



DIPLOMARBEIT

Optische Vermessung des Strahls von Peltondüsen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.Ing. Christian BAUER

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus KÄFER

Institut für Energietechnik und Thermodynamik
Forschungsbereich Strömungsmaschinen

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaft
von

Thomas Lechner

Matr.Nr. 0725709

Untere Marktstraße 11, 3443 Sieghartskirchen

Wien, im Jänner 2016

.....
(Thomas Lechner)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Univ.Prof. Dipl.-Ing.Dr.Ing. Christian Bauer für die Leitung dieser Arbeit bedanken. Ein besonderer Dank gebührt meinem Betreuer Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing.Dr.tech Klaus Käfer, der mir stets zur Seite stand. Die vielen persönlichen Gespräche waren eine große Unterstützung als auch eine fachliche Bereicherung. Ganz herzlich möchte ich mich auch bei Josef Hering und Projektass. Dipl.-Ing. Anton Maly für ihre tatkräftige Unterstützung und Hilfe im Labor bedanken.

Auch möchte die Gelegenheit nutzen um mich auch bei meinen Eltern zu bedanken die dieses Studium ermöglicht haben und mich immer unterstützt haben.

Meiner Freundin Linda gebührt ein ganz besonderer Dank! Durch ihre Unterstützung in den letzten Jahren hat sie einem großen Teil dazu beigetragen, dass ich mein Studium in Kürze abschließen kann.

Ein großes Dankeschön auch an Julia, Gerald und Hedi für die Korrektur und ihre Hilfe.

Da diese Arbeit auch das Ende eines wichtigen Lebensabschnitts möchte ich mich auch bei meinen Kollegen und Freuden bedanken. Sie haben mein Studium zu einer unvergesslichen Zeit gemacht.

Wien, Jänner 2016

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Untersuchung des Freistrahls von unterschiedlichen Pelton-Düsen. Dabei handelt es sich um die Leitvorrichtung der Pelton-Turbine, wobei eine in Längsrichtung verschiebbare Nadel im Inneren für die Durchflussregulierung verantwortlich ist. Zweck der Diplomarbeit ist es weitere Erkenntnisse für den Betrieb von Pelton-Anlagen zu erhalten. Die Arbeit gliedert sich in zwei Teile, einerseits die Erstellung eines Messprogrammes und andererseits die Durchführung von Messungen an einem Modelversuch und die Auswertung der Daten.

Für die Entwicklung des Messprogrammes steht die graphische Programmieroberfläche LabView am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der Technischen Universität Wien zu Verfügung. Das Ziel ist es ein benutzerfreundliches und gleichzeitig flexibles Programm für die Vermessung des Wasserstrahls zu erstellen. Nach der genauen Positionierung der Kamera soll das Programm alle wesentlichen Einstellungen selbst vornehmen. Die Auswertung wird dann in Form von Tabellen und Grafiken an den Benutzer weitergegeben. Somit ist es möglich, Fehler in der Messung sofort zu erkennen und zu beheben.

Der zweite Teil der Arbeit beinhaltet die Messungen im hydraulischen Labor des Instituts. Hier ist es das Ziel, sowohl die Prüfung des selbstentwickelten Messprogrammes auf Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Benutzerfreundlichkeit, als auch die Untersuchung unterschiedlicher Düsen am Modelversuchsstand.

Hierfür wird der Strahl bei unterschiedlichen Betriebspunkten und verschiedenen Düsenkonfigurationen vermessen und ausgewertet. Durch die Variationen der Düsenstellung ist es möglich die unterschiedlichen Faktoren, die Einfluss auf die Strahlqualität nehmen, zu bestimmen. Darüber hinaus soll noch der Strahl von sogenannten Bremsdüsen vermessen und analysiert werden. Hierfür werden die Unterschiede in Form, Kompaktheit und Beschaffenheit des Strahls eine entscheidende Rolle spielen. Bei diesen Bremsdüsen handelt es sich um unregelmäßige Düsen, die im Unterschied zu Pelton-Düsen keine Einbauten wie eine Nadel aufweisen.

Abstract

This thesis deals with the investigation of the free jet of different Pelton nozzles. The nozzle is the guide of the Pelton turbine, where a sliding longitudinally needle inside is responsible for flow control. The intention of this thesis is to obtain further insights into the operation of Pelton plants. The thesis is divided into two parts, one part deals with creating a measurement program. In the second part the performance of the tests on a model turbine and the subsequent analysis of the data are described.

For the development of the measurement program, the graphic programming interface LabView is used. It is provided by the Institute of Energy Technology at the Vienna University of Technology. The goal is to create a user-friendly, flexible program for the measurement of the water jet. After the precise positioning of the camera, the program itself should configure all the key settings. The data is presented to the user in the form of tables and graphics. Thus it is possible to detect errors in the measurement instantly and to correct them.

The second part of the thesis includes the measurements in the laboratory. Its goal is the examination of the self-developed measuring program on reliability, accuracy and ease of use, as well as the investigation of different nozzles at the model test stand.

Therefore the free jet is measured and evaluated at different operating points and different nozzle configurations. By using variations of the nozzle position, it is possible to determine the various factors which have an influence at the quality of the jet. In addition to that the free jet of so called braking nozzle should be investigated. For this, the differences in shape, compactness and quality of the jet stream will play a crucial role. These brake nozzle is an unregulated nozzles are with no internals.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	1
KURZFASSUNG	2
ABSTRACT	3
INHALTSVERZEICHNIS	4
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
1. EINFÜHRUNG	8
1.1. HINTERGRUND ZUR PELTON-TURBINE	8
1.2. WIRKUNGSWEISE	9
1.3. AUFBAU EINER PELTON-TURBINE	10
1.4. BAUTEILE EINER PELTON-ANLAGE	11
1.4.1. LAUFRAD UND BECHER	11
1.4.2. PELTON-DÜSE	12
1.4.3. BREMSDÜSE	13
1.4.4. STRAHLABLENKER	13
1.5. BETRIEBSVERHALTEN	14
2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN	15
2.1. DIE PELTON-DÜSE	15
2.1.1. ENERGIEUMWANDLUNG IN DER DÜSE	15
2.1.2. SYSTEMGRENZEN DES DÜSENBEREICHS	16
2.1.3. STRÖMUNG IN DER DÜSE	17
2.1.4. VERLUSTE IN DER DÜSE UND WIRKUNGSGRAD	19
2.2. DER FREISTRAHL	21
2.2.1. EINSCHNÜRUNG DES WASSERSTRAHLS	21
2.2.2. STRAHLAUFWERTUNG UND RANDSCHICHT	22
2.2.3. STRAHLABLENKUNG Γ	24
2.2.4. OVALITÄT DES FREISTRAHLS	25
3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSUNGEN	27
3.1. DER PELTON-VERSUCHSSTAND	27
3.1.1. AUFBAU UND MUNDSTÜCKE	28
3.1.2. STEUERUNG DER DÜSENNADEL	29
3.1.3. STEUERUNG DER PUMPENDREHZAHL	30
3.2. MESSTECHNIK	30
3.2.1. DURCHFLUSSMESSUNG	30
3.2.2. DRUCKMESSUNG	32
3.2.3. BESTIMMUNG DER FALLHÖHE	32
3.3. OPTISCHE VERMESSUNG DES FREISTRAHLS DER PELTON-DÜSE	33
3.3.1. DIE KAMERA	33
3.3.2. VERMESSUNG VON OBEN	33
3.3.3. VERMESSUNG VON DER SEITE	35
3.3.4. BELEUCHTUNG	37

3.4.	VERMESSUNG DES STRAHL DER BREMSDÜSE	37
3.4.1.	AUFBAU DER BREMSDÜSE	38
3.4.2.	ZULEITUNG ZUR BREMSDÜSE	38
3.4.3.	OPTISCHE VERMESSUNG DES STRAHL DER BREMSDÜSE	39
3.5.	PROJEKTION UND FEHLERABSCHÄTZUNG	39
3.6.	MESSUNSICHERHEIT	40
3.6.1.	SYSTEMATISCHER FEHLER	40
3.6.2.	ZUFÄLLIGER FEHLER	41
3.7.	DAS MESSPROGRAMM	42
3.7.1.	KANTENDETEKTIERUNG	46
3.8.	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	47
4.	ERGEBNISSE UND INTERPRETATION	49
4.1.	DÜSENKENNLINIE	49
4.1.1.	DÜSENKENNLINIE DER BREMSDÜSE	52
4.2.	DURCHMESSER DES FREISTRAHLS	54
4.2.1.	QUALITÄT DER VERMESSUNG	55
4.2.2.	MINIMALE DÜSENÖFFNUNGEN	56
4.3.	KONVERGENTER BEREICH DES STRAHL	57
4.3.1.	KONVERGENZBEREICH DER BREMSDÜSE	59
4.4.	STRAHLAUFWERTUNG	60
4.4.1.	STRAHL DIVERGENZ DER BREMSDÜSE	63
4.5.	WIRKUNGSGRAD	64
4.6.	STRAHLACHSE	66
4.6.1.	STRAHLACHSE DER BREMSDÜSE	68
4.7.	OVALITÄT	69
4.7.1.	OVALITÄT DES BREMSDÜSENSTRAHL	72
5.	ZUSAMMENFASSUNG	73
6.	AUSBLICK	75
7.	LITERATURVERZEICHNIS	76
8.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	78
	ANHANG A	80
	ANHANG B	86

Abkürzungsverzeichnis

A	Querschnittsfläche
A_0	effektive Austrittsfläche
B	Magnetfeld (magnetische Induktion)
B10	kleinste Bremsdüse Öffnungsdurchmesser 10mm
B15	mittlere Bremsdüse Öffnungsdurchmesser 15mm
B15	größte Bremsdüse Öffnungsdurchmesser 20mm
c.....	Geschwindigkeit
d.....	Strahldurchmesser
g.....	Erdbeschleunigung
H.....	Höhe
l	Abstand zum Austritt entlang der Strahlachse
L	Abstand zwischen den Messelektroden
M1	Düsenmundstück, Öffnungsdurchmesser 49,6 mm
M2	Düsenmundstück, Öffnungsdurchmesser 22,8 mm
p.....	Druck
Q.....	Durchfluss
Q_1	Einheitsdurchfluss
r	Strahlradius
s	Nadelstellung
U.....	Spannung
v	Durchflussgeschwindigkeit
x	Koordinatenachse entlang des Strahls
z	Koordinatenachse normal auf die Strahlachse
0	Querschnitt am Austritt
1.....	engster Querschnitt
a.....	Düsenaustritt
AV.....	Anlagenverlust
e.....	Düseneintritt
F	Freihang

geo..... geodätische Höhe
h horizontale Messung
ow..... Oberwasser
th. theoretisch
v..... vertikale Messung

α Strahlaustrittswinkel
 β Strahlerweiterung
 γ Strahlablenkung
 φ Düsenbeiwert
 η Wirkungsgrad
 ρ Dichte

1. Einführung

Die ersten zwei Kapitel dieser Arbeit beinhalten die Grundlagen der Pelton-Turbine. Zuerst wird ein allgemeiner Überblick über Aufbau, Wirkungsweise und die Bauteile gegeben. Im nächsten Kapitel „Theoretische Grundlagen“ wird speziell auf die Düse einer Peltonanlage, die Strömung in der Düse sowie den Freistrahл eingegangen.

1.1. Hintergrund zur Pelton-Turbine

Bei der Pelton-turbine handelt es sich um eine teilbeaufschlagte Freistrahlturbine, die von dem amerikanischen Ingenieur LESTER PELTON konstruiert und 1880 patentiert wurde. Heute zählt sie zusammen mit den Erfindungen von Francis (1849) und Kaplan (1913) zu einer der drei gebräuchlichsten Turbinenbauformen. Im Unterschied zu anderen Freistrahlturbinen wie Ossberger oder Turgomaschinen findet sie aber auch Anwendung im großen Leistungsbereich. [1]

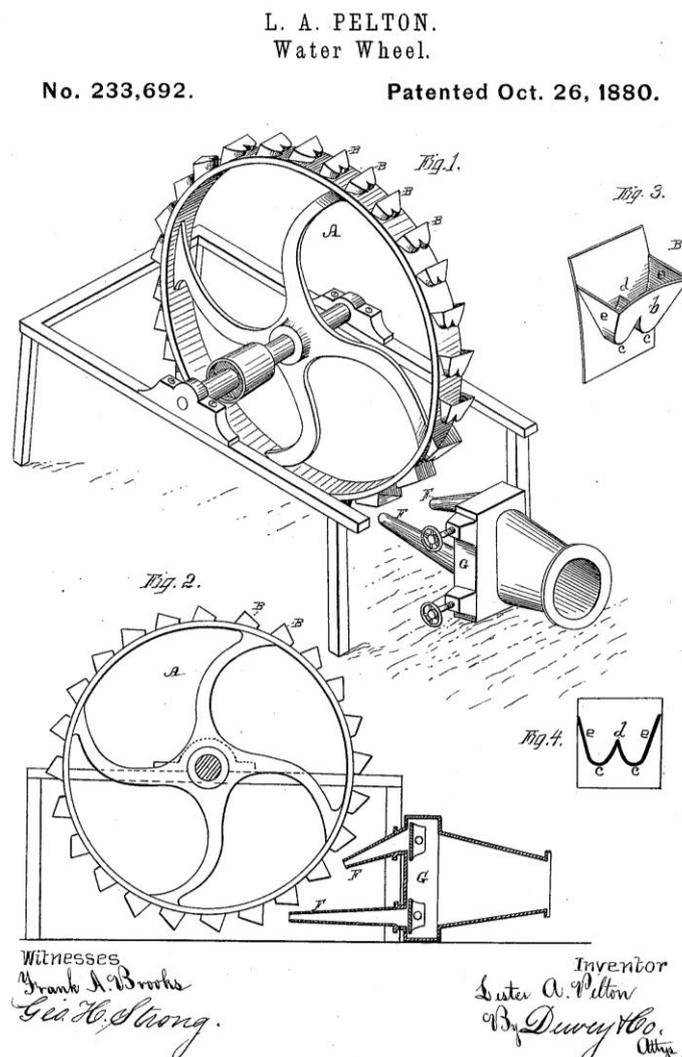


Abbildung 1: Patent von Lester Pelton 1880 [26]

Obwohl die Turbine in den letzten 135 Jahren in allen Bauteilen strömungstechnisch bzw. technisch weiterentwickelt wurde und der Gesamtwirkungsgrad auf über 90% gesteigert werden konnte, erinnert auch eine hochmoderne Pelton-Turbine in Bezug auf ihr Erscheinungsbild nach wie vor an ein klassisches Wasserrad. Gerade in den letzten Jahren konnten durch den Einsatz von Computerprogrammen Verbesserungen in der Geometrie bis ins kleinste Detail vorgenommen werden. Durch härtere Werkstoffe und neuartige Fertigungsmethoden sind nun Fallhöhen von bis zu 2000 Metern realisierbar. So ging um die Jahrtausendwende mit dem Kraftwerk Grande Dixence, in der Schweiz eine Anlage mit 1883m Bruttofallhöhe bzw. 1.869m nutzbarer Fallhöhe und einer Leistung von über 1200MW, erzeugt von drei liegenden Pelton-Turbinen, in Betrieb. Die Strahlggeschwindigkeit von knapp unter 700km/h zeigt, welche Belastungen auf die Bauteile moderner Anlagen wirken.

Pelton-Turbinen werden nur im Hochdruckbereich, insbesondere bei geringen bis mittleren Durchflüssen, eingesetzt. Der Einsatzbereich liegt bei mindestens 200m, meist aber erst ab 500m Fallhöhe und nahezu nur in Speicherkraftwerken. In den letzten Jahren werden sie im Bereich bis 650m Fallhöhe jedoch häufig von Francis-Turbinen verdrängt, da diese einen höheren Spitzenwirkungsgrad aufweisen. Klare Vorteile beweist die Pelton-Turbine durch ihre größere Unempfindlichkeit gegen schwankende Fallhöhen und deutlich kleinere Abmessungen. [2]

1.2. Wirkungsweise

Die Turbine arbeitet als Gleichdruckturbine, das Wasser hat sowohl vor, als auch hinter der Schaufel den gleichen Druck. In der Düse wird die Nettofallhöhe in Geschwindigkeit, eine Umwandlung von potentieller in kinetische Energie, umgesetzt.

$$c = \sqrt{2 g H} \quad (1)$$

Trotz der sehr hohen Geschwindigkeiten geschieht dies in den optimal ausgebildeten Düsen mit einem sehr hohen Wirkungsgrad. Der Freistrahл trifft dann auf ein mit Bechern besetztes Laufrad, wobei die Becher symmetrisch mit einer Doppelmulde und einer Mittelschneide ausgestattet sind. Der Strahl wird durch die Mittelschneide in zwei Teile getrennt und entlang der Mulde umgelenkt. Durch diese Umlenkung des Wasserstrahls in den Bechern wird die kinetische Energie an das Laufrad abgegeben. Die maximale Energieübertragung würde bei einer Umlenkung um 180° stattfinden. Da das ausströmende Wasser dann aber den nachfolgenden Becher bremsen würde, beträgt die übliche Umlenkung in etwa 170°. [3, 4]

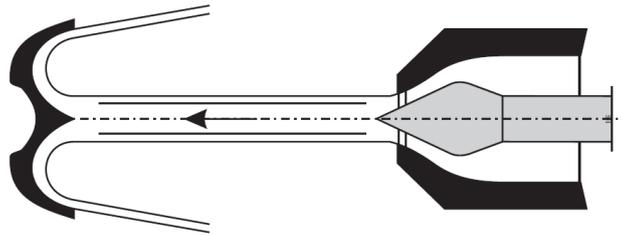


Abbildung 2: Umlenkung des Wasserstrahls im Becher [2]

Da nur immer nur ein Teil des Laufrads mit Wasser in Berührung kommt, spricht man von einer Teilbeaufschlagung. Bei Anlagen mit mehreren Düsen ist es möglich den Grad der Beaufschlagung zu regulieren, wodurch der Durchfluss pro Laufrad sehr stark variieren kann ohne die Anströmung zu verändern. Die nicht beaufschlagten Becher drehen sich nur in der Luft und unterliegen nicht der Reibung mit dem Arbeitsmedium. Dies hat auch den Vorteil, dass eine Vergrößerung des Laufraddurchmessers keine nennenswerte Erhöhung der Radreibung nach sich zieht. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass der Unterwasserspiegel niemals bis zum Laufrad aufsteigt, also ein Freihang vorhanden ist. Somit ist bei Pelton-Turbinen die Verwendung eines Saugrohrs nicht zweckmäßig. Die Austrittsenergie und der Freihang gehen somit verloren. Im Vergleich zu den Verlusten in den Rohrleitungen ist der Verlust des Freihangs meist sehr gering und somit zu vernachlässigen.

1.3. Aufbau einer Pelton-Turbine

Nach Gieseck und Mosonyi [2] unterscheidet man, je nach Fallhöhe und Wassermenge, zwischen Pelton-Turbinen mit horizontaler und vertikaler Welle. Bei liegender Welle können ein bis zwei Düsen je Laufrad verbaut werden, da die Zuleitung keine starken Krümmungen aufweisen sollte. Dafür besteht auch die Möglichkeit eines zweiten Laufrads, durch die Anordnung beidseits des Generators. Im höheren Leistungsbereich, bei größeren Fallhöhen und Durchfluss, wird meist die stehende Ausrichtung angewandt. Da das Fluid ohne gegenseitige Störung aus den Bechern austreten kann, ist es möglich bis zu sechs Düsen, über den Umfang verteilt, anzuordnen.

Das Turbinengehäuse ist so ausgeführt, dass das von den Schaufeln wegspritzende Wasser nicht wieder ins Laufrad zurückfließen kann. Im Vergleich zu Überdruckturbinen ist eine besondere Panzerung des Turbinengehäuses nicht notwendig und Stahlbeton meist ausreichend.

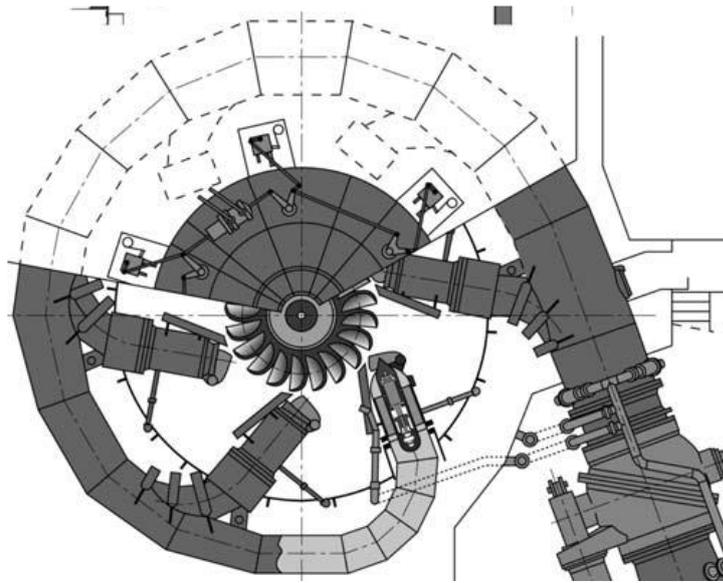


Abbildung 3: Vertikale sechsdüsige Pelton-Turbine mit innen geregelten Düsen [2]

Aufgrund der äußerst hohen Geschwindigkeiten ist es wichtig, das Triebwasser vor dem Eintritt in die Düse von Sand und anderem Geschiebe so gut wie möglich zu befreien. Zusätzlich kommt es dadurch, dass sich die meisten Anlagen im Hochgebirge befinden, durch Gletscherschliff zu einer erhöhten Belastung des Materials durch Abrasion, was zu Schäden führen kann. [1, 2, 5, 6, 7]

1.4. Bauteile einer Pelton-Anlage

1.4.1. Laufrad und Becher

Durch die stark unterschiedlichen Fallhöhen der diversen Anlagen, sind auch die Laufräder unterschiedlichsten Belastungen ausgesetzt. Bei größeren Belastungen werden Radscheiben und Becher aus legiertem Chrom-Nickel-Stahl in einem Stück gegossen. Dieses Material bietet ausreichend Stabilität sowie Elastizität, weist gleichzeitig eine hohe Beständigkeit gegenüber Abrasion auf und ist noch dazu schweißbar. Der Durchmesser kann hier bis zu 5m betragen. Die Becher werden am Ende der Fertigung durch Schleifen bzw. Funkenerosion in die endgültige Form gebracht

Bei der Belastung kann noch zwischen der Belastung durch die Fliehkraft und Strahlkraft unterschieden werden. Dadurch, dass die Strahlkraft nur auf einzelne Schaufeln wirkt, sind Pelton-Turbinen im Vergleich zu anderen Turbinentypen einer deutlich höheren Anzahl an Lastwechseln ausgesetzt.

Das vom Laufrad erzeugte Drehmoment wird im Normalfall ohne zusätzliches Getriebe über eine Welle direkt an einen Generator übertragen, mechanische Verluste des Getriebes entfallen somit komplett. Die Laufräder sind in der Regel so ausgelegt, dass es auch bei

doppelter Nenndrehzahl, das entspricht in etwa der Durchgangsdrehzahl, zu keinen sicherheitsrelevanten Problemen oder Gebrechen kommen kann. [1, 2, 5, 6]

1.4.2. Pelton-Düse

Bei den Düsen, den sog. Nadeldüsen, handelt es sich um die Leitvorrichtung der Pelton-Turbine, wobei die in Längsrichtung verschiebbare Nadel für die Durchflussregulierung verantwortlich ist. Entscheidend ist hierfür, dass sich der Austrittsquerschnitt ändert, ohne dabei Energieverluste durch Drosselung zu verursachen. [7, 8]

Für die Zuleitung zur Düse gibt es je nach Düsenzahl unterschiedliche Ausführungen. Ist nur eine Düse vorhanden, wie am Versuchsstand im Labor, erfolgt die Zuleitung über ein möglichst gerades Rohr oder einen Krümmer, bei zwei Düsen über ein sogenanntes Hosenrohr. Ab drei Düsen wird die Verbindung zur Druckleitung durch eine Ringleitung hergestellt. Die strömungstechnische Optimierung der Zuleitung ist von großer Bedeutung, da sie Auswirkungen auf den Freistrahler hat.

Für den Antrieb der Nadel gibt es zwei unterschiedliche Varianten, wobei die Art von der Größe der Maschine abhängt. Bei kleineren Maschinen ist der außenliegende Antrieb gebräuchlich, dabei wird der Nadelschaft durch den Krümmer nach außen geführt und abgedichtet. Der Stellmotor befindet sich somit außerhalb des Rohres. Ein wesentlicher Vorteil dieser Ausführung liegt in der besseren Zugänglichkeit des Stellmotors, der Nachteil besteht durch die Störung der Strömung. Maschinen größerer Abmessung werden meist mit innenliegenden Antrieben ausgestattet. Dabei liegt der gesamte Verstellantrieb im Düsenrohr und ist über ein Führungskreuz achsensymmetrisch befestigt. Neben dem Wegfall der Dichtungen am Nadelschaft besteht der größte Vorteil dieser Variante darin, dass die Strömung nicht durch den Nadelschaft gestört wird. Obwohl diese Bauweise den Nachteil der schlechten Zugänglichkeit und zeitintensiveren Reparaturen nach sich zieht, wird sie bei einem Großteil der Anlagen angewandt. [4, 9]

Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten und des oft im Wasser mitgeführten Sands sind vor allem Nadelspitze und Mundstück sehr großen Belastungen ausgesetzt. Bereits geringe Rauigkeiten entlang der Nadeloberfläche können zu einer Störung der Strömung und somit zu einem Qualitätsverlust im Strahl führen. Deshalb unterliegt die Nadel meist regelmäßigen Kontrollen. Um den Verschleiß zu minimieren, sind diese Bauteile aus hochfesten rostfreien Werkstoffen mit über 13% Chromstahl gefertigt aber gleichzeitig auch leicht auswechselbar. [7]

Entscheidend für die Qualität der Nadel ist eine stabile Lagerung und dass sie so konstruiert ist, dass zu jeder Nadelposition ein drallfreier und kreisrunder Wasserstrahl erzeugt werden kann. Das Strömungsverhalten in der Düse wird in Abschnitt 2.1.3 noch im Detail behandelt.

1.4.3. Bremsdüse

Um die großen rotierenden Massen einer Wasserkraftanlage (Generator, Laufrad und Welle) abzubremesen, werden Bremsdüsen in den Anlagen verbaut. Obwohl Bremsdüsen nur bei Notstillsetzungen zur Anwendung kommen sollten, werden sie von Betreibern auch im Normalbetrieb angewandt. Durch den Einsatz von Bremsdüsen kann der Stillsetzungsvorgang eines Laufrades deutlich beschleunigt werden, da große Maschinensätze mehrere Stunden benötigen würden bis sie auslaufen. In den meisten Fällen ist pro Laufrad eine Bremsdüse verbaut, die zentral auf den Becherrücken zielt. Bei Bremsdüsen handelt es sich, im Unterschied zu Pelton-Düsen, fast ausschließlich um unregelte Düsen. Die einzige Regulierung erfolgt über Absperrorgane in der Zuleitung. Dadurch entfallen alle Einbauten innerhalb der Düse. Dies führt dazu, dass sich der Freistrahle einer Bremsdüse von dem einer Pelton-Düse unterscheidet. [10]

1.4.4. Strahlablenker

Bei einem plötzlichen Lastabwurf des Generators würde das Laufrad auf die Durchgangsdrehzahl beschleunigen. Bei Pelton-Anlagen entspricht die Durchgangsdrehzahl in etwa der Drehzahl bei der die Umfangsgeschwindigkeit des Laufrads gleich der Ausflussgeschwindigkeit aus der Düse ist. Da Pelton-Turbinen nur im Hochdruckbereich mit meist sehr langen Druckrohrleitungen zur Anwendung kommen, darf die Düsenstellung verhältnismäßig nur langsam geändert werden. Eine zu schnelle Änderung der Düsenstellung würde zu einem zu starken Druckstoß führen und könnte die Beschädigung der Druckrohrleitungen zu Folge haben. Um dem vorzubeugen, erfolgt die Schließung der Nadel nach einer sogenannten Schließkurve, ein schneller Regeleingriff über die Düsenstellung ist somit nicht zu bewerkstelligen. Um trotzdem schnell auf eine Laständerung reagieren zu können, wird nach jeder Düse ein sogenannter Strahlablenker installiert. Durch das Einschwenken des Strahlablenkens wird der Freistrahle oder ein Teilbereich des Strahls am Laufrad vorbeigelenkt. Sobald die deutlich langsamer agierende Düse die richtige Position erreicht, wird der Strahlablenker wieder aus dem Strahl geführt. Zusammen mit der Düsennadel wird der Strahlablenker als Doppelregler bezeichnet. [11, 12]

1.5. Betriebsverhalten

Francis-Turbinen weisen im Vergleich zu Pelton-Turbinen einen um bis zu 2% höheren Spitzenwirkungsgrad auf. Pelton-Anlagen sind jedoch bei stark wechselnden Beanspruchungen der Anlagen klar im Vorteil, da ihre Wirkungsgradlinie flacher verläuft. Da der Wirkungsgrad nur zu einem kleinen Teil vom Durchfluss abhängig ist, kann er bei stark variablem Durchfluss und gleichbleibender Fallhöhe und Drehzahl nahezu konstant gehalten werden. Dieser Vorteil wird zum einen dadurch erreicht, dass sich die Anströmverhältnisse in den Bechern bei einem kleineren Durchfluss nur geringfügig ändern. Zum anderen bieten Anlagen mit mehreren Düsen die Möglichkeit, auch nur einzelne Düsen in Betrieb zuzunehmen.

Der wichtigste Vorteil gegenüber Francis-Anlagen ist aber wahrscheinlich die deutlich schnellere Verfügbarkeit von teils sehr großen Leistungen. Durch die Doppelregulierung aus Düse und Strahlableiter kann auf Leistungsschwankungen im Stromnetz blitzschnell reagiert werden. Diese guten und sehr schnellen Regulierungseigenschaften führen auch dazu, dass Pelton-Anlagen häufig für die Abdeckung von Spitzenenergien herangezogen werden.

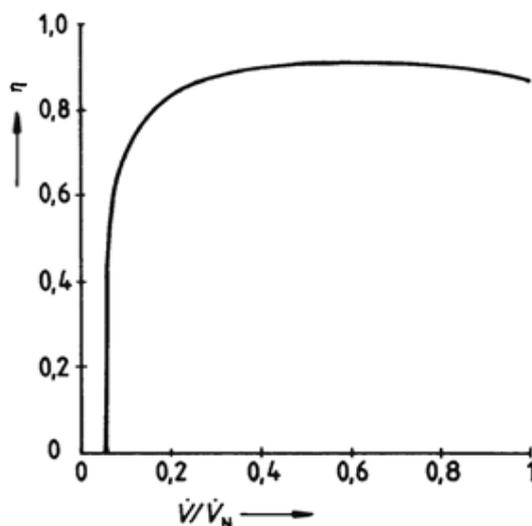


Abbildung 5: Wirkungsgrad Verlauf einer Pelton-Turbine [23]

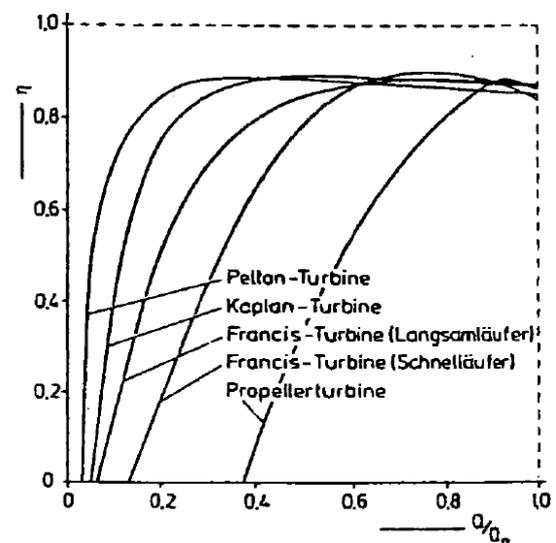


Abbildung 4: Wirkungsgradverlauf unterschiedlicher Turbinentypen [23]

2. Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Hintergründe zur vorliegenden Arbeit beschrieben. Dabei wird vor allem auf das Strömungsverhalten in der Düse und des Freistrahls eingegangen.

2.1. Die Pelton-Düse

Wie bereits eingangs erwähnt, hat die Pelton-Düse, auch Injektor genannt, zum einen die Aufgabe, Druckenergie in kinetische Energie umzuwandeln und zum anderen, den Durchfluss zu regulieren.

2.1.1. Energieumwandlung in der Düse

Unter der Voraussetzung einer eindimensionalen Fluidbewegung-Geschwindigkeitskomponenten normal zur Hauptströmungsrichtung werden vernachlässigt- kann die theoretische Austrittsgeschwindigkeit über die Bernoulli-Gleichung beschrieben werden. Die Erweiterung der Energiehöhengleichung nach Abbildung 6 mit dem Verlustterm H_{AV} führt zu

$$\frac{c_{ow}^2}{2g} + \frac{p_{ow}}{g\rho} + z_{ow} = \frac{c_e^2}{2g} + \frac{p_e}{g\rho} + z_e + H_{AV} \quad (1)$$

Der Index ow bezieht sich auf die Wasseroberfläche des Oberwassers, Index e auf den Eintritt und a auf den Düsenaustritt.

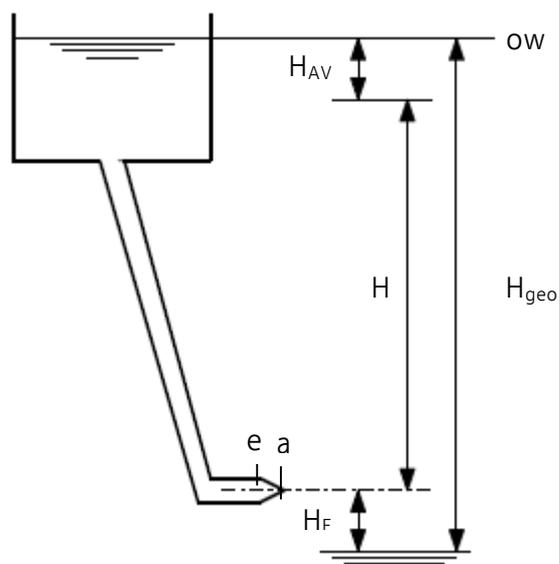


Abbildung 6: Beschreibung der Fallhöhe

Mit $z_{ow} = H_{geo}$ und $z_e = z_a = H_F$ ergibt sich die am Eintritt in die Düse zu Verfügung stehende Nettofallhöhe H zu

$$H = H_{geo} - H_F - H_{AV} \quad (2)$$

Bei H_{geo} handelt es sich um den geodätischen Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasser, wobei dieser im Labor durch eine Pumpe erzeugt wird. Die Verluste in der Rohrleitung bis zur Düse werden durch die Anlagenverluste H_{VA} berücksichtigt und H_F ist der sogenannte Freihang. Darunter versteht man den Höhenunterschied zwischen Unterwasser und der Beaufschlagungsstelle am Laufrad bzw. der Düsenache. Weiters gilt für die Geschwindigkeit im Oberwasser meist $\frac{c_{ow}^2}{2} \approx 0$. Die Oberwassergeschwindigkeit ist somit vernachlässigbar. Da es sich bei Pelton-Turbinen um eine Gleichdruckturbinen handelt gilt $p_{ow} \approx p_a$. Die Höhengleichung reduziert sich somit auf

$$H = \frac{c_e^2}{2g} \quad (3)$$

Ohne Verluste in der Düse ergibt sich die theoretische Austrittsgeschwindigkeit somit zu

$$c_e = c_{a,th} = \sqrt{2gH} \quad (4)$$

Die in der Düse auftretenden Verluste (siehe 2.1.4) führen zu einer Reduzierung der Austrittsgeschwindigkeit am Querschnitt 0. Hierfür wird oft der Düsenbeiwert oder Düsenfaktor φ_D verwendet

$$c_a = c_0 = c_{a,th} \varphi_D \quad (5)$$

Der Düsenbeiwert φ_D lässt sich ausschließlich experimentell bestimmen und liegt bei sauber gerundeter und geschliffener Herstellung zwischen 0,94.....0,98; in Ausnahmefällen auch bei 0,99. [7, 9, 11]

2.1.2. Systemgrenzen des Düsenbereichs

Im eigentlichen Sinne ist die Düse nur der letzte Abschnitt des Injektors mit seiner konvergenten Form, in dem es zu einer Beschleunigung der Strömung kommt. Da sich aber der Begriff Düse für den ganzen Injektor in der Fachliteratur durchgesetzt hat, beinhaltet dieser Begriff sowohl den geraden Einlaufbereich, als auch den konvergenten Abschnitt. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die optische Vermessung des Wasserstrahls, die Ursachen für etwaige Formänderung zu finden und einen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Düsenkonfigurationen herzustellen. Angesichts dessen ist es

zielführend die Systemgrenzen über die eigentliche Düse hinaus zu erweitern. Der Begriff Pelton-Düse erstreckt sich vom Eintritt Index e in Kontraktion über den Austritt Index a bis hinaus bis zur maximalen Einschnürung des Wasserstrahls Index 1. Diese maximale Kontraktion tritt nicht direkt am Austritt aus der Düse, auf sondern erst nach dem Verlassen des Strahles auf. Die Distanz zwischen Austrittskante und der maximalen Kontraktion wird folglich als l_1 bezeichnet. [13, 14]

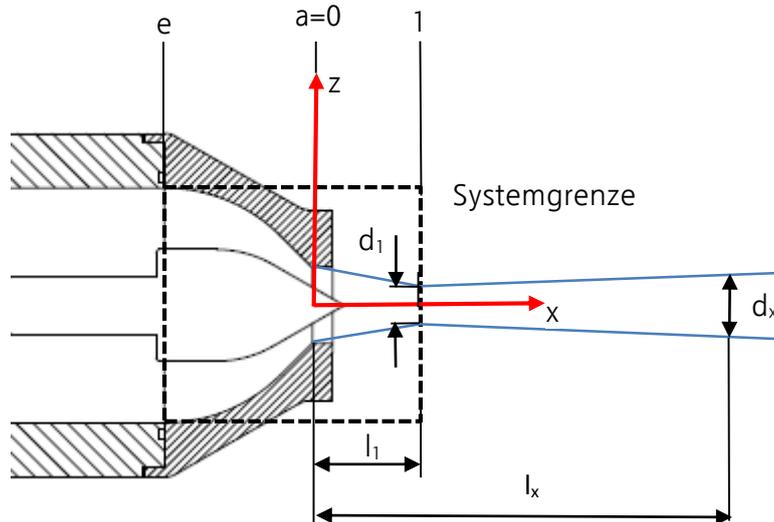


Abbildung 7: Systemgrenzen der Düse

2.1.3. Strömung in der Düse

Die Strömung im Düsenrohr weist über den gesamten Querschnitt, also sowohl an der Außenwand, als auch entlang des Torpedokörpers für die Nadelsteuerung, annähernd eine konstante Druckverteilung auf. Im stationären Betrieb ist der Durchfluss konstant, aufgrund einer Querschnittsveränderung kommt es an der Außenseite aber zu einer Strömungsbeschleunigung. Entlang der Düsenwand erfolgt dadurch ein starker Druckabfall, wodurch der Druck bis zur Austrittskante den Atmosphärendruck erreicht. Entlang der Nadeloberfläche kommt es aufgrund der deutlich stärkeren Reibungen zu einem verzögerten Druckabfall. Diese Verzögerung wird bis zur Austrittskante nicht ausgeglichen, wodurch hier weder Druck noch Geschwindigkeit gleichmäßig verteilt sind. Durch unterschiedliche Düsen- und Nadelwinkel ist es somit möglich, eine Einschnürung des Wasserstrahls nach Verlassen der Düse zu erzielen und dadurch einen möglichst festen und gleichförmigen Strahl zu erzeugen.

Aus den Untersuchungen von Benitez [13] ergibt sich, dass bei Wegfall der Nadel der Druck einen ähnlichen Verlauf zeigt. Der größte Unterschied besteht vielmehr darin, dass der Strahl kein Geschwindigkeitsdefizit im Zentrum aufweist. Somit werden auch die Stromlinien nicht so stark geknickt wie bei der Pelton-Düse.

Eine entscheidende Rolle für die Strömung in der Düse und den Strahl spielt die Austrittsfläche. Die Stromfäden liegen sowohl an der Nadel, als auch an der Düsenaußenfläche an. Die Austrittsfläche A steht dabei in jedem Punkt senkrecht auf diese Strombahn und somit auch senkrecht auf die Nadel- als auch auf die Düsenoberflächen. Somit entsteht eine gewölbte effektive Austrittsfläche A_0 . Sie lässt sich laut Benitez näherungsweise wie folgt berechnen:

$$A_0 = a s - b s^2 \quad (6)$$

s ist dabei die Nadelstellung, und a und b zwei Konstanten, die rein aus der Geometrie des Mundstücks und der Düse bestimmt werden können. Hier muss zwischen zwei Fällen Unterschieden werden.

$$a = \begin{cases} 2 \pi \frac{(\beta - \alpha) \sin \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} r_0 & \text{für } \alpha \neq \beta \\ 2 \pi \sin(\alpha) r_0 & \text{für } \alpha = \beta \end{cases} \quad (7)$$

$$b = \begin{cases} \pi (\beta - \alpha) \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta - \alpha)} (\sin \beta - \sin \alpha) & \text{für } \alpha \neq \beta \\ \pi \sin^2 \alpha \cos \beta & \text{für } \alpha = \beta \end{cases} \quad (8)$$

Sowohl Düsen- als auch Nadelwinkel variieren je nach Anlagenhersteller und Anlagenparametern. Meist liegen sie aber zwischen $85-90^\circ$ für die Düse und 60° für den Nadelwinkel. Aus diesem Grund wird hier auf den Spezialfall $\alpha=\beta$ und die daraus resultierenden Vereinfachungen nicht näher eingegangen.

$$A_0 = 2 \pi \frac{(\beta - \alpha) \sin \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} r_0 s - \pi (\beta - \alpha) \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta - \alpha)} (\sin \beta - \sin \alpha) s^2 \quad (9)$$

Die Gleichung für die Austrittsfläche ist nun nur mehr von der Variable s (Düsenverstellung) abhängig und wird über die Parameter der Düse und des Mundstücks r_0, α, β bestimmt.

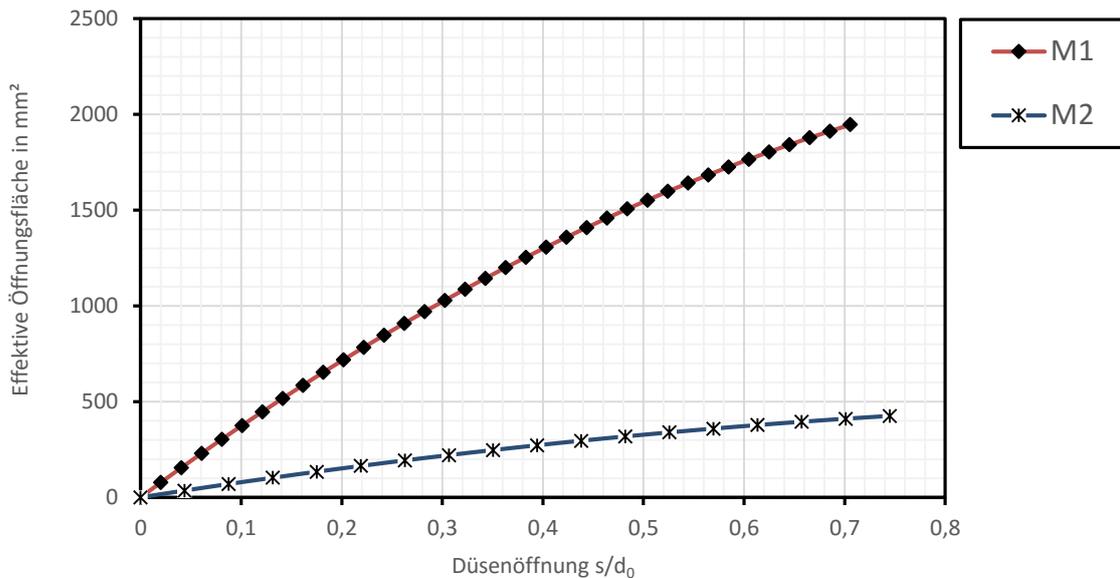


Abbildung 8: Effektive Austrittsfläche der Mundstücke M1 und M2

Die Abbildung zeigt die effektive Öffnungsfläche der zwei verwendeten Mundstücke M1 und M2 (siehe 3.1.1) in Abhängigkeit zur Nadelposition. Bei maximaler Öffnung ist in beiden Fällen die hier mittels Gl. (9) berechnete Fläche etwa 2,6% größer als die durch $A_0 = (d_0/4)^2 \pi$ berechnete Fläche. Bei den Kurven in Abbildung 8 handelt es sich um zwei Parabeln. Das heißt, dass eine kleine Verstellung der Düse kurz vor dem Verschluss der Nadel zu großen Änderungen im Durchfluss führt. Ab einer gewissen Öffnung bewirkt eine Verstellung der Nadel nur mehr geringfügige Querschnitts- und Durchflussänderungen.

Über die Kontinuitätsbedingung kann nun ein direkter Zusammenhang zwischen Austrittsfläche, Durchfluss und Austrittsgeschwindigkeit hergestellt werden.

2.1.4. Verluste in der Düse und Wirkungsgrad

Der Gesamtverlust in der Düse setzt sich aus drei wesentlichen Teilen zusammen: Krümmungs-, Reibungs- und Querschnittsänderungsverluste. [4, 13]

Krümmungsverluste treten vor allem bei mehrdüsenigen Anlagen auf, da die Strömung in der Zuleitung öfters umgelenkt wird, und machen etwa 50% des Gesamtverlustes aus. Da der Modelversuch nur eine gerade Zuleitung aufweist, entfallen Krümmungsverluste komplett. Querschnittsänderungen im Einlaufbereich spielen vor allem bei außengeregelter Düsen eine bedeutende Rolle, da hier die Nadelstange den Zulauf deutlich verengt. Bei innengeregelter Düsen treten diese Verluste zwar ebenfalls auf, durch die strömungstechnische Optimierung sind die Verengungsverluste jedoch deutlich geringer.

Alle in der Düse vorhandenen Verluste können in einem gesamten Höhenverlust in der Düse H_{VD} zusammengefasst werden. Da die Systemgrenzen aber über den Austritt hinaus

erweitert wurden, werden hierbei auch die Verluste bis zur maximalen Kontraktion berücksichtigt. Da nach Abbildung 7 gilt, dass $z_e = z_a = z_1$ ist, gilt somit für die Verluste

$$H_{VD} = H - \left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{c_1^2}{2g} \right) \quad (10)$$

Der Düsenwirkungsgrad wird auf folgende Weise definiert

$$\eta_D = 1 - \sum \frac{\text{Verluste}}{H} = 1 - \frac{H_{VD}}{H} \quad (11)$$

Daraus folgt für den Wirkungsgrad

$$\eta_D = 1 - \frac{H - \left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{c_1^2}{2g} \right)}{H} = \frac{p_1}{\rho g H} + \frac{c_1^2}{2gH} \quad (12)$$

Da ab dem Austrittsquerschnitt Umgebungsdruck herrscht, kann der erste Term vernachlässigt werden. Die Gleichung reduziert sich somit auf

$$\eta_D = \frac{c_1^2}{2gH} = \frac{c_1^2}{c_{th}^2} \quad (13)$$

Der Düsenwirkungsgrad ist somit direkt von der Geschwindigkeit im engsten Querschnitt abhängig. Unter Einbeziehung des Düsenfaktors, der den theoretischen mit dem realen Durchfluss vergleicht, folgt:

$$\varphi = \frac{Q}{Q_{th}} = \frac{c_1 A_1}{c_{th} A_1} = \frac{c_1}{c_{th}} \quad (14)$$

Aus Gl.(6) und Gl (7) ergibt sich direkt die Beziehung

$$\eta_D = \varphi^2 \quad (15)$$

Um eine bessere Vergleichbarkeit her zu stellen ist es sinnvoll die Berechnung von der Fallhöhe unabhängig zu machen. Bei Einheitsdurchfluss Q_1 wird die Wassermenge auf ein Meter Gefälle umgerechnet [15]:

$$Q_1 = \frac{Q}{\sqrt{H}} \quad (16)$$

Durch die Verwendung des Düseneinheitsdurchflusses nach Gl.(17) wird die Höhe eliminiert.

$$\eta_D = \frac{c_1^2}{2 g H} = \frac{(Q/A)^2}{2 g H} = \frac{Q_1^2}{2 g A^2} \quad (17)$$

Somit kann der Düsenwirkungsgrad direkt angegeben werden.

$$\eta_D = \frac{8 Q_1^2}{g d_1^4 \pi^2} \quad (18)$$

2.2. Der Freistrah

Der ideale Strahl einer Pelton-Düse weist über den Querschnitt eine konstante Geschwindigkeit und über die gesamte Länge einen konstanten Durchmesser auf. Über den Durchfluss lässt sich der theoretische Strahldurchmesser unter Vernachlässigung der Reibung berechnen.

$$A = \frac{Q}{c} \quad d = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi \sqrt{2 g H}}} \quad (19)$$

Durch Reibung an den Befestigungen des Nadelantriebs und der Nadel selbst kommt es aber zu einem Geschwindigkeitsverlust im Strahlzentrum. Durch die Krümmung des Außenrohres und die damit einhergehende starke Beschleunigung in diesem Bereich hat die Grenzschicht am Außenrohr und am Mundstück einen deutlich geringeren Einfluss. Nach dem Austritt aus der Düse bewirkt die Oberflächenspannung des Wassers einen Zusammenhalt des Strahls. Der kleinste Querschnitt des Strahls, man spricht von einer Einschnürung, tritt nicht direkt am Mundstück, sondern erst mit einem gewissen Abstand dazu auf. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit des Strahls kommt es aber zu Instabilitäten und einer Interaktion zwischen dem Rand des Wasserstrahls und der Umgebungsluft. Dadurch entsteht am Rand ein Gemisch aus Wasser in Tropfenform und Luft. Diese Interaktion führt zu einer optisch wahrnehmbaren Aufweitung. Weiters zieht sie auch eine Abnahme der Energiedichte im Strahl nach sich, die eine deutlich schlechtere Umsetzung der Energie in den Bechern des Laufrades bewirkt.

2.2.1. Einschnürung des Wasserstrahls

Der Wasserstrahl weist seinen engsten Querschnitt nicht direkt am Austritt aus dem Mundstück auf, sondern etwas stromabwärts. Die starke Strömungsbeschleunigung an der Rohraußenseite und der Einfluss der Reibung entlang der Nadel führt dazu, dass an der

Austrittskante weder Druck noch Geschwindigkeit ausgeglichen sind (siehe 2.1.3). An der Außenseite treten dadurch größere Strömungsgeschwindigkeiten auf. Im Zentrum des Strahls ist ein Geschwindigkeitsdefizit vorhanden. Es wird erst in einem Abstand von $7 \cdot d_0$, zum Düsenmundstück, ausgeglichen.

Da sich nicht alle Stromlinien nach Verlassen der Düse in Richtung der Strahlachse einbiegen können, führt dies zu einer Kontraktion des Strahls. Der engste Querschnitt, er wird auch als Einschnüerstelle bezeichnet, wird dann erreicht, wenn wieder alle Stromlinien parallel laufen. Diese Einschnüerstelle wird erst nach der Nadelspitze erreicht. Die Krümmung der Stromlinien bleibt von der Fallhöhe nahezu unbeeinflusst, somit auch die Lage des kleinsten Querschnitts.

Die Lage des kleinsten Querschnitts des Wasserstrahls wird auch durch die Form des Mundstücks und der Position der Ablösung bestimmt.

Nach der Ausführung von Benitez [13] kann der Wasserstrahl nach dem Austritt aus der Düse und der Engstelle durch eine Parabel mathematisch beschrieben werden. Aus empirisch ermittelten Werten hat sich eine kubische Parabel als brauchbare Näherung herausgebildet:

$$\frac{d}{d_0} = \frac{d_1}{d_0} + \left(1 - \frac{d_1}{d_0}\right) \left(1 - \frac{l}{l_1}\right)^3 \quad (20)$$

Für $l=0$ folgt daraus der Strahlaustrittswinkel

$$\tan \alpha_{Aus} = \frac{3}{2} \frac{d_0}{l_1} \left(1 - \frac{d_1}{d_0}\right) \quad (21)$$

Diese Annäherung ist insbesondere für kleine Düsenöffnungen anwendbar, bei großen Öffnungen kommt es aufgrund der abflachenden Kennliniencharakteristik zu stärkeren Abweichungen.

2.2.2. Strahlaufweitung und Randschicht

Stromabwärts der Einschnürung ändert sich das Strahlverhalten und es kommt zu einer Aufweitung, der Strahldivergenz. Durch optische Messungen lässt sich diese deutliche Erweiterung des Strahls nach der Einschnürung feststellen. Wie in Abbildung 9 wird der Winkel der halben Strahlerweiterung als β bezeichnet. Der Grund die Erweiterung ist, dass an der Strahloberfläche ein Zwei-Phasen-Gebiet, die Wasser-Luft-Zone, entsteht.

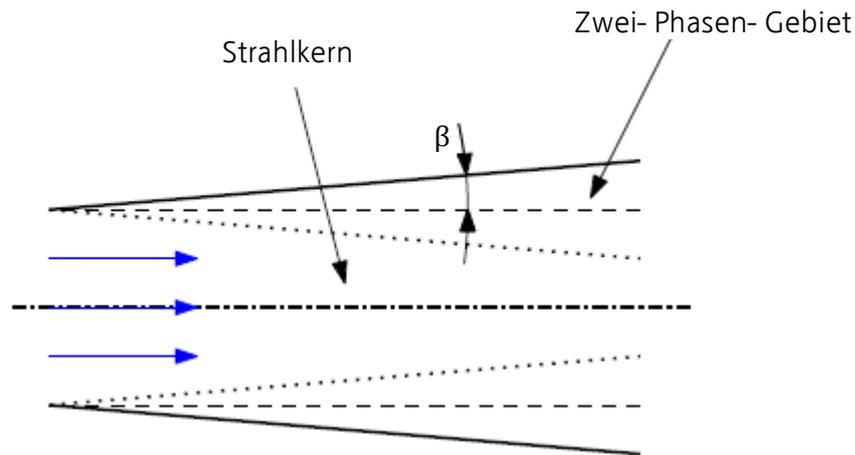


Abbildung 9: Erweiterung des Freistrahls

Bereits beim Verlassen der Düse übt der Strahl eine Pumpwirkung auf die umliegende Luftschicht auf. Die stehenden Luftschichten werden mitgerissen und es kommt aufgrund der hohen Geschwindigkeiten zu einem turbulenten Impulsaustausch mit der Umgebungsluft. [13] Da diese Randschicht, insbesondere bis zum engsten Querschnitt, äußerst klein ist, kann dieser Effekt bis dahin vernachlässigt werden. Ab der Einschnürstelle und stromabwärts kommt es aber aufgrund des größer werdenden Zwei-Phasen-Gebiets zu einem Energieabfall in den Randbereichen. Der Strahlkern zwischen den Randschichten bleibt nahezu unverändert und wird durch den Luftwiderstand nicht beeinflusst. Auch bleibt die Geschwindigkeit des Kernbereichs trotz der optischen Erweiterung des Strahls gleich, da die Dichte über den gesamten Querschnitt nicht mehr konstant ist. In der Luft-Wasser Zone, die nur aus Wasserteilchen bestehen kann, die vorher ein Teil des Strahls waren, kommt es hingegen zu einer Verzögerung der Geschwindigkeit und zu Energiedissipation. Der Winkel der halben Strahlerweiterung β lässt sich über die Beziehung

$$\tan \beta = \left(\frac{\Delta r}{\Delta x} \right) \quad (22)$$

beschreiben.

Die Strahlerweiterung wirkt sich auch negativ auf die Oberflächenbeschaffung des Strahls aus. Durch den höheren Turbulenzgrad kommt es zu einer Aufrauhung des Strahls der von der Oberflächenspannung nicht mehr ausgeglichen werden kann. Des Weiteren können sich Tropfen ausbilden und von der umliegenden Luftschicht mitgerissen werden.

Sehr kleine Öffnungen führen laut Raabe zu einer deutlich stärkeren Aufweitung des Strahls an der Nadelspitze. Man spricht hierbei von einer Aufbesung des Strahls [1]. Durch diese starke Aufweitung kommt es in einem deutlich größeren Bereich des Wasserstrahls als nur in der Randschicht zu einer Dissipation der Energie. Des Weiteren wirken sich die Verluste entlang der Nadel bei kleinen Nadelhüben deutlicher aus, was diesen Effekt noch zusätzlich verstärkt. [16, 17]

2.2.3. Strahlablenkung γ

Neben Oberflächenbeschaffenheit und Energiedichte ist vor allem die Richtung des Freistrahls ein entscheidendes Qualitätsmerkmal. Die sogenannte Strahlablenkung beschreibt die Abweichung der Strahlmittellachse von der idealen geraden Richtung und ist durch den Winkel γ definiert. Die Strahlablenkung kann sowohl in der horizontalen, als auch in der vertikalen Achse auftreten und hat zur Folge, dass der Strahl nicht auf den dafür vorgesehenen Bereich des Bechers trifft. Diese Verschiebung führt dazu, dass es zu einer Minderung bei der Energieumsetzung im Becher kommt. Problematisch ist vor allem eine Ablenkung in axialer Richtung des Laufrads, da der Strahl dann durch die Hauptschneide asymmetrisch geteilt wird. Dies kann zu Schäden an der Schneide, lokalen Erosionen am Bechergrund und durch einen geänderten Austritt auch zu Schäden an der Becherrückseite des nachfolgenden Bechers führen. Im schlimmsten Fall kann es sogar vorkommen, dass ein Teil des Wasserstrahls nicht auf die Becher trifft und dann Schäden am Gehäuse verursacht. [16, 18]

Da in dieser Arbeit im Zuge der Bestimmung der Ovalität, alle Messungen von oben und von der Seite durchgeführt werden, wird in weiterer Folge zwischen der horizontalen γ_h und vertikalen γ_v Strahlablenkung unterschieden. Eine vertikale Verschiebung der Strahlachse, hervorgerufen durch die Erdbeschleunigung, ist aufgrund der kurzen Strahllänge laut Benz auszuschließen. Die Strahlverschiebung $\gamma_{h,v}$ lässt sich durch

$$\tan(\gamma_{h,v}) = \left(\frac{\Delta z}{\Delta x} \right) \quad (23)$$

mathematisch beschreiben. Da der kleinste Querschnitt als Referenz herangezogen wird, ist sichergestellt, dass die Strahlaufweitung keinen Einfluss auf die Verschiebung hat.

Sowohl die Qualität des Strahls, als auch die Aufweitung und Ablenkung haben multifaktorielle Ursachen. Neben den in 2.1.3 beschriebenen Ursachen hat vor allem die Zuleitung einen großen Einfluss. Durch etwaige Einbauten, Krümmer und Umlenkungen kommt es zur Verschiebung der Achse. [16, 17]

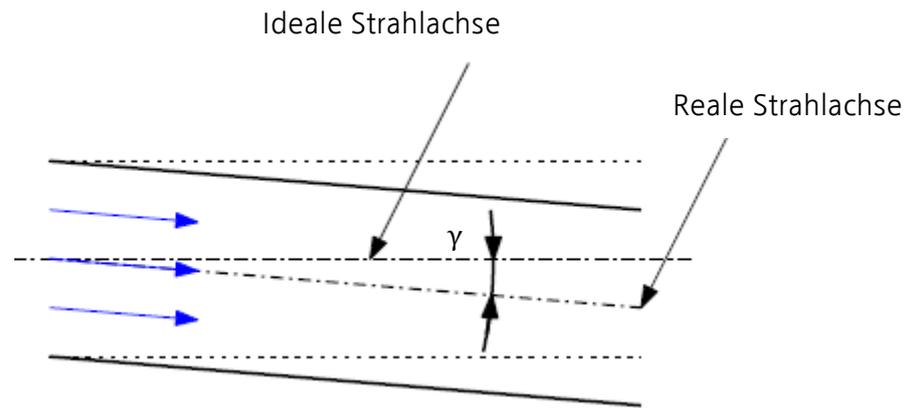


Abbildung 10: Verschiebung der Strahlachse

2.2.4. Ovalität des Freistrahls

Die im Labor vorhandene Düse ist mit einer Innenregulierung ausgeführt. In den meisten Pelton-Düsen ist der Verstellmechanismus der Düsennadel über vier Streben, man spricht von einem Kreuz, an dem Düsennadel befestigt. Der Antrieb der Labordüse ist über zwei vertikale Streben im Düsennrohr befestigt. Zwar sind sowohl Antrieb als auch die flügelartigen Streben strömungstechnisch optimierte Bauteile, trotzdem hat die Bauweise einen grundlegenden Einfluss auf die Strömung innerhalb der Düse und somit auch auf den Freistrahls. Es kommt zu einer messbaren Abweichung des Freistrahls vom ideal-runden Querschnitt. Entlang der Streben kommt es zu einer Beschleunigung, die sich bis zur Austrittskante fortsetzt. Der Querschnitt des Strahls wird dadurch zu einer Ellipse, man spricht von einer Ovalität des Strahls.

Um diese Abweichung zu berücksichtigen, werden Messungen sowohl von oben d_v (vertikale Messungen) als auch von der Seite d_h (horizontale Messungen) durchgeführt. Somit sind beide Halbachsen der Ellipse bestimmt. Daraus folgt der Flächeninhalt des Strahlquerschnitts:

$$A_e = \pi d_v d_h \quad (24)$$

Im Vergleich dazu besitzen Bremsdüsen keine Regulierung. Durch den Wegfall der Einbauten innerhalb der Düse kommt es zu keiner Beeinflussung der Strömung. Der Wasserstrahl weist im Idealfall einen kreisrunden Querschnitt auf. Um eine bessere Vergleichbarkeit mit Düsen ohne Einbauten herstellen zu können, kann mit Hilfe von

$$d = \sqrt{d_v d_h} \quad (25)$$

wieder auf einen Wert für den Durchmesser zurück gerechnet werden. [14]

Eine nicht gerade Zuleitung zur Düse kann noch zu weiteren Abweichungen vom idealen Querschnitt führen. Insbesondere Rohrkrümmungen von 90° kurz vor der Düse verursachen die Ausbildung von sogenannten Strähnen. Da Änderungen in der Zuleitung im Labor mit einem sehr großen Aufwand verbunden sind, wurden hier ausschließlich Untersuchungen mit gerader Zuleitung durchgeführt.



Abbildung 11: Geöffnete Pelton-Düse

3. Versuchsaufbau und Messungen

Die im Zuge der Diplomarbeit durchgeführten Versuche wurden alle am Modelversuchsstand für Pelton-Turbinen des hydraulischen Labors des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik der Technischen Universität Wien durchgeführt. Das Labor am Karlsplatz besteht bereits seit über 100 Jahren.

3.1. Der Pelton-Versuchsstand

Am Pelton-Turbinen-Versuchsstand können Laufräder bis zu einem Strahlkreisdurchmesser von $D=500\text{m}$ betrieben werden. Für den Betrieb stehen eine drehzahlvariable Universalpumpe und zwei drehzahlvariable radiale Hochdruckpumpen zu Verfügung. Die Pumpen können sowohl parallel als auch seriell geschaltet werden, womit eine Fallhöhe bis 160m simuliert werden kann. Bis zu einer simulierten Fallhöhe von etwa 80 m ist die Universalpumpe allein ausreichend, erst ab Fallhöhen von über 80m müssen die Hochdruckpumpen seriell zugeschaltet werden. Die für den Versuch erforderliche Wassermenge wird über ein 30m^3 großes Reservoir bereitgestellt.

- Universalpumpe: Vogel, $H=85\text{m}$, $n= 1475\text{ U/min}$, $Q = 160\text{ l/s}$
- Hochdruckpumpen: 2 x KSB, $H=82\text{m}$, $n= 2900\text{ U/min}$, $Q = 30\text{ l/s}$

Die Zuleitung von der Pumpe zum eigentlichen Versuchsstand erfolgt über ein gerades $\text{DN}100$ Rohr das unterhalb des Hallenbodens verlegt ist. Fünf Meter vor dem Prüfstand macht das Rohr einen 45° -Knick, steigt dann bis zur Höhe der Düse nach oben und wird durch einen zweiten Knick wieder in die Waagrechte übergeführt. Zwischen dem zweiten Knick und der Düse befindet sich ein drei Meter langes gerades Rohr in dem sich die Strömung wieder ausbilden kann. Bei den Untersuchungen wurde Wert auf eine gerade Zuleitung gelegt, um eine vollausgebildete Strömung zu erhalten.

In diesem Abschnitt ist auch der Durchflussmesser untergebracht. Nach dem Austritt aus der Düse durchläuft der Wasserstrahl durch die Messstrecke für die optischen Versuche. Danach wird der Strahl in einem um 90° gekrümmten Rohr aufgefangen und nach unten umgelenkt, das Wasser fließt dann in einen freien Kanal direkt unterhalb des Versuchsstands zurück in das Reservoir.

Das Gehäuse des Prüfstands besteht aus Alu-Profilen und ist durch transparente Plexiglas-Scheiben abgedichtet. Durch diesen modularen Aufbau können Umbauten äußerst schnell und kostengünstig vorgenommen werden.

Der gesamte Versuchstand ist mit einem modernen Überwachungs- und Regelungssystem ausgestattet, womit alle wesentlichen Parameter vom Computer aus überblickt und gesteuert werden können. Für die Regelung der Düse sowie auch für die eigentliche Vermessung wurde das Programm LabVIEW verwendet.

3.1.1. Aufbau und Mundstücke

Die Düse lässt sich in zwei Abschnitte unterteilen. Im ersten Abschnitt, dem Düsenrohr, ist der Torpedokörper untergebracht. Im zweiten Abschnitt, dem Düsenmundstück, erfolgt eine Reduktion der Querschnittsfläche. Dieser Teil ist so konstruiert, dass sich verschiedene Mundstückeinsätze mit unterschiedlichen Öffnungen einsetzen lassen. Für die Versuche stehen zwei kegelförmige Mundstückeinsätze mit unterschiedlichen Öffnungen zu Verfügung.

- Mundstück M1: 45° Winkel, 27,2mm Länge, 49,6mm Öffnung
- Mundstück M2: 45° Winkel, 29,2mm Länge, 22,82mm Öffnung

Der Längenunterschied ergibt sich daraus, dass beide Mundstückeinsätze denselben Anschlussdurchmesser an die Düsen haben und denselben Winkel aufweisen, aber am Austritt unterschiedliche Öffnungsquerschnitte aufweisen. Weiters weisen beide eine Fase von 30° an der Dichtkante zur Nadel auf (siehe Abbildung 14). Somit kommt es zwischen Nadel und Mundstück zu einer Flächenpassung.

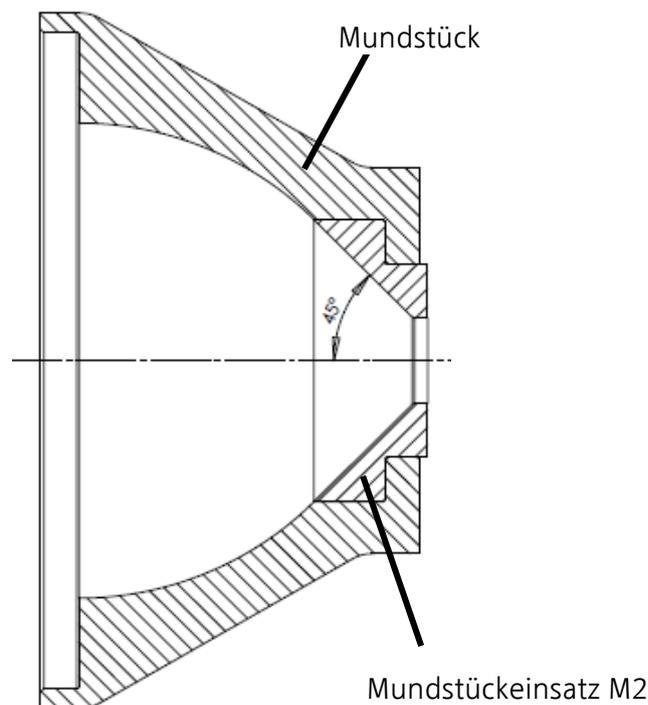


Abbildung 12: Aufbau der Düse

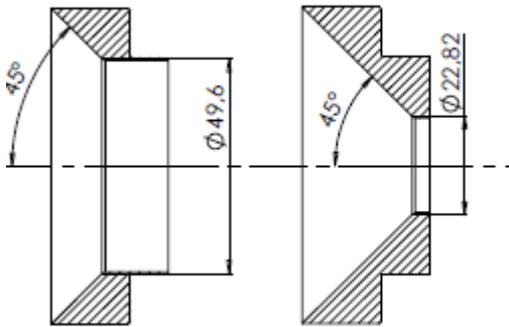


Abbildung 13: Mundstück M1 und M2

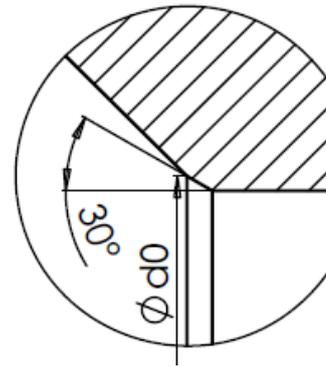


Abbildung 14: Detail Abrisskante

Die Fase führt auch dazu, dass sich die Abrisskante der Strömung verschiebt. Die Strömung reißt nicht am engsten Querschnitt von der Außenwand ab, sondern bereits am Beginn der Fase. Als Austrittsdurchmesser d_0 gilt somit der Durchmesser am Beginn der Fase (siehe Abbildung 14).

Die Düsennadel ist so wie das Mundstück kegelförmig.

- Düsennadel: 60° Winkel, 178mm Länge

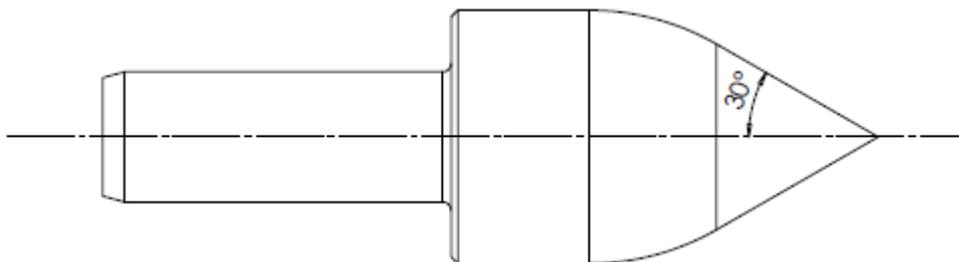


Abbildung 15: Düsennadel

3.1.2. Steuerung der Düsennadel

Die Nadelposition in der Düse wird durch einen 5-Phasen-Stellmotor geregelt und über einen Computer mittels LabVIEW gesteuert. Die elektrische Ansteuerung des Stellmotors erfolgt durch ein digitales Steuergerät. Pro Impuls rotiert der Motor um ein halbes Grad, mittels Kegelrad und Gewinde wird die Rotation in eine translatorische Bewegung der Nadel umgewandelt. Dadurch ergibt sich ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Düsenbewegung und dem Impuls. Da die Düsennadel im Labor über keine Positionsbestimmung verfügt, erfolgt die Lagebestimmung ausschließlich über die Anzahl der Impulse die vom Steuergerät gesendet werden. Um eine Lagereferenz zu erhalten, wird ein Nullabgleich vorgenommen. Die Düse wird dafür komplett geschlossen und es wird optisch kontrolliert ob es auch zu keinem Durchfluss mehr kommt. Dann kann die

Düsenposition s im Programm auf Null gesetzt werden. Da es nach längerem Betrieb und mehreren Öffnungs- und Schließvorgängen zu Ungenauigkeiten und Abweichungen kommen kann, muss dieser Vorgang regelmäßig wiederholt werden. Neben der Nullposition ist im Programm aus Sicherheitsgründen auch eine Maximalposition festgelegt. Sie garantiert, dass es zu keiner Überöffnung der Nadel kommt. Die Software bietet die Möglichkeit die Nadel in 0,1-mm Schritten zu öffnen bzw. zu schließen. Da der Schrittmotor die Nadel relativ langsam, mit einer Geschwindigkeit von 0,25mm/s, bewegt, besteht zu keinem Zeitpunkt die Gefahr eines Druckstoßes in der Zuleitung. [14]

Während der Versuche wurde die Nadel in Ein-Millimeter-Schritten verschoben. Bei den Messungen werden zwei Mundstücke verwendet, die eine unterschiedliche Öffnungsweite aufweisen. Bei dem kleineren Mundstück wird die maximale Öffnung bereits nach 16mm erreicht, bei dem größeren erst nach 35mm. Die 35mm entsprechen gleichzeitig der maximal möglichen Verschiebung der Nadelsteuerung.

Während der Düsenverstellung sollten keine Messungen durchgeführt werden, da es sich um einen dynamischen Vorgang handelt, der einen starken Einfluss auf die Strömung haben kann.

3.1.3. Steuerung der Pumpendrehzahl

Die Pumpendrehzahl kann sowohl über eine Software, als auch per Hand auf einem Schaltpult reguliert werden. Die Software ermöglicht zusätzlich eine automatische Drehzahlregulierung bei vorgeschriebener Fallhöhe bzw. Druck.

Auch hier gilt, dass während der Verstellung der Pumpendrehzahl keine Messungen durchgeführt werden sollten.

3.2. Messtechnik

Für die Überwachung der hydraulischen Parameter Durchfluss und Druck stehen im Labor die im Folgenden beschriebenen Geräte zu Verfügung.

3.2.1. Durchflussmessung

Zur Messung des Volumenstroms wird ein magnetisch-induktiver Durchflussaufnehmer verwendet. Dieses Verfahren beruht auf dem Faradayschen Induktionsgesetz, gemäß dem in einem Leiter, der sich in einem Magnetfeld bewegt, Spannung induziert wird.

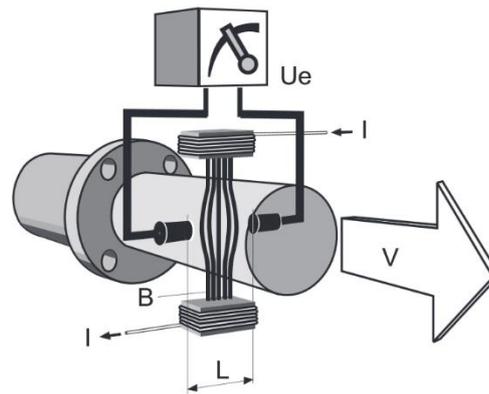


Abbildung 16: Magnetisch-induktives Messprinzip [19]

Bei einer magnetisch-induktiven Messung übernimmt der Massenstrom im Rohr die Aufgabe des bewegten Leiters. Beim magnetischen Feld handelt es sich um ein Gleichfeld, das von außen durch Spulen mittels Gleichstrom erzeugt wird und senkrecht zur Flussrichtung steht. Es gilt

$$U_e = B L v \quad (26)$$

wobei U_e die induzierte Spannung, B das Magnetfeld (magnetische Induktion), L der Abstand zwischen den Messelektroden und v die Durchflussgeschwindigkeit ist. Bei der Geschwindigkeit handelt es sich um eine über den gesamten Strömungsquerschnitt berechnete mittlere Geschwindigkeit. Über zwei senkrecht zum Magnetfeld angeordnete Messelektroden wird die Durchflussgeschwindigkeit zum Messverstärker zugeführt. Da für inkompressible Flüssigkeiten weiters gilt, dass der Volumenstrom proportional zur mittleren Geschwindigkeit ist, gilt für den Durchfluss Q

$$Q = A v \quad (27)$$

Der größte Vorteil dieser Messmethode gegenüber anderen Verfahren, wie zum Beispiel einer Messblende, besteht darin, dass die Strömung nicht durch zusätzliche Einbauten gestört wird. Somit kommt es durch die Messung auch zu keinem zusätzlichen Druckverlust und sie ist außerdem wartungsfrei.

Der Messaufnehmer ist im geraden Zulauf etwa einen Meter vor der Düse angebracht. Bei dem verwendeten Gerät handelt es sich um ein Gerät der Firma Endress + Hauser für hochgenaue Messungen von Flüssigkeiten.

- Endress + Hauser Proline Promag 50W, Genauigkeit $\pm 0.5\%$

Damit sind Durchflussmessungen bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 10m/s möglich. Die bei den Versuchen maximal erreichten Geschwindigkeiten betragen etwa 6,5m/s, sind also deutlich unterhalb des Grenzwerts. [19]

3.2.2. Druckmessung

Die Druckmessung zur Bestimmung der Fallhöhe ist in der Düse auf Höhe der Düsenverstellung eingebaut. Vier Bohrungen sind entlang des Umfangs gleichmäßig, im Winkel von 90°, verteilt. Somit ist es möglich Druckschwankungen, die entlang des Umfangs auftreten können, auszugleichen. Die Bohrungen sind mittels Ringleitung miteinander verbunden, welche wiederum mit dem Druckaufnehmer verbunden ist. Wichtig ist, dass keine Bohrung an der höchsten Stelle des Rohres ist, da sich hier immer wieder kleine Luftblasen ansammeln; die Bohrungen sind deshalb um 45° verdreht, siehe Abbildung 18. Für die Versuche wird der Absolutdruckaufnehmer der Firma HBM verwendet, der nach dem Folien-DMS Messprinzip in Vollbrücken-Schaltung arbeitet. Das Messprinzip beruht darauf, dass der Druck eine Verformung auf einer Membran im Messaufnehmer verursacht. Vier auf der Membran angebrachte Widerstände, die als Messbrücke geschaltet sind, ändern so ihren Ohm'schen Widerstand. Die Veränderung des Widerstandes, bzw. des Stroms, ist proportional zur Änderung des Drucks in der Leitung. Durch die Brückenschaltung wird der Temperatureinfluss automatisch kompensiert. Die Signalabgabe erfolgt mittels Ausgangsstrom.

- Absolutdruckaufnehmer: HBM P3MA, 10bar, 2mV/V Genauigkeit 0,25%

Entscheidend für die Richtigkeit der Druckmessung ist, dass vor dem Start der Messung die Zuleitungen des Gebers entlüftet werden, da es sonst zu gravierenden Abweichungen kommen kann.

3.2.3. Bestimmung der Fallhöhe

Die Fallhöhe H wird über die Messung von Druck und Durchfluss ermittelt. So kann auch der dynamische Anteil des Drucks miteinbezogen werden. Zusätzlich wird noch die Höhendifferenz zwischen Druckanschluss auf der Düse und Aufnehmer berücksichtigt. [10]

$$H = \frac{10^5 p}{\rho g} + \frac{Q^2}{2 g A_d^2} + \Delta z_d \quad (28)$$

p	Druck in der Düse [bar]
Q	Durchfluss [m ³ /s]
A _d	Fläche der Düse beim Druckanschluss [m ²]
Δz _d	Höhendifferenz zwischen Druckanschluss und Aufnehmer [m]

3.3. Optische Vermessung des Freistrahls der Pelton-Düse

Dieser Abschnitt befasst sich mit dem Hauptthema der Arbeit, der optischen Vermessung des Freistrahls. Durch den Einsatz einer Kamera und eines geeigneten Messprogramms ist es möglich neben den üblichen hydraulischen Kenngrößen Druck und Durchfluss auch weitere Parameter wie Durchmesser, Strahlablenkung und Strahlqualität zu bestimmen.

3.3.1. Die Kamera

Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um die digitale Industriekamera vom Hersteller The Imaging Source.

- Kamera: The Imaging Source DFK 23GP031 5 Megapixel

Sie verfügt über eine maximale Auflösung von 2592x1944 Bildpunkten (5 Megapixel) und einer Bildrate von 15 Aufnahmen pro Sekunde (FPS) bei maximaler Auflösung. Die niedrige Bildrate hat in diesem Fall keine negativen Auswirkungen auf die Messungen, siehe dazu 3.7. Die Belichtungszeit kann zwischen $\frac{1}{20\,000}$ und 30 Sekunden gewählt werden. Die Kamera wird über eine GigE-Schnittstelle mit dem Computer verbunden. Dabei handelt es sich um einen Industriestandard zur einfachen Anbindung in einem Gigabit-Ethernet System. Da durch die hohe Auflösung auch erhebliche Datenmengen zustande kommen, empfiehlt es sich die Kamera direkt an den PC anzuschließen, da es durch die Anbindung über einen Router zu erheblichen Problemen in der Datenverarbeitung, insbesondere mit LabVIEW, kommen kann.

Die Kamera verfügt ausschließlich über einen manuellen Zoom, der nach Montage und Ausrichtung der Kamera eingestellt wird. Da der Abstand zwischen Optik und Objekt aber immer gleich bleibt, führt das zu keinen Einschränkungen in der Handhabung. Zusätzlich verfügt die Kamera auch über die Möglichkeit einer Trigger-Funktion. Hierbei wird der Auslöser mittels externem Trigger-Signal gestartet. Da die Versuche aber ohne Laufrad im stationären Zustand durchgeführt werden, ist das Triggern nicht notwendig.

3.3.2. Vermessung von oben

Für die erste Messreihe der Durchmesserermessung des Freistrahls wird die Kamera oberhalb des Prüfstandes montiert. Somit ist es möglich, die Breite und horizontale Lage des Wasserstrahles zu bestimmen. Um einen freien Blick auf den Wasserstrahl zu ermöglichen, wird die obere Plexiglas-Abdeckung des Prüfstandes entfernt.

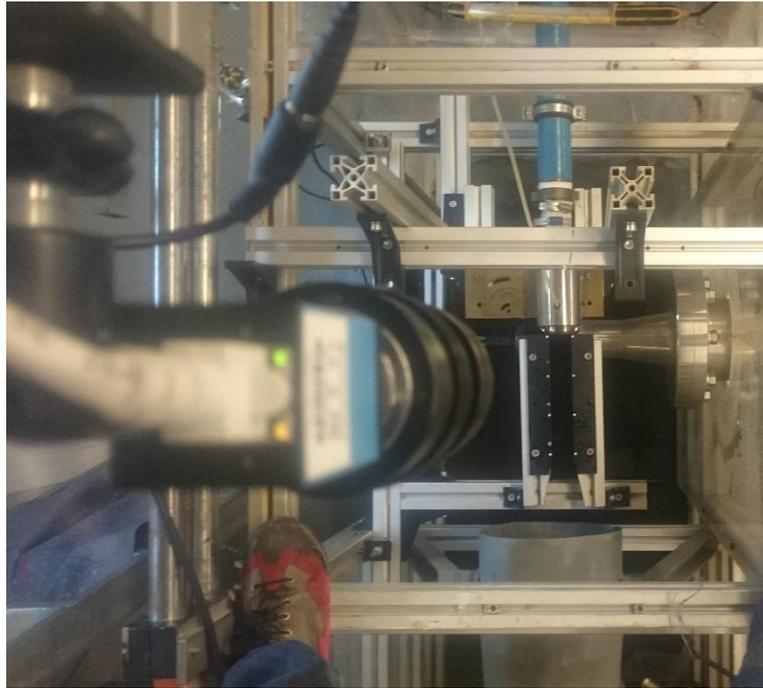


Abbildung 17: Vermessung von Oben (Bremsdüse)

Um eine möglichst große Flexibilität zu erreichen, wurde die Kamera zunächst an eine horizontal verstellbare Einrichtung montiert. Dadurch war es möglich, die Kamera entlang des Wasserstrahls zu verschieben und einen größeren Bereich zu vermessen. Diese Einrichtung erwies sich allerdings als nicht zielführend. Durch starke Vibrationen, die von der Düse über das Versuchsgehäuse auf die Kamera übertragen wurden, kam es immer wieder zu unscharfen Bildern, eine ordnungsgemäße Vermessung war somit nicht gewährleistet. Des Weiteren ist eine Verschiebung der Kamera nicht notwendig, da bei optimaler Positionierung der Kamera der betrachtete Bereich ausreichend ist. Aus diesen Gründen wurde die Kamera, unabhängig vom Versuchstand, fest mit dem Gebäude verbunden.

Bei der Ausrichtung der Kamera wurde größter Wert auf Präzision gelegt, da eine Abweichung bei der Positionierung zu Verzerrungen (siehe 3.5) und somit auch zu Abweichungen in der Messung führen würden. Die Kamera ist sowohl im Hinblick auf die Lage, als auch auf den Winkel genau an das Düsenmundstück angepasst. Die Linse ist parallel zur Strahlebene ausgerichtet und ihr Mittelpunkt liegt genau über der Strahlachse. Der Abstand zum Strahl beträgt 1,2m wobei es sich wie in 3.3.1 erwähnt, um den Mindestabstand zwischen Linse und Objekt handelt. Bei maximalem Zoom kann der entscheidende Strahlabschnitt, 140mm ab Düsenmundstück, genau mit einem Bild vermessen werden. Somit ist weder eine Verschiebung der Kamera, noch ein größerer

Abstand notwendig. Die Kamera ist genau im 90° -Winkel zum Mundstück ausgerichtet, um das Bildformat ideal ausnutzen zu können.

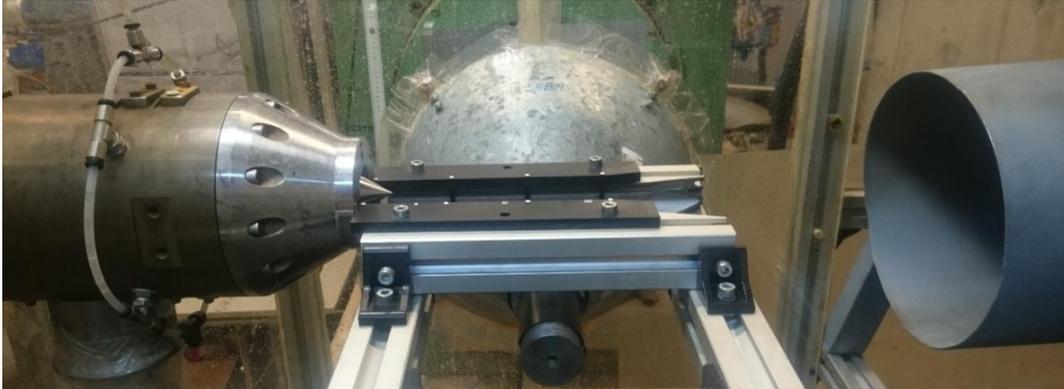


Abbildung 18: Referenzplatten an der Düse

Als Referenz, sowohl für die Einrichtung der Kamera als auch für die spätere Vermessung mittels Software, dienen zwei Platten, die beidseits des Freistrahls angebracht sind. Auf den schwarzen Platten befinden sich jeweils vier weiße Punkte auf einer Linie mit demselben Abstand zu einander. Diese Punkte dienen der Erstellung des lokalen Koordinatensystems und als Größenskala (siehe 3.7 Das Messprogramm). Die Skala ermöglicht eine Umrechnung von Pixel in Millimeter.

Des Weiteren dienen sie zur Positionierung der Kamera. Es ist somit möglich, Lageabweichungen von der Mittelachse und Winkelabweichungen im $0,1$ Millimeter- bzw. $0,1$ Gradbereich zu bestimmen.

Der Abstand zwischen den Platten ist so gewählt, dass es bei maximalem Durchfluss zu keiner Berührung zwischen Wasserstrahl und Platten kommt und der Strahl ungestört bleibt. Die Platten selbst liegen an der Kopfseite direkt am Düsenmundstück auf. Dadurch sind sie genau im rechten Winkel zur Düse ausgerichtet und ihre Position zum Mundstück ist eindeutig bestimmt. Die Plattenebene ist genau auf Höhe der Strahlachse und ist somit gleich der Vermessungsebene. Die mattschwarze Lackierung verhindert störende Lichtreflexionen.

3.3.3. Vermessung von der Seite

Um auch eine seitliche Betrachtung des Strahls zu ermöglichen, wird die Kamera neben dem Versuchstand platziert. Der horizontale Messaufbau unterscheidet sich nur geringfügig von der vertikalen Vermessung. Auch hier wird die Kamera wieder unabhängig vom Versuchstand montiert und über eine Halterung fest mit dem Gebäude verbunden. Die Ausrichtung des Linsenmittelpunkts zur Strahlachse erfolgt im Unterschied zur horizontalen Vermessung nicht mittels Lot sondern mit Hilfe eines Kreuzlinien-Lasers.

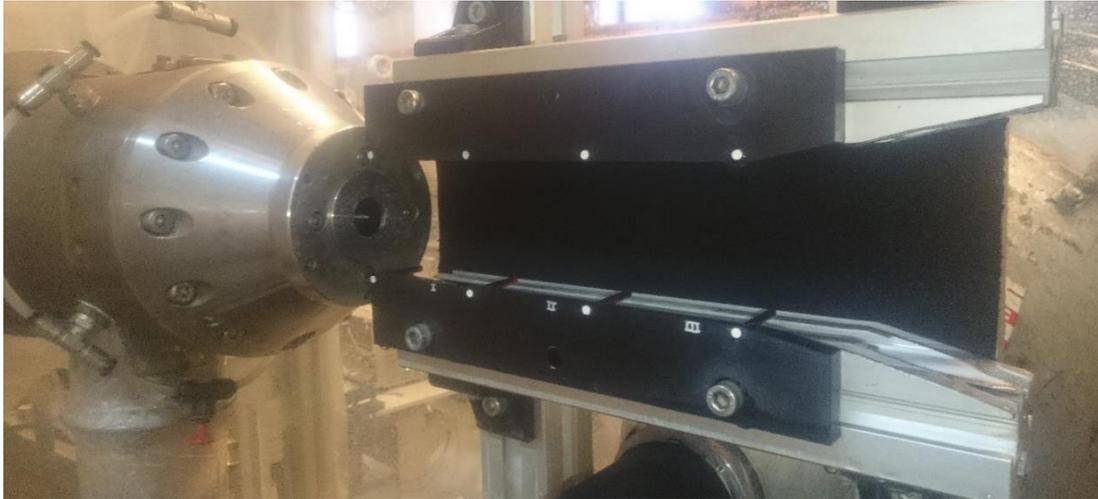


Abbildung 19: Vermessung des Wasserstrahls von der Seite

Der Abstand beträgt die bereits erwähnten 1,2 Meter. Die Referenzplatten werden um 90° entlang der Strahlachse gedreht und liegen am Kopfende wieder am Düsenmundstück auf. Der größte Unterschied zur horizontalen Messung ist der Hintergrund. Da sich hinter dem Strahl kein dunkler Untergrund mehr befindet, wird eine schwarze Platte hinter dem Wasserstrahl angebracht, welche als gleichmäßiger Hintergrund dient. An der Platte haftende Wassertropfen können zu groben Messfehlern führen. Um dies zu vermeiden, ist die Platte mit einem schwarzen Stoff überzogen.

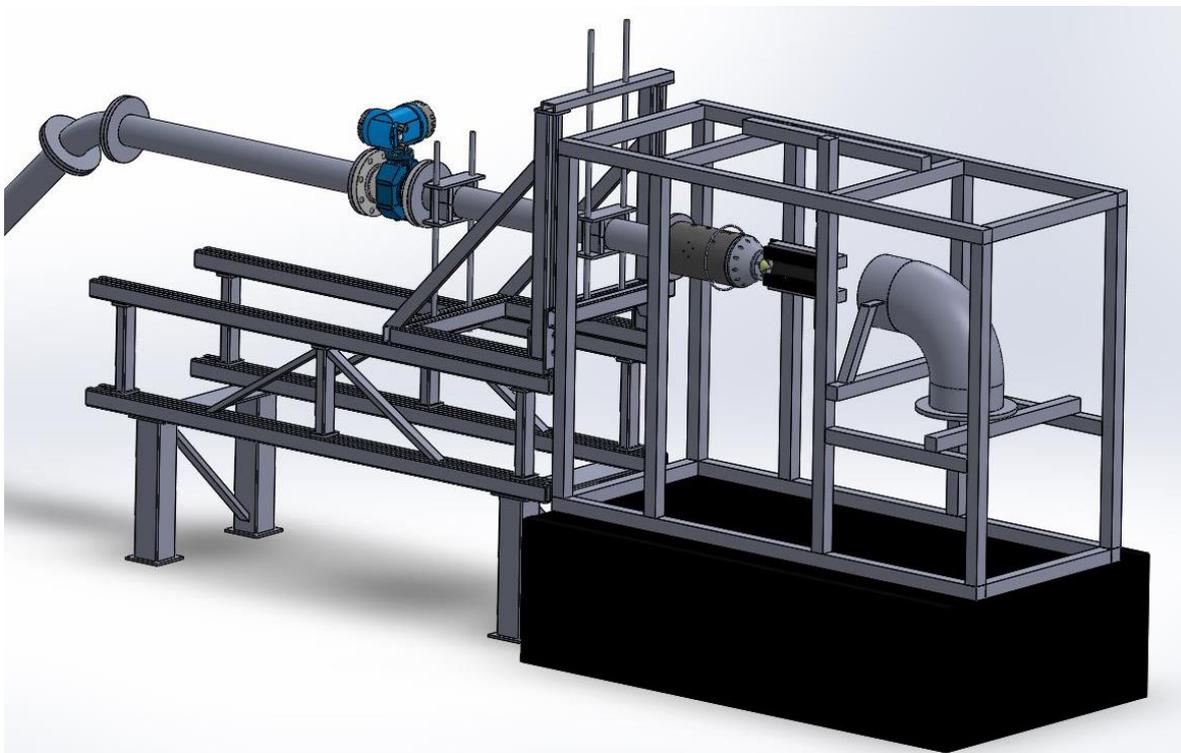


Abbildung 20: Aufbau der Vermessung von der Seite

Wie in Abbildung 20 ersichtlich, sind alle nötigen Einbauten mittels Alu-Profilen befestigt. Durch das flexible System kann der Pelton-Versuchsstand ohne große Umbauarbeiten verwendet werden. Die Laufradwelle muss während des Versuchs nicht ausgebaut, sondern nur mit schwarzem Stoff abgedeckt werden.

3.3.4. Beleuchtung

Neben der Positionierung spielt auch die Beleuchtung eine entscheidende Rolle für die Qualität des Versuchs. Das Optimum wird durch drei Lichtquellen erzielt. Ein großer Leuchtstoffröhren-Strahler befindet sich nach der Messstrecke und leuchtet entlang der Achse stromaufwärts. Wichtig hierbei ist, dass diese Lichtquelle breiter als der Wasserstrahl selbst ist, denn nur so ist eine gleichmäßige Ausleuchtung auf beiden Seiten möglich. Zur Anwendung kommt eine OPUS 2 Leuchte mit 48W und 3600 Lumen. Zwei weitere Stablampen befinden sich links und rechts neben der Messstrecke auf Höhe des Düsenmundstücks. Dadurch können Spiegelungen durch das Mundstück vermieden werden. Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass der Hintergrund komplett schwarz ist. Der Wasserrücklaufbereich unterhalb der Düse darf deshalb nicht beleuchtet werden, um Reflexionen vorzubeugen.



Abbildung 21: Beleuchtung mit drei Lampen

3.4. Vermessung des Strahls der Bremsdüse

Zusätzlich zur Vermessung des Strahls der Pelton-Düse wird auch der Wasserstrahl einer Bremsdüse untersucht. Wie bereits in 1.3 beschrieben, handelt es sich dabei um eine unregulierte Düse ohne Einbauten.

3.4.1. Aufbau der Bremsdüse

Ähnlich der Pelton-Düse ist es auch bei der Bremsdüse möglich, das Mundstück zu wechseln. Sie unterscheidet sich aber dahingehend, dass das Mundstück nicht mehr in ein größeres Düsenmundstück eingepasst wird, sondern der komplette vordere Teil der Düse getauscht wird. Für die Versuche stehen drei verschiedene Mundstücke mit einer kegelförmigen Geometrie zu Verfügung:

- B1: 45° Winkel, 42mm Länge, 10mm Öffnung
- B2: 45° Winkel, 38 mm Länge, 15mm Öffnung
- B3: 45° Winkel, 34 mm Länge, 20mm Öffnung

Auch hier sind wieder die gleichen Winkel bei unterschiedlichen Öffnungen der Grund für die unterschiedlichen Längen.

Auf Grund der deutlich kleineren Baugröße erfolgt die Druckmessung hier nicht über eine Ringleitung sondern nur über einen einzelnen Druckanschluss oben an der Düse. Dadurch muss besonderer Wert darauf gelegt werden, dass sich keine Luft in der Zuleitung zum Druckaufnehmer befindet.

3.4.2. Zuleitung zur Bremsdüse

Die Zuleitung zum Versuchstand muss auf Grund der deutlich kleineren Bauform im Vergleich zur Pelton-Düse adaptiert werden. In der horizontalen Zuleitung wird mit einem Abstand von 70cm zur Durchflussmessung ein Reduktionsstück von DN100 auf DN50 eingebaut. Der Abstand ist notwendig, da 50cm nach der Durchflussmessung keine Einbauten vorhanden sein dürfen. Nach der Reduktion folgt ein 60cm langes DN50 Rohr. In diesem Bereich soll sich die Strömung wieder ausbilden.



Abbildung 22: Bremsdüse im Versuchsaufbau

Auch dieser Aufbau ist wieder so gestaltet, dass es zu keinen Sekundärströmungen kommen kann. Der Anschluss vom Rohr zur Bremsdüse wird über einen Feuerwehrschauch hergestellt. Diese Verbindung führt dazu, dass kurz vor der Bremsdüse eine Kante in die Strömung hineinragt. Konstruktionsbedingt lässt sich diese Kante nicht vermeiden.

3.4.3. Optische Vermessung des Strahls der Bremsdüse

Der Versuchsaufbau zur optischen Vermessung des Wasserstrahls der Bremsdüse unterscheidet sich nur auf Grund der Größenverhältnisse zur Vermessung der Pelton-Düse. Analog zur Vermessung des Strahls der Pelton-Düse wird auch hier wieder eine Messung von oben sowie auch eine Messung von der Seite vorgenommen. Die dafür notwendigen Einbauten müssen nur geringfügig adaptiert werden.

3.5. Projektion und Fehlerabschätzung

Eine optische Durchmesserbestimmung des Strahls mittels Kamera ist nur durch eine geeignete Perspektive möglich. Das Bild darf nicht verzerrt sein, da es sonst zu großen Messfehlern kommt. Um dies zu gewährleisten, müssen sowohl die Strahlebene als auch die Referenzplatten parallel zur Linsenebene ausgerichtet werden (siehe 3.3.2). Man spricht dann von der Frontalperspektive, da alle Linien in dieser Ebene unverzerrt dargestellt werden. Die Projektion des Freistrahls wird durch diese Methode zu einem unverzerrten skalierten Rechteck in der Bildebene. Der Skalierungsfaktor, der das Verhältnis zwischen wahrer Größe und Abbildung angibt, wird durch die Referenzplatten bestimmt. Diese müssen sich somit genau auf der Höhe der Strahlebene befinden, um eine richtige Skalierung für den Durchmesser zu erhalten.

Die Position der Kamera wird durch den Mindestabstand M zum Objekt bestimmt. Der Durchmesser der Kameralinse L ist bei maximaler Düsenöffnung des Mundstücks M_1 kleiner als der Strahldurchmesser. Daraus resultiert, dass es zu einer Abweichung bei der Durchmesserbestimmung kommt, wie in Abbildung 24 ersichtlich. Da die Differenz zwischen Linse und Durchmesser bei maximaler Öffnung nur 3mm und der Abstand M 1200mm beträgt, kann der Fehler auf folgende Weise abgeschätzt werden:

$$\tan \alpha = \frac{r - l}{M} \quad (29)$$

Die Abweichung des Radius Δr beträgt somit

$$\Delta r = r(1 - \cos \alpha) \quad (30)$$

Wenn gilt, dass $l < r$ ist, auch bei maximaler Öffnung der Düse und somit bei maximalem Strahlradius $M \gg r - l$. Daraus resultiert $\alpha \approx 0$ und die Abweichung bei der Bestimmung des Radius kann somit vernachlässigt werden. Bei maximaler Düsenöffnung ist der Fehler kleiner als 0,001% und ab einem Strahldurchmesser $l > r$ ist der Fehler gleich Null.

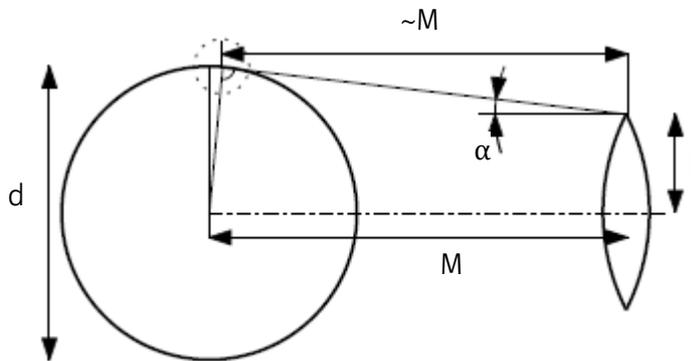


Abbildung 23: Abbildung der Projektion

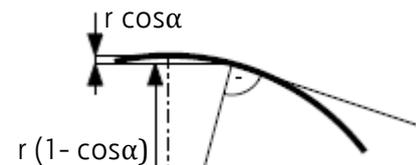


Abbildung 24: Detail der Perspektive

Da der Fehler sehr klein ist, ist eine Vergrößerung des Abstands M zwischen Kamera und Objekt nicht notwendig. Bei M2 und allen Bremsdüsenmessungen gilt stets $l > r$. Somit kommt es zu keiner Abweichung durch die Projektionsmethode. Der Freistrahle ist hier immer kleiner als der Linsendurchmesser.

Der Messfehler der optischen Durchmesserermessung lässt sich über die Kameraauflösung und den Abstand bestimmen. Bei diesem Versuchsaufbau und der verwendeten Kamera ergibt sich ein Millimeter-Pixel-Verhältnis von 0,06mm/pix. Im Abschnitt Messprogramm (3.7) wird auf die mittels LabVIEW durchgeführte Kantendetektierung und die Genauigkeit des Programms eingegangen.

3.6. Messunsicherheit

Der Messfehler bezeichnet die Differenz zwischen dem wahren Wert und dem Messwert der einzelnen Messgrößen. Der Messfehler lässt sich in systematische und zufällige Fehler aufteilen.

3.6.1. Systematischer Fehler

Bei der systematischen Messunsicherheit handelt es sich um jenen Teil der Messunsicherheit der bei gleichen Bedingungen immer mit demselben Betrag auftritt. Sie wird durch die Messgeräte und deren Unsicherheit sowie die Messmethode verursacht. Die systematische Messunsicherheit verursacht somit eine Abweichung zwischen wahren Wert und Messergebnis. Mit einer richtigen Kalibrierung der Messgeräte lässt sich die Unsicherheit der Geräte berichtigen. [21]

Unter 2.1.4 wird der direkte Zusammenhang zwischen Düsenwirkungsgrad und Geschwindigkeit im engsten Querschnitt gezeigt. Für den Düsenwirkungsgrad gilt somit

$$\eta_D = \frac{8 Q_1^2}{2 g d_1^4 \pi^2} \quad (31)$$

Der Wirkungsgrad η_D ist somit von Durchfluss, Druck und Durchmesser abhängig. Der systematische Fehler der nicht direkt bestimmbaren Größe η (Q, p, d) lässt sich nach [21] auf folgende Weise bestimmen

$$\Delta\eta = \eta - \eta_w = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_j} |_{x_{wj}} \Delta x_j \quad (32)$$

Da die Anteile des absoluten Fehlers aus der Durchflussmessung ΔQ und Druckmessung Δp im Vergleich dazu klein sind, können sie vernachlässigt werden. Daraus ergibt sich ein systematischer Fehler der Wirkungsgradbestimmung aus der Durchmesserbestimmung zu

$$\frac{\Delta\eta_D}{\eta_D} = 4 \left(\frac{\Delta d_1}{d_1} \right) \quad (33)$$

Daraus resultiert, dass ein Fehler in der Durchmesserbestimmung sich bei der Berechnung des Düsenwirkungsgrades um das Vierfache verstärkt.

3.6.2. Zufälliger Fehler

Der zufällige Fehler wird durch zufällige Prozesse während des Messens verursacht, er ist weder vermeidbar noch beeinflussbar. Die zufälligen Fehler lassen sich nur durch Wiederholungsmessungen erkennen und nach Methoden der Statistik erfassen und behandeln. Als Schätzwert für den wahren Wert des Durchmessers d_w gilt das arithmetische Mittel:

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (34)$$

Als Maß für die Streuung der Messwerte um den Mittelwert dient die mittlere quadratische Abweichung (Standardabweichung). [21] Da der Durchmesser direkt bestimmbar ist, gilt für die Standardabweichung des Durchmessers

$$s_d \cong \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2}{N - 1}} \quad (35)$$

Beide Werte werden direkt im Messprogramm bestimmt und über die Programmoberfläche an den Benutzer weitergegeben.

3.7. Das Messprogramm

Die Erstellung des Messprogramms erfolgte mit dem Programm LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench). Dabei handelt es sich um eine grafische Programmieroberfläche von National Instruments. Im Allgemeinen besteht ein Labview Programm immer aus zwei Oberflächen: einer Bedienoberfläche, dem sogenannten Frontpanel, und dem Blockdiagramm im Hintergrund.

Die eigentliche Programmierung erfolgt im Blockdiagramm in dem der Benutzer kleine Programme, genannt VIs (Virtual Instruments), miteinander kombiniert. Diese VIs können selbst erstellt werden oder bereits von LabVIEW vorgefertigt sein. Im Blockdiagramm erscheinen die VIs als Bausteine und werden durch virtuelle Drähte miteinander verbunden. Sie symbolisieren den Datenfluss zwischen den einzelnen VIs und machen durch unterschiedliche Farben die Art vom Signal sichtbar. Der modulare Aufbau ermöglicht es auch, komplexe Programme in kurzer Zeit zu erstellen. Auf die VIs und SubVIs wird hier nicht genauer eingegangen. Eine Auswahl der wichtigsten Blockdiagramme befindet sich in Anhang B.

Das Programm hat zur Aufgabe den Durchmesser des Freistrahls und die Lage der Strahlachse zu bestimmen. Für den Benutzer gliedert sich das Messprogramm in vier Bereiche (Registerkarten), die mit dem jeweiligen Reiter aufgerufen werden. Auf die zwei wichtigsten wird hier kurz eingegangen.

In der ersten Registerkarte Einstellungen erfolgt die Eingabe wichtiger Parameter und es werden die grundlegende Einstellung durchgeführt, die vor dem Beginn der Messung vorgenommen werden müssen. Die Verbindung zum Druck- und Durchflussaufnehmer erfolgt über die A/D Starten-Taste (1). Für die richtigen Werte muss das entsprechende Eingangssignal unter Task gewählt werden. Durch Betätigung der Aufnahme-Taste (2) wird eine Verbindung zur Kamera hergestellt und im Fenster (3) erscheint eine Liveaufnahme. Zu sehen sind am linken Bildrand das Düsenmundstück und die daran anschließenden Referenzplatten mit den Markierungen. Mit der Taste Position (4) kann die Einrichtung der Kamera bzw. der Software vorgenommen werden. Dafür wird ein lokales Koordinatensystem erstellt, das sich an den Markierungspunkten ausrichtet. Ein Algorithmus erkennt alle kreisförmigen Punkte im Bildausschnitt und die detektierten Punkte werden im Fenster (5) grün markiert und mit den Zahlen 0 bis 6 beschriftet. Es ist

dabei zu beachten, dass sich keine Wassertropfen auf den Platten befinden da dies zu Fehlern führt.

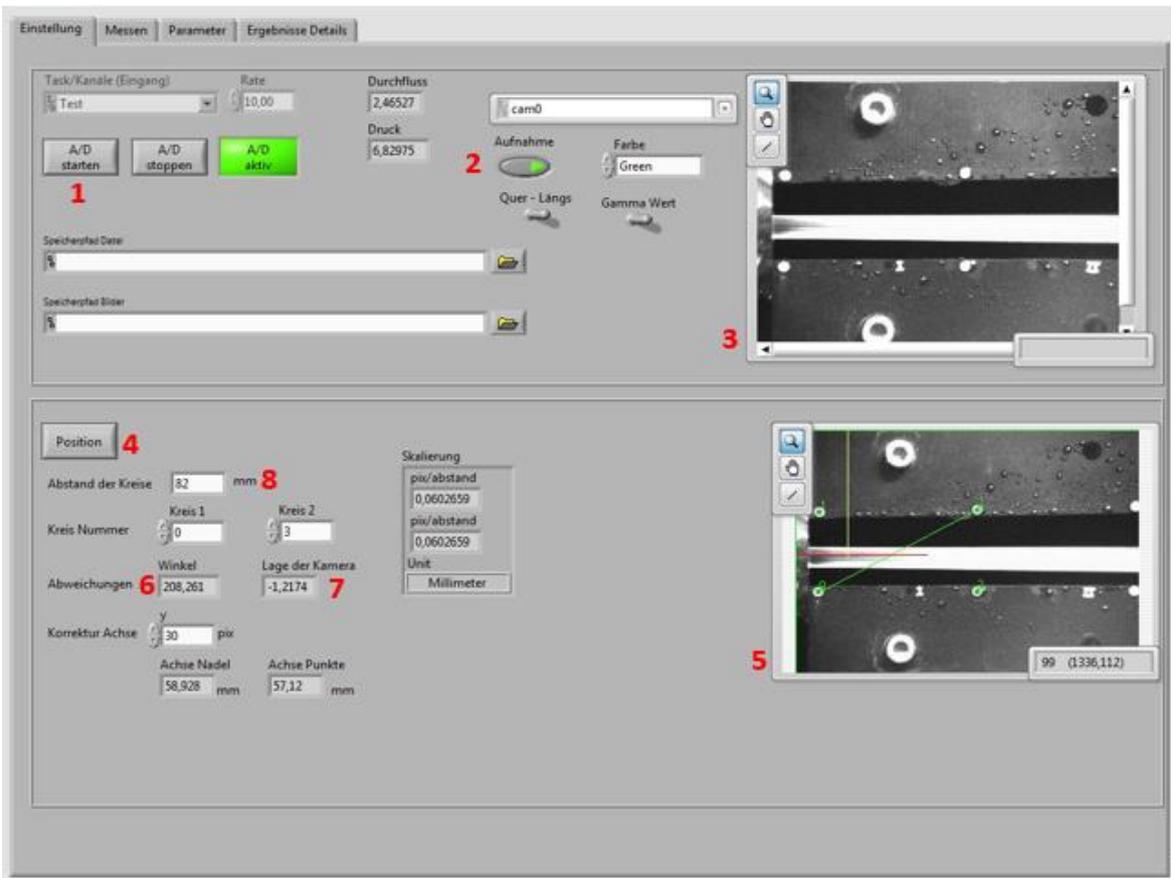


Abbildung 25: Messprogramm (Einstellungen)

In der Anzeige (6) wird die Abweichung des Winkels von den idealen 90° zwischen der Kopfseite des Mundstücks und des Bildausschnitts angegeben. Die Anzeige (7) gibt den Abstand vom Bildmittelpunkt zum Mittelpunkt des Mundstücks an. Es kann somit sichergestellt werden, dass sich der Linsenmittelpunkt genau auf Höhe der Strahlachse befindet. Beide Anzeigen dienen in erster Linie dazu die Kamera nach Umbauten wieder optimal einzurichten. In der Regel sind dafür etliche Justierungsversuche notwendig.

Da im Programm alle Positionsbestimmungen in einem Pixel-Koordinatensystem erfolgen, ist es notwendig die Werte in ein Real-World Koordinatensystem mit der Einheit mm zu überführen. Dafür wird der Abstand zwischen dem Punkt links unten und dem mittleren Punkt in der oberen Reihe per Hand am Prüfstand vermessen. Dieser Wert wird in das Eingabefeld (8) eingetragen. Das Messprogramm berechnet automatisch den Skalierungsfaktor Millimeter pro Pixel (mm/pix). Alle Ausgabewerte des Programms erfolgen nun ausschließlich in Millimetern. Der Skalierungsfaktor ist vom Abstand zwischen Kamera und Strahlachse abhängig. Beim Mindestabstand von 1,2m entspricht ein Pixel einem Abstand von 0,06mm.

Nachdem die Einstellungen abgeschlossen sind, gelangt man mittels zweiter Registerkarte zur Vermessung des Freistrahls. Diese Oberfläche besteht grundsätzlich aus mehreren Bereichen. Rechts oben erscheint wieder ein Live- Bild. Links oben werden spezifische Einstellungen getroffen. Der Eingabewert Messstellen (9) gibt an, wie viele Stellen des Strahls zwischen dem ersten und dem letzten Referenzpunkt vermessen werden sollen. Vom Programm werden automatische Messlinien erstellt und in Anzeige (10) dargestellt und nummeriert. Dabei handelt es sich um die sogenannten Region-Of-Interests (ROIs). Da im Screenshot (Abbildung 26) diese Registerkarte gerade nicht ausgewählt ist, findet sich in Abbildung 27 eine Darstellung der ROIs. Entlang dieser Linien erfolgt die Lagebestimmung beider Kanten des Wasserstrahls. In Punkt 3.7.1 wird der Kantendetektierungs-Mechanismus beschrieben. Diese ROIs können rechts unter Auswahl des Reiters ROI anstelle des Livebilds angezeigt werden. Die Länge der Messlinien kann durch die Eingabe Messlänge (11) verändert werden. Es ist wichtig die Länge immer individuell an den jeweiligen Strahl anzupassen. Umso weniger die Messlinien über den Strahl hinausragen desto weniger können Störungen wie Wassertropfen die Messung beeinflussen. Die Linien müssen aber immer über den Strahl hinausragen um die Kante ermitteln zu können.

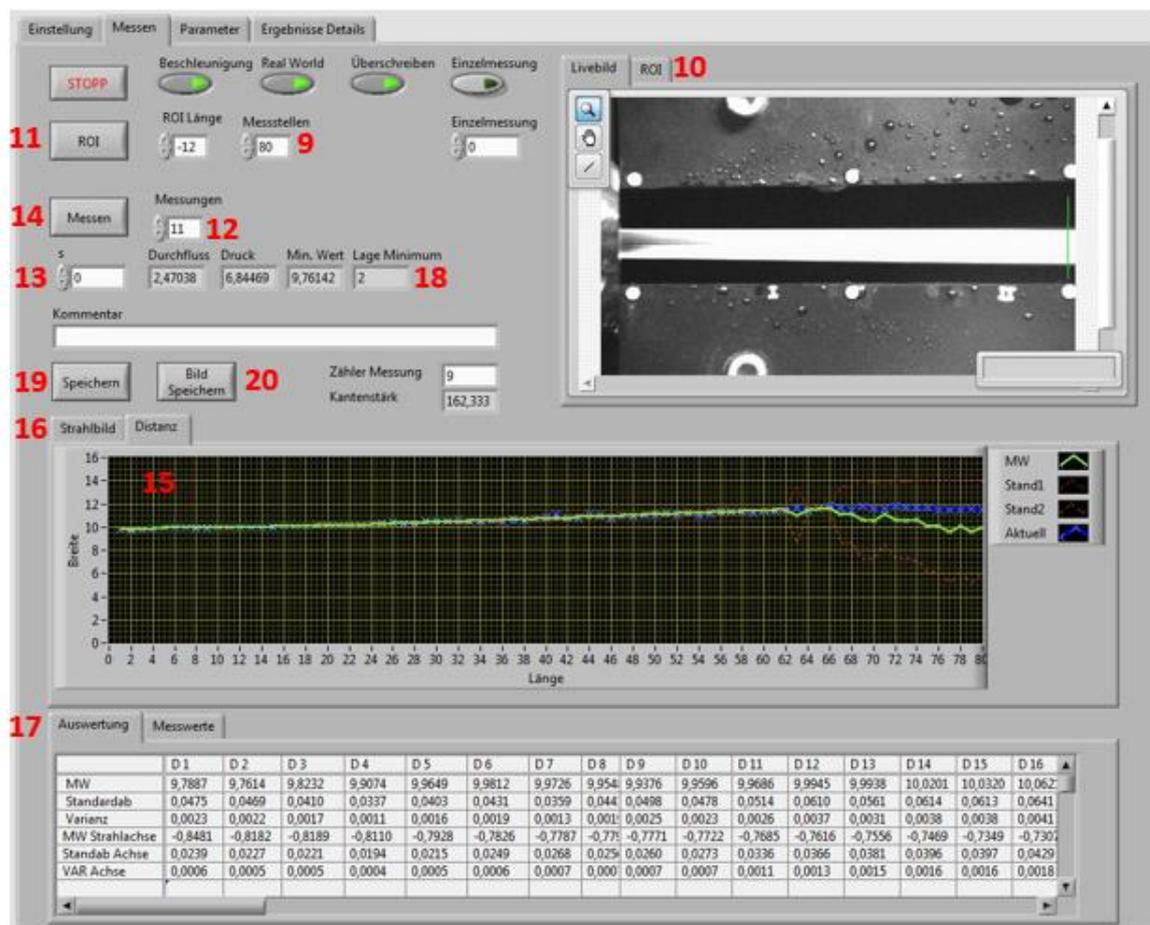


Abbildung 26: Messprogramm

Die Anzahl der Bilder die vermessen werden sollen, wird durch die Eingaben (12) bestimmt. Die Düsenstellung s muss per Hand in (13) eingetragen werden, Druck und Durchfluss werden automatisch angegeben.

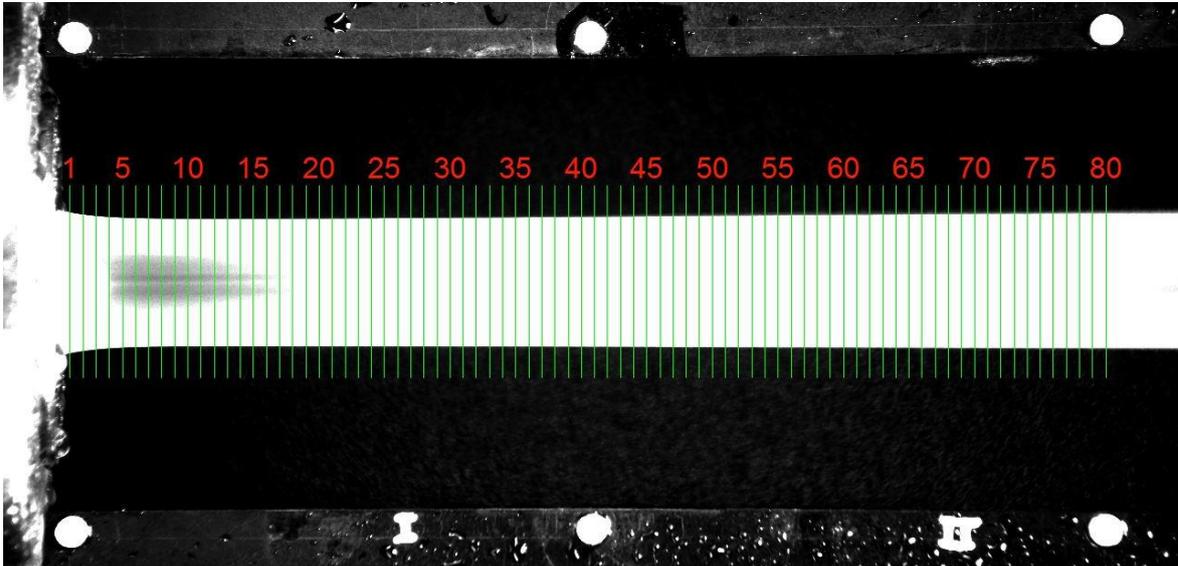


Abbildung 27: Darstellung der ROIs entlang des Wasserstrahls

Sobald die Messung mit der Taste (14) gestartet wird, erscheint im Livebild die jeweilige ROI entlang derer der Strahl gerade vermessen wird. Im unteren Bereich werden die Werte der laufenden Messung in zwei Graphen angezeigt. Der hier sichtbare Graph (15) gibt in blau den aktuellen Strahldurchmesser an, zusätzlich wird der Mittelwert (grün) und der Bereich der Standardabweichung (rot) angezeigt. Es lassen sich somit sehr schnell Rückschlüsse auf die Qualität der Messung führen. Der zweite Graph (16), siehe Abbildung 28, zeigt die Lage der zwei detektierten Kanten des Strahls (blau) sowie den Mittelwert der Lage der Mittelachse an. Die Tabelle (17) gibt nochmals alle Messwerte in gesammelter Form wieder. Es werden Mittelwert, Standardabweichung und Varianz sowohl vom Durchmesser als auch von der Lage der Strahlmittelachse angezeigt. Zusätzlich wird bei (18) noch die Lage und der Wert des kleinsten Querschnitts angegeben.

Nachdem die Messung abgeschlossen ist, können die Dateien mit (19) als .txt gespeichert werden. Der Name setzt sich automatisch aus Druck und Düsenstellung zusammen, kann aber noch ergänzt werden. Es werden sowohl alle Daten der Tabelle und zusätzlich alle Rohdaten gespeichert. Weiters wird durch die Taste Bild-Speichern (20) ein Bild der Liveaufnahme gespeichert. Auch hier wird die Düsenstellung Durchfluss und Druck automatisch zum Namen hinzugefügt um eine spätere Auswertung zu erleichtern.

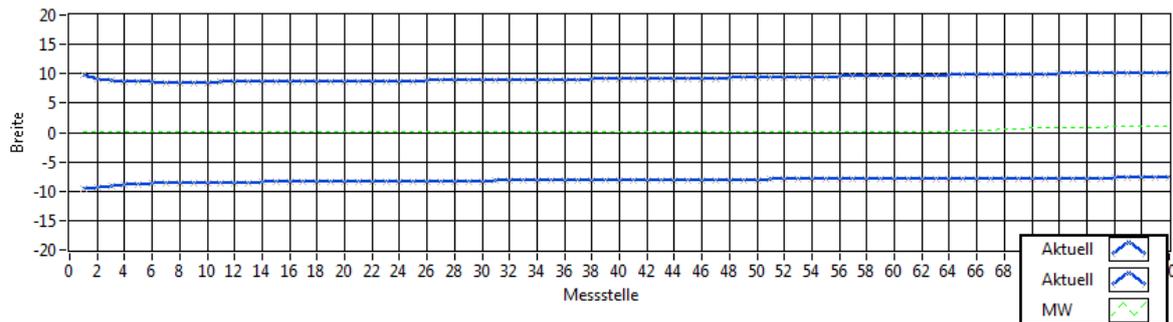


Abbildung 28: Graphische Darstellung des Strahls

3.7.1. Kantendetektierung

Das Detektieren der Kanten erfolgt entlang der ROI-Linie, die quer zum Freistrahl verläuft. Das Linienprofil (Abbildung 29) zeigt die Variation der Intensität entlang dieser Linie. Da die LabVIEW Bildverarbeitung ausschließlich Schwarz-Weiß-Bilder verarbeiten kann, werden hier nur die Grauwerte angezeigt.

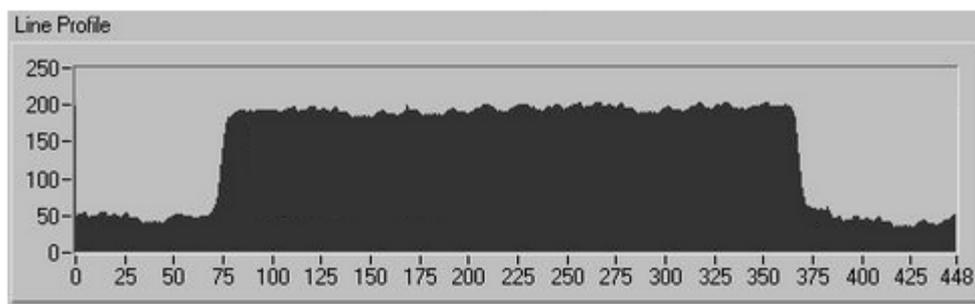


Abbildung 29: Linienprofil

Der Edge-Detection-Mechanismus von LabVIEW unterscheidet bei der Definition und Positionsbestimmung einer Kante zwischen drei verschiedenen Parametern: Kontrast, Weite und Steilheit (contrast, width and steepness). Abbildung 30 zeigt eine Beschreibung der drei Parameter. Für die Kantenbestimmung muss für jeden der drei Parameter ein Schwellenwert angegeben werden. Liegen alle drei gemessenen Werte über dem Schwellenwert, erkennt der LabVIEW Kantendetektierungs-Mechanismus die Kante.

Der Kontrast gibt hierbei den Unterschied der Lichtintensität vor und nach der Kante an. Da sich der beleuchtete Strahl deutlich vom schwarzen Hintergrund abhebt (siehe Bilder im Anhang), ist dieser Wert bei der Strahlvermessung hoch anzusetzen.

Die Weite gibt die Anzahl an Pixel an, die für die Kantendetektierung herangezogen werden. Innerhalb dieser Pixel wird der Mittelwert der Lichtintensität errechnet und der Wert vor und nach der Kante verglichen. Da die ROI-Linie an beiden Seiten stets einige Millimeter über den Strahl hinausragt, kann auch hier wieder ein größerer Pixelwert angegeben werden. Somit ist es möglich kleine Ungenauigkeiten im Hintergrund oder

durchs Bild spritzende Wassertropfen herauszufiltern, da der helle Bereich hier zu klein ist. Die Länge Messlinien (ROI) sollte trotzdem möglichst genau an den jeweiligen Strahldurchmesser angepasst werden um zusätzliche Fehler zu vermeiden.

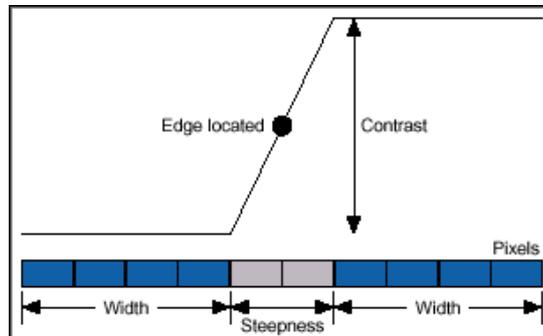


Abbildung 30: Darstellung der Kantendetektierung [20]

Die Steilheit der Kante bezeichnet die Anzahl an Pixel im Übergangsbereich und definiert somit den Bereich, in dem die Kante detektiert werden kann. Je schärfer sich der Strahl vom Hintergrund abhebt, umso kleiner kann dieser Parameter gewählt werden. Da die Strahlkante nicht über die gesamte Messstrecke konstant ist, kommen hier unterschiedliche Parameter zur Anwendung. Im konvergenten Strahlabschnitt wird ein kleinerer Parameter gewählt als im divergenten, da die Kante hier undeutlicher und diffuser ist. Der Umstieg zwischen den zwei Strahlabschnitten erfolgt automatisch. [20]

3.8. Versuchsdurchführung

Die Durchmesserbestimmung findet bei unterschiedlichen Fallhöhen beginnend bei 30m statt. Die Höhe wurde in 10m-Schritten bis auf 80m gesteigert und dann noch zusätzlich eine Messung bei 85m durchgeführt. Auf der Anlage im hydraulischen Labor lassen sich Druckhöhen bis zu 160m simulieren. Da der Wasserstrahl bei diesem Versuchsaufbau aber ohne Turbinenrad direkt in einem Rohr umgelenkt wird, wurde die maximale Höhe hier auf 85m beschränkt. Denn bereits ab einer Fallhöhe von 80m sind deutliche Schwingungen am Gehäuse des Versuchsstands wahrzunehmen.

Zuerst wurde der Strahl der zwei Mundstückeinsätze der Pelton-Düse von den zwei Kamerapositionen vermessen. Anschließend wurde die Zuleitung zum Versuchsaufbau geändert und die drei verschiedenen Bremsdüsen nacheinander eingebaut und der Strahl vermessen. Dies erfolgte jeweils wieder aus den zwei Kamerapositionen.

Bei jeder Düsenstellung und Fallhöhe wurden 50 Bilder vom Strahl aufgenommen und vom Programm automatisch verarbeitet. Die Durchfluss- und Druckmessungen fanden dazu parallel statt und wurden über die Dauer gemittelt. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit ist stark von der Anzahl der Messstellen abhängig. Bei 80 Messstellen pro Bild liegt die Verarbeitungsgeschwindigkeit bei etwa zwei Bildern pro Sekunde.



Abbildung 31: Wasserstrahl der Pelton-Düse während der Vermessung

4. Ergebnisse und Interpretation

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den Messungen genauer erläutert. Zunächst wird ein Überblick über die Düsenkennlinie gegeben und die Durchflusscharakteristika der Düse beschrieben. Im Mittelpunkt des Kapitels stehen die Daten der Querschnittsmessungen und die daraus ableitbaren Eigenschaften des Freistrahls.

4.1. Düsenkennlinie

Da die Düse sowohl die Aufgabe der Energieumwandlung als auch der Durchflussregelung hat, ist es außerordentlich wichtig, zu jeder Nadelposition den Durchfluss zu kennen. So kann für einen gewünschten Durchfluss die Nadel in die entsprechende Stellung gebracht werden. Die Düsenkennlinie stellt diesen Zusammenhang zwischen Nadelposition und Durchfluss her. Der Durchfluss wird hierfür in Abhängigkeit zur Düsenstellung angegeben (siehe Abbildung 32). Die Düsenstellung wird dimensionslos, bezogen auf die Öffnungsweite des Mundstücks, aufgetragen. Somit ist es möglich unterschiedliche Mundstücke direkt miteinander zu vergleichen.

Die Düsenkennlinien in Abbildung 32 weisen den typischen Verlauf einer quadratischen Funktion auf. Im Bereich kleiner Düsenöffnungen, bis etwa $0,4 \cdot d_0$, steigen die Kurven nahezu linear an, der Durchfluss steigt somit proportional zur Düsenbewegung. Je weiter sich die Düse öffnet, desto geringer ist die Durchflusszunahme, d.h. die Kurve flacht ab. Im obersten Bereich steigt der Durchfluss nur mehr sehr gering und ab der maximalen Öffnung kann der Durchfluss nicht mehr erhöht werden.

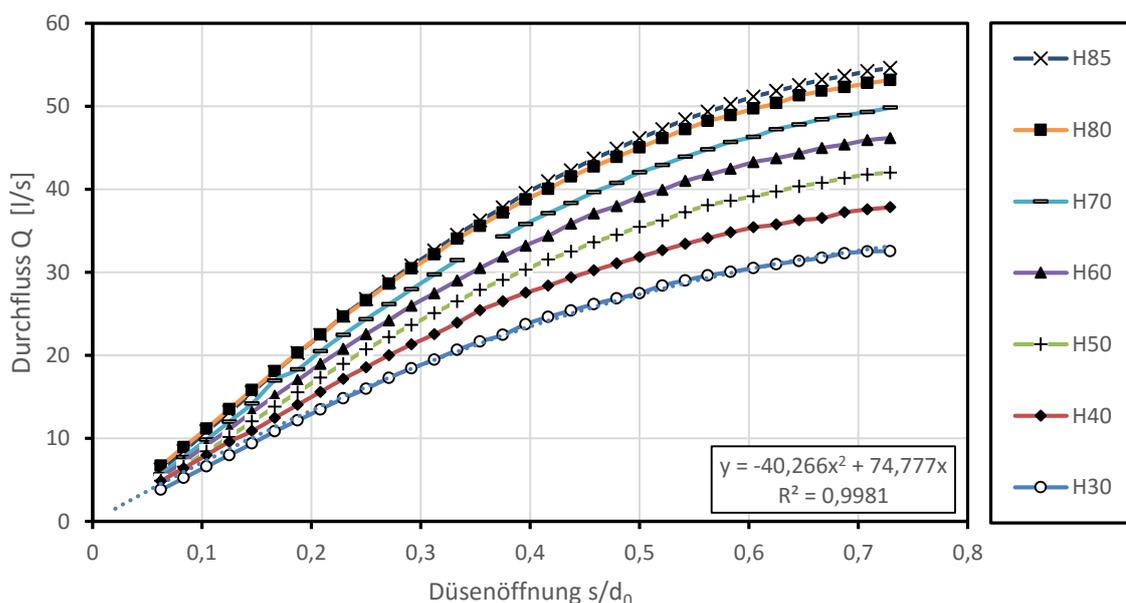


Abbildung 32: Düsenkennlinien, M1

Des Weiteren ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Durchfluss und Fallhöhe auszumachen. Der Durchfluss steigt bei gleichbleibender Nadelstellung mit steigender Höhe an. Aufgrund des nicht linearen Zusammenhangs $Q \approx \sqrt{H}$ liegen die Kurven mit steigender Höhe immer näher beisammen. Eine Ausnahme bilden die letzten beiden Kurven. Sie unterschieden sich dahingehend, dass die Fallhöhendifferenz nur 5m und nicht wie sonst 10m beträgt.

Um verschiedene Betriebspunkte besser gegenüberstellen zu können, kann der Durchfluss unabhängig von der Fallhöhe angegeben werden. Dies geschieht wieder durch die Verwendung des Einheitsdurchflusses nach Gl.(16) $Q_1 = \frac{Q}{\sqrt{H}}$. Die linke Abbildung zeigt deutlich, dass der Einheitsdurchfluss ausschließlich von der Düsenstellung abhängig ist. Alle Kurven liegen genau übereinander.

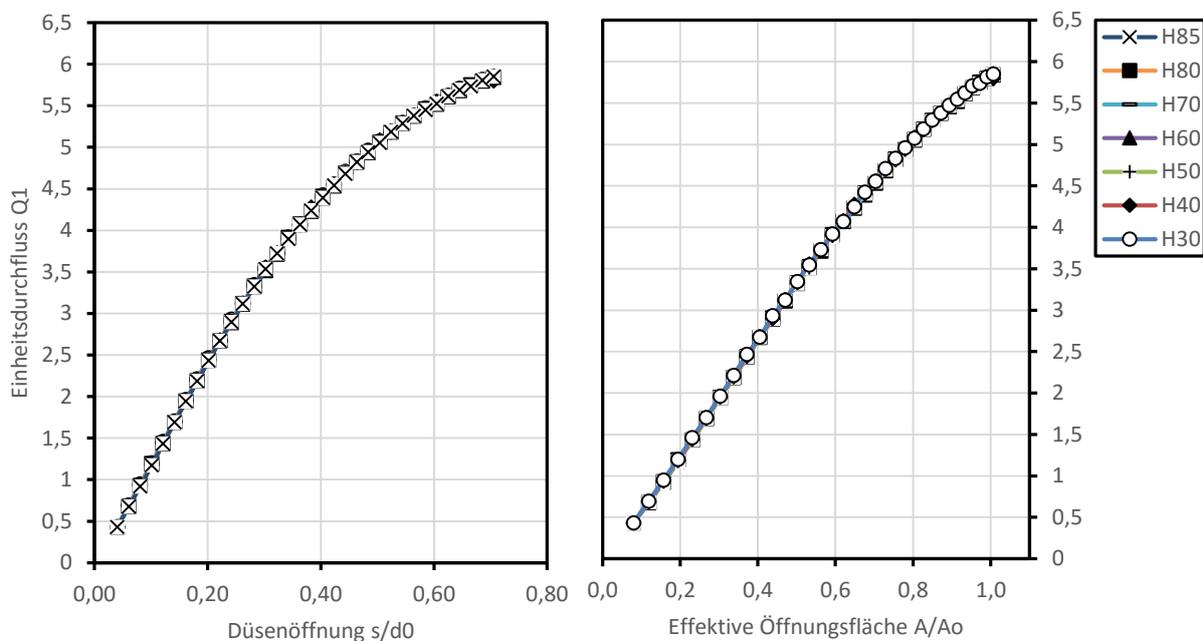


Abbildung 33: Kennlinien des Einheitsdurchflusses, M1

Die rechte Graphik in Abbildung 33 zeigt den Einheitsdurchfluss in Abhängigkeit von der effektiven Öffnungsfläche. Die Kennlinie ist vor allem dahingehend interessant als, dass die effektive Öffnungsfläche nicht linear mit der Düsenöffnung ansteigt, sondern die Form einer Parabel aufweist. Die effektive Öffnungsfläche wird auch hier dimensionslos angegeben, wobei sie sich auf die Öffnungsfläche A_0 bezieht:

$$A_0 = \left(\frac{d_0}{4}\right)^2 \pi \quad (36)$$

Der Einheitsdurchfluss steigt auch hier nahezu über den gesamten Verlauf linear. Es ist aber im oberen Bereich bei allen Linien eine Abflachung festzustellen.

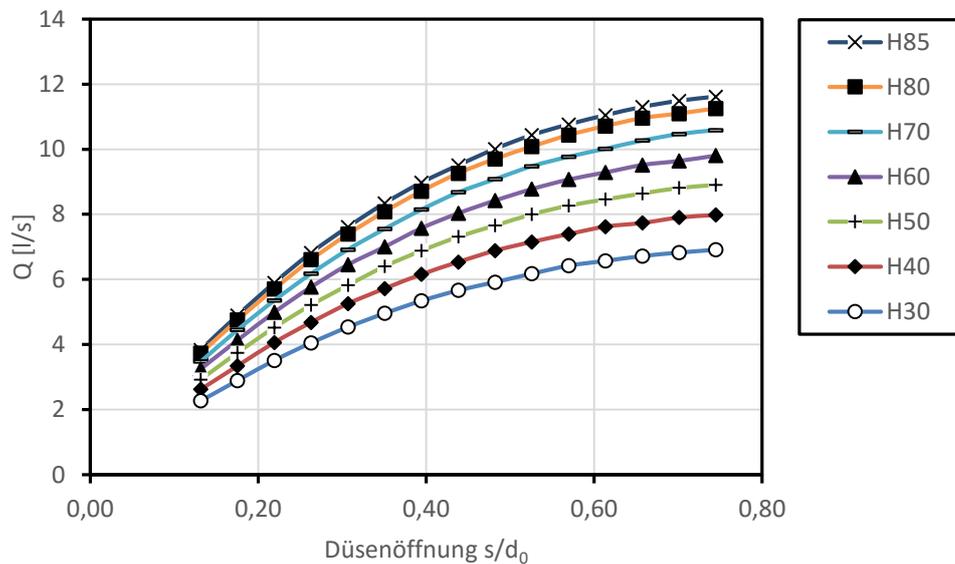


Abbildung 34: Düsenkennlinie, M2

Die Kennlinie des zweiten Mundstücks M2 (Abbildung 34) zeigt einen annähernd gleichen Verlauf. Aufgrund der deutlich kleineren Mundstücköffnung und der Ein-Millimeter-Schritte beim Öffnen der Düse ist die maximale Düsenöffnung bereits nach weniger Schritten erreicht.

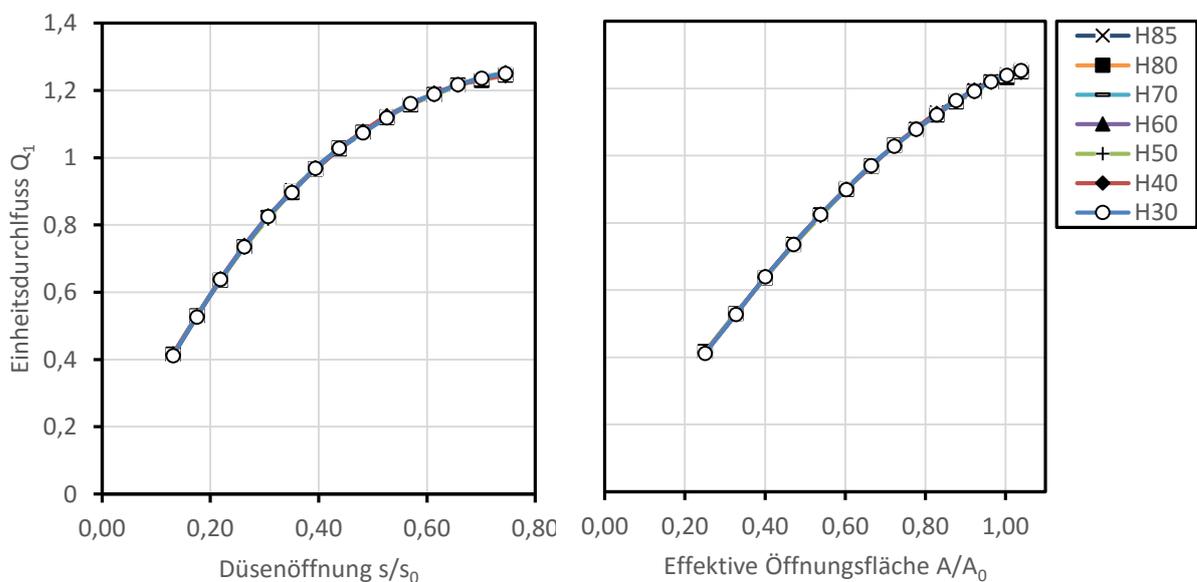


Abbildung 35: Kennlinien des Einheitsdurchflusses, M2

Um unterschiedliche Düsenformen besser vergleichen zu können, ist es zweckdienlich eine größenunabhängige Darstellung zu wählen. Hierfür ist es sinnvoll den Düseneinheitsdurchfluss Q_{11} zu definieren:

$$Q_{11} = \frac{Q_1}{d_0} \quad (37)$$

Die mittels Düseneinheitsdurchfluss erstellten Kennlinien, sind in Abbildung 36 zu sehen.

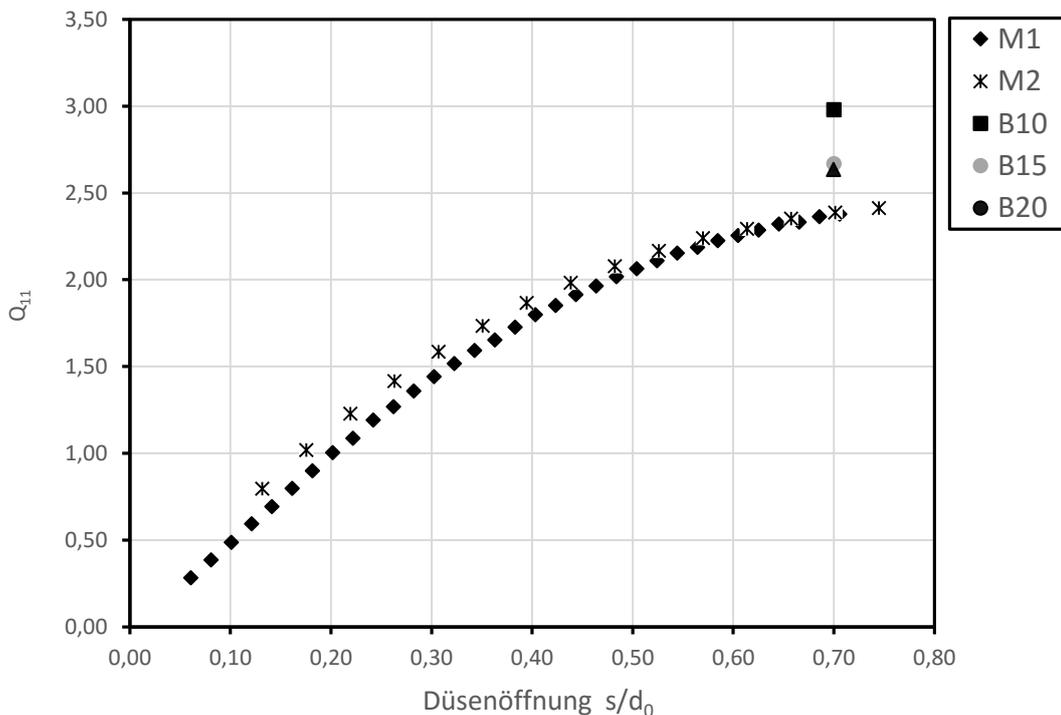


Abbildung 36: Kennlinien aller Düsen

Die Kurven der beiden Mundstücke weisen zwar Ähnlichkeiten auf, liegen aber nicht genau übereinander. Vor allem bei kleinen Düsenöffnungen zeigen sich deutliche Abweichungen. Diese lassen sich darauf zurückführen, dass die beiden Mundstücke nicht modellähnlich sind. Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben weisen beide Mundstücke einen Öffnungswinkel von 45° auf, Mundstück 2 ist aber länger und hat einen kleineren Öffnungsdurchmesser. Dadurch hervorgerufene Unterschiede in der Reibung führen zu der Differenz. Auf die Verluste wird in Abschnitt 4.5 „Wirkungsgrad“ noch genauer eingegangen.

4.1.1. Düsenkennlinie der Bremsdüse

Da Bremsdüsen ungeregelt sind und der Durchfluss somit ausschließlich vom Druck bzw. der Höhe abhängt, kann eine Düsenkennlinie in der bereits angeführten Form nicht erstellt werden. Um die drei verschiedenen Mundstücke vergleichen zu können, wird hier eine andere Darstellung gewählt.

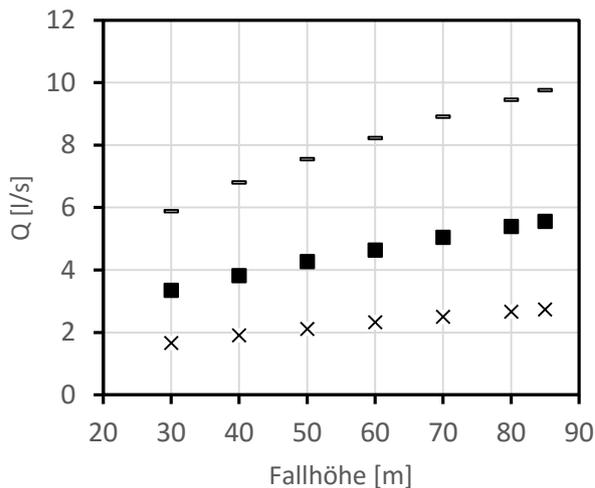


Abbildung 37: Durchfluss der Bremsdüsen

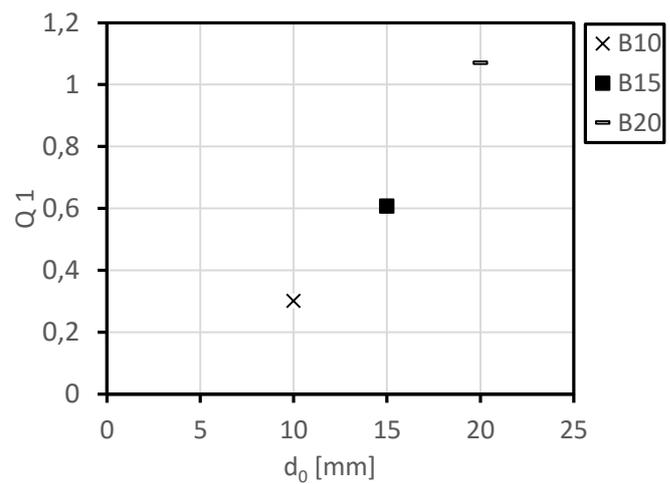


Abbildung 38: Kennlinie der Bremsdüsen

Einen guten Überblick liefert Abbildung 37, in welcher der Durchfluss der einzelnen Mundstücke in Abhängigkeit zur Fallhöhe aufgetragen ist. Erwartungsgemäß nimmt der Durchfluss bei allen Bremsdüsen mit zunehmender Höhe zu. Die Steigerung ist aber stark vom Mundstück bzw. dem Öffnungsdurchmesser abhängig. Vor allem bei dem kleinsten Bremsdüsenmundstück B10 zeigt sich nur eine geringe Zunahme des Durchflusses bei steigender Höhe. Diese Unterschiede lassen sich auch hier wieder auf zusätzliche Reibungsverluste zurückführen.

Die in Abbildung 38 analog zur Pelton-Düse erstellte Kennlinie reduziert sich, wegen der fehlenden Regulierung, auf drei Punkte.

Um die Bremsdüse direkt mit der Pelton-Düse vergleichen zu können, kann auch hier wieder der Düseneinheitsdurchfluss Q_{11} herangezogen werden, da Q_{11} unabhängig vom Austrittsdurchmesser d_0 ist. Die drei Punkte der Bremsdüse sind zusammen mit den Kurven der Pelton-Düse in Abbildung 36 zu sehen. Bei den Pelton-Düsen ist die Düse bei einer Düsenöffnung von $0,7 \cdot d_0$ vollständig geöffnet. Die effektive Öffnungsfläche entspricht hier der Fläche A_0 nach Gl. (36). Die Bremsdüse wird deshalb mit dieser Düsenstellung verglichen.

Die Unterschiede zwischen der Pelton-Düse und der Bremsdüse zeigen sich hier eindeutig. Die fehlenden Einbauten und die kleineren Öffnungen führen zu einem gänzlich anderen Strömungsverhalten. Der Düseneinheitsdurchfluss ist bei den Bremsdüsen deutlich größer. Zusätzlich lassen sich auch deutliche Abweichungen innerhalb der verschiedenen Bremsdüsen feststellen. Das kleinste Mundstück B10 weicht deutlich von den anderen Mundstücken ab. Dies ist auf den mit Abstand kleinsten Öffnungsdurchmesser und den davon abweichende Ausflussverhalten zurückzuführen.

Die Messungen zur Erstellung der Düsenkennlinie wurden zeitgleich mit den Durchmesser-
messungen des Strahls durchgeführt. Da für die genaue Bestimmung der Strahlovalität
jeweils eine Messung von oben und eine von der Seite notwendig ist, sich aber weder an
der Düse noch an der Zuleitung etwas ändert, sind die hier angegebenen Werte jeweils
der Mittelwert des Durchflusses aus beiden Messungen.

4.2. Durchmesser des Freistrahls

Der Freistrahл einer Pelton-Düse lässt sich in zwei Bereiche einteilen. Nachdem sich die
Strömung an der Abrisskante von der Düsenwand löst, beginnt der konvergente Bereich.
Der Strahl engt sich bis zur Einschnürung immer weiter ein. Diese Stelle liegt stets
stromabwärts der Nadelspitze. Anschließend beginnt der Bereich der Divergenz, in dem
sich der Strahl wieder aufweitet. Abbildung 39 zeigt die Durchmesser des Strahls entlang
der Strahlachse des Mundstücks M2. Der Druck ist bei allen Kurven gleich, sie
unterscheiden sich nur durch die Düsenstellungen.

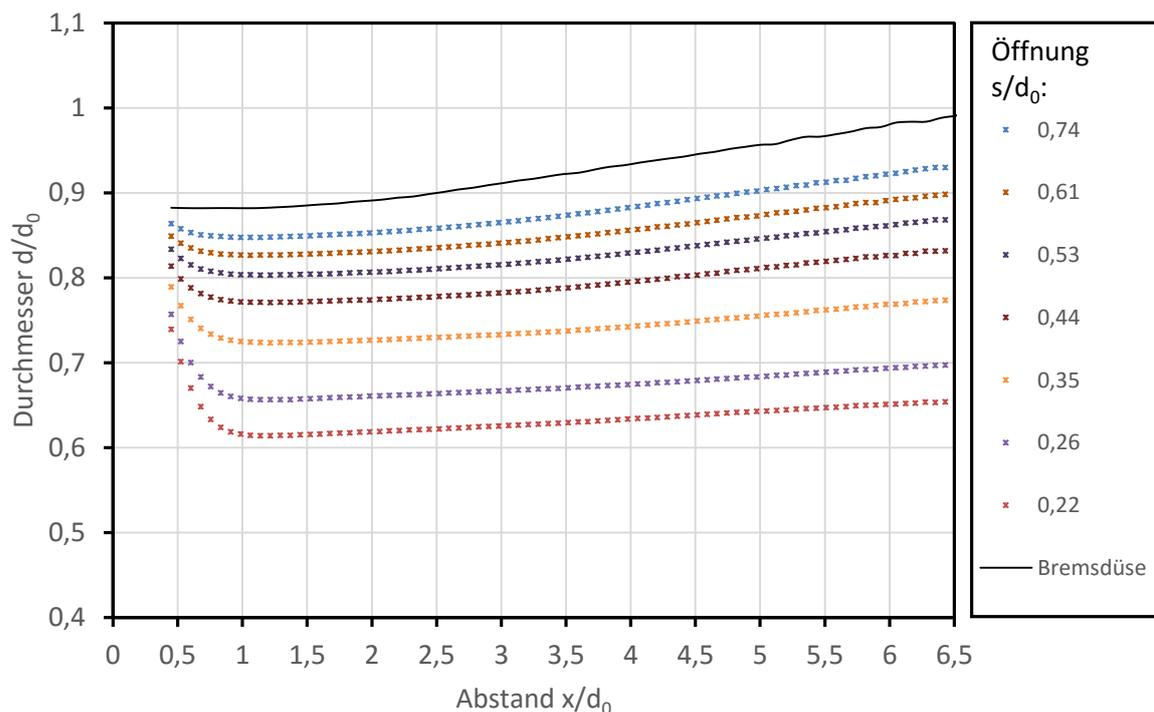


Abbildung 39: Durchmesser entlang der Strahlachse, M2, H60

Die zwei Bereiche sind deutlich zu erkennen. Je nach Düsenstellung endet der
Konvergenzbereich bei diesem Mundstück mit einem Abstand von etwa $0,75 \cdot d_0$. Der
Divergenzbereich erstreckt sich dann bis an das Ende der Messstrecke. Der konvergente
Bereich ist eindeutig kürzer als der anschließende Divergenzbereich. Die Kurven des
Mundstücks M1 weisen nahezu denselben Verlauf auf. Im Vergleich dazu zeigt die

durchgehende Linie den Verlauf des Durchmessers der Bremsdüse. Der Strahl weist keine Einschnürung auf, das bedeutet, dass der konvergente Bereich entfällt. Aber auch hier kommt es zu einer Aufweitung des Strahls mit zunehmendem Abstand zum Mundstück.

Bei einer ausschließlichen Betrachtung des engsten Querschnitts bei unterschiedlichen Höhen (Abbildung 40) zeigt sich eindeutig, dass der Durchmesser des Freistrahls nicht von der Höhe abhängig ist. Alle Kurven liegen genau übereinander. Der Durchmesser im engsten Querschnitt wird somit ausschließlich von der Düsenstellung bestimmt.

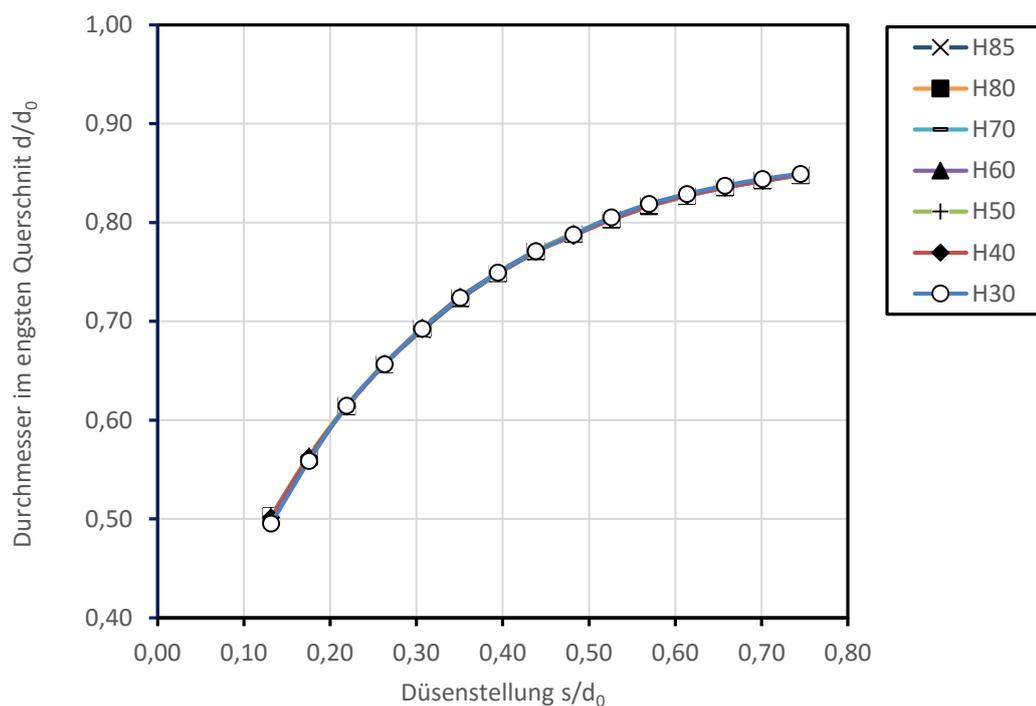


Abbildung 40: Durchmesser d_1 an der Einschnürung; M2; H30-H85

4.2.1. Qualität der Vermessung

Die Qualität der Vermessung wird von vielen Faktoren maßgeblich beeinflusst. Wie in 3.3 beschrieben, kann durch einen präzisen Aufbau und eine geeignete Beleuchtung großer Einfluss darauf genommen werden. Zusätzlich dazu ist aber auch die Strahloberfläche entscheidend für die Genauigkeit der Querschnittsvermessung. Ein wichtiger Indikator für die Qualität ist der zufällige Messerfehler, da er die Schwankung der Messwerte angibt.

In Abbildung 41 sind der Strahldurchmesser und die Fehler der Messung über den gesamten Messbereich zu sehen. Es zeigt sich deutlich, dass der Fehler mit zunehmender Strahllänge zunimmt. Diese Abweichung zeigt sich bei allen Messungen. Sie ist auf die Interaktion des Strahls mit der Umgebung zurückzuführen. Der Strahloberfläche bricht mehr und mehr auf und es ist keine deutliche Strahlkante mehr zu erkennen. Somit wird

auch eine genaue Erkennung der Kanten für das Messprogramm erschwert. Der Fehler vergrößert sich mit zunehmender Düsenöffnung. Zusätzlich wird der Fehler mit zunehmender Fallhöhe verstärkt. Auf diesen Effekt wird in 4.4. noch genauer eingegangen.

Die Einflüsse der Strahloberfläche treten erst nach dem engsten Querschnitt auf. Auf die Bestimmung des Wirkungsgrads haben sie somit keinen Einfluss, da dieser ausschließlich über den engsten Querschnitt bestimmt wird. In diesem Bereich wurde mit einer Genauigkeit zwischen 0,02-0,05mm gemessen.

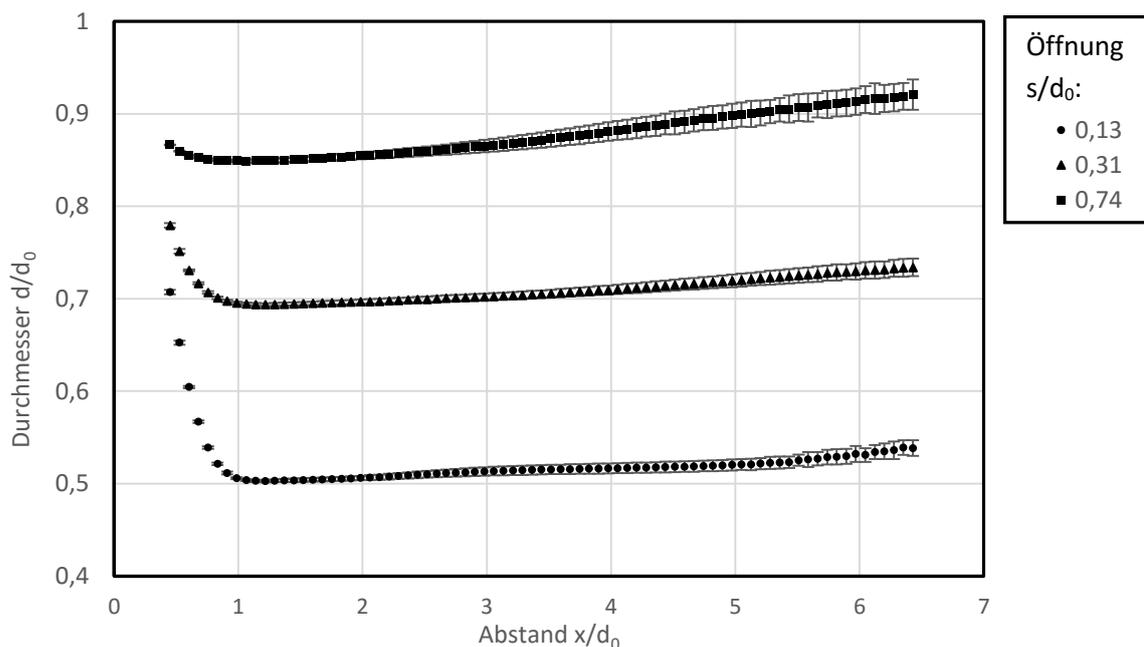


Abbildung 41: Fehler der Messung, M2, H60

4.2.2. Minimale Düsenöffnungen

Der Strahl bei Düsenöffnungen kleiner $0,05 \cdot d_0$ bildet eine Ausnahme. Aufgrund der minimalen effektiven Öffnungsfläche bildet sich nur ein dünner Film auf der Nadeloberfläche. Die starke Reibung entlang der Nadel führt dazu, dass sich ein sehr unregelmäßiger Strahl ausbildet.

Die Werte dieser Messungen weisen erheblich größere Schwankungen auf als bei Messungen größerer Düsenöffnungen und sind deshalb bedingt aussagekräftig. Da sich diese Abweichungen bereits bei den ersten Messungen am Mundstück M1 gezeigt haben, wurden diese Messungen beim Mundstück M2 nicht mehr durchgeführt. Im weiteren Kapitel sind die Werte deshalb nicht angeführt, außer es wird explizit darauf hingewiesen.

4.3. Konvergenter Bereich des Strahls

Der erste Bereich des Wasserstrahls wird als *konvergenter Bereich* bezeichnet. Dieser Bereich erstreckt sich vom Ablösepunkt an der Fase des Düsenmundstücks bis zur Einschnürung. Nach Gl.(21) lässt sich der Durchmesser des Strahls bis zur Einschnürung am besten durch eine Parabel beschreiben. Da der Ablösepunkt vom Mundstück selbst verdeckt wird, beginnen die gemessenen Werte mit einem deutlichen Abstand zum Ablösepunkt.

Abbildung 42 zeigt die gemessenen Punkte im Vergleich zur theoretischen Form des Strahls, zwischen der Abrisskante und dem engsten Querschnitt. Bei großen Düsenöffnungen ergibt die Parabel eine sehr gute Näherung zu den Messwerten. Die Punkte liegen genau auf der nach Gl.(21) bestimmten Linie. Kleine Düsenöffnungen hingegen weisen eine deutliche Abweichung zu den rechnerisch ermittelten Werten auf.

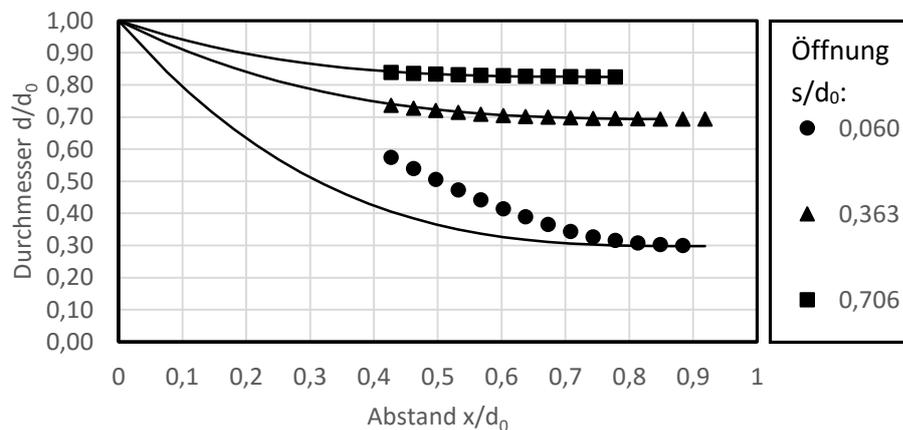


Abbildung 42: Konvergenter Bereich, M1

Der Vergleich unterschiedlicher Fallhöhen zeigt keine Unterschiede bei der Strahlkonvergenz. Die Form des Freistrahls im Bereich zwischen Ablösepunkt und Einschnürung unterliegt somit nicht dem Einfluss der Fallhöhe.

Die Ergebnisse von Mundstück M2 weisen ein ähnliches Verhalten auf. Auch hier werden große Düsenöffnungen sehr gut durch die Parabel angenähert, kleine Düsenöffnungen weichen auch wieder stärker ab. Auffallend ist, dass die Parabeln deutlich flacher ausfallen als bei Mundstück M1.

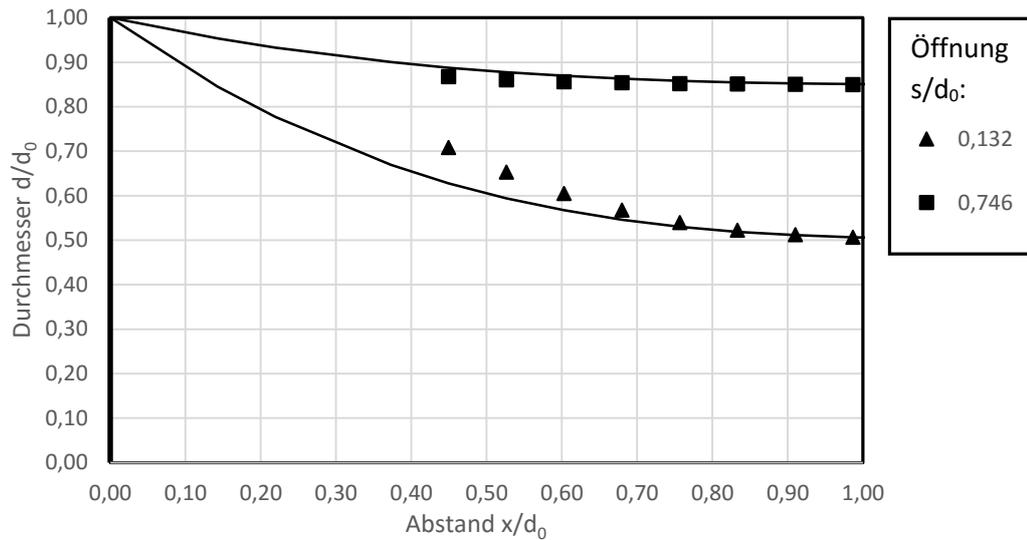


Abbildung 43: Konvergenter Bereich, M2

Beim Austrittswinkel sind Unterschiede zwischen M1 und M2 auszumachen. Dies ist dahingehend interessant, dass beide Mundstücke mit 45° denselben Öffnungswinkel aufweisen, jeweils eine 30°-Fase besitzen und bei allen Versuchen dieselbe Nadel verwendet wurde. Trotzdem unterschieden sich die Austrittswinkel bei kleinen Düsenöffnungen, Die Werte dazu finden sich in Tabelle 1.

Öffnung s/d_0	0,06	0,14	0,26	0,50	0,60	0,71	0,74
M1	49,1	41,7	33,9	20,5	18,0	16,0	-
M2	-	26,2	23,0	18,7	16,7	15,7	15,2

Tabelle 1: Austrittswinkel

Diese Unterschiede zwischen Mundstück M1 und M2 zeigen sich auch beim Vergleich der Durchmesser am engsten Querschnitt. Der Vergleich ist in Abbildung 44 angeführt.

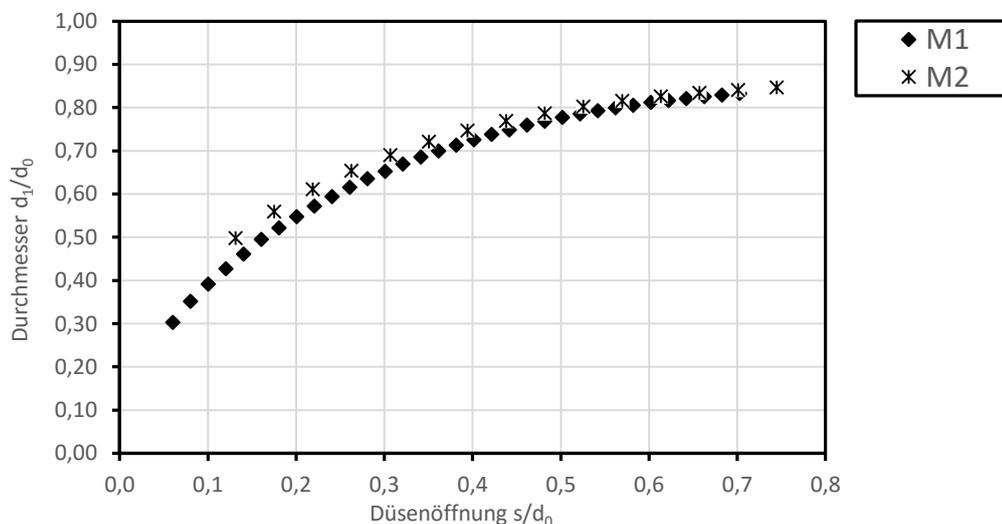


Abbildung 44: Durchmesser im engsten Querschnitt

Augenscheinlich ist, dass der Strahl des kleineren Mundstücks M2 größer ausfällt als jener des Mundstücks M1. Vor allem bei sehr kleinen Öffnungen ergeben sich hier erhebliche Unterschiede. Mit zunehmender Düsenöffnung nimmt der Unterschied ab. Bei vollkommen geöffneten Düsen lässt sich kein Unterschied erkennen. Aus den gemessenen Daten lässt sich dadurch ableiten, dass das Mundstück M1 einen im Verhältnis zu M2 dünneren Strahl hervorbringt. Auf die Gründe wird in Abschnitt 4.5 genauer eingegangen.

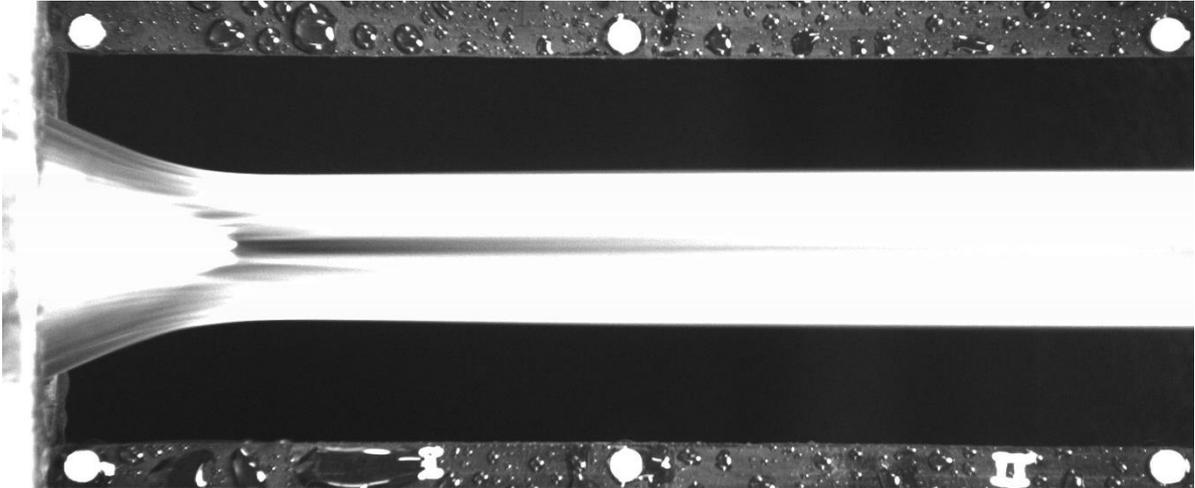


Abbildung 45: Strahl der Pelton-Düse, M1, H60

4.3.1. Konvergenzbereich der Bremsdüse

Ein Vergleich mit der Bremsdüse ist hier nur bedingt möglich. Da zur Pelton-Düse gänzlich verschiedene Strömungsverhältnisse herrschen, bildet sich auch eine andere Strahlform aus. Der Strahl der Bremsdüse weist die zwei Abschnitte (konvergenter und divergenter Bereich) nicht oder nur bedingt auf. Der engste gemessene Querschnitt wird direkt am Austrittspunkt aufgenommen. Der konvergente Bereich, wie er bei der Pelton-Düse vorhanden ist, entfällt somit. Dies ist auch in Abbildung 46 zu sehen.

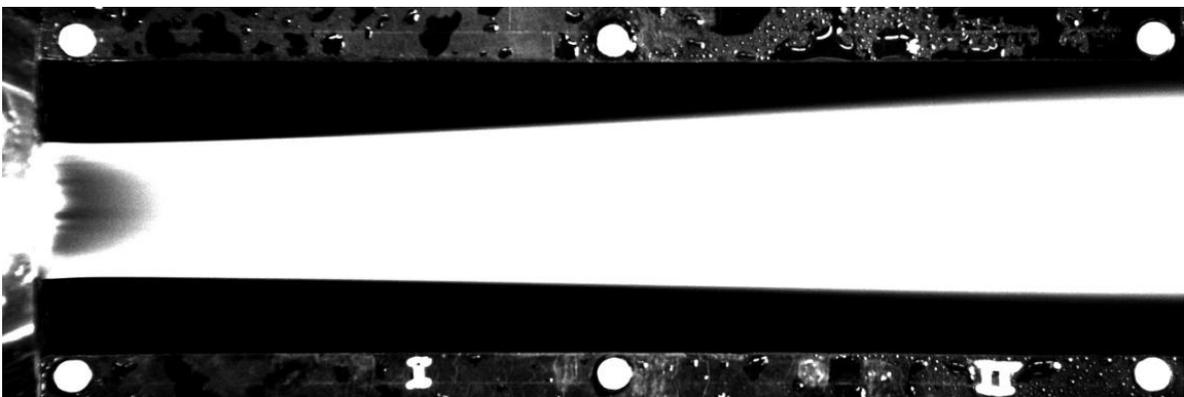


Abbildung 46: Strahl einer Bremsdüse, B20; H80

4.4. Strahlaufweitung

Nachdem der Freistrahл die Stelle der maximalen Kontraktion, die *Einschnürung*, erreicht hat, weist er eine eindeutige Aufweitung auf. Diese Aufweitung wird durch die Bildung eines Wasser-Luft-Gemisches an der Randschicht hervorgerufen. Diese Strahldivergenz lässt sich nach Gleichung (22): $\tan \beta = \left(\frac{\Delta r}{\Delta x}\right)$ durch den Winkel β beschreiben. Dabei handelt es sich um die halbe bzw. einseitige Erweiterung des Wasserstrahls. Als Referenzdurchmesser dient hierfür wieder der engste Querschnitt. An dieser Stelle kann davon ausgegangen werden, dass es nur zu einer unbedeutend kleinen Interaktion zwischen Wasser und Luft kommt.

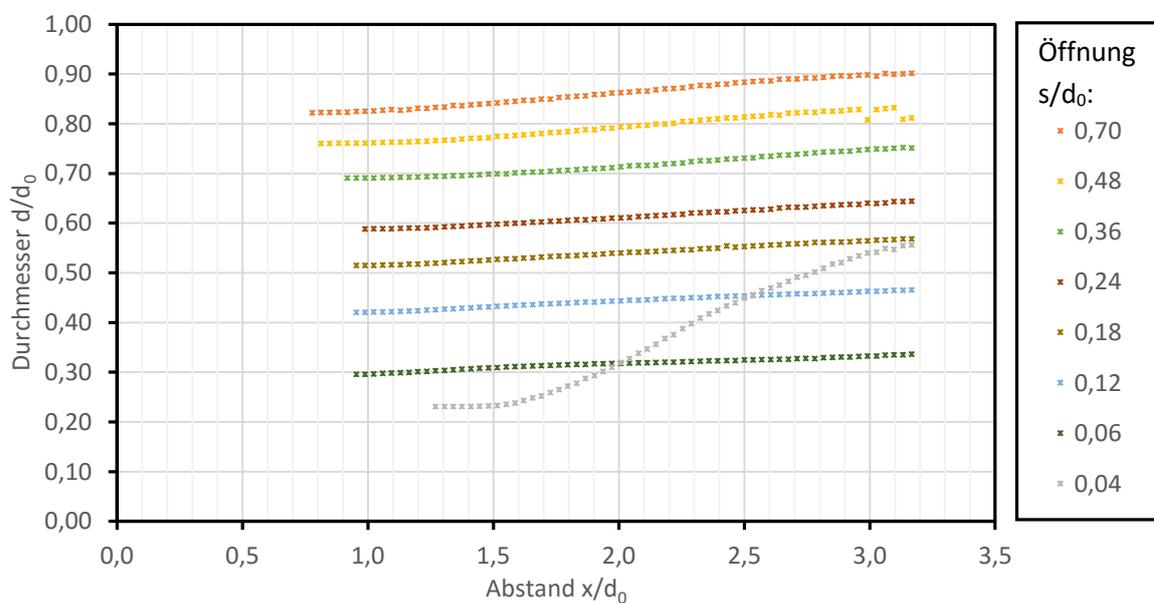


Abbildung 47: Strahlerweiterung entlang der Strahlachse, M1, H60

Abbildung 47 zeigt die Entwicklung des Durchmessers des Mundstücks M1 entlang der Strahlachse ab der Position des engsten Querschnitts. Die Abbildung zeigt unterschiedliche Düsenöffnungen, die Fallhöhe ist konstant. Auch hier ist wieder erkennbar, dass die Position der Einschnürung von der Düsenstellung abhängig ist. Weiters lässt sich bei allen Öffnungen eine eindeutige Erweiterung des Durchmessers erkennen. Diese Erweiterung ist wieder, wenn auch nur geringfügig, von der Düsenstellung abhängig. Größere Düsenöffnungen weisen etwas größere Aufweitungen auf. Bei kleineren Düsenöffnungen zeigt sich, wie schon bei der Konvergenz, dass hier ein kompakterer Strahl erzeugt wird. Wie in Tabelle 1 ersichtlich, fällt die Divergenz merklich geringer aus. Dies lässt sich auf die reduzierte Oberflächenspannung zurückführen.

Abstand x/d_0	0,50	0,75	1,00	1,51	2,01	2,51	
Öffnung s/d_0	0,04	-	-	0,02°	2,39°	4,83°	5,14°
	0,18	-	0,27°	0,53°	0,66°	0,70°	0,72°
	0,49	-	0,23°	0,39°	0,72°	0,89°	0,92°
	0,72	0,31°	0,55°	0,73°	0,90°	1,02°	1,00°

Tabelle 2: Winkel der Strahlerweiterung, M1

Die Erweiterung des Freistrahls von M2 verhält sich ähnlich zu der von M1. Wie aber bereits bei der Strahlkonvergenz treten auch hier wegen der kleineren Düsenöffnung deutlich kleinere Winkel auf.

Abstand x/d_0	1,07	1,53	2,07	2,53	3,07	5,06	
Öffnung s/d_0	0,18	0,15°	0,19°	0,16°	0,16°	0,15°	0,14°
	0,48	0,03°	0,08°	0,11°	0,14°	0,16	0,26°
	0,74	0,09°	0,16°	0,20°	0,23°	0,27°	0,37°

Tabelle 3: Winkel der Strahlerweiterung, M2

Bei den in Tabelle 2 und 3 aufgelisteten Werten beträgt der Winkel der Strahldivergenz von M1 0,5-1° und bei M2 0,15-0,4°. Eine Strahlerweiterung in dieser Größenordnung würde bei einer üblichen Strahllänge zwischen Mundstück und Laufrad laut Zhang [4] einen Energieverlust von bis zu 10% betragen. Die Verluste von Pelton-Düsen sind aber in der Regel geringer, was darauf zurückzuführen ist, dass die Aufweitung etwa bei 0,02° liegt. Die große Differenz lässt sich auf die Bildung des Zwei-Phasen-Gebiets zurückführen, wie in Abbildung 9 ersichtlich.

Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich die Ergebnisse von sehr kleinen Öffnungen von den restlichen Ergebnissen. Im Falle der Konvergenz ist es aber entscheidend auf die Messwerte einzugehen. In Abbildung 47 weist der Durchmesser des Strahls mit einer Öffnung von 0,04 s/d_0 eine deutlich größere Erweiterung als die anderen Düsenöffnungen auf. Die Strahlerweiterung beträgt bis zu 5°. Raabe [1] spricht hier von einer „Aufbesung“. Es bildet sich nicht nur ein kleines Zwei-Phasen-Gebiet, sondern nahezu der gesamte Strahl wird aufgerissen. Die starke Erweiterung führt zusätzlich dazu, dass sich Tropfen im Strahl ausbilden können. Die Tropfen werden von den umliegenden Luftmassen mitgerissen [16] und können zu Beschädigungen an den Bechern führen. In Abbildung 49 sind die Tropfen im letzten Bereich deutlich zu sehen.

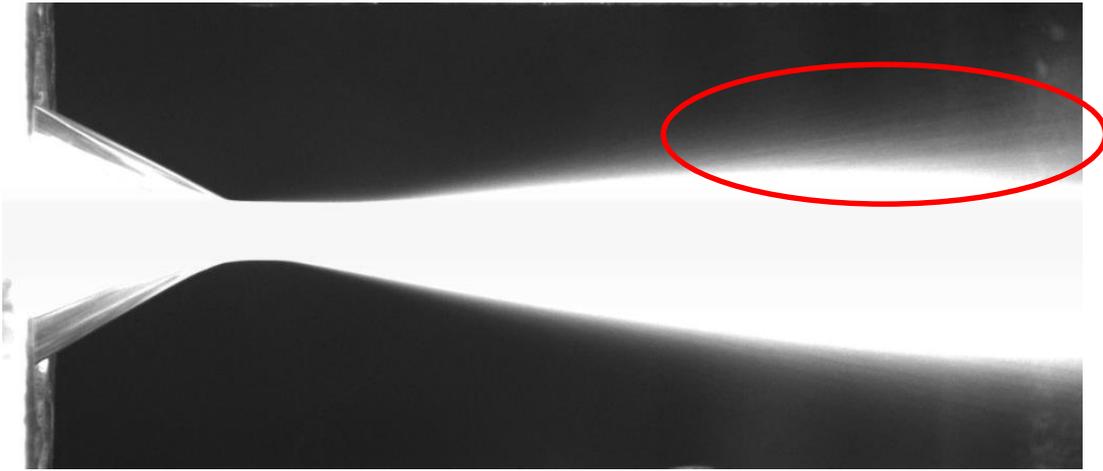


Abbildung 49: Strahlbild inkl. Tropfen in der Randschicht

Im Unterschied zur Konvergenz weist die Divergenz eine ganz klare Abhängigkeit vom Druck auf. Je größer der Druck ist, desto stärker erweitert sich der Wasserstrahl. Durch den größeren Druck und die daraus resultierende höhere Geschwindigkeit kommt es zu einer stärkeren Reibung zwischen der Umgebung und der Randschicht des Strahls. Der Strahl interagiert somit stärker mit der Umgebungsluft und es kommt zu einer Vergrößerung des Zwei-Phasen-Gemischs. Dadurch bestätigt sich die Vermutung, dass es sich bei der Strahldivergenz nicht um den Strahlkern handeln kann, sondern ausschließlich um das Luft-Wasser-Gemisch. Aussagen über den Strahlwirkungsgrad über den engsten Querschnitt hinaus lassen sich somit nur bedingt tätigen.

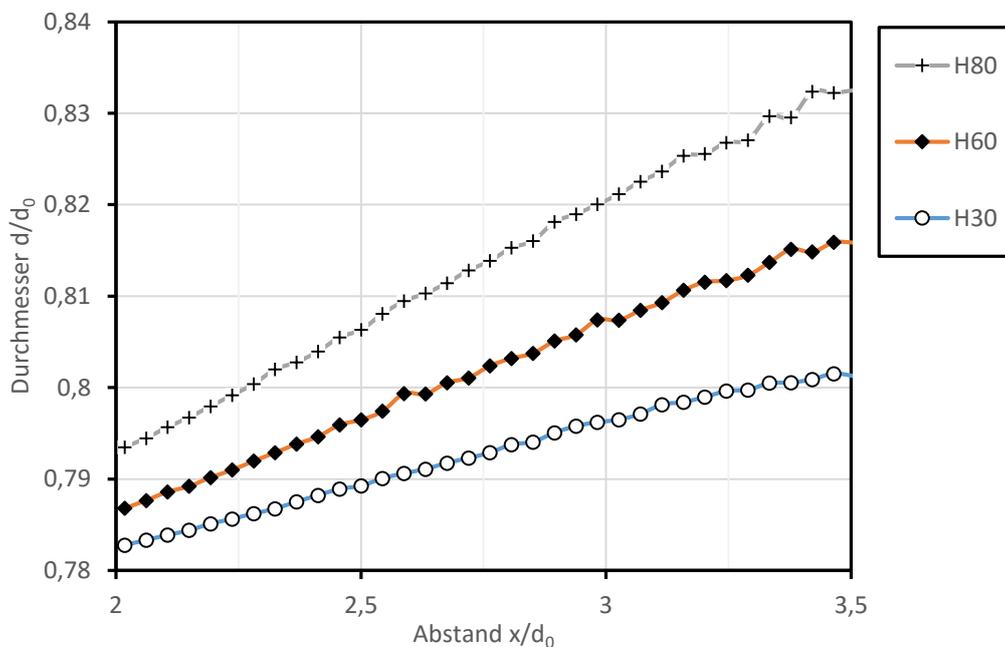


Abbildung 48: Strahldivergenz bei unterschiedlichen Höhen, M1

4.4.1. Strahldivergenz der Bremsdüse

Nachfolgend wird die Strahlendivergenz der Bremsdüse beschrieben. Da diese über keine Einbauten verfügen, ist es möglich, den Einfluss der Einbauten über den ganzen Strahl darzustellen. Aus naheliegenden Gründen ist die Bremsdüse mit großen Strahlöffnungen zu vergleichen.

Im Allgemeinen führt die geänderte Strömung dazu, dass der engste Strahlquerschnitt direkt am Mundstück liegt. Dadurch entfällt der konvergente Bereich und die Strahldivergenz beginnt deutlich früher, in Ausnahmefällen direkt am Düsenmundstück. Insbesondere bei Mundstück B10 lässt sich eine Strahlvergrößerung direkt ab dem Mundstück feststellen. Bei den größeren Öffnungen B15 und B20 erfolgt die Erweiterung mit einem geringen Abstand.

Im direkten Vergleich von B15 und B20 zeigt sich wieder - wie bereits bei der Pelton-Düse - eine Abhängigkeit der Strahldivergenz zur Düsenöffnung. In Abbildung 50 ist zu sehen, dass eine kleinere Düsenöffnung zu einer kleineren Erweiterung des Strahls führt. Im Allgemeinen lässt sich allerdings feststellen, dass alle drei Bremsdüsen eine stärkere Aufweitung als die Pelton-Düse aufweisen.

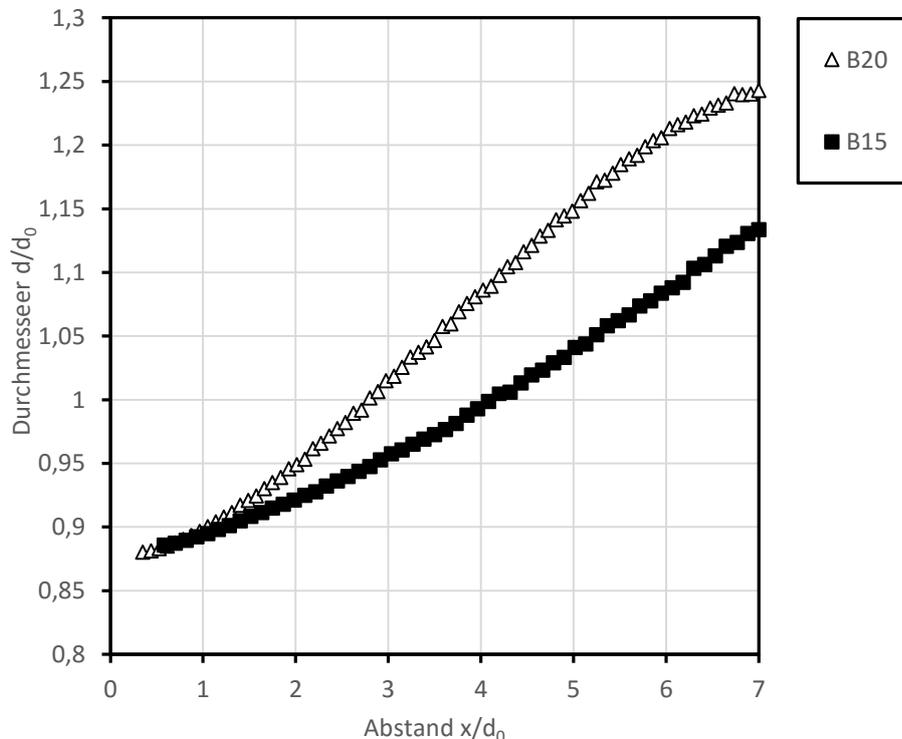


Abbildung 50: Erweiterung des Strahls von unterschiedlichen Bremsdüsen

Die Strahlerweiterung β ist wie auch bei der Pelton-Düse vom Druck abhängig. Die schnellere Austrittsgeschwindigkeit führt auch hier wieder zu einer größeren Erweiterung. Da bei den Bremsdüsen nur eine minimale Einschnürung vorhanden ist, zeigt sich, dass die Aufweitung nichts mit der Strahlenkonvergenz zu tun hat. Sie basiert einzig auf der Scherspannung entlang der Oberfläche des Strahls.

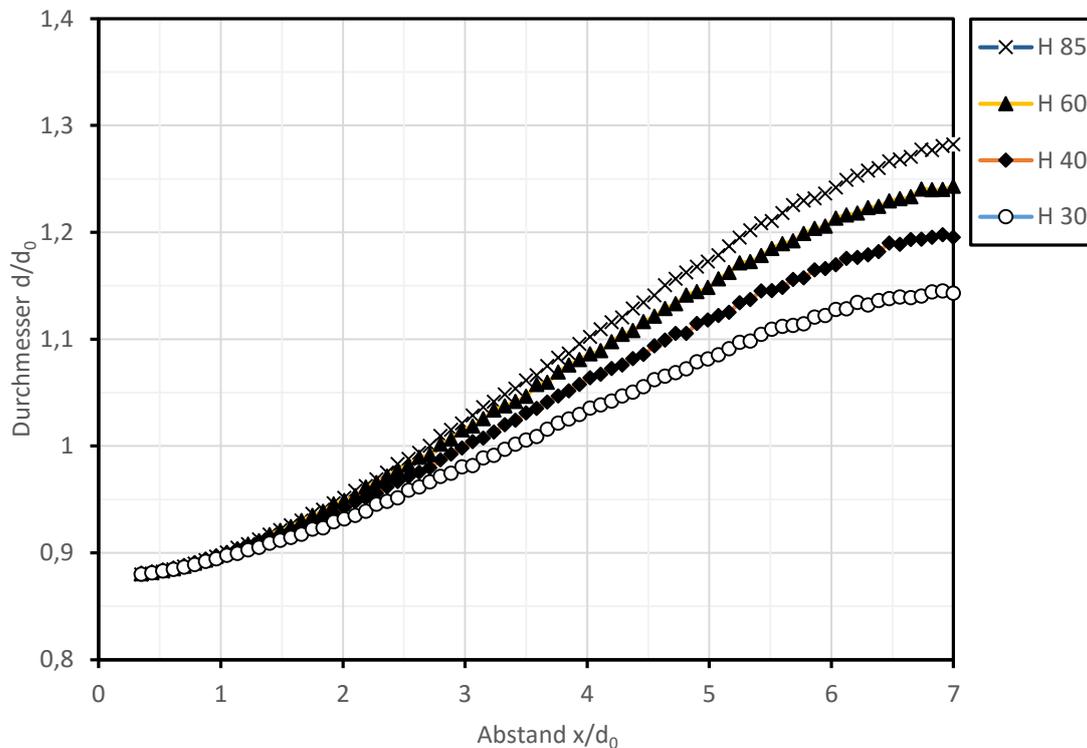


Abbildung 51: Strahldivergenz der Bremsdüse bei unterschiedlichen Höhen, B20

Am Ende des Messbereichs weist der Strahl der Bremsdüse Unterschiede zur Pelton-Düse auf; die Kurven flachen deutlich ab. Dies ist auf zwei Effekte zurückzuführen. Zum einen ist der Messbereich im Verhältnis zur Düsenöffnung länger. Zum anderen zeigt sich somit auch, dass sich die Erweiterung des Strahls nicht linear fortsetzt. In Abbildung 51 ist zu erkennen, dass sich der Strahl ab einem Abstand von $6 \cdot d_0$ nicht mehr weiter öffnet.

4.5. Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad der Düse kann an jeder Position entlang des Strahls bestimmt werden, man spricht dann vom sogenannten *Strahlwirkungsgrad*. Der Strahlwirkungsgrad ist entlang der Achse nicht konstant, sondern hängt vom Abstand zum Mundstück ab. Er ist vor allem dahingehend interessant als, dass auch die Distanz zwischen Mundstück und Laufrad miteinbezogen wird. Die Distanz wird in erster Linie vom Laufraddurchmesser bestimmt. Als problematisch erweist sich hier allerdings, dass es mit zunehmendem Abstand, aufgrund der Strahlerweiterung, zu Dichteunterschieden innerhalb des Strahls

kommt. Es kann somit nicht von einer konstanten Geschwindigkeitsverteilung innerhalb eines Querschnitts ausgegangen werden. Der hier angegebene Düsenwirkungsgrad bezieht sich immer auf die Stelle des engsten Querschnitts. Somit handelt sich um einen Spezialfall des Strahlwirkungsgrads, da hier stets der maximale Wirkungsgrad auftritt. Obwohl die Lage der Einschnürung vom Mundstück abhängig ist, lassen sich die Ergebnisse so direkt miteinander vergleichen. Weiters kommt es an dieser Stelle zu keiner Verfälschung des Ergebnisses der Divergenz des Strahls.

Nach Gl. (18) ist der Düsenwirkungsgrad η_D vom Einheitsdurchfluss Q_1 und vom Strahldurchmesser im engsten Querschnitt d_1 abhängig.

$$\eta_D = \frac{8 Q_1^2}{g d_1^4 \pi^2}$$

Der Düsenwirkungsgrad der beiden Mundstücke der Pelton-Düse ist in Abbildung 52 zu sehen.

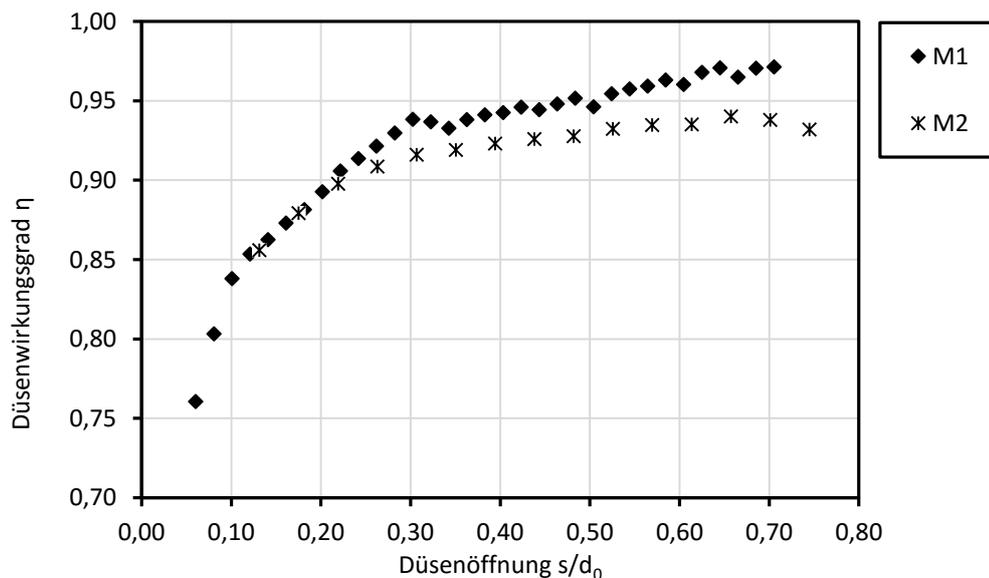


Abbildung 52: Düsenwirkungsgrad, M1 und M2

Beide Kurven zeigen den zu erwartenden Verlauf. Da Q_1 und d_1 von der Düsenstellung abhängig sind, zeigt auch der Wirkungsgrad diese Abhängigkeit auf. Die verhältnismäßig größten Verluste sind bei kleinen Düsenöffnungen festzustellen. Diese Verluste lassen sich vor allem auf erhöhte Reibung zurückführen. Der Grund dafür ist, dass bei kleinen Öffnungen die effektive Öffnungsfläche stark abnimmt, die Oberfläche der benetzten Bauteile aber nahezu konstant bleibt.

Beim Mundstück M1 zeigt sich ein stetig steigender Wirkungsgradverlauf. Es wird ein Spitzenwirkungsgrad von 97% erzielt, wobei das Maximum bei vollkommener geöffneter Düse auftritt. Düsenöffnungen kleiner $0,3 \cdot d_0$ zeigen eine deutliche Reduktion des Wirkungsgrades. Eine Auswahl an genauen Werten findet sich in Tabelle 4.

Der Verlauf des Wirkungsgrades des kleineren Mundstücks M2 weist eine ähnliche Charakteristik auf, unterscheidet sich aber im Detail. In Abb. 50 ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad am Ende wieder abfällt und der maximale Wert somit nicht bei der größten Düsenöffnung auftritt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei dieser Düsenstellung bereits um eine Überöffnung handelt. Die effektive Ausflussfläche wird hier nicht mehr erhöht. Auch kommt es ab einer Düsenöffnung von $0,5 \cdot d_0$ nur mehr zu einer minimalen Steigerung des Wirkungsgrades und der Spitzenwirkungsgrad fällt mit 93% geringer aus. Da durch die gerade Zuleitung Krümmungsverluste in diesem Bereich auszuschließen sind und die Strömung bei beiden Mundstücken gerade austritt, liegt der Grund hierfür ausschließlich in der Mundstückgeometrie und den daraus resultierenden erhöhten Reibungsverlusten. Wie in Abb. 30 zu sehen ist, weisen die Mundstücke zwar denselben Öffnungswinkel auf, das Mundstück M2 ist aber länger und der Öffnungsdurchmesser d_0 ist nur etwa halb so groß. Dadurch, dass die Verluste direkt proportional zur Länge und indirekt proportional zum Durchmesser steigen, kommt zu dieser Differenz im Spitzenwirkungsgrad. Zusätzlich weist die Strömung in diesem Bereich die höchste Geschwindigkeit auf, was den Unterschied zwischen den zwei Mundstücken noch vergrößert.

Bei Düsenöffnungen unter $0,25 \cdot d_0$ lässt sich kein Unterschied zwischen den zwei Mundstücken feststellen. Hier kommt es aufgrund der reduzierten effektiven Öffnungsfläche bei beiden Mundstücken zu einem Wirkungsgradabfall.

Öffnung s/d_0	0,06	0,14	0,26	0,5	0,6	0,71	0,74
M1	0,76	0,86	0,92	0,95	0,96	0,97	-
M2	-	0,85	0,91	0,93	0,93	0,93	0,93

Tabelle 4: Düsenwirkungsgrad M1 und M2

4.6. Strahlachse

Die Bestimmung der Strahlachse wurde gleichzeitig mit den anderen Messungen durchgeführt. Als Grundlage dienen wieder die gemessenen Strahlquerschnitte. Die Strahlachse wird durch Mittelwertbildung der Koordinaten aus der Kantendetektierung ermittelt. Durch die manuelle Positionierung der Referenzplatten und der Kamera kommt

es zu minimalen Verschiebungen zwischen Strahlachse und dem Mittelpunkt zwischen den Platten. Um dies auszugleichen, wird der Startwert von den gemessenen Werten subtrahiert. Der Strahl hat am Düsenmundstück somit keine Abweichung von der idealen Mittellage. Am Winkel γ nach Gl. (23), welcher die Ablenkung des Strahls beschreibt, ändert sich dadurch nichts. Bei allen Messwerten handelt es sich wieder um die gemittelten Werte. Zeitliche Schwankungen der Strahlachse sind somit nicht erkennbar.

Abbildung 53 zeigt den Verlauf der Strahlachse entlang der Messstrecke bei einer Fallhöhe von 40m bzw. 80m. Die Messungen wurden von oben durchgeführt. Bei den vier unterschiedlichen Düsenöffnungen weist der Strahl einen nahezu gleichen Verlauf auf. Die Strahlachse liegt in einem Bereich von weniger als 0,1mm um die Mittelachse. Werte in dieser Größenordnung liegen innerhalb der Messtoleranz des Programms. Eine Ablenkung des Strahls um einen Winkel γ ist somit nicht vorhanden. Es lassen sich hierbei weder Unterschiede zwischen den Düsenstellungen noch zwischen den unterschiedlichen Fallhöhen feststellen.

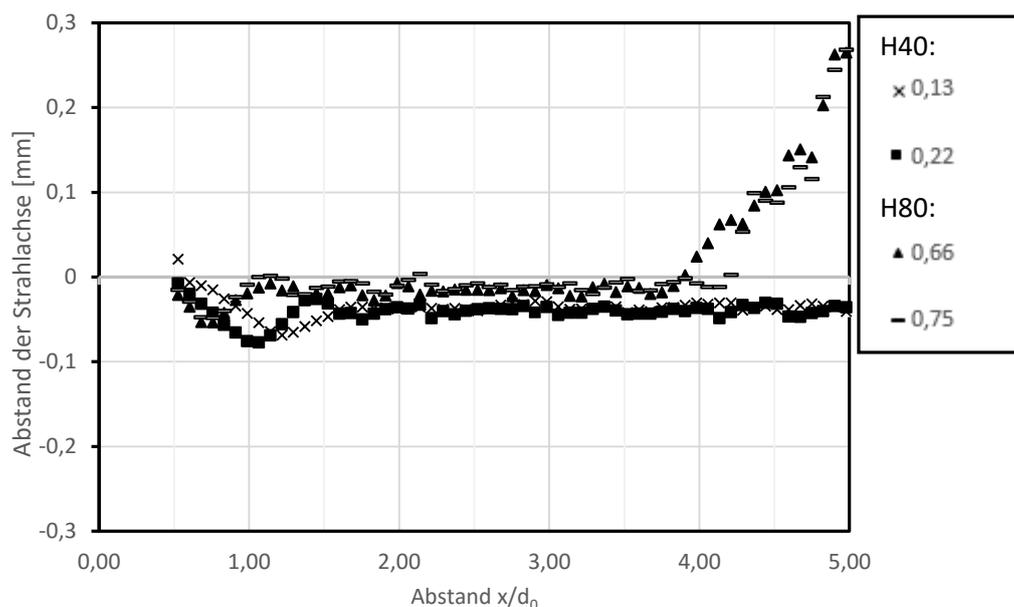


Abbildung 53: Horizontaler Abstand der Strahlachse, H40 und H80, M1

Die Ergebnisse zeigen auch hier wieder die Probleme bei der Vermessung des Strahldurchmessers gegen Ende des Messbereichs auf. Ab einem Abstand von $4 \cdot d_0$ kommt es bei größeren Fallhöhen zu einer Verfälschung der Ergebnisse. Diese Abweichungen werden ausschließlich durch Fehler bei der Kantendetektierung hervorgerufen.

Abbildung 54 zeigt den direkten Vergleich von Messungen von der Seite und von oben. Auch hier weisen die Kurven keine Unterschiede auf. Es kommt weder zu einer Ablenkung in vertikaler γ_v noch in horizontaler γ_h Richtung. Bei der Vermessung von der Seite zeigt sich, dass die Schwerkraft innerhalb des Messbereichs keinerlei Einfluss auf den Wasserstrahl hat. Der Strahl weist keine Tendenzen nach unten auf. Die Düseneinbauten verursachen somit keine negative Auswirkung auf die Richtung des Freistrahls. Dies wird in Tabelle 5 nochmals verdeutlicht.

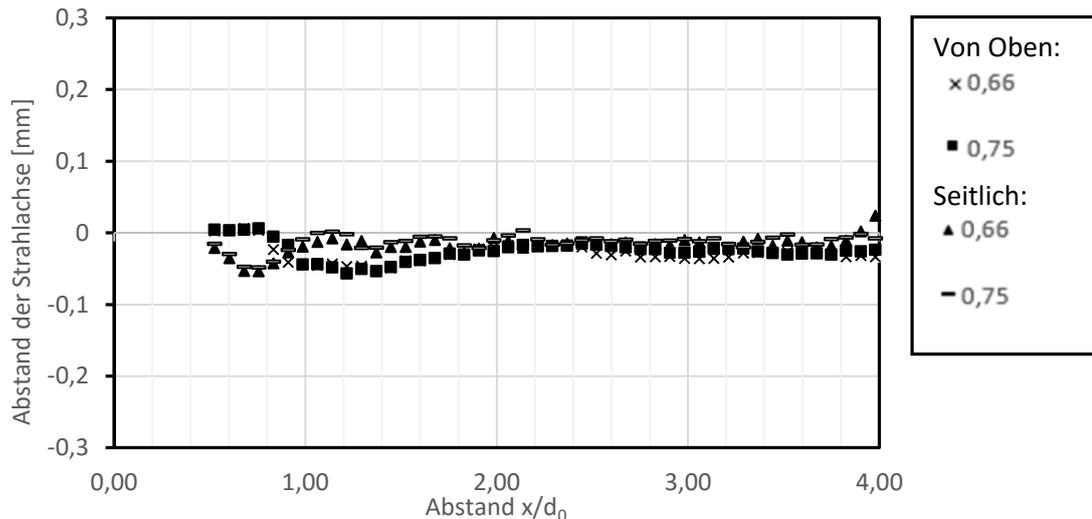


Abbildung 54: Vergleich der horizontalen und vertikalen Achse, M2

Da keine Unterschiede zwischen vertikaler und horizontaler Strahlablenkung bestehen, werden hier ausschließlich die Werte der horizontalen Verschiebung angegeben. Da der Winkel der Ablenkung null ist, werden hier die Abstände zur Mittelachse in mm angegeben.

Abstand x/d_0	1,07	2,07	3,07	
Öffnung s/d_0	0,13	-0,03	-0,05	-0,04
	0,48	-0,05	-0,04	-0,05
	0,75	-0,05	-0,04	-0,04

Tabelle 5: Achsabstand in mm, M2, H80

Auch die Ergebnisse des Mundstücks M1 zeigen keine Abweichungen der Lage der Strahlachse.

4.6.1. Strahlachse der Bremsdüse

Da die Bremsdüsen über keine Einbauten verfügen, welche die Strömung stören könnten, und eine gerade Zuleitung vorhanden ist, kann davon ausgegangen werden, dass auch der Freistrahls keine Abweichungen aufweist.

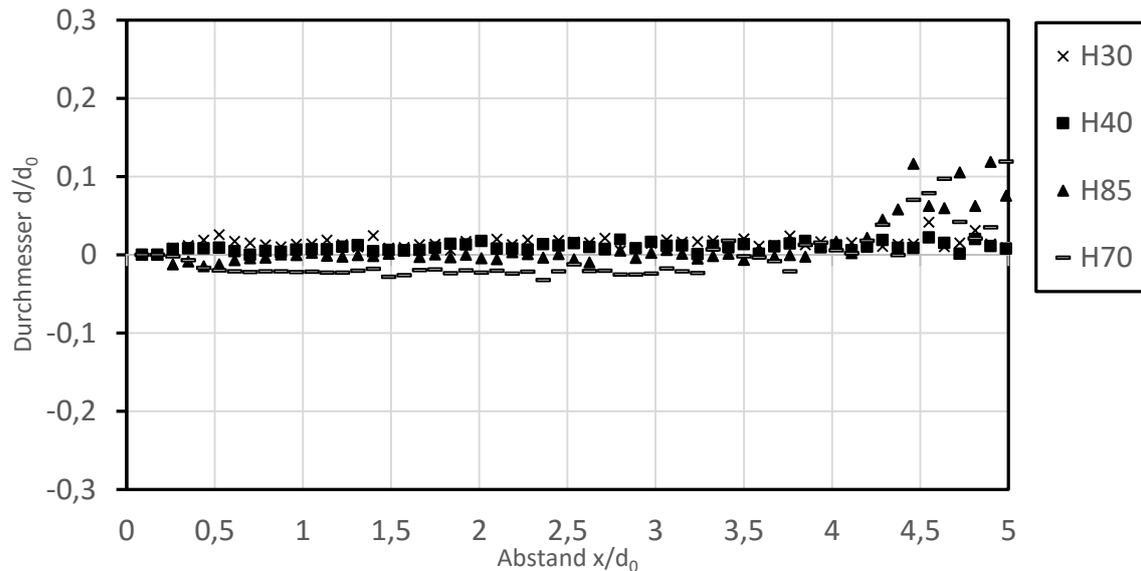


Abbildung 55: Achse Bremsdüse B20; H30- H85

Die Messungen bestätigen diese Vermutung. Wie in Abbildung 55 zu sehen ist, weist auch der Freistrah der Bremsdüse keine Abweichungen von der idealen Lage auf.

4.7. Ovalität

Wie bereits in den Grundlagen in 2.3. beschrieben, kommt es aufgrund der Einbauten zu einer Verformung des Wasserstrahls. Entlang der Befestigung der Düsennadel kommt es zu einer Verzögerung der Strömung, die sich bis auf den Freistrah auswirken kann. Wie bereits in 0 gezeigt, hat die Schwerkraft aufgrund des kurzen Messbereichs und des hohen Drucks, keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

Die Verformung des Wasserstrahls wird bestimmt, indem sowohl die Breite d_b als auch Höhe d_h vermessen werden. Die beiden Messungen unterscheiden sich ausschließlich durch die unterschiedliche Positionierung der Kamera. Da Zuleitung und Düse unverändert bleiben, lassen sich die Messergebnisse direkt miteinander vergleichen.

Um die Ovalität zu bestimmen, ist es zielführend die Werte im engsten Querschnitt zu vergleichen. Der Vergleich des kleinsten Querschnitts ist hier besonders zweckdienlich, da der Strahl an dieser Position noch nicht von der Umgebungsluft beeinflusst wird. Es werden somit die Strahlkerne ohne eine Verfälschung durch die Zwei-Phasen-Zone von Luft und Wasser miteinander verglichen. Für die Ovalität gilt dasselbe wie für die in 4.3 beschriebene Konvergenz: sie wird ausschließlich durch die Düsenöffnung bestimmt. Es lassen sich keine Unterschiede zwischen den Messreihen der unterschiedlichen Fallhöhen

feststellen. Die Ovalität lässt sich durch den Vergleich der beiden Halbmesser der Ellipse (Breite und Höhe des Strahls) in Abhängigkeit von der Düsenstellung angeben.

Der Freistrahle des Mundstücks M1 weist im engsten Querschnitt eine messbare Ovalität auf. Die Einbauten führen zu einer geringfügigen Aufweitung des Strahls in der Höhe bzw. einer Stauchung in der Breite. Dies wird beim Vergleich des kleinsten Strahlquerschnitts über die Düsenöffnung deutlich. Im engsten Querschnitt hat die Düsenöffnung nur einen geringen Einfluss auf die Ovalität.

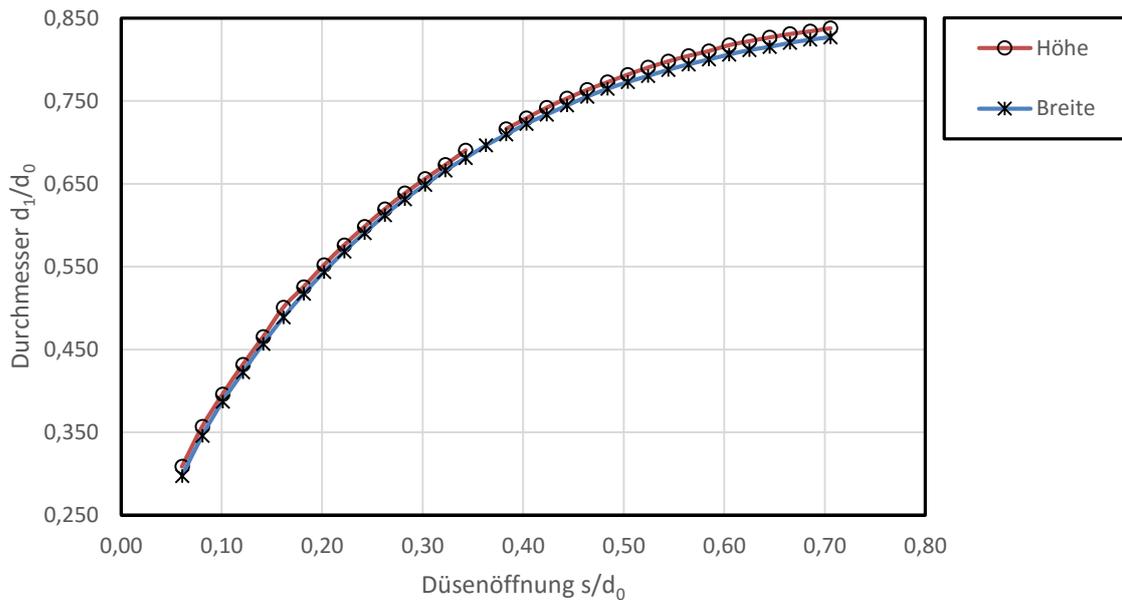


Abbildung 56: Form des Strahls im engsten Querschnitt, M1

Die Ergebnisse des Mundstücks M2 weisen geringfügige Unterschiede zu den Ergebnissen von M1 auf. Aufgrund der längeren Bauform und der kleineren Öffnung kommt es zu geänderten Strömungsbedingungen und erhöhter Reibung. Dies führt zu einer Reduzierung der Ovalität. An der Stelle der Einschnürung weist der Strahl einen nahezu kreisrunden Querschnitt auf.

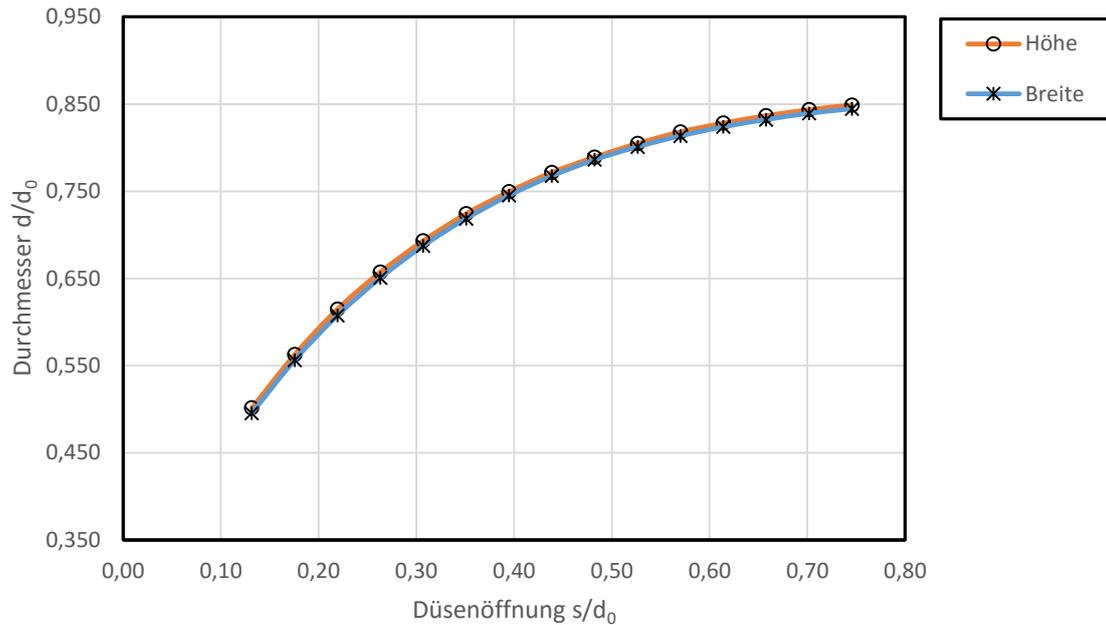


Abbildung 58: Form des Strahls im engsten Querschnitt, M2

Der Vergleich der Querschnitte über den gesamten Verlauf führt zu ähnlichen Ergebnissen. Es ist aber festzuhalten, dass im hinteren Teil ab etwa $2 \cdot d_0$ die Luft-Wasser-Zone einen deutlichen Einfluss auf die Messung hat und somit zur Verfälschung der Ergebnisse führen kann. Auch hier ist eine Abflachung des Strahls in der Breite des Querschnittes über den gesamten Verlauf festzustellen. Interessant ist, dass die Messungen geringe Unterschiede zwischen kleinen und großen Düsenöffnungen aufweisen. Bei größeren Öffnungen der Düse ist die Ovalität fast über den gesamten Verlauf konstant.

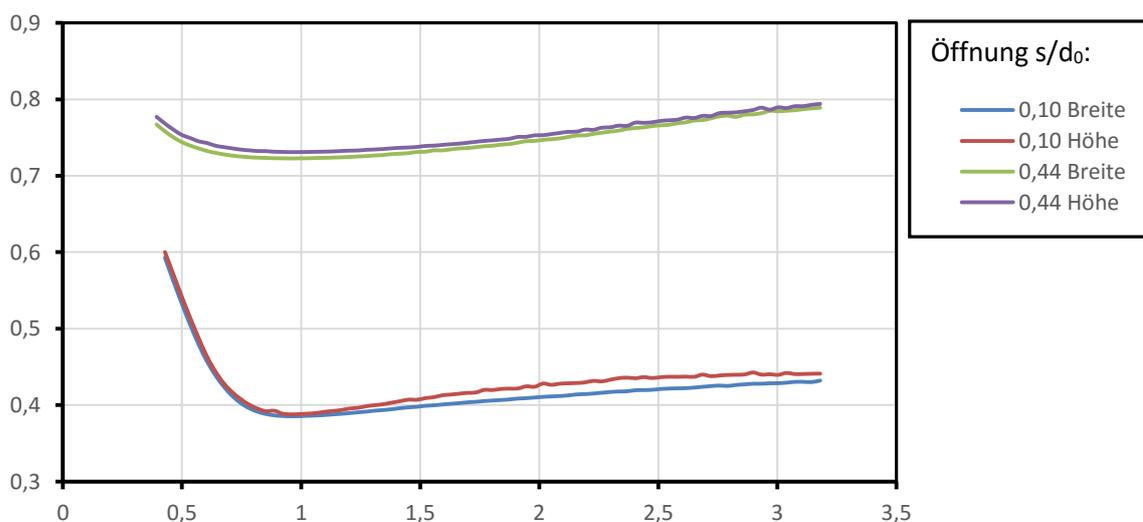


Abbildung 57: Ovalität des Strahls über den gesamten Verlauf, M1, H60

Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen aus 4.3, da der Strahl nicht stark kontrahiert wird und nahezu über den gesamten Verlauf denselben Durchmesser hat. Kleine Öffnungen hingegen zeigen Unterschiede entlang des Strahls. Im Bereich des engsten Querschnitts kommt es aufgrund der starken Strahlkontraktion α auch zu einer Reduktion der Ovalität. Nach der Einschnürung wird auch die Ovalität, hervorgerufen durch die Strahlerweiterung β , etwas vergrößert.

4.7.1. Ovalität des Bremsdüsenstrahls

Im Vergleich dazu zeigt sich bei der Bremsdüse ein gänzlich anderes Bild. Da in der Düse die Einbauten fehlen, kommt es zu keiner Ovalität. Der Freistrahler weist im engsten Querschnitt unabhängig von der Höhe keine Differenz zwischen d_h und d_v auf, wie in Tabelle 6 ersichtlich. Alle Messungen bestätigen die zu erwartenden Ergebnisse. Weder im engsten Querschnitt noch an einem Punkt, der weiter von der Austrittskante entfernt ist, weicht der Strahl vom kreisförmigen Querschnitt ab. Die Ergebnisse dienen eher zur Verifizierung der Messeinrichtung.

Fallhöhe [m]	30	40	50	60	70	80	85
Breite [mm]	13,25	13,25	13,26	13,25	13,26	13,25	13,25
Höhe [mm]	13,23	13,26	13,24	13,25	13,25	13,25	13,25
Differenz [mm]	-0,02	0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,01

Tabelle 6: Ovalität des Strahls der Bremsdüse

Wie in Abbildung 48 zu sehen, zeigt sich auch bei unterschiedlichen Höhen, dass der Strahl kreisrund bleibt.

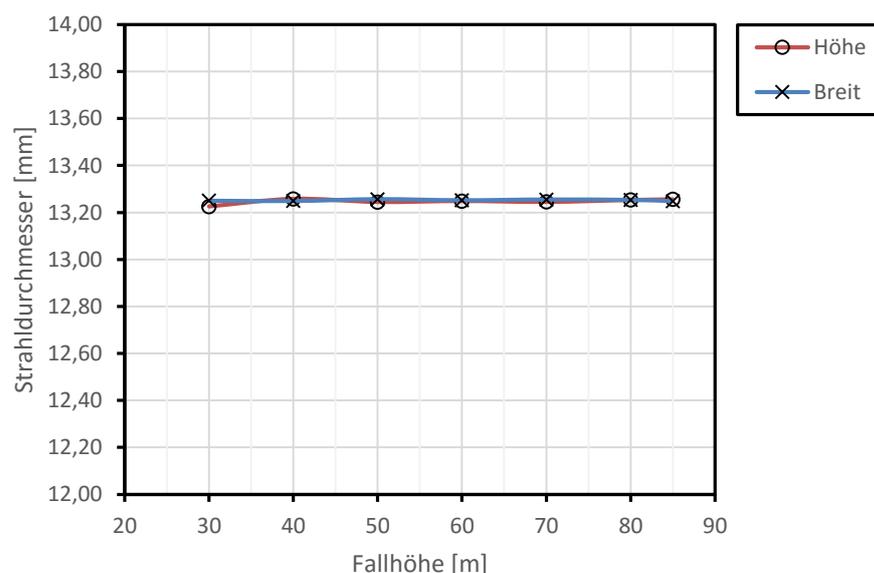


Abbildung 59: Breite und Höhe des Strahls der Bremsdüse, B15

5. Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde der Freistrahle einer Pelton-Düse und einer Bremsdüse untersucht. Bei der Pelton-Düse standen zwei Mundstückeinsätze unterschiedlichen Öffnungsdurchmessers und verschiedener Längen zu Verfügung. Bei den Bremsdüsen wurden Messungen an drei Mundstücken durchgeführt. Auch diese unterscheiden sich in Öffnungsdurchmesser und Länge. Mittels Kamera wurde der Durchmesser des Freistrahls entlang der Strahlachse bestimmt. Die Messungen wurden sowohl von der Seite als auch von oben getätigt, um den Einfluss der etwaigen Einbauten feststellen zu können. Zeitgleich zur Querschnittsbestimmung wurden Druck und Durchfluss ermittelt.

Der Strahl der Pelton-Düse lässt sich in zwei Bereiche einteilen. Nachdem sich die Strömung vom Mundstück löst, beginnt der konvergente Bereich. Der Durchmesser des Strahls verringert sich, bis die Position des engsten Querschnitts erreicht wird. Dieser Bereich ist von der Fallhöhe unabhängig. So wird auch die Position des engsten Querschnitts nur von der Düsenstellung bestimmt. Anschließend an den konvergenten Bereich vergrößert sich der Durchmesser wieder, der sogenannte divergente Bereich. Im Unterschied zur Konvergenz besteht in diesem Abschnitt eine starke Abhängigkeit von der Fallhöhe. Die Strahldivergenz wird durch die Interaktion zwischen der Randschicht des Strahls und der Umgebung hervorgerufen. Es entsteht ein Luft-Wasser-Gemisch, das sich mit zunehmendem Abstand vom Düsenmundstück vergrößert. Diese Interaktion wird mit zunehmender Fallhöhe und somit Strahlgeschwindigkeit verstärkt. Der Kern des Strahls bleibt aber nahezu unverändert.

Der Vergleich der Strahldurchmesser der unterschiedlichen Mundstückeinsätze der Pelton-Düse zeigt, dass das größere Mundstück einen verhältnismäßig kleineren Freistrahle hervorbringt. Diese Unterschiede zeigen sich auch in den Unterschieden beim Wirkungsgrad.

Der Wirkungsgrad der Pelton-Düsen wird an der Position des engsten Querschnitts bestimmt. Somit kann ein Einfluss des Luft-Wasser-Gemischs auf die Ergebnisse verhindert werden. Es zeigt sich, dass der Wirkungsgrad des größeren Mundstücks mit ca. 97% um 3% höher ausfällt als der des kleineren Mundstücks. Dieser Unterschied ist auf die geringere Reibung zurückzuführen.

Der Strahl der Bremsdüse weicht deutlich von dem der Pelton-Düse ab, da bei der Bremsdüse keine Nadel zur Durchflussregulierung vorhanden ist. Der konvergente Bereich entfällt hier gänzlich. Der engste Strahlquerschnitt ist direkt am Düsenmundstück.

Anschließend beginnt auch hier der divergente Bereich, mit derselben Abhängigkeit vom Druck. Im Allgemeinen fällt die Divergenz größer als bei der Pelton-Düse aus.

Bei den Ergebnissen der Lage der Strahlachse zeigt sich ein einheitliches Bild. Der Freistrahл tritt sowohl bei der Pelton-Düse als auch bei der Bremsdüse gerade aus dem Mundstück aus. Es kommt zu keiner Abweichung oder Verdrehung. Bei beiden Düsen liegt die Strahlachse genau auf der idealen Mittellage.

6. Ausblick

Ausgehend von dieser Arbeit könnten noch einige Verbesserungen, sowohl am Versuchsaufbau, als auch an der Software durchgeführt werden.

Der wahrscheinlich wichtigste Punkt am Versuchsaufbau ist die Verbesserung der Kamerahalterung. Zwar hat sich die Befestigung an der Gebäudewand als notwendig erwiesen, es zeigt sich aber gleichzeitig, dass minimale Positionsänderungen der Kamera mit großem Aufwand verbunden sind. Ein Kamerastativ inkl. geeigneter Verstellvorrichtung könnte den Zeitaufwand erheblich reduzieren und eine noch präzisere Einstellung ermöglichen. Durch eine automatische Verstelleinrichtung könnte die Positionierung der Kamera auch von einer einzigen Person durchgeführt werden. Des Weiteren würde ein Objektiv mit einem größeren Zoom den Vermessungsbereich verkleinern und die Pixel-Dichte pro Millimeter erhöhen.

Die Software sollte hinsichtlich der Bearbeitungsgeschwindigkeit optimiert werden. Da die Dauer einer Messung von den Anzahl der Messpunkte abhängt, gibt es hier derzeit eine Beschränkung auf etwa 100 Messpunkte. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit würde ein feineres Messraster ermöglichen, ohne die Dauer der Messung zu verlängern. Zusätzlich könnte die zeitliche Änderung des Strahls bestimmt werden. Somit wäre auch eine Bestimmung der zeitlichen Variation der Strahlachse möglich.

Eine Umrechnung der Millimeter-Werte auf den Durchmesser d_0 bezogene Werte würde die nachträgliche Auswertung erleichtern. Zusätzlich wären eine direkte Ausgabe des Strahlwirkungsgrades und eine direkte Einbindung der Nadelsteuerung wünschenswert.

Zusätzlich zu den hier getätigten Messungen, könnten ferner Versuche mit gekrümmter Zuleitung durchgeführt werden. Somit könnte auch der Strahl von mehrdünsigen Anlagen mit unterschiedlichen Zuleitungen simuliert und untersucht werden.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Raabe, Hydraulische Maschinen und Anlagen : Teile 1 bis 4 in einem Band, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.
- [2] E. M. Jürgen Gieseck, Wasserkraftanlagen : Planung, Bau und Betrieb, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [3] W. B. Alfred Böge, Handbuch Maschinenbau : Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [4] Z. Zhang, Freistrahlturbinen: Hydromechanik und Auslegung, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [5] W. Bohl und W. Elmendorf, Strömungsmaschinen. 1. Aufbau und Wirkungsweise, Würzburg: Vogel , 2008.
- [6] H. P. Carl Pfeleiderer, Strömungsmaschinen, 1991.
- [7] K. Menny, Strömungsmaschinen : Hydraulische und thermische Kraft- und Arbeitsmaschinen, Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006.
- [8] L. Quantz, Wasserkraftmaschinen : eine Einführung in Wesen, Bau und Berechnung von Wasserkraftmaschinen und Wasserkraftanlagen, Berlin: Springer , 1954.
- [9] H. Sigloch, Technische Fluidmechanik, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [10] G. Edinger, Bremsverhalten verschiedener Bremsdüsenkonfigurationen in Pelton Turbinen, Wien: Hochschulschrift, 2009.
- [11] H. Sigloch, Strömungsmaschinen Grundlagen und Anwendung, München; Wien: Hanser , 2013.
- [12] W. Bohl, Strömungsmaschinen. 2. Berechnung und Konstruktion, Würzburg : Vogel , 2005.
- [13] R. V. Benitez, Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Einlaufdüsen von Freistrahlturbinen : als Beitrag zur Aufwertung der Wirkungsgrade von Freistrahlturbinen, Zürich: Hochschulschrift: Technische Hochschule, Diss, 1972.
- [14] P. Unterberger, Einfluss verschiedener Düsenparameter auf den Wirkungsgrad von Pelton-turbinen, Wien: Hochschulschrift, 2009.

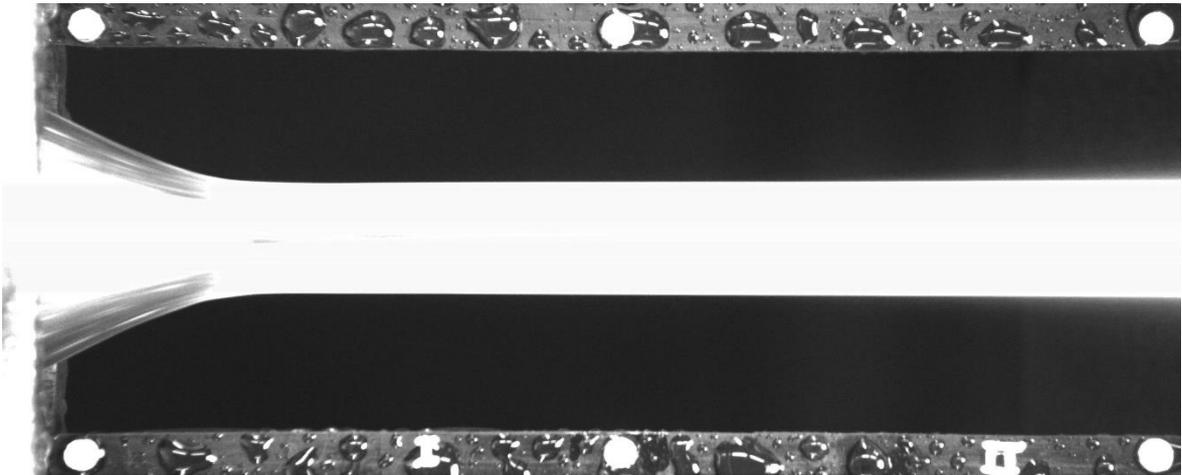
- [15] J. Lal, Die Kennlinien einer Freistrahlturbine im Triebgebiet sowie im Bremsgebiet und die Wirkungsgrade im Triebgebiete, Wien: Springer , 1952.
- [16] A. A. P. W. C. B. E. P. J. L. Thomas Staubli, „Die Auswirkung der Strahlqualität auf den Wirkungsgrad von Pelton turbinen,“ *Wasser Energie Luft*, Bd. Heft 3, Nr. 101. Jahrgang, 2009.
- [17] H. H. T. STAUBLI, „Flow Visualization - A Diagnosis Tool For Pelton Turbines,“ in *Fifth IGHEM conference*, Lucerne, 2004.
- [18] B. A. ., C. J. ., R. S. ., O. D. T.R. Bajracharya, „Sand erosion of Pelton turbine nozzles and buckets: A case study of Chilime Hydropower Plant,“ *ScienceDirect*, 2007.
- [19] Endress+Hauser, „Products: Durchflussmesstechnik,“ 2005. [Online]. Available: <http://www.at.endress.com/de>. [Zugriff am 08 09 2015].
- [20] „Vision,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/>. [Zugriff am 22 10 2015].
- [21] H. Springer, Mess- und Schwingungstechnik, Wien: Skriptum, 2009.
- [22] U. Zanke, Hydraulik für den Wasserbau, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [23] C. Bauer, Berechnung und Konstruktion hydraulischer Energiesytsme, Wien: Vorlesungs-Skriptum, 2011.
- [24] V. Wesselak und T. Schabbach, Regenerative Energietechnik, Springer Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [25] A. A. THOMAS STAUBLI, „EFFICIENCY DIFFERENCES OF UPPER AND LOWER INJECTORS,“ Milano, 2008.
- [26] L. A. Pelton, „Patent No. 233,692 Water Wheel,“ California USA, 1880.

8. Abbildungsverzeichnis

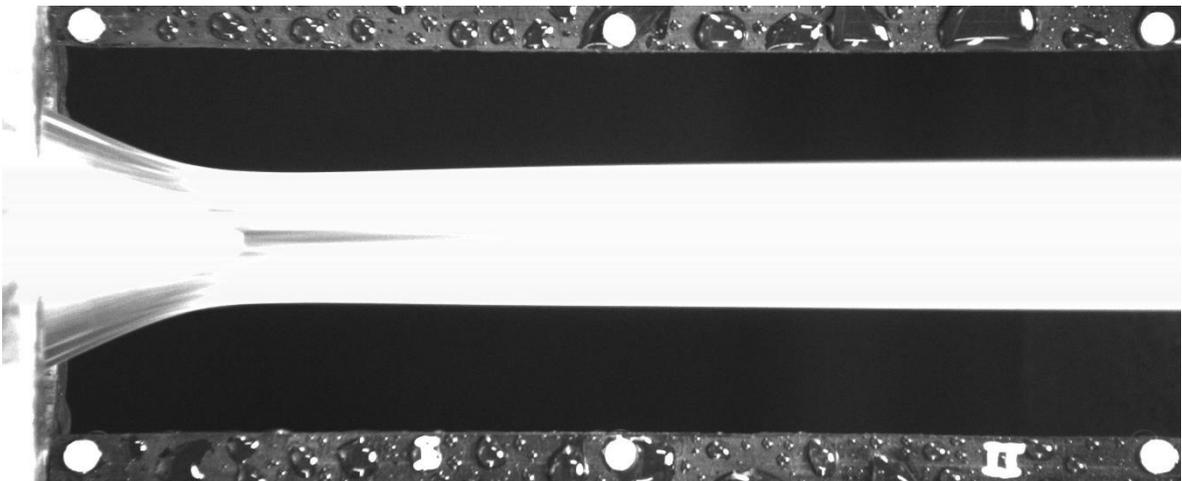
Abbildung 1: Patent von Lester Pelton 1880 [26].....	8
Abbildung 2: Umlenkung des Wasserstrahls im Becher [2].....	10
Abbildung 3: Vertikale sechsdüsige Pelton-Turbine mit innen geregelten Düsen [2].....	11
Abbildung 4: Wirkungsgradverlauf unterschiedlicher Turbinentypen [23]	14
Abbildung 5: Wirkungsgrad Verlauf einer Pelton-Turbine [23].....	14
Abbildung 6: Beschreibung der Fallhöhe	15
Abbildung 7: Systemgrenzen der Düse	17
Abbildung 8: Effektive Austrittsfläche der Mundstücke M1 und M2	19
Abbildung 9: Erweiterung des Freistrahls	23
Abbildung 10: Verschiebung der Strahlachse	25
Abbildung 11: Geöffnete Pelton-Düse	26
Abbildung 12: Aufbau der Düse	28
Abbildung 13: Mundstück M1 und M2	29
Abbildung 14: Detail Abrisskante	29
Abbildung 15: Düsennadel	29
Abbildung 16: Magnetisch-induktives Messprinzip [19]	31
Abbildung 17: Vermessung von Oben (Bremsdüse).....	34
Abbildung 18: Referenzplatten an der Düse.....	35
Abbildung 19: Vermessung des Wasserstrahls von der Seite	36
Abbildung 20: Aufbau der Vermessung von der Seite	36
Abbildung 21: Beleuchtung mit drei Lampen	37
Abbildung 22: Bremsdüse im Versuchsaufbau.....	38
Abbildung 23: Abbildung der Projektion	40
Abbildung 24: Detail der Perspektive	40
Abbildung 25: Messprogramm (Einstellungen)	43
Abbildung 26: Messprogramm	44
Abbildung 27: Darstellung der ROIs entlang des Wasserstrahls	45
Abbildung 28: Graphische Darstellung des Strahls.....	46
Abbildung 29: Linienprofil	46
Abbildung 30: Darstellung der Kantendetektierung [20]	47
Abbildung 31: Wasserstrahl der Pelton-Düse während der Vermessung.....	48
Abbildung 32: Düsenkennlinien, M1	49
Abbildung 33: Kennlinien des Einheitsdurchflusses, M1	50
Abbildung 34: Düsenkennlinie, M2.....	51
Abbildung 35: Kennlinien des Einheitsdurchflusses, M2.....	51
Abbildung 36: Kennlinien aller Düsen.....	52
Abbildung 37: Durchfluss der Bremsdüsen.....	53
Abbildung 38: Kennlinie der Bremsdüsen	53
Abbildung 39: Durchmesser entlang der Strahlachse, M2	54
Abbildung 40: Durchmesser d_1 an der Einschnürung; M2; H30-H85	55
Abbildung 41: Fehler der Messung, M2, H60.....	56
Abbildung 42: Konvergenter Bereich, M1	57
Abbildung 43: Konvergenter Bereich, M2.....	58
Abbildung 44: Durchmesser im engsten Querschnitt	58
Abbildung 45: Strahl der Pelton-Düse, M1, H60.....	59
Abbildung 46: Strahl einer Bremsdüse, B20; H80.....	59
Abbildung 47: Strahlerweiterung entlang der Strahlachse, M1, H60.....	60
Abbildung 48: Strahldivergenz bei unterschiedlichen Höhen, M1	62
Abbildung 49: Strahlbild inkl. Tropfen in der Randschicht	62

Abbildung 50: Erweiterung des Strahls von unterschiedlichen Bremsdüsen	63
Abbildung 51: Strahldivergenz der Bremsdüse bei unterschiedlichen Höhen, B20	64
Abbildung 52: Düsenwirkungsgrad, M1 und M2	65
Abbildung 53: Horizontaler Abstand der Strahlachse, H40 und H80, M1	67
Abbildung 54: Vergleich der horizontalen und vertikalen Achse, M2	68
Abbildung 55: Achse Bremsdüse B20; H30- H85	69
Abbildung 56: Form des Strahls im engsten Querschnitt, M1	70
Abbildung 57: Ovalität des Strahls über den gesamten Verlauf, M1, H60	71
Abbildung 58: Form des Strahls im engsten Querschnitt, M2	71
Abbildung 59: Breite und Höhe des Strahls der Bremsdüse, B15	72

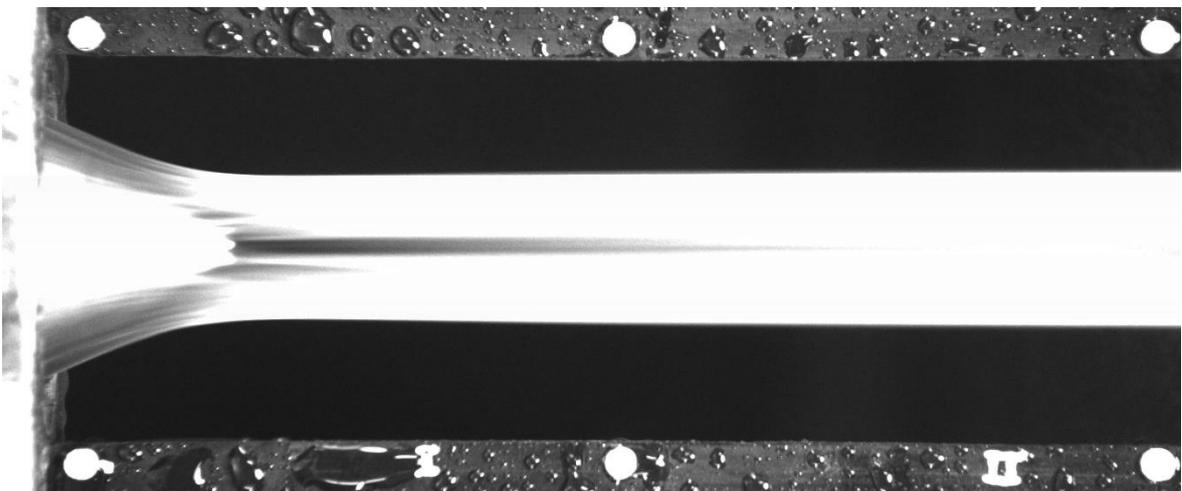
Anhang A



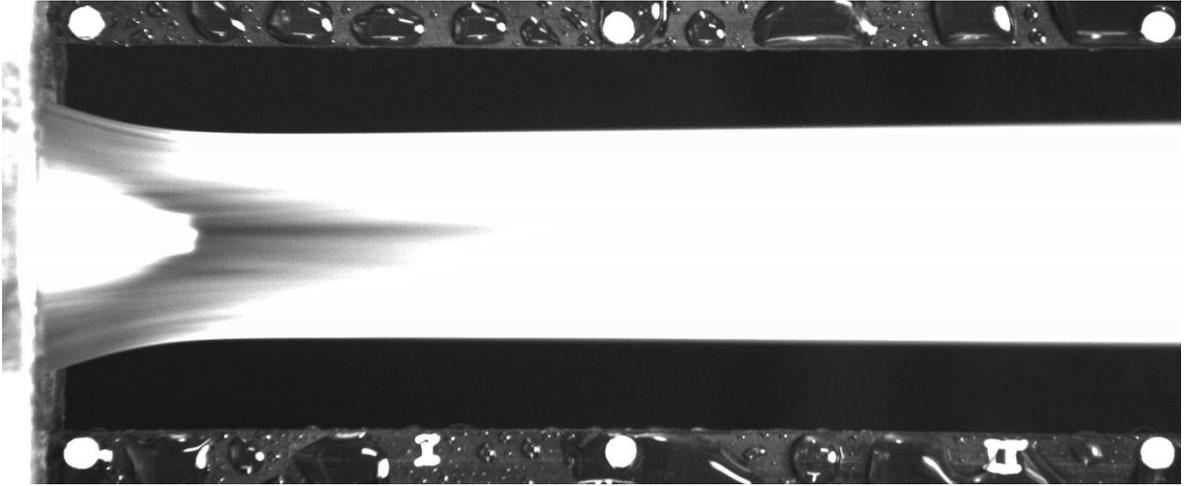
Anhang A 1: Strahlbild, s/d_0 0,06; H60, M1



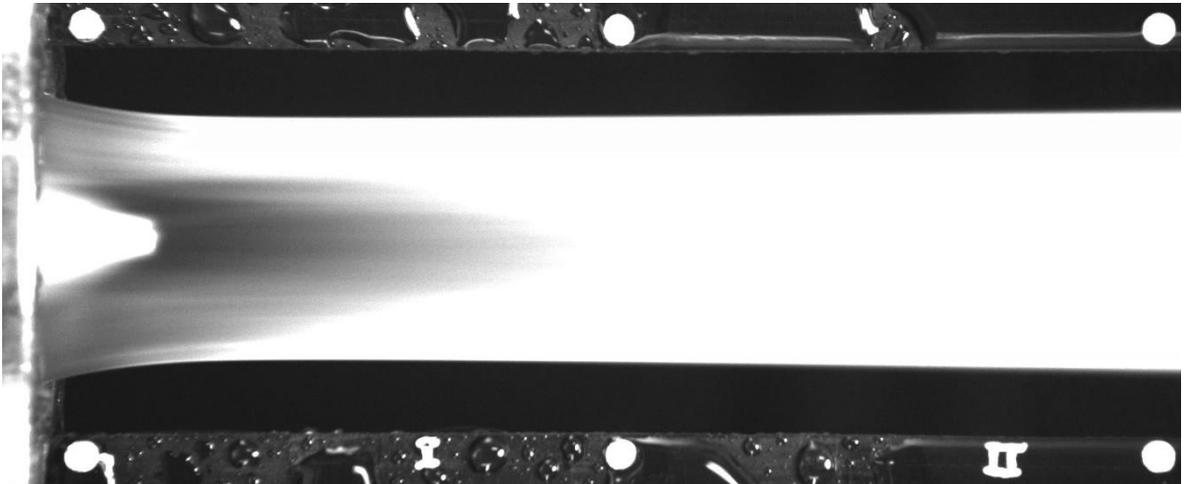
Anhang A 2: Strahlbild, s/d_0 0,081; H60, M1



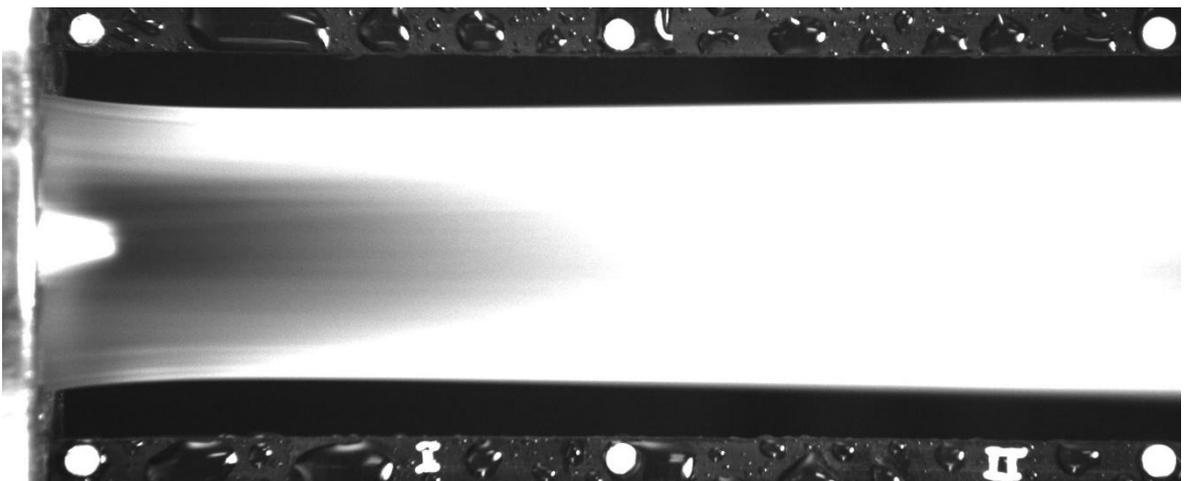
Anhang A 3: Strahlbild, s/d_0 0,101; H60, M1



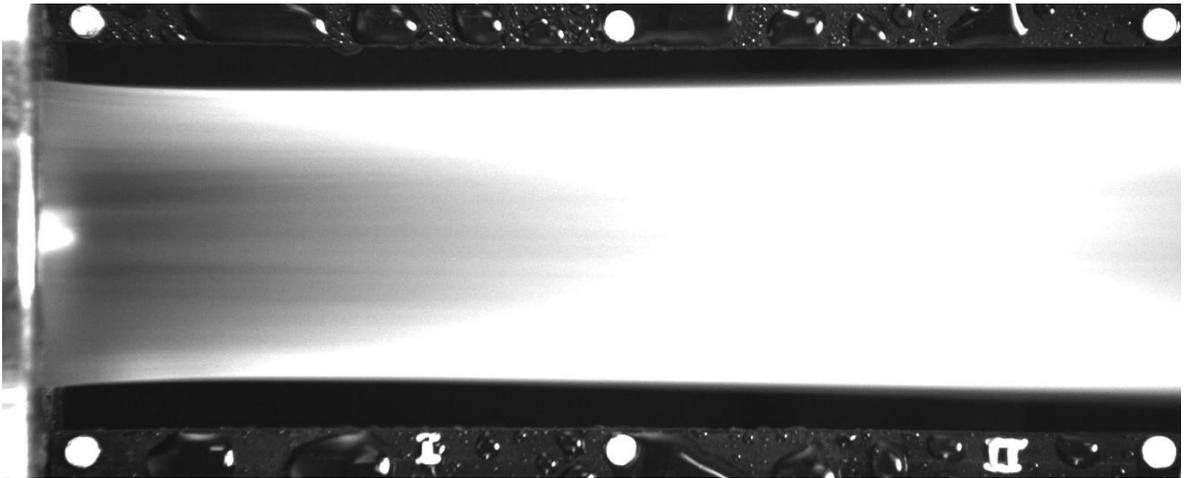
Anhang A 4: Strahlbild, $s/d_0 0,2$; H60, M1



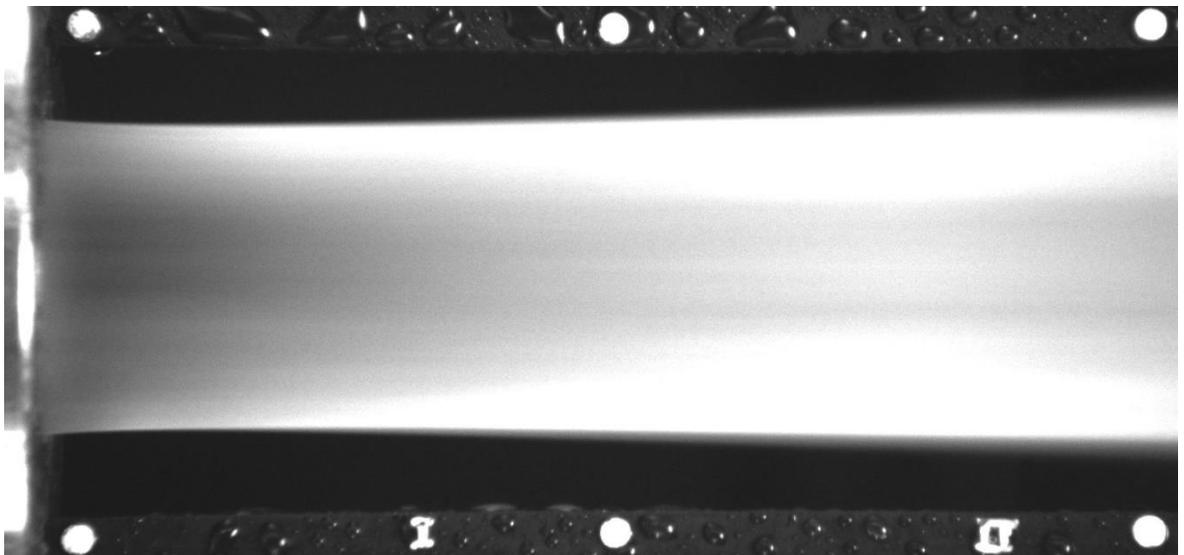
Anhang A 5: Strahlbild, $s/d_0 0,3$; H60, M1



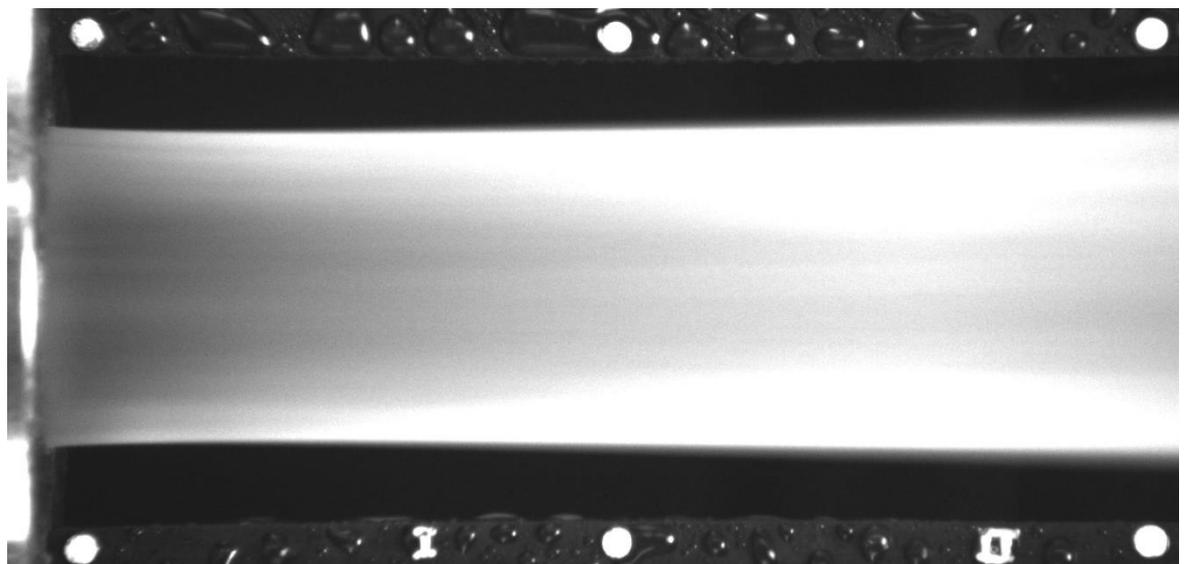
Anhang A 6: Strahlbild, $s/d_0 0,4$; H60, M1



Anhang A 7: Strahlbild, s/d_0 0,5; H60, M1



Anhang A 8: Strahlbild, s/d_0 0,6; H60, M1



Anhang A 9: Strahlbild, s/d_0 0,7; H60, M1



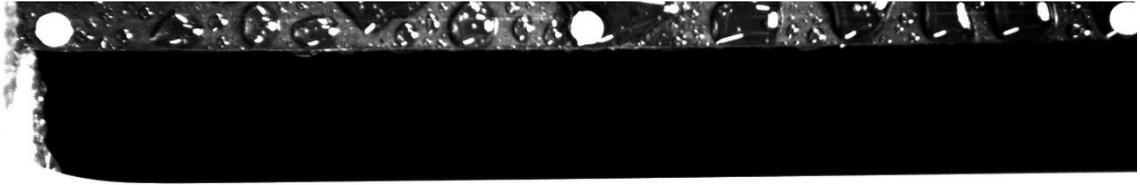
Anhang A 10: Strahlbild, s/d_0 0,13; H60, M2



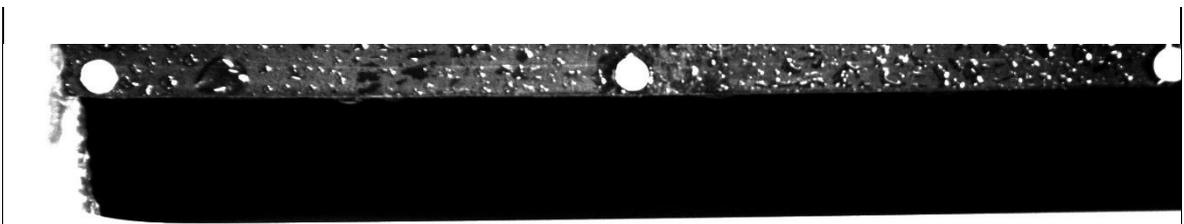
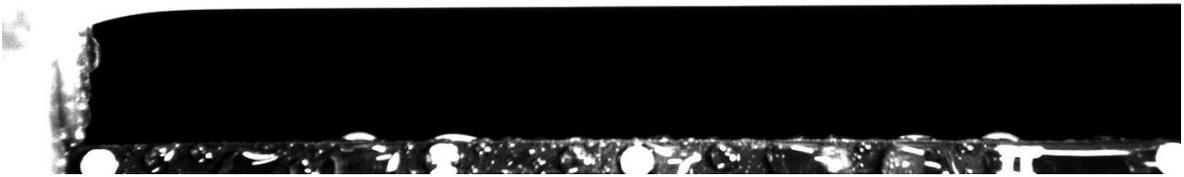
Anhang A 11: Strahlbild, s/d_0 0,18; H60, M2



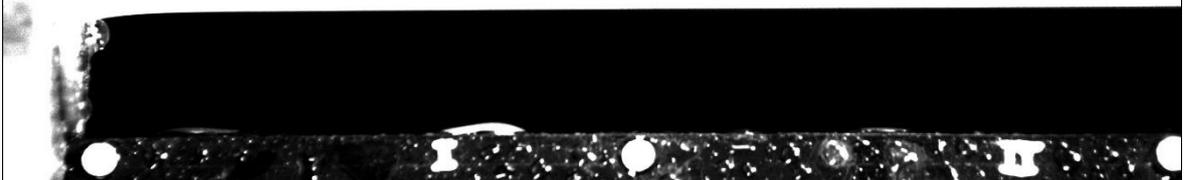
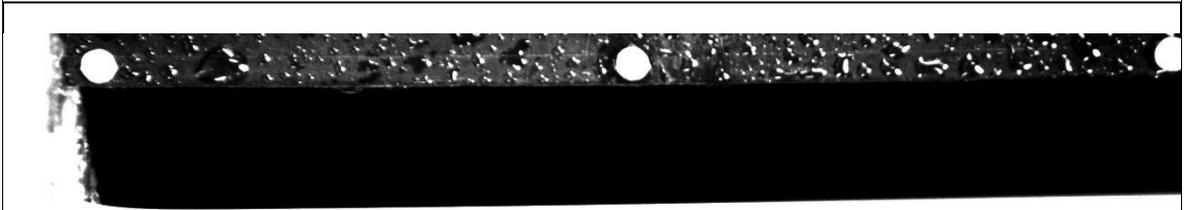
Anhang A 12: Strahlbild, s/d_0 0,22; H60, M2



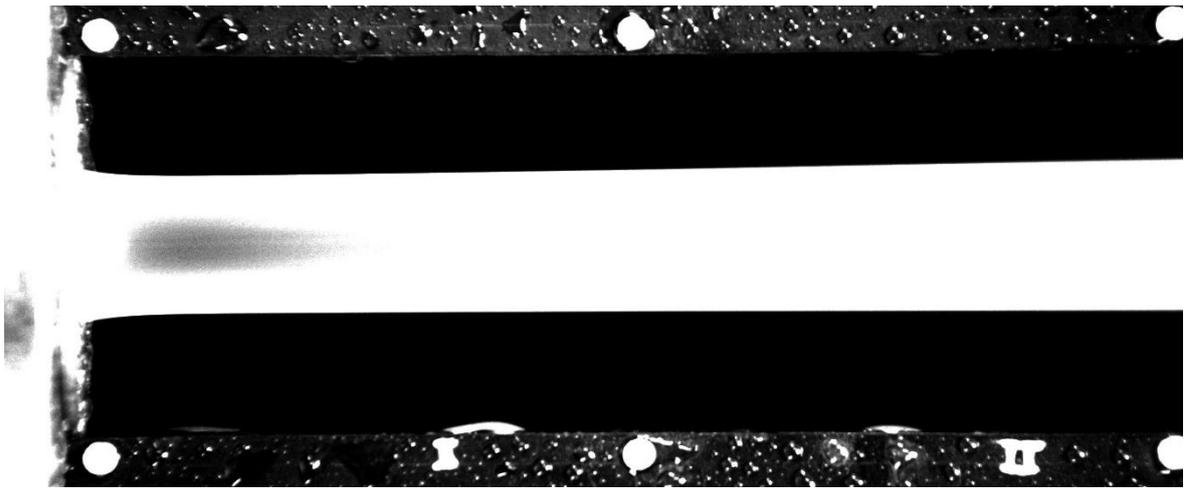
Anhang A 13: Strahlbild, $s/d_0 0,26$; H60, M2



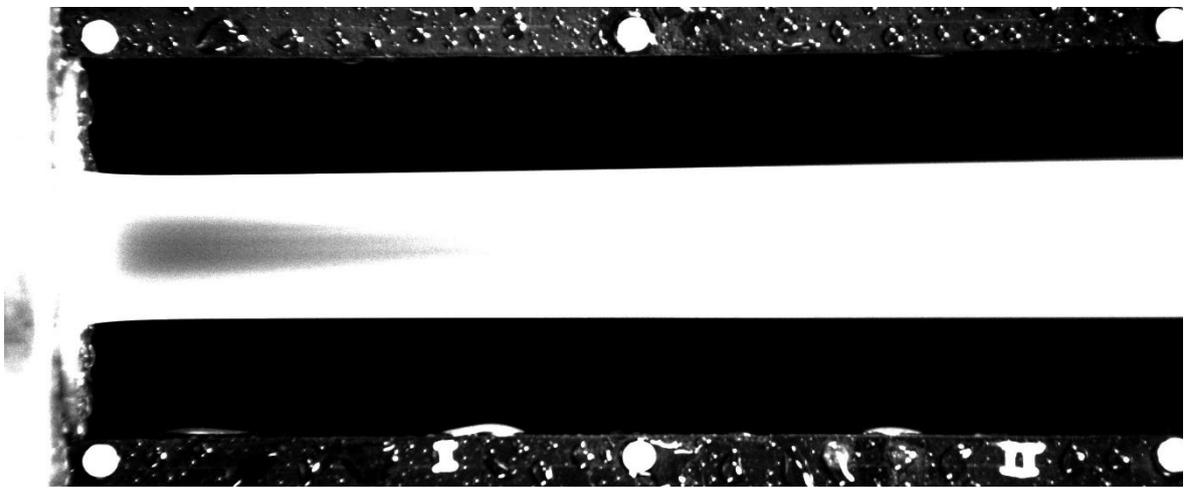
Anhang A 14: Strahlbild, $s/d_0 0,35$; H60, M2



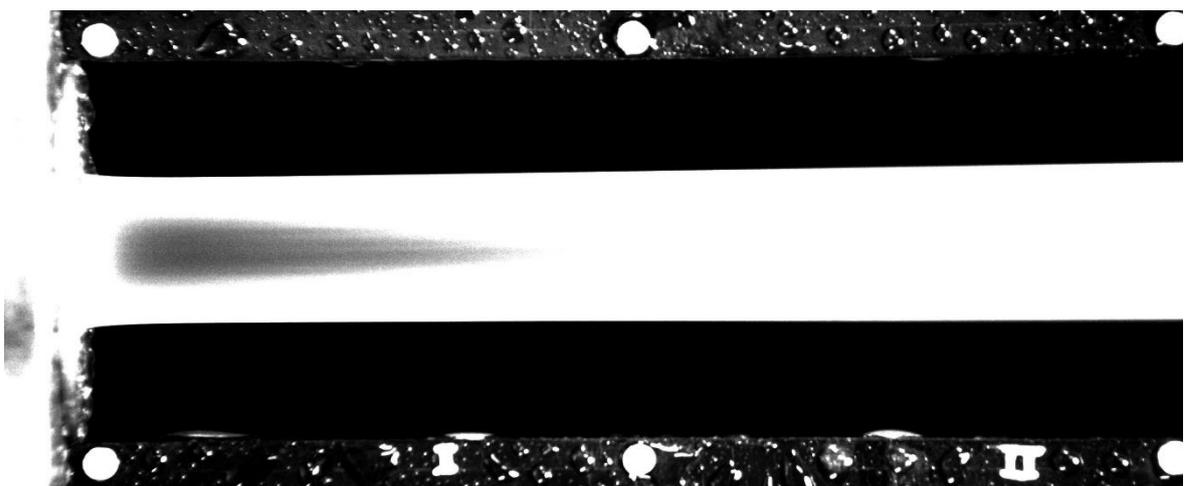
Anhang A 15: : Strahlbild, $s/d_0 0,44$; H60, M2



Anhang A 16: : Strahlbild, $s/d_0 0,53$; H60, M2



Anhang A 17: Strahlbild, $s/d_0 0,61$; H60, M2



Anhang A 18: Strahlbild, $s/d_0 0,70$; H60, M2

Anhang B

