

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	II
Eidesstattliche Erklärung	III
Inhaltsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Grundlagen des Zyklones.....	2
2.1.1 Die Struktur und das Funktionsprinzip des Zyklones.....	2
2.2 Grundlagen von CFD	4
3 Erstellung von CFD-Modell	6
3.1 Das mathematisches Modell der Strömung.....	6
3.2 Turbulenzmodell	7
3.2.1 Standard $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell	7
3.2.2 $k-\omega$ -Turbulenzmodell	8
3.2.3 Reynolds-Spannungs-Modell	8
3.3 Kräfte auf Partikel	9
4 Konstruktion des Zyklons	11
4.1 Zyklon mit Schlitzeinlauf.....	11
4.2 Zyklon mit Rohreinlauf.....	13
4.3 Zyklon mit Spiraleinlauf	14
4.4 Zyklon mit Wendeleinlauf	15
5 Vorbereitung der Simulation	17
5.1 Interpolationsverfahren	17
5.2 Druckkorrektur-Verfahren	18
5.3 DPM (Discrete Phase Models)	18
5.4 Randbedingungen.....	19
5.5 Bewertung des Zyklons.....	20
6 Verteilung der Geschwindigkeit im Zyklon	21
6.1 Verteilung der Gesamtgeschwindigkeit	21

6.2 Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit.....	25
6.3 Verteilung der Axialgeschwindigkeit.....	30
6.4 Verteilung der Radialgeschwindigkeit	33
6.5 Zusammenfassung.....	36
7 Verteilung des Drucks im Zyklon	38
7.1 Verteilung des statischen Drucks	38
7.2 Verteilung des dynamischen Drucks	41
7.3 Verteilung des Totaldrucks	44
7.4 Zusammenfassung.....	47
8 Einflussfaktoren der Leistung von Zyklon	48
8.1 Einflussparameter des Druckverlustes	48
8.1.1 Einfluss der Geschwindigkeit auf den Druckverlust	48
8.1.2 Einfluss der Einlaufstruktur auf den Druckverlust	51
8.2 Einflussparameter des Abscheidegrades	52
8.2.1 Einfluss der Geschwindigkeit auf den Abscheidegrad.....	52
8.2.2 Einfluss des Durchmessers von Partikeln auf den Abscheidegrad	57
8.2.3 Einfluss der Dichte von Partikeln auf den Abscheidegrad	58
8.2.4 Einfluss der Einlaufstruktur auf den Abscheidegrad.....	59
8.3 Zusammenfassung.....	65
9 Zusammenfassung und Ausblick	67
Literaturverzeichnis	69
Tabellenverzeichnis	71
Abbildungsverzeichnis	72
Symbolverzeichnis	73
Abkürzungsverzeichnis	75
Anhang A: Technische Zeichnungen von Zyklon	A-1
Anhang B: Daten-CD	B-1

1 Einleitung

Der Zyklonabscheider ist ein sehr effektives Staubabscheidegerät. Er besitzt die Vorteile einer einfachen Struktur, niedriger Herstellungskosten und einer einfachen Reparatur und ist daher in vielen Bereichen weit verbreitet. Die Partikel treten mit der Strömung in den Zyklon ein und werden unter Einwirkung der Zentrifugalkraft von der Strömung getrennt. Obwohl die Struktur und das Prinzip des Zyklones sehr einfach sind, ist die Bewegung von Strömung und Partikel innerhalb des Zyklones während des Arbeitsprozesses sehr kompliziert. Durch die Analyse der Geschwindigkeits- und Druckverteilung der Strömung im Zyklon, kann die Bewegung der Partikel besser verstanden werden und kann auch dazu beitragen, die Leistung und Struktur des Zyklones zu optimieren. Wenn die experimentelle Methode zur Analyse des Zyklones verwendet wird, ergeben sich Nachteile wie große Investitionen und großer Zeitaufwand. Deswegen wird die Methode der numerischen Simulation angewendet, um den Zyklonabscheider zu simulieren, zu analysieren und zu optimieren.

CFD steht für Computational Fluid Dynamics, auch die numerische Strömungsmechanik genannt. Die Forschung von CFD konzentriert sich darauf, die Gleichungen der Strömungsmechanik durch Computer- und numerische Methoden zu lösen und Probleme über Strömungsmechanik zu simulieren und zu analysieren [1]. Die CFD-Technologie ist sehr anpassungsfähig und spart Zeit. Die Flexibilität in der Verwendung ist ebenfalls sehr hoch. Die Experimente, welche hohe Temperaturen, Entflammbarkeit usw. enthalten, können durch die CFD-Technologie leicht simuliert werden. Gleichzeitig sind die Kosten niedriger, die Entwurfs- und Berechnungsgeschwindigkeit schnell und die Informationen vollständig [2].

In dieser Arbeit wird CFD verwendet, um die Bewegung von dem Luftstrom und den Partikeln im Zyklon zu berechnen und simulieren. Zunächst werden die Gleichungen zur Luftbewegung und die Bewegungsgleichung des Partikels entsprechend der Partikelkraft im Strömungsfeld aufgestellt. Durch Analyse der Eigenschaften der Einlaufstruktur des Zyklones werden dreidimensionale Modelle von vier Zyklonen erstellt. Nach der Festlegung von Simulationsparameter und Randbedingungen wird die Simulation durchgeführt.

Nach Erhalt der Simulationsdaten, werden die Verteilungen von Geschwindigkeit und Druck unter verschiedenen Simulationsbedingungen analysiert und verglichen. Gleichzeitig werden auch die Faktoren analysiert, die den Druckverlust und den Abscheidegrad des Zyklones beeinflussen. Durch Vergleich der Unterschiede in den Simulationsergebnissen von Zyklonen mit unterschiedlichen Einläufen wird das Modell für unterschiedliche Anforderungen empfohlenen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Grundlagen des Zyklones

Fliehkraftabscheider, manchmal auch Zyklon oder Zyklonabscheider genannt, ist das am häufigste verwendete Staubentfernungsgerät in der Industrie. Seit **O.A. Morse** 1886 das erste Patent für einen Zyklon erhielt [3], wird die Struktur des Zyklones kontinuierlich weiterentwickelt. Gleichzeitig wird der Abscheidegrad des Zyklones ständig verbessert. In den Abhandlungen von **Isaac Newton**, **Claude Louis Marie Henri Navier** und **George Gabriel Stokes** werden die physikalischen Prinzipien des modernen industriellen Zyklones festgelegt [4]. Diese Theorien legen auch den Grundstein für die Analyse der Kräfte auf Partikel in Flüssigkeitsbewegung.

2.1.1 Die Struktur und das Funktionsprinzip des Zyklones

Die Trennung von Partikeln im Gas ist immer ein wichtiger Teil in der Industrie. Zum Beispiel kann eine effektive Abscheidung von Staub in der Luft die Arbeitsumgebung verbessern und die Umweltschutzanforderungen erfüllen. Ebenso müssen die Partikel in den teuren Katalysatoren nach der Reaktion wieder entfernt werden, um die Katalysatoren wiederverwenden zu können. Auch kann das Entfernen von harten Partikeln im Gas nachgeschaltete Geräte schützen und Schäden an Rotorblättern oder anderen Komponenten vermeiden [4]. Für Partikel mit unterschiedlicher Größe sind verschiedene Methoden und Anlagen erforderlich. Gleichzeitig ändern sich die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Partikel während der Bewegung stark. Es gibt kein einziges Gerät, das alle Arten von Partikeln verarbeiten kann, doch Zyklone können für die meisten Anwendungen genutzt werden. Zyklon ist in vielen Bereichen wie in Bergwerken, in Wärmekraftwerken, in Baustofffabriken, bei der Kunststoffherstellung, usw. weit verbreitet.

Zyklon ist eine Vorrichtung, die partikuläre Feststoffe durch eine radiale Zentrifugalkraft, die auf die Partikel ausgeübt wird, von einem Fluidstrom trennt [5]. Die Struktur eines allgemeinen Zyklons besteht aus Einlauf, Zylinder, Kegel, und Auspuffrohr, siehe **Abbildung 2.1**. Die Struktur jeder Komponente hat viele Formen, wodurch verschiedene Arten von Zyklonen gebildet werden, aber die Prinzipien sind dieselben. Für die verschiedenen Anforderungen werden unterschiedliche Leistungen eingesetzt.

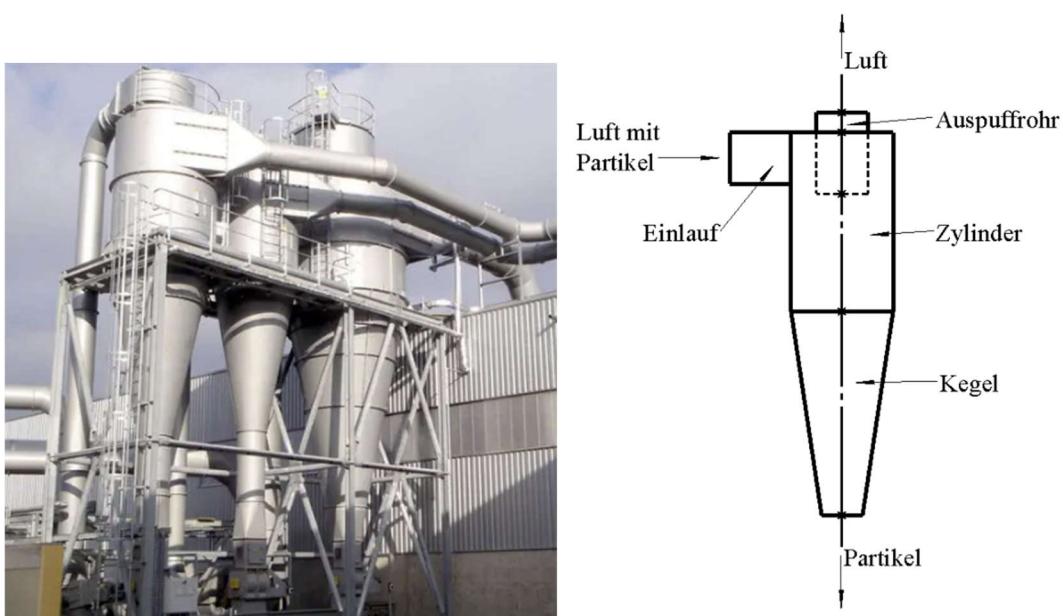


Abbildung 2.1: Links: Zyklon in Industrie [6]; rechts: Die Struktur eines Zylkones

Nachdem die partikelhaltige Strömung vom Einlauf in den Zyklonabscheider gelangt ist, wird die ursprüngliche lineare Bewegung aufgrund der Einschränkung der Wand in eine Kreisbewegung umgelenkt. Aufgrund des Vorhandenseins der oberen Abdeckung dreht sich die Strömung entlang der axialen Richtung nach unten. Dieser Teil wird als externer Wirbel oder Abwärtsströmung bezeichnet. Die Partikel werden während der Rotation durch die Zentrifugalkraft beeinflusst. Wenn die nach außen gerichtete Zentrifugalkraft größer als der nach innen gerichtete viskose Widerstand ist, werden die Partikel an die Wand gestoßen. Sobald die Partikel Kontakt mit der Wand haben, nimmt die kinetische Energie der Partikel schnell ab [7]. Danach fallen die Partikel allmählich in das Staubauspuffrohr und werden abgeschieden. Wenn die Abwärtsströmung den Kegel erreicht, nimmt die Tangentialgeschwindigkeit der Luftströmung aufgrund der Kontraktion weiter zu. Gleichzeitig steigt der Druck des Luftstroms aufgrund der starken Drehung der Abwärtsströmung, und der in der Mitte des Kegels erzeugte niedrige Druck zwingt den rotierenden Luftstrom, sich auf die Mitte des Kegels zu konzentrieren. Der neu gebildete Wirbel dreht sich von unten nach oben in die gleiche Drehrichtung, und verlässt den Zyklonabscheider über das Auspuffrohr. Dieser Teil wird als interner Wirbel oder Aufwärtsströmung bezeichnet. Es ist zu beachten, dass die Trennung von Partikeln hauptsächlich während der Abwärtsbewegung der Strömung erfolgt und nicht aufgrund der Schwerkraft. In einem vertikal gesetzten Zyklon spielt die Schwerkraft nur eine unterstützende Rolle. Nur wenn die Konzentration vom Partikel im Zyklonabscheider hoch ist, hat die Schwerkraft einen signifikanten Einfluss auf den Abscheidegrad [4].

Zyklon hat gegenüber anderen Geräten folgende Vorteile [4]:

1. Niedrige Herstellungskosten und Wartungskosten in den meisten Anwendungsfällen;
2. Kompakte Struktur, keine beweglichen Teile, lange Lebensdauer;
3. Zyklon kann in extremen Umgebungen mit chemischer Korrosion, hohen Temperaturen und hohem Druck usw. angewendet werden.
4. Zyklon kann Feststoff oder Flüssigkeit von Gas abscheiden;
5. Je nach Verwendungsbedingungen können verschiedene Materialien verwendet werden.

Nachteile:

1. Höherer Druckverlust;
2. Wenn die Partikel hart oder klebrig sind, verschleißt sich der Zyklon schnell;
3. Wenn die Partikel zu klein für die Zyklonleistung sind, fällt der Abscheidegrad stark ab.

Obwohl die Struktur und das Prinzip sehr einfach sind, ist die Bewegung von Strömung und Partikel innerhalb des Zyklonabscheiders kompliziert, dreidimensional, rotierend und turbulent. Es ist schwierig, den spezifischen internen Bewegungsprozess nur mit Experimenten genau darzustellen. Die numerische Simulationsmethode wird deswegen verwendet, um das komplexe turbulente Strömungsgesetz im Zyklonabscheider zu untersuchen. Dadurch werden die Leistung und die Struktur des Zylkons optimiert. Im Vergleich zur experimentellen Methode kann die numerische Simulationsmethode den Forschungs- und Entwicklungszyklus erheblich verkürzen und die Kosten senken. Diese Methode hat einen wichtigen praktischen Anwendungswert [8].

2.2 Grundlagen von CFD

CFD steht für Computational Fluid Dynamics, auch die numerische Strömungsmechanik genannt. CFD ist eine numerische Simulationstechnologie für das Strömungsfeld, die in den 1970er Jahren mit der Entwicklung der Strömungsmechanik, der numerischen Analyse und der Computertechnologie schrittweise entstand. Die Forschung von CFD konzentriert sich darauf, die Gleichungen der Strömungsmechanik durch Computer- und numerischen Methoden zu lösen und Probleme über Strömungsmechanik zu simulieren und zu analysieren [1].

Bei CFD werden das ursprüngliche kontinuierliche Druckfeld und das Geschwindigkeitsfeld in Zeit und Raum durch eine Reihe variabler Werte an einer begrenzten Anzahl diskreter Punkte ersetzt. Die algebraische Beziehung zwischen den Variablenwerten an diesen diskreten Punkten wird dann durch bestimmte

spezifische Beziehungen hergestellt. Nachdem die algebraischen Gleichungen über die Beziehung zwischen diesen diskreten Variablen erhalten wurden, wird ein geeignetes Modell zur Steuerung ausgewählt. Schließlich werden diese algebraischen Gleichungen vom Computer gelöst, und der spezifische Wert jedes physikalischen Parameters an diskreten Punkten wird erhalten. Durch Beobachtung der Verteilung dieser Parameter im Strömungsfeld und des Gesetzes der zeitlichen Veränderung können spezifische physikalische Probleme untersucht und analysiert werden [9].

Die Berechnungsschritte in CFD sind [10]:

1. Das mathematische Modell und bestimmte Lösungsbedingungen werden festgelegt;
2. Die Berechnungsmethoden mit hoher Effizienz und Genauigkeit werden gesucht, nämlich Diskretisierungsmethoden, z.B. FEM (Finite-Elemente-Methode), FDM (Finite-Differenzen-Methode), FVM (Finite-Volumen-Methode);
3. Programmierung und Berechnung;
4. Analyse der Ergebnisse.

Die CFD-Technologie ist sehr anpassungsfähig und spart Zeit. Die Flexibilität in der Verwendung ist ebenfalls sehr hoch. Experimente unter hohen Temperaturen, mit Entflammbarkeit usw. können leicht simuliert werden. Gleichzeitig sind die Kosten niedrig, die Entwurfs- und Berechnungsgeschwindigkeit ist schneller und die Informationen sind vollständig [2]. CFD kann die innere Struktur der Flüssigkeit vollständig demonstrieren. Es gibt keine "blinde Zone", die aufgrund der Einschränkungen experimenteller Methoden nicht erkannt wird. Deswegen wird CFD häufig in den Bereichen Maschinenbau, Umwelttechnik, Schiffbau, Fahrzeugbau usw. angewandt.

Die Grundlage für fast alle CFD-Probleme sind die Navier-Stokes-Gleichungen. Die Navier-Stokes-Gleichungen (nach **Claude Louis Marie Henri Navier** und **George Gabriel Stokes**) sind ein mathematisches Modell der Strömung von linear-viskosen newtonschen Flüssigkeiten und Gasen. Im engeren Sinne, insbesondere in der Physik, ist mit Navier-Stokes-Gleichungen die Impulsgleichung für Strömungen gemeint [11]. Im weiteren Sinne, insbesondere in der numerischen Strömungsmechanik, wird diese Impulsgleichung um die Kontinuitätsgleichung und die Energiegleichung erweitert und bildet dann ein System von nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen zweiter Ordnung [12]. Dieses ist das grundlegende mathematische Modell der Strömungsmechanik.

Dies geschieht in Näherungsform, weil keine exakten analytischen Lösungen für diese komplizierten Anwendungsfälle bekannt sind. Die Existenz und Eindeutigkeit einer Lösung der Gleichungen ist außerdem im allgemeinen Fall noch nicht erwiesen.

3 Erstellung von CFD-Modell

3.1 Das mathematische Modell der Strömung

Die Strömung folgt während der Bewegung drei grundlegende Erhaltungssätze: Massenerhaltungssatz, Impulserhaltungssatz und Energieerhaltungssatz. Weil die Bewegung der Strömung im Zyklon keine Energieübertragung beinhaltet, wird bei der Erstellung eines numerischen Modells nur die Erhaltung von Masse und Impuls berücksichtigt. Die Mach-Zahl des Fluids in dieser Simulation ist sehr klein. Wenn die Mach-Zahl kleiner als 0,3 ist, wird das Fluid als inkompressibel angesehen [2].

Weil das Fluid inkompressibel ist, wird der Massenerhaltungssatz durch eine vereinfachte Kontinuitäts-Gleichung beschrieben:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

u_i ($i = 1, 2, 3$) die kartesischen Komponenten der Geschwindigkeit, $m \cdot s^{-1}$

x_i ($i = 1, 2, 3$) die kartesischen Koordinaten

Das Impulserhaltungssatz wird durch Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} + \rho F \quad (3.2)$$

ρ Dichte des Fluids, $kg \cdot m^{-3}$

t Zeit der Bewegung des Fluids, s

P Druck des Fluids, Pa

μ Viskosität des Fluids, $Pa \cdot s$

F Kraft auf Fluid, N

Es ist schwierig, mit den vorhandenen mathematischen Werkzeugen zu beweisen, dass eine eindeutige Lösung für bestimmte Randbedingungen existiert. Nur in wenigen Fällen ist es möglich, eine analytische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen zu erhalten. Die Reynolds-Gleichungen oder Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen sind eine Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen, die in der numerischen Strömungsmechanik zur Approximation turbulenter Strömungen verwendet werden. Sie werden auch als RANS-Gleichungen bezeichnet.

In RANS-Gleichungen ist die Strömung stationär und in einer statistisch stationären Strömung kann jede Variable als Summe aus einem zeitgemittelten Wert \bar{u}_i und einer Schwankung um diesen Wert u'_i ausgedrückt werden [2]:

$$u = \bar{u}_i + u'_i \quad (3.3)$$

Dann werden die RANS-Gleichungen abgeleitet:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + (\mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) + \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \quad (3.4)$$

$\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$ die Reynolds-Spannungen

3.2 Turbulenzmodell

Im Vergleich zu den Navier-Stokes-Gleichungen wird ein zusätzlicher Term mit zusätzlichen Variablen, die Reynolds-Spannungen, in den RANS-Gleichungen eingeführt. Die Schließung des Gleichungssystems gelingt durch zusätzliche Annahmen für die Komponenten der Reynolds-Spannungen in Form von Gleichungen. Diese zusätzlichen Gleichungen werden Turbulenzmodell genannt. Nach unterschiedlichen Annahmen und Verarbeitungsmethoden werden unterschiedliche Turbulenzmodelle erstellt. Derzeit gibt es drei Turbulenzmodelle, die bei CFD weit verbreitet sind: Standard $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell, $k-\omega$ -Turbulenzmodell und Reynolds-Spannungs-Modell (RNS-Modell).

3.2.1 Standard $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell

Das von Launder und Spalding vorgeschlagene $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell für turbulente Strömungen mit hohen Reynolds-Zahlen ist bis heute das mit Abstand am häufigsten in CFD Simulationen genutzte Turbulenzmodell [13]. Dieses Modell ist ein Zweigleichungsmodell, der aus der Lösung zweier gekoppelter Transportgleichungen besteht.

Die Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie k und die isotropen Dissipationsrate ε sind:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + C_{\mu} \rho \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{4} C_{\varepsilon 1} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.6)$$

σ_k Prandtl-Zahl der Turbulenz für k

μ_t Wirbelviskosität, $\mu_t = C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$

Die Modellkonstanten sind $C_\mu=0,09$, $C_{\varepsilon 1}=1,44$, $C_{\varepsilon 2}=1,92$, $\sigma_k=1$ und $\sigma_\varepsilon=1,3$.

Das $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell ist gut geeignet für die Berechnung von relativ einfachen Strömungen, wie etwa dem Kernbereich einer vollturbulenten Rohrströmung oder der Simulation über Wärmeübertragung. Bei komplexeren Strömungen führt das Modell zu schlechten Resultaten.

3.2.2 $k-\omega$ -Turbulenzmodell

Das von Wilcox vorgeschlagene $k-\omega$ -Turbulenzmodell ist eine Variante des Standard $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodells, und ist ein weiteres weitverbreitetes Zweigleichungs-Turbulenzmodell [13]. Das Modell besteht aus einer Transportgleichung für k und einer Transportgleichung für die charakteristische Frequenz ω . Die charakteristische Frequenz ω ist für den energietragenden Wirbel, und wird als Turbulenzgröße verwendet [9]:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (3.7)$$

Die Transportgleichungen sind:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = C_\mu \rho \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma^* \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \alpha \frac{\omega}{k} C_\mu \rho \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \frac{\omega^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (3.9)$$

Die Modellkonstanten sind $\alpha=5/9$, $\beta=3/40$, $\beta^*=9/100$, $\sigma=0,5$ und $\sigma^*=0,5$.

Das $k-\omega$ -Turbulenzmodell liefert speziell in der Nähe von festen Wänden eine deutlich bessere Beschreibung der mittleren Turbulenz. So dass das Modell hauptsächlich bei Strömungen mit starker Krümmung verwendet wird.

3.2.3 Reynolds-Spannungs-Modell

Das Reynolds-Spannungs-Modell basieren auf der Transportgleichung der Reynolds-Spannungen. Die Struktur der Gleichungen ist damit wesentlich komplexer als bei den zuvor beschriebenen Zwei-Gleichungsmodellen. Diese dreidimensionale Transportgleichung besteht aus folgenden Termen:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = P_{ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij} + D_{ij} \quad (3.10)$$

P_{ij} Produktionstensor, $P_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} \right)$

Π_{ij} Druck-Scher-Korrelationstensor, $\Pi_{ij} = \overline{p' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)}$

ε_{ij} Dissipationstensor, $\varepsilon_{ij} = 2\mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}$

D_{ij} Diffusionstensor, $D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right]$

Das Reynolds-Spannungs-Modell hat eine höhere Genauigkeit und ist billiger bei Simulation von großem Turbulenzmodell. In diesem Modell sind nur die Anfangs- und/oder Randbedingungen erforderlich. Gleichzeitig wird es auch in der Simulation von isotroper und anisotroper Turbulenz angewendet.

Die Bewegung der Strömung im Zyklon ist eine stark rotierende Bewegung und es gibt keine verbogenen Rohre. Durch den Vergleich der drei häufig verwendeten Turbulenzmodelle kann festgestellt werden, dass das Reynolds-Spannungs-Modell besser zur Simulation von komplexen und starken Wirbelbewegungen geeignet ist. Daher wird das Reynolds-Spannungs-Modell in der nachfolgenden Simulation verwendet.

3.3 Kräfte auf Partikel

Die Bewegung eines einzelnen Partikels im Strömungsfeld ist das Ergebnis der kombinierten Wirkung mehrerer Kräfte. Die Gleichung lautet:

$$m_p \frac{d\overline{u_p}}{dt} = \overrightarrow{F_D} + \overrightarrow{F_P} + \overrightarrow{F_B} + \overrightarrow{F_{Ba}} + \overrightarrow{F_S} + \overrightarrow{F_M} + \overrightarrow{F_G} + \overrightarrow{F_m} \quad (3.11)$$

F_D Strömungswiderstand: Eine Kraft, die durch die Viskosität der Flüssigkeit auf die Partikel erzeugt wird. $\overrightarrow{F_D} = \frac{1}{2} \rho u^2 C_D A$, C_D ist der Strömungswiderstandscoefficient.

F_P Gradientenkraft: Aufgrund eines Luftdruckgradienten, also eines Unterschiedes im Luftdruck zwischen Hoch- und Tiefdruckgebiet, wirkt auf die Luft entlang des Druckgefälles eine Kraft. $\overrightarrow{F_P} = -\frac{m}{\rho} \frac{\partial P}{\partial t}$,

ρ ist die Dichte des Partikels.

F_B Auftriebskraft: $\overrightarrow{F_B} = \rho V_p g$, V_p ist das Volumen des Partikels.

F_{Ba} Basset-Kraft: Die Kraft beschreibt die Kraft aufgrund der verzögerten Grenzschichtentwicklung mit sich ändernder Relativgeschwindigkeit (Beschleunigung) der Partikel, die sich durch eine Flüssigkeit bewegen. $\overrightarrow{F_{Ba}} = \frac{3}{2} d_p^2 (\pi \rho \mu)^{\frac{1}{2}} \int_{t_0}^t (t - t')^{-\frac{1}{2}} \frac{d}{dt} (v - v_p) dt'$, d_p ist der Durchmesser des Partikels.

F_S Saffman-Kraft: Aufgrund eines Geschwindigkeitsgradientes, also eines Unterschiedes in Geschwindigkeit zwischen hohem und niedrigem Geschwindigkeitsgebiet, wirkt auf die Luft entlang des Geschwindigkeitsgefälles eine Kraft.

$$\vec{F}_S = 1,61 d_p^2 (\rho \mu)^{\frac{1}{2}} (v - v_p) \left| \frac{dv}{dy} \right|^{\frac{1}{2}}$$

F_M Magnus-Kraft: Die von Magnus beschriebene Kraft ergibt sich durch die Eigenrotation des Partikels.

Durch die Rotation stellt sich aufgrund der daraus resultierenden Relativgeschwindigkeiten an der Teilchenoberfläche eine ungleichmäßige Druckverteilung über die Oberfläche ein. Dadurch ergibt sich eine Querkraft/Auftriebskraft.

$$\vec{F}_M = \frac{1}{8} \pi \rho d_p^3 (v - v_p) \omega, \quad \omega \text{ ist die Winkelgeschwindigkeit der Partikel.}$$

F_G Gravitation, $\vec{F}_G = \rho_p V_p g$

F_m Zusätzliche Massenkraft: Wenn sich die Partikel beschleunigen, beschleunigt sich auch das Fluid um die Partikel. Die zum Beschleunigen des Fluids verwendete Kraft ist die zusätzliche Massenkraft.

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} V_p \rho a_F, \quad a_F \text{ ist die Beschleunigung des Fluids.}$$

4 Konstruktion des Zyklons

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt im Vergleich der Auswirkungen von vier verschiedenen Einlaufstrukturen auf die Leistung des Zyklons. Diese vier Strukturen sind in unterschiedlichen Bereichen weit verbreitet. Gleichzeitig basieren alle verbesserten Strukturen auf diesen vier Strukturen. Um nachfolgende CFD-Simulationen durchführen zu können, müssen die vier Zyklone separat dimensioniert und modelliert werden. Um zu verhindern, dass andere Strukturparameter die Simulationsergebnisse beeinflussen, sind die Größe von anderen Strukturen mit Ausnahme der Einlaufstruktur gleich.

4.1 Zyklon mit Schlitzeinlauf

Nach mehr als einhundertjähriger Entwicklung wird die Struktur des Zyklonabscheiders in verschiedenen Experimenten kontinuierlich verbessert. Weil die Größe des Zyklones in direktem Zusammenhang mit der Leistung steht, wird an der Zyklonstruktur noch immer geforscht. In 1997 fasste der Artikel von **Koch W. H.** und **Licht W.** die strukturellen Designs verschiedener Autoren zusammen, siehe **Tabelle 4.1** [17]. Diese Größen und Proportionen sind in modernen Designs weit verbreitet.

Tabelle 4.1: Geometrie von Standard Zyklon

Dimension	Standard			Hohe Effizienz	
	Lapple	Swift	Peterson Whitby	Stairmand	Swift
H_c / D_c	0,5	0,5	0,583	0,5	0,44
B_c / D_c	0,25	0,25	0,208	0,2	0,21
S_c / D_c	0,625	0,6	0,583	0,5	0,5
D_i / D_c	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
L_c / D_c	2	1,75	1,333	1,5	1,4
Z_c / D_c	2	2	1,84	2,5	2,5
D_s / D_c	0,25	0,4	0,5	0,375	0,4

Alle Abmessungen beziehen sich auf den Durchmesser des Zylinders, siehe **Abbildung 4.1**. Die industrielle Nachfrage kann durch Anpassen von D_c und Auswählen des geeigneten Verhältnisses gedeckt werden.

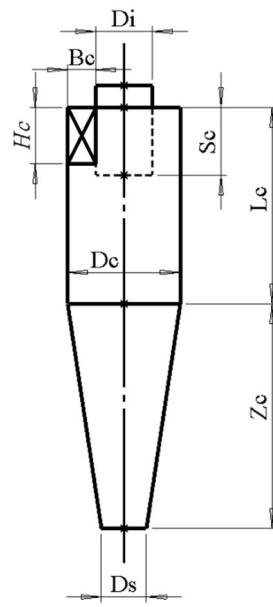


Abbildung 4.1: Nomenklatur der charakteristischen Geometrie des Zyklones

Der Zyklon mit Schlitzeinlauf wird am häufigsten in der Chemie- und Erdölindustrie verwendet. Zusätzlich zur Erhöhung der Festigkeit gemäß spezifischen Anforderungen sind die Schwierigkeiten und Kosten der Herstellung dieser Struktur nicht hoch [4]. Weil im Allgemeinen kreisförmige Rohre zum Transport von Strömung mit Partikeln verwendet werden, erfordert diese Struktur einen Übergangsabschnitt von rund zu rechteckig. Dies führt zu einer komplizierten Struktur.

In dieser Arbeit wird entschieden, die Standard-Swift-Struktur zu übernehmen. Zur Vereinfachung der Simulation und Berechnung wird $D_c = 100 \text{ mm}$ gewählt. Nach der Berechnung wird die Größe des Zylklons mit Schlitzeinlauf erhalten, siehe das entsprechende 3D-Modell in **Abbildung 4.2**. Weil der Schwerpunkt dieser Arbeit die Analyse des Strömungsfeldes im Zyklon ist, hat die Wanddicke des Zylklons keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Die Wanddicke wurde deswegen auf 1 mm festgelegt.

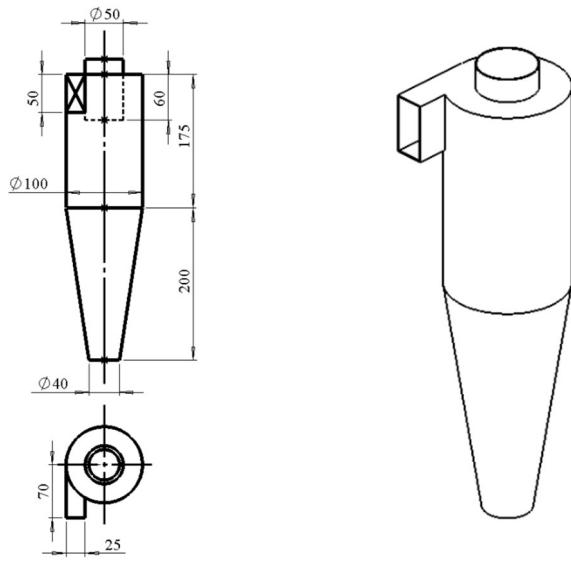


Abbildung 4.2: Links: Geometrie des Zyklons mit Schlitzeinlauf; rechts: 3D-Modell

4.2 Zyklon mit Rohreinlauf

Die Struktur des Zyklons mit Rohreinlauf ist am einfachsten. Diese Struktur wird häufig in Holzfabriken und Fabriken für chemische Pellets verwendet. Weil es keinen Übergangsabschnitt gibt, ist die Herstellung von Rohreinlauf einfacher als von Schlitzeinlauf. Gleichzeitig sind die Kosten geringer.

Nach der Berechnung werden die Geometrie und das 3D-Modell des Zyklons mit Rohreinlauf erstellt, siehe

Abbildung 4.3.

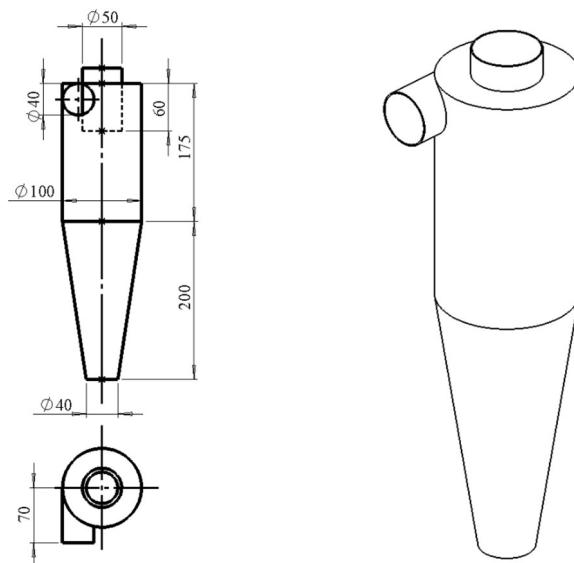


Abbildung 4.3: Links: Geometrie des Zyklons mit Rohreinlauf; rechts: 3D-Modell

4.3 Zyklon mit Spiraleinlauf

Aufgrund der Spiralstruktur ist der Radius von Eintritt des Zyklons mit Spiraleinlauf größer als bei anderen Strukturen. Deswegen ist unter der Bedingung der gleichen Größe von Zylinder und Kegel das Volumen der verarbeiteten Strömung größer. Diese Struktur wird häufig für Anforderungen von großer Durchflussmengen von Strömung und hoher Konzentration von Partikel verwendet. In industriellen Anwendungen gibt es vier übliche Spiralstrukturen, siehe **Abbildung 4.4**.

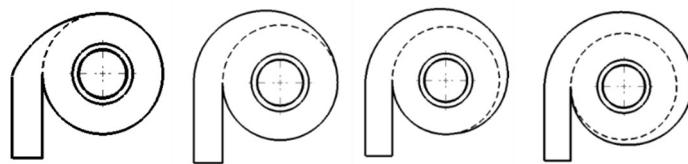


Abbildung 4.4: Spiraleinlauf mit unterschiedlichen Winkeln: von links nach rechts mit 90° , 180° , 270° und 360°

Je größer die Winkel der Spirale ist, desto größer ist der Einfluss der Struktur auf die Strömung. Um den Einfluss der Spiralstruktur auf die Leistung des Zyklons deutlicher hervorzuheben, wird ein Spiraleinlauf mit 360° ausgewählt.

Es gibt zwei Methoden, den Spiralradius zu berechnen [4]. Eine Methode ist durch exzentrische Entfernung δ_r berechnet, siehe **Abbildung 4.5**.

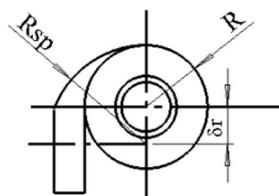


Abbildung 4.5: Berechnung des Spiralradius durch exzentrische Entfernung

Die andere Methode ist die Verwendung der logarithmischen Spirale. Bei dieser Berechnungsmethode ändert sich der Radius der Spirale mit dem Winkel:

$$\ln\left(\frac{R_{sp}}{R_{in}}\right) = \left[\frac{1}{360^\circ} \ln\left(\frac{R_{fin}}{R_{in}}\right)\right] \theta \quad (4.1)$$

θ Winkel von Spirale

R_{sp} Radius von Spirale bei Winkel = θ

R_{in} Radius von Spirale bei Winkel = 0°

R_{fin} Radius von Spirale bei Winkel = 360°

In dieser Arbeit wird die Methode der logarithmischen Spirale verwendet. Nach der Berechnung werden die Geometrie und das 3D-Modell des Zyklones mit Spiraleinlauf erstellt, siehe **Abbildung 4.6**.

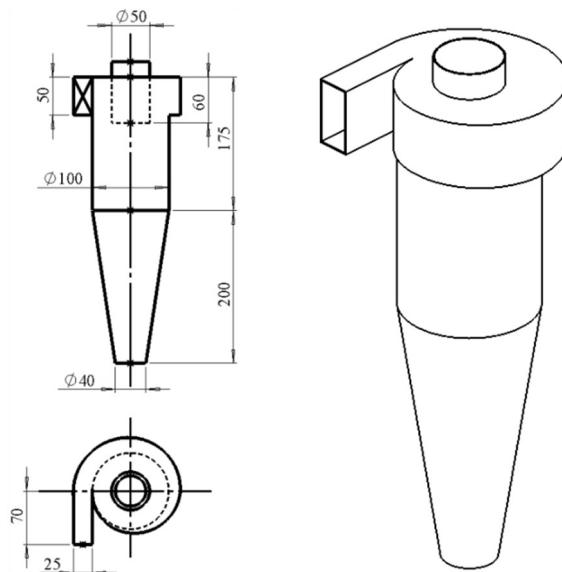


Abbildung 4.6: Links: Geometrie des Zyklons mit Spiraleinlauf; rechts: 3D-Modell

4.4 Zyklon mit Wendeleinlauf

Wenn der Zyklon mit Wendeleinlauf ausgestattet ist, tritt der Luftstrom mit zusätzlicher axialer Abwärtsgeschwindigkeit in den Zylinder ein. Dies kann die Wahrscheinlichkeit einer sekundären Wirbelbildung verringern, wodurch der kinetische Energieverbrauch verringert und die Leistung des Zyklonabscheiders verbessert wird. Diese Struktur ist in der Metallurgie, dem Guss und anderen Industriebereichen weit verbreitet.

Weil die Größe des Eingangs festgelegt wird, entspricht der Gewindegang der Höhe des Eingangs. Nach der Berechnung werden die Geometrie und das 3D-Modell des Zyklons mit Wendeleinlauf erstellt, siehe **Abbildung 4.7.**

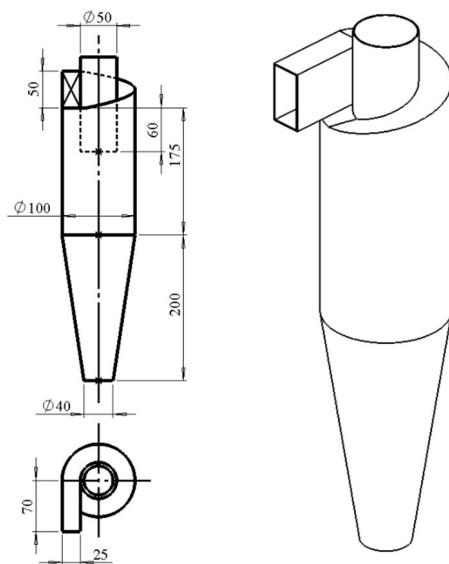


Abbildung 4.7: Links: Geometrie des Zyklons mit Wendeleinlauf; rechts: 3D-Modell

5 Vorbereitung der Simulation

5.1 Interpolationsverfahren

Die Wahl des numerischen Interpolationsverfahrens hat einen entscheidenden Einfluss darauf, ob das CFD-Modell die Transporteigenschaft besitzt oder nicht [13]. Das Interpolationsverfahren wird verwendet, um die Diskretisierung von Gleichungen in der Simulation zu steuern. Wenn ein ungeeignetes Interpolationsverfahren gewählt wird, sind die Simulationsergebnisse weit von der Realität entfernt. Um genaue und stabile Simulationsdaten zu erhalten, muss das geeignete Verfahren nach einem Vergleich der unterschiedlichen Verfahren ausgewählt werden. Die am häufigsten verwendeten Verfahren sind: First-Order-Upwind-Interpolation, Second-Order-Upwind-Interpolation, QUICK-Interpolation (Quadratic Interpolation for Convective Kinematics).

Beim Upwind Schema wird eine Methode angewandt, bei der der Wert der nächsten Variablen anhand des Werts der vorherigen Variablen berechnet wird. Die First-Order-Upwind-Interpolation ist das einfachste Verfahren. Nur wenn die Struktur sehr einfach ist, kann diese Methode stabil und genau bleiben, wobei die Werte schnell konvergieren. Wenn die Struktur jedoch komplizierter wird und die Berechnungsdaten größer werden, wird auch der Fehler größer.

Second-Order-Upwind-Interpolation hat Vorteile bei der Berechnung komplexer Probleme. Die Genauigkeit und Stabilität sind bei der Simulation komplexer Strukturen besser. Gleichzeitig werden mehr Ressourcen im Berechnungsprozess belegt und die Berechnungszeit erhöht sich.

QUICK-Interpolation ist eine verbesserte Second-Order-Upwind-Interpolation. Von den drei Methoden hat diese die höchste Genauigkeit. Jedoch erfordert dieses Verfahren eine sehr hohe Detailgenauigkeit des Modells. Wenn eine Simulation mit einer Second-Order-Upwind-Interpolation durchgeführt wird, wird die Genauigkeit mit einer QUICK-Interpolation unter den gleichen Bedingungen im Allgemeinen nicht wesentlich verbessert.

Nach dem Vergleich der verschiedenen Methoden und der Berücksichtigung der Komplexität des Modells wird die Second-Order-Upwind-Interpolation für die Simulation ausgewählt.

Im Zyklonabscheider gibt es einen großen Druckgradienten. Um die Druckfeldänderungen genau zu simulieren, muss das richtige Druckinterpolationsverfahren ausgewählt werden. Durch Auswahl einer geeigneten Methode kann das Berechnungsergebnis genauer sein und gleichzeitig die Arbeitsbelastung verringert werden. Für die Strömung mit hohen Wirbelzahlen, natürlicher Konvektion mit hoher Rayleigh-Zahl oder

rotierende Strömung mit hoher Geschwindigkeit ist PRESTO! (PREssure STaggering Option) besser geeignet [18].

5.2 Druckkorrektur-Verfahren

In einem Druckkorrektur-Verfahren sind die diskretisierte Kontinuitätsgleichung und Navier-Stokes-Gleichung erfüllt. Es gibt zwei häufig verwendete Verfahren: SIMPLE-Algorithmus (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) und SIMPLEC-Algorithmus (SIMPLE-Corrected).

Die Grundidee, auf der SIMPLE basiert, ist das unbekannte Druckfeld zu schätzen, die Geschwindigkeitsfelder damit zu berechnen und mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung eine Druckkorrektur und anschließend eine Geschwindigkeitskorrektur zu bestimmen. Dieses Vorgehen wird wiederholt, bis die Kontinuitätsgleichung im Rahmen der vorgegebenen Genauigkeit erfüllt wird.

SIMPLEC-Algorithmus ist ein verbessertes SIMPLE. In diesem Verfahren werden die in SIMPLE vernachlässigten Terme beibehalten und ihre Beiträge durch bekannte Werte approximiert. Im Vergleich zu SIMPLE kann SIMPLEC die Konvergenz in Simulationen mit Turbulenzen verbessern. In komplexen Modellen mit Biegung ist die Konvergenz von SIMPLE jedoch besser und die Berechnungsergebnisse sind genauer.

Weil im Zyklonabscheider Turbulenzen dominieren, wird SIMPLEC ausgewählt.

5.3 DPM (Discrete Phase Models)

DPM ist ein Modell, das auf Euler-Lagrange-Gleichungen basiert und zur Simulation der Bewegung von Partikeln im Strömungsfeld verwendet wird.

Im Allgemeinen sind die von DPM berechneten Partikel sehr klein und die Volumenkonzentration beträgt nicht mehr als 10 %. Die Partikel im Strömungsfeld sind deswegen während der Bewegung sehr weit voneinander entfernt. Die Wahrscheinlichkeit, dass Partikel miteinander kollidieren, ist gering. Die Wechselwirkung zwischen Partikeln kann deswegen ignoriert werden.

Weil die Partikelkonzentration im Zyklonabscheider unter 10 % liegt, ist das DPM gut für diese Simulation geeignet [18].

5.4 Randbedingungen

In dieser Simulation werden vier Geschwindigkeiten ausgewählt, um den Einfluss der vier Einlassstrukturen auf die Zyklonleistung unter verschiedenen Simulationsbedingungen zu vergleichen. Die vier Geschwindigkeiten sind 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s. Die Flüssigkeit ist Luft mit Raumtemperatur. Der Luftstrom tritt gleichmäßig senkrecht zum Eintritt in den Zyklon ein.

Die Eigenschaften der Partikel haben auch einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse. In dieser Simulation wurden insgesamt zwei verschiedene Partikel verwendet: Anthrazit und Asche. Es wird angenommen, dass die Form der Partikel kugelförmig ist. Die Auswirkung des Partikeldurchmessers auf den Abscheidegrad ist offensichtlich [4]. Um den Einfluss der Partikelgröße auf den Abscheidegrad so gut wie möglich hervorzuheben, hat jeder Partikel sieben Durchmesser, siehe **Tabelle 5.1**. Die Partikel treten mit dem Luftstrom gleichmäßig und senkrecht zum Eintritt in den Zyklon ein. Um sicherzustellen, dass zwischen den Partikeln und dem Luftstrom kein relativer Schlupf besteht, entspricht die Geschwindigkeit der Partikel der Strömung.

Tabelle 5.1: Parameter von Partikel

Art von Partikel	Dichte	Durchmesser	Anzahl von Partikel
Anthrazit	1550 kg/m ³	1 µm, 2,5 µm, 3,5 µm, 5 µm 6,5 µm, 8 µm, 10 µm	500
Asche	600 kg/m ³	1 µm, 2,5 µm, 3,5 µm, 5 µm, 6,5 µm, 8 µm, 10 µm	500

Das Auspuffrohr ist der einzige Auslass für den Luftstrom. Wenn die Partikel durch das Auspuffrohr austreten, können die Partikel nicht abgeschieden werden. Dieser Zustand wird als Entkommen definiert. Wenn die Partikel das Staubauspuffrohr erreichen, gelten die Partikel als gefangen. Nachdem Partikel gefangen werden, hat das Strömungsfeld keine Auswirkungen mehr darauf. Gleichzeitig wird die Berechnung dieses Partikels gestoppt.

5.5 Bewertung des Zyklons

Es gibt viele Bewertungsindikatoren für Zyklonabscheider, von denen die wichtigsten der Abscheidegrad und der Druckverlust sind.

Der Abscheidegrad kann die Qualität der Fähigkeit zur Entfernung von Partikel anzeigen. Je höher der Abscheidegrad ist, desto besser ist der Zyklon. Es gibt drei Partikelzustände im Zyklon: in den Zyklon eintretende Partikel, vom Zyklon gefangene Partikel, mit dem Luftstrom entkommene Partikel.

Die Beziehung untereinander ist:

$$M_{ges} = M_{fa} + M_{ent} \quad (5.1)$$

M_{ges} die Menge der in den Zyklon eintretenden Partikel

M_{fa} die Menge der vom Zyklon gefangenem Partikel

M_{ent} die Menge der mit dem Luftstrom entkommenen Partikel

In dieser Simulation wird der Abscheidegrad η durch diese Gleichung ausgedrückt:

$$\eta = \frac{M_{fa}}{M_{ges}} \quad (5.2)$$

Der Druckverlust ist ein wichtiger Parameter zur Messung des Energieverbrauchs und der Betriebskosten eines Zyklons. Je geringer der Druckverlust ist, desto geringer ist der Energieverbrauch und die Betriebskosten. Der Druck im Abscheider wird in Totaldruck P_{total} , statischen Druck P_{sta} und dynamischen Druck P_{dyn} unterteilt. Die Beziehung untereinander ist:

$$P_{total} = P_{sta} + P_{dyn} \quad (5.3)$$

Der Druckabfall bezieht sich auf die Differenz zwischen dem Totaldruck am Einlass und am Auslass. Der Druckverlust des Zyklones besteht aus drei Teilen: Verlust am Einlass, Verlust im Zyklon und Verlust im Auspuffrohr.

Der Energieverlust am Einlass ist im Vergleich zu den beiden anderen vernachlässigbar, da er sehr gering ist. Der Energieverlust im Zyklon ist hauptsächlich auf die Reibung zwischen Strömung und Wand zurückzuführen, wodurch die kinetische Energie der Strömung abnimmt. Der dominierende Energieverlust ist jedoch der Energieverlust im Auspuffrohr [4].

6 Verteilung der Geschwindigkeit im Zyklon

Nach der Simulation müssen die Simulationsergebnisse nachbearbeitet werden, um die Bewegung der Strömung im Zyklon zu analysieren. In allen Eigenschaften der Strömung ist die Luftgeschwindigkeit einer der wichtigsten Parameter, die den Abscheidegrad beeinflussen. Nachdem der Luftstrom vom Einlass in den Zyklonabscheider gelangt ist, dreht sich die Strömung aufgrund der Einschränkung der Wand nach unten. Wenn der Luftstrom den Boden des Abscheidlers erreicht hat, ändert sich die Richtung der Axialgeschwindigkeit und beginnt sich nach oben zu bewegen. Der Luftstrom verlässt dann den Abscheider durch das obere Auspuffrohr.

6.1 Verteilung der Gesamtgeschwindigkeit

Nach Verarbeitung der Simulationsdaten wird das Verteilungsdiagramm der Gesamtgeschwindigkeit erhalten, siehe **Abbildung 6.1**. Es ist ersichtlich, dass die Luftgeschwindigkeit in der Nähe der Achse und der Wand im internen Strömungsfeld gering ist. Von der Achse zur Wand entlang des Radius nimmt die Geschwindigkeit zu und dann ab, was eine typische doppelschichtige Rankine-Wirbelstruktur zeigt. Zwischen den beiden Rankine-Wirbeln befindet sich eine Fläche mit der höchsten Geschwindigkeit. Diese Fläche wird als CS-Ebene bezeichnet [4], und überlappt im Wesentlichen die imaginäre Verlängerungsfläche des Auspuffrohrs zum Boden des Abscheidlers, siehe **Abbildung 6.2**. Die CS-Ebene trennt Abwärtsstrom und Aufwärtsstrom. Gleichzeitig ist die Geschwindigkeit des Abwärtsstromes signifikant niedriger als die des Aufwärtsstromes. Nahe der imaginären CS-Ebene ist die Rate der Geschwindigkeitsänderung groß.

In der Nähe des Auspuffrohres ist die Gesamtgeschwindigkeit sehr groß und die Geschwindigkeit ändert sich drastischer. Es zeigt sich, dass hier starke Turbulenzen auftreten. Ein Teil des Luftstromes tritt vom Einlass in den Zyklonabscheider ein, und verlässt den Zyklonabscheider dann direkt durch das Auspuffrohr. Dieser Fluss erzeugt einen Kurzschluss. Die Existenz eines Kurzschlusses verringert den Abscheidegrad erheblich. Bei der Strukturverbesserung soll so weit wie möglich die Erzeugung des Kurzschlussflusses vermieden werden.

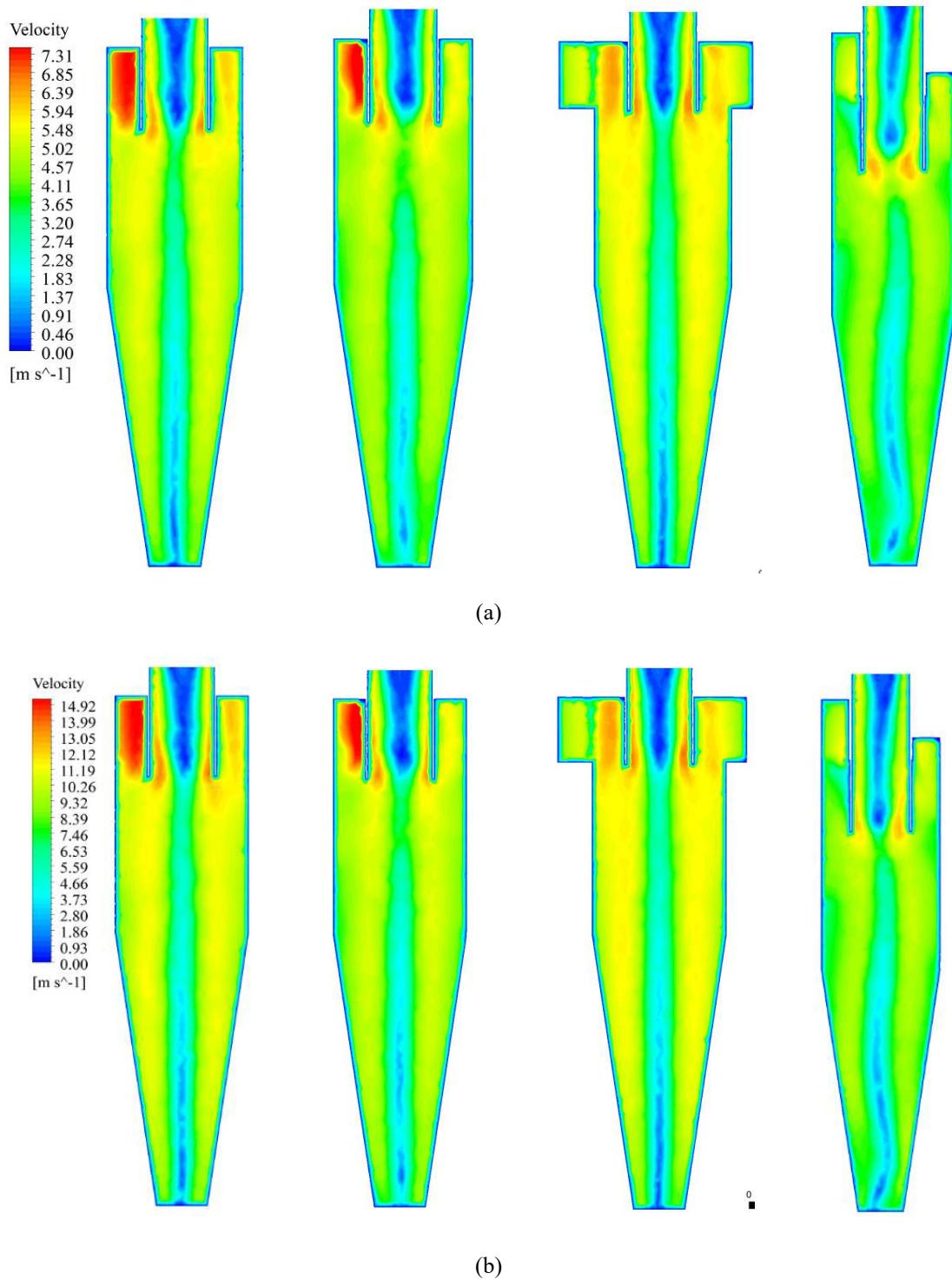


Abbildung 6.1: Verteilung der Gesamtgeschwindigkeit, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitz-einlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (a) bei 5 m/s; (b) bei 10 m/s

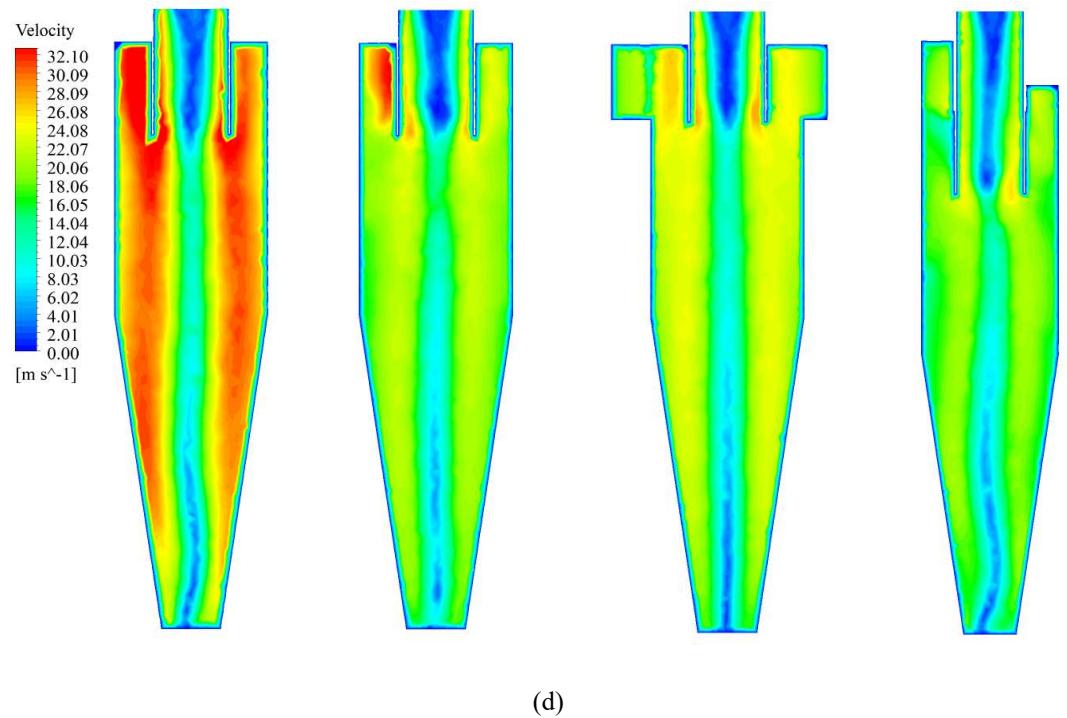
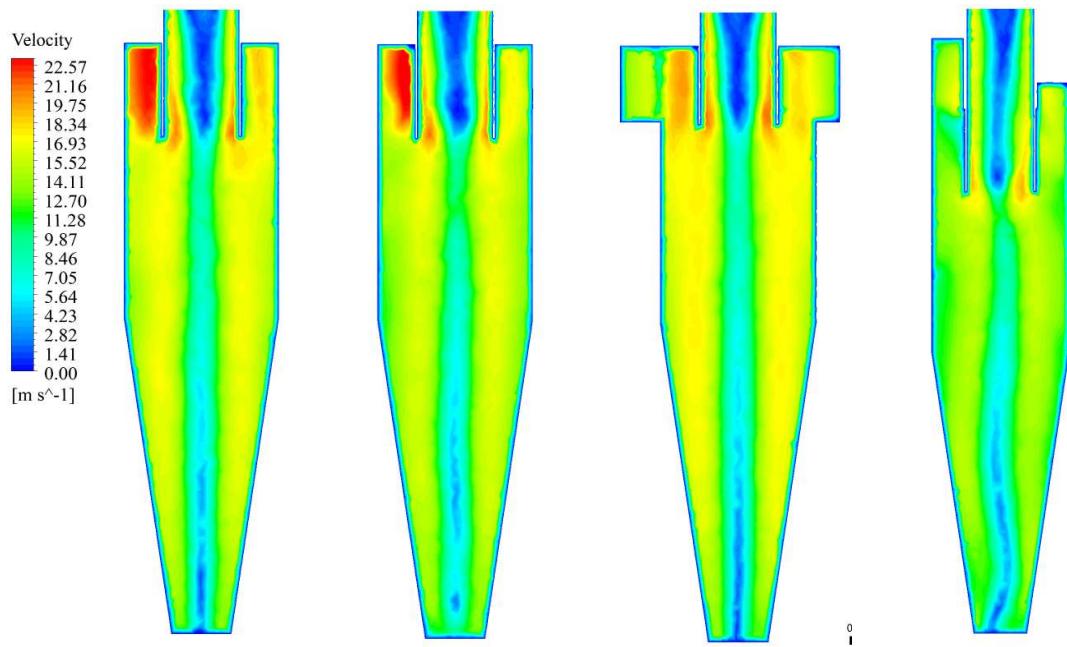


Abbildung 6.1 (Fortsetzung): Verteilung der Gesamtgeschwindigkeit, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (c) bei 15 m/s; (d) bei 20 m/s

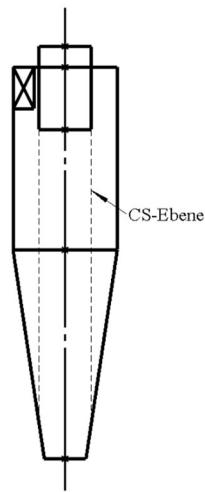


Abbildung 6.2: CS-Ebene

Die Verteilung im Zyklon mit Schlitzeinlauf zeigt in den ersten drei Simulationen eine gute Symmetrie. Aber wenn die Eintrittsgeschwindigkeit auf 20 m/s ansteigt, weist der Rankine-Wirbel in Kegel eine offensichtliche Verschiebung auf. Aufgrund der Verschiebung des Rankine-Wirbels können Partikel, die sich ursprünglich nach unten bewegen, von der Aufwärtsströmung erfasst werden. Der Kurzschluss in der Nähe des Einlasses des Auspuffrohrs wird ebenfalls starker. Diese Phänomene sind nicht günstig für den Abscheidegrad.

Im Zyklon mit Rohreinlauf ist die Verteilung stabil, aber bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s gibt es eine leichte Schwankung im Kegel.

Eine ausgezeichnete Stabilität und Symmetrie in allen vier Simulationen gibt es im Zyklon mit Spiraleinlauf und es gibt keine Schwankung des Wirbels.

Die Verteilung im Zyklon mit Wendeleinlauf weist in allen Simulationen eine offensichtliche Asymmetrie und Instabilität auf. Die Asymmetrie ändert sich auch bei einer Geschwindigkeitssteigerung nicht und die Schwankung von Rankine-Wirbel im Kegel ändert sich ebenfalls nicht.

Beim Vergleich dieser vier Strukturen ist festgestellt, dass die Gesamtgeschwindigkeit von Zyklon mit Spiraleinlauf in den ersten drei Simulationen am höchsten ist. Wenn jedoch die Eintrittsgeschwindigkeit 20 m/s erreicht, steigt die Gesamtgeschwindigkeit von Zyklon mit Schlitzeinlauf stark an. Der Kurzschluss dieser beiden Strukturen ist ebenfalls am offensichtlichsten. Die Gesamtgeschwindigkeit von Zyklon mit Wendeleinlauf ist die niedrigste in allen Simulationen, und der Kurzschluss ist nicht gleichzeitig offensichtlich.

Die maximale Geschwindigkeit im Zyklon ist größer als die Eintrittsgeschwindigkeit und wenn sich die Einlaufstruktur ändert ist auch die höchste Geschwindigkeit unterschiedlich. Trotzdem kann durch einen Vergleich der Änderungen der Luftgeschwindigkeit jeder Simulation ermittelt werden, dass die Erhöhung der Eintrittsgeschwindigkeit kaum Einfluss auf die Änderung des Verhältnisses von der Verteilung der Gesamtgeschwindigkeit im Zyklon hat. Ebenfalls ändert sich in jeder Simulation die Geschwindigkeit im Zyklon in axialer Richtung nicht wesentlich, wenn keine Schwankung des Wirbels vorliegt.

Die dreidimensionale starke Wirbelströmung innerhalb des Zyklones ist sehr komplex und die Geschwindigkeit der Strömung kann an jedem Punkt in senkrecht zueinanderstehende Tangentialgeschwindigkeit, Axialgeschwindigkeit und Radialgeschwindigkeit zerlegt werden. Durch die Untersuchung der drei Geschwindigkeiten können die Eigenschaften der Strömung erhalten werden.

6.2 Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit

Nachdem der Luftstrom in den Zyklonabscheider eingetreten ist, wird die lineare Bewegung in eine tangentielle Bewegung geändert. Deswegen ist die Tangentialgeschwindigkeit am größten in den drei Komponenten der Gesamtgeschwindigkeit. Gleichzeitig spielt die Tangentialgeschwindigkeit der Strömung eine entscheidende Rolle im ganzen Prozess der Staubentfernung. Die Richtung, die Größe und die Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit beeinflussen die Leistung des Zyklons stark. Die tangentiale Strömung treibt die Partikel dazu, sich mit hoher Geschwindigkeit zu drehen, und die Partikel werden durch die Zentrifugalkraft abgeschieden. Die Tangentialgeschwindigkeit wirkt sich direkt auf den Abscheidegrad aus. Je größer die Tangentialgeschwindigkeit ist, desto stärker ist die Zentrifugalkraft und desto höher ist der Abscheidegrad.

Die Tangentialgeschwindigkeit in Zyklon mit unterschiedlicher Einlaufstruktur ist unterschiedlich und trotzdem ist die Regelmäßigkeit der Verteilung fast gleich, siehe **Abbildung 6.3**.

Die Tangentialgeschwindigkeit ist in zwei Teile unterteilt. Die Richtung zeigt auf der linken Seite der Achse nach innen und auf der rechten Seite der Achse nach außen.

Die Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit im Zylinder mit Schlitzeinlauf zeigt, trotz der unterschiedlichen Simulationsgeschwindigkeit, eine gute Symmetrie. Der Luftstrom ist stabil und der Wirbelkern befindet sich in der Mitte des Zyklons. Der Wirbel im Kegel schwankt. Die Strömung verschiebt sich an der Spitze des Kegels und dieses Phänomen ist bei 20 m/s am offensichtlichsten.

Die Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit im Zyklon mit Rohreinlauf ist fast gleich wie bei jenem mit Schlitzeinlauf. Aber die Schwankung des Wirbels ist kleiner und ist demzufolge stabiler.

Die Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit im Zyklon mit Spiraleinlauf hat in jeder Simulation eine gute Stabilität und Symmetrie gezeigt, ob im Zylinder oder Kegel.

Die Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit im Zyklon mit Wendeleinlauf ist in Zylinder extrem instabil und asymmetrisch. Die Achse des Wirbels wird nach links verschoben und der Wirbel wird instabil. Die Schwankung des Wirbels im Kegel wird weiter erweitert. Gleichzeitig verschlechtert sich die Stabilität des Luftstroms mit zunehmender Eintrittsgeschwindigkeit.

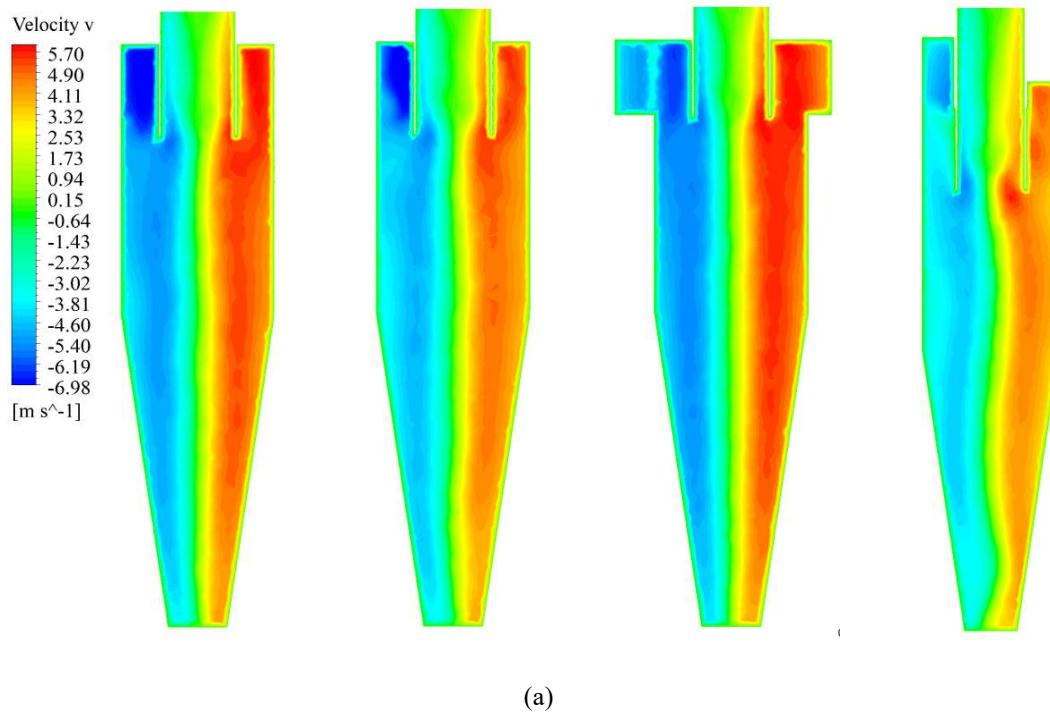


Abbildung 6.3: Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitz-
einlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (a) bei 5 m/s

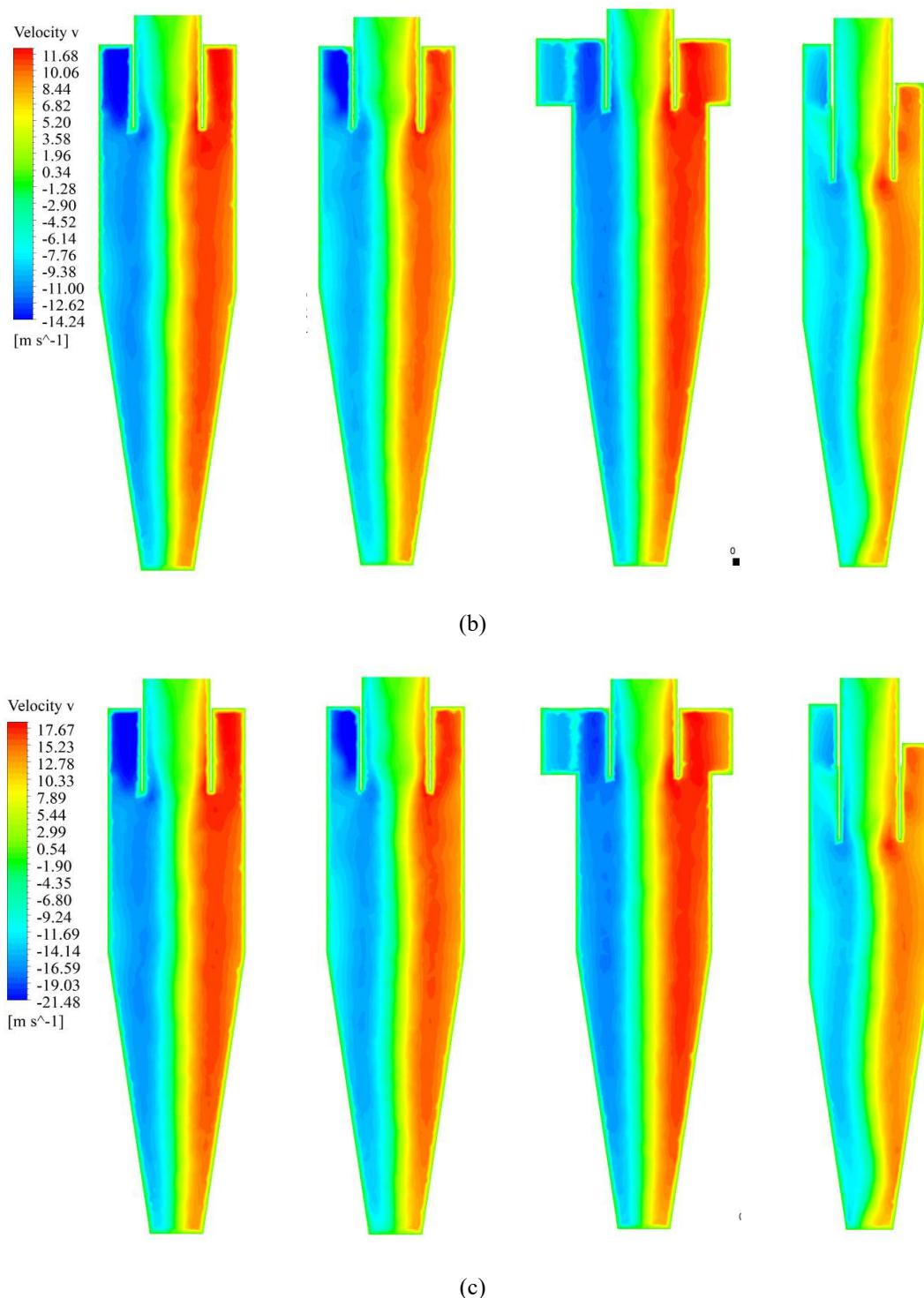


Abbildung 6.3 (Fortsetzung): Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (b) bei 10 m/s (c) bei 15 m/s

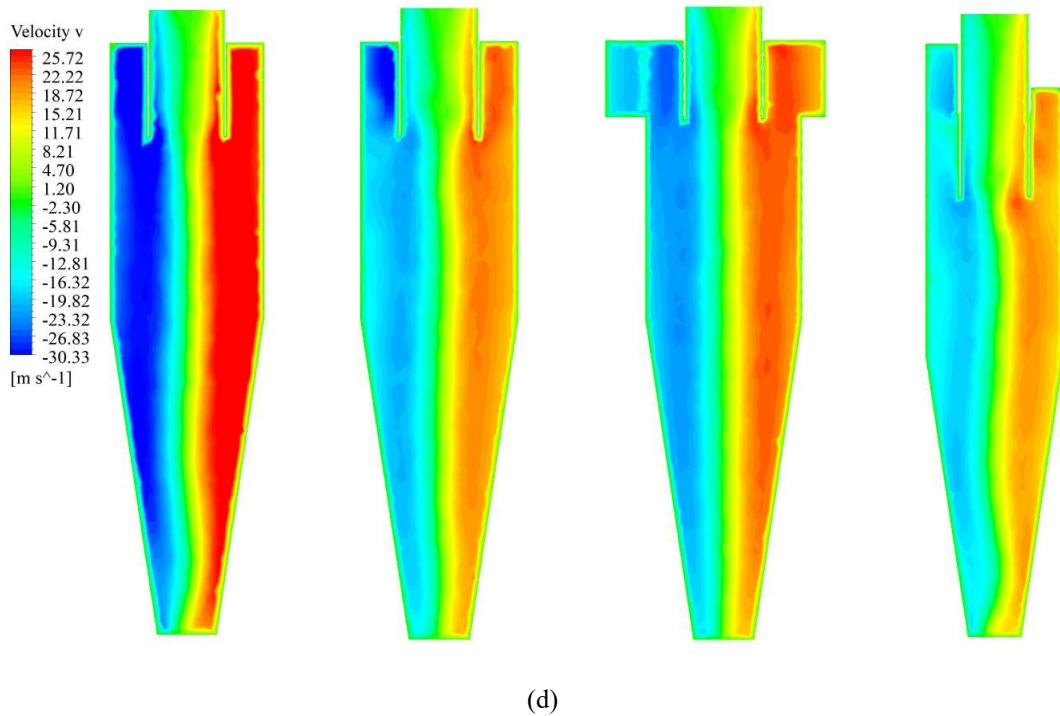


Abbildung 6.3 (Fortsetzung): Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (d) bei 20 m/s

Um die Änderung der Tangentialgeschwindigkeit im Zyklonabscheider genauer zu analysieren, werden drei Positionen im Zyklon ausgewählt. Bei diesen drei Positionen werden alle ein Millimeter ein Messpunkt ausgewählt. Diese drei Positionen sind die Mitte des Zylinders, die Mitte des Kegels und die Verbindung zwischen dem Zylinder und dem Kegel. Weil die Änderung der Eintrittsgeschwindigkeit wenig Einfluss auf das Verteilungsgesetz der Tangentialgeschwindigkeit hat, werden die Simulationsergebnisse bei Eintrittsgeschwindigkeit von 10 m/s zum Vergleich ausgewählt, siehe Abbildung 6.4. Darin ist die X-Achse die Position des Punktes und die Y-Achse der absolute Wert der Tangentialgeschwindigkeit.

Es ist deutlich ersichtlich, dass sich die Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit entlang der axialen Richtung nur geringfügig ändert. Der allgemeine Trend zeigt eine buckelförmige Verteilung und weist eine gute Symmetrie auf. Auf beiden Seiten der Achse befindet sich eine Position mit maximaler Tangentialgeschwindigkeit. Wird die Position im Kegel nach unten bewegt, bewegt sich der Spitzenpunkts der Geschwindigkeit allmählich näher an die Achse heran.

Der Punkt der maximalen Tangentialgeschwindigkeit kann ungefähr eine zylindrische Ebene bilden. Diese Ebene überlappt sich im Wesentlichen mit der CS-Ebene. Diese Ebene teilt die Tangentialgeschwindigkeit in zwei Bereiche. Der erzwungene Wirbel, der sich nach oben bewegt, ist darin und außerhalb ist der freie Wirbel, der sich nach unten bewegt.

Im Bereich des erzwungenen Wirbels nimmt die Tangentialgeschwindigkeit mit zunehmendem Radius zu. Diese Änderung hilft den Partikeln, die in der Abwärtsströmung nicht getrennt werden können, während der Aufwärtsströmung in den externen freien Wirbel geworfen zu werden, um eine erneute Trennung zu erreichen. Im freien Wirbel nimmt die Tangentialgeschwindigkeit mit zunehmendem Radius allmählich ab. Wenn der Wirbel die Wand erreicht, wird die Geschwindigkeit Null. Eine solche Verteilung verursacht, wenn sich die Luft näher an der Wand befindet, ist die Tragfähigkeit von dem Partikel schwächer. Was ist günstig, die kinetische Energie der Partikel zu reduzieren und zum Abscheidegrad verbessern.

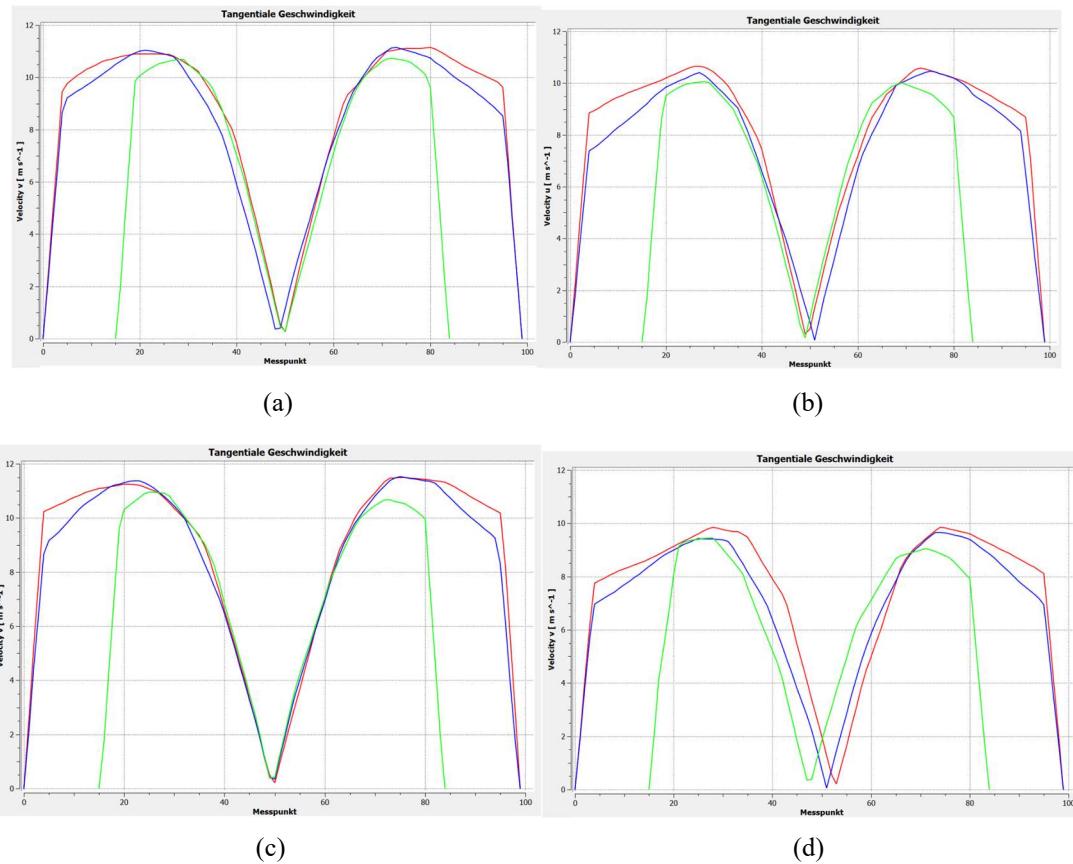


Abbildung 6.4: Tangentialer Geschwindigkeitsverlauf bei Eintrittsgeschwindigkeit von 10 m/s; (a) Zyklon mit Schlitzeinlauf; (b) Zyklon mit Rohreinlauf; (c) Zyklon mit Spiraleinlauf; (d) Zyklon mit Wendeleinlauf; Rot: die Mitte des Zylinders, Blau: Verbindung zwischen Zylinder und Kegel; Grün: die Mitte des Kegels

6.3 Verteilung der Axialgeschwindigkeit

Aus der **Abbildung 6.5** ist deutlich ersichtlich, dass die Axialgeschwindigkeit auch eine offensichtliche Axialsymmetrie zeigt. Dabei ist ersichtlich, dass die Axialgeschwindigkeit kleiner ist als die Tangentialgeschwindigkeit. Die Axialgeschwindigkeit auf der imaginären CS-Ebene ist Null. Die Axialgeschwindigkeit ist an der Außenseite der CS-Ebene nach unten und an der Innenseite nach oben gerichtet. Die Abwärtsströmung in der Nähe der Wand spielt eine sehr wichtige Rolle bei der Partikelabscheidung. Diese Strömung kann Partikel zum Staubauspuffrohr am Boden transportieren. Weil die Axialgeschwindigkeit der Abwärtsströmung viel größer als die Schwerkraft der Partikel ist, kann der Zyklonabscheider auch bei horizontaler Platzierung effektiv arbeiten.

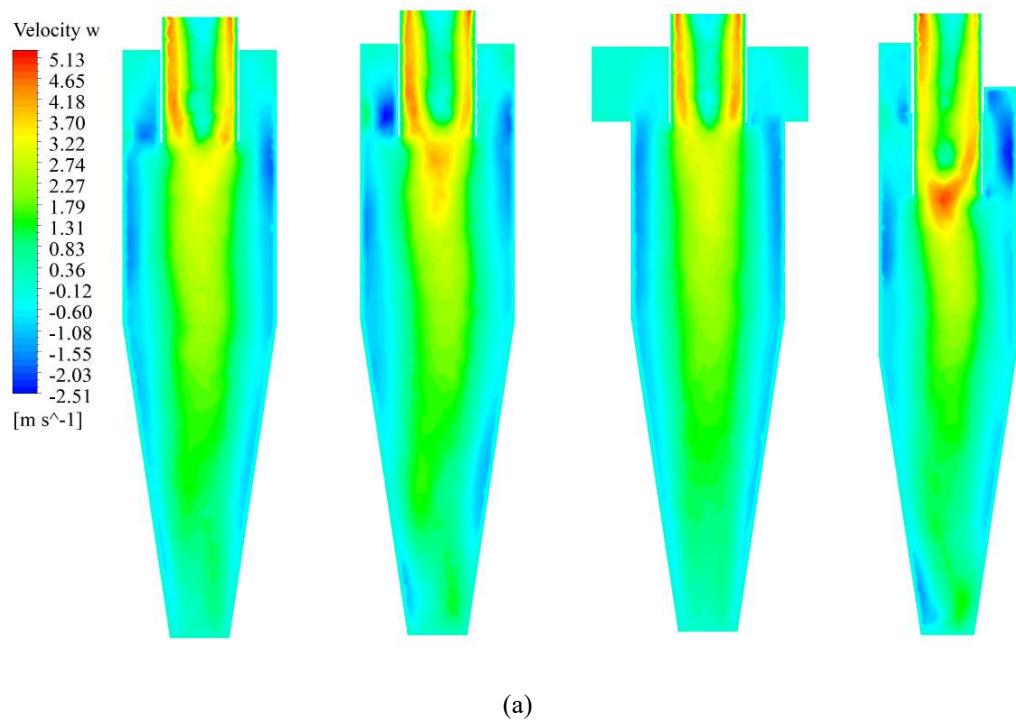
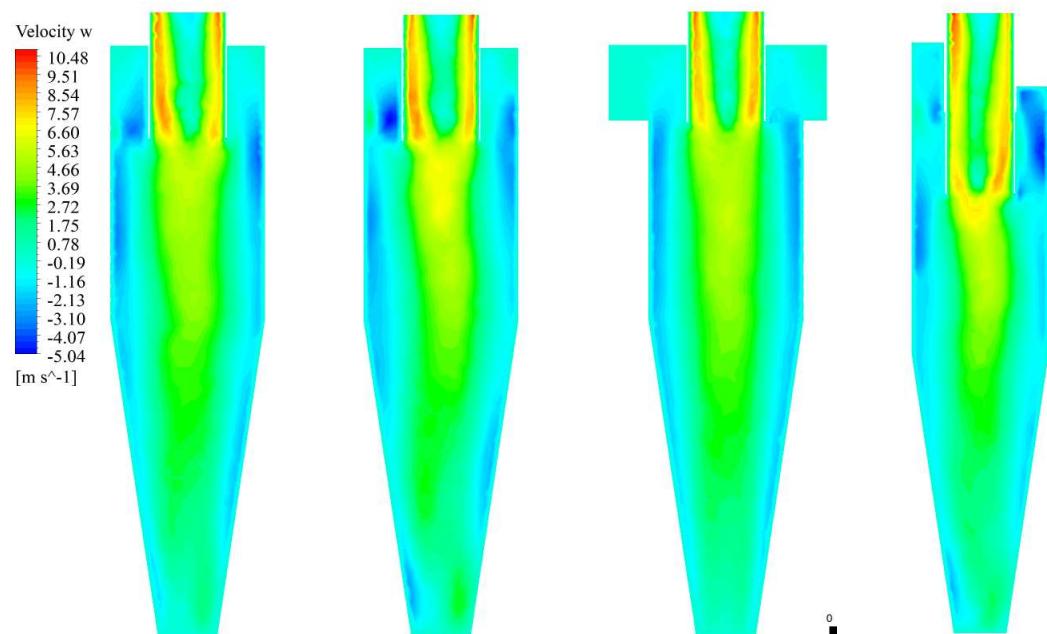
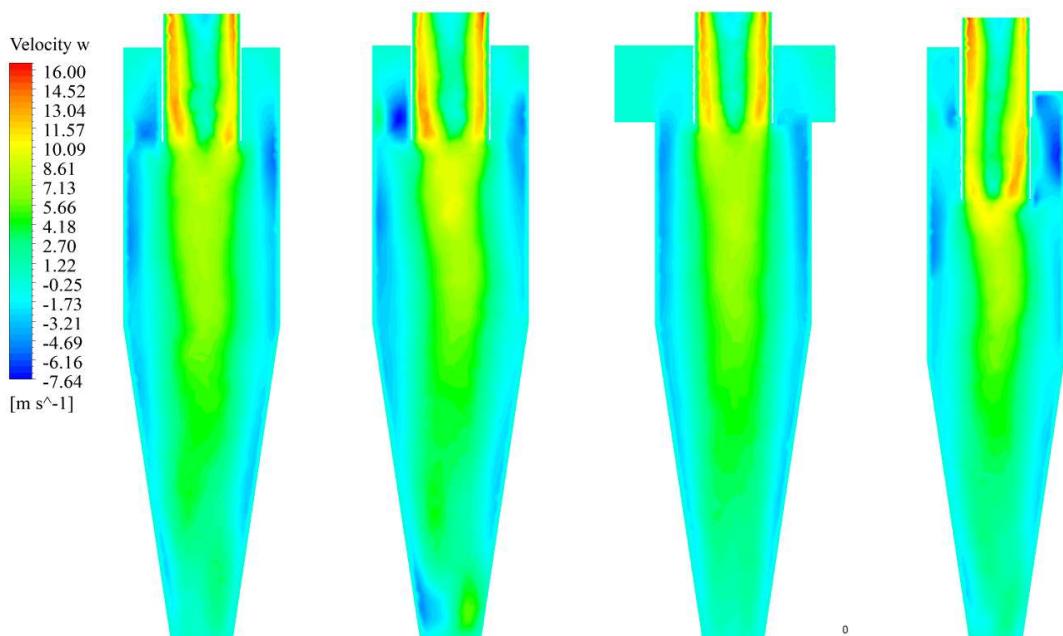


Abbildung 6.5: Verteilung der Axialgeschwindigkeit, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (a) bei 5 m/s



(b)



(c)

Abbildung 6.5 (Fortsetzung): Verteilung der Axialgeschwindigkeit, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (b) bei 10 m/s (c) bei 15 m/s

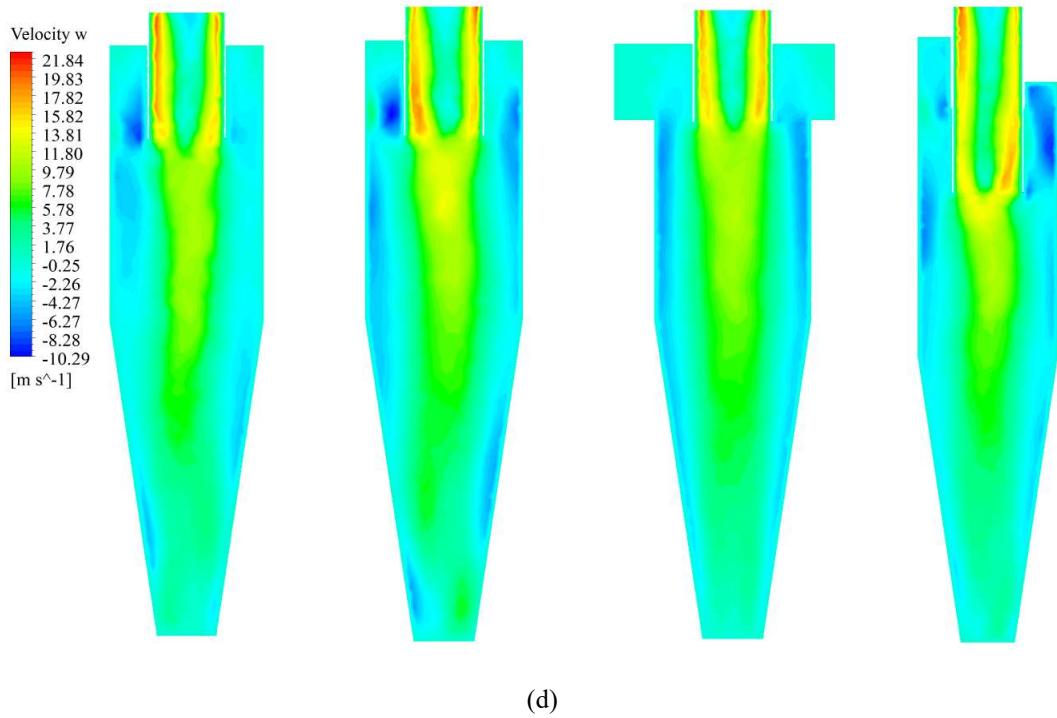


Abbildung 6.5 (Fortsetzung): Verteilung der Axialgeschwindigkeit, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (b) bei 20 m/s

Die maximale Axialgeschwindigkeit liegt in der Mitte des Bereichs der Aufwärtsströmung. Die Größe der Geschwindigkeit nimmt mit zunehmendem Radius ab. Die Axialgeschwindigkeit in der Abwärtsströmung nimmt mit dem Radius zu und fällt schnell auf Null ab, wenn sie die Wand erreicht. Die Axialgeschwindigkeit der Abwärtsströmung ändert sich in axialer Richtung nicht wesentlich. Aber in der Aufwärtsströmung wird ein zunehmender Trend von unten nach oben in axialer Richtung gezeigt. Dieser Trend setzt sich bis zum Eingangsbereich des Auspuffrohrs fort. Der Durchmesser der CS-Ebene im Zylinder ist größer als der Durchmesser des Auspuffrohrs, so dass die Aufwärtsströmung eine Kontraktion hat, wenn sie sich zum Eingang des Auspuffrohrs bewegt. Deswegen tritt ein plötzlicher Anstieg der Axialgeschwindigkeit in der Nähe dieses Bereiches auf. Dieses Phänomen zeigt auch, dass der Luftstrom nahe dem Eingang des Auspuffrohrs stark ist und ein Kurzschluss, welche für die Partikelabscheidung sehr ungünstig sind, erzeugt wird. Die Axialgeschwindigkeit in dem Auspuffrohr nimmt erheblich ab, der Mindestgeschwindigkeitswert liegt nahe Null und einige Bereiche weisen negative Werte auf, die zu Stagnation oder Rückfluss führen.

Im Zyklon mit Schlitzeinlauf verschlechtern sich die Stabilität und Symmetrie von Aufwärtsströmung allmählich, wenn die Eintrittsgeschwindigkeit zunimmt.

Der interne Wirbel im Zyklon mit Rohreinlauf hat eine signifikante Linksverschiebung im Kegel. Am Boden des Kegels existiert eine Aufwärtsströmung mit hoher Geschwindigkeit in der Nähe der Wand. Dies

kann die Partikel, die sich ursprünglich nach unten bewegt, in den Aufwärtsstrom bringen. Dadurch wird der Abscheidegrad reduziert.

Die Verteilung von Axialgeschwindigkeit im Zyklon mit Spiraleinlauf behält immer noch eine gute Symmetrie und Stabilität bei, und ändert sich aufgrund der Steigerung von Eintrittsgeschwindigkeit nicht.

Die Aufwärtsströmung im Zyklon mit Wendeleinlauf hat in jeder Simulation eine Verschiebung im Zylinder oder Kegel. Der Bereich der Aufwärtsströmung am Boden ist ebenfalls größer. Dieses Phänomen verringert den Abscheidegrad.

6.4 Verteilung der Radialgeschwindigkeit

Die Radialgeschwindigkeit innerhalb des Zylkones ist viel kleiner als die Tangentialgeschwindigkeit und die Axialgeschwindigkeit. Der Grund liegt daran, dass der radiale Bewegungsabstand des Luftstroms kürzer ist. Trotzdem beeinflusst die Radialgeschwindigkeit auch den Abscheidegrad.

Aus der **Abbildung 6.6** ist ersichtlich, dass die Verteilung der Radialgeschwindigkeit sehr ungleichmäßig ist. Es ist jedoch in jeder Simulation offensichtlich, dass es am Eingang des Auspuffrohrs einen Bereich mit großen Geschwindigkeitsänderungen gibt. Das erzeugt einen offensichtlichen Kurzschluss. Ein Teil des partikelhaltigen Luftstroms strömt direkt von unterhalb des Auspuffrohrs aus und der Abscheidegrad wird dadurch reduziert.

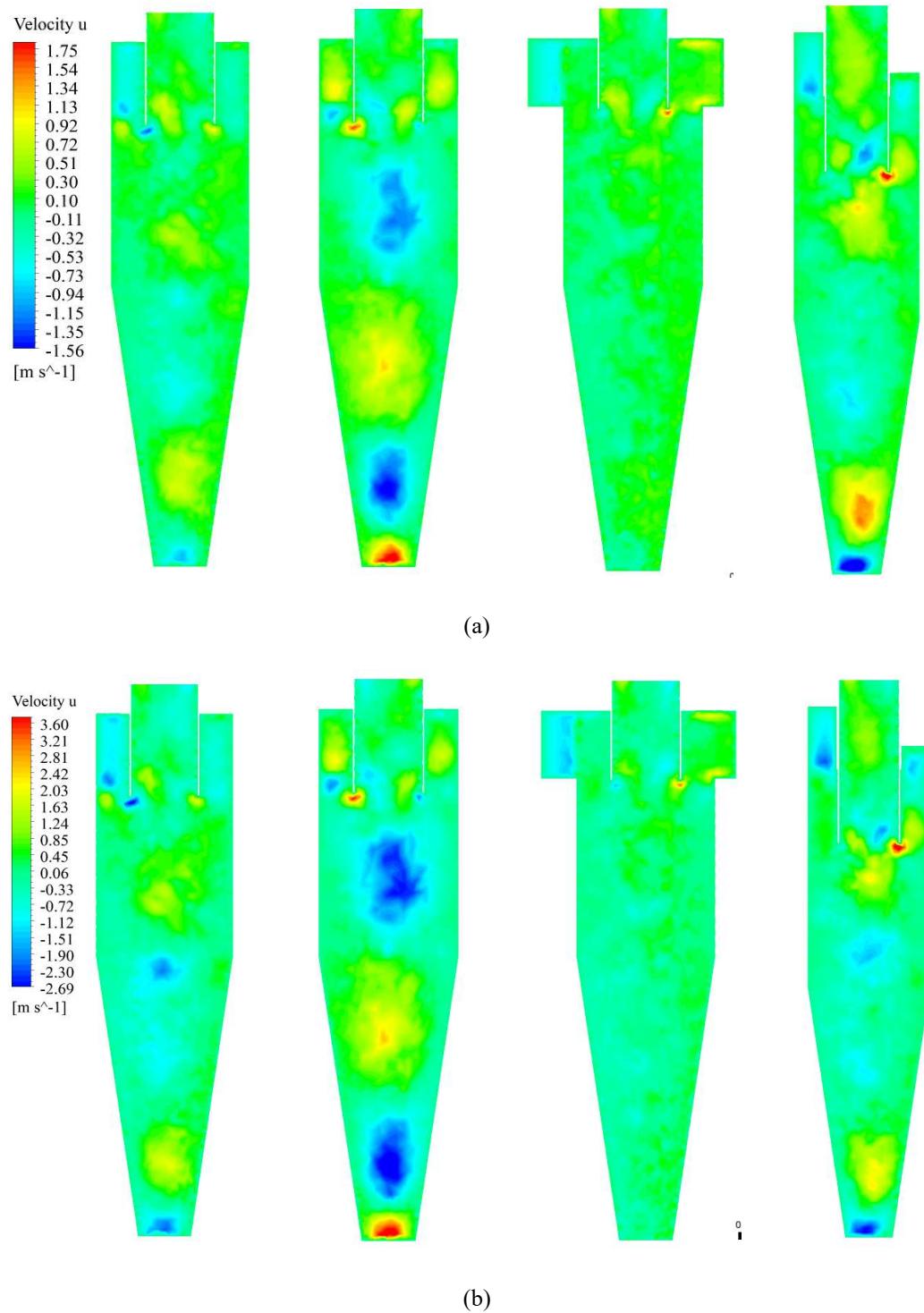


Abbildung 6.6: Verteilung der Radialgeschwindigkeit, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzelauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (a) bei 5 m/s; (b) bei 10 m/s

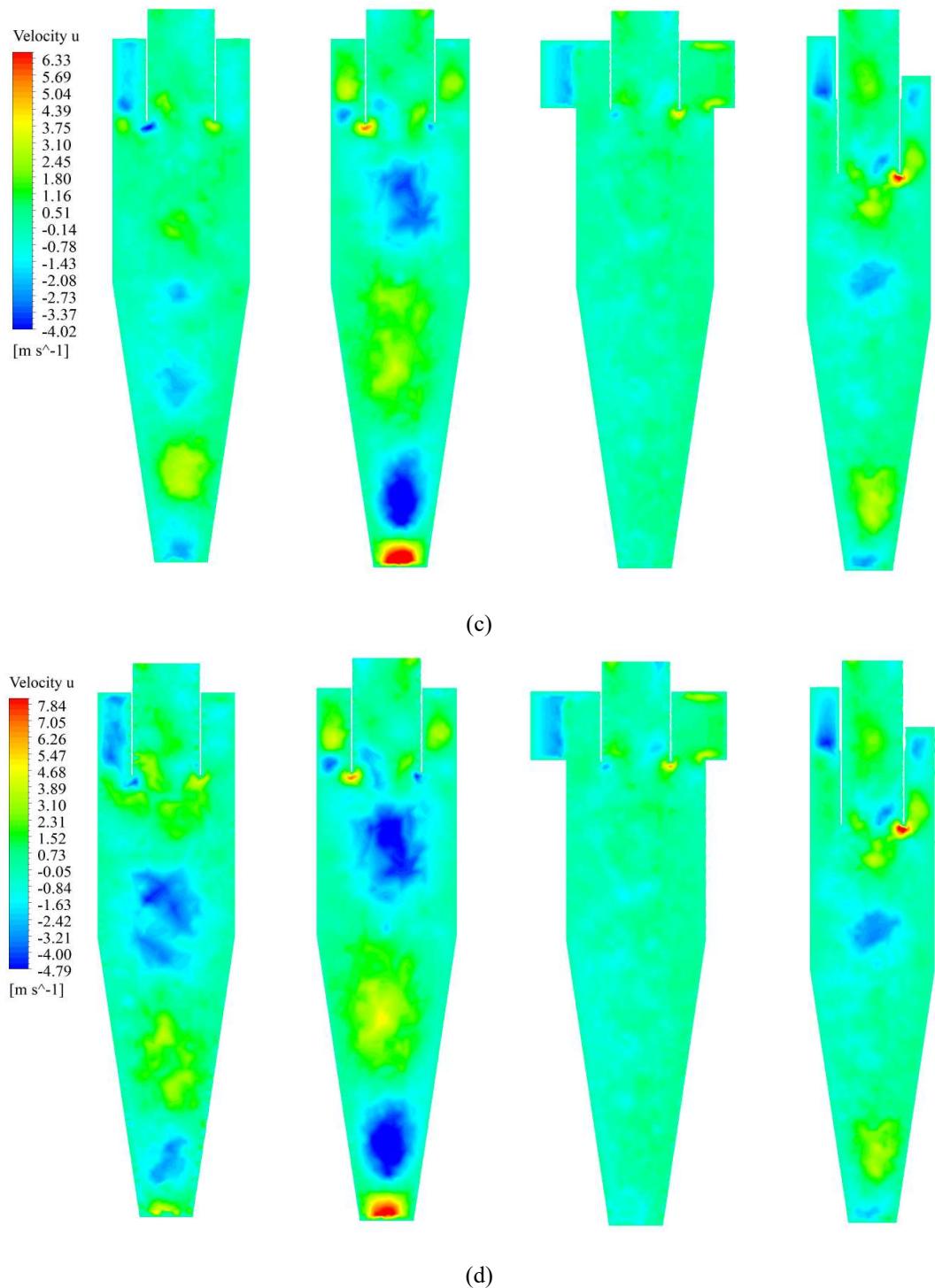


Abbildung 6.6 (Fortsetzung): Verteilung der Radialgeschwindigkeit, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (c) bei 15 m/s; (d) bei 20 m/s

Die Verteilung von Radialgeschwindigkeit hat keine Symmetrie und Regelmäßigkeit wie die Tangentialgeschwindigkeit und der Axialgeschwindigkeit. Die Verteilung der Radialgeschwindigkeiten ist komplizierter und wechselt entlang der axialen und radialen Richtung zwischen positiven und negativen Werten. Dieses Phänomen ist in der Aufwärtsströmung am offensichtlichsten. Gleichzeitig gibt es in Simulationen Bereiche am Boden des Kegels, in denen die Radialgeschwindigkeit sehr groß ist. Dies führt dazu, dass die Partikel in die Aufwärtsströmung gebracht werden, wodurch der Abscheidegrad verringert wird.

Im Zyklon mit Schlitzeinlauf tritt der Bereich mit hoher Radialgeschwindigkeit am Boden, aber die Fläche davon ist nicht groß. Wenn sich die Eintrittsgeschwindigkeit erhöht, ändert sich die Radialgeschwindigkeit in der Aufwärtsströmung unregelmäßig.

Im Zyklon mit Rohreinlauf ist die Änderung von Radialgeschwindigkeit in der Aufwärtsströmung größer als im Zyklon mit Schlitzeinlauf. Es ist offensichtlich, dass die Radialgeschwindigkeit in der Mitte zwischen positiv und negativ wechselt. Gleichzeitig ist die Fläche des Bereichs, der sich ungünstig für den Abseidegrad ist, in allen Strukturen am größten. Der Kurzschluss bei dieser Struktur ist reduziert.

Die Radialgeschwindigkeit im Zyklon mit Spiraleinlauf hat nur geringe Änderung in axialer oder radialer Richtung. Es gibt keinen Bereich mit hoher Radialgeschwindigkeit am Boden des Kegels. Aber der Kurzschluss ist stark.

Im Zylinder des Zylkons mit Wendeleinlauf ändert sich die Radialgeschwindigkeit wenig, aber mit zunehmender Eintrittsgeschwindigkeit nimmt die Änderung zu. Der Bereich mit hoher Radialgeschwindigkeit existiert, und die Fläche des Bereichs nimmt mit zunehmender Eintrittsgeschwindigkeit ab. Der Kurzschluss ist erheblich dabei verringert.

6.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird die Bewegung des Luftstromes von vier Zyklen bei vier verschiedenen Eintrittsgeschwindigkeiten simuliert. Gleichzeitig wird die Gesamtgeschwindigkeit des Luftstroms in drei Teilgeschwindigkeiten zur Analyse und zum Vergleich unterteilt. Die Folgerungen sind:

1. Im Zyklon befindet sich ein doppelschichtiger Wirbel. Mit der CS-Ebene als Grenzfläche ist an der Außenseite ein nach unten rotierender Wirbel und in der Mitte ein nach oben rotierender Wirbel. Sie drehen sich in die gleiche Richtung und zeigen eine typische zweischichtige Rankine-Wirbelstruktur. Die Tangentialgeschwindigkeit ist am größten auf der CS-Ebene und die Axialgeschwindigkeit ist am kleinsten.
-

2. Die Tangentialgeschwindigkeit spielt im Zyklonabscheider eine wichtige Rolle und beeinflusst direkt den Abscheidegrad. Ein erzwungener Wirbel ist in der Mitte und ein freier Wirbel an der Außenseite. Der Zyklon mit Spiraleinlauf zeigt eine gute Symmetrie und Stabilität bei der Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit. Er ist günstig für die Erhöhung des Abscheidegrades. Die Verteilung im Zyklon mit Rohreinlauf ist stabiler als mit Schlitzeinlauf. Im Zyklon mit Wendeleinlauf schwankt die Verteilung stark und die Symmetrie ist sehr schlecht.

3. Die Axialgeschwindigkeit im Zyklon ist grundsätzlich achsensymmetrisch. Der Trend von Änderung ist entlang der axialen Richtung gleich. Die Axialgeschwindigkeit im Bereich von Abwärtsströmung nimmt mit zunehmendem Radius allmählich ab, und ist am größten in der Mitte der Aufwärtsströmung. In der Nähe des Eingangs des Auspuffrohrs ändert sich die Geschwindigkeit stark aufgrund der Kontraktion der Aufwärtsströmung, so dass ein Kurzschluss entsteht. Die Verteilung von Axialgeschwindigkeiten im Zyklon mit Spiraleinlauf ist immer noch sehr stabil und die Symmetrie ist auch gegeben. Im Zyklon mit Rohreinlauf und Schlitzeinlauf schwankt die Verteilung im Aufwärtsströmung. Die Amplitude der Schwankung ist mit Wendeleinlauf größer und der Kurzschluss ist auch offensichtlicher.

4. Die Radialgeschwindigkeit ist sehr klein und die Verteilung ist ungleichmäßig. Trotzdem kann die Verteilung der Radialgeschwindigkeit den Kurzschluss und die Geschwindigkeitsänderung am Boden des Kegels ausführlich anzeigen. Im Zyklon mit Wendeleinlauf ist die Fläche des Kurzschlusses die kleinste und die größte im Zyklon mit Schlitzeinlauf. Am Boden des Kegels befindet sich ein Bereich, der den Abscheidegrad nicht förderlich ist und in dem die Radialgeschwindigkeit das Maximum erreicht. Dieses Phänomen ist das stärkste bei Rohreinlauf. Und die Fläche dieses Bereichs ist auch dabei die größte. Bei Spiraleinlauf tritt dieses Phänomen nicht auf.

7 Verteilung des Drucks im Zyklon

Die Druckverteilung im Zyklon wirkt sich auf die Bewegung des Luftstromes aus, so dass der Abscheidegrad dadurch beeinflusst wird. Deswegen ist es notwendig, die Druckverteilung zu analysieren.

7.1 Verteilung des statischen Drucks

Die Verteilung des statischen Drucks ist unter verschiedenen Simulationsbedingungen unterschiedlich, aber es gibt gemeinsame Gesetze, siehe **Abbildung 7.1**.

In der **Abbildung 7.1** weist der statische Druck im Strömungsfeld eine regelmäßige achsensymmetrische Verteilung auf. Grundsätzlich ändert sich der statische Druck in axialer Richtung nicht. In radialer Richtung nimmt der statische Druck jedoch von außen nach innen ab und erreicht an der Achse das Minimum. Der statische Druck in der Aufwärtsströmung ist viel niedriger als in der Abwärtsströmung und es gibt sogar einen Unterdruckbereich in der Mitte des Wirbels. Der Bereich des Niederdrucks im Auspuffrohr kann einen Kurzschluss verursachen und der Bereich am Ende des Kegels kann dazu führen, dass Partikel in Aufwärtsstrom eintreten. Wenn der Kegel und das Staubauslassrohr nicht dicht verbunden sind, wird auch die externe Luft in den Zyklonabscheider gesaugt. Dann wird der normale Fluss innerhalb des Zylkons unterbrochen. Diese Phänomene sind ungünstig für die Abscheidung von Partikeln.

Die Symmetrie der Verteilung des statischen Drucks wird im Zyklon mit Schlitzeinlauf mit zunehmender Eintrittsgeschwindigkeit allmählich schlechter. Gleichzeitig vergrößert sich die Fläche des Bereiches des Unterdrucks im erzwungenen Wirbel deutlich. Wenn die Geschwindigkeit auf 20 m/s steigt, nimmt der Bereich des Hochdruckbereichs stark zu.

Im Zyklon mit Rohreinlauf hat die Verteilung zwischen den vier Simulationen keinen signifikanten Unterschied und wenn die Eintrittsgeschwindigkeit 5 m/s beträgt, gibt es nur einen kleinen Unterdruckbereich am Boden des Kegels.

Die Verteilung des statischen Drucks zeigt im Zyklon mit Spiraleinlauf in jeder Simulation eine gute Symmetrie und Stabilität. Ist die Eintrittsgeschwindigkeit hingegen niedrig, so ist der Unterdruckbereich größer als bei anderen Zylkonen. Der Bereich des Hochdrucks ist in der Schnecke konzentriert.

Die Symmetrie der Verteilung des statischen Drucks ist nicht so gut im Zyklon mit Wendeleinlauf. Offensichtliche Schwankung existiert im Niederdruckbereich und die Amplitude der Schwankung wird im Kegel größer. Des Weiteren wird der Unterdruckbereich mit zunehmender Geschwindigkeit größer. Der Bereich des Hochdruckbereichs ist klein.

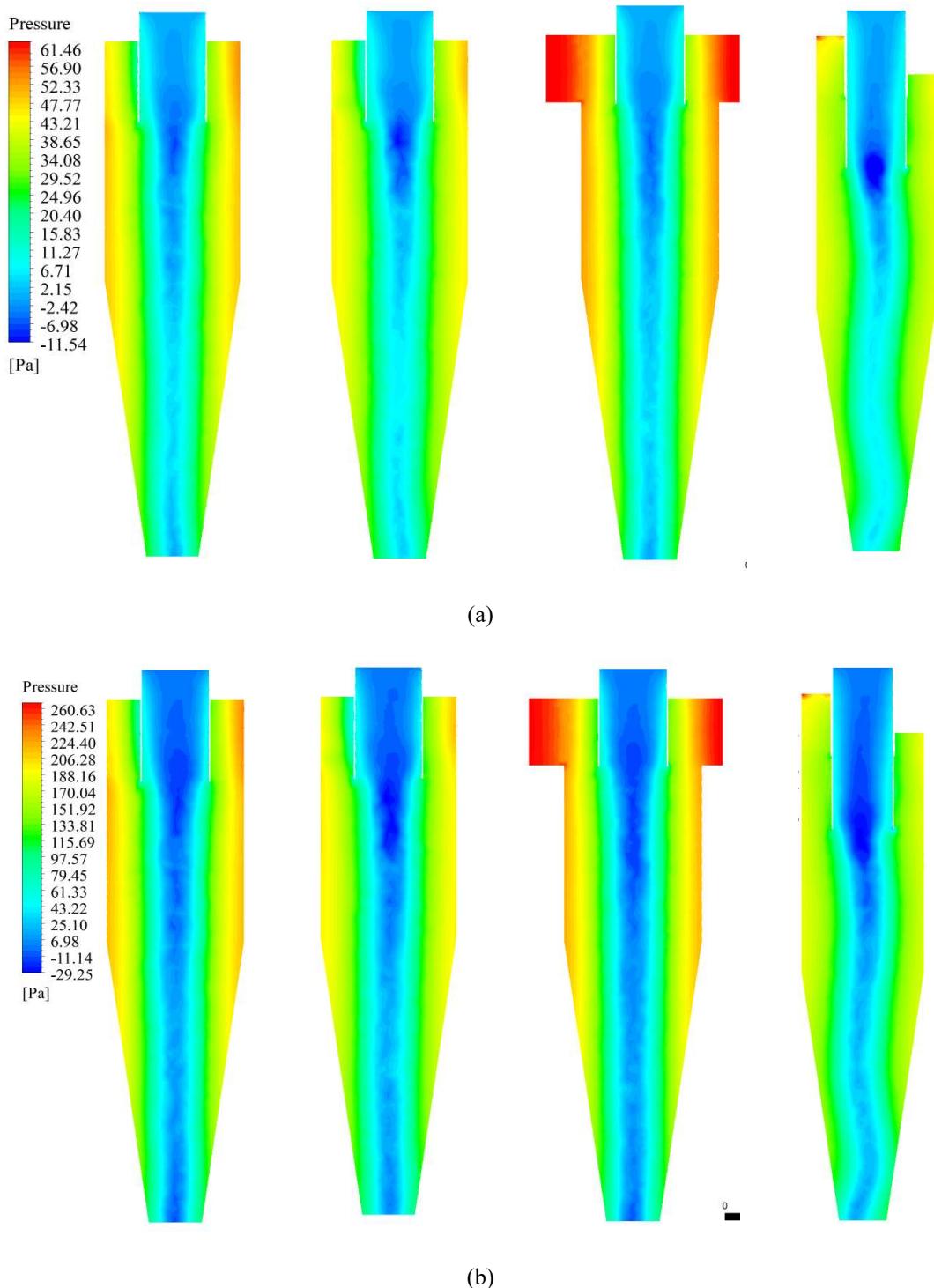


Abbildung 7.1: Verteilung des statischen Drucks, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (a) bei 5 m/s; (b) bei 10 m/s

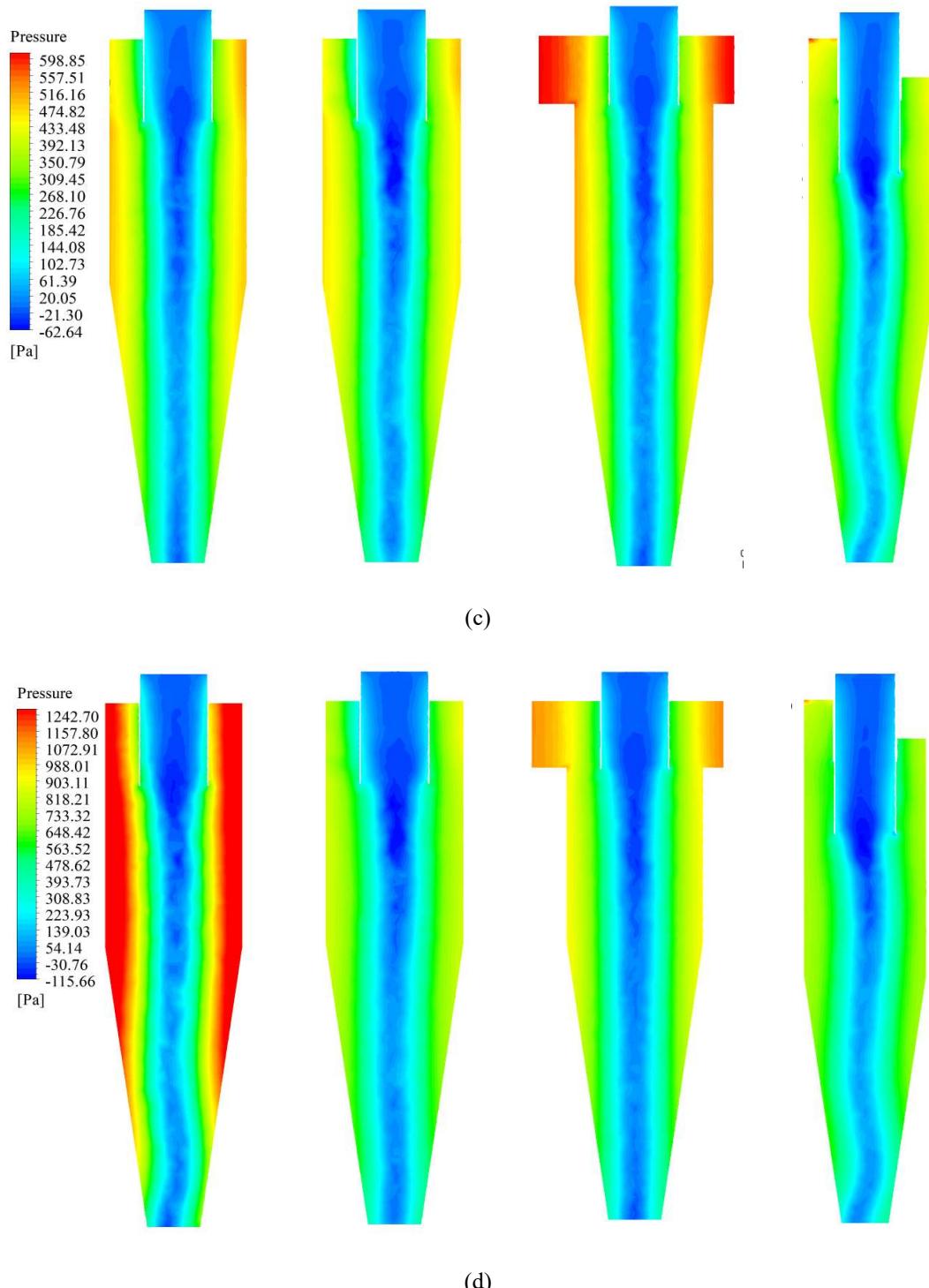


Abbildung 7.1 (Fortsetzung): Verteilung des statischen Drucks, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (c) bei 15 m/s; (d) bei 20 m/s

7.2 Verteilung des dynamischen Drucks

Die Verteilungen des dynamischen Drucks und der Gesamtgeschwindigkeit sind ähnlich, siehe **Abbildung 7.2**.

7.2. Dies liegt daran, dass der dynamische Druck von der Geschwindigkeit der Strömung abhängig ist:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (7.1)$$

P_d Dynamischer Druck

ρ Dichte der Strömung

u Geschwindigkeit der Strömung

In Bereichen mit hoher Geschwindigkeit ist auch der dynamische Druck hoch. Auf der CS-Ebene, wo die Gesamtgeschwindigkeit am größten ist, erreicht der dynamische Druck ebenfalls das Maximum. Der dynamische Druck innerhalb des erzwungenen Wirbels nimmt mit zunehmendem Radius zu. Nach Erreichen der CS-Ebene tritt der dynamische Druck in den Bereich der freien Wirbel und nimmt mit zunehmendem Radius ab. Wenn der erzwungene Wirbel mit dem Auspuffrohr in Kontakt kommt, steigt der dynamische Druck erheblich an.

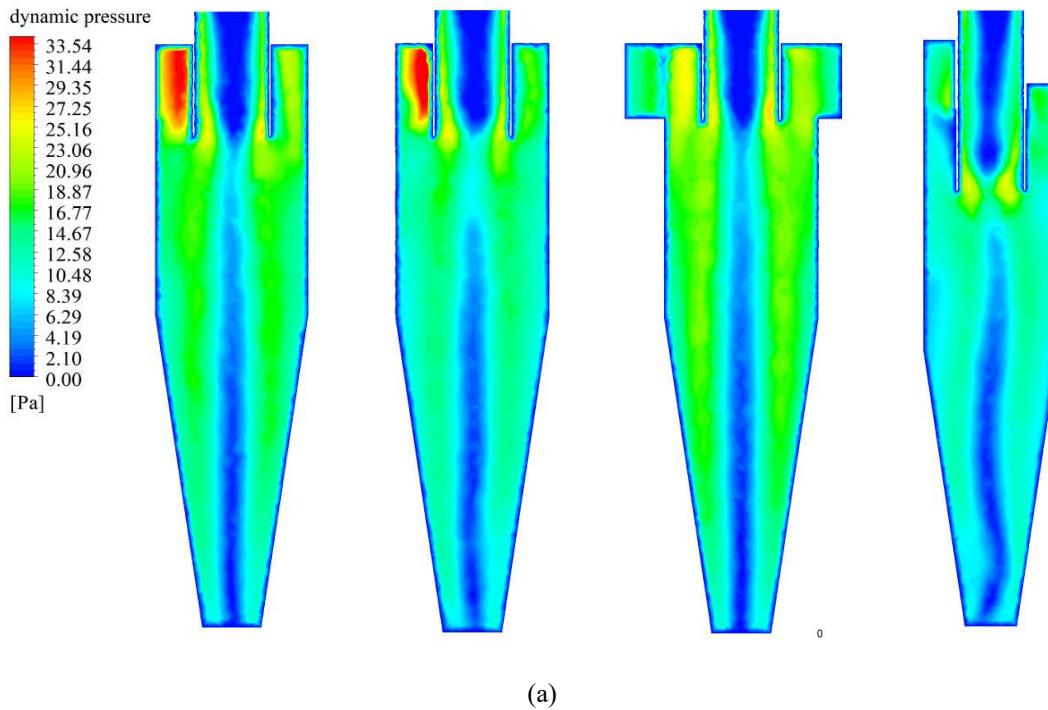


Abbildung 7.2: Verteilung des dynamischen Drucks, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (a) bei 5 m/s

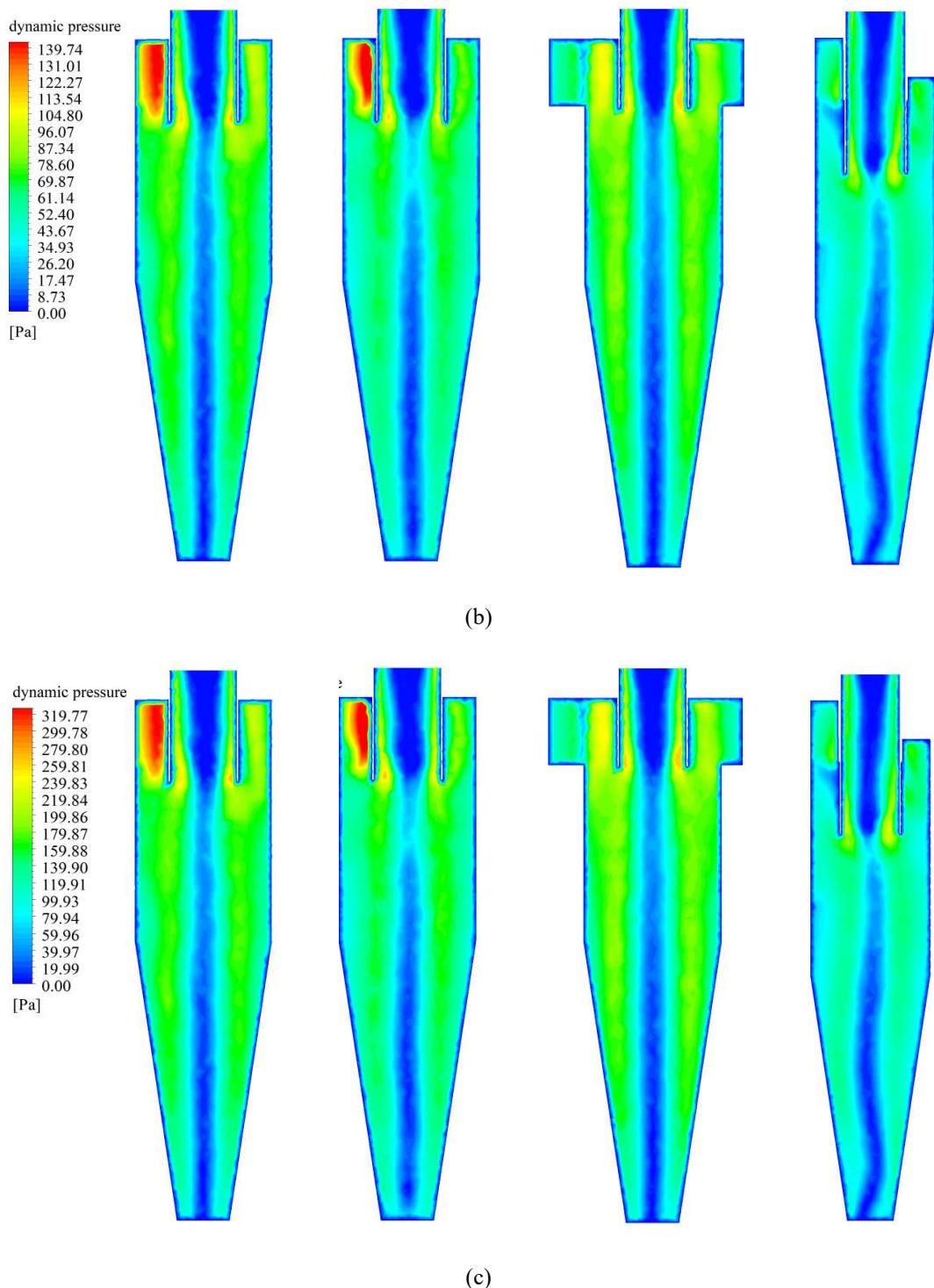


Abbildung 7.2 (Fortsetzung): Verteilung des dynamischen Drucks, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (b) bei 10 m/s; (c) bei 15 m/s

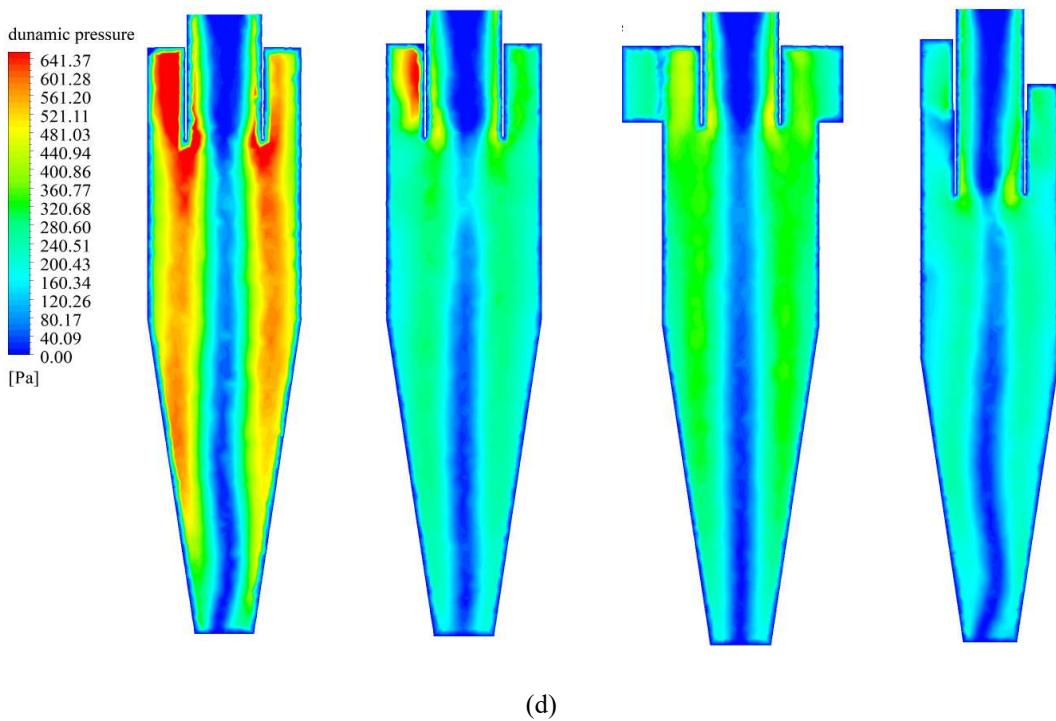


Abbildung 7.2 (Fortsetzung): Verteilung des dynamischen Drucks, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (d) bei 20 m/s

Das Volumen des erzwungenen Wirbels nimmt im Zyklon mit Schlitzeinlauf mit zunehmender Eintrittsgeschwindigkeit zu. Gleichzeitig ändert sich der dynamische Druck in der Nähe des Auspuffrohrs drastischer. Die Symmetrie der dynamischen Druckverteilung wird schlechter, wenn die Eintrittsgeschwindigkeit 20 m/s beträgt.

Die Symmetrie der Verteilung des dynamischen Drucks ändert sich im Zyklon mit Rohreinlauf aufgrund von Geschwindigkeitsänderungen geringfügig. Im Vergleich zu anderen Strukturen ist die Geschwindigkeitsänderung in der Nähe des Auspuffrohrs geringer.

Die Verteilung des dynamischen Drucks weist im Zyklon mit Spiraleinlauf ebenfalls eine gute Symmetrie auf und ändert sich aufgrund der Geschwindigkeitsänderung nicht stark. Trotzdem ist die Geschwindigkeitsänderung in der Nähe des Auspuffrohrs in allen Simulationen offensichtlich.

Im Zyklon mit Wendeleinlauf zeigt die Verteilung eine Asymmetrie und die Schwankung ist im erzwungenen Wirbel offensichtlich. Demgegenüber ist die Geschwindigkeitsänderung in der Nähe des Auspuffrohrs am kleinsten.

7.3 Verteilung des Totaldrucks

Der Totaldruck ist die Summe aus statischem und dynamischem Druck. Die Verteilung des Totaldrucks ist ähnlich der Verteilung des statischen Drucks. Die beiden Verteilungen zeigen eine gute axiale Symmetrie, siehe **Abbildung 7.3**. Der Totaldruck am Einlauf ist maximal und ist an der Achse am Kleinsten. Mit zunehmendem Radius steigt der Totaldruck schnell an, aber ändert sich entlang der axialen Richtung nicht wesentlich.

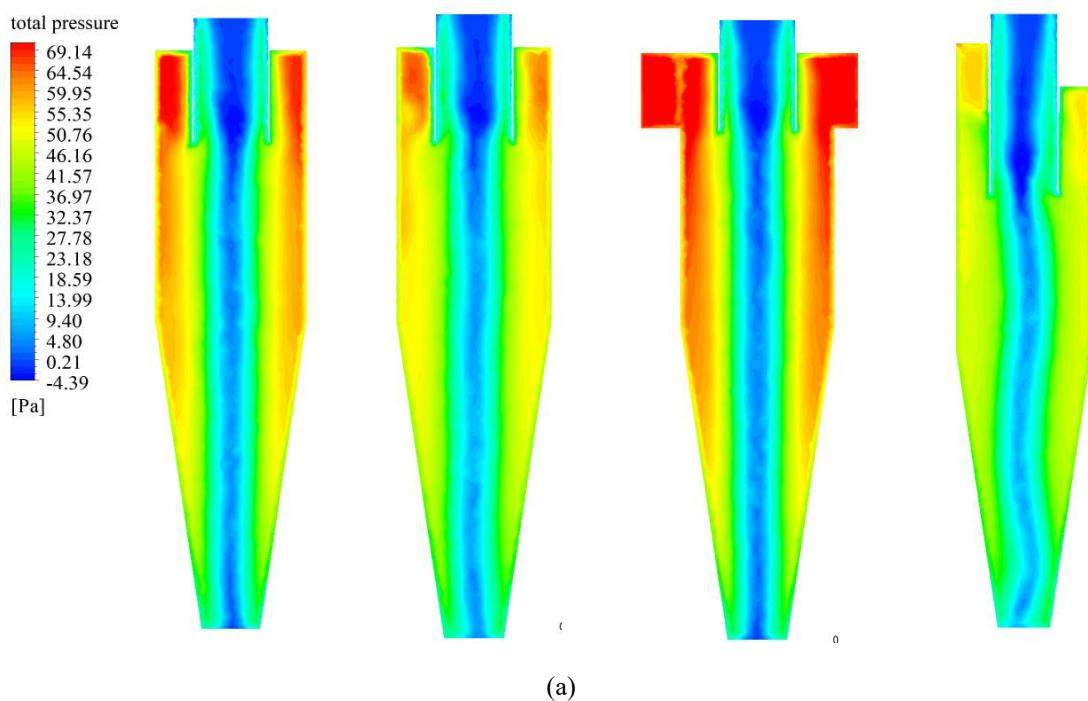


Abbildung 7.3: Verteilung des Totaldrucks, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitzeinlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (a) bei 5 m/s

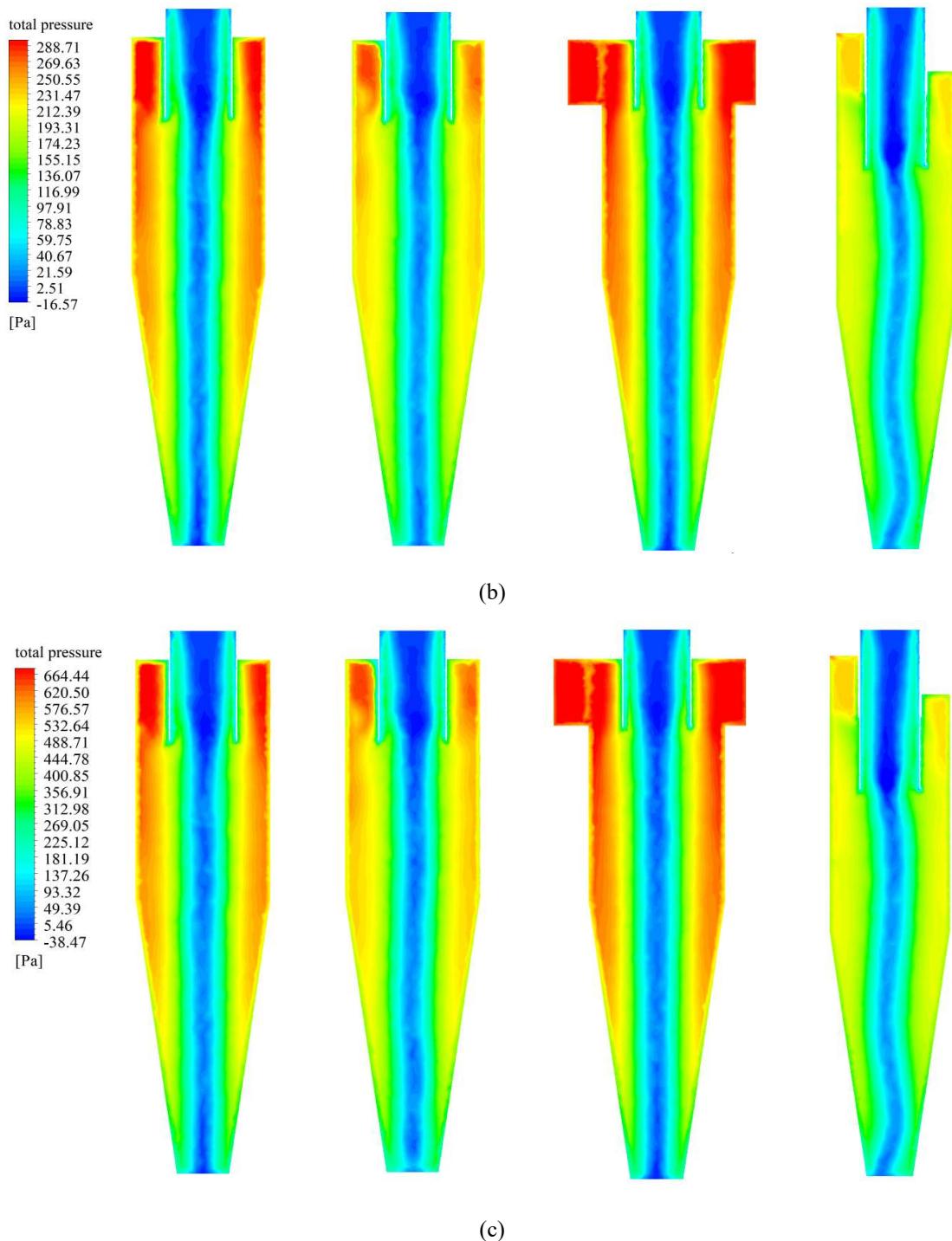


Abbildung 7.3 (Fortsetzung): Verteilung des Totaldrucks, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitz-
einlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (b) bei 10 m/s; (c) bei 15 m/s

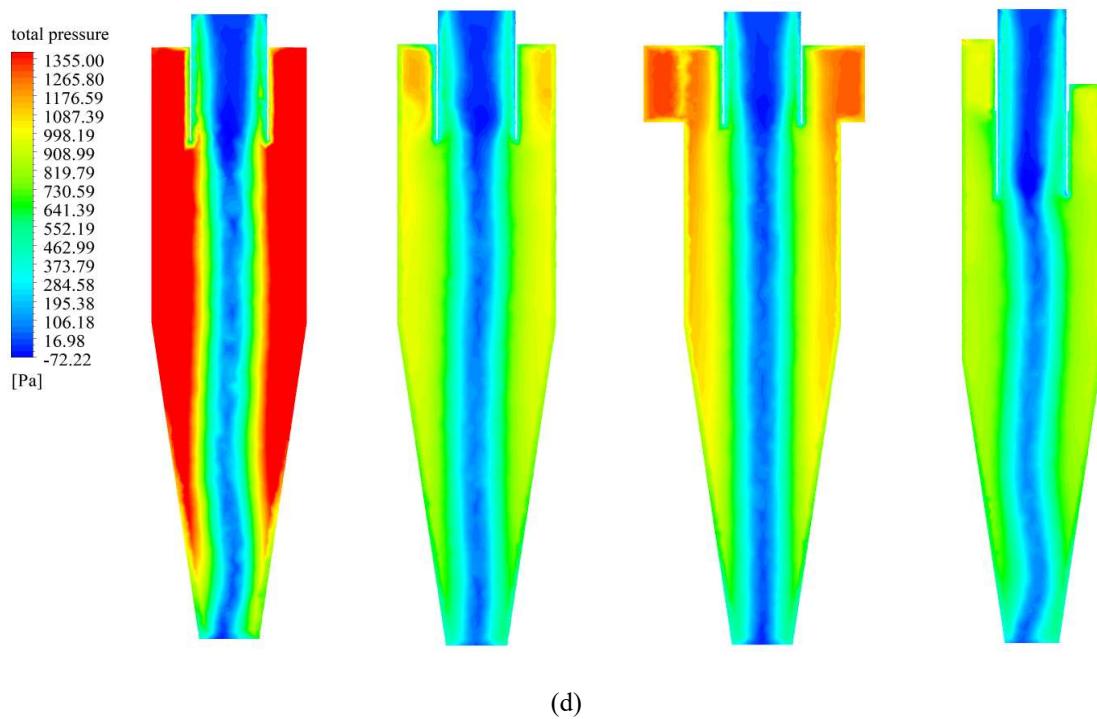


Abbildung 7.3 (Fortsetzung): Verteilung des Totaldrucks, Einlaufstruktur ist von links nach rechts Schlitz-einlauf, Rohreinlauf, Spiraleinlauf, Wendeleinlauf. (d) bei 20 m/s

Der Bereich des Hochdrucks nimmt im Zyklon mit Schlitzeinlauf mit zunehmender Geschwindigkeit zu. Der Totaldruck erhöht in der Nähe des Auspuffrohrs am deutlichsten. Die Verteilung bleibt stabil, wenn die Geschwindigkeit niedrig ist.

Im Zyklon mit Rohreinlauf hat die Geschwindigkeit keinen offensichtlichen Einfluss auf die Verteilung des Totaldrucks.

Der Bereich des Hochdrucks ist in der Schnecke von Zyklon mit Spiraleinlauf konzentriert. Die Erhöhung der Geschwindigkeit beeinflusst die Stabilität und Symmetrie der Verteilung nicht.

Die Schwankung der Verteilung ist im Zyklon mit Wendeleinlauf am offensichtlichsten. Im Auspuffrohr verschiebt sich das Wirbelzentrum nach links, aber die Verteilung ändert sich mit zunehmender Geschwindigkeit nicht.

7.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Druckänderungen des Zylkones während der Bewegung analysiert und verglichen, und der Druck wird in statischen Druck, dynamischen Druck und Totaldruck unterteilt. Die Folgerungen sind:

1. Der statische Druck im Bereich von Abwärtsströmung des Zylkones ist höher und nimmt mit abnehmendem Radius stark ab. Im zentralen Bereich bildet sich eine Unterdruckzone. Der Bereich des Niederdruckbereichs in der Nähe des Auspuffrohrs ist am größten, was eine wichtige Ursache für einen Kurzschluss ist. Am Boden des Zylkons mit Rohreinlauf befinden sich nur wenige Niederdruckbereiche. Dies ist günstig für die Verhinderung der Einsaugung von Außenluft und die Abscheidung von Partikeln. Obwohl die Verteilung im Zylkon mit Spiraleinlauf sehr stabil ist, ist der Bereich mit niedrigem Druck in Aufwärtsströmungsbereich groß. Die Verteilung innerhalb von Zylkon mit Schlitzeinlauf wird leicht durch die Geschwindigkeit beeinflusst. Die Symmetrie und Stabilität der Verteilung sind im Zylkon mit Wendeleinlauf immer noch sehr schlecht.
2. Die Verteilung des dynamischen Drucks im Zylkon ähnelt der Verteilung der Gesamtgeschwindigkeit. Der dynamische Druck erreicht das Maximum auf der CS-Ebene. Die Änderung des dynamischen Drucks ist in der Nähe des Auspuffrohrs des Zylkons mit Rohreinlauf klein, was die Wahrscheinlichkeit der Entstehung eines Kurzschlusses verringern kann. Der Kurzschluss im Zylkon mit Spiraleinlauf ist offensichtlich. Die Verteilung wird in Zylkon mit Schlitzeinlauf mit zunehmender Geschwindigkeit instabil. Die Verteilung im Zylkon mit Wendeleinlauf ist asymmetrisch, aber der dynamische Druck in der Nähe des Auspuffrohrs ändert sich wenig.
3. Die Verteilung des Totaldrucks und des statischen Drucks ist nahezu identisch. Der Totaldruck in der Abwärtsströmung ist größer und in der Aufwärtsströmung kleiner. Die Verteilungen im Zylkon mit Rohreinlauf und Spiraleinlauf zeigen gute Symmetrien. Der Bereich des Hochdrucks wird im Zylkon mit Schlitzeinlauf mit zunehmender Geschwindigkeit größer. Die Verteilung des Zylkons mit Wendeleinlauf schwankt offensichtlich.

8 Einflussfaktoren der Leistung von Zyklon

Die industrielle Anforderung an Zyklonen besteht aus einem höheren Abscheidegrad und einem geringeren Energieverbrauch, so dass die Bewertungsindikatoren für Zyklone hauptsächlich der Druckverlust und der Abscheidegrad sind. Es gibt viele Parameter, die die Zyklonleistung beeinflussen. In dieser Arbeit werden der Einfluss der Eintrittsgeschwindigkeit, der Struktur des Einlaufs, dem Durchmesser und der Dichte der Partikel auf die Zyklonleistung simuliert.

8.1 Einflussparameter des Druckverlustes

Der Druckverlust ist ein wichtiger Parameter für die Leistung von Zyklonen und ist gleichzeitig eine der Grundlagen für die Auswahl eines Ventilators. Der Druckverlust wirkt sich nicht nur direkt auf den Energieverbrauch aus, sondern auch auf den Strukturtyp anderer Geräte, die mit dem Zyklon verbunden sind. Die Drehbewegung im Zyklon erschwert die Analyse des Druckverlusts und der Druckverlust wird auch von anderen Parametern beeinflusst. Zum Beispiel von der Länge des Auspuffrohrs, der Länge des Zyklonabscheiders, den Eigenschaften der Luft usw. In diesem Kapitel wird der Einfluss von Eintrittsgeschwindigkeit und Einlaufstruktur auf den Druckverlust analysiert.

8.1.1 Einfluss der Geschwindigkeit auf den Druckverlust

Wenn die Fläche am Einlauf gleich ist, kann die Größe der Geschwindigkeit die Fähigkeit des Zyklones zur Verarbeitung von partikelhaltigen Strömungen zeigen. Je größer die Geschwindigkeit ist, desto größer ist das Gesamtvolume des vom Zyklon verarbeiteten Luftstroms. Der Luftstrom am Eingang ist stabiler und sanfter, so dass die Größe des Totaldrucks einfach zu ermitteln ist. Aber die Strömung am Ausgang ist ein starker Wirbel und deswegen haben die Strömungsbewegungen drei Richtungen. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Verteilung des Totaldrucks auf die Fläche am Ausgang. Um den Totaldruck auf der Fläche am Ausgang zu erhalten, wird die Berechnungsmethode „Area-Weighted Average“ verwendet, siehe **Tabelle 8.1.**

Tabelle 8.1: Totaldruck am Eingang und Ausgang

(a) Zyklon mit Schlitzeinlauf

Geschwindigkeit	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
Totaldruck am Eingang	76,67 Pa	309,83 Pa	698,39 Pa	1906,45 Pa
Totaldruck am Ausgang	13,77 Pa	58,57 Pa	132,39 Pa	322,72 Pa
Druckverlust	62,9 Pa	251,26 Pa	566,00 Pa	1583,73 Pa
Proportion	82,04 %	81,10 %	81,04 %	83,07 %

(b) Zyklon mit Rohreinlauf

Geschwindigkeit	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
Totaldruck am Eingang	66,40 Pa	280,55 Pa	649,72 Pa	1160,14 Pa
Totaldruck am Ausgang	13,71 Pa	58,04 Pa	133,75 Pa	240,19 Pa
Druckverlust	62,9 Pa	222,51 Pa	515,97 Pa	919,95 Pa
Proportion	79,35 %	79,31 %	79,41 %	79,30 %

(c) Zyklon mit Spiraleinlauf

Geschwindigkeit	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
Totaldruck am Eingang	78,39 Pa	319,99 Pa	730,67 Pa	1306,47 Pa
Totaldruck am Ausgang	14,87 Pa	61,40 Pa	140,37 Pa	251,30 Pa
Druckverlust	63,52 Pa	258,59 Pa	590,30 Pa	1055,17 Pa
Proportion	81,03 %	80,81 %	80,79 %	80,76 %

(c) Zyklon mit Wendeleinlauf

Geschwindigkeit	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
Totaldruck am Eingang	55,99 Pa	234,89 Pa	539,68 Pa	969,54 Pa
Totaldruck am Ausgang	11,95 Pa	51,42 Pa	118,42 Pa	213,09 Pa
Druckverlust	44,04 Pa	188,47 Pa	421,26 Pa	756,45 Pa
Proportion	78,66 %	78,11 %	78,06 %	78,02 %

Um die Beziehung zwischen Druckverlust und Geschwindigkeit einfacher zu erkennen, wird die **Tabelle 8.1** in ein Diagramm umgewandelt, siehe **Abbildung 8.1**.

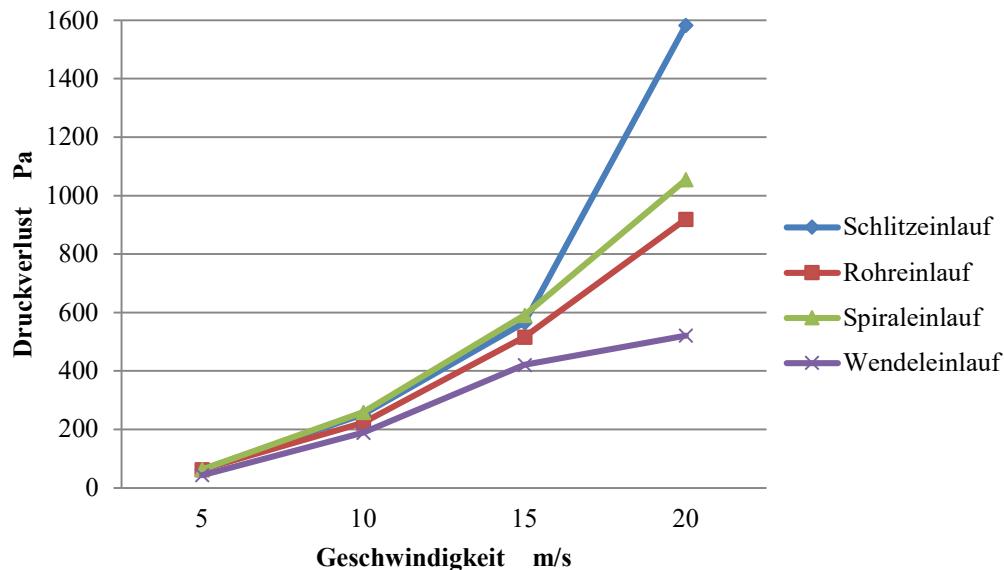


Abbildung 8.1: Beziehung zwischen Druckverlust und Geschwindigkeit

Es ist ersichtlich, dass der Trend von Änderung des Druckverlustes in jeder Struktur konsistent ist. Der Druckverlust des Zyklons nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit zu. Der Grund ist, dass je größer die Geschwindigkeit ist, desto größer die Tangentialgeschwindigkeit des Luftstroms ist. Die Zunahme der Tangentialgeschwindigkeit erhöht den Verlust der Energie wegen der Relativbewegung zwischen Strömung und Wand. Der Reibungsverlust ist proportional zur vierten Potenz der Tangentialgeschwindigkeit. Gleichzeitig ist die starke Rotation des Luftstroms im Auspuffrohr einer der Gründe für den Anstieg des Druckverlustes. Durch die Erhöhung der Geschwindigkeit nimmt die Reibung zwischen den Partikeln und der Wand zu. Das führt leicht zu einem erhöhten Verschleiß der Innenwand des Zyklones. Zwar kann Verschleiß durch das Hinzufügen verschleißfester Schutzschichten vermindert werden, doch dies erhöht die Herstellungskosten.

Obwohl der Druckverlust mit zunehmender Geschwindigkeit zunimmt, ist es aus **Tabelle 8.1** ersichtlich, dass sich das Verhältnis von Druckverlust zu Eingangsdruck mit zunehmender Geschwindigkeit nicht stark ändert. Die Änderung überschreitet 1 % -2 % nicht.

Um den Druckverlust, den Energieverlust und den Verschleiß der Innenwandoberfläche zu verringern, sollte die Geschwindigkeit so niedrig wie möglich sein.

8.1.2 Einfluss der Einlaufstruktur auf den Druckverlust

Wenn die Fläche des Einlaufes gleich ist, wird durch Wechsel der Einlaufstruktur auch der Druckverlust erheblich verändert. Ein neues Diagramm wird erhalten, indem die Simulationsdaten wieder verarbeitet werden, siehe Abbildung 8.2.

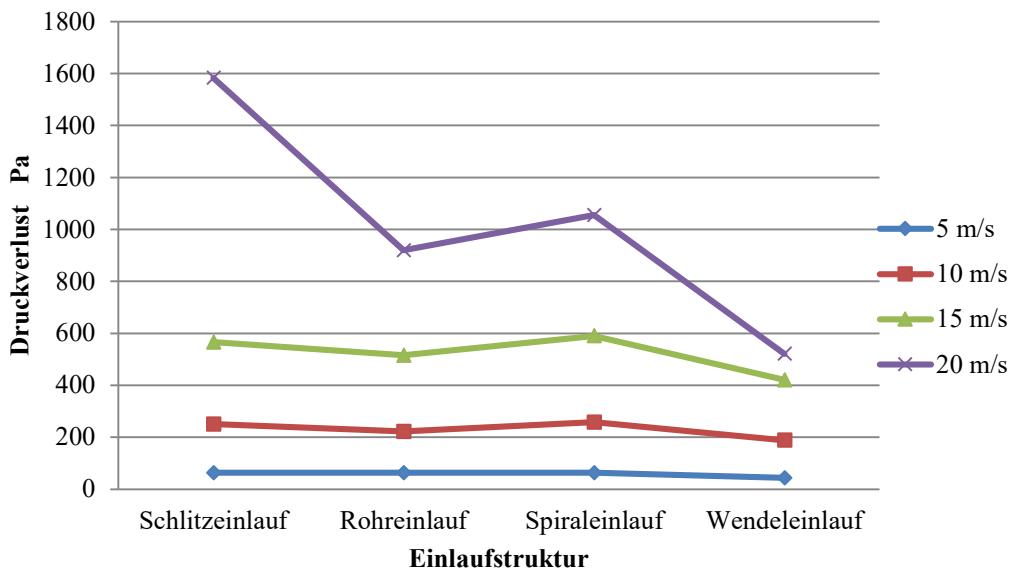


Abbildung 8.2: Druckverlust von unterschiedlichen Einlaufstrukturen

Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender Geschwindigkeit die Differenz des Druckverlusts zwischen den Strukturen immer größer wird und die Schwankung der Linie ist ebenfalls offensichtlicher. Der Wechsel der Struktur bedeutet, dass sich die Kontaktfläche zwischen der Strömung und der Wand ändert. Je größer die Kontaktfläche ist, desto größer ist die Reibung. Erhöhung der Reibung führt auch dazu, dass der Verlust an Strömungsenergie unterschiedlich ist.

Der Druckverlust von Zyklonen mit Wendeleinlauf ist am kleinsten in allen Simulationen und mit zunehmender Geschwindigkeit ist auch die Steigerung des Druckverlusts am Geringsten. Wenn die Luft durch den Wendeleinlauf in den Zyklon strömt, entsteht aufgrund der Spiralstruktur eine große Axialkraft nach unten. Der Luftstrom bleibt also kürzer im Zyklon als bei den drei anderen Strukturen, so dass die Kontaktfläche zwischen Luftstrom und Wand kleiner ist.

Im Zyklon mit Schlitzeinlauf, Rohreinlauf und Spiraleinlauf ist die Differenz von Druckverlusten in den ersten drei Simulationen nicht deutlich, aber es wird mit zunehmender Geschwindigkeit offensichtlicher. In den ersten drei Simulationen ist der Druckverlust von Zyklonen mit Spiraleinlauf am größten. Aufgrund

der Spiralstruktur ist das Volumen des Zyklons größer als mit anderen Strukturen, so dass der Luftstrom am längsten im Zyklon bleibt und die Kontaktfläche zwischen Strömung und Wand am größten ist.

Wenn die Geschwindigkeit 20 m/s ist, steigt der Druckverlust im Zyklon mit Schlitzeinlauf stark an. Der Grund ist, dass der Luftstrom am oberen Bereich des Zylinders verweilt und einen Sekundärwirbel bildet. Dies führt zu einer Erhöhung der Bewegungszeit des Luftstroms im Zyklon, was wiederum zu einer Erhöhung des Druckverlustes führt.

Wenn die Luft durch den Rohreinlauf einströmt, ist die Kontaktfläche zwischen Strömung und Wand kleiner als bei anderen Strukturen, da die Fläche des Zylinders kleiner ist als die Fläche des Quaders, so dass der Druckverlust kleiner ist.

8.2 Einflussparameter des Abscheidegrades

Als Vorrichtung zur Trennung von in Strömungen enthaltenen Feststoffen ist der Abscheidegrad der wichtigste Bewertungsindex des Zyklons. Entsprechend dem unterschiedlichen Abscheidegrad kann der Zyklon in Stufen unterteilt werden. Der am besten geeigneten Zyklon wird unter verschiedenen Anforderungen ausgewählt, dies garantiert nicht nur die Erfüllung der Anforderung über den Abscheidegrad, sondern auch die Minimierung des Energieverbrauchs. In diesem Kapitel wird der Einfluss der vier Parameter Geschwindigkeit, Durchmesser und Dichte von Partikeln und Einlaufstruktur auf den Abscheidegrad analysiert.

8.2.1 Einfluss der Geschwindigkeit auf den Abscheidegrad

In den Simulationen gibt es zwei Arten von Partikeln, von denen jeder sieben verschiedene Durchmesser hat und vier unterschiedliche Geschwindigkeiten. Änderung der unterschiedlichen Parameter beeinflusst den Abscheidegrad, siehe **Tabelle 8.2**. Wenn der Abscheidegrad höher als 90 % ist, wird durch Grün angezeigt.

Tabelle 8.2: Abscheidegrad unter unterschiedlichen Bedingungen

(a) Schlitzeinlauf mit Anthrazit

Durchmesser von Partikel \ Geschwindigkeit	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
1 µm	10,39 %	16,27 %	21,18 %	62,62 %
2,5 µm	29,61 %	40,59 %	83,53 %	96,67 %
3,5 µm	31,57 %	95,10 %	99,80 %	100 %
5 µm	90,59 %	99,80 %	100 %	100 %
6,5 µm	99,41 %	100 %	100 %	100 %
8 µm	100 %	100 %	100 %	100 %
10 µm	100 %	100 %	100 %	100 %

(b) Schlitzeinlauf mit Asche

Durchmesser von Partikel \ Geschwindigkeit	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
1 µm	8,82 %	9,80 %	11,18 %	39,29 %
2,5 µm	12,16 %	30,20 %	47,65 %	71,90 %
3,5 µm	20,39 %	44,71 %	55,10 %	90,48 %
5 µm	40,59 %	84,51 %	98,82 %	98,57 %
6,5 µm	44,90 %	98,82 %	99,80 %	100 %
8 µm	92,16 %	99,80 %	100 %	100 %
10 µm	99,41 %	100%	100 %	100 %

≥ 90 %

Tabelle 8.2 (Fortsetzung): Abscheidegrad unter unterschiedlichen Bedingungen

(c) Rohreinlauf mit Anthrazit

Geschwindigkeit Durchmesser von Partikel	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
1 µm	5,49 %	6,27 %	10,39 %	13,53 %
2,5 µm	11,37 %	24,12 %	75,10 %	87,25 %
3,5 µm	16,08 %	86,08 %	95,88 %	98,63 %
5 µm	79,61 %	97,84 %	99,80 %	100 %
6,5 µm	96,08 %	99,80 %	100 %	100 %
8 µm	99,80 %	100 %	100 %	100 %
10 µm	100 %	100 %	100 %	100 %

(d) Rohreinlauf mit Asche

Geschwindigkeit Durchmesser von Partikel	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
1 µm	4,71 %	5,69 %	6,08 %	7,06 %
2,5 µm	7,84 %	12,55 %	17,06 %	12,35 %
3,5 µm	9,02 %	15,69 %	38,82 %	73,53 %
5 µm	11,18 %	67,25 %	91,57 %	97,06 %
6,5 µm	34,51 %	92,35 %	97,65 %	99,61 %
8 µm	80,98 %	97,06 %	99,61 %	99,80 %
10 µm	95,29 %	99,41%	100 %	100 %

≥ 90 %

Tabelle 8.2 (Fortsetzung): Abscheidegrad unter unterschiedlichen Bedingungen

(e) Spiraleinlauf mit Anthrazit

Geschwindigkeit Durchmesser von Partikel	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
1 µm	7,80 %	12,20 %	15,80 %	27,00 %
2,5 µm	30,00 %	34,40 %	88,60 %	98,40 %
3,5 µm	32,00 %	97,80 %	99,6 %	100 %
5 µm	49,30 %	100 %	100 %	100 %
6,5 µm	100 %	100 %	100 %	100 %
8 µm	100 %	100 %	100 %	100 %
10 µm	100 %	100 %	100 %	100 %

(f) Spiraleinlauf mit Asche

Geschwindigkeit Durchmesser von Partikel	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
1 µm	6,40 %	7,6 %	10,00 %	13,00 %
2,5 µm	11,40 %	26,40 %	38,00 %	39,40 %
3,5 µm	20,60 %	38,40 %	58,80 %	90,80 %
5 µm	32,20 %	87,20 %	99,40 %	99,80 %
6,5 µm	57,60 %	100 %	100 %	100 %
8 µm	97,80 %	100 %	100 %	100 %
10 µm	99,60 %	100 %	100 %	100 %

≥ 90 %

Tabelle 8.2 (Fortsetzung): Abscheidegrad unter unterschiedlichen Bedingungen

(g) Wendeleinlauf mit Anthrazit

Geschwindigkeit Durchmesser von Partikel	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
1 µm	8,40 %	12,00 %	20,00 %	23,20 %
2,5 µm	24,60 %	38,00 %	67,20 %	79,40 %
3,5 µm	28,20 %	78,20 %	91,20 %	96,00 %
5 µm	71,20 %	95,40 %	99,20 %	99,40 %
6,5 µm	91,00 %	100 %	100 %	100 %
8 µm	98,80 %	100 %	100 %	100 %
10 µm	100 %	100 %	100 %	100 %

(h) Wendeleinlauf mit Asche

Geschwindigkeit Durchmesser von Partikel	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
1 µm	7,80 %	8,00 %	11,00 %	13,80 %
2,5 µm	11,60 %	21,60 %	40,40 %	48,60 %
3,5 µm	16,40 %	41,20 %	45,00 %	69,20 %
5 µm	31,20 %	63,00 %	85,00 %	90,40 %
6,5 µm	32,00 %	86,40 %	95,00 %	98,60 %
8 µm	69,60 %	95,40 %	99,40 %	99,80 %
10 µm	89,80 %	99,20 %	100 %	100 %

≥ 90 %

Es kann durch Vergleich der Simulationsdaten herausgefunden werden, dass der Abscheidegrad mit zunehmender Geschwindigkeit steigt. Dieser Trend hängt nicht von der Änderung anderer Simulationsparameter ab. Die Erhöhung der Geschwindigkeit erhöht die Zentrifugalkraft auf die Partikel, was die Bewegung der Partikel zur Wand beschleunigen kann. Gleichzeitig nimmt auch die Axialgeschwindigkeit der Abwärtsströmung zu, wodurch die Bewegung der Partikel zum Staubauspuffrohr beschleunigt wird und somit der Abscheidegrad verbessert wird. Der Abscheidegrad von Partikeln mit Durchmessern von $2,5 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ nimmt am offensichtlichsten mit zunehmender Geschwindigkeit zu. Bei Partikeln mit Durchmesser unter $2,5 \mu\text{m}$ kann eine Erhöhung der Geschwindigkeit dazu führen, dass die Partikel eine größere Zentrifugalkraft haben und gleichzeitig wird der Sekundärwirbel im Strömungsfeld stärker. Dies kann leicht einen Kurzschluss in der Nähe des Auspuffrohrs und eine Schwankung der Strömung am Boden des Zyklones verursachen. Deswegen ist die Erhöhung des Abscheidegrades nicht wesentlich. Bei großen Partikeln hat eine Erhöhung der Geschwindigkeit nur geringe Auswirkungen, weil der Abscheidegrad bei niedrigerer Geschwindigkeit bereits sehr gut ist.

In Kombination mit dem Einfluss der Geschwindigkeit auf den Druckverlust kann die Erhöhung der Geschwindigkeit den Abscheidegrad wirksam verbessern. Gleichzeitig erhöht sich aber der Druckverlust, was einen Anstieg des Energieverbauchs verursacht. Deswegen ist es nicht vorteilhaft in den Anwendungen, dass die Geschwindigkeit des Zyklones so groß wie möglich ist. In der Anwendung soll die minimalste Geschwindigkeit ausgewählt werden, welche noch immer den Zweck gemäß den spezifischen Anforderungen zur Staubentfernung erfüllen kann. Dies sorgt nicht nur dafür, dass die Anforderungen erfüllt werden, sondern dass auch der Energiverlust verringert wird. Gleichzeitig kann der Wandverschleiß verringert werden, um die Lebensdauer des Zyklones zu verlängern.

8.2.2 Einfluss des Durchmessers von Partikeln auf den Abscheidegrad

Nicht nur die Geschwindigkeit hat einen großen Einfluss auf den Abscheidegrad, sondern auch die Partikelgröße spielt eine wichtige Rolle bei der Beeinflussung des Abscheidegrads. Die Partikel in der Simulation sind kugelförmig, sodass der Durchmesser der Partikel der Größe der Partikel entspricht.

Aus der **Tabelle 8.2** ist ersichtlich, dass die Partikelgröße einen regelmäßigen Einfluss auf den Abscheidegrad hat. Wenn andere Variablen gleich sind, ist der Abscheidegrad umso größer, je größer der Durchmesser der Partikel ist. Um diese Regel deutlicher darzustellen, werden die Simulationsergebnisse von Asche im Zyklon mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s graphisch visualisiert, siehe **Abbildung 8.3**.

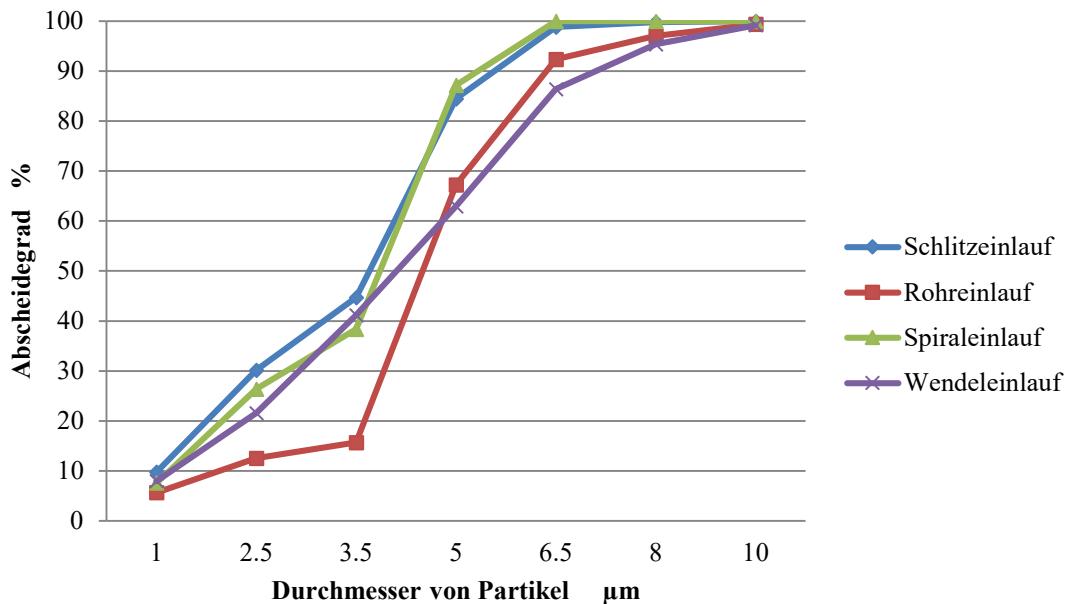


Abbildung 8.3: Abscheidegrad von Asche bei 10 m/s

Wenn die Dichte der Partikel konstant ist, ist die Schwerkraft umso größer, je größer der Partikeldurchmesser ist. Dann werden die Partikel weniger von Kurzschluss und Sekundärwirbel beeinflusst. Gleichzeitig nimmt das Volumen der Partikel zu und aufgrund der Vergrößerung der Kontaktfläche mit dem Luftstrom ist die Tangentialkraft und die nach unten gerichtete Axialkraft auf das Partikel umso größer. Deswegen wird der Abscheidegrad erheblich verbessert.

8.2.3 Einfluss der Dichte von Partikeln auf den Abscheidegrad

Der Abscheidegrad mit Partikeln mit verschiedener Dichte ist unter den gleichen Bedingungen signifikant unterschiedlich. Diese Simulationen enthalten zwei Arten von Partikeln Anthrazit (1500 kg/m^3) und Asche (600 kg/m^3). Wenn andere Variablen gleich sind, ist der Abscheidegrad umso besser, je größer die Dichte ist. Gleichzeitig ist dieser Trend umso offensichtlicher, je höher die Geschwindigkeit ist. Um den Einfluss der Dichte auf den Abscheidegrad unter jeder Partikelgröße zu zeigen, werden die Simulationsergebnisse der beiden Partikel mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s im Zyklon mit Rohreinlauf zum Vergleich ausgewählt, siehe **Abbildung 8.4**.

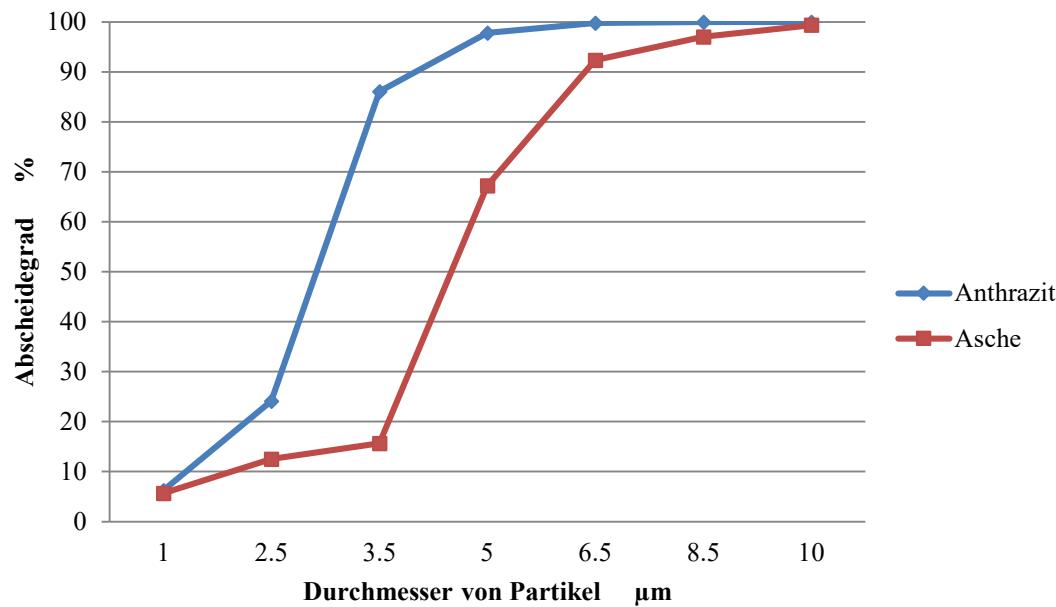
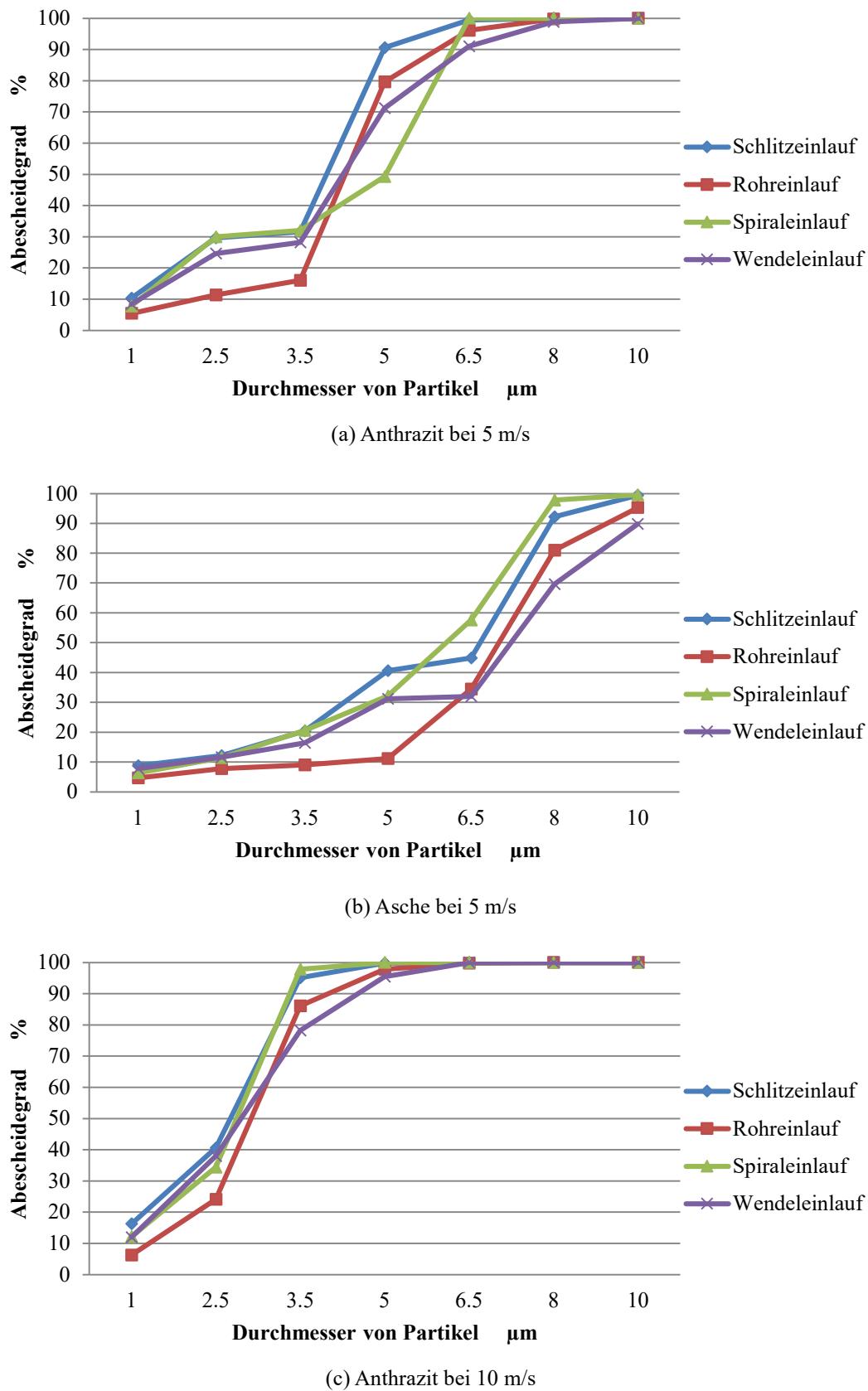


Abbildung 8.4: Abscheidegrad von Anthrazit und Asche mit Rohreinlauf bei 10 m/s

Wenn das Partikel das gleiche Volumen hat, ist die Schwerkraft umso größer, je größer die Dichte ist. Dies führt dazu, dass die Partikel vom Sekundärwirbel weniger beeinflusst werden. Die Auswirkung der Partikeldichte auf den Abscheidegrad ist am offensichtlichsten, wenn der Durchmesser des Partikels weniger als 5 μm beträgt. Wenn das Partikel groß ist, ist der Abscheidegrad bereits sehr hoch, so dass die Verbesserung nicht deutlich ist.

8.2.4 Einfluss der Einlaufstruktur auf den Abscheidegrad

Um den Einfluss zu analysieren und den Vergleich von Simulationsdaten zu erleichtern, wird die **Tabelle 8.2** in Diagramm umgewandelt, siehe **Abbildung 8.5**.

**Abbildung 8.5:** Abscheidegrad mit unterschiedlicher Einlaufstruktur

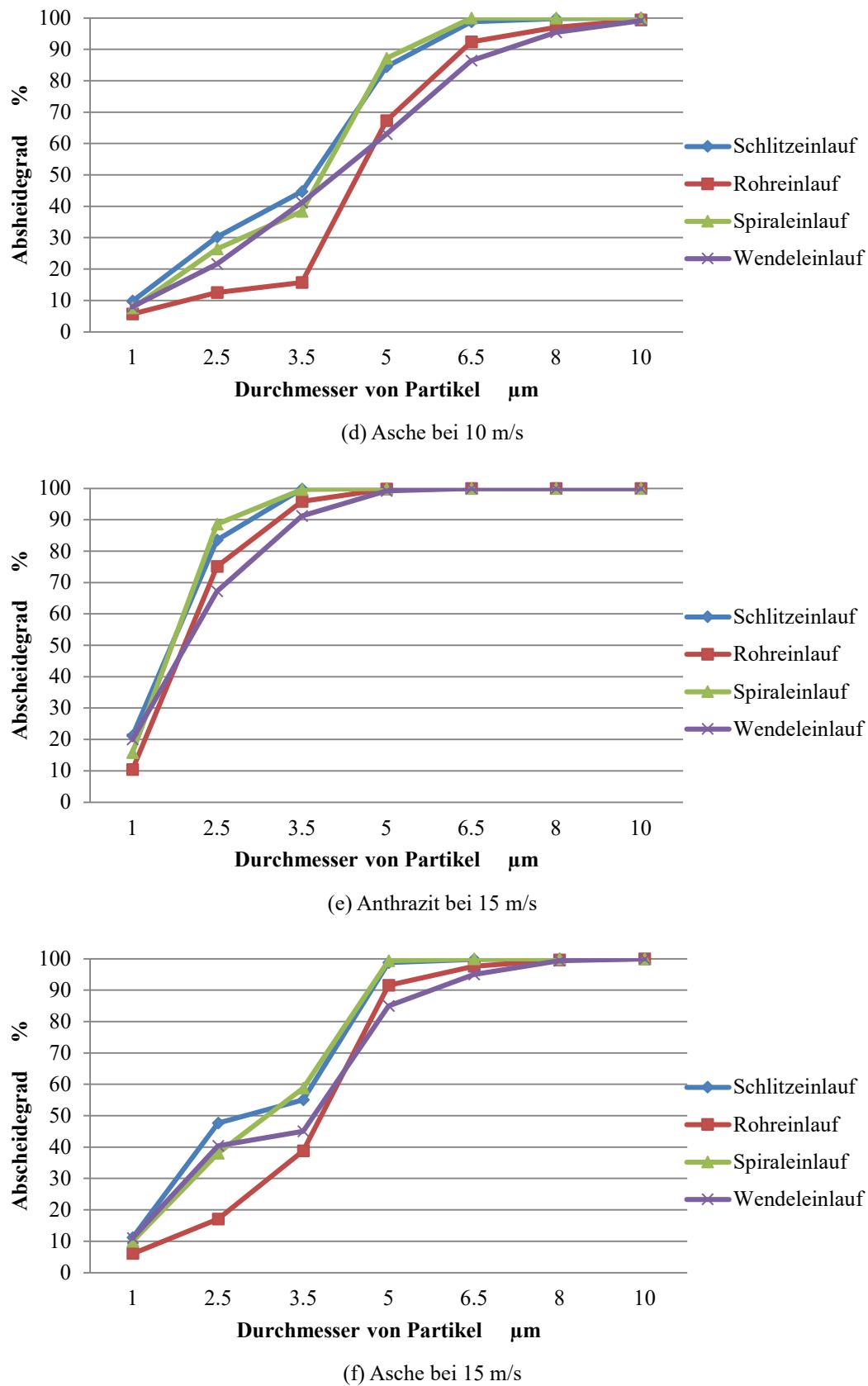
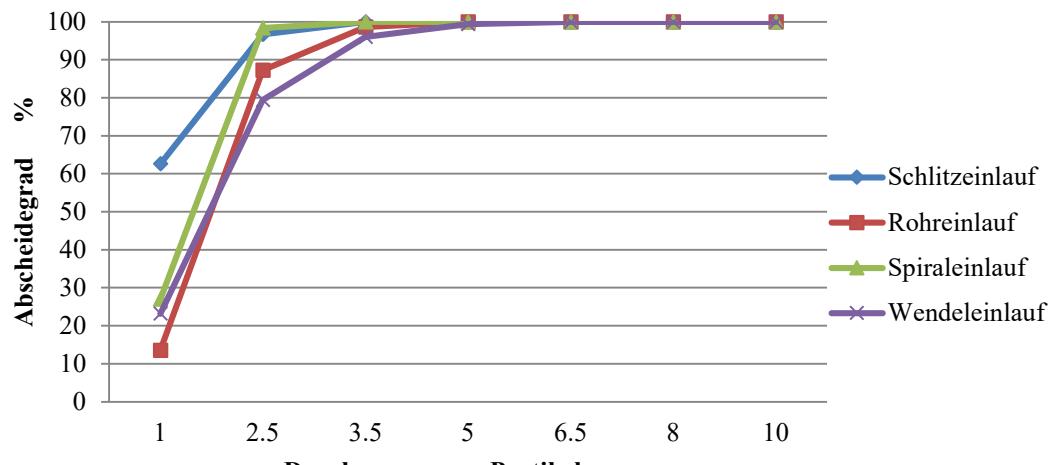
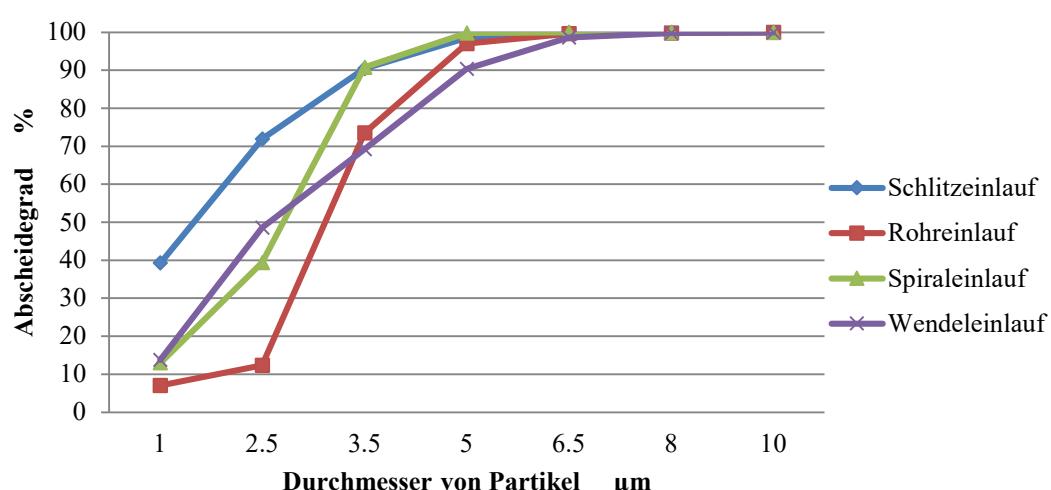


Abbildung 8.5 (Fortsetzung): Abscheidegrad mit unterschiedlicher Einlaufstruktur



(g) Anthrazit bei 20 m/s



(h) Asche bei 20 m/s

Abbildung 8.5 (Fortsetzung): Abscheidegrad mit unterschiedlicher Einlaufstruktur

Zyklone mit Schlitzeinlauf und Spiraleinlauf haben in allen Simulationen einen hohen Abscheidegrad. Insbesondere ist dieses Phänomen in der Simulationsgruppe von (b) bis (h) am offensichtlichsten. Wenn der Partikeldurchmesser kleiner als 3,5 μm ist, ist der Abscheidegrad mit Schlitzeinlauf größer als mit Spiraleinlauf. Gleichzeitig wird diese Differenz mit zunehmender Geschwindigkeit immer deutlicher. Der Grund für diese Differenz ist, dass die Tangentialgeschwindigkeit des Zylons mit Schlitzeinlauf höher ist als mit Spiraleinlauf und der Einfluss von Kurzschlüssen ist im Zyklon mit Spiraleinlauf größer. Wenn die Partikel jedoch allmählich größer werden, wird der Abscheidegrad mit Spiraleinlauf größer als bei Schlitzeinlauf. Wenn der Partikeldurchmesser größer wird, wird der Einfluss von Kurzschlüssen kleiner und der Wirbelstrom im Zyklon mit Spiraleinlauf ist stabiler, so dass der Abscheidegrad mit Spiraleinlauf allmählich ansteigt.

Weil die Geschwindigkeit niedrig und die Partikeldichte hoch ist, hat die Schwankung des Wirbels im Zyklon mit Wendeleinlauf wenig Einfluss auf die Partikel. Gleichzeitig ist aufgrund der Wendelstruktur des Wendeleinlaufs die Auswirkung eines Kurzschlusses auf den Abscheidegrad relativ gering. In anderen Simulationen ist der Abscheidegrad nicht so gut wegen der geringen Tangentialgeschwindigkeit und des starken Einflusses von Sekundärwirbeln.

Der Abscheidegrad mit Rohreinlauf ist auf einem mittleren Niveau und ist sogar niedriger als mit Wendeleinlauf, wenn der Partikeldurchmesser klein ist. Dies liegt daran, dass ein kleineres Partikel einfacher durch den Kurzschluss beeinflusst wird. Der Kurzschluss im Zyklon mit Rohreinlauf ist stärker als mit Wendeleinlauf.

In praktischen Anwendungen sind die Durchmesser der in den Zyklon eintretenden Partikel nicht gleich. Um genauere Simulationsdaten zu erhalten, werden alle Partikel gemischt und dann unter denselben Simulationsbedingungen simuliert, siehe **Tabelle 8.3 und 8.4**.

Tabelle 8.3: Abscheidegrad von Anthrazit mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern

Geschwindigkeit Einlaufstruktur	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
Schlitzeinlauf	65,93 %	78,82 %	86,36 %	94,18 %
Rohreinlauf	58,35 %	73,45 %	83,03 %	85,63 %
Spiraleinlauf	66,97 %	77,77 %	86,29 %	89,34 %
Wendeleinlauf	60,29 %	74,80 %	82,51 %	85,40 %

Tabelle 8.4: Abscheidegrad von Asche mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern

Geschwindigkeit Einlaufstruktur	5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s
Schlitzeinlauf	45,49 %	66,81 %	73,22 %	85,75 %
Rohreinlauf	34,79 %	55,71 %	64,40 %	69,92 %
Spiraleinlauf	46,51 %	65,66 %	72,32 %	77,57 %
Wendeleinlauf	36,91 %	59,23 %	67,97 %	74,34 %

Um den Vergleich von Simulationsdaten zu erleichtern, wird die **Tabelle 8.3 und 8.4** in Diagramm umgewandelt, siehe **Abbildung 8.6 und 8.7**.

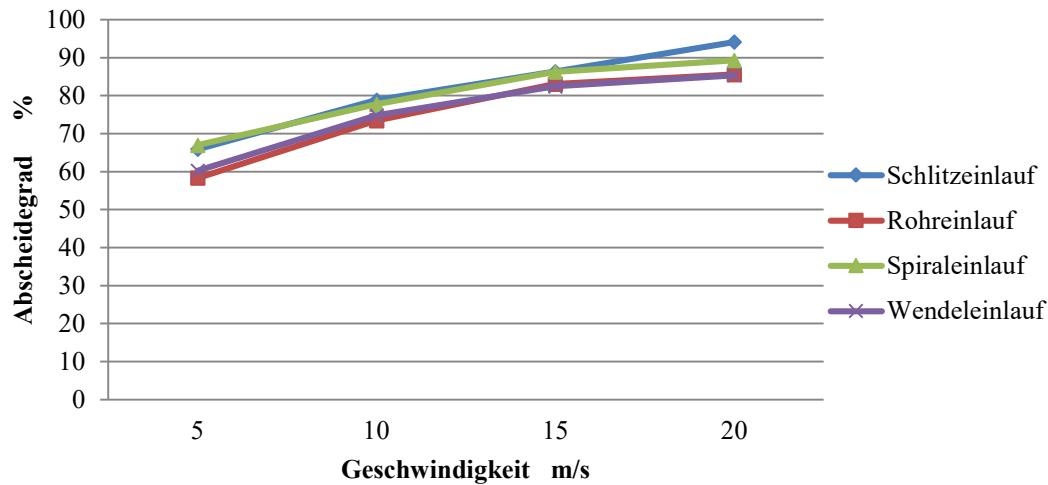


Abbildung 8.6: Abscheidegrad von Anthrazit mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern

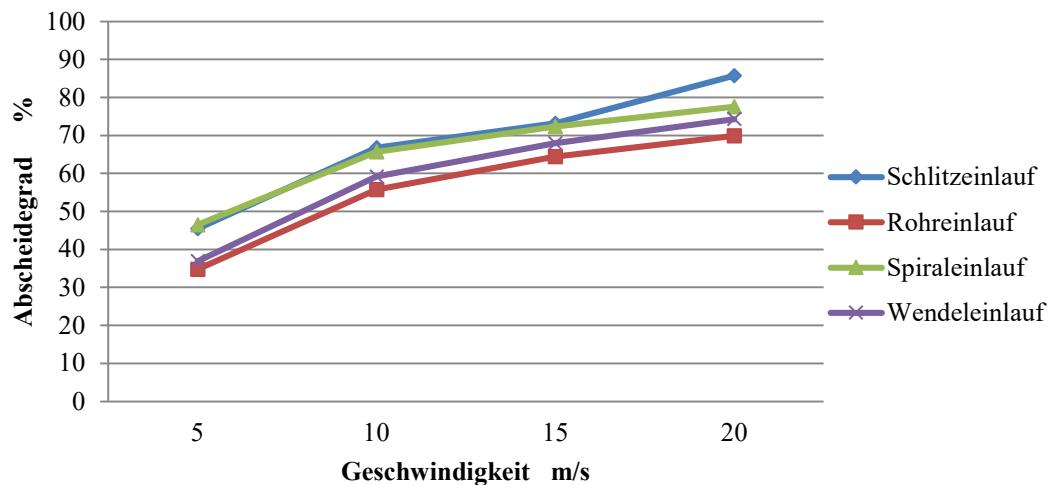


Abbildung 8.7: Abscheidegrad von Asche mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern

Der Abscheidegrad des Zyklons mit Schlitzeinlauf und Spiraleinlauf sind immer hoch. Der Abscheidegrad bei Schlitzeinlauf ist jedoch höher als bei Spiraleinlauf. Wenn die Geschwindigkeit zunimmt, vergrößert sich die Differenz zwischen den beiden allmählich. Zyklon mit Wendeleinlauf hat einen hohen Abscheidegrad, wenn die Dichte des Partikels klein ist. Die Differenz des Abscheidegrads zwischen Schlitzeinlauf und Wendeleinlauf ist am kleinsten, wenn die Geschwindigkeit 15 m/s beträgt. Der Abscheidegrad des Zyklons mit Rohreinlauf ist die niedrigste unter den vier Strukturen. Wenn die Dichte größer wird, wird die Differenz zwischen den Abscheidegrad der vier Strukturen kleiner.

8.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden der Einfluss der Eintrittsgeschwindigkeit und der Einlaufstruktur auf den Druckverlust und der Einfluss der Eintrittsgeschwindigkeit, des Partikeldurchmessers, der Partikeldichte und der Einlaufstruktur auf den Abscheidegrad analysiert. Die Folgerungen sind:

1. Wenn andere Parameter der Simulation gleich sind, erhöht die Steigerung der Eintrittsgeschwindigkeit den Druckverlust. Gleichzeitig gilt diese Regelmäßigkeit für jede Struktur. Es wird berücksichtigt, dass die Erhöhung der Geschwindigkeit den Wandverschleiß und den Energieverlust erhöht, so dass die Eintrittsgeschwindigkeit so niedrig wie möglich sein soll.
2. Unter den gleichen Bedingungen ist der Druckverlust der Zyklone mit Wendeleinlauf am niedrigsten und der Druck beim Eingang auch am niedrigsten. Bei Geschwindigkeiten von 5 m/s, 10 m/s und 15 m/s gibt es kaum Unterschiede im Druckverlust bei Schlitzeinlauf, Rohreinlauf und Spiraleinlauf. Trotzdem ist der Druckverlust bei Spiraleinlauf am größten. Wenn die Geschwindigkeit auf 20 m/s steigt, steigt der Druckverlust bei Schlitzeinlauf stark an.
3. Wenn andere Simulationsparameter gleich sind, verbessert die Erhöhung der Eintrittsgeschwindigkeit den Abscheidegrad. Wenn der Durchmesser von Partikel im Bereich von 2,5 μm bis 5 μm liegt, steigt der Abscheidegrad am offensichtlichsten mit zunehmender Geschwindigkeit.
4. Wenn andere Simulationsparameter gleich sind, ist der Abscheidegrad umso besser, je größer der Durchmesser oder die Dichte der Partikel ist.
5. Wenn die Dichte der Partikel hoch und die Geschwindigkeit niedrig ist, ist der Abscheidegrad von Zyklen mit Wendeleinlauf besser. Wenn der Durchmesser von Partikel kleiner als 3,5 μm ist, ist der Abscheidegrad von Zyklen mit Schlitzeinlauf besser. Außerhalb dieser Situationen ist der Abscheidegrad von Zyklen mit Spiraleinlauf besser.
6. Wenn die Anforderung am Abscheidegrad höher als 90 % sein muss und gleichzeitig der Druckverlust berücksichtigt wird, werden Zyklone mit Schlitzeinlauf, Spiraleinlauf und Wendeleinlauf unter verschiedenen Verwendungsbedingungen empfohlen. Wenn die Dichte der Partikel größer und der Partikeldurchmesser größer als 5 μm ist, wird aufgrund des geringen Druckverlustes der Wendelinlauf empfohlen. Wenn die Dichte klein oder der Durchmesser klein ist, werden Schlitzeinlauf und Spiraleinlauf empfohlen, weil der Druckverlust und der Abscheidegrad dabei nicht sehr unterschiedlich sind. Wenn die Geschwindigkeit jedoch hoch ist, wird Schlitzeinlauf wegen des starken Anstiegs des Druckverlustes nicht empfohlen. Zyklone mit Rohreinlauf werden nicht in jeder Situation empfohlen.

7. Wenn die Partikel mit unterschiedlichen Durchmessern gemischt werden und die Geschwindigkeit nicht hoch ist, werden Schlitzeinlauf und Spiraleinlauf wegen eines hohen Abscheidegrads empfohlen. Wenn jedoch die Geschwindigkeit höher wird, steigt der Abscheidegrad des Zyklons mit Schlitzeinlauf signifikant an. Wenn der Partikeldurchmesser klein ist, wird Wendeleinlauf wegen eines geringen Druckverlusts und eines hohen Abscheidegrads empfohlen.
8. Wenn der Partikeldurchmesser kleiner als $2,5 \mu\text{m}$ ist und das Erfordernis des Abscheidegrades hoch ist, wird der Zyklon für Staubentfernung nicht empfohlen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird die CFD-Technologie verwendet, um das Strömungsfeld und die Bewegung von Partikeln in Zyklonen numerisch zu simulieren und entsprechend den Simulationsergebnissen werden die Vor- und Nachteile von vier verschiedenen Einlaufstrukturen verglichen.

Zunächst wird gemäß den Bewegungseigenschaften des Luftstromes im Zyklon die Bewegungsgleichungen basierend auf Navier-Stokes-Gleichungen und der Kontinuitätsgleichung erstellt. Das für die numerische Simulation von Zyklonen geeignete Reynolds-Spannungs-Modell wird ausgewählt und durch den Vergleich verschiedener Simulationsmethoden werden die am besten geeigneten Simulationsbedingungen für Zyklone ausgewählt.

Dann werden die Eigenschaften der Struktur des Zyklonabscheiders analysiert und basierend auf der Standard-Swift-Struktur wird ein 3D-Modell von Zyklonen mit Schlitzeinlauf erstellt. Gleichzeitig werden ohne Änderung von Zylinder und Kegel drei Modelle mit unterschiedlichen Einlaufstrukturen erstellt.

Durch die Verarbeitung der Simulationsergebnisse des Zyklonabscheiders werden die Geschwindigkeits- und Druckverteilung erhalten und analysiert. Im Zyklon befindet sich ein doppelschichtiger Wirbel. Mit der CS-Ebene als Grenzfläche ist an der Außenseite ein nach unten rotierender Wirbel und in der Mitte ein nach oben rotierender Wirbel lokalisiert. Diese beiden Wirbel drehen sich in die gleiche Richtung und zeigen eine typische zweischichtige Rankine-Wirbelstruktur. Die Tangentialgeschwindigkeit ist am größten auf der CS-Ebene und die Axialgeschwindigkeit ist am kleinsten. Die Verteilung des Totaldrucks innerhalb des Zyklones zeigt die Eigenschaften, dass der Druck in der Mitte klein und außen groß ist und in der Mitte ein Unterdruckbereich vorhanden ist. Die Geschwindigkeits- und Druckverteilung bei Spiraleinlauf weist in jeder Simulation eine gute Symmetrie und Stabilität auf, aber der Kurzschluss ist am schwerwiegsten. Die Stabilität und Symmetrie des Schlitzeinlaufs werden sich aufgrund der Steigerung von Geschwindigkeit verschlechtern. Die Symmetrie ist am schlechtesten im Wendeleinlauf, aber der Kurzschluss hat dabei den geringsten Einfluss auf den Abscheidegrad.

Der Bewertungsindex des Zyklons wird in dieser Arbeit als Druckverlust und Abscheidegrad definiert. Nach den Simulationsergebnissen ist der Druckverlust umso größer, je höher die Geschwindigkeit ist. Der Druckverlust ist bei einem Wendeleinlauf am geringsten. Der Druckverlust von einem Schlitzeinlauf und einem Spiraleinlauf ist nahezu gleich, aber der Druckverlust beim Schlitzeinlauf steigt bei hoher Geschwindigkeit stark an. Der Druckverlust ist beim Rohreinlauf immer auf einem mittleren Niveau. Wenn andere Bedingungen stabil bleiben, steigt der Abscheidegrad mit zunehmender Geschwindigkeit. Gleichzeitig wird

durch die Erhöhung des Durchmessers oder der Dichte der Partikel auch der Abscheidegrad erheblich verbessert.

Wenn die Dichte der Partikel größer und der Partikeldurchmesser größer als $5 \mu\text{m}$ ist, wird der Wendeinlauf empfohlen. Wenn die Dichte klein oder der Durchmesser klein ist, werden Schlitzeinlauf und Spiraleinlauf empfohlen. Wenn die Geschwindigkeit jedoch hoch ist, wird Schlitzeinlauf nicht empfohlen. Zyklone mit Rohreinlauf werden nicht empfohlen. Wenn der Partikeldurchmesser kleiner als $2,5 \mu\text{m}$ ist und die Anforderung an den Abscheidegrad hoch sind, wird der Zyklon für Staubentfernung nicht empfohlen. Wenn die Partikel mit unterschiedlichen Durchmessern gemischt werden und die Geschwindigkeit nicht hoch ist, werden Schlitzeinlauf und Spiraleinlauf empfohlen. Wenn jedoch die Geschwindigkeit höher wird, steigt der Abscheidegrad des Zyklons mit Schlitzeinlauf signifikant an.

Schließlich ist festzustellen, dass die ermittelten Erkenntnisse zur Konstruktion von Zyklonen und deren Optimierung verwendet werden können. Für das weitere Vorgehen wird empfohlen, mehrere Experimente durchzuführen, um die Parameter und Ergebnisse der Simulation zu überprüfen. Die Simulationsparameter in dieser Arbeit sind alle vorhanden. Wenn die speziellen Simulationsparameter für den Zyklon festgelegt werden können, liegen die Simulationsergebnisse näher an den experimentellen Daten.

Literaturverzeichnis

- [1] **ATa-Chih Hsiao, Daren Chen, Paul S. Greenberg, Kenneth W. Street:** *Effect of geometric configuration on the collection efficiency of axial flow cyclones*, Journal of Aerosol Science, 2011. ISSN 0021-8502
- [2] **Joel H. Ferziger, Milovan Perić, Robert L. Street:** *Numerische Strömungsmechanik*, Springer Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-67586-0
- [3] **Lemann, Martin, Lemann, Martin F.:** *Verfahrenstechnik und Umwelt*, Peter Lang AG, 2000. ISBN 978-3-906-76466-5
- [4] **Hoffmann, Alex C., Stein, Louis E.:** *Gas cyclones and swirl tubes principles, design and operation*, Springer Verlag, 2002. ISBN 978-3-540-43326-2
- [5] **Edgar Muschelknautz, Volker Greif:** *Cyclones and other gas-solids separators*, Springer Verlag, 1997. ISBN 978-94-010-6530-6
- [6] **Scheuch GmbH:** *CY-CLONE AND MULTI-CY-CLONE*, Internet:
<https://www.scheuch.com/en/products-solutions/filtration-separation/cyclone-and-multi-cyclone/>
- [7] **Hideto Yoshida, Yusuke Nishimura, Kunihiro Fukui, Tetsuya Yamamoto:** *Effect of apex cone shape on fineparticle classification of gas-cyclone*, Powder Technology, 2010. ISSN 0032-5910
- [8] **Dengwen Wang, Xuebin Li:** *Study Progress of Structural Design of Cyclone Separator*, Coal Mine Machinery, 2012. ISSN 1003-0794
- [9] **John F. Wendt,** *Computational Fluid Dynamics*, Springer Verlag, 2009.
ISBN 978-3-540-85056-4
- [10] **Ehairy E, Lacor C.:** *Numerical modeling of the flow field and performance in cyclones of different cone-tip diameters*, Computers & Fluids, 2011. ISSN 0045-7930
- [11] **Landau, Lev Davidovič, Lifšic, Evgenij M.:** *Mechanik*, Springer Verlag, 1997.
ISBN 978-3-817-11326-2
-

- [12] **Chorin, Alexandre Joel, Marsden, Jerrold E.**: *A mathematical introduction to fluid mechanics*, Springer Verlag, 1993. ISBN 978-3-540-97918-0
- [13] **Rüdiger Schwarze**: *CFD-Modellierung: Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*, Springer Verlag, 2013. ISBN 978-3-642-24377-6
- [14] **Khairy Elsayed, Chris Lacor**: *Turbulence and Interactions*, Springer Verlag, 2014. ISBN 978-3-662-43488-8
- [15] **Martin Sommerfeld**: *Bewegung fester Partikel in Gasen und Flüssigkeiten*, Springer Verlag, 2013. ISBN 978-3-642-19980-6
- [16] **Atakan Avci, Irfan Karagoz, Ali Surmen**: *Development of a new method for evaluating vortex length in reversed flow cyclone separators*, Powder technology, 2013. ISSN 0032-5910
- [17] **Koch W. H., Licht W.**: *New design approach boosts cyclone efficiency*, Chemical Engineering Journal, 1977. ISSN: 1385-8947
- [18] **ANSYS, Inc.**: *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*, Internet:
<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node1.htm>
-

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Geometrie von Standard Zyklon.....	13
Tabelle 5.1: Parameter von Partikel.....	19
Tabelle 8.1: Totaldruck am Eingang und Ausgang.....	49
Tabelle 8.2: Abscheidegrad unter unterschiedlichen Bedingungen.....	53
Tabelle 8.3: Abscheidegrad von Anthrazit mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern.....	63
Tabelle 8.4: Abscheidegrad von Asche mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Zyklon in Industrie und die Struktur eines Zylkons.....	4
Abbildung 4.1: Nomenklatur der charakteristischen Geometrie des Zylkons.....	12
Abbildung 4.2: Geometrie des Zylkons mit Schlitzeinlauf.....	13
Abbildung 4.3: Geometrie des Zylkons mit Rohreinlauf.....	13
Abbildung 4.4: Spiraleinlauf mit unterschiedlichen Winkeln.....	14
Abbildung 4.5: Brechnung des Spiralradius durch exzentrische Entfernung.....	14
Abbildung 4.6: Geometrie des Zylkons mit Spiraleinlauf.....	15
Abbildung 4.7: Geometrie des Zylkons mit Wendeleinlauf.....	16
Abbildung 6.1: Verteilung der Gesamtgeschwindigkeit.....	22
Abbildung 6.2: CS-Ebene.....	24
Abbildung 6.3: Verteilung der Tangentialgeschwindigkeit.....	26
Abbildung 6.4: Tangentialer Geschwindigkeitsverlauf bei Eintrittsgeschwindigkeit von 10 m/s.....	29
Abbildung 6.5: Verteilung der Axialgeschwindigkeit.....	30
Abbildung 6.6: Verteilung der Radialgeschwindigkeit.....	34
Abbildung 7.1: Verteilung des statischen Drucks.....	39
Abbildung 7.2: Verteilung des dynamischen Drucks.....	41
Abbildung 7.2: Verteilung des Totaldrucks.....	44
Abbildung 8.1: Beziehung zwischen Druckverlust und Geschwindigkeit.....	50
Abbildung 8.2: Druckverlust von unterschiedlichen Einlaufstrukturen.....	51
Abbildung 8.3: Abscheidegrad von Asche bei 10 m/s.	58
Abbildung 8.4: Abscheidegrad von Anthrazit und Asche mit Rohreinlauf bei 10 m/s.....	59
Abbildung 8.5: Abscheidegrad mit unterschiedlicher Einlaufstruktur.....	60
Abbildung 8.6: Abscheidegrad von Anthrazit mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern.....	64
Abbildung 8.7: Abscheidegrad von Asche mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern.....	64

Symbolverzeichnis

Lateinische Notation

Symbol	Bezeichnung	Einheit
a	Beschleunigung	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
B_c	Breite von Einlauf	mm
d, D	Durchmesser, allgemein	mm
D_c	Durchmesser von Zylinder	mm
D_i	Durchmesser von Auspuffrohr	mm
D_s	Durchmesser von Staubauspuffrohr	mm
F	Kraft, allgemein	N
F_p	Gradientkraf	N
F_B	Auftriebskraf	N
F_{Ba}	Basset-Kraft	N
F_s	Saffman-Kraft	N
F_M	Magnus-Kraft	N
F_G	Gravitation	N
F_m	Zusätzliche Massenkraf	N
F_D	Strömungswiderstand	N
H_c	Höhe von Einlauf	mm
k	kinetische Energie	J
L_c	Höhe von Zylinder	mm
M_{ges}	Menge der in den Zyklon eintretenden Partikel	-
M_{fa}	Menge der vom Zyklon gefangenen Partikel	-
M_{ent}	Menge der entkommenden Partikel	-
P	Druck, allgemein	Pa

Lateinische Notation

Symbol	Bezeichnung	Einheit
P_{total}	Totaldruck	Pa
P_{sta}	statischer Druck	Pa
P_{dyn}	dynamischer Druck	Pa
R_{sp}	Radius von Spirale	mm
S_c	Höhe von Auspuffrohr	mm
t	Zeit	s
u	Geschwindigkeit	$m \cdot s^{-1}$
V	Volumen, allgemein	mm^3
Z_c	Höhe von Kegel	mm

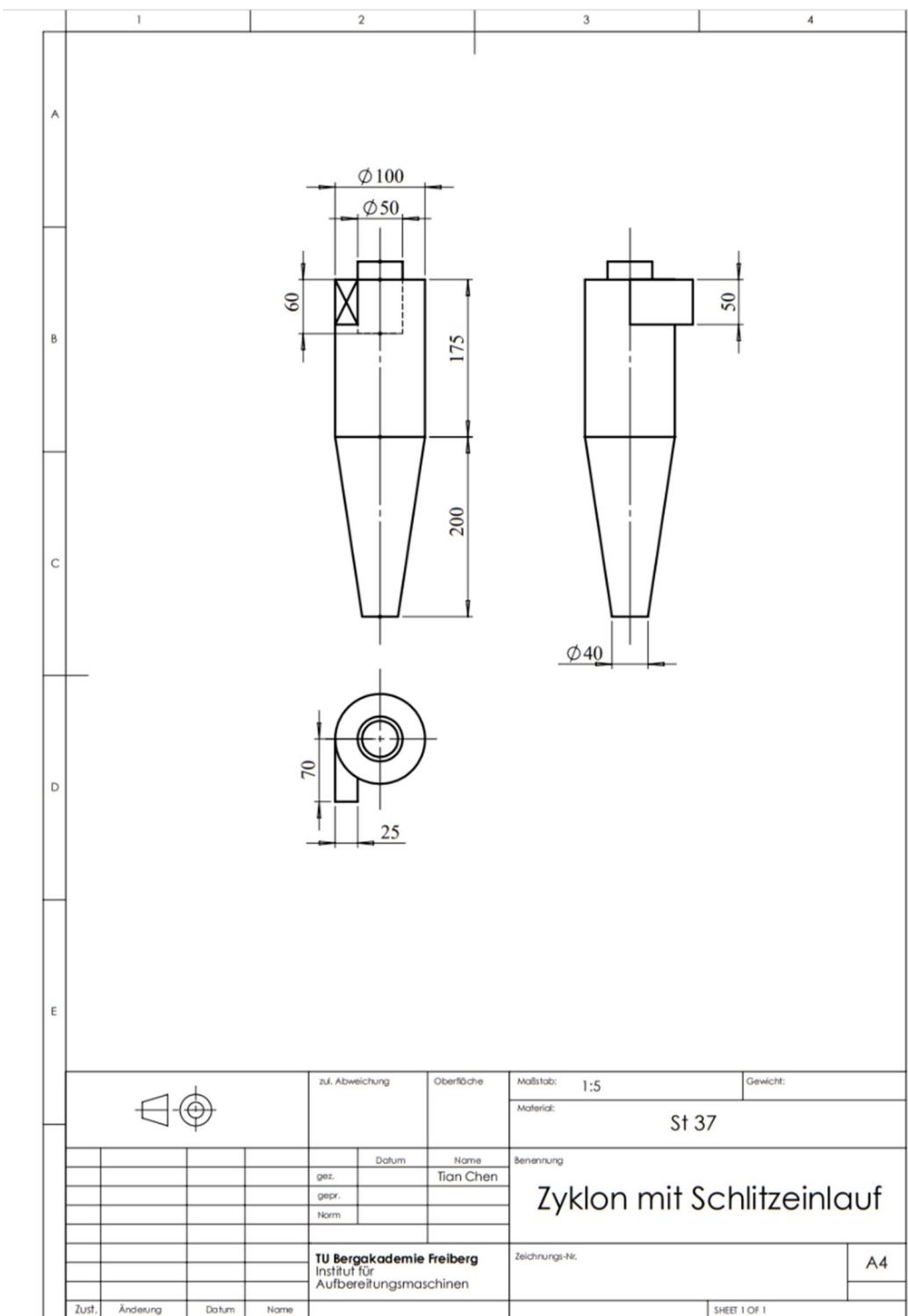
Griechische Notation

Symbol	Bezeichnung	Einheit
ρ	Dichte	$kg \cdot m^{-3}$
μ	Viskosität	$Pa \cdot s$
μ_t	Wirbelviskosität	$Pa \cdot s$
σ	Prandtl Nummer	-
ω	Frequenz	s^{-1}
ε	Dissipationsrate	-
δ_r	exzentrische Entfernung	mm
θ	Winkel von Spirale	°
η	Abscheidegrad	-

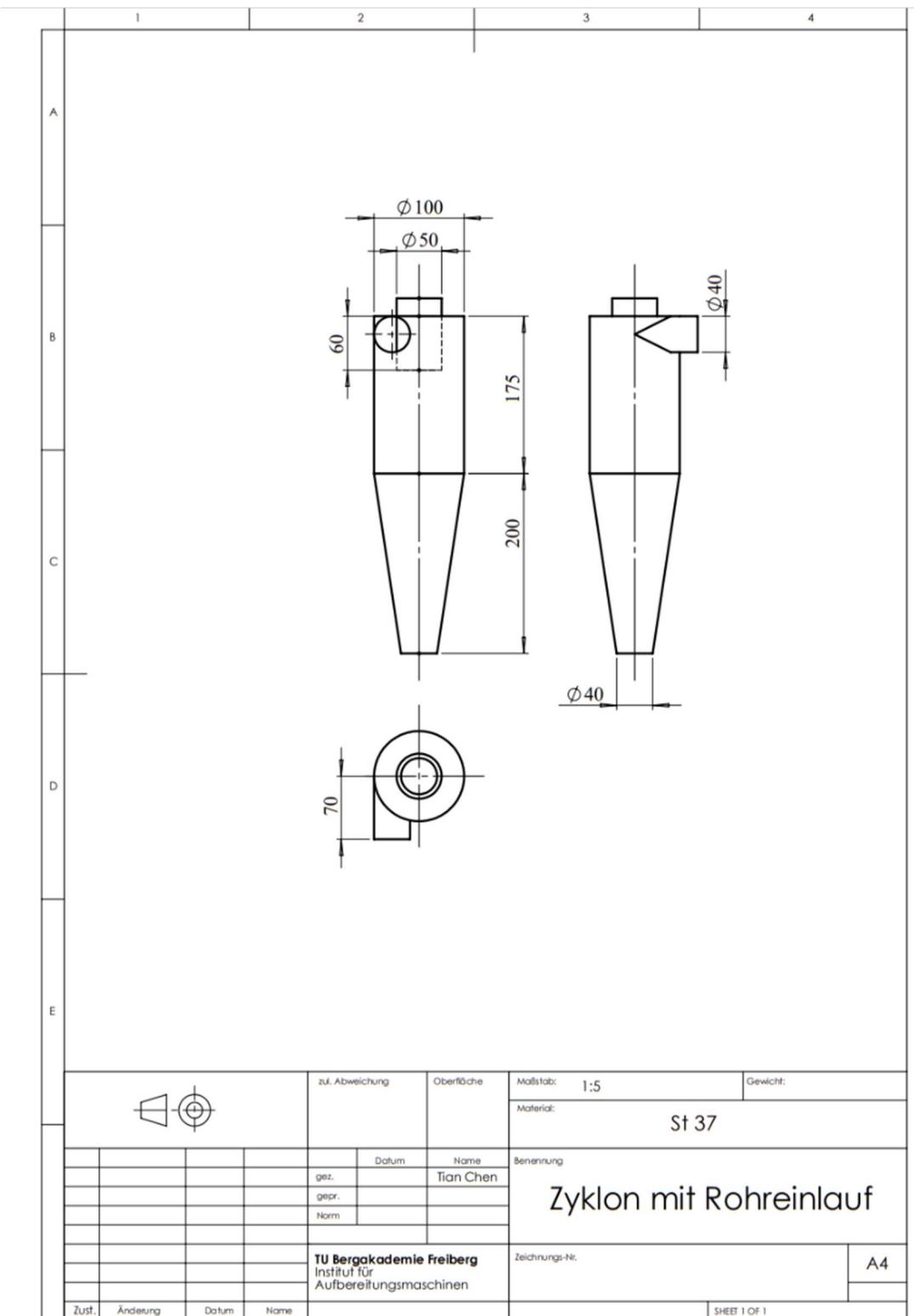
Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
CFD	Computational Fluid Dynamics
DPM	Discrete Phase Models
FEM	Finite-Elemente-Methode
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
QUICK	Quadratic Interpolation for Convective Kinematics
PRESTO	Pressure Staggering Option
SIMPLE	Semi implicit Method for Pressure Linked Equations
SIMPLEC	SIMPLE-Corrected

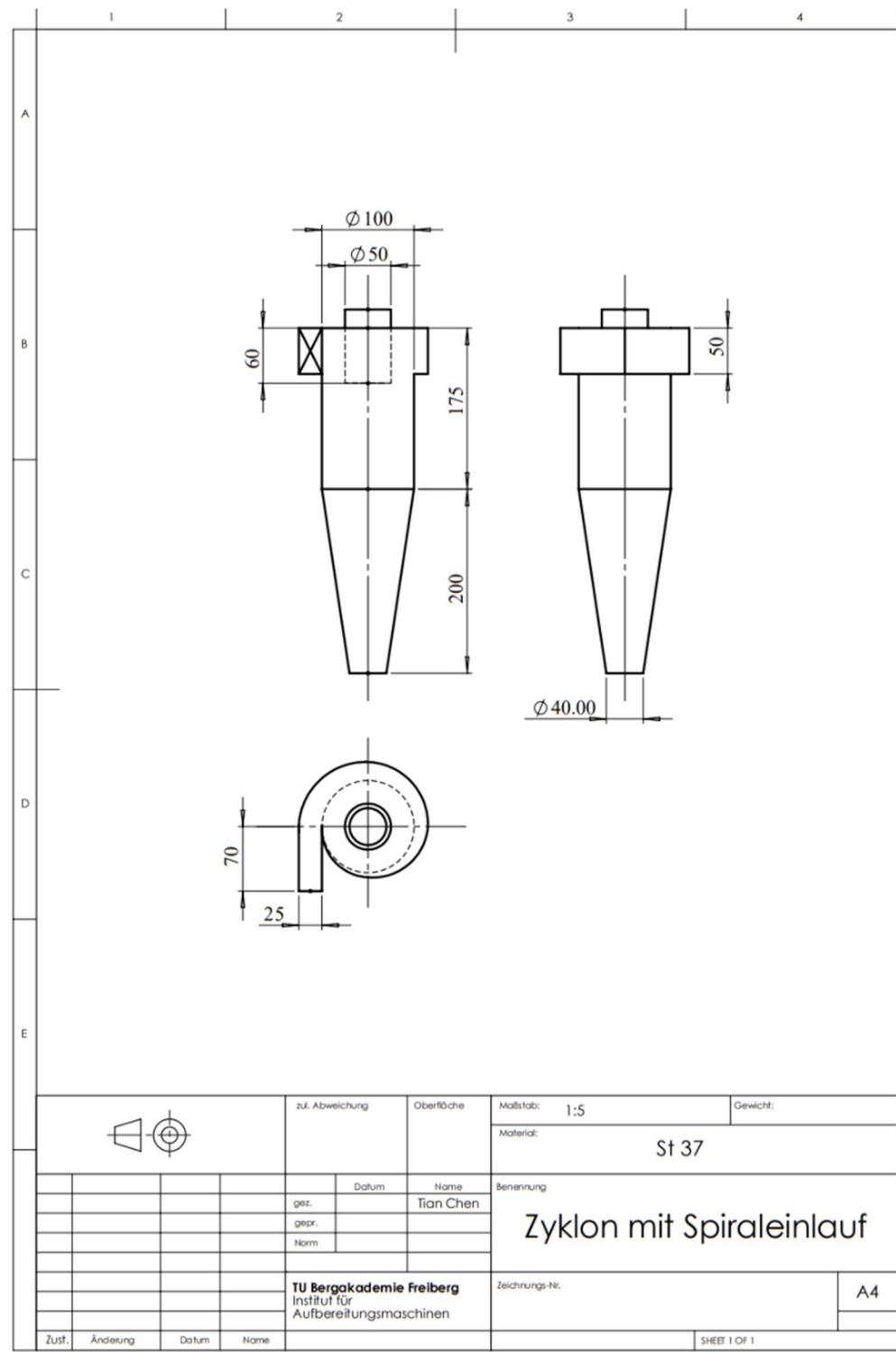
Anhang A: Technische Zeichnungen von Zyklon



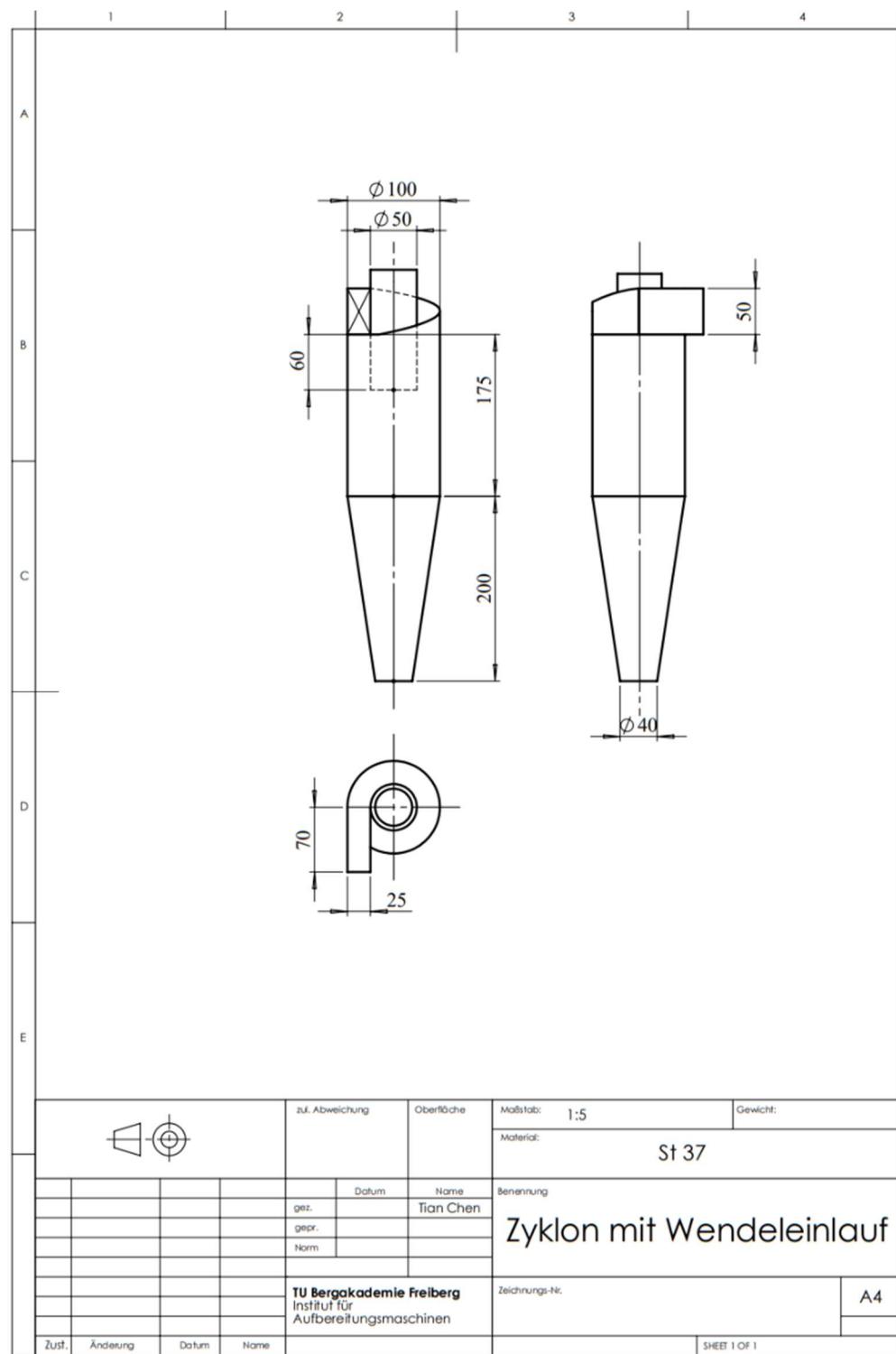
Anhang A.1: CAD-Zeichnung von Zyklon mit Schlitzeinlauf



Anhang A.2: CAD-Zeichnung von Zyklon mit Rohreinlauf



Anhang A.3: CAD-Zeichnung von Zyklon mit Spiraleinlauf



Anhang A.4: CAD-Zeichnung von Zyklon mit Wendeleinlauf