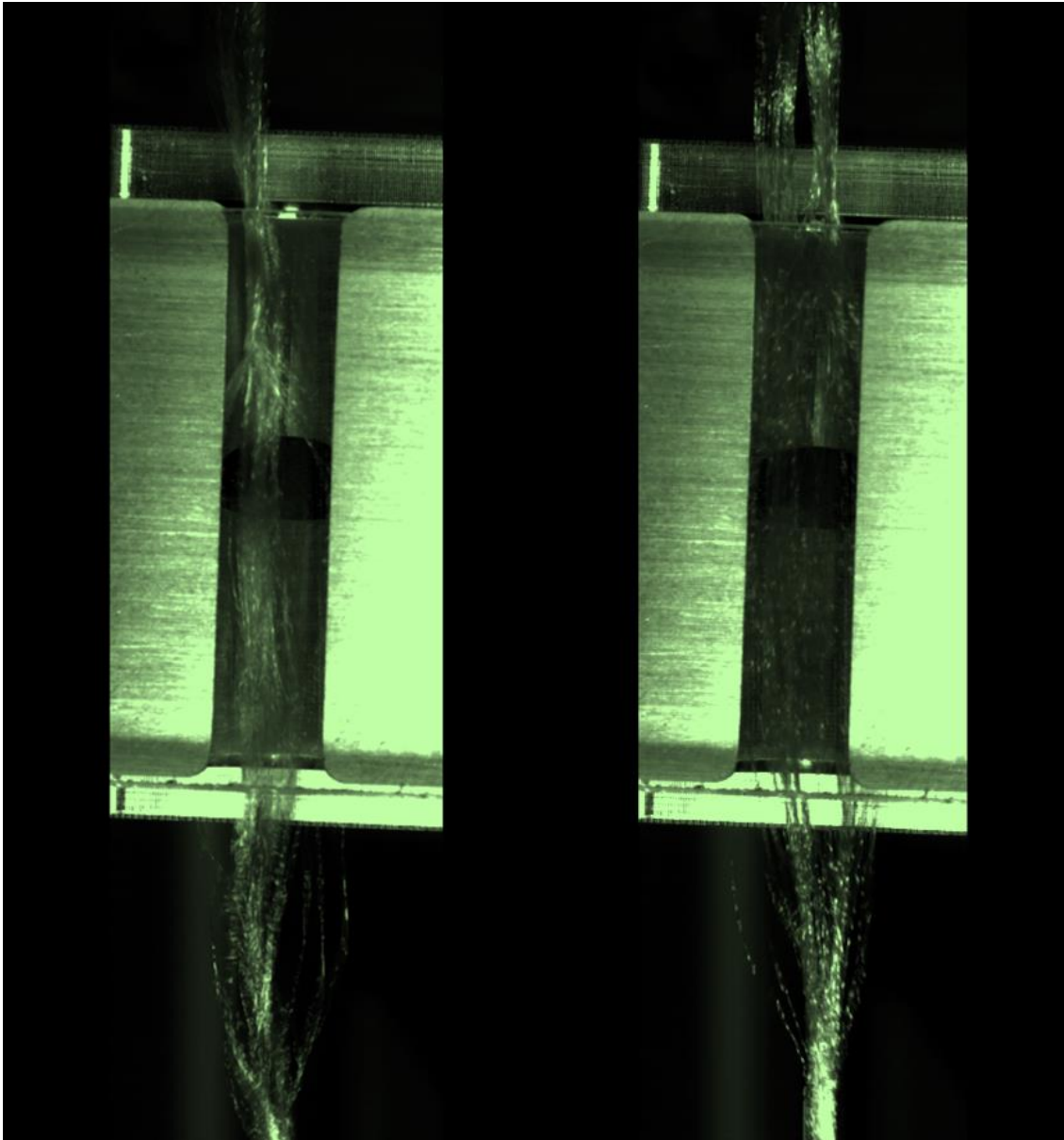




Schlussbericht

Energieoptimierte Luftverwirbelungsdüse





Datum: 04.05.2018

Ort: Männedorf

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energieforschung
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Firma streamwise gmbh
Emil-Staub-Strasse 5
CH-8708/Männedorf
www.streamwise.ch

Firma Heberlein AG
Bleikenstrasse 11
CH-9639/Wattwil
www.heberlein.ch

Autor:

Benjamin Rembold, streamwise gmbh, rembold@streamwise.ch

BFE-Bereichs/Programmleitung: Carina Alles, Carina.Alles@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung: Carina Alles, Carina.Alles@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501439-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
Résumé	4
Summary	5
1. Einleitung	6
1.1. Ausgangslage	6
1.2. Projektziel	9
1.3. Vorgehen bei der Auslegung	10
2. Messtechnik.....	11
3. Rechnerische Auslegung und Optimierung	14
3.1. Berechnungssetup	14
3.2. Auswertungsprozedere.....	16
4. Performancebericht.....	16
4.1. Variantenübersicht	17
4.2. Strömung im Oszillator, exemplarisch V1e.....	20
4.3. Frequenzidentifikation	21
4.4. Tests mit realem Garn.....	27
4.5. Luftverbrauchsmessungen	29
5. Erkenntnisse	29
6. Zielerreichung & Ausblick	31
6.1. Bewertung Zielerreichung.....	31
6.2. Weitere Entwicklungsschritte.....	31
Literaturverzeichnis.....	33



Zusammenfassung

Im Prozess der Garnherstellung und Garnveredelung spielt Druckluft eine entscheidende Rolle. Mit sogenannten Verwirbelungsdüsen wird im Spinnprozess durch Knotenbildung ein Fadenschluss, also eine Verbindung einzelner Fadenfilamente erreicht. Der Druckluft- bzw. Energiebedarf hierbei ist enorm. Ziel des vorliegenden Projekts war es, zur deutlichen Senkung des Luftverbrauchs Verwirbelungsdüsen basierend auf Fluidoszillatoren zu entwickeln.

Für einen relevanten Prozess, den Bulk Continuous Fiber Prozess, wurde die heute meist verwendete Düse als Referenz bzgl. Luftverbrauch und Verwirbelungsleistung definiert. Verschiedene Oszillatorvarianten wurden konzipiert, ausgelegt und optimiert. Eine auf transienter, dreidimensionaler Strömungssimulation beruhende automatisierte Prozesskette wurde hierfür aufgebaut. Parallel wurden Messkampagnen durchgeführt mit akustischen Frequenzmessungen, Background-Oriented Schlieren Messungen und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Dadurch konnte umfangreiches Wissen über die Funktionsweise der Oszillatoren gewonnen werden. Das vorhergesagte Verhalten der Oszillatoren konnte messtechnisch sehr gut wiedergefunden werden.

Das Ziel, den Luftverbrauch von Luftverwirbelungsdüsen zur Garnherstellung unter Einsatz von Fluidoszillatoren drastisch zu senken, wurde erreicht. Die besten Varianten erreichten ca. 70% der Knotenbildungsleistung der Referenzdüse bei halbem oder weniger als 25% des Luftverbrauchs. Weitere Optimierungsschritte haben grosses Potential sowohl bezüglich Leistung als auch Verbrauch der Düsen insbesondere durch die Anpassung der Oszillatorfrequenz an die Garngeschwindigkeit. Alle dimensionierten Oszillatoren wurden auf industrielle Geschwindigkeiten von 3000 m/min ausgelegt, die Testanlage erreichte jedoch lediglich 800 m/min. Die erzielten Resultate lassen vermuten, dass für diese Garngeschwindigkeit die Oszillatoren zu hohe Frequenzen aufweisen um ihre volle Entfaltung erreichen zu können.

Résumé

L'air comprimé joue un rôle décisif dans la production et le processus de finition des fils. Lors de la filature, des buses dites « d'entrelacement » sont utilisées pour créer des nœuds afin d'obtenir une bonne cohérence du fil, c'est-à-dire une connexion entre les différents filaments. À cet effet, la demande en air comprimé et en énergie est énorme. L'objectif du présent projet était de développer des buses d'entrelacement à base d'oscillateurs à fluide afin de réduire la consommation d'air de manière significative.

Pour la pertinence de ce procédé, le procédé Bulk Continuous Fiber (fibre continue en vrac), le système de buse le plus couramment utilisé aujourd'hui a été défini comme étant la référence en matière de consommation d'air et de formation des nœuds. Différents types d'oscillateurs ont été conçus, mis en œuvre et optimisés. Une chaîne de processus automatisée, basée sur une simulation tridimensionnelle de flux transitoires, a été développée à cet effet. Parallèlement, des campagnes de mesure ont été réalisées avec des mesures acoustiques de fréquence, des mesures par Background Oriented Schlieren et des enregistrements à haute vitesse. Cela nous a permis d'acquérir une connaissance approfondie sur le fonctionnement des oscillateurs. Le comportement prévu des oscillateurs a pu être parfaitement retrouvé grâce aux résultats de métrologie.

L'objectif de réduction drastique de la consommation d'air des buses d'entrelacement pour la production de fils à l'aide d'oscillateurs à fluide a pu être atteint. Les meilleures options ont atteint environ 70% de la performance de formation des nœuds de la buse de référence pour une consommation d'air réduite de moitié ou de moins de 25%. D'autres étapes d'optimisation offrent un



grand potentiel en termes de performance et de consommation des buses, notamment en adaptant la fréquence de l'oscillateur à la vitesse du fil. Tous les oscillateurs dimensionnés ont été conçus pour des vitesses industrielles de 3000 m/min, mais l'installation d'essai n'a atteint que 800 m/min. Les résultats obtenus laissent présager que les oscillateurs ont des fréquences trop élevées pour que cette vitesse de fil puisse atteindre son plein développement.

Summary

In the process of yarn production and yarn finishing compressed air plays an important role. So-called interlacing jets lead to intermingled knots and provide yarn compactness. The consumption of compressed air or energy in this process is enormous. The goal of this project was to develop interlacing jets based on fluid oscillators and thus drastically reduce the air consumption.

For one relevant process, the Bulk Continuous Fiber Process, the today most widely used interlacing jet was defined as reference in terms of air consumption and interlacing performance. Various oscillators were devised and optimized. An automated process based on transient, three-dimensional computational fluid dynamic simulations was developed. Moreover, extensive measurement campaigns with acoustic frequency determination, background-oriented Schlieren and high-speed imaging were conducted. Thus, an in-depth knowledge about the functionality of the oscillators could be obtained. The predicted behaviour of the oscillators was very well reproduced in the measurements.

The goal to drastically reduce the air consumption of interlacing jets in the yarn production with fluid oscillators was achieved. The best variants reached 70% of the reference performance with 50% or even less than 25% of air consumption. Additional optimization steps offer still large potential in terms of increased performance and reduced air consumption, especially by matching the oscillator frequency better to the yarn process speed. All designed oscillators had a target yarn speed of 3000 m/min, the available test bed, however, could only reach 800 m/min. It is believed that this mismatch leads to a reduced performance, i.e. the oscillator frequencies were too high to fully reach their potential for the lower yarn speed.



1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Weltweit werden aktuell jährlich ca. 90 Mio. Tonnen Textilfasern produziert. Davon wird ein zunehmender Anteil (ca. 70%, also ca. 63 Mio. Tonnen in 2015) durch Kunstfasern abgedeckt, siehe Abbildung 1. Schätzungen zufolge wird dieses Gesamtvolumen auf ca. 125 Mio. Tonnen im Jahr 2030 ansteigen (Quelle: www.ivc-ev.de). Der Anteil von Kunstfasern wird hierbei aufgrund der limitierten Verfügbarkeit von Naturfasern weiterhin überproportional ansteigen.

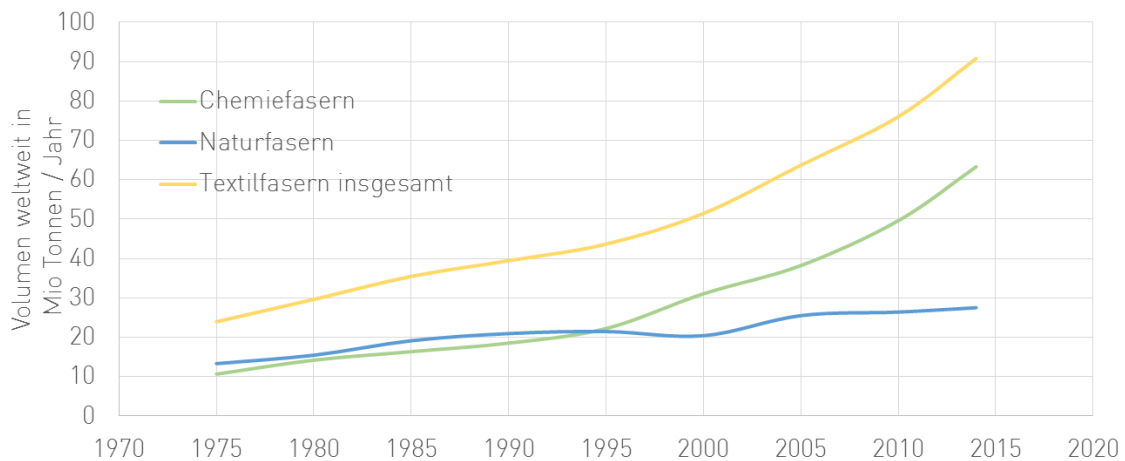


Abbildung 1: Weltweite Garnproduktion, Quelle: www.ivc-ev.de

Im Produktionsprozess werden die Kunstfasern nach dem eigentlichen Spinnprozess der Luftverwirbelung zugeführt um in der Kunstfaser einen Fadenschluss zu erzeugen. Hierbei wird der gesponnene Faden durch Luftverwirbelungsdüsen geleitet, in denen sich die Filamente des Garns je nach Art der Düse unterschiedlich untereinander verknoten und dem Garn so seine Charakteristik geben. Diese Luftverwirbelungsdüsen werden gewöhnlich mit Druckluft betrieben. Eine klassische Luftverwirbelungsdüse der Firma Heberlein AG ist in Abbildung 2 dargestellt. Weltweit sind ca. 6 Millionen solcher und vergleichbarer Düsen im Einsatz.

Um eine bestimmte Garneigenschaft zu erreichen, werden in den Düsen unterschiedliche strömungsmechanische Effekte ausgenutzt. Die Möglichkeiten sind hierbei zahlreich. Nachteilig an den aktuell im Einsatz stehenden Düsen ist, dass der Druckluftverbrauch und damit der Energiebedarf sehr hoch sind. Im Mittel verbraucht eine einzelne Düse etwa 2.5 Nm^3 Luft pro Stunde (Luftverwirbelung oder Lufttexturierdüse). Unter der Annahme, dass die Druckluft energieeffizient erzeugt wird und ein mittleres Druckniveau von 4-5 bar ausreichend ist, ergibt sich für diesen Produktionsschritt ein jährlicher Energieverbrauch in Form von Druckluft zur Erzeugung des Weltbedarfs an Kunstfasern von ca. 1.4×10^{10} kWh. Dies entspricht der Jahresleistung von ca. 1.5 Atomkraftwerken bzw. einem Viertel des Jahresbedarfs an Elektrizität der Schweiz (2014).

In Tabelle 1 sind die Energieanteile am Gesamtverbrauch einer Spinnerei für zwei verschiedene Spinnprozesse (Fully drawn yarn (FDY) / partially oriented yarn (POY) sowie draw-textured yarn



(DTY)) dargestellt. Es ist dabei zu beachten, dass jedes Garn den FDY/POY Prozess durchläuft und ca. 40% der Garne anschliessend noch zusätzlich den DTY Prozess durchlaufen.

Man erkennt, dass der Energieverbrauch der Haupt- oder Luftverwirbelungsdüsen, welche Thema des vorliegenden Projektes sind, ca. 15% bzw. 30% ausmachen und somit erheblich sind. Somit ist die Energieeffizienz der Luftverwirbelungsdüse auch ein wichtiges Verkaufsargument für die Hersteller, da der Druckluftverbrauch einen grossen Kostenfaktor darstellt.

Zur Reduktion des Energiebedarfs im Rahmen dieses Projekts wurde ein bisher in Luftverwirbelungsdüsen nicht verwendetes strömungsmechanisches Konzept eingesetzt. Eine erste Abschätzung zu Projektbeginn ergab eine realistische Reduktion des Druckluftverbrauches um 50% gegenüber den herkömmlichen Düsen. Dies entspräche einem Einsparpotential von ca. 25'000 TJ/ Jahr weltweit. Dies ist äquivalent zu 12 % des Gesamtverbrauchs an elektrischer Energie in der Schweiz (2014).

Die strömungsmechanischen Verhältnisse, welche durch die Druckluft in den aktuellen Luftverwirbelungsdüsen erzeugt werden, bewirken eine Verflechtung der einzelnen Filamente zu einem Garn. Dazu wird eine relativ fix an den Luftverbrauch der Düse gekoppelte Schwingungsfrequenz der Strömung ausgenutzt. Energetisch betrachtet wird so allerdings nur ein Bruchteil der Energie der Druckluft tatsächlich zur Garnbeeinflussung genutzt. Der Hauptanteil wird dazu benötigt, die zur Verknotung verwendete Sekundärströmung (Verwirbelung) überhaupt zu erzeugen. Da die Anzahl der Knoten pro Länge als eine wichtige Produkteigenschaft vorgegeben ist, ist zudem eine Steigerung der Garngeschwindigkeit (Produktionsleistung) immer auch an eine Erhöhung des Luftverbrauchs gekoppelt.

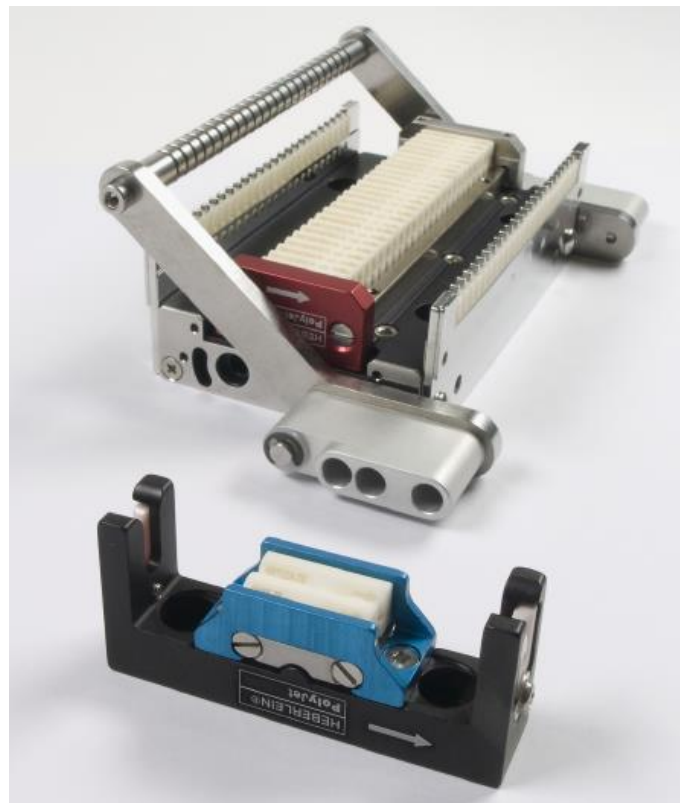


Abbildung 2: Klassische Luftverwirbelungsdüse (Polyjet, Quelle Heberlein).



Das Ziel des vorliegenden Projekts ist, die in der Druckluft vorhandene Energie gezielter zur Beeinflussung der Garneigenschaften zu verwenden und nicht ungenutzt ausströmen zu lassen. Der Ansatz ist, zur Garnproduktion die primäre kinetische Energie der Druckluft zu verwenden und nicht wie bisher, lediglich fluiddynamische Sekundäreffekte auszunutzen. In den heute eingesetzten Düsen wird ein Doppelwirbelsystem erzeugt um den oszillierenden Filamentstrang zu verflechten. Die Schwingungsfrequenz und damit die erzielbare Anzahl Knoten pro Zeit ist dabei direkt mit der Luftmenge gekoppelt. Dieser stationäre Doppelwirbel sollte beim vorgeschlagenen neuen Konzept durch einen pulsierenden, von einem Oszillator gezielt angeregten Doppelwirbel, ersetzt werden. Damit sollte sich die gleiche Garnbearbeitung wie mit dem aktuell erzeugten kontinuierlichen Wirbelpaar erreichen lassen. Der Luftstrom wird hierbei auf zwei Düsen aufgeteilt, so dass der Energieverbrauch wie bereits erwähnt in erster Näherung um 50% reduziert werden kann. Zusätzlich lässt sich bei diesem Ansatz die Oszillationsfrequenz unabhängig von der Luftmenge einstellen. Dies ermöglicht, den Luftverbrauch von der Produktionsleistung im Wesentlichen zu entkoppeln und die Kontrolle über den Prozess zu verbessern.

Prozess	Komponente	Spinnprozess FDY/POY	Texturierprozess DTY
Aufschmelzen der Spinnmasse	15-25%		
Kühlen der Faser	Anblasen im Fallschacht	~5%	
Erwärmung des Fadens	Heizer		~30%
Leichter Fadenschluss	Vorverwirbelungsdüse	~5%	
Verstrecken	Heizen der Galetten	10-20%	
	Antrieb der Galetten	10-20%	~20%
	Hauptverwirbelungsdüse	~15%	~30%
Aufwickeln	Wickler	~5%	~15%
Klimatisierung des Gebäudes und weiteres	~15%	~5%	

Tabelle 1: Energieverbrauch bei der Faserherstellung (Quelle: Heberlein), Anteil der hier besprochenen Verwirbelungsdüsen in Rot.

Das Potential zu Energieeinsparung ist bei den Luftverwirbelungsdüsen sicherlich am grössten, da jeder gesponnene Faden mind. eine solche durchläuft. Bei erfolgreicher Umsetzung für die Verwirbelungsdüse sind jedoch auch verschiedene andere Anwendungen in der Fadenbeeinflussung denkbar. Heberlein hat ein vollständiges Programm an Garnbeeinflussungsdüsen, von denen viele mit Druckluft betrieben werden. Dies sind u.a. Luftmigrationsdüsen, Luftblastexturierdüsen, Luftdralldüsen sowie Fach-Luftverwirbelungsdüsen. Bei erfolgreicher Umsetzung des vorgeschlagenen Oszillatorkonzepts für Luftverwirbelungsdüsen, was gleichzeitig auch einem deutlichen Erkenntniszuwachs bzgl. der Funktionsweise der Düsen beinhaltet, besteht Potential zur Energieeinsparung bei den anderen Düsentypen und es könnten womöglich auch völlig neue Anwendungsbereiche erschlossen werden.

Das vorliegende Projekt folgte dem dominierenden weltweiten Trend bei der Faserherstellung zur Effizienzsteigerung, das heisst Senkung der Produktionskosten bei gleichzeitig niedrigen Investitionen für die Produktionsanlage. Treiber bei diesem Trend sind dabei die Fixkosten für die Maschinenbeschaffung sowie die Produktionsleistung pro eingesetztem Kapital. Bei diesen Investitionen wird auch der Platz bzw. der Volumenbedarf berücksichtigt, da dies unmittelbaren Einfluss auf die Gebäudegrösse hat. Darüber hinaus ist eine minimale Ausschussrate, also die Zuverlässigkeit der Maschinen, sehr wichtig. Neben diesen Fixkosten sind jedoch auch die variablen



Kosten wie die Energiekosten tief zu halten. Der weltweite Trend, dass die Fasern immer feiner werden und somit die Verbrauchskennzahl kWh/kg steigt, verschärft die Nachfrage nach energiearmen Produktionsprozessen. Durch die Tatsache, dass die Energiekosten über die Lebensdauer der Düse bereits heute ein Vielfaches der Anschaffungskosten betragen, und sich dieser Trend noch verstärken wird, ist die Energieeffizienz ein Entwicklungsschwerpunkt quer durch alle Produktgruppen bei Heberlein AG. Es werden dabei verschiedene oft empirische Modifikationen im Entwicklungsprozess vorgenommen, deren Potential jedoch beschränkt ist. Das Konzept der Oszillatordüse hingegen birgt durch den für die Garnherstellung völlig neuen Ansatz sehr viel mehr Potential. Bislang wurde das bisherige Konzept des Doppelwirbels nie grundsätzlich in Frage gestellt und daher auch nur inkrementell verbessert. Im Falle der erfolgreichen Umsetzung des Oszillatorkonzepts hätte das neue Produkt das Potential für einen Technologiewechsel bei der Garnveredelung.

1.2. Projektziel

Das Hauptziel dieses Projekts war die Verringerung des Druckluftbedarfs der Luftverwirbelungsdüsen bei gleicher Wirkung und somit die Reduktion des Energieverbrauchs. Es wurden zwei Stossrichtungen bei der Auslegung und Anwendung des Prinzips der Oszillatordüse verfolgt. Erstens wurde über den Oszillator eine periodische Umschaltung des Luftvolumenstroms auf zwei Garnkanäle angestrebt. Dadurch kann theoretisch eine Halbierung des Volumenstroms erreicht werden. Die Frequenz der Umschaltung orientierte sich an der vorgegebenen Knotenfrequenz aus Knotendichte und Fadengeschwindigkeit. Bei diesem Konzept wurde bis auf die periodische Umschaltung im Vergleich zur aktuellen Verwirbelungsdüse möglichst alles unverändert belassen. Dies barg den Vorteil, dass der Fadenschlussmechanismus, der bislang nicht voll verstanden ist, grundsätzlich identisch sein müsste. Neben einer angestrebten Halbierung des Energieverbrauchs war zu erwarten, dass die Knotenbildungen durch die erzwungenen Frequenzen regelmässiger auftreten. Die aktuell verwendeten Düsen weisen bezüglich Knotenfrequenz eine gewisse Stochastik auf, die als qualitativ weniger hochwertig angesehen wird.

Als zweite Stossrichtung wurde der Einfluss einer forcierten periodischen Strömung auf den Fadenschlussprozess untersucht. Bei dieser Stossrichtung zur Energieeinsparung wurden auch höhere Knotenfrequenzen angestrebt und allenfalls auch andere Fadenschlussmechanismen untersucht. Hintergrund ist wiederum, dass der Fadenschlussprozess selber aktuell noch wenig verstanden ist und noch viel Potenzial für eine Optimierung bietet. Dies zeigt sich auch in der Praxis, wo eine Veränderung der Parameter im Spinnprozesse sehr heikel ist und die Übertragbarkeit von einem Prozess auf den anderen oft nicht gegeben ist.

Das hier untersuchte Prinzip der Oszillatordüse ermöglicht eine Platzierung direkt bei der Luftzuführung sehr nahe am Garnkanal. Die Mechanismen, wie das Garn hierbei mit einer durch das Oszillatordesign vorgegebenen Frequenz beeinflusst wird, sind vielfältig. Eine pulsierende Strömung wie bei der ersten Stossrichtung ist möglich, jedoch auch periodisches Hin- und Herblasen des Garns durch einen schwingenden Gasstrom aus dem Oszillator. Der zur Knotenbildung notwendige Drall kann dadurch direkt durch die Hauptströmung erzeugt werden anstatt durch die Sekundärströmung wie im bisherigen System.

Das Anwendungsspektrum für oszillatorbasierte Düsen im Textilbereich ist potentiell gross. Um eine erfolgreiche kommerzielle Umsetzung zu erreichen, ist es notwendig, sich zunächst auf einen Teilbereich zu beschränken, um dort im industriellen Umfeld die Machbarkeit und den Mehrwert zu demonstrieren. Gemeinsam mit Heberlein wurde dazu der BCF (Bulk Continuous Fiber) Prozess ausgewählt. Dieser Prozess wird z.B. bei der Teppichgarnherstellung verwendet. Der Luftverbrauch bei diesen Düsen ist relativ hoch verglichen mit dem durchschnittlichem Luftverbrauch über alle Düsen. Die Verwirbelungsdüse für diesen Prozess, welche aktuell von Heberlein für diesen Markt angeboten wird, ist die LD32.05 Düse, siehe Abbildung 3. Bei der Abbildung fehlt die Abdeckplatte



und erlaubt somit einen Einblick in den Garnkanal. Die Luftzuführung findet von unten her statt, das Gas tritt vorne und hinten aus dem Garnkanal aus. Das Garn durchläuft den Garnkanal von vorne nach hinten.

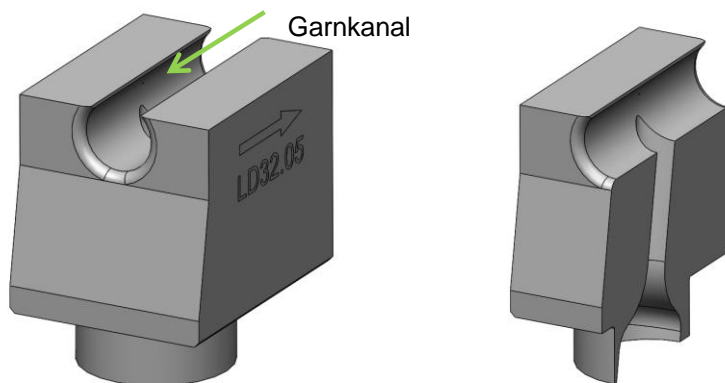


Abbildung 3: Geometrie der Referenzdüse für den BCF Prozess, links komplett, rechts geschnitten.

Folgende Parameter sollen eingehalten werden:

- Referenzknotenzahl: 20 Knoten/m
- Verwirbelungsdruck: 4 bis 5 bar Überdruck gegenüber Atmosphäre
- Fadengeschwindigkeit: 3000 m/min

Die notwendige Frequenz in Hz berechnet sich aus Fadengeschwindigkeit und Referenzknotenzahl zu einer Grundfrequenz von 1000 Hz. Der aktuell benötigte Volumenstrom ist dem Katalog von Heberlein zu entnehmen. Mit der Formel $Q_{vn} = 10.89 * (p_e + 1)$ (p_e entspricht dabei dem Überdruck) erhält man bei einem Überdruck von $p_e = 4 \text{ bar}$ für den Normvolumenstrom für einen Garnkanal den Normvolumenstrom $Q_{vn} = 54.45 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

1.3. Vorgehen bei der Auslegung

Der physikalische Prozess, in dem ein Luftstrom eine Bewegungsantwort eines Filamentstrangs auslöst, der wiederum zur Knotenbildungen im Filamentstrang führt, ist sehr komplex. In der gesamten Auslegung wurde daher die Strömung in den Verwirbelungsdüsen von der Bewegungsantwort des Fadens auf die Strömung getrennt. Während die komplexe zeitabhängige Strömung relativ gut simulatorisch behandelt werden kann, ist die Wechselwirkung des Filamentstrangs mit der Strömung und somit die erwünschte Knotenbildung nicht verlässlich durch ein Modell abbildbar, sondern hängt von einer Vielzahl von zusätzlichen Parametern auf der Maschine ab. Um dies in diesem Entwicklungsschritt zu berücksichtigen sind Prototypentests mit realen Filamentsträngen unter anwendungsnahen Bedingungen unabdingbar.

Aufgrund dieser Überlegungen wurde für die Konzeptionierung und Dimensionierung der in diesem Projekt betrachteten Oszillatordüsen folgendes fünfstufiges Entwicklungsprozedere angewandt:

- a. Analytische Auslegung: Basierend auf einer Literaturstudie zu Fluidoszillatoren wurde zunächst eine analytische Auslegung und grobe Dimensionierung der Komponenten vorgenommen.



- b. Anschliessend wurden 2D Strömungssimulationen mit den Oszillatorgeometrien aus Schritt a durchgeführt und eine Geometrieoptimierung vorgenommen. Als Ergebnis lagen vier Oszillatoren vor, die für erste Prototypentests hergestellt wurden.
- c. Messkampagne 1: Für die erstellten Prototypen wurde ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt, welches in Abschnitt 2 im Detail beschrieben ist.
- d. Anschliessend wurde die Strömung für alle Varianten in 3D unter Einbezug des realen Garnkanals detailliert simulatorisch untersucht. Diese Zusatzerkenntnisse sowie die Erkenntnisse aus der Messkampagne 1 führte zu zwei weiteren optimierten Varianten, die wiederum als Prototyp gefertigt wurden.
- e. Messkampagne 2: In einer zweiten Messkampagne wurden die neuen Varianten aus Schritt d untersucht.

Der vorliegende Bericht behandelt im Folgenden zunächst die angewandte Messtechnik zur Bestimmung der Oszillatorfunktionalität und -performance. Anschliessend wird die Vorgehensweise bei der rechnerischen 3D Optimierung im Detail erläutert. Im Abschnitt 4 werden alle Ergebnisse aller betrachteten Varianten vergleichend dargestellt und bewertet. Ebenso werden hier alle Erkenntnisse zusammengefasst und eine abschliessende Bewertung hinsichtlich Energieeinsparung vorgenommen.

2. Messtechnik

2.1.1. Akustische Frequenzbestimmung

Als robuste Methode zur Verifikation des Schwingverhaltens eines Fluidoszillators hat sich die akustische Messung mittels Mikrophon erwiesen. Über ein Mikrophon, welches nahe beim Austritt des Garnkanals, jedoch nicht im Gasstrahl platziert wird, kann der akustische Frequenzgang für verschiedene Eingangsdrücke ermittelt werden. Dies ist exemplarisch in Abbildung 4 (links) dargestellt. In derselben Abbildung rechts sind die Frequenzverläufe für verschiedene Eingangsdrücke dargestellt. Die y-Achse des Plots ist ein Mass für den Schalldruck (Absolutwerte nicht entscheidend). Deutlich sichtbar ist die Schalldrucküberhöhung bei der jeweiligen Oszillationsfrequenz. Die Frequenzgänge für die verschiedenen Eingangsdrücke des Oszillators sind vertikal verschoben um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewähren. Für dieses Beispiel erkennt man deutlich, dass sich die Oszillatorfrequenz mit Erhöhung des Eingangsdrucks kontinuierlich von ca. 1370 Hz zu ca. 1630Hz verschiebt. Diese Analyse wurde für alle Oszillatoren durchgeführt.

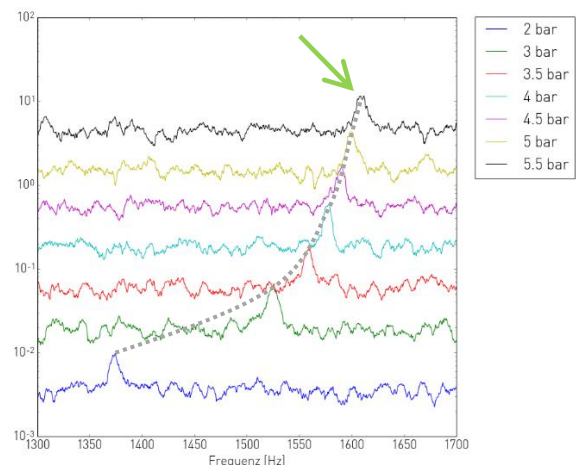
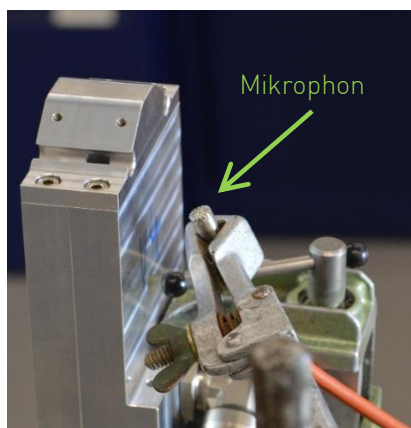


Abbildung 4: Mikrophonmessung des Frequenzgangs der Oszillatoren, links Oszillator mit Mikrophon, rechts typischer Frequenzgang mit Peak bei Oszillatorfrequenz.



2.1.2. BOS Messungen

Ergänzend zur akustischen Frequenzbestimmung wurde das Strömungsfeld am Austritt der Oszillatoren optisch mittels der Background-Oriented-Schlieren (BOS) Methode zeitaufgelöst visualisiert. Dieses Verfahren nutzt Dichtegradienten in der Strömung aus um diese sichtbar zu machen. Durch den Vergleich der Aufnahmen mit einem Referenzbild werden die austretenden Strömungspulse als hellere Bereiche in den Aufnahmen sichtbar. Bei einer genügend hohen Bildrate kann so die Oszillationsfrequenz, aber auch Details der Ausströmung analysiert werden.

Diese Messungen dienen der Verifikation, ob sich die Resonanz des Oszillators auch in eine messbare Pulsation des Geschwindigkeitsfeldes am Eintritt in den Garnkanal übersetzt. Diese Messungen wurden ohne Abdeckung auf dem Garnkanal vorgenommen um einen besseren optischen Zugang zu gewähren und nur in der ersten Messkampagne durchgeführt. Als Hochgeschwindigkeitskamera wurde eine Photron FASTCAM SA-Z mit einer Erfassungsrate von 20'000-200'000 Bildern pro Sekunde eingesetzt. Der Messaufbau ist in Abbildung 5 dargestellt, wobei die Kamera selber nicht abgebildet ist.

Da die Umsetzung der Pulsationen in Geschwindigkeitspulsationen durchweg sehr gut nachweisbar war und auch eine gute Übereinstimmung mit den Akustikmessungen und CFD-Berechnung zeigen, wurden diese Messungen in der zweiten Messkampagne nicht wiederholt.

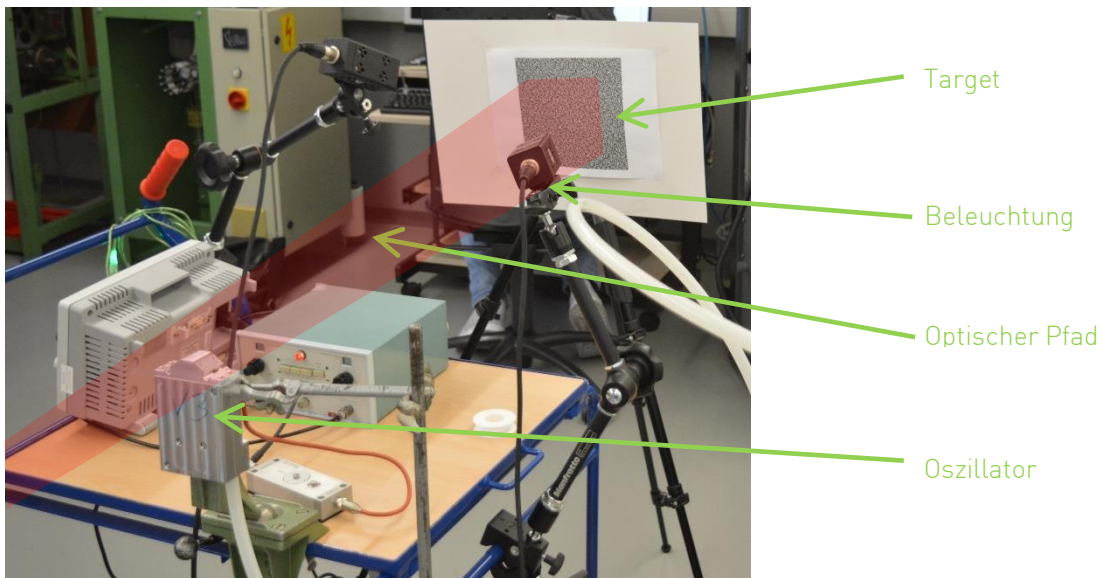


Abbildung 5: Messaufbau für BOS-Messungen. Die Hochgeschwindigkeitskamera (nicht dargestellt) ist auf den Oszillator gerichtet mit dem Target im Hintergrund.

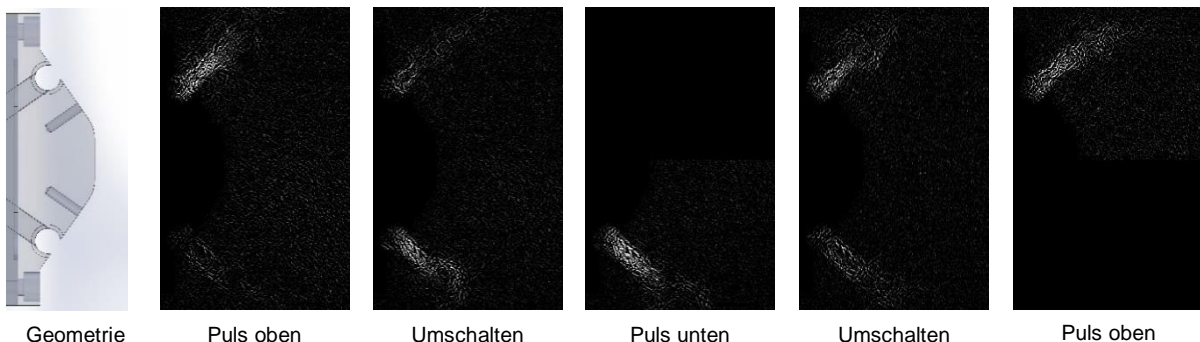


Abbildung 6: Typische BOS Visualisierungen für einen Oszillator.



2.1.3. Tests mit realem Garn

Entscheidend für die Performance einer Luftverwirbelungsdüse ist ihre Fähigkeit, die Filamentstränge zu verwirbeln und dadurch Knotenbildung zu erreichen. Wie bereits erwähnt ist dieser komplexe Vorgang nur durch reale Fadentests unter produktionsnahen Bedingungen nachzubilden. Hierzu wurden alle Tests auf einer Testmaschine «Erdmann» bei Heberlein durchgeführt. Diese Tests wurden durchweg bei einer Garneschwindigkeit von 800 m/min ausgeführt, welches die maximal mögliche Geschwindigkeit in diesem Labormasstab darstellt. Dies ist deutlich tiefer als die realen Produktionsgeschwindigkeiten von 3000 m/min, die jedoch nur auf Kundenanlagen erreicht werden können. Es wurde für alle Düsen mit verschiedenen Versorgungsdrücken relevante Fadenlängen verwirbelt und bezüglich Knotenbildung ausgewertet. Parallel zu den Analysen des Garns wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vom Faden im Garnkanal gemacht.

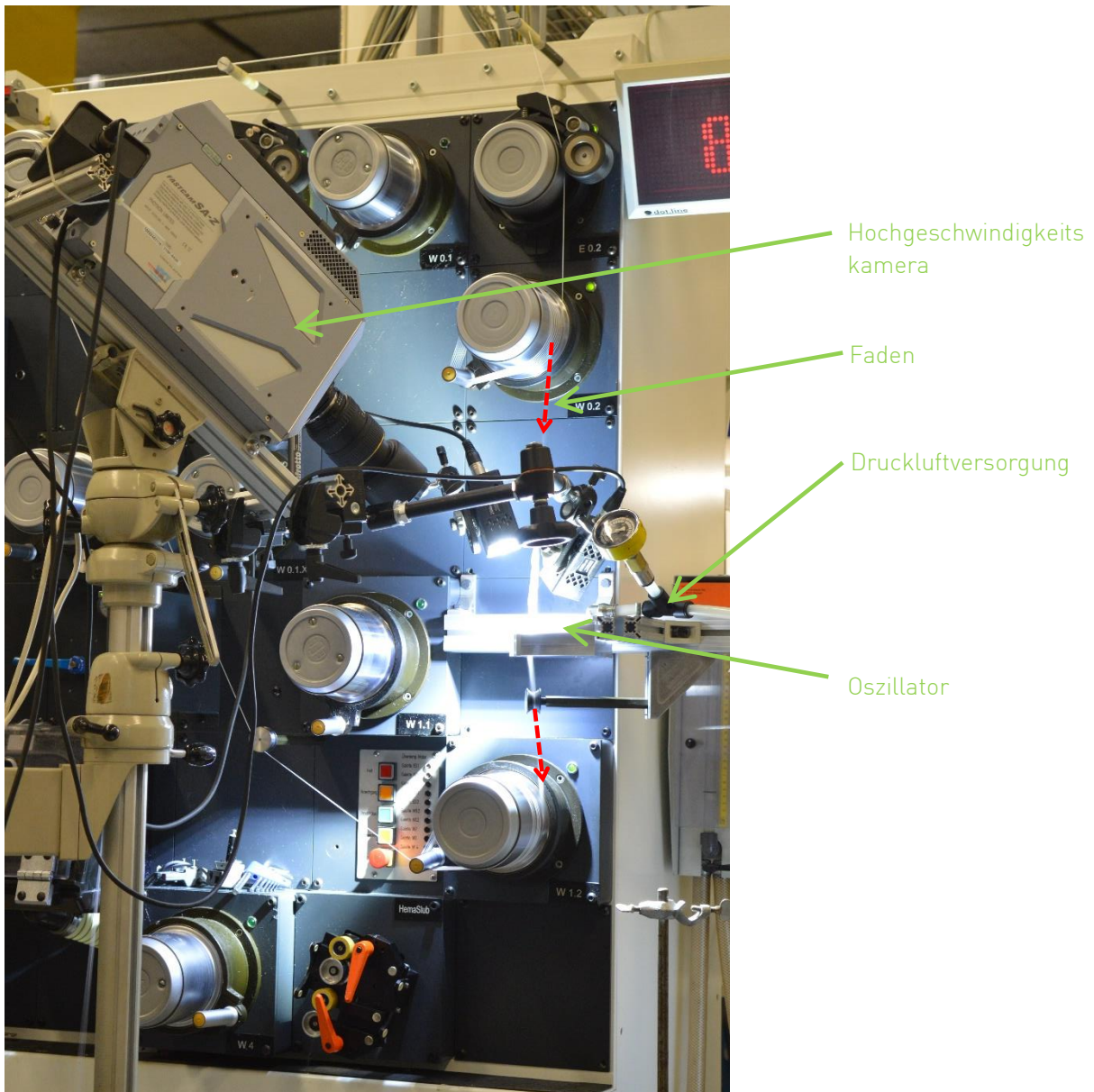


Abbildung 7: Setup auf der Labormaschine «Erdmann» für die Garntests.



2.1.3.1. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sind die einzige Methode, die Reaktion des Filamentstrangs auf die Strömung in der Verwirbelungsdüse zeitaufgelöst im Detail zu erfassen. Für diese Messungen wurden die Luftverwirbelungsdüsen mit Glasplattenabdeckungen versehen, die einen guten optischen Zugang ermöglichten. In Abbildung 8 sind typische Standbilder dieser Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für eine Sequenz von knapp einer Millisekunde dargestellt. Dies entspricht bei der dargestellten Düse (V1, 5 bar) mit 1530 Hz Oszillationsfrequenz ca. 6 Bilder pro Schwingungsperiode. Man erkennt, wie der Luftpuls den Faden ballonförmig zu öffnen vermag. Ebenso erkennt man aber bereits hier, dass die Frequenz der Pulse zu hoch ist, als dass sie bei der Fadengeschwindigkeit vom Faden voll aufgenommen werden kann. Darauf wird im Ergebnisteil noch eingegangen. Für das Verständnis der Funktionsweise der Oszillatoren sind diese Aufnahmen aller Düsen eine sehr wertvolle Erkenntnisquelle.

2.1.3.2. Garnqualitätsmessungen

Für jede Oszillatorvariante sowie die Referenzkonfigurationen (bestehende Düsen) wurden für verschiedene Versorgungsdrücke Garnqualitätsmessungen vorgenommen. Es wurden hierbei zwei Qualitätsparameter ermittelt: Die Anzahl der Knoten pro Meter sowie der maximale Knotenabstand auf einer relevanten, vergleichbaren Fadenlänge. Wichtig ist für diese Messungen, dass sie jeweils nur innerhalb einer Messkampagne vergleichbar ist, nicht jedoch von Kampagne zu Kampagne, da sich die Ergebnisse absolut gesehen aufgrund der veränderten Versuchsbedingungen (Umweltbedingungen, Garnqualität) hierbei stark ändern können. Daher sind diese Daten mit den Referenzdaten normiert.

2.1.4. Luftverbrauchsmessungen

Massgeblich für den Energieverbrauch der Luftverwirbelungsdüsen ist neben dem Versorgungsdruck der effektive Luftverbrauch. Dieser ist durch den engsten Querschnitt, jedoch auch durch die Konstruktionsdetails eines jeden Oszillators gegeben. Um eine Vergleichbarkeit im Energieverbrauch zu gewährleisten, wurden daher für alle Varianten bei verschiedenen Drücken die Luftverbrauchsmessungen durchgeführt. Diese sind jeweils bei den Ergebnissen angegeben.

3. Rechnerische Auslegung und Optimierung

Für die Auslegung der Oszillatoren ist ein gutes Setup der Simulationsumgebung sehr wichtig. Im ersten Schritt wurden diverse Oszillatoren in 2D Geometrien mittels instationären CFD-Simulationen ohne Betrachtung der Umlenkung im Garnkanal untersucht. Für die detaillierte Untersuchung der vermessenen Oszillatoren wurden anschliessend der gesamte Garnkanal mit betrachtet. Dies führt zu sehr komplexen, rechenaufwändigen 3D-Simulationen. Im Folgenden ist das Setup dieser Berechnungsstrategie detailliert, sowie das Prozedere der Datenauswertung skizziert.

3.1. Berechnungssetup

Aus den CAD Daten des Oszillators wurde jeweils der Fluidkanal extrahiert und anschliessend vernetzt. Dafür wurde ein automatisches Prozedere erstellt, welches die Netze für alle Varianten erzeugt. Das gesamte CFD-Berechnungsvorgehen beruht hierbei auf der Software OpenFOAM. Die Geometrien wurden mit ca. 4-6 Millionen Zellen pro Variante vernetzt. Zunächst wurde dann für den Standardversorgungsdruck von 4 bar (5 bar absolut) und 0 bar (1 bar absolut) Umgebungsdruck eine stationäre Startlösung generiert. Anschliessend wurde ausgehend von dieser Startlösung eine instationäre Simulation jedes Oszillators über einen Zeitraum von 0.01 bis 0.015 s durchgeführt. Dies entspricht 10 Perioden eines Oszillators bei 1000 Hz, etwas mehr für Oszillatoren mit höheren Frequenzen. Dies hat sich als ausreichend für alle Konfigurationen erwiesen, um anfängliche

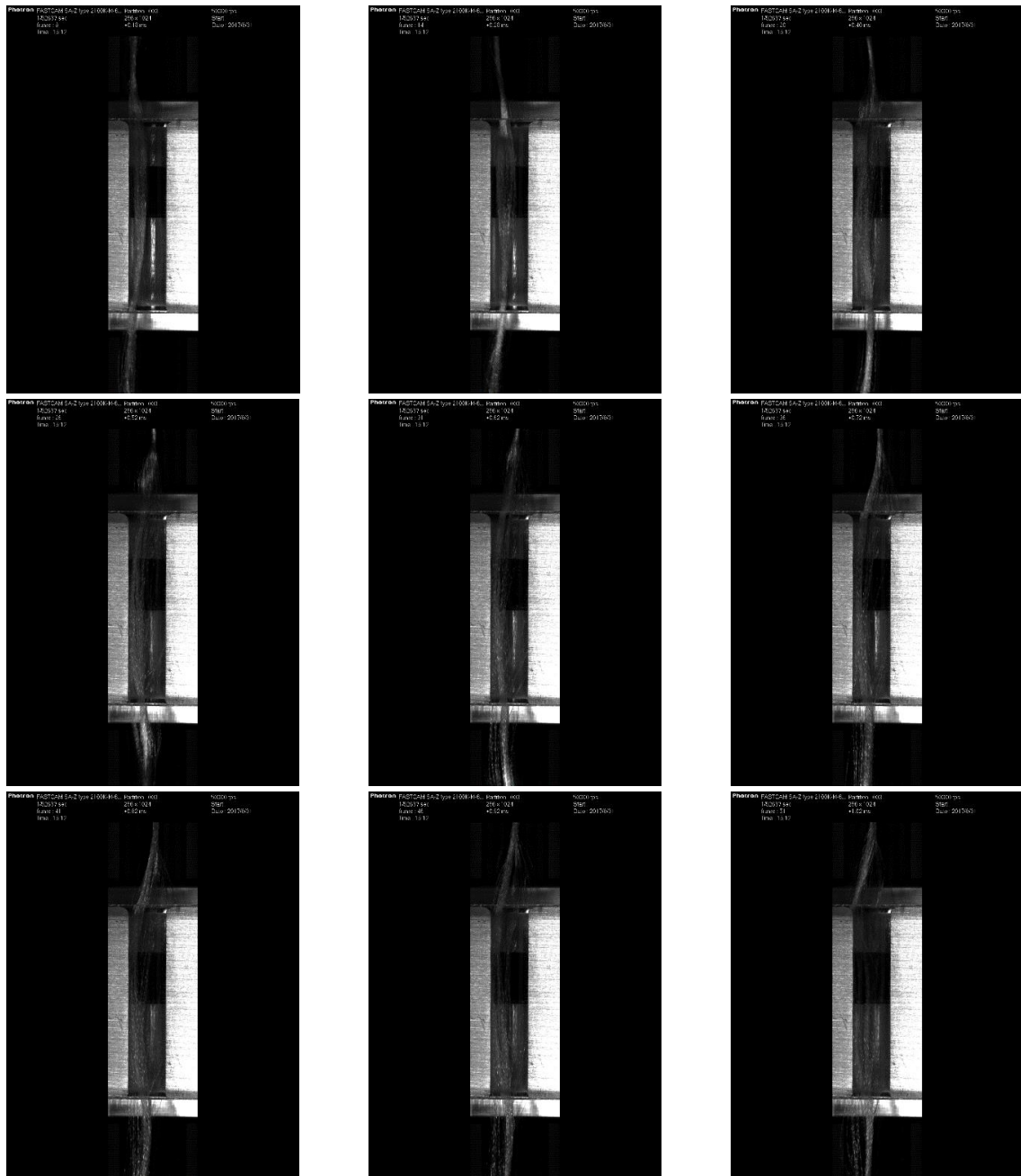


Abbildung 8: Typische Standbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Framerate: 50'000 fps, Abstand der Bilder 0.1 ms. Für diese Düse (V1, 5 bar) beträgt die Frequenz 1530 Hz, die Periodendauer ca. 0.65 ms.

Transienten im Einschwingvorgang gut abbilden zu können. Als CFD-Strömungsmodell wurde ein kompressibler, instationärer Löser mit $k-\omega$ STT Turbulenzmodell verwendet. Als Gasmodell wurde ein perfektes Gas mit Eigenschaften von Luft eingesetzt.

Die Berechnungen wurden auf einem Rechencluster durchgeführt. Auf 16 Prozessoren dauerte die Berechnung einer Variante ca. 3 Tage.

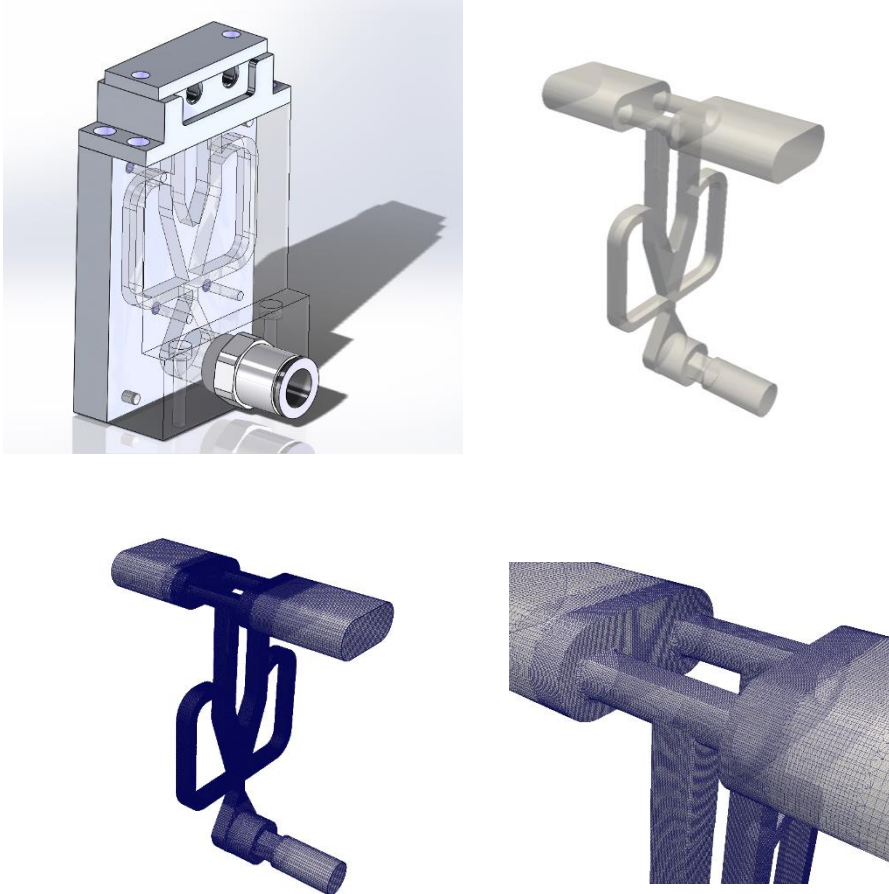


Abbildung 9: Exemplarische Darstellung der Erstellung des Berechnungssetups. Die Geometrie des Strömungskanals des Oszillators wird hierbei extrahiert und mit ca. 4-6 Millionen Zellen vernetzt.

3.2. Auswertungsprozedere

Die gesamte Auswertung der Daten wurde stark mittels python Skripten automatisiert, um die grossen Datenmengen handhabbar auswerten zu können (ca. 25 GB pro Variante und Betriebspunkt). Für alle Varianten wurden die Massenströme durch die Oszillatoren ermittelt sowie der zeitliche Verlauf einiger Strömungsparameter im Garnkanal aufgenommen. Darüber hinaus wurden sehr viele Strömungsvisualisierungen, auch in Form von Animationen, erstellt. Im Rahmen dieses Berichts sind insbesondere die Integraldaten wie Massenströme, als auch die zeitliche Auswertung von Monitordaten im Garnkanal relevant. Zum Verständnis der Strömung werden auch Standbilder von Animationen für die Oszillatorvarianten dargestellt.

4. Performancebericht

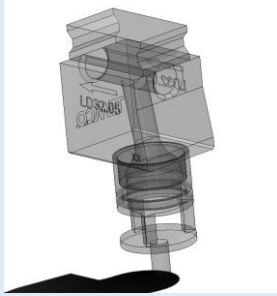
Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse des Projektes zusammengefasst.



4.1. Variantenübersicht

Es wurde eine Vielzahl von Varianten ausgelegt, als volles 3D Modell simulatorisch untersucht und eine reduzierte Anzahl in Form von Prototypenmessungen vermessen. Diese sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Dort sind ebenfalls auch die ermittelten Frequenzen eingetragen. Die Historie der Varianten basiert auf folgender Entwicklungslogik:

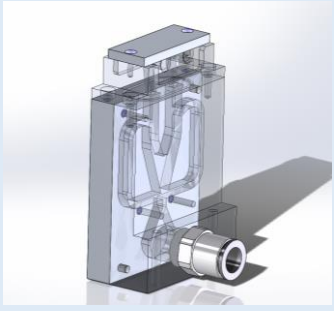
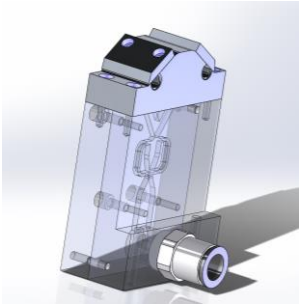
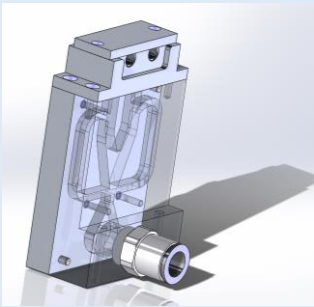
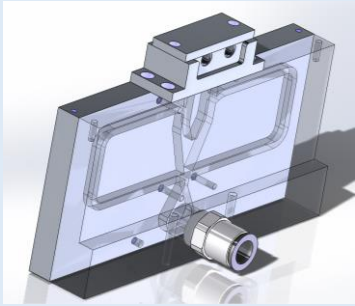
- V0 stellt die Referenzdüse dar, sie beinhaltet keinen Oszillator. Der für den Luftverbrauch dieser Düse massgebliche engste Querschnitt wurde als Referenzquerschnitt für die Oszillatordüsen verwendet.
- V1, V2 V3 und V4 sind die Oszillatorvarianten, die zu Beginn des Projekts als am vielversprechendsten ermittelt wurden. Für diese wurden Prototypen gebaut und (bis auf V3, da sehr ähnlich zu V4) auch alle rechnerisch voll erfasst. Basierend auf den Erkenntnissen der Messungen und der Simulationen wurden dann weitere Varianten erstellt:
- V2_ext: Diese Variante wurde basierend auf der V2 erstellt, in dem die Rückführungs Kanäle verlängert wurden. Ziel war eine Frequenzsenkung.
- Die Varianten V1e und V4e sind weiterentwickelte Varianten V1 und V4, die jedoch mit einem elliptischen Querschnitt in den Garnkanal ausgestattet sind, der zudem noch gekippt ist in Garnrichtung. Der elliptische Querschnitt entspricht dem in der Vergangenheit für die Referenzdüsen gefundenen Optimum. Hierbei wurde bei der Variante V1e bewusst eine Querschnittsverengung nach dem Oszillator in Kauf genommen. Bei Variante V4 wurde diese Querschnittsverengung als zu grosse Veränderung des Grundoszillators eingeschätzt, weswegen der Grundquerschnitt drastisch reduziert wurde (was zu deutlich geringeren Luftverbräuchen dieser Variante führt).
- Basierende auf der Variante V1e wurden simulatorisch weitere Varianten untersucht:
 - o V1e_mod1: Verengter Eintrittsquerschnitt mit dem Ziel, das Druckniveau im Oszillator leicht zu senken und damit die Austrittsgeschwindigkeitsspitzen bei nicht aktiviertem Kanal zu senken.
 - o V1e_mod2: wie V1e_mod1, jedoch zusätzliche Geometriemodifikation im Übergang zum elliptischen Querschnitt zum Garnkanal derart, dass dort eine Überschallbeschleunigung stattfinden kann.
 - o V1e_mod3: Variante mit deutlich abgesenkter Oszillatorfrequenz.
 - o V1e_mod4: Variante mit sehr langem (1 m) Verbindungsrohr zwischen Oszillator und Garnkanal.

Variante	Bild	Bemerkung	Prototyp- messung / Simulation durchgeführt	Frequenz rechnerisch/ gemessen / Hz bei p = 4barü	Querschnitt / mm ²
V0		Referenzdüse	ja / ja	keine Oszillation ----- keine Oszillation	18.39



V1		Zwei Garnkanäle	ja / ja	keine Oszillation ----- 1520 (bei 4.5 bar)	18.39
V2		Sweep jet	ja / ja	1415 ----- 1575	18.42
V2_ext		Sweep jet, extended feedback	ja, nur Akustik / --	Nicht gerechnet ----- 1920	18.42
V3		Zwei Garnkanäle	ja / --	nicht gerechnet ----- 950	18.00
V4		Zwei Garnkanäle	ja / ja	1195 ----- 1090	18.00



V1e		Elliptischer Querschnitt	ja / ja	956 ----- 1000	18.39
V4e		Elliptischer Querschnitt	ja / ja	1140 ----- 1080	7.50
V1e_mod1		Verengter Querschnitt	-- / ja	1045 ----- kein Prototyp	12.39
V1e_mod2		Verengter Querschnitt, Überschallbeschleunigung in Ellipse	-- / ja	1166 ----- kein Prototyp	12.39
V1e_mod3		Reduzierte Frequenz	-- / ja	687 ----- kein Prototyp	18.39

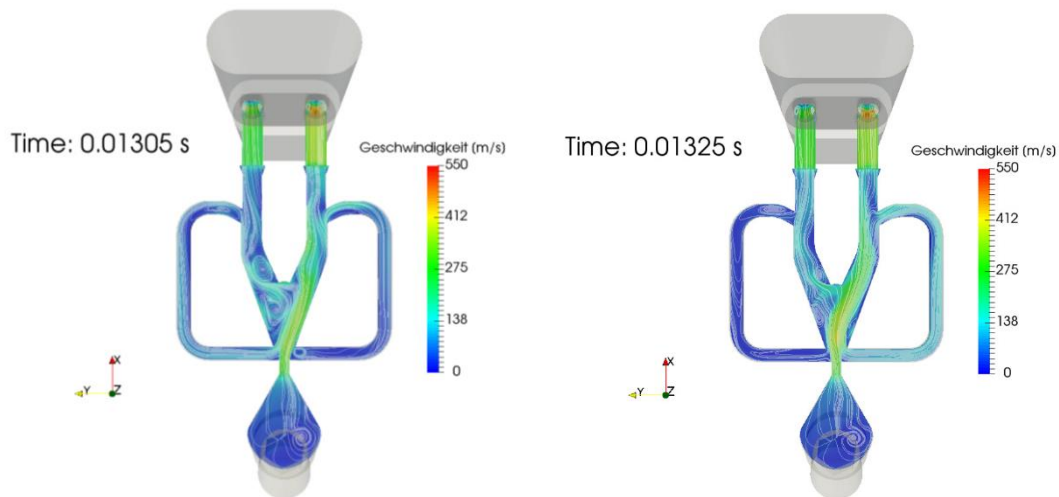


V1e_mod4		Langer Abstand zwischen Oszillator und Garnkanal	-- / ja	Keine Oszillation im Garnkanal mehr ----- kein Prototyp	18.39
----------	---	--	---------	--	-------

Tabelle 2: Übersicht aller Varianten mit ermittelten Oszillationsfrequenzen.

4.2. Strömung im Oszillator, exemplarisch V1e

Die Strömung in den Oszillatoren, den Rückführungen und den Übergängen in den Garnkanal ist durchwegs sehr komplex, dreidimensional und geprägt durch grosse Kompressibilitätseffekte. Die genaue Beschreibung all dieser Effekte bei den verschiedenen Varianten übersteigt den Umfang dieses Berichts. Es soll hier daher exemplarisch an der Variante V1e die grundsätzliche Strömung im Oszillator dargestellt und erläutert werden. In Abbildung 10 ist die Strömung dieser Variante über eine Periode dargestellt. In einem Schnitt durch den Oszillator wird hier der Betrag der Geschwindigkeit gezeigt. Überlagert sind auf die Ebene projizierte Stromlinien, die die Komplexität der Strömung sehr gut verdeutlichen. Im jeweils aktiven Kanal werden die höchsten Geschwindigkeiten im Garnkanal erreicht. Der Umschaltvorgang, eingeleitet durch einen Druckpuls durch den dem aktiven Kanal anliegendem Rückführkanal, wird beschleunigt durch das Aufprallen auf die konische Fläche des Kanalteilers.



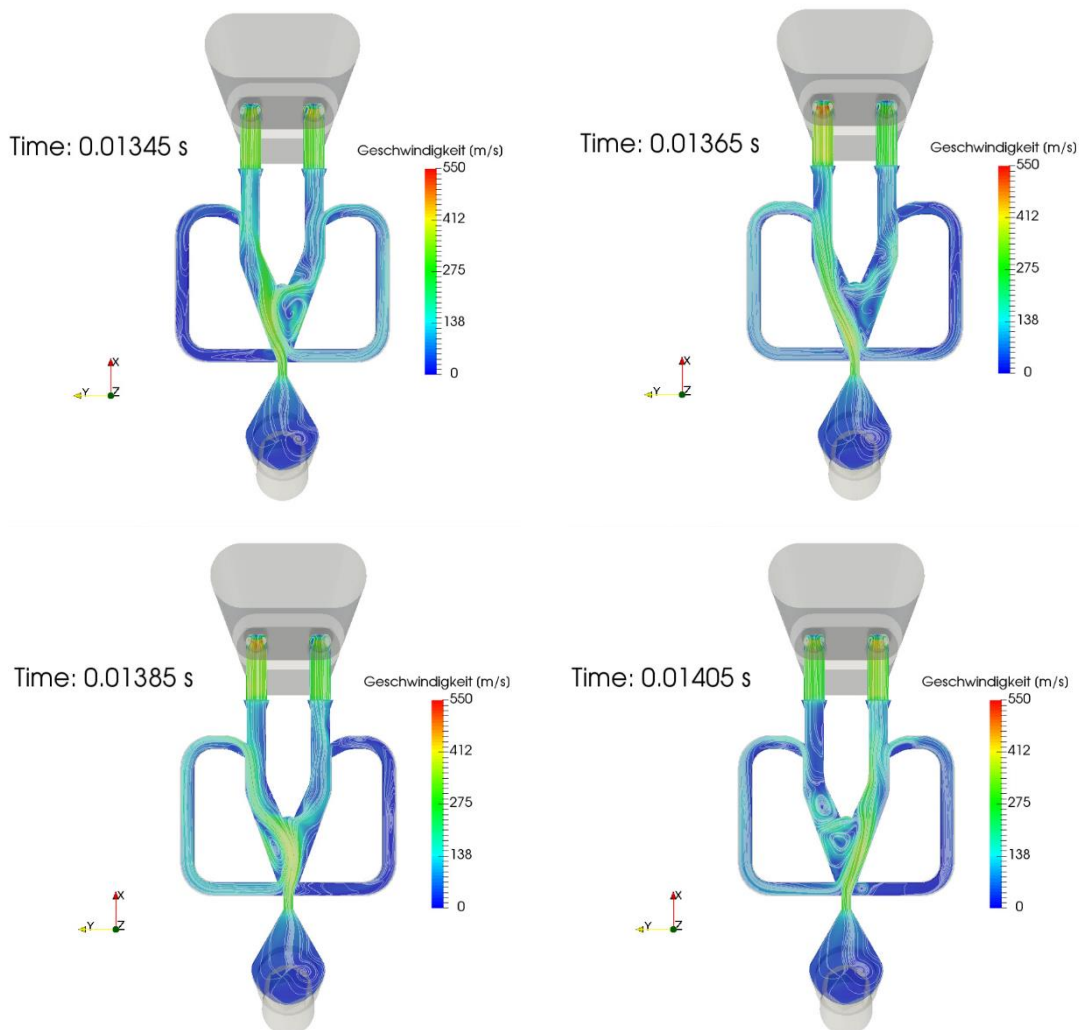


Abbildung 10: Abfolge der Schwingung über eine Periode.

4.3. Frequenzidentifikation

4.3.1. Messtechnisch durch akustische Auswertung

Die in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen akustischen Messungen wurden für alle vermessenen Varianten durchgeführt. Diese Ergebnisse sind hier zusammengefasst. Es ist der Schallpegel über der Frequenz gezeigt, die Resonanzüberhöhung findet jeweils bei der Oszillatorfrequenz statt. Es sind Schallpegel für verschiedene Eingangsdrücke (2 bar bis 5.5 bar) dargestellt. Für alle dargestellten Varianten ist der Garnkanal oben abgedeckt («mit Platte»), was dem späteren Betriebszustand entspricht. Einzig für die V2 (und Varianten davon) sind die Daten für den offenen Kanal dargestellt, da in den Messungen kein Signal messbar war bei abgedecktem Kanal. Die Oszillatorfrequenz für den Eingangsdruck 4 bar ist in Tabelle 2 eingetragen.

Für Variante 1 erkennt man deutlich eine semistabile Eigenschaft des Oszillators. Bis 4 bar Eingangsdruck findet keine Schwingung statt, ab 4.5 bar schwingt dieser deutlich bei 1520 Hz. Die Frequenz bei weiterer Druckerhöhung nimmt leicht ab.

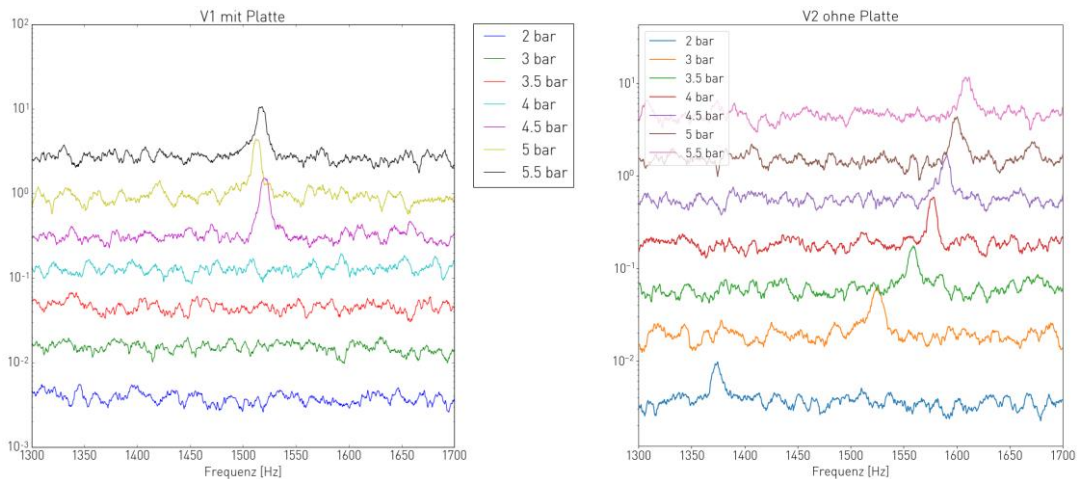


Bei der Variante 2 ist eine deutliche Schwingung für die Variante mit und ohne Platte hörbar gewesen. Per Mikrophon war diese jedoch nur für die Variante ohne Platte nachweisbar, vermutlich auf Grund schlechter Anordnung des Mikrophons und damit verbundenem hohem, breitbandigem Strömungsgeräusch, welches den Oszillator im Pegel überstieg. Bei der Messung ohne Platte wurde jedoch die erwünschte Oszillation sehr gut detektiert. Die Frequenzen nehmen, wie vorhergesagt mit steigendem Versorgungsdruck zu, bleiben aber ab 5 bis 6 bar dann nahezu konstant.

Die Variante V2_ext wurde durch nachträgliche Modifikation (Verlängerung der Rückkoppelungskanäle) der Variante V2 erstellt. Das Ziel war, dadurch die Frequenz des Oszillators zu senken. Messtechnisch wurde jedoch im Gegenteil eine Erhöhung der Frequenzen beobachtet. Dies führte zu der Erkenntnis, dass es sich bei diesem Oszillator um einen massenstromgeschalteten Oszillator handelt. Die Umschaltfrequenz wird in diesem Fall durch die Menge des Fluids in den Rückkoppelungskanälen geregelt und nicht durch einen durchlaufenden Druckpuls (druckgeschalteter Oszillator). Bei Druckschaltung hätte eine Verlängerung der Rückkoppelungskanäle eine Frequenzreduktion erreicht.

Die Varianten V3 wie V4 zeigten beide eine solide Oszillation um die 950 bzw. 1090 Hz (4 bar). Die Druckabhängigkeit der Frequenz ist sehr gering.

Für die Varianten mit elliptischen Querschnitt V1e und V4e zeigte sich ein deutlich anderes Verhalten gegenüber ihrer nichtelliptischen Grundvariante V1 und V4. Die V1e zeigte eine sehr robuste Schwingung, auch bei niedrigen Versorgungsdrücken. Die Frequenz der V1 betrug 1000 Hz, was der Berechnung (956 Hz) sehr gut entspricht. Für die Variante V4e gilt dies ebenso mit gemessener Frequenz (4 bar) von 1180 Hz gegenüber 1140 Hz in der Berechnung.



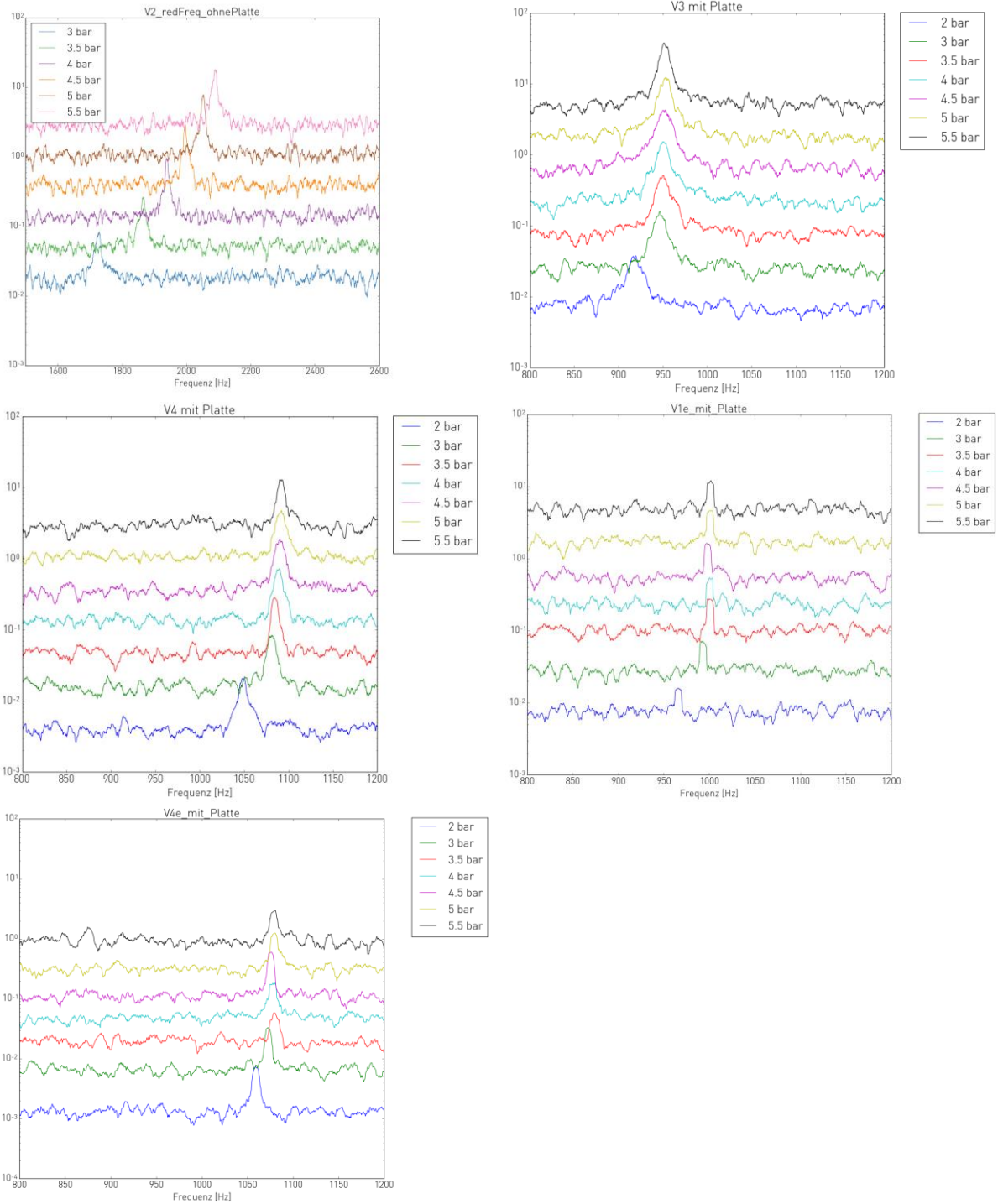


Abbildung 11: Akustische Frequenzverläufe der vermessenen Varianten.

4.3.2. Frequenzidentifikation in der Simulation

Um die Oszillatorperformance aus den Simulationsergebnissen zu extrahieren, wurde eine Reihe von zeitaufgelösten Daten der Oszillatoren erfasst. Dies waren



- Massenströme am Einlass und an den verschiedenen Auslässen der Oszillatoren
- Druck und Geschwindigkeitssignale im Garnkanalzentrums, siehe Abbildung 12
- Volle 3D Datensätze zur Erstellung von 3D Plots und Animationen

Die Darstellung erfolgt hier in drei Plots (siehe Abbildung 13) über der Zeit aufgetragen. Im ersten sind die Massenströme am Eintritt und Austritt (wo z.T. die beiden Garnkanäle einer Seite der Düse in einem Austritt zusammengefasst sind) der Oszillatoren dargestellt. Diese sind normiert mit dem theoretisch maximal möglichen Massenstrom bei vorherrschendem Druck und gegebenem Querschnitt (reibungsfrei). Ein Wert des Massenstroms von nahe bei 1 zeigt somit sehr geringe Strömungsverluste an. Im zweiten Plot ist der Druck im Garnkanalzentrums eines Kanals dargestellt, normiert mit dem Umgebungsdruck von 1 bar. Im dritten Plot sind die senkrechte sowie die Querkomponente der Geschwindigkeit im Garnkanal dargestellt. In diesem Signal erkennt man die Oszillation am deutlichsten. Aus diesem Signal wurde durch Signalfitting mit einer Sinuskurve die Frequenz ermittelt (nach Erreichen des Einschwingens des Oszillators).

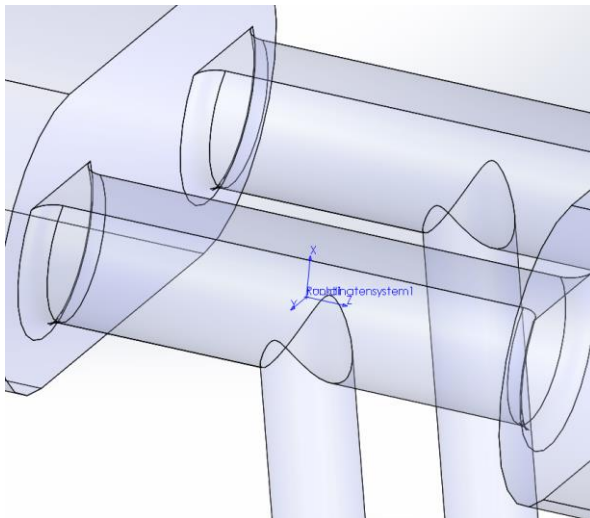


Abbildung 12: Koordinatensystem der Simulationen, Ort der Zeitreihenerfassung für instationäre Strömungsdaten.

Man erkennt deutlich, dass die Variante V1 nicht zum Schwingen kommt, lediglich einige hochfrequente Anteile sind z.B. im Drucksignal erkennbar. Die Variante V2 zeigt eine deutliche Oszillation in der Quergeschwindigkeit im Garnkanal mit Amplituden von +/- 50 m/s. Die Variante V1e zeigt ein sehr klares Oszillationsverhalten bei 956 Hz bei einer Amplitude von ca. +/- 80 m/s (Mittelwert ca. 380 m/s). Diese Variante erzielte somit die höchsten Geschwindigkeiten im Garnkanal von ca. 460 m/s.

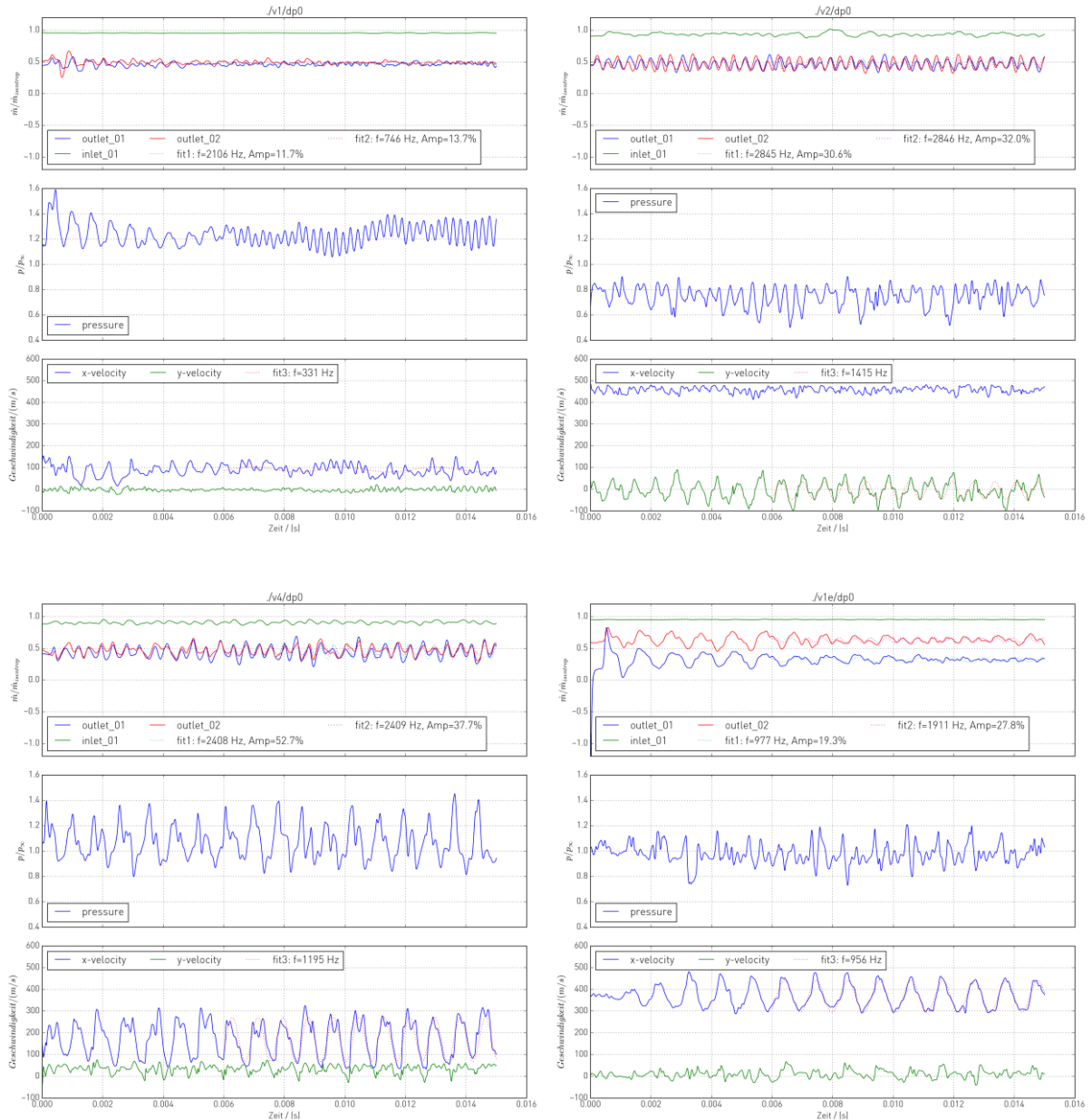
Die V4 schwingt deutlich bei 1195 Hz mit einer Amplitude von ca. +/- 100 m/s bei einem Mittelwert um die 200 m/s. Bei elliptischem Querschnitt (V4e) ändert sich dieses Verhalten nur unwesentlich.

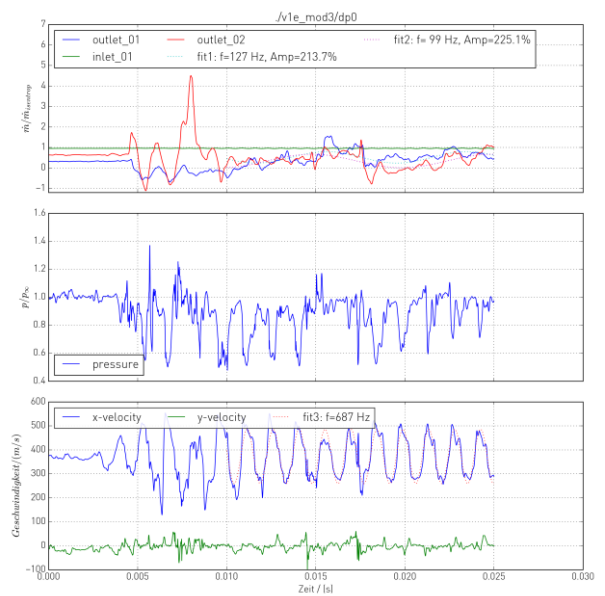
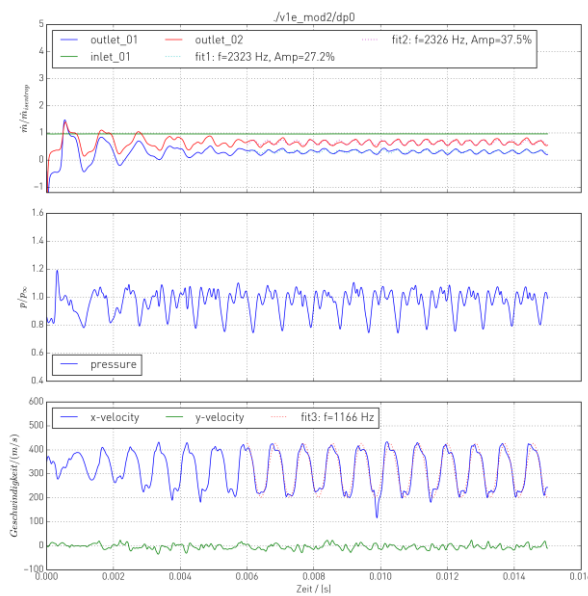
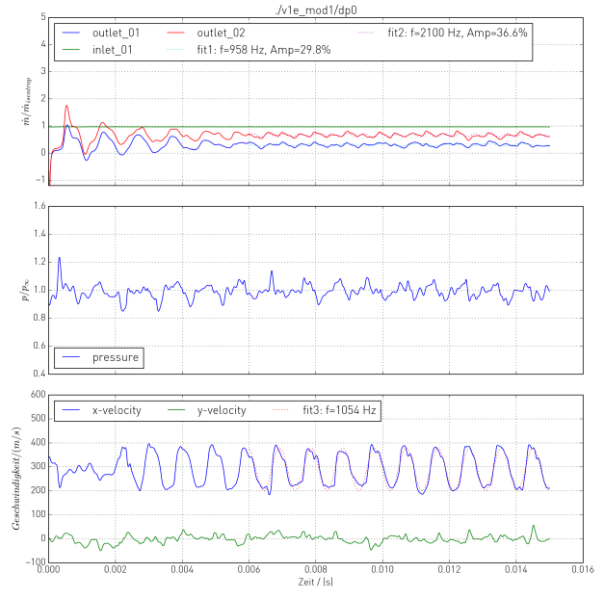
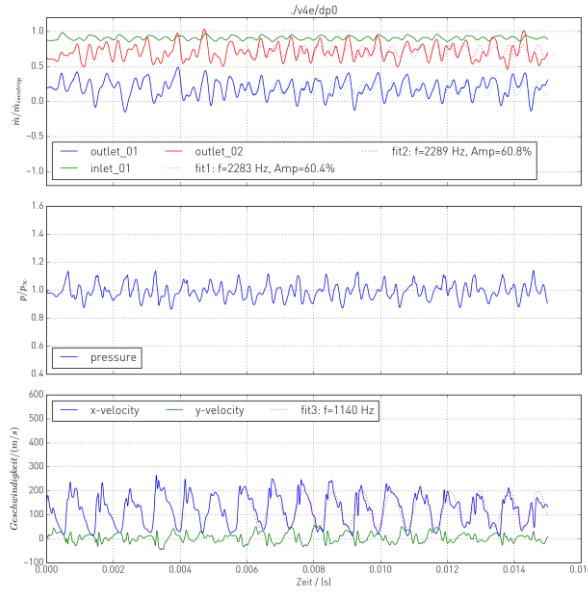
Für alle Varianten mit Umschalten der Strömung von einem Garnkanal auf den anderen kann gesagt werden, dass die Geschwindigkeit aufgrund der hohen Frequenzen im ausgeschalteten (nicht durchströmten) Kanal nicht zu null abgesenkt werden. Weitere Modifikation der Variante V1e mit dem Ziel, die Geschwindigkeit im abgeschalteten Kanal zu senken waren zwar erfolgreich (V1e_mod1 und V1e_mod2), senkten jedoch gleichzeitig jeweils die Geschwindigkeit im eingeschalteten Kanal.

Da die Variante V1e eine druckgeschaltete Variante darstellt, konnte eine Frequenzsenkung durch Verlängerung der Rückführkanäle sehr gut erreicht werden, siehe Variante V1e_mod3. Hier wurde eine sehr robuste Schwingung gefunden (687 Hz) mit Spitzengeschwindigkeiten im Garnkanal von über 500 m/s. Diese Variante weist somit noch sehr viel Potential auf und sollte in einem nächsten Schritt versuchstechnisch umgesetzt werden.



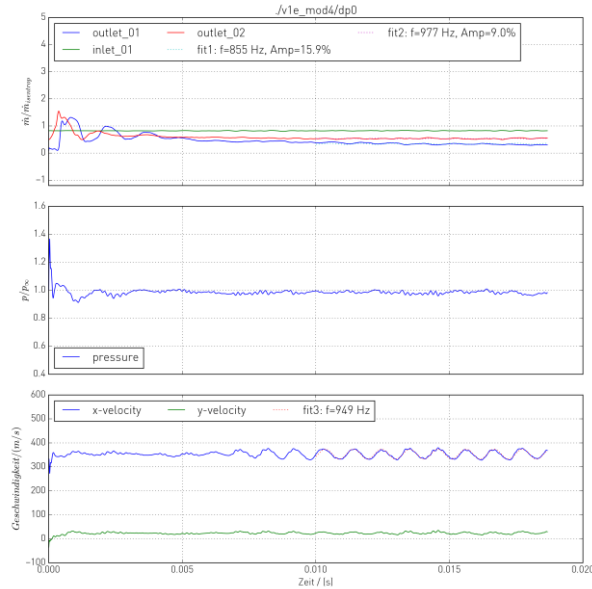
Um die Fragen zu beantworten, ob der Oszillator auch entfernt vom eigentlichen Garnkanal an einem anderen Ort der Maschine platzsparend platzierbar wäre (mit pneumatischer Ankoppelung via Schläuche) wurde die Variante V1e mit einem 1 m langen elliptischen Kanal versehen. Das Ergebnis bestätigt erste Abschätzungen, dass die Druckverluste im langen Kanal zu hoch sind, als dass eine relevante Oszillation den Garnkanal erreicht. Es ist also zwingend eine Anordnung des Oszillators in unmittelbarer Nähe des Garnkanals erforderlich.





V1e_mod2

V1e_mod3



V1e_mod4

Abbildung 13: Zeitverläufe verschiedener Größen im Garnkanal.

4.4. Tests mit realem Garn

Entscheidend für die Performance der Luftverwirbelungsdüsen ist noch vor dem Luftverbrauch die Garnqualität. Hierfür wurden wie in 2.1.3 beschrieben Tests auf einer Labormaschine mit einer fixen Garngeschwindigkeit von 800 m/min durchgeführt. Es wurden für die Düsen V1 bis V4 sowie V1e und V4e Luftverwirbelungstests gefahren und zeitgleich Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Luftverwirbelungsprozesses erstellt. Dies in im Folgenden detailliert.

4.4.1. Garnqualitätsvergleiche

Die Garne wurden nach der Verwirbelung mit den verschiedenen Düsentypen vermessen, die charakteristische Kennzahl ist die Anzahl der Knoten pro Laufmeter Garn. Die Ergebnisse von zwei Messkampagnen sind dargestellt in Abbildung 14 und Abbildung 15. In der ersten Messkampagne (Phase 2 im Projekt) erreichte einzig die Variante V1 relevante Knotenbildung von über 50% im Vergleich durch Referenzdüse, dies jedoch erst ab 4.5 bar. Dies entspricht bei halbem Luftverbrauch der Oszillatordüse und halber Knotenzahl keiner Energieeinsparung gegenüber der Referenz, jedoch auch keiner Verschlechterung (und dies bei völlig rudimentärem Strömungseintritt in den Garnkanal). Die in der Variante V2 gefundenen hohen Knotenzahlen sind ebenfalls sehr vielversprechend, der Fadenschlussmechanismus ist jedoch ein völlig anderer (oszillierendes Queranblasen des Garns gegenüber ballonartigem Aufbauschen zur Knotenbildung).

In der zweiten durchgeführten Messkampagne wurden die in Abbildung 15 dargestellten Werte ermittelt. Man erkennt, dass insbesondere die Variante V1e Performancedaten von ca. 70% der Referenz erreicht (bei halbem Energieverbrauch pro Faden). Dieser Wert sollte durch weitere Optimierungen jedoch noch deutlich steigerbar sein, wie z.B. die Variante V1e_mod3 zeigen. Insbesondere auch die Tatsache, dass die Variante V4e ähnlich gute Ergebnisse erzielt wie die



Variante V1e, bei jedoch deutlich weniger als halbem Luftverbrauch (siehe Abschnitt 4.5) zeigt, dass noch Optimierungspotential vorhanden ist.

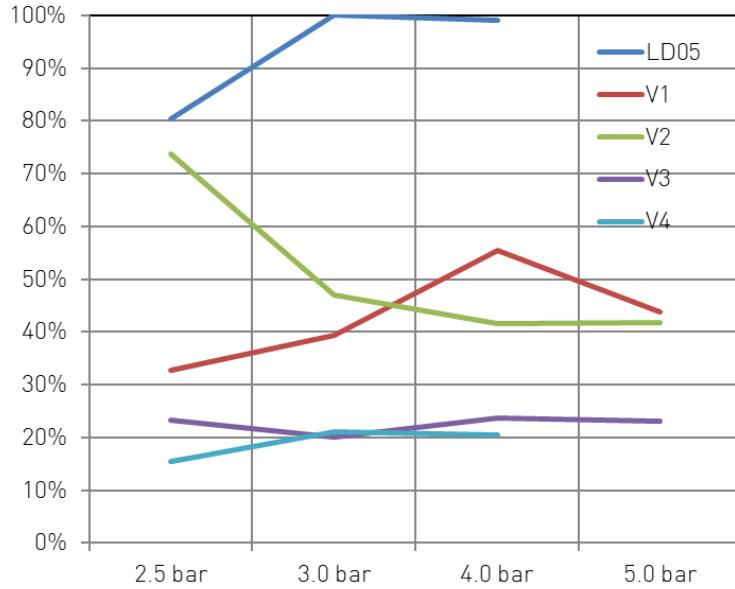


Abbildung 14: Relative Knotenanzahl für die verschiedenen Varianten, normiert mit Maximalperformance der Referenzdüse LD05, Messkampagne 1.

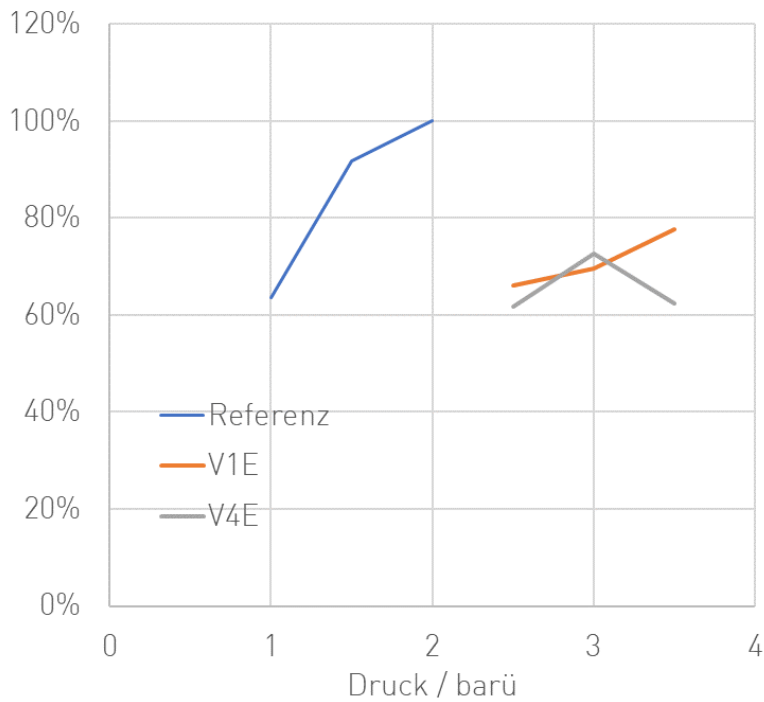


Abbildung 15: Relative Knotenanzahl für die verschiedenen Varianten, normiert mit Maximalperformance der Referenzdüse LD05, Messkampagne 2.



4.5. Luftverbrauchsmessungen

In Abbildung 16 sind die messtechnisch ermittelten Luftverbrauchsdaten aller Varianten dargestellt. Da alle Variante bis auf eine auf dem Querschnitt der Referenzvariante ausgelegt wurden, zeigen diese auch durchweg nahezu dasselbe Verhalten. Unterschiede im Luftverbrauch sind durch fertigungstechnische Abweichungen sowie mit Unterschiede im strömungsmechanischen Verhalten erklärbar. Wie bereits erwähnt wurde die Variante V4e mit einem deutlich geringeren Querschnitt ausgelegt, was sich in den Luftverbrauchsmessungen widerspiegelt.

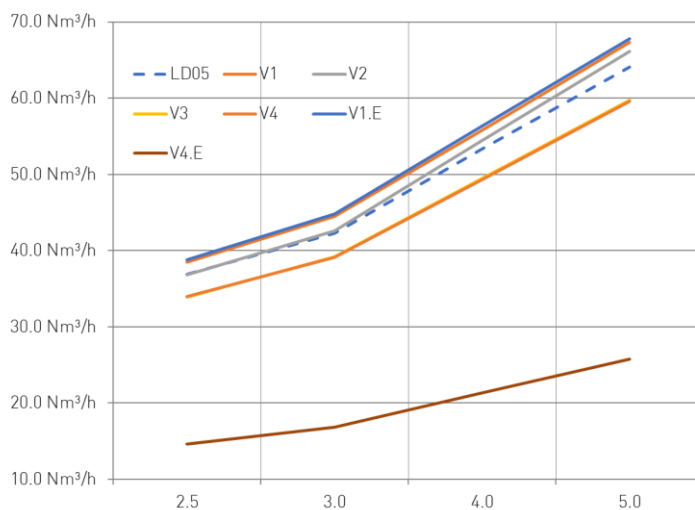


Abbildung 16: Luftverbrauchsmessungen für alle gemessenen Varianten.

5. Erkenntnisse

In diesem Abschnitt werden die Erkenntnisse der Fluidoszillatoranwendung des gesamten Projekts aufgelistet.

Auslegungsprozedere im Design der Oszillatoren

- Eine analytische Grobdimensionierung der Oszillatoren ist nicht geeignet bzw. zu ungenau für eine zielgerichtete Dimensionierung und Vorhersage der Eigenschaften eines Oszillators.
- Die Berechnungsvorhersagen von 3D Simulationen decken sich sehr gut mit den in Versuchen gemessenen Werten. Dies gilt sowohl für die Frequenzvorhersagen, wie auch für strömungstopologische Effekte, die sich hinsichtlich der Performance der Düsen interpretieren lassen.
- Der Übergang von der zweidimensionalen numerischen Auslegung zur vollen dreidimensionalen Betrachtung mit Berücksichtigung der Garnkanäle erhöht die Vorhersagegenauigkeit beträchtlich.
- Mittels der 3D Modellierung ist eine Optimierung eines Oszillatortyps sowie die Erforschung weiterer möglicher Typen sehr gut möglich.
- Das frühzeitige Einbinden von Prototypentests in den Entwicklungsprozess hat sich als richtig erwiesen. Die Wirkung der Strömung auf den Knotenbildungsprozess der Garnfilamente kann letztendlich nur versuchstechnisch ermittelt werden.



Messtechnik

- Die BOS Aufnahmen ermöglichten ein gutes Verständnis der zeitaufgelösten Strömung am Austritt der Oszillatoren und waren unerlässlich um in einer ersten Phase das tatsächliche Pulsen der Strömung nachzuweisen.
- Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen waren unerlässlich um die Reaktion des Garns auf die Luftpulse beobachten zu können.
- Mittels der akustischen Frequenzanalyse konnte die Frequenz der Oszillatoren verlässlich bestimmt werden.

Luftverbrauch der Düsen

- Die Luftverbrauchsmessungen entsprechen den Berechnungen und damit den Erwartungen.

Funktionsweise und Verhalten der Oszillatoren

- Die Vorhersage der Frequenz der Oszillatoren konnte bis auf wenige Prozent genau mittels Simulation erfolgen.
- Das qualitative Verhalten wurde gut durch die Simulationen wiedergegeben. So wurde ein sehr empfindliches Verhalten (lock-in auf einer Kanalseite, die sich manuell umschalten lässt) bei der Variante V1 in der Messung gefunden. Erst ab einem Eingangsdruck von 4.5 bar schaltete der Oszillator ein. In der Simulation bildete ich dieses Verhalten derart ab, dass die Oszillatoren nicht angeregt werden konnten. Versuchstechnisch führen hier womöglich leichte Asymmetrien zu einem anfänglichen Auslenken und dann zur Schwingung ab 4.5 bar, wohingegen die Simulation auf einer absolut symmetrischen Geometrie beruht.
- Wie zu erwarten, waren bei der Referenzdüse absolut keine Oszillationen zu finden, sowohl rechnerisch als auch experimentell.
- Eine Abhängigkeit der Frequenz von Prallplatte (Gegendruck) wird beobachtet.

Wirkung des pulsierenden Luftstroms auf das Garn

- Der Wirkmechanismus zur Knotenbildung ist (mit Ausnahme der Variante 2) identisch mit der Referenzdüse.
- Die gepulste Düse hält das Garn länger in der Mitte des Kanals als bei kontinuierlichem Luftstrom (dort wird das Garn häufig an den Rand des Kanals gedrückt).
- Fadenschluss erfolgt nicht immer durch gegenläufige Kreisbewegung (Doppelwirbel), sondern:
 - o Bei kontinuierlichem Luftstrom erfolgt der Fadenschluss oft nach einem zweistufigen Mechanismus: Die Filamente werden in einem ersten Schritt voneinander getrennt („aufgeblasen“, Ballonbildung) und im nächsten Schritt erfolgt das eigentliche Verdrillen; hingegen erfolgen bei gepulster Düse beide Schritte sehr schnell hintereinander und nahezu simultan.
 - o Bei kontinuierlicher Strömung öffnet sich das Filamentbündel nicht immer zuverlässig, selbst wenn der Faden perfekt in der Mitte des Garnkanals liegt; bei der gepulsten Düse ist dies häufiger der Fall.
- Eine Abstimmung der Frequenz auf die Garngeschwindigkeit bzw. Eigenfrequenz des Garns erscheint unabdingbar. Insbesondere die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen lassen darauf schließen, dass bei Ballonbildung des Filamentstrangs diese bei Pulsende noch nicht abgeschlossen ist. Als Bemerkung sei hier angefügt, dass das Design der Oszillatoren



grundsätzlich schon auf eine Garneschwindigkeit von 3000 m/min ausgelegt wurde. Die Testanlagen konnte jedoch nur 800 m/min leisten.

6. Zielerreichung & Ausblick

6.1. Bewertung Zielerreichung

Das Ziel, den Luftverbrauch von Luftverwirbelungsdüsen zur Garnherstellung durch den Einsatz von Fluidoszillatoren drastisch zu senken, konnte erreicht werden. So haben die besten Varianten ca. 70% der Performance der Referenzdüse bei der Knotenbildungsleistung erreichen können, und dies bei halben (V1e) oder weniger als 25% (V4e) des Luftverbrauchs. Weitere Optimierungsschritte haben grosses Potential sowohl bezüglich Leistung als auch Verbrauch der Düsen.

Wesentliches Potential wird darüber hinaus in der Anpassung der Fadengeschwindigkeiten an die Oszillatorfrequenz gesehen. Alle in diesem Projekt dimensionierten Oszillatoren sind auf Garneschwindigkeiten von 3000 m/min ausgelegt, was auch der anvisierten industriellen Anwendung entspricht. Die zur Verfügung stehende Testanlage erreichte jedoch lediglich eine reduzierte maximale Garneschwindigkeit von 800 m/min. Die Auswertung der in diesem Projekt erzielten Resultate lässt vermuten, dass für diese Garneschwindigkeiten die Oszillatoren zu hohe Frequenzen aufweisen um ihre volle Entfaltung erreichen zu können. Diese Aussage beruht vor allem auf Auswertungen der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Knotenbildungsprozesses mit den Oszillatordüsen.

6.2. Weitere Entwicklungsschritte

Die nächsten Entwicklungsschritte haben das Ziel, die Knotenleistung sowie den Luftverbrauch durch weitere Designoptimierungen sowohl rechnerisch als auch in Versuchen weiter zu optimieren. Am Ende soll als wichtigster Schritt die Verbesserung auf einer Produktionsanlage bei einem Testkunden bei 3000 m/min nachgewiesen werden. Für diese Schritte wird ein weiteres Entwicklungsprojekt angestrebt. Folgende drei Elemente sind die wesentlichen Stossrichtungen des Folgeprojekts:

6.2.1. Frequenzanpassung

Um die auf 3000 m/min ausgelegten Oszillatoren für die Testanlage (800 m/min) anzupassen wird eine deutliche Frequenzsenkung für weitere Prototypenoszillatoren angestrebt. Es wird mit dem erstellten Auslegungsprozedere rechnerisch eine neue Variante mit einer Zielfrequenz um die 300 Hz ausgelegt. Diese soll demselben Testprozedere unterworfen werden.

6.2.2. Verwendung des Oszillatorprinzips für alternative Anwendungen

Das Hauptziel des Gesamtprojekts ist die Senkung des Luftverbrauchs der Luftverwirbelungsdüsen durch das Oszillatorprinzip. Es zeigt sich jedoch zusätzlich zur Luftverbrauchssenkung auch noch Potential beim Einsatz der Düsen zur Erreichung anderer Effekte. Dies könnten z. B. neuartige Effekte beim Verspinnen unterschiedlich farbiger Garne sein, es sind jedoch auch noch viele andere Einsatzmöglichkeiten denkbar. Dieser Bereich soll in der Folge systematisch untersucht werden. Auch wenn der Energieverbrauch hierbei nicht mehr im Zentrum steht, besteht sehr wohl Potential relevante Effekte mit weniger Luft zu erreichen wie bisher.

6.2.3. Nachweis auf Industrieller Anlage bei 3000 m/min

Als ultimativer Schritt zur Industrialisierung der Oszillatordüsen ist zwingend der Test und Funktionsnachweis auf einer industriell relevanten Anlage bei 3000 m/min Garneschwindigkeit



notwendig. Diese Anlagen stehen bei Kunden von Heberlein zur Verfügung, und es bestehen auch gute Kontakte zu diesen Kunden. Um diese jedoch zur Mitarbeit für Tests für diese Düsen zu bewegen müssen in einem nächsten Schritt, wie unter 6.2.1 beschrieben, zunächst noch bessere Ergebnisse auf der Testanlage bei 800 m/min erreicht werden. Anschliessend sollen dann die für 3000 m/min ausgelegten Oszillatoren auf den realen Industrieanlagen getestet werden.



Literaturverzeichnis

- [1] P. Prokopiu, «Use of a fluidic oscillator as a humidity sensor for a hydrogen-steam mixture,» 1966.
- [2] R. K., «Advanced air data sensing techniques,» 1968.
- [3] R. B. Dowdell, «Development of a wall-attachment fluidic oscillator applied to volume flow metering,» 1974.
- [4] S. A. Gokoglu, Numerical Studies of a Supersonic Fluidic Diverter Actuator for Flow Control, 2010.
- [5] G. Raman, «Cavity Resonance Suppression Using Miniature Fluidic Oscillators,» 2004.
- [6] M. N. Tomac, «Frequency Studies and Scaling Effects of Jet Interaction in a,» 2012.
- [7] J.-T. Yang, «A novel fluidic oscillator incorporating step-shaped attachment walls,» 2006.
- [8] V. Tesar, «Experimental investigation of a fluidic actuator,» 2007.
- [9] E. W. Simões, «Microfluidic oscillator for gas flow control and measurement,» 2004.