

Bachelor-Thesis
im
Studiengang
Maschinenbau Produktionstechnik

**3D-Design, FEM-Berechnung und Inbetriebnahme
eines Prüfstands für Industrieventilatoren**

Avraam Emvraizoglou
Matrikelnummer 703664

Düsseldorf
September 2024

Betreuender Professor

Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier
Strömungstechnik und Akustik
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Münsterstr. 156
40476 Düsseldorf
frank.kameier@hs-duesseldorf.de

Zweiter Prüfer

Alexander Mann
ISAVE
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Münsterstr. 156
40476 Düsseldorf
alexander.mann@hs-duesseldorf.de

Aufgabenstellung

Der reflexionsarme Kanalabschluss nach ISO 5136 schränkt die Aufbauvarianten eines Industrieventilatorenprüfstands gemäß ISO 5801 ein. Durch die Einbindung einer neu zu entwickelnden Höhenverstellung sollen die Erfordernisse nach beiden Normen erfüllt werden.

Die Bearbeitung der Thesis soll in folgenden Schritten erfolgen:

- Bestandsaufnahme und Ausmessung des Prüfstands Woche 1
- Erfassung des aktuellen Zustands des Prüfstands, insbesondere das Gestell des Motors Woche 1
- Dokumentation der Maße und spezifischen Eigenschaften des Prüfstands Woche 2
- Erstellung detaillierter 3D-Modelle des Prüfstands und des Motorgestells mithilfe von Inventor. Woche 3
- Konzeption und Entwicklung innovativer Ideen für die Umsetzung einer Höhenverstellung für das Motorgestell. Dabei sollen die Anforderungen an Stabilität und Bedienbarkeit berücksichtigt werden. Woche 4
- FEM-Berechnung / Simulation mittels ANSYS Workbench, um die Belastbarkeit und Funktionalität der Modelle zu validieren Woche 5-6
- Entsprechende Anpassung des Designs anhand der Simulationsergebnisse Woche 7
- Umbau und Inbetriebnahme des Prüfstands Woche 8-9
- Abschließende Dokumentation Woche 10-12



Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Bachelorthesis unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem betreuenden Professor, Frank Kameier, der mir diese Arbeit ermöglicht und mich stets mit wertvollen Ratschlägen und Anregungen unterstützt hat. Seine Motivation und Geduld waren für mich eine große Hilfe und haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ein großes Dankeschön geht auch an Tobias Pohlmann und Alexander Mann, die mir insbesondere bei allen Fragen zur FEM-Berechnung mit Rat und Tat zur Seite standen.

Ebenso möchte ich Achim Dörr danken, der mir bei technischen Fragen und der Konstruktion geholfen hat.

Von Herzen danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die stets an mich geglaubt, mich motiviert und unterstützt haben.



Düsseldorf, September 2024

Aufgabenstellung

Der reflexionsarme Kanalabschluss nach ISO 5136 schränkt die Aufbauvarianten eines Industrieventilatorenprüfstands gemäß ISO 5801 ein. Durch die Einbindung einer neu zu entwickelnden Höhenverstellung sollen die Erfordernisse nach beiden Normen erfüllt werden.

Die Bearbeitung der Thesis soll in folgenden Schritten erfolgen:

- Bestandsaufnahme und Ausmessung des Prüfstands Woche 1
- Erfassung des aktuellen Zustands des Prüfstands, insbesondere das Gestell des Motors Woche 1
- Dokumentation der Maße und spezifischen Eigenschaften des Prüfstands Woche 2
- Erstellung detaillierter 3D-Modelle des Prüfstands und des Motorgestells mithilfe von Inventor. Woche 3
- Konzeption und Entwicklung innovativer Ideen für die Umsetzung einer Höhenverstellung für das Motorgestell. Dabei sollen die Anforderungen an Stabilität und Bedienbarkeit berücksichtigt werden. Woche 4
- FEM-Berechnung / Simulation mittels ANSYS Workbench, um die Belastbarkeit und Funktionalität der Modelle zu validieren Woche 5-6
- Entsprechende Anpassung des Designs anhand der Simulationsergebnisse Woche 7
- Umbau und Inbetriebnahme des Prüfstands Woche 8-9
- Abschließende Dokumentation Woche 10-12

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	I
Inhaltsverzeichnis	II
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Ventilatoren	2
2.1.1 Bauvarianten	2
2.2 CAD	3
2.3 Nutzung von Autodesk Inventor zur Konstruktion	3
2.3.1 Skizzenerstellung	3
2.3.2 Extrusion	4
2.3.3 Ebenenerstellung	4
2.3.4 Spiegeln von Bauteilen	4
2.3.5 Erstellung von technischen Zeichnungen	4
2.4 Schrauben	5
2.5 FEM	5
2.5.1 Grundsätze und Anwendung	5
2.5.2 Festigkeitsberechnung	6
2.5.3 Modalanalyse	7
3 Der Prüfstand	8
3.1 DIN EN ISO 5136 & ISO 5801	8
3.2 Schematischer Aufbau	8
3.2.1 Radialventilator mit Gehäuse	10
3.2.2 Kanalaufbau	10
3.2.3 Der Drehkanal	10
3.2.4 Die Brüel & Kjaer-Schlitzrohrsonde	10
3.2.5 Der reflexionsarme Kanalabschluss	11
3.2.6 Der Schalldämpfer	11
3.2.7 Normblende nach DIN EN ISO 5167	11
3.2.8 Drosselvorrichtung	13
3.3 Durchführung der Messungen	13
3.3.1 Akustische Messungen und Auswertungen	13
3.3.2 Aerodynamische Messungen	13
4 Ausgangszustand / Bestandsaufnahme	14
4.1 Erfassung aller relevanten physikalischen Größen	14
4.2 Problemstellung	16
5 Konzept / Ideenfindung	17
5.1 Hebebühnen	17

5.1.1	Hydraulische Hebebühnen.....	17
5.1.2	Hebebühne mit Spindeltrieb.....	17
5.2	Modifikation des bestehenden Gestells mit Spindelstützen.....	17
5.3	Neue Konstruktion mittels ITEM-Profilen	18
5.4	Finale Idee: Umbau des bestehenden Gestells	18
5.5	Auswahl der benötigten Teile & Hilfsmittel.....	19
6	CAD.....	21
6.1	Ausgangszustand.....	21
6.2	Neue Konzepte / Ideen.....	21
6.3	Finales Modell	22
6.4	Rohrstrecke des Prüfstands	25
6.5	Griff für Bowdenzug des Hubwagens	26
7	FEM-Simulation ANSYS.....	27
7.1	Geometrieimport und Materialzuweisung.....	27
7.2	Optimierung der Schraubengeometrie	27
7.3	Aufteilung in Komponenten.....	28
7.4	Erstellung von Kontakten und Verbindungen.....	28
7.4.1	Verbundkontakte.....	28
7.4.2	Reibungskontakte	29
7.5	Einstellung der Kräfte und Lager	29
7.6	Netzgenerierung und -untersuchung	30
7.7	Ergebnisse	32
7.8	Diskussion der Festigkeitsrechnung	37
8	Umbau & Inbetriebnahme	38
8.1	Die neuen Bauteile & Hilfsmittel.....	38
8.2	Umbau des Hubwagens	39
8.3	Anordnung der Rohrstrecke für Radialventilatoren	39
8.4	Anschluss der Messtechnik	40
8.4.1	Messbedingungen	41
8.4.2	Software zur Messtechnik.....	41
8.4.3	Schaltbild der Messung in DASyLab	42
8.5	Ausstehende Maßnahmen.....	42
8.5.1	Überprüfung und Anpassung der Normblende	42
8.5.2	Drehmomentmessung am Pendelmotor.....	43
8.5.3	Beschaffung fehlender Teile	43
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	44
	Quellenverzeichnis.....	46

Anhang A	48
Eidesstattliche Erklärung	49

1 Einleitung

Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich mit der Wiederinbetriebnahme und Verbesserung eines Industrieventilatorenprüfstands, der sowohl den Anforderungen der ISO 5136 als auch der ISO 5801 gerecht wird. Der reflexionsarme Kanalabschluss gemäß ISO 5136 stellt spezifische Anforderungen an den Aufbau des Prüfstands, die die Flexibilität der Prüfstandskonfigurationen einschränken. Ziel dieser Arbeit ist es, durch die Integration einer neu entwickelten Höhenverstellung des Motors samt Gestell, diese Einschränkungen zu überwinden und die Erfordernisse beider Normen zu erfüllen.

Die Bearbeitung der Thesis erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden eine Bestandsaufnahme und Vermessung des bestehenden Prüfstands durchgeführt, um den aktuellen Zustand, insbesondere das Gestell des Motors, zu erfassen. Anschließend werden die Maße und spezifischen Eigenschaften des Prüfstands dokumentiert. Auf Basis dieser Daten werden detaillierte 3D-Modelle des Prüfstands und des Motorgestells mithilfe der CAD-Software Autodesk Inventor erstellt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden innovative Konzepte für die Umsetzung einer Höhenverstellung des Motorgestells entwickelt, wobei die Anforderungen an Stabilität und Bedienbarkeit berücksichtigt werden. Die Belastbarkeit und Funktionalität der entwickelten Modelle werden mittels FEM-Berechnungen und Simulationen in ANSYS Workbench validiert. Basierend auf den Ergebnissen dieser Simulationen wird das Design entsprechend angepasst.

Abschließend erfolgen der Umbau und die Inbetriebnahme des Prüfstands, gefolgt von einer umfassenden Dokumentation der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse. Diese strukturierte Vorgehensweise gewährleistet, dass sowohl die Anforderungen der ISO 5136 als auch der ISO 5801 erfüllt werden und der Prüfstand optimal für zukünftige Tests und Anwendungen vorbereitet ist.

Vorgesehen ist eine erste Inbetriebnahme mit der erforderlichen Messtechnik.

2 Grundlagen

Für eine gute Nachvollziehbarkeit späterer Kapitel dieser Arbeit, beschäftigt sich dieser Abschnitt mit den dazugehörigen theoretischen Grundlagen.

2.1 Ventilatoren

Die Funktion von Ventilatoren besteht darin, Luft zu bewegen und den Druck zu erhöhen. Ventilatoren zählen zu den Arbeitsmaschinen, was bedeutet, dass mechanische Energie über eine Antriebswelle und das Laufrad auf das jeweilige Fördermedium übertragen wird. In der Regel handelt es sich bei diesem Fördermedium um Luft oder Rauchgase. Die Umwandlung der mechanisch zugeführten Energie in aerodynamische Energie erfolgt hauptsächlich durch das Laufrad, wobei auch das Gehäuse des Ventilators eine Rolle spielt. Bei Radialventilatoren wird diese Umwandlung durch das Spiralgehäuse positiv unterstützt. [1]

2.1.1 Bauvarianten

Ventilatorlaufräder können grundsätzlich in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: die radiale und die axiale Laufradform.

Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2 zeigen den konstruktiven Unterschied der Laufräder. Beide Maschinen funktionieren jedoch nach dem gleichen Prinzip. Ein über die Antriebswelle übertragenes Drehmoment gibt der Luft, durch die Strömungsumlenkung in den Schaufeln des Laufrads, Energie. [1]

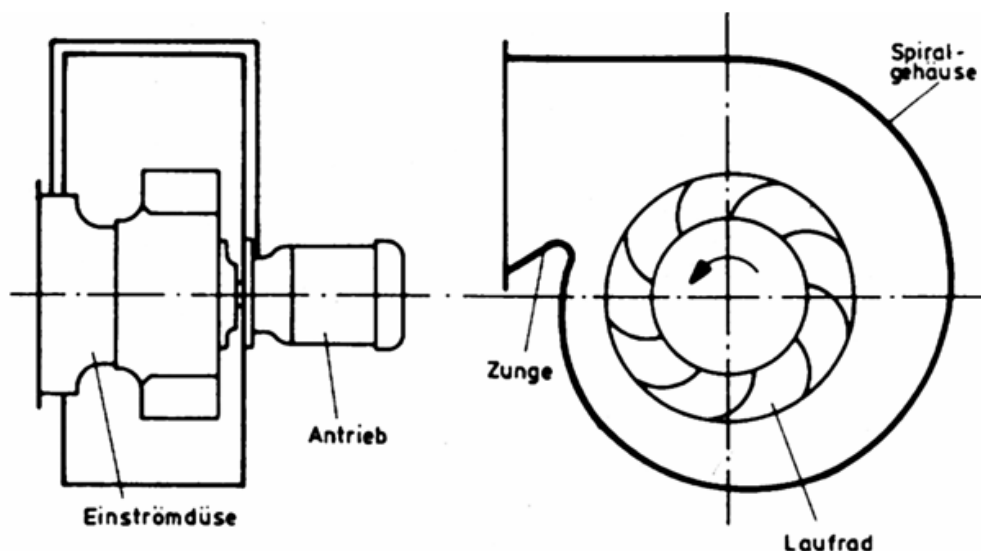


Abbildung 2-1: Radialventilator mit Spiralgehäuse. [1]

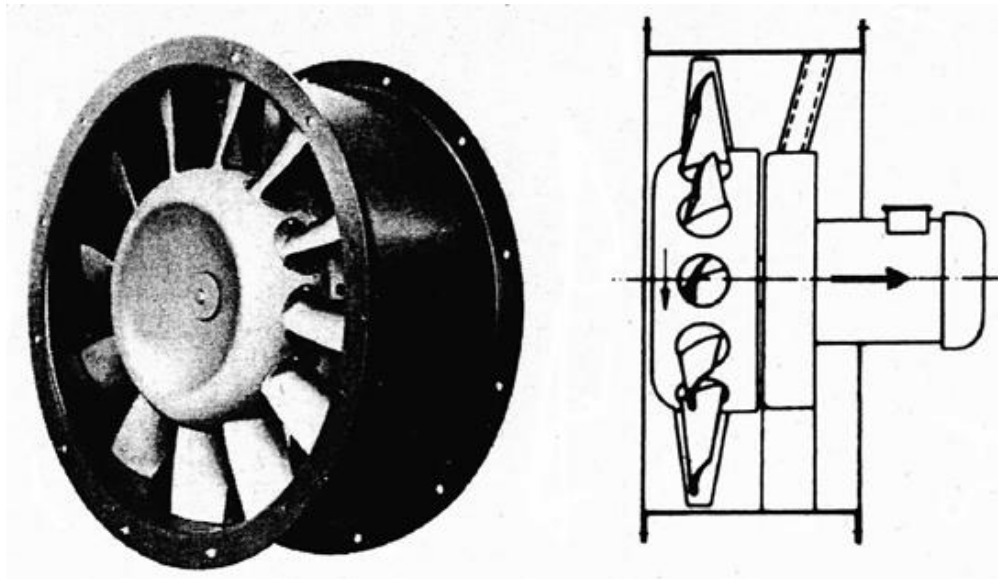


Abbildung 2-2: Axialventilator. [1]

2.2 CAD

CAD steht als Abkürzung für computer-aided design. Dieses Verfahren hat sich als alltägliches Werkzeug im Maschinenbau etabliert.

CAD-Programme werden nicht nur verwendet, um technische Zeichnungen, sondern auch um aussagekräftige dreidimensionale (3D) Modelle zu erstellen, welche für die Anfertigung verschiedener Simulationstypen genutzt werden.

Die 3D-Modelle dienen als Grundlage für die Herstellung und Prüfung von Bauteilen und Baugruppen. Durch die Exportfunktion können diverse Dateiformate erzeugt werden. [2]

2.3 Nutzung von Autodesk Inventor zur Konstruktion

Autodesk Inventor ist eine weit verbreitete CAD-Software im Maschinenbau, die es ermöglicht, Bauteile, Baugruppen und technische Zeichnungen zu erstellen und zu konstruieren. Dieser Text beschreibt die grundlegenden Funktionen von Inventor, einschließlich der Erstellung von Skizzen, Extrusionen, Ebenen und Spiegelungen.

Autodesk Inventor bietet eine Vielzahl von Werkzeugen und Funktionen, die die Konstruktion und Erstellung von Bauteilen erleichtern. [3]

2.3.1 Skizzenerstellung

Der erste Schritt bei der Konstruktion eines Bauteils in Inventor ist das Erstellen einer Skizze. Eine Skizze ist eine zweidimensionale Zeichnung, die als Grundlage für die 3D-

Geometrie dient. Um eine Skizze zu erstellen, wählt man eine Arbeitsebene aus und verwendet Werkzeuge wie Linien, Rechtecke und Kreise, um die gewünschte Geometrie zu zeichnen. [3]

2.3.2 Extrusion

Nach der Erstellung der Skizze kann diese extrudiert werden, um ein 3D-Bauteil zu erzeugen. Die Extrusion ist ein Prozess, bei dem eine zweidimensionale Skizze in die dritte Dimension erweitert wird. In Inventor kann zwischen Volumenkörper- und Flächenextrusionen gewählt werden. Die Extrusion erfolgt durch Auswahl der Skizze und Festlegung der Extrusionsparameter wie Tiefe und Richtung. [3]

2.3.3 Ebenenerstellung

Ebenen sind grundlegende Elemente in Inventor, die als Bezugspunkte für Skizzen und Konstruktionen dienen. Es gibt verschiedene Methoden zur Erstellung von Ebenen, wie z.B. das Versetzen von einer bestehenden Ebene, das Erstellen einer Ebene durch einen Punkt oder das Erstellen einer Ebene zwischen zwei Ebenen. Diese Ebenen können dann für weitere Konstruktionsschritte verwendet werden. [3]

2.3.4 Spiegeln von Bauteilen

Das Spiegeln ist eine nützliche Funktion, um symmetrische Bauteile zu erstellen. In Inventor können Bauteile oder Baugruppen entlang einer Ebene gespiegelt werden. Dazu werden die zu spiegelnden Komponenten und die Spiegelungsebene ausgewählt. Diese Funktion erleichtert die Konstruktion von Bauteilen, die eine symmetrische Geometrie aufweisen. [3]

2.3.5 Erstellung von technischen Zeichnungen

Technische Zeichnungen sind essenziell für die Fertigung und Montage von Bauteilen. In Inventor können detaillierte Zeichnungen aus 3D-Modellen abgeleitet werden. Diese Zeichnungen enthalten Ansichten, Bemaßungen und Anmerkungen, die für die Herstellung des Bauteils notwendig sind. Die Erstellung erfolgt durch Auswahl des 3D-Modells und Festlegung der gewünschten Ansichten und Details. [3]

2.4 Schrauben

Schraubenverbindungen sind essenzielle Elemente im Maschinenbau, die zur Verbindung und Befestigung von Bauteilen verwendet werden. Die VDI 2230 bietet eine systematische Vorgehensweise zur Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen und stellt sicher, dass diese funktions- und betriebssicher ausgelegt sind.

Eine Schraubenverbindung besteht typischerweise aus einer Schraube und einer Mutter oder einem Innengewinde im Bauteil. Die Hauptaufgabe der Schraube ist es, eine Vorspannkraft zu erzeugen, die die Bauteile zusammenhält. Diese Vorspannkraft muss ausreichend groß sein, um die auftretenden Betriebsbelastungen sicher aufzunehmen. [4]

2.5 FEM

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist eine numerische Methode, mit der Differenzialgleichungen gelöst werden, die in zahlreichen Bereichen der angewandten Mathematik und des Ingenieurwesens vorkommen. Besonders hilfreich ist sie für die Untersuchung von Problemen in den Bereichen Elektromagnetik, Fluidodynamik, Thermodynamik und Strukturmechanik. Die Vorgehensweise erlaubt es, komplexe Geometrien und Randbedingungen zu berücksichtigen, die mit analytischen Verfahren häufig nur schwer oder überhaupt nicht zu lösen sind. Dieses Kapitel befasst sich mit den Prinzipien der Strukturmechanik. [5]

2.5.1 Grundsätze und Anwendung

Die FEM basiert auf der Idee, ein fortlaufendes Problem in eine bestimmte Anzahl von Teilproblemen zu unterteilen. Dies erfolgt, indem das Untersuchungsgebiet in eine endliche Anzahl von kleinen, einfachen Teilgebieten unterteilt wird, die als finite Elemente bekannt sind. Mögliche Formen dieser Elemente sind Dreiecke, Vierecke und Tetraeder.

Die Anzahl der Knoten, an denen die Lösungsvariablen berechnet werden, bestimmt jedes dieser Elemente. Die Verteilung der Lösungsvariablen in jedem Element wird mithilfe von Approximationsfunktionen, die auch als Formfunktionen bezeichnet werden, interpoliert. In der Regel handelt es sich bei diesen Merkmalen um Polynome geringen Grades, die eine kontinuierliche und differenzierbare Lösung im gesamten Untersuchungsbereich sicherstellen.

Ein System algebraischer Gleichungen, das sich aus der Diskretisierung der zugrundeliegenden Differentialgleichungen und Randbedingungen ergibt, wird verwendet, um das ursprüngliche Problem zu lösen. Die Grundsätze der Variationsrechnung oder der Methode der gewichteten Residuen dienen als Grundlage für diese Gleichungen. Oftmals geschieht dies in der Strukturmechanik, indem das Prinzip der virtuellen Arbeit oder das Minimum der totalen potenziellen Energie angewendet wird. [5]

2.5.2 Festigkeitsberechnung

Bei FEM-Simulationen werden hauptsächlich zwei verschiedene Spannungen analysiert. Für die Analyse von einachsigen Belastungen in einer Geometrie ist die Normalspannung eine geeignete Methode.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-1)$$

F stellt die Kraft dar, die die Fläche senkrecht beeinflusst, während A die Querschnittsfläche darstellt, auf die sich die Kraft auswirkt. [5]

Die Spannung wirkt auf den Werkstoff als Flächenlast. Die Spannung, genauso wie die Kraft, besitzt eine Größe und eine Ausrichtung und ist in einem Koordinatensystem definiert. Zur Beschreibung des Spannungszustandes an einer spezifischen Stelle eines belasteten Körpers wird ein unendlich kleines Werkstoffelement betrachtet und die Spannungen beschrieben, die auf den Elementflächen wirken. [5]

Normalspannungen σ sind die Bezeichnungen für die Spannungen senkrecht zu den Flächen, während Schubspannungen τ die Bezeichnung für die Spannungen parallel zu den Flächen sind. Um den Spannungszustand eines kubischen Elements mit sechs Flächen und jeweils drei Spannungskomponenten vollständig zu beschreiben, ergibt sich eine Summe von 18 Zahlenwerten. Das Kräftegleichgewicht des Elements lässt darauf schließen, dass die Spannungskomponenten, die sich gegenüber befinden, in ihrer Ausrichtung und in ihrer Höhe gleich sein müssen. Dies hat zur Folge, dass die Zahl der unabhängigen Spannungsangaben auf neun gesenkt wird. In einer Matrix können diese neun Spannungskomponenten zusammengefasst werden, um den Spannungszustand an jedem Punkt eines Körpers darzustellen. [5]

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

Normalspannungen entstehen oft in simplen mechanischen Elementen wie Zugstäben, Druckstäben und Balken, worin sie dann analysiert werden. [6]

In der Festigkeitslehre dient die von-Mises-Spannung als skalare Spannungsgröße zur Vorhersage des Versagens von Materialien unter komplexen Belastungszuständen. Sie nimmt die Verzerrungsenergie des Materials in Betracht und ist insbesondere bei der Analyse duktiler Materialien hilfreich.

Die von-Mises-Spannungsgleichung in einem Hauptachsensystem ohne Schubspannung:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2-3)$$

Die Hauptspannungen in den drei orthogonalen Richtungen sind $\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$.

Um die Sicherheit gegen plastisches Versagen zu bewerten, wird die Von-Mises-Spannung häufig genutzt, um die Vergleichsspannung in einem Bauteil zu bestimmen. Diese wird dann mit der Fließgrenze des Materials aus dem einachsigen Zugversuch verglichen. Die von-Mises-Spannung wird bei ANSYS-Mechanical als Vergleichsspannung definiert. [6]

2.5.3 Modalanalyse

Die Modalanalyse in ANSYS wird verwendet, um die dynamischen Merkmale eines Systems zu untersuchen. Insbesondere um die Eigenfrequenzen und Eigenmoden eines Strukturmodells zu bestimmen. Um ein Verständnis für das Verhalten von Materialien und Strukturen unter dynamischen Lasten zu erlangen, wie es etwa bei Vibrationen oder Erdbeben der Fall sein kann, ist diese Analyse von großer Bedeutung. Im vorliegenden Fall kann der Motor mit der Rotationswelle den Prüfstand dynamisch anregen. [7]

3 Der Prüfstand

In diesem Kapitel wird der schematische Aufbau des Prüfstands, der Komponenten und der Messtechnik erläutert. Darüber hinaus gibt es eine kurze Beschreibung der DIN-Normen, an die der Aufbau des Prüfstands angelehnt ist.

3.1 DIN EN ISO 5136 & ISO 5801

DIN EN ISO 5801: Diese Norm legt die Methoden zur Leistungsmessung von Ventilatoren aller Art fest, mit Ausnahme von reinen Umluftventilatoren und sogenannten Strahlventilatoren. Sie enthält Schätzungen zur Messunsicherheit und gibt Umrechnungsregeln für die Prüfergebnisse bei Änderungen der Drehzahl, des geförderten Gases und, bei Modellversuchen, der Maße innerhalb festgelegter Grenzen. [8]

DIN EN ISO 5136: Diese Norm definiert eine Methode zur Messung der Schallleistung, die von kanalgebundenen Ventilatoren und anderen Strömungsmaschinen in einen reflexionsarm endenden Kanal abgestrahlt wird. Sie ist auf Geräte anwendbar, die breitbandigen, schmalbandigen oder tonalen Dauerschall erzeugen. Sie gilt für Lufttemperaturen zwischen -50 °C und $+70\text{ °C}$. [9]

3.2 Schematischer Aufbau

In Abbildung 3-1 wird der schematische Aufbau des Prüfstands dargestellt, wie er an der Hochschule Düsseldorf vielfach eingesetzt wurde. Die Abbildung zeigt die Anordnung der verschiedenen Komponenten, die für die Durchführung der Messungen erforderlich sind. Die detaillierte Beschreibung der einzelnen Komponenten ist in Tabelle 3-1 aufgeführt. [10]

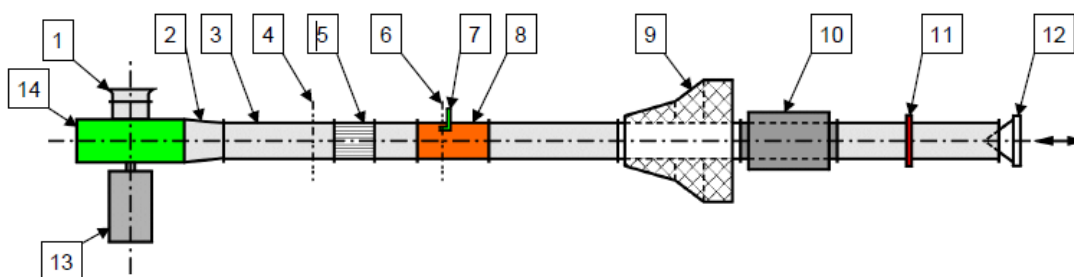


Abbildung 3-1: Schematischer Aufbau des Prüfstands. [10]

Tabelle 3-1: Bezeichnung der Komponenten. [10]

Nummer	Bezeichnung
1	Einlaufdüse
2	Übergangsstück
3	Zwischenkanal
4	Ringkanal
5	Gleichrichter (austauschbar)
6	Messebene des Mikrofons
7	Messmikrofon mit Schlitzrohrsonde
8	Drehkanal
9	Reflexionsarmer Abschluss
10	Durchgangsschalldämpfer
11	Ringkammerblende
12	Drossel (motorisch verstellbar)
13	Elektromotor (Pendelmotor)
14	Ventilator

3.2.1 Radialventilator mit Gehäuse

Ein Pendelmotor mit einer maximalen Leistung von 30 kW treibt den Radialventilator direkt an. Dieser Ventilator verfügt über zehn rückwärts gekrümmte Schaufeln mit einem Austrittswinkel von 41° . Er ist in einem Spiralgehäuse gemäß der Einbaukategorie RD und einem Befestigungswinkel von 90° montiert. Aufgrund des Laufradverhältnisses von etwa 2,3 wird der Radialventilator der Baureihe 22 zugeordnet und als RV722 bezeichnet. [11]

3.2.2 Kanalaufbau

Gemäß den Vorgaben der DIN ISO 5136 sind die Kanäle gerade und koaxial zum Ein- und Auslass des Ventilators ausgerichtet, wobei sie über ihre gesamte Länge einen konstanten, kreisförmigen Querschnitt aufweisen. Die Kanäle und Übergangsstücke bestehen aus Stahl mit einer Mindestdicke von 1 mm, um eine schallharte und glatte Innenfläche zu gewährleisten. [11]

3.2.3 Der Drehkanal

Der Drehkanal wird durch einen Linearantrieb mittels eines Zahnriemens angetrieben und rotiert mit einer Geschwindigkeit von 1 U/min. Auf dem Drehkanal ist eine Zugangs-klappe angebracht, an der die Schlitzrohrsonde zusammen mit dem Kondensatormikrofon in axialer Richtung, parallel zur Kanalachse und in Richtung des Ventilators, befestigt ist. Der Abstand der Schlitzrohrsonde zur Kanalachse beträgt gemäß DIN EN ISO 5136 0,16 m. [11]

3.2.4 Die Brüel & Kjaer-Schlitzrohrsonde

Die Schlitzrohrsonde, auch als Turbulenzschirm bezeichnet, besteht aus einem Metallrohr mit einem Längsschlitz. Dieser Schlitz ist mit einem porösen Material hinterlegt, in das das Mikrofon eingebettet wird. Dadurch reagiert das Mikrofon weniger empfindlich auf selbstinduzierte Strömungsgeräusche und durch Turbulenzen verursachte Wechseldruckschwankungen des Luftdrucks im Kanal. [11]

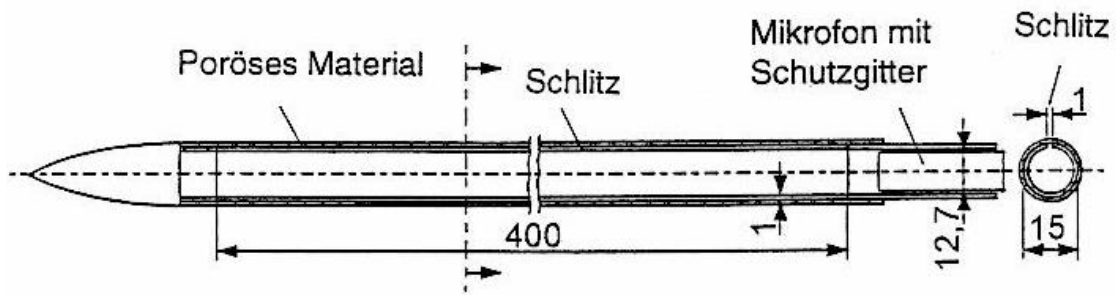


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung einer Schlitzrohrsonde für ein 1/2-Zoll-Mikrofon.
[11]

3.2.5 Der reflexionsarme Kanalabschluss

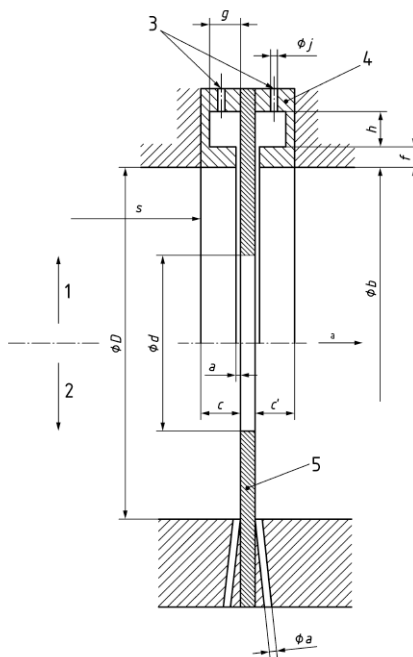
Ein wesentliches Merkmal eines reflexionsarmen Kanalabschlusses ist die allmähliche Erweiterung des Kanals, um Reflexionen der Schallwellen zurück in den Kanal zu verhindern, die die Schallpegelmessungen beeinträchtigen könnten. In diesem Fall wurde die allmähliche Vergrößerung der Kanalquerschnittsfläche in Form eines Exponentialtrichters realisiert, der mit Dämmmaterial gefüllt ist. [11]

3.2.6 Der Schalldämpfer

Der Schalldämpfer ist mit Mineralwolle gefüllt, die in einem Hohlraum um den Rohrkanal eingebracht wurde. Diese Mineralwolle absorbiert einen Großteil der durch die Drossel erzeugten Schallenergie. Dadurch wird der Gesamtschallleistungspegel hinter der Messstelle reduziert, was eine präzise Messung der abgestrahlten Schallleistung des Ventilators ermöglicht. [11]

3.2.7 Normblende nach DIN EN ISO 5167

Die Normblende besteht aus einer flachen Scheibe mit einer kreisförmigen, scharfkantigen Einlassöffnung, die einen Durchmesser von $d = 0,318 \text{ m}$ ($\beta=0,8$) aufweist. Sie ist mit Fassungsringen ausgestattet, die Druckentnahmebohrungen oder -schlitze enthalten. Die Normblende dient zur Messung der Wirkdruckdifferenz, welche zur Berechnung des Volumenstroms erforderlich ist. Abbildung 3-3 zeigt eine Zeichnung der Blende, ergänzt durch eine Legende gemäß DIN-Norm. Die aktuell verbaute Blende ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Für die Auswertung der Messungen befindet sich im Anhang A eine Excel-Tabelle. [11]



Legende

- | | |
|---|---|
| 1 Fassungsring mit ringförmigem Schlitz | f Schlitztiefe |
| 2 Einzel-Druckentnahmen | c Breite des Fassungsringes im Einlauf |
| 3 Druckentnahmen | c' Breite des Fassungsringes im Auslauf |
| 4 Fassungsring | b Durchmesser des Fassungsringes |
| 5 Blende | a Schlitzweite oder Durchmesser der Einzel-Druckentnahme |
| ^a Strömungsrichtung. | s Abstand zwischen dem Durchmessersprung auf der Einlaufseite |
| | g, h Maße der Ringkammer |
| | j Durchmesser der Druckentnahme aus der Ringkammer |

Abbildung 3-3: Normblende nach DIN EN ISO 5167. [12]



Abbildung 3-4: Aktuell verbaute Normblende.

3.2.8 Drosselvorrichtung

Am Ende der Rohrleitung ist ein verstellbares Drosselgerät angebracht. Die Drosselvorrichtung gestattet eine Variation des Betriebspunktes bei gleichbleibender Drosselkennlinie. Dadurch können die Betriebsbedingungen eingestellt werden, unter denen eine Geräuschanalyse des Ventilators erwünscht ist. So können verschiedene Geräuschanalysen unter denselben Betriebsbedingungen miteinander verglichen werden. [11]

3.3 Durchführung der Messungen

„Die Messungen gliedern sich in zwei Bereiche. Der erste Bereich der Messungen umfasst die Messung der aerodynamischen Daten und der zweite Bereich die Messung der akustischen Daten. Aerodynamische Messungen sind notwendig, um die akustischen Messungen Betriebspunkten zuordnen zu können.“ [11]

3.3.1 Akustische Messungen und Auswertungen

Die akustischen Messungen werden im Drehkanal mit dem Brüel&Kjaer-Kondensatormikrofon Typ 4133 durchgeführt, das in einer Brüel&Kjaer-Schlitzrohrsonde befestigt ist. Der Drehkanal wird von einem Schrittmotor angetrieben, der über einen Zahnriemen mit der TLC 511-F Positioniersteuerung verbunden ist, welche an einen Rechner angeschlossen ist. Die Positioniersteuerung wird am Rechner mit einem in LabVIEW von Klitz geschriebenen Programm bedient. Zusätzlich dient dieser Rechner mit einer ROGA-Soundkarte dazu, Signale vom Brüel & Kjaer-Kondensatormikrofon Typ 4133, die durch den Brüel & Kjaer-Verstärker „Nexus“ verstärkt werden, zu empfangen und auszuwerten. Der Drehkanal ermöglicht es, durch die konstante Umlaufgeschwindigkeit von 1 U/min, die Signale 60 Sekunden lang aufzunehmen. Die standardisierten Wave-Files werden in der Regel mit Matlab ausgewertet. [11]

3.3.2 Aerodynamische Messungen

Die aerodynamischen Messungen werden mithilfe eines Computers durchgeführt, der die Messgrößen p_b , T_E , n , M , dp_a , dp_1 , dp_{B1} , T_1 erfasst.

Die Daten werden über RS232-Schnittstellen sowie über einen AD-Wandler via National Instruments DAG erfasst. Die Bedienung erfolgt mittels DASYLab. [11]

4 Ausgangszustand / Bestandsaufnahme

In diesem Kapitel wird der aktuelle Zustand des Prüfstands und die händischen Abmessungen, die durchgeführt wurden, detailliert dargestellt. Diese Bestandsaufnahme bildet die Grundlage für weitere Untersuchung und Analyse.

Zunächst gibt es einen Überblick über den Prüfstand, seiner Konstruktion und seiner Hauptkomponenten. Zu Beginn dieser Arbeit besteht der Prüfstand aus anderen Komponenten, da dieser zuletzt für Axialventilatoren benutzt wurde. In dieser Arbeit wird nur auf die Komponenten eingegangen, welche den Aufbau mit einem Industrieventilator radialer Bauart relevant sind.

Anschließend werden die Ergebnisse der händischen Ausmessungen dargestellt. Diese umfassen quantitative Daten wie z.B. Abmessungen und Gewicht, welche wichtig für die Erstellung der CAD-Modelle sind.

Durch diese Bestandsaufnahme wird ein klares Bild vom aktuellen Zustand des Prüfstands abgebildet und die Bereiche identifiziert, in denen Verbesserungen oder Anpassungen notwendig sind.

4.1 Erfassung aller relevanten physikalischen Größen

Da es für den Prüfstand und Motor mit Gestell weder technischen Zeichnungen noch CAD-Modelle gibt, werden alle notwendigen Bauteile händisch ausgemessen.

Folgende Hilfsmittel kommen zum Einsatz:

- Gliedemaßstab
- Maßband
- Kranwaage

Mit Hilfe dieser Hilfsmittel wurden alle relevanten Abmessungen und das Gewicht des Motors samt Gestell ermittelt. Das Gewicht des Motors mit Gestell wurde ohne Ventilator ermittelt. Anschließend wurde der Ventilator an den Motor montiert, damit die aktuelle Höhendifferenz zur Rohrstrecke ermittelt werden kann. Die dokumentierten Parameter sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Abbildung 4-1 zeigt den zuvor erwähnten Motor mit Radialventilator und dem Gestell.

Tabelle 4-1: Ermittelte Parameter des Prüfstands

Parameter	Einheit	Wert
Innendurchmesser der Rohre	mm	400
Außendurchmesser der Rohre	mm	405
Höhe der Rohre - tiefster Punkt bis zum Boden	mm	1820
Gewicht des Motors mit Gestell	kg	750
Höhendifferenz zwischen Ventilator und Rohrstrecke	mm	340

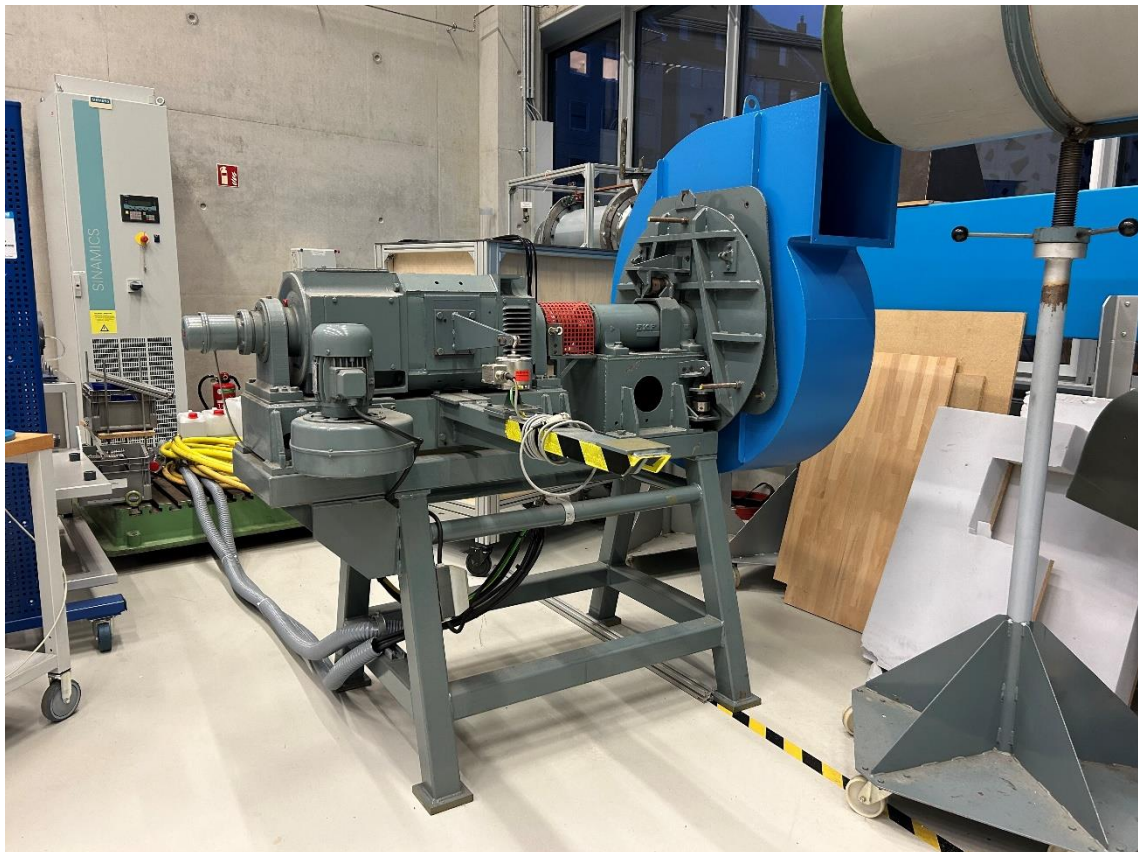


Abbildung 4-1: Pendelmotor mit Radialventilator auf Gestell.

4.2 Problemstellung

Die Problemstellung dieser Bachelorarbeit ergibt sich aus den spezifischen Anforderungen der Normen ISO 5136 und ISO 5801, die an den Prüfstand für Industrieventilatoren gestellt werden. Insbesondere der reflexionsarme Kanalabschluss gemäß ISO 5136 stellt Anforderungen an den Aufbau des Prüfstands, was die Flexibilität der Prüfstandskonfiguration erheblich einschränkt. Diese Einschränkungen können die Durchführung von Tests und die Validierung von Ventilatoren unter realistischen Bedingungen beeinträchtigen.

Ein zentrales Problem ist die Notwendigkeit, eine Höhenverstellung des Motorgestells zu integrieren, um den Anforderungen beider Normen gerecht zu werden. Die neue Höhenverstellung benötigt mindestens einen Hub von 340 mm, damit der aktuelle Radialventilator angeschlossen werden kann. Darüber hinaus muss die Rohrstrecke für Radialventilatoren neu angeordnet werden und die modifizierte und aktualisierte Messtechnik muss angeschlossen werden. Die bestehende Konstruktion des Prüfstands bietet möglicherweise nicht die erforderliche Anpassungsfähigkeit, um verschiedene Ventilortypen und -größen zu testen. Daher ist es erforderlich, innovative Konzepte zu entwickeln, die sowohl die Stabilität als auch die Bedienbarkeit der Höhenverstellung gewährleisten.

Zusätzlich müssen die entwickelten Lösungen hinsichtlich ihrer Belastbarkeit und Funktionalität validiert werden.

5 Konzept / Ideenfindung

Die Modernisierung eines höhenverstellbaren Antriebs samt Gestell für einen Radialventilator stellt eine komplexe Herausforderung dar, insbesondere aufgrund des zu hebenden Gewichts von ca. 1000 kg. Im Rahmen der Konzept- und Ideenfindung wurden mehrere Ansätze untersucht, um eine optimale Lösung zu entwickeln.

5.1 Hebebühnen

5.1.1 Hydraulische Hebebühnen

Eine der ersten Überlegungen war der Einsatz von hydraulischen Hebebühnen. Diese bieten den Vorteil einer hohen Tragfähigkeit und einer stufenlosen Höhenverstellung. Hydraulische Systeme sind bekannt für ihre Zuverlässigkeit und die Fähigkeit, große Lasten präzise zu bewegen. Allerdings sind sie oft mit hohen Kosten und einem erhöhten Wartungsaufwand verbunden, was ihre Anwendung in diesem speziellen Fall weniger attraktiv machte.

5.1.2 Hebebühne mit Spindeltrieb

Ein weiterer Ansatz war die Verwendung eines Spindeltriebs. Spindeltriebe zeichnen sich durch ihre hohe Präzision und Belastbarkeit aus. Sie ermöglichen eine exakte Höhenverstellung und sind in der Regel wartungsärmer als hydraulische Systeme. Der Nachteil liegt jedoch in der Komplexität der Konstruktion und der Notwendigkeit einer genauen Ausrichtung der Spindeln, um eine gleichmäßige Lastverteilung zu gewährleisten.

5.2 Modifikation des bestehenden Gestells mit Spindelstützen

Die nächste Idee bestand darin, das bestehende Gestell so umzubauen, dass Spindelstützen daran montiert werden können. Diese Lösung würde es ermöglichen, die vorhandene Struktur beizubehalten und lediglich die Höhenverstellung zu optimieren. Durch die Integration von Spindelstützen könnte eine kostengünstige und effiziente Lösung realisiert werden. Allerdings müsste die Stabilität des Gestells gewährleistet werden, um die Sicherheit während des Betriebs zu garantieren. Abbildung 5-1 zeigt ein 3D-Modell einer solchen Spindelstütze.



Abbildung 5-1: 3D-Modell einer Spindelstütze. [13]

5.3 Neue Konstruktion mittels ITEM-Profilen

Eine weitere Überlegung war die komplette Neugestaltung des Gestells unter Verwendung von ITEM-Profilen. Diese Aluminiumprofile bieten eine hohe Flexibilität und Modularität, was eine einfache Anpassung und Erweiterung der Konstruktion ermöglicht. ITEM-Profile sind leicht und dennoch stabil, was sie zu einer attraktiven Option für den Bau von Maschinenrahmen macht. Der Nachteil dieser Lösung liegt in den höheren Materialkosten und dem Aufwand für die Neukonstruktion.

In der Überlegung einer neuen Konstruktion mittels ITEM-Profilen wurde Aluminium als Material gewählt. Aluminiumprofile sind leicht, korrosionsbeständig und bieten eine hohe Flexibilität in der Konstruktion. Sie sind jedoch teurer als Stahl und bieten eine geringere Tragfähigkeit, was sie für die finale Lösung weniger geeignet macht.

5.4 Finale Idee: Umbau des bestehenden Gestells

Die finale und bevorzugte Idee ist der Umbau des bestehenden Gestells. Hierbei sollen Stahlprofile an die bisherigen Füße mithilfe von 10mm dicken Stahlplatten angeschweißt werden. In diese verschweißten Stahlprofile können weitere Stahlprofile verschraubt werden.

Das Gestell soll mittels eines speziellen Hubwagens (Hubweg bis zu 830 mm) auf die gewünschte Höhe angehoben werden, woraufhin die losen Stützen herabgesenkt und verschraubt werden. Diese Lösung bietet eine robuste und kosteneffiziente Möglichkeit, die

Höhenverstellung zu realisieren, ohne die gesamte Struktur neu zu gestalten. Mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) können ohne großen Aufwand Berechnung und Simulation durchgeführt werden, um die Stabilität und Belastbarkeit der Konstruktion zu überprüfen.

Für die tragenden Elemente des Gestells wurden 80 x 80 S235JR Stahlprofile gewählt. Mit einer Wandstärke von 8mm und einer Länge von 675 mm. Die Verschraubungen sollen mittels M16 Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 erfolgen. Mit dieser Konstruktion soll eine Anhebung von bis zu 375 mm möglich sein.

Stahl bietet eine hohe Festigkeit und Steifigkeit, was besonders wichtig ist, um das Gewicht von ca. 1000 kg sicher zu tragen. Zudem ist Stahl kostengünstig und gut verfügbar, was die Materialwahl wirtschaftlich attraktiv macht. Die Schweißbarkeit von Stahl ermöglicht eine stabile Verbindung der Profile, was die Gesamtkonstruktion zusätzlich verstärkt.

5.5 Auswahl der benötigten Teile & Hilfsmittel

Alles, was für die Umsetzung der neuen Konstruktion benötigt wird, kann aus Tabelle 5-1 entnommen werden. Bei der Stahlauswahl handelt es sich um einen S235JR (alte Bezeichnung ST 37).

Tabelle 5-1: Liste der Teile & Hilfsmittel für die neue Konstruktion.

Anzahl	Bauteil	Beschreibung
8	Winkel (Stahl)	80 x 80 / 8mm Wandstärke / 675mm Länge
8	Dreiecke (Stahl)	Maße anhand der CAD-Zeichnung
4	Fußplatte (Stahl)	100 x 100 x 8 mm (Rechteck)
32	/	Unterlegscheiben
16	M16 8.8	Sechskantmuttern
16	M16 x 55 8.8	Sechskantschrauben mit Schaft
1	Hubwagen	fetra Scheren-Hubwagen 6821

Der Scheren-Hubwagen, welcher in Abbildung 5-2 zu sehen ist, hat einen Hubbereich von 85 – 830mm und eine Traglast von 1000kg. Dieser erfüllt die gewünschten Anforderungen für die Umsetzung der finalen Idee.



Abbildung 5-2: Scherenhubwagen – fetra 6821. [14]

6 CAD

In diesem Abschnitt erfolgen die Darstellung und Beschreibung der erzeugten Modelle. Die wichtigsten Konstruktionsschritte, die im Zusammenhang dieser Arbeit verwendet wurden, können in Kapitel 2.3 eingesehen werden. Zur Darstellung werden 3D-Modelle genutzt. Die wichtigsten Bemaßungen können in Kapitel 6.3 anhand der 2D-Zeichnungen entnommen werden.

6.1 Ausgangszustand

In Abbildung 6-1 wird das Gestell in seinem Ausgangszustand dargestellt.



Abbildung 6-1: 3D-Modell des Gestells im Ausgangszustand.

6.2 Neue Konzepte / Ideen

Abbildung 6-2 zeigt eine neue Konstruktion mittels ITEM-Profilen. Dabei sollte der obere Rahmen aus Stahl unverändert bleiben. Die 3D-Dateien der ITEM-Profile können sehr praktisch in verschiedenen Variationen und den benötigten Formaten von der ITEM-Homepage bezogen werden.



Abbildung 6-2: 3D-Modell eines Entwurfs mittels ITEM-Profilen.

Die Idee das alte Gestell mittels Spindelstützen umzurüsten, wird in Abbildung 6-3 dargestellt. Dabei werden die Spindelstützen als rechteckige Säulen konstruiert, um das Modell zu vereinfachen.

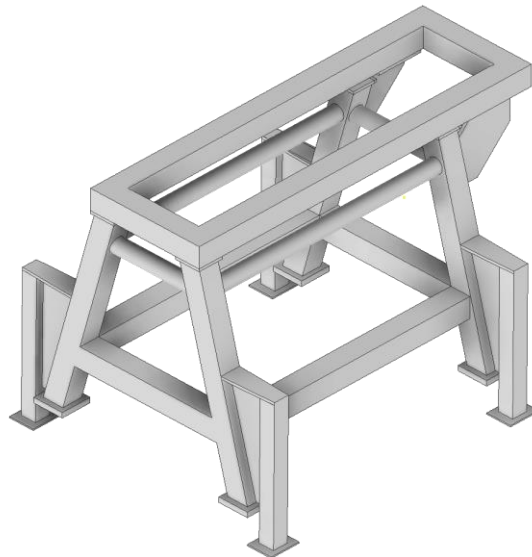


Abbildung 6-3: 3D-Modell einer Konstruktion mit Spindelstützen.

6.3 Finales Modell

Als Erstes wurden für jedes Tischbein zwei Dreiecke erzeugt, welche verschweißt werden und die Grundlage für einen weiteren Umbau bilden. Dieses Modell wird in Abbildung 6-4 dargestellt.

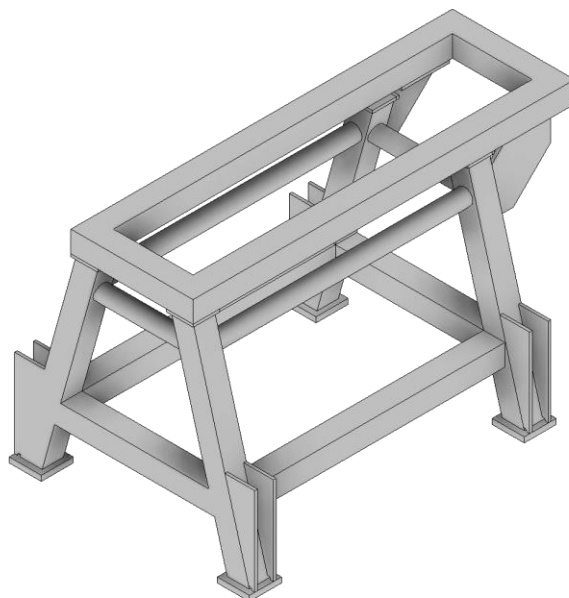


Abbildung 6-4: 3D-Modell mit angeschweissten Dreiecken zur Befestigung der neuen Füße.

Abbildung 6-5 zeigt die Auswahl der verwendeten Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben. Darüber hinaus wird auch die ISO-Bohrung erwähnt. Mit Hilfe des Schraubenverbindungs-Generators wurden die Bohrungen und Schraubenverbindungen erzeugt.

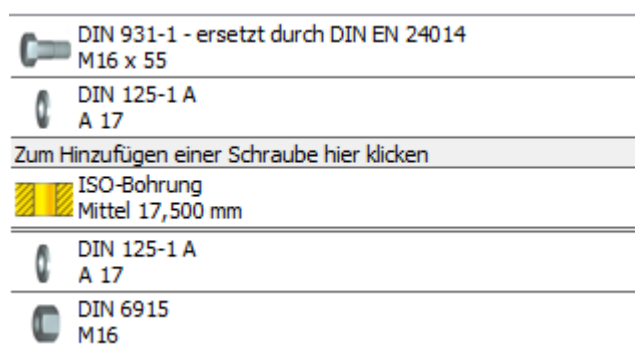


Abbildung 6-5: Schraubenverbindungs-Generator.

Das endgültige Modell, mit allen benötigten Anbauten, wird in Abbildung 6-6 dargestellt.

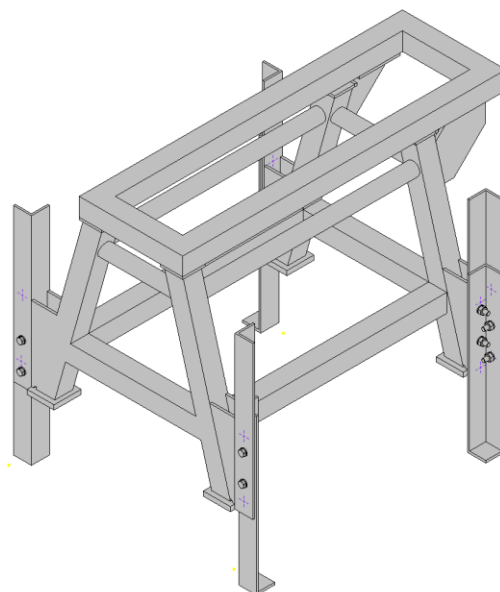


Abbildung 6-6: Endgültiges 3D-Modell.

Die wichtigsten Abmessungen des Grundgerüsts können aus Abbildung 6-7 entnommen werden.

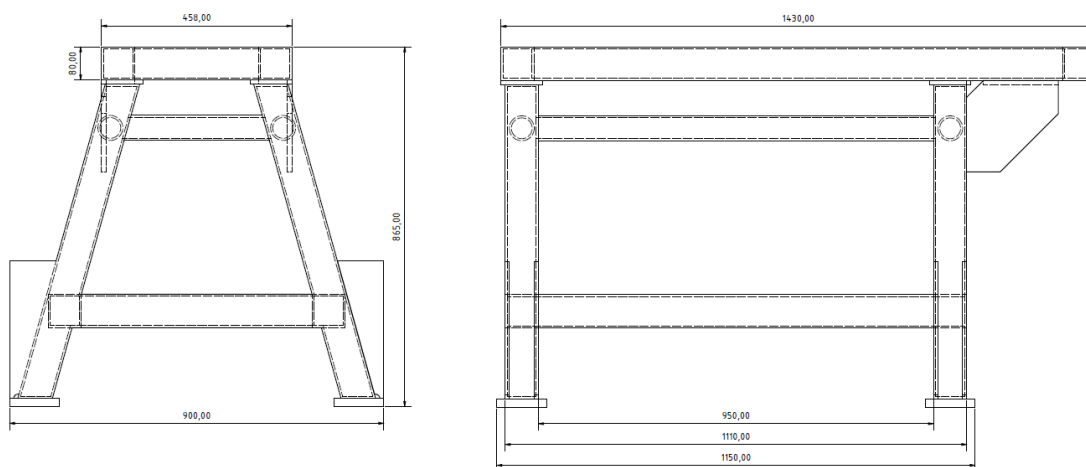


Abbildung 6-7: Bemaßte 2D-Zeichnung des Gestells mit angeschweißten Dreiecken.

Abbildung 6-8 zeigt ergänzende Bemaßungen der finalen Konstruktion und die Positionierung der Schraubenverbindungen.

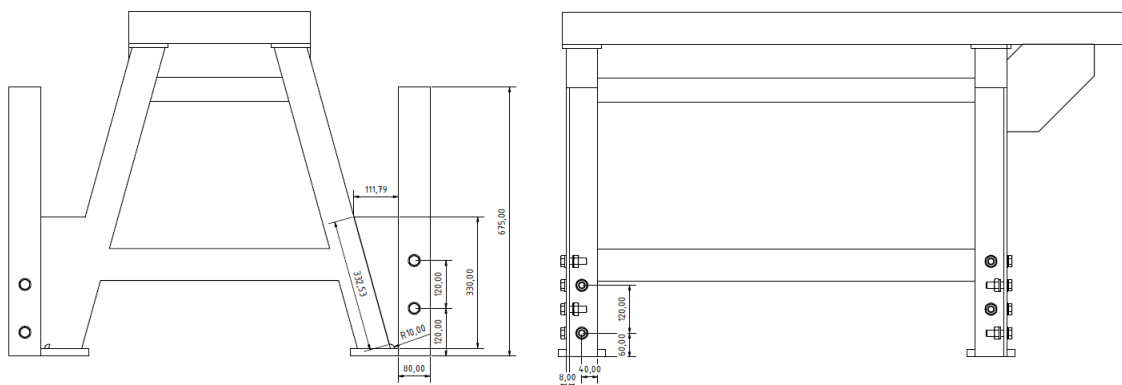


Abbildung 6-8: Bemaßte 2D-Zeichnung des Gestells mit den festen Stützen und Schrauben.

6.4 Rohrstrecke des Prüfstands

Abbildung 6-9 zeigt die Frontansicht des 3D-Modells der kompletten Rohrstrecke. Der Drehkanal wird hier als einfaches Rohr in grün dargestellt. Die Bauteilbezeichnungen können in Kapitel 3.2 eingesehen werden.

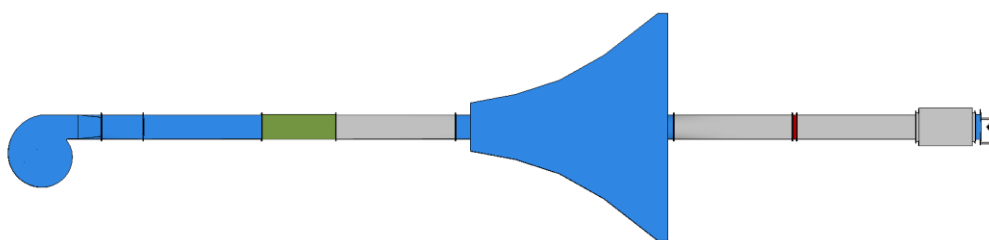


Abbildung 6-9: 3D-Modell des Prüfstands (Rohrstrecke).

Der gesamte Prüfstand, bestehend aus neuem Motorgestell und Rohrstrecke, wird in einer 3D-Ansicht in Abbildung 6-10 dargestellt.

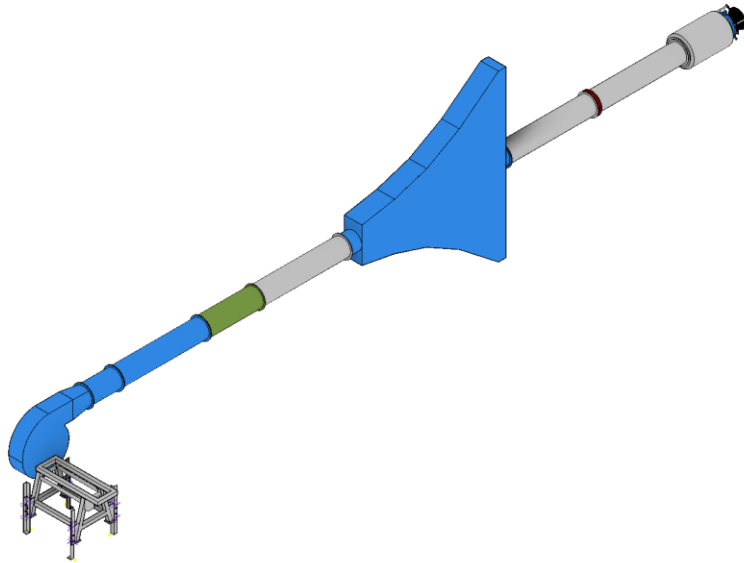


Abbildung 6-10: 3D-Modell (Baugruppe) des Prüfstands mit Motorgestell.

6.5 Griff für Bowdenzug des Hubwagens

Abbildung 6-11 zeigt das 3D-Modell eines neu konstruierten Griffs für den Hubwagen. Dieser dient zur Betätigung des Absenkmechanismus mittels Bowdenzugs.

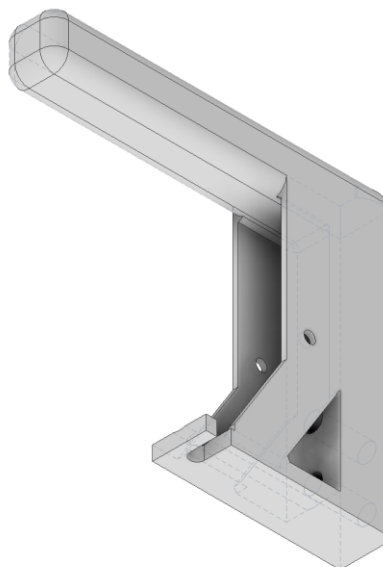


Abbildung 6-11: 3D-Modell (mit verdeckten Kanten) eines neuen Griffs für den Hubwagen.

7 FEM-Simulation ANSYS

Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die Beschreibung der statisch-mechanischen Analyse und die modale Analyse. Die statisch-mechanische Analyse ermöglicht es, das Verhalten eines Materials unter statischen oder quasi-statischen Belastungen zu untersuchen, während die modale Analyse hilft, die natürlichen Schwingungsmodi eines Systems zu bestimmen, was für das Verständnis der dynamischen Eigenschaften eines Systems von entscheidender Bedeutung ist.

7.1 Geometrieimport und Materialzuweisung

Zu Beginn der Analyse wurde die Geometrie der Baugruppe als STEP-Datei in ANSYS Multi-Physics importiert. Das Material der Geometrie wurde als Baustahl definiert. Bei der Untersuchung der Geometrieeigenschaften fiel eine ungewöhnlich hohe Masse auf. Eine Untersuchung mittels Schnittansicht ergab, dass die Geometrie als Vollkörper anstatt Hohlkörper dargestellt wurde. Um dieses Problem zu beheben, wurde die Geometrie erneut im IGS-Format importiert, was die korrekte Darstellung der Geometrie ermöglichte.

7.2 Optimierung der Schraubengeometrie

Die Geometrie der Schrauben wurde gemäß den Richtlinien der VDI 2230 vereinfacht. Diese Vereinfachung dient einer effizienteren Simulation, da das Model weniger scharfe Kanten aufweist und somit Rechenzeit eingespart wird. Abbildung 7-1 zeigt den abgerundeten Schraubenkopf und die abgerundete Mutter. [15]

Geometrie
02.09.2024 22:18

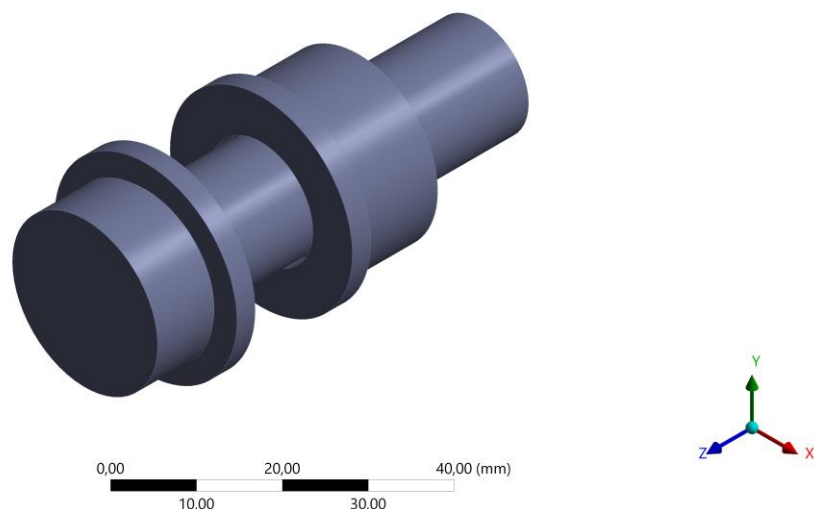


Abbildung 7-1: Vereinfachte Schraubenverbindung.

7.3 Aufteilung in Komponenten

Da die importierte Geometrie aus einer Baugruppe mit mehreren Unterteilen besteht, wurden diese in verschiedene Komponenten unterteilt. Diese Aufteilung erleichtert die Übersicht und das weitere Vorgehen bei der Analyse. Die Übersicht der Komponenten wird in Abbildung 7-2 dargestellt.

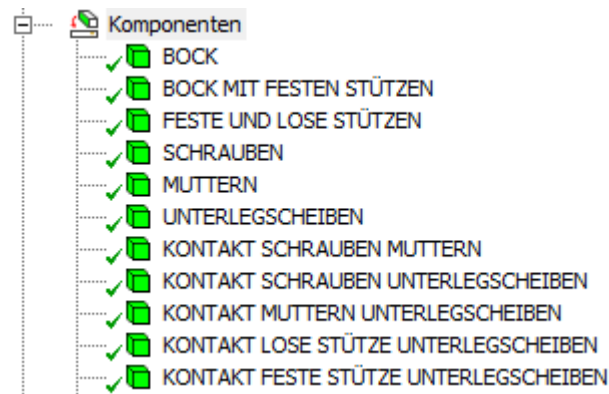


Abbildung 7-2: Übersicht der Komponenten.

7.4 Erstellung von Kontakten und Verbindungen

Die Kontakte und Verbindungen zwischen den Komponenten wurden manuell erstellt. Dies ist ein wichtiger Schritt, um die Interaktionen zwischen den verschiedenen Teilen der Baugruppe korrekt zu modellieren. Die Definition der Kontakte umfasst die Festlegung von Kontaktflächen und -eigenschaften, wie z.B. Reibung und Haftung. Die Übersicht der Kontakte, welche in Untergruppen sortiert wurden, wird in Abbildung 7-3 gezeigt.

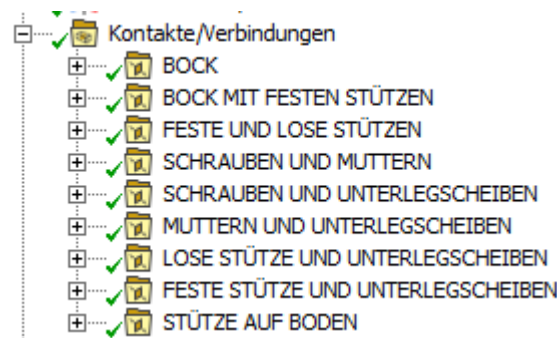


Abbildung 7-3: Übersicht der Kontakte/Verbindungen.

7.4.1 Verbundkontakte

Allen Bauteilen, die miteinander verschweißt sind oder nachträglich verschweißt werden sollen, wurde der Kontakttyp "Verbund" zugewiesen. Dies umfasst die Unterbaugruppen "Bock" und "Bock mit festen Stützen". Ebenso wird der Kontakt zwischen jeder Schraube und der dazugehörigen Mutter als Verbundkontakt angenommen.

7.4.2 Reibungskontakte

Alle weiteren Kontakte wurden als reibungsbehaftet definiert. Der Kontakt "Stütze auf Boden" weist einen Reibungskoeffizienten von 0,4 auf, was dem typischen Wert für den Kontakt von Stahl auf Estrich entspricht. Alle anderen Reibungskontakte haben einen Reibungskoeffizienten von 0,12, welcher typisch für den Kontakt von Stahl auf Stahl ist. [16]

7.5 Einstellung der Kräfte und Lager

Im Abschnitt der statisch mechanischen Analyse wurden alle relevanten Kräfte und Lagerbedingungen eingestellt. Dies umfasst die Definition von äußeren Lasten, wie z.B. Kräfte und Momente, sowie die Festlegung von Lagerbedingungen, die die Bewegung der Baugruppe einschränken. Die hier verwendeten Einstellungen werden als Vektoren in Abbildung 7-4 veranschaulicht.

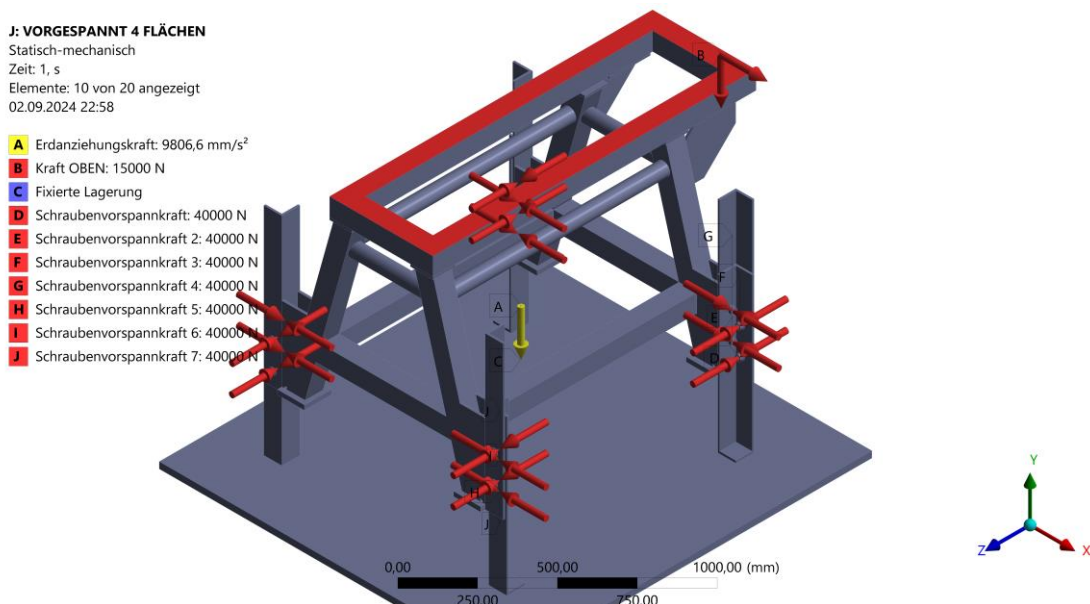


Abbildung 7-4: Übersicht der Kräfte und Lager.

Als fixierte Lagerung wurde die Unterseite der Bodenplatte ausgewählt. Bei der Berechnung werden zwei Schritte der Last benötigt. Um die Verspannung (Vorspannweg) der Schraube als Längenänderung zu bestimmen, werden im ersten Lastschritt die äußeren Kräfte auf die Baugruppe ausgesetzt.

Erst im zweiten Lastschritt treten die äußeren Lasten in Kraft, was zu einer Erhöhung (Zug) oder einer Verringerung (Druck) der in der Schraube wirksamen Kraft führt. Somit dürfen die äußeren Belastungen (Kräfte, Momente, Temperaturen, Eigengewicht usw.) erst nach Abschluss der Schraubenkalibrierung einwirken. In Tabelle 7-1 können die vorgenommenen Einstellungen eingesehen werden.

Tabelle 7-1: Einstellung der Lastschritte und Kräfte.

Lastschritt	Parameter	Einheit	Wert
1	Schraubenvorspannkräfte	N	40000
2	Schraubenvorspannkräfte	N	gesperrt
	Erdanziehungskraft	mm/s ²	9806,6
	Kraft OBEN	N	15000
	Querkraft	N	1000

7.6 Netzgenerierung und -untersuchung

Nach der Definition der Randbedingungen wurde das Netz für die FEM-Berechnung erstellt. Die Netzgenerierung ist ein kritischer Schritt, da die Qualität des Netzes einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse hat. Das Netz wurde anschließend untersucht, um sicherzustellen, dass es den Anforderungen der Analyse entspricht.

Erste Untersuchungen des Netzes

Die Ergebnisse der manuellen Netzverfeinerung sind in Tabelle 7-2 dargestellt. Diese Tabelle zeigt die Gesamtverformung, die Vergleichsspannung sowie die prozentuale Änderung der Vergleichsspannung in Abhängigkeit von der Netzgröße. Es wurde beobachtet, dass feinere Netze zu höheren Vergleichsspannungen führten, was auf das Vorhandensein von Singularitäten hinweisen könnte.

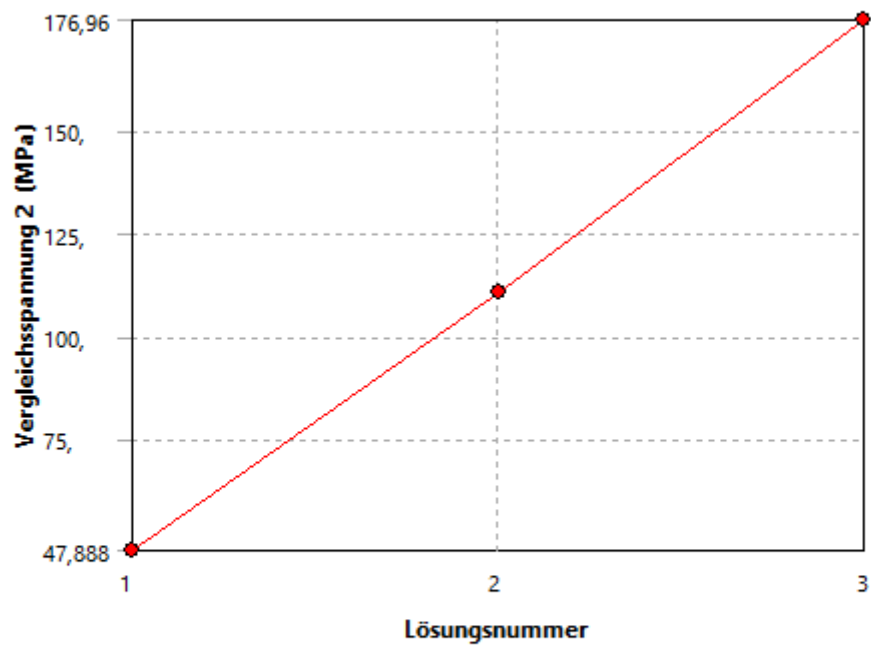
Zur weiteren Überprüfung des Netzes wurde das Konvergenz-Tool auf die Vergleichsspannung angewendet. Das Ziel war eine Änderung von maximal 5 % zu erreichen. Dieses Ziel konnte jedoch nicht erreicht werden, worauf der Prozess automatisch abgebrochen wurde. Auch hier zeigte sich, dass wie erwartet, die Spannungen mit zunehmender Netzfeinheit anstiegen. Diese Ergebnisse werden in Abbildung 7-5 dargestellt.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Netzverfeinerung einen signifikanten Einfluss auf die berechneten Spannungen hat und dass möglicherweise Singularitäten im Modell vorhanden sind, die zu diesen erhöhten Spannungen führen.

Tabelle 7-2: Ergebnisse einer manuellen Netzverfeinerung.

Parameter	Einheit	Wert						
		50	25	20	15	10	8	6
Netz	mm	50	25	20	15	10	8	6
Gesamtverformung	mm	0,096	0,094	0,096	0,102	0,106	0,108	0,109
Vergleichsspannung	MPa	16,826	18,412	17,843	21,027	23,588	26,607	41,449
Änderung der Vergleichsspannung	%	/	+9	-3	+18	+12	+13	+56

Konvergenzverlauf



	Vergleichsspannung 2 (MPa)	Änderung in %	Knoten	Elemente
1	47,888		981131	370183
2	110,85	79,326	1197229	627542
3	176,96	45,944	1676956	943769

Abbildung 7-5: Konvergenzverlauf der Vergleichsspannung.

7.7 Ergebnisse

Die Ergebnisse der FEM-Berechnung umfassen die Verteilung von Spannungen und Verformungen in der Baugruppe. Diese Ergebnisse wurden analysiert, um kritische Bereiche zu identifizieren und mögliche Schwachstellen zu erkennen.

Finales Netz

Für die gesamte Baugruppe wurde ein Netz mit einer Elementgröße von 10 mm ausgewählt. Da die bisherigen Spannungsspitzen im Bereich der Schrauben auftraten, wurden die Schrauben und Muttern mit separaten Elementgrößen auf ein 4 mm großes Netz verfeinert. Diese Netzqualität wird in Abbildung 7-6 dargestellt. An allen wichtigen Bereichen der Neukonstruktion ist ein ausreichend feines Netz zu sehen.

Die Verfeinerung des Netzes im Bereich der Schrauben und Muttern war notwendig, um die Genauigkeit der Spannungsberechnungen zu erhöhen und potenzielle Spannungsspitzen präzise zu erfassen. Darüber hinaus wird durch die Verfeinerung einzelner Komponenten Rechenzeit eingespart.

Die Ergebnisse zeigen, dass die gewählte Netzstrategie effektiv war, um eine ausreichende Netzqualität in den relevanten Bereichen zu gewährleisten. Die Verfeinerung auf 4 mm in den Bereichen der Schrauben und Muttern hat dazu beigetragen, die Genauigkeit der FEM-Analyse zu verbessern und potenzielle Schwachstellen in der Konstruktion zu identifizieren.

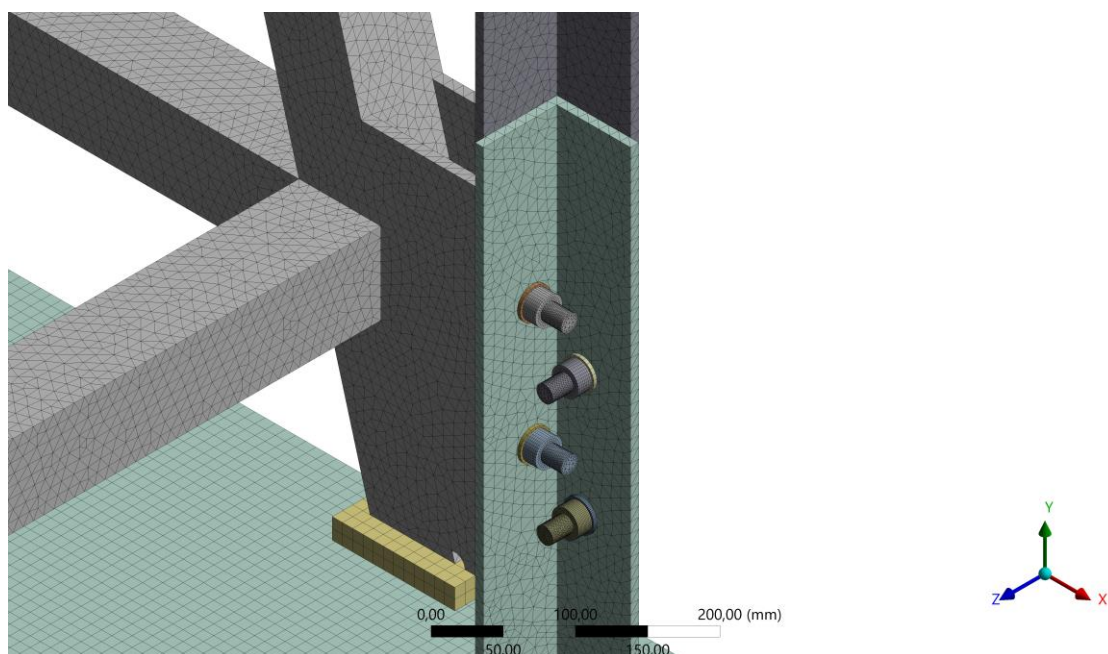


Abbildung 7-6: Vernetzung im Bereich der Schrauben.

Lösungen der statisch-mechanischen Analyse

In Abbildung 7-7 wird die Gesamtverformung der kompletten Baugruppe dargestellt. Dabei tritt maximale Gesamtverformung von 0,17781 mm im oberen Bereich auf. Siehe Max-Pfeil.

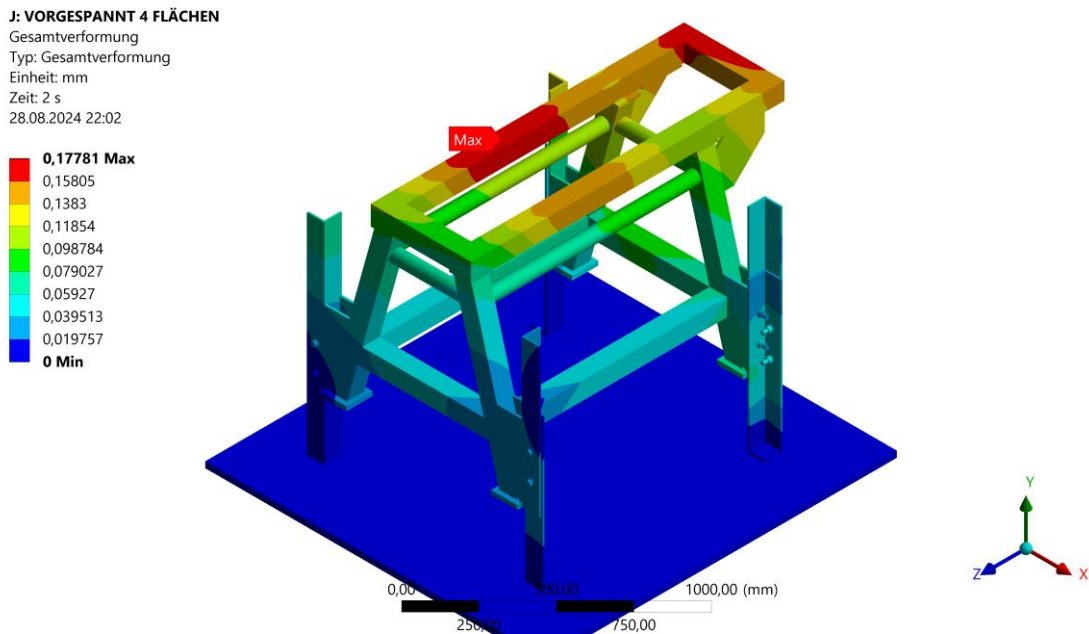


Abbildung 7-7: Gesamtverformung der kompletten Baugruppe.

Abbildung 7-8 zeigt die Vergleichsspannung der gesamten Baugruppe. Die Stelle der maximalen Vergleichsspannung von 623,8 MPa tritt im Bereich der Schraubenverbindung auf und wird mittels Max-Pfeil gekennzeichnet.

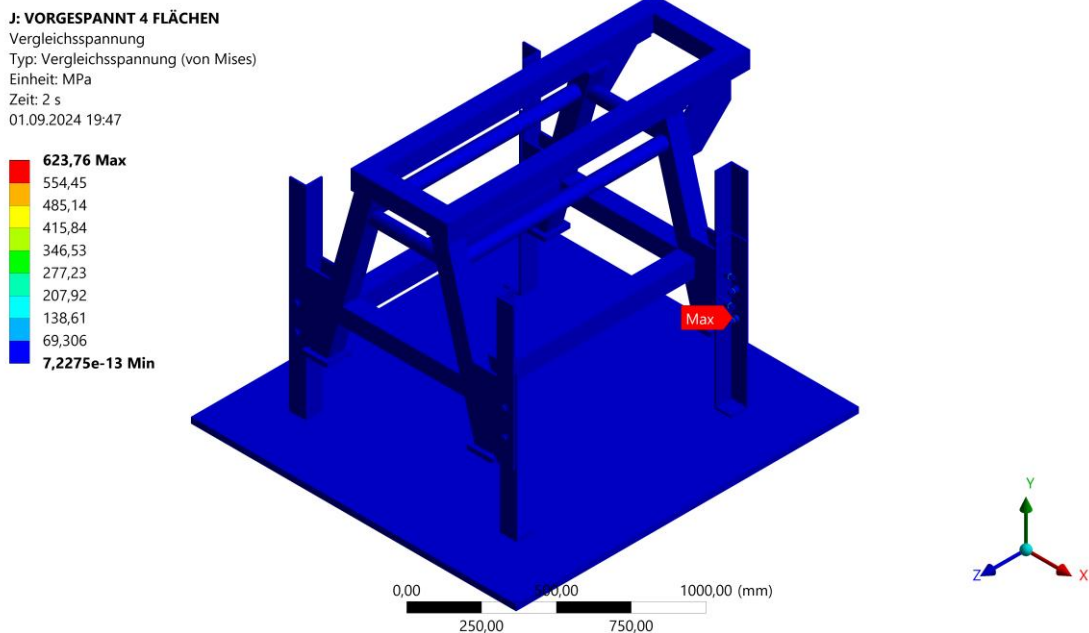


Abbildung 7-8: Vergleichsspannung der gesamten Baugruppe.

Schrauben

In diesem Abschnitt werden die Schraubenverbindungen isoliert betrachtet und untersucht. Abbildung 7-9 zeigt die Vergleichsspannung und lokalisiert die Spannungsspitze. Diese befindet sich offensichtlich im Kontaktbereich zwischen Schraube und Mutter. Darüber hinaus sieht man eine ausreichend feine Netzqualität in diesen kritischen Bauteilen.

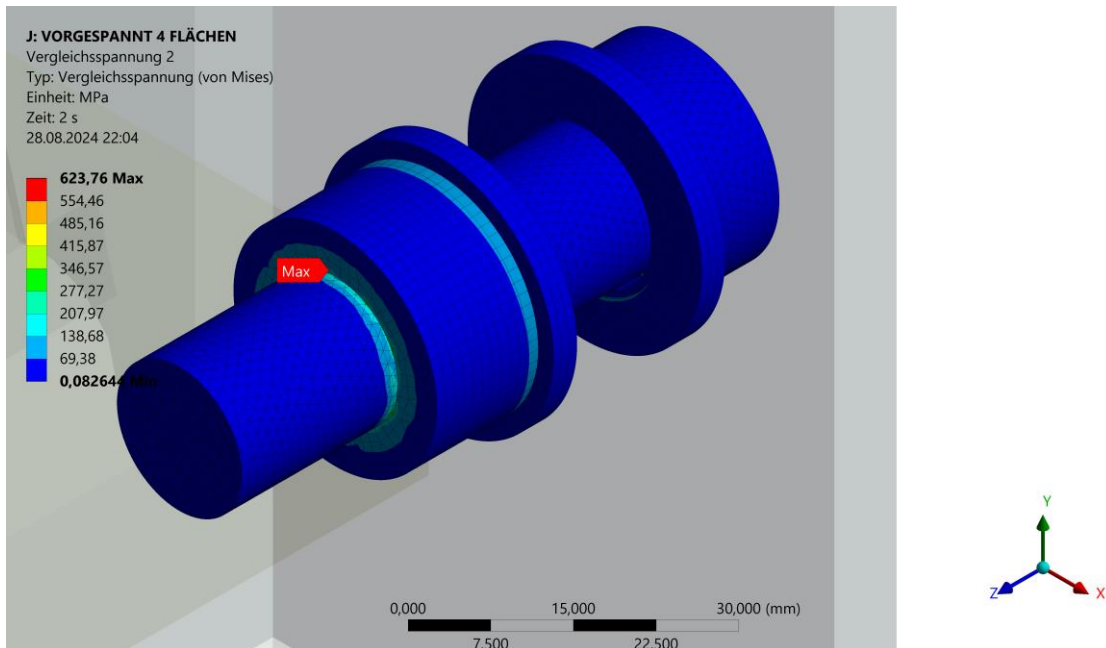


Abbildung 7-9: Vergleichsspannung (Max) der Schraubverbindung.

Anhand von Abbildung 7-10 wird der Bereich der maximalen Vergleichsspannung auf der Innenseite der Mutter sichtbar.

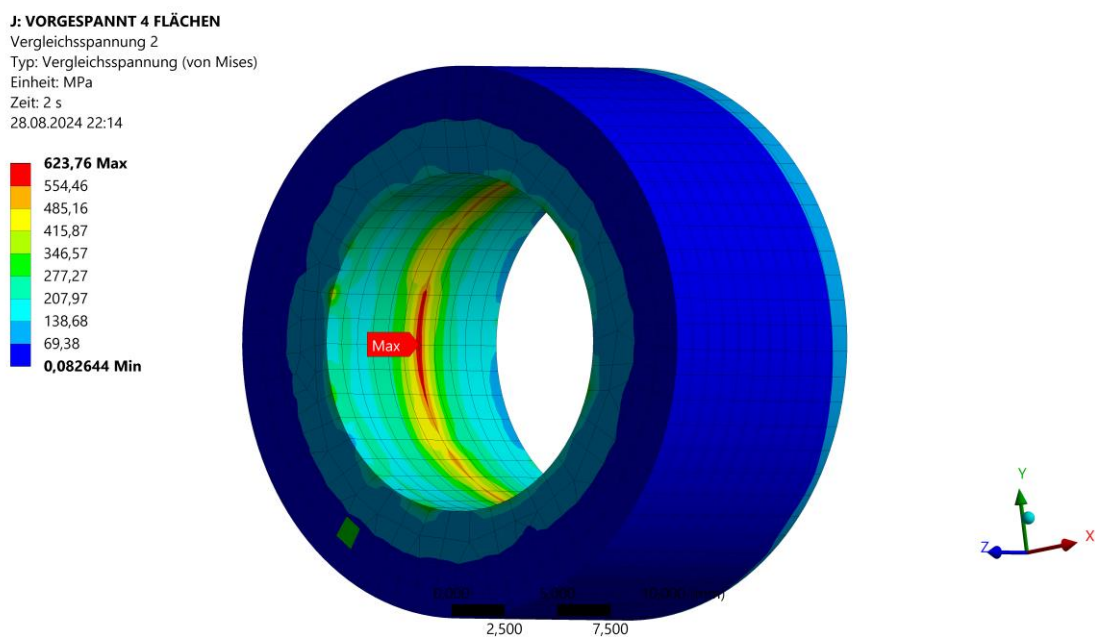


Abbildung 7-10: Vergleichsspannung (Max) der Mutter.

Betriebslast der Schrauben

In ANSYS Workbench wird die Betriebslast einer Schraube durch die Kräfte und Momente bestimmt, die auf die Schraube während des Betriebs einwirken. Diese Lasten spielen eine wichtige Rolle bei der Analyse der Verbindung der Schrauben, da sie die Reaktion der Schraube unter tatsächlichen Umständen bestimmen.

Die ermittelten Betriebslasten der Schrauben liegen zwischen 40000N und 40005N. Die maximale Änderung im Vergleich zur Vorspannkraft (40000N) beträgt demnach 0,0125%.

Baugruppe ohne Schrauben

Abbildung 7-11 zeigt die Vergleichsspannung der Baugruppe ohne Schraubenverbindungen. Dabei treten moderate Spannungen auf, welche gleichmäßig verteilt sind. Auch hier gibt es eine Spannungsspitze im Bereich der Schrauben.

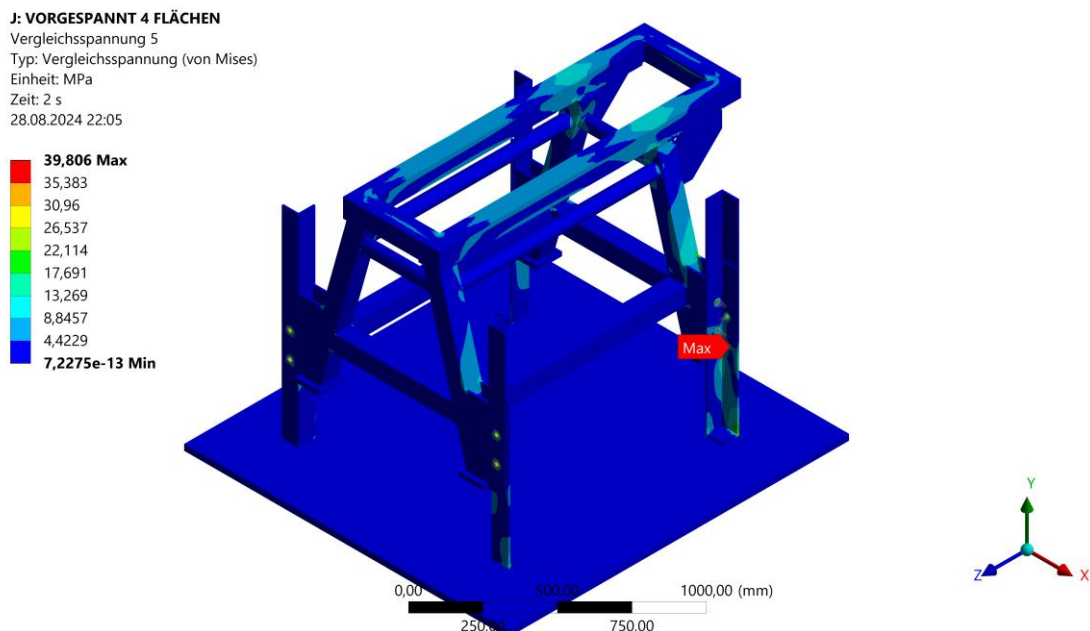


Abbildung 7-11: Vergleichsspannung der Baugruppe ohne Schraubverbindungen.

Modalanalyse

Das Ziel der Modalanalyse ist in erster Linie die Untersuchung der Eigenfrequenzen mit der Ermittlung der Frequenzen, in denen das System unabhängig von äußeren Einflüssen schwingt. Die berechneten Eigenfrequenzen der Baugruppe wurden mithilfe der Blattfolgefrequenz in Drehzahlen für den Radialventilator mit 10 Schaufelblättern umgerechnet und können aus Tabelle 7-3 entnommen werden.

Tabelle 7-3: Modalanalyse - Eigenfrequenzen und kritische Drehzahl.

Parameter	Frequenz	Drehzahl
Einheit	Hz	U/min
Wert	152,1	912,3
	187,0	1122,1
	196,2	1177,1
	196,8	1180,9
	211,7	1270,1
	222,0	1331,9
	227,5	1365,1
	237,9	1427,1
	239,7	1437,9
	247,4	1484,3
	260,6	1563,7
	262,5	1575,0
	270,3	1622,0
	281,5	1688,9
	297,2	1783,2
	303,2	1818,9
	305,1	1830,7
	309,6	1857,7
	312,9	1877,5
	331,7	1990,4
	334,8	2008,6
	338,9	2033,2
	353,0	2118,1
	365,8	2195,0
	370,2	2221,0
	391,3	2347,9
	410,9	2465,3
	425,7	2554,4
426,5	2559,0	
442,0	2651,7	
485,4	2912,2	
503,9	3023,5	
541,1	3246,5	

7.8 Diskussion der Festigkeitsrechnung

Grundlage der Diskussion sind die folgenden Zugfestigkeiten:

- M16 Schraube Festigkeitsklasse 8.8 – 800 MPa, [4]
- Baustahl (Ansys Profil) – 250 MPa,
- Sicherheitsfaktor 1,5 – dieser wurde bei den Kräften / Lasten einkalkuliert.

In Anbetracht der zuvor gelisteten technischen Parameter wurde eine passende und optimale Netzgröße für die FEM-Berechnung gewählt. Diese Netzgröße gewährleistet eine hohe Genauigkeit der Simulationsergebnisse und ermöglicht eine detaillierte Untersuchung der Spannungsverteilung innerhalb der Baugruppe.

Die maximalen Spannungen von 623,8 MPa traten im Innenradius der Mutter auf, also im Kontaktbereich zwischen Schraube und Mutter. Dies entspricht jedoch nicht der Realität, da in der Praxis die höchste Spannung an der Kontaktfläche zwischen Mutter und Unterlegscheibe vermutet wird. Daher ist es schwierig, die Betriebssicherheit der Schraubenverbindung anhand der hier gezeigten Spannungen zu bewerten. Dennoch lässt sich feststellen, dass die Spannungen unterhalb der Streckgrenze für die gewählten M16 Schrauben, der Festigkeitsklasse 8.8, liegen. Für die Validierung der Betriebssicherheit der Schraubenverbindung kann die berechnete Betriebslast der Schrauben herangezogen werden, da diese eine maximale Erhöhung um 0,0125 % von der anliegenden Schraubenvorspannkraft zeigt.

Die Betrachtung der Spannungen der Baugruppe ohne Schraubenverbindungen zeigt eine maximale Spannung von 39,8 MPa. Diese tritt ebenfalls im Bereich der Schraubenbohrung auf. Die restliche Konstruktion weist gleichmäßig verteilte Spannungen bis ca. 20 MPa auf, was auf eine homogene Spannungsverteilung hinweist.

Mit der Modalanalyse wurden die Eigenfrequenzen der Baugruppe ermittelt. Diese wurden mit Hilfe der Blattfolgefrequenz in Drehzahlen für einen Radialventilator mit 10 Schaufelblättern umgerechnet. Diese Drehzahlen können als kritische Drehzahlen angesehen werden, da bei diesen Drehzahlen die Eigenfrequenzen des Gestells angeregt werden und es zu hohen und unkontrollierten Vibrationen oder Schwingungen kommen kann.

Anhand dieser Simulationsergebnisse kann die Aussage getroffen werden, dass die neue Konstruktion ausreichende Stabilität und Festigkeit aufweist. Die Spannungen liegen unterhalb der Streckgrenze der verwendeten Materialien, und die kritischen Drehzahlen wurden identifiziert, um potenzielle Resonanzprobleme zu vermeiden.

8 Umbau & Inbetriebnahme

In diesem Kapitel werden die Schritte und Überlegungen zum Umbau und zur Inbetriebnahme der neuen Komponenten beschrieben. Dabei geht es um die Integration neuer Bauteile und Hilfsmittel, die für die Optimierung des Prüfstands erforderlich sind. Zudem wird die Anordnung der Rohrstrecke für die Radialventilatoren in Anlehnung zu den DIN-Normen behandelt. Ein weiterer zentraler Aspekt ist der Anschluss der Messtechnik. Abschließend werden die ausstehenden Maßnahmen erörtert, die notwendig sind, um eine reibungslose Inbetriebnahme sicherzustellen.

8.1 Die neuen Bauteile & Hilfsmittel

In Abbildung 8-1 werden die bisher gelieferten Stahlwinkel und Stahlplatten dargestellt. Die Stahlwinkel, die als innenliegende und verstellbare Füße dienen, wurden in der spannenden Fertigung mittels einer Fräsmaschine bearbeitet. Dabei wurden die scharfen Kanten abgetragen, um einen optimalen Kontakt der Flächen zu ermöglichen. Aus den Stahlplatten sollen die benötigten Dreiecke ausgeschnitten werden.

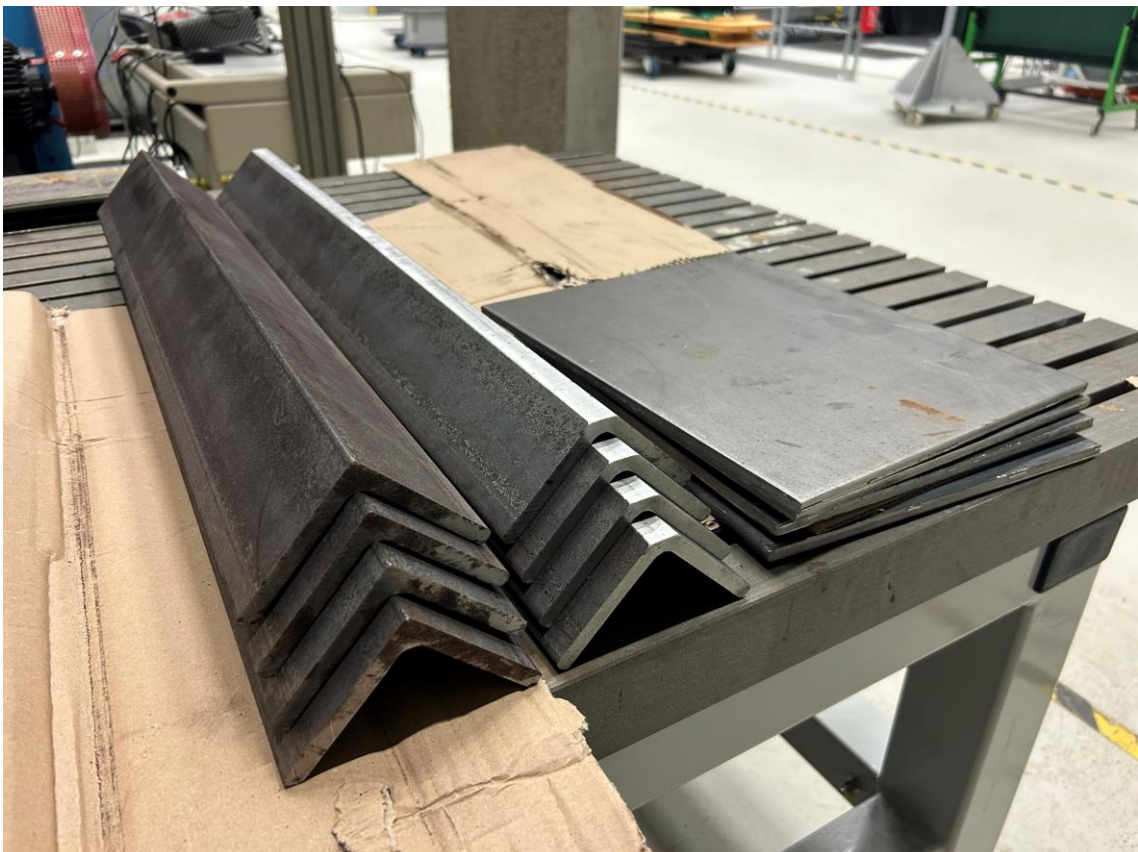


Abbildung 8-1: Stahlwinkel und Stahlplatten.

8.2 Umbau des Hubwagens

Abbildung 8-2 zeigt den Ausgangszustand des neuen Hubwagens. Dabei sieht man, dass der Schiebebügel, an dem auch die Absenkbetätigung montiert ist, im Weg ist. Der Hubwagen kam nicht ausreichend unter das Gestell fahren. Deshalb wurde der Schiebebügel demontiert.

Ein neuer Absenkbetätigungsgriff, der einen Bowdenzug verwendet, wurde mit 3D-Druck gefertigt. Dieser wird in Abbildung 8-3 im montierten und funktionsfähigen Zustand dargestellt. Mittels dieser Optimierung ist der Hubwagen für den Prüfstand uneingeschränkt einsatzfähig.



Abbildung 8-2: Ausgangszustand des Hubwagens.



Abbildung 8-3: Neuer Griff am Hubwagen.

8.3 Anordnung der Rohrstrecke für Radialventilatoren

Abbildung 8-4 zeigt die finale Anordnung der Rohrstrecke des Prüfstands in Anlehnung an DIN EN ISO 5136 & ISO 5801.

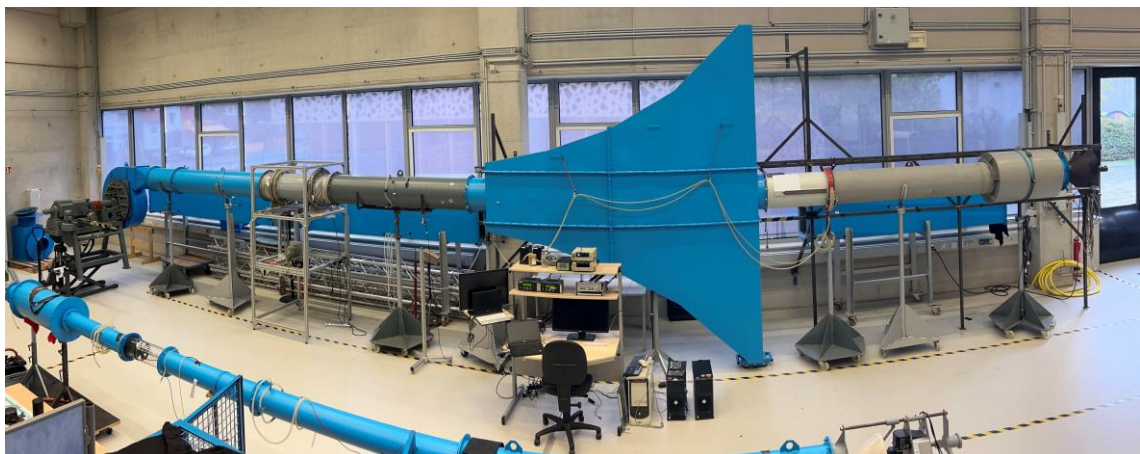


Abbildung 8-4: Neue Anordnung der Rohrstrecke für Radialventilatoren.

8.4 Anschluss der Messtechnik

In diesem Abschnitt wird die aktuell vorhandene Messtechnik beschrieben, welche nach der neuen Anordnung der Rohre bereits angeschlossen wurde. Abbildung 8-5 zeigt den Arbeitsplatz am Prüfstand mit nummerierter Messtechnik. Weitere Einzelheiten zur Messtechnik können in Kapitel 3.2 & 3.3 eingesehen werden.

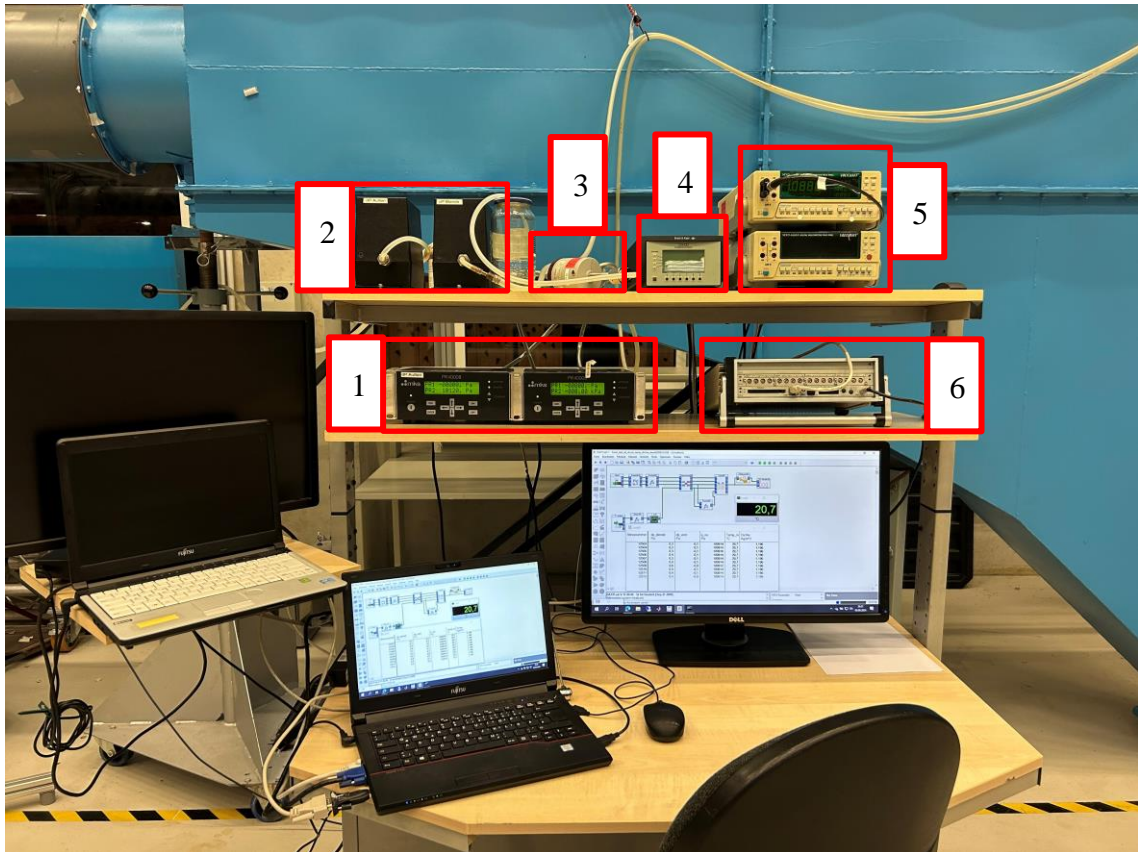


Abbildung 8-5: Arbeitsplatz mit Messtechnik.

- 1) Das MKS PR4000B-F2V2 ist ein digitales Netzteil und Anzeigemodul mit 2 Kanälen, das für die Steuerung und Überwachung von Druckmessungen entwickelt wurde. [17]
- 2) Das MKS Model 120A-26416 ist ein hochpräzises kapazitives Manometer, womit genau und zuverlässige Druckmessungen durchgeführt werden können. Es hat einen Messbereich von 0 – 10 000 Pa. Der Sensor für die Temperaturkontrolle wird auf 45°C beheizt und erfordert Dauerbetrieb. Es liefert eine standardmäßige Genauigkeit des Messwerts von 0,12% bei einer Ausgangsspannung von 0 – 10 Volt. [18]
- 3) Das MKS Type 626, auch bekannt als 626D Absolute Baratron Capacitance Manometer, ist ein leistungsfähiges Barometer, das auf kapazitiver Technologie basiert. [19]
- 4) Das Brüel & Kjaer Type 2690-0S2, für Kondensatormikrofone, ist ein vielseitiger Mikrofon-Konditionierungsverstärker der NEXUS-Reihe. Dieser wird mit Mikrofonen von Brüel & Kjaer verwendet. [20]

- 5) Ein Multimeter mit serieller Schnittstelle, das für Widerstandsmessungen mit einem Pt1000-Sensor konfiguriert ist, ermöglicht präzise Temperaturmessungen.
- 6) Das PAK MK 2 ist ein leistungsfähiges, tragbares Datenerfassungssystem, das speziell für die Messung und Analyse von dynamischen Daten in verschiedenen Anwendungen entwickelt wurde. Mit 16 Kanälen ermöglicht es die gleichzeitige Erfassung von mehreren Messgrößen. Es kommt für die Akustikmessung zum Einsatz und ersetzt damit die ROGA-Soundkarte am LabVIEW Rechner für den Drehkanal. [21]

8.4.1 Messbedingungen

Die Norm DIN EN ISO 5136 ist auf Ventilatoren anwendbar, die breitbandigen, schmalbandigen oder tonalen Dauerschall emittieren. Sie ist für Lufttemperaturen im Bereich von -50 °C bis $+70\text{ °C}$ ausgelegt. Die Messkanaldurchmesser variieren von 0,15 m bis 2 m, wobei kleinere oder größere Durchmesser gesondert behandelt werden müssen. Die maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeit am Mikrofonkopf, bei der das Verfahren anwendbar ist, hängt von der Art des Mikrofonwindschirms ab. In dieser Arbeit wird eine Brüel & Kjaer-Schlitzrohrsonde verwendet, bei der die höchstzulässige Strömungsgeschwindigkeit am Mikrofonkopf 40 m/s beträgt. Oberhalb dieser Geschwindigkeit können die turbulenten Druckschwankungen durch die Schlitzrohrsonde nicht mehr ausreichend reduziert werden. [11]

8.4.2 Software zur Messtechnik

Für die akustischen Messungen Analysen kommen die Software PAK 5.9, LabVIEW sowie wav-Dateien, die mit Matlab auszuwerten sind, zum Einsatz. PAK 5.9 ermöglicht die detaillierte Analyse und Verarbeitung von akustischen Signalen, während LabVIEW zur Steuerung und Automatisierung der Messprozesse verwendet wird. Die Verwendung von wav-Dateien dient der Speicherung und Weiterverarbeitung der aufgenommenen Audio-daten in CD-Format 44,1 kHz, 16 bit.

Für die aerodynamischen Messungen wird eine Vollversion von DASyLab mit einem NI-DAQ Add-On zur Konfiguration des AD-Wandlers genutzt. DASyLab bietet eine benutzerfreundliche Oberfläche zur Erstellung und Durchführung komplexer Messabläufe. Die Software ermöglicht die Echtzeit-Datenverarbeitung und -analyse.

8.4.3 Schaltbild der Messung in DASyLab

In Abbildung 8-6 wird das Schaltbild in DASyLab dargestellt. Dies ist die Schaltung und Funktionsfähigkeit für Druckdifferenz- und Temperaturmessungen.

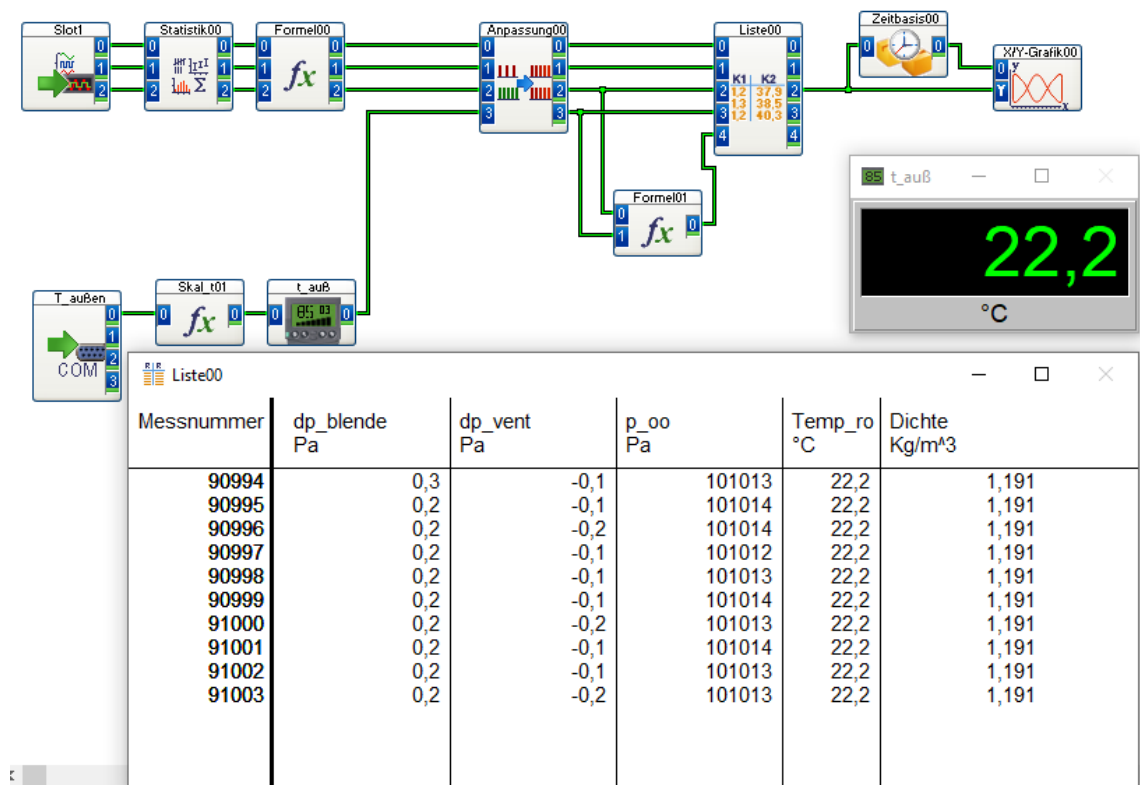


Abbildung 8-6: Schaltbild in DASyLab mit Echtzeitdatenerfassung.

8.5 Ausstehende Maßnahmen

Während der Umbauarbeiten am Prüfstand wurden mehrere Aspekte identifiziert, die eine Inbetriebnahme verzögern. Durch die Umsetzung dieser Maßnahmen wird die Grundlage für eine erfolgreiche Inbetriebnahme des Prüfstands geschaffen. Es ist entscheidend, dass alle identifizierten Probleme systematisch und zeitnah behoben werden, um den Prüfstand den Anforderungen entsprechend zu modernisieren und betriebsbereit zu machen.

8.5.1 Überprüfung und Anpassung der Normblende

Es wurde festgestellt, dass die vorhandene Normblende möglicherweise nicht der aktuellen DIN EN ISO 5167 entspricht. Um dies zu verifizieren, wäre ein Vergleich am Prüfstand der Firma Pollrich sinnvoll.

Diese Schritte sind notwendig, um sicherzustellen, dass die Normblende den geforderten Standards entspricht und somit eine präzise und zuverlässige Messung ermöglicht.

8.5.2 Drehmomentmessung am Pendelmotor

Die Messung des Drehmoments am Pendelmotor erfolgt über einen 500 mm langen Hebelarm und eine Kraftmessdose.

Bei der Kraftmessdose handelt es sich um eine Wägezelle Typ Z3H3 R vom Hersteller HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik). Der verwendete KWS 501.D TF-Messverstärker ist ein Trägerfrequenz-Messverstärker, welcher ebenfalls vom Hersteller HBM ist.

Die Kraftmessdose muss einen Bereich von 0 bis 20 kg abdecken. Die Kraft und das Drehmoment werden anhand der nachstehenden Formeln berechnet.

$$F = 20 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 196,2 \text{ N} \quad (8-1)$$

$$M = 0,5 \text{ m} \cdot 196,2 \text{ N} = 98,1 \text{ Nm} \quad (8-2)$$

Die Kraftmessdose und die dazugehörige Elektronik sind älter als 30 Jahre und müssen ersetzt werden.

8.5.3 Beschaffung fehlender Teile

Für den Umbau des Gestells fehlen derzeit noch einige bestellte Teile. Diese Teile sind Bestandteil für die Fertigstellung des Umbaus und die anschließende Inbetriebnahme des Prüfstands. Es ist wichtig, den Lieferstatus dieser Teile zu überprüfen und gegebenenfalls alternative Beschaffungswege zu evaluieren, um Verzögerungen zu minimieren.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurde ein Industrieventilatorprüfstand neu konzipiert, der den Anforderungen der ISO 5136 und ISO 5801 gerecht wird. Ziel war es, durch die Integration einer neu entwickelten Höhenverstellung des Motors samt Gestell die Einschränkungen eines doppelseitigen reflexionsarmen Kanalabschlusses gemäß ISO 5136 zu überwinden.

Die strukturierte Vorgehensweise umfasste eine umfassende Bestandsaufnahme des bestehenden Prüfstands, die Erstellung detaillierter 3D-Modelle mithilfe der CAD-Software Autodesk Inventor sowie die Entwicklung innovativer Konzepte zur Höhenverstellung. Die Validierung der Belastbarkeit und Funktionalität der Modelle erfolgte durch FEM-Berechnungen und Simulationen in ANSYS Workbench, was zu einer gezielten Anpassung des Designs führte.

Es wurde die Umgestaltung eines bestehenden Gestells untersucht, um eine kosteneffiziente und robuste Höhenverstellung zu ermöglichen. Die bevorzugte Lösung bestand darin, 8 mm dicke 80x80 Stahlprofile an die bestehenden Füße des Gestells anzuschweißen. Diese Profile bieten eine stabile Basis, an die weitere Stahlprofile angeschraubt werden können. Diese Konstruktion ermöglicht es, das Gestell mittels eines Hubwagens auf die gewünschte Höhe (340 mm) anzuheben, woraufhin die losen Stützen herabgesenkt und verschraubt werden. Diese Methode bietet eine wirtschaftliche Alternative zur vollständigen Neugestaltung der Struktur. Es wird eine Anhebung um bis zu 375 mm ermöglicht.

Die Wahl von Stahl als Material für die tragenden Elemente des Gestells basiert auf dessen hoher Festigkeit und Steifigkeit, die notwendig sind, um das Gewicht von ca. 1000 kg sicher zu tragen. Stahl ist zudem kostengünstig und gut verfügbar, was die Materialwahl wirtschaftlich attraktiv macht. Die Schweißbarkeit von Stahl ermöglicht stabile Verbindungen der Profile, was die Gesamtkonstruktion zusätzlich verstärkt.

Die durchgeführte FEM-Berechnung und Simulation bestätigten die Stabilität und Belastbarkeit der Konstruktion. Die Auswertung der FEM-Analyse unter Berücksichtigung der verwendeten Werkstoffe zeigte eine positive Prognose, wobei die Spannungen unterhalb der Streckgrenzen lagen. Besonders hervorzuheben ist, dass die Schraubenverbindungen unter Berücksichtigung der eingesetzten Vorspannkraft eine gute Betriebslast aufwiesen, was die Zuverlässigkeit der Verbindungen sicherstellt.

Die bestehenden Rechner der Messtechnik wurden aktualisiert und erfolgreich initialisiert. Zudem wurde die Messtechnik angeschlossen und ihre Funktionsfähigkeit durch einen Testlauf mit DASYS Lab validiert.

Während der Umbauarbeiten traten einige Herausforderungen auf, welche die Inbetriebnahme des Prüfstands verzögerten. Benötigte Teile wurden nicht rechtzeitig angeliefert, weshalb der Umbau nicht vollständig vollendet werden konnte.

Zudem wurde die Normblende als potenziell nicht konform mit den DIN-Normen identifiziert. Diesbezüglich wäre ein Vergleich am Prüfstand der Firma Pollrich sinnvoll.

Zur erfolgreichen Inbetriebnahme des Prüfstands und zur Sicherstellung der vollständigen Funktionalität ist es erforderlich, die bestehenden Probleme zeitnah zu beheben. Die erfolgreiche Umsetzung dieser Maßnahmen wird nicht nur die Erfüllung der Normen gewährleisten, sondern auch den Prüfstand optimal für zukünftige Tests und Anwendungen vorbereiten.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus dieser Arbeit bieten eine solide Grundlage für weitere Entwicklungen im Bereich der Ventilatorentechnologie und deren Prüfstandstechnik.

Zukünftige Arbeiten könnten sich darauf konzentrieren, die Langzeitstabilität der Konstruktion unter realen Betriebsbedingungen zu untersuchen und mögliche Optimierungen in der Materialwahl oder der Konstruktionstechnik zu identifizieren.

Quellenverzeichnis

- [1] Horvat, I. (2009). CAE für Radialventilatoren unter dem Gesichtspunkt des Umweltschutzes – Energieeffizienz, Haltbarkeit, Lärm (Abschlussbericht). Fachhochschule Düsseldorf.
- [2] Krebs, J. (2017). Basics CAD. Birkhäuser.
- [3] Ridder, D. (2023). 3D-Konstruktionen mit Autodesk Inventor 2024: Der umfassende Praxiseinstieg. Inkl. Übungsbeispielen und Aufgaben mit Lösungen. MITP-Verlags GmbH & Co. KG.
- [4] VDI 2230 Blatt 1: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen: Zylindrische Einschraubenverbindungen. (2015). VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb.
- [5] Steinke, P. (2010). Finite-Elemente-Methode: Rechnergestützte Einführung. Springer-Verlag.
- [6] Stommel, M., Stojek, M., & Korte, W. (2018). FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- [7] Gebhardt, C. (2018). Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench: Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. Mit 25 Übungsbeispielen.
- [8] DIN EN ISO 5801:2018-04, Ventilatoren_- Leistungsmessung auf genormten Prüfständen (ISO_5801:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_5801:2017. (o. J.). DIN Media GmbH. <https://doi.org/10.31030/2637235>
- [9] DIN EN ISO 5136:2009-11, Akustik_- Bestimmung der von Ventilatoren und anderen Strömungsmaschinen in Kanäle abgestrahlten Schallleistung_- Kanalverfahren (ISO_5136:2003); Deutsche Fassung EN_ISO_5136:2009. (o. J.). DIN Media GmbH. <https://doi.org/10.31030/1545135>
- [10] Klitz, T. (2003). Konstruktion, Aufbau und Programmierung eines Drehkanals zur Bestimmung der von Ventilatoren in Kanäle abgestrahlten Schallleistung (Diplomarbeit). Fachhochschule Düsseldorf.
- [11] Sariaslan, E. (2004). Messung und Prognose von Ventilatorgeräuschen (Diplomarbeit). Fachhochschule Düsseldorf.
- [12] DIN EN ISO 5167-2:2023-08, Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt_- Teil_2: Blenden (ISO_5167-2:2022); Deutsche Fassung EN_ISO_5167-2:2022. (o. J.). DIN Media GmbH. <https://doi.org/10.31030/3343996>
- [13] Spindelstütze. (2024). Abgerufen 10. August 2024, von Haacon website: <https://www.haacon.com/de/produkte/industriehobetechnik/spindelwinden-lasten-heben-abstuetzen/>
- [14] Scherenhubwagen. (2024). Abgerufen 17. August 2024, von fetra website: <https://www.fetra.de/hubgeraete/scheren-hubwagen-6821>
- [15] VDI 2230 Blatt 2: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen, Mehrschraubenverbindungen. (2014). VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb.

- [16] Popov, V. L. (2009). Kontaktmechanik und Reibung: Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation. Springer-Verlag.
- [17] MKS PR4000B. (2024). Abgerufen 30. August 2024, von mks website: <https://www.mks.com/p/PR4000BF2V2>
- [18] MKS 120A. (2024). Abgerufen 30. August 2024, von mks website: <https://www.mks.com/f/120aa-reference-absolute-capacitance-manometers>
- [19] MKS Type 626. (2024). Abgerufen 30. August 2024, von mks website: <https://www.mks.com/f/626d-absolute-capacitance-manometers>
- [20] B&K Type 2690. (2024). Abgerufen 30. August 2024, von bksv website: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1702.ashx>
- [21] PAK MK2. (2024). Abgerufen 30. August 2024, von mbbm-vas website: <https://www.mbbm-vas.com/produkte/datenerfassung/pak-mkii/>

Anhang A

Strömungstechnik und Lärmschutz		26.04.2021											
Frank Kameier				DIN EN ISO 5167 Stand Januar 2004									
FB Maschinenbau und Verfahrenstechnik													
Hochschule Düsseldorf													
<u>Konstanten</u>													
d_1	0,12785 [m]			definiert als Namen: STRG F3 oder rechte Maustaste									
d_2	0,16008 [m]												
eta	1,80E-05 [kg/m s]												
kappa	1,4												
beta	0,7987			10205,806									
R_luft	287 [J/kg*K]									Achtung: Datei, Optionen, Formeln, Iteration aktivieren			
g	9,81 [m/s^2]												
p_b	1012,6 [mbar]												
Messwerte		← →		Auswertung									
[mbar]	[mbar]	[°C]	[Pa]	[Pa]	[kg/m^3]	[m^2/s]			[m^3/s]	[m/s]			
delta_p_1	delta_p_Bl	t	d_pbl	p_1	rho	nue	epsilon	c_bl	q_v	c_Rohr	Re		
0,7	1	21	100	1,012E+05	1,1986	1,50171E-05	0,9996	0,6009	0,1293	6,4	68505,4		
2,2	3	21,1	300	1,010E+05	1,1965	1,50445E-05	0,9987	0,5963	0,2223	11,0	117531,1		
4,2	5,8	21,1	580	1,008E+05	1,1941	1,50743E-05	0,9975	0,5941	0,3079	15,3	162451,4		
6,2	8,6	21,1	860	1,006E+05	1,1917	1,51043E-05	0,9963	0,5929	0,3741	18,6	196987,8		
9,5	13,4	21,1	1340	1,003E+05	1,1878	1,5154E-05	0,9942	0,5917	0,4658	23,1	244475,7		
13,3	18,6	21,1	1860	9,993E+04	1,1833	1,52116E-05	0,9919	0,5909	0,5478	27,2	286429,9		
		d_pbl=100*delta_p_Bl				epsilon=1-(0.351+0.256*beta^4+0.93*beta^8)*(1-((p_1-d_pbl)/p_1)^(1/kappa))							
		p_1=100*(p_b-delta_p_1)				c_bl=0,5961+0,0261*beta^2-0,216*beta^8+0,000521*(beta*10^6/Re)^0,7+ ...							
		rho=p_1/(R*(t+273,15))				... +(0,0188+0,0063*(19000*beta/Re)^0,8)*beta^3,5*(10^6/Re)^0,3							
		ny=eta/rho				q_v=c_bl*(1-beta^4)^-0,5*(PI()/4)*d_1^2*(2*d_pbl/rho)^0,5*epsilon							
						c_Rohr=4*q_v/(PI()*d_2^2)							
						Re=WENN(ISTFEHLER(Re);100000;q_v^4/(PI()*d_2^ny))							

Abbildung 0-1: Excel-Tool zur Auswertung der Messblendenmessungen.

Eidesstattliche Erklärung

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

Dies ist die von der Hochschule Düsseldorf zu bewertende Version.

Ort, Datum Düsseldorf, 10.09.24 Unterschrift

