

**TU**

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**

**DIPLOMARBEIT**

**Einfluss verschiedener Düsenparameter auf den  
Wirkungsgrad von Peltonturbinen**

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 Thermodynamik und Energiewandlung

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaft**

von

Philipp Unterberger  
Matr.Nr. 0225289  
Schellhamnergasse 3/22, 1170 Wien

Wien, am 11. Januar 2010

.....  
(Philipp Unterberger)

# Danksagung

Ich möchte mich bei der Firma VOITH SIEMENS Hydro Power Generation für die Ermöglichung und Unterstützung bei dieser Diplomarbeit bedanken. Besonderer Dank geht an Herrn DI Josef Gaschl und Herrn DI Rainer Mack.

Ein herzliches Danke gilt dem Team rund um Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.Ing. Christian BAUER am Institut für Thermodynamik und Energie-wandlung/E302 der TU Wien. Besonderer Dank gebührt Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus KÄFER, dessen Tür mir immer offen stand und der mir unermüdlich, auch in seiner Freizeit, mit Rat und Tat zur Seite stand. Besonderer Dank auch an Herrn Josef HERIG vom Labor für die Hilfe beim Umbau des Versuchsstands, der auch schon mal bis in die Nacht hinein gedauert hat.

Ein herzliches Vergeltsgott an meine Eltern für die Unterstützung und die Ermöglichung meines Studiums. Vielen Dank auch an meine Freunde und Kommilitonen die meinen Studienweg begleitet haben, danke Georg für L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, danke Gerhard und Kathi für die Korrektur, danke Caro für Photoshop.

Wien, Dezember 2009

# Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss verschiedener Mundstückaustrittswinkel in Kombination mit verschiedenen Nadelwinkeln und Nadelkonturen auf den Freistrahlfeld von Pelton-Turbinendüsen untersucht. Hierfür wird ein optisches Messverfahren inklusive Messsoftware entwickelt. Die damit erarbeiteten Messergebnisse liefern Aussagen über Lage und Größe der maximalen Strahlkontraktion, den Strahlaustrittswinkel, den Strahldivergenzwinkel, die Düsenkennlinie, den Düsenwirkungsgrad sowie dessen Verlauf über die Strahllänge.

# Abstract

This study aims to examine the influence of different nozzle exit angles in combination with different needle angles and needle contours for the open jet of pelton nozzles. For this purpose, an optical measurement method including measurement software was developed. The obtained results provide information about location and size of the maximum jet contraction, the jet exit angle, the jet divergence angle, the nozzle characteristics, the nozzle efficiency and its trend over the jet length.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Die Düse . . . . .	3
2.1.1	Einschränkung der Düsendefinition . . . . .	3
2.1.2	Die verwendeten Bauarten . . . . .	4
2.1.3	Die Durchflussfläche der Nadeldüse . . . . .	5
2.1.4	Verluste in der Düse und Düsenwirkungsgrad $\eta_D$ . . . . .	8
2.1.5	Fehlerfortpflanzung . . . . .	11
2.2	Der Freistrahл . . . . .	12
2.2.1	Definition des Freistrahls . . . . .	12
2.2.2	Verluste im Freistrahл und Strahlwirkungsgrad $\eta_{Str}$ . . . . .	13
2.2.3	Ovalität des Freistrahls . . . . .	14
2.3	Die Modellturbine . . . . .	15
2.3.1	Das verwendete Laufrad . . . . .	15
2.3.2	Verluste in der Turbine, Turbinenwirkungsgrad $\eta_T$ und Vergleichswirkungsgrad $\eta_V$ . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Beschreibung der Versuchseinrichtung</b>	<b>18</b>
3.1	Der Aufbau für die Durchmessermessung . . . . .	19
3.2	Aufbau zur Messung der Strahlovalität . . . . .	21
3.3	Aufbau für die Laufradmessung . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Messung</b>	<b>24</b>
4.1	Bestimmung der Düsenkennlinie . . . . .	24
4.1.1	Messung der Düsenstellung . . . . .	24
4.1.2	Messung des Volumenstroms $Q$ . . . . .	25
4.1.3	Druckmessung . . . . .	25
4.2	Vermessung des Wasserstrahls . . . . .	26
4.2.1	Aufstellung und Positionierung der Kamera . . . . .	26
4.2.2	Die Referenzmarkierung . . . . .	28

4.2.3	Die Messsoftware . . . . .	29
4.3	Messung der Leistungsaufnahme am Laufrad . . . . .	32
4.3.1	Messung von Drehmoment und Drehzahl . . . . .	32
4.3.2	Messung des Reibmoments . . . . .	33
4.4	Messwerterfassung und Messfehler . . . . .	34
4.4.1	Trägerfrequenzmessverstärker . . . . .	34
4.4.2	Messfehler der einzelnen Komponenten . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>36</b>
5.1	Düsenkennlinien . . . . .	36
5.2	Das Strahlprofil . . . . .	40
5.2.1	Ovalität . . . . .	40
5.2.2	Strahlkontraktion und $\beta_{Str}$ . . . . .	41
5.2.3	Strahldivergenz und $\alpha_{Div}$ . . . . .	45
5.2.4	Die größte Strahlkontraktion: $z_1$ und $d_1$ . . . . .	48
5.3	Düsen- und Strahlwirkungsgrad . . . . .	51
5.3.1	Auswertungsansatz mittels Funktionsgebirge . . . . .	51
5.3.2	$\eta_D$ in Abhängigkeit von $Q_1$ . . . . .	53
5.3.3	$\eta_S$ in Abhängigkeit von $z/d_0$ . . . . .	54
5.4	Wirkungsgrad der Versuchsturbine . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick</b>	<b>62</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>64</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>66</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>67</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>69</b>
	<b>Anhang</b>	<b>69</b>
<b>A</b>	<b>Strahlaustrittswinkel <math>\beta_{Str}</math></b>	<b>70</b>
<b>B</b>	<b>Strahldivergenzwinkel <math>\alpha_{Div}</math></b>	<b>75</b>
<b>C</b>	<b><math>d_1</math> und <math>z_1</math></b>	<b>80</b>
<b>D</b>	<b>Messsoftware</b>	<b>85</b>

<b>E</b>	<b>Strahlkontur</b>	<b>90</b>
<b>F</b>	<b>Laufradmessung - Muscheldiagramme</b>	<b>105</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Forschung im Bereich der Strömungsmaschinen hat sich die Optimierung und stetige Verbesserung von Wirkungsgraden zum Ziel gemacht. Dabei wird versucht dem Prinzip der Ökonomie gerecht zu werden, indem der Ertrag maximiert wird, bei gleichzeitiger Schonung der Ressourcen. Dies ist nur durch Senkung der Verluste möglich. In modernen Peltonturbinen entstehen diese hauptsächlich am Laufrad, im Gehäuse und in der Freistrahldüse.

Während es für Modellversuche an Laufrädern verschiedener Turbinentypen Aufwertungsformeln zB. nach Moody, Pfeleiderer und Ackeret [12] gibt, werden die Verluste der Freistrahldüse in der Berechnung im Allgemeinen durch einen Reduktionsfaktor berücksichtigt. Bohl [4] gibt hierfür einen Düsenbeiwert an, welcher die Verluste über eine verminderte Strahlgeschwindigkeit beschreibt. Dieser Düsenbeiwert wird in der Größenordnung von  $k_c \approx 0.96$  bis 0.99 angegeben. Daraus ergibt sich ein Wirkungsgradbereich der Düse von  $\eta_D \approx 91.75\%$  bis 98%. Über die Abhängigkeit des Wirkungsgrads von Durchfluss oder Fallhöhe können daraus keine Aussagen gemacht werden.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Optimierung von Freistrahldüsen im Bereich des Düsenmundstücks und der Düsennadel liefern. Hierfür wird der Einfluss, der zu Verfügung stehenden Geometrien, auf zwei Faktoren untersucht:

*Strahlkontur:* Es wird gemessen wie sich die Lage und die Größe der maximalen Strahlkontraktion in Abhängigkeit von der Düsengeometrie und verschiedenen Betriebsbedingungen (Düsenstellung, Höhe und resultierender Durchfluss) verhält. Für die Beschreibung der Betriebsbedingungen wird später der Düseneinheitsdurchfluss eingeführt. Weiters wird gemessen wie sich die unterschiedlichen Mundstück- und Düsennadelwinkel auf den Strahlaustritt

und auf die Strahldivergenz auswirken.

*Düsenwirkungsgrad:* Um genauere Aussagen über den Absolutwert und die Abhängigkeit des Düsenwirkungsgrads von veränderlichen Betriebsbedingungen für die vorhandenen Geometrien machen zu können werden hierfür geeignete Kennlinien erarbeitet. Die Wirkungsgradbestimmung erfolgt durch Vermessung des Freistrahldurchmessers über mehrere Messstellen entlang der Strahlkontur. Zur Überprüfung der daraus berechneten Düsenwirkungsgrade wird anschließend die Messung der Leistungsaufnahme an einem Peltonreferenzrad durchgeführt.

Ein großer Teil meiner Arbeit floss in die Entwicklung einer geeigneten Messmethode und das Erstellen der zugehörigen Messsoftware mit der Programmiersprache LabView. Im Zuge dieser Diplomarbeit wird noch genauer darauf eingegangen.

# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

### 2.1 Die Düse

Die Düse der Freistrahlturbine ist eine verstellbare Nadeldüse. Mit Düse wird der Bereich bezeichnet, der sich vom Einlauf bis zum Austritt des Wassers ins Freie erstreckt. In ihr erfolgt die Umwandlung des Nettogefälles der Turbine in Geschwindigkeit bzw. kinetische Energie des Freistrahls. Die Regelung des Durchflusses erfolgt durch die Düsennadelverstellung.

Zur Vermeidung von Druckstößen in der Druckleitung und zur Verhinderung des Durchgehens der Turbine wird bei größeren Regeleinriffen nicht nur die Nadeldüse verschoben, sondern zusätzlich auch noch ein Strahlabschneider eingeschwenkt, um dadurch den Düsenstrahl ganz oder teilweise vom Laufrad abzulenken.

#### 2.1.1 Einschränkung der Düsensdefinition

Da in dieser Arbeit der Einfluss der Geometrie des Düsenmundstücks und der Düsennadel untersucht werden soll, wird von der obigen Definition der Düse abgewichen und hierfür die Systemgrenze der Düse neu festgelegt. Diese erstreckt sich im Weiteren über den konvergenten Bereich zwischen dem Anfang des Mundstücks (in Strömungsrichtung) und dem Ort der maximalen Strahlkontraktion.

Der Vorteil dieser Systemgrenzen liegt darin, dass der im nächsten Abschnitt eingeführte Begriff Düsenswirkungsgrad nur Verluste berücksichtigt die unmittelbar in diesem Bereich entstehen. Verluste aufgrund von Einbauten die für die Verstellung der Düsennadel notwendig sind werden dadurch ebenso

nicht berücksichtigt, wie Verluste die durch die Strahldivergenz aufgrund von Impulsaustausch mit der Umgebung entstehen.

## 2.1.2 Die verwendeten Bauarten

Für die Messungen stehen fünf Düsennadeln und vier Düsenmundstücke unterschiedlicher Geometrien zur Verfügung. Drei der Düsennadeln sind kegelförmig ausgeführt und haben einen Spitzenwinkel  $\alpha$  zwischen  $20^\circ$  und  $30^\circ$  (siehe Abbildung 2.1 a) . Untersucht werden auch zwei ältere Ausführungen, sogenannte Zwiebelform-Nadeln, deren Kontur durch eine Kurve mit Wendepunkt erzeugt wird (siehe Abbildung 2.1 b). Die Mundstückinnenkontur wird durch Kombination von Geraden und Kreisbögen erzeugt. Sie unterscheiden sich in Länge und Austrittswinkel  $\beta$ , der zwischen  $30^\circ$  und  $45^\circ$  liegt (siehe Abbildung 2.1 c). Der Düsenaustrittsdurchmesser ist mit  $d_0 = 40$  mm für alle gleich.

Beim Mundstück ist die wichtige Unterscheidung zwischen der scharfkantigen und der abgeschrägten Variante zu machen. Der Unterschied wird bei vollständig geschlossenem Zustand deutlich: Beim scharfkantigen Mundstück ergibt sich eine linienförmige Berührung mit der Düsennadel. Der Nachteil ist hier, dass sich nach längerer Betriebszeit eine Kerbe an der Nadeloberfläche bildet, die zu zusätzlichen Verlusten führt. Um dies zu verhindern wird bei der abgeschrägten Bauform, bei geeigneter Kombination mit der Düse, eine flächenförmige Berührung erzeugt. Das Mundstück M3 verfügt über solch einen Flächensitz mit einem Phasenwinkel von  $30^\circ$ , welcher nur in Verbindung mit der Düsennadel N3 als solcher genutzt werden kann. Einzelheiten zu den Geometrien gibt Tabelle 2.1 wieder.

Tabelle 2.1: Geometriedaten und Bezeichnung der Düsenmundstücke und Düsennadeln

Düsennadel	$\alpha$	Länge	Düsenmundstück	$\beta$	Länge
N1	$20^\circ$	216.3 mm	M1	$45^\circ$	90.8 mm
N2	$27.5^\circ$	185.3 mm	M2	$40^\circ$	94.4 mm
N3	$30^\circ$	177.7 mm	M3**	$45^\circ$	90.8 mm
N4	-*	199.4 mm	M4	$30^\circ$	108.6 mm
N5	-*	245 mm			

\*Kontur durch Kurve mit Wendepunkt  
(siehe Abbildung 2.1 b)

\*\*Mundstück mit Flächensitz

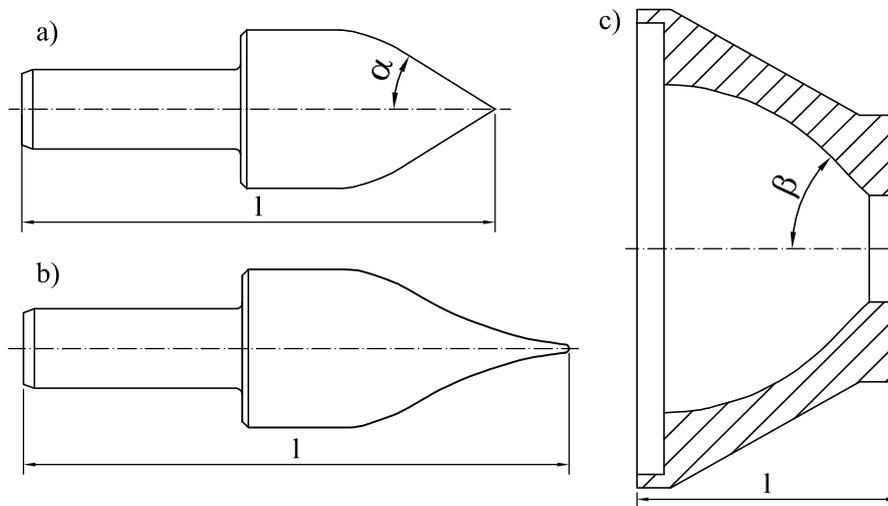


Abbildung 2.1: Geometriedaten der verwendeten Düsennadeln und Mundstücke. a) kegelförmige Ausführung mit Nadelwinkel  $\alpha$ , b) Zwiebelform c) Mundstück mit Mundstückswinkel  $\beta$

### 2.1.3 Die Durchflussfläche der Nadeldüse

Um die Betrachtungen zur Düsengeometrie zu vervollständigen soll hier ein Zusammenhang zwischen den Nadel- und Mundstückswinkeln, der Durchflussfläche und dem zu erwartenden Düseneinheitsdurchfluss gefunden werden.

Knapp [9] berechnet die zu den Strombahnen senkrechte Durchflussfläche zwischen Nadel und Düsenaustrittskante, mit mehr als ausreichender Genauigkeit, nach der *Guldinschen* Regel, die besagt: “Die Mantelfläche eines Rotationskörpers, dessen Rotationsachse die erzeugende Linie nicht schneidet, ist gleich dem Produkt aus der Länge der erzeugenden Linie und dem Umfang des durch die Rotation des Schwerpunktes der Umfangslinie erzeugten Kreises”. Nimmt man den Schwerpunkt des Bogens  $\sigma$  in Bild 2.2 im Schwerpunkt der Strecke  $\overline{AB}$  an, so ergibt sich für den Austrittsquerschnitt:

$$F = \pi \cdot (R_0 + r) \cdot \sigma \quad (2.1)$$

Die Größen  $r$  und  $\sigma$  müssen in Abhängigkeit vom Nadelhub  $s$  dargestellt werden, da der Querschnitt von diesem abhängt. Aus dem Sinussatz ergibt sich für den Durchmesser der Erzeugenden der Austrittsfläche

$$\delta = s \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \quad (2.2)$$

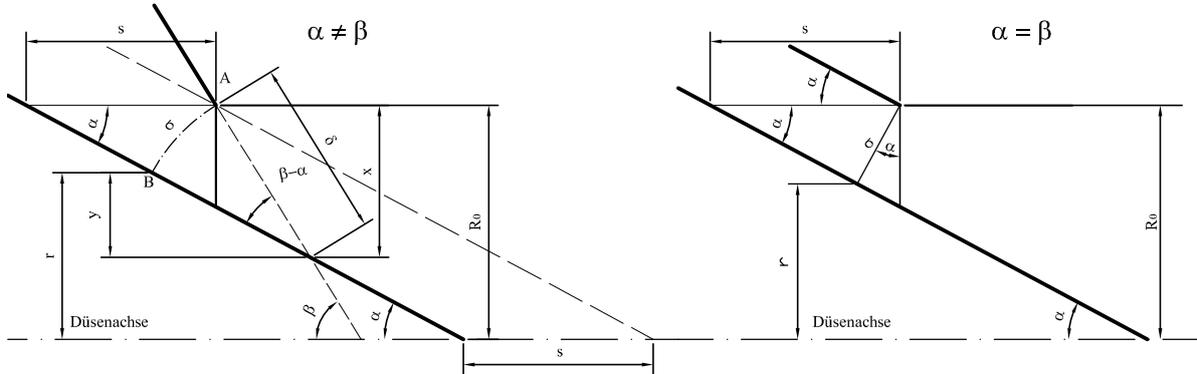


Abbildung 2.2: Durchflussfläche der Nadeldüse

Die Erzeugende des Durchflussquerschnitts besitzt die Länge

$$\sigma = \delta \cdot (\beta - \alpha)$$

und mithilfe der Gleichung (2.2) ergibt sich:

$$\sigma = s \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \cdot (\beta - \alpha) \quad (2.3)$$

Wie man Abbildung 2.2 entnehmen kann ergibt sich ferner:

$$r = R_0 - x + y = R_0 - \delta \cdot \sin \beta + \delta \cdot \sin \alpha$$

Auch hier kann wieder Gleichung (2.2) eingesetzt werden, dann ergibt sich nach Umformung:

$$r = R_0 - s \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \cdot (\sin \beta - \sin \alpha) \quad (2.4)$$

Nun kann man für die Austrittsfläche in Gleichung 2.1 mithilfe der Gleichungen 2.3 und 2.4 schreiben:

$$F = 2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot (\beta - \alpha) \frac{\sin \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \cdot s - \pi \cdot (\beta - \alpha) \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta - \alpha)} (\sin \beta - \sin \alpha) \cdot s^2$$

Diese Gleichung verliert jedoch ihre Gültigkeit für den Spezialfall:  $\alpha = \beta$  bei der gemessenen Kombination N3M4. Man kann sich leicht überlegen, dass dann der Durchmesser der Erzeugenden der Austrittsfläche  $\delta = \infty$  wird und der Bogen  $\sigma$  in eine Gerade übergeht. Wie man Abbildung 2.2 entnehmen kann ergibt sich daher:

$$\sigma = s \cdot \sin \alpha$$

und

$$r = R_0 - \sigma \cdot \cos \alpha = R_0 - s \cdot \sin \alpha \cos \alpha$$

Mit diesen beiden Gleichungen kann man für die Austrittsfläche in Gleichung (2.1) schreiben:

$$F = 2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot \sin \alpha \cdot s - \pi \cdot \sin^2 \alpha \cos \alpha \cdot s^2$$

Führt man nun noch die Abkürzungen

$$A = \begin{cases} 2 \cdot \pi \cdot (\beta - \alpha) \frac{\sin \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} & \text{für } \alpha \neq \beta, \\ 2 \cdot \pi \cdot \sin \alpha & \text{für } \alpha = \beta \end{cases}$$

und

$$B = \begin{cases} \pi \cdot (\beta - \alpha) \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta - \alpha)} (\sin \beta - \sin \alpha) & \text{für } \alpha \neq \beta, \\ \pi \cdot \sin^2 \alpha \cos \alpha & \text{für } \alpha = \beta \end{cases}$$

ein, erhält man schließlich:

$$F = A \cdot R_0 \cdot s - B \cdot s^2 \quad (2.5)$$

Für festgelegte Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  und den konstanten Düsenaustrittsradius  $R_0$  ist die Durchflussfläche also nur vom Düsenhub  $s$  abhängig und wird, wie in Abbildung 2.3 zu sehen, durch eine Parabel dargestellt. Über einen gewissen Hub hinweg nimmt die Durchflussfläche also nur mehr sehr wenig zu.

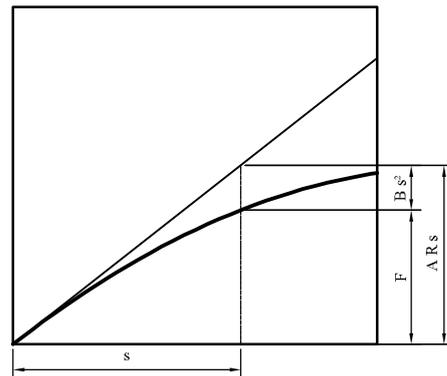


Abbildung 2.3: Durchflussfläche in Abhängigkeit der Düsenstellung

Für eine vereinfachte Abschätzung des Durchflusses kann man mithilfe der Kontinuitätsgleichung  $Q = c \cdot F$ , der Torricellische Ausflussformel  $c = \sqrt{2gH}$  und der Definition des Düseneinheitsdurchflusses  $Q_1 = Q/\sqrt{H}$ , folgende Näherung anschreiben:

$$Q_1 = \sqrt{2g} \cdot F$$

Genauso wie die Durchflussfläche wird auch der Düseneinheitsdurchfluss mit steigender Düsenstellung zunehmen. Für die Düsenkennlinien ist also ebenfalls mit einem parabelförmigen Verlauf ähnlich Abbildung 2.3 zu rechnen.

### 2.1.4 Verluste in der Düse und Düsenwirkungsgrad $\eta_D$

Bei der Definition der Systemgrenzen der Düse in Kap. 2.1.1 wurde als Ende der Ort maximaler Strahlkontraktion angegeben. An dieser Stelle hat der Strahl den kleinsten Durchmesser  $d_1$  und die Strahllänge  $l_1$ . Wie die Messung zeigen wird, kann für  $l_1$  kein absoluter Wert angegeben werden, da sich die Position des minimalen Durchmessers je nach Kombination und in Abhängigkeit der Düsenstellung ändert.

Allgemein sollen alle im Weiteren verwendeten Variablen mit einem Index  $_1$  den Zustand im engsten Strahlquerschnitt, Index  $_e$  den Zustand unmittelbar vor der Düse und Index  $_a$  den Zustand im Düsenaustritt kennzeichnen (siehe Abbildung 2.4).

Charakteristisch für die Strömung im konvergenten Bereich vor dem Strahlaustritt ist eine starke Beschleunigung auf kurzer Strecke. Ziel ist hierbei, die möglichst vollständige Umwandlung der Nettofallhöhe in kinetische Energie. Je nach Düsen Güte findet diese Umwandlung mit mehr oder weniger Verlusten statt.

Hauptverantwortlich für die Verluste ist die Reibung an der inneren Mundstückwand und an der Düsenadel. Ihre Oberflächen sind zum Austritt hin den größten Geschwindigkeiten ausgesetzt. Weitere Verluste entstehen durch nicht geeignete Formgebung, wie unetstetige Übergänge in Form von Ecken und Kanten, sowie ungeeignete Wandkonturen. Daraus können Ablösungen resultieren, welche zusätzliche Abnutzungen durch Kavitation hervorrufen.

Sind Reibungs- und Querschnittänderungsverluste für die Reduzierung des Wirkungsgrads verantwortlich, können diese gemeinsam als Gefälleverluste der Düse:  $H_{VD}$  dargestellt - und deren Summe auf das Gefälle der Turbine  $H$  bezogen werden. Daraus lässt sich aus der allgemeinen Definition eines Wirkungsgrads,  $\eta = 1 - \sum$  Verluste, für den Düsenwirkungsgrad  $\eta_D$  folgender Zusammenhang definieren:

$$\eta_D = 1 - \frac{H_{VD}}{H}$$

Der Gefälleverlust in der Düse berechnet sich mit:

$$H_{VD} = E_e - E_1 = E_e - \left( \frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 \right)$$

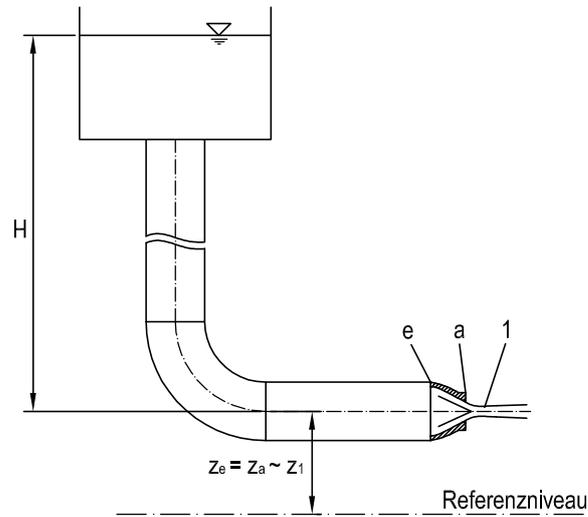


Abbildung 2.4: Nettofallhöhe ( $H$ ), geodätische Höhen ( $z$ ) und Bezeichnungen

Hierin bedeutet  $E$  die Energiehöhe,  $c$  die mittlere Strömungsgeschwindigkeit,  $p$  der Überdruck gegenüber dem Atmosphärendruck,  $\rho$  die Dichte und  $z$  die geodätische Höhe. Für das Gefälle  $H$  kann man mithilfe der Stromfadentheorie den folgenden Zusammenhang folgern:

$$H = z_e - z_a + \frac{p_e}{\rho \cdot g} + \frac{c_e^2}{2g} = E_e - z_a$$

Dadurch ergibt sich für die Verlusthöhe

$$H_{VD} = (H + z_a) - \left( \frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 \right)$$

und schließlich der Düsenwirkungsgrad:

$$\eta_D = 1 - \frac{H_{VD}}{H} = 1 - 1 + \frac{\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{c_1^2}{2g} + z_1 - z_a}{H} = \frac{E_1 - z_a}{H}$$

Führt man an dieser Stelle die Durchflusszahl  $\varphi$ , die laut Definition den gemessenen - zum theoretischen (verlustfreien) Durchfluss in Beziehung setzt, ein:

$$\varphi_1 = \frac{Q}{Q_{th}} = \frac{c_1 \cdot A_1}{c_{th} \cdot A_1} = \frac{c_1}{\sqrt{2gH}} \quad (2.6)$$

Für den Wirkungsgrad ergibt sich schließlich:

$$\eta_D = \varphi_1^2 + \frac{p_1}{\rho g H} + \frac{z_1 - z_a}{H}$$

Es gilt  $(z_1 - z_a) \ll H$  und damit kann der Term  $(z_1 - z_a)/H$  vernachlässigt werden. Außerdem entspricht der Druck im engsten Querschnitt in etwa dem Atmosphärendruck. Somit ist  $p_1 \ll (\rho g H)$  und der Term  $(p_1/\rho g H)$  kann ebenfalls vernachlässigt werden.

Mit diesen Vereinfachungen erhält man endgültig:

$$\eta_D = \varphi_1^2 \quad (2.7)$$

Die theoretischen Verläufe von  $\varphi_1$  und  $\eta_D$  sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

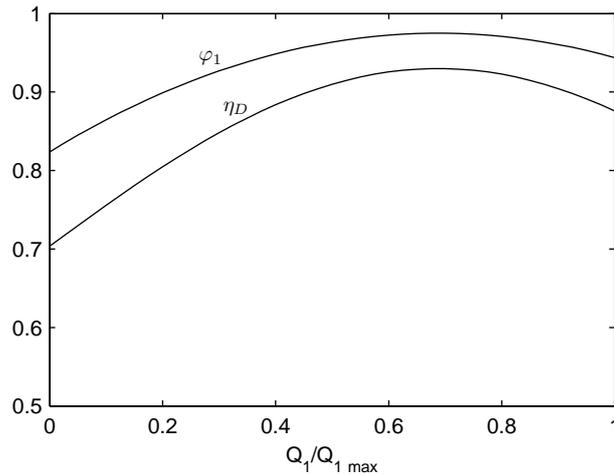


Abbildung 2.5: theoretische Verläufe von  $\varphi_D$  und  $\eta_D$  aus den Gleichungen (2.6) und (2.7)

Für die Auswertung ist es wichtig den Zusammenhang zwischen den gemessenen Größen  $Q$ ,  $H$ ,  $d_1$  und  $\eta_D$  zu kennen. Hierfür wird die Gleichung für den Strahlwirkungsgrad unter Verwendung der Beziehung (2.6) umgeformt:

$$\begin{aligned} \eta_D &= \frac{c_1^2}{2gH} = \frac{Q^2}{2gH \left(\frac{\pi}{4}d_1^2\right)^2} = \frac{8}{g\pi^2} \frac{Q_1^2}{d_1^4} \\ &\cong 0,0827 \frac{Q_1^2}{d_1^4} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Darin ist  $Q_1 = Q/\sqrt{H}$  der Einheitsdurchfluss der Düse, als Äquivalenz zum Durchfluss der sich bei einer Fallhöhe von  $1m$  ergeben würde. Er dient als Grundlage für den Vergleich der verschiedenen Messungen, da diese bei verschiedenen Höhen durchgeführt wurden. Durch Verändern der Höhe ändert sich auch der Durchfluss bei gleichbleibender Düsenstellung, das Verhältnis  $Q/\sqrt{H}$  bleibt jedoch konstant.

Selbst nach all den getroffenen Vereinfachungen bleibt das Bestimmen des Düsenwirkungsgrads eine schwierige Messung. Dies soll die nachfolgende Betrachtung zu den Messfehlern zeigen.

### 2.1.5 Fehlerfortpflanzung

Ausgangspunkt ist die umgeformte Gleichung (2.8) für den Düsenwirkungsgrad unter Berücksichtigung des Zusammenhangs  $p = \rho g H$ :

$$\eta_D(Q, p, d) = \frac{8}{g\pi^2} \cdot \frac{Q^2}{H \cdot d^4} = \frac{8\rho g}{g\pi^2} \cdot \frac{Q^2}{p \cdot d^4} = C \cdot \frac{Q^2}{p \cdot d^4}$$

Daraus berechnet sich der absolute Fehler, mit Taylorreihenentwicklung und Abbruch nach dem linearen Glied, in guter Näherung:

$$\begin{aligned} \Delta\eta_D &\leq \left| \frac{\partial\eta_D}{\partial Q} \right| \Delta Q + \left| \frac{\partial\eta_D}{\partial p} \right| \Delta p + \left| \frac{\partial\eta_D}{\partial d} \right| \Delta d + \dots \\ \Delta\eta_D &\leq 2C \frac{Q}{pd^4} \Delta Q + C \frac{Q^2}{p^2 d^4} \Delta p + 4C \frac{Q^2}{pd^5} \Delta d \end{aligned}$$

Berücksichtigt man den maximalen Fehler der Durchflussmessung  $\Delta Q = 0.002 \cdot Q$  und den maximalen Fehler der Druckmessung  $\Delta p = 0.0025 \cdot p$  so folgt:

$$\begin{aligned} \Delta\eta_D &\leq 0.004 \cdot C \cdot \frac{Q^2}{\rho g H d^4} + 0.0025 \cdot C \cdot \frac{Q^2}{\rho g H d^4} + 4 \cdot C \cdot \frac{Q^2}{\rho g H d^5} \cdot \Delta d \\ \Delta\eta_D &\leq 0.004\eta_D + 0.0025\eta_D + 4\eta_D \frac{\Delta d}{d} \\ \Delta\eta_D &\leq \eta_D \left( 0.0065 + 4 \frac{\Delta d}{d} \right) \end{aligned} \tag{2.9}$$

Den größten Teil des absoluten Fehlers den man bei der Wirkungsgradmessung macht, ist dem relativen Fehler der Durchmesser messung zuzuschreiben. Nach Umformung von (2.9) und unter der Berücksichtigung von

$0.0065 \ll 4\Delta d/d$  erhält man den relativen Fehler des Wirkungsgrads:

$$\frac{\Delta\eta_D}{\eta_D} \approx 4\frac{\Delta d}{d} \quad (2.10)$$

Wie man sieht beträgt der relative Düsenwirkungsgradfehler das vierfache des relativen Fehlers der Durchmessermessung. Macht man bei der Messung von  $d_1$  also beispielsweise einen Fehler von 1 % von  $d_1$ , was bei dieser Messung durchaus realistisch erscheint, so beträgt der relative Fehler  $\Delta\eta_D/\eta_D$  bereits 4 %.

## 2.2 Der Freistrahle

### 2.2.1 Definition des Freistrahls

Der Freistrahle ist jener Teil im Strömungsverlauf, der vom Austritt aus der Düse bis zum Eintritt in den Becher des Laufrads reicht. Die Festlegung der genauen Position des Strahleintritts ist schwierig, da der Kontakt mit der Schaufel nicht über den gesamten Querschnitt gleichmäßig stattfindet. Laut Benitez [3] erhält man eine brauchbare Definition des Laufradeintritts durch Verwendung des Schnittpunkts vom Laufrad-Spitzenkreis  $D_s$  mit dem Strahlprofil. Dieser Punkt stellt den ersten möglichen Kontakt zwischen dem Laufrad und dem Strahl dar. Anhand von Abbildung 2.6 kann man einen geometrischen Zusammenhang für die Strahllänge formulieren.

Für den Winkel zwischen der Verbindung von Laufradmittelpunkt mit dem Strahleintritt und der Symmetrieachse des Laufrads gilt:

$$\alpha = \arccos \frac{D_1 - d_z}{D_s}$$

Daraus resultiert für den Abstand zwischen der Achse durch den Radmittelpunkt und dem Strahleintritt

$$(l_R - z) = \frac{D_s}{2} \sin \alpha$$

Kennt man nun die Mundstücklänge  $l_M$  und den aus dem Einbau resultierenden Abstand zwischen Mundstückflansch und Laufradachse  $l_A$ , so erhält man für die Strahllänge:

$$z = l_A - l_M - \frac{D_s}{2} \sin \alpha$$



malen Zusammenhang:

$$\eta_{Str} = \varphi_{Str}^2 \cong 0.0827 \frac{Q_1^2}{d_z^4}$$

Wie bereits in Kapitel 2.1.4 angesprochen ist die Ursache für Verluste im Freistrah in der Strahldivergenz (Zunahme des Strahldurchmesser mit der Strahllänge) zu finden. Diese wiederum entsteht als Folge des Impulsaustausches mit der Umgebung am Strahlrand. Aus der Überlegung zur Durchmesserzunahme mit der Strahllänge, folgt aus obiger Gleichung, dass sich eine Abnahme von  $\eta_{Str}$  mit größer werdender Strahllänge ergibt.

Sowohl [3] als auch [2] arbeiten mit dieser Gleichung. Die stillschweigende Annahme einer konstanten Geschwindigkeitsverteilung über den gesamten Strahlquerschnitt als Voraussetzung bei der Herleitung von Gleichung (2.8) für den Strahlwirkungsgrad, führt nur im engsten Strahlquerschnitt  $d_1$  zu ausreichend guten Ergebnissen. Will man den genauen Strahlwirkungsgrad  $\eta_{Str}$  an einer bestimmten Position am Strahl messen, muss zusätzlich die Geschwindigkeitsverteilung über den Strahlquerschnitt bekannt sein. Hierfür würde sich eine Strömungsgeschwindigkeitsmessung mithilfe der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) eignen, wie in [16] detailliert beschrieben.

### 2.2.3 Ovalität des Freistrahls

Bei den Labormessungen konnte festgestellt werden, dass der Strahlquerschnitt nicht wie angenommen rund ist, sondern eine Ovalität aufweist. Am Prüfstand des Labors der TU Wien ist dies auf die Einbaumaßnahmen zur Verstellung der Düsenadel zurückzuführen. Am oberen und unteren Teil befindet sich im Zulaufrohr ein tragflügelförmiger Einbau, um welchen die Strömung beschleunigt wird. Dies hat zur Folge, dass die Strahlgeschwindigkeit in der Austrittsfläche hier höher ist. Dadurch wird der Strahl stromabwärts horizontal gestaucht und vertikal gestreckt.

Bei der optischen Durchmesser messung, welche senkrecht von oben erfolgt, wird deshalb der kleinere Achsenabschnitt  $d_{kl}$  der Ellipse gemessen. Dies wird in der Wirkungsgradberechnung aus den Durchmesser messwerten, durch Ersetzen des gemessenen Durchmessers mit dem flächengleichen Durchmesser berücksichtigt. Ist  $d_{gr}$  der größere - und  $d_{kl}$  der kleinere Achsenabschnitt einer Ellipse so errechnet sich der flächengleiche Durchmesser zu:

$$d = \sqrt{d_{gr} d_{kl}} \quad (2.11)$$

Das Verhältnis von  $d_{gr}/d_{kl}$  wurde in speziellen Messungen ermittelt (siehe auch Abschnitt 3.2)

## 2.3 Die Modellturbine

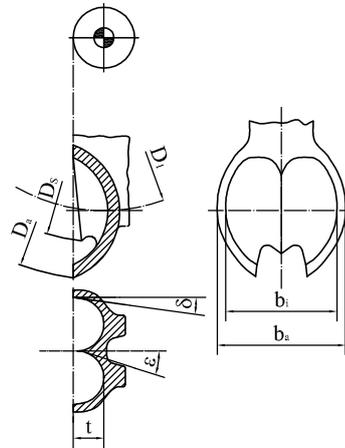
Zur Überprüfung und Beurteilung der gemessenen Strahlwirkungsgrade werden weitere Messung an einem Peltonlaufrad durchgeführt. Bei bekanntem Strahlwirkungsgrad an der Stelle des Eintritts ins Laufrad und Berücksichtigung der für alle Kombinationen gleichen Verluste im Laufrad müssten so die gleichen Unterschiede im maximalen Wirkungsgrad der Modellturbine entstehen wie bei der Bestimmung des Strahlwirkungsgrads.

### 2.3.1 Das verwendete Laufrad

Die Versuche werden an einem Peltonlaufrad älterer Generation gemacht. Da es sich um eine Referenzmessung handelt, hat dies jedoch keinen Einfluss auf die Messung, da als Voraussetzung für den Vergleich der verschiedenen Kombinationen immer das gleiche Laufrad verwendet wird. In Tabelle 2.2 sind die Auslegungsdaten und Hauptabmessungen des Laufrads angegeben.

Tabelle 2.2: Hauptabmessungen und Auslegungsdaten der Modellturbine

Bezeichnung	Symbol	Wert
spezifische Drehzahl	$n_q$	$5,7 \text{ min}^{-1}$
Strahlkreisdurchmesser	$D_1$	420 mm
Außendurchmesser	$D_a$	536 mm
Spitzenkreisdurchmesser	$D_s$	508 mm
Becherzahl	$z$	19
äußere Becherbreite	$b_a$	142 mm
innere Becherbreite	$b_i$	130 mm
Bechertiefe	$t$	41 mm
Becherlänge	$l$	121 mm
Schneidenwinkel	$\epsilon$	$8^\circ$
Austrittswinkel	$\delta$	$10^\circ$



### 2.3.2 Verluste in der Turbine, Turbinenwirkungsgrad $\eta_T$ und Vergleichswirkungsgrad $\eta_V$

Neben den Verlusten in der Düse, reduzieren noch weitere Einflüsse den Wirkungsgrad von Peltonturbinen. Laut Rosegger [15] setzt sich der Gesamtverlust neben den Düsenverlusten noch zusätzlich aus folgenden Einzelverlusten zusammen:

- Leitungsverluste: Dies sind Reibungsverluste und Verluste durch Sekundärströmungen in Rohrleitungen, Verteilern und Absperrorganen.
- Laufradverluste: Dazu zählen Reibungsverluste im Becher, der Stoßverlust beim Laufradeintritt, Verluste aufgrund der Kreuzung von Stromlinien unterschiedlicher kinetischer Energie, Austrittsverluste am Becher und Umlenkungsverluste infolge einer Strömungsumlenkung die kleiner als  $180^\circ$  ist.
- Gehäuseverluste: Diese setzen sich aus dem Ventilationsverlust und Verluste infolge von Spritzwasser, das auf das Laufrad und den Strahl einwirken, zusammen.
- Mechanische Verluste: Darunter sind die Verluste im Generator, in Lagern und eventuell im Getriebe zu verstehen.

In den folgenden Betrachtungen werden Leitungsverluste und mechanische Verluste nicht berücksichtigt, da bei den Messungen rein der Wirkungsgrad des Systems Düse-Laufrad-Gehäuse ermittelt wird. Für dieses System kann der Turbinenwirkungsgrad eingeführt werden. Er ist als Verhältnis von abgeführter mechanischer Leistung zu zugeführter hydraulischer Leistung definiert:

$$\eta_T = \frac{P}{\dot{m} Y} = \frac{\omega(n) M(n, Q, H)}{\dot{m} (Q) Y(H)} \quad (2.12)$$

Darin bezeichnet  $\dot{m}$  den Massenstrom und  $Y$  die spezifische Stutzenarbeit. Der Wirkungsgrad einer hydraulischen Turbine ist also durch drei unabhängige Variablen definiert. Eine Funktion abhängig von drei unabhängigen Variablen ist unpraktisch in der Darstellung, deshalb transformiert man auf bezogene Koordinaten.

Bezogen wird auf eine Fallhöhe und einen Laufraddurchmesser von jeweils einem Meter. Hierfür werden zwei dimensionslose Kennzahlen nach Norm CEI IEC 60193 [6] eingeführt: die Einheitsdrehzahl und der Einheitsdurchfluss für Turbinen:

$$\begin{aligned} n_{11} &= n \frac{D}{\sqrt{H}} \\ q_{11} &= Q \frac{1}{D^2 \sqrt{H}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Damit kann man nun für den Wirkungsgrad schreiben:

$$\eta_T(n, Q, H) = \eta_T(n_{11}, q_{11}) \quad (2.14)$$

Zur Bestimmung des Wirkungsgrads aus den Messungen ist diese Gleichung jedoch nicht geeignet. Ein sinnvoller Zusammenhang mit einfach messbaren Größen soll aus Gleichung (2.12) gefunden werden.

Führt man die Gleichung  $Y = gH$  für die spezifische Stutzenarbeit ein und ersetzt den Massenstrom  $\dot{m}$  durch die Kontinuitätsgleichung  $\dot{m} = \rho Q$ , sowie die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  durch die Drehzahl  $n$ :  $\omega = 2\pi n$ , so erhält man schließlich:

$$\eta_T = \frac{2\pi n M}{\rho g H Q}$$

Wie man sieht kann nun durch Messung der vier Größen: Drehzahl  $n$ , Drehmoment  $M$ , Fallhöhe  $H$  und Durchfluss  $Q$  der Wirkungsgrad der Turbine bestimmt werden.

Die Messung des Turbinenwirkungsgrads soll herangezogen werden, um die bestimmten Wirkungsgrade der Düse zu überprüfen. Hierfür muss ein Vergleichswirkungsgrad  $\eta_V$  definiert werden, der nur die Gehäuseverluste und die Laufradverluste berücksichtigt. Dann setzt sich der Turbinenwirkungsgrad aus dem Produkt von Vergleichs- und Düsenwirkungsgrad zusammen:

$$\eta_T = \eta_V \cdot \eta_D \quad (2.15)$$

Nun kann man sich folgendes überlegen: Sind die Randbedingungen bei der Messung immer die selben, d.h. gleiches Laufrad, gleiches Gehäuse und gleiche Strahllänge am Laufradeintritt, so müsste ein Unterschied im Turbinenwirkungsgrad für verschiedene Düsen, rein auf einem Unterschied im Düsenwirkungsgrad zurückzuführen sein, da ja die Parameter die  $\eta_V$  beeinflussen immer die gleichen sind. Ein aus den Messwerten bestimmtes  $\eta_V$  dürfte sich also nur innerhalb der Messunsicherheit bewegen.

# Kapitel 3

## Beschreibung der Versuchseinrichtung

Alle vorliegenden Versuche wurden am Peltonturbinenversuchsstand des Hydrodynamischen Labors am Institut für Thermodynamik und Energiewandlung der Technischen Universität Wien durchgeführt. Dieser ist für Modellversuche an Laufrädern mit einem Strahlkreisdurchmesser  $D_1$  bis zu 500 mm in ein- oder zweidüsigem Betrieb mit einer Fallhöhe von bis zu  $H = 160$  m bei einer maximalen Drehzahl von  $n = 1400 \text{ min}^{-1}$  ausgelegt.

Zum Betrieb des Versuchsstandes stehen drei beliebig miteinander kombinierbare, drehzahlgeregelte Radialpumpen, die aus einem  $30 \text{ m}^3$  Wasserreservoir fördern, zur Verfügung. Über ein Rohrsystem wird das Wasser in die Düse geleitet und nach dem Durchsatz durch die Turbine über eine Freispiegelrinne wieder dem Vorratsbecken zugeführt. Einzelheiten zum Aufbau des Prüfstands können [5] und [14] sowie den Abbildung 3.1 und 3.3 entnommen werden.

Alle Funktionen des Versuchsstandes sind mittels Computer steuerbar. Die relevanten Betriebsdaten werden über ein *Testpoint*© Programm eingelesen, verarbeitet und gespeichert. Eine genaue Beschreibung der Software erfolgt in [10].

Für eine effiziente Verarbeitung der anfallenden Messdaten ist der Versuchsstand mit einer automatischen Datenerfassung ausgestattet. Diese erfolgt ebenfalls mittels Computer nach Verarbeitung der Messdaten in einem Trägerfrequenzmessverstärker. Die Ausarbeitung und Speicherung der Daten erfolgt über ein *catman*® Programm, das am Institut zur Verfügung steht.

### 3.1 Der Aufbau für die Durchmessermessung

Für den ersten Teil der Messungen wird der Prüfstand wie in Abbildung 3.1 aufgebaut. Die folgende Beschreibung bezieht sich auf die Zahlen in der Abbildung.

Auf einer oberhalb des Prüfstands angebrachten, horizontalen Verstelleinrichtung ① wird zusätzlich eine *Sony DFW-VL500 Firewire Camera* ② montiert. Die Verstelleinrichtung ermöglicht, mehrere Fotos an verschiedenen Positionen entlang der Strahllänge zu machen, ohne die Kamera jedes mal neu montieren- und hierfür den Versuch unterbrechen zu müssen. Die Notwendigkeit der Verschiebung ergibt sich aus der geringen Auflösung der Kamera von 640 x 480 px. Um genügend Auflösung für eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen, wird der Strahl mit drei Fotos entlang der Strahlachse vermessen. Aneinandergereiht ergäben diese Bilder somit eine Auflösung von ungefähr 1800 x 480 px, wenn man die notwendige Überlappung der Einzelbilder berücksichtigt.

Zusätzlich werden zwei Referenzplatten ③, für die Initialisierung der Messposition und den Aufbau eines lokalen Koordinatensystems in der Messsoftware, verbaut. Eine genauere Beschreibung der Referenzplatten und ihrer Aufgaben erfolgt in Kapitel 4.2.2.

Am Strahlende wird der Strahl durch ein 90° Umlenkrohr ④ senkrecht nach unten in die Freispiegelrinne gelenkt. Dies ist notwendig um die Zerstörung der Abdeckung durch den Wasserstrahl zu verhindern und um das Wasser ins Vorratsbecken zurückzuführen.

Der Versuchsstand ist mit einer innengeregelten Freistrahldüse ⑤ mit elektrischer Düsenverstellung ausgestattet. Die rotatorische Bewegung des Schrittmotors ⑥ wird über ein Kegelradgetriebe ⑦ umgelenkt und durch ein Gewinde ⑧ in die lineare Düsenverstellung umgewandelt. Die Lage der Düse ist so angeordnet, dass die Strahlachse horizontal verläuft. Der Verstellweg beträgt - abhängig von der Düsenadellänge - maximal 50 mm.

Die Beleuchtung ⑨ erfolgt stromabwärts in Richtung des Düsenstrahls. Sie ist zentral auf die Strahlachse gerichtet, um den bestmöglichen Kontrast für die Kameraaufnahmen zu ermöglichen. Wichtig ist hierbei die Verwendung einer großflächigen Beleuchtung, deren Lichtquelle breiter ist als der Freistrahldüse. Dadurch wird eine optimale Ausleuchtung der Strahlkontur für die Durchmessermessung garantiert.

Die für die Untersuchung notwendigen verschiedenen Fallhöhen werden durch zwei Pumpen erzeugt. Hierbei handelt es sich um Hochdruckpumpen, die durch drehzahlregelte Gleichstrommaschinen angetrieben werden. Die Pumpen erreichen eine maximale Förderhöhe von  $H_{max} = 94$  m und einem maximalen Durchfluss von  $Q_{max} = 0.05$  m<sup>3</sup>/s. Die Regelung erfolgt je nach Notwendigkeit entweder für konstanten Druck oder konstanten Durchfluss. Für die Automatisierung der Versuche ist die Vorgabe der Sollwerte mittels Computer möglich.

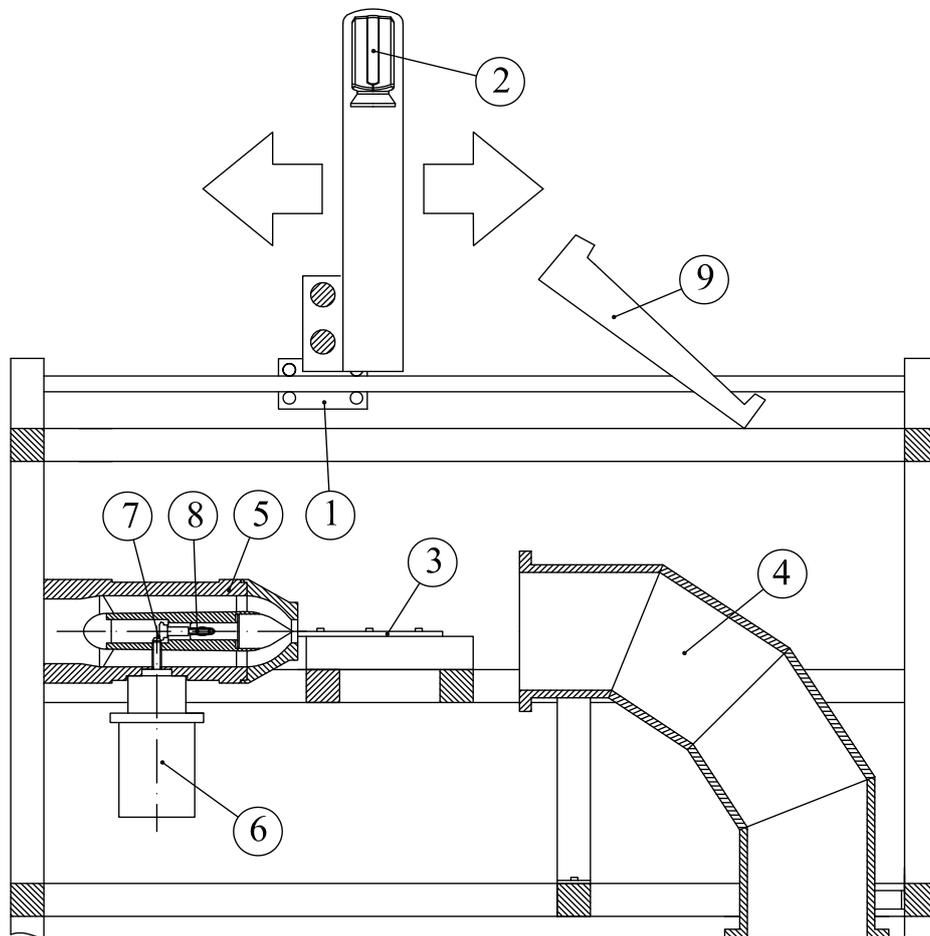


Abbildung 3.1: Schnitt durch den Prüfstandaufbau für die Strahldurchmessermessung . 1 Verstellvorrichtung , 2 Kamera , 3 Referenzplatten, 4 Umlenkrohr, 5 Freistrahldüse, 6 Schrittmotor, 7 Kegelradgetriebe, 8 Gewinde, 9 Beleuchtung

## 3.2 Aufbau zur Messung der Strahlovalität

Wie bereits im Theorieteil der Arbeit erwähnt entsteht an der Düse ein ovaler Strahl. Die Ovalität wird durch Einbaumaßnahmen in der Freistrahldüse hervorgerufen. Bei der Bestimmung des Düsenwirkungsgrads ist es wichtig diese Ovalität zu kennen um einen flächengleichen Durchmesser der Ellipse bestimmen zu können.

Zur Bestimmung der Ovalität werden vier Versuchsläufe durchgeführt. Zunächst wird die Messung mit der Kamera von oben durchgeführt und die Düse in der Ausgangsposition sowie um  $90^\circ$  verdreht eingebaut. Dadurch kann einmal der kleinere und anschließend der größere Durchmesser bestimmt werden. Anschließend wird die Kamera seitlich am Prüfstand montiert und die Referenzplatten vertikal eingebaut. Dieser Aufbau ist nötig um sicherzustellen, dass die Ovalität rein auf die Einbaumaßnahmen in der Freistrahldüse oder auf einen stromaufwärts verbauten Rohrbogen zurückzuführen ist. Abbildung 3.2 zeigt ein Foto vom Prüfstands-aufbau zur Bestimmung der Strahlovalität.

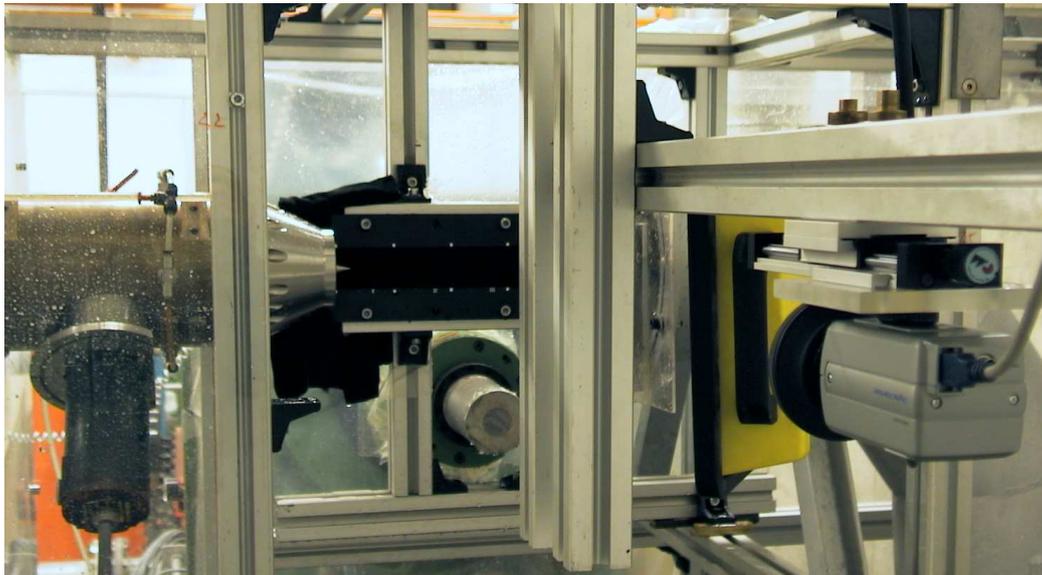


Abbildung 3.2: Versuchsaufbau zur Messung der Strahlovalität. Kamera seitlich am Prüfstand montiert und Referenzmarkierung vertikal verbaut

### 3.3 Aufbau für die Laufradmessung

Zur Messung der Leistungsaufnahme am Peltonrad wird in den Versuchsstand - anstelle des Umlenkrohrs und der Referenzmarkierungen - ein Peltonrad älterer Generation mit Geometrie laut Tabelle 2.2 verbaut. Der Aufbau wird in Abbildung 3.3 dargestellt und soll im folgenden komponentenweise erklärt werden.

*Hydrostatische Lagerung:* Die Turbinenwelle ist mit Wälzlager in einem Gleitkörper gelagert, welcher durch Versorgung mit Drucköl von unten in seiner Gleitlagerschale hydrostatisch aufschwimmt. An diesem nahezu momentenfrei drehbar gelagerten Gleitkörper ist ein Kraftaufnehmer montiert, welcher an einem genau definierten Wirkradius angreift und mit einem Gewicht über ein Zugband vorgespannt ist. Am Kraftaufnehmer wirkt also das in den Wälzlager der Turbinenwelle auftretende Reibmoment, welches zu dem von der Drehmomentmesswelle gemessenen Moment hinzugerechnet werden muss.

Der *Motor/Generator* verfügt über eine maximale Leistung von 87 kW und einen frei einstellbaren Drehzahlbereich von 0 - 1500 min<sup>-1</sup>. Im Generatorbetrieb wird die erzeugte elektrische Leistung in das Netz des Laboratorium rückgespeist, sodass für den Betrieb aus dem öffentlichen Netz nur die Leistung zur Deckung der auftretenden Kreislaufverluste bezogen werden muss. Der Motorbetrieb der Gleichstrommaschine wird durch den Einsatz eines voll gesteuerten Doppelstromrichters ermöglicht. Die für die Messung notwendige Regelung kann entweder durch Drehzahl- oder Drehmomentregelung erfolgen. Die hierfür notwendigen Sollwertvorgaben erfolgen mittels PC, wodurch eine automatische Steuerung ermöglicht wird. Die beiden Regelungsarten sind Voraussetzung für die Untersuchung jeglicher Betriebszustände beim Betrieb der Pelton turbine.

Mit diesem Aufbau ist der Betrieb der Turbine in jedem gewünschten Betriebspunkt des Kennfeldes (Teillast/Optimum/Volllast) möglich. Die zur exakten Bestimmung der hydraulischen Leistung notwendigen Größen, Drehmoment und Reibmoment der Lagerung, können über eine Drehmomentmesswelle, bzw. einen Kraftaufnehmer gemessen werden. Die genaue Beschreibung der Messkomponenten erfolgt im nächsten Abschnitt.

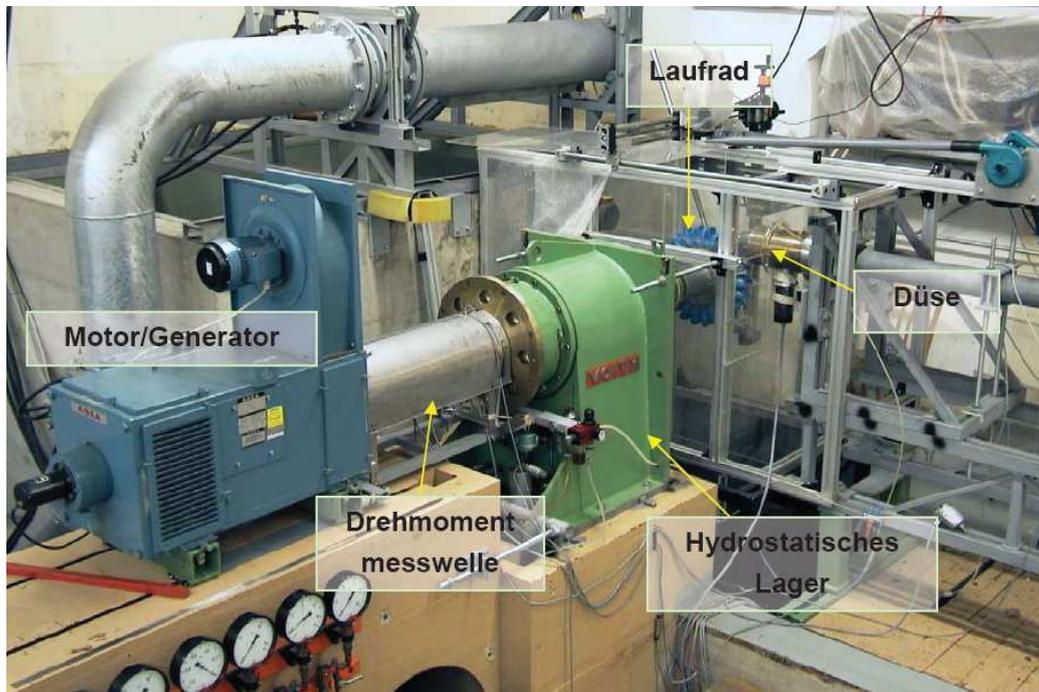


Abbildung 3.3: Versuchsaufbau zur Leistungsaufnahme am Peltonrad

# Kapitel 4

## Messung

In diesem Kapitel sollen die durchgeführten Messungen erklärt, die Messmethoden dargestellt und die verwendeten Messgeräte beschrieben werden. Genauer eingegangen wird auf die entwickelte Methode der Durchmessermessung und die zugehörige Messsoftware.

### 4.1 Bestimmung der Düsenkennlinie

Die Düsenkennlinie stellt die Änderung des Durchflusses  $Q$  über der Düsenstellung  $s$  dar. Aus ihr kann für jede Düsenstellung der Durchfluss bestimmt werden. Für die Aufnahme der Düsenkennlinie muss deshalb die Düsenstellung und der daraus resultierende Durchfluss gemessen werden. Zusätzlich hängt der Durchfluss durch die Düse bei konstanter Düsenstellung von der Fallhöhe – die proportional zum Druck in der Zuleitung ist – ab. Als dritte Messgröße wird der Druck im Einlauf benötigt. Dieser muss unmittelbar vor dem Mundstück gemessen werden um Druckverluste aufgrund der Einbauten nicht zu berücksichtigen.

#### 4.1.1 Messung der Düsenstellung

Die Verstellung der Düse erfolgt durch die elektrische Ansteuerung eines Schrittmotors über ein Steuergerät. Beim Schrittmotor handelt es sich um einen fünf-Phasen Stellmotor, der pro Impuls eine Rotation um ein halbes Grad durchführt. Diese Rotation wird über ein Kegelrad und ein Gewinde in die translatorische Bewegung der Düsennadel umgeformt (siehe Abbildung 3.1). Die Düsenstellung ist dadurch immer proportional zur Anzahl der digitalen Steuerimpulse.

Da es kein absolutes Messsystem gibt, erfolgt die Bestimmung der Düsenstellung aus der Anzahl der gesendeten Impulse an den Schrittmotor. Als Referenz muss die „Vollkommen-geschlossen-Position“ ( $s = 0$ ) am Computer eingestellt- und der Impulszähler auf Null gesetzt werden. Hierfür wird die Düse bei geringer Höhe solange geschlossen, bis kein Durchfluss mehr sichtbar ist.

### 4.1.2 Messung des Volumenstroms $Q$

Die exakte Messung des Volumenstroms ist für die Bestimmung der Düsenkennlinie, sowie für die Wirkungsgradmessung von großer Bedeutung. Am Versuchsstand wird hierfür ein magnetisch-induktiver Durchflussmesser der Firma Endress + Hauser vom Typ Proline Promag 50W verwendet.

Das Messprinzip basiert auf dem Faraday'schen Induktionsgesetz gemäß welchem in einen Leiter, der sich in einem Magnetfeld bewegt, eine Spannung induziert wird:

$$u_{ind} = BLc$$

Hierin bedeutet  $u_{ind}$  die induzierte Spannung,  $B$  die magnetische Induktion,  $L$  den Elektrodenabstand und  $c$  die Durchflussgeschwindigkeit.

Bei der Durchflussmessung entspricht die strömende Flüssigkeit dem bewegten Leiter. Die durch das Magnetfeld fließende elektrisch leitende Flüssigkeit induziert senkrecht zum Magnetfeld und senkrecht zur Durchflussrichtung eine Spannung, die der mittleren Durchflussgeschwindigkeit proportional ist. Der Messumformer bildet aus der mittleren Durchflussgeschwindigkeit und dem Rohrquerschnitt an der Messstelle den Messwert für den Volumenstrom.

Der Stromausgang von 0 - 20 mA wird als Signal für die Steuerung verwendet. Die Messgenauigkeit beträgt  $\pm 0.2\%$  v.E. (vom Endwert), bei einem Messbereich von 0 - 50 l/s.

Einzelheiten zum genauen Aufbau und der Funktionsweise des Messwertempfängers und des Messumformers können [1] entnommen werden.

### 4.1.3 Druckmessung

Für die Druckmessung wird oberwasserseitig am Ende des Einlaufs eine Druckmessstelle eingebaut. Um geringe Druckunterschiede entlang des Umfangs zu kompensieren, befinden sich vier Messbohrungen entlang des Rohrumfangs. Das Wasser fließt durch die Messbohrung in eine Ringleitung, die

sich um das Rohr spannt, und schließlich in einen Absolutdruckaufnehmer der Firma HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) mündet. Beim Aufnehmer handelt es sich um einen Dehnmessstreifen-Aufnehmer (DMS-Aufnehmer) vom Typ P 3MA/10 mit einem Nenndruck von 10 bar und einer Genauigkeitsklasse von 0.25.

Im Absolutdruckaufnehmer bewirkt der Druck eine Verformung und eine entsprechende Änderung des ohmschen Widerstands der DMS. Dies resultiert in der Verstimmung der Wheatstone'schen Brückenschaltung in der vier solcher DMS geschaltet werden. Die Änderung der Stromstärke in der Messbrücke ist direkt proportional zum gemessenen Absolutdruck am Ende des Einlaufs. Das Messsignal wird mithilfe eines Trägerfrequenzmessverstärkers in ein Spannungssignal von 0 - 10 V als Ausgangssignal umgewandelt.

## 4.2 Vermessung des Wasserstrahls

Wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, ist der Wirkungsgrad vom gemessenen Durchfluss, der Höhe, sowie vom kleinsten Strahldurchmesser  $d_1$  abhängig. Die Messung von  $Q$  und  $H$  erfolgt wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Um durch Schwankungen keine Messfehler zu erzeugen, wird ihre Größe aus der Mittelung über 30 s Messdauer bestimmt. Dies entspricht der Zeit, die notwendig ist um den Strahl über die gesamte Strahllänge zu vermessen.

Für die Durchmessermessung muss ein automatisiertes, optisches Messsystem entwickelt werden. Der folgende Abschnitt erklärt die Aufstellung und Positionierung der Kamera, das optische Messprinzip sowie die hierfür entwickelte Software.

### 4.2.1 Aufstellung und Positionierung der Kamera

Wie bereits im Kapitel über den Aufbau erklärt, besteht die Notwendigkeit die Kamera während der Messung des Strahldurchmessers entlang der Strahlachse zu verschieben. Die Kamera wird deshalb auf einer Verstellereinrichtung mit elektrischer Handsteuerung senkrecht oberhalb des Freistrahls montiert.

Um den Messfehler aufgrund der Kameraposition gering zu halten, muss die Kamera so weit wie möglich von der Strahlachse entfernt positioniert werden. Hierfür wird der optische zwölfmalige Zoom der Kamera auf das Maximum

eingestellt.

Voraussetzung für die Durchmessermessung ist eine Projektionsmethode, bei der parallele Linien nicht verzerrt dargestellt werden. Die sinnvollste anzuwendende Methode ist die Zentralprojektion. Hier werden alle Objekte die parallel zur Kameraebene platziert sind, maßstäblich verkleinert abgebildet und alle Abmessungen bleiben im Verhältnis gleich. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit Kamera und Strahlebene parallel auszurichten. Dies gilt auch für die Ebene in der die Referenzmarkierungen angebracht werden.

Bei der Zentralprojektion ist der Linsenradius kleiner als der Strahldurchmesser. Um abzuschätzen welcher Fehler dadurch in radialer Richtung resultiert, kann man sich anhand von Abbildung 4.1 geometrisch überlegen welcher Umrisspunkt  $U'$  an Stelle des in der Strahlebene liegenden Punkt  $U$  abgebildet wird.  $U'$  wird über die Tangente am größten Strahlumriss durch die Linsenaußenkante am Linsenradius  $r_L$  erzeugt.

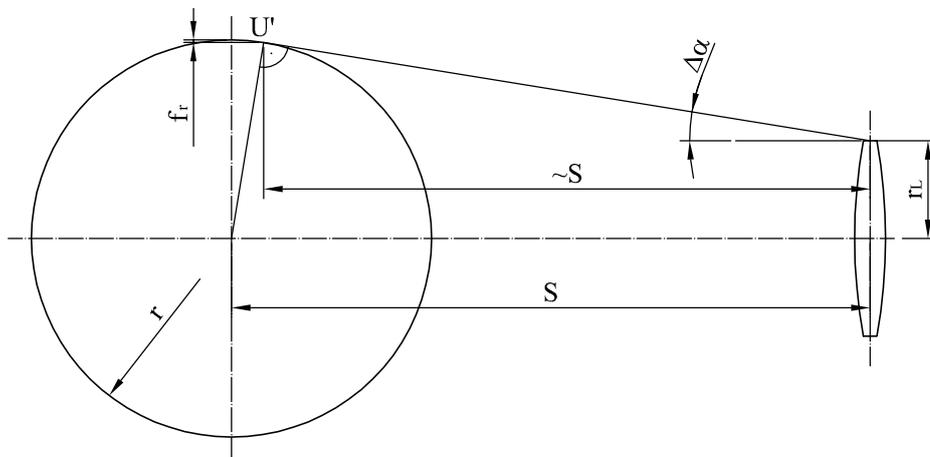


Abbildung 4.1: Fehler in radialer Richtung aufgrund der Kamerapositionierung

Unter Berücksichtigung kleiner Winkel gilt:

$$\tan \Delta\alpha = \frac{|r - r_L|}{S} \simeq \Delta\alpha$$

Damit ergibt sich für den Fehler in radialer Richtung:

$$f_r = r (1 - \cos \Delta\alpha)$$

Wie man sieht ist der Fehler in radialer Richtung indirekt proportional zum Abstand zwischen Kamera und Strahlebene. Die obige Aussage, dass die Kamera so weit wie möglich von der Strahlachse entfernt platziert werden soll wird dadurch bestätigt. Die Kamera wird im Versuch, bei maximalem Zoom, so lang von der Strahlachse entfernt, dass am oberen Rand der Abbildung die Referenzmarkierungen noch vollständig zu erkennen sind. Der resultierende Abstand beträgt 980 mm.

Tabelle 4.1: Tabelle I stellt die resultierenden Einbaudaten der Kamera dar, Tabelle II zeigt den resultierenden absoluten- und relativen Fehler in radialer Richtung

I		II			
Bezeichnung	Größe	$r$	$\Delta\alpha$	$f_r$	$f_r/r$
Linsenradius ( $r_L$ )	18.5 mm	10 mm	$0.497^\circ$	$0.376 \mu m$	0.0038 %
Abstand ( $S$ )	980 mm	15 mm	$0.205^\circ$	$0.096 \mu m$	0.0006 %
Zoom	12x	20 mm	$0.088^\circ$	$0.023 \mu m$	0.0001 %

Auch wenn laut Gleichung (2.10) ein relativer Fehler in der Durchmesser-messung einen vierfachen relativen Fehler des Wirkungsgrads hervorruft, so ist dieser zB. im Fall von  $r = 10$  mm, also beim halbem Düsenaustrittsradius, mit  $\Delta\eta_D/\eta_D = 0.015\%$  gering und kann vernachlässigt werden.

#### 4.2.2 Die Referenzmarkierung

Für die optische Durchmesser-messung mithilfe der Kamera, werden parallel zur Strahlachse im Abstand von jeweils 25 mm Referenzplatten montiert. Diese sind nötig um die aktuelle Position der Kamera entlang der Strahlachse festzustellen und um die Umrechnung der vermessenen Längen von den Pixeln des Fotos auf mm zu ermöglichen. Zusätzlich ermöglichen Messmarkierungen den Aufbau eines lokalen Koordinatensystems, für die Festlegung der Messpositionen entlang der Strahllänge, durch die Messsoftware.

Versuche mit Oberflächen unterschiedlicher Materialien haben gezeigt, dass sich geschwärztes Plexiglas mit weißen Referenzpunkten für die vorliegende Anwendung am besten eignen. In Abbildung 4.2 sind die Referenzplatten dargestellt. Zwischen je zwei weißen Punkten werden die Markierungen I, II und III angebracht die der Positionsbestimmung der Kamera dienen. Zur leichten Demontage beim Ein- und Ausbau der Düsenmundstücke, werden die Platten auf Aluminiumprofilen verschraubt. Um den Abstand der Platten festzulegen

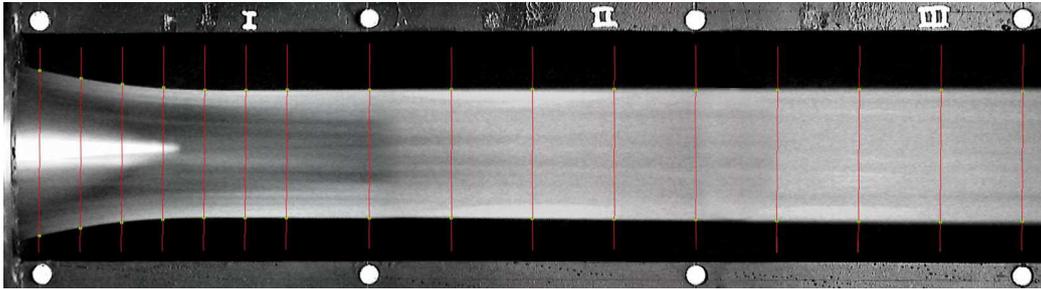


Abbildung 4.2: geschwärzte Plexiglasplatten, nötig als Referenz für die optische Vermessung des Wasserstrahls

werden auf Querprofilen Anschlagwinkel befestigt. Die Positionierung entlang der Strahlachse erfolgt durch das Mundstück. Die Mundstückaustrittskante wird als Anschlag verwendet und legt die Position  $z = 0$  fest.

### 4.2.3 Die Messsoftware

Für die automatische Vermessung des Wasserstrahls wird eine spezielle Messsoftware mit der visuellen Programmiersprache LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) von National Instruments entworfen.

Die Programmierung erfolgt über Funktionsblöcke, auch Virtuelle Instrumente (VIs) genannt. Dabei kann ein VI ein gesamtes Messprogramm enthalten und geschachtelte Unterprogramme (Sub-VI) verknüpfen aber auch Sub-VI eines anderen Programms sein. Die Programmierung erfolgt durch verbinden einzelner VIs mit Verbindungslinien die den Datenfluss festlegen und jeweils unterschiedliche Arten von Signalen übertragen können.

Dabei kann jedes VI Ein- und Ausgänge besitzen. Das VI verarbeitet die Signale vom Eingang und stellt die Ergebnisse, nach erfolgter Verarbeitung im gesamten Unterprogramm, am Ausgang bereit. Auf diese Weise ist die Abarbeitungsreihenfolge eindeutig definiert.

In der tiefsten Ebene, basieren alle VIs auf einer Reihe grundlegender Funktionen, sog. Primitives die sich nicht weiter öffnen lassen. Datenquellen und Datensinken können mit Anzeige- und Bedienelementen auf der Bedienoberfläche (dem Frontpanel) verknüpft sein. So kann z. B. die Initialisierung der Kameraposition über einen Druckknopf vom Bediener gestartet werden.

Auf die Speziell erstellten VIs und SubVIs soll hier nicht näher eingegangen werden. In Anhang D erfolgt eine übersichtliche Darstellung von Auszügen aus den Blockdiagrammen. Die Beschreibung der Messsoftware beschränkt sich auf die Bedienung sowie die wichtigsten Funktionsprinzipien. Die Bedienoberfläche ist in Abbildung 4.3 dargestellt und wird anhand der Abfolge im Bedienungsablauf im folgenden erklärt.

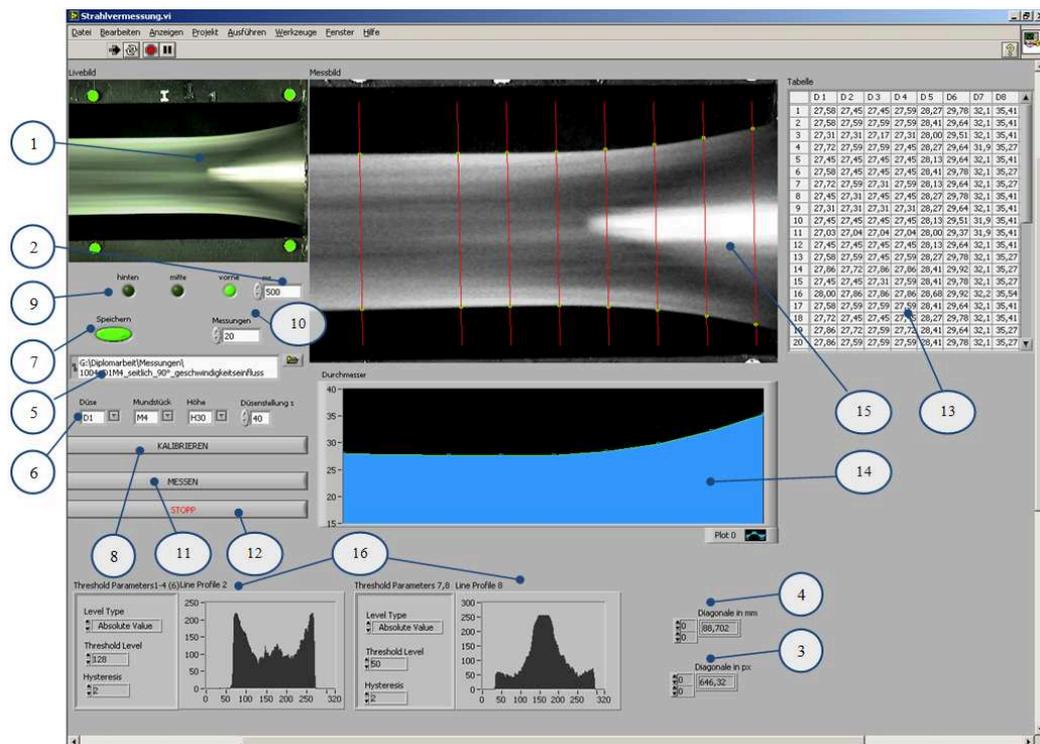


Abbildung 4.3: Bedienoberfläche der Software für die optische Vermessung des Wasserstrahls

Nach dem Starten des Programms wird die Verbindung zur Kamera über die IEEE 1394 Schnittstelle aufgebaut und das *Livebild* (1) dargestellt. Dieses ermöglicht eine einfachere Positionierung der Kamera über dem zu vermessenden Strahlabschnitt. Es besteht die Möglichkeit die Bildwiederholungsfrequenz des Livebilds über die numerische Vorgabe in *ms* (2) zu verändern. Die Standardeinstellung liegt bei 500 ms.

Für die Kalibrierung des Messbildes, als Voraussetzung für die Vermessung in "Real World Coordinates", also in der gewählten Längeneinheit, muss programmintern ein Maßstab für die Umrechnung vorgegeben werden. Als Refe-

renz wird der diagonale Abstand der linken oberen und der rechten unteren Messmarkierung der Kameraposition I (am Mundstück) händisch vermessen. Zusätzlich erfolgt die Vermessung des gleichen Abstands mithilfe der Software, die in (3) die Diagonale in Pixeln anzeigt. Daraus berechnet sich der Umrechnungsfaktor. Das Ergebnis der Umrechnung wird schließlich in (4) dargestellt und dient der Überprüfung.

Die Speicherung der Daten erfolgt in Tabstopp-getrennten Textfiles (.txt). Der Speicherort wird in (5) vorgegeben. Der Dateiname setzt sich aus der zu vermessenden Düsenadel, dem Kürzel für das Mundstück, der gewählten Fallhöhe und der Düsenstellung zusammen, die jeweils mithilfe der Pulldown Menüs (6) gewählt werden können. Soll die Vermessung nicht gespeichert werden, zB. für Testzwecke oder Probemessungen, so kann die Speicherung mithilfe des Kippschalters (7) unterdrückt werden.

Die Erkennung der Messposition und der Referenzmarkierung wird durch betätigen des *Kalibrieren* - Tasters (8) gestartet. Hierfür sucht das Programm im oberen Bildmittel des Livebilds nach der Beschriftungsmarkierung und vergleicht sie mit gespeicherten Templates. Ist diese Suche erfolgreich ist die Kameraposition festgelegt und wird anhand der LEDs (*hinten, mitten, vorne*) (9) zur Bestätigung für den Benutzer angezeigt. Anschließend erfolgt die Erkennung der Referenzpunkte in den Ecken des Livebilds. Sind diese erkannt worden, werden sie grün angezeigt, ihre Position am Bild intern gespeichert und ein lokales Koordinatensystem für die Vermessung aufgebaut.

Um aufeinander folgende Wiederholungen der Durchmessermessung zu ermöglichen, kann über das Bedienfeld *Messungen* (10) die Wiederholungsanzahl ausgewählt werden. Nach dem Starten der Messung mit dem Taster *Messen* (11) arbeitet das Programm die Messschleife so lange ab bis die Anzahl der vorgegebenen Messungen erfolgt ist oder die Messung mit dem *Stopp* Taster (12) unterbrochen wird. Die Ergebnisse der Messungen werden in der *Tabelle*(13) sowie als digitalisierte Version der Strahlkontur in Anzeige (14) dargestellt.

Das Messbild (15) stellt monochrom das aktuell ausgewerteten Bild dar. Die roten Linien zeigen die aktuellen Messstellen und die grünen Punkte die erkannten Strahlkanten. Die Justierung der Kantenerkennung ermöglichen die Threshold Parameter (16). Die Diagramme zeigen den Helligkeitsverläufe entlang der vorgegebenen Messmarkierungen. Mit dem Threshold Level wird der Helligkeitswert, entsprechend dem Diagramm, vorgegeben, da dieser für die Kantenerkennung notwendig ist.

## 4.3 Messung der Leistungsaufnahme am Lauf- rad

Zur Messung des Einflusses der verschiedenen Düsen/Mundstück Kombinationen auf die Leistungsaufnahme bzw. den Wirkungsgrad der Pelton turbine wird der Prüfstandsaufbau laut Abschnitt 3.3 verwendet. Neben den bereits erklärten Messung des Durchflusses (s. Kap. 4.1.2) und der Messung des Drucks (s. Kap. 4.1.3 ) ist weiters die Messung des Drehmoments und der Drehzahl der Welle, sowie die Messung des in den Lagern aufgenommenen Moments notwendig. Die für diese Messungen verwendeten Aufnehmer werden im folgenden beschrieben.

### 4.3.1 Messung von Drehmoment und Drehzahl

Zur Messung des Drehmoments wird eine Drehmomentmesswelle auf der Basis von DMS, für statische und dynamische Momente, verwendet. Die Messung der Drehzahl erfolgt mit integriertem Drehzahlaufnehmer.

Die Messwelle ist als Hohlwelle ausgebildet, auf welcher die DMS appliziert sind. Innen befindet sich die Elektronik für die Brückenspannung und Messsignalübertragung. Die Hülse des Messkörpers trägt einen Zahnkranz mit 30 Zähnen für die Drehzahlmessung. Die Speisespannung für den Messkörper wird induktiv übertragen, die Messwerte vom Messkörper auf das Gehäuse, kapazitiv. Die dafür erforderlichen Übertragungselemente befinden sich ebenfalls auf dem Zahnkranz. Die Erfassung von Drehzahl und Drehrichtung findet mittels zweier induktiver Messköpfe statt.

*Drehmoment-Messsystem:* Die applizierten DMS werden in einer Wheatstone'schen Messbrücke geschaltet und sind so angeordnet, dass nur Verformungen durch das Drehmoment die Brückenspannung ändern. Verschiedene Raumtemperaturen werden mittels Widerstandstemperaturkompensation ausgeglichen.

Für die Brückenspeisespannung wird eine 13 kHz Spannung induziert, die in einem Frequenz-Spannungsumsetzer in eine Gleichspannung umgeformt wird. Die Brückenausgangsspannung ist dem übertragenen Drehmoment proportional und wird einem Spannungsfrequenzumformer zugeführt. Dieser erzeugt Impulse, deren Wiederholungsfrequenz der Brückenausgleichsspannung proportional sind. Die Impulse werden kapazitiv zum Gehäuse übertragen und dort im Vorverstärker zu einer Rechteckspannung umgeformt. Das Ausgangssignal liegt je nach Drehmoment zwischen 5 und 15 kHz.

Dieses Ausgangssignal wird mit einer speziellen Umsetzereinheit in eine Span-

nung zwischen  $-10$  und  $+10$  V umgewandelt. Die Umsetzereinheit erreicht dabei eine Genauigkeit von  $\pm 0.1\%$  v.E.

*Drehzahl-Messsystem:* Bei jeder Umdrehung der Welle werden durch das Zahnrad 30 Spannungsimpulse in zwei Messköpfe induziert. Diese sind so angeordnet, das eine Phasenverschiebung der zwei Signale von einem viertel der Periodendauer vorliegt. Die Drehrichtung kann somit durch Identifikation des vorausgehenden Messsignals bestimmt werden. In einem Vorverstärker erfolgt die Umformung der beiden Impulsreihen in Rechteckspannungen.

Ein dritter Signalausgang liefert pro Wellenumdrehung 60 Spannungsimpulse, wodurch die Drehzahl mithilfe eines Frequenzzählers unmittelbar in Umdrehungen pro Minute umgerechnet werden können.

Auch hier wird das Ausgangssignal mit einer speziellen Umsetzereinheit abhängig von der Drehrichtung in eine Ausgangsspannung zwischen  $-10$  V und  $+10$  V umgewandelt. Die Umsetzereinheit erreicht dabei eine Genauigkeit von  $\pm 0.1\%$  v.E.

Die Drehmomentmesswelle kann für Drehmomente von maximal  $1000$  Nm bei einer Höchstdrehzahl von  $3000 \text{ min}^{-1}$  eingesetzt werden. Die Abweichungen des gemessenen Drehmoments liegen innerhalb von  $\pm 3\%$  v.E.

### 4.3.2 Messung des Reibmoments

Der Wirkungsgrad der Turbine wird nach Gleichung (2.12) aus den sich ergebenden Messwerten berechnet. Das vom Peltonrad abgegebene Drehmoment  $M$  setzt sich dabei aus dem Drehmoment an der Welle:  $M_W$  (Messung siehe 4.3.1) und dem Reibmoment der Lager  $M_R$  zusammen:  $M = M_W + M_R$ . Für eine exakte Wirkungsgradbestimmung ist die genaue Messung des Reibmoments deshalb sehr wichtig.

Das Reibmoment bewirkt eine Verdrehung des Gleitkörpers im hydrostatischen Lager (siehe Kap: 3.3). Durch dieses Verdrehung ist es möglich das auftretende Reibmoment mithilfe eines Kraftaufnehmers am Rohrträger zu messen. Die Messung der Kraft erfolgt mithilfe einer Wägezelle der Typenreihe Z 6H2 der Firma HBM, mit einer Nennlast von  $20$  kg und einer Genauigkeitsklasse von  $0.05$ . Das übertragene Moment wird über den bekannten Hebelarm bestimmt.

Als Messelement in der Wägezelle dient eine Plattenfeder, die als Doppelbiegebalken eingebaut wird. Je zwei DMS werden auf der Ober- und der Unterseite appliziert. Eine aufgeprägte Kraft resultiert in der Durchbiegung der Feder und damit in einer Stauchung (auf der Oberseite) bzw. Streckung

(auf der Unterseite) der DMS und dementsprechend eine Veränderung ihres Widerstands. Durch die Schaltung der vier DMS in einer Wheatstone'schen Messbrücke bewirkt die Verformung eine Veränderung der Brückenausgangsspannung  $U_A$ . Das Aufnehmergeingangssignal  $U_A/U_B$  in mV/V ändert sich linear mit der aufgetragenen Last.

## 4.4 Messwerterfassung und Messfehler

Um die Auflistung der Messinstrumente zu vervollständigen wird noch kurz auf die Trägerfrequenzmessverstärker eingegangen sowie die verwendeten Messkomponenten tabellarisch dargestellt.

### 4.4.1 Trägerfrequenzmessverstärker

Je ein Trägerfrequenzmessverstärker versorgt die Messwertnehmer für Reibkraft und Druck mit der Brückenspannung und formt das Ausgangssignal der Aufnehmer in ein Gleichspannungssignal um, das dem Messwert proportional ist. Der Trägerfrequenzmessverstärker erlaubt außerdem den Abgleich des Messwertnehmer nach Betrag und Phase, sowie die Kalibrierung mit einem elektrischen Kalibriersignal.

Funktionsweise: Bei Verstimmung des Messwertnehmers, liefert die Brückenschaltung eine Trägerfrequenzspannung, die dem Messwert proportional ist. Über den Vorverstärker gelangt das Signal zum Eingangverstärker und wird im Demodulator phasenrichtig gleichgerichtet. Im Endverstärker wird das durch einen Tiefpassfilter von der Trägerrestspannung befreite Messsignal auf einen Nennausgang von  $\pm 10$  V bzw.  $\pm 20$  mA angehoben.

Der Messbereich liegt zwischen  $\pm 0.05$  mV/V und  $\pm 50$  mV/V bei einer Genauigkeitsklasse von 0.1.

### 4.4.2 Messfehler der einzelnen Komponenten

Einen Überblick über die verwendeten Messwertnehmer, ihre Hersteller, den Messbereich und der Genauigkeit gibt die folgende Tabelle wieder. Der Messfehler wird in Prozent vom Endwert (% v.E.) angegeben, was laut [8] der Genauigkeitsklasse entspricht.

Tabelle 4.2: Tabellarischer Überblick über die verwendeten Messwertaufnehmer und die Messfehler. Der Messfehler wird in % vom Endwert (v.E) angegeben

Messwert	Hersteller	Prinzip	Bereich	Fehler in % v.E.
Druck ( $p$ )	HBM *	DMS	0 - 10 bar	0.25
Reibkraft ( $F_r$ )	HBM *	DMS	0 - 20 kg	0.05
Drehmoment ( $M$ )	HBM *	DMS	0 - 1000 Nm	0.2
Drehzahl ( $n$ )	HBM *	Induktiv	0 - 3000 min <sup>-1</sup>	0.2
Volumenstrom ( $Q$ )	E+H **	Induktiv	0 - 50 l/s	0.2

\*Hottinger Baldwin Messtechnik

\*\*Endress und Hauser

# Kapitel 5

## Auswertung

### 5.1 Düsenkennlinien

Für die Regelung von Pelton-turbinen ist es wichtig den Durchfluss zu kennen, der sich bei einer eingestellten Düsenstellung ergibt, bzw. die Düsenstellung zu kennen, die für einen vorgegebenen Durchfluss eingestellt werden muss. Hierfür verwendet man die Düsenkennlinie die den Durchfluss in Abhängigkeit von der Düsenstellung darstellt.

Die Messung der Kennlinien aller Nadel- Mundstück Kombinationen wurde bei vier verschiedenen Fallhöhen von 50 m, 60 m, 70 m und 80 m durchgeführt. Als Ergebnis erhält man vier, von der jeweiligen Höhe abhängige, Kennlinien (siehe Abbildung 5.1) links.

Bei der Betrachtung der ungeformten Beziehung (2.6):  $Q = \varphi_1 A_1 \sqrt{2gH}$ . wird deutlich, dass  $Q \sim \sqrt{H}$  gilt. Demzufolge hat ein Anstieg der Höhe, einen Anstieg des Durchflusses zur Folge (unter Voraussetzung gleich bleibender Düsenstellung). Dies zeigen auch die Ergebnisse.

Um die Anwendbarkeit der Kennlinien zu vereinfachen sollen diese höhen-unabhängig zusammengefasst werden. Hierfür trägt man auf der Ordinate an Stelle des Durchflusses, den Düseneinheitsdurchfluss  $Q_1$  auf (siehe Abbildung 5.1 rechts). Wie bei der Einführung vom Düseneinheitsdurchfluss in Abschnitt (2.1.4) beschrieben, gilt für  $Q_1$  folgender Zusammenhang:

$$Q_1 = \frac{Q}{\sqrt{H}} \Big|_{s=const.} = const.$$

Als Resultat erhält man also eine Kennlinie die von  $H$  unabhängig ist und

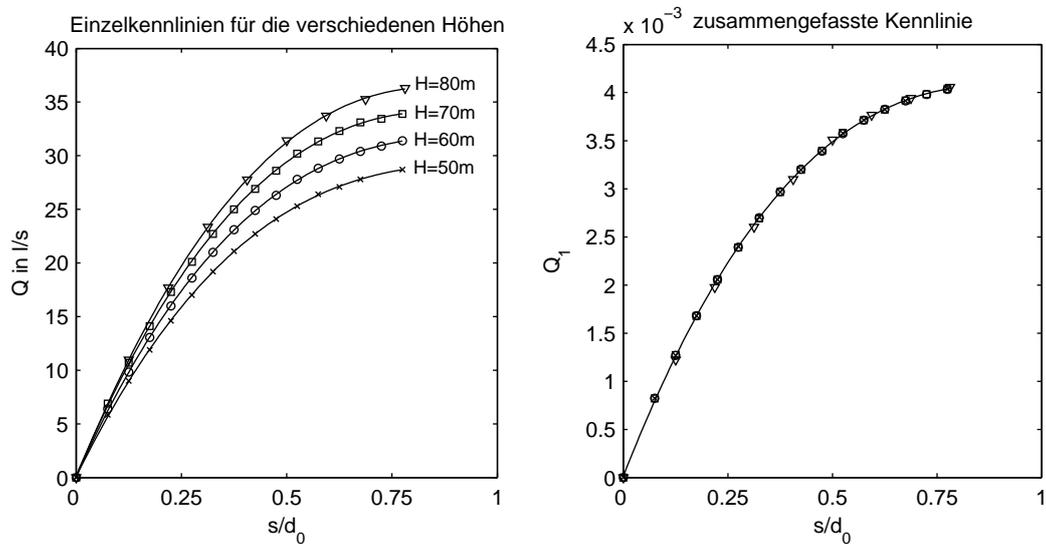


Abbildung 5.1: Exemplarische Überlagerung der Düsenkennlinien durch bezogene Darstellung mittels Düseneinheitsdurchfluss

in der die Einzelkennlinien zusammengefasst werden können.

Abbildung 5.2 stellt die Düsenkennlinien für alle gemessenen Kombinationen, sortiert nach Mundstücken, dar. Wie man den Kennlinien entnehmen kann, reicht der Verstellweg der Kombinationen N1M1, N1M2, N1M3, N5M1, N5M2, N5M3 und N5M4 nicht aus, um eine vollständige Kennlinie aufzunehmen. Dies liegt an der Länge der Düsennadeln, für die der Prüfstand einen zu kleinen maximalen Verstellweg hat.

Der Kennlinienverlauf ist für kleine Düsenstellungen annähernd linear. Der Durchfluss steigt also annähernd proportional zum Verstellweg der Düsennadel. Bei weiterer Verstellung ist ein Rückgang der Durchflusszunahme zu beobachten. Verschiebt man die Nadel schließlich so weit, dass die Düsen spitze an der Stelle der Austrittskante steht, ist die Düse maximal geöffnet. Durch zusätzliches Verstellen der Düsennadel kann kein weiterer Anstieg des Durchflusses erreicht werden.

Der Einfluss des Nadelwinkels wird durch den Vergleich bei jeweils gleichem Mundstück deutlich. Je flacher der Nadelwinkel umso schneller die Durchflusszunahme. Das wird auch deutlich wenn man sich überlegt, dass der durchgeflossene Querschnitt schneller mit der Düsenstellung wächst, je flacher die Düsennadel ist. Dies drückt auch die Gleichung (2.5) aus dem Kapitel

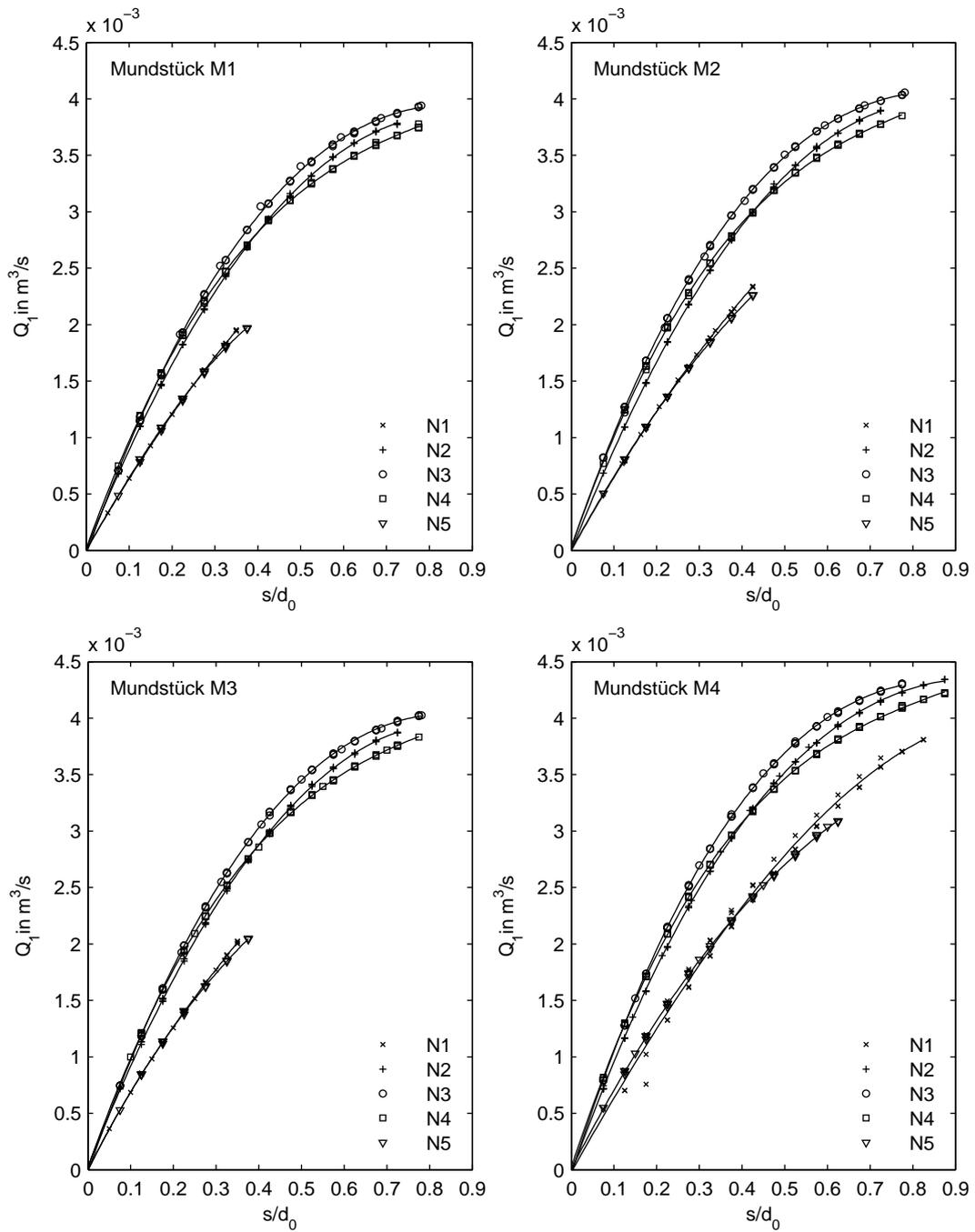


Abbildung 5.2: Düsenkennlinie: Düseneinheitendurchfluss  $Q_1$  über der bezogenen Düsenstellung  $s/d_0$  nach Mundstücken sortiert

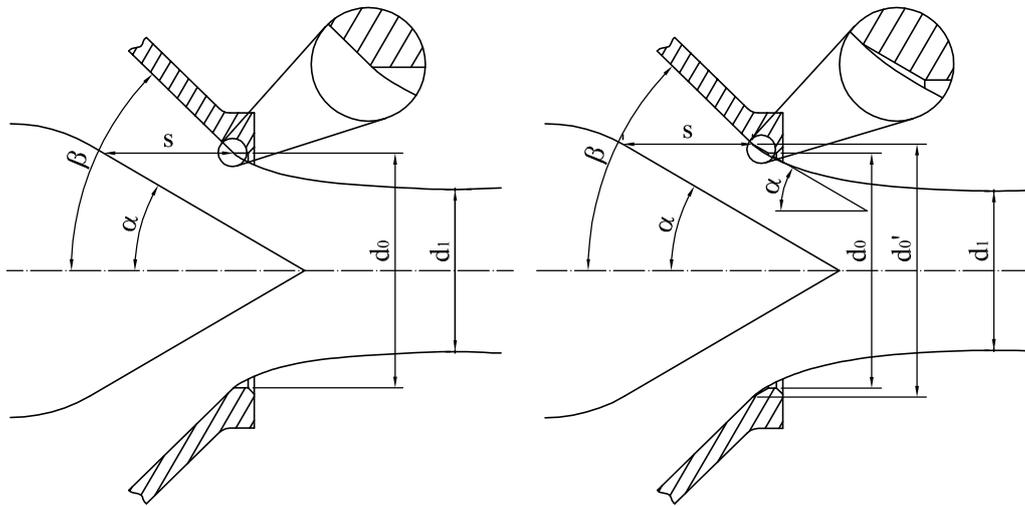


Abbildung 5.4: links: Düse mit scharfkantigem Sitz (M1), rechts Flächensitz durch Phase an der Austrittskante (M3)

2.1.3 zur Betrachtung der durchflossenen Düsenquerschnittfläche eindeutig aus.

Anhand der Kennlinien für die Kombinationen N3M1 und N3M3 soll der Einfluss des Flächensitzes diskutiert werden. Wie man Tabelle 2.1 entnehmen kann sind die beiden Mundstücke geometrisch gleich. Mundstück M3 besitzt zusätzlich einen Flächensitz, der durch Abschrägen der Austrittskante entsteht. Anhand der Kennlinie in Abbildung 5.3 kann man erkennen, dass die Kombination N3M3 bei gleicher Düsenstellung stets einen höheren Düseneinheitsdurchfluss hat.

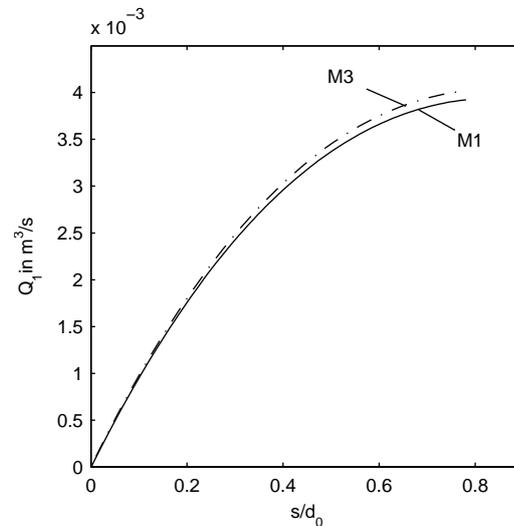


Abbildung 5.3: Einfluss des Flächensitzes bei M3 auf  $Q_1$

Bei Betrachtung der Vergrößerungsausschnitte in Abbildung 5.4 wird die Ursache klar. Bei der Ausführung mit scharfkantigem Sitz erfolgt die Ablösung des Freistrahls vom Mundstück im Austrittsquerschnitt. Die Austrittsfläche errechnet sich über den Düsenaustrittsdurchmesser  $d_0$ . Bei der Ausführung

mit Flächensitz erfolgt die Ablösung bereits früher, falls der Austrittswinkel des Strahls größer als der Winkel des Flächensitzes ist. Der Austrittsquerschnitt errechnet sich mit dem Durchmesser  $d'_0 > d_0$ . Der Austrittsquerschnitt ist also größer als bei der scharfkantigen Ausführung. Dadurch steigt der Durchfluss und entsprechend auch  $Q_1$  an.

Eine andere oder zusätzlich mögliche Ursache für die Steigerung des Durchflusses ist die Vergrößerung der Durchflusszahl  $\varphi$  durch die Phase. Dittmann, Kullenkopf und Witting [11] sowie Hay und Spencer [13] untersuchen in ihren Arbeiten den Einfluss von Mündungen die mit Phasen oder Radien versehen sind. Beide zeigen eindeutig, dass mit steigendem Rundungsradius der Durchflussbeiwert einer Mündung zunimmt. Durch Umformung der Gleichung (2.6) erhält man:

$$\varphi_1 = \frac{4}{\sqrt{2 \cdot g\pi}} \cdot \frac{Q_1}{d_1^2}$$

Steigt also  $\varphi$  aufgrund der Phase, die wegen Ihrer kleinen Größe von 0.5 mm Kantenlänge als Rundung interpretiert werden kann, so steigt der Durchfluss  $Q$  und deshalb auch der Düseneinheitsdurchfluss  $Q_1$ .

## 5.2 Das Strahlprofil

Im folgenden Abschnitt wird das Strahlprofil in Hinsicht auf die Ovalität, den Düsenaustrittswinkel, die Lage des kleinsten Durchmessers und die Strahldivergenz untersucht. Die resultierenden mathematischen Zusammenhänge werden angewendet, um die Strahlkonturen im Anhang E zu erzeugen.

### 5.2.1 Ovalität

Für die Untersuchung der Ovalität des Strahlquerschnitts wurden anhand der Kombination N1M4 Messungen laut Abschnitt 3.2 durchgeführt. Um Aussagen über die Ursache machen zu können, müssen die Strahlkonturen aus vier Messungen verglichen werden. Die Kamera wird hierfür senkrecht oberhalb der Strahlängsachse und anschließend seitlich montiert. Für jede Kameraposition wird die Düse in der Position  $0^\circ$  und  $90^\circ$ , von der vertikalen Achse des Freistrahls aus gesehen, eingebaut.

In Abbildung 5.5 ist die Überlagerung der vier Einzelmessungen für  $s=21$  mm abgebildet. Es ist zu erkennen, dass sich die Strahlkonturen der jeweiligen Kameraposition, im bezogenen Strahlradius ( $r/r_0$ ) unterscheiden. Der gemessene Durchmesserwert ist also der kleinere Halbmesser des elliptischen

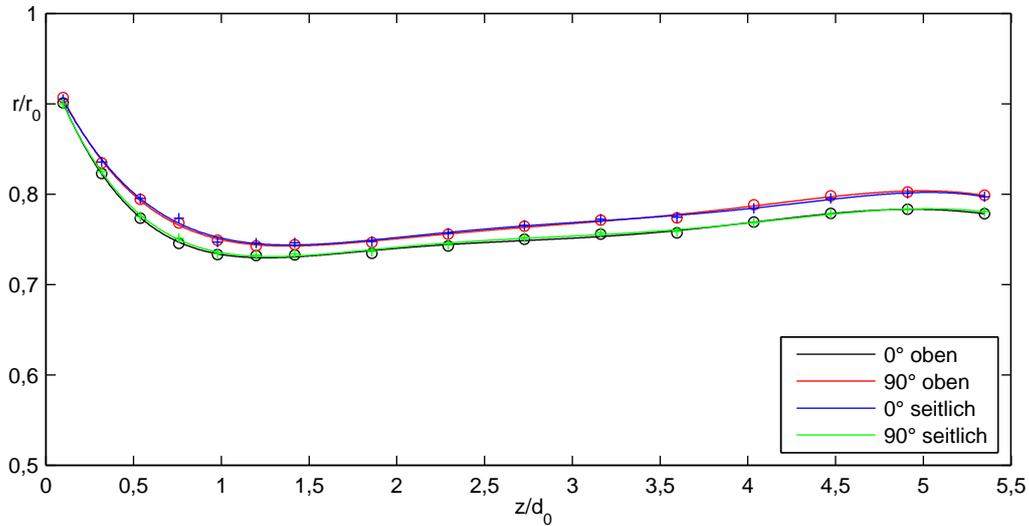


Abbildung 5.5: Überlagerung der Strahlkonturen aus der Ovalitätsmessung an N1M4 bei  $s=21$  mm,  $H=60$  m

Strahlquerschnitts. Die Überlagerung der Kurven für  $90^\circ$  oben und  $0^\circ$  seitlich, sowie  $0^\circ$  oben und  $90^\circ$  seitlich verstärken diese Aussage zusätzlich.

Für die Korrektur der Messergebnisse wurde eine Ovalitätsmatrix zusammengestellt. Diese enthält für alle Messpositionen entlang der Strahlachse einen Ovalitätsfaktor  $d/d_{gemessne} = d/d_{kl}$  in Abhängigkeit von  $Q1$ , der sich aus Gleichung (2.11):  $d = \sqrt{d_{gr}d_{kl}}$  ergibt. Die Ovalitätsmatrix ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Aufgrund des großen Zeitaufwands wurden die Messungen der Ovalität nur an dieser Kombination (N1M4) durchgeführt und alle weiteren gemessenen Kombinationen in gleichem Maße korrigiert.

### 5.2.2 Strahlkontraktion und $\beta_{Str}$

Für den Teilabschnitt des Freistrahls zwischen dem Mundstückaustritt und der Position der maximalen Strahlkontraktion ist eine konvergente Strömung zu beobachten. Um diese zu charakterisieren soll die Strahlkontur mathematisch beschrieben werden.

Laut Benitez [3] ist es möglich das Strahlprofil zwischen dem Düsenaustrittsquerschnitt  $A_0$  und dem minimalen Strahlquerschnitt  $A_1$  durch eine Parabel

Tabelle 5.1: Ovalitätsmatrix:  $d/d_{kl}$  Werte zur Korrektur der Durchmesser-  
messung in Abhängigkeit von  $Q_1$  und  $z/d_0$

<b>z</b> (in mm)	<b><math>Q_1 \times 10^{-3} (inm^3/s)</math></b>								
	1,454	1,739	2,008	2,261	2,499	2,928	3.122	3.301	3.613
3.94	1.0157	1.0168	1.0125	1.0110	1.0102	1.0114	1.0068	1.0105	1.0111
12.737	1.0157	1.0169	1.0128	1.0115	1.0107	1.0119	1.0076	1.0108	1.0115
21.534	1.0157	1.0170	1.0131	1.0121	1.0113	1.0124	1.0084	1.0111	1.0120
30.331	1.0157	1.0170	1.0134	1.0127	1.0118	1.0129	1.0093	1.0114	1.0124
39.128	1.0157	1.0171	1.0160	1.0162	1.0175	1.0132	1.0139	1.0121	1.0152
47.924	1.0224	1.0201	1.0131	1.0151	1.0144	1.0135	1.0108	1.0131	1.0104
56.721	1.0147	1.0202	1.0138	1.0146	1.0128	1.0133	1.0112	1.0111	1.0126
74.315	1.0099	1.0197	1.0155	1.0124	1.0112	1.0149	1.0124	1.0133	1.0136
91.698	1.0163	1.0143	1.0150	1.0160	1.0132	1.0167	1.0125	1.0127	1.0170
109.08	1.0159	1.0157	1.0165	1.0171	1.0161	1.0182	1.0142	1.0128	1.0171
126.46	1.0150	1.0134	1.0150	1.0155	1.0153	1.0197	1.0173	1.0147	1.0193
143.845	1.0153	1.0126	1.0144	1.0147	1.0150	1.0205	1.0201	1.0171	1.0185
161.36	1.0136	1.0158	1.0176	1.0256	1.0199	1.0209	1.0248	1.0161	1.0199
178.88	1.0170	1.0235	1.0191	1.0267	1.0223	1.0220	1.0246	1.0173	1.0192
196.4	1.0133	1.0225	1.0201	1.0244	1.0258	1.0222	1.0257	1.0165	1.0202
213.92	1.0199	1.0189	1.0198	1.0220	1.0224	1.0213	1.0250	1.0174	1.0215

zu approximieren. Er gibt die kubische Parabel

$$\frac{d}{d_0} = \frac{d_1}{d_0} + \left(1 - \frac{d_1}{d_0}\right) \left(1 - \frac{l}{l_1}\right)^3 \quad (5.1)$$

als brauchbare Näherung an. Aus der Parabel ergibt sich für den Strahlradius:

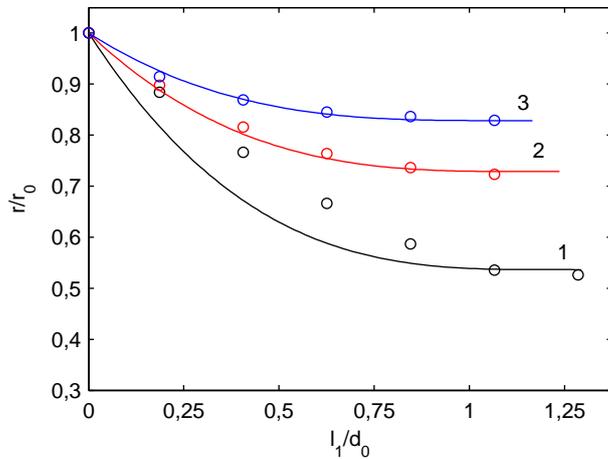
$$\frac{r}{d_0} = \frac{r_1}{d_0} + \left(0.5 - \frac{r_1}{d_0}\right) \left(1 - \frac{l}{l_1}\right)^3$$

Daraus lässt sich der Strahlaustrittswinkel wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \frac{r}{d_0}}{\partial l} &= 3 \left(0.5 - \frac{r_1}{d_0}\right) \left(1 - \frac{l}{l_1}\right)^2 \left(-\frac{1}{l_1}\right) \\ \frac{\partial r}{\partial l} &= -3 \frac{d_0}{l_1} \left(0.5 - \frac{r_1}{d_0}\right) \left(1 - \frac{l}{l_1}\right)^2 \end{aligned}$$

Für  $l = 0$  wird  $|\partial r / \partial l| = \tan \beta_{Str}$ :

$$\tan \beta_{Str} = \frac{3 d_0}{2 l_1} \left(1 - \frac{d_1}{d_0}\right) \quad (5.2)$$



Nr.	$s/d_0$	$Q_1$	$R^2$
1	0.250	0.0015 m <sup>3</sup> /s	0.895
2	0.525	0.0028 m <sup>3</sup> /s	0.993
3	0.775	0.0036 m <sup>3</sup> /s	0.992

Abbildung 5.6: Überlagerung der kubischen Parabel mit den Messwerten der Kombination N1M4. In der Tabelle sind die Düsenstellung, daraus resultierender Düseneinheitsdurchfluss sowie das Bestimmtheitsmaß angegeben.

Vom negativen Vorzeichen wird bei der Bestimmung von  $\tan \beta_{Str}$  abgesehen. Dieses hat nur die Bedeutung, dass die Parabel zwischen  $d_0$  und  $d_1$  fallen muss (Strahlkontraktion).

Um abzuschätzen, wie gut diese Parabel die Messwerte wiedergibt, werden die Messwerte aus der Durchmesserermessung mit der Ausgleichskurve nach Gleichung (5.1) überlagert. Abbildung 5.6 zeigt hierfür stellvertretend die Überlagerung für N1M4 für kleine (1), mittlere (2) und große (3) Düsenstellungen. Weitere Überlagerungen sind im Anhang E abgebildet.

Die kubische Parabel gibt die Messwerte nicht für den gesamten Bereich der Düsenstellungen ausreichend gut wieder wie beim Betrachten der Kennlinie 1 in Abbildung 5.6 deutlich zu erkennen ist. Um einen Bereich angeben zu können für den die kubische Parabel angewendet werden kann soll das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  herangezogen werden:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - f_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.3)$$

$R^2$  beschreibt statistisch wie gut eine Ausgleichsfunktion die bestimmten Messpunkte wiedergibt.  $R^2 = 0$  bedeutet überhaupt keine Übereinstimmung, da die Messwerte zu einer anderen Gesamtheit gehören als die Funktion. Je näher der Wert bei 1 liegt, umso besser ist die Ausgleichsfunktion geeignet. Die Grenzen für die Anwendbarkeit der kubischen Parabel sind in Tabelle

Tabelle 5.2: Zusammenstellung über den Anwendungsbereich von Gleichung (5.1) zum Ausgleich der Messpunkte zwischen Strahlaustritt und  $d_1$

	$Q_{1min}$	$Q_{1max}$		$Q_{1min}$	$Q_{1max}$
N1M4	0.0016	-	N3M3	-	-
N2M1	-	0.0036	N3M4	-	-
N2M2	-	0.0036	N4M1	-	0.0037
N2M3	-	0.0038	N4M2	-	-
N2M4	-	0.0039	N4M3	-	-
N3M1	-	-	N4M4		0.0042
N3M2	-	-	N5M4	0.0013	-

5.2 für den gewählten Mindestwert von  $R^2 \geq 0.9$  zusammengefasst. Ist in der Tabelle kein Wert angegeben, so gibt es für diese Kombination kein  $Q_{1min}$  oder  $Q_{1max}$  für die das Bestimmtheitsmaß zu klein wird.

Laut Tabelle 5.2 kann man also ein Intervall für  $Q_1$  angeben. Für  $0.0016 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \leq Q_1 \leq 0.0036 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  gibt die kubische Parabel nach Gleichung (5.1) die ermittelten Messwerte aller Kombinationen mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 \geq 0.9$  wieder und ist damit ausreichend genau. Diese Grenzen sollen auch für die Interpretation des Strahlaustrittswinkels verwendet werden.

Mit den vorhandenen Messwerten von  $d_1$  und  $l_1$  wurde der Strahlaustrittswinkel  $\beta_{Str}$  nach Gleichung (5.2) berechnet und die Ergebnisse in Abbildung 5.7 dargestellt. Zusätzlich sind die Kennlinien sortiert nach Mundstücken und anschließend nach Düsenadeln in Anhang A dargestellt.

Für die Bestimmung von  $l_1$  ist wichtig, dass zum gemessenen  $z_1$  noch der Abstand zwischen Düsenaustritt und dem kantenförmigen Übergang der Mundstückkontur, an dem ja die Ablösung stattfindet, hinzugerechnet wird:  $l_1 = z_1 + 3.5 \text{ mm}$ . Um die Auswertung von der Höhe unabhängig darstellen zu können, wird wiederum  $Q_1$  anstelle der Düsenstellung für die Darstellung gewählt.

Es ergeben sich  $\beta_{Str}$  Werte die gegen große Düsenöffnungen hin abnehmen. Die Abnahme ist für kleine Düsenstellungen höher als für große. Die kleinsten Werte zeigen die Düsenadeln mit Zwiebelform. Die kegeligen Ausführungen haben größere Austrittswinkel. Eine Gruppierung nach Düsenadeln ist ersichtlich, jedoch nicht signifikant.

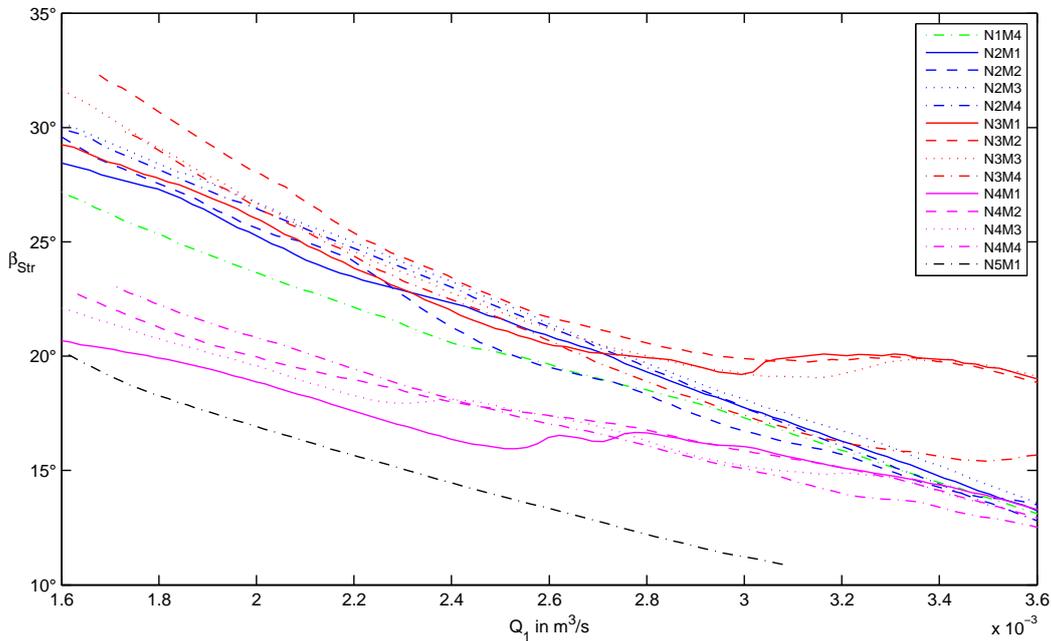


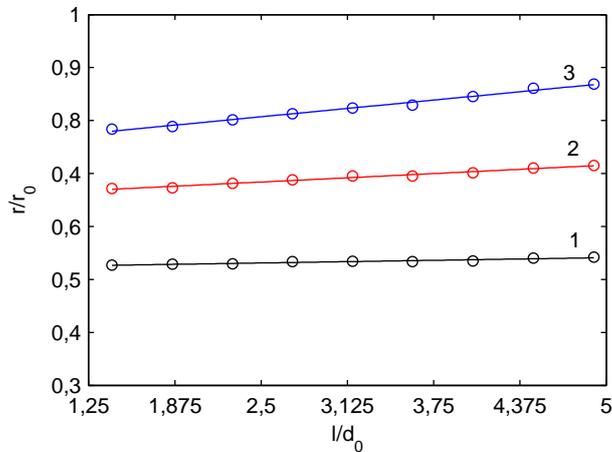
Abbildung 5.7: Strahlaustrittswinkel  $\beta_{Str}$  in Abhängigkeit vom Düseninheitsdurchfluss  $Q_1$  für alle gemessenen Kombinationen

Da sich die Kennlinien kreuzen ist kein eindeutiger Einfluss weder von Nadel- noch von Mundstückswinkel zu erkennen, da weder die Gruppierung nach Nadelwinkeln noch nach Mundstückswinkeln eindeutig ist. Die Aussage von Benitez in [3], dass für große Düsenöffnungen der Strahlaustrittswinkel in wesentlicher Weise durch den Nadelwinkel bestimmt wird, kann damit nicht eindeutig bestätigt werden.

### 5.2.3 Strahldivergenz und $\alpha_{Div}$

Für den Freistrahл stromabwärts von der Position mit maximaler Strahlkontraktion ist ein divergentes Strahlprofil zu beobachten. Um auch diese charakterisieren zu können, soll wiederum die Strahlkontur mathematisch beschrieben werden.

In unmittelbarer Umgebung vom Ort der maximalen Kontraktion ist die Strahlkontur gekrümmt. Trägt man die Messwerte weiter stromabwärts über der Strahllänge auf, so erkennt man einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen Strahldurchmesser und Strahllänge. Abbildung 5.8 zeigt dies exemplarisch am Beispiel der Kombination N2M1 für kleine (1), mittlere (2) und große (3) Düsenstellungen.



Nr.	$s/d_0$	$Q_1$	$R^2$
1	0.175	0.0015 m <sup>3</sup> /s	0.924
2	0.325	0.0024 m <sup>3</sup> /s	0.982
3	0.525	0.0033 m <sup>3</sup> /s	0.990

Abbildung 5.8: Überlagerung der linearen Ausgleichsgerade mit den Messwerten der Kombination N2M1. In der Tabelle sind die Düsenstellung, daraus resultierender Düseneinheitsdurchfluss, sowie das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden angegeben.

Zur Charakterisierung der Strahldivergenz soll hier der Strahldivergenzwinkel  $\alpha_{Div}$  eingeführt werden. Sein Tangens entspricht der Steigung der linearen Ausgleichsgeraden:

$$\tan \alpha_{Div} = \frac{dr}{dz} \quad (5.4)$$

Auch hier soll das Bestimmtheitsmaß zur Abschätzung der Güte der linearen Approximation der Strahlkontur herangezogen werden. Es resultiert für alle Messungen ein Wert von  $R^2 \geq 0.9$ , die Approximation ist daher ausreichend genau.

Um die Abhängigkeit des Divergenzwinkels von  $Q_1$  zu untersuchen wurde  $\alpha_{Div}$  für alle vorhandenen Messwerten berechnet. Auch hier wird  $Q_1$  verwendet um eine höhenunabhängige Darstellung zu ermöglichen.

Als Interpolationskurven erweisen sich quadratische Funktionen durch den Ursprung als am besten geeignet. Das Bestimmtheitsmaß für die von Ausreißern bereinigten Ergebnisse der einzelnen Kombinationen ist in Tabelle 5.3 dargestellt. Die Kombinationen N1M4, N2M4 und N5M4 sind mit  $R^2 < 0.9$

Tabelle 5.3: Interpolationsgüte von  $\alpha_{Str}$  in Abhängigkeit von  $Q_1$

	$R^2$		$R^2$
N1M4	0.86	N3M3	0.99
N2M1	0.97	N3M4	0.95
N2M2	0.92	N4M1	0.97
N2M3	0.97	N4M2	0.93
N2M4	0.74	N4M3	0.98
N3M1	0.97	N4M4	0.94
N3M2	0.91	N5M4	0.16

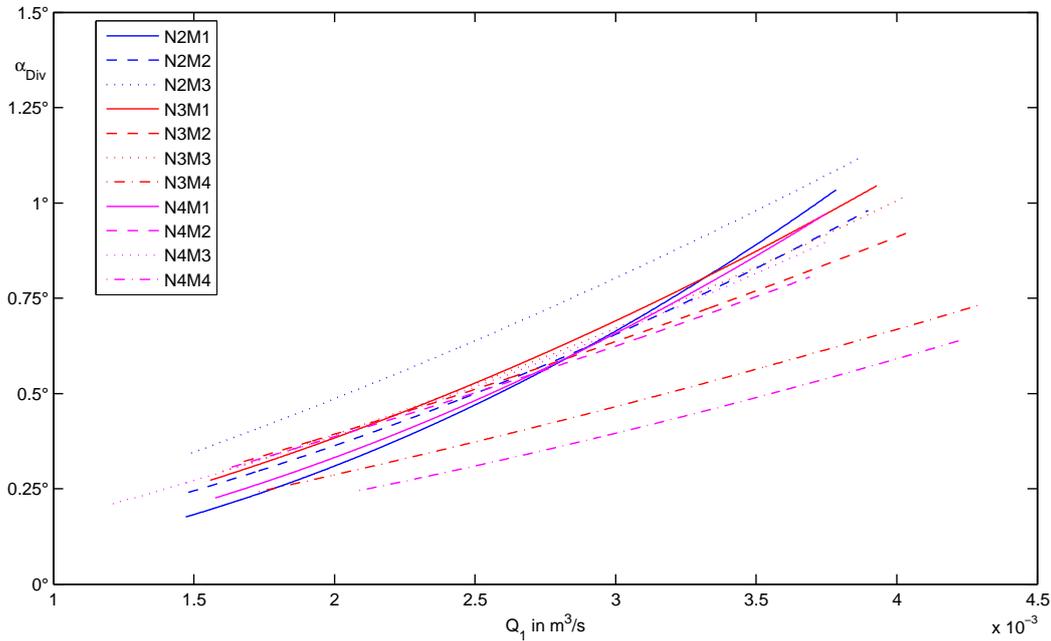


Abbildung 5.9: Strahldivergenzwinkel  $\alpha_{Div}$  in Abhängigkeit vom Düseninheitsdurchfluss  $Q_1$

nicht für die Auswertung geeignet und werden für die Auswertung des Strahldivergenzwinkels nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.9 sowie zusätzlich in Anhang B sortiert nach Mundstücken und Düsenadeln dargestellt.

Es ergeben sich  $\alpha_{Div}$  Werte, die gegen große Öffnungen hin zunehmen. Die kleinsten Werte zeigt die Düsenadel N4 mit Zwiebelform. Daraus kann man folgern, dass die lange Führung des Strahls durch die Nadelkontur mit Wendepunkt zu kleineren Strahldivergenzen führt. Die größte Strahldivergenz hat die Kombination N2M3 ( $\alpha = 27.5^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$  und Flächensitz). Da sich die Kennlinien kreuzen ist keine eindeutige Aussage über die Einflussfaktoren möglich.

Wie die Auswertung zeigt sind Strahlerweiterungen im Bereich von ca.  $0.2^\circ$  bis ca.  $1.2^\circ$  gemessen worden. Eine derartige Strahlerweiterung kann in dieser Größenordnung nicht vorliegen. Zhang [17] betrachtet bereits Strahlerweiterungen von  $0.5^\circ$  als zu groß und macht folgende mathematische Überlegung:

Wird angenommen, dass die Strahlerweiterung durch  $\alpha_{Div}$  beschrieben wird, so ergibt sich aus dem konstanten Durchfluss  $Q = A \cdot c$  die Änderung der

mittleren Geschwindigkeit längs des Wasserstrahls mit:

$$\frac{dc}{dz} = -\frac{c}{A} \frac{dA}{dz} \quad (5.5)$$

Der Strahlquerschnitt wird mit  $A = \pi \cdot r^2$  berechnet. Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung von Gleichung (5.4):

$$\frac{dA}{dz} = 2\pi \cdot r \frac{dr}{dz} = 2\pi \cdot r \tan \alpha_{Div} \quad (5.6)$$

Die spezifische kinetische Energie des Wasserstrahls ist gegeben durch  $e = c^2/2$ . Ihre Änderung längs des Wasserstrahls berechnet sich aus:

$$\frac{de}{e dz} = 2 \frac{dc}{c dz} \quad (5.7)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (5.5) und (5.6) in Gleichung (5.7) und mit  $d_0 = 2r_0$  als Austrittsdurchmesser erhält man schließlich die Änderung der kinetischen Energie längs des Wasserstrahls in folgender Form:

$$\frac{\Delta e}{e} = -8 \tan \alpha_{Div} \cdot \frac{z}{d_0} \quad (5.8)$$

Für eine typische Lauflänge des Wasserstrahls von  $z/d_0 = 4$  und den kleinsten gemessenen Strahlerweiterungswinkel von ca  $0.2^\circ$  errechnet sich somit der Energieverlust nach Gleichung (5.8) zu 11 %. Geht man, wie Zhang es angibt, von einem abgeschätzten Energieverlust auf dieser Strecke von 1 % aus, so errechnet sich nach Gleichung (5.8) eine Strahlerweiterung von lediglich  $0.02^\circ$ .

Aus dieser Überlegung kann man schließen, dass die durch Messung beobachtete Strahlerweiterung nur auf die Strahloberfläche beschränkt und daher im Hinblick auf den Energieverlust von geringer Bedeutung ist. Vielmehr kommt diese gemessene Strahlerweiterung durch turbulenten Impulsaustausch mit der Umgebungsluft zustande.

#### 5.2.4 Die größte Strahlkontraktion: $z_1$ und $d_1$

In den vorherigen Abschnitten wurde der Freistrah stromabwärts und stromaufwärts vom Ort der maximalen Strahlkontraktion untersucht. Nun soll aus den Messwerten der Durchmesser messung ein Zusammenhang zwischen den Düsenparametern und der Lage, sowie Größe der maximalen Strahlkontraktion gefunden werden.

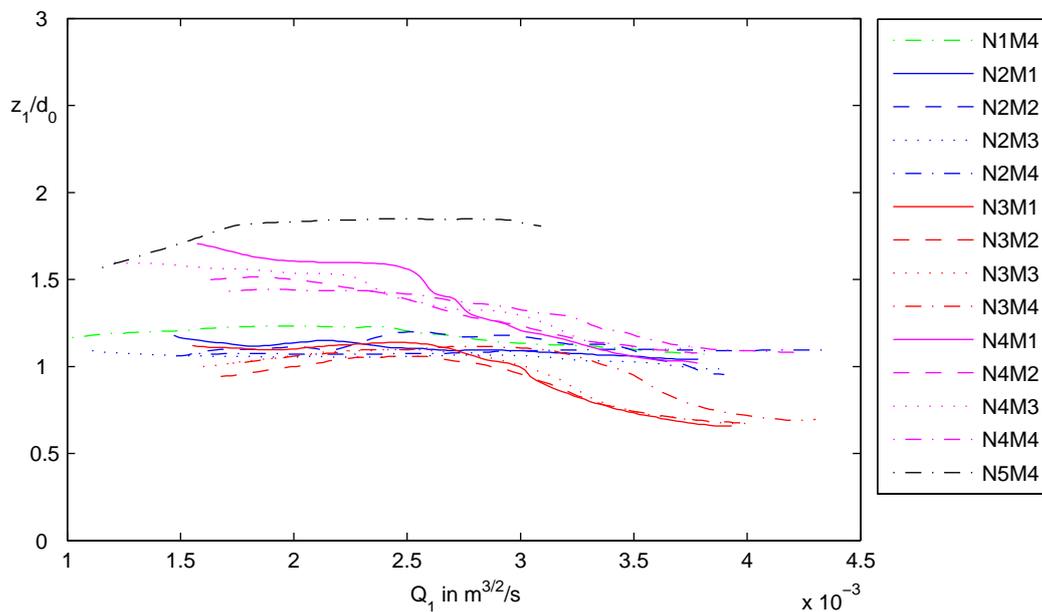


Abbildung 5.10: Lage der maximalen Strahlkontraktion  $z_1$  in Abhängigkeit von  $Q_1$

Auch hier wird für die höhenunabhängige Auswertung die Darstellung in Abhängigkeit von  $Q_1$  gewählt.

Die Lage der maximalen Strahlkontraktion ist in Abbildung 5.10, sowie zusätzlich in Anhang C sortiert nach Mundstücken und Düsennadeln, dargestellt. Die Kennlinien zeigen für große  $Q_1$  (also auch für große Düsenstellung) einen Trend zu kleineren  $z_1/d_1$ . Der Ort der größten Strahlkontraktion wandert also bei Öffnung der Düse näher an das Düsenmundstück heran. Ausnahme ist die Zwiebeldüse N5 bei der sich  $z_1$  zunächst vergrößert und schließlich konstant bleibt. Ursache hierfür ist möglicherweise die lange Strahlführung durch die Düsennadel.

Die Darstellung zeigt weiter eine grobe Gruppierung nach Düsennadeln. Für die zwiebelförmige Düsennadeln (N4, N5) zeigt sich bei gleichem Mundstück M4, dass die größere Länge von N5 in einem größeren  $z_1$  Wert resultiert. Die Gruppierung der kegelförmigen Nadeln (N1-N3) ist zwar ersichtlich, die Aussage: je kleiner der Spitzenwinkel ( $\alpha$ ) umso größer  $z_1$ , kann jedoch nicht über den gesamten Messbereich gemacht werden.

Im folgenden soll noch ein Zusammenhang über die Größe des kleinsten Strahldurchmessers getroffen werden.

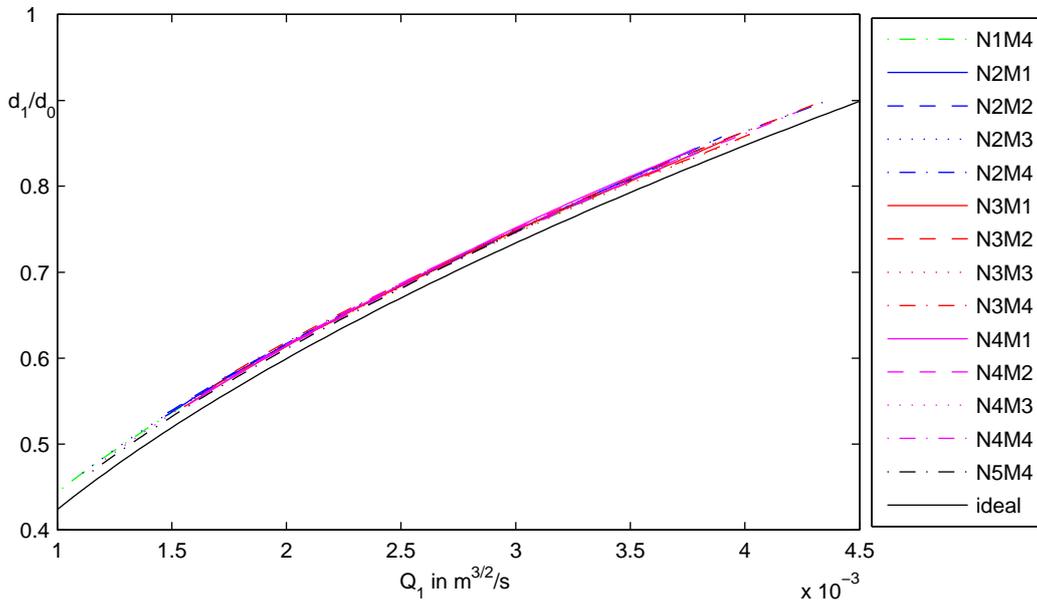


Abbildung 5.11: kleinster Strahldurchmesser  $d_1$  in Abhängigkeit von  $Q_1$

Abbildung 5.11 zeigt  $d_1$  in Abhängigkeit von  $Q_1$ . Die Kurven zeigen für größere  $Q_1$  Werte eine Steigerung des Durchmessers, was zu erwarten war. Die Durchmesserzunahme verringert sich für größer werdende Düseneinheitsdurchflusswerte, jedoch gering, sodass der Durchmesser annähernd linear mit dem Düseneinheitsdurchfluss zunimmt. Der Unterschied im  $d_1/d_0$  Wert der verschiedenen Kombinationen für konstante  $Q_1$  Werte ist gering und sollte in einem geringen Unterschied der Düsenwirkungsgrade resultieren, die ja nach Gleichung 2.8 nur von  $Q_1$  und  $d_1$  abhängen.

Die Abbildung zeigt zusätzlich den theoretisch idealen Verlauf im verlustfreien Fall. Er ergibt sich aus Gleichung (2.8) für  $\eta = 1$  zu:

$$d_1 = 0.536\sqrt{Q_1}$$

Wie zu erwarten war, liegen alle gemessenen Werte eindeutig oberhalb dieser idealen Grenzlinie. Je näher eine Kennlinie am Ideal liegt umso größer ist ihr Wirkungsgrad.

## 5.3 Düsen- und Strahlwirkungsgrad

### 5.3.1 Auswertungsansatz mittels Funktionsgebirge

Als Grundlage dieses Auswertungsansatzes dient das im Jahr 1999 am ehemaligen Institut für Wasserkraftmaschinen und Pumpen der TU Wien entwickelte Programm *Auto MUSCHEL 4.13a* zur Auswertung von Turbinenmessdaten und Darstellung in Muscheldiagrammen.

Das Verfahren ermittelt eine geglättete Fläche im Raum, für Messwerte die mit einem zufälligen Fehler behaftet sind. Das Quadrat der Abweichung von der Fläche zu den Messwerten wird dabei in Summe minimiert und entspricht somit der statistischen Streuung, die als Messunsicherheit bekannt ist. Es werden nur Messwerte verwendet die maximal den zweifachen Abstand der Standardabweichung von der Interpolationsfläche haben. Somit liegen 95.21 % der Messwerte innerhalb der Messunsicherheit.

Die vom Programm angewandte Methode basiert auf der Verwendung von Linearkombinationen aus Greenschen Funktionen der Differentialgleichung minimaler Krümmung. Einzelheiten sollen nicht näher beschrieben werden und können [7] entnommen werden.

Für die hier vorliegenden Daten wurde das Programm an verschiedenen Teilen adaptiert und verändert. Dadurch kann der Strahlwirkungsgrad als Funktionsgebirge in Abhängigkeit vom Düseneinheitsdurchfluss  $Q_1$  und auf den Düsenaustrittsdurchmesser bezogener Strahllänge  $z/d_0$  dargestellt werden. Abbildung 5.12 zeigt exemplarische Messwerte mit überlagertem Funktionsgebirge.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 erwähnt kann der Düsenwirkungsgrad als Spezialfall des Strahlwirkungsgrads interpretiert werden. Somit ergibt das Maximum des Strahlwirkungsgradverlaufs den Düsenwirkungsgrad. Dessen Verlauf über  $Q_1$  wird durch eine Schnittkurve, ausgehend vom Maximum, mit minimaler Steigung in  $Q_1$  Richtung bestimmt. In Abbildung 5.13 ist die Vorgehensweise durch die grüne Linie dargestellt.

Analog wird der Verlauf des Strahlwirkungsgrads über die bezogenen Strahllänge mittels Schnittkurven bei konstantem  $Q_1$  gebildet (Blaue Linie in 5.13).

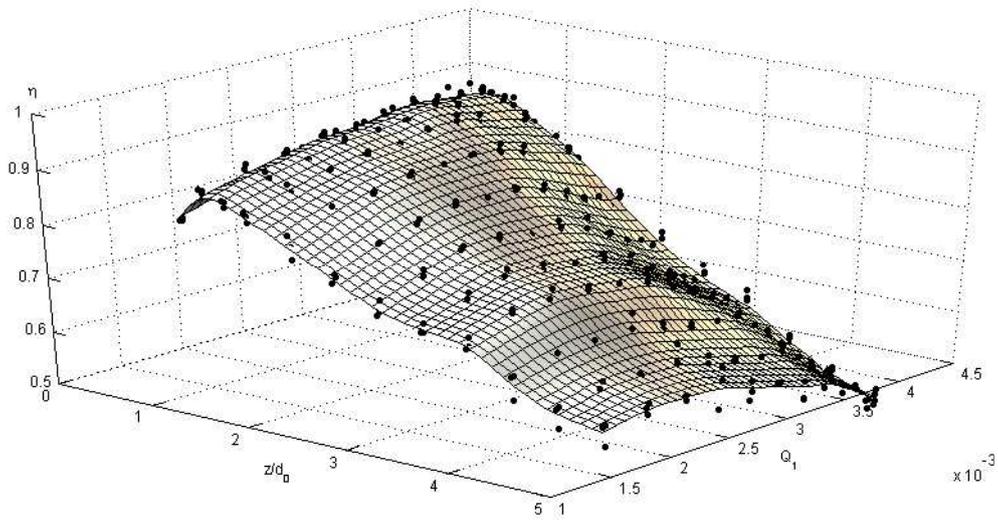


Abbildung 5.12: Funktionsgebirge des Düsenwirkungsgrads über  $Q_1$  und  $z/d_0$

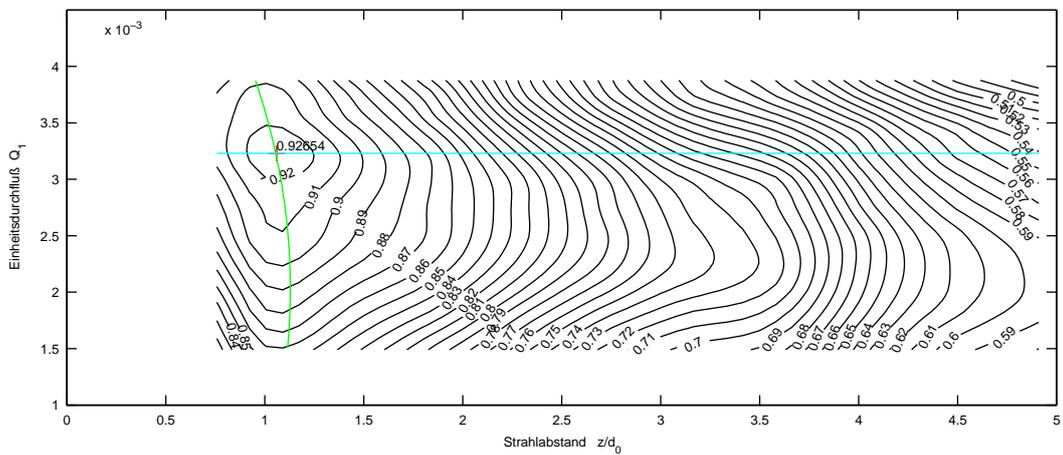


Abbildung 5.13: Iso-Wirkungsgradlinien und Schnittkurven zur Bestimmung von  $\eta_D$  (grün) und  $\eta_{Str}$  (blau)

### 5.3.2 $\eta_D$ in Abhängigkeit von $Q_1$

Wie bereits in Kapitel 5.1 erwähnt, reicht der Verstellweg der Düsennadel nicht für alle Kombinationen aus, um aussagekräftige Ergebnisse zu liefern. Diese sollen hier nicht weiter für die Auswertung berücksichtigt werden.

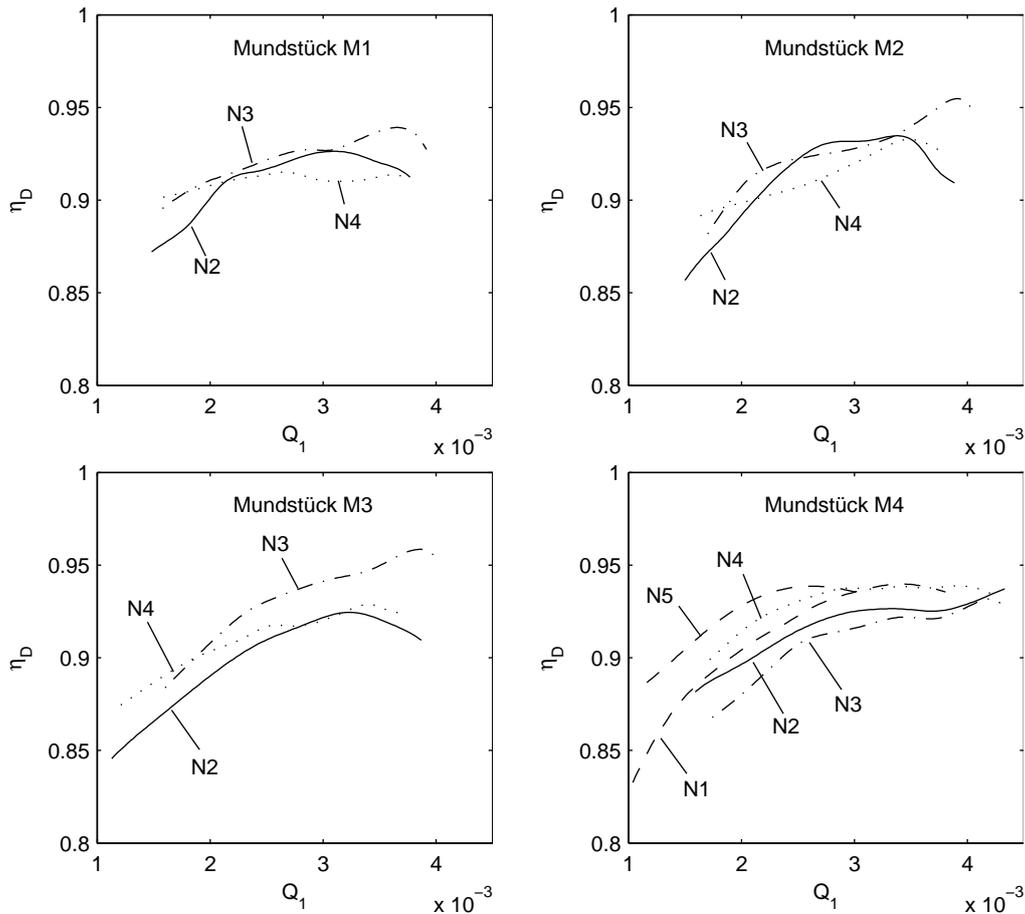


Abbildung 5.14: Verlauf des Düsenwirkungsgrads  $\eta_D$  über dem Düseneinheitsdurchfluss  $Q_1$  sortiert nach Mundstücken

Die Düsenwirkungsgradverläufe für alle gemessenen Kombinationen, sortiert nach Mundstücken, können Abbildung 5.14 entnommen werden. Die Maximalwerte und deren Lage sind in Tabelle 5.4 dargestellt.

Alle Verläufe zeigen, wie zu erwarten, ein Maximum für den Verlauf über  $Q_1$ . Die größten spezifischen Verluste sind bei kleinen Düsenöffnungen zu erkennen. Dies lässt auf den Reibungseinfluss schließen, da sich bei Verkleinerung

des Durchflussquerschnitts der Einfluss der gleich bleibenden benetzten Oberfläche stärker auswirkt. Bei großen Düsenöffnungen überwiegen die Verluste aufgrund der Querschnittsänderung zwischen Einlauf und Austritt aus dem Mundstück, die sich bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten in der Düse stärker auswirken.

*Messunsicherheit:* Um Überlegungen zur Messunsicherheit machen zu können, muss man sich Überlegen welchen Fehler man bei der Durchmessermessung macht. Die Vermessung des Strahls erfolgt in der Messsoftware Pixelweise. Der maximale Messfehler liegt also bei  $\pm 2$  px bei zwei erkannten Kanten. Zur Umrechnung in mm wird der durchschnittliche Umrechnungsfaktor aller Messwerte benutzt. Es ergibt sich eine Abweichung bei der Durchmessermessung  $\Delta d \leq 0.276$  mm. Laut Tabelle 5.4 liegen die  $Q_1$  Werte im Bereich von  $Q_1 \leq 2.5$  m<sup>3</sup>/s. Und daraus resultiert  $d_1 \geq 0.65 \cdot d_0 = 25$  mm laut Abbildung 5.11. Für den relativen Wirkungsgradfehler ergibt sich schließlich laut Gleichung (2.9) für den relativen Messfehler:  $\frac{\Delta \eta}{\eta} = 4.4$  %

Der relative Messfehler ist größer als der Unterschied zwischen der besten - und der schlechtesten Kombination. Die Differenz liegt also innerhalb der Messtoleranz und deshalb gibt es keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen Kombinationen (bedingt durch die Messmethode).

### 5.3.3 $\eta_S$ in Abhängigkeit von $z/d_0$

Zur Beurteilung des Strahlwirkungsgradverlaufs sind in Abbildung 5.15 Schnittkurven entlang des  $Q_1$  Werts von  $\eta_D$  (siehe Tabelle 5.4) dargestellt.

Wie der Wirkungsgradverlauf zeigt gibt es unmittelbar nach dem Maximalwert eine abfallende Tendenz über die bezogene Strahllänge die mit größer werdender Strahllänge abflacht. Anhand von Gleichung (2.8):  $\eta_D \cong 0.0827 \cdot Q_1^2/d_1^4$  soll dieser Zusammenhang untersucht werden. Wie festgestellt, ist für den Strahlverlauf stromabwärts vom minimalen Durchmesser, ein linearer Zusammenhang für  $\Delta d/z = \tan \alpha_{Div}$  zu erkennen. Setzt man diesen in die obige Gleichung bei konstantem  $Q_1$  ein erhält man als Verlauf den abfallenden Ast einer Parabel.

Der Grund für die Wirkungsgradabnahme im Strahlbereich stromabwärts von der Stelle mit maximalen Strahlkontraktion ist also in der Strahldivergenz zu finden, deren lineare Zunahme auch den parabolischen Verlauf charakterisiert.

Tabelle 5.4: Düsenwirkungsgrade  $\eta_D$ , deren Lage und die bestimmte Messunsicherheit für alle gemessenen Nadel-Mundstück Kombinationen

<b>Kombination</b>	$\alpha$ °	$\beta$ °	$\eta_D$ %	$Q_1 \times 10^{-3}$ $m^3/s$	$z/d_0$ -
N1M4	20	30	93.97	3.42	1.11
N2M1	27.5	45	92.63	3.10	1.08
N2M2	27.5	40	93.48	3.38	1.12
N2M3	27.5	45 *	92.45	3.23	1.04
N3M1	30	45	93.93	3.64	0.70
N3M2	30	40	95.48	3.92	0.68
N3M3	30	45 *	95.85	3.86	0.68
N3M4	30	30	93.18	4.21	0.69
N4M1	-	45	91.64	2.67	1.40
N4M2	-	40	93.28	3.48	1.12
N4M3	-	45 *	92.88	3.40	1.13
N4M4	-	30	93.90	3.89	1.10

\*Flächensitz

Wie bereits im Kapitel 5.2.3 zur Strahldivergenz festgestellt, beschränkt sich die Strahlerweiterung nur auf die Strahloberfläche. Dies erklärt auch die sehr große Wirkungsgradabnahme bei relativ kleiner bezogener Strahllänge  $z/d_0 = 3$  auf teilweise unter 70 %. Wie bereits in den theoretischen Betrachtungen zum Strahlwirkungsgrad (Kap. 2.2.2) erwähnt, wäre die Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung im Strahlquerschnitt nötig um genaue Werte angeben zu können. Die Diagramme in Abbildung 5.15 können nur in der Umgebung des Wirkungsgradmaximums gute Näherungswerte liefern.

Aus der Erkenntnis der Strahlwirkungsgradabnahme mit der Strahllänge sollte das Rad so nahe wie möglich an die Düse herangeführt werden, soweit dies durch andere Einbaumaßnahmen wie Strahlableiter überhaupt möglich ist.

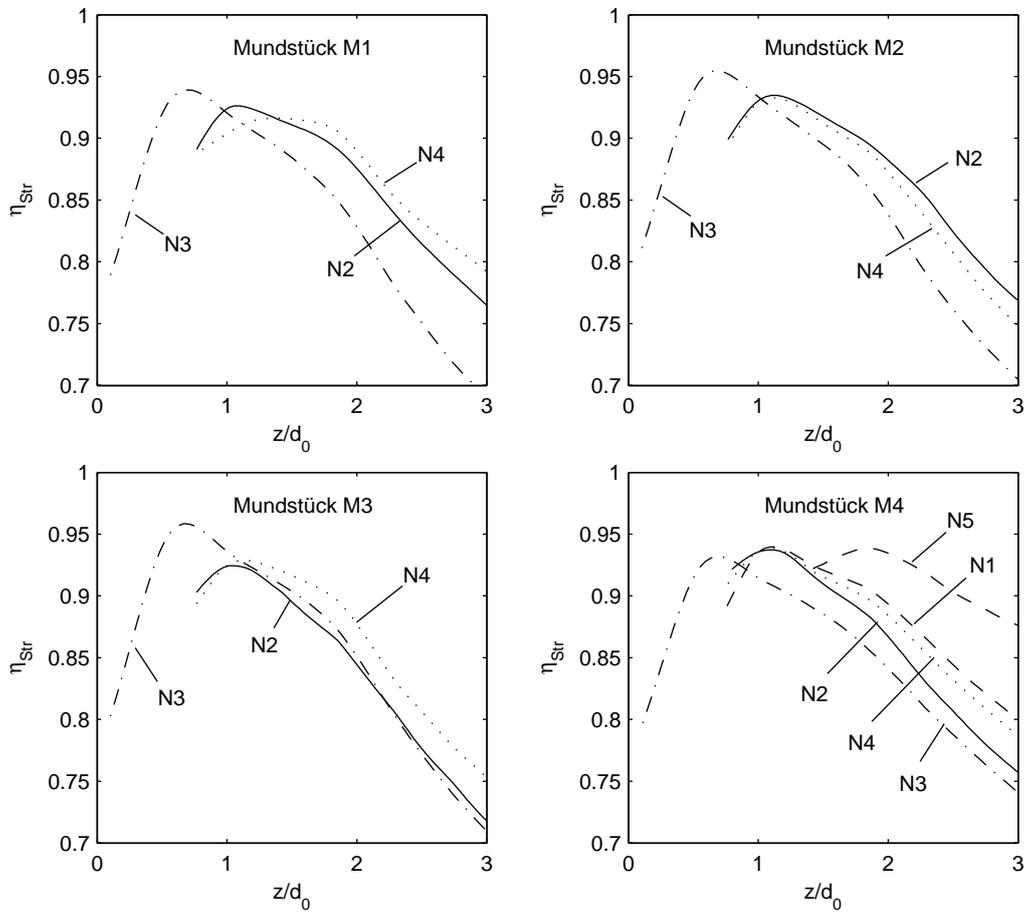


Abbildung 5.15: Verlauf des Strahlwirkungsgrad  $\eta_{str}$  über der bezogenen Strahlänge  $z/d_0$  sortiert nach Mundstücken

## 5.4 Wirkungsgrad der Versuchsturbine

In Kap 2.3 wurde der Vergleichswirkungsgrad  $\eta_V$  eingeführt um mit der Laufradmessung eine Überprüfungsmessung für  $\eta_D$  zu ermöglichen. Da der Düsenwirkungsgrad ja laut Interpretation in Kap 2.2.2 einen Spezialfall des Strahlwirkungsgrad, genauer gesagt sein Optimum, darstellt, liefert die Überprüfungsmessung am Laufrad Werte für den Strahlwirkungsgrad, da die Randbedingungen für den Düsenwirkungsgrad ( $l_1(\eta_D)$ ,  $Q_1(\eta_D)$ ) laut Tabelle 5.4 aufgrund von Einbaumaßnahmen nicht eingehalten werden können.

Nach Umformung von Gleichung (2.15) erhält man für den Vergleichswir-

kungsgrad:

$$\eta_V = \frac{\eta_T(q_{11}, n_{11})}{\eta_{Str}(Q_1, z/d_0)}$$

Der Vergleichswirkungsgrad ist also der Quotient aus Turbinenwirkungsgrad und Strahlwirkungsgrad, und deshalb von den 4 Parametern  $q_{11}$ ,  $n_{11}$ ,  $Q_1$  und  $z/d_0$  abhängig. Diese müssen eindeutig festgelegt werden um den Vergleichswirkungsgrad bestimmen zu können:

- Turbineneinheitsdrehzahl  $n_{11}$  und Turbineneinheitsdurchfluss  $q_{11}$ : Für den Vergleich müssen beide Werte einheitlich festgelegt werden. Für ihre Festlegung wird der Mittelwert aus der Lage der Optima bei der Turbinenwirkungsgradmessung gewählt. Damit sind  $q_{11} = 0.0165 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  und  $n_{11} = 42.347 \text{ min}^{-1}$  festgelegt.
- Düseneinheitsdurchfluss  $Q_1$ : Für seine Bestimmung muss der oben festgelegte Turbineneinheitsdurchfluss  $q_{11}$  in den Düseneinheitsdurchfluss  $Q_1$  umgerechnet werden. Aus Gleichung (2.13) ergibt sich der Zusammenhang  $Q_1 = D^2 \cdot q_{11} = (0.46 \text{ m})^2 q_{11} = 0.349 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .
- Strahleintrittslänge  $z/d_0$ : Um die Umbaumaßnahmen gering zu halten wurden die Kombinationen aus Mundstück und Düsennadel in drei Kategorien eingeteilt, abhängig vom Abstand zwischen Mündstücksflansch und Laufradachse,  $l_A = 308.3 \text{ mm}$ ,  $327.49 \text{ mm}$ ,  $336.4 \text{ mm}$ . Da  $z = z(d)$  laut Kap 2.2.1 zusätzlich vom Strahldurchmesser abhängig ist muss noch für den Strahldurchmesser ein Wert vorgegeben werden. Wählt man  $d_z = 30 \text{ mm}$  so ergeben sich bei bekannter Mundstücklänge  $l_M$  die in Tabelle 5.5 eingetragenen Werte  $z/d_0$  für die verschiedenen Kombinationen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.5 dargestellt, Anhang F zeigt zusätzlich die ausgewerteten Muscheldiagramme der Turbinenmessung. Deren Messunsicherheit liegt im Bereich von  $\pm 0.8 \%$ .

Die Unterschiede zwischen den Kombinationen beim Turbinenwirkungsgrad  $\eta_T$  liegen alle innerhalb der Messtoleranz und ermöglichen keine statistisch signifikante Unterscheidung. Die Kombinationen die einen guten Düsenwirkungsgrad haben resultieren jedoch nicht in den besten Turbinenwirkungsgraden. Die Muscheldiagramme im Anhang F zeigen unterschiedliche Verläufe, ein Einfluss der Düsenkombination ist also vorhanden. Eine mögliche Ursache hierfür könnte in der Strahlform zu finden sein. Die unterschiedlichen Düsenformen führen zu verschiedenen Strahlformen. Dies könnte zu

unterschiedlichen Verlusten in den Bechern führen.

Der Vergleichswirkungsgrad ist für einen Vergleich der Güte der Düsenkombinationen anscheinend nicht geeignet. Die relativ hohe Messunsicherheit im Strahlwirkungsgrad resultiert in sehr hohen Unsicherheiten beim Vergleichswirkungsgrad von ca.  $\pm 11\%$ .

Tabelle 5.5: Überprüfung des Strahlwirkungsgrads: bezogene Stahllängeneintrittslänge  $z/d_0$  die sich durch den Einbau ergeben,  $\eta_{Str}$  für  $Q_1 = 0.00349 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  und  $z/d_0$ , gemessener Wirkungsgrad der Turbine  $\eta_T$  für  $q_{11} = 0.0165 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  und  $n_{11} = 42.347 \text{ min}^{-1}$  zugehörige Messunsicherheit der Mischelfläche und resultierender Vergleichswirkungsgrad  $\eta_V$

Kombination	$\alpha$ °	$\beta$ °	$z/d_0$	$\eta_{Str}$ %	$\eta_T$ %	$\eta_V$ %
N1M4	20	30	1.637	93.96	-**	-
N2M1	27.5	45	1.604	92.04	86.86	94.37
N2M2	27.5	40	1.514	93.33	86.71	92.91
N2M3	27.5	45 *	1.604	92.09	86.55	93.98
N2M4	27.5	30	1.637	92.60	86.65	93.35
N3M1	30	45	1.604	93.71	86.61	92.42
N3M2	30	40	1.514	93.94	86.65	92.24
N3M3	30	45 *	1.604	94.94	86.63	91.25
N3M4	30	30	1.637	92.18	86.51	93.85
N4M1	-	45	1.604	91.26	86.58	95.17
N4M2	-	40	1.514	93.28	86.52	92.74
N4M3	-	45 *	1.604	92.76	86.70	92.75
N4M4	-	30	1.637	93.82	86.38	92.07
N5M4	-	30	1.862	92.98	86.24	92.75

\*Flächensitz

\*\* $q_{11} = 0.0165 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  nicht erreicht da Verstellweg der Düse nicht ausreicht

# Kapitel 6

## Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ziel dieser Arbeit war es, eine Messmethode zur Wirkungsgradmessung der Freistrahldüsen von Peltonturbinen zu entwickeln und den Freistrahlauf auf verschiedene Parameter zu untersuchen. Im folgenden wird eine Zusammenfassung zu den einzelnen Kapiteln gegeben.

**1. Theoretische Grundlagen:** Es werden die Begriffsdefinitionen für Düse, Freistrahlauf, Düsenwirkungsgrad, Strahlwirkungsgrad, Turbinenwirkungsgrad und Vergleichswirkungsgrad sowie Düsendurchflussfläche angegeben. Weiters werden mathematische Herleitungen und Überprüfungen zu den einzelnen Wirkungsgradbegriffen, sowie theoretische Betrachtungen zur Düsendurchflussfläche, dem relativen Messfehler bei der Wirkungsgradbestimmung und dem Einfluss der Ovalität des Freistrahls formuliert. Außerdem werden theoretische Betrachtungen zu den verschiedenen Verlusten aufgestellt und die geometrischen Abmessungen der verwendeten Komponenten angegeben.

**2. Versuchsaufbau:** In diesem Kapitel werden die Versuchsaufbauten für die Durchmesser- und die Messung der Strahlovalität und die Laufradmessung eingehend erläutert und die einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus beschrieben.

**3. Messung:** Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Vorgehensweise bei der Messung der Düsenkennlinie, der Vermessung des Wasserstrahls und der Messung der Leistungsaufnahme am Laufrad. Zusätzlich wird auf die verwendeten Messaufnehmer und Messkomponenten genauer eingegangen, deren Prinzipien erklärt und die Messbereiche sowie Messfehler angegeben. Außerdem erfolgt eine ausführliche Beschreibung der entwickelten optischen Mess-

methode zur Durchmessermessung und der entwickelten Messsoftware.

**4. Ergebnisse:** Es werden kurz die Ergebnisse abschnittsweise kommentiert und zusammengefasst:

*Düsenkennlinien:* Alle Kennlinienverläufe verlaufen für kleine Düsenstellungen annähernd linear und zeigen einen anschließenden Rückgang der Durchflusszunahme mit der Düsenverstellung. Je flacher der Nadelwinkel ist umso steiler verläuft die Düsenkennlinie. Der Flächensitz bei Mundstück M3 führt zu einem höheren Düseneinheitsdurchfluss bei gleicher Düsenstellung.

*Ovalität:* Es wurde eine eindeutige Strahlovalität festgestellt, die von der Strahllänge und dem Düseneinheitsdurchfluss abhängig ist und mathematisch korrigiert werden muss.

*Strahlkontraktion und Strahlaustrittswinkel  $\beta_{Str}$ :* Die Strahlkontur im konvergenten Teil des Freistrahls kann durch eine kubische Parabel im Bereich von  $0.0016 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \leq Q_1 \leq 0.0036 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  ausreichend genau beschrieben werden. Der Strahlaustrittswinkel  $\beta_{Str}$  nimmt mit steigender Düsenöffnung ab und liegt für alle gemessenen Kombinationen im Bereich von  $10^\circ \div 32.5^\circ$ . Den kleinsten Wert zeigen die zwiebelförmigen Düsennadeln. Ein Einflussfaktor konnte nicht eindeutig formuliert werden.

*Strahldivergenz und  $\alpha_{Div}$ :* Die Strahlkontur im divergenten Teil kann für den gesamten gemessenen  $Q_1$  Bereich durch lineare Funktionen ausreichend genau beschrieben werden. Der Strahldivergenzwinkel  $\alpha_{Div}$  nimmt mit steigender Düsenöffnung zu und liegt für alle gemessenen Kombinationen im Bereich von  $0.2^\circ \div 1.2^\circ$ . Die größten Werte zeigt die Kombination N2M3 mit dem Mundstück mit Flächensitz, die kleinsten Werte die Zwiebelnadel N4. Ein Einflussfaktor konnte nicht eindeutig formuliert werden. Die theoretische Betrachtung zur Strahlenergie lässt jedoch die Vermutung zu, dass die Strahlerweiterung nur an der Strahloberfläche zu erwarten ist und die Werte deshalb zu groß sind.

*Die größte Strahlkontraktion und deren Lage:* Der Ort der maximalen Strahlkontraktion wandert mit steigender Düsenstellung näher an das Mundstück heran. Die geometrischen Einflüsse auf den kleinsten Strahldurchmesser  $d_1$  bei gleichem Düseneinheitsdurchfluss sind gering.

*Düsenwirkungsgrad  $\eta_D$ :* Die Verläufe in Abhängigkeit von  $Q_1$  zeigen ein Maximum und sind für kleine und große Düsenöffnungen geringer. Die Maximal-

werte liegen je nach Kombination im Bereich  $91.64\% \div 95.85^\circ$ . Die Messunsicherheit ist mit  $4.4\%$  sehr hoch, da, wie im theoretischen Teil formuliert, der relative Wirkungsgradfehler den vierfachen Wert des relativen Fehlers bei der Durchmessermessung annimmt. Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Kombinationen ist nicht angebar.

*Strahlwirkungsgrad  $\eta_S$* : Die Verläufe über  $z/d_0$  haben ein eindeutiges Maximum, das den Düsenwirkungsgrad darstellt. Alle Verläufe zeigen nach dem Maximum eine stark abfallende Tendenz bei zunehmender Strahllänge.

*Turbinenwirkungsgrad  $\eta_T$* : Die Unterschiede zwischen den Kombinationen beim Turbinenwirkungsgrad  $\eta_T$  liegen alle innerhalb der Messtoleranz und ermöglichen keine statistisch signifikante Unterscheidung. Die Kombinationen die einen guten Düsenwirkungsgrad haben resultieren jedoch nicht in den besten Turbinenwirkungsgraden. Ein Einfluss der Düse ist aus den Mischdiagrammen jedoch ersichtlich.

*Vergleichswirkungsgrad  $\eta_V$* : Der Vergleichswirkungsgrad ist für einen Vergleich der Güte der Düsen anscheinend nicht geeignet. Die relativ hohe Messunsicherheit im Strahlwirkungsgrad resultiert in sehr hohen Unsicherheiten beim Vergleichswirkungsgrad von ca.  $\pm 11\%$ .

# Kapitel 7

## Ausblick

Für zukünftige Messungen mit der ausgearbeiteten Methode sollten folgende Verbesserungsvorschläge beachtet werden:

Aus dem Zusammenhang in Gleichung 2.10 (der relative Fehler bei der Durchmessermessung hat eine Auswirkung auf den relativen Fehler des Düsenwirkungsgrad von Faktor vier) resultiert, dass die Durchmessermessung sehr genau zu erfolgen hat, um brauchbare Ergebnisse zu erhalten.

Eine hohe Auflösung der Digitalkamera und genauere Untersuchungen zur Verbesserung der Kantenerkennung der Messsoftware sind hierfür zu empfehlen. Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit zur Lage der Optima ermöglicht es den Messbereich einzuschränken und interessante Bereiche genauer zu untersuchen.

Eine höhere Auflösung würde auch das horizontale Verschieben der Kamera überflüssig machen und damit einen erheblichen Zeitvorteil mit sich bringen. Außerdem würde damit das Vermessen über die ganze Strahllänge ermöglicht und das Zusammensetzen aus den Einzelbildern überflüssig.

Zusätzliche Messungen des Geschwindigkeitsprofils mittels LDA wären sehr hilfreich um den Strahlwirkungsgrad und die Strahlerweiterung im divergenten Teil genauer untersuchen zu können.

Die Messsoftware sollte dahingehend verbessert werden, dass die Eingabe des Umrechnungsfaktors von Pixel in *Real World Coordinates* auf der Benutzeroberfläche geschehen kann. Eine sofortige Umrechnung in den Wirkungsgrad wäre wünschenswert, dargestellt in Diagrammen und evtl. überlagert mit einer statistischen Auswertung aus den Messwerten.

# Literaturverzeichnis

- [1] *Technische Information; Proline Promag 50W, 53W. Magnetisch-induktives Durchfluss-Messsystem, Durchflussmengenmessung von Flüssigkeiten in Wasser- oder Abwasserapplikationen.*
- [2] ANGERER, K. C.: *Ein Beitrag zur Ermittlung der Kenngrößen von Freistrahldüsen.* Diplomarbeit, TU Wien, 1984.
- [3] BENITEZ, R. VILLACORTA: *Theoretische und experimentelle Untersuchung an Einlaufdüsen von Freistrahlturbinen.* Doktorarbeit, ETH Zürich, 1972.
- [4] BOHL, W.: *Strömungsmaschinen 2 (Berechnung und Konstruktion.* Vogel Buchverlag, 2005.
- [5] C. ROSEGGER, H.B. MATTHIAS: *Die Versuchs- und Forschungseinrichtungen am Institut für Wasserkraftmaschinen und Pumpen der Technischen Universität Wien.* Österreichische Hochschulzeitung, 7/8, 1988.
- [6] COMMISSION, IEC INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL (Herausgeber): *Hydraulic turbine, storage pumpe and Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests.* INTERNATIONAL STANDARD IEC 60193, 1999.
- [7] FRANZ, GEORG: *Graphische Auswertung von Turbinenmeßdaten.* Diplomarbeit, TU Wien, 1999.
- [8] H. HART, W. LOTZE, E.G. WOSCHNI: *Meßgenauigkeit.* Oldenbourg, 1997.
- [9] KNAPP, F.H.: *Ausfluß, Überfall und Durchfluß im Wasserbau.* Braun, 1960.
- [10] LEIBNITZ, GEORG: *Steuerung und Messdatenerfassung eines Pelton-turbinenversuchsstandes.* Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 1998.

- [11] M. DITTMANN, K. DULLENKOPF, S. WITTING: *Discharge Coefficients of Rotating Short Orifices With Radiused and Chamfered Inlets*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 126: 803 – 808, 2004.
- [12] MATTHIAS, H.-B.: *Grundzüge der hydraulischen Maschinen und Anlagen (Vorlesungsskriptum)*. TU Wien, 2003.
- [13] N. HAY, A. SPENCER: *Discharge Coefficients of Cooling Holes With Radiused and Chamfered Inlets*. Journal of Turbomachinery, 114: 701 – 706, 1992.
- [14] ROSEGGER, CHRISTIAN: *Aufbau und Betrieb des Freistrahlturbinenversuchsstandes im Hydrodynamischen Laboratorium der Technischen Universität Wien*. 5. Internationales Seminar Wasserkraftanlagen, Technische Universität Wien, Seiten 489 – 500, 1988.
- [15] ROSEGGER, CHRISTIAN: *Ein Beitrag zur Untersuchung des Gehäuseeinflusses auf das Betriebsverhalten einer Modellturbine unter besonderer Berücksichtigung der Automatisierung des Versuchsstands*. Doktorarbeit, TU Wien, 1991.
- [16] ZH ZHANG, M CASEY: *Experimental studies of the jet of a Pelton turbine*. I MECH E Part A Journal of Power and Energy, 221:1181–1192 (12), 2007.
- [17] ZHANG, ZH.: *Freistrahlturbinen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Nadel und Mundstückswinkel . . . . .	5
2.2	Durchflussfläche der Nadeldüse . . . . .	6
2.3	Durchflussfläche in Abhängigkeit der Düsenstellung . . . . .	7
2.4	Nettofallhöhe und Bezeichnungen . . . . .	9
2.5	Verlauf von $\varphi_D$ und $\eta_D$ . . . . .	10
2.6	Freistrahл und Strahleintritt . . . . .	13
3.1	Schnitt Prüfstand . . . . .	20
3.2	Aufbau Ovalitätsmessung . . . . .	21
3.3	Aufbau Turbinenmessung . . . . .	23
4.1	Geometrie Zentralprojektion . . . . .	27
4.2	Messmarkierung . . . . .	29
4.3	Frontpanel der Messsoftware . . . . .	30
5.1	$Q$ und $Q_1$ abhängig von der Düsenstellung . . . . .	37
5.2	Düsenkennlinie $Q_1 - a/d_0$ . . . . .	38
5.4	Flächensitz . . . . .	39
5.3	Einfluss Flächensitz auf Düsenkennlinie . . . . .	39
5.5	Überlagerung Strahlkonturen Ovalitätsmessung . . . . .	41
5.6	Überlagerung: kubische Parabel und Messwerte . . . . .	43
5.7	$\beta_{Str}$ über $Q_1$ . . . . .	45
5.8	Überlagerung: Gerade und Messwerte . . . . .	46
5.9	$\alpha_{Div}$ über $Q_1$ . . . . .	47
5.10	$z_1$ über $Q_1$ . . . . .	49
5.11	$d_1$ über $Q_1$ . . . . .	50
5.12	Funktionsgebirge für $\eta_D$ . . . . .	52
5.13	Bestimmungskurven für $\eta_D$ und $\eta_{Str}$ . . . . .	52
5.14	Düsenwirkungsgradverlauf $\eta_D - Q_1$ . . . . .	53
5.15	Strahlwirkungsgradverlauf $\eta_{Str} - z/d_0$ . . . . .	56
A.1	oben: Mundstück M1, unten: Mundstück M2 . . . . .	71

A.2	oben: Mundstück M3, unten: Mundstück M4 . . . . .	72
A.3	oben: Düsennadel N2, unten: Düsennadel N3 . . . . .	73
A.4	Düsennadel N4 . . . . .	74
B.1	oben: Mundstück M1, unten: Mundstück M2 . . . . .	76
B.2	oben: Mundstück M3, unten: Mundstück M4 . . . . .	77
B.3	oben: Mundstück N2, unten: Mundstück N3 . . . . .	78
B.4	Düsennadel N4 . . . . .	79
C.1	oben: Mundstück M1, unten: Mundstück M2 . . . . .	81
C.2	oben: Mundstück M3, unten: Mundstück M4 . . . . .	82
C.3	oben: Mundstück N2, unten: Mundstück N3 . . . . .	83
C.4	Düsennadel N4 . . . . .	84
E.1	Strahlkontur N1M4 . . . . .	91
E.2	Strahlkontur N2M1 . . . . .	92
E.3	Strahlkontur N2M2 . . . . .	93
E.4	Strahlkontur N2M3 . . . . .	94
E.5	Strahlkontur N2M4 . . . . .	95
E.6	Strahlkontur N3M1 . . . . .	96
E.7	Strahlkontur N3M2 . . . . .	97
E.8	Strahlkontur N3M3 . . . . .	98
E.9	Strahlkontur N3M4 . . . . .	99
E.10	Strahlkontur N4M1 . . . . .	100
E.11	Strahlkontur N4M2 . . . . .	101
E.12	Strahlkontur N4M3 . . . . .	102
E.13	Strahlkontur N4M4 . . . . .	103
E.14	Strahlkontur N5M4 . . . . .	104
F.1	oben: N1M4H50, unten: N2M1H50 . . . . .	106
F.2	oben: N2M2H50, unten: N2M3H50 . . . . .	107
F.3	oben: N2M4H50, unten: N3M1H50 . . . . .	108
F.4	oben: N3M2H50, unten: N3M3H50 . . . . .	109
F.5	oben: N3M4H50, unten: N4M1H50 . . . . .	110
F.6	oben: N4M2H50, unten: N4M3H50 . . . . .	111
F.7	oben: N4M4H50, unten: N5M4H50 . . . . .	112

# Tabellenverzeichnis

2.1	Geometriedaten und Bezeichnung der Düsenmundstücke und Düsennadeln . . . . .	4
2.2	Hauptabmessungen und Auslegungsdaten der Modellturbine .	15
4.1	Kamerageometrie und Fehler in radialer Richtung . . . . .	28
4.2	Messfehler . . . . .	35
5.1	Ovalitätsmatrix . . . . .	42
5.2	Anwendungsbereich der kubischen Parabel . . . . .	44
5.3	Interpolationsgüte der quadratischen Interpolation . . . . .	46
5.4	Düsenwirkungsgrade . . . . .	55
5.5	Laufgradwirkungsgrad . . . . .	58

# Abkürzungsverzeichnis

$A$ .....	zur Fließrichtung senkrechte Querschnittsfläche
$b_a$ .....	äußere Becherbreite
$b_i$ .....	innere Becherbreite
$c$ .....	Strömungsgeschwindigkeit
$D_1$ .....	Strahlkreisdurchmesser
$d_0$ .....	Strahlaustrittsdurchmesser am Mundstück
$d_1$ .....	kleinster Strahldurchmesser
$D_a$ .....	Aussendurchmesser
$D_s$ .....	Spitzenkreisdurchmesser
$d_z$ .....	variabler Strahldurchmesser
$E$ .....	Energiehöhe
$F$ .....	Austrittsfläche der Düse
$g$ .....	Erdbeschleunigung
$H$ .....	Gefälle
$H_{VD}$ .....	Gefälleverluste
$k_c$ .....	Düsenbeiwert
$l$ .....	Bezugslänge, Becherlänge in Abschn. 2.3
$l_1$ .....	Strahllänge von $d_1$
$\dot{m}$ .....	Massenstrom
$M$ .....	Drehmoment
$n_{11}$ .....	Einheitsdrehzahl
$n$ .....	Drehzahl
$n_q$ .....	spezifische Drehzahl
$P$ .....	abgeführte mech. Leistung
$p$ .....	Druck
$Q$ .....	Durchfluss
$Q_1$ .....	Einheitsdurchfluss der Düse
$q_{11}$ .....	Einheitsdurchfluss der Turbine
$r_0$ .....	Strahlaustrittsradius am Mundstück
$t$ .....	Bechertiefe
$Y$ .....	Stutzenarbeit

$z$ .....	geodätische Höhe, Strahllänge gemessen vom Mundstück laut Abbildung 2.6, Becherzahl in Abschn. 2.3
$\alpha$ .....	Nadelwinkel Abb. 2.1 außer 2.2.1
$\beta$ .....	Mundstückswinkel Abb. 2.1
$\delta$ .....	Durchmesser der Erzeugenden der Austrittsfläche
$\epsilon$ .....	Schneidenwinkel
$\eta$ .....	Wirkungsgrad allg.
$\eta_D$ .....	Düsenwirkungsgrad (2.8)
$\eta_L$ .....	Laufradwirkungsgrad
$\eta_{Str}$ .....	Strahlwirkungsgrad
$\rho$ .....	Dichte des Wassers
$\sigma$ .....	Erzeugende des Durchflussquerschnitts
$\varphi$ .....	Durchflusszahl
$\omega$ .....	Winkelgeschwindigkeit
$1$ .....	Stelle kleinsten Strahldurchmessers
$A$ .....	Achse
$a$ .....	Düsenaustritt
$e$ .....	Düseneintritt
$M$ .....	Mundstück
$Str$ .....	Strahl
$th$ .....	theoretisch
$z$ .....	Stelle mit Strahldurchmesser $d_z$

# Anhang A

## Strahlaustrittswinkel $\beta_{Str}$

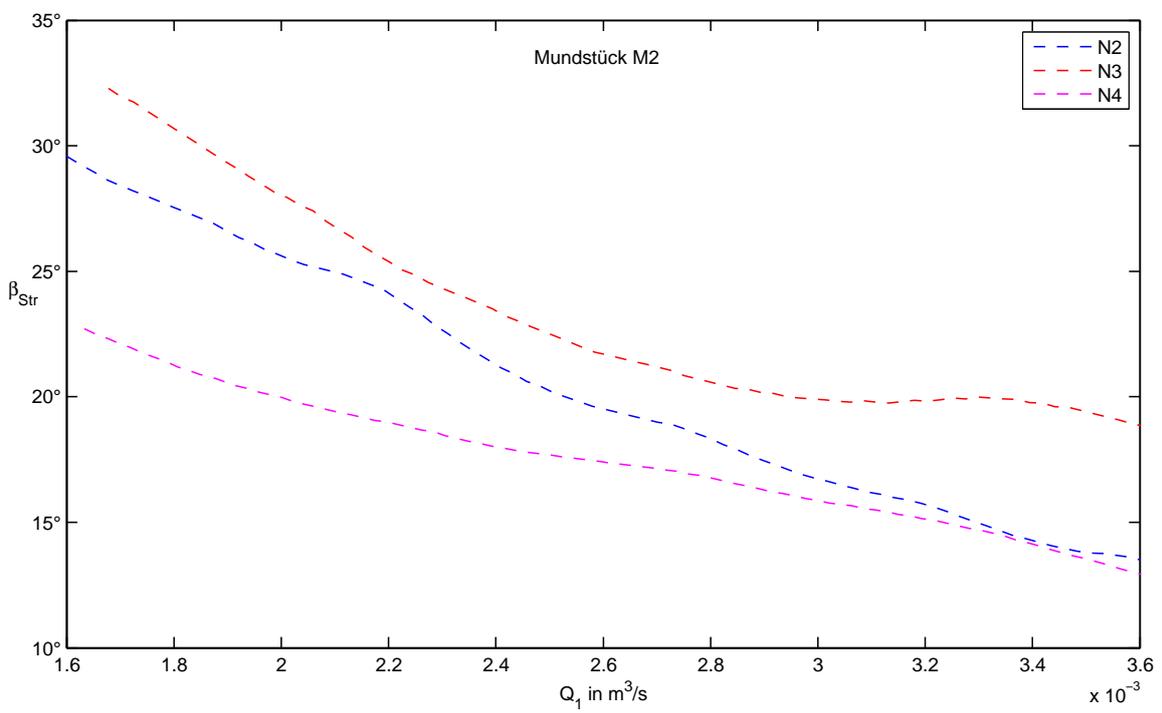
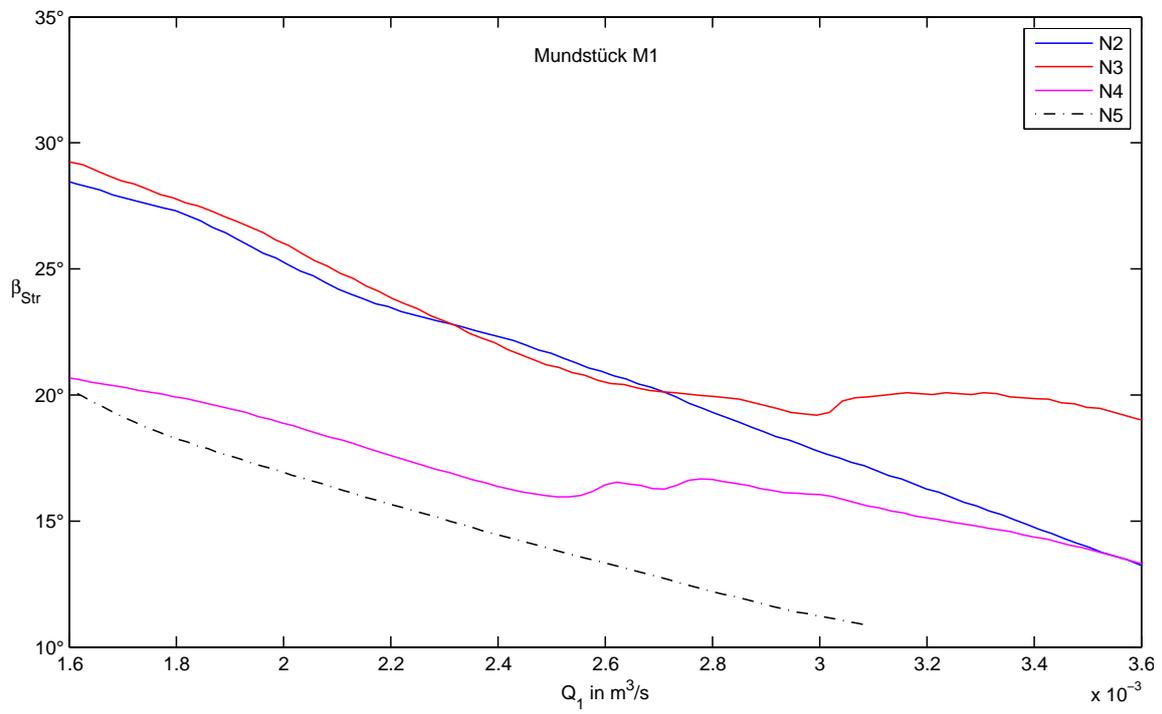


Abbildung A.1: oben: Mundstück M1, unten: Mundstück M2

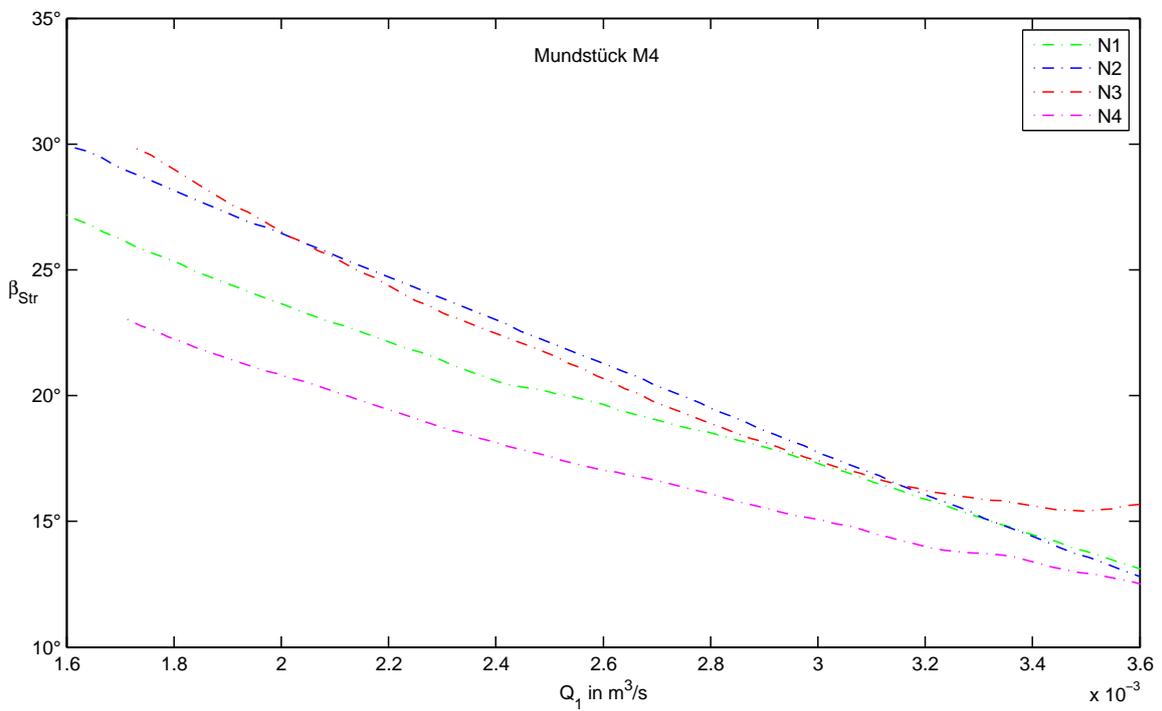
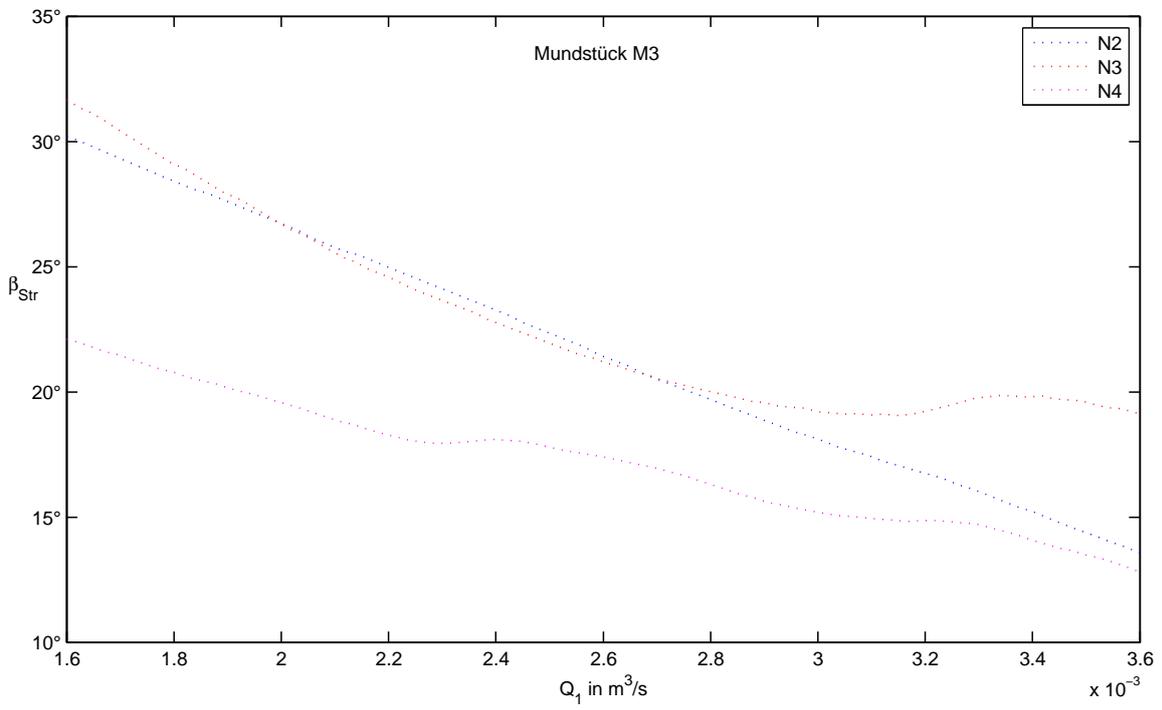


Abbildung A.2: oben: Mundstück M3, unten: Mundstück M4

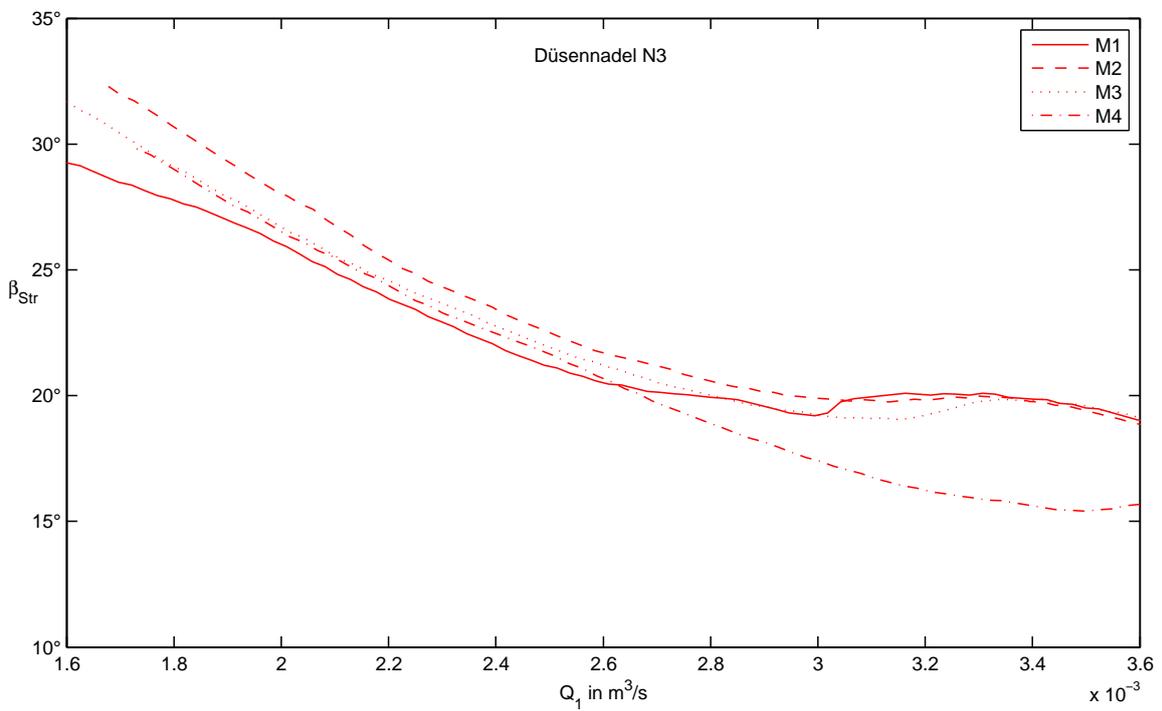
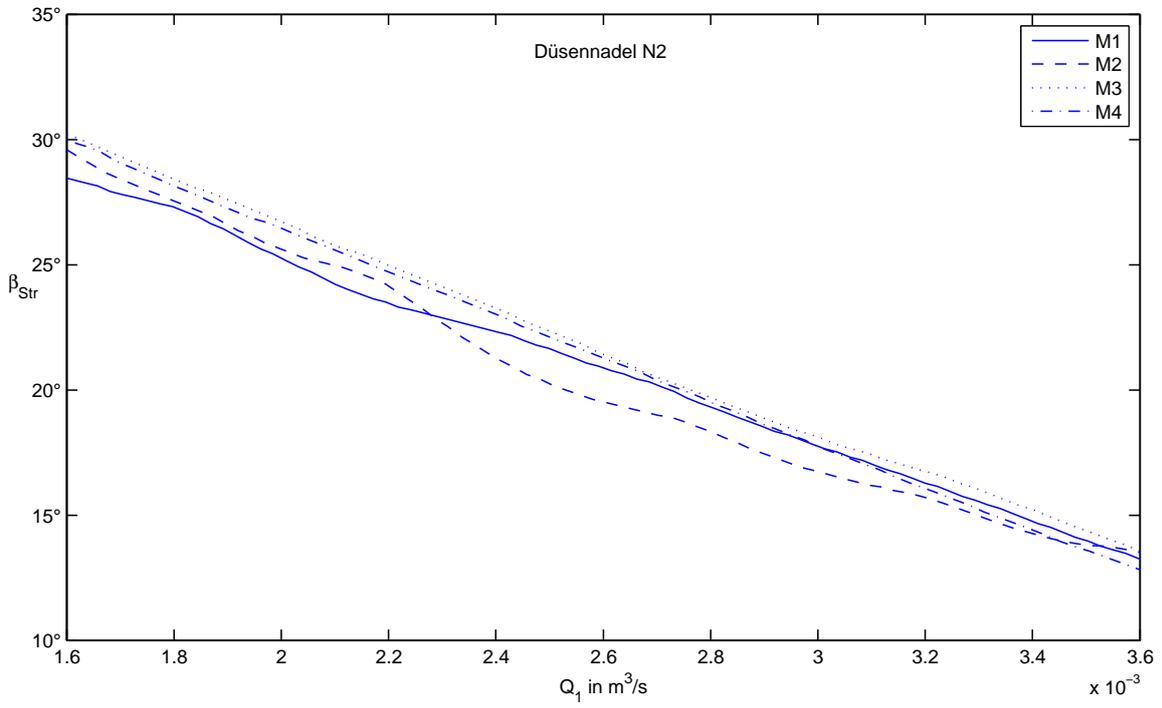


Abbildung A.3: oben: Düsenadel N2, unten: Düsenadel N3

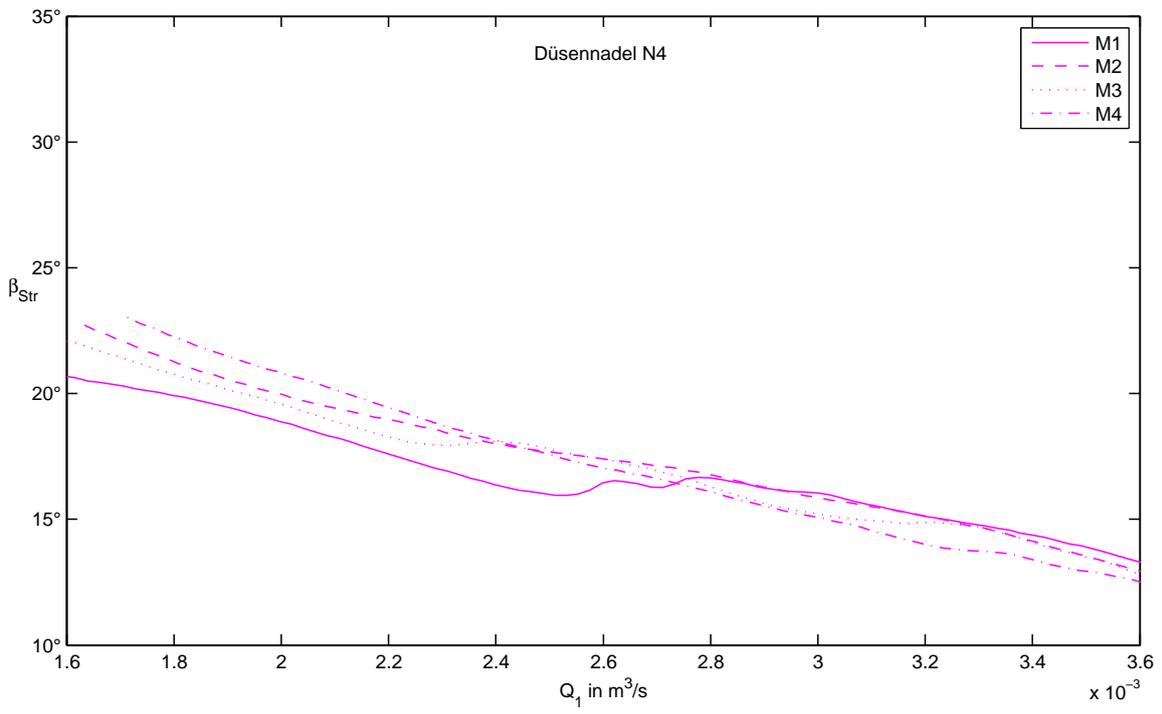


Abbildung A.4: Düsennadel N4

## Anhang B

### Strahldivergenzwinkel $\alpha_{Div}$

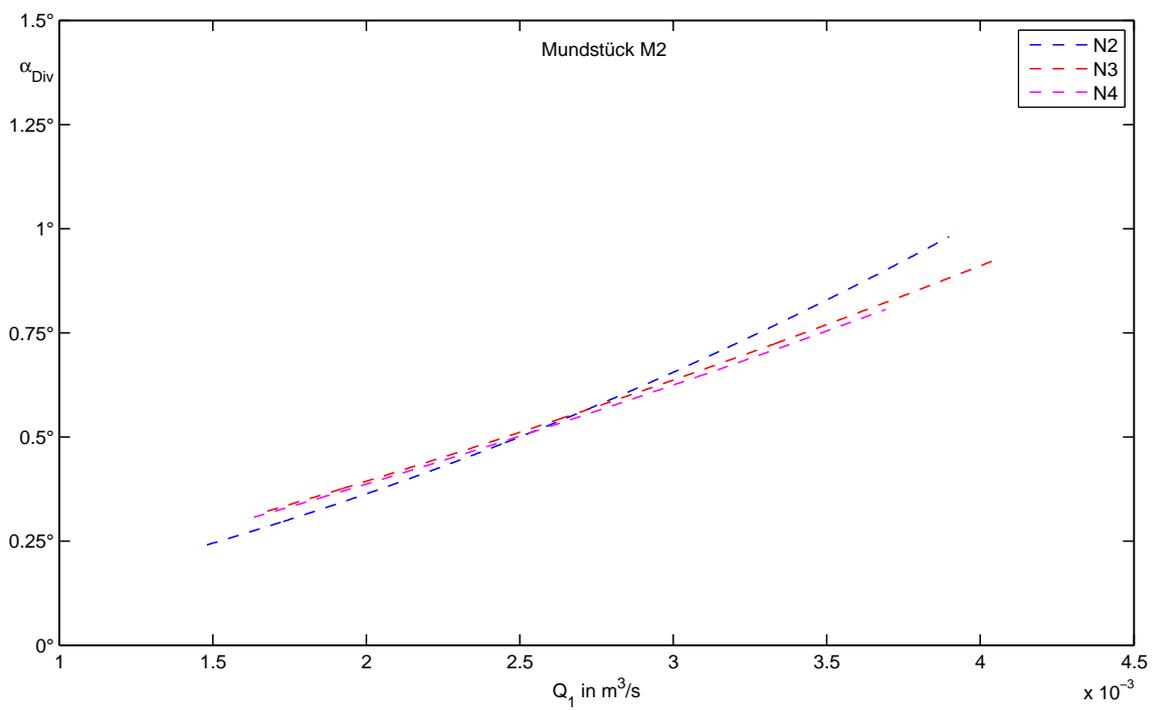
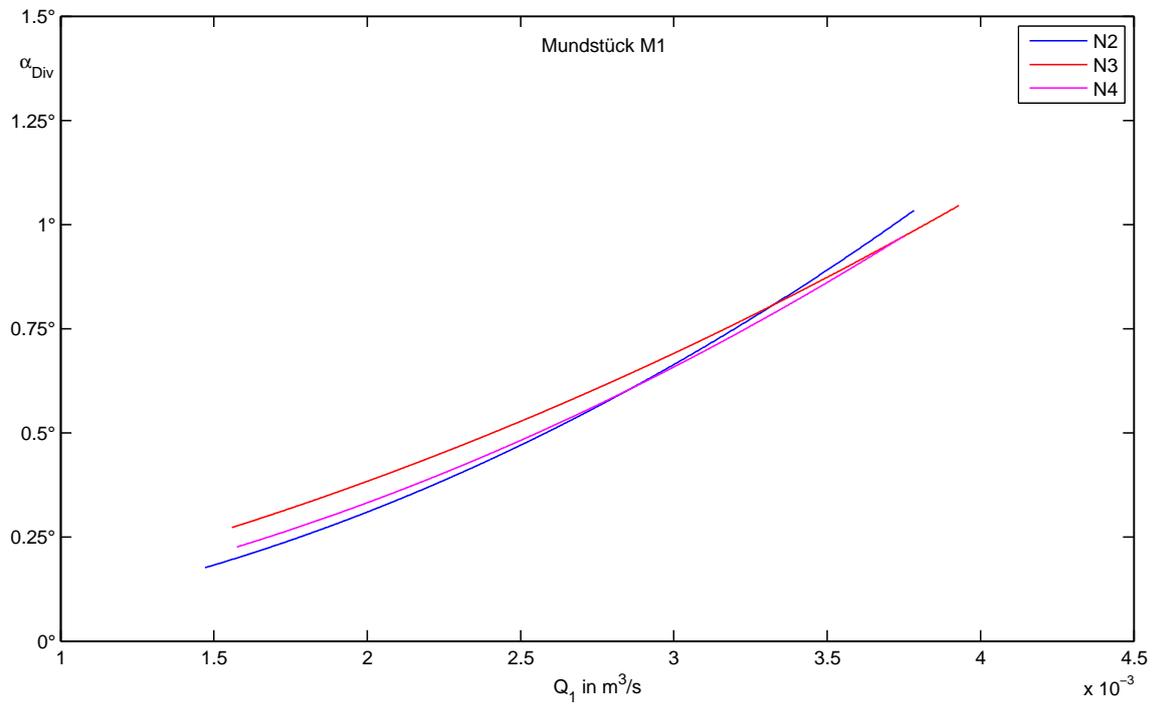


Abbildung B.1: oben: Mundstück M1, unten: Mundstück M2

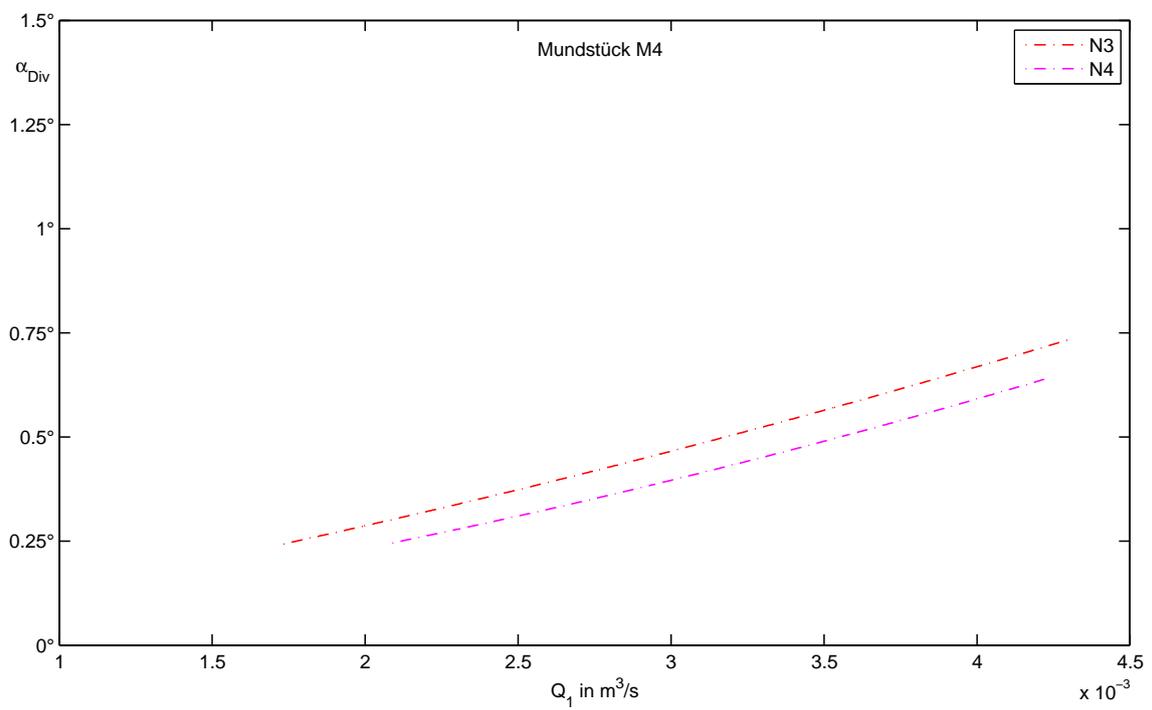
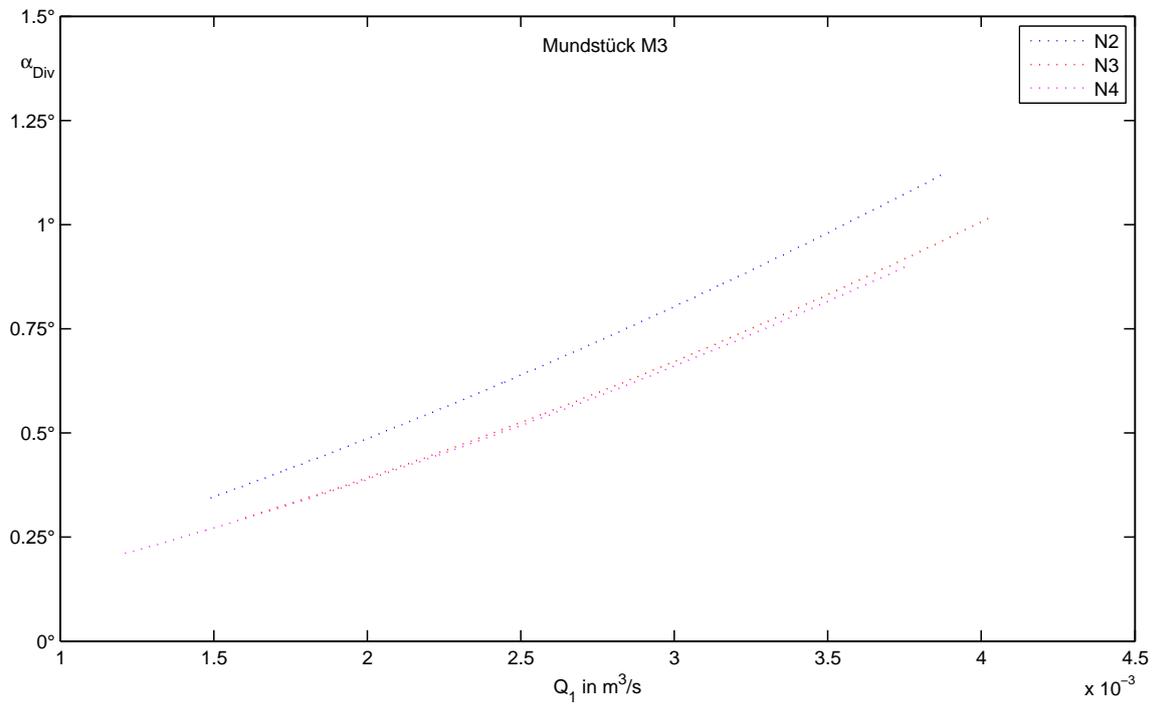


Abbildung B.2: oben: Mundstück M3, unten: Mundstück M4

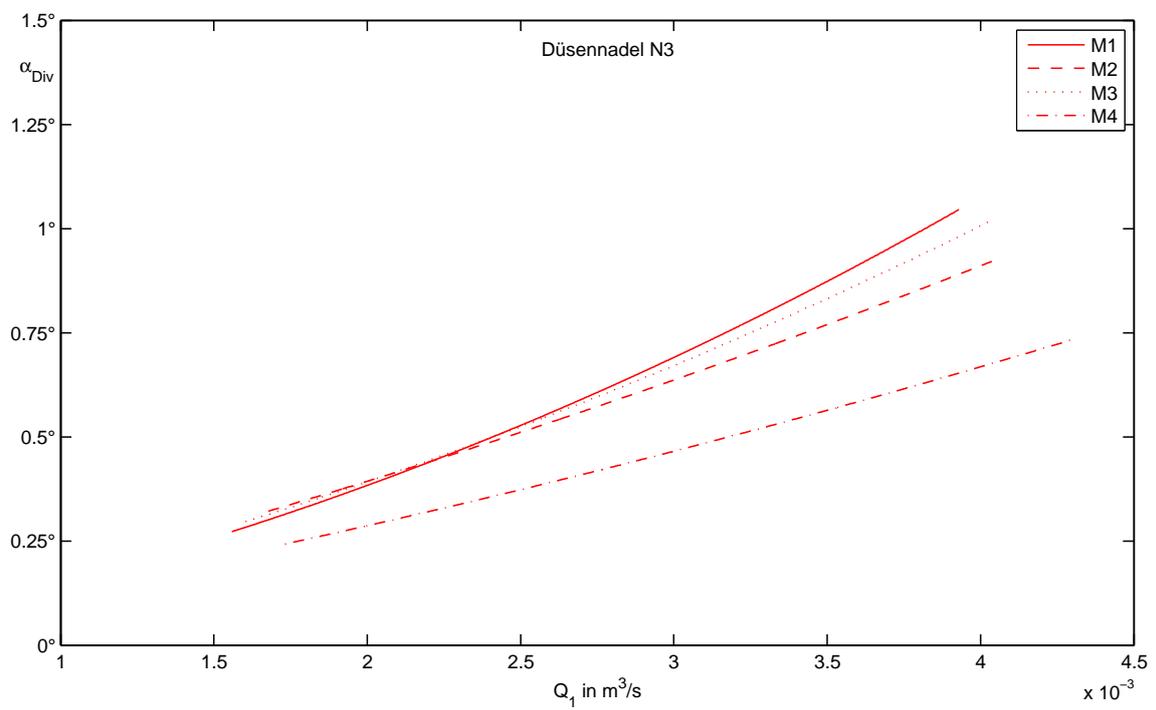
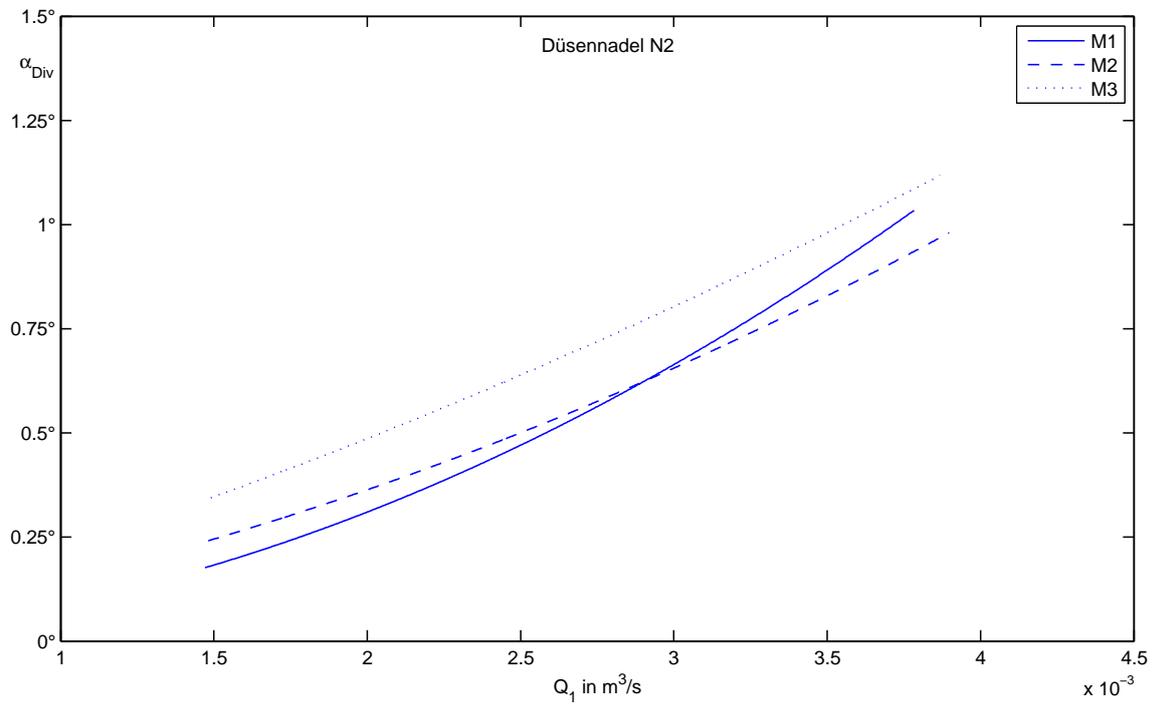


Abbildung B.3: oben: Mundstück N2, unten: Mundstück N3

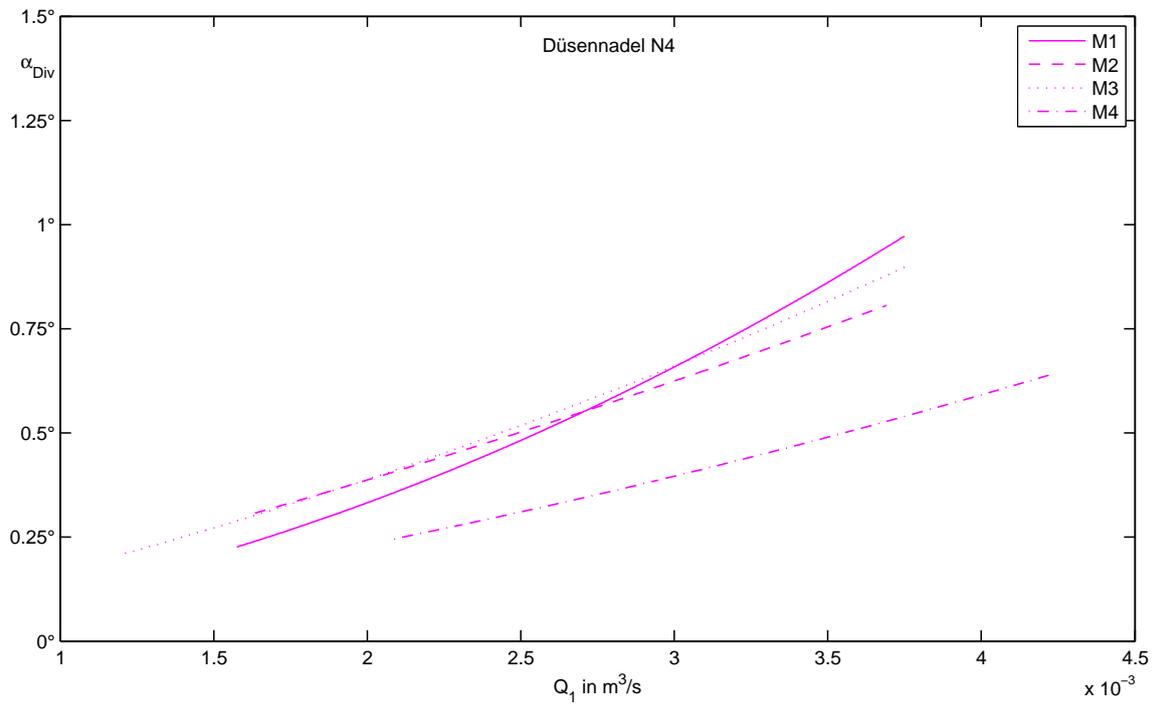


Abbildung B.4: Düsennadel N4

# Anhang C

$d_1$  und  $z_1$

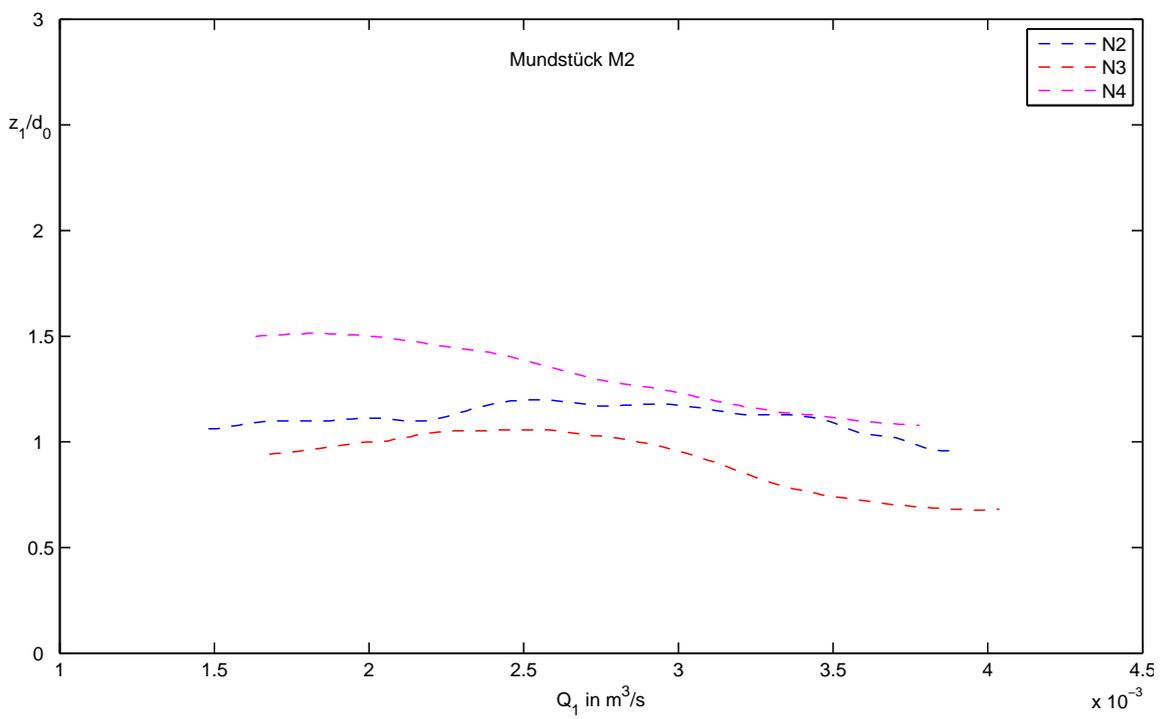
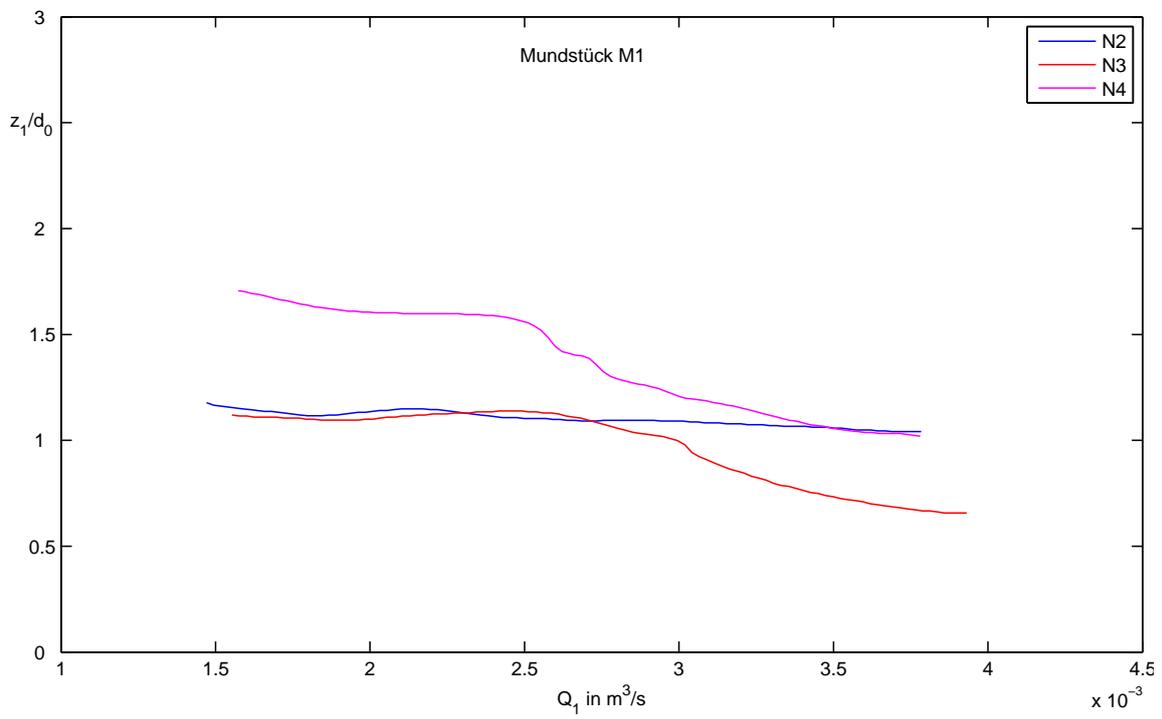


Abbildung C.1: oben: Mundstück M1, unten: Mundstück M2

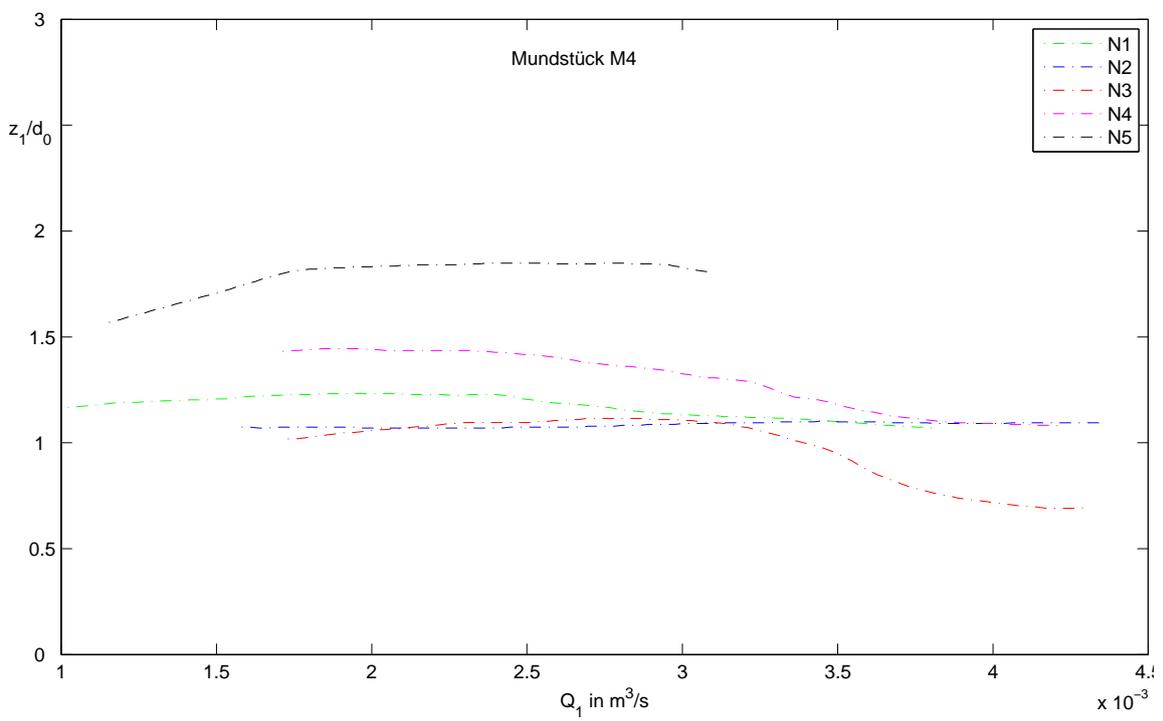
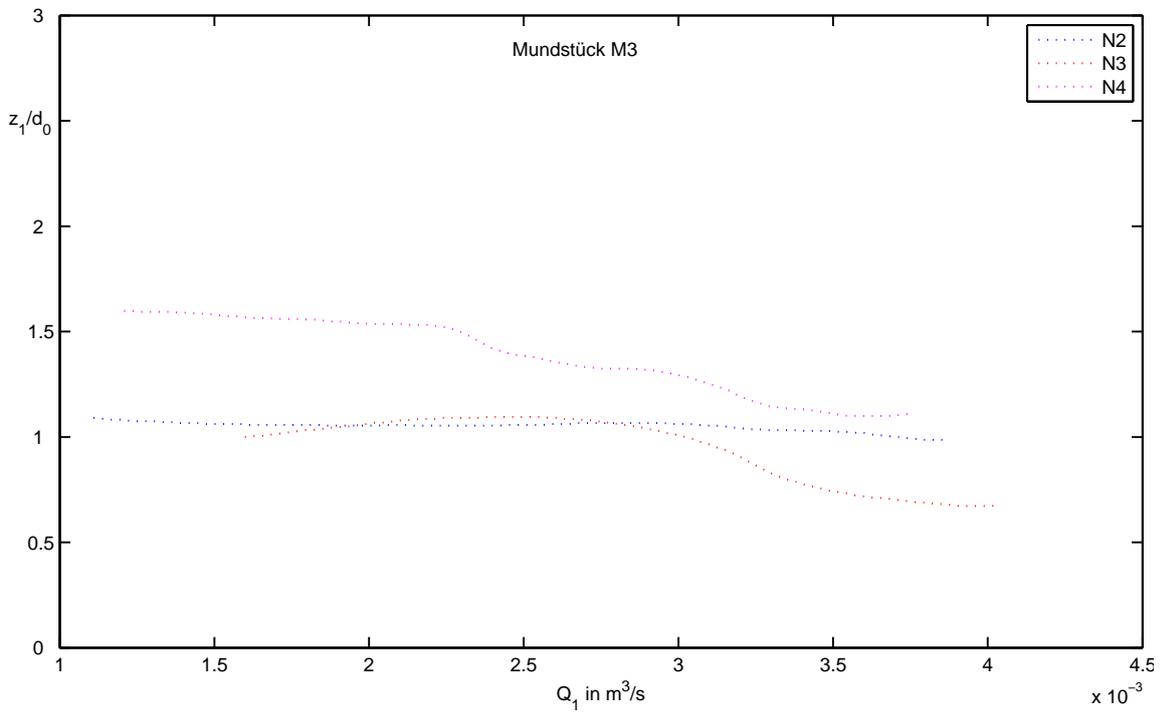


Abbildung C.2: oben: Mundstück M3, unten: Mundstück M4

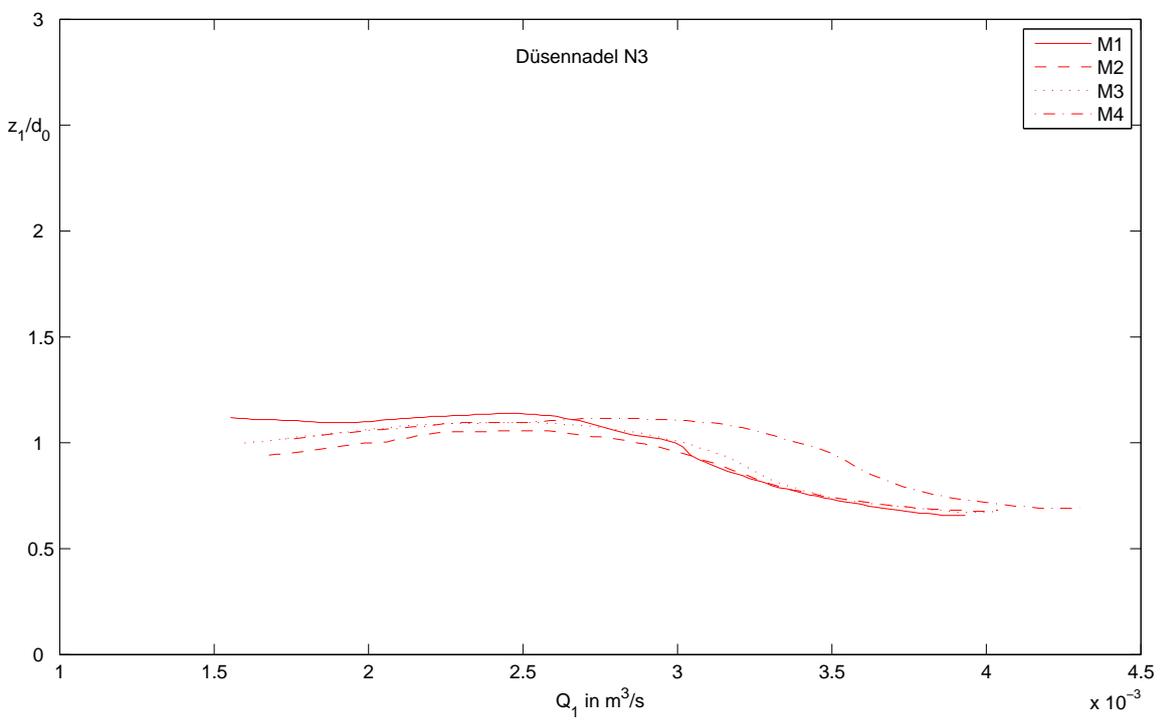
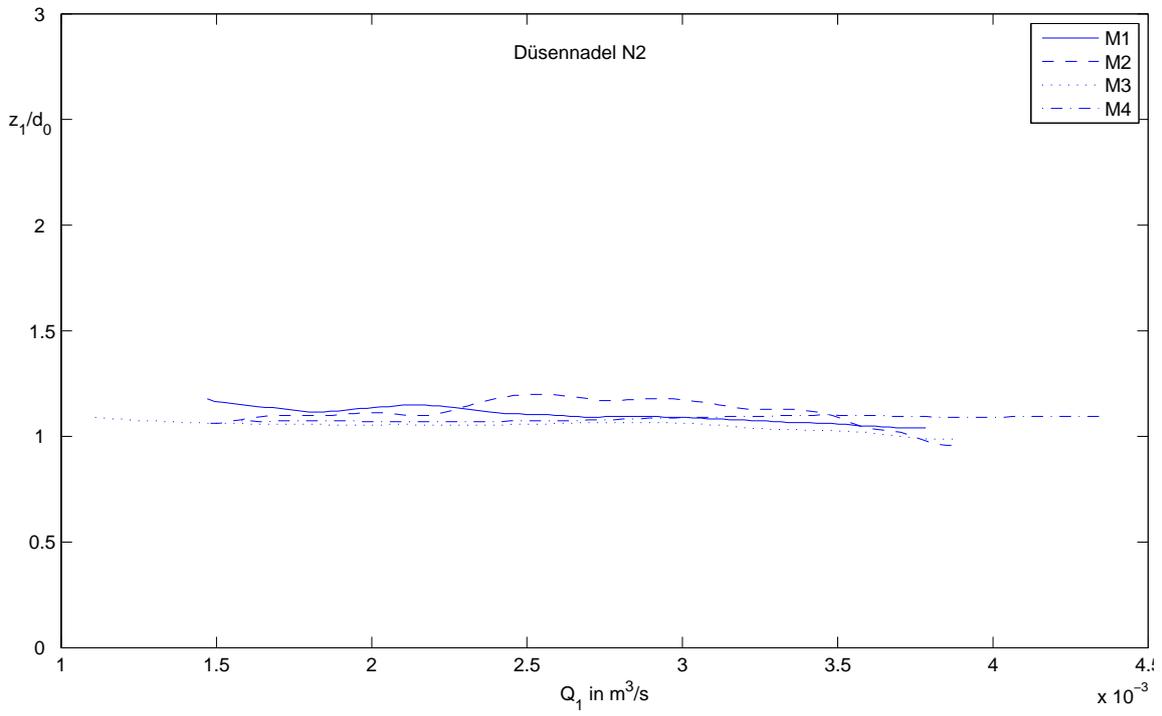


Abbildung C.3: oben: Mundstück N2, unten: Mundstück N3

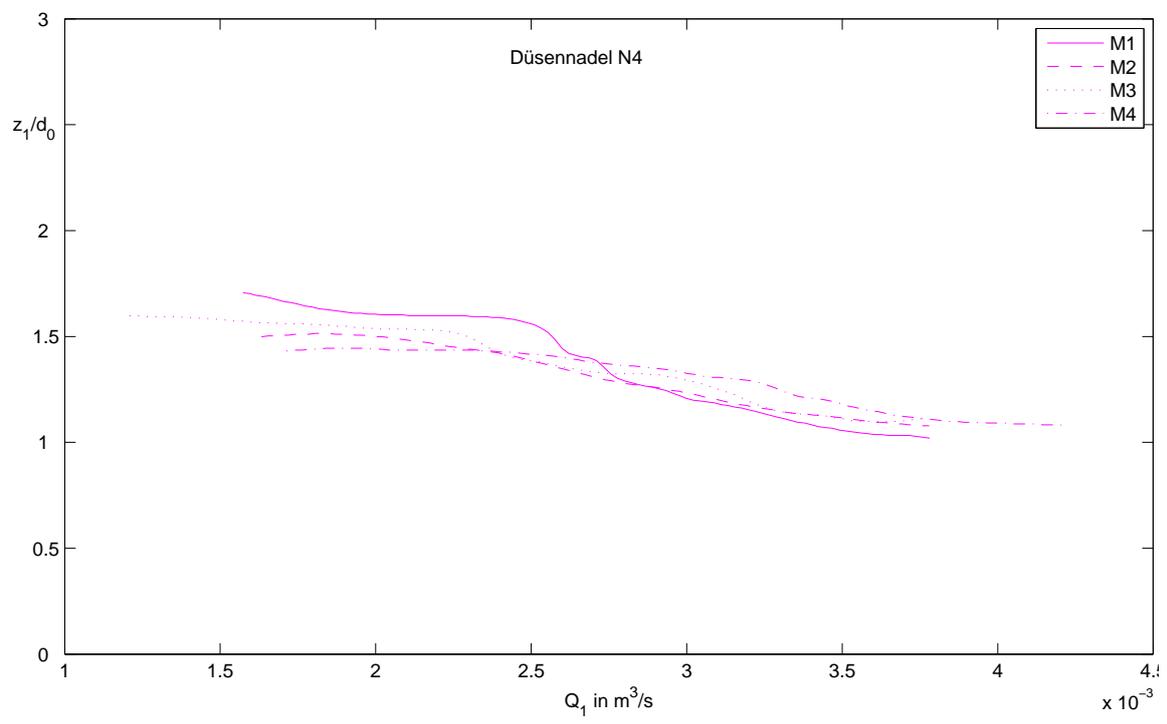
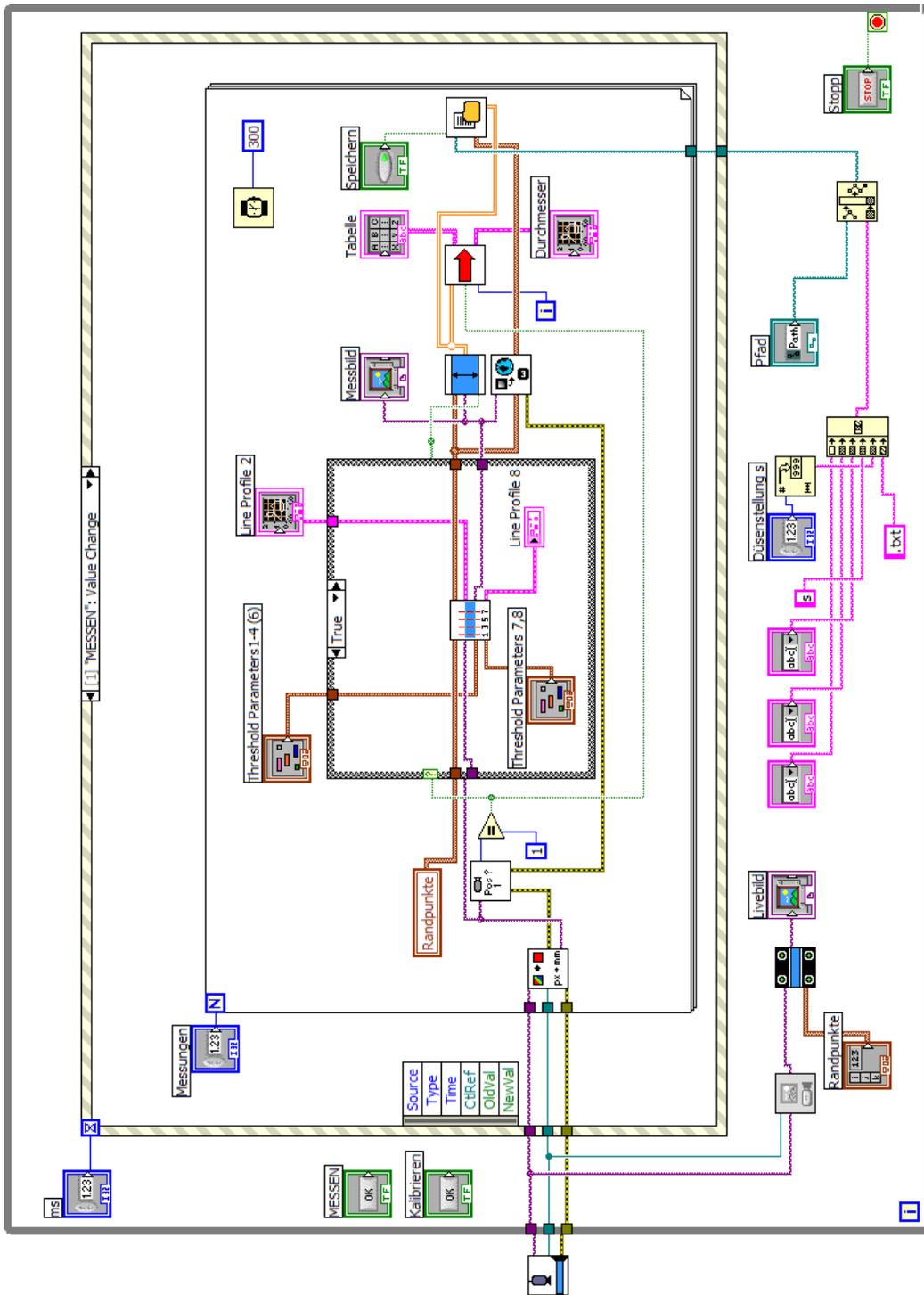
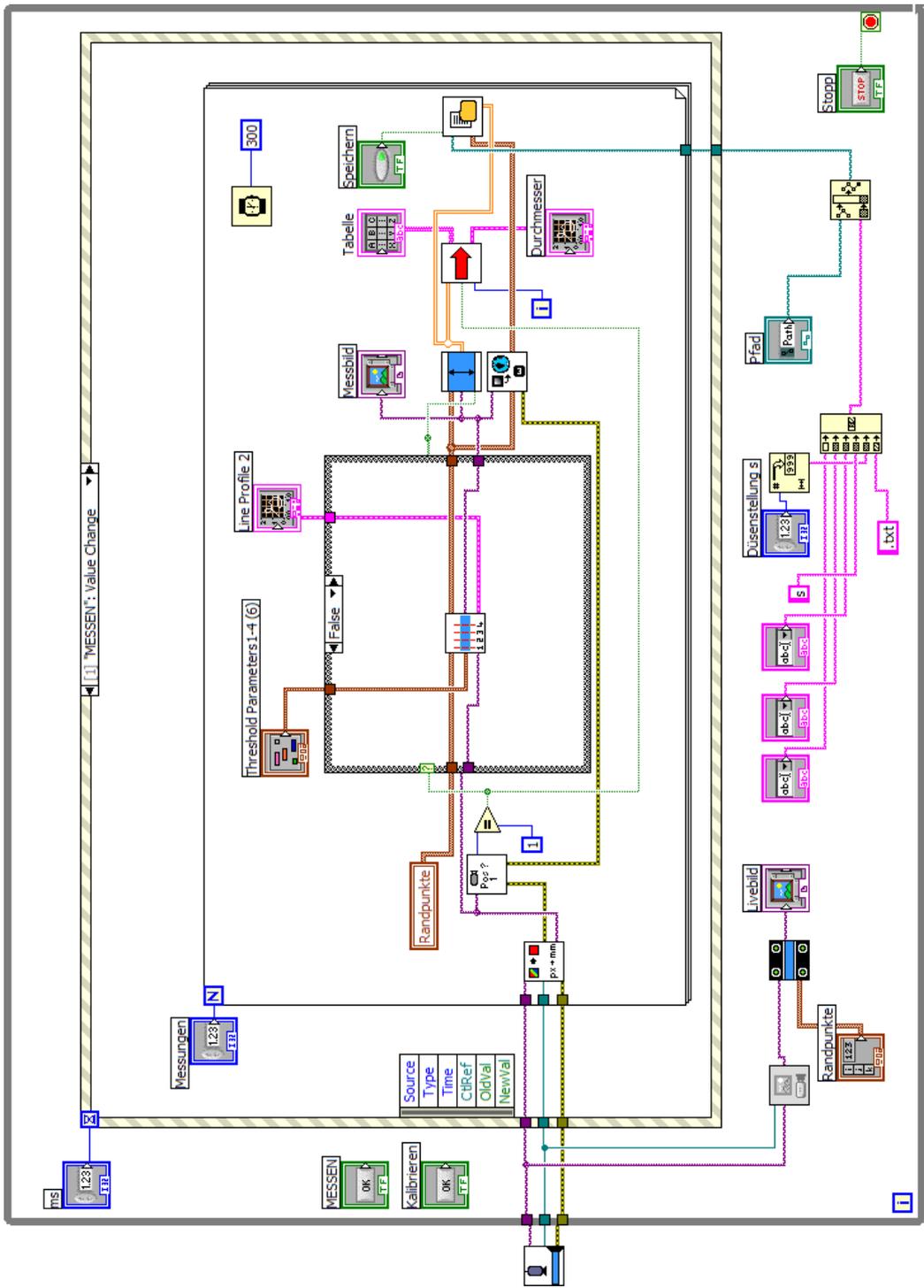


Abbildung C.4: Düsennadel N4

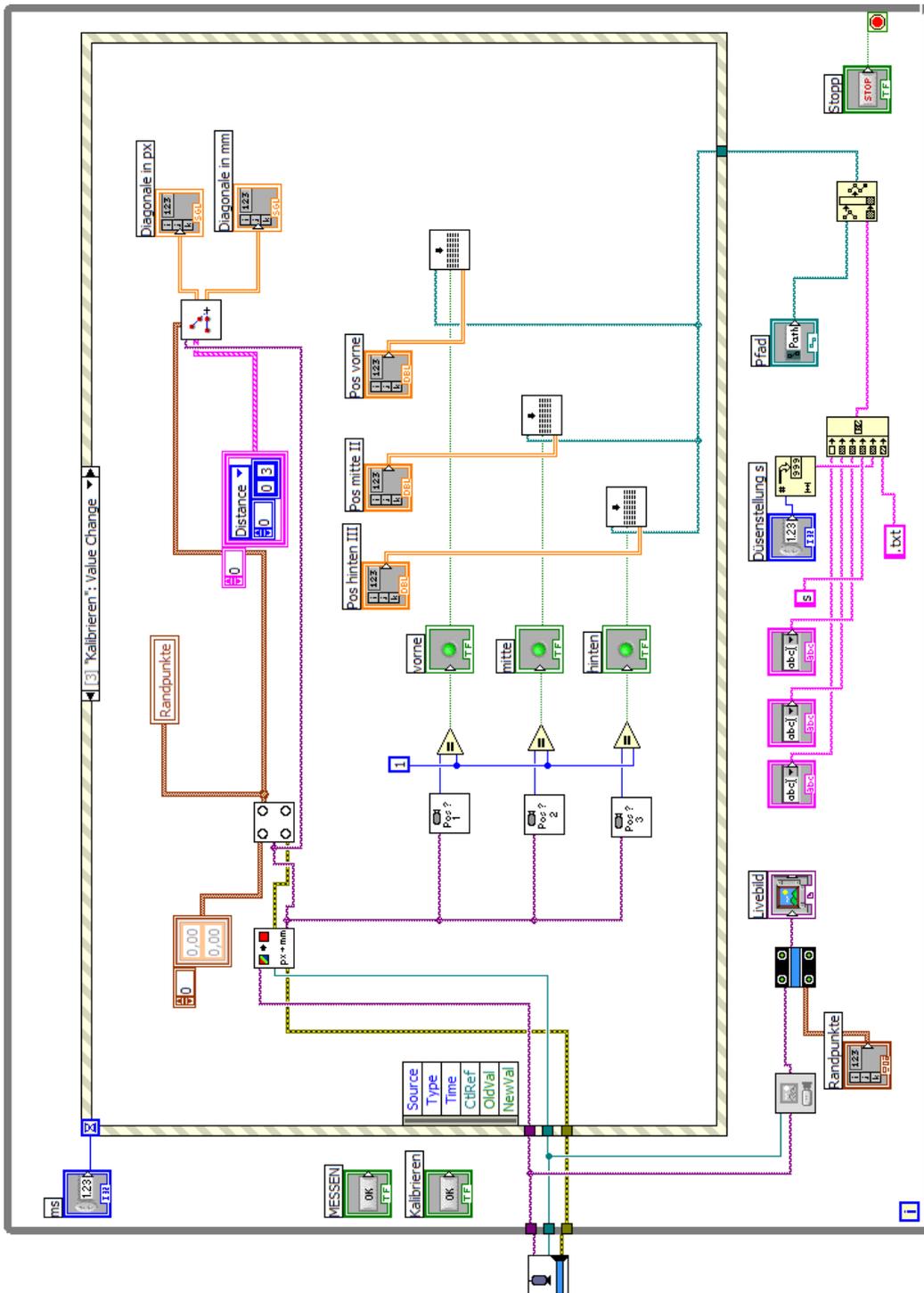
# Anhang D

## Messsoftware









# Anhang E

## Strahlkontur

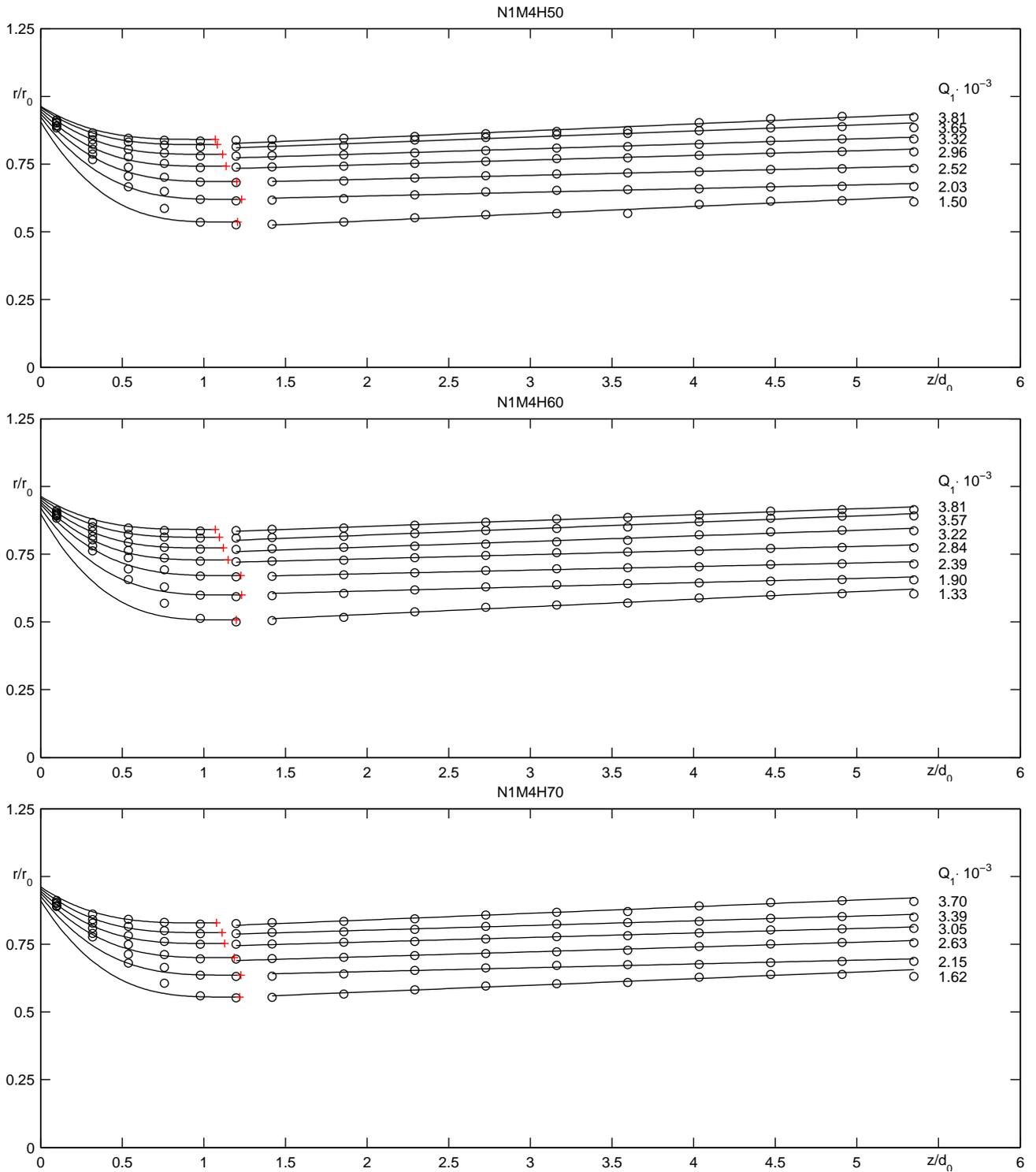


Abbildung E.1: Strahlkontur N1M4: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahlänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius, o ... Messpunkte

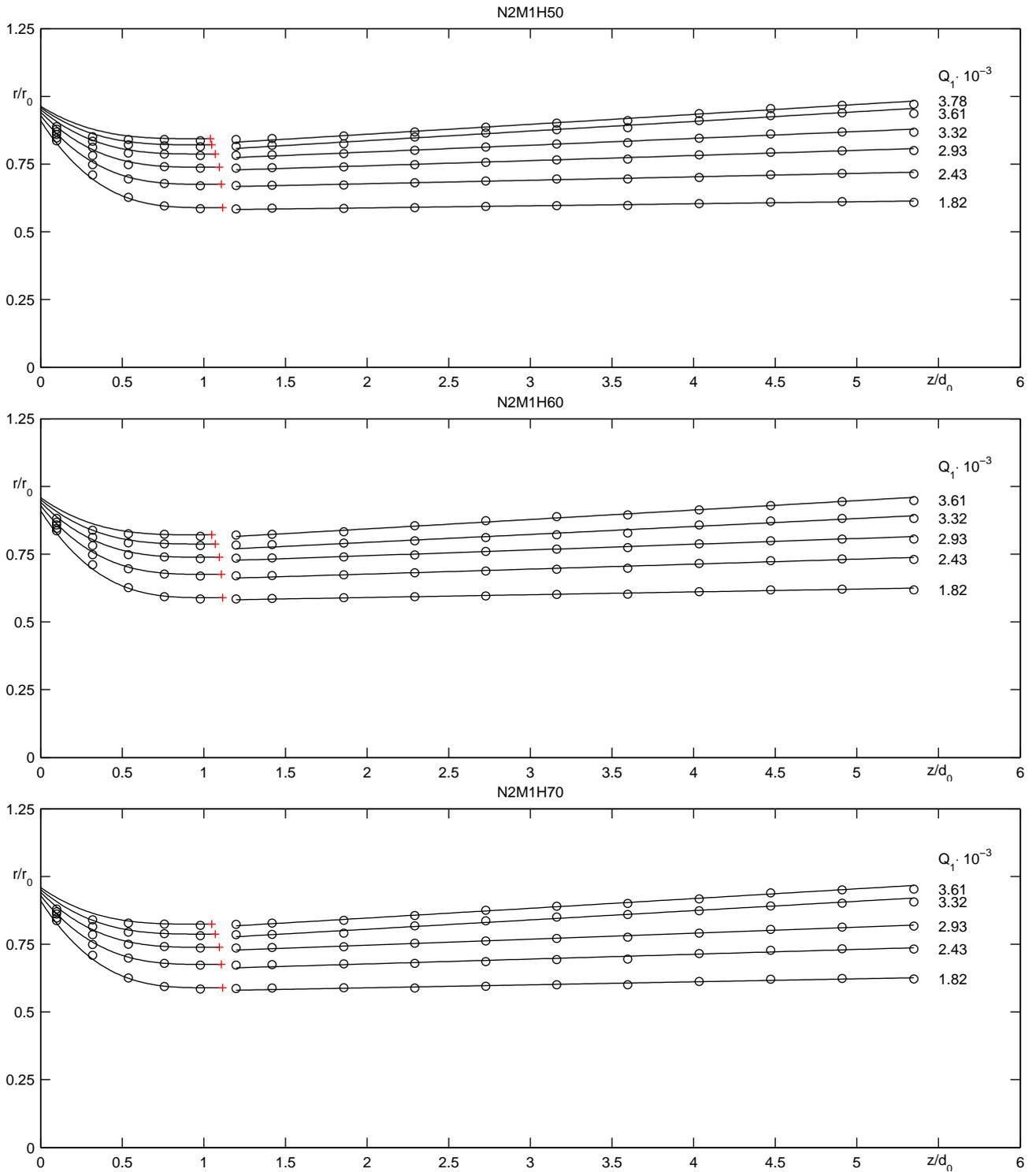


Abbildung E.2: Strahlkontur N2M1: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius,  $\circ$  ... Messpunkte

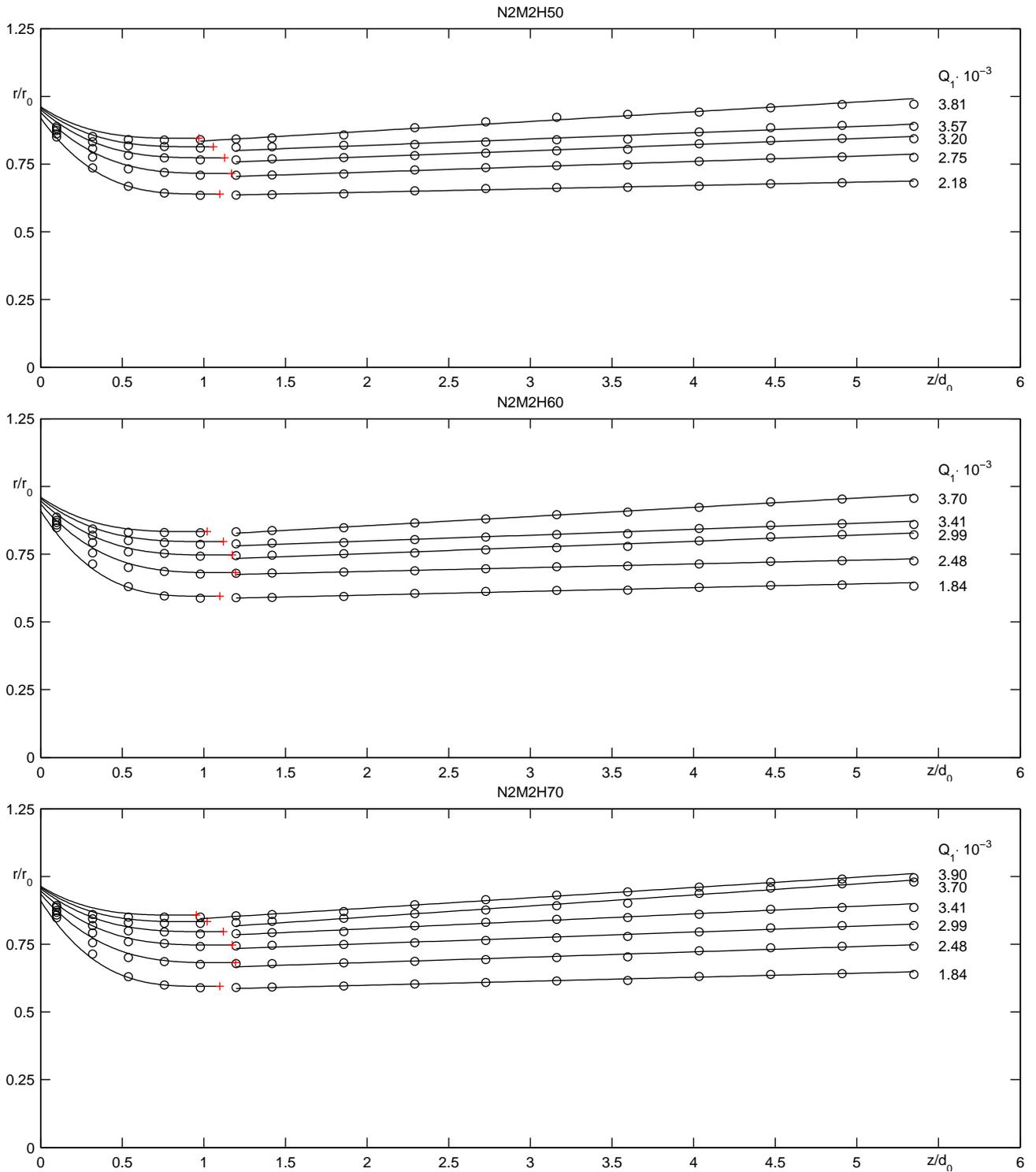


Abbildung E.3: Strahlkontur N2M2: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius, o ... Messpunkte

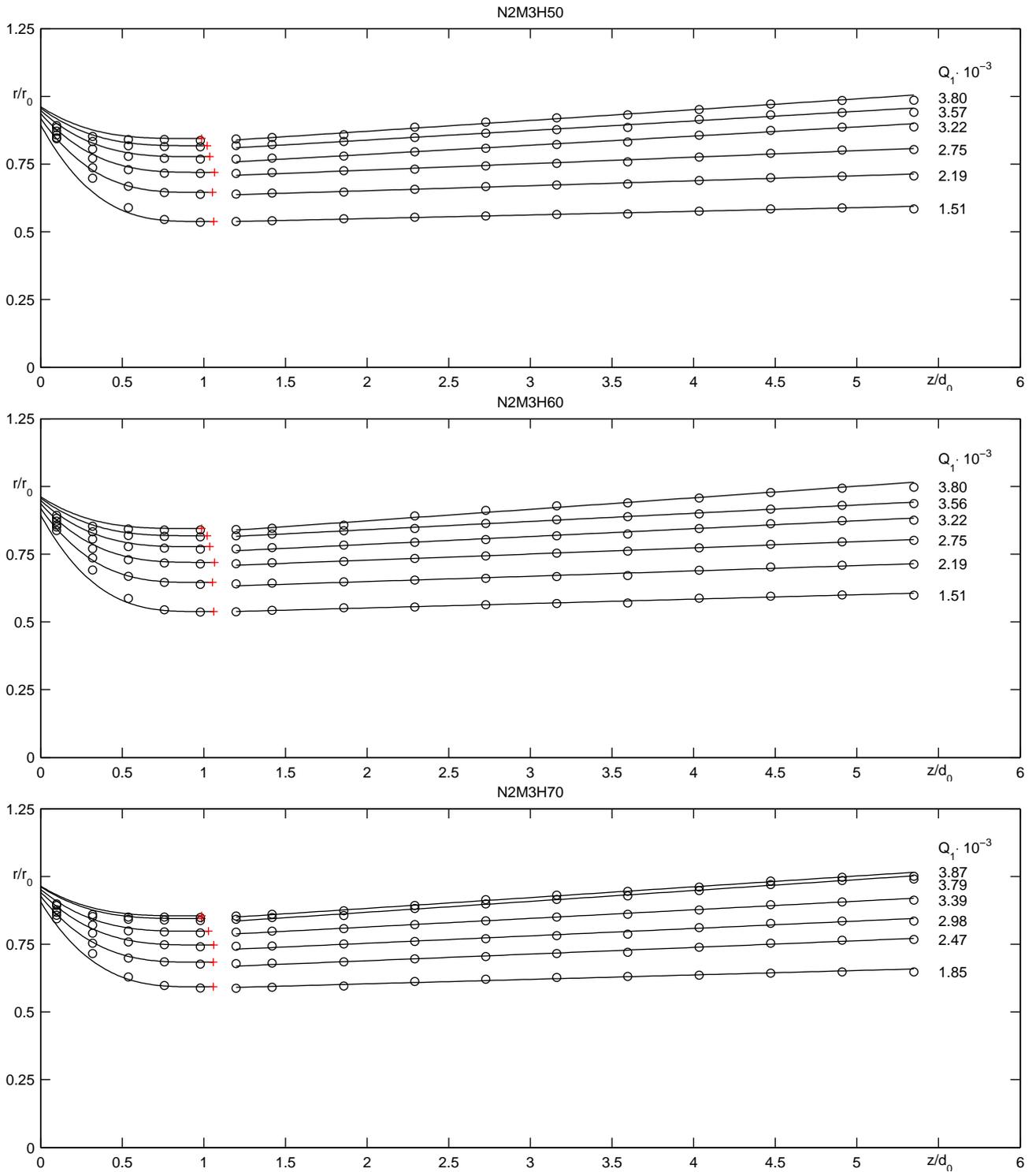


Abbildung E.4: Strahlkontur N2M1: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius,  $\circ$  ... Messpunkte

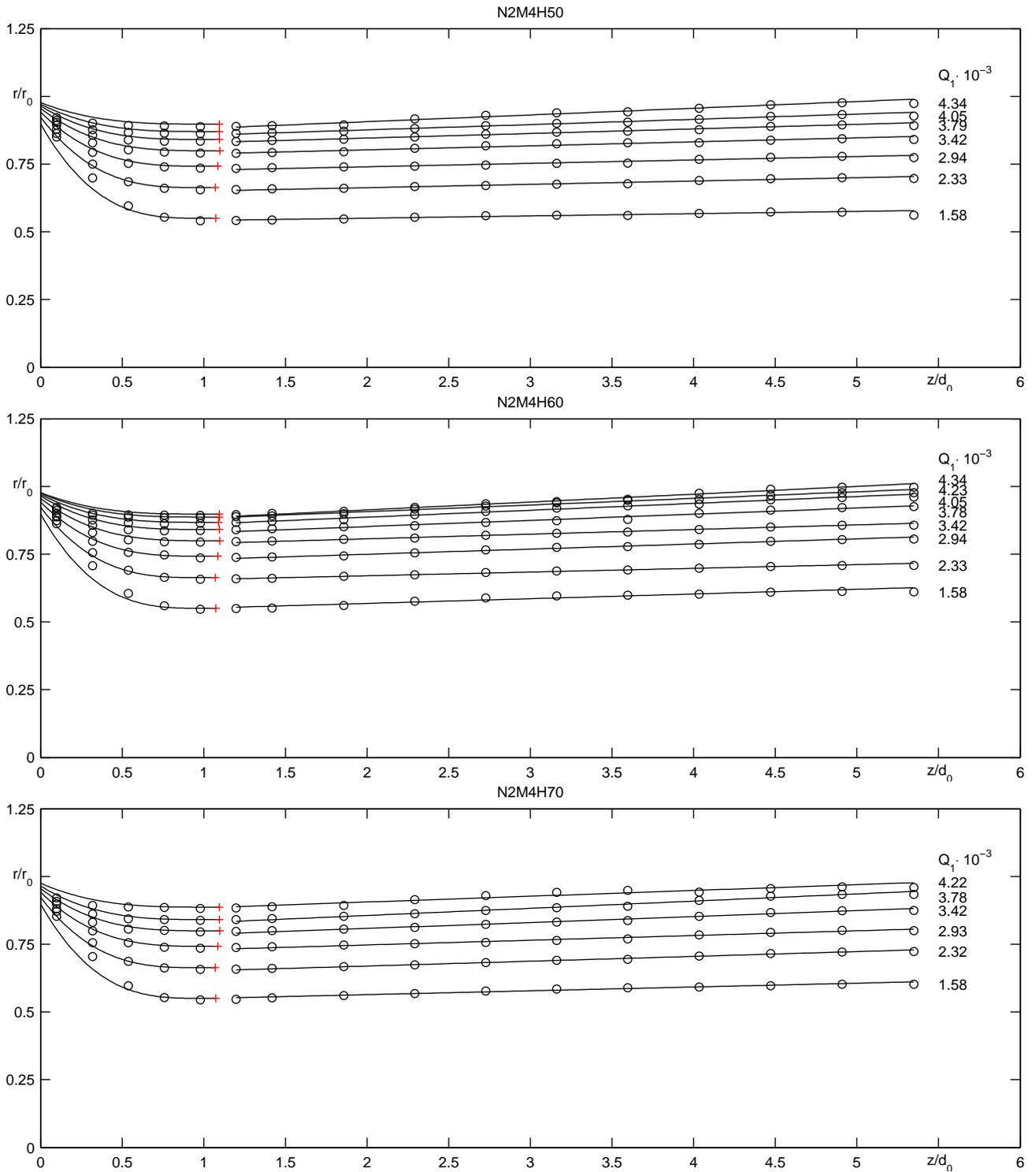


Abbildung E.5: Strahlkontur N2M4: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius, o ... Messpunkte

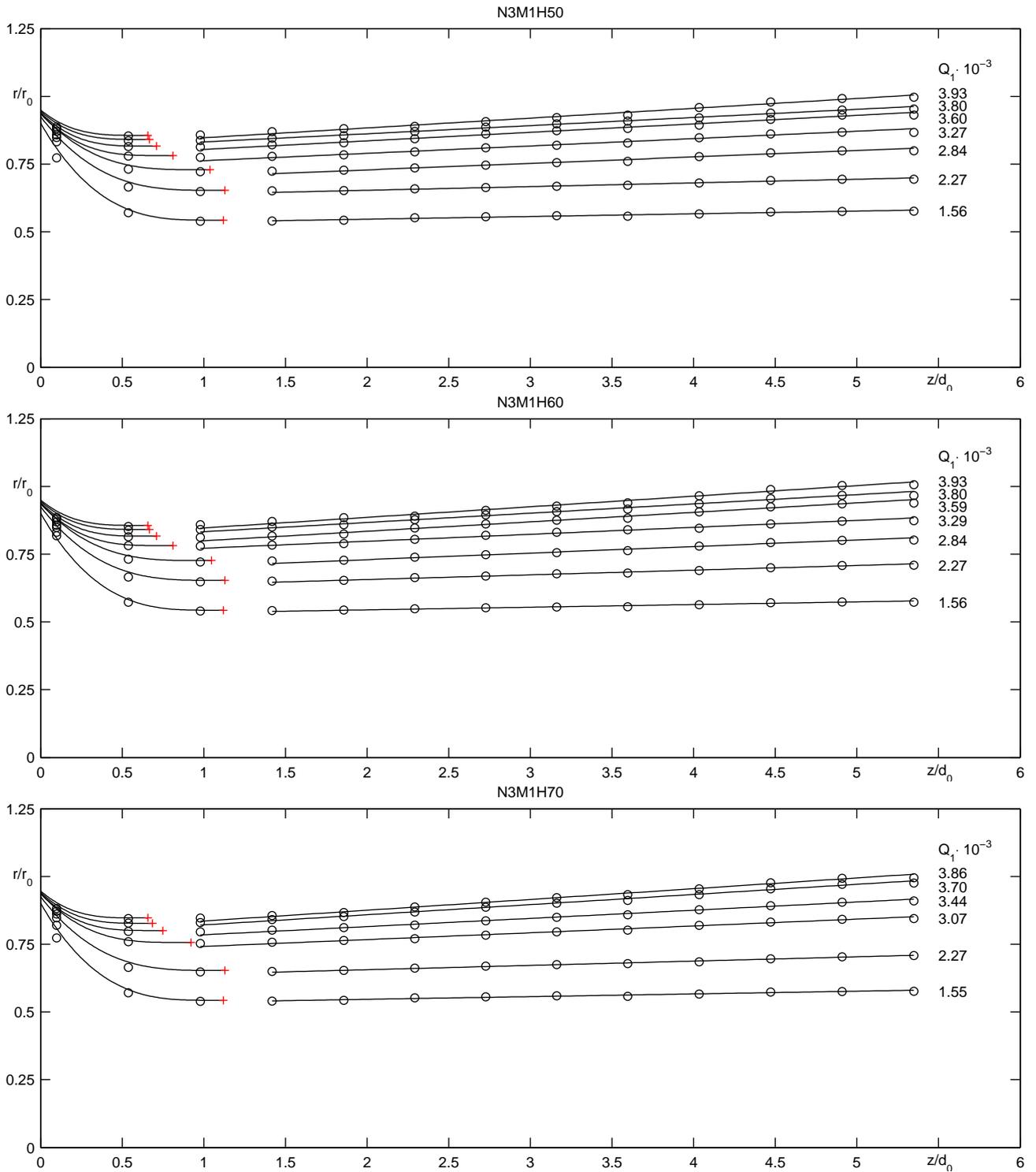


Abbildung E.6: Strahlkontur N3M1: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius, o ... Messpunkte

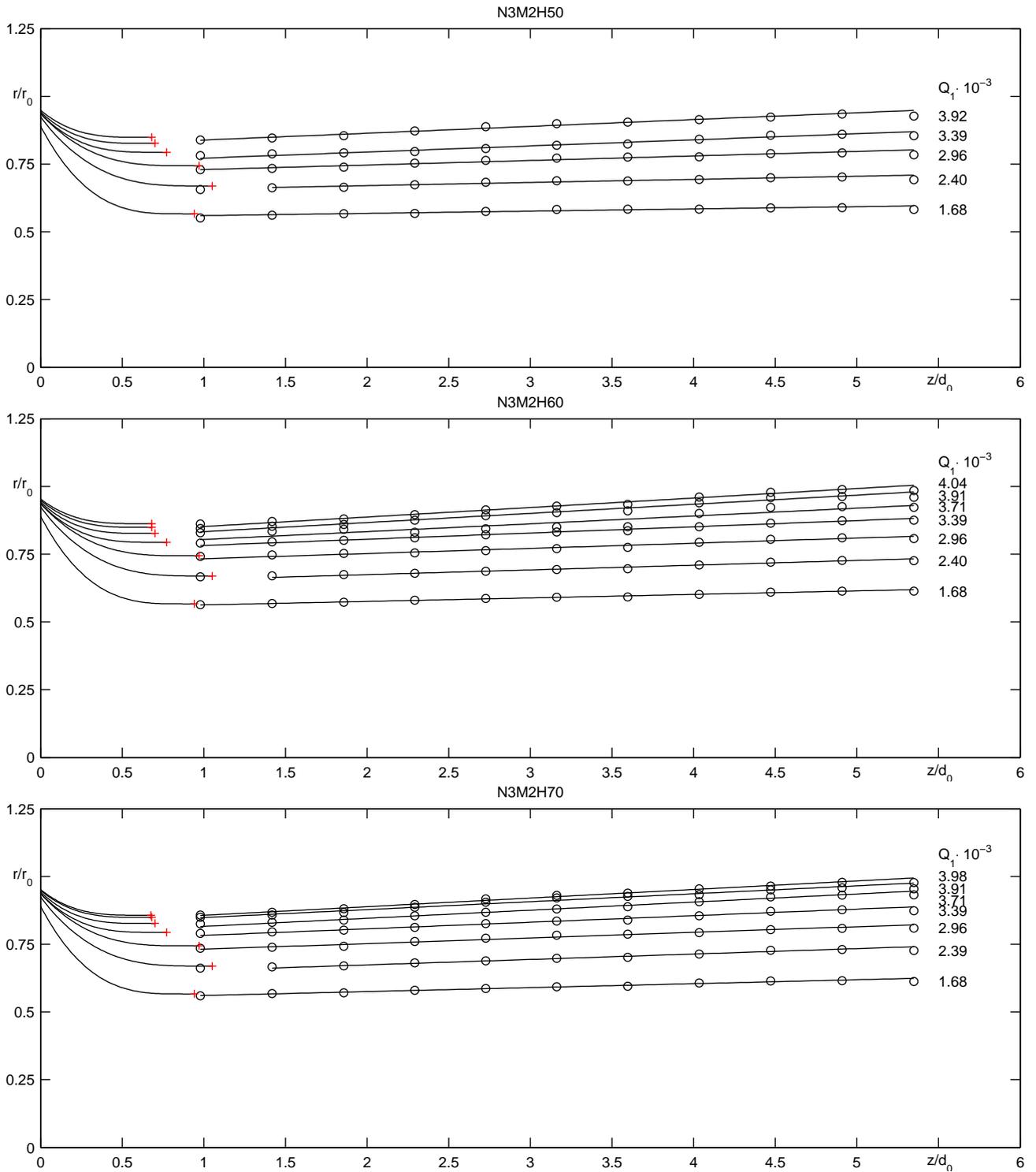


Abbildung E.7: Strahlkontur N3M2: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius,  $\circ$  ... Messpunkte

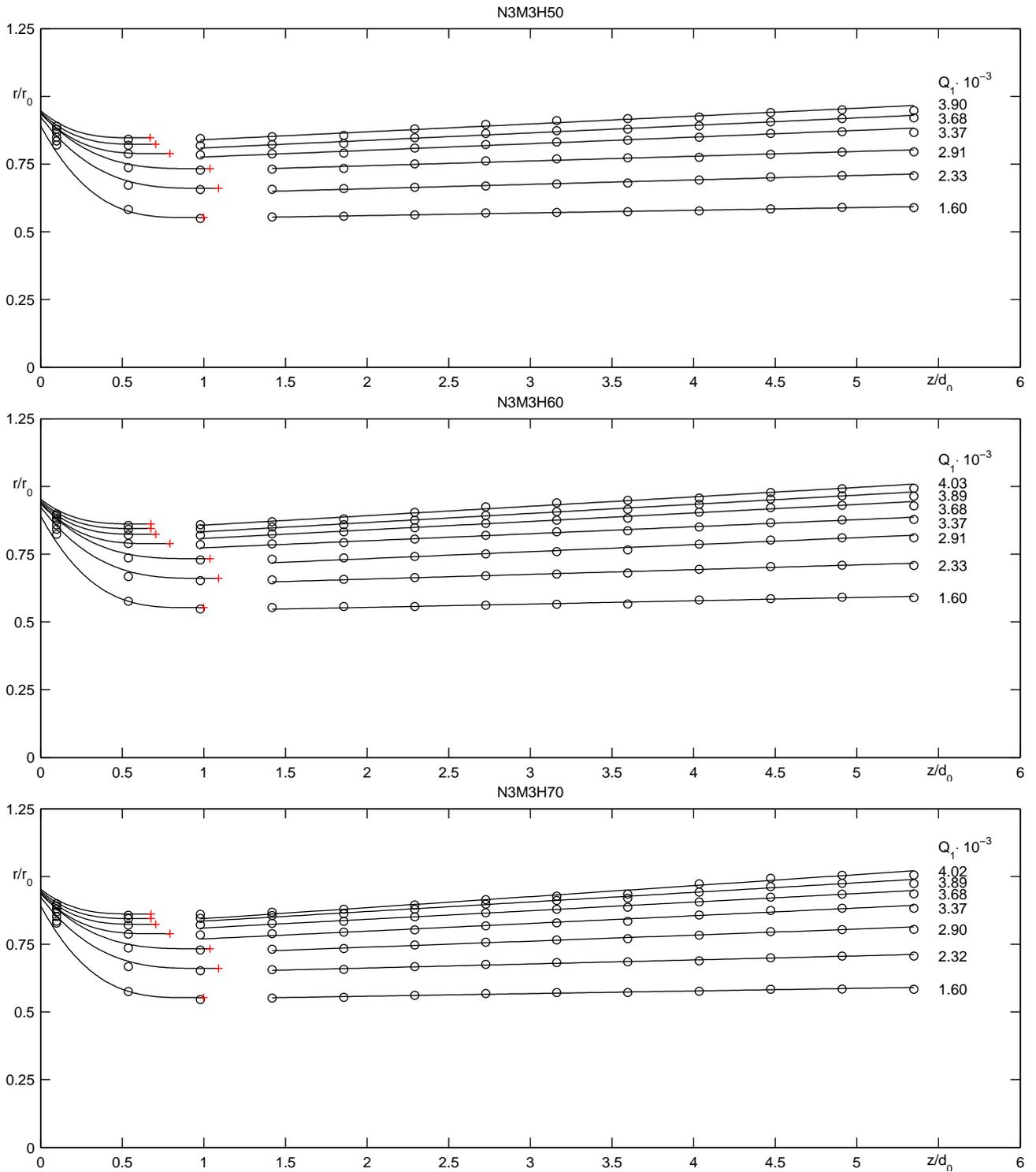


Abbildung E.8: Strahlkontur N3M3: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius, o ... Messpunkte

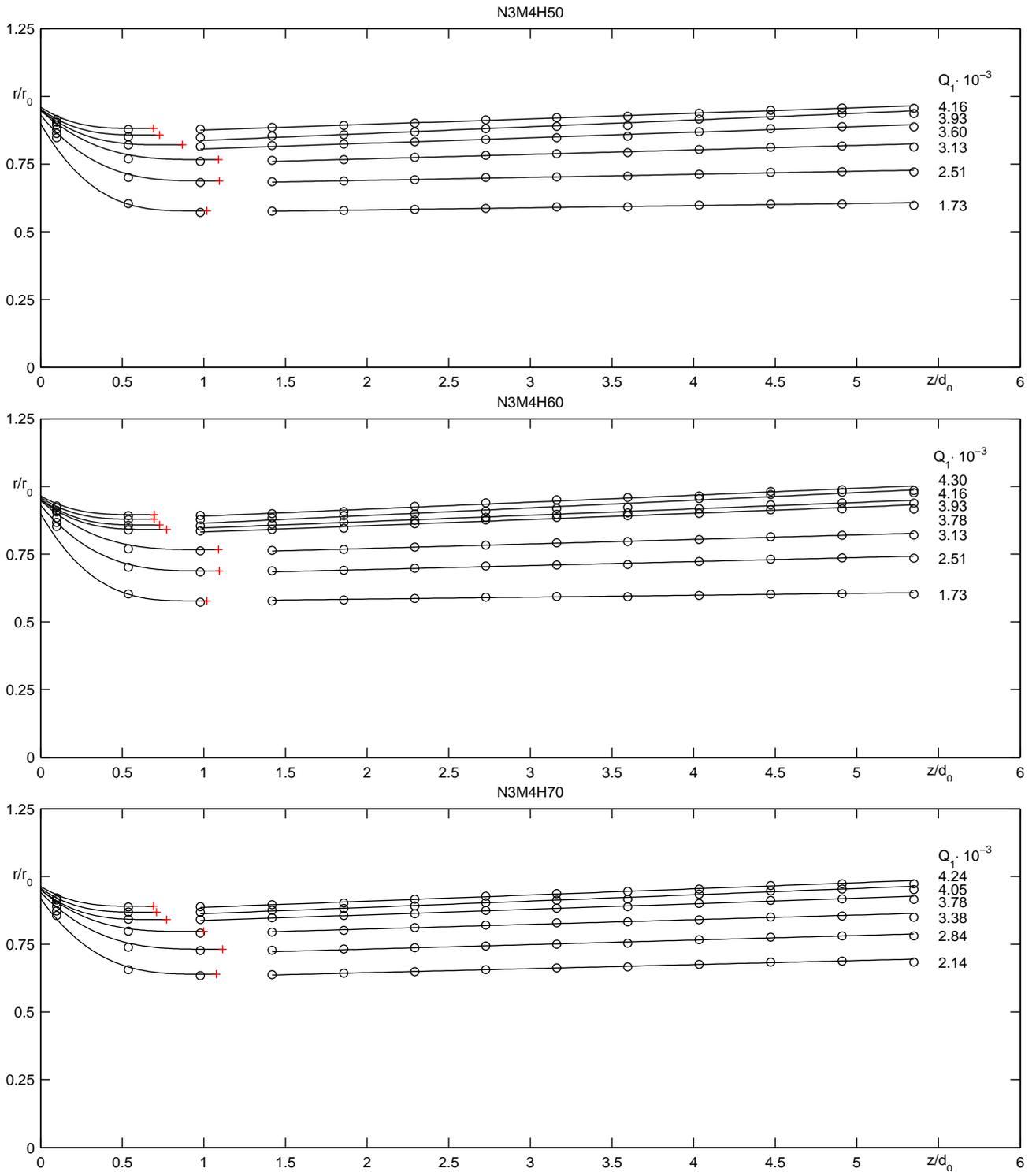


Abbildung E.9: Strahlkontur N3M4: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius, o ... Messpunkte

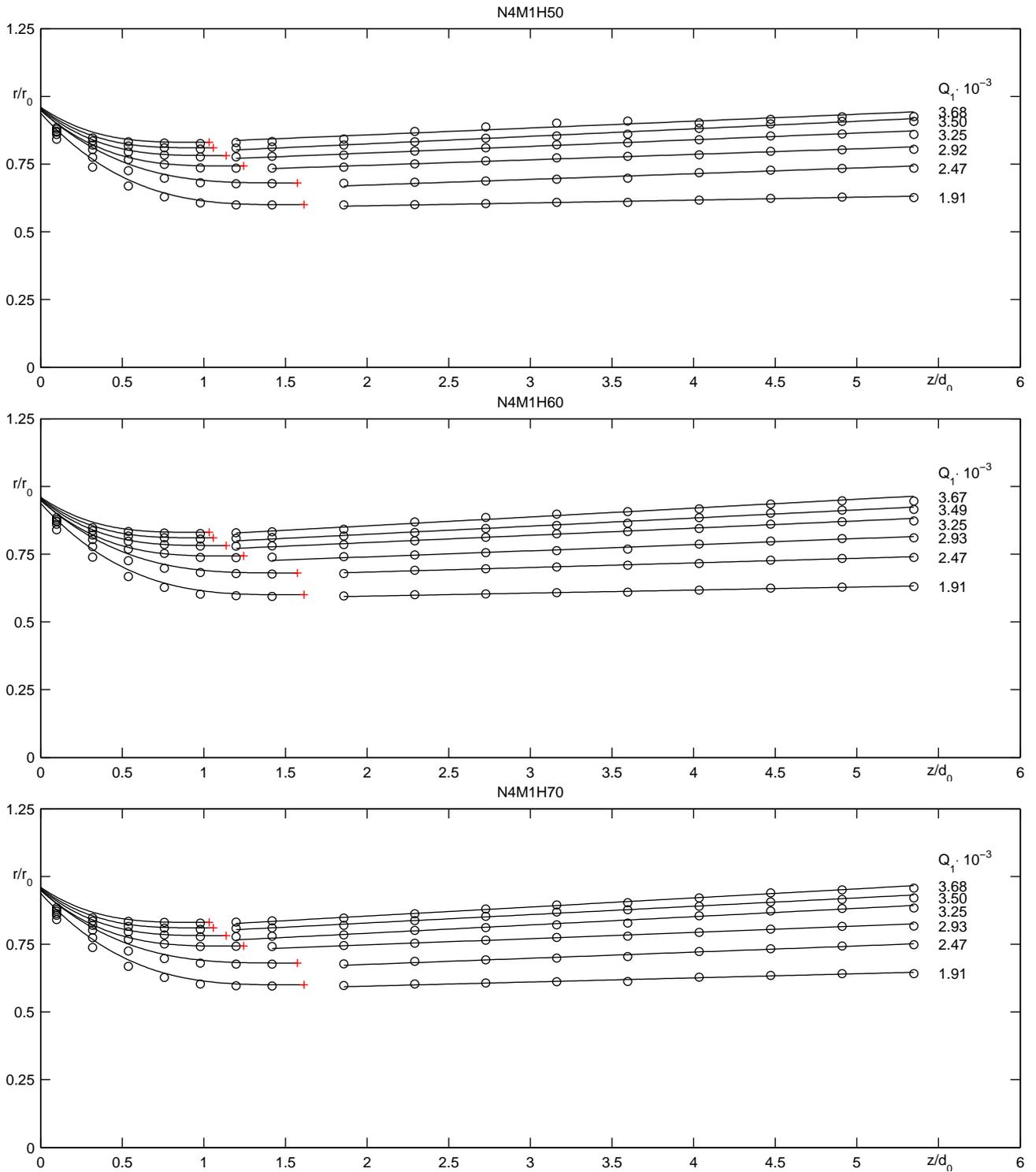


Abbildung E.10: Strahlkontur N4M1: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius, o ... Messpunkte

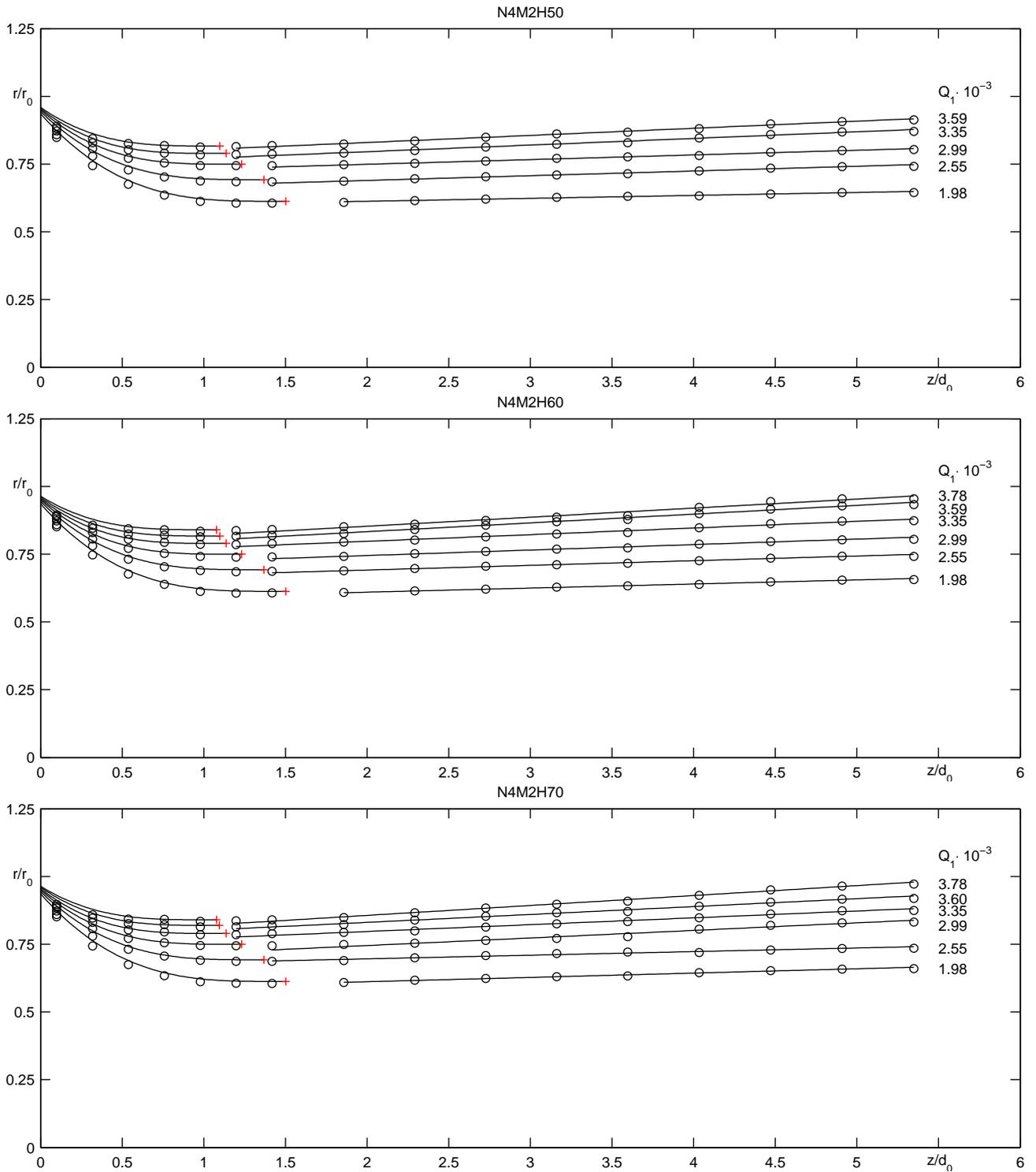


Abbildung E.11: Strahlkontur N4M2: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius, o ... Messpunkte

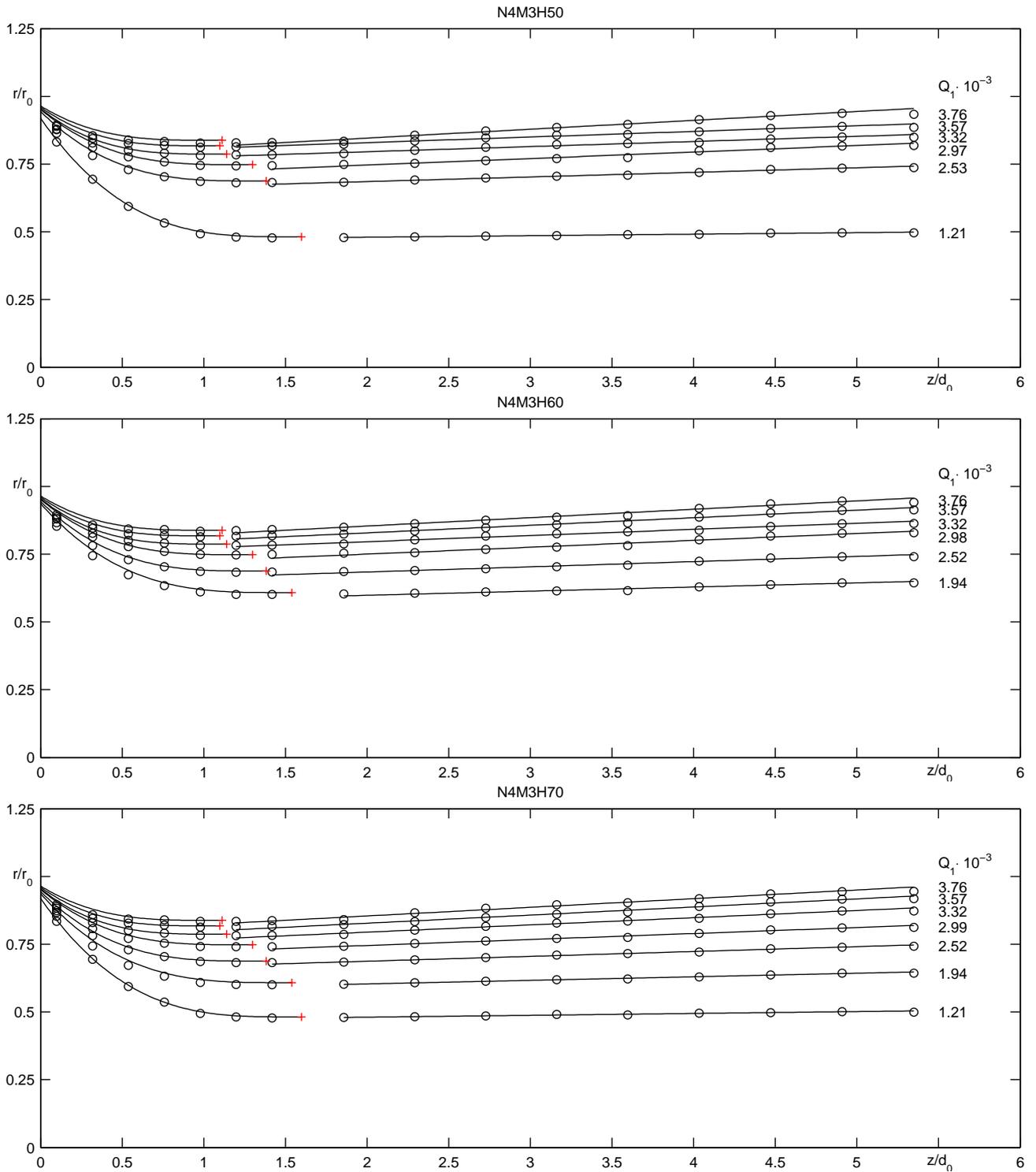


Abbildung E.12: Strahlkontur N4M3: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius, o ... Messpunkte

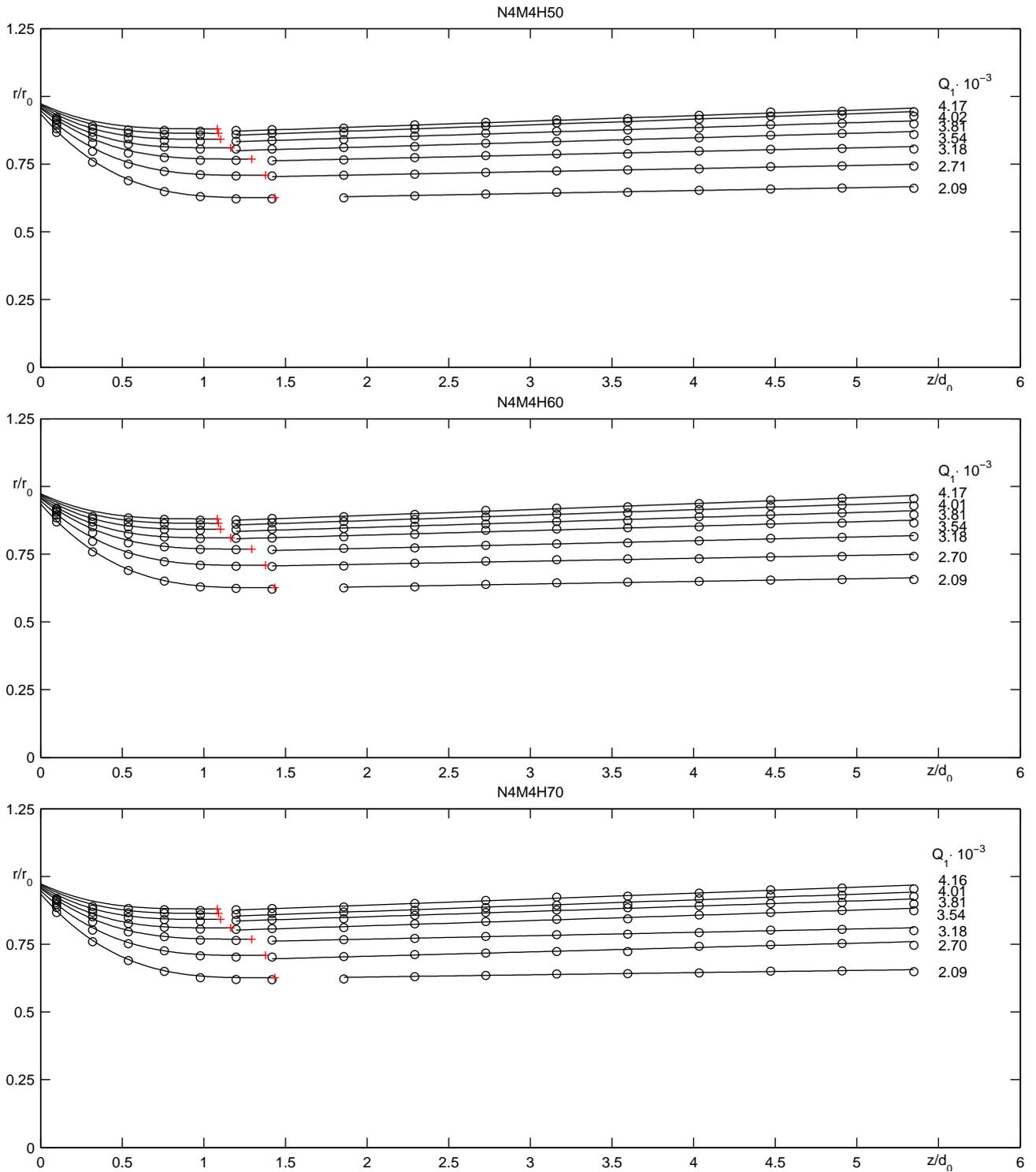


Abbildung E.13: Strahlkontur N4M4: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius, o ... Messpunkte

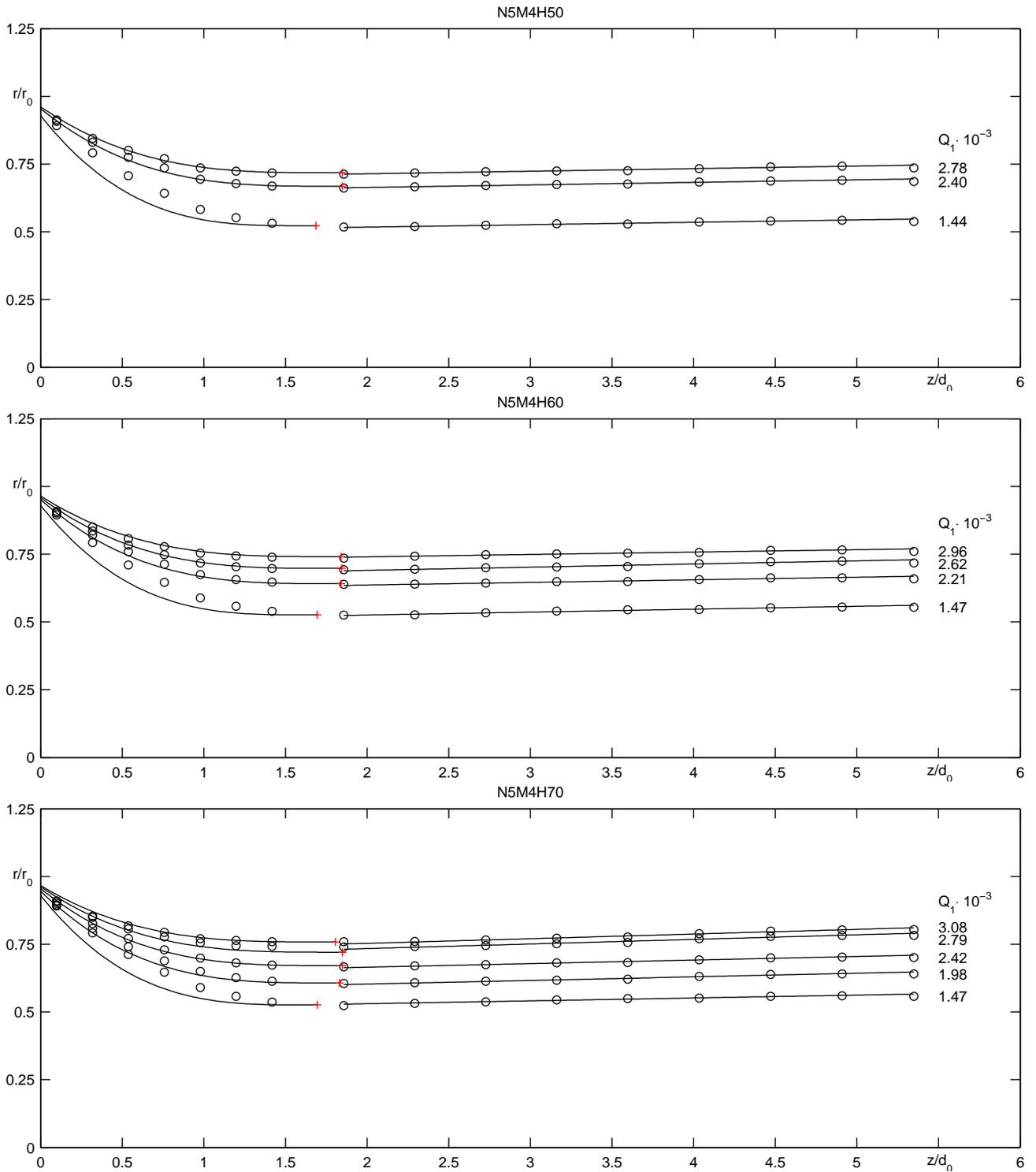


Abbildung E.14: Strahlkontur N5M4: bezogener Strahlradius  $r/r_0$  über der bezogenen Strahllänge  $z/d_0$ . + ... minimaler Strahlradius, o ... Messpunkte

# Anhang F

## Laufradmessung - Muscheldiagramme

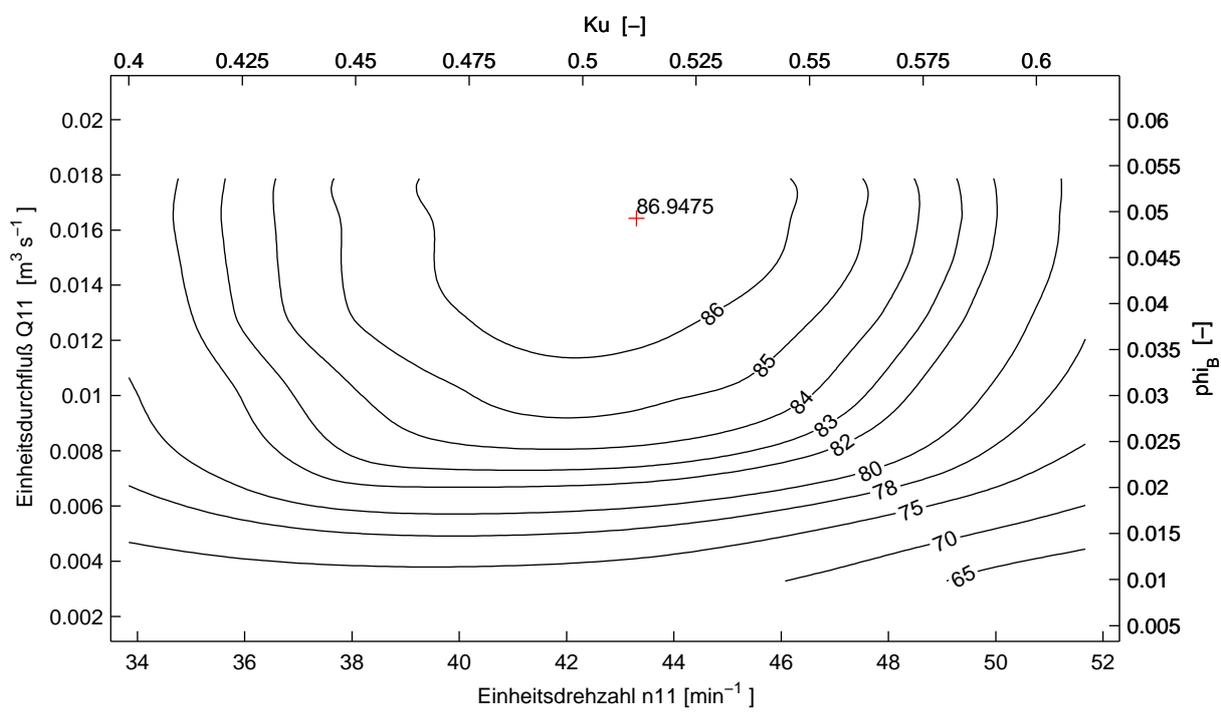
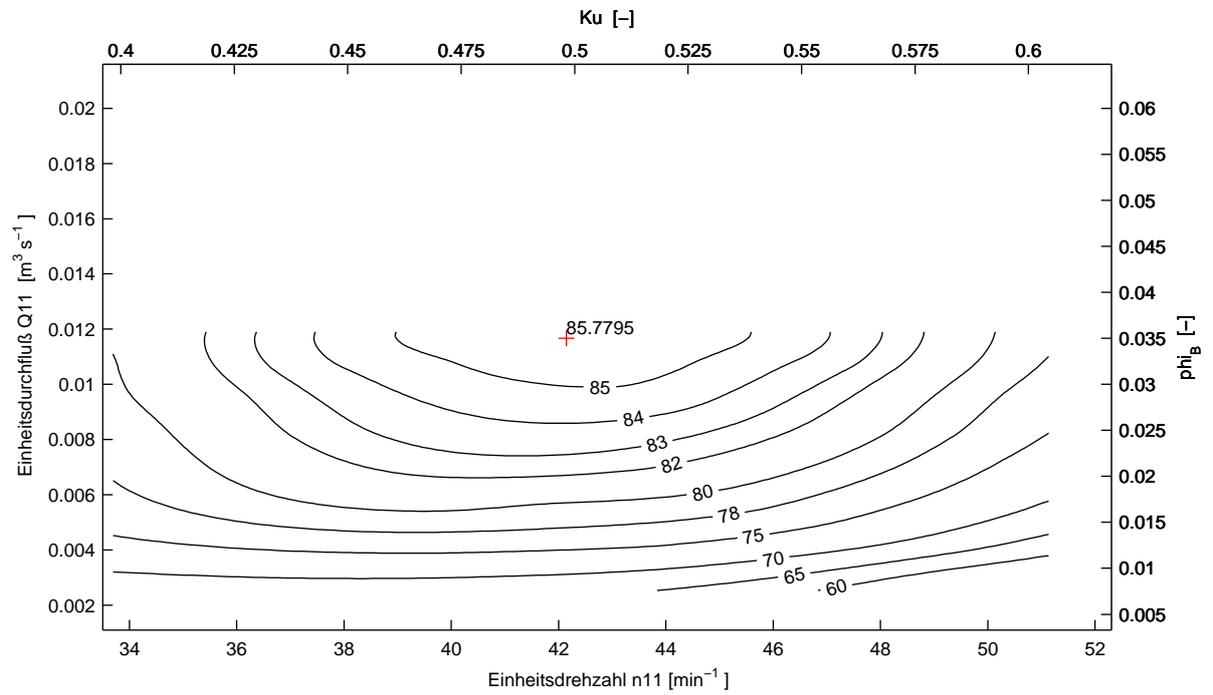


Abbildung F.1: oben: N1M4H80, unten: N2M1H50

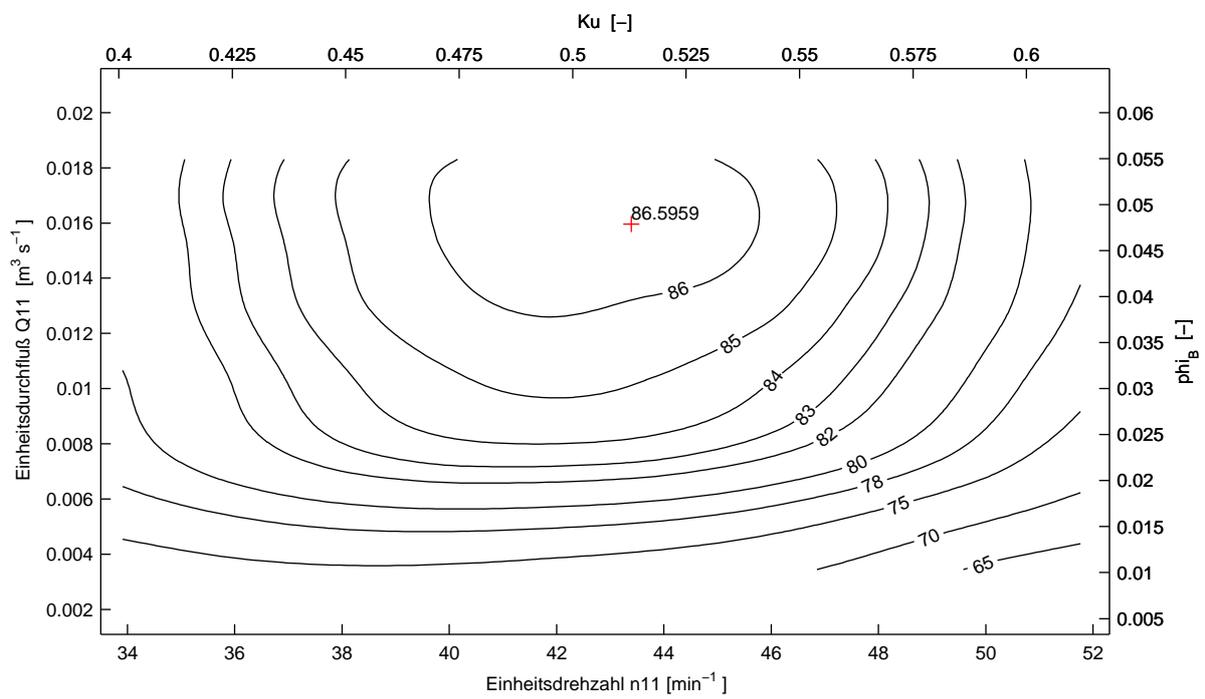
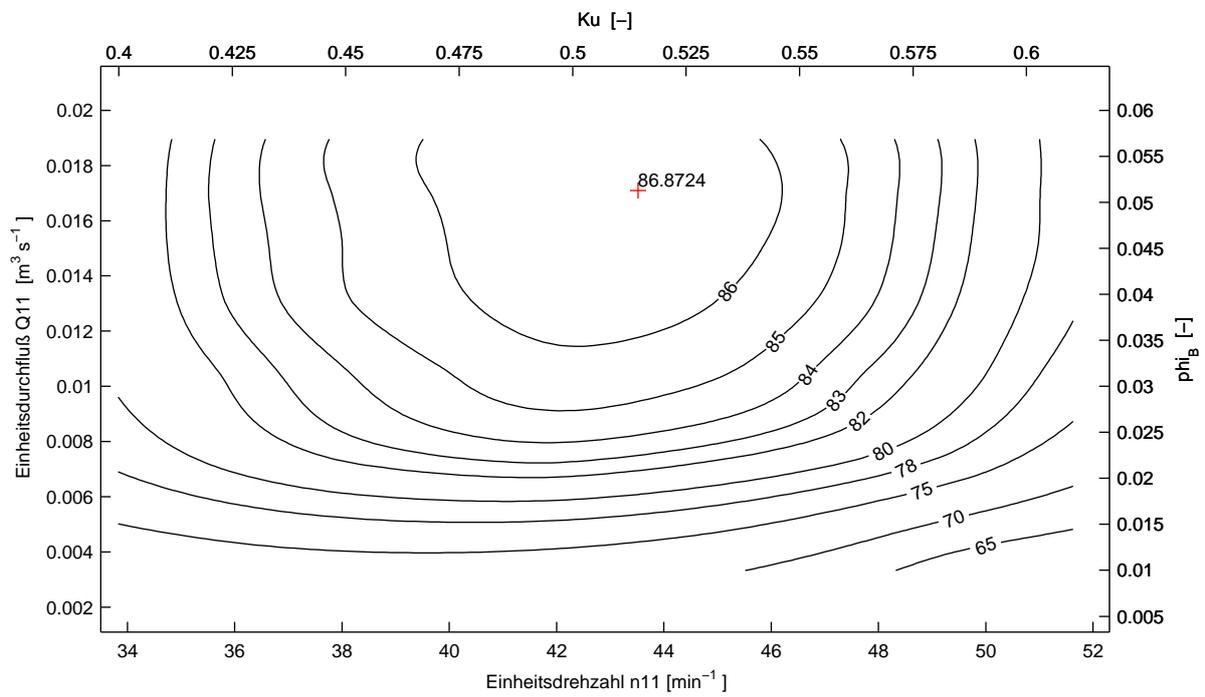


Abbildung F.2: oben: N2M2H50, unten: N2M3H50

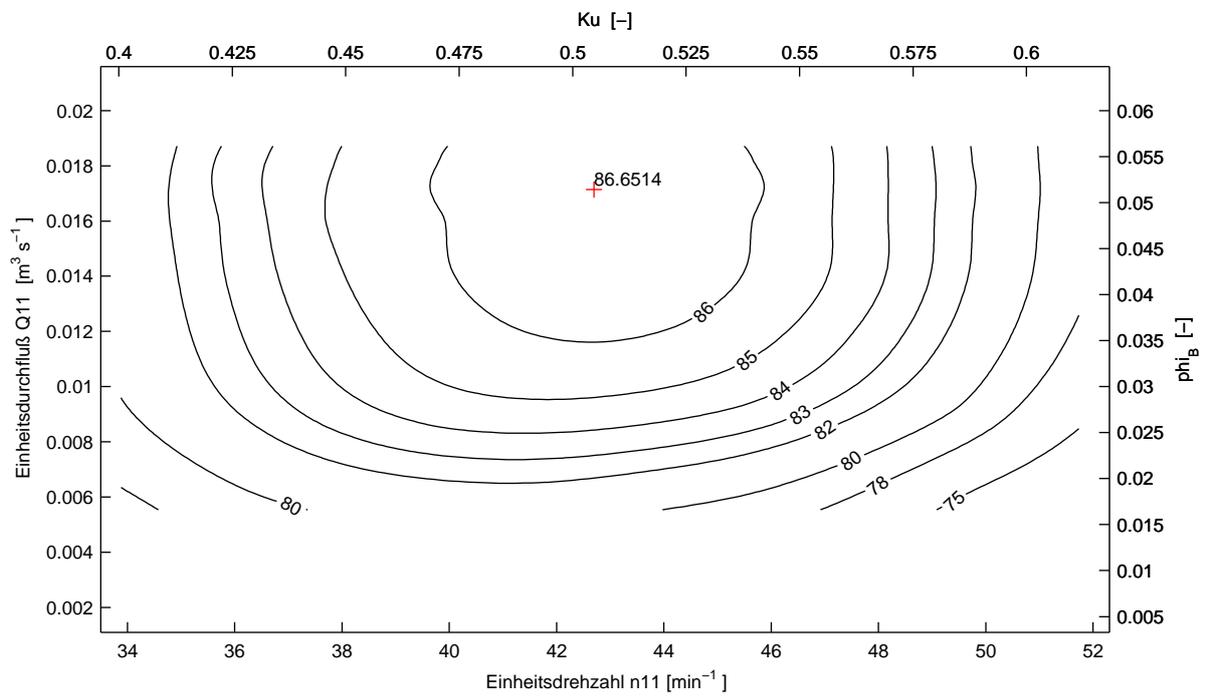
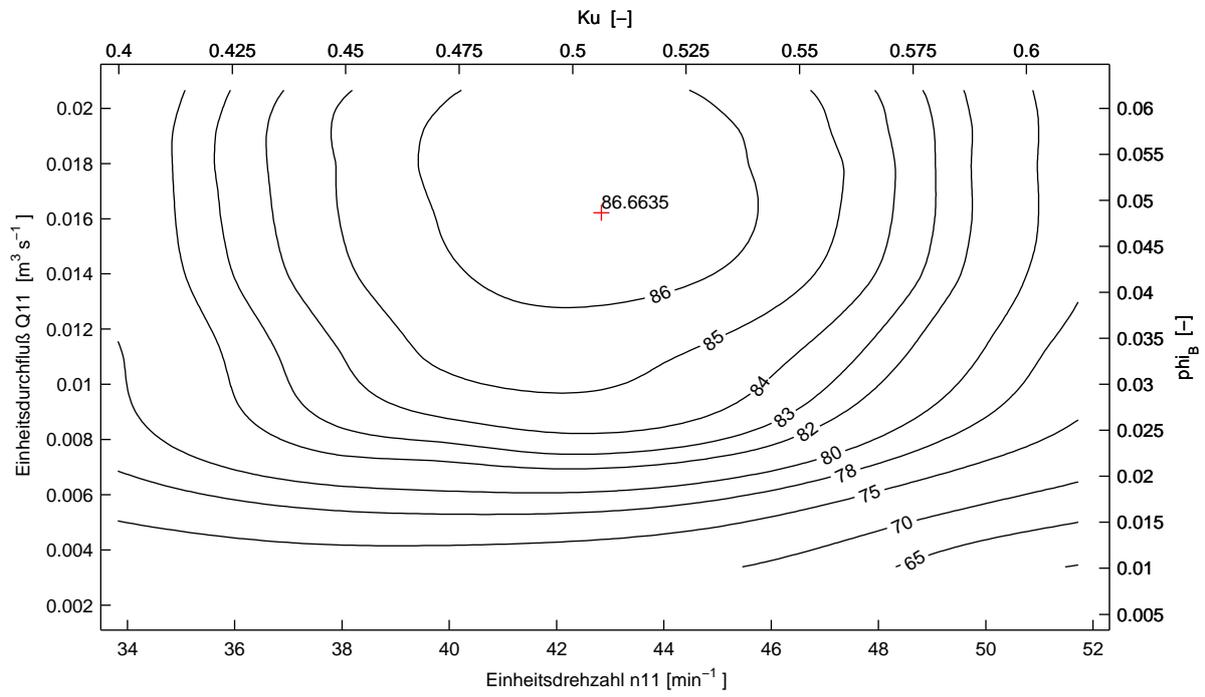


Abbildung F.3: oben: N2M4H50, unten: N3M1H50

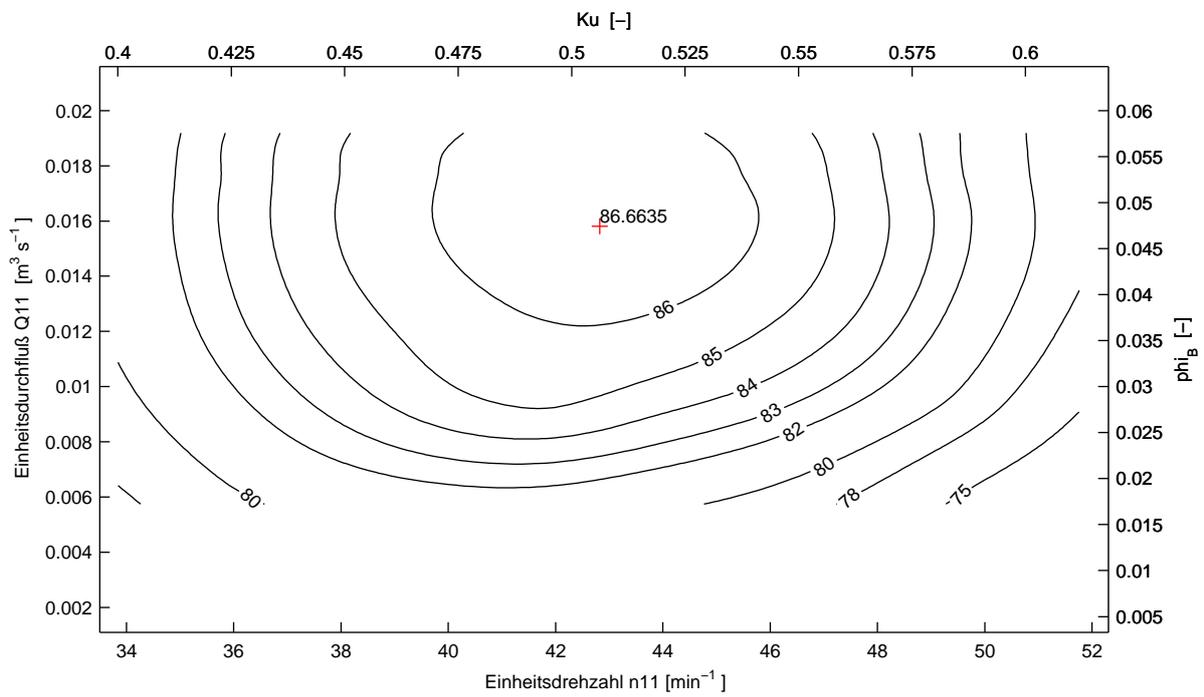
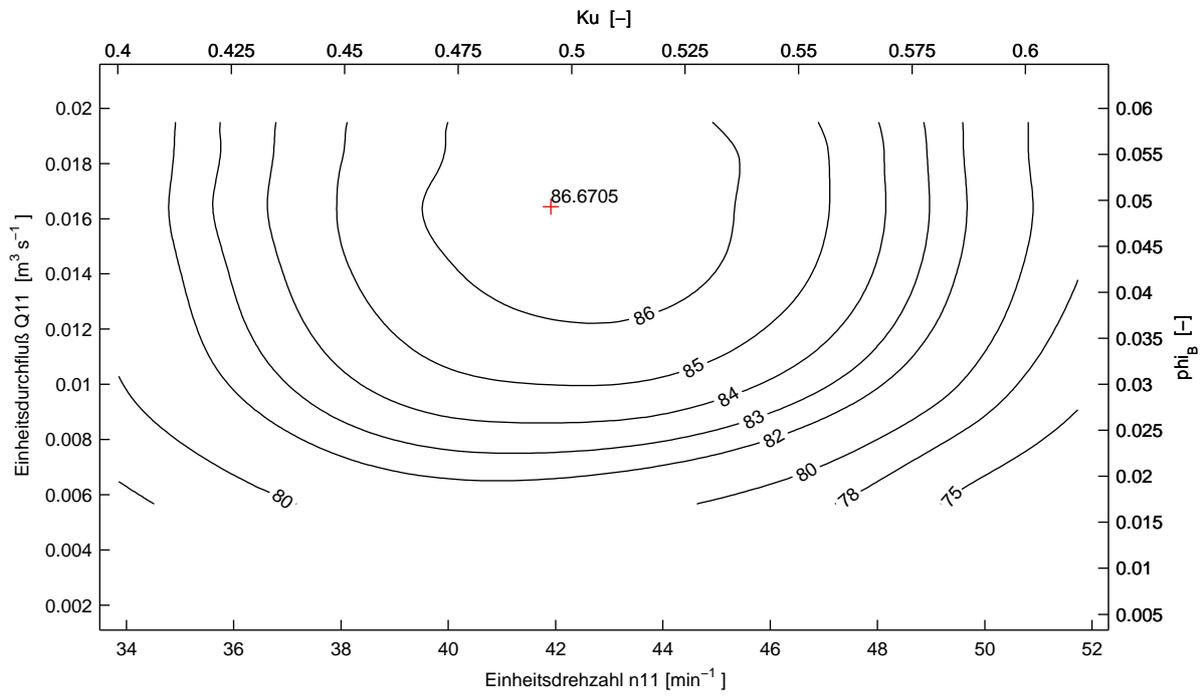


Abbildung F.4: oben: N3M2H50, unten: N3M3H50

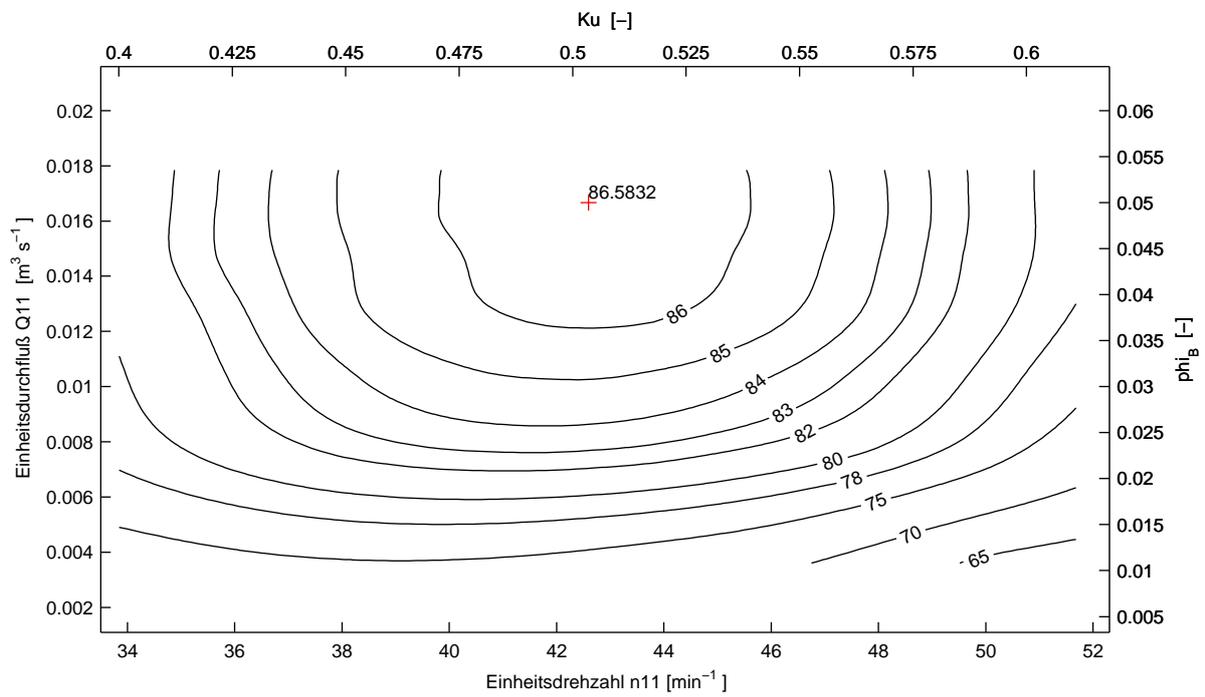
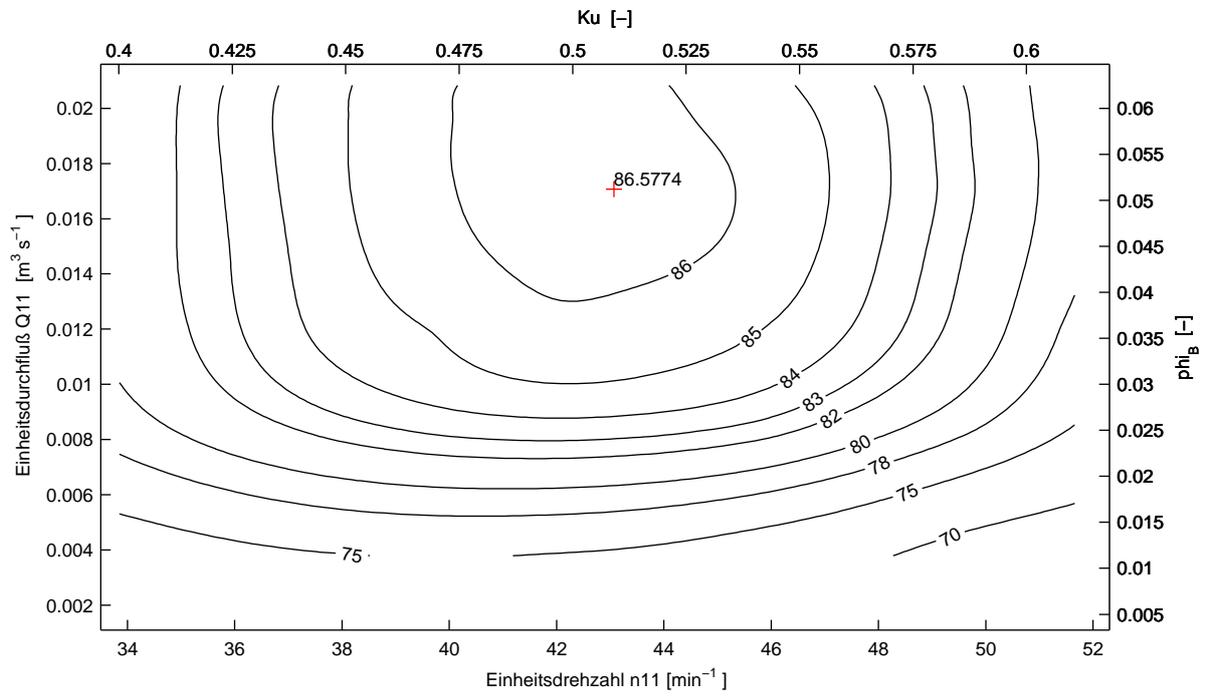


Abbildung F.5: oben: N3M4H50, unten: N4M1H50

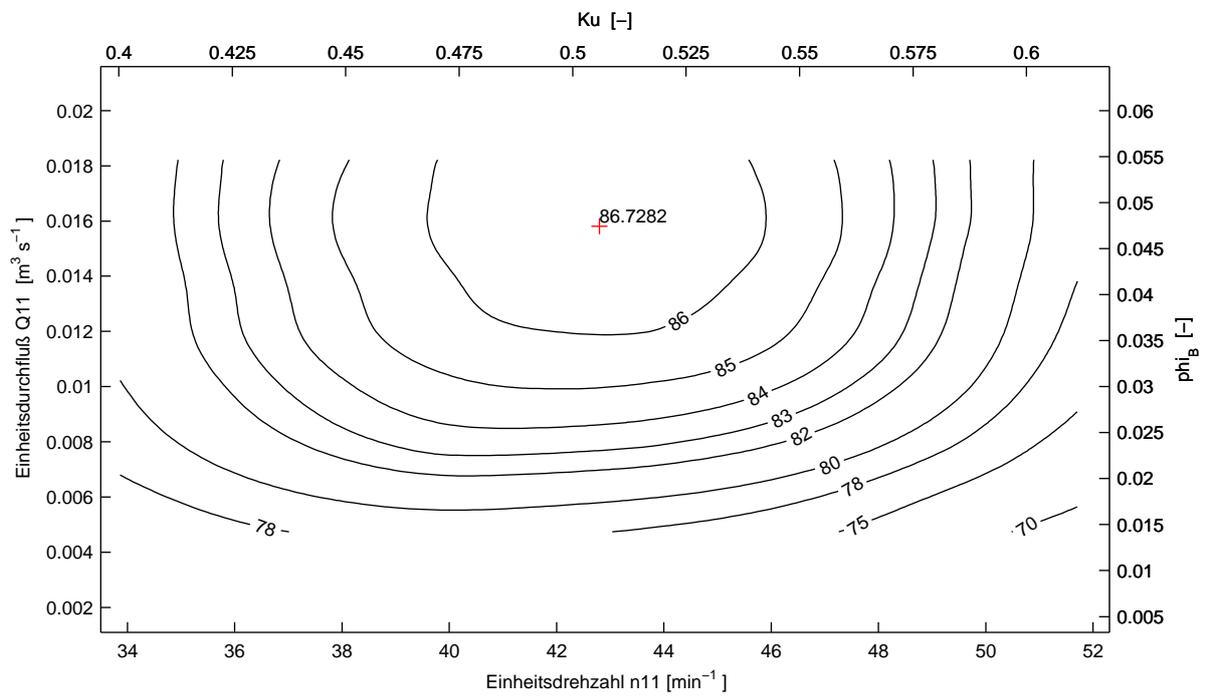
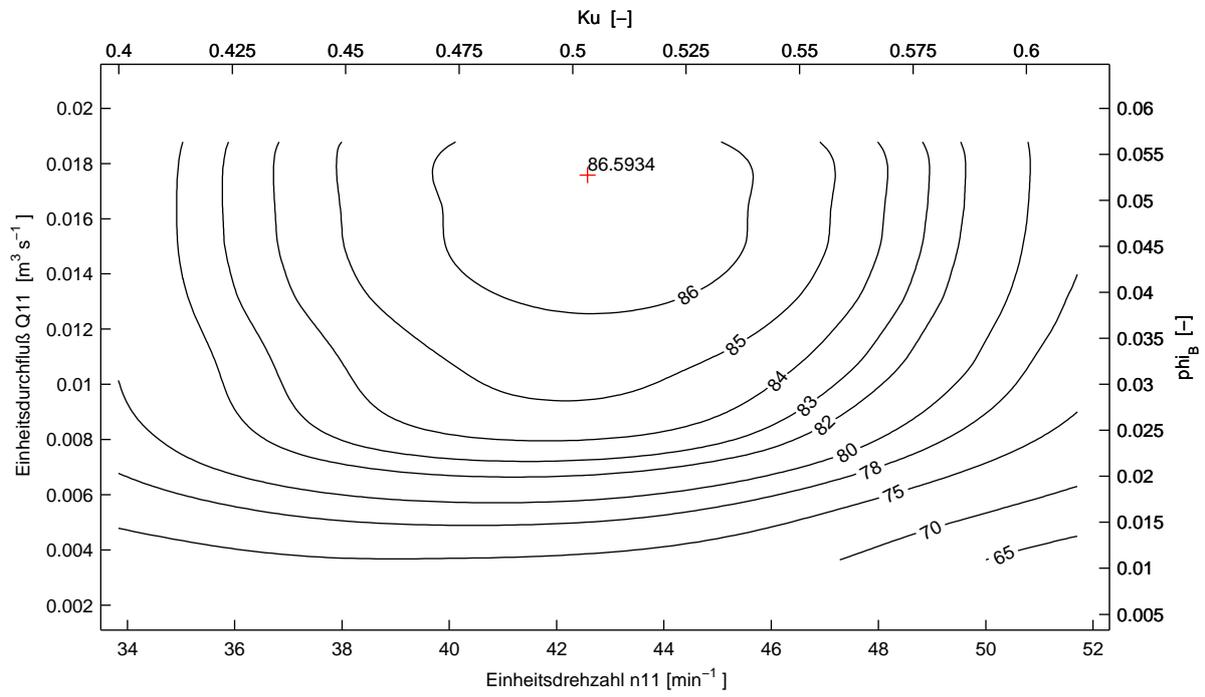


Abbildung F.6: oben: N4M2H50, unten: N4M3H50

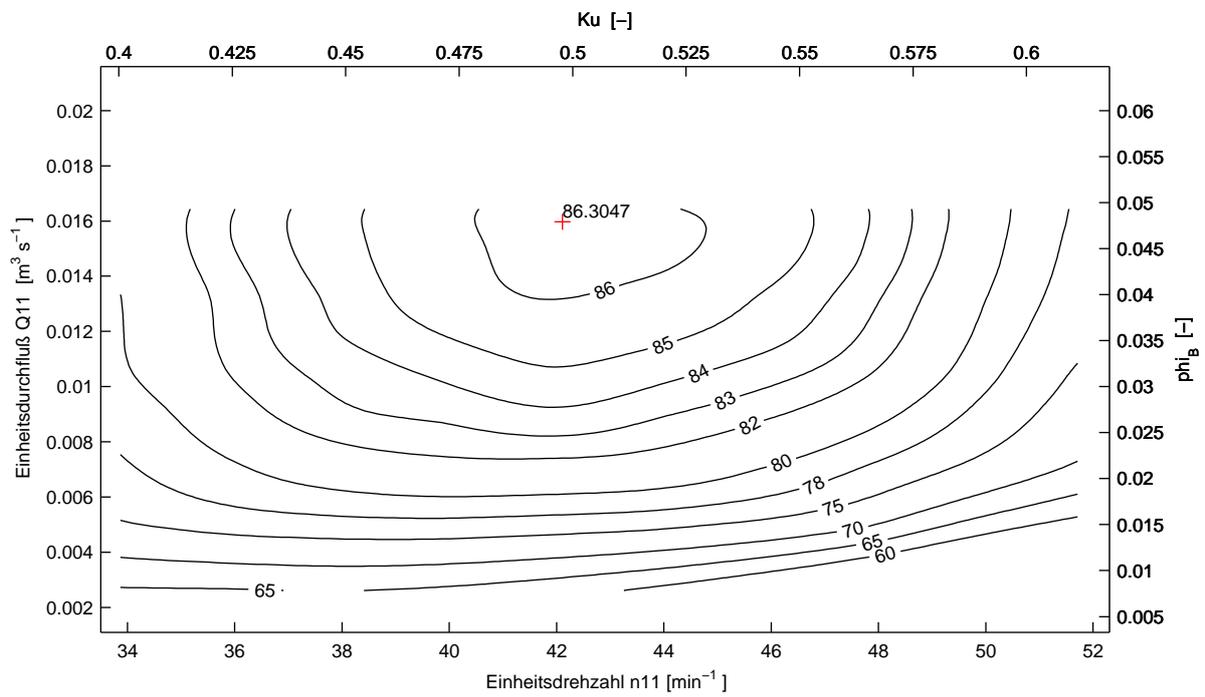
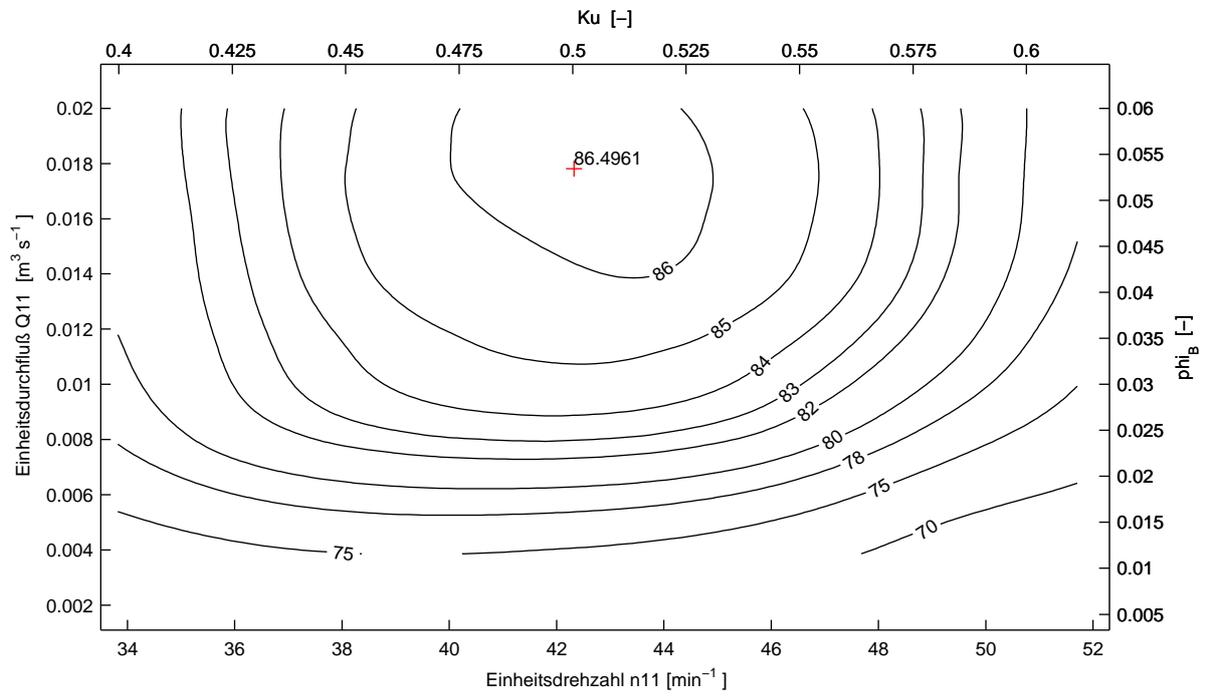


Abbildung F.7: oben: N4M4H50, unten: N5M4H50