

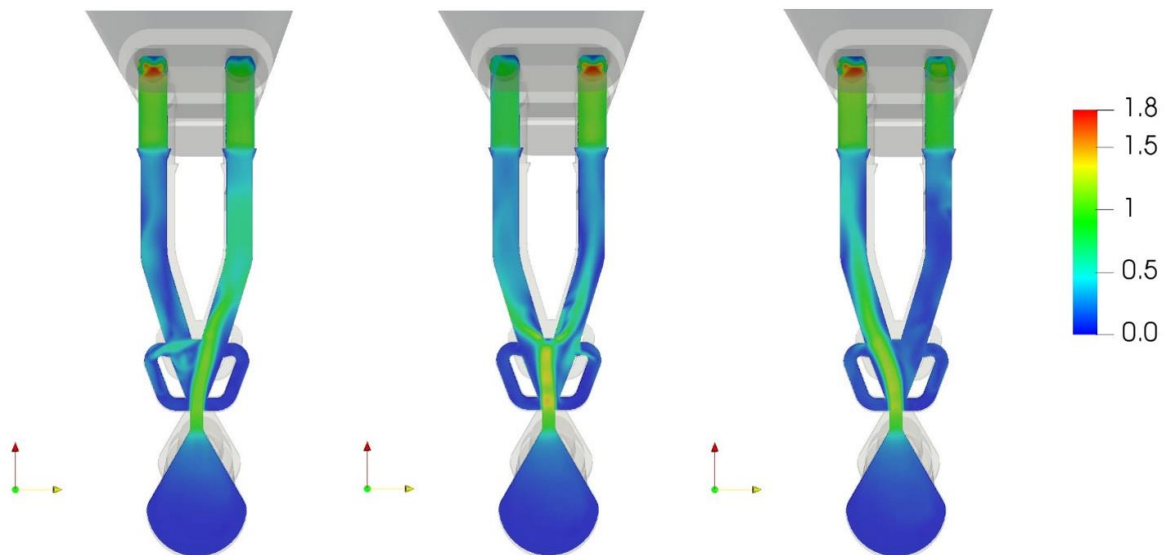


1. Schlussbericht vom 13.01.2022

---

# Oszillator-basierte Verwirbelungsdüse: Industrielle Machbarkeit

---



Quelle: streamwise gmbh



STREAMWISE

 **HEBERLEIN**<sup>®</sup>  
TECHNOLOGY FOR PROFESSIONALS

**Datum:** 13.01.2022

**Ort:** Männedorf

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfänger/innen:**

streamwise gmbh  
Emil-Staub-Strasse 5, CH-8708 Männedorf  
[www.streamwise.ch](http://www.streamwise.ch)

Herberlein AG  
Bleikenstrasse 11, 9639 Wattwil  
[www.heberlein.com](http://www.heberlein.com)

**Autor/in:**

Rembold Benjamin, streamwise gmbh, [rembold@streamwise.ch](mailto:rembold@streamwise.ch)

**BFE-Projektbegleitung:**

Carina Alles, [carina.alles@bfe.admin.ch](mailto:carina.alles@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501718-01

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



## 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. In diesem Projekt wurde das neuartige Konzept des Fluidoszillators auf die Behandlung von industriellen Garnen angewandt. Ziel war es die industrielle Machbarkeit zu demonstrieren sowie den Energieverbrauch jetziger sogenannten Verwirbelungsdüsen deutlich (mehr als 25%) zu senken.

Der industrielle Zielprozess dieses Projekts war der bulk continuous fibre (BCF) Prozess. In einer Reihe von Messkampagnen wurden verschiedenste Oszillatorkonzepte an realen Garnen, sowohl auf Testanlagen sowie auch in drei Kampagnen auf realen Spinnereimaschinen gefahren. Bei dünneren Garnen waren die Oszillatordüsen hierbei sehr erfolgreich, es konnten bis zu 50% Lufteinsparung realisiert werden. Eine erste Messkampagne in der realen Spinnerei bei Titern von 2900 dtex war ein Rückschlag, die Oszillatordüsen konnten im schweren Garn fast keine Verwirbelung realisieren. Als Erkenntnis konnte daraus genommen werden, dass der limitierende Faktor bei diesem Prozess die dynamische Garnantwort ist. Es benötigt eine sehr hohe Verwirbelungsenergie, die durch die gepulsten Düsen noch nicht erreicht werden konnte.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden erneute verbesserte Varianten entwickelt, die auf der Labormaschine bei realen Titern gute Verwirbelungen erzeugen konnten. Zudem wurde das alternative Konzept der Oszillatoren in den Steurdüsen entwickelt und getestet. Hier konnten bei gleichem Luftverbrauch Performancesteigerungen erreicht werden. Diese Düsen konnte auch im industriellen Prozess bei hohen Garngeschwindigkeiten und hohen Titern eine Performancesteigerung erreichen. Aufgrund von sehr begrenzten Testmöglichkeiten während der Covidpandemie konnten neue Varianten mit Hauptkanaloszillation noch nicht final getestet werden. Dies wird nachfolgend im Entwicklungsprozess bei Heberlein stattfinden, sobald sich wieder eine Testmöglichkeit ergibt.

Somit wurde das erste Ziel erreicht, wonach die Realisierbarkeit von Oszillatordüsen für den industriellen Zweck gezeigt werden sollte. Das zweite Ziel der Energieeinsparung von 25% konnte noch nicht abschliessend gezeigt werden. Bei Laborgeschwindigkeiten konnte eine gute Verwirbelung bei Titern um die 1000 dtex erreicht werden mit einer Einsparung von ca. 30%.

## 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. Dans ce projet, le nouveau concept de l'oscillateur à fluide a été appliqué au traitement des fils industriels. L'objectif était de démontrer la faisabilité industrielle et de réduire significativement (plus de 25%) la consommation énergétique des buses d'entrelacement actuelles.

Le procédé de Bulk Continuous Fiber (fibre continue en vrac, BCF) a été choisi comme procédé industriel cible pour ce projet. Dans une série de campagnes de mesures, différents concepts d'oscillateurs ont été testés sur des fils de production, à la fois sur des machines de laboratoire et au cours de trois campagnes sur des machines à filer industrielles. Les buses d'oscillateur ont eu beaucoup de succès avec des fils plus fins, économisant jusqu'à 50% d'air. Mais un premier test sur des machines à filer industrielles avec des titres de 2900 dtex a été un échec, les buses d'oscillateur ne pouvaient créer



quasiment aucun nœud dans le fil lourd. En conséquence, on a pu apprendre que le facteur limitant dans ce processus est la réponse dynamique du fil. Les fils lourds nécessitent un niveau de turbulence très élevé, que les buses pulsées n'ont pas encore pu atteindre.

Sur la base de ces connaissances, des variantes améliorées ont été développées. Avec ceux-ci, une bonne cohérence de fil a été atteinte sur une machine de laboratoire même pour des titres lourds. De plus, un concept alternatif, dans lequel les oscillateurs sont situés dans les buses de commande, a été développé et testé. Ce concept a permis d'augmenter les performances des buses avec la même consommation d'air. Cette amélioration a également été démontrée sur des machines à filer industrielles à hautes vitesses et à des titres élevés. En raison des possibilités de test très limitées pendant la pandémie de Covid, les nouvelles variantes des buses avec oscillateur dans le canal principal n'ont finalement pas pu être testées. Cela sera rattrapé au cours du développement ultérieur à Heberlein dès qu'il y aura une autre option de test.

En résumé, l'objectif de démontrer la faisabilité des buses d'oscillateur dans un environnement industriel a été atteint. Cependant, une économie d'énergie de 25 % n'a pas encore été prouvée de manière concluante. Aux vitesses laboratoires et avec des titres d'environ 1000 dtex, une bonne cohérence du fil a pu être obtenue avec une économie d'environ 30%.

## Summary

In the process of yarn production and yarn finishing pressurized air plays a crucial role. Directly after the spinning process a connection of the individual filaments is realized with so-called interlacing jets that introduce knots to the yarn. The consumption of pressurized air and thus energy is enormous. In this project the new concept of fluid-oscillators was applied to yarn treatment in the industrial production process. The goal was to demonstrate that oscillator-based interlacing jets can be successfully used at industrial production conditions and can lead to large (more than 25%) energy savings (by consuming less pressurized air).

The industrial target process for this project was the bulk continuous fibre (BCF) process. In a number of test campaigns several oscillator concepts were tested on real yarns, in lab-scale tests and also in three campaigns on real industrial spinning machines. For the thinner yarns the oscillator interlacing jets proved very successful with up to 50% savings in pressurized air. A first campaign with a heavy titer of 2900 dtex was a failure, almost no interlacing results could be obtained with the oscillator interlacing jets. The learning from this campaign was that the dynamic response of the yarn to the flow impulse was the limiting factor. It required a too high interlacing energy that could not yet be reached with the current oscillator-based interlacing jets.

Based on this learning improved oscillator interlacing jets were designed and tested. They could reach good interlacing results at heavy titers on lab-scale yarn speed. Moreover, a completely new concept of using the oscillator not in the main treatment air, but in additional control jets within the yarn channel was developed and tested. With similar air consumption performance improvements in the interlacing process could be obtained.

Due to very limited availability of access to industrial spinning machines during the Covid19 pandemic the new variants with main treatment air oscillation could not yet be tested at industrial speeds and heavy titers. This will be followed-up by Heberlein as soon as possible.

Thus, the first goal of the project, i.e. the proof that oscillator-based interlacing jets can be used in real industrial production, could be reached. The second goal of obtaining energy savings of more than 25% could not yet finally shown. At lab-speed very good interlacing results could be, however, reached even for a heavy titer of 1000 dtex with energy savings around 30%.



## Take-home messages

- Fluidoszillatoren stellen eine gute Möglichkeit dar, pulsierende Luftströme mit definierten Eigenschaften für industrielle Prozesse stabil und zuverlässig zu erzeugen (ohne bewegte Teile und Steuerelemente). Hierbei sind auch relativ hohe Frequenzen (Kiloherz-Bereich) realisierbar.
- Der Einsatz von Oszillatordüsen anstelle kontinuierlicher Düsen birgt ein hohes Potential zur Einsparung von Druckluft in industriellen Prozessen, je nach Anwendung bis zu 50%.
- Für die Textilanwendung der Verwirbelungsdüse wurden völlig neuartige Oszillatoren entworfen und für eine Vielzahl von Prozessparametern in verschiedensten Szenarien getestet. In einer Reihe von Tests waren diese sehr erfolgreich. Beim kritischen Schritt, der Übertragbarkeit auf reale Prozessgeschwindigkeiten besteht noch weiterer Optimierungsbedarf. Insbesondere schwere, technische Garne lassen sich noch zu wenig gut verwirbeln.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>3</b>
<b>Summary</b> .....	<b>4</b>
<b>Take-home messages</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>8</b>
1.1 Ausgangslage und Hintergrund .....	8
1.2 Vorarbeiten .....	9
1.3 Vorgehen und Ziele des Projektes .....	9
<b>2 Vorgehen und Methode</b> .....	<b>10</b>
2.1 Funktionsweise der klassischen Verwirbelungsdüsen .....	10
2.2 Konzept der Garnbeeinflussung durch Oszillatoren .....	11
2.3 Designprozess .....	12
2.4 Testmethodik mit Garn .....	12
2.5 Messtechnik.....	13
<b>3 Ergebnisse und Diskussion</b> .....	<b>17</b>
3.1 Ergebnisse bei Laborgeschwindigkeit .....	17
3.2 Erste Kampagne am ITA Aachen .....	21
3.3 Zweite Kampagne .....	26
3.4 Dritte Kampagne Heberlein .....	26
3.5 Vierte Kampagne .....	29
<b>4 Schlussfolgerungen und Fazit</b> .....	<b>31</b>
<b>5 Ausblick und zukünftige Umsetzung</b> .....	<b>32</b>
<b>6 Publikationen</b> .....	<b>33</b>
<b>7 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>33</b>



## Abkürzungsverzeichnis

BCF	Bulk continuous fibre
CFD	Computational fluid dynamics



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Weltweit werden aktuell jährlich ca. 110 Mio. Tonnen Textilfasern produziert. Davon wird ein grosser Teil (ca. 72%, also ca. 80 Mio. Tonnen) durch Kunstfasern abgedeckt, siehe Abbildung 1. Schätzungen zufolge wird dieses Gesamtvolumen auf ca. 125 Mio. Tonnen im Jahr 2030 ansteigen. Der Anteil von Kunstfasern wird hierbei aufgrund der limitierten Verfügbarkeit von Naturfasern weiterhin überproportional ansteigen.

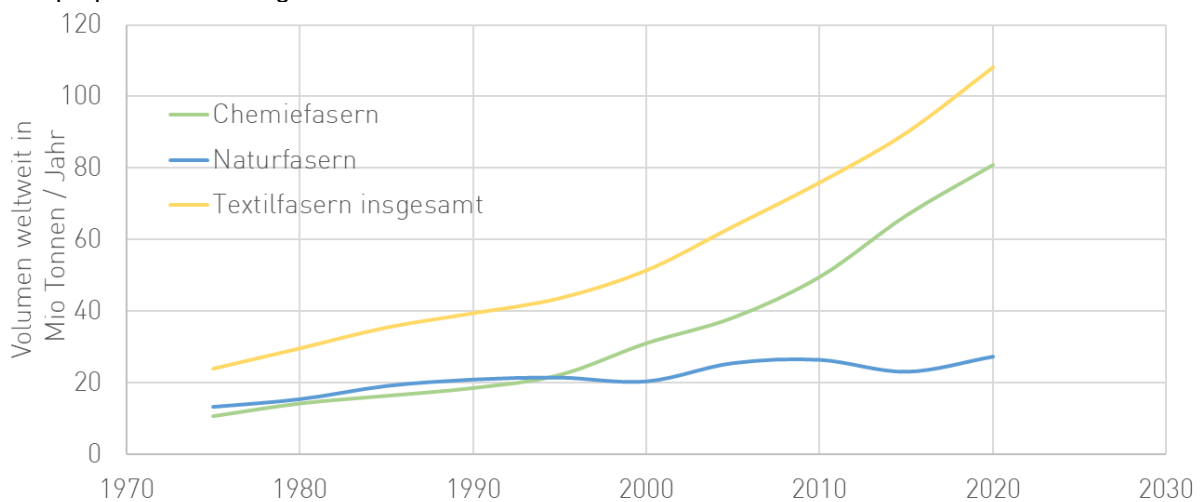


Abbildung 1: Weltweite Garnproduktion, Quelle: [www.ivc-ev.de](http://www.ivc-ev.de)

Im Produktionsprozess werden die Kunstfasern nach dem eigentlichen Spinnprozess der Luftverwirbelung zugeführt. In diesem Schritt wird in der Kunstfaser ein Fadenschluss erzeugt. Hierbei wird der gesponnene Faden durch Luftverwirbelungsdüsen geleitet, in denen sich die Filamente des Garns je nach Art der Düse andersartig verknoten und um den Faden anordnen um ihm so seine Charakteristik zu 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.

Nachteilig an den aktuell im Einsatz stehenden Düsen ist, dass der Druckluftverbrauch und damit der Energiebedarf sehr hoch ist. Im Mittel verbraucht eine einzelne Düse etwa 2.5 Nm<sup>3</sup> Luft pro Stunde (Luftverwirbelungs- oder Lufttexturierdüse). Unter der Annahme, dass die Druckluft energieeffizient erzeugt wird und ein mittleres Druckniveau von 4-5 bar ausreichend ist, ergibt sich ein jährlicher Energieverbrauch an Druckluft zur Erzeugung des Weltbedarfs an Kunstfasern von ca. 1.4 x 10<sup>10</sup> kWh. Dies entspricht der Jahresleistung von ca. 1.5 Atomkraftwerken bzw. einem Viertel des Jahresbedarfs an Elektrizität der Schweiz (2014). Der Energieverbrauch der Hauptverwirbelungsdüsen macht ca. 15% bzw. 30% des Gesamtverbrauchs einer Spinnerei aus und ist somit für den Betrieb relevant. Damit ist die Energieeffizienz der Luftverwirbelungsdüse auch ein wichtiges Verkaufsargument für die Hersteller, da der Druckluftverbrauch einen grossen Kostenfaktor darstellt.

Die hier verfolgte Innovation ist es, durch den neuartigen Einsatz von Fluidoszillatoren die Druckluft in Luftverwirbelungsdüsen effizienter zu nutzen (z.B. mit einem Oszillator zwei Düsen zu versorgen anstelle einer) um so den Luftverbrauch signifikant zu reduzieren und die Prozessstabilität zu erhöhen.

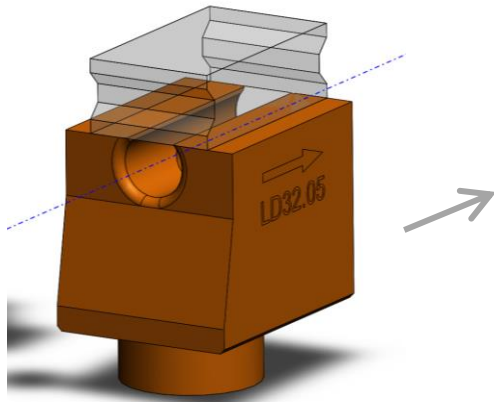


Abbildung 2: Klassische Luftverwirbelungsdüse der Firma Heberlein. Der Faden wird entlang der Mittellinie durchgeführt (Pfeil). Die Druckluft strömt von unten senkrecht in den Garnkanal ein.

## 1.2 Vorarbeiten

Im Rahmen eines durch das Bundesamt für Energie geförderten Forschungsprojekts „Energieoptimierte Luftverwirbelungsdüse“ (SI/501439-01) wurde erstmalig eine Verwirbelungsdüse nach dem Oszillatorprinzip gebaut und erfolgreich in Versuchen getestet. Damit konnte die prinzipielle Machbarkeit und das Einsparpotenzial von Oszillatordüsen für den Luftverwirbelungsprozess nachgewiesen werden. Dazu wurde für einen relevanten Prozess, den BCF Prozess (Bulk Continuous Fiber), die heute meistverwendete Düse als Referenz in Bezug auf Luftverbrauch und Verwirbelungsleistung definiert (siehe auch Abbildung 3). Es wurde eine automatisierte Prozesskette aufgebaut, die auf transienter, dreidimensionaler Strömungssimulation (CFD) und automatischer Auswertung der relevanten Daten beruht. Das rechnerisch vorhergesagte Verhalten der Oszillatoren konnte messtechnisch sehr gut reproduziert werden. Insbesondere die Oszillatorfrequenzen konnten sehr gut vorhergesagt werden. Die Kombination dieser beiden Methoden ermöglichte somit einen sehr zielgerichteten Aufbau von Erkenntnissen in der Funktionsweise der Oszillatoren für diese Anwendung. Der eigentliche Fadenschlussmechanismus, also wie sich die von der Düse erzeugte instationäre Strömung in eine Verknotung der Garnfilamente übersetzt, wurde messtechnisch nachgewiesen.

Das Ziel, den Luftverbrauch von Luftverwirbelungsdüsen zur Garnherstellung durch den Einsatz von Fluidoszillatoren drastisch zu senken, konnte dabei erreicht werden. So erreichen die besten Varianten ca. 70% der Performance der Referenzdüse bei der Knotenbildungsleistung und dies bei halben Luftverbrauch.

## 1.3 Vorgehen und Ziele des Projektes

Aufbauend auf die mit der Vorstudie erzielten Ergebnisse im Labormassstab sowie die dabei erlangten Erkenntnisse über die Funktionsweise und weitere Optimierungsmöglichkeiten sollte in diesem Pilotprojekt die Übertragung der Ergebnisse auf den industriellen Prozess vorgenommen werden. Dazu war es zunächst notwendig, die bisher erlangte Verknotungsperformance der Oszillatordüsen im Labormassstab weiter zu steigern. Dies sollte durch weitere Optimierung und insbesondere Frequenzanpassung an die Laborgarngeschwindigkeiten (ca. 800 m/min) erreicht werden. Anschliessend wurde eine nächste Generation Oszillatordüsen für die industrielle Prozessgeschwindigkeit von ca. 3000 m/min ausgelegt und als Industrieprototyp realisiert. Der Projektpartner Heberlein besitzt langjährige und intensive Kontakte zu Lead-Kunden mit industriellen Anlagen, auf denen mit diesen Prototypen umfangreiche Testkampagnen gefahren werden können.



In einem ersten Schritt bei industrieller Geschwindigkeit wurden Garnmessungen für den gesamten Betriebsbereich (Druck) der Oszillatordüsen durchgeführt. Ebenso wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Verwirbelungsprozesses erstellt und ausgewertet. Im Vorfeld der Kampagne wurden zudem die Frequenzen der Oszillatoren akustisch ausgemessen.

Die Erfahrungen dieser ersten industriellen Kampagne flossen dann in einen weiteren Optimierungsloop ein. Dazu wurden weitere Optimierungen vorgenommen und weitere Generationen industrieller Oszillatordüsen erstellt. In weiteren Messkampagnen bei Heberlein (auf unverwirbeltem Garn sowie Glattgarn) und auf einer industriellen Spinnereimaschine, wurden diese im Labor- sowie industriellen Massstab eingehend vermessen und geprüft.

Folgende Ziele des Pilotprojekts wurden definiert

- Die Realisierbarkeit von Verwirbelungsdüsen für den industriellen BCF Prozess sowie für technischen Garne auf Basis von Oszillatordüsen ist bei state-of the-art Prozessparametern nachgewiesen.
- Das Einsparpotential seitens Energieverbrauch (im Sinne von geringerem Druckluftverbrauch) bei diesem Prozess ist bekannt. Der Zielbereich ist mehr als 25% Einsparung.

## 2 Vorgehen und Methode

### 2.1 Funktionsweise der klassischen Verwirbelungsdüsen

Um bestimmte Garneigenschaften zu erreichen, werden in den Düsen unterschiedliche strömungsmechanische Effekte ausgenutzt. Die Möglichkeiten sind hierbei grundsätzlich zahlreich. Für die in diesem Projekt betrachteten Verwirbelungsdüsen gilt, dass durch eine zentrisch angeordnete Luftversorgung im Garnbehandlungskanal starke Sekundärströmungen erzeugt werden, siehe Abbildung 3. Diese bewirken, dass sich der Filamentstrang periodisch quasi aufblasen lässt und dadurch die Filamente in den Einflussbereich der starken Sekundärströmungen gebracht werden. Dadurch werden fadenauf- und abwärts jeweils Knoten gebildet.

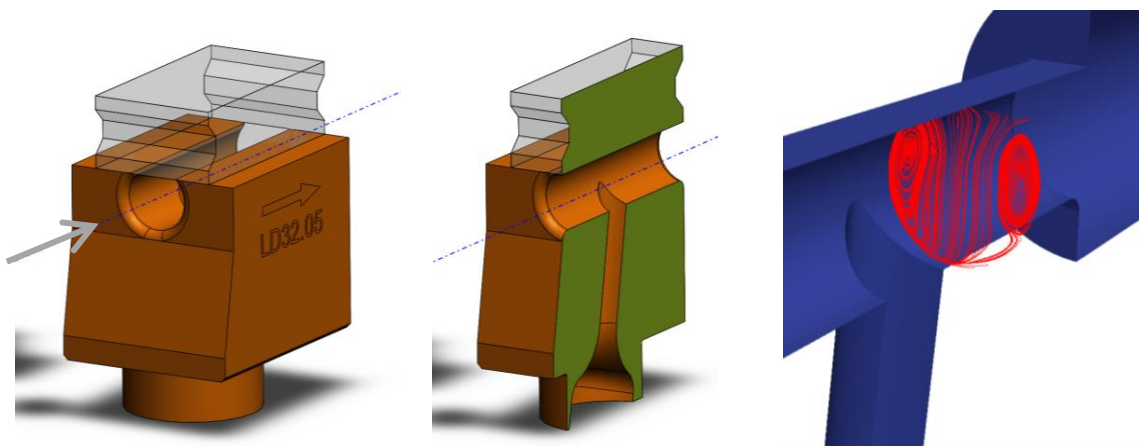


Abbildung 3: Strömungstopologie in der hier als Referenz dienenden konventionellen Verwirbelungsdüse. Der Faden ist durch die gestrichelte Linie angedeutet, seine Bewegungsrichtung durch den Pfeil. Die Druckluftversorgung erfolgt durch die zentrische Bohrung von unten. Die sich ausbildende Doppelwirbelstruktur in der Strömung ist rechts durch Stromlinien in einer Ebene dargestellt.



## 2.2 Konzept der Garnbeeinflussung durch Oszillatoren.

### 2.2.1 Grundprinzip des Fluidoszillators im Hauptstrom

Die Grundidee beruht darauf, dass in den klassischen Verwirbelungsdüsen die kontinuierliche Strömung durch eine pulsierende Strömung ersetzt wird, die zeitlich mit den zu formenden Knoten synchronisiert ist, siehe Abbildung 4. Durch die Aufteilung der Luft auf zwei Düsen besteht grundsätzlich ein Sparpotential bei der benötigten Druckluft von 50%.

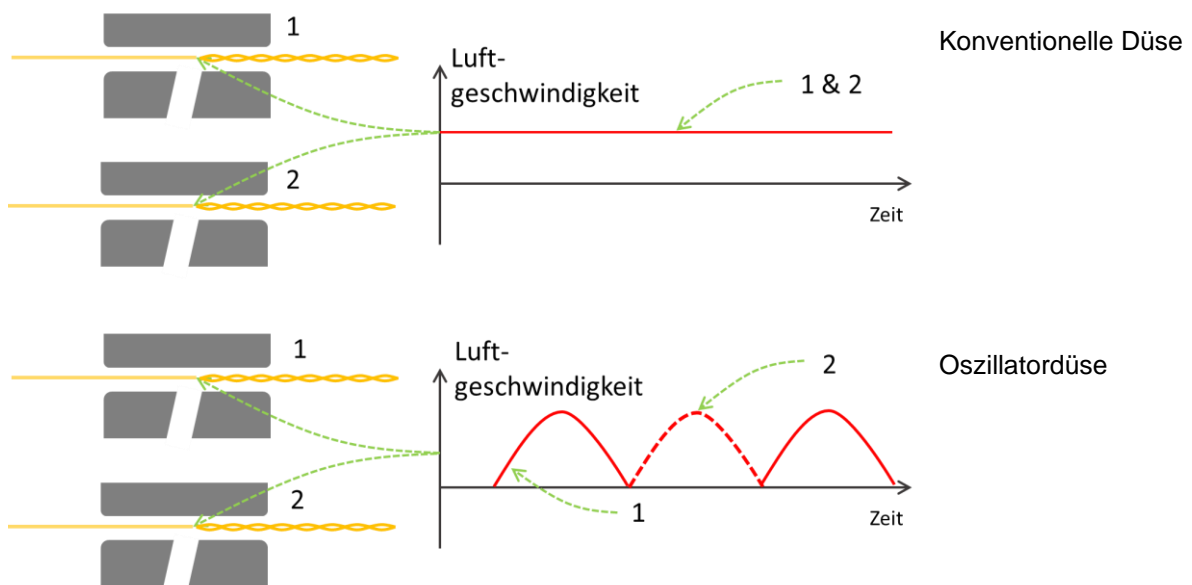


Abbildung 4: Grundwirkprinzip. Der kontinuierliche Luftstrom zweier Düsen wird ersetzt durch einen pulsierenden, der sich auf die beiden Düsen aufteilt. Dadurch beträgt das theoretische Sparpotential der Luft 50%.

Um die für die realen Garngeschwindigkeiten notwendigen Umschaltfrequenzen von ca. 300-3000Hz für den Luftstrom zu erwirken ist technisch gesehen der Fluidoszillator die einzige Möglichkeit.

Bei einem Fluidoszillator wird eine Hauptströmung durch eine fixe Geometrie geleitet, so dass ein selbsterregender Rückkoppelungsmodus entsteht, der die Strömung periodisch z.B. in zwei Kanäle umlenkt. Grundsätzlich sind die Eigenschaften des Oszillators vom Medium, von der geometrischen Beschaffenheit des Oszillators sowie von den Betriebsbedingungen (Druck, Temperatur) abhängig. Bei geeignet designter Geometrie für das Medium Luft hängen die Eigenschaften des Oszillators (Frequenz und Durchfluss) lediglich noch vom Versorgungsdruck ab. Übliche, in Spinnereien verfügbare Luftdrücke von 5-8bar, bieten hierfür ein sehr geeignetes Betriebsfenster.

### 2.2.2 Garnführungsbeeinflussung

Neben dem Einsatz des Oszillators im Hauptluftstrom gibt es grundsätzlich auch die Möglichkeit den Oszillator zur Steuerung von stabilisierenden Nebenluftströmen einzusetzen. Hierbei wird die Hauptluft, die die eigentliche Verwirbelung erzeugt, nicht gepulst. Durch Zusatzbohrungen seitlich im Garnkanal werden kleinere Steuerluftströme eingeführt, die eine gezielte, periodische Garnführung im Kanal bewirken. Der Oszillator wird hierbei in der Steuerplatte der Düse eingebaut zur Erzeugung der periodischen Steuerströme. Das primäre Optimierungsziel hierbei ist nicht die Einsparung von Luft sondern die Erhöhung der Garnqualität durch bessere Knotenregelmässigkeit bei nahezu gleichem Luftverbrauch.



## 2.3 Designprozess

Das Design und die Auslegung von Fluidoszillatoren für den hier verwendeten Bereich ist sehr komplex. Es wurde hierzu eine automatisierte Prozesskette aufgebaut, die auf transienter, dreidimensionaler Strömungssimulation (CFD) und automatischer Auswertung der relevanten Daten beruht. Dieser Prozess wurde sorgfältig validiert, siehe [1]. Das rechnerisch vorhergesagte Verhalten der Oszillatoren konnte messtechnisch (siehe Abschnitt 2.5) sehr gut reproduziert werden. Insbesondere die Oszillatorfrequenzen konnten sehr gut vorhergesagt werden. Die Kombination dieser beiden Methoden ermöglichte somit einen sehr zielgerichteten Aufbau von Erkenntnissen in der Funktionsweise der Oszillatoren für diese Anwendung.

Bei der Entwicklung der Oszillatoren, sei es für die Oszillation der Hauptluft (siehe 2.2.1) oder für die Oszillation zur Garnführungsbeeinflussung (siehe 2.2.2) sind verschiedene Kriterien relevant. Es wurden je nach Anwendung unterschiedliche Oszillatorkonzepte verwendet und auf die Anwendung optimiert. Optimierungsziele für die Hauptluftoszillation waren:

- Zielfrequenz
- Gutes Umschlagverhalten des Oszillators
- Klares Schwingverhalten ohne Oberschwingungen und akustische Reflektionen
- Einsetzen der Oszillation bei bereits niedrigen Drücken (z.B. 2 bar)
- Geeignete Frequenzabhängigkeit des Oszillators vom Versorgungsdruck
- Verschiedene Hauptluftmassenströme

Für die Oszillatoren zur Garnführungsbeeinflussung waren zusätzlich noch folgende Kriterien wichtig

- Gute Übertragbarkeit der Oszillation durch die Steurdüsen in den Hauptkanal
- Wechsel des Oszillatorkonzepts auf Massenstrom-Feedback zur Erreichung der geringen Baugrösse

Für die Tests wurden somit verschiedene Oszillatorkonzepte entwickelt und diese jeweils bei verschiedenen Drücken untersucht. Zudem ist zu bemerken, dass die Oszillatoren zur Garnführungsbeeinflussung ca. 10x kleiner sein mussten als die Oszillatoren für die Hauptluftoszillation.

## 2.4 Testmethodik mit Garn

Der anspruchsvollste Teil im Verwirbelungsprozess ist wie die komplexe 3-dimensionale Luftströmung im Garnkanal über die Wechselwirkung mit dem Garn sich tatsächlich in Knotenbildung umsetzen lässt. Hierbei kommen eine Vielzahl von textiltechnologischen Parametern ins Spiel, die nur sehr schwer alle genau im Designprozess berücksichtigt werden können. Die Wesentlichen sind die mechanischen Eigenschaften der Filamente, Temperatur, Feuchte, Fadenspannung, Verstreckung, Garngeschwindigkeit, Titer sowie die Filament-Anzahl. Daher ist es neben einem guten Designprozess für die Düsen wichtig, experimentelle Validierungsversuche im echten Produktionsprozess durchführen zu können. Für die realen industriellen Spinnprozesse bei realen Garngeschwindigkeiten um die 3000 m/min werden sehr komplexe Anlagen benötigt, die nur wenige Garnproduzenten oder Maschinenhersteller zur Verfügung haben. Testzeiten auf diesen Anlagen sind sehr begrenzt, daher wurde in einem ersten Schritt auf einer Labormaschine bei 800 m/min mit unverwirbeltem Rohgarn sowie Glattgarn getestet.



#### 2.4.1 Testanlage bei Heberlein

Im Textillabor von Heberlein stand eine Testmaschine «Erdmann» zur Verfügung, siehe Abbildung 5. Die Maschine ermöglicht es Garne unter verschiedenen Parametern (vor allem Geschwindigkeit, Fadenspannungen) umzuwickeln. Hierbei können die zu testenden Düsen in den Garnlauf eingebaut werden und das Garn dadurch behandelt werden. Das resultierende Garn wird mit dem in der Maschine integrierten Wickler auf Rollen aufgewickelt für die nachfolgende Garnanalyse.

Die Tests wurden durchweg bei Garngeschwindigkeiten von 800 bis 1000 m/min ausgeführt, welches die maximal mögliche Geschwindigkeit in diesem Labormassstab darstellt. Für eine typische Messung der Performance einer Düse wurden relevante Fadenlängen bei verschiedenen Drücken verwirbelt und bezüglich Knotenbildung ausgewertet. Parallel zu den Analysen des Garns wurden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vom Faden im Garnkanal gemacht.

#### 2.4.2 Tests in realer Spinnerei auf frischem Rohgarn im BCF Prozess

Tests unter produktionsnahen Bedingungen erfordern eine industrielle Spinnereianlage inkl. geschultem Personal. Es müssen sowohl hohe Geschwindigkeiten fahrbar sein sowie auch genügende Garnqualität erzeugbar sein. Im Rahmen dieses Projekts wurden Tests auf einer industriellen Spinnereimaschine und beim Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen (ITA, Deutschland) durchgeführt. Erreichbare Geschwindigkeiten waren hierbei um die 3000 m/min bei Titern von maximal ca. 2700 dtex. Diese Maschinen sind Stand der Technik und werden für die Produktion von Kunstfasern weltweit eingesetzt. Zentral bei diesen Anlagen ist, dass in diesen Anlagen das Garn frisch gesponnen wird und dann je nach Prozess weiterverarbeitet wird. Eine typische BCF-Anlage hat einen Titerbereich von 1000-5000 dtex und einen Geschwindigkeitsbereich von 1000-3500 m/min. Eine solche Anlage kann bis zu 3.8 Tonnen Garn pro Tag produzieren (bei 4 Fäden).

### 2.5 Messtechnik

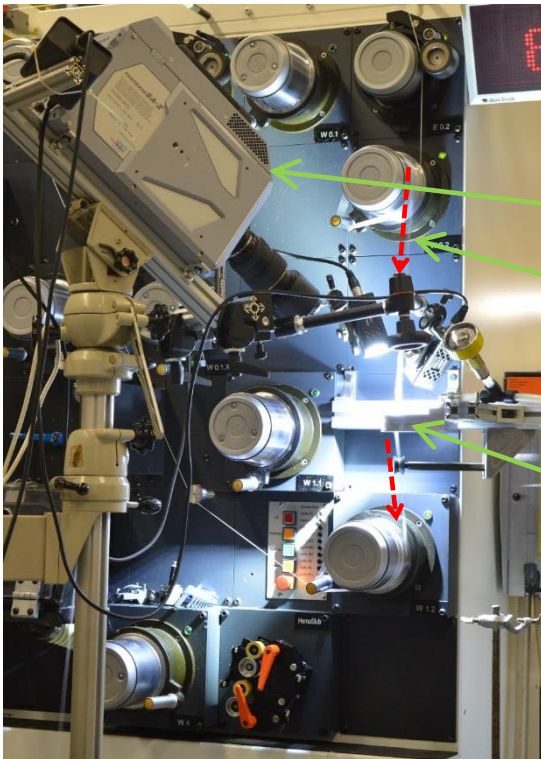
#### 2.5.1 Akustische Frequenzmesstechnik

Zur Bestimmung der Frequenzen der Oszillatoren wurden zunächst akustische Spektren ermittelt. Der Nachweis, dass die akustisch dominierende Frequenz der Oszillatorfrequenz entspricht, wurde im Vorgängerprojekt [1] erbracht. Über ein Mikrofon, 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 6 (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.

#### 2.5.2 Inline Frequenzmesstechnik

Zur Überprüfung der Frequenzen der Oszillatoren im realen Betrieb mit Garn wurden in einigen Oszillatoren Druckports geschaffen, die die Montage eines schnellen Drucksensors direkt im Rückführarm der Oszillatoren ermöglichte. Dadurch konnten die realen Druckverläufe im Oszillator zeitaufgelöst ermittelt werden, was eine Frequenzbestimmung und auch Phasenlage verschiedener Oszillatoren zueinander bestimmbar machte. Ein Beispiel ist in Abbildung 7 gezeigt.



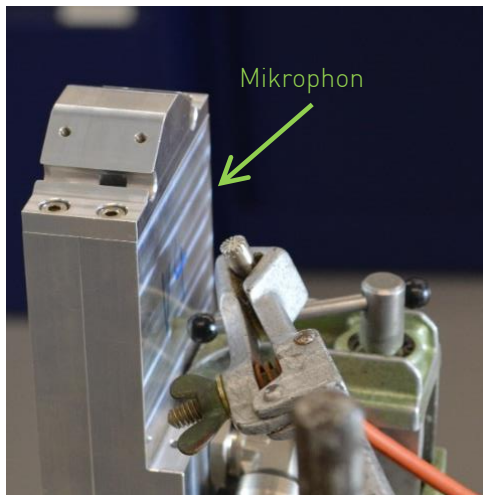
Hochgeschwindigkeitskamera

Faden

Druckluftversorgung

Oszillator

Abbildung 5: Typischer Messaufbau auf der Labormaschine «Erdmann» bei Heberlein.



Mikrofon

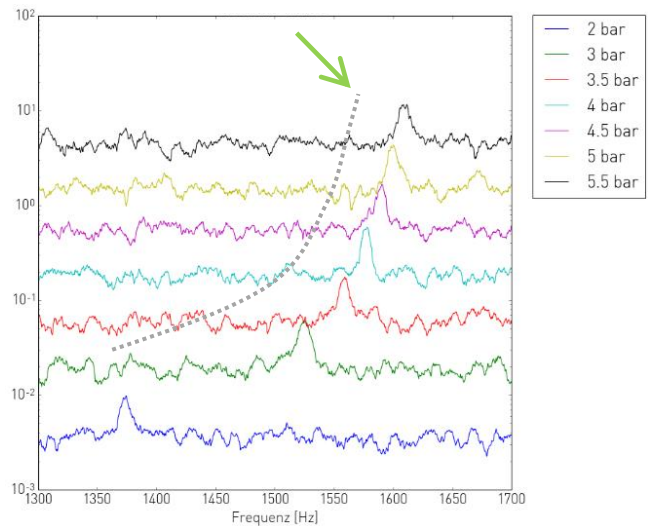


Abbildung 6: Mikrophonmessung des Frequenzgangs der Oszillatoren, links Oszillator mit Mikrofon, rechts typischer Frequenzgang mit Peak bei Oszillatorfrequenz.

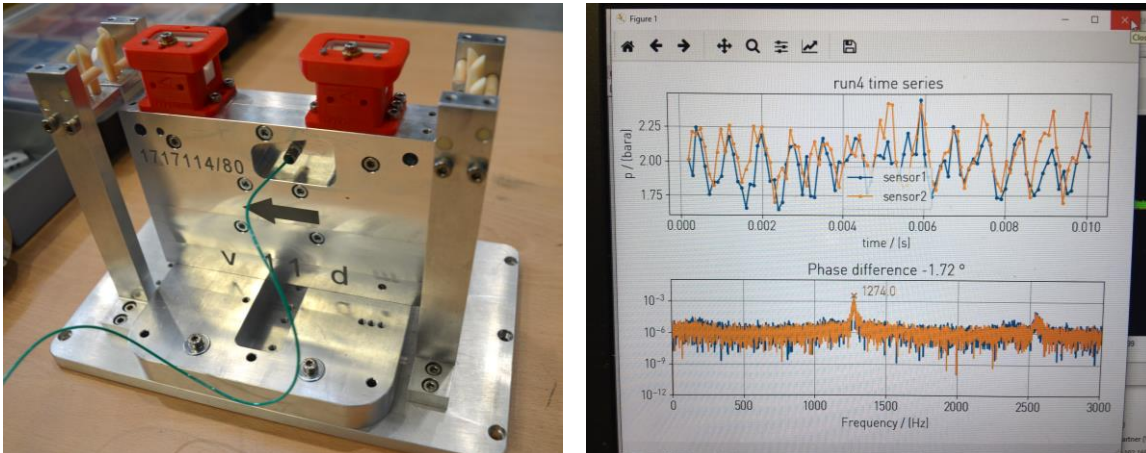


Abbildung 7: Einbaubeispiel des dynamischen Drucksensor (links, grünes Kabel) in einer seriellen Oszillatorvariante. Auswertung Zeitverlauf und Spektrum.

### 2.5.3 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 jeweils Luftverbrauchsmessungen durchgeführt.

### 2.5.4 Garnmesstechnik

Die Garnerstellung kennt eine Reihe von Qualitätskriterien, an denen die Leistung der Luftverwirbelungsdüsen gemessen werden kann. Diese Kriterien/Messmethoden sind über Jahre entwickelt worden und werden für jeden neuen Prozessschritt in dieser Industrie angewandt. Für den Nachweis der Performance von Luftverwirbelungsdüsen sind die Hauptmessmethoden die Messung der Garnqualitäten (Knotenmessung). Beides wird routinemässig an den bestehenden Produkten durchgeführt.

Für die Knotenmessung des Garns stehen bei Heberlein drei verschiedenen Messmethoden zur Verfügung:

- Nadeltester Rapid 600, der mittels Einstechen einer Nadel in das Garn und Ziehen bis eine definierte Kraft überstritten ist, die Anzahl Knoten misst.
- Itemat von Textechno, der mittels eines kapazitiven Sensors die Dicke des Garns misst.
- Wasserbad. Oberflächenspannung des Wassers öffnet die nichtverwirbelten Stellen im Garn.

Alle Messmethoden werden auf das konventionell verwirbelte Garn (Standard) und das mit der Oszillatordüse erzeugte Garn angewandt und die Resultate relativ gegeneinander verglichen. Die Garne werden unter gleichen Bedingungen hergestellt. Das bedeutet, dass die Prozessparameter der Garherstellung exakt die gleichen sind (ausser der Düse für die Verwirbelung).

Wichtige industrielle Prozessparameter hierbei sind:

- Geschwindigkeit
- Garn Grösse
- Anzahl Filamente im Garn
- Querschnittsgeometrie der Filamente.



- Fadenspannung vor und nach der Düse

Nach den geplanten umfangreichen Tests in diesem Projekt ist die wichtigste Vergleichsgrösse der Luftverbrauch der Oszillatordüse im Vergleich zur Standarddüse bei gleicher Düsenperformance (Anzahl Knoten pro Länge).

### 2.5.5 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sind die einzige Methode, die Reaktion des Filamentstrangs auf die Strömung in der Verwirbelungsdüse zeitaufgelöst im Detail zu erfassen. Für solche 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. Für das Verständnis der Funktionsweise der Oszillatoren sind diese Aufnahmen aller Düsen eine sehr wertvolle Erkenntnisquelle. 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. Auf diesen Effekt wird im Ergebnisteil noch eingegangen.



Abbildung 8: Typische Standbilder der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Framerate: 50'000 fps, Abstand der Bilder 0.1 ms.



## 3 Ergebnisse und Diskussion

Für die Performance von oszillatorbasierten Düsen sind zwei Faktoren von zentraler Bedeutung.

Anders als bei den kontinuierlichen Düsen, bei denen die Knotenanzahl eine direkte Reaktion der Filamente ist und die Garngeschwindigkeit unabhängig modifiziert werden kann, muss die Frequenz der Oszillatoren auf die Garngeschwindigkeit abgestimmt sein. Höhere Garngeschwindigkeiten erfordern bei etwa gleicher Knotenzahl höhere Oszillatorfrequenzen. Da die Verfügbarkeit von industriellen Hochgeschwindigkeitsanlagen für Tests sehr begrenzt ist wurden daher zusätzliche Oszillatoren für die Labortests bei niedrigerer Garngeschwindigkeit entwickelt und gebaut.

Der zweite Faktor ist die Übertragung des Luftströmungsimpulses auf die vorbeigleitenden Filament-Pakete. Dieser Vorgang ist hochkomplex und kaum in allen Parametern in der Vorhersage greifbar und macht es unabdingbar, final auf realen Anlagen zu testen. Im Rahmen dieses Projekts wurden drei Kampagnen auf realen Anlagen durchgeführt.

### 3.1 Ergebnisse bei Laborgeschwindigkeit

#### 3.1.1 Designvarianten

Es wurden diverse Düsen rechnerisch ausgelegt und optimiert. Die Zielfrequenz lag bei 431Hz. Dies entspricht ca. 32 Knoten/m bei 800 m/min. Die finale Variante V6 ist in Abbildung 9 dargestellt.

Zusätzlich zu dieser Variante mit fixer Frequenz wurde noch eine Variante mit variabler Frequenz ausgelegt, V7. Hierfür wurden die Rückführkanäle des Oszillators über Schlauchkupplungen ausgekoppelt. Dadurch konnten verschieden lange Rückführschläuche eingebaut werden und dadurch die Frequenz im Versuch angepasst werden. Diese Variante ist in Abbildung 10 dargestellt.

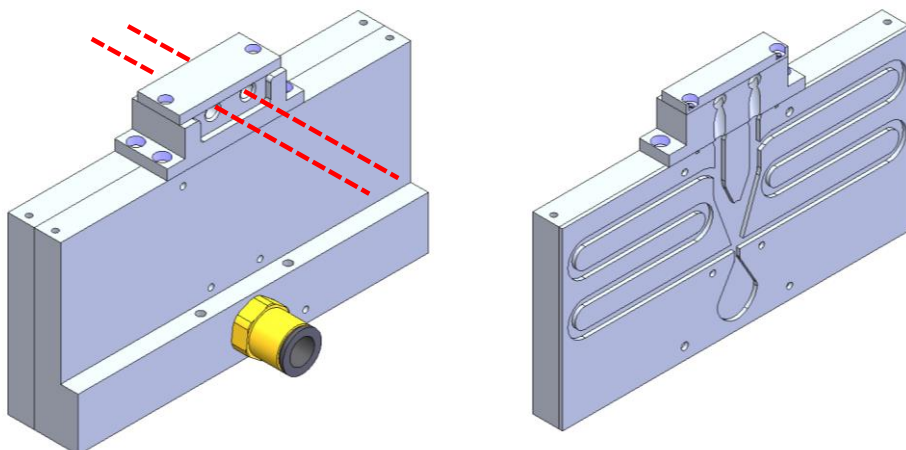


Abbildung 9: Variante V6. Die Garnführung ist durch die rot gestrichelten Linien angedeutet. In der Schnittdarstellung im rechten Teil wird der Oszillator im inneren sichtbar. Die Druckluftversorgung findet durch die Kupplung in gelb statt.

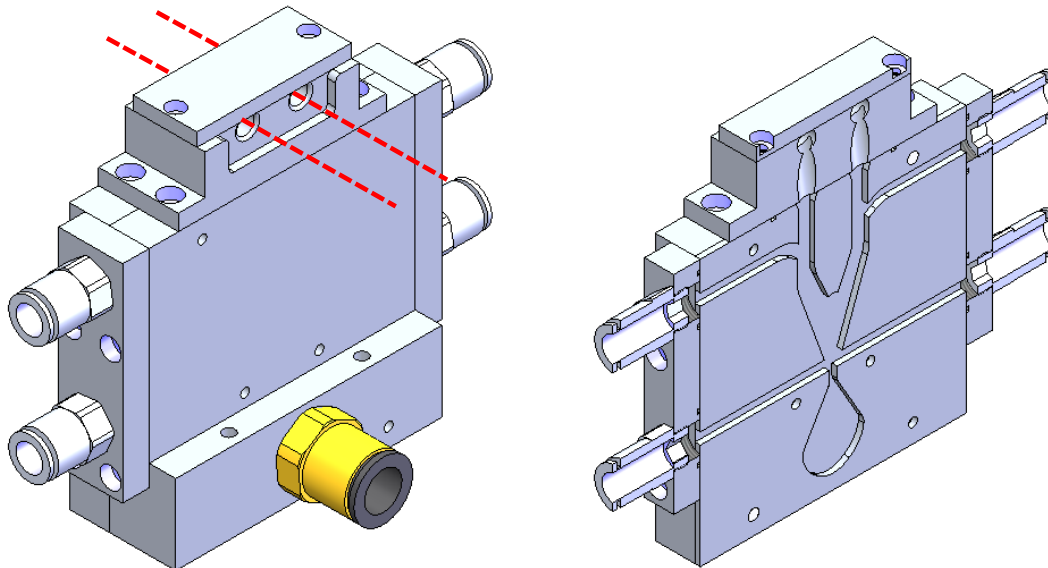


Abbildung 10: Variante V7. Die Garnführung ist durch die rot gestrichelten Linien angedeutet. In der Schnittdarstellung im rechten Teil wird der Oszillator im inneren sichtbar. Die Druckluftversorgung findet durch die Kupplung in gelb statt. Die Rückführkanäle werden durch Druckluftschläuche aus Kunststoff geschlossen.

In Abbildung 11 ist zu einem Zeitpunkt die Strömung durch den Oszillator (V6) dargestellt (Simulationsergebnis). Zu diesem Zeitpunkt ist der linke Kanal voll durchströmt. Nach einer Einschwingphase (ca. 0.02s) stellt sich eine Frequenz von 431 Hz ein.

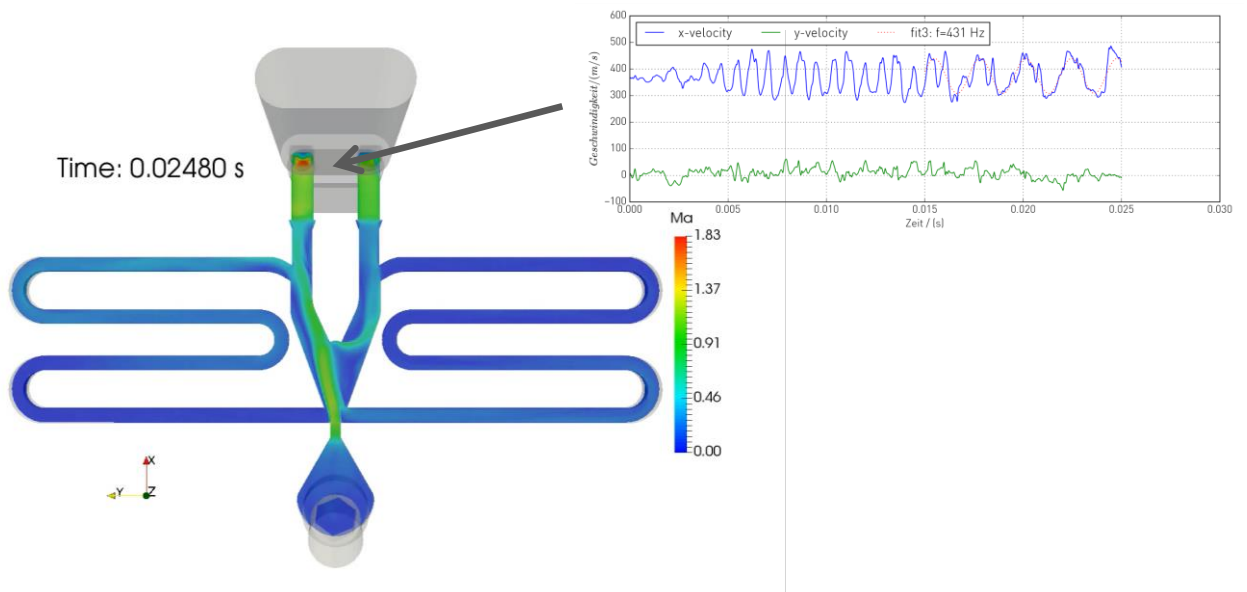


Abbildung 11: Variante V6. Simulationsergebnis der Strömung im Oszillator zu einem Zeitpunkt, in dem der linke Kanal vorwiegend durchströmt wird. Im rechten oberen Bild sind die Strömungsgeschwindigkeiten im Garnkanal dargestellt.



### 3.1.2 Ergebnisse Akustischer Tests

Zur Überprüfung der Oszillatorfrequenzen wurden akustische Tests der V6 durchgeführt für eine Druckreihe von 1 - 5 bar, siehe Abbildung 12. Man erkennt klar die Peaks in der Frequenz sehr nahe bei der Designfrequenz (431 Hz @ 4 bar), die jedoch etwas tiefer als erwartet (rote gestrichelte Linie) liegen. Bei tieferen Drücken sinkt die Frequenz etwas ab. Dieselbe Darstellung für V7 ist in Abbildung 13 gezeigt. Zudem ist die Frequenzabhängigkeit des Oszillators in Abhängigkeit der Schlauchlängen ermittelt worden. Für beide Varianten gilt, dass die Oszillatoren wie erwartet funktionierten.

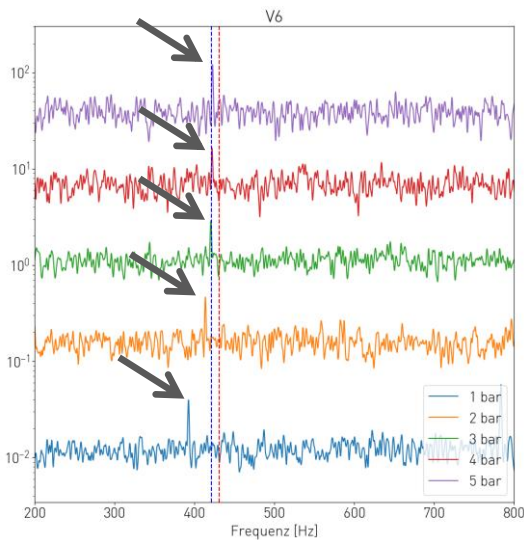


Abbildung 12: Variante V6. Frequenzspektrum bei verschiedenen Versorgungsdrücken (y-Achse verschoben für verschiedene Drücke).

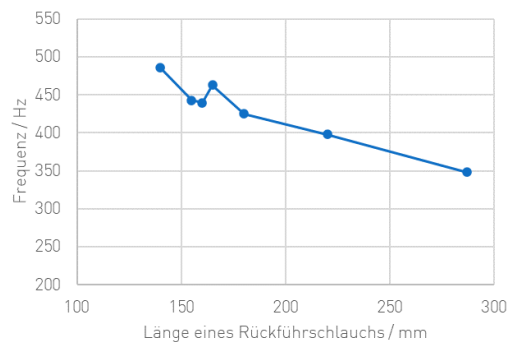
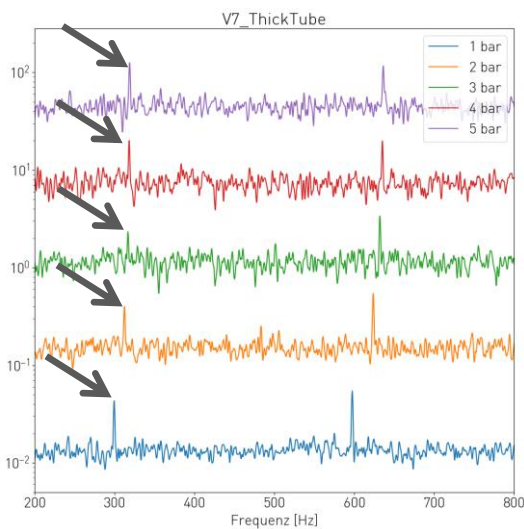


Abbildung 13: Variante V7. Frequenzspektrum bei verschiedenen Versorgungsdrücken (links, y-Achse verschoben für verschiedene Drücke) bei Schlauchlänge 350 mm. Frequenzvariation bei 4 bar für verschiedene Schlauchlängen (rechts).



### 3.1.3 Garntests

Es wurde reales, unverwirbeltes Testgarn mit einem Titer von ca. 1050 dtex mit einer Garngeschwindigkeit von 800 m/min bei verschiedenen Drücken verwirbelt. Die Ergebnisse der Auswertung (Knotenzahlen) mit zwei verschiedenen Messmethoden sind in Abbildung 14 dargestellt. Man erkennt, dass die Variante V6 bei Drücken oberhalb von 2 bar in den Bereich von 30 FP/m kommt. Dies entspricht den akustisch ermittelten Frequenzen sehr gut, 31 FP/m entsprechen bei 800m/min einer Frequenz von 413Hz. Die Performance im Sinne der Knotenzahlen war geringer als die Referenz, jedoch konnte der Oszillator designbedingt wie bereits erwähnt keine höheren Knotenzahlen erreichen. Betrachtet man trotzdem die Knotenzahl als Mass für die Performance so konnte bei 5bar bei halbem Luftverbrauch ca. 85% der Referenzperformance erreicht werden. Und dies bei Garnkanälen, die noch in Prototypenoberflächen ausgeführt waren.

Die Ergebnisse mit dem Oszillator mit verstellbarer Frequenz waren durchweg weniger gut. Insbesondere bei Drücken unterhalb von 4 bar konnte keine nennenswerte Qualität in den Garnen erreicht werden. Es wird vermutet, dass leichte geometrische Asymmetrien in den beiden Rückführkanälen bei dieser Variante zur weniger sauberer Schwingung führten. Dies wurde anschliessend auch in Simulationen bestätigt. Hierzu wurden leicht asymmetrische Rückführkanäle im Simulationsmodell generiert. Die Schwingung wies hierbei Oberschwingungen auf. Zudem führten Druckreflexionen an den Schnittstellen zu den Kunststoffrückführschläuchen zu weiterer Laufunruhe. Als Schlussfolgerung dieser Messkampagne konnte festgehalten werden:

- Die Auslegung der Oszillatoren funktionierte sehr gut, in akustischen Frequenzmessungen wurde die Frequenz auf wenige Prozent genau getroffen.
- Der Oszillator mit fixer Frequenz erzielte gute Verwirbelungseigenschaften bei halbem Luftverbrauch
- Die Knotenzahlen des mit den Oszillatoren verwirbelten Garnen entsprach sehr gut den bei Garngeschwindigkeit und Oszillatorfrequenz zu erwartenden Werten.
- Die Oszillatoren mit variabler Rückführkanallänge wiesen eine zu wenig saubere Oszillation auf. Dies wird auf leichte Ungenauigkeiten in der Symmetrie zurückgeführt. Zudem führten unvermeidbare Durchmessersprünge in den variablen Rückführleitungen zu zusätzlicher Laufunruhe. Dies konnte auch durch Simulationen bestätigt werden.

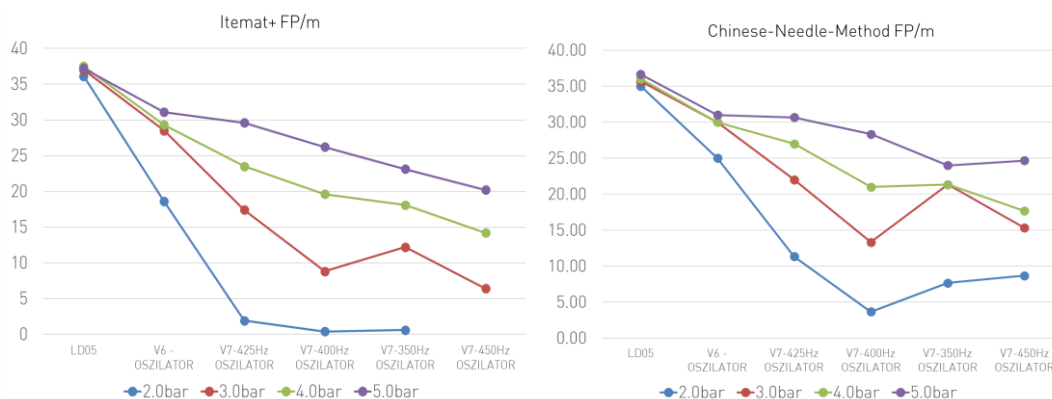


Abbildung 14: Auswertung der Knotenzahlen für verschiedene Oszillatoren im Vergleich zur Referenz mit zwei Messmethoden.

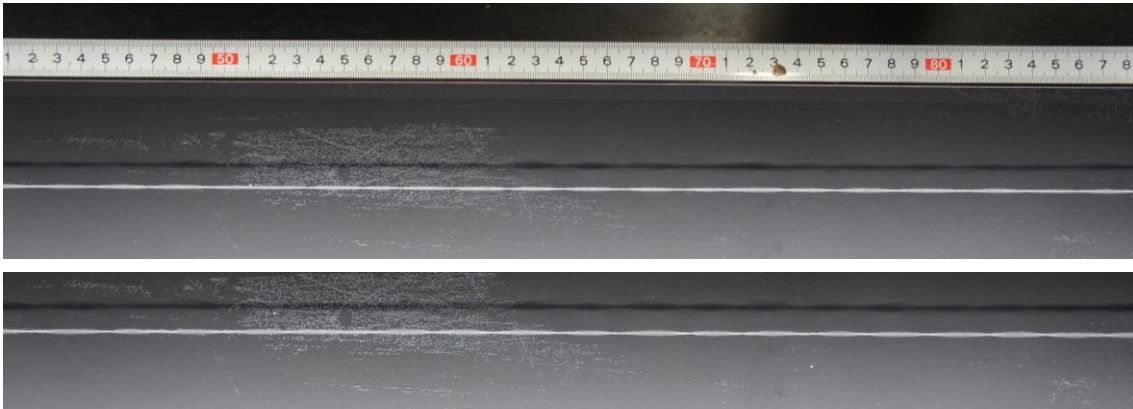


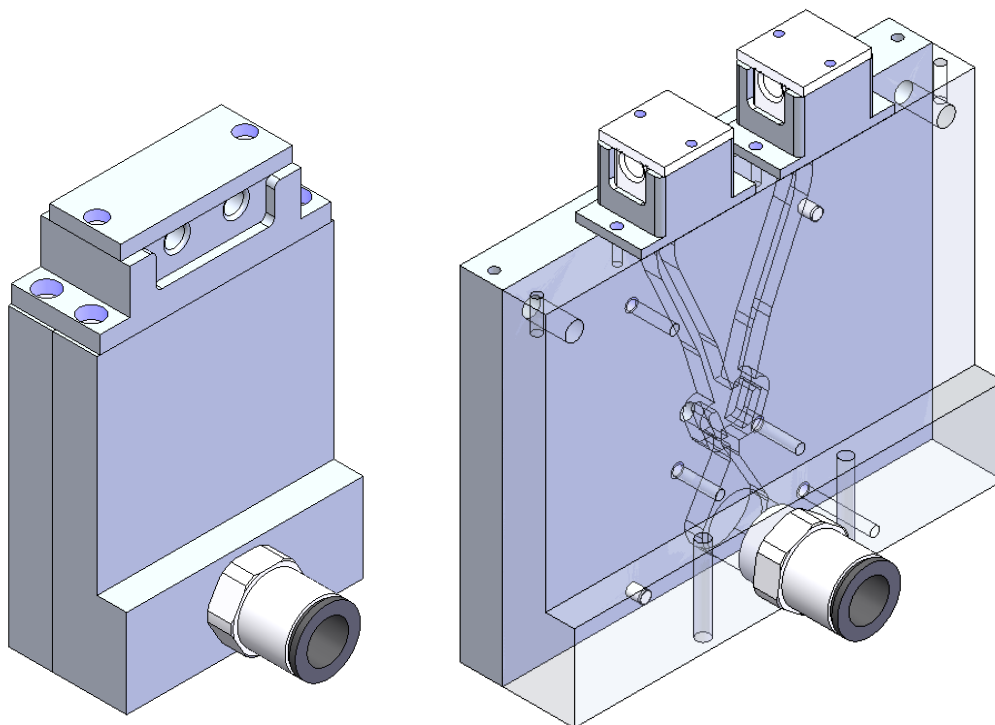
Abbildung 15: Auswertung der Knotenzahlen für LD05@5bar (oben) und V6@5bar (unten).

## 3.2 Erste Kampagne am ITA Aachen

### 3.2.1 Designvarianten

Es wurden folgende Oszillatorvarianten entworfen und gebaut mit dem Designziel, 1300Hz zu erreichen.

- V10\_5: 1283Hz
- V10\_7: 1326Hz
- V11 Serieller Tandem (basierend auf V10\_7)
- V12 Doppelte Tandemdüse (basierend auf V10\_7)



a.

b.

Abbildung 16: a. Hochgeschwindigkeitsoszillator V10\_5 (V10\_7 identisch von aussen) und b. V11 (serieller Tandem).



Die beiden ersten entsprachen klassischen Oszillatoren, die eine Aufteilung des Luftstroms auf zwei Garnkanäle bewirkten. Diese wurden auf die Zielfrequenzen sowie sehr sauberes Umschaltverhalten optimiert, siehe Abbildung 16, a. Mit der Variante V11 und V12 wurde die Variante V10\_7 in Tandemkonfigurationen verbaut. V11 entspricht einer seriellen Tandemkonfiguration, wo dasselbe Garn doppelt verwirbelt wird, siehe Abbildung 16, b. Dieser Oszillator musste geometrisch auf diese Konfiguration angepasst werden, was seine Eigenschaften etwas verändert. Eine Parallele Tandemvariante stellt die Variante V12 dar. Hierbei werden zwei Oszillatoren hintereinandergeschaltet und pneumatisch synchronisiert. Dazu werden sie durch eine Verbindungsleitung pneumatisch gekoppelt. Dies führt zu einer Synchronisation der Oszillatoren. Diese Funktionsweise der Synchronisation wurde sowohl in Simulationen überprüft als auch messtechnisch gezeigt. In Abbildung 17 ist die Variante V12 vollinstrumentiert dargestellt in der Versuchsvorbereitung. Man erkennt deutlich die beiden Oszillatoren. Beide Oszillatoren waren mit dynamischen Drucksensoren ausgestattet (grüne Messleitungen), mit denen der Druckverlauf im Oszillator und somit die Phasenbeziehung zu den beiden Oszillatoren überprüft werden konnte.

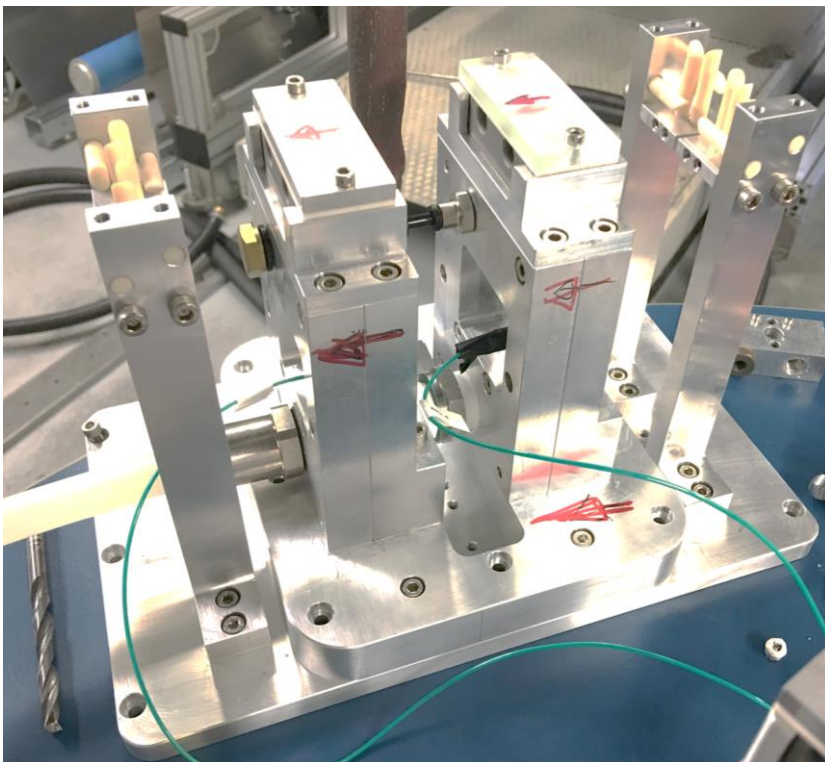


Abbildung 17: a. Hochgeschwindigkeitsvariante V12 (paralleler Tandem), vollinstrumentiert mit Fadenführung und dynamischen Drucksensoren in jedem Oszillator.

### 3.2.2 Ergebnisse Akustischer Tests

Alle Varianten wurden wieder den akustischen Tests unterzogen, bei denen die Oszillatorfrequenzen bei verschiedenen Drücken vermessen wurde, siehe Abbildung 18. Die Designfrequenzen (@4 bar) sind als senkrechte Linie eingezeichnet. Die Variante V10\_5 verhält sich exakt wie vorhergesagt, die Variante V10\_7 weist etwas tiefere Frequenzen auf, jedoch absolut im Zielbereich. Die Variante V11 ist ebenfalls sehr nahe bei Designfrequenz. Für die Variante V12 gilt, dass für die Doppeltandemkonfiguration in den Vorauslegungen ein Koppelungseffekt vorausgesagt wurde, der zur



Senkung der Frequenz auf 1120 Hz gegenüber der Ausgangsvariante führte. In den akustischen Tests konnte diese Koppelung nicht gefunden werden, die gemessenen Varianten sind vielmehr sehr genau bei der Frequenz des Ausgangsoszillators und sogar leicht darüber.

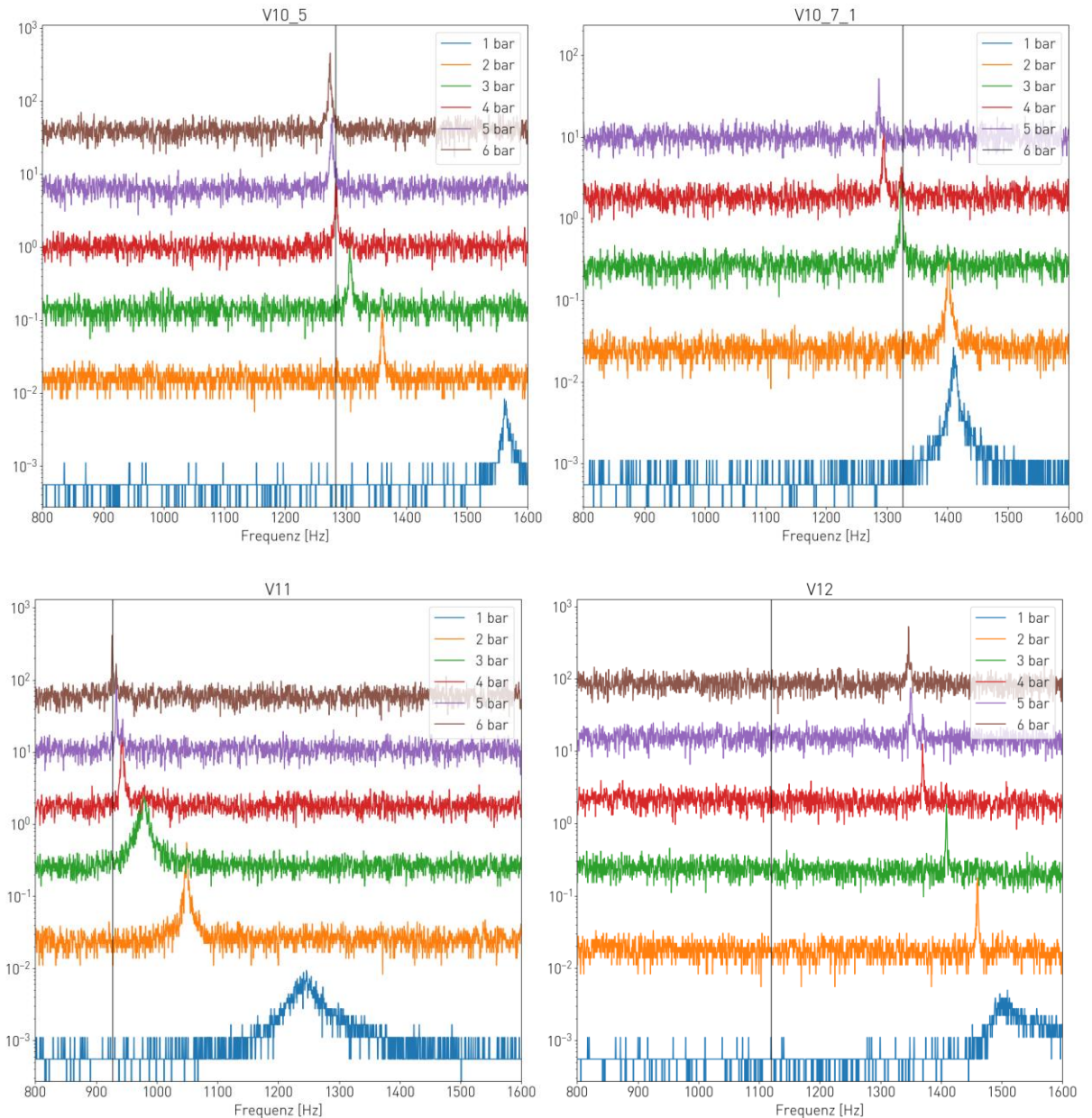


Abbildung 18: Akustische Spektren für die vier Varianten bei verschiedenen Drücken.

### 3.2.3 Garntests ITA

In dieser Messkampagne am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen (ITA) wurden innerhalb von drei Tagen die ersten umfangreichen Messdaten bei realen Garngeschwindigkeiten durchgeführt. Das Mess-Setup ist in Abbildung 21 dargestellt. Es wurde eine Vielzahl von Varianten bei verschiedenen Drücken auf realem Garn vermessen. Hierbei wurden 120 Filamente per Garn bei einem geplanten Titer von 500 dtex vermessen. Wie sich nach Abschluss der Messungen herausstellte, produzierte die Anlage lediglich ca. 100 dtex. Garngeschwindigkeiten waren zwischen 2700 und 2800 m/min.



Neben den Oszillatoren wurde als Referenz für diese Messungen die Standardverwirbelungsdüse von Heberlein, HN403/CN52-4 Topair mitvermessen. Zudem wurde die Variante 11 in verschiedenen Materialausführungen des Düsenkanals vermessen. In den Oszillatoren wurden hierbei dynamische Druckdaten gemessen. In Abbildung 20 sind exemplarisch die Drücke der beiden Oszillatoren der Tandemkonfiguration V12 gezeigt. Beide Oszillatoren sind sehr gut in Phase (Winkelunterschied  $13^\circ$ ).

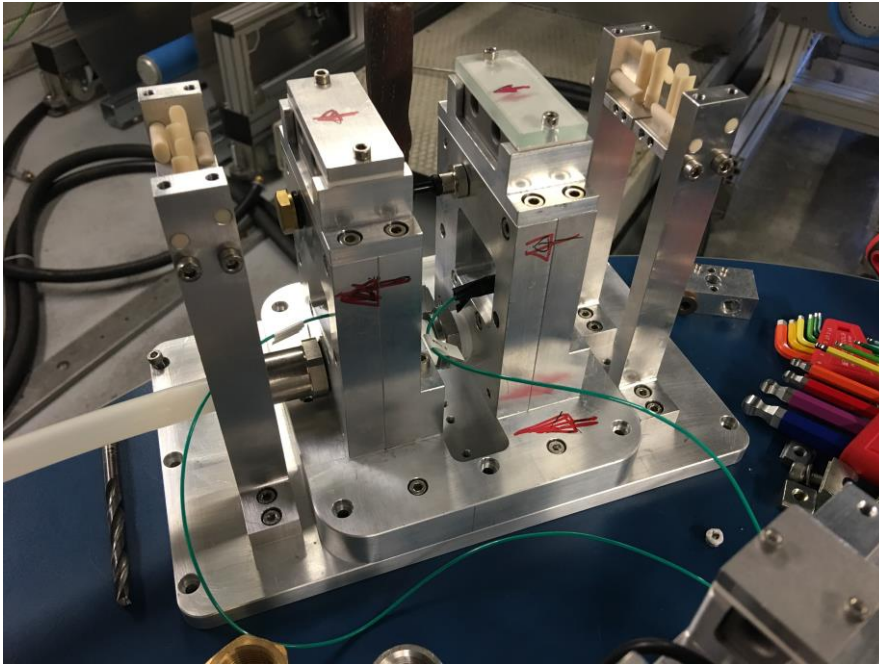


Abbildung 19: Vollinstrumentierter Oszillator Düsen in Tandemkonfiguration.

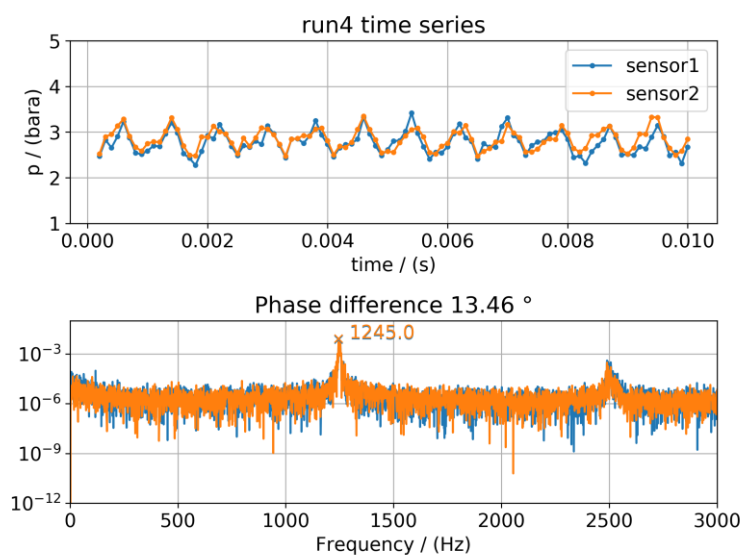


Abbildung 20: Dynamische Drücke exemplarisch für V12 @ 6bar. Oben Zeitverlauf des Drucks in den beiden Oszillatoren, unten die Spektren der beiden Oszillatoren.



Abbildung 21: Testaufbau am ITA (links) mit Tandemkonfiguration des Oszillators montiert (rechts).

Für die Varianten wurden jeweils Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Garnverwirbelung durchgeführt.

In der Auswertung der Garne wurden folgende Verfahren verwendet:

- Bestimmung der Knotenzahlen (FP/m) mit Iemat & Chinese needle Methode.
- Garn Stabilitätsmessungen
- Bestimmung der maximalen Öffnungslängen des Garns

Allgemein gilt, dass die Oszillatordüsen etwas tiefere Knotenzahlen liefern wie die Referenzdüse (ausser bei 5 bar) bei ca. halbem Luftverbrauch (V10\_7 und V10\_5) sowie vergleichbare Knotenzahlen in den Tandemversionen (V12 und V11, Keramik). Es ist auch zu beobachten, dass die Oszillatorvarianten erst bei höheren Drücken (ab 4 bar) gut funktionieren. Obwohl die Varianten V10\_7 und V10\_5 frequenzseitig sehr nahe beieinander liegen, erweist sich die Variante V10\_5 besser in der Performance bei den Knotenzahlen.

#### **Fazit der Garntests bei ITA**

Zusammenfassend waren die Ergebnisse dieser ersten Tests sehr ermutigend. Strömungsseitig funktionierten die Oszillatoren hervorragend. Ihre Wirkung auf das Garn konnte mit diesen Versuchen erstmals nachgewiesen werden. Eine vergleichbare Performance einiger der Oszillatoren im Vergleich mit der Referenz (V10\_5 und V10\_7) ermöglicht eine Druckluft einsparung von ca. 50% für diese Anwendung. Die erreichten Knotenzahlen der Oszillatordüsen stimmte sehr gut mit den Auslegepunkten der Düsen überein. Für höhere Drücke blieben die Knotenzahlen für Oszillatordüsen wie zu erwarten relativ konstant. Jedoch erhöht sich hier die Stabilität. Für die Referenzdüse gilt, dass sich bei Erhöhung des Drucks die Knotenzahlen erhöhen, die Stabilität jedoch gleichbleibt.

Bezüglich der Testbedingungen muss jedoch klar gesagt werden, dass der gefahrene Titer von 100 dtex deutlich zu tief war (viel tiefer als geplant) und die Resultate damit nur bedingt aussagekräftig sind. Reale Anwendungen für technische Garne liegen eher um die 1000 dtex. Zudem waren für diese dünnen Garne die Düsen eigentlich zu gross. Somit waren diese Ergebnisse ermutigend aber noch nicht aussagekräftig für reale Titer.



### 3.3 Zweite Kampagne

#### 3.3.1 Designvarianten

Es wurden dieselben Varianten wie zuvor in 3.2.1 verwendet.

#### 3.3.2 Garntests

Es wurden Tests auf einer Testanlage in industrieller Grösse durchgeführt. Die gefahrenen Garngeschwindigkeit betrug 2800 m/min. Das Garn wies 96 Filamente mit 1900 dtex auf. Dies war ca. 200 mal höher als bei den ITA Versuchen. Fadenspannungen waren im Bereich 200cN. Der gefahrene Prozess entsprach dem BCF Prozess. In zwei Tagen wurden diverse Versuche mit allen Oszillatoren gefahren. Als Referenzdüse wurde hierbei die LD32.05 mit vermessen. Es wurden wieder Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Verwirbelung gemacht und dynamische Druckmessungen an den Oszillatordüsen.

Die Oszillatoren funktionierten alle reibungslos bezüglich fluiddynamischer Performance. Die Frequenzen wurden alle wie erwartet erreicht. Jedoch war die Verwirbelungsleistung der Oszillatordüsen ernüchternd. Lediglich die V11 (serielle Tandemversion) zeigte eine brauchbare Verwirbelungsleistung.

Die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Verwirbelung ergab, dass die Oszillatordüsen durchaus eine Knotenbildung initiierten durch Aufblasen des Filamentstrangs, dieser jedoch nicht vollendet wird.

#### **Fazit**

Die Oszillatordüsen konnten trotz fluiddynamisch einwandfreiem Verhalten nicht die notwendige Knotenbildung in den schweren technischen Garnen erzeugen. Wie die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigten, wurden die Knotenbildung initiiert, jedoch nicht vollendet. Die Pulsübertragung auf den Filamentstrang war nicht gut genug.

### 3.4 Dritte Kampagne Heberlein

#### 3.4.1 Designvarianten

Basierend auf den Erfahrungen der vorigen Messkampagne wurden nochmal eine komplett neue Serie von Oszillatoren ausgelegt, gebaut und getestet. Hierbei wurden zwei Wege verfolgt:

Der erste Weg folgte dem Konzept, mehr Luft in den Oszillator zu bekommen, um den Impuls auf das Garn zu erhöhen. Gleichzeitig wurde die Zielgrösse der Lufteinsparung auf ca. 20% gegenüber der Referenz gesetzt. Dafür wurde ein neuer Oszillator entworfen, der pro Kanal ca. 1.55 mal mehr Luft erlaubt als die Referenzdüse (V28\_5). Dies führt zu einer Lufteinsparung pro Kanal von ca. 23%. Zudem wurde die Grösse des Garnkanals der Testdüsen etwas reduziert (LD32.04). Die Variante V28\_5 ist in Abbildung 24 dargestellt. Die Auslegungsfrequenz betrug 1141 Hz. Das Konzept wurde so entworfen, dass der eigentliche Garnkanal ausgetauscht werden konnte. So konnte der Kanal der LD32.04 verwendet werden, aber auch eine neuere Version, die HN403 Kanalversion.

Der zweite Pfad entspricht dem in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Vorgehen. Hierbei wird der Oszillator nicht mehr im Hauptluftstrom eingebaut, sondern in der Deckplatte zur verbesserten Garnführung verwendet. Die Impulsübertragung erfolgt so durch den Hauptkanal während der Oszillator das Garn führt. Die Lufteinsparung ergibt sich bei diesem Konzept indirekt durch eine Verbesserung der



Düsenperformance bei gleichem Luftverbrauch. Zur Umsetzung wurde die Ausgangsvariante HN403 von Heberlein verwendet, siehe Abbildung 22. Die bestehenden Deckplatten dieser Düsen wurden mit Oszillatoren versehen. Vorteil dieser Variante gegenüber der Oszillatordüsen ist, dass es viel näher an einem industrialisierten Produkt ist. Die Herausforderung jedoch war, dass in einem sehr viel kleinerem Bauraum (ca. 10x kleiner!) völlig neue Oszillatoren mit hoher Frequenz entwickelt werden mussten.

Es wurde wieder eine Vielzahl von Varianten entworfen und simuliert. Final wurden zwei Deckplatten realisiert, mit zwei verschiedenen Zielfrequenzen. Das Grundprinzip der Oszillatordeckplatte ist in Abbildung 23 dargestellt. Die zwei Zielfrequenzen waren 1000 Hz und 1700 Hz.

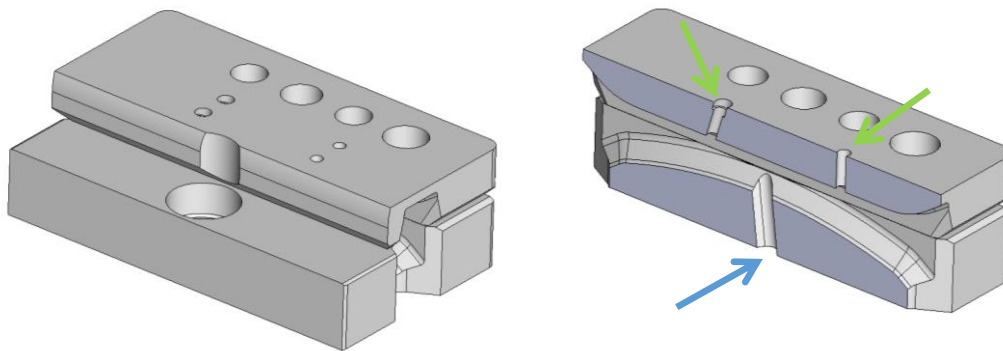


Abbildung 22: Ausgangsversion HN403-basierter Garnkanal mit Hauptluftzufuhr (kontinuierlich, blauer Pfeil) von unten und Steuerluftbohrungen (grüner Pfeil) in der Deckplatte. Diese wurden mit Oszillatoren versehen.

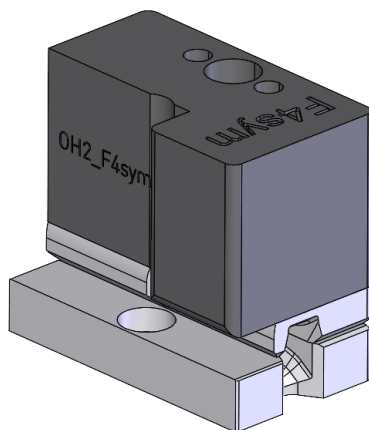


Abbildung 23: Deckplattenoszillator.



### 3.4.2 Akustische und dynamische Druckmessung

Die Oszillatordüsen-Variante V28\_5 konnte aufgrund der Platzverhältnisse sehr gut mit dem dynamischen Drucksensor validiert werden, siehe Abbildung 24. Die ermittelte Frequenz bei 4 bar betrug 1133 Hz, was sehr gut mit der Auslegungsfrequenz von 1141 Hz übereinstimmte.

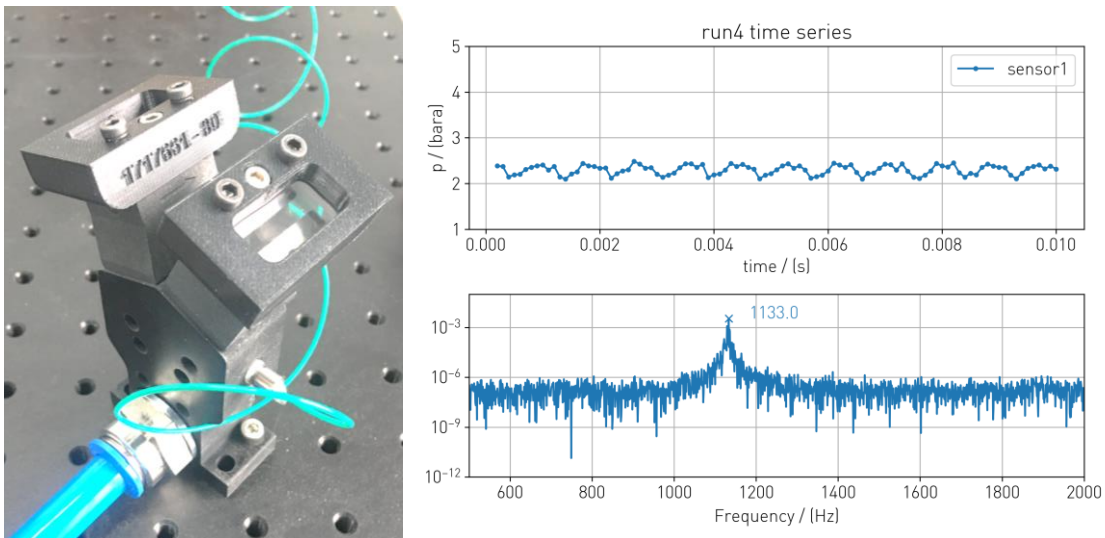


Abbildung 24: Variante V28\_5 in Testkonfiguration mit LD32.04 Kanal für Frequenzmessung mit dynamischem Drucksensor (grünes Kabel).

Die Deckplattenoszillatoren konnten aufgrund der Platzverhältnisse lediglich mit akustischen Tests validiert werden. Diese bestätigten die Designfrequenzen von 1000 und 1700Hz. Das Herstellverfahren für diese Steuerdeckplatten mit Oszillatoren war der 3D Druck. Es waren mehrere Versuche notwendig, eine zuverlässige Druckmethodik zu finden, die eine gute Funktionsweise der Oszillatoren sicherstellte.

### 3.4.3 Garntests

Es wurden zunächst Tests bei Heberlein intern gefahren bei 800 m/min. Die Variante V28\_5 wurde mit zwei verschiedenen Garnkanälen getestet. Man erkennt, dass die V28\_5 Düsen für dieses Garn diesmal in der Lage waren Knoten zu erzeugen. Auch die Anzahl der offenen Stellen ist sehr tief. Diese Versuche wurden wiederholt mit Glattegarn, für die Standard HN403 Düse (Referenz), die V28\_5 Düse mit HN403 Kanal sowie die beiden Varianten mit dem Oszillator in der Deckplatte. Der Grund dafür ist, dass unverwirbeltes Garn sehr schwer zu bekommen ist. Auch hier gilt, dass alle Varianten gute Knotenzahlen erreichten und in der maximale Öffnungslänge vergleichbar waren. Die V28\_5 Varianten hierbei mit ca. 30% weniger Luftverbrauch.

### Fazit

Die verbesserten Oszillatordüsen konnten bei grossen Titern (1900 dtex) auf der Labormaschine gute Verwirbelungsergebnisse erzielen. Die Oszillatoren in der Deckplatte zeigen erste vielversprechende Ergebnisse. Ein Trend zur Verminderung der offenen Stellen im Garn ist sichtbar, es müssen jedoch noch weitere Tests gefahren werden. Insbesondere die Übertragbarkeit wieder auf die grossen industriellen Garngeschwindigkeiten muss gezeigt werden.



### 3.4.4 Luftverbrauchsmessungen

In Abbildung 25 sind die Luftverbrauchsmessungen für die untersuchten Varianten dargestellt für verschiedene Betriebsdrücke. Diese sind wie folgt zu interpretieren

- Grundsätzlich steigt der Luftverbrauch fast linear mit dem Versorgungsdruck. Dies ist eine fundamentale fluiddynamische Eigenschaft der Düsen.
- Der Luftverbrauch ist pro Garnkanal zu vergleichen. Die Werte der Variante V28\_5 müssen daher halbiert werden. Lesebeispiel: Bei 4 bar Versorgungsdruck verbraucht die V28\_5 53 Nm<sup>3</sup>/h, also 26.5 Nm<sup>3</sup>/h pro Garnkanal. Die Referenz LD04 verbraucht hier ca. 39 Nm<sup>3</sup>/h. Dies ergibt eine Einsparung von 32%.
- Die OH Varianten verbrauchen etwas mehr Luft als die HN403 Basisvariante, da die Oszillatoren zusätzliche Luft eindüsen.

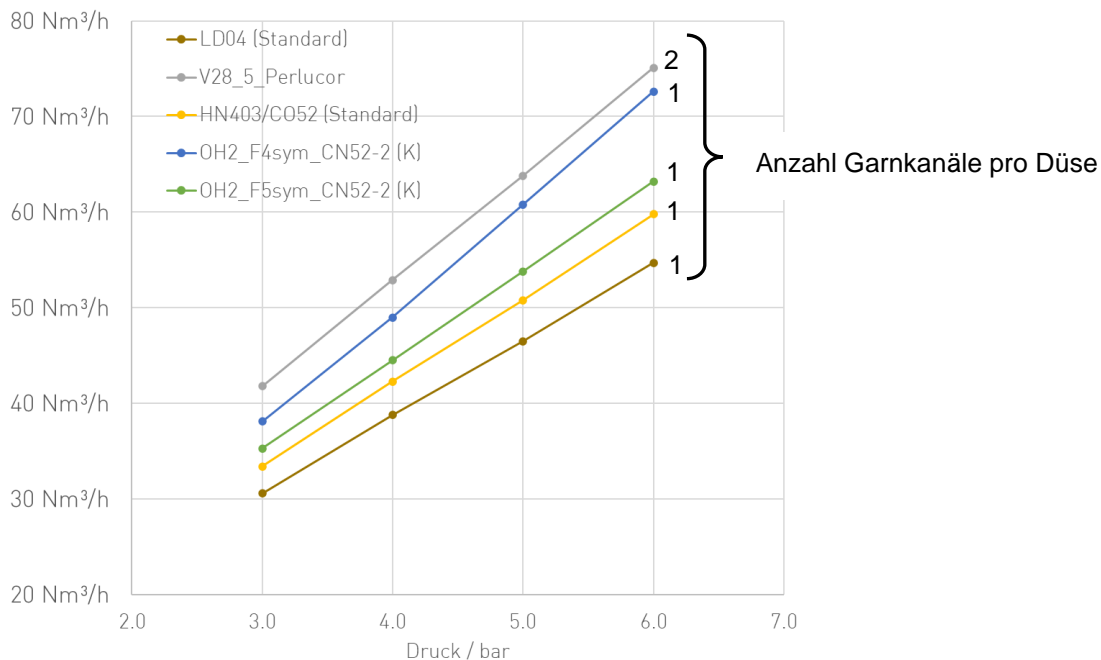


Abbildung 25: Luftverbrauchsmessungen. Anmerkung. Für die V28\_5 Variante werden zwei Garnkanäle versorgt.

## 3.5 Vierte Kampagne

### 3.5.1 Designvarianten

Trotz der strengen Corona-Massnahmen gelang es eine erneute Messkampagne durchzuführen. Aufgrund der beschränkten Zugänglichkeit war es leider nicht möglich, dort alle Varianten zu testen. Insbesondere die V28\_5 Varianten mit verschiedenen Garnkanälen konnten nicht mehr vermessen werden. Diese Ergebnisse müssen zu einem späteren Zeitpunkt ermittelt werden. Es wurden die folgenden Varianten vermessen:

- **TG-1 HN403 CO52 (Std) Messing**  
Standard HN403 Garnkanal mit Topair Bohrungen
- **TG-3 HN403 CO52 TG-3 Messing**  
Standard HN403 Garnkanal mit Topair Bohrungen mit neuer Generation Garnkanal



- **TG-3 HN403 CO52 TG-3 F5**  
Standard HN403 Garnkanal mit Topair Bohrungen und F5 (1700Hz) Oszillatordeckplatte mit neuer Generation Garnkanal
- **TG-3 HN403 CO52 TG-3 F4**  
Standard HN403 Garnkanal mit Topair Bohrungen und F5 (1000Hz) Oszillatordeckplatte mit neuer Generation Garnkanal
- **TG-3 HN403 CO52 TG-3 F3**  
Standard HN403 Garnkanal mit Topair Bohrungen und F5 (700Hz) Oszillatordeckplatte mit neuer Generation Garnkanal
- **TG-3 HN403 CO52 TG-3 F4-XL**  
Standard HN403 Garnkanal mit Topair Bohrungen und F5 (1000Hz) Oszillatordeckplatte mit neuer Generation Garnkanal und erhöhtem Oszillatormassenstrom

### 3.5.2 Garntests

Es wurden auf der Testanlage frisch gesponnenes Garn mit Titer 950 dtex bei 6 bar verwirbelt für alle Düsenvarianten. Die Garngeschwindigkeit betrug 2815 m/min. Anschliessend wurden die Garnqualitätsparameter ermittelt. In Abbildung 26 sind die Knotenzahlen und die mittleren Öffnungslängen sowie die Maximalen Öffnungslängen für die Varianten dargestellt. Es wird deutlich, dass die Oszillatoren in den Deckplatten die Knotenzahlen erhöhen können. Und zwar je mehr, desto höher die Frequenz des Oszillators. In gleichem Masse sinkt die durchschnittliche Öffnungslänge. Die maximalen Öffnungslängen, die für die Prozessstabilität entscheidend sind, konnten dabei bei der F3 und der F5 sogar gesenkt werden.

Für technische Garne liegt der bislang unerreichte Zielbereich bei 35-40 FP/m (Knoten/m). Man erkennt, dass man mit den Oszillatordeckplatten diesem Bereich deutlich nähergekommen ist.

#### Fazit

Der Einsatz der Oszillatoren im Steuerluftbereich (Topair) zeigt verbesserte Ergebnisse bei gleichem Luftverbrauch. Damit könnten technische Garne womöglich besser verwirbelt werden als mit den aktuellen Düsen. Das 3D Druckverfahren der Steuerplatten hat sich bewährt. Damit steht eine vielversprechende, relativ rasch umzusetzende Variante zur Verfügung. Es muss jedoch noch hinsichtlich Prozessstabilität und Wiederholbarkeit für eine Produktreife verbessert werden. Die Varianten V28\_5 mit den Oszillatoren in der Hauptluft müssen in einem nächsten Schritt noch auf einer industriellen Anlage getestet werden. Sie bieten ein grösseres Potenzial hinsichtlich Lufteinsparung, der Aufwand für die weitere Entwicklung ist allerdings beträchtlich.





Der industrielle Zielprozess dieses Projekts war der BCF Prozess. Zum einen ist für diesen der Luftverbrauch relativ hoch, zum anderen ist er genügend flexibel, um alternative Düsenkonzepte zu verwenden. In einer Reihe von Messkampagnen wurden verschiedenste Oszillatorkonzepte an realen Garnen, sowohl auf Testanlagen sowie auch in drei Kampagnen auf realen Spinnereimaschinen gefahren. Bei dünneren Garnen waren die Oszillatordüsen hierbei sehr erfolgreich, es konnten bis zu 50% Lufteinsparung realisiert werden. Eine erste Messkampagne in der realen Spinnerei bei Titern von 2900 dtex war ein Rückschlag, die Oszillatordüsen konnten im schweren Garn fast keine Verwirbelung realisieren. Als Erkenntnis konnte daraus genommen werden, dass der limitierende Faktor bei diesem Prozess die dynamische Garnantwort ist. Es benötigt eine sehr hohe Verwirbelungsenergie, die durch die gepulsten Düsen noch nicht erreicht werden konnte.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden erneute verbesserte Varianten entwickelt, die auf der Labormaschine bei realen Titern gute Verwirbelungen erzeugen konnten. Zudem wurde das alternative Konzept der Oszillatoren in den Steuerdüsen entwickelt und getestet. Hier konnten bei gleichem Luftverbrauch Performancesteigerungen erreicht werden. Diese Düsen konnten auch im industriellen Prozess bei hohen Garngeschwindigkeiten und hohen Titern eine Performancesteigerung erreichen. Aufgrund von sehr begrenzten Testmöglichkeiten während der Covidpandemie konnten die neuen Varianten mit Hauptkanaloszillation noch nicht final getestet werden. Dies wird nachfolgend im Entwicklungsprozess bei Heberlein stattfinden, sobald sich wieder eine Testmöglichkeit ergibt.

Somit wurde das erste Ziel erreicht, wonach die Realisierbarkeit von Oszillatordüsen für den industriellen Zweck gezeigt werden sollte. Das zweite Ziel der Energieeinsparung von 25% konnte noch nicht abschliessend gezeigt werden. Bei Laborgeschwindigkeiten konnte eine gute Verwirbelung bei Titern um die 1000 erreicht werden mit einer Einsparung von ca. 30%.

Rechnet man diese Einsparung konservativ hoch auf den weltweiten Einsatz dieser Düsen nur für den Einsatz bei technischen Garnen und im BCF Bereich ergibt sich unter folgenden Annahmen

- Weltweite Fadenzahl	ca. 30'000
- Luftverbrauch pro Faden	ca. 50 m <sup>3</sup> /h
- Betriebsdauer	ca. 8000 h/Jahr
- Energieverbrauch Druckluft (6bar)	ca. 0.1 KWh / m <sup>3</sup>
- Energiekosten Druckluft (6bar)	ca. 0.02 CHF/ m <sup>3</sup>

ein Verbrauch weltweit von ca. 1.2 TWh pro Jahr (ca. 15 % des Kraftwerks Gösgen). Würden alle diese Düsen mit den Oszillatordüsen betrieben, würde das Energieeinsparungen von 0.36 TWh / Jahr bedeuten.

## 5 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Wie zu Beginn des Projekts antizipiert ist der kritische Erfolgsfaktor für die entwickelten Oszillatordüsen genügend Testkapazität auf den realen industriellen Maschinen sowie ein vertieftes Verständnis für die Verwirbelungsprozesse auf diesen Hochleistungsmaschinen. Die entwickelten Oszillatordüsen funktionieren fluiddynamisch hervorragend und auch ebenfalls in der Umsetzung bei moderaten Garngeschwindigkeiten und mittleren Garntitern. Für den oberen Leistungsbereich müssen jedoch noch weitere Tests gefahren werden und allenfalls weitere Optimierungsschritte vorgenommen werden. Dies erfordert Tests auf einer industriellen Spinnereimaschine bei grösseren Titern und produktionsnahen Garngeschwindigkeiten. Optimierungsmöglichkeiten bestehen hinsichtlich Pulsform des Oszillators sowie auch geometrisch in der Garnbehandlungszone. Eine Produktreife liegt zum aktuellen Zeitpunkt



noch nicht vor. Heberlein wird mit Unterstützung von streamwise sowohl das Konzept der Hauptluftoszillation als auch der Steuerluftoszillation innerhalb des nächsten Jahres weiterverfolgen, um die offenen Punkte zu verifizieren und die weitere Entwicklungsstrategie festzulegen.

## **6 Publikationen**

1. Europäisches Patent EP3564421A1 «METHOD AND DEVICE FOR TREATING THREADS», 06.011.2019

## **7 Literaturverzeichnis**

1. Schlussbericht «Energieoptimierte Luftverwirbelungsdüse» Projekt Nr. SI/501439-01, B. Rembold, 04.05.2018