Ventilatoren.

## Anhang A: Bedienungsanleitung für das Bommes-Tool in Matlab

Das Matlab-Tool besteht aus einer Ordnerstruktur, die sich aus Matlab-Skripten, Excel-Tabellen für die Speicherung der Parameter und aus Geometrien des Ventilators zusammensetzt. Die Dateien in dem Ordner müssen zusammenbleiben, da sonst das Tool nicht mehr funktioniert. Zum Ausführen des Programms muss der Nutzer entweder das Matlab-Skript „Bommes\_Tool\_MIT\_Eingabefenster“ oder „Bommes\_Tool\_ohne\_Eingabefenster“ öffnen. Bei dem ersten Skript öffnet sich nach drücken des Start-Buttons in Matlab ein Eingabefenster, wo die gewünschten Eingaben gemacht werden können (vgl. Abbildung 0-1). Die wichtigsten Werte sind der Volumenstrom, die Druckerhöhung im Betriebspunkt, die mittlere Dichte des Mediums und die Drehzahl. Für die restlichen Werte sind Standardwerte hinterlegt, sodass nicht bei allen Feldern Eingabewerte festgelegt werden müssen. Der Anwender kann sich zwischen einer Spiralanpassung der Vier-Radien-Methode an die reibungsfreie logarithmische Spirale oder für eine Breitenoptimierung mit Spiralanpassung entscheiden. Bei der Breitenoptimierung wird vor der Spiralanpassung die logarithmische Spirale auf eine gewünschte Breite angepasst. Je nach Entscheidung öffnen sich andere Fenster, um für den gewählten Fall Werte eintragen zu können. Für die Breitenoptimierung können neben der Eingabe der gewünschten Breite noch Gewichtungen für die Optimierung festgelegt werden. Dazu zählt die Einhaltung der Breite, die Einhaltung der Grenzen für die meridionale Verzögerungszahl und die Einhaltung der Flächengewichtung zwischen Ein- und Austrittsfläche. Mit dem zweiten Skript werden dieselben Eingaben direkt im Skript gemacht und es wird erst danach der Start-Button bedient.

Abbildung 0-1: Eingabefelder des Bommes-Tools mit Standarteingabewerten

Nachdem die Berechnungen durchgeführt wurden, öffnet sich ein separates Fenster mit einer zweidimensionalen Draufsicht auf den Ventilator, einer Seitenansicht und einem Cordier-Diagramm. Es ist an einem Beispiel in Abbildung 0-2 dargestellt.

Die Draufsicht auf den Ventilator zeigt die Vier-Radien-Spirale, die logarithmische Spirale, den Laufradinnendurchmesser und den Laufradaußendurchmesser. Bei der Seitenansicht sind die Schaufeln im Bezug zu dem Gehäuse dargestellt. In dem Cordier-Diagramm kann geprüft werden, ob der Ventilator sich noch im Bommes-Bereich (Bereich maximaler Wirkungsgrade für Radialventilatoren) befindet. Außerdem sind noch die errechneten dimensionslosen Kennzahlen angegeben

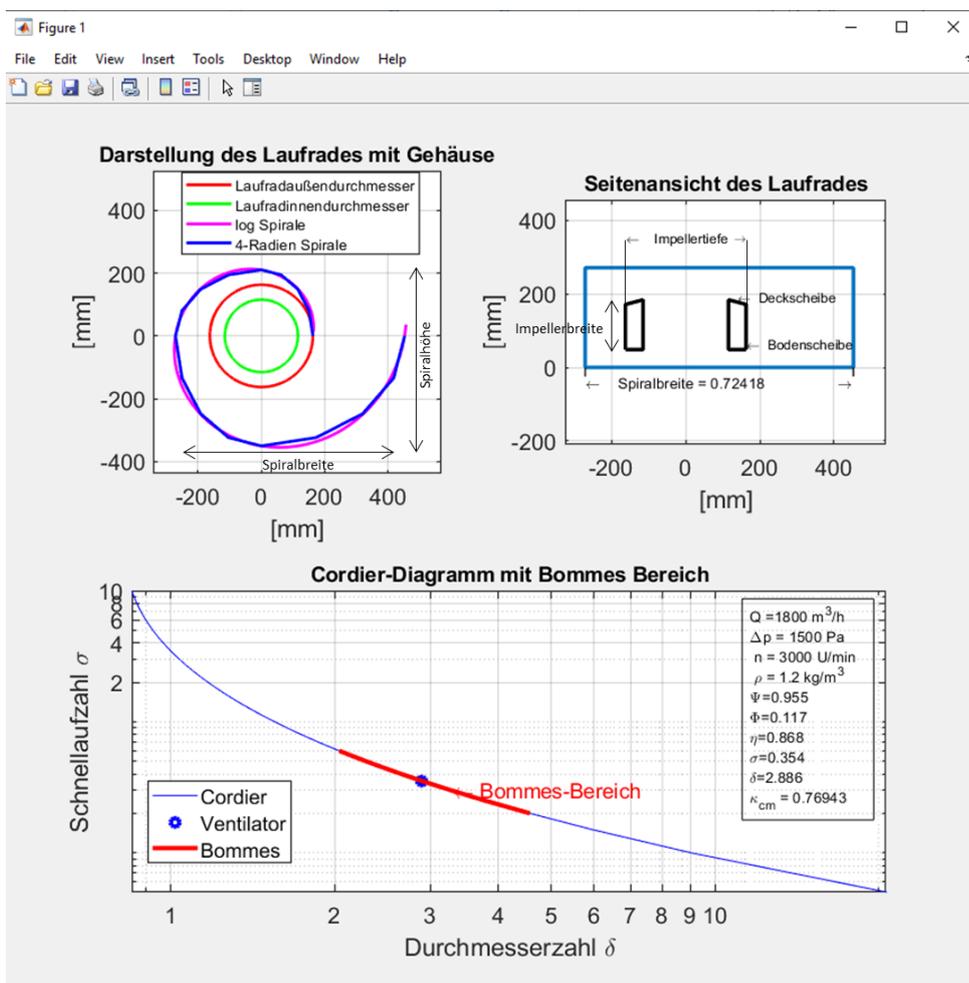


Abbildung 0-2: Grafische zweidimensionale Darstellung der Geometrien und Einordnung des berechneten Ventilators in das Cordier-Diagramm durch das Matlab-Tool

## Anhang B: Matlab-Codes

### Matlab-Code des Hauptprogramms ohne Eingabefenster

```

clear all;
close all;
clc;

%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% EINGABEN %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

V_pkt_h=800; %Volumenstrom [m^3/h])
delta_p=600; %Druckerhöhung im Betriebspunkt [Pa]
rho_m=1.2;%mittlere Dichte des Mediums (bei 25°C) [kg/m^3]
n=1849;%Drehzahl im Betriebspunkt [1/min]

z_1=11; %Anzahl der Schaufeln, z>10 für Stabilität und weniger Schau-
fellärm
s_1=0.0010; %Schaufeldicke [m]
F_B=2; %Faktor Gehäusebreite
F_D_a=1.26; %Faktor Saugstutzen, um Saugstutzendurchmesser variabel an-
gängige Rohrdurchmesser anzupassen

Breitenoptimierung = 1; % Breitenoptimierung ja(1)/nein(0)?

%Mit Breitenoptimierung (Breitenoptimierung = 1):
Breite_Spirale=0.7; %gewünschte Spiralbreite [m]
gew_breite = 3; %Gewichtung der Spiralbreite
gew_kappa_low=1;% Gewichtung der meridionalen Verzögerungszahl (untere
Grenze)
gew_kappa_high=1;% Gewichtung der meridionalen Verzögerungszahl (obere
Grenze)
gew_Flaechen=1; % Gewichtung des Flächenverhältnisses Eintritt/ Aus-
tritt Impeller

%Nur Spiralanpassung (Breitenoptimierung = 0):
gamma=15; % Deckscheibenwinkel
faktor_breite=1.78; %Faktor Laufradbreite, sofern keine Breitenopti-
mierung gewünscht

%Materialstärken [mm]
Gehaeuse=1; %Materialstärke Gehäuse [mm]
Schaufel=1; %Materialstärke Schaufel [mm]
Bodenscheibe=1;%Materialstärke Bodenscheibe [mm]
Deckscheibe=1; %Materialstärke Deckscheibe [mm]
Einlaufduese=1;%Materialstärke Einlaufdüse [mm]

%=====
%=====
%=====
%=====

```

```

%=====
%=====
%===== AB HIER NUR BERECHNUNGEN
%=====
%=====
%=====

%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Start der Berechnungen
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Spiralanpassung = 1; %Soll 4R and log-Spirale angepasst werden
ja(1)/nein(0)?--> Soll immer stattfinden
kappa = [0.32 0.17]; % Festlegung der kappa-Standardwerte falls keine
Optimierung stattfindet
gamma_faktorBreite=[gamma faktor_breite]; % Deckscheibenwinkel und
der Faktor von der Breite werden in einen Vektor geschrieben (für spä-
tere Fehlertermbestimmung)

if Spiralanpassung ==1 % Spiralanpassung erwünscht
    if Breitenoptimierung ==0 % Berechnung ohne Breitenanpassung

        x=1; % Hilfsvariabel für Unterskript
        fun = @(kappa) bommess(kappa,gamma_faktor-
Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); % Funk-
tion mit unbestimmten Werten für kappa wird erstellt
        kappa0 = rand(1,2).*([2-0.001 1-0.001]+[0.001 0.001]); % Be-
stimmung von willkürlichen Startwerte für kappa 4 (0.001-2) und kappa
1 (0.001-1)
        [kappa_Opti, fOpti] = fmincon(fun,kappa0,[],[],[],[],[0.001
0.001],[2 1]); % Minimaler Wert für Funktion fun bei Fehlerterm
        [~, D_1, D_2, log_x, log_y, XX, YY,
b_1,b_2,beta_1,beta_2,r_D,r_E,D_a,s_w,s_1,B_,Sch_Kr_R,r_z_und_r_strich
,R_quad,log_Sp_Br,Vier_Ra_Br,log_Sp_Hoe,Vier_Ra_Hoe,kappa_cm,xi_1,
sigma,
kdelta_p,eta_p,psi_p,phi_p,A_ein,A_aus,kappa_cm_des,D_eta_max,n_eta_ma
x] = bommess(kappa_Opti,gamma_faktor-
Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); %benö-
tigte Ergebnisse mit optimiertem Kappa zurück holen für Plotting-Funk-
tion

        kappa=[kappa_Opti(1) kappa_Opti(2)]; %Optimiertes Kappa für
Spiralanpassung
        gamma_faktorBreite_Opti=[gamma faktor_breite];

    else % Breitenoptimierung gewünscht

        while 1
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 1. Schritt: Neue Log-Spirale de-
finieren

            x=2; % Hilfsvariabel für Unterskript
            %gamma_faktorBreite_0=[5 0.5];
            gamma_faktorBreite_0 = rand(1,2).*([15-5 2-1]+[5 1]);
            %Deckscheibenwinkel 0-45 deg, Faktor Breite im Bereich 1-3 angenommen

```

```

        fun = @(gamma_faktorBreite) bommess(kappa,gamma_faktor-
Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); % Funk-
tion mit unbestimmten Werten für kappa wird erstellt
        [gamma_faktorBreite_Opti, fOpti] = fmincon(fun,gamma_fak-
torBreite_0,[],[],[],[],[0 1],[45 3]); %Minimiere Zielfunktion unter
Variation von Deckscheibenwinkel (von 0 bis 45) und Faktor Gehäuse-
breite (von 1 bis 3)

        [log_Sp_Br,kappa_cm,b_1,xi_1] = bommess(kappa,gamma_fak-
torBreite_Opti,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); %benö-
tigte Ergebnisse mit optimiertem gamma und faktor_breite zurück holen
für Plotting-Funktion
        gamma_faktorBreite=[gamma_faktorBreite_Opti(1) gamma_fak-
torBreite_Opti(2)]; % Neue Werte für gamma und Faktor Breite
        gamma=gamma_faktorBreite_Opti(1); % Herausschreiben des
Deckscheibenwertes

        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 2. Schritt: Erneute Anpassung
der 4-Radien

        x=1; % Hilfsvariabel für Unterskript
        fun = @(kappa) bommess(kappa,gamma_faktor-
Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); % Funk-
tion mit unbestimmten Werten für kappa wird erstellt
        kappa0 = rand(1,2).*([2-0.001 1-0.001]+[0.001 0.001]); %
Bestimmung von willkürlichen Startwerte für kappa 4 (0.001-2) und
kappa 1 (0.001-1)
        [kappa_Opti, fOpti] = fmin-
con(fun,kappa0,[],[],[],[],[0.001 0.001],[2 1]); % Minimaler Wert für
Funktion fun bei Fehlerterm
        [~, D_1, D_2, log_x, log_y, XX, YY,
b_1,b_2,beta_1,beta_2,r_D,r_E,D_a,s_w,s_l,B_,Sch_Kr_R,r_z_und_r_strich
,R_quad,log_Sp_Br,Vier_Ra_Br,log_Sp_Hoe,Vier_Ra_Hoe,kappa_cm,xi_1,
sigma,
kdelta_p,eta_p,psi_p,phi_p,A_ein,A_aus,kappa_cm_des,D_eta_max,n_eta_ma
x] = bommess(kappa_Opti,gamma_faktor-
Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); %benö-
tigte Ergebnisse mit optimiertem Kappa zurück holen für Plotting-Funk-
tion
        kappa=[kappa_Opti(1) kappa_Opti(2)]; %Optimiertes Kappa
für Spiralanpassung

        if xi_1 < 0.92 % Prüfung des Verengungsfaktors
            fprintf('\nVerengungsfaktor = %f < 0.92 \n',xi_1); %
Ausgaben im Command Window
            fprintf('Schaufelzahl reduzieren \n');
            fprintf('Schaufelstärke reduzieren \n');
            fprintf('Drehzahl reduzieren \n');
        end
        if b_2<b_1 && b_2>0 % Die Schleife wird nur unterbrochen, wenn
Außenschaufelbreite < Innenschaufel und >0
            break;
        end
    end
end
end

```

```

end

else %Spiralanpassung nicht gewünscht

    x=0; % Hilfsvariabel für Unterskript
    [~, D_1, D_2, log_x, log_y, XX, YY,
b_1,b_2,beta_1,beta_2,r_D,r_E,D_a,s_w,s_l,B_,Sch_Kr_R,r_z_und_r_strich
,R_quad,log_Sp_Br,Vier_Ra_Br,log_Sp_Hoe,Vier_Ra_Hoe,kappa_cm,xi_1,
sigma,
kdelta_p,eta_p,psi_p,phi_p,A_ein,A_aus,kappa_cm_des,D_eta_max,n_eta_ma
x] = bommess(kappa,gamma_faktor-
Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); % Aus-
führen der Berechnung ohne Optimierung
    gamma_faktorBreite_Opti=[gamma faktor_breite]

end

verh=A_aus/A_ein; %Ausgabe Flächenverhältnis Eintritt/Austritt
if verh > 2.0 % Falls das Verhältnis Größer als 22 ist, bekommt Nutzer
Hinweise
    fprintf('\nMeridionale Verzögerungszahl = %f (opt 0.6 -
0.8)\n',kappa_cm_des);
    fprintf('\nFlächenverhältnis Eintritt/ Austritt = %f\n',verh);
    fprintf('Optimum 1.8 - 2.0 betragen\n');
    fprintf('Wenn möglich Faktor Laufradbreite reduzieren oder Breite
Spiralgehäuse erhöhen\n');
end

%fprintf (' \nOptimale Drehzahl = %f \nOptimaler Schaufelaußendurchmes-
ser = %f', n_eta_max ,D_eta_max);
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Plots und Parameterübertragung in Excel
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Plotting(r_z_und_r_strich,B_,D_1, D_2, log_x, log_y, XX, YY,b_1,b_2,
sigma, kdelta_p,
gamma,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,eta_p,psi_p,phi_p,Vier_Ra_Br,D_a,s_l,r_D
,kappa_cm_des,D_eta_max,n_eta_max) % Funktion zur graphischen Darstel-
lung des Gehäuses und der Schaufeln
Inv=[D_2; D_1; b_1; b_2; gamma;beta_1; beta_2;
r_D;r_E;D_a;s_w;s_l;B_;D_a;Sch_Kr_R;z_1;D_a;r_z_und_r_strich(1);r_z_un
d_r_strich(2);r_z_und_r_strich(3);r_z_und_r_strich(4);r_z_und_r_strich
(5);R_quad(1);R_quad(2);R_quad(3);R_quad(4);Gehaeuse/1000;Schau-
fel/1000;Bodenscheibe/1000;Deckscheibe/1000;Einlaufduese/1000;
kappa(2);kappa(1);
kappa(2)/kappa(1);xi_1;kappa_cm;Vier_Ra_Br;Vier_Ra_Hoe;log_Sp_Br;log_S
p_Hoe;gamma_faktorBreite_Opti(2);verh; A_aus;A_ein]; % Wichtige Para-
meter für Bauteil in Inventor als ein Vektor zusammenfassen
Inventor=[D_2; D_1; b_1; b_2; gamma;beta_1; beta_2;
r_D;r_E;D_a;s_w;s_l;B_;D_a;Sch_Kr_R;z_1;D_a;r_z_und_r_strich(1);r_z_un
d_r_strich(2);r_z_und_r_strich(3);r_z_und_r_strich(4);r_z_und_r_strich
(5);R_quad(1);R_quad(2);R_quad(3);R_quad(4);Gehaeuse/1000;Schau-
fel/1000;Bodenscheibe/1000;Deckscheibe/1000;Einlaufduese/1000]; %
Wichtige Parameter für Bauteil in Inventor als ein Vektor zusammenfas-
sen
xlswrite('Pruefung',Inv,1,['B1:B44']); % Parameter zum Prüfen werden
in Excel-Tabelle übernommen

```

```
xlswrite('centrifugal_fan_design_ISAVE_excel2021JT',Inven-
tor,1,['B1:B34']); % Parameter für Inventor werden in Excel-Tabelle
übernommen
```

## Matlab-Code des Hauptprogramms mit Eingabefenster

```
clear all;
close all;
clc;

%=====
%=====
%=====
%=====
%=====
%=====
%===== BITTE AUF RUN KLICKEN!
%=====
%=====
%=====
%=====
%=====
%=====
%=====
%=====
%=====
%% %%%%%%%%%%% EINGABEN
%% %%%%%%%%%%%

defaultanswer =
{'400','300','1.2','3000','10','0.001','2','1','1','1','1','1','1','1.26',
'0'}; % Standartwerte vor jeder Eingabe
prompt      ={'Volumenstrom [m^3/h]','Druckerhöhung im Betriebspunkt
[Pa]','mittlere Dichte des Mediums (bei 25°C) [kg/m^3]','Drehzahl im
Betriebspunkt [1/min]',...
'Anzahl der Schaufeln', 'Schaufeldicke [m]', 'Faktor Gehäusebrei-
te','Materialstärke Gehäuse [mm]', 'Materialstärke Schaufel [mm]',...
'Materialstärke Bodenscheibe [mm]', 'Materialstärke Deck-
scheibe[mm]','Materialstärke Einlaufdüse [mm]','Faktor
Saugstutzen',...
'Breitenoptimierung [ja(1)/nein(0)]'}; % Vektor für Namen der Eingabe-
felder
name        = 'Bitte Werte eingeben:'; % Titel des Eingabefensters
numlines    = 1; % Zeilenanzahl der Eingabefenster
x = inputdlg(prompt,name,numlines,defaultanswer, 'on'); % Öffnen des
Eingabefensters

% Benutzereingaben von string in Zahl:
V_pkt_h = str2num(x{1}); %Volumenstrom [m^3/h]
delta_p = str2num(x{2}); %Druckerhöhung im Betriebspunkt [Pa]
rho_m = str2num(x{3}); %mittlere Dichte des Mediums (bei 25°C)
[kg/m^3]
n = str2num(x{4}); %Drehzahl im Betriebspunkt [1/min]
```

```

z_1=str2num(x{5}); %Anzahl der Schaufeln, z>10 für Stabilität, weniger
Schaufellärm
s_1=str2num(x{6}); %Schaufeldicke [m]
F_B=str2num(x{7}); %Faktor Gehäusebreite
%Materialstärken [mm]
Gehaeuse=str2num(x{8}); %Materialstärke Gehäuse [mm]
Schaufel=str2num(x{9}); %Materialstärke Schaufel [mm]
Bodenscheibe=str2num(x{10});%Materialstärke Bodenscheibe [mm]
Deckscheibe=str2num(x{11}); %Materialstärke Deckscheibe [mm]
Einlaufduese=str2num(x{12}); %Materialstärke Einlaufdüse [mm]
F_D_a=str2num(x{13}); %Faktor Saugstutzen, um Saugstutzendurchmesser
variabel an gängige Rohrdurchmesser anzupassen
Breitenoptimierung = str2num(x{14}); % Breitenoptimierung
ja(1)/nein(0)?

if Breitenoptimierung == 1 % Wenn Breitenoptimierung erwünscht ist,
wird neues Eingabefenster geöffnet

    defaultanswer = {'1.0','3','1','1','1'}; % Standartwerte vor jeder
Eingabe
    prompt          ={'gewünschte Spiralbreite [m]','Gewichtung (0-5)
der Spiralbreite','Gewichtung (0-5) der meridionalen Verzögerungszahl
> 0.6',...
    'Gewichtung (0-5) der meridionalen Verzögerungszahl <
0.8','Gewichtung (0-5) des Flächenverhältnisses A_ein/ A_aus < 2'}; %
Vektor mit Namen der Eingabefelder
    name            = 'Mit Breitenoptimierung: '; % Titel des Eingabe-
fensters
    numlines        = 1; % Zeilenanzahl der Eingabefenster
    x = inputdlg(prompt,name,numlines,defaultanswer, 'on');

    % Benutzereingaben von string in Zahl:
    Breite_Spirale=str2num(x{1}); %gewünschte Spiralbreite [m]
    gew_breite = str2num(x{2}); %Gewichtung der Spiralbreite
    gew_kappa_low=str2num(x{3});% Gewichtung der meridionalen Verzöge-
rungszahl (untere Grenze)
    gew_kappa_high=str2num(x{4});% Gewichtung der meridionalen Verzö-
gerungszahl (obere Grenze)
    gew_Flaechen=str2num(x{5}); % Gewichtung des Flächenverhältnisses
Eintritt/ Austritt Impeller

    % Folgende Werte werden bei Breitenoptimierung optimiert und müs-
sen
    % deshalb nicht von dem Benutzer eingegeben werden:
    gamma=10; % Deckscheibenwinkel
    faktor_breite=1.79; %Faktor Laufradbreite, sofern keine Breitenop-
timierung gewünscht

elseif Breitenoptimierung == 0 % Wenn keine Breitenoptimierung er-
wünscht ist, wird neues Eingabefenster geöffnet

    defaultanswer = {'10','1.79'};
    prompt          ={'Deckscheibenwinkel [°]','Faktor Laufradbreite'};
% Vektor mit Namen der Eingabefelder
    name            = 'Nur Spiralanpassung: '; % Titel des Eingabefens-
ters
    numlines        = 1; % Zeilenanzahl der Eingabefenster
    x = inputdlg(prompt,name,numlines,defaultanswer, 'on');

```

```

% Benutzereingaben von string in Zahl:
gamma=str2num(x{1}); % Deckscheibenwinkel
faktor_breite=str2num(x{2}); %Faktor Laufradbreite, sofern keine
Breitenoptimierung gewünscht

% Folgende Werte werden bei Spiralanpassung nicht benötigt und
müssen
% deshalb nicht von dem Benutzer eingegeben werden:
Breite_Spirale=0.12; %gewünschte Spiralbreite [m]
gew_breite = 4; %Gewichtung der Spiralbreite
gew_kappa_low=4;% Gewichtung der meridionalen Verzögerungszahl
(untere Grenze)
gew_kappa_high=4;% Gewichtung der meridionalen Verzögerungszahl
(obere Grenze)
gew_Flaechen=1; % Gewichtung des Flächenverhältnisses Eintritt/
Austritt Impeller

else
fprintf('Bei Breitenoptimierung 1 oder 0 angeben!'); % Ausgabe,
falls falsche Werte bei der Breitenoptimierung angegeben wurden
end

%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Start der Berechnungen
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Spiralanpassung = 1; %Soll 4R and log-Spirale angepasst werden
ja(1)/nein(0)?--> Soll immer stattfinden
kappa = [0.32 0.17]; % Festlegung der kappa-Standartwerte falls keine
Optimierung stattfindet
gamma_faktorBreite =[gamma faktor_breite]; % Deckscheibenwinkel und
der Faktor von der Breite werden in einen Vektor geschrieben (für spä-
tere Fehlertermbestimmung)

if Spiralanpassung ==1 % Spiralanpassung erwünscht
if Breitenoptimierung ==0 % Berechnung ohne Breitenanpassung

x=1; % Hilfsvariabel für Unterskript
fun = @(kappa) bommess(kappa,gamma_faktor-
Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); % Funk-
tion mit unbestimmten Werten für kappa wird erstellt
kappa0 = rand(1,2).*([2-0.001 1-0.001]+[0.001 0.001]); % Be-
stimmung von willkürlichen Startwerte für kappa 4 (0.001-2) und kappa
1 (0.001-1)
[kappa_Opti, fOpti] = fmincon(fun,kappa0,[],[],[],[],[0.001
0.001],[2 1]); % Minimaler Wert für Funktion fun bei Fehlerterm
[~, D_1, D_2, log_x, log_y, XX, YY,
b_1,b_2,beta_1,beta_2,r_D,r_E,D_a,s_w,s_l,B_,Sch_Kr_R,r_z_und_r_strich
,R_quad,log_Sp_Br,Vier_Ra_Br,log_Sp_Hoe,Vier_Ra_Hoe,kappa_cm,xi_1,
sigma,
kdelta_p,eta_p,psi_p,phi_p,A_ein,A_aus,kappa_cm_des,D_eta_max,n_eta_ma
x] = bommess(kappa_Opti,gamma_faktor-
```

```

Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); %benö-
tigte Ergebnisse mit optimiertem Kappa zurück holen für Plotting-Funk-
tion

    kappa=[kappa_Opti(1) kappa_Opti(2)]; %Optimiertes Kappa für
Spiralanpassung
    gamma_faktorBreite_Opti=[gamma faktor_breite];

else % Breitenoptimierung gewünscht

    while 1
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 1. Schritt: Neue Log-Spirale de-
finieren

        x=2; % Hilfsvariabel für Unterskript
        %gamma_faktorBreite_0=[5 0.5];
        gamma_faktorBreite_0 = rand(1,2).*([15-5 2-1]+[5 1]);
%Deckscheibenwinkel 0-45 deg, Faktor Breite im Bereich 1-3 angenommen
        fun = @(gamma_faktorBreite) bommess(kappa,gamma_faktor-
Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); % Funk-
tion mit unbestimmten Werten für kappa wird erstellt
        [gamma_faktorBreite_Opti, fOpti] = fmincon(fun,gamma_fak-
torBreite_0,[],[],[],[],[0 1],[45 3]); %Minimiere Zielfunktion unter
Variation von Deckscheibenwinkel (von 0 bis 45) und Faktor Gehäuse-
breite (von 1 bis 3)

        [log_Sp_Br,kappa_cm,b_1,xi_1] = bommess(kappa,gamma_fak-
torBreite_Opti,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); %benö-
tigte Ergebnisse mit optimiertem gamma und faktor_breite zurück holen
für Plotting-Funktion
        gamma_faktorBreite=[gamma_faktorBreite_Opti(1) gamma_fak-
torBreite_Opti(2)]; % Neue Werte für gamma und Faktor Breite
        gamma=gamma_faktorBreite_Opti(1); % Herausschreiben des
Deckscheibenwertes

        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 2. Schritt: Erneute Anpassung
der 4-Radien

        x=1; % Hilfsvariabel für Unterskript
        fun = @(kappa) bommess(kappa,gamma_faktor-
Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); % Funk-
tion mit unbestimmten Werten für kappa wird erstellt
        kappa0 = rand(1,2).*([2-0.001 1-0.001]+[0.001 0.001]); %
Bestimmung von willkürlichen Startwerte für kappa 4 (0.001-2) und
kappa 1 (0.001-1)
        [kappa_Opti, fOpti] = fmin-
con(fun,kappa0,[],[],[],[],[0.001 0.001],[2 1]); % Minimaler Wert für
Funktion fun bei Fehlerterm
        [~, D_1, D_2, log_x, log_y, XX, YY,
b_1,b_2,beta_1,beta_2,r_D,r_E,D_a,s_w,s_l,B_,Sch_Kr_R,r_z_und_r_strich
,R_quad,log_Sp_Br,Vier_Ra_Br,log_Sp_Hoe,Vier_Ra_Hoe,kappa_cm,xi_1,
sigma,
kdelta_p,eta_p,psi_p,phi_p,A_ein,A_aus,kappa_cm_des,D_eta_max,n_eta_ma
x] = bommess(kappa_Opti,gamma_faktor-

```

```

Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); %benö-
tigte Ergebnisse mit optimiertem Kappa zurück holen für Plotting-Funk-
tion
        kappa=[kappa_Opti(1) kappa_Opti(2)]; %Optimiertes Kappa
für Spiralanpassung

        if xi_1 < 0.92 % Prüfung des Verengungsfaktors
            fprintf('\nVerengungsfaktor = %f < 0.92 \n',xi_1); %
Ausgaben im Command Window
            fprintf('Schaufelzahl reduzieren \n');
            fprintf('Schaufelstärke reduzieren \n');
            fprintf('Drehzahl reduzieren \n');
        end
        if b_2<b_1 && b_2>0 % Die Schleife wird nur unterbrochen, wenn
Außenschaufelbreite < Innenschaufelbreite und >0
            break;
        end

        end

        end

else %Spiralanpassung nicht gewünscht

        x=0; % Hilfsvariabel für Unterskript
        [~, D_1, D_2, log_x, log_y, XX, YY,
b_1,b_2,beta_1,beta_2,r_D,r_E,D_a,s_w,s_1,B_,Sch_Kr_R,r_z_und_r_strich
,R_quad,log_Sp_Br,Vier_Ra_Br,log_Sp_Hoe,Vier_Ra_Hoe,kappa_cm,xi_1,
sigma,
kdelta_p,eta_p,psi_p,phi_p,A_ein,A_aus,kappa_cm_des,D_eta_max,n_eta_ma
x] = bommess(kappa,gamma_faktor-
Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x); % Aus-
führen der Berechnung ohne Optimierung
        gamma_faktorBreite_Opti=[gamma_faktor_breite]

end

verh=A_aus/A_ein; %Ausgabe Flächenverhältnis Eintritt/Austritt
if verh > 2.0 % Falls das Verhältnis Größer als 22 ist, bekommt Nutzer
Hinweise
        fprintf('\nMeridionale Verzögerungszahl = %f (opt 0.6 -
0.8)\n',kappa_cm_des);
        fprintf('\nFlächenverhältnis Eintritt/ Austritt = %f\n',verh);
        fprintf('Optimum 1.8 - 2.0 betragen\n');
        fprintf('Wenn möglich Faktor Laufradbreite reduzieren oder Breite
Spiralgehäuse erhöhen\n');
end

%fprintf ('\nOptimale Drehzahl = %f \nOptimaler Schaufelaußendurchmes-
ser = %f', n_eta_max ,D_eta_max);
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Plots und Parameterübertragung in Excel
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Plotting(r_z_und_r_strich,B_,D_1, D_2, log_x, log_y, XX, YY,b_1,b_2,
sigma, kdelta_p,

```

```

gamma,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,eta_p,psi_p,phi_p,Vier_Ra_Br,D_a,s_l,r_D
,kappa_cm_des,D_eta_max,n_eta_max) % Funktion zur graphischen Darstel-
lung des Gehäuses und der Schaufeln
Inv=[D_2; D_1; b_1; b_2; gamma;beta_1; beta_2;
r_D;r_E;D_a;s_w;s_l;B_;D_a;Sch_Kr_R;z_1;D_a;r_z_und_r_strich(1);r_z_un
d_r_strich(2);r_z_und_r_strich(3);r_z_und_r_strich(4);r_z_und_r_strich
(5);R_quad(1);R_quad(2);R_quad(3);R_quad(4);Gehaeuse/1000;Schäu-
fel/1000;Bodenscheibe/1000;Deckscheibe/1000;Einlaufduese/1000;
kappa(2);kappa(1);
kappa(2)/kappa(1);xi_1;kappa_cm;Vier_Ra_Br;Vier_Ra_Hoe;log_Sp_Br;log_S
p_Hoe;gamma_faktorBreite_Opti(2);verh; A_aus;A_ein]; % Wichtige Para-
meter für Bauteil in Inventor als ein Vektor zusammenfassen
Inventor=[D_2; D_1; b_1; b_2; gamma;beta_1; beta_2;
r_D;r_E;D_a;s_w;s_l;B_;D_a;Sch_Kr_R;z_1;D_a;r_z_und_r_strich(1);r_z_un
d_r_strich(2);r_z_und_r_strich(3);r_z_und_r_strich(4);r_z_und_r_strich
(5);R_quad(1);R_quad(2);R_quad(3);R_quad(4);Gehaeuse/1000;Schäu-
fel/1000;Bodenscheibe/1000;Deckscheibe/1000;Einlaufduese/1000]; %
Wichtige Parameter für Bauteil in Inventor als ein Vektor zusammenfas-
sen
xlswrite('Pruefung',Inv,1,['B1:B44']); % Parameter zum Prüfen werden
in Excel-Tabelle übernommen
xlswrite('centrifugal_fan_design_ISAVE_excel2021JT',Inven-
tor,1,['B1:B34']); % Parameter für Inventor werden in Excel-Tabelle
übernommen

```

## Unterprogramm zur Berechnung

```

function [zg, D_1, D_2, log_x, log_y, XX, YY,
b_1,b_2,beta_1,beta_2,r_D,r_E,D_a,s_w,s_l,B_,Sch_Kr_R,r_z_und_r_strich
,R_quad,log_Sp_Br,Vier_Ra_Br,log_Sp_Hoe,Vier_Ra_Hoe,kappa_cm,xi_1,sigm
a,
kdelta_p,eta_p,psi_p,phi_p,A_ein,A_aus,kappa_cm_des,D_eta_max,n_eta_ma
x] = bommess(kappa,gamma_faktor-
Breite,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,z_1,s_1,F_D_a,F_B,Breite_Spi-
rale,gew_breite,gew_kappa_low,gew_kappa_high,gew_Flaechen,x)
    kappa4=kappa(1);%Koeffizient kappa 4 wird festgelegt
    kappal=kappa(2);%Koeffizient kappa 1 wird festgelegt

    gamma=gamma_faktorBreite(1); %Deckscheibenwinkel
    faktor_breite=gamma_faktorBreite(2);%Faktor für Laufradbreite

    if gamma<0 %Deckscheibenwinkel [°], darf Werte zwischen 0° bis 45°
annehmenen
        gamma=0;
    elseif gamma>45
        gamma=45;
    end

    if F_B<2 %Faktor Gehäusebreite darf Werte zwischen 2 und 3 anneh-
men
        F_B=2;
    elseif F_B>3
        F_B=3;
    end

```

```

    if F_D_a<1.21 % Faktor Saugstuten darf Werte zwischen 1.21 und
1.46 annehmen
        F_D_a=1.21;
    elseif F_D_a>1.46
        F_D_a=1.46;
    end

X_zunge=0.0001; %Verhältnis Laufrad zu Zunge
alpha_steig=1; %Steigungswinkel [°]

%% Berechnungen

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Umrechnung %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

V_pkt_s=V_pkt_h/3600; %Volumenstrom pro Sekunde [m^3/s]
n_s=n/60; %Drehzahl pro Sekunde [1/sec]
P_th=V_pkt_s*delta_p/1000; %umgesetzte Leistung
Y_th=delta_p/rho_m ; %Theoretische Stufenarbeit

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Dimensionslose Kennzahlen %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

sigma=(2).^(1/4)*(pi)^(1/2)*n_s*(V_pkt_s^(1/2)/Y_th^(3/4));
%Schnelllaufzahl
eta_p=10^(-0.097358-
0.0800538*log10(sigma)+0.151771*log10(sigma)^2+0.340467*log10(sigma)^3
); %polynomischer innerer Wirkungsgrad
psi_p=10^(-0.381488-1.04357*log10(sigma)-
0.502523*log10(sigma)^2+0.0704883*log10(sigma)^3); %polynomische
Druckzahl
phi_p=sigma^2*psi_p^(3/2); %polynomische Lieferzahl
kdelta_p=1/(psi_p^(1/2)*sigma); %polynomische Durchmesserzahl

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Berechnung Laufrad und Einlaufdüse %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

u_2=(2*Y_th/psi_p)^(1/2); %erforderliche Umfangsgeschwindigkeit
D_2=u_2/(pi*n_s); %Laufradaussendurchmesser
D_1=D_2*1.27*psi_p^0.5*sigma^(5/6); %Laufradeintrittsdurchmesser
(aus Bommess)
b_1=0.54*sigma^(1/6)*D_1*faktor_breite;%Schaufeleintrittsbreite
(aus Bommess)*beliebige Aufdickung

D1_D2=D_1/D_2; %Durchmesser Verhältnis D1/D2
b1_D1=b_1/D_1; %Verhältnis b1/D1
b2_D2=((b_1/D_1*D1_D2)-(0.5*(1-D1_D2))*tan(gamma*pi/180)); %Ver-
hältnis b2/D2

b_2=b2_D2*D_2; %Schaufelaustrittsbreite
r_D=0.14*D_1; %Krümmungsradius Deckscheibe r_D>= 0,14xD_1
r_E=r_D; %Krümmungsradius Einlaufdüse r_D=r_E
s_w=0.01*D_1; %Spaltenweite
s_l=0.04*D_1; %Spaltenlänge

%Flächenverhältnis Eintritt zu Austritt
A_ein=D_1^2*pi/4; %Eintrittsfläche in Impeller
A_aus=D_2*pi*b_2; %Austrittsfläche aus Impeller: Beeinflusst durch
Deckscheibenwinkel

```

```

D_a=F_D_a*D_1; %Saugstutzendurchmesser

B_=F_B*b_1; %Gehäusebreite (2*B/b^2)
%Laufrad muss in Gehäuse rein passen:
while B_ < ((D_a-D_1)/2*tand(45)+s_1*2+r_D*1.2)+b_1+0.005 % Solange
wie b_1 nicht ins Gehäuse passt, wird Faktor um 0.1 erhöht
    F_B=F_B+0.1;
    B_=F_B*b_1;
end

% Berechnung der optimalen Drehzahl mit zugehörigem Laufradaussen-
durchmesser
sigma_eta_max=0.34;
eta_max=10^(-0.097358-
0.0800538*log10(sigma_eta_max)+0.151771*log10(sigma_eta_max)^2+0.34046
7*log10(sigma_eta_max)^3);
psi_max=10^(-0.381488-1.04357*log10(sigma_eta_max)-
0.502523*log10(sigma_eta_max)^2+0.0704883*log10(sigma_eta_max)^3);
delta_eta_max=1/(psi_max^(1/2)*sigma_eta_max);
n_eta_max=sigma_eta_max*(2*Y_th)^0.75/(V_pkt_s^0.5*2*pi^0.5)*60;
D_eta_max=delta_eta_max*2*V_pkt_s^0.5/(pi^0.5*(2*Y_th)^0.25);
n_eta_max=round(n_eta_max*1)/1;
D_eta_max=round(D_eta_max*1000)/1000;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Schaufeln %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Iterative Berechnung von Schaufeleintrittswinkel und Verengungs-
faktor am Eintritt
i=1; % Laufvariabel
beta_1=10; % Startwert für Schaufeleintrittswinkel [°]
xi_1=1; % Startwert Verengungsfaktor am Eintritt
while i > 1e-20 % Solange die Differenz zwischen alten und neuen
% Schaufeleintrittswinkel zu hoch ist, muss die
Schleife
    % weiter durchlaufen werden
    beta_1i=atan(0.233*(sigma^-(2/3))/xi_1)*180/pi; %Saufelein-
trittswinkel
    xi_1i=1-((s_1*z_1)/(pi*D_1*sin(beta_1*pi/180))); %Verengungs-
faktor am Eintritt
    i=abs(beta_1-beta_1i); % Absolute Differenz zwischen alten und
neuen Schaufeleintrittswinkel
    xi_1=xi_1i; % Verengungsfaktor nimmt Wert vom neu berechneten
an
    beta_1=abs(beta_1i); % Schaufeleintrittswinkel nimmt Wert vom
neu berechneten an
end

beta_2=beta_1+10; % Schaufelaustrittswinkel [°]
xi_2=1-((s_1*z_1)/(pi*D_2*sin(beta_2*pi/180))); %Verengungsfaktor
am Austritt

kappa_cm_p=(0.54*sigma^(1/6)*(1.279*psi_p^(1/2)*sigma^(5/6))^2*(xi_1/x
i_2))/(0.686*psi_p^(1/2)*sigma-0.5*(1-

```

```

(1.279*psi_p^(1/2)*sigma^(5/6))*tan(gamma*pi/180));%meridionale Verzögerungszahl dimensionslos
kappa_cm=(b_1*D_1*xi_1)/(b_2*D_2*xi_2);%meridionale Verzögerungszahl aus reellen Größen
Sch_Kr_R=((D_2/2)^2)-((D_1/2)^2)/(2*((D_2/2)*cos((beta_2*pi/180))-(D_1/2)*cos((beta_1*pi/180))));%Schaufelkrümmungsradius

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Geschwindigkeiten %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

c_1m=V_pkt_s/(D_1*pi*b_1);%Meridiangeschwindigkeit am Eintritt
u_1=D_1*pi*n/60;%Umfangsgeschwindigkeit am Eintritt
c_1u=0;%drallfreier Eintritt
w_1u=u_1-c_1u;%Relativgeschwindigkeit am Eintritt
c_2m=V_pkt_s/(D_2*pi*b_2);%Meridiangeschwindigkeit am Austritt
u_2_2=D_2*pi*n/60;%Umfangsgeschwindigkeit am Austritt
c_2u=Y_th/u_2;%Umfangs-komponente der Absolutgeschwindigkeit am Austritt
w_2u=u_2_2-c_2u;%Relativgeschwindigkeit am Austritt

%% Berechnung Spiralen

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% log Spirale nach Mode (1972) von Müller (2001), %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% verlustfreier idealer Strömungsfall %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

k=delta_p*(D_2/2)/(rho_m*u_2); % Beiwert k nach Mode

% Berechnung der Koordinaten für log Spirale
for i=1:81 % for-Schleife mit steigender Variabel für Spirale
    log_pi(i)=i*2.5*pi/100;% pi-Werte für Spirale

log_x(i)=(D_2/2*exp(log_pi(i)*V_pkt_s/(2*pi*b_2*k))*cos(log_pi(i)))*1000;% x-Koordinaten der Spirale

log_y(i)=(D_2/2*exp(log_pi(i)*V_pkt_s/(2*pi*b_2*k))*sin(log_pi(i)))*1000;% y-Koordinaten der Spirale
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Vier-Radien-Methode %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Festlegung der pi-Werte auf Kreis
PI=[0 pi/8 pi/4 pi*3/8 pi/2 pi/2 pi*5/8 pi*3/4 pi*7/8 pi pi pi*9/8 pi*10/8 pi*11/8 pi*12/8 pi*12/8 pi*13/8 pi*14/8 pi*15/8 pi*16/8];

r_1=D_1/2;% Radius von Laufradinnendurchmesser
r_2=D_2/2;% Radius von Laufradaußendurchmesser
% r_strich=(r_1+r_2)/2;% mittlerer Radius
% beta_strich=(beta_1+beta_2)/2;% mittlerer Schaufelwinkel
r_zunge=r_2*X_zunge+r_2;% Radius zur Zunge

% Einheitssilhouette nach Bommes/Reinartz, umgestellt nach r/r_z
j=0;% Laufvariabel

```

```

for i=1:5
    r_rz(i)=exp((2/(3*pi))*log((kappa4/kappa1))*pi*j); % Berechnung von r/r_z an den Polwinkeln
    j=j+1/2; % für Winkel von 0 pi bis 2 pi (5 Polwinkel)
    r_z_und_r_strich(i)=r_zunge*r_rz(i); % mit Betrachtung des Radius zur Zunge
end

% Berechnung des Spiralradius vom 1. bis zum 4. Quadranten
for i=1:4

R_quad(i)=(r_z_und_r_strich(i+1)+r_z_und_r_strich(i))/(2*cos(alpha_steig*pi/180));
end

% Vier Radian Methode Punkt A
% Bestimmung des Mittelpunktes
X34halbe=sqrt(r_z_und_r_strich(4)^2+r_z_und_r_strich(5)^2)/2;
beta34=atan(r_z_und_r_strich(4)/r_z_und_r_strich(5))/pi*180;
r_4a2=X34halbe/(cos(beta34*pi/180));
r_4a =r_z_und_r_strich(5)-r_4a2;
gamma34=90-beta34;
alpha34=135-gamma34;
Axy=(r_4a*sin(gamma34*pi/180))/sin(alpha34*pi/180);
Ax=cos(45*pi/180)*Axy;
Ay=sin(45*pi/180)*Axy;

% Vier Radian Methode Punkt B
% Bestimmung des Mittelpunktes
PIb=atan(Ax/(r_z_und_r_strich(4)+Ay))/pi*180;
DELTAAb=90-PIb;
Xib=135-DELTAAb;
RHOb=180-Xib;
Bxy=(r_z_und_r_strich(4)*sin(PIb*pi/180)/(sin(RHOb*pi/180)));
Bx=cos(45*pi/180)*Bxy;
By=sin(45*pi/180)*Bxy;

% Vier Radian Methode Punkt C
% Bestimmung des Mittelpunktes
PIc=atan(Bx/(r_z_und_r_strich(3)+By))/pi*180;
DELTAc=90-PIc;
Xic=135-DELTAc;
RHOC=180-Xic;
Cxy=(r_z_und_r_strich(3)*sin(PIc*pi/180)/(sin(RHOC*pi/180)));
Cx=cos(45*pi/180)*Cxy;
Cy=sin(45*pi/180)*Cxy;

% Vier Radian Methode Punkt D
% Bestimmung des Mittelpunktes
PId=atan(Cx/(r_z_und_r_strich(2)+Cy))/pi*180;
DELTAAd=90-PId;
Xid=135-DELTAAd;
RHOD=180-Xid;
Dxy=(r_z_und_r_strich(2)*sin(PId*pi/180)/(sin(RHOD*pi/180)));
Dx=cos(45*pi/180)*Dxy;
Dy=sin(45*pi/180)*Dxy;

```

```

% Bestimmung von x-Punkten in den 4 Quadranten, um Spirale gra-
phisch
% darstellen zu können
ji=20; % Laufvariabel für 4. Quadrant
ki=ji-5; % Laufvariabel für 3. Quadrant
li=ji-5-5; % Laufvariabel für 2. Quadrant
mi=ji-5-5-5; % Laufvariabel für 1. Quadrant
for i=1:5
    X4(i)=(R_quad(4)+Ax)*cos(PI(ji))*1000;
    ji=ji-1;
    X3(i)=(R_quad(3)-Bx)*cos(PI(ki))*1000; %D3_1 soll noch mit +
gerechnet werden???
    ki=ki-1;
    X2(i)=(R_quad(2)+Cx)*cos(PI(li))*1000;
    li=li-1;
    X1(i)=(R_quad(1)-Dx)*cos(PI(mi))*1000;
    mi=mi-1;
end

% Bestimmung von y-Punkten in den 4 Quadranten, um Spirale gra-
phisch
% darstellen zu können
ji=20; % Laufvariabel für 4. Quadrant
ki=ji-5; % Laufvariabel für 3. Quadrant
li=ji-5-5; % Laufvariabel für 2. Quadrant
mi=ji-5-5-5; % Laufvariabel für 1. Quadrant
for i=1:5
    Y4(i)=(R_quad(4)-Ay)*sin(PI(ji))*1000;
    ji=ji-1;
    Y3(i)=(R_quad(3)+By)*sin(PI(ki))*1000;
    ki=ki-1;
    Y2(i)=(R_quad(2)-Cy)*sin(PI(li))*1000;
    li=li-1;
    Y1(i)=(R_quad(1)+Dy)*sin(PI(mi))*1000;
    mi=mi-1;
end

% Zusammenfassen der x- und y- Koordinaten aller vier Quadranten
XX=[X4,X3,X2,X1];
YY=[Y4,Y3,Y2,Y1];

kappa_cm_des=(0.2/0.6)*(D_1/D_2)+0.5333; % Definition der meridio-
nalen Verzögerungszahl nach Bommers in abh. des Durchmesserhältnis-
ses
kappa_low=kappa_cm_des-kappa_cm_des*0.05; % Untere Grenze für
kappa mit 5% Abweichung
kappa_high=kappa_cm_des+kappa_cm_des*0.05; % Obere Grenze für
kappa mit 5% Abweichung

%% Berechnung für log Spirale und Vier-Radien
% Breite
Vier_Ra_Br=(-1)*X3(5)+X4(1)/1000; % Breite der Spirale nach 4-
Radi-Methode
log_Sp_Br= (-1)*log_x(40)+log_x(80)/1000; % Breite der Spirale
nach log-Methode
% Höhe

```

```

    Vier_Ra_Hoe=(-1)*Y4(5)+Y2(5))/1000; % Höhe der Spirale nach 4-
Radi-Methode
    log_Sp_Hoe=(-1)*log_y(60)+log_y(20))/1000; % Höhe der Spirale
nach log-Methode

gew_breiteX=gew_breite; % Übernahme der Gewichtungen
gew_kappa_lowX=gew_kappa_low;
gew_kappa_highX=gew_kappa_high;
gew_FlaechenX=gew_Flaechen;

%% Zu minimierende Zielfunktion definieren:
% für Spiralanpassung
if x == 1

    eukl1= mean(sqrt(([XX(1) YY(1)]-[log_x(80) log_y(80)]).^2));
%Euklidischer Abstand des ersten Punktes aus 4R und log-Spirale
    eukl2= mean(sqrt(([XX(5) YY(5)]-[log_x(60) log_y(60)]).^2)); %
Euklid 2. Punkt
    eukl3= mean(sqrt(([XX(11) YY(11)]-[log_x(40) log_y(40)]).^2));
% Euklid 3. Punkt
    eukl4= (b_2<0)*(10000); % Außenschaufeldurchmesser darf auf
keinen Fall negativ werden
    zg = eukl1+eukl2+eukl3+eukl4+(Vier_Ra_Br>log_Sp_Br)*1000; % Zu
minimierender Fehlerterm, optional noch mit Booleanschem Strafterm um
die Breite der log-Spirale nicht zu überschreiten.

    % für Breitenoptimierung
elseif x == 2

    par1=abs(log_Sp_Br-Breite_Spirale)*gew_breiteX; % Breite Spi-
rale soll Eingabewert des Nutzers entsprechen
    par2=abs(kappa_cm-kappa_low)*gew_kappa_lowX; % Einhaltung der
unteren Grenze der meridionalen Verzögerungszahl
    par3=abs(kappa_cm-kappa_high)*gew_kappa_highX; % Einhaltung
der oberen Grenze der meridionalen Verzögerungszahl
    par4=(b_2<0.001)*1e10; %Mindest Schaufelaustrittsbreite
    par5=abs(2-(A_aus/A_ein))*gew_FlaechenX; %Flächenverhältnis
Eintritt vs. Austritt --> Soll auch optimalen Deckscheibenwinkel steu-
ern und mehr Konstanz liefern. Optimal, wenn 1.8 - 2.0
    zg = par1+par2+par3+par4+par5;%(Vier_Ra_Br>log_Sp_Br)*1000 %
Zu minimierender Fehlerterm, optional noch mit Booleanschem Strafterm
um die Breite der log-Spirale nicht zu überschreiten.
    else
        zg=0; % Wenn keine Optimierung erwünscht ist
    end
end

end

```

## Unterprogramm zur grafischen Darstellung

```

function [] = Plotting(r_z_und_r_strich,B_,D_1, D_2, log_x, log_y, XX,
YY,b_1,b_2, sigma, kdelta_p,

```

```

gamma,V_pkt_h,delta_p,rho_m,n,eta_p,psi_p,phi_p,Vier_Ra_Br,D_a,s_l,r_D
,kappa_cm_des,D_eta_max,n_eta_max) % Funktion zur graphischen Darstel-
lung des Gehäuses und der Schaufeln
%% Plots

%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Plot Spiralen
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Ermittlung der Koordinaten für Laufradinnen- und Laufradaußendurch-
messer
th = 0:pi/1000:2*pi; % Erstellung eines Vektors, der Punkte des Krei-
ses beinhaltet
D_1_Kreis_x = D_1/2 *1000* cos(th); % Erstellung eines Vektors, der x-
Koordinaten für Kreis mit Durchmesser D1 beinhaltet
D_1_Kreis_y = D_1/2 *1000* sin(th); % Erstellung eines Vektors, der y-
Koordinaten für Kreis mit Durchmesser D1 beinhaltet
D_2_Kreis_x = D_2/2 *1000* cos(th); % Erstellung eines Vektors, der x-
Koordinaten für Kreis mit Durchmesser D2 beinhaltet
D_2_Kreis_y = D_2/2 *1000* sin(th); % Erstellung eines Vektors, der y-
Koordinaten für Kreis mit Durchmesser D2 beinhaltet

figure;
% Erstellung des Plots für Laufrad- und Gehäusedarstellungen
% figure % öffnen eines neuen Fensters
Api=subplot(2,2,1);
plot(D_2_Kreis_x, D_2_Kreis_y,'r', D_1_Kreis_x, D_1_Kreis_y,'g',
log_x, log_y,'m', XX,YY,'b','linewidth',2); % Laufradaußendurchmes-
ser,Laufradinnendurchmesser, logarithmische Spirale und 4-Radien Spi-
rale werden geplottet
grid on % Gitternetz im Plot wird zu Orientierung angezeigt
axis equal % die Achsen sollen dieselbe Länge haben
set(gca, 'color', 'white', 'LineWidth',1,'fontSize',15, 'GridColor',
'black','xlim',[log_x(40)*1.25 log_x(80)*1.25], 'ylim',[log_y(60)*1.25
log_y(20)*2.5]) % Festlegung Eigenschaften des Fensters
legend("Laufradaußendurchmesser","Laufradinnendurchmesser","log Spi-
rale", "4-Radien Spirale",'Position',
[0.195916147630801,0.827450980392157,0.216010457873786,0.0984569936603
69], 'FontSize', 10) %Legende
title("Darstellung des Laufrades mit Gehäuse", 'FontSize', 14) % Fest-
legung des Titels
xlabel("[mm]") % Beschriftung der x-Achse
ylabel("[mm]") % Beschriftung der y-Achse

%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Plot Seitenansicht
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Festlegung der Koordinaten für Gehäuse
D2_x = [-r_z_und_r_strich(3)*1000 r_z_und_r_strich(5)*1000
r_z_und_r_strich(5)*1000 -r_z_und_r_strich(3)*1000 -
r_z_und_r_strich(3)*1000];
D2_y = [0 0 B_*1000 B_*1000 0];

% Festlegung Koordinaten Schaufel
S_x=[D_2*1000/2 D_2*1000/2 D_1*1000/2 D_1*1000/2 D_2*1000/2];
L_=(B_*1000)-((D_a-D_1)/2*tand(45)+2*s_l+r_D*1.2)*1000;
S_y=[(L_-b_1*1000) (L_-(b_1-b_2)*1000) L_ L_-b_1*1000 L_-b_1*1000];
s_x=-S_x;

```

```

s_y=S_y;

A=[-r_z_und_r_strich(3)*1000 r_z_und_r_strich(5)*1000];
B=[-10 -10];
% Erstellung des Plots für Schaufeldarstellung
% figure % öffnen eines neuen Fensters
subplot(2,2,2);
plot(D2_x,D2_y,S_x,S_y,'black',s_x,s_y,'black','LineWidth',2.5)
set(gca, 'color', 'white', 'LineWidth',1,'fontSize',15, 'GridColor',
'black' , 'xlim', [-r_z_und_r_strich(3)*1000*1.2
r_z_und_r_strich(5)*1000*1.2]) % Festlegung Eigenschaften des Fensters
if r_z_und_r_strich(3)*1000+100+r_z_und_r_strich(5)*1000+100 < B_*1000
    set(gca, 'color', 'white', 'LineWidth',1,'fontSize',15, 'GridCo-
lor', 'black', 'ylim', [-75 B_*1000*1.1]) % Festlegung Eigenschaften
des Fensters
end

axis equal % die Achsen sollen dieselbe Länge haben
grid on % Gitternetz im Plot wird zu Orientierung angezeigt
hold on
%Strichlinien
Strich1_x=[-r_z_und_r_strich(3)*1000 -r_z_und_r_strich(3)*1000];
Strich1_y=[0 -25];
Strich2_x=[r_z_und_r_strich(5)*1000 r_z_und_r_strich(5)*1000];
Strich2_y=[0 -25];
plot(Strich1_x,Strich1_y,'k--',Strich2_x,Strich2_y,'k--','LineWidth',1);
txt1 = ['\leftarrow   Spiralsbreite = ' num2str(Vier_Ra_Br)]; % Text
mit einem Linksfeil
t1 = text(-r_z_und_r_strich(3)*1000, -40,txt1,'FontSize',10); % Text
im Plot positionieren
txt2 = ' \rightarrow'; % Text mit einem Rechtsfeil
t2 = text(r_z_und_r_strich(5)*1000, -40,txt2,'HorizontalAlign-
ment','right','FontSize',10); % Text im Plot positionieren

% txt3 = ['\leftarrow Deckscheibe']; % Text mit einem Linksfeil
% t3 = text(s_x(3), s_y(3)*1.1,txt3,'FontSize',9); % Text im Plot po-
sitionieren
% txt3 = ['\leftarrow Bodenscheibe']; % Text mit einem Linksfeil
% t3 = text(S_x(5), S_y(5)+S_y(5)*0.3,txt3,'FontSize',9); % Text im
Plot positionieren
% txt4 = ['\leftarrow   Impellertiefe ']; % Text mit einem Linksfeil
% t4 = text(s_x(2),D2_y(3)*1.3 ,txt4,'FontSize',9); % Text im Plot po-
sitionieren
% txt5 = ' \rightarrow'; % Text mit einem Rechtsfeil
% t5 = text(S_x(2),D2_y(3)*1.3 ,txt5,'HorizontalAlign-
ment','right','FontSize',8); % Text im Plot positionieren

% t6=annotation('\doublearrow',[.1 .2],[.1 .2])

title("Seitenansicht des Laufrades", 'FontSize', 14); % Festlegung des
Titels
xlabel("[mm]") % Beschriftung der x-Achse
ylabel("[mm]") % Beschriftung der y-Achse

```

```

%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Plot Cordier-Diagramm
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

sigma_poly=0:0.05:10; %Wertebereich für Schnelllaufzahl

for i=1:length(sigma_poly) % Berechnung der psi und kDelta-Werte für
den Wertebereich von sigma
    psi_poly(i)=10^(-0.381488-1.04357*log10(sigma_poly(i))-
0.502523*log10(sigma_poly(i))^2+0.0704883*log10(sigma_poly(i))^3);
    %polynomische Druckzahl
    kdelta_p_poly(i)=1/(psi_poly(i)^(1/2)*sigma_poly(i)); %polynomische
Durchmesserzahl
end

sigma_Bommes=0.2:0.05:0.6; %Wertebereich Schnelllaufzahl für Bommes-
bereich

for i=1:length(sigma_Bommes)% Berechnung der psi und kDelta-Werte für
den Wertebereich von sigma
    psi_p_Bommes(i)=10^(-0.381488-1.04357*log10(sigma_Bommes(i))-
0.502523*log10(sigma_Bommes(i))^2+0.0704883*log10(sigma_Bommes(i))^3);
    %polynomische Druckzahl
    kdelta_p_poly_Bommes(i)=1/(psi_p_Bommes(i)^(1/2)*sigma_Bommes(i));
    %polynomische Durchmesserzahl
end

if sigma>0.6 || sigma < 0.2 % Abfrage, ob Auslegung sich im Bommes-Be-
reich befindet
    fprintf('Außerhalb des Bommes-Bereich \n'); % Ausgabe in Command
Window
end

% Werte für Ausgabefenster werden gerundet und in Vektor geschrieben
psi_p=round(psi_p*1000)/1000;
phi_p=round(phi_p*1000)/1000;
eta_p=round(eta_p*1000)/1000;
sigma=round(sigma*1000)/1000;
kdelta_p=round(kdelta_p*1000)/1000;

txtFeld=[ 'Q =' num2str(V_pkt_h) ' m^3/h' '\newline' '\Delta' 'p = '
num2str(delta_p) ' Pa' '\newline' ' n = ' num2str(n) ' U/min' '\new-
line' ' \rho' ' = ' num2str(rho_m) ' kg/m^3' '\newline' '\Psi' '='
num2str(psi_p) '\newline' '\Phi' '=' num2str(phi_p) '\newline' '\eta'
=' num2str(eta_p) '\newline' '\sigma' '=' num2str(sigma) '\newline'
'\delta' '=' num2str(kdelta_p) '\newline' '\kappa' '_c_m = '
num2str(kappa_cm_des)];%; 'p ='; num2str(delta_p); '\newline'; '\Q = '
num2str(V_pkt_h)]%'\newline' ' \Gamma = ' num2str(gamma) '\newline'
'\Psi = ' num2str(psi_p) '\newline' '\Phi = ' num2str(phi_p) '\newline'
'\eta = ' num2str(eta_p)];
%txtFeld2=[ 'n_o_p_t = ' num2str(n_eta_max) ' Pa ' '\newline'
'D_2_o_p_t = ' num2str(D_eta_max) ' m' ];

subplot(2,2,[3,4]); % Auswahl der Position im Fenster für das Cordier-
Diagramm

```

```
loglog (kdelta_p_poly,sigma_poly, 'b')% beide Achsen sind logarith-
misch
hold on;
loglog(kdelta_p,sigma,'bo',kdelta_p_poly_Bommes,sigma_Bommes,
'r','linewidth',3); % Einzeichnung des Punktes und Markierung des Bom-
mes-Bereich in rot
annotation('textbox',
[0.756318831987326,0.158338414340331,0.142752558334738,0.2832031170449
53], 'String', txtFeld, 'FitBoxToText','on')
%annotation('textbox',
[0.19028794533919,0.364132687162426,0.178135670994246,0.08300781051123
8], 'String', txtFeld2, 'FontSize',7, 'FitBoxToText','on')
grid on % Gitternetz ist an
set(gca, 'color', 'white', 'LineWidth',1,'fontsize',15, 'GridColor',
'black','xTick',[0:1:10], 'yTick',[0:2:10]) % Festlegung Eigenschaften
des Fensters
legend("Cordier","Ventilator","Bommes",'positi-
on',[0.14204314484507,0.129289403875148,0.156288153486228,0.1205211692
89316]) %Legende
title("Cordier-Diagramm mit Bommes Bereich", 'FontSize', 14) % Festle-
gung des Titels
xlabel("Durchmesserzahl \delta") % Beschriftung der x-Achse
ylabel("Schnellaufzahl \sigma") % Beschriftung der y-Achse
txt3 = '\leftarrow Bommes-Bereich'; % Text mit einem Linksfeil
t3 = text(3.3,0.3, txt3,'FontSize',14,'Color', 'r'); % Text im Plot
positionieren
set(gcf,'units','normalized','position',[.1 .1 .6 .8])

end
```

## Anhang C: Tabellen

### Prognosegüte Spiralanpassung

**Tabelle 0-1: Vergleich der Geometriewerte zwischen dem Bommes-Tool aus Matlab und aus Excel bei der Spiralanpassung aus Fall 1**

		<i>Geometrie Excel</i>	<i>Geometrie Matlab</i>	<i>Abweichung</i>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,326	0,326	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,170	0,170	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,139	0,138	1%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,125	0,124	1%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	10,0	10,0	0%
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	25,9	25,9	0%
<i>Schaufelaustrittswinkel</i>	°	35,9	35,9	0%
<i>Krümmungsradius Deckscheibe</i>	m	0,024	0,024	0%
<i>Krümmungsradius Einstromdüse</i>	m	0,024	0,024	0%
<i>Durchmesser</i>	m	0,215	0,215	0%
<i>Spaltweite</i>	m	0,002	0,002	0%
<i>Spaltlänge</i>	m	0,007	0,007	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,277	0,275	1%
<i>Seitenlänge Stutzen</i>	m	0,215	0,215	0%
<i>Schaufelkrümmungsradius</i>	m	0,174	0,174	0%
<i>Schaufelzahl</i>	oE	10	10	0%
<i>Saugstutzendurchmesser</i>	m	0,215	0,215	0%
<i>r<sub>z</sub></i>	m	0,163	0,163	0%
<i>r<sub>1_strich</sub></i>	m	0,209	0,210	0%
<i>r<sub>2_strich</sub></i>	m	0,269	0,270	0%
<i>r<sub>3_strich</sub></i>	m	0,346	0,348	1%
<i>r<sub>4_strich</sub></i>	m	0,444	0,448	1%
<i>R<sub>1quad</sub></i>	m	0,186	0,186	0%
<i>R<sub>2quad</sub></i>	m	0,239	0,240	0%
<i>R<sub>3quad</sub></i>	m	0,307	0,309	1%
<i>R<sub>4quad</sub></i>	m	0,395	0,398	1%
<i>Materialstärke Gehäuse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Schaufel</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Bodenscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Deckscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Einlaufdüse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>kappa1</i>	oE	0,165	0,935	467%
<i>kappa4</i>	oE	0,350	1,999	471%
<i>kappa4/ kappa1</i>	oE	2,124	2,137	1%

**Tabelle 0-2: Vergleich der Geometriewerte zwischen dem Bommies-Tool aus Matlab und aus Excel bei der Spiralanpassung aus Fall 2**

		<i>Geometrie Excel</i>	<i>Geometrie Matlab</i>	<i>Abweichung</i>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,188	0,188	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,133	0,133	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,119	0,119	0%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,112	0,112	0%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	15,0	15,0	0%
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	18,5	18,5	0%
<i>Schaufelaustrittswinkel</i>	°	28,5	28,5	0%
<i>Krümmungsradius Deckscheibe</i>	m			
		0,019	0,019	0%
<i>Krümmungsradius Einströmduüse</i>	m			
		0,019	0,019	0%
<i>Durchmesser</i>	m	0,167	0,167	0%
<i>Spaltweite</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Spaltlänge</i>	m	0,005	0,005	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,238	0,238	0%
<i>Seitenlänge Stutzen</i>	m	0,167	0,167	0%
<i>Schaufelkrümmungsradius</i>	m	0,112	0,112	0%
<i>Schaufelzahl</i>	oE	11	11	0%
<i>Saugstutzendurchmesser</i>	m	0,167	0,167	0%
<i>r<sub>z</sub></i>	m	0,094	0,094	0%
<i>r<sub>1_strich</sub></i>	m	0,148	0,148	0%
<i>r<sub>2_strich</sub></i>	m	0,233	0,233	0%
<i>r<sub>3_strich</sub></i>	m	0,367	0,366	0%
<i>r<sub>4_strich</sub></i>	m	0,577	0,576	0%
<i>R<sub>1quad</sub></i>	m	0,121	0,121	0%
<i>R<sub>2quad</sub></i>	m	0,190	0,190	0%
<i>R<sub>3quad</sub></i>	m	0,300	0,299	0%
<i>R<sub>4quad</sub></i>	m	0,472	0,471	0%
<i>Materialstärke Gehäuse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Schaufel</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Bodenscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Deckscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Einlaufdüse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>kappa1</i>	oE	0,144	0,375	161%
<i>kappa4</i>	oE	0,562	1,462	160%
<i>kappa4/ kappa1</i>	oE	3,906	3,901	0%

**Tabelle 0-3: Vergleich der Geometriewerte zwischen dem Bommes-Tool aus Matlab und aus Excel bei der Spiralanpassung aus Fall 3**

		<b>Geometrie Excel</b>	<b>Geometrie Matlab</b>	<b>Abweichung</b>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,449	0,449	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,164	0,164	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,122	0,121	1%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,084	0,083	1%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	15,0	15,0	0%
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	35,1	35,1	0%
<i>Schaufelaustrittswinkel</i>	°	45,1	45,1	0%
<i>Krümmungsradius Deckscheibe</i>	m	0,023	0,023	0%
<i>Krümmungsradius Einströmdüse</i>	m	0,023	0,023	0%
<i>Durchmesser</i>	m	0,207	0,207	0%
<i>Spaltweite</i>	m	0,002	0,002	0%
<i>Spaltlänge</i>	m	0,007	0,007	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,243	0,242	1%
<i>Seitenlänge Stutzen</i>	m	0,207	0,207	0%
<i>Schaufelkrümmungsradius</i>	m	0,239	0,239	0%
<i>Schaufelzahl</i>	oE	11	11	0%
<i>Saugstutzendurchmesser</i>	m	0,207	0,207	0%
<i>r_z</i>	m	0,225	0,225	0%
<i>r1_strich</i>	m	0,271	0,272	0%
<i>r2_strich</i>	m	0,326	0,328	1%
<i>r3_strich</i>	m	0,393	0,397	1%
<i>r4_strich</i>	m	0,474	0,480	1%
<i>R_1quad</i>	m	0,248	0,248	0%
<i>R_2quad</i>	m	0,299	0,300	0%
<i>R_3quad</i>	m	0,360	0,363	1%
<i>R_4quad</i>	m	0,434	0,438	1%
<i>Materialstärke Gehäuse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Schaufel</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Bodenscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Deckscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Einlaufdüse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>kappa1</i>	oE	0,170	0,710	318%
<i>kappa4</i>	oE	0,300	1,255	318%
<i>kappa4/ kappa1</i>	oE	1,765	1,766	0%

## Prognosegüte Breitenoptimierung

**Tabelle 0-4: Vergleich der Geometriewerte zwischen dem Bommes-Tool aus Matlab und aus Excel bei der Breitenoptimierung aus Fall 1**

		<i>Geometrie Excel</i>	<i>Geometrie Matlab</i>	<i>Abweichung</i>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,326	0,326	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,170	0,170	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,255	0,228	10%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,217	0,225	3%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	25,6	2,6	90%
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	25,9	25,9	0%
<i>Schaufelaustrittswinkel</i>	°	35,9	35,9	0%
<i>Krümmungsradius Deckscheibe</i>	m	0,024	0,024	0%
<i>Krümmungsradius Einströmdüse</i>	m	0,024	0,024	0%
<i>Durchmesser</i>	m	0,215	0,215	0%
<i>Spaltweite</i>	m	0,002	0,002	0%
<i>Spatllänge</i>	m	0,007	0,007	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,509	0,457	10%
<i>Seitenlänge Stutzen</i>	m	0,215	0,215	0%
<i>Schaufelkrümmungsradius</i>	m	0,174	0,174	0%
<i>Schaufelzahl</i>	oE	10	10	0%
<i>Saugstutzendurchmesser</i>	m	0,215	0,215	0%
<i>r_z</i>	m	0,163	0,163	0%
<i>r1_strich</i>	m	0,188	0,187	0%
<i>r2_strich</i>	m	0,217	0,215	1%
<i>r3_strich</i>	m	0,250	0,248	1%
<i>r4_strich</i>	m	0,288	0,285	1%
<i>R_1quad</i>	m	0,175	0,175	0%
<i>R_2quad</i>	m	0,202	0,201	0%
<i>R_3quad</i>	m	0,233	0,231	1%
<i>R_4quad</i>	m	0,269	0,266	1%
<i>Materialstärke Gehäuse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Schaufel</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Bodenscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Deckscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Einlaufdüse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>kappa1</i>	oE	0,173	0,508	193%
<i>kappa4</i>	oE	0,266	0,773	190%
<i>kappa4/ kappa1</i>	oE	1,534	1,520	1%
<i>Verengungsfaktor xi_1</i>	oE	0,957	0,957	0%
<i>kappa_cm</i>	oE	0,596	0,517	13%
<i>Vier_Ra_br</i>	m	0,505	0,500	1%
<i>Vier_Ra_Hoe</i>	m	0,438	0,435	1%

<i>log_breite</i>	m	0,508	0,500	2%
<i>log_hoe</i>	m	0,439	0,435	1%

**Tabelle 0-5: Vergleich der Geometriewerte zwischen dem Bommestool aus Matlab und aus Excel bei der Breitenoptimierung aus Fall 2**

		<b>Geometrie Excel</b>	<b>Geometrie Matlab</b>	<b>Abweichung</b>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,195	0,199	2%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,127	0,128	1%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,100	0,112	12%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,100	0,096	3%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	0,0	23,7	#DIV/0!
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	20,6	21,0	2%
<i>Schaufelaustrittswinkel</i>	°	30,6	31,0	1%
<i>Krümmungsradius Deckscheibe</i>	m			
		0,018	0,018	1%
<i>Krümmungsradius Einströmdüse</i>	m			
		0,018	0,018	1%
<i>Durchmesser</i>	m	0,160	0,161	1%
<i>Spaltweite</i>	m	0,001	0,001	1%
<i>Spatllänge</i>	m	0,005	0,005	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,199	0,224	12%
<i>Seitenlänge Stutzen</i>	m	0,160	0,161	1%
<i>Schaufelkrümmungsradius</i>	m	0,112	0,113	1%
<i>Schaufelzahl</i>	oE	11,000	11,000	0%
<i>Saugstutzendurchmesser</i>	m	0,160	0,161	1%
<i>r_z</i>	m	0,097	0,099	2%
<i>r1_strich</i>	m	0,144	0,147	2%
<i>r2_strich</i>	m	0,214	0,219	2%
<i>r3_strich</i>	m	0,318	0,324	2%
<i>r4_strich</i>	m	0,472	0,481	2%
<i>R_1quad</i>	m	0,121	0,123	2%
<i>R_2quad</i>	m	0,179	0,183	2%
<i>R_3quad</i>	m	0,266	0,272	2%
<i>R_4quad</i>	m	0,395	0,403	2%
<i>Materialstärke Gehäuse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Schaufel</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Bodenscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Deckscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Einlaufdüse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>kappa1</i>	oE	0,151	0,594	294%
<i>kappa4</i>	oE	0,492	1,939	294%
<i>kappa4/ kappa1</i>	oE	3,267	3,265	0%
<i>Verengungsfaktor xi_1</i>	oE	0,924	0,924	0%
<i>kappa_cm</i>	oE	0,615	0,715	16%

<i>Vier_Ra_br</i>	m	0,701	0,700	0%
<i>Vier_Ra_Hoe</i>	m	0,472	0,472	0%
<i>log_breite</i>	m	0,700	0,700	0%
<i>log_hoe</i>	m	0,472	0,472	0%

**Tabelle 0-6: Vergleich der Geometriewerte zwischen dem Bommes-Tool aus Matlab und aus Excel bei der Breitenoptimierung aus Fall 3**

		<b>Geometrie Excel</b>	<b>Geometrie Matlab</b>	<b>Abweichung</b>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,449	0,449	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,164	0,164	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,182	0,153	16%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,109	0,109	0%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	27,3	17,3	37%
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	35,1	35,1	0%
<i>Schaufelaustrittswinkel</i>	°	45,1	45,1	0%
<i>Krümmungsradius Deckscheibe</i>	m	0,023	0,023	0%
<i>Krümmungsradius Einströmdüse</i>	m	0,023	0,023	0%
<i>Durchmesser</i>	m	0,207	0,207	0%
<i>Spaltweite</i>	m	0,002	0,002	0%
<i>Spaltlänge</i>	m	0,007	0,007	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,364	0,306	16%
<i>Seitenlänge Stutzen</i>	m	0,207	0,207	0%
<i>Schaufelkrümmungsradius</i>	m	0,239	0,239	0%
<i>Schaufelzahl</i>	oE	11	11	0%
<i>Saugstutzendurchmesser</i>	m	0,207	0,207	0%
<i>r_z</i>	m	0,225	0,225	0%
<i>r1_strich</i>	m	0,259	0,260	0%
<i>r2_strich</i>	m	0,299	0,300	0%
<i>r3_strich</i>	m	0,345	0,346	0%
<i>r4_strich</i>	m	0,398	0,400	1%
<i>R_1quad</i>	m	0,242	0,242	0%
<i>R_2quad</i>	m	0,279	0,280	0%
<i>R_3quad</i>	m	0,322	0,323	0%
<i>R_4quad</i>	m	0,372	0,373	0%
<i>Materialstärke Gehäuse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Schaufel</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Bodenscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Deckscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Einlaufdüse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>kappa1</i>	oE	0,173	0,554	219%
<i>kappa4</i>	oE	0,266	0,854	221%
<i>kappa4/ kappa1</i>	oE	1,536	1,542	0%

<i>Verengungsfaktor xi_1</i>	oE	0,963	0,963	0%
<i>kappa_cm</i>	oE	0,597	0,501	16%
<i>Vier_Ra_br</i>	m	0,697	0,700	0%
<i>Vier_Ra_Hoe</i>	m	0,604	0,606	0%
<i>log_breite</i>	m	0,701	0,700	0%
<i>log_hoe</i>	m	0,607	0,606	0%

**Tabelle 0-7: Vergleich der Geometriewerte zwischen dem Bommies-Tool aus Matlab und aus Excel bei der Breitenoptimierung aus Fall A**

		<b>Geometrie Excel</b>	<b>Geometrie Matlab</b>	<b>Abweichung</b>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,721	0,720	0%
<i>Laufraudeintrittsdurchmesser</i>	m	0,318	0,318	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,306	0,295	3%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,222	0,221	1%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	22,661	20,357	10%
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	29,900	29,852	0%
<i>Schaufelaustrittswinkel</i>	°	39,900	39,852	0%
<i>Krümmungsradius Deckscheibe</i>	m	0,045	0,045	0%
<i>Krümmungsradius Einströmdüse</i>	m	0,045	0,045	0%
<i>Durchmesser</i>	m	0,401	0,401	0%
<i>Spaltweite</i>	m	0,003	0,003	0%
<i>Spaltlänge</i>	m	0,013	0,013	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,612	0,591	3%
<i>Seitenlänge Stutzen</i>	m	0,401	0,401	0%
<i>Schaufelkrümmungsradius</i>	m	0,377	0,377	0%
<i>Schaufelzahl</i>	oE	10,000	10,000	0%
<i>Saugstutzendurchmesser</i>	m	0,401	0,401	0%
<i>r_z</i>	m	0,360	0,360	0%
<i>r1_strich</i>	m	0,435	0,436	0%
<i>r2_strich</i>	m	0,525	0,527	1%
<i>r3_strich</i>	m	0,633	0,638	1%
<i>r4_strich</i>	m	0,764	0,772	1%
<i>R_1quad</i>	m	0,398	0,398	0%
<i>R_2quad</i>	m	0,480	0,482	0%
<i>R_3quad</i>	m	0,579	0,583	1%
<i>R_4quad</i>	m	0,699	0,705	1%
<i>Materialstärke Gehäuse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Schaufel</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Bodenscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Deckscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Einlaufdüse</i>	m	0,001	0,001	0%

<i>kappa1</i>	oE	0,170	0,527	210%
<i>kappa4</i>	oE	0,299	0,933	212%
<i>kappa4/ kappa1</i>	oE	1,758	1,772	1%
<i>Verengungsfaktor xi_1</i>	oE	0,980	0,980	0%
<i>kappa_cm</i>	oE	0,600	0,583	3%
<i>Vier_Ra_br</i>	m	1,289	1,300	1%
<i>Vier_Ra_Hoe</i>	m	1,068	1,074	1%
<i>log_breite</i>	m	1,296	1,300	0%
<i>log_hoe</i>	m	1,072	1,074	0%

**Tabelle 0-8: Vergleich der Geometriewerte zwischen dem Bommies-Tool aus Matlab und aus Excel bei der Breitenoptimierung aus Fall B**

		<b>Geometrie Excel</b>	<b>Geometrie Matlab</b>	<b>Abweichung</b>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	1,409	1,409	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,953	0,953	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	1,608	1,417	12%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	1,608	1,417	12%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	0,000	0,000	#DIV/0!
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	18,400	18,368	0%
<i>Schaufelaustrittswinkel</i>	°	28,400	28,368	0%
<i>Krümmungsradius Deck- scheibe</i>	m	0,134	0,133	0%
<i>Krümmungsradius Ein- stromdüse</i>	m	0,134	0,133	0%
<i>Durchmesser</i>	m	1,201	1,239	3%
<i>Spaltweite</i>	m	0,010	0,010	0%
<i>Spaltlänge</i>	m	0,038	0,038	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	3,217	2,834	12%
<i>Seitenlänge Stutzen</i>	m	1,201	1,239	3%
<i>Schaufelkrümmungsradius</i>	m	0,803	0,803	0%
<i>Schaufelzahl</i>	oE	10,000	10,000	0%
<i>Saugstutzendurchmesser</i>	m	1,201	1,239	3%
<i>r_z</i>	m	0,704	0,704	0%
<i>r1_strich</i>	m	0,860	0,885	3%
<i>r2_strich</i>	m	1,050	1,111	6%
<i>r3_strich</i>	m	1,282	1,396	9%
<i>r4_strich</i>	m	1,565	1,753	12%
<i>R_1quad</i>	m	0,782	0,795	2%
<i>R_2quad</i>	m	0,955	0,998	5%
<i>R_3quad</i>	m	1,166	1,254	8%
<i>R_4quad</i>	m	1,423	1,575	11%
<i>Materialstärke Gehäuse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Schaufel</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Bodenscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%

<i>Materialstärke Deckscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Einlaufdüse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>kappa1</i>	oE	0,169	0,612	262%
<i>kappa4</i>	oE	0,308	1,213	294%
<i>kappa4/ kappa1</i>	oE	1,819	1,981	9%
<i>Verengungsfaktor xi_1</i>	oE	0,989	0,989	0%
<i>kappa_cm</i>	oE	0,673	0,673	0%
<i>Vier_Ra_br</i>	m	2,615	2,865	10%
<i>Vier_Ra_Hoe</i>	m	2,142	2,281	6%
<i>log_breite</i>	m	2,626	2,865	9%
<i>log_hoe</i>	m	2,148	2,281	6%

**Tabelle 0-9: Vergleich der Geometriewerte zwischen dem Bommes-Tool aus Matlab und aus Excel bei der Breitenoptimierung aus Fall C**

		<i>Geometrie Excel</i>	<i>Geometrie Matlab</i>	<i>Abweichung</i>
<i>Laufradaußendurchmesser</i>	m	0,089	0,089	0%
<i>Laufradeintrittsdurchmesser</i>	m	0,027	0,027	0%
<i>Schaufeleintrittsbreite</i>	m	0,046	0,027	42%
<i>Schaufelaustrittsbreite</i>	m	0,020	0,020	0%
<i>Deckscheibenwinkel</i>	°	39,648	11,357	71%
<i>Schaufeleintrittswinkel</i>	°	43,600	43,640	0%
<i>Schaufelaustrittswinkel</i>	°	53,600	53,640	0%
<i>Krümmungsradius Deck- scheibe</i>	m	0,004	0,004	1%
<i>Krümmungsradius Ein- stromdüse</i>	m	0,004	0,004	1%
<i>Durchmesser</i>	m	0,034	0,034	1%
<i>Spaltweite</i>	m	0,000	0,000	1%
<i>Spaltlänge</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Gehäusebreite</i>	m	0,092	0,053	42%
<i>Seitenlänge Stutzen</i>	m	0,035	0,034	0%
<i>Schaufelkrümmungsradius</i>	m	0,055	0,055	0%
<i>Schaufelzahl</i>	oE	10,000	10,000	0%
<i>Saugstutzendurchmesser</i>	m	0,034	0,034	0%
<i>r_z</i>	m	0,045	0,045	0%
<i>r1_strich</i>	m	0,049	0,049	0%
<i>r2_strich</i>	m	0,055	0,054	1%
<i>r3_strich</i>	m	0,060	0,060	1%
<i>r4_strich</i>	m	0,067	0,066	1%
<i>R_1quad</i>	m	0,047	0,047	0%
<i>R_2quad</i>	m	0,052	0,052	0%
<i>R_3quad</i>	m	0,057	0,057	1%
<i>R_4quad</i>	m	0,063	0,063	1%
<i>Materialstärke Gehäuse</i>	m	0,001	0,001	0%

<i>Materialstärke Schaufel</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Bodenscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Deckscheibe</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>Materialstärke Einlaufdüse</i>	m	0,001	0,001	0%
<i>kappa1</i>	oE	0,176	0,349	98%
<i>kappa4</i>	oE	0,238	0,467	96%
<i>kappa4/ kappa1</i>	oE	1,350	1,338	1%
<i>Verengungsfaktor xi_1</i>	oE	0,832	0,832	0%
<i>kappa_cm</i>	oE	0,602	0,348	42%
<i>Vier_Ra_br</i>	m	0,121	0,120	1%
<i>Vier_Ra_Hoe</i>	m	0,110	0,109	1%
<i>log_breite</i>	m	0,120	0,120	0%
<i>log_hoe</i>	m	0,109	0,109	0%

## Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Tabelle 0-10: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus Matlab bei der Breitenoptimierung  
aus Fall 1

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		2 zu 1	3 zu 1	4 zu 1	5 zu 1	6 zu 1	7 zu 1	8 zu 1	9 zu 1	10 zu 1
<b>Deckscheibenwinkel</b>	grad	26,510	22,618	26,057	25,395	25,126	24,036	24,009	24,154	24,491	24,581		15%	2%	3%	1%	4%	0%	1%	1%	0%
<b>Schaufelaustrittsbreite</b>	m	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>Schaufeleintrittsbreite</b>	m	0,139	0,133	0,138	0,137	0,137	0,135	0,135	0,135	0,136	0,136		5%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	0%
<b>Laufrad-eintrittsdurchmesser</b>	m	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>Laufradaußendurchmesser</b>	m	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Saugstut- zendurch- messer	Schaufel- zahl	Schaufel- krüm- mungsra- dius	Seiten- länge Stut- zen	Gehäuse- breite	Spaltlänge	Spaltweite	Durchmes- ser	Krüm- mungsra- dius Ein- stromdüse	Krüm- mungsra- dius Deck- scheibe	Schaufel- austritts- winkel	Schau- felein- trittswin- kel
m	oE	m	m	m	m	m	m	m	m	grad	grad
0,215	10,000	0,174	0,215	0,292	0,007	0,002	0,215	0,024	0,024	35,918	25,918
0,215	10,000	0,174	0,215	0,279	0,007	0,002	0,215	0,024	0,024	35,918	25,918
0,215	10,000	0,174	0,215	0,291	0,007	0,002	0,215	0,024	0,024	35,918	25,918
0,215	10,000	0,174	0,215	0,288	0,007	0,002	0,215	0,024	0,024	35,918	25,918
0,215	10,000	0,174	0,215	0,287	0,007	0,002	0,215	0,024	0,024	35,918	25,918
0,215	10,000	0,174	0,215	0,284	0,007	0,002	0,215	0,024	0,024	35,918	25,918
0,215	10,000	0,174	0,215	0,284	0,007	0,002	0,215	0,024	0,024	35,918	25,918
0,215	10,000	0,174	0,215	0,285	0,007	0,002	0,215	0,024	0,024	35,918	25,918
0,215	10,000	0,174	0,215	0,286	0,007	0,002	0,215	0,024	0,024	35,918	25,918
0%	0%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Material- stärke Bo- den- scheibe	Material- stärke Schaufel	Material- stärke Ge- häuse	R_4quad	R_3quad	R_2quad	R_1quad	r4_strich	r3_strich	r2_strich	r1_strich	r_z
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0,001	0,001	0,001	0,492	0,360	0,264	0,193	0,569	0,416	0,304	0,223	0,163
0,001	0,001	0,001	0,492	0,360	0,264	0,193	0,569	0,416	0,304	0,223	0,163
0,001	0,001	0,001	0,492	0,360	0,264	0,193	0,569	0,416	0,304	0,223	0,163
0,001	0,001	0,001	0,492	0,360	0,264	0,193	0,569	0,416	0,304	0,223	0,163
0,001	0,001	0,001	0,492	0,360	0,264	0,193	0,569	0,416	0,304	0,223	0,163
0,001	0,001	0,001	0,492	0,360	0,264	0,193	0,569	0,416	0,304	0,223	0,163
0,001	0,001	0,001	0,492	0,360	0,264	0,193	0,569	0,416	0,304	0,223	0,163
0,001	0,001	0,001	0,492	0,360	0,264	0,193	0,569	0,416	0,304	0,223	0,163
0,001	0,001	0,001	0,492	0,360	0,264	0,193	0,569	0,416	0,304	0,223	0,163
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

kappa_cm	Verengungsfaktor xi_1	kappa1/ka ppa4	kappa4	kappa1	Materialstärke laufdüse	Materialstärke Deck- scheine
					m	m
0,706	0,957	0,391	1,672	0,654	0,001	0,001
0,673	0,957	0,391	1,107	0,433	0,001	0,001
0,702	0,957	0,391	1,789	0,700	0,001	0,001
0,696	0,957	0,391	2,000	0,783	0,001	0,001
0,694	0,957	0,391	1,568	0,614	0,001	0,001
0,685	0,957	0,391	1,690	0,661	0,001	0,001
0,685	0,957	0,391	0,549	0,215	0,001	0,001
0,686	0,957	0,391	1,925	0,754	0,001	0,001
0,688	0,957	0,391	1,409	0,552	0,001	0,001
0,689	0,957	0,391	2,000	0,783	0,001	0,001
5%	0%	0%	34%	34%	0%	0%
1%	0%	0%	7%	7%	0%	0%
1%	0%	0%	12%	12%	0%	0%
0%	0%	0%	22%	22%	0%	0%
1%	0%	0%	8%	8%	0%	0%
0%	0%	0%	68%	68%	0%	0%
0%	0%	0%	251%	251%	0%	0%
0%	0%	0%	27%	27%	0%	0%
0%	0%	0%	42%	42%	0%	0%

Tabelle 0-11: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus Matlab bei der Breitenoptimierung  
aus Fall 2

Laufradeintrittsdurchmesser	Laufradaußendurchmesser	
m	m	
0,128	0,199	<b>1</b>
0,128	0,199	<b>2</b>
0,128	0,199	<b>3</b>
0,128	0,199	<b>4</b>
0,128	0,199	<b>5</b>
0,128	0,199	<b>6</b>
0,128	0,199	<b>7</b>
0,128	0,199	<b>8</b>
0,128	0,199	<b>9</b>
0,128	0,199	<b>10</b>
0%	0%	
0%	0%	<b>2 zu 1</b>
0%	0%	<b>3 zu 1</b>
0%	0%	<b>4 zu 1</b>
0%	0%	<b>5 zu 1</b>
0%	0%	<b>6 zu 1</b>
0%	0%	<b>7 zu 1</b>
0%	0%	<b>8 zu 1</b>
0%	0%	<b>9 zu 1</b>
0,128	0,199	<b>10 zu 1</b>

Seitenlänge Stutzen	Gehäusebreite	Spaltlänge	Spaltweite	Durchmesser	Krümmungsradius Einstromdüse	Krümmungsradius Deckscheibe	Schaufelaustrittswinkel	Schaufeleintrittswinkel	Deckscheibenwinkel	Schaufelaustrittsbreite	Schaufeleintrittsbreite
m	m	m	m	m	m	m	grad	grad	grad	m	m
0,161	0,166	0,005	0,001	0,161	0,018	0,018	31,0	21,0	23,3	0,083	0,099
0,161	0,166	0,005	0,001	0,161	0,018	0,018	31,0	21,0	26,4	0,083	0,101
0,161	0,166	0,005	0,001	0,161	0,018	0,018	31,0	21,0	21,3	0,083	0,097
0,161	0,166	0,005	0,001	0,161	0,018	0,018	31,0	21,0	24,1	0,083	0,099
0,161	0,166	0,005	0,001	0,161	0,018	0,018	31,0	21,0	24,8	0,083	0,100
0,161	0,166	0,005	0,001	0,161	0,018	0,018	31,0	21,0	21,0	0,083	0,097
0,161	0,166	0,005	0,001	0,161	0,018	0,018	31,0	21,0	20,7	0,083	0,097
0,161	0,166	0,005	0,001	0,161	0,018	0,018	31,0	21,0	20,3	0,083	0,096
0,161	0,166	0,005	0,001	0,161	0,018	0,018	31,0	21,0	21,1	0,083	0,097
0,161	0,166	0,005	0,001	0,161	0,018	0,018	31,0	21,0	24,3	0,083	0,099
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	0%	2%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	9%	0%	1%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	13%	0%	2%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%	0%	3%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4%	0%	1%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%	0%	2%
0,161	0,166	0,005	0,001	0,161	0,018	0,018	31,0	21,0	23,3	0,083	0,099



kappa_cm	Verengungsfaktor xi_1	kappa1/kappa4	kappa4	kappa1	Materialstärke laudüse	Materialstärke Deck-scheibe	Materialstärke Boden-scheibe	Materialstärkeschaufel	Materialstärke Gehäuse
					m	m	m	m	m
0,728	0,924	0,255	1,591	0,405	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,745	0,924	0,255	1,464	0,373	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,717	0,924	0,255	2,000	0,509	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,733	0,924	0,255	1,999	0,509	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,736	0,924	0,255	0,535	0,136	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,716	0,924	0,255	1,785	0,455	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,714	0,924	0,255	0,914	0,233	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,712	0,924	0,255	0,760	0,194	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,716	0,924	0,255	0,947	0,241	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
0,733	0,924	0,255	1,009	0,257	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
2%	0%	0%	8%	8%	0%	0%	0%	0%	0%
1%	0%	0%	26%	26%	0%	0%	0%	0%	0%
2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	73%	73%	0%	0%	0%	0%	0%
3%	0%	0%	234%	234%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	49%	49%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	17%	17%	0%	0%	0%	0%	0%
1%	0%	0%	25%	25%	0%	0%	0%	0%	0%
2%	0%	0%	7%	7%	0%	0%	0%	0%	0%
0,728	0,924	0,255	1,591	0,405	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

**Tabelle 0-12: Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus Matlab bei der Breitenoptimierung  
aus Fall 3**

Durchmesser	Krümmungsradius Einströmdüse	Krümmungsradius Deckscheibe	Schaufelaustrittswinkel	Schaufeleintrittswinkel	Deckscheibenwinkel	Schaufelaustrittsbreite	Schaufeleintrittsbreite	Laufradeintrittsdurchmesser	Laufradaußendurchmesser	
m	m	m	grad	grad	grad	m	m	m	m	
0,207	0,023	0,023	45,1	35,1	18,9	0,052	0,101	0,164	0,449	<b>1</b>
0,207	0,023	0,023	45,1	35,1	18,8	0,052	0,101	0,164	0,449	<b>2</b>
0,207	0,023	0,023	45,1	35,1	19,0	0,053	0,102	0,164	0,449	<b>3</b>
0,207	0,023	0,023	45,1	35,1	18,8	0,052	0,101	0,164	0,449	<b>4</b>
0,207	0,023	0,023	45,1	35,1	18,8	0,052	0,101	0,164	0,449	<b>5</b>
0,207	0,023	0,023	45,1	35,1	18,8	0,052	0,101	0,164	0,449	<b>6</b>
0,207	0,023	0,023	45,1	35,1	18,8	0,052	0,101	0,164	0,449	<b>7</b>
0,207	0,023	0,023	45,1	35,1	18,8	0,052	0,101	0,164	0,449	<b>8</b>
0,207	0,023	0,023	45,1	35,1	18,8	0,052	0,101	0,164	0,449	<b>9</b>
0,207	0,023	0,023	45,1	35,1	18,8	0,052	0,101	0,164	0,449	<b>10</b>
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	0%	<b>2 zu 1</b>
0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	0%	<b>3 zu 1</b>
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	<b>4 zu 1</b>
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	<b>5 zu 1</b>
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	<b>6 zu 1</b>
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	<b>7 zu 1</b>
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	<b>8 zu 1</b>
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	<b>9 zu 1</b>
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	<b>10 zu 1</b>

r4_strich	r3_strich	r2_strich	r1_strich	r_z	Saugstut- zendurch- messer	Schaufel- zahl	Schaufel- krüm- mungsra- dius	Seiten- länge Stut- zen	Gehäuse- breite	Spalllänge	Spaltweite
m	m	m	m	m	m	oE	m	m	m	m	m
0,747	0,553	0,410	0,303	0,225	0,207	11	0,239	0,207	0,212	0,007	0,002
0,751	0,555	0,411	0,304	0,225	0,207	11	0,239	0,207	0,211	0,007	0,002
0,742	0,551	0,408	0,303	0,225	0,207	11	0,239	0,207	0,213	0,007	0,002
0,751	0,555	0,411	0,304	0,225	0,207	11	0,239	0,207	0,211	0,007	0,002
0,751	0,555	0,411	0,304	0,225	0,207	11	0,239	0,207	0,211	0,007	0,002
0,751	0,555	0,411	0,304	0,225	0,207	11	0,239	0,207	0,211	0,007	0,002
0,751	0,555	0,411	0,304	0,225	0,207	11	0,239	0,207	0,211	0,007	0,002
0,751	0,555	0,411	0,304	0,225	0,207	11	0,239	0,207	0,211	0,007	0,002
0,750	0,555	0,411	0,304	0,225	0,207	11	0,239	0,207	0,211	0,007	0,002
0,751	0,555	0,411	0,304	0,225	0,207	11	0,239	0,207	0,211	0,007	0,002
1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%
1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

kappa1/ka ppa4	kappa4	kappa1	Material- stärke Ein- laufdüse	Material- stärke Deck- scheine	Material- stärke Bo- den- scheibe	Material- stärke Schaufel	Material- stärke Ge- häuse	R_4quad	R_3quad	R_2quad	R_1quad
			m	m	m	m	m	m	m	m	m
0,406	1,638	0,665	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,650	0,482	0,357	0,264
0,405	0,952	0,385	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,653	0,483	0,357	0,264
0,408	0,943	0,385	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,647	0,480	0,356	0,264
0,405	1,207	0,488	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,653	0,483	0,357	0,264
0,405	1,136	0,460	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,653	0,483	0,357	0,264
0,405	1,940	0,785	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,653	0,483	0,357	0,264
0,405	1,119	0,453	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,653	0,483	0,357	0,264
0,405	1,841	0,745	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,653	0,483	0,357	0,264
0,405	0,920	0,373	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,653	0,483	0,357	0,264
0,405	0,626	0,253	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,653	0,483	0,357	0,264
0%	42%	42%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	42%	42%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%
1%	28%	27%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	0%
0%	6%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	71%	71%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	42%	42%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	64%	64%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	50%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	32%	32%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	32%	32%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

<b>kappa_cm</b>	<b>Veren- gungsfak- tor xi_1</b>
0,688	0,963
0,688	0,963
0,688	0,963
0,688	0,963
0,688	0,963
0,688	0,963
0,688	0,963
0,688	0,963
0,688	0,963
0,688	0,963
0%	0%
0%	0%
0%	0%
0%	0%
0%	0%
0%	0%
0%	0%
0%	0%
0%	0%
0%	0%

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, Judith Thönnissen, an Eides statt, die vorliegende Bachelor -Thesis selbständig verfasst und keine weiteren als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt zu haben.

Dies ist die von der Hochschule Düsseldorf zu bewertende Version.

Ort, Datum \_\_\_\_\_ Unterschrift \_\_\_\_\_