



iaf

Institut für angewandte Forschung

Abschlussbericht zum Projekt:

**Entwicklung eines energiesparenden Verfahrens zum Hochenergiewasserstrahlen
gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Az: 23757**

Band I – Hauptteil



Verfasser:

Pradeep Narrain, Institut für Angewandte Forschung, Hochschule Esslingen, 73728 Esslingen

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Gärtner, Institut für Angewandte Forschung, Hochschule Esslingen, 73728 Esslingen

Thomas Piller, Piller Entgrattechnik GmbH, 71254 Ditzingen

Esslingen, Juni 2009

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	23757	Referat	21/2	Fördersumme	59.916,00€
----	--------------	---------	-------------	-------------	-------------------

Antragstitel "Entwicklung eines Energie sparenden Verfahrens zum Hochenergiewasserstrahlen"

Stichworte Energie, Wasser, Verfahren, Oberflächenbehandlung, Resonanz

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
24	April 2006	Januar 2009	

Zwischenberichte	alle 6 Monate Kurzbericht
------------------	------------------------------

Bewilligungsempfänger	Piller Entgrattechnik GmbH Einsteinstraße 11 71254 Ditzingen	Tel 07152/99770-0	Fax 07152/99770-26
		Projektleitung Hr. Thomas Piller	
		Bearbeiter Hr. Pradeep Narrain	

Kooperationspartner IAF – Institut für Angewandte Forschung „Modeling and Prototyping“ der Hochschule Esslingen, Kanalstraße 33, 73728 Esslingen

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Zielsetzung des Projektes ist die Entwicklung eines umweltfreundlichen Verfahrens zur Bearbeitung metallischer Oberflächen mit Wasserstrahlen. Dieses wird mit einer hydraulischen Anlage realisiert. Es wird mit gepulsten Wasserstrahlen gearbeitet, womit eine Energie- und Kostenersparnis bezüglich der Hochdruckpumpen zu erwarten ist. Es werden keine chemischen Zusatzstoffe verwendet und das abgetragene Material kann sortenrein aus dem Strahlwasser herausgefiltert werden. Das Strahlwasser wird wieder verwendet; es entstehen geringere Wiederaufbereitungskosten. Aufgrund der gesamten Kostenreduktion könnte diese umweltfreundliche Oberflächenbearbeitung eine breite Umsetzung in der Industrie finden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Projekt basiert auf Untersuchungen zur Erzeugung von hochenergetischen pulsierenden Wasserstrahlen. Diese können in sehr kurzer Zeit z.B. metallische Oberflächen aufrauen. Der Strahlzerfall wird durch das Anbringen von Resonanzkammern an der Düse erreicht. Der Wasserstrahl soll in sehr kurzer Zeit in große Tropfen zerfallen deren Aufschlag Ermüdungserscheinungen im Material der zu bearbeitenden Oberfläche erzeugen. In einem ersten Projekt wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches die Formgebung der Düse optimierte. In der 1. Phase des folgenden Projekts, konnte die Erzeugung der Pulsation im Strahl im Gegensatz zu vorherigen Ansätzen, mithilfe von achsensymmetrischen Resonanzkammern erzeugt werden. Daher geht Projekt hinsichtlich der Erzeugung der Pulsation über den Stand der Technik hinaus. Anhand der Simulationsergebnissen wurden erste Versuche mit Prototypen der Düsen durchgeführt, die einen deutlich höheren Abtrag leisteten.

Das Projekt geht hinsichtlich der Erzeugung der Pulsation über den Stand der Technik hinaus. Konventionelle Methoden verwenden zum Beispiel Blenden, um eine Pulsation im austretenden Strahl zu erzeugen.

Ergebnisse und Diskussion

Die Versuchsdüsen bestehen aus mehreren Teilen. Die Innenkontur der Düse wird aus einem 1,5mm dicken Stahlblech erodiert, welches zwischen zwei verschraubte Metallplatten eingespannt wird. Anders als bei einem rotierenden Herstellungsprozess (bohren, drehen) kann die Düse Hinterschnitte in der Innenkontur besitzen. Dieses ermöglicht die Gestaltung der kreisförmigen Resonanzkammern.

Für den Versuch wurde der Abtrag von vier Düsen bei gleichem Arbeitsdruck (500bar) verglichen. Die Resonanzebene der Düsen lag orthogonal zur Bewegungsrichtung. Alle Düsen hatten den gleichen Düsenquerschnitt, wobei eine keine Resonanzkammern besaßen. Die vier Abtragsbahnen der Düsen zeigen unterschiedliche Strukturen. Über einen Gesamtweg von 150mm beginnt der Materialabtrag der Düse ohne Resonanzkammern bei ca. 140mm. Die Tiefe des Abtrags ist so gering dass er nicht messbar ist. Im Gegensatz dazu beginnt der Abtrag von zwei der Düsen mit Resonanzkammern wesentlich früher. Hier ist der Abtrag nicht nur an der Oberfläche sichtbar, sondern die Tiefe ist auch messbar.

Die Versuchsreihe zeigt, dass über die Änderung der Düsengeometrie erhebliche Änderungen in der Abtragsleistung erreicht werden kann. Eine Gegenüberstellung der jeweils aufgewendeten hydraulischen Leistung zu der damit verbundenen kinetischen Energie zeigt das Einsparpotential.

Das effizientere Düsen Prototyp wurde in einem weiteren Versuch im Freien aufgebaut. Ziel dieses Versuchs war die optische Auswertung des Strahlzerfalls mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera aufzunehmen und anschliessend Auszuwerten. Die Auswertung der Filme mit Auflösungen (Bilderrate) bis zu 12500 pro Sekunde haben keine brauchbare Ergebnissen geliefert da die Vorgänge in der Strömung der Düse unter Betriebsbedingungen mit dieser Methode nicht verwertbar waren. Durch eine Umskalierung wurde ein größeres Modell erstellt. Dadurch verlangsamten die physikalische Prozesse innerhalb der Düse. Die Auswertung der Aufnahmen des vergrößerten Modells zeigt eine gute Übereinstimmung der Pulsationsfrequenz im Wasserstrahl des Versuchsmodells und im Simulationsmodell. Anhand dieser Ergebnisse konnten die Randbedingung für die Strömungssimulation für das parametrisierte Modell unverändert übernommen werden. Das parametrisierte Modell dient als Basis für den folgenden Optimierungsprozess.

In der Optimierungssoftware-Umgebung wurden Geometrieerzeugung, Strömungssimulation, Auslesen der Simulationsergebnisse sowie die Auswertung der Ergebnisse zu einem Prozess vereint. Dadurch konnte das vorgegebene Ziel (Maximierung der Pulsations-Druckamplitude), durch Simulationen in einer vorgegebenen Anzahl von Modellvarianten erreicht werden. Durch mehrere Simulationsläufe konnten die Geometrie-Parameter und Massenströme für unterschiedliche Betriebspunkte in einem Diagramm zusammengefasst werden. Dieses bildet die Basis für die Auslegung von Düsenkammern für bestimmte Anwendungen und Druckbereiche.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Messeauftritt: parts2clean - Internationale Leitmesse für Reinigung in Produktion und Instandhaltung, Messe Stuttgart, 28 – 30.10.2008

Patentierung der zwei-Kammer Düse mit modularem Aufbau

Fazit

Im Sinne der Nachhaltigkeit kann diese Technologie mit einer großen Anwendungsbreite im Bereich der gesamten Oberflächenbearbeitung von Metallen eingesetzt werden und führt zu einer Verringerung des Wasserverbrauchs und zu einer Vermeidung von Abwasser und Schlamm. Durch die einfache Handhabung der Reststoffe kann diese Technologie den gesamten Aufbereitungsaufwand der Reststoffe reduzieren. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wäre es möglich, Anwendungsgebiete, die bisher nur mit umweltbelastenden Verfahren bearbeitet werden können, neu zu erschließen, z.B. die Entlackung von Oberflächen. Daraus ergibt sich ein insgesamt hoher volkswirtschaftlicher Nutzen des Verfahrens.

Ziel des weiterführenden Projektes ist außerdem, eine vermarktbare Produktpalette von Düsen und Bearbeitungsmaschinen zu entwickeln, die durch konkurrenzfähige Bearbeitungszeiten eine breite Anwendung dieses umweltfreundlichen Bearbeitungsverfahrens ermöglichen.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	4
2.	Begriffe und Definitionen	6
3.	Zusammenfassung.....	8
4.	Einleitung	9
5.	Hauptteil	11
5.1.	Stand der Technik	11
5.1.1.	Projektaufbau	13
5.1.2.	Verlauf des AiF Vorgängerprojekts bis zum Zeitpunkt 1. Januar 2006 in Stichworten:	14
5.1.3.	Vergleich zu herkömmlichen Verfahren	14
5.1.4.	Zusatzstoffe	15
5.1.5.	Funktionsprinzip Piller Entgratanlagen	15
5.1.6.	Fazit: Stand der Technik	16
5.1.7.	Umwelttechnische Aspekte: Bedeutung für die Umwelt	16
5.2.	Theoretische Hintergründe.....	17
5.3.	Modellierung im Flachwasserkanal	25
5.4.	Cad – Simulationsmodell mit der Software SolidWorks	28
5.5.	Abtragsversuch	33
5.6.	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen.....	38
5.7.	Umskaliertes Modell.....	40
5.7.1.	Geometrie des Modells.....	40
5.7.2.	Beschreibung des Resonator-Systems	42
5.8.	Modellversuch: Aufbau eines Labview Modells	47
5.9.	Photographische Auswertung des Versuchs	53
5.10.	Modellierung mit ICEMCFD.....	57
5.11.	CFD Simulation mit ANSYS CFX.....	61
5.12.	Auswertung der Ergebnisse	63
5.13.	Optimierung mit modeFrontier.....	65
5.14.	Konstruktion	72
5.14.1.	Entgratanlagen.....	72
5.14.2.	Reinigungsanlage	75
6.	Fazit	77
7.	Literaturverzeichnis.....	78

1. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abbildung 3-1: Zerfall eines Flüssigkeitsstrahls	11
Abbildung 3-2: Druckwellen-Ausbreiten	12
Abbildung 3-3: Wöhlerkurve eines Werkstoffes, ermittelt durch Tropfenschlag und mechanische Lastwechsel	12
Abbildung 3-4: Beeinflussung der Strahlstruktur durch Laserstrahl nach Mazurkiewicz (1983)	13
Abbildung 3-5: Ultraschallmodulator nach Puchala und Vijay (1984)	13
Abbildung 3-6: Viskosität für Newtonsche Flüssigkeiten	17
Abbildung 3-7: Resonanzkammern am Düsenmodell	25
Abbildung 3-8: Resonanzkammern am Modell	26
Abbildung 3-9: CAD-Halbmodell der Düse	28
Abbildung 3-10: Druckverlauf in der transienten Simulation	28
Abbildung 3-11: SolidWorks-Modell der Düse mit zwei Kammern	29
Abbildung 3-12: Vernetztes Modell der 2D-Düse	31
Abbildung 3-13: Mehrteilige Düse	33
Abbildung 3-14: Pulsierender Strahl	33
Abbildung 3-15: Düsenvarianten I, II, III	34
Abbildung 3-16: Versuchsaufbau	34
Abbildung 3-17: Prüfobjekt	35
Abbildung 3-18: Auswertung	35
Abbildung 3-19: Abtragkontur, Düse II	36
Abbildung 3-20: Abtragsvolumen, Düse III	36
Abbildung 3-21: Wasserstrahl-Austritt bei 100 bar Druck	38
Abbildung 3-22: Kontrastbild -Strahlaustritt	38
Abbildung 3-23: Strahlausbreitung	38
Abbildung 3-24: Strahlzerfall	39
Abbildung 3-25: Strahl - Struktur	39
Abbildung 3-26: Düsenmaße	41
Abbildung 3-27: Messstellen in der Düse	41
Abbildung 3-28: Düsenmodell aus Aluminium	42
Abbildung 3-29: Charakteristische Längen	43
Abbildung 3-30: Eingebaute Düse mit Plexiglas-Deckel	47
Abbildung 3-31: Messstellen am Modell	48
Abbildung 3-32: Druckanschlüsse	48
Abbildung 3-33: Druckmessstellen	51
Abbildung 3-34: Strahlzerfall	53
Abbildung 3-35: Auflösung des Strahls	54
Abbildung 3-36: Bildbearbeitung	54
Abbildung 3-37: Abstand zwischen Wasserpakete	55
Abbildung 3-38: Ursprung des Koordinatensystems	57
Abbildung 3-39: Linien und Kurven des Modells	57
Abbildung 3-40: Das Blocking	58
Abbildung 3-41: O-Grid	58
Abbildung 3-42: Vernetzung ohne O-grid	59
Abbildung 3-43: Blocking und Vernetzung mit O-grid	59
Abbildung 3-44: Das fertige Netz	60
Abbildung 3-45: Extrudiertes Netz	60
Abbildung 3-46: Kammergeometrie in Abhängigkeit von Parameter R	66
Abbildung 3-47: Eingangsvariablen in mF	67
Abbildung 3-48: Scheduler und DOS-Knoten	68
Abbildung 3-49: FFT und Zielgröße	69

Abbildung 3-50: Entgratanlage Vector II.....	73
Abbildung 3-51: Entgratanlage VectorJet III.....	74
Abbildung 3-52: Behälterstation der Reinigungsanlage.....	75
Abbildung 3-53: Arbeitseinheit der Reinigungsanlage.....	75
Abbildung 3-54: Vakuumtrockner mit Wäschekorb.....	76

Tabellen

Tabelle 3-1: Charakteristische Größen.....	21
Tabelle 3-2: Normierter Flächenabtrag.....	36
Tabelle 3-3: Wellenlänge für unterschiedliche Längen.....	43
Tabelle 3-4: Frequenzen.....	44
Tabelle 3-5: Vergleich Simulation und Versuch.....	56
Tabelle 3-6: Definition von Wasser als Medium.....	61
Tabelle 3-7: Fluid- und Turbulenz-Modell.....	62
Tabelle 3-8: Randbedingungen und Solver Einstellungen.....	62

2. Begriffe und Definitionen

Lateinische Buchstaben

a	Beschleunigung
A	Fläche
b	Breite
D	Durchmesser
D_{hy}	hydraulischer Durchmesser
E_{Fl}	Kompressionsmodul
f	Frequenz
F	Kraft, allgemein
h	Höhe
l	Länge
m	Masse
p	Druck, allgemein
Δp	Druckdifferenz
Q	Volumenstrom
R	Radius
R_{hy}	hydraulischer Radius
t	Zeit
T	Temperatur
u	Strömungsgeschwindigkeit
V	Volumen

Griechische Buchstaben

α_D	Durchflusskoeffizient
β	Kompressibilitäts-Koeffizient
η	dynamische Viskosität
ν	kinematische Viskosität
ξ	Reibungsverlustbeiwert
ρ	Dichte

Abkürzungen

CAD	computer aided design
CFD	computational fluid dynamics
cfx	ANSYS CFX
FDM	Finite Difference Method
FEM	Finite Element Method
FFT	Fast (schnelle) Fourier Transformation
FVM	Finite Volume Method
icem	ANSYS ICEMCFD
Ma	Machzahl
mF	modeFRONTIER
MF	ModeFrontier
MID	magnetisch-induktiver Durchflussmesser
Re	Reynoldszahl
Sr	Strouhalzahl
Vo	Vorschub

Indizes

Anf	Anfangsgeschwindigkeit
dyn	dynamisch
Ende	Endgeschwindigkeit
hyd	hydraulisch
stat	statisch
H ₂ O	Wasser
o	Original
M	Modell
max	Maximum
min	Minimum

3. Zusammenfassung

Das Projekt „Entwicklung eines Energie sparenden Verfahrens zum Hochenergiwasserstrahlen“ (DBU AZ. 23757) wurde in zwei Phasen über einen Gesamtzeitraum von April 2006 bis Januar 2009 durchgeführt.

Es wurde eine Düse entwickelt, die durch die Erzeugung von hochenergetischen, pulsierenden Wasserstrahlen einen höheren Wirkungsgrad als herkömmliche Düsen aufweist.

Im Rahmen dieses Projektes wird eine theoretische und experimentelle Machbarkeitsstudie zur Erzeugung hochenergetischer, pulsierender Wasserstrahlen durchgeführt. Diese Wasserstrahlen dienen zur Aufrauung und Bearbeitung metallischer Oberflächen in extrem kurzer Zeit.

Die Pulsation im Strahl wird durch Resonanzkammern im engsten Querschnitt erzeugt. Ziel des Projekts war die Festlegung von Geometrieparametern zur Anpassung der Düse an unterschiedliche Arbeitsbedingungen.

Die Oszillation im Strahl wird über den Betriebsdruck und die Düsengeometrie so gesteigert, dass der Flüssigkeitsstrahl am Düsenaustritt stark beschleunigt und durch Kavitation in Segmente zerlegt wird. Die aus Simulationen ermittelten Geometrien mit optimaler Strahlbeeinflussung wurden in Versuchen näher untersucht. Seitlich an der Austrittsbohrung angeordnete Kammern wirken als Resonatoren, zwischen denen eine Druckwelle pendelt. Die Druckschwankungen in den Kammern führen zu einer Pulsation des Drucks am Austritt, die mit einer seitlichen Strahlschwankung verbunden ist.

Die Flüssigkeitsabschnitte, die die Düse verlassen, zerfallen schnell zu Tropfen, die dann auf die zu bearbeitende Oberfläche treffen. Die Vorteile des Verfahrens gegenüber dem Stand der Technik sind durch umweltschutztechnische Merkmale wie das Vermeiden von Zusatzstoffen im Wasser sowie energiesparende Merkmale wie einen höheren Wirkungsgrad der Anlagen gegeben.

Aufgrund der Ergebnisse des Vorgängerprojekts konnte ein Simulationsmodell erstellt werden. Dieses konnte als Ausgangsmodell für die Parametrisierung verwendet werden. Die parametrisierte Geometrie des Modells wurde mit der Software ANSYS ICEMCFD erstellt und die CFD Berechnung mit dem Software - Paket ANSYS CFX durchgeführt. Aufgrund der hohen Simulationsdauer (bis zu 15 Stunden) wurden die Simulationen auf einen dafür fest zugeordneten Dual core Workstations (Rechner) im Institut für Angewandte Forschung durchgeführt.

Beide Software Pakete (ICEM CFD und CFX) wurden in einem dritten Schritt in der Software - Umgebung modeFRONTIER gekoppelt. Hier wurden die Parameter für die Geometrieänderungen sowie die Zielgrößen festgelegt. Die Simulationsschleifen wurden von modeFRONTIER gesteuert und kontinuierlich durchgeführt, bis die vordefinierten Zielgrößen (das Optimum) mittels statistisch-mathematischer Algorithmen von modeFRONTIER berechnet und erreicht wurde.

Damit konnten die Geometrieparameter von Düsen für unterschiedliche Betriebspunkte festgelegt werden. Neben dem Einsatz in der Anlagenserie VectorJet werden die Düsen in einer neu-entwickelten Anlagenserie zur Reinigung von Bauteilen im Niederdruckbereich eingesetzt. Dieser Anlagen sind für die Reinigung von Getriebegehäuse bestimmt und werden mit Arbeitsdrücken von ca. 7 bar betrieben. Weitere Änderungen der Technologie für eine Erweiterung der Anwendungsbreite sind vorgesehen.

4. Einleitung

Das Projekt basiert auf Vorarbeiten des Vorgängerprojekts wobei Untersuchungen am Flachwasserkanal gezeigt haben dass Instabilitäten im Strahl am Austritt einer Düse durch Resonanzkammern erzeugt werden können. Versuche werden am Flachwasserkanal mit mehreren Kammer-Paaren in der Düse durchgeführt. Daraus kann Abhängigkeit der Pulsationsfrequenz zur Kammergeometrien sichtbar gemacht werden.

Durch die Ähnlichkeitsmechanik können Modelle nach verschiedenen Verhältnissen hoch- oder herunterskaliert werden. Die beobachtete Pulsation im Flachwasserkanal kann durch eine Umskalierung auf einen Prototyp der Düse unter Betriebsbedingungen in einer Entgratanlage entsprechend wiedergegeben werden. Die Effizienz einer solchen Düse kann in einem Abtragsversuch geprüft werden.

Erste Abtragsversuche anhand eines Düsenprototyps haben diesen Einfluss qualitativ bestätigt. Die Pulsationserzeugung selbst kann kaum beschrieben werden da die Vorgänge unter realen Bedingungen (Arbeitsdruck ca. 100 bar, Austrittsgeschwindigkeit ca. 200 m/s) messtechnisch sehr schwer auffassbar sind.

Im Rahmen dieses aufbauendes Projektes soll eine theoretische und experimentelle Machbarkeitsstudie zur Erzeugung hochenergetischer, pulsierender Wasserstrahlen durchgeführt werden. Diese Wasserstrahlen dienen zur Aufrauung und Bearbeitung metallischer Oberflächen in extrem kurzer Zeit. Diese Machbarkeitsstudie soll die notwendigen Informationen zur Auslegung der Kammergeometrien unter Betriebsbedingungen liefern.

Die Pulsation wird im Gegensatz zu existierenden Verfahren durch Resonanzkammern im Vorlauf der Düse erzeugt. Die Pulsation im Strahl wird über den Betriebsdruck und die Düsengeometrie so gesteigert, dass der Flüssigkeitsstrahl am Düsenaustritt stark beschleunigt und durch Kavitation in Segmente zerlegt wird.

Die Flüssigkeitsabschnitte, die die Düse dann verlassen, zerfallen schnell zu Tropfen, die auf die zu bearbeitende Oberfläche treffen. Außerdem wird durch die Fokussierung der Druckwelle in der Düse dort ein sehr hoher lokaler Druck aufgebaut, der den Anlagendruck bei weitem überschreitet. Dies führt zu einem erheblich höheren Maximalimpuls, der mit dem austretenden Flüssigkeitsstrahl erreicht werden kann. Somit ist neben einer größeren Reichweite auch eine höhere Strahlenergie zu erwarten, die die Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens im Vergleich zum Stand der Technik erheblich steigern.

Weitere Vorteile des Verfahrens gegenüber dem Stand der Technik sind durch folgende Merkmale gegeben:

Umwelttechnische Aspekte

Aus umwelttechnischer Sicht soll ein umweltfreundliches Verfahren entwickelt werden, in dem reines Wasser zum Entgraten von metallischen Bauteilen eingesetzt wird. Herkömmliche Verfahren verwenden Zusatzstoffe wie Sand, um die Abtragsleistung zu erhöhen. Dadurch entstehen mehrere Stoffe im Abwasser, die oft mit sehr hohem technischem Aufwand getrennt werden müssen. Werden keine Zusatzstoffe zur Entgratung verwendet, so müssen die Anlagen mit sehr hohem Druck betrieben werden, was wiederum mit hoher Pumpenleistung und Energieverbrauch verbunden ist.

Die neu entwickelte Düse soll mit Hilfe von mehreren Resonanzkammern den austretenden Wasserstrahl zum Pulsieren bringen. Die Pulsationserregung mit Resonanzkammern basiert auf Untersuchungen am Flachwasserkanal, die in einer frühen Projekt - Phase durchgeführt wurden. Die Pulsation im Strahl führt zum Tropfenschlag-Effekt beim Zerfall, und kann eine schnellere Materialermüdung am Werkstück, z.B. beim Entgratverfahren, führen.

Ziel der Düsenentwicklung ist die Optimierung der Düsengeometrie (die Anordnung der Kammern zueinander), um eine gezielte Pulsation im Strahl zu erreichen. Damit kann die Düse für bestimmte Einsätze bei optimiertem Energieverbrauch verwendet werden.

Um dieses Vorhaben zu realisieren, wird in einem ersten Schritt die parametrisierte Düsengeometrie mit dem Software-Tool ANSYS ICEM CFD erstellt. Die Geometrie wird mit demselben Tool vernetzt mit anschließender Überprüfung der Netzqualität. Für die Strömungssimulation im zweiten Schritt

wird die ebenfalls von ANSYS entwickelte CFD Software ANSYS CFX verwendet. Diese Software ermöglicht die Definition des Fluids Wasser als kompressibles Medium.

Beide Software Pakete (ICEM CFD und CFX) werden in einem dritten Schritt mit modeFRONTIER gekoppelt. Hier werden die Parameter für die Geometrieänderungen sowie die Zielgrößen festgelegt. Die Simulationsschleifen werden fortan von modeFRONTIER gesteuert und kontinuierlich durchgeführt, bis die vordefinierten Zielgrößen erreicht sind. Diese Zielgröße ist das Druckamplituden-Maximum welches modeFrontier durch Geometrieänderungen erreicht. Ein wesentlicher Zwischenschritt ist die Umrechnung des zeitlichen Druckverlaufs in den Frequenzbereich mittels einer Fourier Fast Transformation. In den ersten Simulationen wurden die Umrechnung mit einem Excel Makro mit der Excel Fourieranalyse Add-In manuell durchgeführt. Anschliessend wurde für modeFrontier ein Matlab Programm geschrieben da es keinerlei detaillierte Informationen über den Syntax innerhalb der modeFrontier Umgebung gab. Erst am Ende dieser Arbeit wurde die Frage der Einbauung eines modeFrontier-eigenes FFT im Modell geklärt. Damit konnte der gesamte Optimierungsprozess mit ICEM CFD, ANSYS CFX und modeFrontier durchgeführt werden.

5. Hauptteil

5.1. Stand der Technik

Projektziel ist die Entwicklung eines energiesparenden Verfahrens zur Bearbeitung metallischer Oberflächen mit Hilfe von Wasserstrahlen. Diese können in sehr kurzer Zeit z.B. metallische Oberflächen aufrauen. Der Entwicklungsansatz lässt sich anhand des Zerfallsvorganges eines Flüssigkeitsstrahls in gasförmiger Umgebung erklären (Abbildung 5-1).

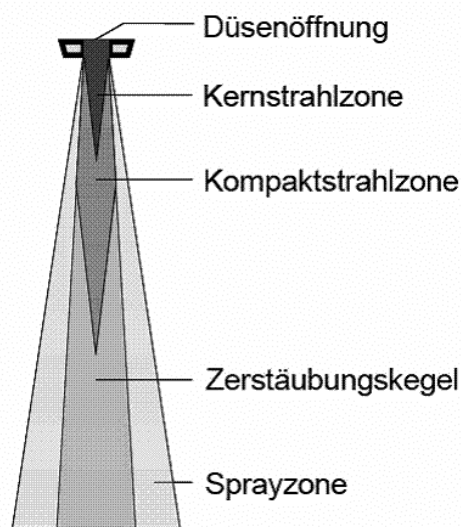


Abbildung 5-1: Zerfall eines Flüssigkeitsstrahls

Der aus der Düse austretende Strahl beginnt durch Reibung an der gasförmigen Umgebung an der Oberfläche in Tropfen zu zerfallen. Durch den fortschreitenden Zerfall wird der Strahl allmählich vollständig abgebaut. Trifft der Strahl während des Zerfalles auf eine Oberfläche, zeigt sich, dass die im Außenbereich entstandenen Tropfen bei gleicher Geschwindigkeit eine größere mechanische Belastung für die Oberfläche bewirken als der noch vorhandene Kernstrahl. Die Tropfen treffen die Metalloberfläche wie Geschosse und erzeugen Schockwellen im Material. Diese Schockwellen im Material werden durch Druckwellen in den Tropfen ausgelöst. Dieses Prinzip dient als Basis für das Entgratungsverfahren.

Das Entgraten spanend bearbeiteter sowie im Feinguss hergestellter Teile durch Hochdruckwasserstrahlen ist inzwischen ein etabliertes Bearbeitungsverfahren. Der mechanische Aufbau einer dazu benötigten Hochdruckwasserstrahlanlage ist im Prinzip recht einfach. Eine Hochdruckpumpe fördert Wasser, das in Feinstfiltern gereinigt wird, mit einem Druck von bis zu ca. 100 MPa durch Düsen mit typischen Öffnungsdurchmessern von ca. 1 mm. Die aus diesen Düsen austretenden Wasserstrahlen erreichen Geschwindigkeiten von einigen hundert Metern pro Sekunde. Der Oberflächenabtrag ist dann besonders groß, wenn der auftreffende Strahl in einzelne Tropfen zerfällt.

Es lässt sich leicht abschätzen, dass bei den Strömungsgeschwindigkeiten, die in den Düsen auftreten, und einer Schallgeschwindigkeit, die je nach thermodynamischem Zustand des Wassers über 1500 m/s betragen kann, am Auftreffpunkt eines Tropfens erhebliche Druckspitzen auftreten. Die Ausbreitung dieser Wellen sind in (Abbildung 5-2) dargestellt. Diese Druckspitzen führen zu einer lokalen Überbeanspruchung des Werkstoffes. Die im Werkstoff erzeugten Schockwellen führen nach sehr kurzer Zeit zum örtlich begrenzten Ermüdungsbruch.

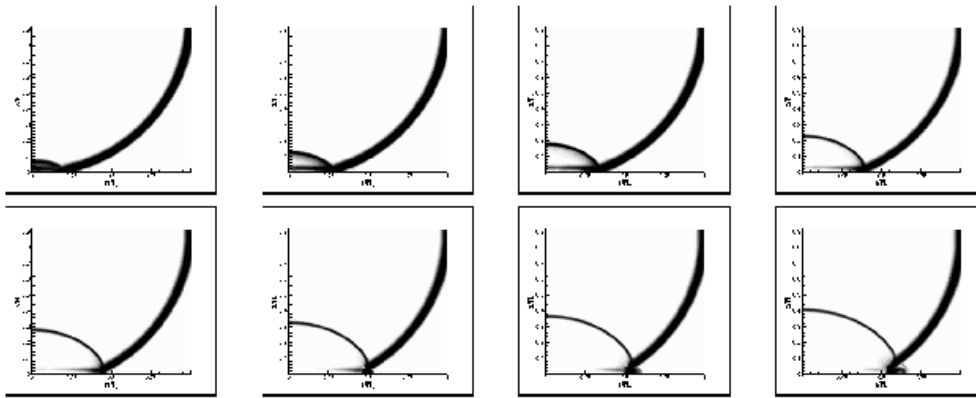


Abbildung 5-2: Druckwellen-Ausbreiten

Die Ermüdung durch Tropfenschlag kann mit den Messungen aus konventionellen Ermüdungsversuchen verglichen werden, wie in Abbildung 5-3 gezeigt wird [PM84].

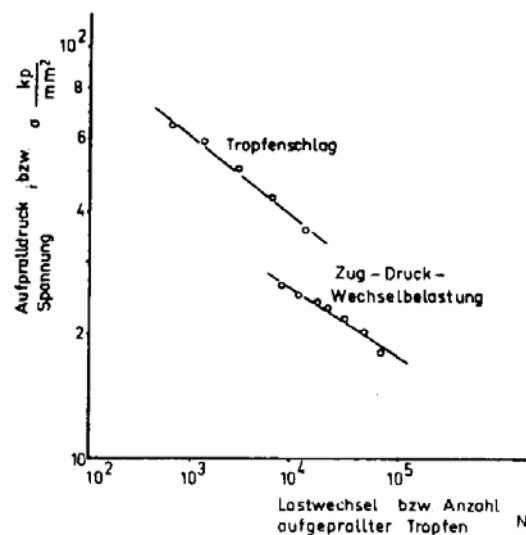


Abbildung 5-3: Wöhlerkurve eines Werkstoffes, ermittelt durch Tropfenschlag und mechanische Lastwechsel

Durch die Einwirkdauer der Wasserstrahlen kann der Umfang der Oberflächenbearbeitung beeinflusst werden. Im Zentrum der Kontaktfläche ist der Druck am größten; dort beginnt der Werkstoff bei hinreichend hohen Drücken sogar zu fließen.

Die zurzeit gängigen Verfahren zur Bearbeitung von Oberflächen mit Hilfe von Hochdruckwasserstrahlen beruhen hauptsächlich auf dem selbsttätigen Zerfallen des Strahles in Tropfen. Verschiedene Methoden einer erzwungenen Zerlegung wurden in der Vergangenheit erprobt und zum Teil auch patentiert, so die Zerlegung mit Hilfe von lokalen Verdampfungen durch Laserstrahlen [DK03] (Abbildung 5-4) oder durch die Durchmischung mit Luft [PM84].

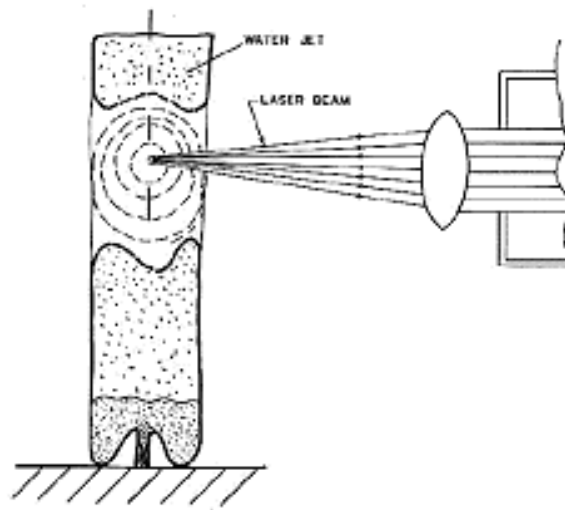


Abbildung 5-4: Beeinflussung der Strahlstruktur durch Laserstrahl nach Mazurkiewicz (1983)

Ein weiteres veröffentlichtes Verfahren ist die lokale Beschleunigung des Wasserstrahles mit Ultraschall [PM84] (Abbildung 5-5).

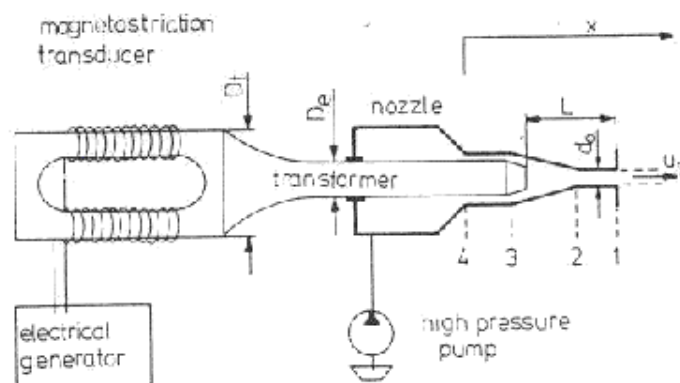


Abbildung 5-5: Ultraschallmodulator nach Puchala und Vijay (1984)

Hochdruckwasserstrahlen werden in der industriellen Anwendung hauptsächlich zur Entgratung von Frästeilen und zur Reinigung von Gussteilen verwendet. Die üblichen Drücke liegen im Bereich von 500 bis 1500 bar, wobei das Druckniveau durch die Bearbeitungsabstände und die Werkstoffeigenschaften vorgegeben ist. Flächige Bearbeitungen sind in der Serienproduktion noch nicht üblich, da die erforderlichen Drücke eine wirtschaftliche Verfahrenstechnik nur in Ausnahmefällen zulassen.

5.1.1. Projektaufbau

Im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderten Vorprojekts wurde eine theoretische und experimentelle Machbarkeitsstudie zur Erzeugung hochenergetischer, pulsierender Wasserstrahlen durchgeführt. Die Pulsation sollte im Gegensatz zu existierenden Verfahren durch eine chemische Reaktion (Verbrennung von Knallgas o. ä.) oder mit einem mechanischen System im Vorlauf der Düse erzeugt werden.

5.1.2. Verlauf des AiF Vorgängerprojekts bis zum Zeitpunkt 1. Januar 2006 in Stichworten:

Energiebilanzen:	Theoretische Ausführung des zu entwickelnden Verfahrens. Erstellung von Energiebilanzen für die Druckwellenerzeugung.
Geometriefestlegung:	Ausgehend von der Energiebetrachtung wurden von beiden Partnern gemeinsam die erste vorläufige Geometrie der Düse und das Verfahren zur Druckerzeugung festgelegt. Aus den Düsenmaßen wurden die Hauptenergieumsätze der Strömung und damit die Anforderungen an die hydraulische Peripherie definiert.
Modellierung:	Die instationäre Modellierung der Strömungsverhältnisse im Vorlauf der Düse wurde mit Hilfe der Simulationswerkzeuge des IAF detailliert durchgeführt. Themenschwerpunkt war die Fokussierung der entstehenden Druckwellen im Bereich der Düsenöffnung, um eine hohe Beschleunigung der Strömung zu erreichen. Parallel zu den Berechnungen wurde auch der erste Versuch an einem einfachen Funktionsmuster durchgeführt.
Konstruktion:	Die Ergebnisse der Modellierung wurden in eine erste Konstruktion für eine Versuchsdüse umgesetzt. Der Hauptanteil der Konstruktionsarbeit wurde von der Firma Piller übernommen. In dieser Zeit wurde im IAF das Simulationsmodell weiterentwickelt.
Erprobung:	Die Erprobung des ersten Funktionsmusters diente der Überprüfung der Energiebilanzen und dem Nachweis der Druckwellenerzeugung.

Anhand der Ergebnisse wurden detaillierte Untersuchungen zur Optimierung der Düsenzuströmung durchgeführt. Während der Berechnungsphase wurden die Grundlagenuntersuchungen zur Erzeugung der Druckwellen mit Hilfe einer Gasexplosion und eines Pendelschlagwerks durchgeführt. Ausgehend davon wurden weitere Messungen durchgeführt, um die maximale Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahles zu erhöhen und die Pulsation in einer vorgesehenen Frequenz zu erzeugen.

Die Untersuchungen zur Optimierung ergaben verschiedene neue Geometrievarianten für die Düse. In der Optimierungsphase wurden die Düsenform und ihr Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad und die maximale Austrittsgeschwindigkeit untersucht. Die Düsenform mit Eintritt wurde damit festgelegt. Die mit diesen Düsen durchgeführten Erprobungen ergaben, dass die festkörpermechanische Erzeugung von Druckwellen stark verschleißbehaftet ist und somit nicht für eine Serienanwendung in der Produktion geeignet ist.

5.1.3. Vergleich zu herkömmlichen Verfahren

Durch den Einsatz von Hochenergielaserstrahlen können Bauteile entgratet werden, die sonst nur mit Hilfe von elektrochemischen Entgratverfahren (Electro Chemical Machining, ECM) bearbeitet werden. In diesem ECM-Verfahren wirkt das Bauteil als Anode und das Werkzeug als Kathode. Der Spalt (0,05mm bis 0,2mm) zwischen dem Werkzeug und dem Bauteil wird von einem Elektrolyten durchströmt. Die Elektrolyte bestehen aus anorganischen Säuren oder Natriumnitrat- bzw. Natriumchlorid-Lösungen. Für die Aufbereitung von ECM-Abwasser muss daher zuerst eine Entgiftung durchgeführt werden, insbesondere auch, da viele Stahl-Legierungen Chrom enthalten. In einem weiteren Schritt müssen die Schwermetalle getrennt werden, die nach der Trennung in der Regel als Schlamm ausfallen. Dieser Schlamm muss anschließend in der Firma gesondert gelagert werden. Es besteht keine Möglichkeit, das entgratete Metall direkt zurück zu gewinnen.

Im Gegensatz zum ECM werden in Hochenergielaserstrahlanlagen keine chemischen Stoffe verwendet. Es wird ausschließlich mit reinem Wasser gearbeitet. Die Wasserkreisläufe in den Anlagen sind in sich geschlossen und das Wasser wird im geschlossenen Kreislauf ständig gefiltert.

Das Filtrat wird zu einem Block zusammengepresst, der aufgrund des verwendeten reinen Wassers sortenrein anfällt. Dadurch ist der Werkstoff ohne weitere Aufbereitung recyclebar. Das Wasser in der Anlage wird kontinuierlich filtriert und kann im geschlossenen Wasserkreislauf weiter verwendet werden. Wird die Anlage für die Bearbeitung eines anderen Werkstoffes umgerüstet, so müssen lediglich die Metallreste im Filter entfernt werden: das Wasser im Kreislauf kann weiterverwendet werden. Muss das Wasser in der Anlage ausgewechselt werden, so kann es problemlos entsorgt werden.

5.1.4. Zusatzstoffe

In herkömmlichen Entgratanlagen (Wasserabrasiventgraten) wird dem Wasser ein Zusatz beigelegt, um den Abtrag zu erhöhen. Diese Zusatzstoffe reichen von Glaskugeln über Keramik und Korund bis hin zu künstlichen Abrasivmitteln. In diesem Verfahren wird das Wasser benutzt, um die Feststoffpartikel zu beschleunigen, die zu einer Mikrozerspannung an der Werkstückoberfläche führen. Die Korngrößen der Partikel liegen im Bereich von 0,1mm bis 0,3mm. Damit befinden sich Partikel unterschiedlicher Größe und chemischer Zusammensetzung im Abwasser, welches die Reinigung des Abwassers zusätzlich erschwert. Die abgetragenen Metallspäne liegen in der Größenordnung von wenigen Mikrometern bis in den Millimeterbereich. Damit befinden sich mindestens zwei unterschiedliche Stoffe mit stark schwankendem Durchmesser im Abwasser, die herausfiltriert werden müssen. Dies bedeutet, dass eine weitere Trennung der Stoffe in mehreren verfahrenstechnischen Schritten durchgeführt werden muss, bevor das Abwasser entsorgt werden kann. Die Metallpartikel müssen vom Strahlmittel getrennt werden, um verwertet werden zu können. Das verbrauchte Strahlmittel bzw. der Strahlsand wird in Form von Schlamm in industriellem Abwasser gesammelt und vom Wasser getrennt. Beide Arbeitsschritte sind wiederum mit einem zusätzlichen Verbrauch von Frischwasser verbunden.

Beim Einsatz von pulsierenden Wasserstrahlen entfallen die gesamten Wasser-Aufbereitungsprozesse, die mit der herkömmlichen Technologie verbunden sind. Das Abfallprodukt fällt sortenrein an und kann gesammelt werden. Es werden keine Zusatzstoffe benötigt und der Gesamtwasserverbrauch der Anlage kann reduziert werden. Die durch die Verwendung von Strahlsand verursachte Menge von Schlamm in industriellem Abwasser kann deutlich reduziert werden.

5.1.5. Funktionsprinzip Piller Entgratanlagen

Eine typische Entgratanlage der Firma Piller hat einen 1000 Liter Wassertank. Der Druck für den Wasserstrahl wird über eine Hochdruckpumpe aufgebaut und durch eine Düse in die Arbeitskammer geleitet, wo die Bearbeitung der Werkstücke stattfindet. Das Strahlwasser aus der Arbeitskammer wird in einem Behälter gesammelt und über eine Förderpumpe durch die Filtrationsanlage zurück in den Wassertank gepumpt. Die Förderpumpe für den Filter ist nicht kontinuierlich im Einsatz, sondern richtet sich nach der Wassermenge im Tank.

Der Wasserverbrauch einer existierenden Anlage ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Wird ein hoher Sauberkeitsgrad des Werkstücks verlangt, so muss eine hohe Wasserqualität vorhanden sein. Dieses wird über entsprechende Filter erreicht. Die Förderpumpen der Filterkreisläufe haben einen Durchsatz von 120 l/min bis 180 l/min und werden über den Volumenstrom und den Differenzdruck vor und nach dem Filter überwacht, so dass eine hohe Prozesssicherheit gewährleistet ist.

Für das Entgraten werden in herkömmlichen Anlagen Drücke bis 1500bar erreicht. Diese sind notwendig, um ein gutes Abtragsergebnis zu erreichen. Durch wechselnden Auf- und Abbau des Drucks im Wasser verdampfen ca. 5% der Wassermenge, die mit Frischwasser nachgefüllt werden müssen. Bei der täglichen durchschnittlichen Betriebszeit von 6 Stunden entspricht dies 50 Liter pro Tag. Werden pulsierende Wasserstrahlen eingesetzt, so reduziert sich der Wasserverlust aufgrund der Zeitersparnis auf 3,3 Liter pro Tag. Für den Betrieb der Anlage mit pulsierenden Wasserstrahlen kann der Arbeitsdruck für die Düse reduziert werden. Dadurch wird weniger Wasser durch die Verdampfung verloren.

Der Wasserverbrauch einer Entgratanlage hängt von folgenden Faktoren ab:

Werkstoff: Das Verhalten der Metallgrate ist vom Werkstoff abhängig. Wird z.B. eine Gusslegierung bearbeitet, so wird bei gleichem Arbeitsdruck ein größerer Volumenstrom benötigt als bei der Bearbeitung von Aluminium.

Bauteil: Ein anderer entscheidender Faktor für den Wasserverbrauch ist das Bauteil selbst. Bei Gussteilen, die im Feingussverfahren hergestellt sind, muss das Entfernen von Resten von Gussand (indem das Wachsmoell eingebettet wird) im Arbeitsablauf berücksichtigt werden. In diesem Fall wird das Bauteil nach der Bearbeitung untersucht und wenn nötig nochmals entgratet.

Geometrie: Die Komplexität der Bauteilgeometrie ist ein weiterer Faktor, der den Wasserverbrauch beeinflusst. In der Regel benötigt ein komplexes Bauteil mehr Wasser um entgratet zu werden, da

während der Bearbeitung zwischen verschiedenen Bearbeitungsgeschwindigkeiten und -drücken gewechselt werden muss.

Das Entgraten von gleichen Bauteilen kann von Teil zu Teil aufgrund unterschiedlicher Gratgeometrien unterschiedlich sein. Dieses führt dazu, dass die Filteranlage, die kontinuierlich überwacht wird, in unregelmäßigen Abständen gereinigt werden muss, um eine gute Wasserqualität zu gewährleisten. Diese Anforderungen werden vom Bedienpersonal bestimmt.

Die Auswirkung der oben genannten Faktoren wurden berücksichtigt, um unterschiedliche Einsatzbereiche dieser Technologie zu erschliessen. Mit den höheren Abtragsleistungen eines pulsierenden Wasserstrahls sind in jedem Fall kürzere Taktzeiten und die damit verbundene Verringerung des Wasserverbrauchs zu erwarten.

5.1.6. Fazit: Stand der Technik

Im Sinne der Nachhaltigkeit kann diese Technologie mit einer großen Anwendungsbreite im Bereich der gesamten Oberflächenbearbeitung von Metallen eingesetzt werden und führt zu einer Verringerung des Wasserverbrauchs und zu einer Vermeidung von Abwasser und Schlamm. Durch die einfache Handhabung der Reststoffe kann diese Technologie den gesamten Aufbereitungsaufwand der Reststoffe reduzieren.

Im Vergleich zu anderen Verfahren können folgende Ziele erreicht werden:

Reduzierung der Schadstoffe (Vergleich ECM, Vermeidung chemischer Abfallstoffe)	100%
------------------------------------------------------------------------------------	------

Reduzierung der Verunreinigung im zu recycelnden Metall (Vergleich Abrasivverfahren, sortenreine Abfallstoffe)	100%
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

Energieersparnis (Vergleich konventionelles Wasserstrahlentgraten)	96%
--------------------------------------------------------------------	-----

Im Rahmen des Projektes sollen theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung von allgemeinen Auslegungsrichtlinien für pulsierende Düsen durchgeführt werden.

Diese Untersuchungen sind sehr zeitaufwendig, da die entsprechenden Strömungssimulationen und auch die experimentellen Nachweise aufgrund der aufwendigen Auswertung der Abtragsergebnisse nicht automatisierbar sind.

5.1.7. Umwelttechnische Aspekte: Bedeutung für die Umwelt

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wäre es möglich, Anwendungsgebiete, die bisher nur mit umweltbelastenden Verfahren bearbeitet werden können, neu zu erschließen, z.B. die Entlackung von Oberflächen. Daraus ergibt sich ein insgesamt hoher volkswirtschaftlicher Nutzen des Verfahrens.

Außerdem kann eine vermarktbare Produktpalette von Düsen und Bearbeitungsmaschinen entwickelt werden, die durch konkurrenzfähige Bearbeitungszeiten eine breite Anwendung dieses umweltfreundlichen Bearbeitungsverfahrens ermöglichen.

Die Vorteile des Verfahrens gegenüber dem Stand der Technik sind durch folgende Merkmale gegeben:

- Das Verfahren verwendet keine chemischen Zusatzstoffe zur Bearbeitung der Oberflächen.
- Das Strahlwasser wird wieder verwendet.
- Durch den Wasserstrahl wird der Oberflächenabtrag im Wasser gebunden, es entstehen somit keine Staubentwicklungen oder sonstige Emissionen.
- Das abgetragene Material fällt sortenrein an, es kann aus dem Strahlwasser herausgefiltert werden.
- Die aufgeraute Oberfläche ist frei von Einlagerungen, wie sie beim Sandstrahlen auftreten.
- Durch den Einsatz von Pulsation wird der Gesamtenergieumsatz der Anlage geringer, der Energieeinsatz erfolgt wirtschaftlicher.

5.2. Theoretische Hintergründe

Fluid Eigenschaften

Viskosität

Viskosität oder Zähigkeit ist der Widerstand, der einer Verschiebung benachbarter Flüssigkeitsschichten entgegengesetzt wird. Die Schubspannung ist proportional zur Viskosität und dem Geschwindigkeitsgradienten des Strömungsprofils quer zur Strömungsrichtung. Daraus bildet sich das Newtonsches Schubspannungsgesetz.

$$\tau = \eta \cdot \frac{d\dot{x}}{dy}$$

Folgende Abbildung 5-6 veranschaulicht das Schubspannungsgesetz.

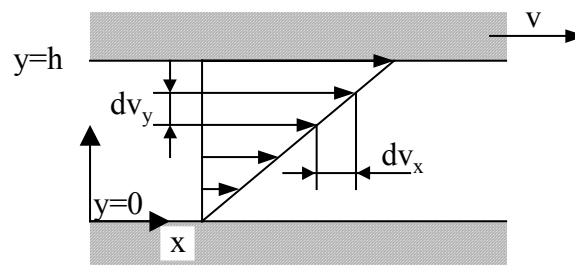


Abbildung 5-6: Viskosität für Newtonsche Flüssigkeiten

Der Proportionalitätsfaktor η wird als dynamische Viskosität benannt. Die Einheit ist $[\text{Ns} / \text{m}^2]$. Wird diese auf die Dichte normiert, so wird sie als kinematische Viskosität ν bezeichnet.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Hohe Viskosität bedeutet hohe Flüssigkeitsreibung (Druckverluste). Wird eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit überschritten, so geht die Strömung vom laminaren in den turbulenten Zustand über. In diesem Bereich treten starke Verwirbelungen auf, die der Flüssigkeit zusätzliche Energie entziehen. Die dimensionslose Reynoldszahl Re ermöglicht Aussagen über den Zustand einer Strömung. Die Re kennzeichnet das Verhältnis der Trägheitskräfte pro Flächeneinheit zu den Zähigkeitskräften pro Flächeneinheit.

$$Re = \frac{\rho \cdot v^2}{\eta \cdot v} = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta} = \frac{v \cdot D_H}{\nu}$$

v ist die Strömungsgeschwindigkeit, ν im Nenner die kinematische Viskosität. Der hydraulische Durchmesser errechnet sich aus dem Strömungsquerschnitt A und dem benetzten Querschnittsumfang U .

$$D_H = \frac{4 \cdot A}{U}$$

Im glatten Rohr erfolgt der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung etwa bei $Re = 2300$. Bei anderen Strömungswiderständen ist es möglich diesen Wechsel bei kleineren Reynoldszahlen zu finden.

Bis zu einer bestimmten Grenzgeschwindigkeit ist der Strömungsverlauf durch ein glattes Rohr (mit Radius r und Länge l) laminar. Das ausbreitende Geschwindigkeitsprofil über dem Rohrquerschnitt lässt sich mit dem Newtonschen Schubspannungsgesetz berechnen. Nach Berücksichtigung der Kräftebilanz und Integration der Gleichung für den Gesamtquerschnitt folgt die Gleichung für den Volumenstrom für laminare Rohrströmungen

$$Q = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot \eta \cdot l} \cdot \Delta p \quad \text{oder} \quad Q = f(p)$$

Das Verhältnis der Druckdifferenz zum Volumenstrom wird als hydraulischen Widerstand bezeichnet.

$$R_H = \frac{\Delta p}{Q}$$

Tait Gleichung

Die Tait Gleichung beschreibt den Zustand von Wasser. Die Beziehung zwischen Druck und Dichte für schwer kompressible Fluide kann damit ausgedrückt werden. Das Medium Wasser für die Simulation wird in der CFD Software ANSYS CFX mit dieser Gleichung definiert.

$$d(p) = \left(\frac{p + B_w}{B_w} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot \rho_0$$

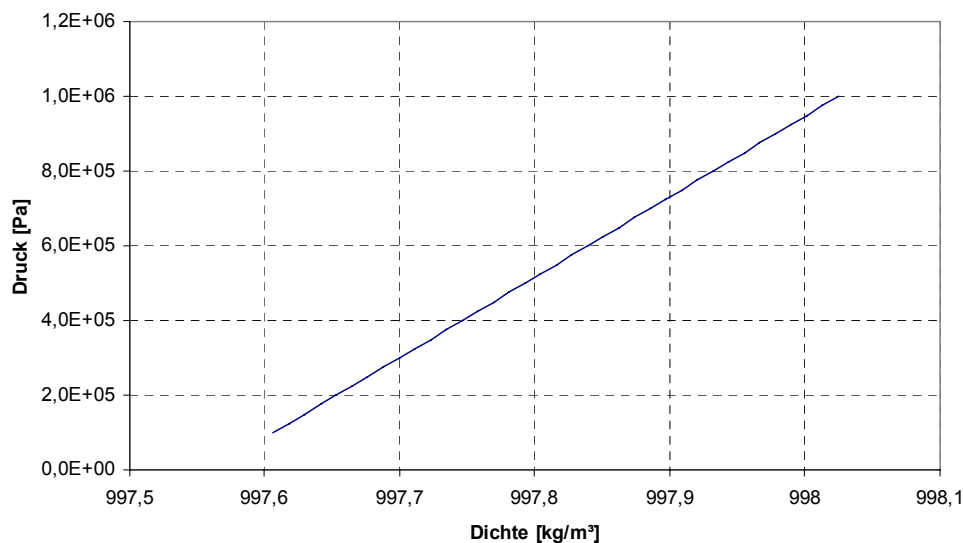


Diagramm 5-1 veranschaulicht das Verhältnis von Druck und Dichte für das Fluid Wasser.

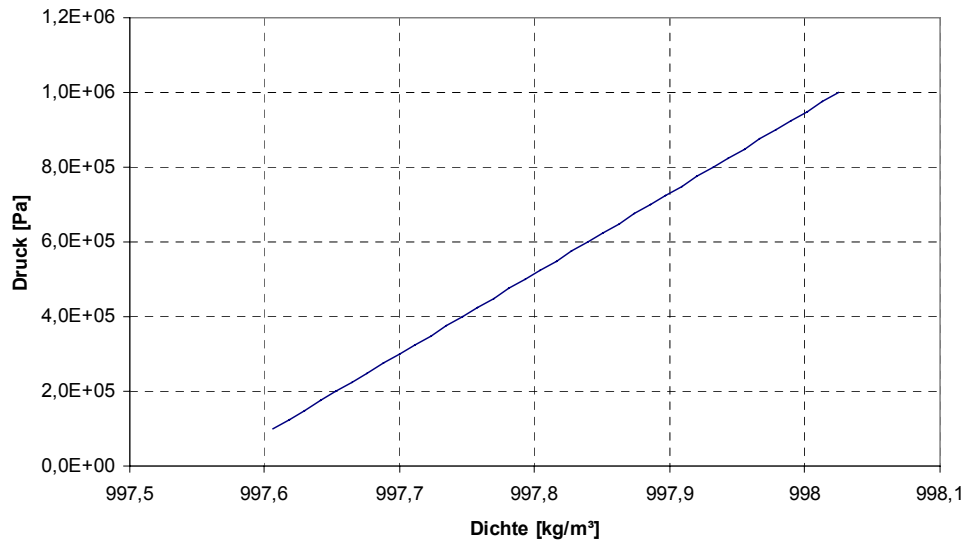


Diagram 5-1: Druck und Dichte von Wasser nach Tait

Kavitation

Nach der Kavitationstheorie von Raleigh ist eine Verdampfung nicht auszuschliessen. Treten hohe Strömungsgeschwindigkeiten auf so sinkt der Druck bis auf den Dampfdruck bei der gegebenen Betriebstemperatur. Es muss aber zwischen gelöster Luft und Kavitationsblasen unterschieden werden. Die für die Kavitationszahl zu berechnende Formel lautet
Geschwindigkeit von der Blasenwand

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot p + 2 \cdot \pi \cdot \rho_0 \cdot v^2 \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot p$$

r = momentaner Blasenradius

R = maximaler Blasenradius

P = statische Druckdifferenz

ρ_0 = Dichte der Flüssigkeit

v = Zentripetalgeschwindigkeit

$E_{pot} + E_{kin} = E_{pot}$ bei maximalen Blasenradius

Die einzelnen Energien errechnen sich aus
potentielle Energie:

$$E_{pot} + E_{kin} = E_{pot}$$

$$E_{pot} = p \cdot V(t) = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot p$$

V(t) = Volumenänderung

kinetische Energie:

$$E_{kin} = 2 \cdot \pi \cdot \rho_0 \cdot v^2 \cdot r^3$$

r(0) = Radius am Anfang einer wachsenden oder implodierenden Blase

$$v = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \right]}$$

Für die Beschleunigung gilt

$$a = \pm \frac{r_0^3 \cdot p}{r^4 \cdot \rho_0}$$

maximaler Blasenradius:

$$R = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p}{\rho_0} \cdot t_u}$$

t_g = Zeit im Unterdruckgebiet

Gesamtimplosionszeit:

$$t_g = 0,915 \cdot R \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{p}}$$

$$t_g \sim R$$

Implosionsdruck:

$$p_i = \rho_0 \cdot c_0 \cdot v = c_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot p_0 \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{R^3}{R_m^3} - 1 \right)}$$

p_0 = Druck in unendlicher Entfernung zur Blase

R = Anfangsradius der Blase

Kavitationsgeräusch in einer Blase

Entstehen Kavitationsgeräusche durch Volumenschwankungen, so können diese als akustische Monopole dargestellt werden. In der Hydroakustik erreichen Monopole den höchsten Geräuschniveau. Daher kann angenommen werden, dass der Wirkungsgrad des abgestrahlten Schalls proportional der Machzahl erster Ordnung ist. Der Zusammenhang ist aus folgender Gleichung ersichtlich.

$$k \cdot r_v = \frac{\omega \cdot r_v}{c_0} = \left(\frac{\omega \cdot r_v}{U_0} \right) \cdot \left(\frac{U_0}{c_0} \right) = \left(\frac{\omega \cdot r_v}{U_0} \right) \cdot M$$

$k \cdot r_v$: dimensionslose Frequenz

$\left(\frac{U_0}{c_0} \right)$: Machzahl

$$\eta_{rad} = k \cdot r_v = \left(\frac{\omega \cdot r_v}{U_0} \right) \cdot M \quad (\text{Monopol})$$

$$\eta_{rad} \sim M$$

Ähnlichkeitsmechanik

Ähnlichkeitsanalyse

Das Grundsätzliche einer Ähnlichkeitsanalyse besteht im wesentlichen darin, einzelne Teilprozesse eines komplexen Prozesses zueinander in ein relatives Verhältnis zu setzen. Dabei werden nicht nur ihre absoluten Größen betrachtet. Alle betroffenen Größen werden zu dimensionslosen Größen reduziert.

Dimensionslose Zahlen für den Impulstransport

Viele vereinfachende Modelle die viele physikalische Prozesse genau beschreiben sind vorhanden. Als Beispiel wird die Navier-Stokes-Gleichung für die Strömung Newton'sche Fluide allgemein anerkannt.

$$\underbrace{\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v}}_{\substack{\text{Im pulsänderung} \\ \text{Trägheitskräfte}}} = \underbrace{\vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{v}}_{\substack{\text{angreifende} \\ \text{Kräfte}}} \left[\frac{N}{kg} = \frac{kg \cdot m}{s^2 \cdot kg} = \frac{m}{s^2} \right]$$

mit $\nabla \equiv \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i}; \frac{\partial}{\partial y} \vec{j}; \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right)$ „Nabla – Operator“

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$: Einheitsvektoren $\vec{i} \equiv (1;0;0)\vec{x}$, $\vec{j} \equiv (0;1;0)\vec{y}$, $\vec{k} \equiv (0;0;1)\vec{z}$

$\Delta \equiv \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}; \frac{\partial^2}{\partial y^2}; \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ „Delta – Operator“ $\Delta \equiv \nabla \cdot \nabla = \nabla^2$

für x-Komponenten (g_x wird zu null falls g nur in z-Richtung wirkt)

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = \bar{g}_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right)$$

Die Kräftebilanz ist eine vektorielle Größe pro Masseneinheit und ist gültig für Newton'sche Fluide: d.h. es besteht eine lineare Beziehung zwischen den Spannungen und Deformationsgeschwindigkeiten.

$$\tau = \eta \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad \text{oder} \quad \tau_{ij} = \eta \nabla v$$

mit isotope Fluideigenschaften und für inkompressible Fluide (nur für Flüssigkeiten wo $\rho = \text{const.}$). Die Terme stellen jeweils eine Kraft dar: Trägheitskraft, Schwerkraft, Druckgradient sowie die viskosen Kräfte.

Für eine Strömung wird die Aufgabe mit charakteristischen Größen beschrieben:

Strömungsgrößen	charakteristische Größen
\vec{v}	v
t	T : Zeitintervall $\frac{1}{f}$: charakter. Frequenz
\vec{g}	g
ρ	ρ
p	p
ν	ν
$\nabla \equiv \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i}; \frac{\partial}{\partial y} \vec{j}; \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right)$	$\frac{1}{L}$
$\Delta \equiv \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}; \frac{\partial^2}{\partial y^2}; \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$	$\frac{1}{L^2}$

Tabelle 5-1: Charakteristische Größen

Wird die charakteristische Geschwindigkeit \bar{v} für eine Rohrströmung mit Querschnittsfläche A gewählt, so kann die mittlere Strömungsgeschwindigkeit wie folgt berechnet werden:

$$v_m \equiv \frac{Q}{A}$$

oder

$$\bar{v} = \left(\frac{\bar{v} \cdot v_m}{v_m} = \frac{\bar{v}}{v_m} \cdot v_m \right) \equiv \bar{v} \bullet v_m$$

mit $\left(\bar{v} \bullet \equiv \frac{\bar{v}}{v_m} \right) [-] = \text{dimensionslos.}$

Werden die Größen dimensionslos in der Navier-Stokes-Gleichung ersetzt, so wird die Gleichung zu:

$$\underbrace{v \cdot f}_{\substack{\text{char.} \\ \text{lokale} \\ \text{Trägheitskraft}}} \frac{\partial \bar{v}^*}{\partial t^*} + \underbrace{\frac{v^2}{L}}_{\substack{\text{char.} \\ \text{konvektive} \\ \text{Trägheitskraft}}} \cdot \bar{v}^* \cdot \nabla^* \cdot \bar{v}^* = \underbrace{g}_{\substack{\text{char.} \\ \text{Schwerkraft}}} \cdot \bar{g}^* - \underbrace{\frac{p}{\rho L}}_{\substack{\text{char.} \\ \text{Druckkraft}}} \cdot \frac{\nabla^* p^*}{\rho^*} + \underbrace{\frac{\nu v}{L^2}}_{\substack{\text{char.} \\ \text{viskose} \\ \text{Kraft}}} \cdot v^* \Delta^* \bar{v}^*$$

Dimensionslose Kräfteverhältnisse die sich auf die konvektive Trägheitskraft beziehen werden durch eine Division durch v^2/L gebildet.

$$\underbrace{\frac{L \cdot f}{v}}_{\substack{\text{Str} \\ \text{Strouhal-Zahl}}} \frac{\partial \bar{v}^*}{\partial t^*} + v^* \cdot \nabla^* \cdot \bar{v}^* = \underbrace{\frac{g \cdot L}{v^2}}_{\substack{\text{Fr}^{-2} \\ \text{Froude-Zahl}}} \bar{g}^* - \underbrace{\frac{p}{\rho v^2}}_{\substack{\text{Eu} \\ \text{Euler-Zahl}}} \cdot \frac{\nabla^* p^*}{\rho^*} + \underbrace{\frac{\nu}{L v}}_{\substack{\text{Re}^{-1} \\ \text{Reynolds-Zahl}}} \cdot v^* \Delta^* \bar{v}^*$$

Werden diese Kennzahlen in die Navier-Stokes Gleichung eingesetzt, so ändert sich diese zu

$$\text{Str} \frac{\partial \bar{v}^*}{\partial t^*} + v^* \cdot \nabla^* \cdot \bar{v}^* = \frac{1}{\text{Fr}^2} \bar{g}^* - \text{Eu} \cdot \frac{\nabla^* p^*}{\rho^*} + \frac{1}{\text{Re}} v^* \Delta^* \bar{v}^*$$

Bei konstanter Dichte, Viskosität und Gravitationsfeld ($\rho^* = 1$, $\nu^* = 1$, $g^* = 1$) wird die Gleichung vereinfacht.

$$\text{Str} \frac{\partial \bar{v}^*}{\partial t^*} + v^* \cdot \nabla^* \cdot \bar{v}^* = \frac{1}{\text{Fr}^2} \bar{z} - \text{Eu} \cdot \bar{v}^* p^* + \frac{1}{\text{Re}} \Delta^* \bar{v}^*$$

Dimensionslose Zahlen

Folgende Kräfteverhältnisse werden von dimensionslosen Kennzahlen repräsentiert.

Reynolds Zahl:

$$\text{Re} = \frac{vL}{\nu} \left[\frac{m}{s} \frac{m}{m^2} \frac{s}{m^2} \right] = [-] \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{viskose Kräfte}}$$

Froude Zahl:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \left[\frac{m \cdot s}{s \cdot \frac{1}{m^2} \cdot \frac{1}{m^2}} \right] = [-] \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Schwerkraft}}$$

Euler Zahl:

$$Eu = \frac{p}{\rho v^2} \left[\frac{kg \cdot m \cdot m^3 \cdot s^2}{s^2 \cdot m^2 \cdot kg \cdot m^2} \right] = [-] \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Druckkräfte}}$$

Strouhal Zahl:

$$Str = \frac{Lf}{v} \left[\frac{m \cdot s}{s \cdot m} \right] = [-] \frac{\text{lokale Trägheitskräfte}}{\text{konvektive Trägheitskräfte}}$$

Mach Zahl:

$$Ma = \frac{v}{\sqrt{\kappa \frac{E}{\rho}}} \left[\frac{m \left(\frac{m \cdot s^2 \cdot kg}{kg \cdot m^3} \right)^{\frac{1}{2}}}{s} \right] = [-] \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Elastizitätskräfte}}$$

Weber Zahl:

$$We = \frac{v}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho L}}} \left[\frac{m \left(\frac{s^2 \cdot kg \cdot m}{kg \cdot m^3} \right)^{\frac{1}{2}}}{s} \right] = [-] \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Kapillarkräfte}}$$

Dimensionen von mechanischen Größen werden über die Basis Einheiten Länge L, Masse M, Zeit T und Kraft ausgedrückt (in SI Einheiten m, kg, s, N).

$$F = M \frac{L}{T^2} \left[N = \frac{kg \cdot m}{s^2} \right]$$

Für den Volumenstrom ergeben sich

$$Q = \frac{L^3}{T} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Bedingung für die Dimensionsanalyse ist das es eine geometrische, kinematische sowohl eine dynamische Ähnlichkeit zwischen dem Modell und das Original besteht. (Indizes O = Original, M = Modell)

Geometrische Ähnlichkeit

Länge:

$$\frac{L_O}{L_M} = L_r$$

Fläche:

$$\frac{A_O}{A_M} = \frac{L_O^2}{L_M^2} = L_r^2$$

Volumen:

$$\frac{V_O}{V_M} = \frac{L_O^3}{L_M^3} = L_r^3$$

Kinematische Ähnlichkeit

Zeit:

$$\frac{T_O}{T_M} = T_r$$

Geschwindigkeit:

$$v_r = \frac{v_O}{v_M} = \frac{L_O}{L_M} \frac{T_M}{T_O} \frac{v_O}{v_M} = \frac{L_r}{T_r}$$

Beschleunigung:

$$a_r = \frac{a_O}{a_M} = \frac{L_O}{L_M} \frac{T_M^2}{T_O^2} = \frac{L_r}{T_r^2}$$

Dynamische Ähnlichkeit

Kraft

$$\frac{F_O}{F_M} = F_r$$

5.3. Modellierung im Flachwasserkanal

In einem ersten Projekt konnte durch das Institut für Angewandte Forschung der Hochschule Esslingen ein Simulationsmodell erstellt werden, welches die Formgebung der Düse optimierte. Hierbei wurde die Form des Einlass der zum engsten Querschnitt der Düse führt festgelegt. Die Konstruktion einer Geometrie zur Erzeugung von Druckschwankungen soll an erster Stelle untersucht werden.

Das Projekt geht hinsichtlich der Erzeugung der Pulsation über den Stand der Technik hinaus. Konventionelle Methoden verwenden zum Beispiel Blenden, um eine Pulsation im austretenden Strahl zu erzeugen. Die Idee der Erzeugung der Druckwellen über eine mechanische Einrichtung im Vorlauf der Düse wurde fallengelassen. Anstelle von mechanischen Einrichtungen (Kolben) und aufgrund der zu erwartenden Reibungsverluste in Dichtungen wird die Pulsation im Strahl nun über Resonanzkammern in der Düse erzeugt. Ein Düsenmodell wurde dazu im Flachwasserkanal aufgebaut, welches schrittweise mit verschiedenen Resonanzkammern versehen wurde. Die Resonanzkammer-Anordnung der ersten Variante im Flachwasserkanal ist in folgender Abbildung 5-7 dargestellt.

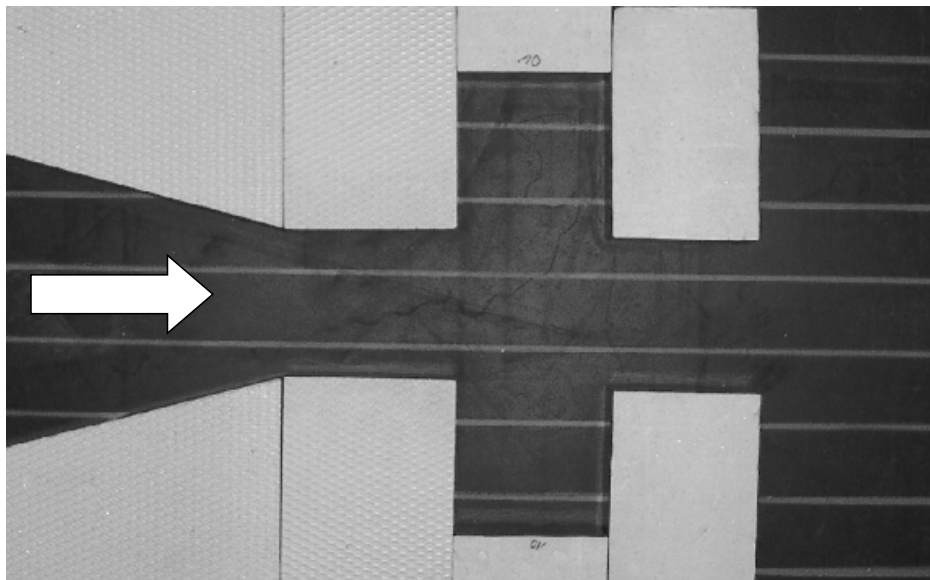


Abbildung 5-7: Resonanzkammern am Düsenmodell

In Zusammenarbeit zwischen dem Antragsteller und der Hochschule wurde ein Prüfstand aufgebaut, der die Erzeugung von Druckwellen in der Düse experimentell untersucht. Düsenvarianten, die auf der Simulationsoptimierung basieren, werden dort praktisch untersucht, um eine Auslegung für unterschiedliche Werkstoffe und Geometrien zu ermöglichen. In einem weiteren Schritt sollen diese Erkenntnisse zur Konstruktion einer kompletten Anlage führen, die zur Bearbeitung unterschiedlicher Werkstoffe geeignet ist.

Für Modellversuche im Flachwasserkanal wurde ein Düsenmodell mit zwei Resonanzkammern im engsten Querschnitt aufgebaut (Abbildung 5-8). Die Modellierung im Flachwasserkanal hat den Vorteil, daß in sehr kurzer Zeit viele Varianten einer Grundgeometrie vergleichend untersucht werden können.

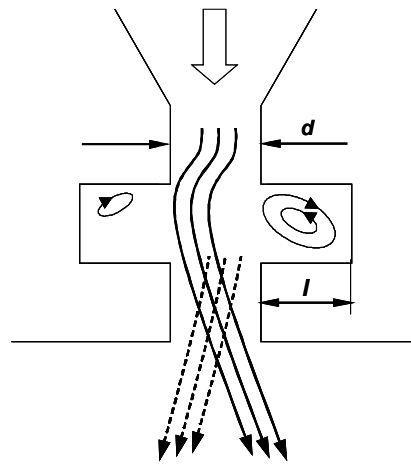


Abbildung 5-8: Resonanzkammern am Modell

Berechnung

Die Untersuchungen im Flachwasserkanal bezogen sich auf eine Düse mit einem Durchmesser von 1 mm. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Düse bei einem Arbeitsdruck von z.B. 100bar wird mit folgender Gleichung berechnet.

$$u_{H_2O} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

Strömungsgeschwindigkeit
mit:

$$u_{H_2O} = 142 \text{ m/s}$$

Dichte von Wasser bei 293K

$$\rho_{H_2O} = 988,2 \text{ kg/m}^3$$

Die Mach-Zahl Ma_O in der Düse wird aus der Strömungs- und Schallgeschwindigkeit von Wasser berechnet.

$$Ma_O = \frac{u_{H_2O}}{a_{H_2O}} = 0,11$$

Machzahl, Original
mit:

Schallgeschwindigkeit in Wasser

$$a_{H_2O} = 1200 \text{ m/s}$$

Reynoldszahl, Original:

$$Re_O \approx 1,4 \cdot 10^5$$

Die Reynold'sche Ähnlichkeit verlangt

$$Re_O \approx Re_M$$

oder

$$u_O \cdot D_O = u_M \cdot D_M$$

Im vorliegenden offenen Gerinne des Flachwassermodelles ist maximale Strömungsgeschwindigkeit

$$u_{M,\max} = 0,1 \text{ m/s}$$

Daraus ergibt sich der Durchmesser im Modell

$$D_M = 1,4 \text{ m}$$

Da die Strömung in der Düse vollturbulent ist, kann die Reynoldszahl für das Modell ohne Gefährdung der Ähnlichkeit um den Faktor 10 reduziert werden. Somit verkleinert sich der Modelldurchmesser entsprechend.

mit $Re_M \approx 1,4 \cdot 10^4$
 Durchmesser, Modell $D_M = 0,14m$

Die aus diesen Versuchen ermittelten Geometrien mit optimaler Strahlbeeinflussung wurden dann in der CFD-Simulation näher untersucht. Die seitlich an der Austrittsbohrung angeordneten Kammern wirken als Helmholtz-Resonatoren, zwischen denen eine Druckwelle pendelt. Die Druckschwankungen in den Kammern führen zu einer Pulsation des Drucks am Austritt, die mit einer seitlichen Strahlschwankung verbunden ist.

Eine Parameterstudie zeigte, dass die Kammergeometrie einen direkten Einfluß auf das Schwingungsverhalten des Strahles hat. Es wurden unterschiedliche Geometrie-Änderungen experimentell durchgeführt. Die wichtigsten Maße sind die Kammertiefe l und der engste Querschnitt der Düse d . Diagramm 5-1 zeigt die gemessenen Druckverläufe für unterschiedliche Verhältnisse l/d . Die größten Schwingungsamplituden im Strahlaustritt erreichen ihren maximalen Wert bei einem Durchmesser Verhältnis $l/d = 1$.

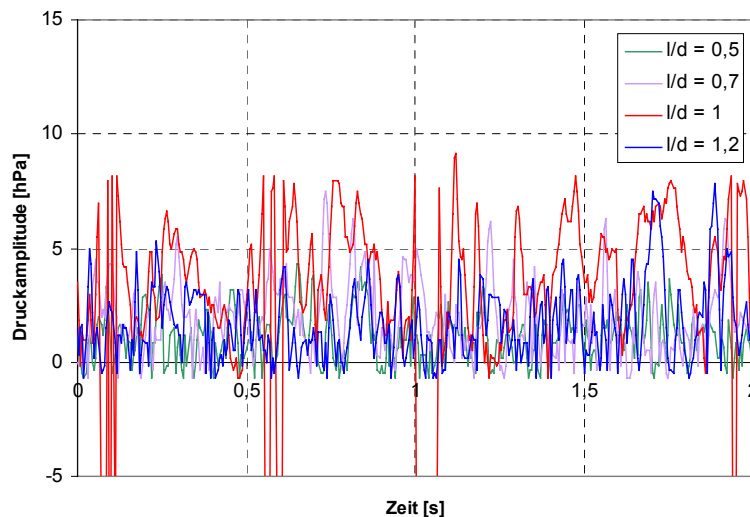


Diagramm 5-1: Schwingungsamplituden

Um diese Resonanz so zu verstärken, daß der Wasserstrahl in Abschnitte zerlegt wird, wurde ein zweites Kammerpaar im engsten Querschnitt angebracht. Unterschiedliche Kammergeometrien wurden am Modell im Flachwasserkanal und in der Simulation untersucht. Zur genauen Modellierung der auftretenden Resonanzschwingungen wurden sehr kleine Zeitschritte in einer transienten Berechnung simuliert. Dies führt zu einem hohen Rechenaufwand (Simulationszeit $\approx 20h$) und großen Datenmengen. Aus diesem Grund werden Teile der Parameterstudie experimentell durchgeführt, um eine schnelle Eingrenzung zu ermöglichen.

Ziel ist eine möglichst schmalbandige Oszillation des Druckes, um die hydraulische Energie zeitlich in Einzelimpulsen zu konzentrieren.

5.4. Cad – Simulationsmodell mit der Software SolidWorks

Es wurde nur ein Halbmodell aufgebaut. Im Simulationsmodell wurde die Schnittebene als Symmetrieebene definiert. Die Modelle wurden mit der CAD-Software SolidWorks erstellt (Abbildung 5-9).

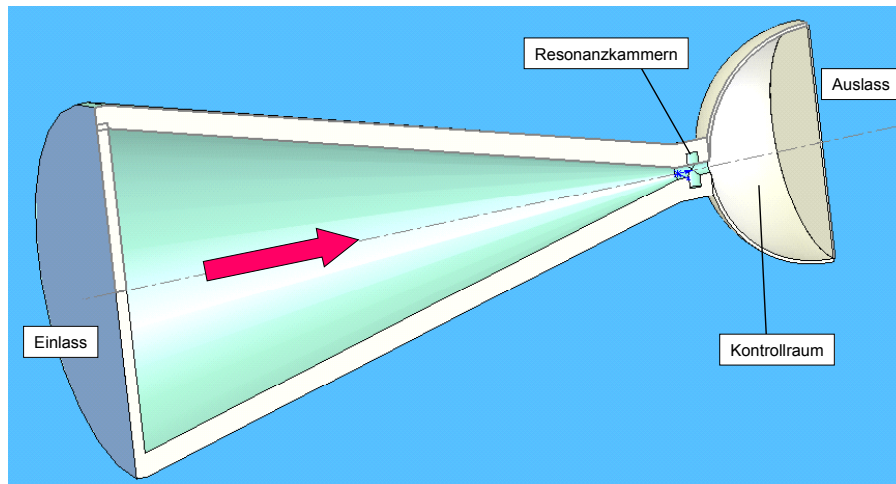


Abbildung 5-9: CAD-Halbmodell der Düse

Die Innenkontur des Düsenmodells wurde mit der Software ICEM CFD der Firma ANSYS Inc. vernetzt. Nach der Aufteilung des Modells in Blöcke („Blocking“) kann die eigentliche Vernetzung mit hexaeder-förmigen Zellen durchgeführt werden. Die Simulationen werden mit der Software CFX 10.0 der Firma ANSYS Inc. durchgeführt.

Die Ergebnisse der transienten Rechnung zeigen eine Druckschwankung im Strahl. In der folgenden Abbildung 5-10 werden Drücke für sechs Zeitschritte dargestellt. In der linken Spalte ist ein Wandern eines Gebiets mit einem höheren Druck im Kontrollraum erkennbar. Die räumliche Darstellung der Ergebnisse der transienten Rechnung ist in der rechten Spalte zu sehen. Sie zeigt die Ausbreitung der Druckwelle im Kontrollraum. Auch hier ist eine Pulsation im Strahl erkennbar.

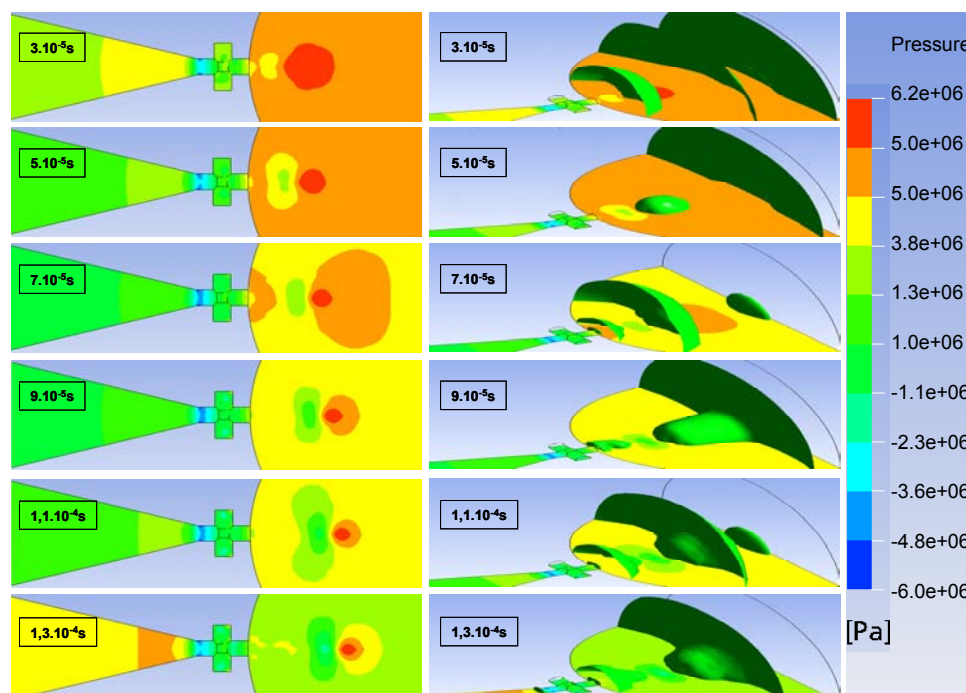


Abbildung 5-10: Druckverlauf in der transienten Simulation

Das folgende Diagramm 5-1 zeigt den Druckverlauf für den Zeitabschnitt 0,0 bis 0,0002s der Simulation. Als Randbedingung für den Druck am Auslass wurde ein statischer Druck von einem bar angegeben. Aufgrund dieser vereinfachten Definition am Auslass der Düse im CFX Simulationsmodell erscheinen negative Werte für den Druck d.h. der Druck schwankt um den Referenzdruck, der in der Simulation zu Null gesetzt wird. Dieser Druckverlauf dient als Basis für weitere qualitative Untersuchungen der Pulsation, erzeugt durch Resonanzkammern in der Düse.

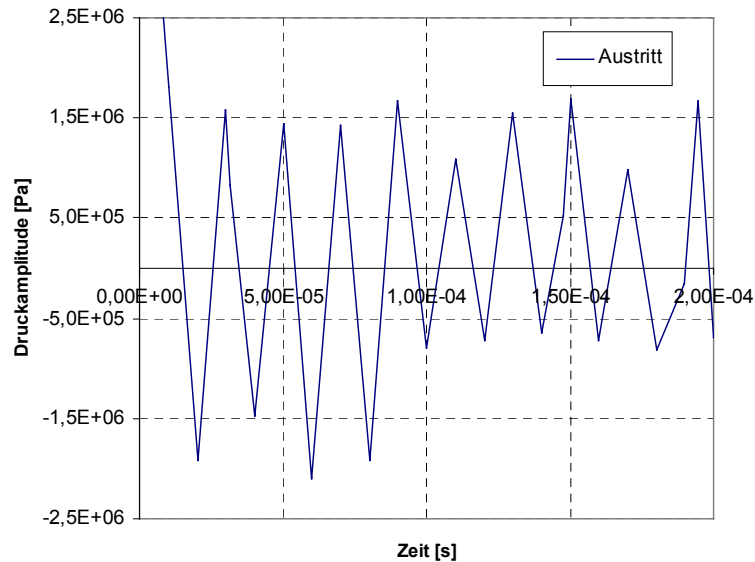


Diagramm 5-1: Druckverlauf der transienten Simulation

In einem weiteren Schritt wurde das Modell im Flachwasserkanal mit einer zweiten Resonanzkammer versehen, um die von der ersten Kammer erzeugten Resonanzeffekte (Druckschwankungen) zu verstärken. Durch Parameteruntersuchungen im Flachwassermodell konnte eine Geometrie für die zweite Resonanzkammer festgelegt werden.

Aufgrund der Symmetrie der Düse wurde nur eine Hälfte in SolidWorks modelliert und für die Simulation verwendet. Abbildung 5-11 zeigt eine Detailansicht der Geometrie mit zwei Resonanzkammerpaaren.

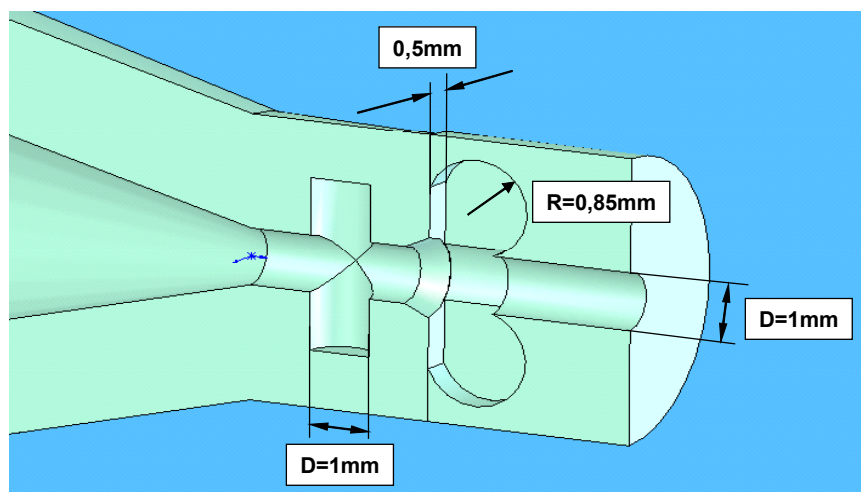


Abbildung 5-11: SolidWorks-Modell der Düse mit zwei Kammern

Diagramm 5-2 zeigt den Druckverlauf am Austritt der in Abbildung 5-11 dargestellten Düse. Die Größe der Zeitschritte für die Simulation beträgt $5,10^{-5}$ s, um die Pulsationen im Strahl zeitlich auflösen zu können.

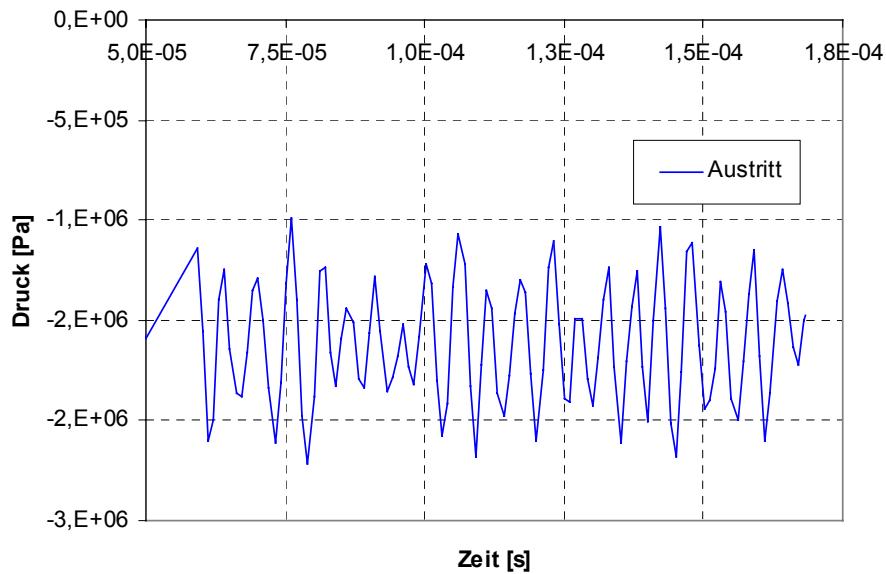


Diagramm 5-2: Druckverlauf am Austritt der Düse

Der Druck am Austritt wurde mit einer Fourier-Transformation analysiert, um die Frequenzen der Druckschwankungen zu berechnen. Die Simulation am Zwei-Kammer Modell zeigt eine Resonanzfrequenz im Bereich von 18kHz (Diagramm 5-3).

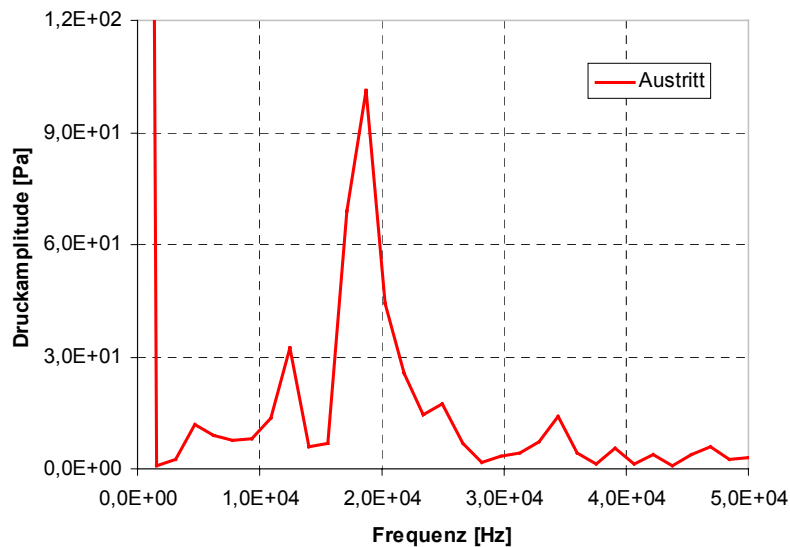


Diagramm 5-3: FFT des Druckverlaufs

In einem weiteren Schritt wurde die Düsengeometrie modifiziert. In Anlehnung an die fertigungstechnischen Möglichkeiten wurde ein ebenes Simulationsmodell verwendet. Daraus entstand die Düse als „Scheibe“ (Abbildung 5-12). Eine ausführliche Beschreibung der Konstruktion folgt im Kapitel Abtragsversuch.

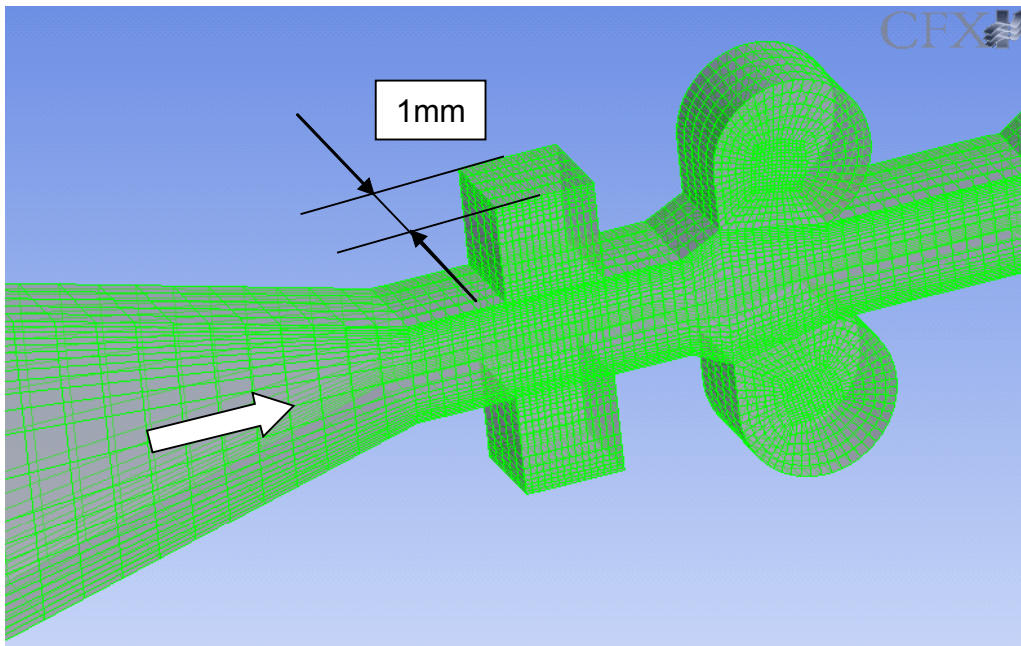


Abbildung 5-12: Vernetztes Modell der 2D-Düse

Simulationen mit der neuen Ausführung der Düse zeigen eine deutliche Pulsation im Strahl. Diagramm: 5-4 zeigt den Druckverlauf am Austritt der Düse. Der Druckverlauf von 0,011s bis 0,0125s zeigt deutlich geringere Oberschwingungen als bei Zeiten $t > 0,0125$ s, da sich der Druck in der Simulation stufenartig verändert. Dadurch können in einem Simulationdurchgang mehrere Drücke simuliert werden.

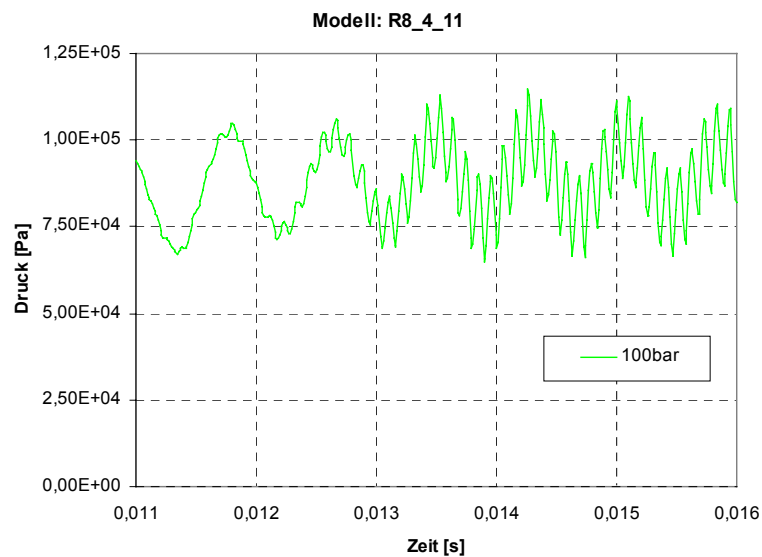


Diagramm: 5-4: Druckverlauf

Die Fourieranalyse des Druckverlaufs der Düse für unterschiedliche Arbeitsdrücke sind in Diagramm 5-5 aufgetragen.

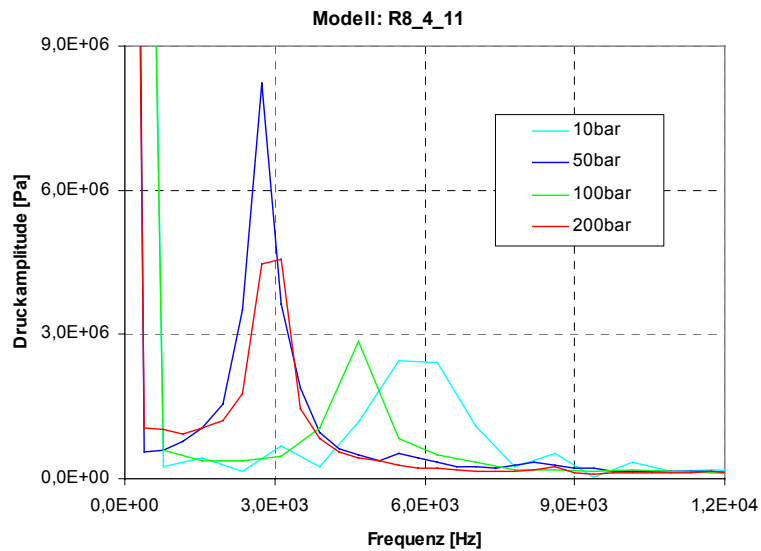


Diagramm 5-5: FFT

Weitere Simulationen wurden im IAF durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen der Pulsationsfrequenz und der Kammergeometrie weiter zu untersuchen. Parallel dazu wurden Einbaumöglichkeiten in Entgratanlagen der Firma Piller untersucht.

5.5. Abtragsversuch

Die Versuchsdüsen bestehen aus mehreren Teilen. Die Innenkontur der Düse wird aus einem 1,5mm dicken Stahlblech erodiert, welches zwischen zwei Metallplatten eingespannt und verschraubt wird. Anders als bei einem rotierenden Herstellungsprozess (bohren, drehen) kann die Düse Hinterschnitte in der Innenkontur besitzen. Abbildung 5-13 zeigt die zwei Hälften des Gehäuses. Im linken Bild ist die Strömungsrichtung angedeutet. Die inneren Konturen im Stahlblech sind erkennbar. Die zwei Aussparungen am Austritt (roter Kreis) bilden die Kammern, in denen die gewünschten Resonanzeffekte auftreten.

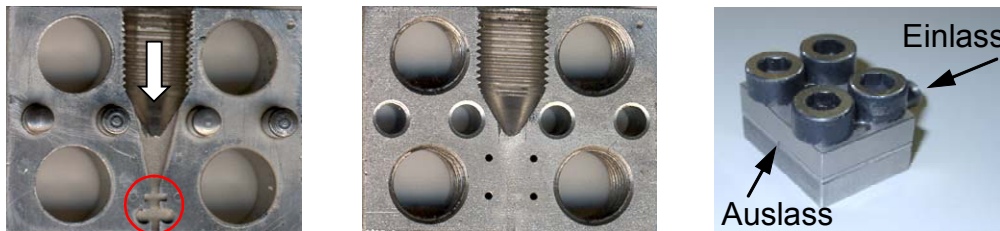


Abbildung 5-13: Mehrteilige Düse

Der modulare Aufbau der Düse ermöglicht ein Auswechseln der Innengeometrie für weitere Versuche. Für den Druckanschluss der Anlage ist ein Gewinde am Einlass vorhanden.

Die Düse wird an einem Wasseranschluss angeschlossen und der Wasserhahn aufgedreht. Bei geringem Druck tropft das Wasser aus der Düse heraus. Wird der Druck erhöht, so bildet sich eine Pulsation im Strahl aus. Abbildung 5-14 zeigt die Pulsation im Strahl. Diese Pulsation findet in der Kammerebene statt, sodass sich eine seitliche Aufweitung (Oszillation) des Strahles ergibt.

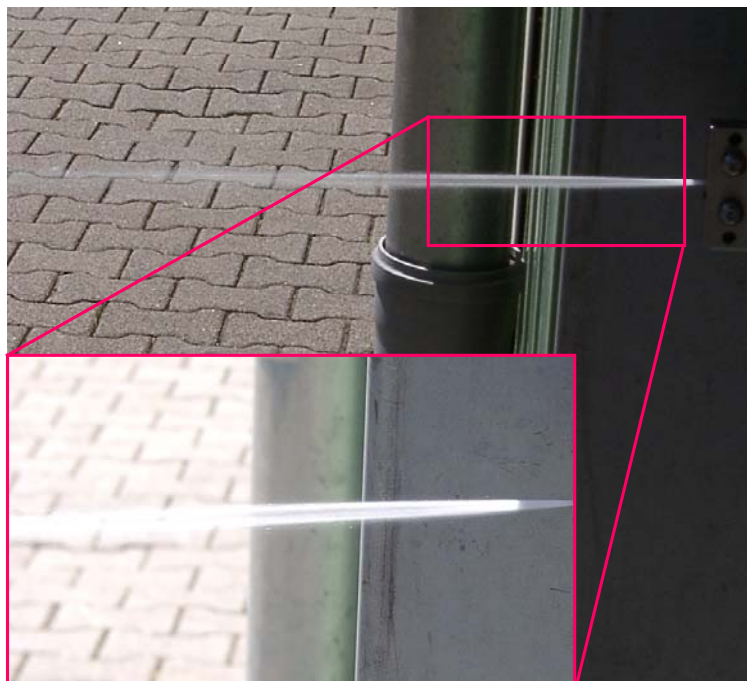


Abbildung 5-14: Pulsierender Strahl

Bei dem Abtragsversuch wurden drei Varianten der Düse mit unterschiedlichen Innenkonturen verglichen. Es wurden nur die Radien der beiden runden Kammern verändert. Diese Ergebnisse wurden mit dem Abtrag einer Rundstrahldüse mit Durchmesser $D = 1,4\text{mm}$ verglichen. Abbildung

5-15 zeigt die Unterschiede in der Geometrie der Versuchsdüsen in der Resonanzebene. Für den Versuch werden die Düsen als Variante I ($R = 0,7\text{mm}$), Variante II ($R = 0,8\text{mm}$) und Variante III ($R = 1,0\text{mm}$) bezeichnet.

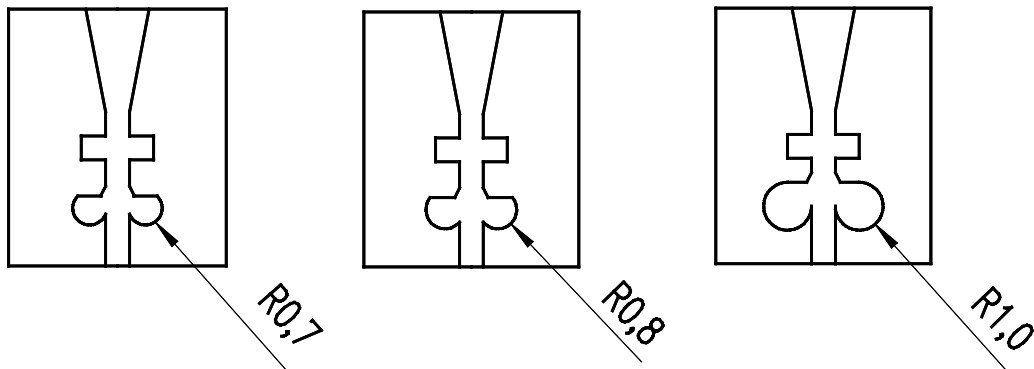


Abbildung 5-15: Düsenvarianten I, II, III

Als Prüfobjekt wurde ein Aluminiumblock verwendet. Dieser wurde in einer Vorrichtung so montiert, dass die vier Versuche nebeneinander gefahren werden konnten, ohne das Prüfobjekt umspannen zu müssen. Der Wasserstrahl wurde mit einem Betriebsdruck von 500bar bei einem Abstand von 30mm auf das Prüfobjekt gerichtet. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit wurde mittels eines NC-Programms linear variiert. Die Gesamtstrecke betrug 150mm. Der Vorschub begann mit 200mm/min und endete mit 1mm/min. Die eingestellten Werte sind Erfahrungswerte der Firma Piller.

Die „Resonanzebene“ des Wasserstrahles liegt quer zur Vorschubrichtung. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5-16 schematisch dargestellt. Die Düse fährt mit vorgegebener Vorschubgeschwindigkeit von links nach rechts, wobei die Vorschubgeschwindigkeit abnimmt.

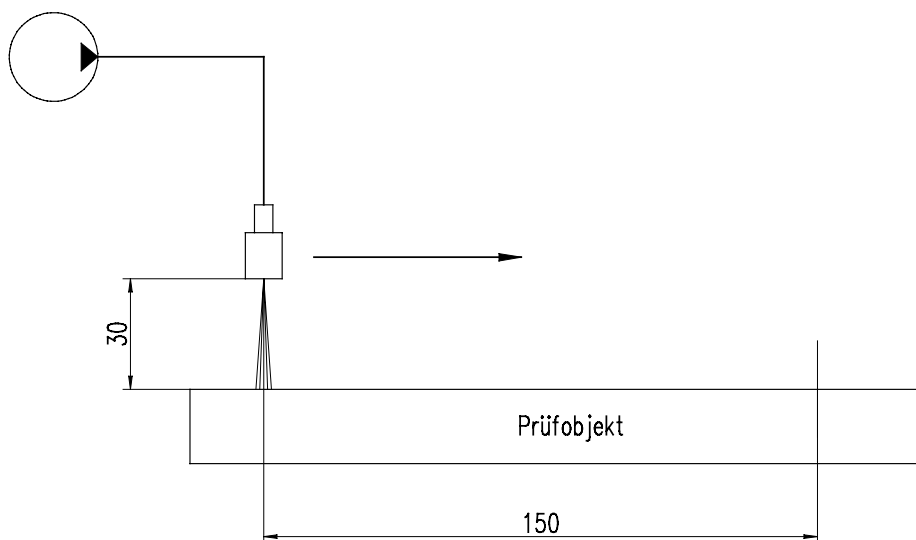


Abbildung 5-16: Versuchsaufbau

Ergebnisse und Auswertung

In Abbildung 5-17 sind die vier Abtrags-Bahnen am Prüfobjekt sichtbar. Am Ende, wo die Vorschubgeschwindigkeit stark verringert ist, werden die Abtragungen im Metall stärker. Die Düsenvarianten I und II zeigen ein deutlich größeres Abtragsvolumen als die Runddüse N und die Düse III. Bei Düse II beginnt der Materialabtrag deutlich früher als bei der Runddüse. Die Kammern der Düse III haben den größten Radius, was sich in diesem Versuchsfall als ungünstig erweist.

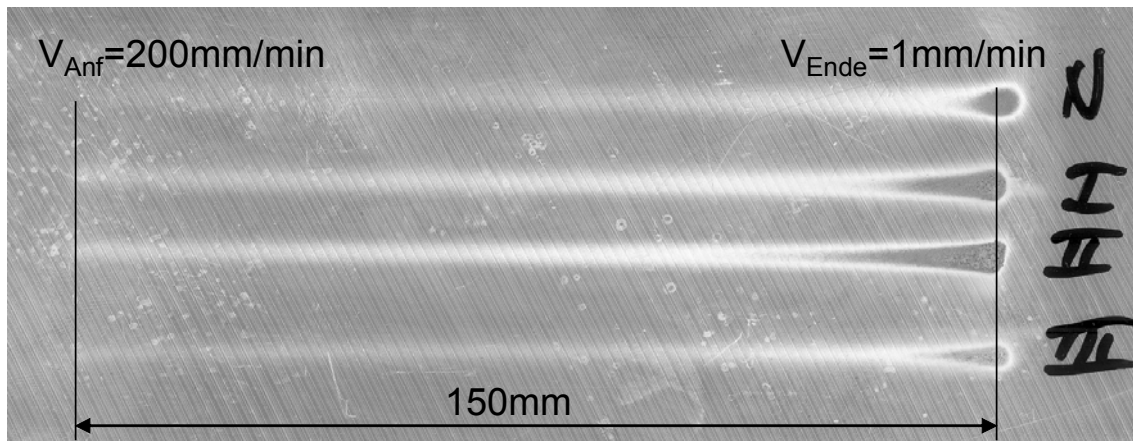


Abbildung 5-17: Prüfobjekt

Um die Wirkung der Düse quantitativ zu beurteilen, wurde die Werkstückoberfläche mit Hilfe eines Laserstrahls dreidimensional vermessen, um das Volumen des abgetragenen Aluminiums zu ermitteln. Damit konnte die Masse des abgetragenen Materials bestimmt werden. Da die Tiefe der Abtragungen zum Teil sehr gering ist, ergibt sich eine verfahrensbedingte Grenze für die noch erfassbare Abtragung. Die so ermittelte Oberflächenkontur wird über ein Auswerteprogramm in Dreiecke so aufgeteilt, dass die Konturen der Abtragsbahnen nachgebildet werden.

Diese so ermittelten Flächen sind in Abbildung 5-18 dargestellt. Da Düse III das kleinste Abtragsvolumen hat, dient diese in der folgenden Berechnung als Referenz. Die Oberfläche in der Bahn der Düse N zeigt keinen messbaren Abtrag und wird daher nicht berücksichtigt.

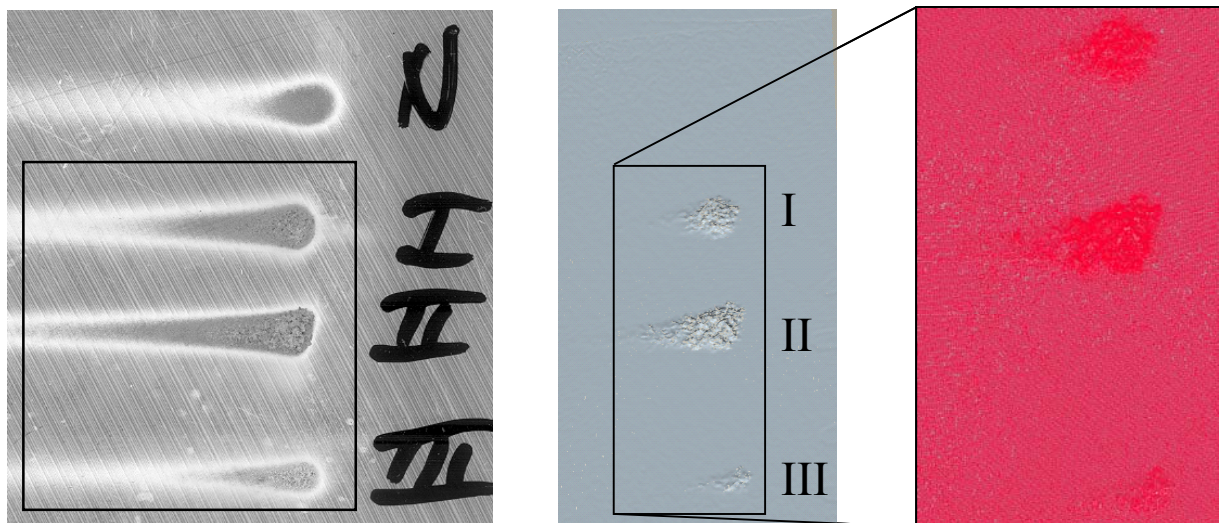


Abbildung 5-18: Auswertung

Abbildung 5-19 zeigt das Vorgehen zur Vermessung der Kontur II. Die gemessene Oberfläche wird in die Software ProEngineer importiert, wo eine Ebene in einem bestimmten Abstand zur Messebene (hier 2mm) gelegt wird. Diese ist notwendig, da die Tiefe der Abtragung bei Düse III sehr gering ist. Der Umriss der Kontur wird definiert und anschließend wird ein Volumenkörper mit diesem Umriss zwischen der Ebene und der Oberfläche erzeugt.

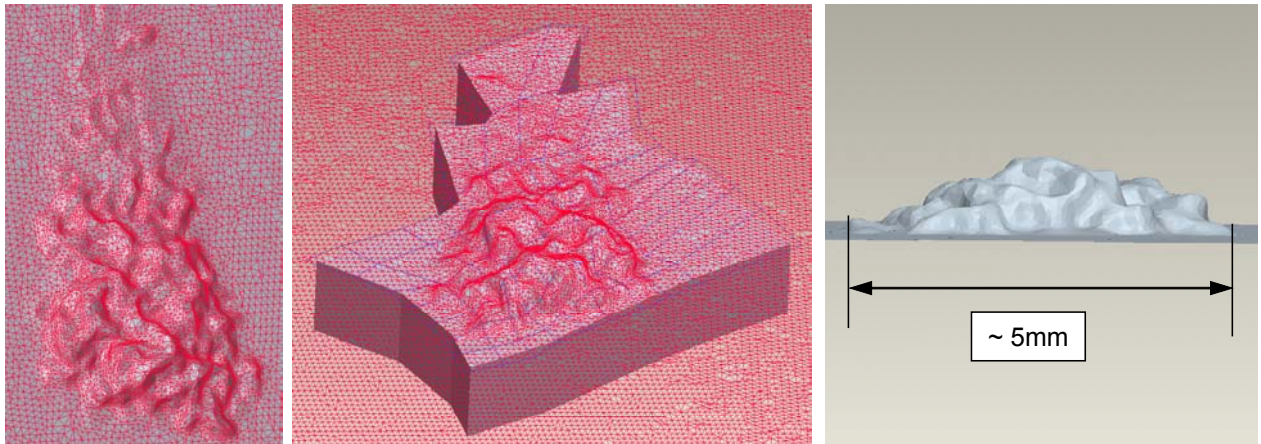


Abbildung 5-19: Abtragkontur, Düse II

Die Flächengröße des Umrisses und das Gesamtvolumen des Körpers werden von ProEngineer angegeben. Wird das Volumen des Sockels vom Gesamtvolumen abgezogen, kann so das abgetragene Volumen berechnet werden.

Abbildung 5-20 zeigt den Körper, der durch den Strahl der Düse III erzeugt wurde. Es sind kaum Konturen zu erkennen und das berechnete abgetragene Volumen beträgt $0,3232\text{mm}^3$.

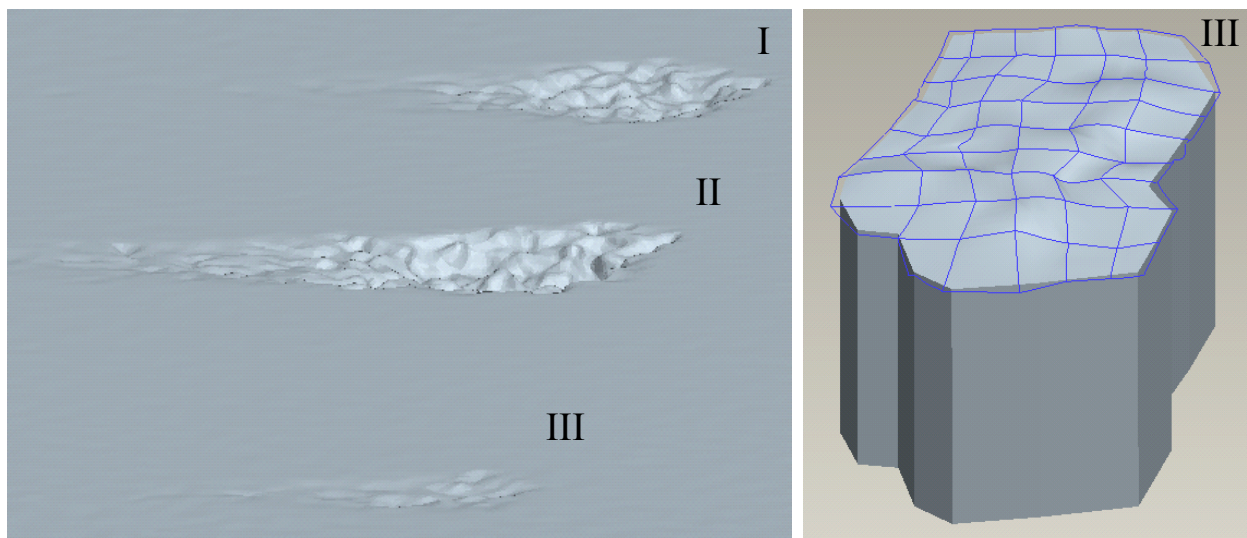


Abbildung 5-20: Abtragsvolumen, Düse III

Die Abtragsvolumina von Düse I und Düse II werden über das Abtragsvolumen der Düse III normiert, da Düse III das geringste Abtragsvolumen hat. Die Werte sind in Tabelle 5-2 eingetragen. Durch die Auswertung der Messungen wird deutlich, dass die Düse II das größte Abtragsvolumen im Vergleich zur Düse III aufweist.

Düse	Volumen [mm^3]	Volumenverhältnis I/N
I	2,99403	9,3
II	8,62213	26,7
III	0,3232	1

Tabelle 5-2: Normierter Flächenabtrag

Alle Volumina wurden in der gleichen Zeit bearbeitet. Nimmt man das abgetragene Volumen als Maß für die physikalisch verrichtete Arbeit, so ergibt sich für den pulsierenden Strahl aus der Düse II eine um den Faktor 26 größere Abtragsleistung.

Diese Versuchsreihe zeigt, dass über die Änderung der Düsengeometrie erhebliche Änderungen in der Abtragsleistung erreicht werden können. Eine Gegenüberstellung der jeweils aufgewendeten hydraulischen Leistung der der damit verbundenen Energie zeigt das Einsparpotential.

Die Vorschubgeschwindigkeit wurde in allen Versuchen gleich variiert, also zwischen 200 mm/min und 1 mm/min. Die Volumenströme und die Drücke waren in allen Fällen gleich, so dass alle Düsen mit der gleichen Leistung betrieben wurden. Die Leistungsersparnis lässt sich somit durch den Vergleich der abgetragenen Volumina ermitteln.

Bei einem Druck von 500 bar und einem Düsenaustrittsquerschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$ ergibt sich ein Volumenstrom von 28,5 l/min. Dies entspricht einer hydraulischen Leistung von 23,7 kW.

Aus der Gegenüberstellung der Messungen ergibt sich, dass im Vergleich zur Ausgangsgeometrie (Variante II) das gleiche Bearbeitungsergebnis mit $1/26,7$ entsprechend 3,78 % der insgesamt aufgewendeten Energie erreicht werden kann. Die verwendete hydraulische Anlage hat eine Nennleistung von 43 kW. Setzt man die erreichbare Energieersparnis entsprechen den Versuchsergebnissen an, so ergibt sich bei einer durchschnittlichen Betriebszeit von 6 Stunden täglich pro Arbeitstag eine Ersparnis in der Bearbeitungszeit von ca. 5,6 Stunden. Die mit dieser Zeitersparnis verbundene Energieersparnis beträgt rechnerisch 248 kWh pro Tag. Der reale Fertigungsprozess wird diese Steigerung der Bearbeitungsgeschwindigkeit nur durch eine Anpassung der Verkettung innerhalb der Produktion ausnützen können. Das Rechenbeispiel zeigt jedoch, dass sich ein erhebliches Einsparpotential gegenüber einem kontinuierlichen Wasserstrahl ergibt. Somit ergibt sich eine erhebliche Reduzierung der in einer vergleichenden Gesamtbilanz der Verfahren anzusetzenden Emissionen.

5.6. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Das Düsen Prototyp wurde in einem weiteren Versuch im Freien aufgebaut. Ziel dieses Versuchs war die optische Auswertung des Strahlzerfalls mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera aufzunehmen und anschliessend Auszuwerten. Die Auswertung der Filme mit Auflösungen (Bilderrate) bis zu 12500 pro Sekunde haben keine brauchbare Ergebnissen geliefert da die Vorgänge in der Strömung der Düse unter Betriebsbedingungen mit dieser Methode nicht verwertbar waren. Abbildung 5-21 zeigt die Strahlausbreitung bei einem Betriebsdruck von 100 bar.

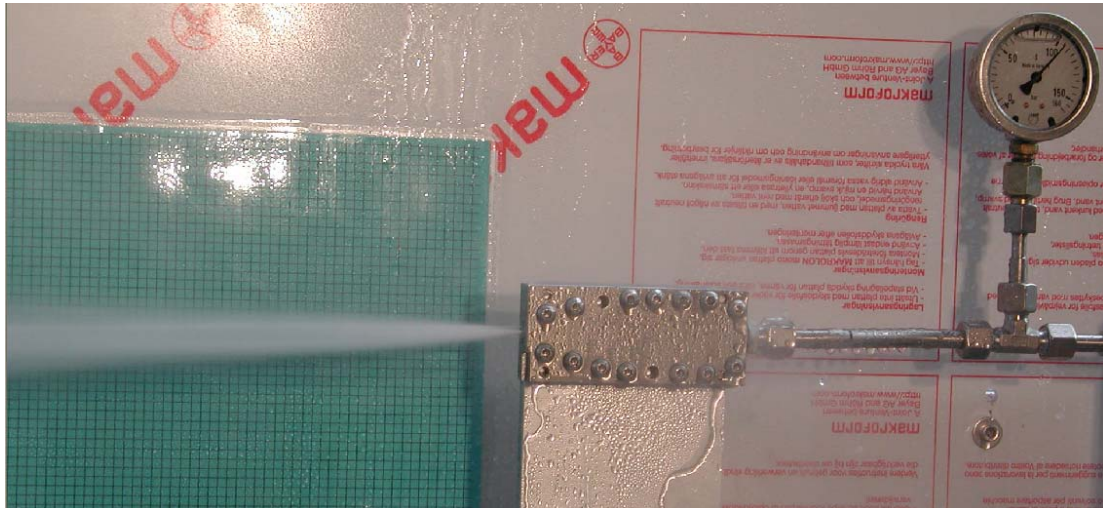


Abbildung 5-21: Wasserstrahl-Austritt bei 100 bar Druck

Der austretende Wasserstrahl hat klar definierte Ränder die sich erst nach ca. 2 Metern vom Austritt auflösen. Der Einsatzbereich zum Entgraten liegt wenige Zentimetern vom Austritt. Die folgende Abbildung 5-22 zeigt diesen Bereich und wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Bildrate von 3000 Bilder pro Sekunde aufgenommen. Eine mit 170 Nanosekunden doppelgepulste Laserdiode im Hintergrund wurde zur Beleuchtung verwendet. Langsamere Tropfen am Rande des Strahls lösen sich.

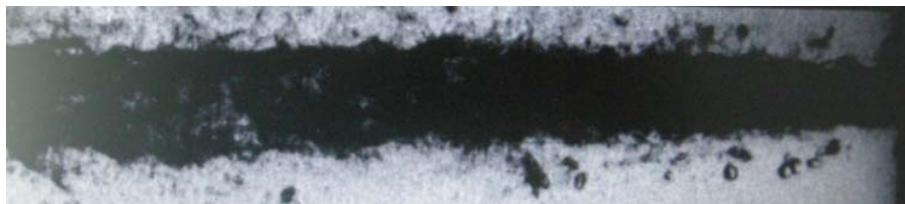


Abbildung 5-22: Kontrastbild -Strahlaustritt

Mit zunehmenden Abstand vom Austritt wird der Strahl breiter. Dieser Bereich ist für das Entgraten nicht mehr effektiv, wird aber für den Einsatz in Waschanlagen interessant da eine größere Fläche in einem Arbeitsgang gereinigt werden kann (Abbildung 5-23).



Abbildung 5-23: Strahlausbreitung

Abbildung 5-24 zeigt Details in den Strahl in diesem Bereich. Der Strahlzerfall ist in der linken Bildhälfte erkennbar. Hier lösen sich die einzelnen Wasserpakete.

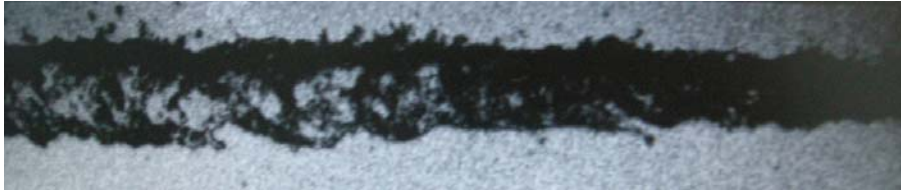


Abbildung 5-24: Strahlzerfall

Um die Struktur innerhalb der Strahls zu visualisieren wurden Detailaufnahmen mit einer gepulsten Belichtung im Hintergrund aufgezeichnet. Der Druck wurde abgesenkt um die Austrittsgeschwindigkeit zu verringern.

Abbildung 5-25 zeigt den Strahlzerfall in der Strömung (Richtung: von rechts nach links). Es wurden 12400 Bilder pro Sekunde mit einer pulsierenden Laserdiode (Pulsdauer 84 Nanosekunden) aufgenommen. Die dunklen Regionen sind Wasserpakete die Luftblasen (hell) einschliessen. Die Trennung der Wasserpakete sind auch sichtbar. Diese Struktur im Wasserstrahl wiederholt sich in späteren Versuchen.



Abbildung 5-25: Strahl - Struktur

5.7. Umskaliertes Modell

Die Düse II zeigt den effektivsten Abtrag und wird als Ausgangsmodell für weitere Geometrie-Änderungen verwendet. Da Düsen für einen Betriebspunkt ausgelegt werden müssen, sind Parametervariationen wie die Durchmesser der Kammern in Simulationen durchzuführen, um optimale Maße für bestimmte Drücke zu ermitteln. Die Düsenvarianten können für unterschiedliche Anwendungen eingesetzt werden wie z.B. Oberflächen-Behandlung oder Entgratung.

Der erste Versuch einer Pulsations-Erzeugung durch Resonanzkammern zeigt eine deutliche Steigerung der Abtragsleistung. Diese könnte weiter verbessert werden z.B. durch die Erhöhung der Oberflächengüte in der Düse, um Reibungsverluste zu minimieren.

Gleichzeitig werden Simulationen durchgeführt, die den Zusammenhang zwischen den Geometrie-Parametern ermitteln. Die Simulationszeit beträgt ca. 20 Stunden pro Düse. Als Alternative sind experimentelle Nachweise denkbar, die jedoch mit eingeschränkten Variationsmöglichkeiten verbunden sind. Aus diesem Grund wird nur ausgewählte Konturen experimentell untersucht.

Die Düse mit zwei Resonanzkammern mit 1mm Durchmesser die durch Simulationen entwickelt wurde, wird mit einem Betriebsdruck von bis zu 200bar betrieben. Der Abtragsversuch indem diese Düse mit herkömmlichen Düsen verglichen wurde, zeigt einen höheren Materialabtrag.

Die in der Simulation aufgezeichnete Druckschwankung konnten nicht gemessen werden, da die Drucksensoren eine solch hohe Frequenz nicht aufnehmen können (3,5 kHz).

Da die Vorgänge in der Strömung unter Betriebsbedingungen wegen die hohe Drücke aus u.a. Sicherheitsgründen nicht untersucht werden können, wird die Düse umskaliert um eine dynamische „Verlangsamung“ der Vorgänge zu erreichen.

5.7.1. Geometrie des Modells

Um diese zu untersuchen, wird ein weiterer Prototyp hergestellt, der im Niederdruckbereich (1,3 bis 10bar) eingesetzt werden soll. Diese Düse soll zu Bauteilreinigungszwecken verwendet werden. Die Pulsation im Strahl dient dazu, Schmutz und Unreinheiten effizienter zu beseitigen. Dadurch entsteht die Möglichkeit gar keine umweltbelastende Zusatzstoffe zu verwenden.

Der Anschluss an einer Pumpe sind durch den Schlauchdurchmesser ($19 \cdot 10^{-3}$ m) festgelegt: Aufgrund der Reynolds'schen Ähnlichkeit wird diese Düse mit einem Profil von 17x17mm an Auslass konstruiert. In der folgenden Abbildung 5-26 sind alle Maße für die Versuchsdüse in Millimeter dargestellt

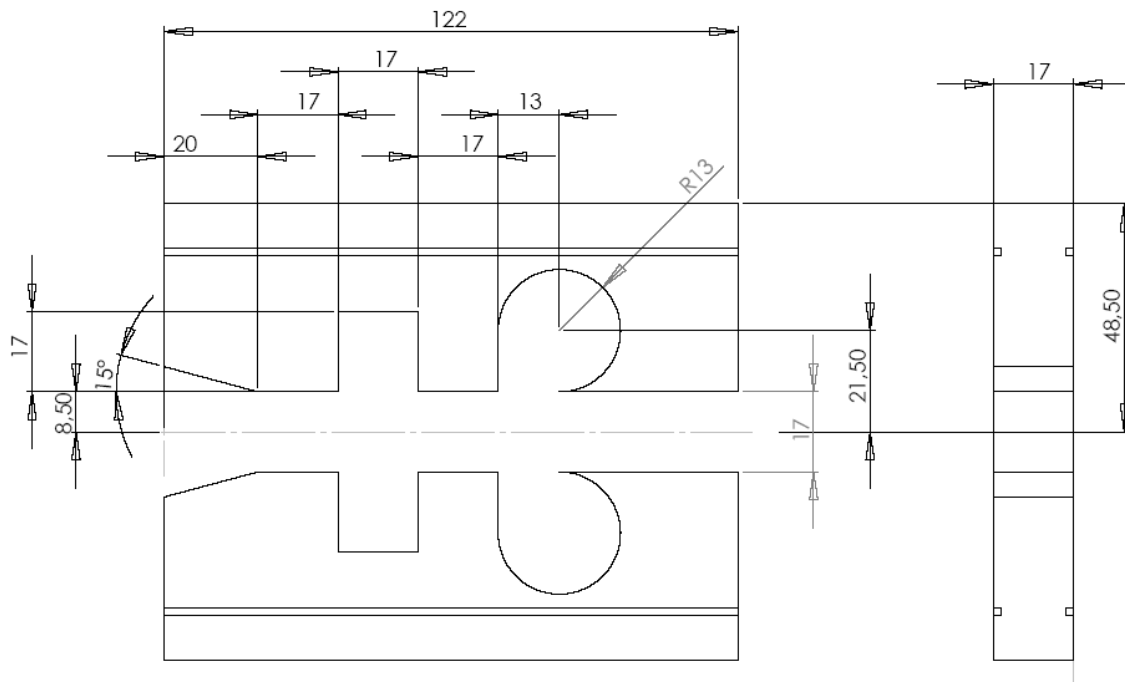


Abbildung 5-26: Düsenmaße

Für die vorgesehenen Druckmessungen sind Bohrungen für den Anschluss an Druckmesssensoren angebracht. Diese befinden sich in den Resonanzkammern sowie an verschiedenen Stellen im engsten Querschnitt der Düse (Abbildung 5-27).

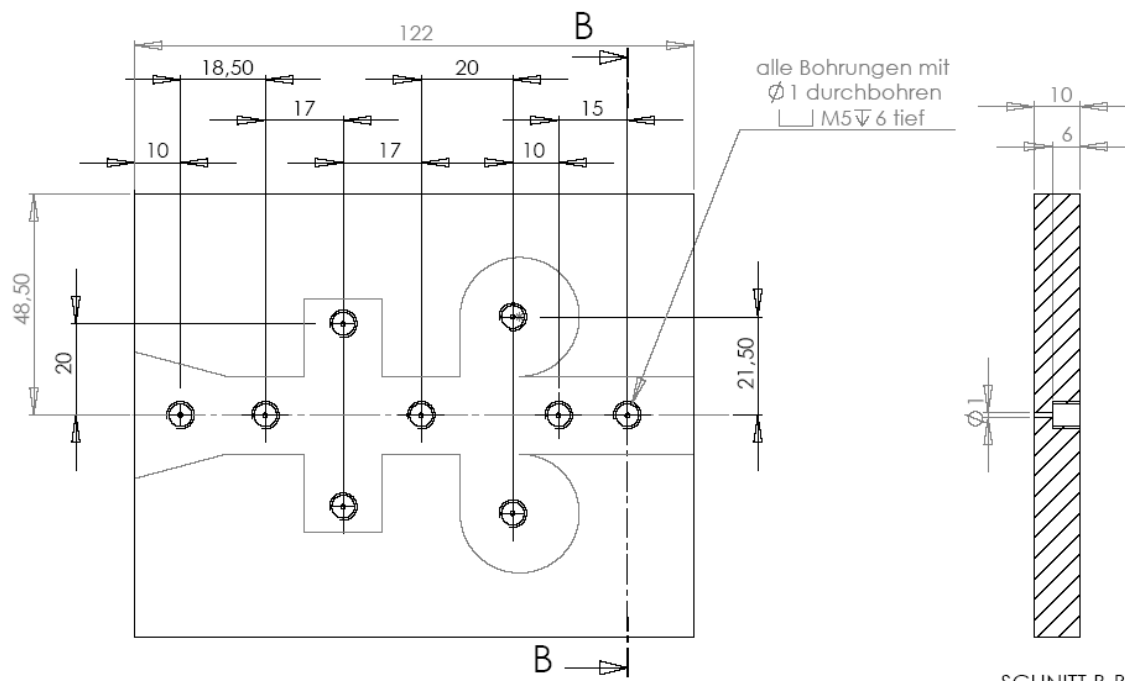


Abbildung 5-27: Messstellen in der Düse

Als Versuchsdüse wurde eine aus Aluminium gefräste Innenkontur hergestellt. Der Deckel wurde aus Plexiglas gefertigt. Dies ermöglicht eine optische Beobachtung der Schwingungsvorgänge. Zusätzlich wurde die Düse mit Druckmessstellen versehen. Dadurch kann eine Druckverlauf während des Versuchs aufgenommen werden.

In der folgenden Abbildung 5-28 ist das aus Aluminium gefrästes Düsenmodell ohne Deckel dargestellt. Das Wasser tritt durch die große Öffnung auf der rechten Bildseite ein, und verlässt die Düse durch die Öffnung in der linken Kante. Dieses Modell wird mit einer durchsichtigen Plexiglasscheibe geschlossen, um das Verhalten der Strömung in den Kammern optisch zu beobachten.

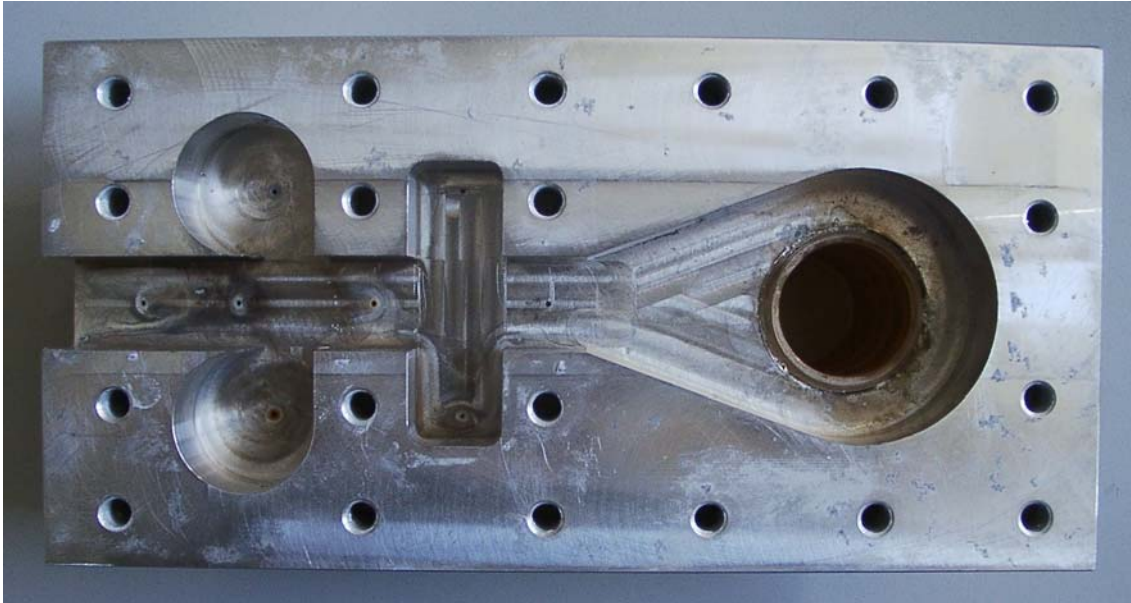


Abbildung 5-28: Düsenmodell aus Aluminium

5.7.2. Beschreibung des Resonator-Systems

Die Strömung fließt durch den Einlass in die Düse hinein. Durch das erste Kammerpaar wird eine Pulsation (Druckschwankung) erzeugt, die sich auch mit der Strömung fortbewegt. Erreicht diese Schwankung der zweiten Kammer so kann diese Druckschwankung durch die dort entstehende Instabilität entweder verstärkt oder verringert werden (d.h. die Wellen heben sich auf). Die am Austritt erscheinende Pulsation im Strahl ist eine Kombination der Effekte beider Resonanzkammerpaare. Möglich charakteristische Längen für die Resonanzfrequenzen sind in folgender Abbildung 5-29 mit s_1 bis s_6 dargestellt.

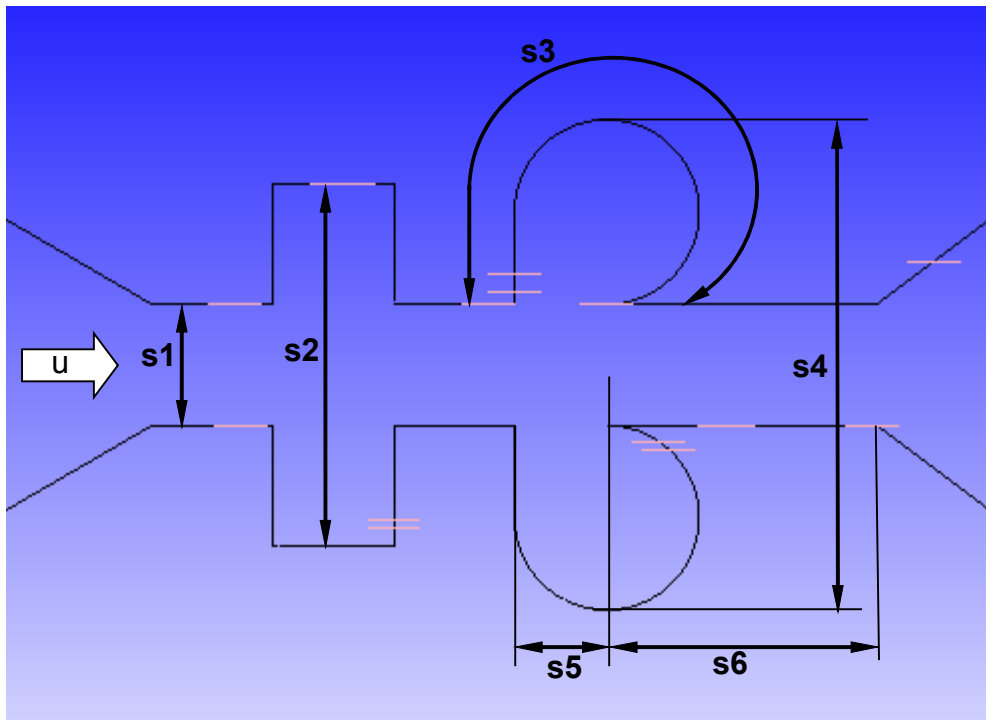


Abbildung 5-29: Charakteristische Längen

Bestimmung der charakteristischen Länge für die Wellenlänge

Werden die charakteristischen Längen s_1 bis s_6 verwendet, so können die dazugehörigen Frequenzen theoretisch mit folgenden Formeln berechnet werden. In der Formel wird die charakteristische Länge für den Wert „a“ angebracht.

Wellenlänge

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{2 \cdot a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2 \cdot b}\right)^2}}$$

Damit ergibt sich die Resonanzfrequenzen mit

Frequenz

$$f = \frac{u}{\lambda_g}$$

Die Grundfrequenz der Schwingungen wird in den ersten beiden Resonanzkammern erzeugt. Die möglichen Wellenlängen für die jeweiligen Stellen an der Geometrie sind in Tabelle 5-3 eingetragen. Diese Werte basieren auf die Annahme dass die Schwingungen sich voll ausgebildet haben und die gesamten Längen der Geometrie nutzen.

	s1	s2	s3	s4	s5	s6
char. Länge s [m]	1,70E-02	5,10E-02	8,20E-02	6,90E-02	1,30E-02	3,40E-02
λ [m]	0,034	0,102	0,164	0,138	0,026	0,068

Tabelle 5-3: Wellenlänge für unterschiedliche Längen

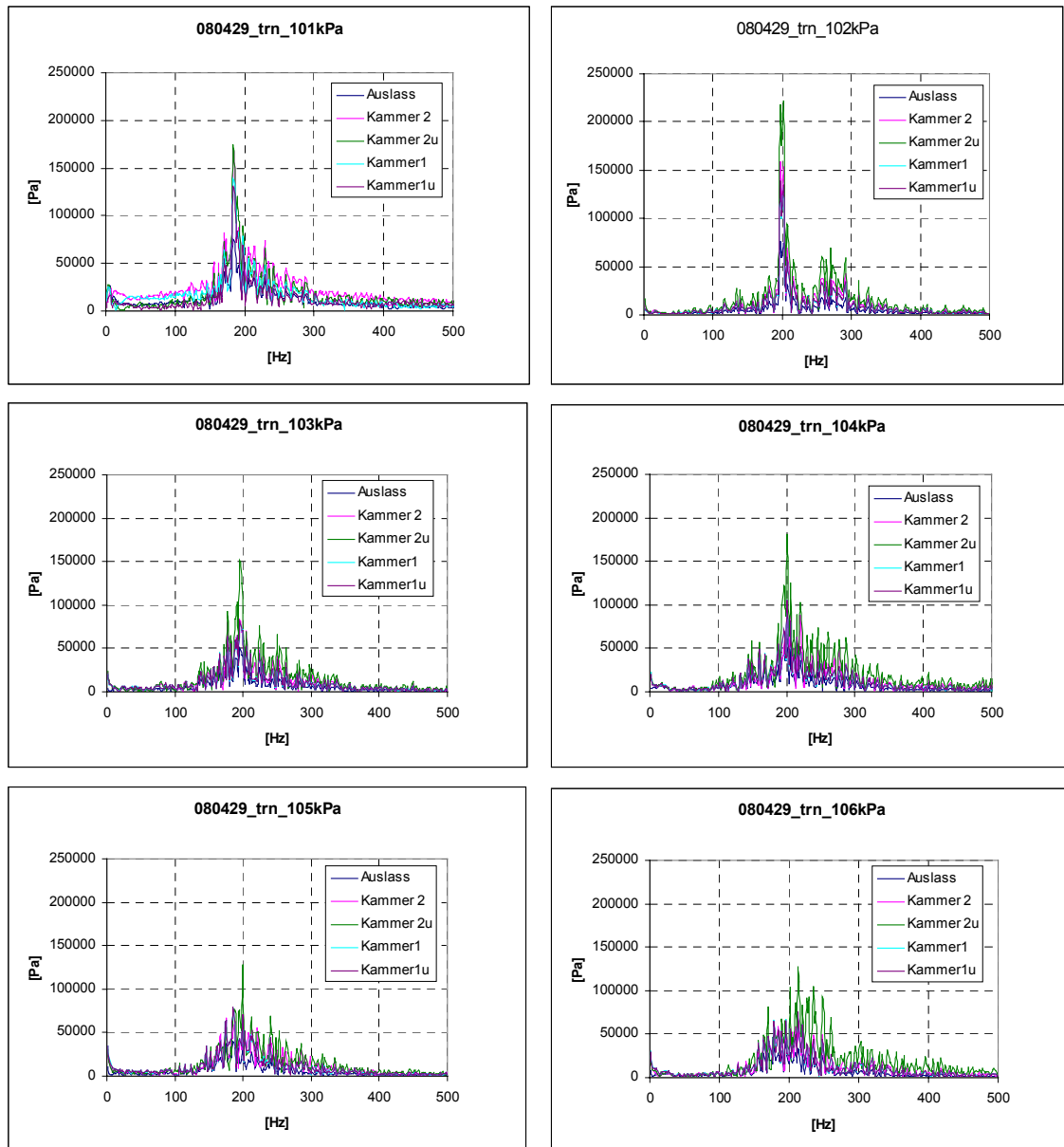
Die Resonanzfrequenzen, die aus den geometriebedingten Längen berechnet werden sind in folgender Tabelle 5-4 eingetragen. Diese zeigt die berechneten Frequenzen f_1 bis f_6 für die charakteristischen Längen s_1 bis s_6 bei unterschiedlichen Drücken von 1,01bar bis 1,36bar.

Druck [Pa]	Frequenz [Hz]					
	f1	f2	f3	f4	f5	f6
101000	41,6	13,9	8,6	10,3	54,5	20,8
102000	58,9	19,6	12,2	14,5	77,0	29,4
103000	72,1	24,0	15,0	17,8	94,3	36,1
104000	83,3	27,8	17,3	20,5	108,9	41,6
105000	93,1	31,0	19,3	22,9	121,8	46,6
106000	102,0	34,0	21,1	25,1	133,4	51,0
110000	131,7	43,9	27,3	32,4	172,2	65,8
120000	190,5	63,5	39,5	46,9	249,1	95,3
130000	228,1	76,0	47,3	56,2	298,3	114,0
136000	235,3	78,4	48,8	58,0	307,7	117,6

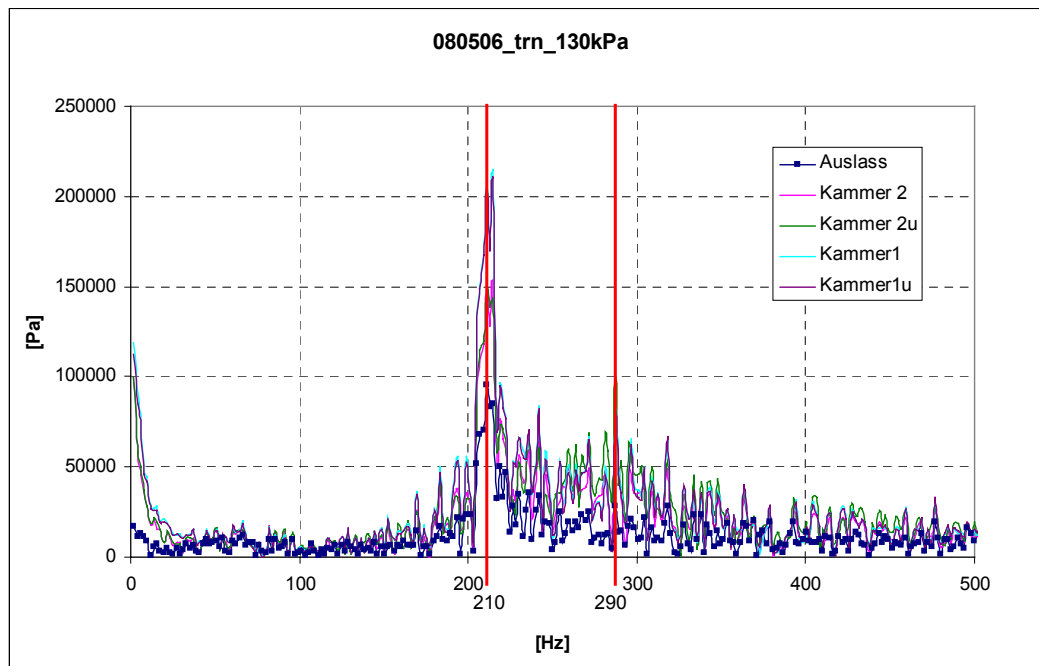
Tabelle 5-4: Frequenzen

Die obige Tabelle veranschaulicht die möglichen Einflussgrößen für die Resonanz. Bei einer Wechselwirkung zwischen den Parametern werden die Zusammenhänge komplexer.

Simulationen der Düse in Druckbereich von 1,01bar bis 1,06bar zeigen Druckspitzen bei unterschiedlichen Frequenzen. Druckverläufe im Frequenzbereich an unterschiedlichen Stellen in der Düse sind in den Diagrammen (Diagramm 5-6: Simulationsergebnisse) dargestellt. Diese Frequenzen liegen im Bereich um 200Hz und können mit einer umhüllenden Kurve beschrieben werden. Da sie ein nicht-lineares Verhalten gegenüber des Massenstroms (Betriebsdruck) aufweisen zeigt dass die Geometrie-Parametern eine wesentliche Rolle im Resonanz-Verhalten der Düse spielen.

**Diagramm 5-6: Simulationsergebnisse**

In den obigen Simulationsergebnissen verschieben steigen die Resonanzfrequenz-Spitzen mit steigendem Betriebsdruck. Die Druckamplituden steigt anfänglich (bei 1,02 bar), fallen aber mit steigendem Druck ab. Wird ein bestimmter Druck überschritten, so erreichen die Druckamplitudenspitzen ein Maximum, wie in Diagramm 5-7 dargestellt

**Diagramm 5-7: Frequenzverlauf 1,30bar**

Die Grundfrequenz des Resonatorpaars wird über die Länge s_1 bestimmt. Das erste Kammerpaar erzeugt eine Instabilität im Strahl, die zu Druckschwankungen im Strahl führt. Diese erzeugten Pulsationen werden mit der Strömungsgeschwindigkeit bzw. -umlenkung zum zweiten Kammerpaar übertragen, wo die charakteristische Länge s_5 (mit $s_5 = 0,75 \cdot s_1$) die Frequenz einstellt. Diese führt zu einer Überlagerung einer zweiten Frequenz im Strahl. Die Wechselwirkung zwischen den beiden Kammern führt dazu dass die Druckwelle im ersten Kammerpaar sich nicht über die gesamte Wellenlänge ausbilden kann. Dieses führt dazu dass die Frequenzen überlagert werden.

5.8. Modellversuch: Aufbau eines Labview Modells

Zur Datenerfassung des Versuchs wurde ein Modell mit der Software Labview der Firma National Instruments aufgebaut. Dieses interaktive Programm ermöglicht eine Aufnahme sowie die Bearbeitung und Visualisierung der gemessenen Werte. Dadurch können bis zu 32 Kanäle gleichzeitig aufgenommen werden.

Ziel der Messung ist die Bestimmung der Resonanzfrequenzen bei unterschiedlichen Drucken. Die runde Kammerform des zweiten Kammerpaares verursacht eine Verwirbelung in der Kammer. Aufgrund der höheren Geschwindigkeit kann gelöste Luft in Wasser sich hier entgasen. Dadurch bilden sich Luftblasen im Zentrum der Kammer.

Das Düsenmodell wird im Prüfstand an einer Pumpe mit einem maximalen Durchfluss von ($Q_{\max} = 3,33\text{l/s}$) angeschlossen. Abbildung 5-30 zeigt die Düse mit Plexiglas-Deckel im Prüfstand.

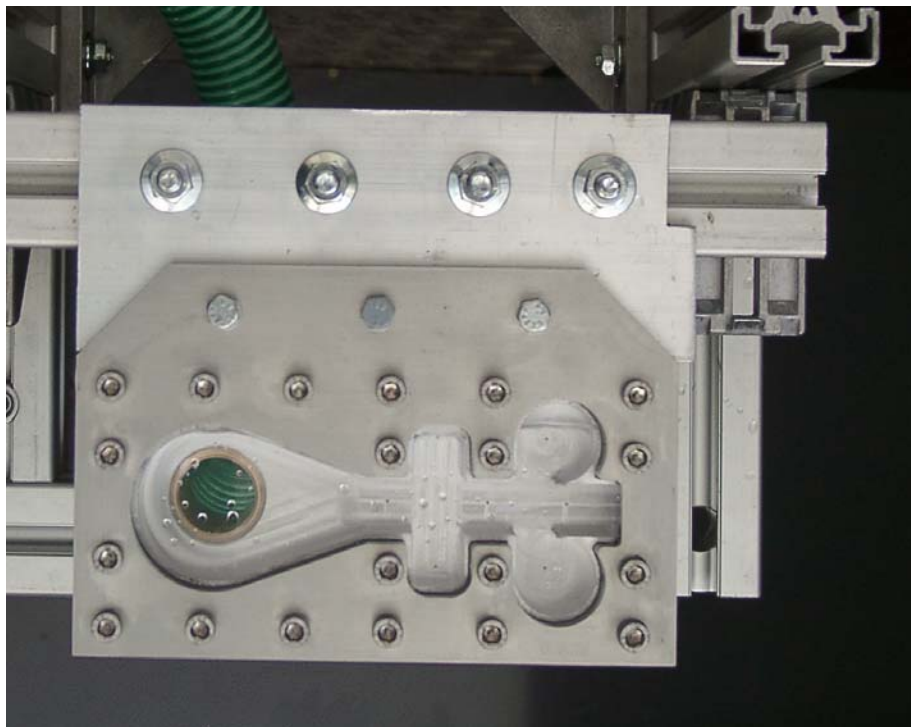


Abbildung 5-30: Eingebaute Düse mit Plexiglas-Deckel

LabView Modell im Versuchsstand

Im Modell sind 9 Messstellen an Boden der Düse angebracht. Diese sind in Abbildung 5-31 als Bohrungen mit 1 mm Durchmesser dargestellt.

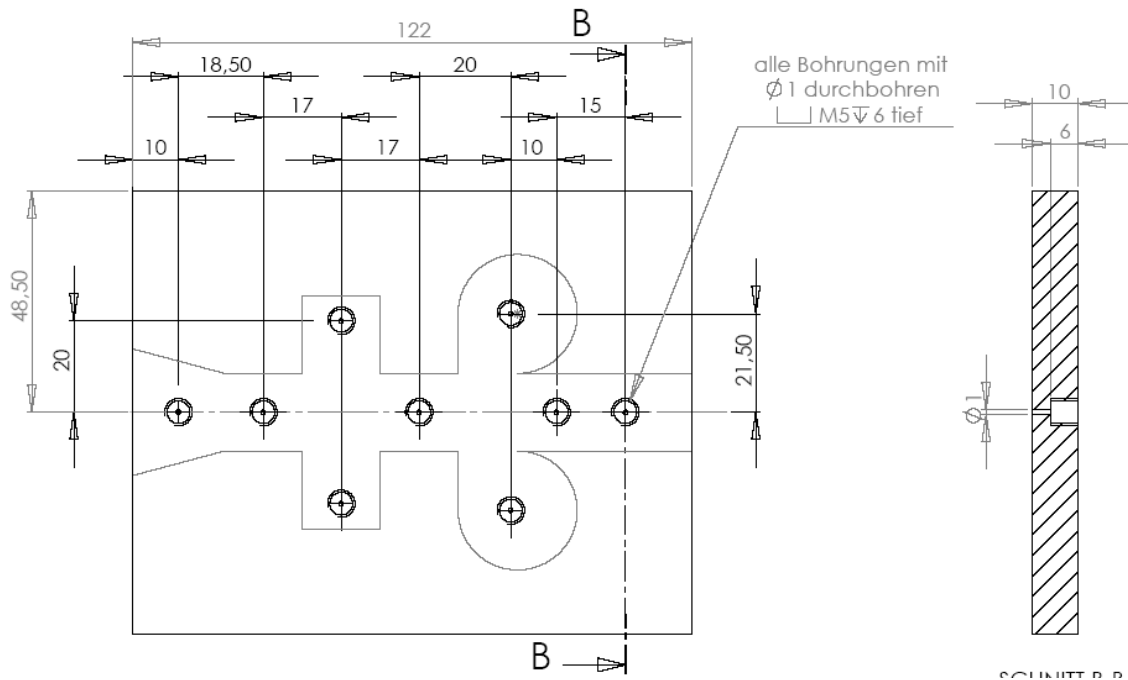


Abbildung 5-31: Messstellen am Modell

Damit können bis zu 9 Kanäle im LabView Virtual Instrument mit Drucksensoren bestückt werden. Ziel ist, die Differenzen in den Drücken an ausgewählte Stellen (z.B. zwischen den Kammern) zu vergleichen, um die Druckverhältnisse innerhalb der Düse darzustellen. Diese Anschlüsse sowie die Schlauchleitung von der Pumpe sind in der folgenden Abbildung 5-32 aus zwei Perspektiven sichtbar.

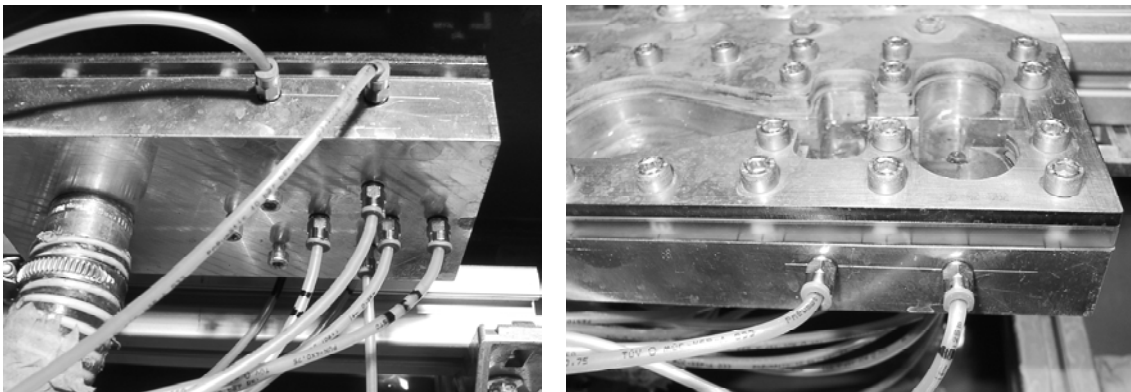


Abbildung 5-32: Druckanschlüsse

Drucksensoren an der Düse

Zur Ermittlung des Druckverlaufs in der Düse werden Messstellen im Vorlauf der Kammern, in den Kammern und an Stellen im engsten Querschnitt angebracht. Diese Messungen im Versuch dienen dazu, Druckschwankung bei unterschiedlichen Eingangsdrücke (Volumenströme) aufzunehmen. Damit kann das Simulationsmodell validiert werden, und Optimierungen an den Parametern der Geometrie und Eingangsdrücke durchgeführt werden.

Eigenfrequenzen der Druckleitung

Bei der Messung von Drücken sind die Eigenfrequenzen der Messleitung zu berücksichtigen. Im ungünstigen Fall werden diese Schwingungen dem gemessenen Druck überlagern. Die Eigenfrequenzen werden für eine Wellenlaufgeschwindigkeit a und Messleitungslänge L mit folgenden Formeln berechnet.

1. Eigenfrequenz: $f = \frac{a}{4 \cdot L}$
2. Eigenfrequenz: $f = \frac{3 \cdot a}{4 \cdot L}$
3. Eigenfrequenz: $f = \frac{5 \cdot a}{4 \cdot L}$

Für die Messleitungen am Versuchsstand berechnen sich die ersten beiden Eigenfrequenzen zu 750Hz und 2250Hz. Anhand der Ergebnisse der Simulationen liegen die Frequenzen der Druckschwankungen im Wasserstrahl bei 220Hz.

Pumpenkennlinie

Um die Versuche an der Düse durchzuführen wird eine Pumpen-Kennlinie zur Bestimmung des Volumenstroms aufgetragen. Die Pumpe wird über einen drehzahlgeregelten Motor angetrieben. Die Drehzahlregelung erfolgt über einen Frequenzumrichter. Die Kennlinie des Massenstroms über die Frequenz des Umrichters ist im folgenden Diagramm 5-8 aufgetragen.

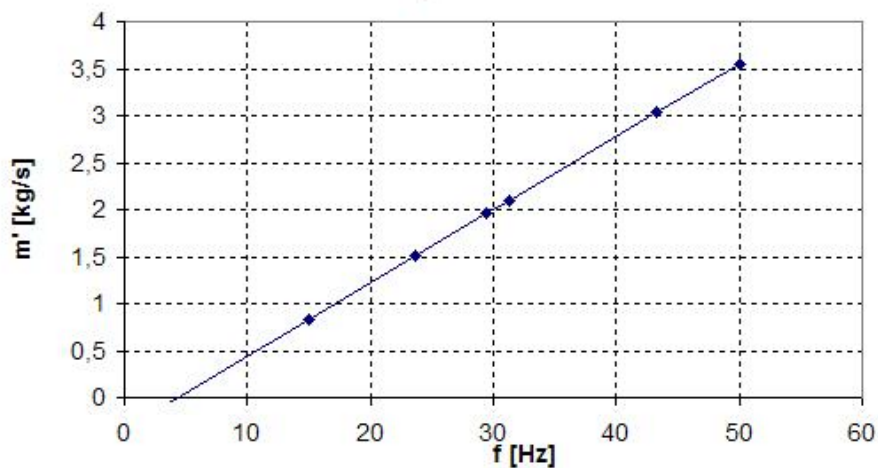


Diagramm 5-8: Pumpenkennlinie

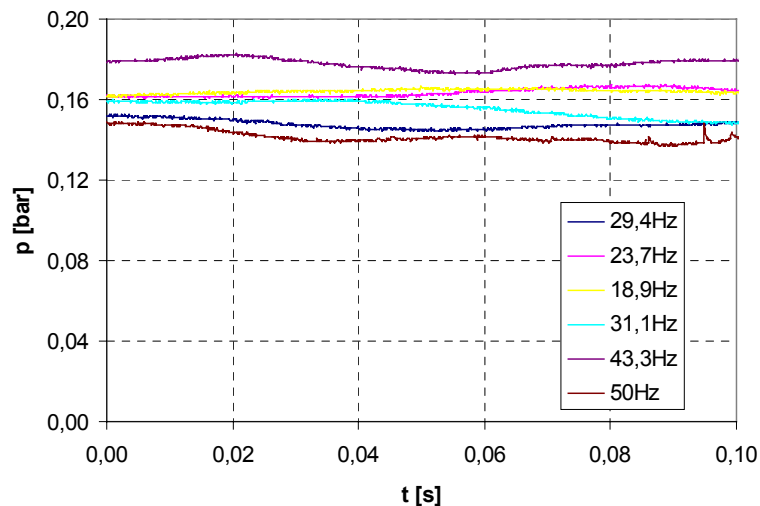
Der Massenstrom bzw. der Betriebsdruck kann durch den Frequenzumrichter direkt gesteuert werden und wird stufenweise für fünf Arbeitspunkte umgestellt.

Druckmessung

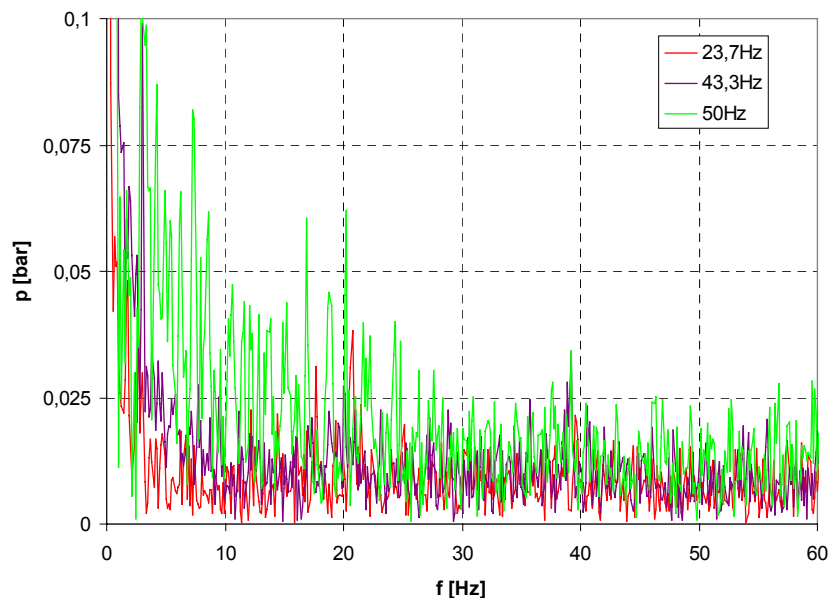
Der Druck am Einlauf der Düse wird über den Frequenzumrichter eingestellt. Es werden absolute Drücke von 0 bis 1bar in Schritte von 0,1bar am Einlass eingestellt. Für jede Druckstufe werden Messungen durchgeführt, die erst ausgenommen werden wenn die Pumpe einen stabilen Zustand erreicht hat.

Die Messreihen werden von LabView im .vi Format aufgenommen. Das Format erlaubt lediglich ein Öffnen der Datei mit Microsoft Excel.

Bei der Versuchsdurchführung wurde festgestellt dass die Druckschwankungen in den Kammern eine sehr kleine Amplitude zeigen. Diese sind in Diagramm 5-9 dargestellt.

**Diagramm 5-9: Druckmessungen am Prüfstand**

Die gemessenen Daten wurden in Excel mit einem FFT analysiert. Damit konnte festgestellt werden dass die Messungen nicht verwertbar sind (Diagramm 5-10).

**Diagramm 5-10: Excel FFT**

Daher wurden die Messstellen in den Kammern an den Wänden der Kammern angebracht da die Druckwellen rechtwinklig zur Strahlrichtung bewegen. Die neue Anordnung der Messstellen ist in der folgenden Abbildung 5-33 gezeigt. Diese Anordnung ermöglicht, dass die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit zwischen zwei gegenüber liegenden Drucksensoren gemessen werden kann. Daraus könnte die Pulsationsfrequenz im Strahl einer verursachenden Geometrie angeordnet werden. Dieses wiederum dient als Auslegungsparameter für das numerische Modell.

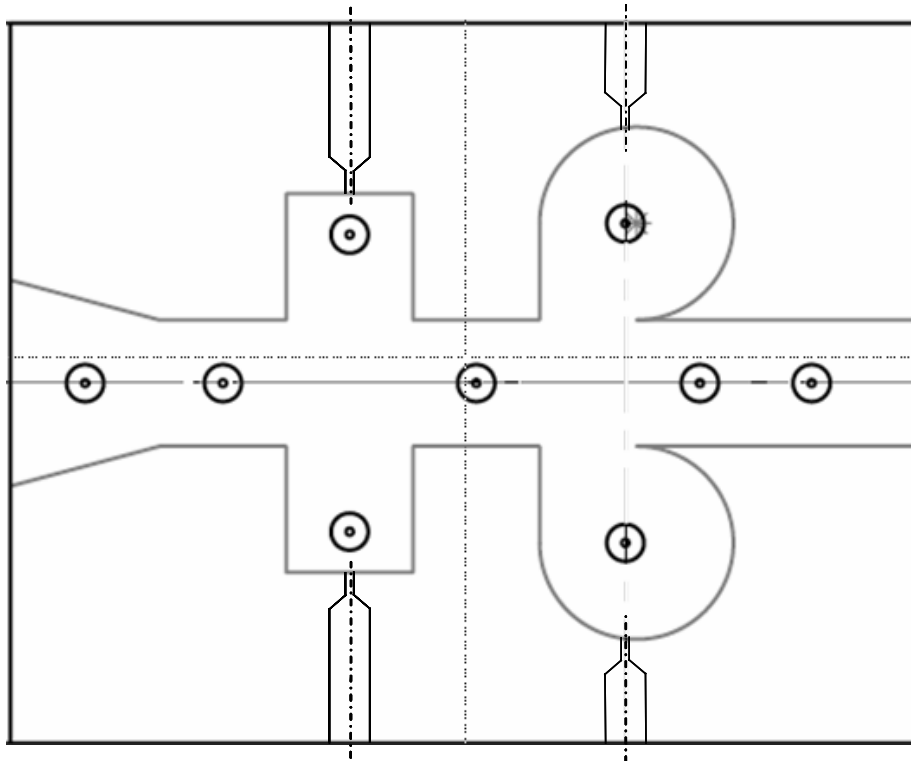


Abbildung 5-33: Druckmessstellen

Trotz der neuen Anordnung konnten keine verwertbare Messungen durchgeführt werden. Ein wesentlicher Einfluß war die Entstehung von Luftblasen in der zweiten Resonanzkammer. Aufgrund der gelösten Luft im Wasser die durch die Pumpe verursacht wird, verdampft die Luft in Regionen der Düse wo hohe Geschwindigkeiten herrschen. Die Luftblasen werden in der zweiten Kammer aufgewirbelt. Aufgrund der runden Geometrie läuft die Strömung entlang der kreisförmigen Kammerwand und es bilden sich große Luftblasen im Zentrum der Kammer. Dadurch wird das System gedämpft und es kann sich keine Druckwelle quer zur Strömungsrichtung bilden.

Auswertung der gemessenen Druckverläufe

Die zeitabhängige Druckmessung wird mit drei Abtastfrequenzen von 8kHz, 10kHz und 15kHz aufgenommen. Bei diesen Abtaststraten wird Rauschen aufgenommen und keine eindeutige Frequenz deutlich. Auch bei höheren Abtaststraten (250Hz, 500Hz, 1kHz) sind keine brauchbaren Messreihen aufgenommen worden.

Diagramm 5-11 zeigt eine Messreihe mit den Druckverläufen mit einer Abtastrate von 15 kHz.

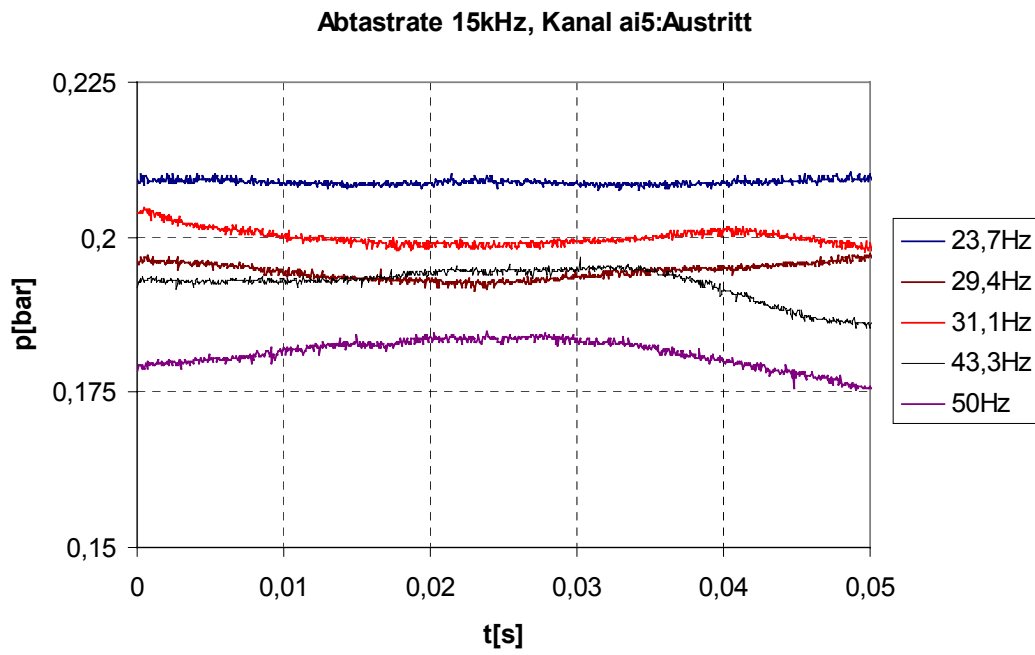


Diagramm 5-11: Druckmessung mit 15 kHz Abtastrate

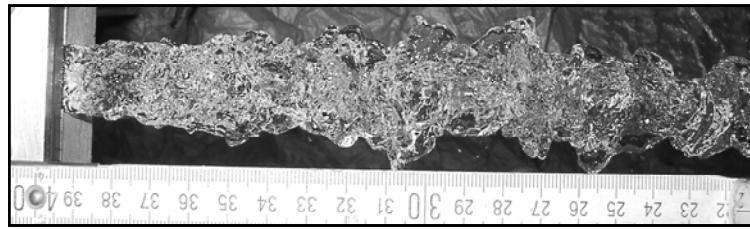
5.9. Photographische Auswertung des Versuchs

Kurz nach dem Austritt aus der Düse beginnt der Wasserstrahl zu zerfallen. Die Pulsation im Strahl zerlegt den Strahl in Wasserpakete. Mit zunehmenden Abstand vom Austritt werden Wasserpakete deutlicher. Der Strahlzerfall ist in der folgenden Abbildung 5-34 gezeigt.

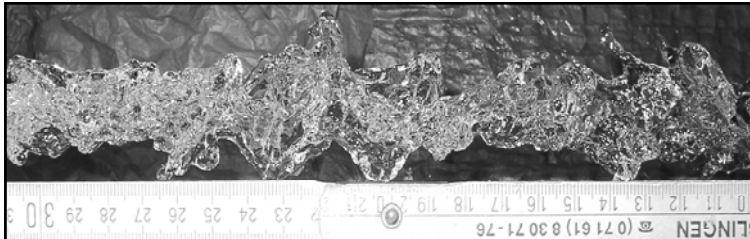


Abbildung 5-34: Strahlzerfall

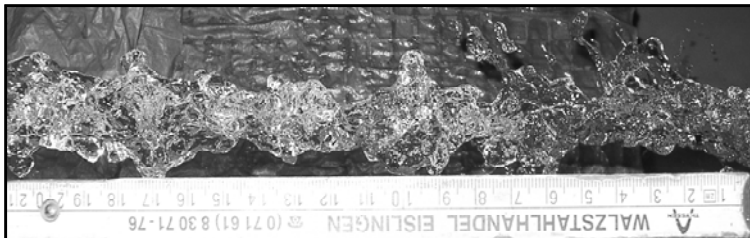
Um den Strahlzerfall genauer zu untersuchen, wurden Strahlabschnitte fotografiert. Die einzelnen Bilder zeigen unterschiedliche Zonen im Strahl. Beim Austritt bilden sich charakteristische Einschnitte durch Lufteinschlüsse an den Rändern des Strahls. Diese Lufteinschlüsse breiten sich aus und es werden Wasser-Pakete gebildet. Anschliessend kommt es zu einer Einschnürung der Einschnitte wobei sich die langsameren Tropfen vom Strahl ablösen, bis sich der Strahl ganz auflöst. Diese vier Regionen des Strahls sind in Abbildung 5-35 dargestellt.



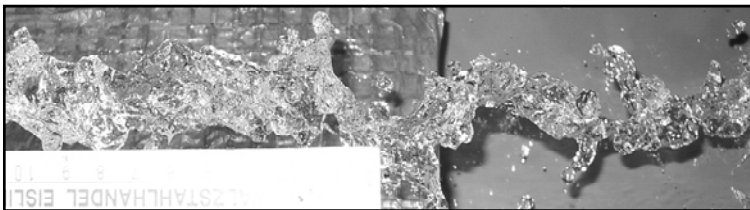
0 bis 20 cm vom Austritt



10 bis 30 cm vom Austritt



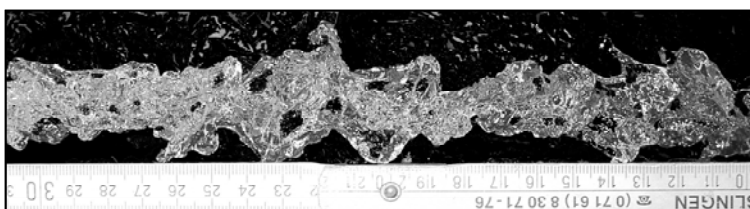
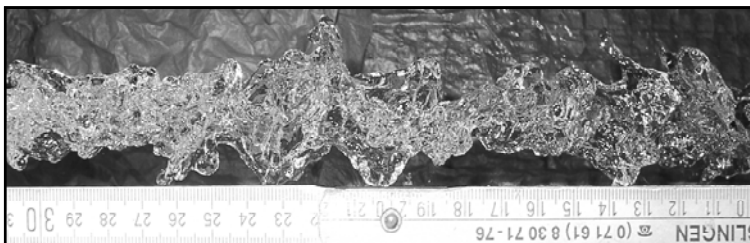
20 bis 40 cm vom Austritt



30 bis 50 cm vom Austritt

Abbildung 5-35: Auflösung des Strahls

Der für die Anwendung der Düse interessanter Abschnitt des Strahls ist dort wo sich einzelne Wasserpakete bilden. Durch die in der Strömung enthaltene kinetische Energie kann der Tröpfchenschlag-Effekt am optimalsten ausgenutzt werden. Mittels einer Bildbearbeitung wurde dieser Abschnitt verdeutlicht (Abbildung 5-36).

**Abbildung 5-36: Bildbearbeitung**

Bei bekannter Strömungsgeschwindigkeit u_2 unmittelbar am Austritt sowie der Abstand s zwischen den Wasserpaketen anhand des Metermaß im Bild kann die Pulsationsfrequenz ausgerechnet werden.

$$\text{Pulsationsfrequenz } f = \frac{u_2}{s}$$

Die folgende Abbildung 5-37 zeigt die Abstände zwischen den Wasserpaketen für steigende Massenströme. Auf der linken Seite der einzelnen Bilder ist ein dichter Wasserstrahl am Düsenaustritt zu erkennen. Alle Bilder zeigen den Bereich 10 cm bis 30 cm vom Düsenaustritt entfernt.

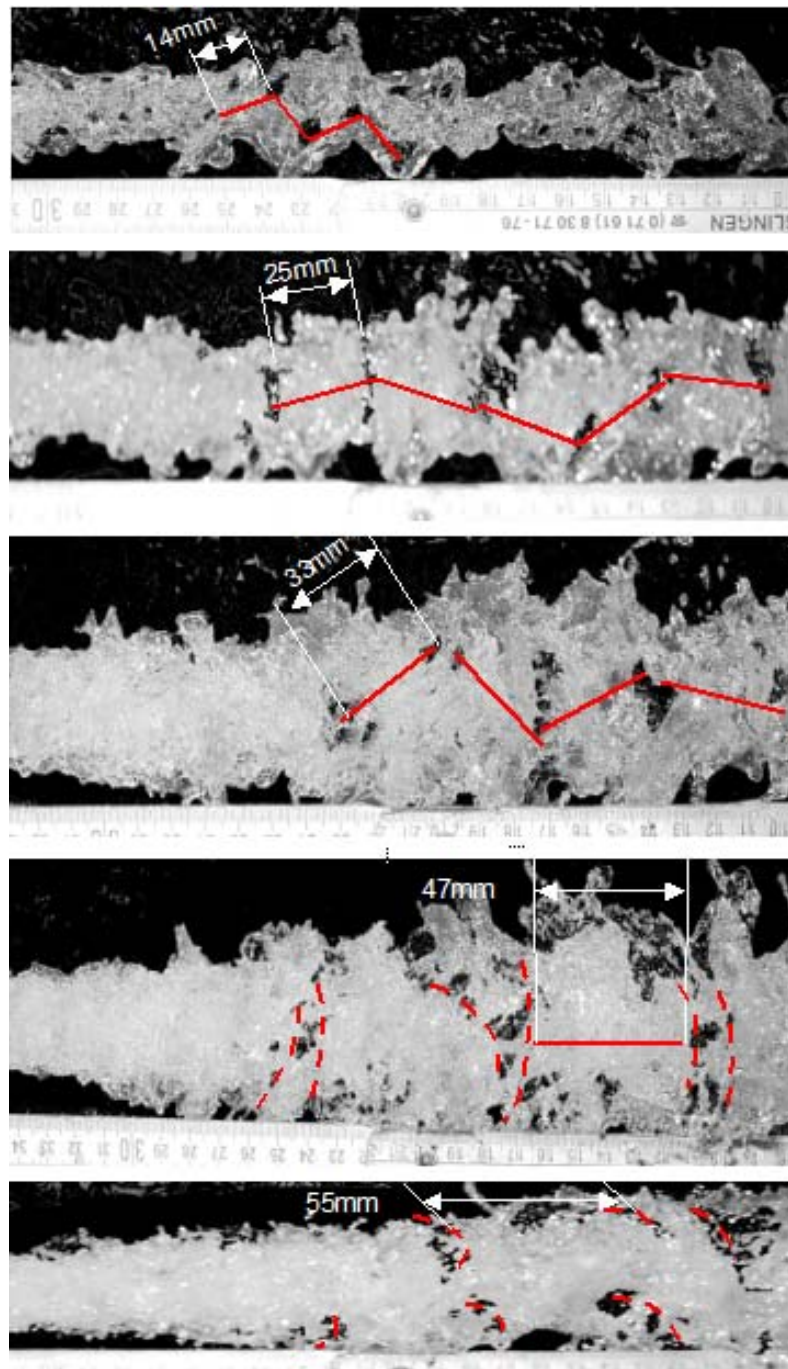


Abbildung 5-37: Abstand zwischen Wasserpakete

Die errechneten Werte stimmen weitgehend mit den Frequenzen aus den Simulationsergebnissen überein, so dass das Simulationsmodell für die Geometrieoptimierung übernehmen werden kann. Die folgende Tabelle 5-5 zeigt die Ergebnisse der Simulation im Vergleich mit den Messungen.

Massenstrom [m ³ /s]	0,83	1,51	1,96	3,03	3,55
Druck [Pa]	104000	115000	122000	155000	175000
Abstand s [mm]	14	25	33	47	55
Pulsationsfrequenz [Hz]					
Simulation	200~210	200~220	200~210	215~230	230~235
Versuch	206	200	205	224	225

Tabelle 5-5: Vergleich Simulation und Versuch

Alle wichtigen Daten zum ANSYS CFX Simulationsmodell sind in Kapitel 0 „CFD Simulation mit ANSYS CFX“ tabellarisch eingetragen. Es wurden lediglich Standard-Parameter für den Solver übernommen. Das Modell selbst kann mit den Daten im Anhang in der Simulationsumgebung ANSYS CFX Präprozessor wieder erstellt werden.

5.10. Modellierung mit ICEMCFD

Das parametrisierte Modell ICEMCFD

Für die Simulationsdurchgänge wird ein einfaches 2D-Modell erzeugt. Es werden in der Umgebung ANSYS ICEMCFD Punkte in einer sogenannten „Replay-Datei“ definiert. Diese Datei funktioniert wie ein herkömmliches Makro und ist notwendig, damit einzelne Werte herausgelesen werden können, um eine parametrisierte Optimierung durchzuführen. Die Replay Datei `icemcfd_batch.rpl` befindet sich im Anhang.

In einem ersten Schritt werden Punkte in einer Ebene (Z-Koordinate = 0) erstellt. Abbildung 5-38 zeigt die Anordnung der Punkte im Koordinatensystem

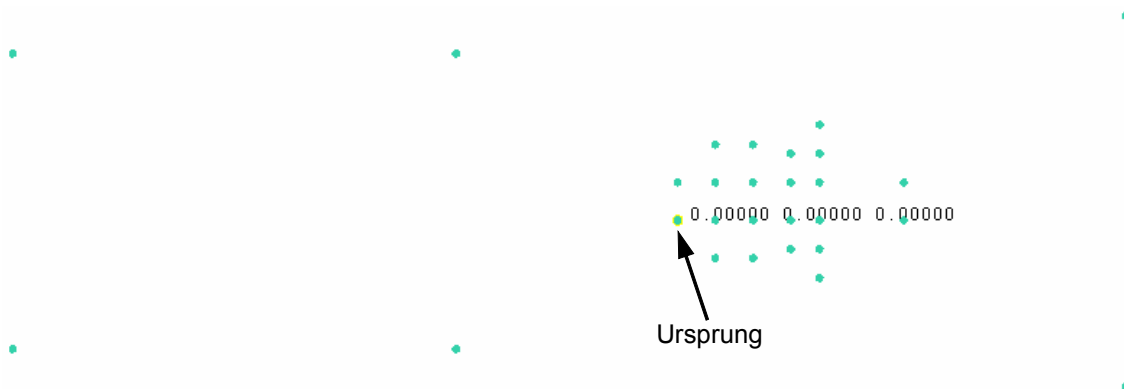


Abbildung 5-38: Ursprung des Koordinatensystems

Die Punkte bilden die Eckpunkte der Geometrie des Modells und werden mit Geraden und Kurven verbunden. (Abbildung 5-39). Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Geometrieänderung durch eine Verschiebung der Punkte. Die Parametervariation im Kapitel 5.13 „Optimierung mit modeFrontier“ hängt direkt von der absoluten Position der Punkte ab. Die Linien und Kurven werden anschliessend zu den Teilen der Düse (Einlass, Auslass, Wände) angeordnet, und werden mit dem fertigem Netz in das CFD-Programm übertragen, damit die Randbedingungen dort entsprechend festgelegt werden können.

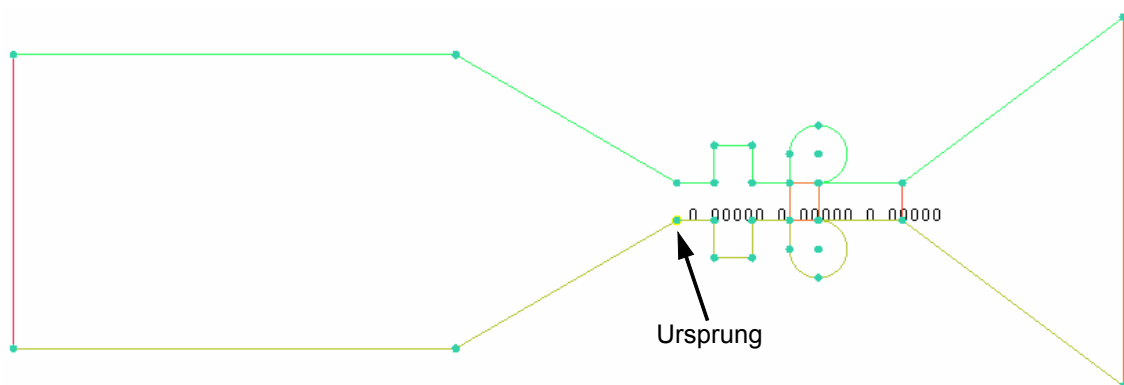


Abbildung 5-39: Linien und Kurven des Modells

In einem weiteren Schritt wird das Modell in Teilbereiche mittels „Blocking“ aufgeteilt. Hiermit wird ein Block mit Kanten über die Geometrie gelegt. Dieser Block kann beliebig geteilt werden. Die Knotenanzahl der einzelnen Kanten der Blöcke sowie deren Verteilung können hier definiert werden. Abbildung 5-40 zeigt die Aufteilung der einzelnen Blöcke sowie die Zugehörigkeit der Kanten zu den Linien, Kurven und Ecken (Vertices).

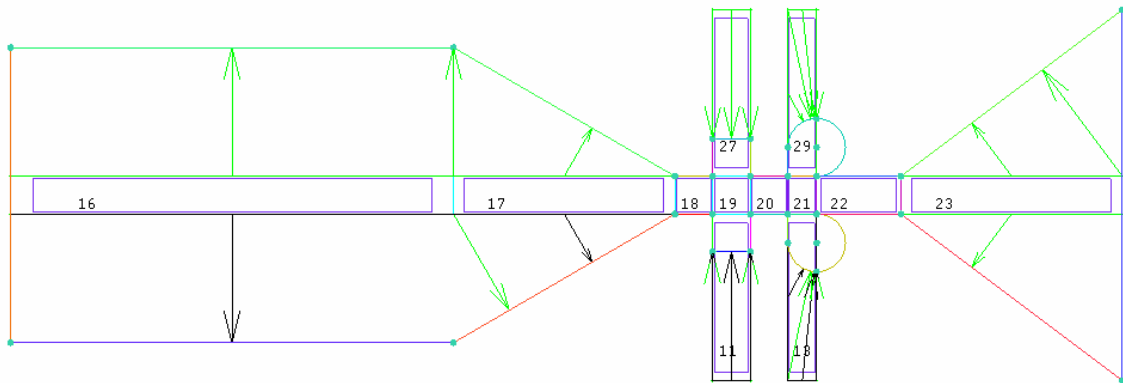


Abbildung 5-40: Das Blocking

Das Blocking ist von besonderer Bedeutung da es eine optimale Vernetzung von kreisförmigen Konturen ermöglicht. Dieses geschieht über das Definieren eines „O-grid“ in den entsprechenden Blöcken und wird bei der Vernetzung sichtbar. Die Qualität des Netzes wird im Bereich von Kreisen mit O-grids deutlich gesteigert. Das fertige Blocking sowie die Knotenanzahl der Kanten in in der folgenden Abbildung 5-41 dargestellt.

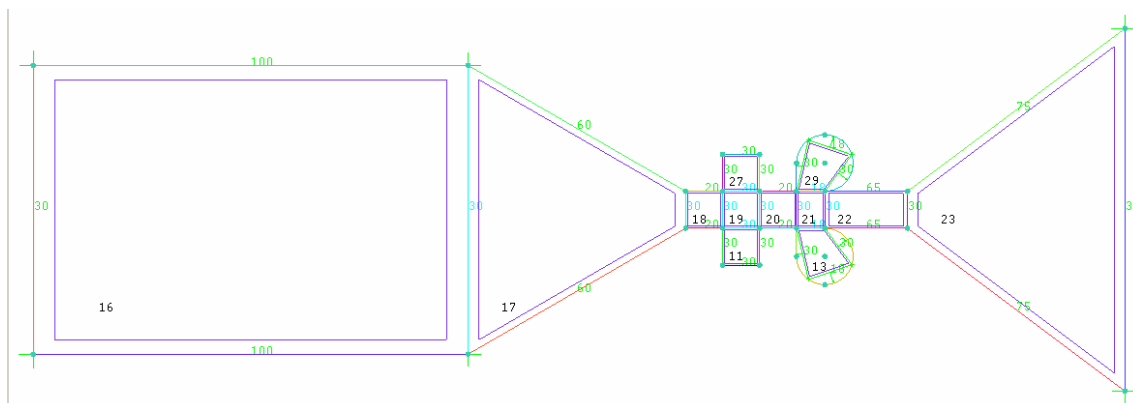


Abbildung 5-41: O-Grid

Das O-grid wird im zweiten Resonanzkammer-Paar angebracht da eine normale Definition der Knotenverteilung zu der in (Abbildung 5-42) dargestellte Vernetzung führen würde. Die Berechnung wird nicht richtig durchgeführt werden, da das Verhältnis der Länge zur Breite der Zellen (Aspect Ratio) sehr groß ist.

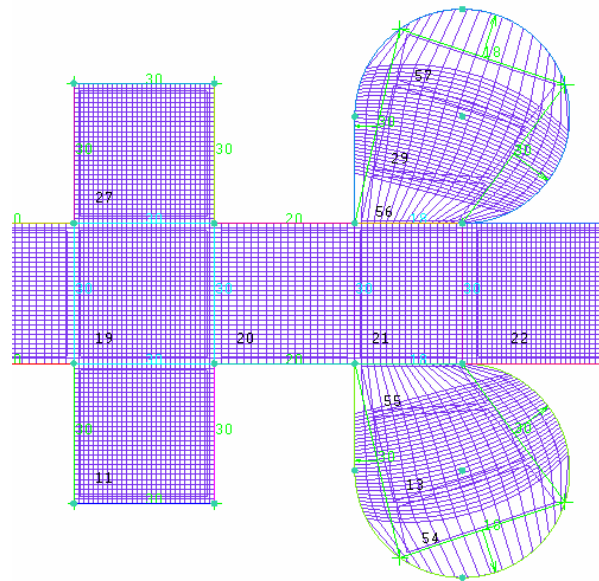


Abbildung 5-42: Vernetzung ohne O-grid

Um den Aspect Ratio (Verhältnis der Zellkantenlängen zueinander) klein zu halten werden die beiden vier-kantigen Blöcke in der Kammern werden im Inneren (Abbildung 5-43 links) geteilt. Das führt zu einer erhöhte anzahl von Knoten die aber für eine korrekte Rechnung im CFD Code notwendig sind. Das rechte Bild zeigt die generierten Kanten in der Mitte der Blöcke. Dadurch wird eine zusätzlich Kante erzeugt, deren Zellenanordnung in Umfangsrichtung der kreisrunden Kammern steht. Die Qualität des Netzes ist dadurch gewährleistet.

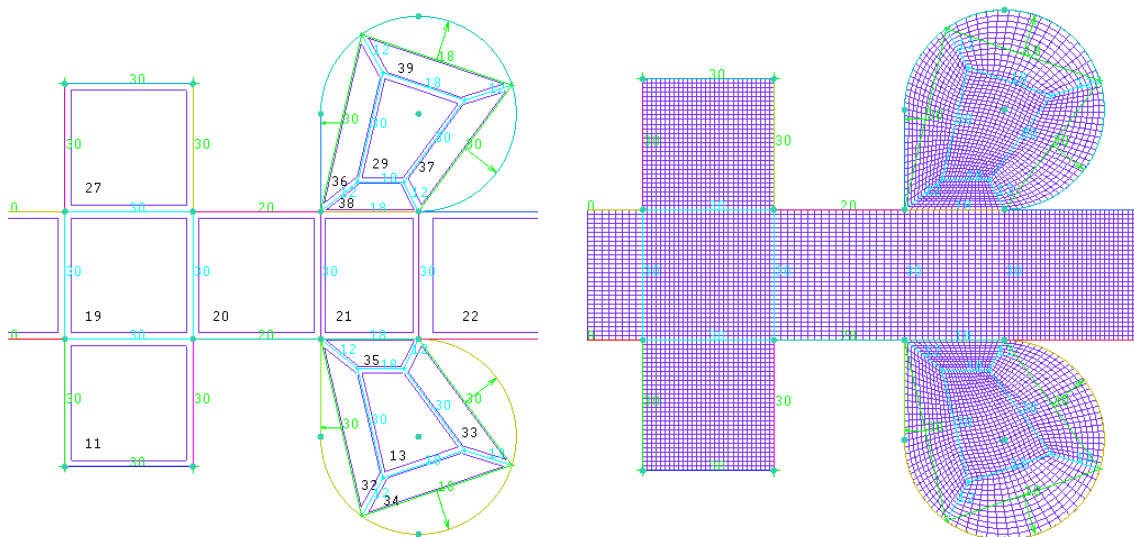


Abbildung 5-43: Blocking und Vernetzung mit O-grid

Um das Netz für eine CFD-Berechnung verwenden zu können, muss das Netz extrudiert werden. Dadurch werden zwei Symmetrie-Ebenen erzeugt, die eine im Wesentlichen schnellere CFD-Berechnung ermöglichen. Die folgende Abbildung 5-44 stellt das fertige Netz dar. Der Ausschnitt um die Resonanzkammern zeigt eine gezielte Verfeinerung, die über die Knotenzahl der einzelnen Kanten erreicht werden kann.

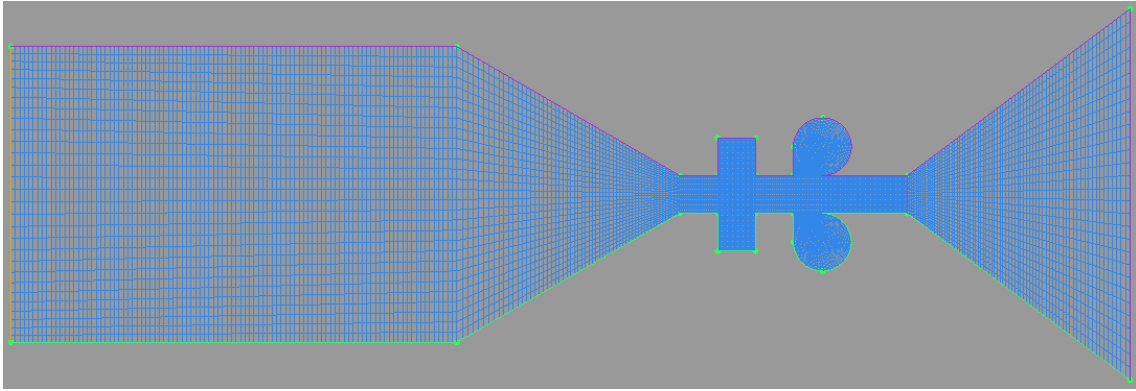


Abbildung 5-44: Das fertige Netz

Die folgende detaillierte Ansicht der Resonanzkammern (Abbildung 5-45) zeigt das 1-Zellen dicke Hexaeder Netz. Die Punkte, mit denen die Geometrie erzeugt wurden, sind auch auf der vorderen Netz-Ebene sichtbar.

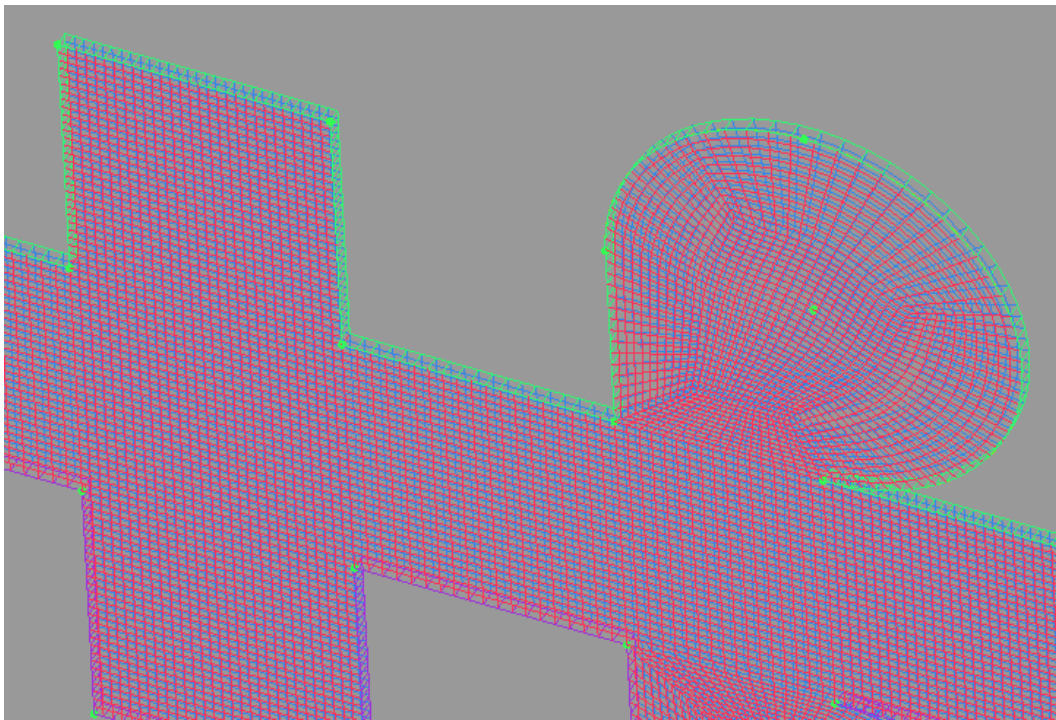


Abbildung 5-45: Extrudiertes Netz

In einem letzten Schritt wird das Netz-Format definiert und gespeichert. ICEMCFD ist ein universal einsetzbares Vernetzungstool und erlaubt, fertige Netze (Finite Elemente Vernetzung oder Finite Volumen Vernetzung) für eine Vielzahl von Solvers abzuspeichern. Der entsprechende Löser wird aus einer vorgeschlagenen Liste gewählt. Da die CFD-Simulation mit ANSYS CFX durchgeführt wird, muss das Netz im .cfx5 Format gespeichert werden.

5.11. CFD Simulation mit ANSYS CFX

Die CFD Simulationen wurden in der Softwareumgebung ANSYS CFX Version SP 11.0 durchgeführt. Abgesehen von den notwendigen Änderung um das Fluidum nach der Tait Gleichung zu definieren, wurden Standard Einstellungen für das Fluid Modell, Turbulenz Modell sowie für die Randbedingungen übernommen.

Die Durchführung einer CFD Simulation in ANSYS CFX besteht aus zwei Schritten. Erstens werden die Randbedingungen, Modell-Definitionen und andere Parameter wie Fluid-Wahl, maximale Iterationsschritte usw. im CFX Pre-prozessor Modul eingetragen. In einem zweiten Schritt wird das aktuelle Rechenmodell in einer Simulation mit dem Solver Modul durchgeführt. Anschliessend, nachdem die Rechnung gelaufen ist, werden die Ergebnisse im Postprozessor geladen und weiter bearbeitet.

Die Durchführung einer FFT im Post-prozessor Modul von ANSYS CFX besteht in dieser Software Version 11.0 keine Möglichkeit zur Automatisierung. Daher wurden die notwendigen Ergebnisse durch eine Skript im Post-prozessor aufgerufen und die Befehle zum Export derjenigen Ergebnissen im vorgegebenen Format ausgeführt. Anschliessend wurden diese mit einem Makro in Microsoft Excel nochmals bearbeitet, um die Frequenz-Maxima der einzelnen Läufe zu bestimmen.

Die ersten Simulationsläufe wurden einzeln durchgeführt. Angesichts der hohen Rechenlaufzeiten (ca. 20 Stunden) wurden die Simulationen im Batch Modus durchgeführt. Hiermit konnten vordefinierte Berechnungsläufe durch eine MSDOS Batchfile durchgeführt werden.

Für die CFD Simulationen wurden im Pre-prozessor folgende Einstellungen übernommen. Die Tabellen zeigen die Definition des Fluids (Tabelle 5-6), die Einstellung des Fluid Modells(Tabelle 5-7) sowie die Randbedingungen und Solver-Einstellungen (Tabelle 5-8) für die Simulationen. Komplette Datensätze des Simulationsmodells befinden im Anhang in Textform.

LIBRARY:	MATERIAL: IAF Water	Material Description = rho=f(t)
		Thermodynamic State = Liquid
		Thermal Expansivity = 0.000257 [K ⁻¹]
		Absorption Coefficient = 1.0 [m ⁻¹]
		Dynamic Viscosity = 0.0008899 [kg m ⁻¹ s ⁻¹]
	EQUATION OF STATE:	Density = dp
		Molar Mass = 18.02 [kg kmol ⁻¹]
		Refractive Index = 1.0
		Specific Heat Capacity = 4181.7 [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
		Thermal Conductivity = 0.6069 [W m ⁻¹ K ⁻¹]
		Reference Pressure = 1 [atm]
		Reference Temperature = 25 [C]
		Reference Specific Enthalpy = 0 [J kg ⁻¹]
		Reference Specific Entropy = 0 [J kg ⁻¹ K ⁻¹]

Tabelle 5-6: Definition von Wasser als Medium

FLOW:		
DOMAIN: Domain 1		
SIMULATION TYPE:	Option = Steady State	
EXPRESSIONS:	Massenstr=1.68 [kg s ⁻¹]	
DOMAIN MODELS:	REFERENCE PRESSURE:	Reference Pressure = 1e5 [Pa]
FLUID MODELS:	HEAT TRANSFER MODEL:	Option = Total Energy
TURBULENCE MODEL:	Option = k epsilon	
FLOW REGIME:	Option = Subsonic	
HEAT TRANSFER:	Option = Static Temperature	Static Temperature = 298 [K]
MASS AND MOMENTUM:	Mass Flow Rate = Massenstr	Option = Mass Flow Rate
TURBULENCE:	Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio	

Tabelle 5-7: Fluid- und Turbulenz-Modell

BOUNDARY CONDITIONS:	Boundary Type = INLET	Location = IN
	FLOW DIRECTION:	Option = Normal to Boundary Condition
BOUNDARY: OUT	Boundary Type = OUTLET	Location = OUT
BOUNDARY CONDITIONS:	FLOW REGIME:	Option = Subsonic
MASS AND MOMENTUM:	Option = Static Pressure	Relative Pressure = 1e5 [Pa]
BOUNDARY: WAND1	Boundary Type = WALL	Location = WAND1
BOUNDARY CONDITIONS:	HEAT TRANSFER:	Option = Adiabatic
	WALL INFLUENCE ON FLOW:	Option = No Slip
	WALL ROUGHNESS:	Option = Smooth Wall
SOLVER CONTROL:	ADVECTION SCHEME:	Option = High Resolution
CONVERGENCE CONTROL:	Maximum Number of Iterations =	Physical Timescale = 0.01 [s]
		Timescale Control = Physical Timescale
CONVERGENCE CRITERIA:	Residual Target = 0.001	Residual Type = RMS

Tabelle 5-8: Randbedingungen und Solver Einstellungen

5.12. Auswertung der Ergebnisse

Sowie für die Durchführung der einzelnen Simulationen werden die Ergebnissen anhand von Skripte ausgewertet. Durch die Ausführung einer Perl Skript, können bestimmte Werte aus den Rechenergebnissen in einem bestimmten Datenformat herausgeschrieben werden. In den Ergebnissen aus den Simulationen sind jeweils die Druckverläufe an unterschiedlichen Stellen notwendig, um die Vorgänge in der Strömung innerhalb der Düse zu beschreiben. Da diese Werte nicht mit Druckverläufe aus Messungen vergleichbar sind, wird im wesentlichen auf die Verhältnisse in der Strömung unmittelbar am Austritt der Düse bearbeitet.

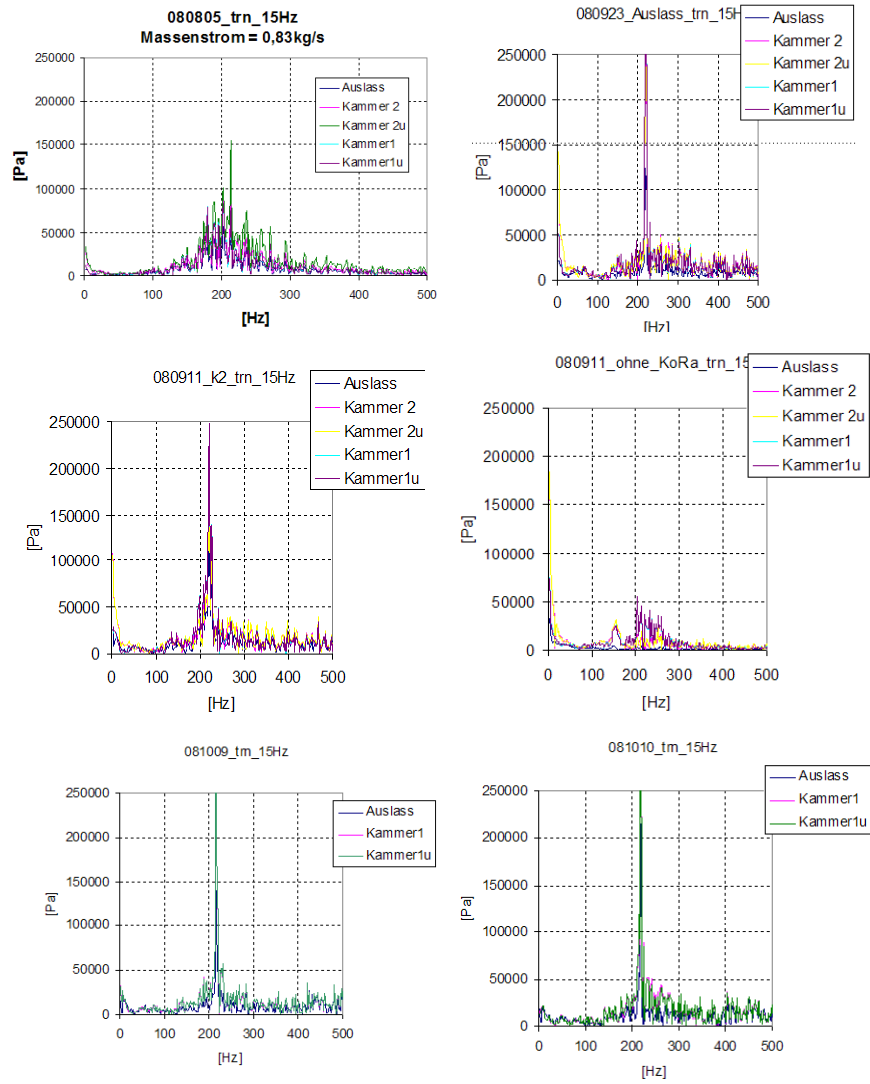
Wie schon erwähnt, wurden die Druckverläufe in einem von Microsoft Excel lesbarer Format (.csv) an ANSYS CFX Post mittels einer Batch exportiert. Diese Tabellen wurden dann in Excel im vorgegebenen Format importiert. Hier wurde eine FFT über die zeitlichen Druckverläufe durchgeführt. Die Amplituden-Maxima wurden dann in einer weiteren Excel Tabelle eingetragen. Der ganze Verlauf wurde mittels einem Excel Makro durchgeführt. Damit konnte am Ende einer Simulation-Batches mit mehreren Rechnungen, in wenigen Schritten alle Ergebnisse ausgelesen werden.

Als Vorbereitung auf den komplett automasierten Optimierungsprozess mit modeFrontier, wurden Geometrieänderungen mit anschliessenden Simulationen durchgeführt, um die mögliche Verkleinerung des Simulationsmodells zu untersuchen.

Ziel war, den Kontrollraum des Modells zu verkleinern, um damit einen Zeitgewinn bei akzeptablen Simulations-Ergebnissen zu erreichen. Dafür wurde die Generierung des Berechnungsgitters berücksichtigt, da dies eine wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Dabei konnte festgestellt, dass es kaum eine Verschiebung in der Frequenz des Druckamplitudenmaximums gibt.

Es wurde festgestellt das der Kontrollraum des Modells verkleinert werden konnte und das ein Simulationslauf auf eine Dauer von ca. 2 Stunden reduziert werden konnte.

Die folgenden Diagramm 5-1 zeigt die qualitativen Ergebnissen von Simulationen mit einer stufenweise verkleinertes Kontroll Voluminas. Es gibt kaum eine Verschiebung der Frequenzspitzen im Frequenzbereich.

**Diagramm 5-12: FFT bei veränderte Kontrollvolumine**

5.13. Optimierung mit modeFrontier

modeFRONTIER ist ein neu-entwickeltes multidisziplinäres und multikriterielles Design-Optimierungs Werkzeug der Firma Esteco. Im Bereich der CFD findet diese Anwendung effiziente Lösungen in und erlaubt die schnelle Optimierung von Bauteilen. Bei zeitaufwendige Simulationen können die unterschiedlichen Schnittstellen von mehreren Programmen so verknüpft werden, dass die Geometrieerzeugung, Simulationsberechnung und die Auswertung der Ergebnisse voll-automatisiert abläuft. Dabei werden alle vordefinierten Designparametern vom Optimierer „durchgespielt“ bis die Zielgröße und Zielrichtung (z.B. Maximum) erreicht werden.

Im folgendem Diagramm 5-13 wird der Optimierungsprozess für die Düse dargestellt. Eine Grundgeometrie wird mit ICEMCFD erstellt und vernetzt. Das vernetzte Modell wird in den Präprozessor von ANSYS CFX importiert, wo vordefinierte Randbedingung gesetzt werden. Im nächsten Schritt wird die Rechnung im Solver (Löser) durchgeführt. Die notwendigen Ergebnisse werden dann im Postprozessor extrahiert und in modeFrontier aufgerufen. In diesem Fall wird bei gegebener Geometrie zuerst eine stationäre Berechnung durchgeführt, deren Ergebnissen als Anfangswerte für die zweite instationäre Berechnung benutzt werden. Der Druckverlauf (am Austritt der Düse) der transienten Berechnung wird in modeFrontier eingelesen, wo eine Fourier-Transformation (FFT) die Ergebnissen im Frequenzbereich umrechnet. Es wurde das FFT Module von modeFrontier verwendet nachdem eine gute Übereinstimmung mit einem Matlab FFT in den ersten Simulationen festgestellt wurde. Dadurch konnte das Matlab Modul aus dem ursprünglichen Modell weggelassen werden.

Als Ziel wurde eine Maximierung der Frequenzamplitude in modeFrontier vorgegeben. Dieses Ziel konnte durch Geometrie-Variationen erreicht werden. Diese Geometrieparameter im ICEMCFD Grundmodell werden in der modeFrontier Umgebung als Variablen definiert.

Dadurch kann eine gesamte Prozessschleife für die Optimierung gebildet werden um die effizienteste Geometrie zu erzeugen.

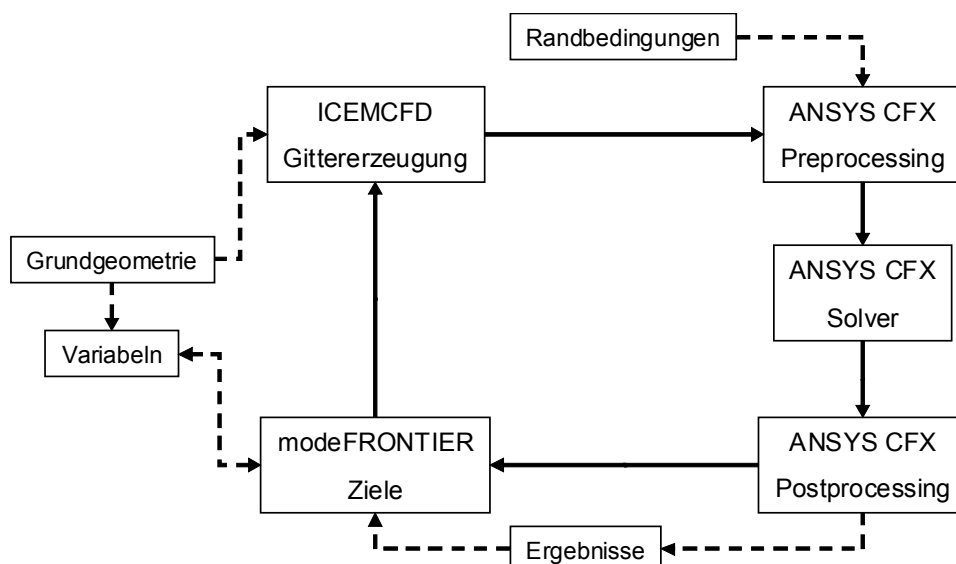


Diagramm 5-13: Arbeitsfluss in modeFrontier

Die Geometrieänderung wird über zwei Variablen definiert. Alle notwendigen Maßen werden von diesen beiden Variablen abhängig, so dass die Anzahl der Knoten auch dementsprechend vergrößert bzw. verkleinert werden. Der Ausgangswert für die Variable R basiert auf den Vertex 66 mit den absoluten Koordinaten (51, 0, 0). Die anderen Punkte y_{11} , y_{12} , y_{21} , y_{22} sowie x_2 werden als Funktionen von R berechnet. Die Vernetzungsparametern werden auch als Funktionen von R definiert. Abbildung 5-46 zeigt die veränderbaren Parameter und deren Position in der Geometrie.

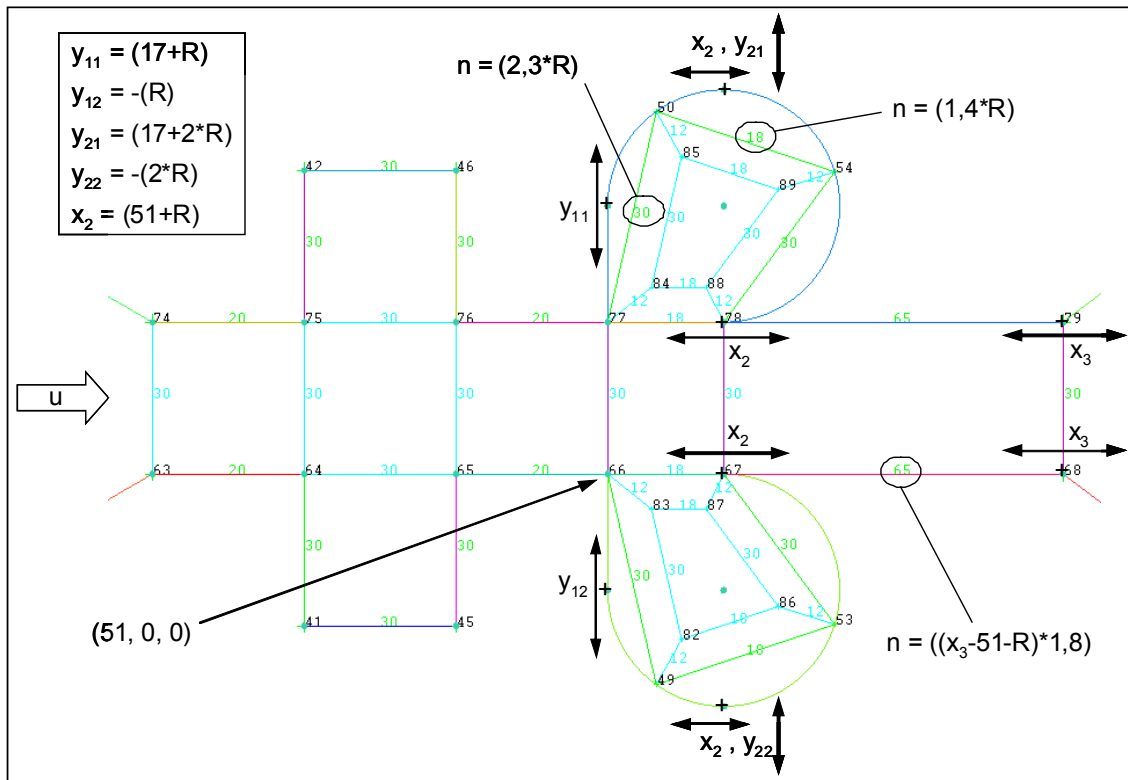


Abbildung 5-46: Kammergeometrie in Abhängigkeit von Parameter R

Die Verhältnissen der Variablen zueinander ist im folgenden Excel Diagramm 5-14 sichtbar. Das Diagramm stellt die Punkte für zwei Werte von R dar. Der Wert von x_3 bleibt dadurch unverändert.

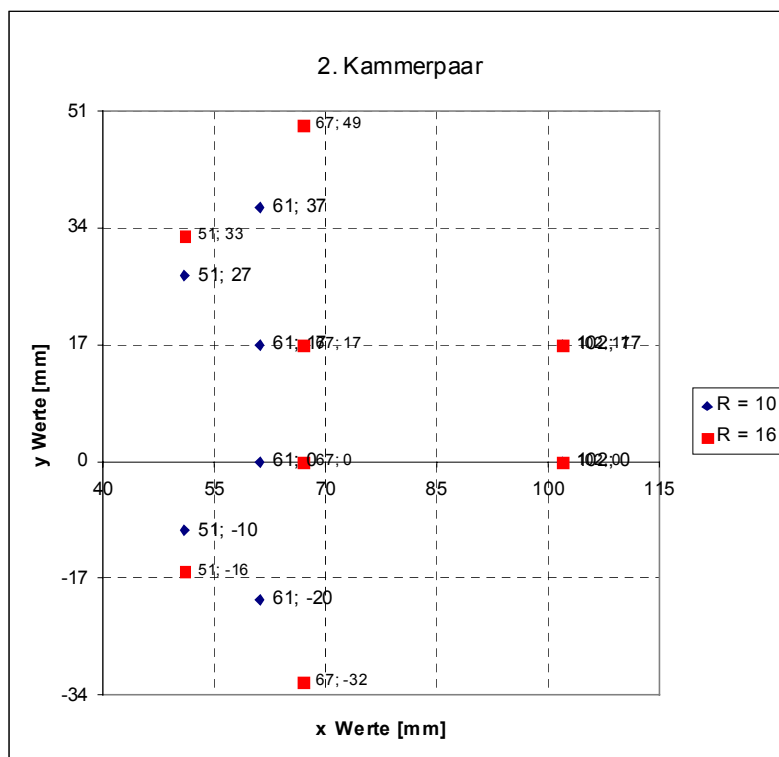


Diagramm 5-14: Geometrie der 2. Kammer

Diese Verhältnisse der Punkte zueinander werden in der Umgebung von modeFRONTIER (mF) genau nachgebildet. Die zwei Variablen werden als Input Variables definiert. Unter den Eigenschaften werden Anfangswert und Endwert sowie die Schrittgröße eingetragen. Das Format der Zahl wird auch definiert. Dadurch kann erreicht werden, dass die Knotenanzahl für das Netz nur ganzzahlig ist. Die davon abhängigen Werte werden als Transfer Variablen mF Knoten „Input File“ im ICEMCFD Skript an den entsprechenden Stellen eingetragen. Damit ist der Teil, der für die Netzgenerierung zuständig ist, erledigt, alle Eingangsgrößen in mF eingetragen (Abbildung 5-47).

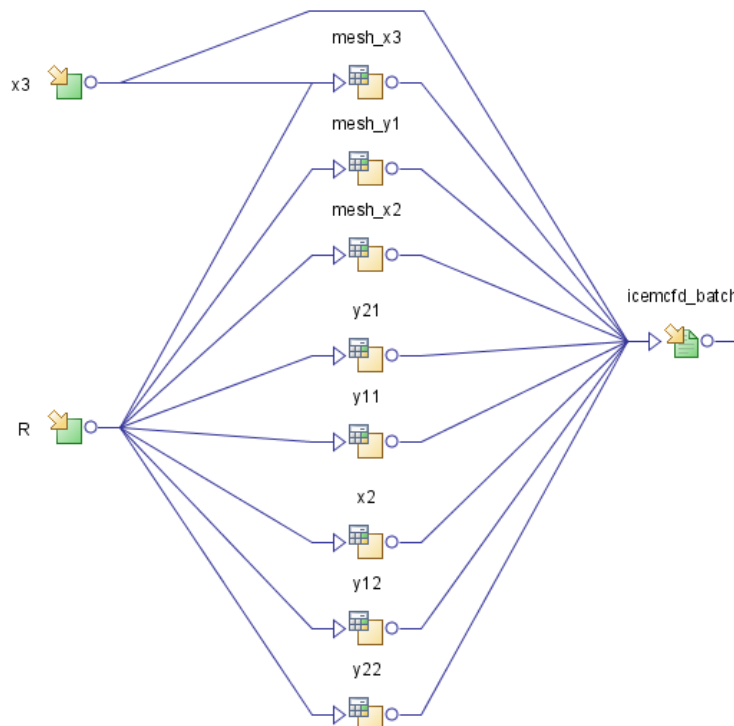


Abbildung 5-47: Eingangsvariablen in mF

Die Programme ICEMCFD und CFX werden im Batch Modus angesteuert und laufen im Hintergrund. Daher sind keine graphische User-Interfaces sichtbar. Die Codes werden mit DOS-Befehlen gesteuert. Diese Befehle werden in mF im „Script Node“ eingetragen. Alle Skripte befinden sich im Anhang. Der erste DOS Batch mit dem Befehl zur Netzgenerierung ist mit dem ICEMCFD Batch Skript verbunden. Das Netz wird durch Ausführen dieses Skripts erstellt.

Das Pre-processing verläuft im zweiten Script Node. Hier wird das Netz über ein „Transfer File“ (Übertragungsdatei) in den CFX-Preprozessor geladen und die Randbedingungen definiert. In einer weiteren Befehlszeile wird der CFX Solver (Löser) aufgerufen, der die Berechnung durchführt.

Die Steuerung der Designs und die Abläufe innerhalb von mF erfolgt über einem „Logic Node“ (logischer Knoten) DOE (Design of Experiments), der zusammen mit einem Scheduler Knoten (Abbildung 5-48, rot umrandet) verbunden ist. Der DOE Algorithmus erzeugt die Anfangswerte für den ersten Satz von Designs, die berechnet werden sollen. In den Eigenschaften des DOE kann von einer Vielzahl von Algorithmen sowie deren Parameter (z.B. Anzahl von Designs) gewählt werden. Die DOS Batch Knoten sind in blau umrandet.

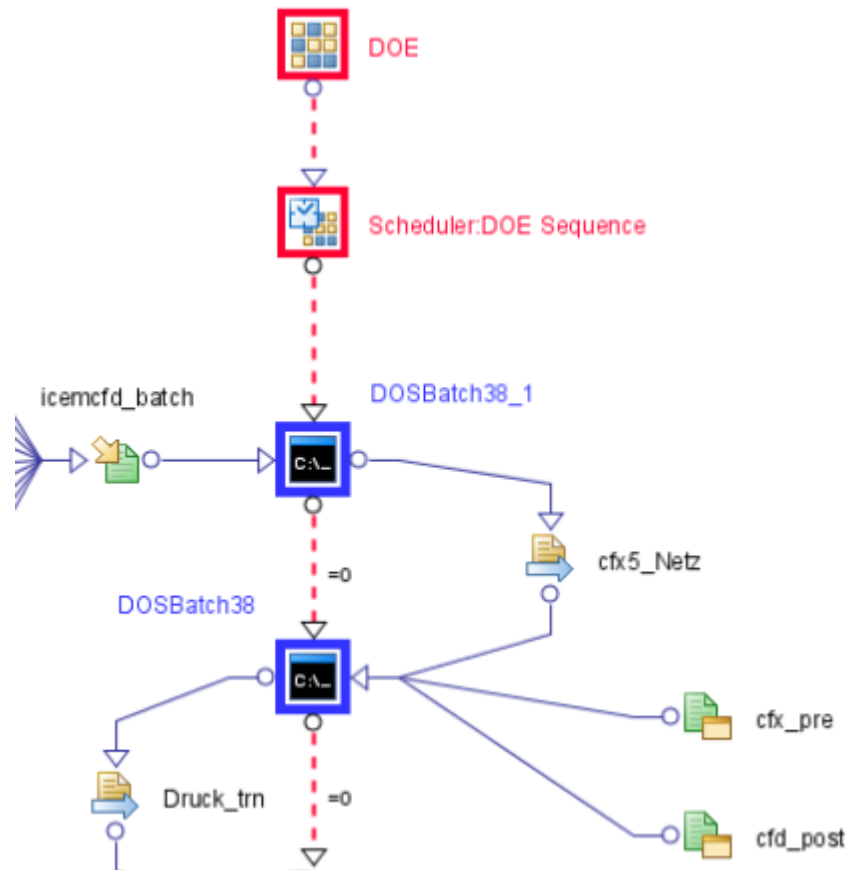


Abbildung 5-48: Scheduler und DOS-Knoten

Im Scheduler Node wird festgelegt, welche Designs evaluiert werden. Mithilfe des Algorithmus im Scheduler kann die Strategie die zur Wahl der DOE sowie zur Erzeugung von neuen Designs bestimmt werden. Hier wurde der Algorithmus SIMPLEX für nicht-lineare Optimierungsanwendungen verwendet. SIMPLEX ist ein Polyhedron mit $N+1$ Punkte im N -dimensionalem Raum (in 2-Dimensionen: Dreieck, in 3-Dimensionen: Tetraeder, usw.).

Die Simulationsergebnisse für den Druckverlauf wird über eine Transfer Variable in zwei ein-spaltige Dateien (Zeitreihe, Druckwerte) getrennt. Diese beide Dateien werden dann im modeFrontier Rechner verwendet um die FFT durchzuführen (Abbildung 5-49). Der Ausgabewert des Rechners ist das Druckamplituden-Maximum der in ie Datei „VALUE“ geschrieben wird.

Am Ende der Schleife wird das Ziel definiert (Objective). Hier wird eine Maximierung definiert.

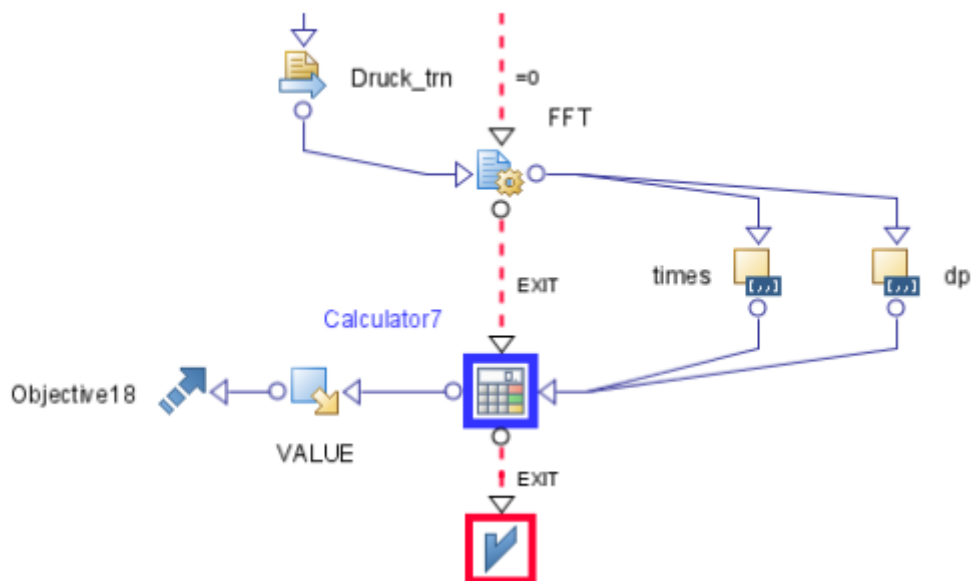


Abbildung 5-49: FFT und Zielgröße

Die Ergebnisse der Optimierung zeigen den Zusammenhang zwischen Betriebsdruck und den beiden Optimierungsparameter (Kammerradius und Abstand zwischen das zweite Kammerpaar und der Austritt der Düse) in den folgenden Diagrammen. Die Optimierungsläufe wurden für unterschiedliche Drücke in drei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wurde nur die Radien der zweiten Kammern als variabler Parameter definiert. In mehreren Optimierungsläufe wurde der optimale Kammerradius für unterschiedliche Drücke bei konstanter Austrittslänge berechnet. Dieser Verlauf ist in Diagramm 5-15 dargestellt.

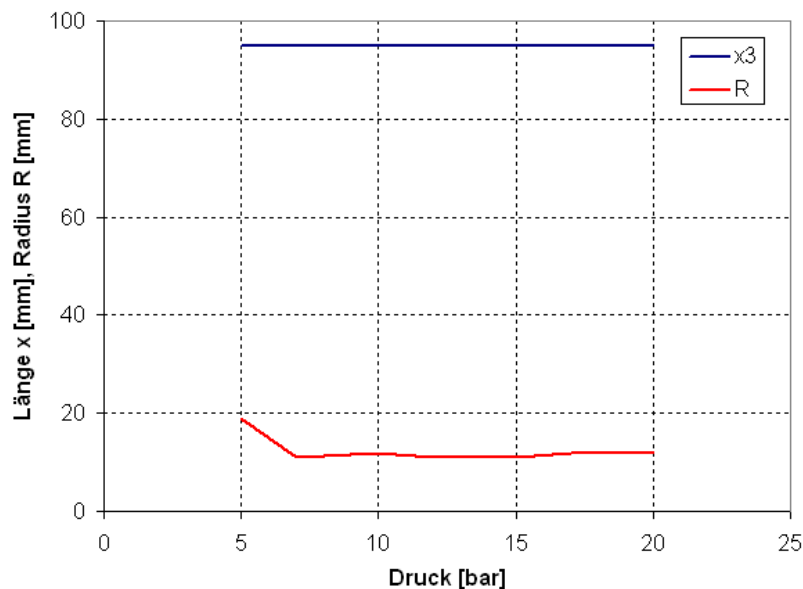


Diagramm 5-15: Variabler Radius

Das folgende Diagramm 5-16 zeigt die Werte für den Kammerradius bei einer anderen Austrittslänge (Länge = 100 mm). Das Verlauf der Radius in diesem Fall ist sichtbar anders.

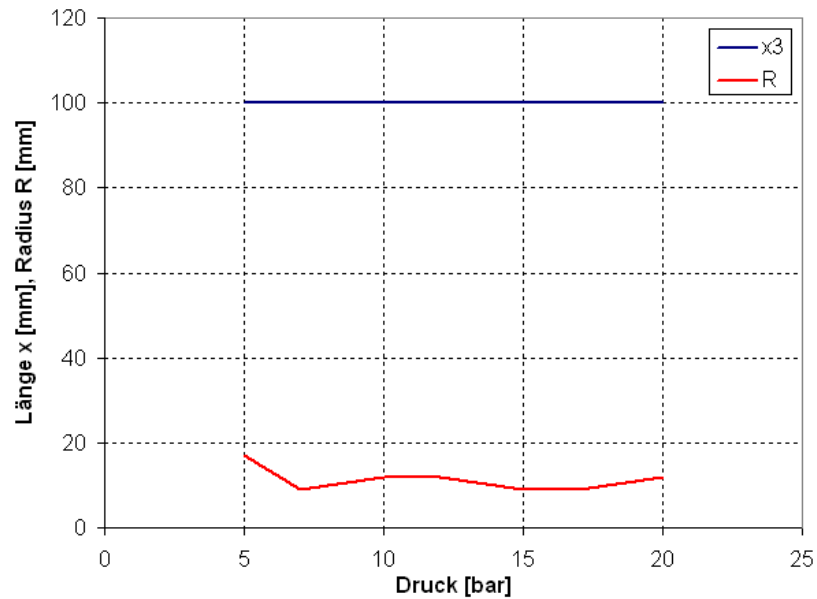


Diagramm 5-16: Variabler Radius für Länge = 100 mm

Für die beiden Austrittslängen zeigt sich ein Peak in der Frequenzamplitude im FFT. Diagramm 5-17 zeigt ein drei-dimensionales Bild der beiden obigen Ergebnissen.

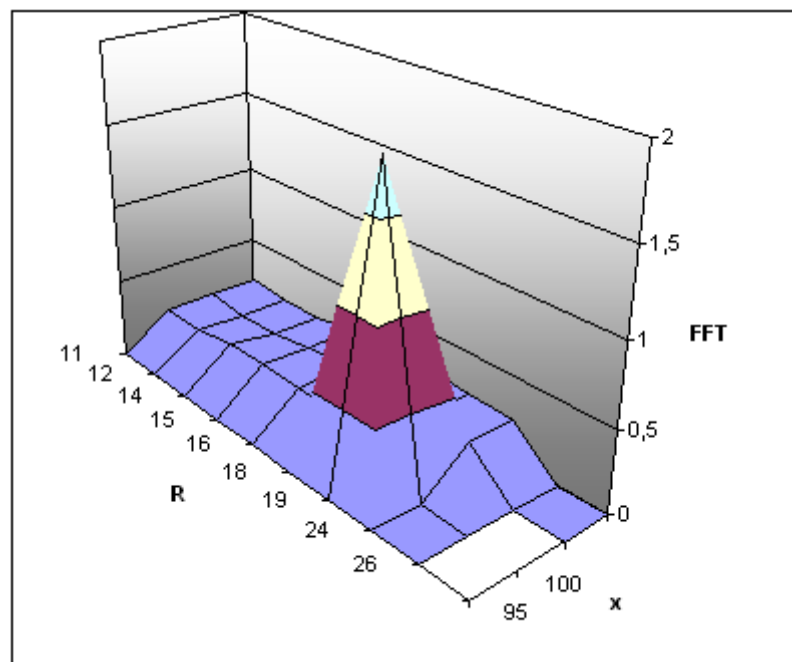
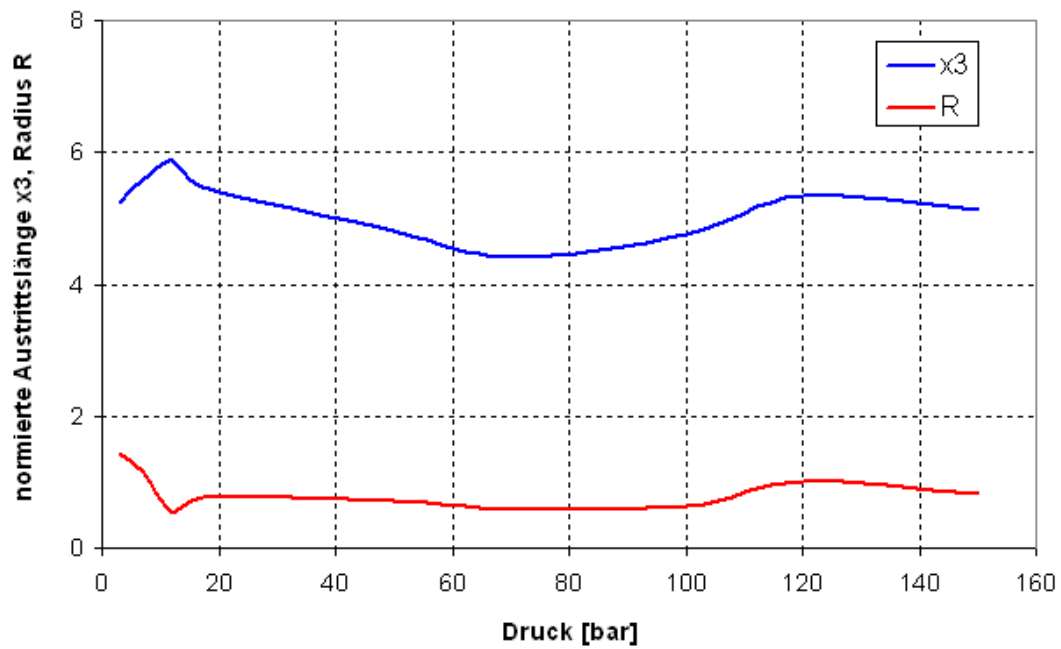


Diagramm 5-17: Verhältnis Länge x, Radius R und FFT

Im letzten Schritt der Düsenoptimierung wurde die Austrittslänge auch als Variable definiert. Die Austrittslänge sowie der Kammerradius wurde über den Düsenradius normiert. Optimierungsverläufe wurden für einen Betriebsdruck der Anlagen von 3 bar bis 150 bar durchgeführt. Dieser Druckbereich ist repräsentativ für das Wasserstrahlentgraten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Diagramm 5-18 aufgetragen.

**Diagramm 5-18: Geometrieparameter**

Im Niederdruckbereich ist der Einfluss der Kammerradien eher gering. Bei ca. 12 bar nimmt er jedoch zu. Wird der Druck erhöht so wird die maximale Pulsationsdruckamplitude stark durch die Austrittslänge beeinflusst. Ab Drücke von ca. 75 bar steigt der Kammerradius sowie die Austrittslänge für die stärkste Druckschwankung. Im Hochdruckbereich werden bei 125 bar die größten Düsenmaße erreicht.

5.14. Konstruktion

Die Konstruktion der Düse wurde bei der Fa. Piller anhand von Platzverhältnissen in Entgratanlagen untersucht und durchgeführt. Der Einsatz in einer „Waschanlage“ in der Bauteile gereinigt werden ist in einem Anlagen-Prototyp vorgesehen. Diese Anlage ist nach Kunden-Spezifikationen geplant, und wird im Niederdruck-Bereich (7 bar bis 10 bar) eingesetzt.

Als Anwendungsbeispiele für den Einsatz der Düse mit Resonanzkammern wurden folgende Entgratanlagen der Firma Piller vorgestellt.

Das Informationsmaterial stammt von der Firma Piller

5.14.1. Entgratanlagen

Die Arbeitseinheiten VectorJet II und VectorJet III in Verbindung mit der Hochdruckeinheit WSD 22 sind die am häufigsten eingesetzte Anlagen aufgrund ihrer hohen Flexibilität. Der Einsatzbereich ist über die Bauteilgröße bestimmt und eignet sich für kleine und mittlere Serien. Häufig kommt es dazu, dass eine weitere Reinigung stattfinden muss, um den hohen Reinheitsgrad für eine Weiterbearbeitung bzw. Montage eingehalten wird.

Daher wird im Anschluss an diesen Entgratprozess eine Waschanlage konstruiert. Hier können die Bauteile durch die neuentwickelte Reinigungsanlage (bestehend auf Behälterstation und Arbeitseinheit) gewaschen werden.

Hier wird mit ca. 600 l/min Volumenstrom bei einer Waschwassertemperatur von ca. 60 °C gearbeitet. Die Werkstücke befinden sich in einem Waschkorb, welcher über ein Rollenband in und durch die Arbeitseinheit der Reinigungsanlage gefahren und gedreht wird. Es können, je nach Platzverhältnisse, bei gegebenem Volumenstrom bis zu 32 der neuentwickelten Düsen eingesetzt werden.

Des Weiteren können die Kundenanforderungen nach getrockneten Bauteilen ebenfalls erfüllt werden. Hier stehen die hauseigene Abblasstation und der Vakuumtrockner zur Verfügung.

Alle Komponenten können in einer Prozesskette zusammengefasst und automatisiert werden. Damit kann die Anwendungsbreite der Düsen in einem Arbeitslauf an mehreren Stellen der Arbeitskette ausgenutzt werden.

Folgend sind die technischen Daten der Entgratanlagen die mit den neuentwickelten Düsen bestückt werden. Die Anlagen werden in Abbildung 5-50 und Abbildung 5-51 dargestellt.

VectorJet II**Abbildung 5-50: Entgratanlage Vector II**

Arbeitseinheit

Maschinenverfahrwege	x = 400 mm y = 300 mm z = 620 mm
Eilganggeschw. x-y-z	45 m/Min.
Betriebsspannung/Frequenz	3 x 400 V / 50 Hz
Anschlussleistung	35 kVA
Stromaufnahme gesamt	50 A
Steuerspannung	24 V DC
Leergewicht	ca. 3.800 kg
Betriebsgewicht	ca. 3.850 kg
Abmessung L x B x H	1,7 x 1,9 x 3,3 m ³
Steuerung	Siemens 840DBosch Rexroth Indramotion MTX

Maschinenkonzept: Flexibles, vertikales NC-Wasserstrahlzentrum mit C-Achse für kleinere und mittlere Serien, mit sehr guter Zugänglichkeit und manuell oder automatisch zu beladender Werkstückspannvorrichtung, die selbst wiederum einfach ausgetauscht werden kann. Sehr gute Schallschutzisolierung und kompakte Bauweise.

Werkstückspektrum: Bauteilgrößen bis: Höhe 500 mm x \varnothing max. 550 mm Bauteilgewicht: maximal 250 kg

Vorteile: Palettensystem für automatisierte Werkstückzufuhr; Schnellwechselsystem bei manueller Werkstückaufspannung.

VectorJet III

Abbildung 5-51: Entgratanlage VectorJet III

Arbeitseinheit

Maschinenverfahrwege	x = 900 mm y = 850 mm z1..3 = 550 ... (900) mm
Eilganggeschw. x-y-z	45 m/Min.
Betriebsspannung/Frequenz	3 x 400 V / 50 Hz
Anschlussleistung	58 kVA
Stromaufnahme gesamt	84 A
Steuerspannung	24 V DC
Leergewicht	ca. 8.800 kg
Betriebsgewicht	ca. 9.000 kg
Abmessung L x B x H	3,9 x 2,6 x 3,1 m ³
Steuerung	Siemens 840D

Maschinenkonzept: Horizontales NC Wasserstrahlzentrum mit Schwenktisch und Schott mit bis zu 3 Bearbeitungsachsen. Für mittlere Serien und für größere Teil (z.B. Motoren, Kurbelwellen...). Wie VectorJet II voll automatisier- und verkettbar.

Werkstückspektrum: Bauteilgrößen bis: Höhe 800 mm x \varnothing max. 720 mm Bauteilgewicht: max. 250 kg

Vorteile zu VectorJet II: Bearbeitungsvorgang und Einlage neuer Werkstücke gleichzeitig Portalbelastung für schwere Teile von oben möglich

5.14.2. Reinigungsanlage

Da die Reinigungsanlage sich noch in der Konstruktion befindet, sind noch keine Abbildungen angefertigt worden. Es können auch keine detaillierte Spezifikationen angegeben werden da diese Anlage auf Kundenwunsch ausgelegt ist. Die folgende Abbildung 5-52 zeigt die Behälterstation, die an der Anlage angebracht wird.

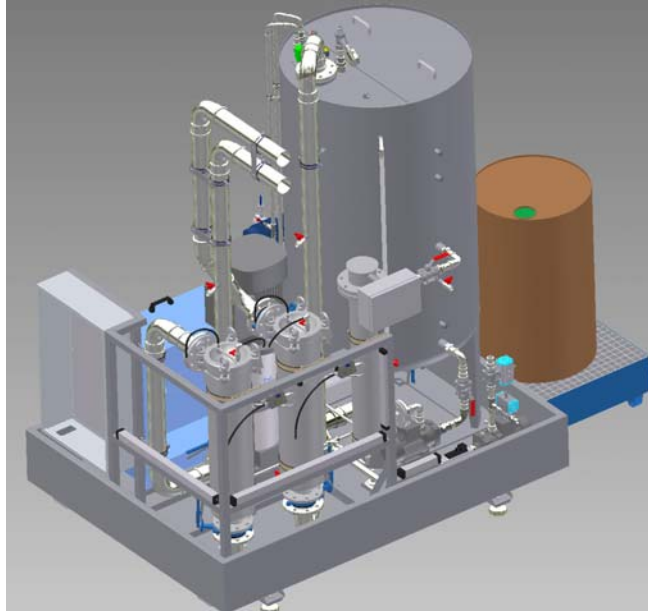


Abbildung 5-52: Behälterstation der Reinigungsanlage

Die Leitungen von der Behälterstation werden zur Waschanlage geführt wo das Bauteil gereinigt wird. Diese Anlage ist in der Abbildung 5-53 dargestellt.

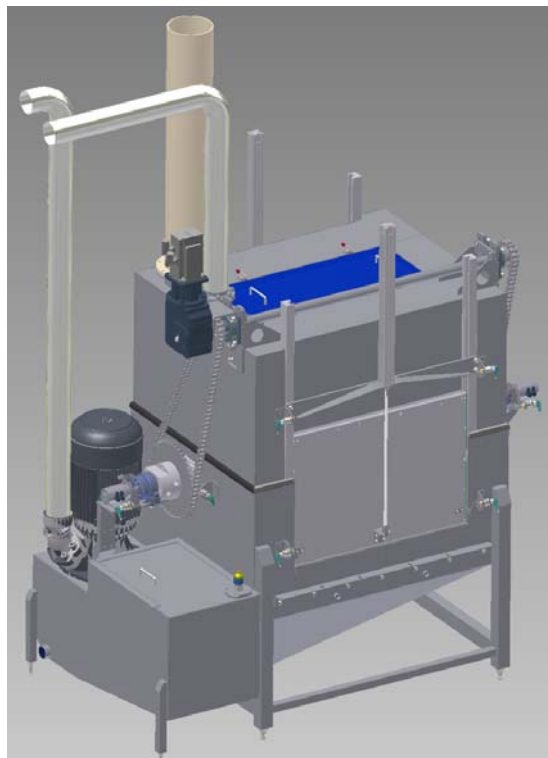


Abbildung 5-53: Arbeitseinheit der Reinigungsanlage

Nachdem das Bauteil die vorgegebene Waschdauer überschritten hat, kann es der Wascheinheit entnommen werden und weiter bearbeitet werden. Soll das Bauteil auf Wunsch des Kunden auch getrocknet werden, so geschieht dies in einem zur Anlage angeschlossenen Vakuumtrockner (Abbildung 5-54).

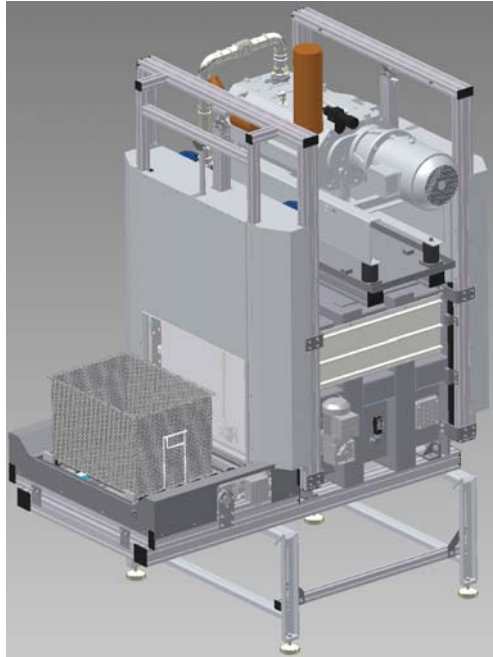


Abbildung 5-54: Vakuumtrockner mit Wäschekorb

6. Fazit

Ergebnisse aus dem Vorgängerprojekt haben gezeigt, dass eine rein mechanische Pulsationserzeugung im Strahl schlecht realisierbar ist. Daher wurden Untersuchungen am Flachwasserkanal durchgeführt wobei die Pulsationserzeugung mithilfe von Resonanzkammern erzeugt wurden. Diese Resonanzkammern befinden sich im engsten Querschnitt der Düse. Die Grundfrequenz der Pulsation wurde von der Kammergeometrie festgelegt. Um diese zu verstärken, wurde ein zweites Kammerpaar in der Düse angebracht.

Ein Prototyp der Düse wurde erstellt und erprobt. Aufgrund der sehr schnellen Abläufe innerhalb der Düse konnten keine brauchbaren Messungen durchgeführt werden. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen haben eine Pulsation im Strahl gezeigt, die qualitative Aussagen ermöglichen. Durch eine Umskalierung wurde ein größeres Modell erstellt. Dadurch verlangsamten die physikalische Prozesse innerhalb der Düse.

Die Auswertung der Aufnahmen des vergrößerten Modells zeigt eine gute Übereinstimmung der Pulsationsfrequenz im Wasserstrahl des Versuchsmodells und im Simulationsmodell. Anhand dieser Ergebnisse konnten die Randbedingung für die Strömungssimulation für das parametrisierte Modell unverändert übernommen werden. Das parametrisierte Modell dient als Basis für den folgenden Optimierungsprozess.

In der Optimierungssoftware-Umgebung wurden Geometrieerzeugung, Strömungssimulation, Auslesen der Simulationsergebnisse (Post-processing) und die anschließende Auswertung der Ergebnisse zu einem Prozess vereint. Durch die parametrisierte Geometrieerzeugung konnte das vorgegebene Ziel (Maximierung der Pulsations-Druckamplitude am Auslass der Düse), durch Simulationen in einer vorgegebenen Anzahl von Modellvarianten erreicht werden.

Durch mehrere Simulationsläufe konnten die Geometrie-Parameter und Massenströme für unterschiedliche Betriebspunkte in einem Diagramm zusammengefasst werden. Dieses bildet die Basis für die Auslegung von Düsenkammern für bestimmte Anwendungen und Druckbereiche.

Die Mechanismen, die zu einer Pulsation im austretenden Wasserstrahl führen, sind in dieser Arbeit nicht im Detail erfasst. Es bestehen genügend Gründe zur Weiteruntersuchung der Vorgänge, diese waren aber im Rahmen dieses anwendungsnahen Projekts nicht sinnvoll. Eine Auswertung der Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen in Zusammenhang mit hochempfindlichen Druckmessungen, die die Schwingungen messen können, würde dazu beitragen, die physikalischen Prozesse, die zur Druckschwankungen führen, weiter zu klären. Dieses Thema würde jedoch eher zur Grundlagenforschung zählen.

7. Literaturverzeichnis

- [Rie97] Rieger, H.: Kavitation und Tropfenschlag
Werkstofftechnische Verlagsgesellschaft m.b.H., Karlsruhe, 1997
- [KD98] Kuszla, P. Daru, V: Multifluid computation of droplets impact, Sixteenth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics, Springer Berlin / Heidelberg, 1998
- [DK03] Daru, V. Kuszla, P:Numerical investigation of compressible liquid impact
Laboratoire SINUMEF, Interne Bericht 2003
- [PM84] R.J. Puchala & M.M. Vijay, Study of an Ultrasonically Generated Cavitating or Interrupted Jet: Aspects of Design, Seventh International Symposium on Jet Cutting Technology, 1984