



## **Abschlußbericht**

zur

Gestaltung, Bemessung, Bestückung und Herstellung der  
Umschaltapparatur für die Mess-Strecke DN 50

Teil: Gestaltung, Bemessung  
für das Hydrodynamische Prüffeld  
der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt Braunschweig

Auftraggeber:

Staatshochbauamt Braunschweig II

Auftrag-Nr.: 1165/00 v. 10.11.00

(B112-26230-1-130)

gemäß Angebot vom 04. September 2000

Bericht: SL – 05/01  
Umfang: Blatt  
Bearbeiter: Prof. Kecke  
Dr. Praetor

Magdeburg, 28. Mai 2001

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Kecke

## 1. Aufgabenstellung

Für das Hydrodynamische Prüffeld der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig sind drei Meßstrecken vorgesehen. Nach Auslegung der Umschaltarmaturen für die DN 150 – und DN 400 – Strecke war abschließend die DN 50-Apparatur auszulegen.

Für die Ausführung der 180°-Umlenkung und die Bemessung der Düse des Austrittsstrahles sind vorgegeben:

- Arbeitsbereich

Volumenstrom:  $\dot{V} = 0,3$  bis  $30 \text{ m}^3/\text{h}$   
damit in der DN 50-Zuleitung:  
 $w = 0,042$  bis  $4,244 \text{ m/s}$   
 $Re = 2,1 \cdot 10^3$  bis  $2,1 \cdot 10^5$

Bei minimalem Durchsatz wird eine instabile Strömung bzw. laminare Strömung zu erwarten sein. Für die Düse sollte deshalb eine stärkere Einschnürung vorgesehen werden.

- Düsenaustritt:

Für den Austrittsstrahl wird eine maximale Unsymmetrie von 2% zugelassen.  
Zur Beherrschung des erheblichen Volumenstrombereiches von 1:100 ist auch hier von einer Aufteilung  
von 1:10 auf den Düsenstellbereich und  
von 1:10 auf den Austrittsgeschwindigkeitsbereich auszugehen.

Die Austrittsgeschwindigkeit ist im Bereich von 0,5 bis 5 m/s zu wählen.  
Der Auftreffwinkel des Austrittsstrahles auf die Strahl-Umlenkplatte soll, wie bei den anderen Apparaturen, kleiner als 7° betragen.

- Umschaltapparatur, gesamt:

Die Umschaltapparatur soll optisch geometrisch ähnlich (nicht exakt) zur DN 150 – und DN 400-Apparatur ausgeführt werden.  
Damit ist eine größere Freiheit bei den Schrägabschnitten (Längen und Neigungen) und der Länge des Vordüsenbereiches gegeben.  
Vorgegeben ist der Abstand zwischen Steigrohr und Düsenmittellinie (s. Bild 1) sowie die maximale Düsentiefe ( $< 175 \text{ mm}$ ).

Zur Festlegung der Gestaltung und Bemessung der Umschaltapparatur sind Variantenuntersuchungen betreffs Einhaltung der vorgenannten Bedingungen bzw. einer weiteren Optimierung durchzuführen. Dies betrifft Berechnungen des Strömungsfeldes unter Heranziehung des CFD - Programmes CFX-TASCflow. Die Aussagekraft derartiger Berechnungen wurde nicht zuletzt am Beispiel der Auslegung der DN 150-Apparatur (Berechnungen im Vergleich zur experimentellen Untersuchung) nachgewiesen.

\* diese Maße sind bindend

Schnitt Waage 350 kg  
Umschaltklappe Stellung "AUS"

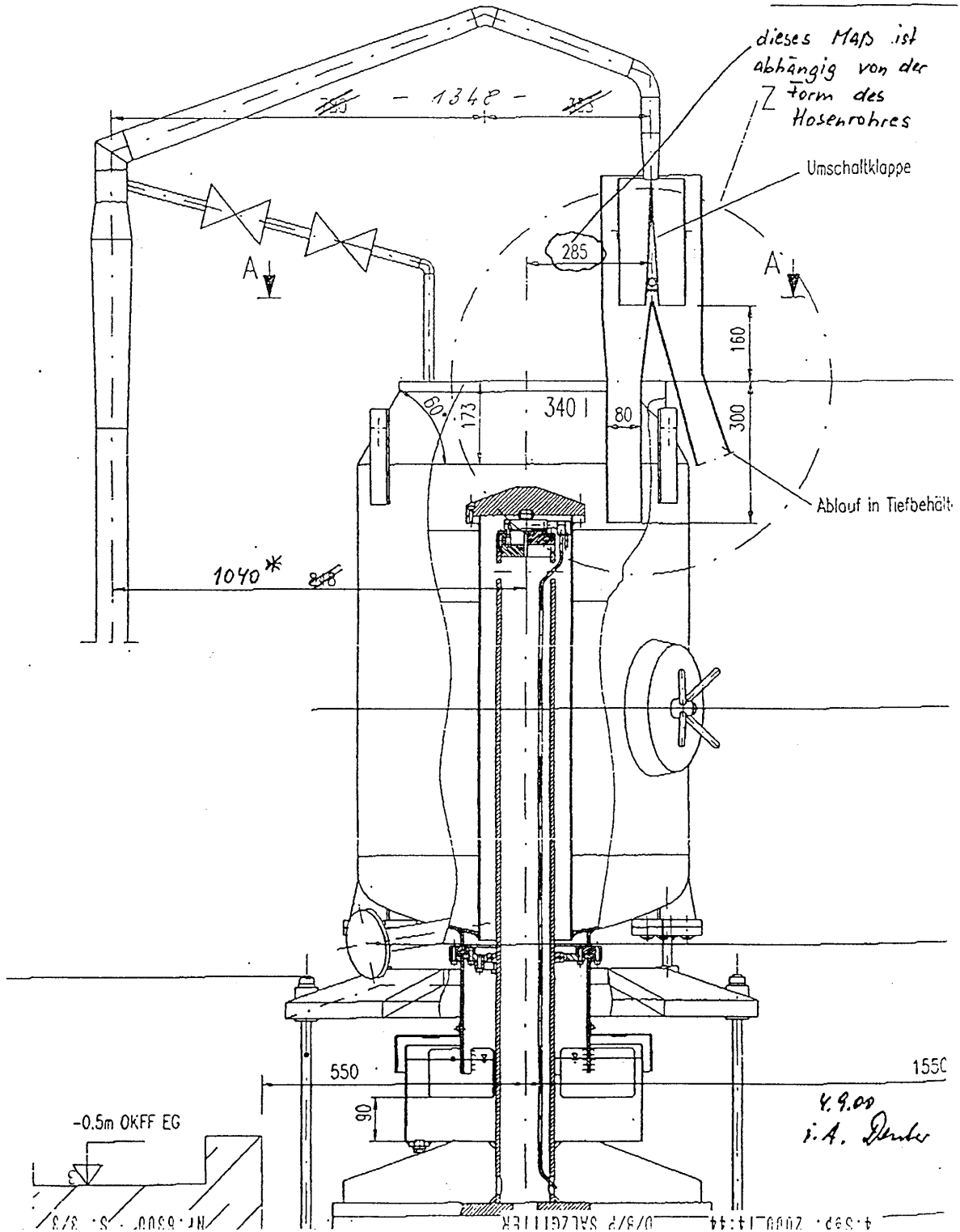


Bild 1: Umschaltapparatur für die Meßstrecke DN 50

## 2. Gestaltungsbereich, mögliche Variation

Bei Einhaltung der exakten geometrischen Ähnlichkeit, ausgehend von der primär bemessenen Ausführung der DN 150-Apparatur, würde sich folgende Gestaltung ergeben, Bild 2.

Die DN 400 Ausführung hatte vor allem die Gebäudeverhältnisse bzw. Einbaubedingungen zu beachten, die jedoch für die DN 50-Variante nicht als Zwangsbedingungen zutreffen. Es sind lediglich die unter Pkt. 1 genannten Vorgaben einzuhalten. Somit kann eine Optimierung hinsichtlich der Querschnitte, der Kanalabschnitts-Neigungen sowie der Längen vorgenommen werden.

### 2.1 Düsenaustrittsquerschnitt

Zur Diskussion stehen:

- Begrenzung der maximalen Austrittsgeschwindigkeit;
- Düseneinschnürung möglichst größer als 2:1;
- minimaler Öffnungsspalt möglichst größer als 1,5 mm.

Dementsprechend wird vorgeschlagen:

- Düsentiefe weiter reduziert auf 120 mm;
- Düseneinschnürung erhöht auf 2,5:1;
- Düsenlänge vergrößert auf 300 mm, nicht zuletzt zur Reduzierung des Arbeitswinkels der Düsenverstellung;
- Düsenaustrittsquerschnitt  $120 \times 1,5 \dots 20 \text{ mm}^2$ .

Es folgt danach:

- bei maximalem Durchsatz

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 30 \text{ m}^3/\text{h} & A_{\text{Austritt}} &= 12 \cdot 2 = 24 \text{ cm}^2 \\ w_{\text{Austritt}} &= 3,47 \text{ m/s} & Re &= 1,19 \cdot 10^5 \end{aligned}$$

- bei minimalem Durchsatz

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 0,3 \text{ m}^3/\text{h} & A_{\text{Austritt}} &= 12 \cdot 0,15 = 1,8 \text{ cm}^2 \\ w_{\text{Austritt}} &= 0,46 \text{ m/s} & Re &= 1,37 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

Bei minimalem Durchsatz ist somit durchgehend eine laminare Strömung gegeben.

### 2.2 Neigungen und Längen der Querabschnitte der Apparatur

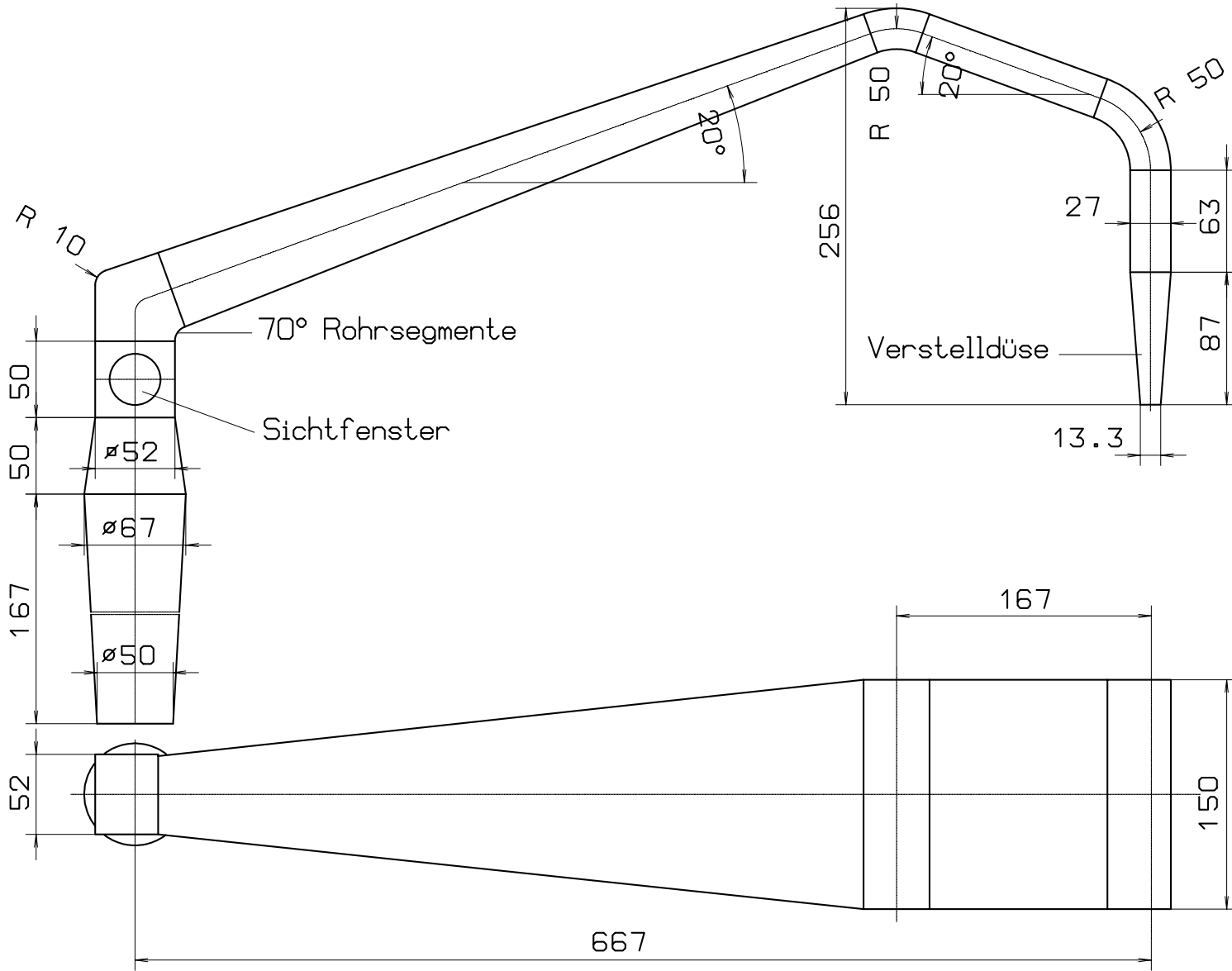
Variationen mit dem Ziel einer minimalen Ungleichverteilung am Düsenaustritt sind möglich, S. Bild 3,

- hinsichtlich der Lage des Hochpunktes – Variation von LL1;
- hinsichtlich der Neigungswinkel-Variation von  $\beta_1, \beta_2$ .

Bei grundsätzlicher Beibehaltung des Erscheinungsbildes der Apparatur wurden Berechnungen durchgeführt bei den Bedingungen

$$\begin{aligned} \text{Austrittsbreite / Düse} &= 20 \text{ mm} \\ \text{Austrittsgeschwindigkeit} &= 2,5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Bild 2: DN 50 - Ausflußapparat (geometrisch ähnlich zur DN 150 - Apparatur)





Die eindeutige Tendenz der Berechnungsergebnisse führt zum Vorschlag eine Schenkel-längenaufteilung (projizierte) mit den Maßen 800 : 548 vorzuschlagen.

b) Ergänzende detaillierte Variation der Neigung der Schenkel ( $\beta_1 - \beta_2$ ):

Die unter a) erkennbare Tendenz der Neigungseinflüsse war weiter zu untersuchen.

Die Strömungsfeldberechnung ergibt folgende Werte der Austrittsstrahl-Unsymmetrie:

Neigungswinkel $\beta_1 - \beta_2$	Strahl-Unsymmetrie in %
20 - 20	0,23
20 - 30	0,38
25 - 20	0,13
30 - 10	0,04
30 - 15	0,00
30 - 20	0,04
30 - 25	0,31
30 - 30	0,50
35 - 10	0,27
35 - 15	0,18
35 - 20	0,11

berechnet bei  
LL1 = 800 mm  
LL2 = 200 mm  
LL3 = 300 mm

Schlußfolgernd wird vorgeschlagen

$$\beta_1 = 30^\circ$$

$$\beta_2 = 15^\circ$$

also die Umlenkungsfolge der Strömung in der Apparatur:

$$\alpha_1 = 60^\circ$$

$$\alpha_2 = 45^\circ$$

$$\alpha_3 = 75^\circ$$

c) Variation der Düsen- und Vordüsenlängen (LL2, LL3):

Da hier bei der DN 50-Apparatur keine Begrenzungen gegeben sind, wird auf größere Längen orientiert. Wie schon genannt ist LL3 auch aus Gründen des Stellwinkelbereiches möglichst groß zu wählen. Die strömungstechnische Analyse unterstützt dies:

Längenvariation LL2 - LL3	Strahl-Unsymmetrie in %
200 - 300	0,57 beim Fall
200 - 200	0,70 LL1 = 1000
120 - 200	0,85 $\beta_1 / \beta_2 = 20/20$

Die Berechnungen bestätigen die Erwartungen und führen somit zum Vorschlag

$$\text{LL2} = 200 \text{ mm}$$

$$\text{LL3} = 300 \text{ mm}$$

- d) Ergänzende Betrachtung der Auswirkung des Düsenverhältnisses, der Strahleinschnürung:

Betrachtet werden nur zwei Fälle

- die bisher gewählte Einschnürung 2: 1
- die Wirkung der gewählten Einschnürung 2,5 : 1

Es bestätigt sich erwartungsgemäß die angestrebte Verbesserung. Bei 2:1 liegt die Unsymmetrie bei 0,08 % bei der vorgeschlagenen Geometrie.

### 3. Ausführung der DN 50-Apparatur

Die vorzusehende Geometrie der DN 50-Apparatur auf der Grundlage der vorstehenden Analyse zeigt Bild 4.

Von Umlenkschaufeln in den Krümmern wurde dabei abgesehen. Bei den gegebenen Abmessungen würde dies auch zu einer erheblichen Einschnürung führen. Die ausgewiesenen Unsymmetrie-Daten machen eine derartige Ergänzung auch nicht erforderlich. Die erhebliche Abmessung der Apparatur (Längen) reicht für die Zielstellung einer minimalen Unsymmetrie des Austrittsstrahles aus.

Hinsichtlich des Gesamt-Querschnittsverlaufes war auch hier wieder eine Querschnittserweiterung bis zum Hochpunkt vorzusehen, um die abschließende, die Strömung vergleichmäßige Beschleunigung zu ermöglichen.

Die auszuführende Variante gliedert sich somit in folgende Abschnitte:

- Zuleitung DN 50
- Diffusor mit einem Erweiterungswinkel von  $2 \times 0,29^\circ$
- Übergangsstück auf quadratischen Querschnitt bei gleichem Umfang (mit Fertigungsvorteil)
- aufwärtiger Schenkel mit Flächenerweiterung
- abwärtiger Schenkel mit Flächenkonstanz
- Vordüsen-Zwischenstück mit Flächenkonstanz
- Düse mit Einschnürung von 2,5 : 1 bis 33 : 1.

Den Flächenverlauf insgesamt zeigt Bild 5.

### 4. Durchströmung (global) / Arbeitsfeld

Die Meßstrecke ist vorgesehen für den Durchsatzbereich  
von 0,3 bis 30 m<sup>3</sup>/h

Charakteristische Querschnitte der Umschaltapparatur sind  
die DN 50 – Meßstrecke / Zuleitung  
der 50 · 120 mm<sup>2</sup> - Querschnitt  
der Düsenaustrittsquerschnitt

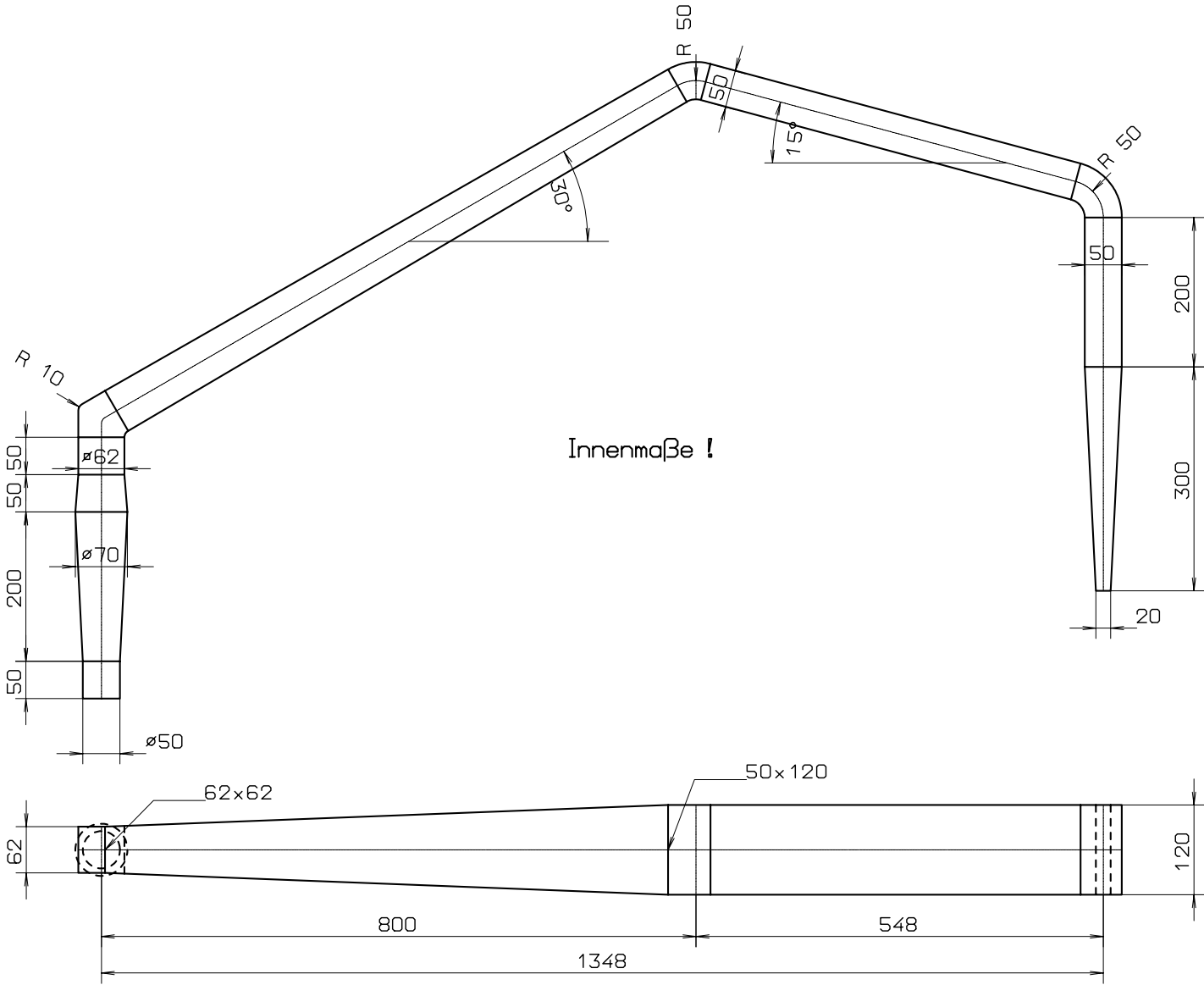


Bild 4: Vorschlagende Geometrie der DN 50-Apparatur

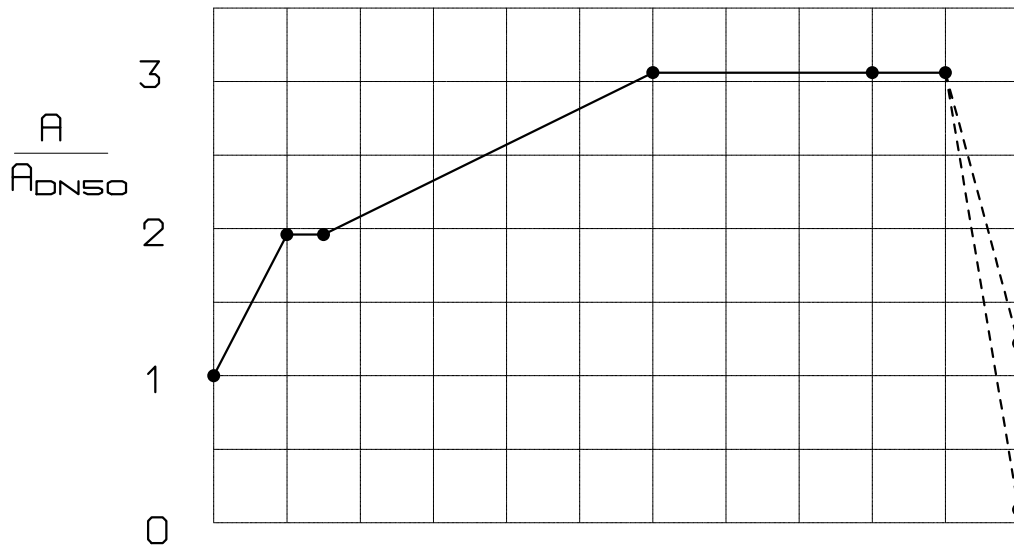


Bild 5: Querschnittsverlauf der DN 50-Apparatur

Für die jeweils mittlere Geschwindigkeit und die Reynolds-Zahl gilt bei Annahme des minimalen bzw. maximalen Durchsatzes:

Querschnitt	$\bar{w}$ in m/s	Re
DN 50	0,04 ... 4,24	$2,1 \cdot 10^3$ ... $2,1 \cdot 10^5$
50 · 120	0,01 ... 1,39	$0,98 \cdot 10^3$ ... $9,81 \cdot 10^4$
Düsenaustritt	0,5 ... 3,47 (b=1,5 mm) (b=20 mm)	$1,37 \cdot 10^3$ ... $1,19 \cdot 10^5$ b = 1,5 mm) (b = 20 mm)

Es ist somit festzustellen (s. hierzu auch Bild 6):

- für den minimalen Durchsatz von  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$  liegen durchgehend laminare Strömungsverhältnisse vor;
- es folgt ein Übergangsbereich mit teilweise laminaren und turbulenten Abschnitten bzw. dem Übergang der Strömung vom laminaren zum turbulenten Zustand;
- ab Durchsätzen von etwa  $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$  liegt dann durchgehend eine stabile turbulente Strömung vor.

Im Übergangsbereich laminar-turbulent ist eine Strömung bekanntermaßen instabil. Eine genaue Vorausberechnung der Verhältnisse in diesem Bereich ist nicht möglich. Es muß somit für den Bereich von  $0,5$  bis  $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$  auf die experimentelle Erprobung verwiesen werden.

Das gesamte Arbeitsfeld, bezogen auf den Düsenaustritt, ist im Bild 7 angegeben. Der zu empfehlende Arbeitsbereich ist schlußfolgernd besonders gekennzeichnet.

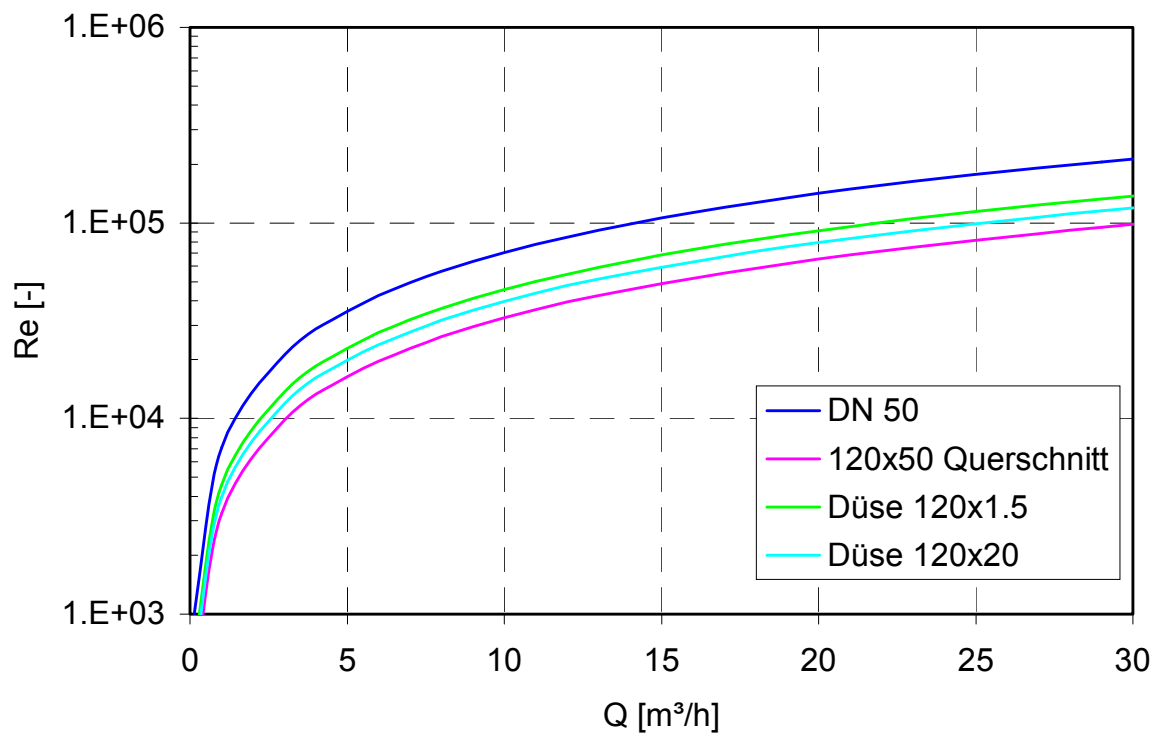


Bild 6: Re-Zahl in Zuströmbereichen zur Düse

Anzumerken ist auch hier bei der DN 50-Ausführung, daß sich am Hochpunkt durchgehend Unterdruck einstellt:

$$\Delta_{fu} \approx \rho gh - \frac{\rho}{2}(w_A^2 - w_E^2)$$

Index A: Düsenaustritt

Index E: Düseneintritt

Bei kleineren Durchsätzen also ein Unterdruck von etwa 7,5 kPa.

Somit muß auch hier, zumindest bei Inbetriebnahme der Anlage eine Luftaustragung gewährleistet werden. Nach den Abschätzungen bei den DN 150 – bzw. DN 400-Apparaturen wurde als Mindestgeschwindigkeit für ein Blasenmitreißen der Wert 0,5 m/s abgeschätzt. Für die Kanalgeometrie der DN 50-Apparatur trifft somit ein zu empfehlender Mindestdurchsatz für die Entlüftung von etwa 10 m<sup>3</sup>/h zu.

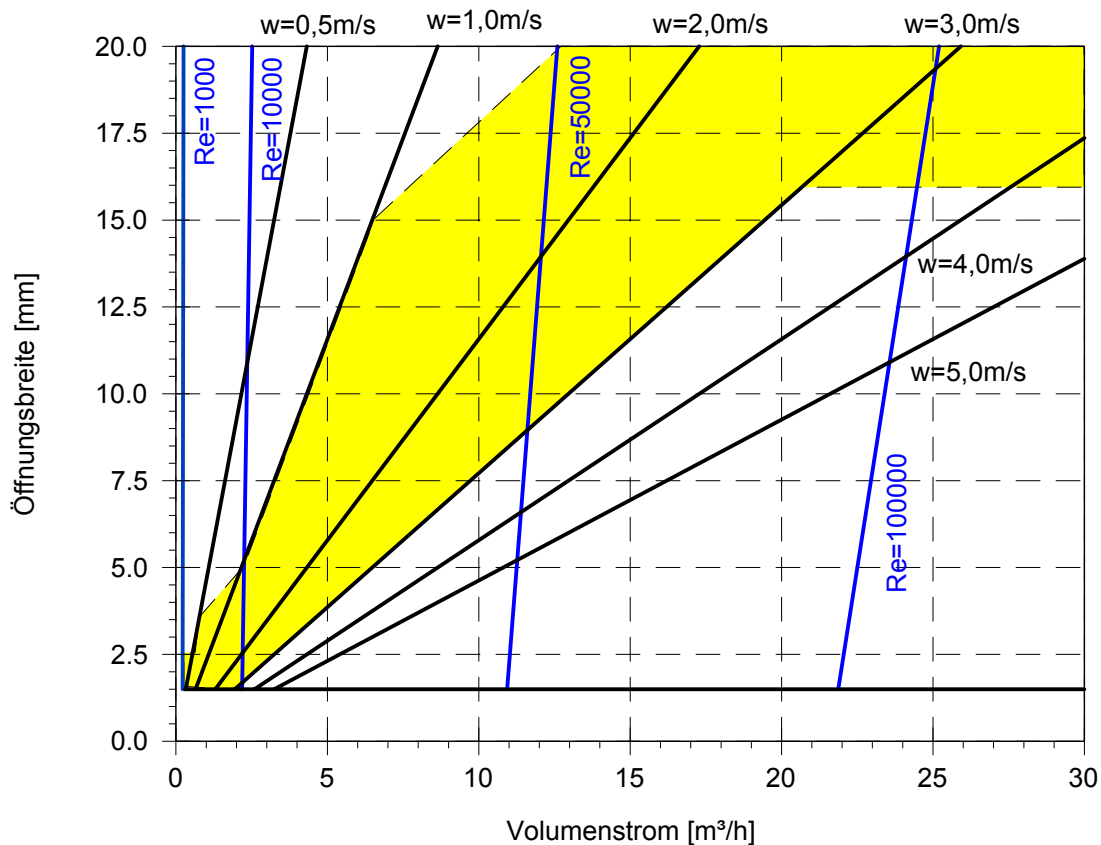


Bild 7:  $b - \dot{V} - w - Re$ -Düsenaustrittsverhältnisse

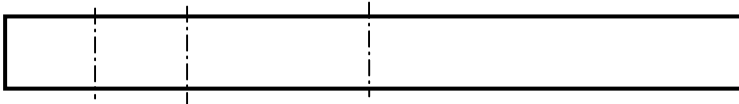
## 5. Austrittsprofil, Druck- und Geschwindigkeitsverteilung

Für ausgewählte Fälle, repräsentativ für das Gesamt - Arbeitsfeld nach Bild 7, werden nachfolgend die Geschwindigkeits- und Druckverhältnisse angegeben; dies für:

$Q$ [m <sup>3</sup> /h]	$B_2$ [mm]
-------------------------	------------

30,0	20,0
15,0	16,0
3,0	3,0
0,3	1,5

Die Strahlaustrittsprofile, Bild 8 bis 11, sind dargestellt für die Querschnitte Symmetrieebene und Halbierungen der Tiefe.



Deutlich ist der Unterschied vom Laminarprofil, Bild 11, gegenüber der turbulenten Durchströmung zu erkennen.

Die Druck- und Geschwindigkeitsverteilung in der gesamten Apparatur ist in den Bildern 12 bis 19 angegeben. Ergänzend sind detailliert die Geschwindigkeitsverteilungen in der Düse in Bild 20 dargestellt.

Die zugeordnet jeweils berechnete Unsymmetrie des Austrittsstrahles gibt die nachfolgende Tabelle an.

Q [m <sup>3</sup> /h]	B <sub>2</sub> [mm]	U [%]
30,0	20,0	0,024
15,0	16,0	-0,026
3,0	3,0	0,016
0,3	1,5	-0,024

Das angestrebte Ziel einer maximalen Unsymmetrie von 2% wird als gesichert eingehalten.

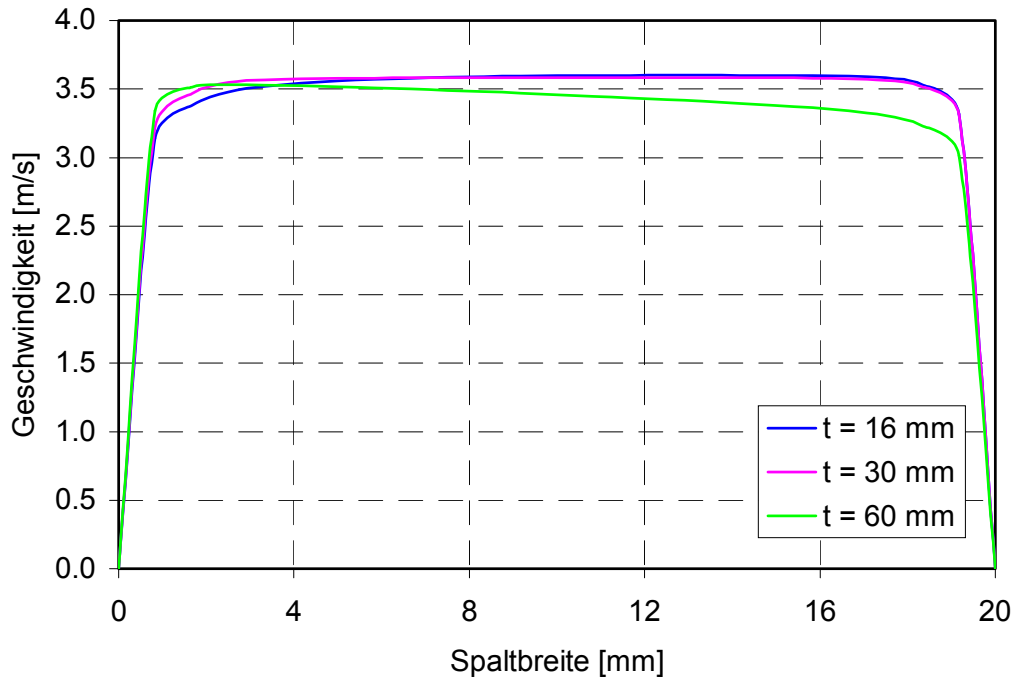


Bild 8: Berechnetes Geschwindigkeitsprofil im Austrittsquerschnitt in Abhängigkeit von der Tiefe (DN 50,  $Q = 30.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 3.47 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 20 \text{ mm}$ )

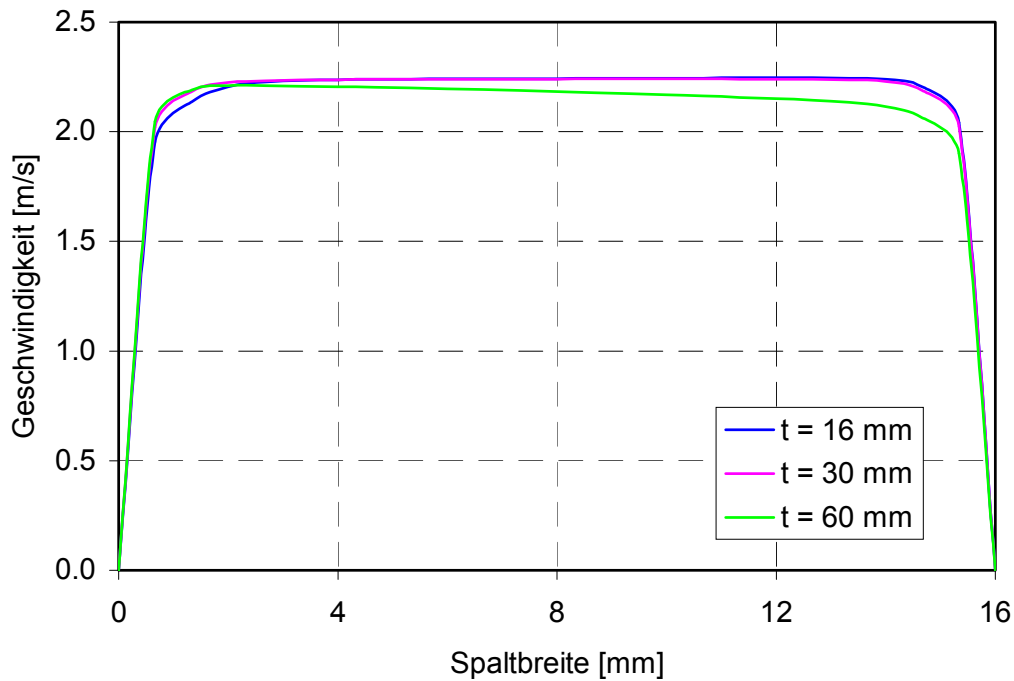


Bild 9: Berechnetes Geschwindigkeitsprofil im Austrittsquerschnitt in Abhängigkeit von der Tiefe (DN 50,  $Q = 15.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 2.17 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 16 \text{ mm}$ )

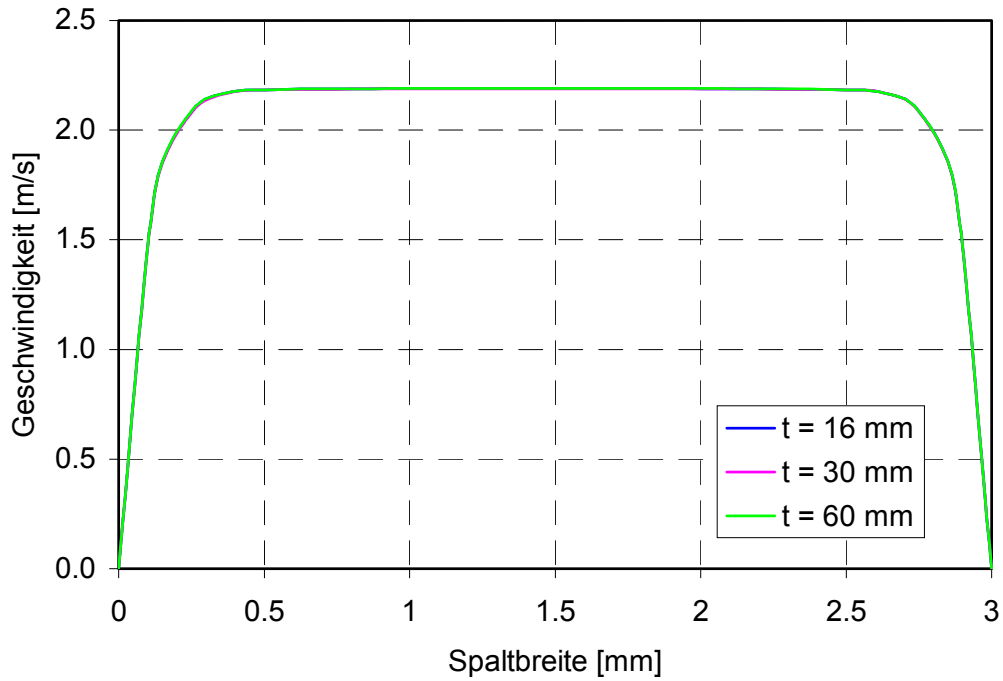


Bild 10: Berechnetes Geschwindigkeitsprofil im Austrittsquerschnitt in Abhängigkeit von der Tiefe (DN 50,  $Q = 3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 2.31 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 3 \text{ mm}$ )

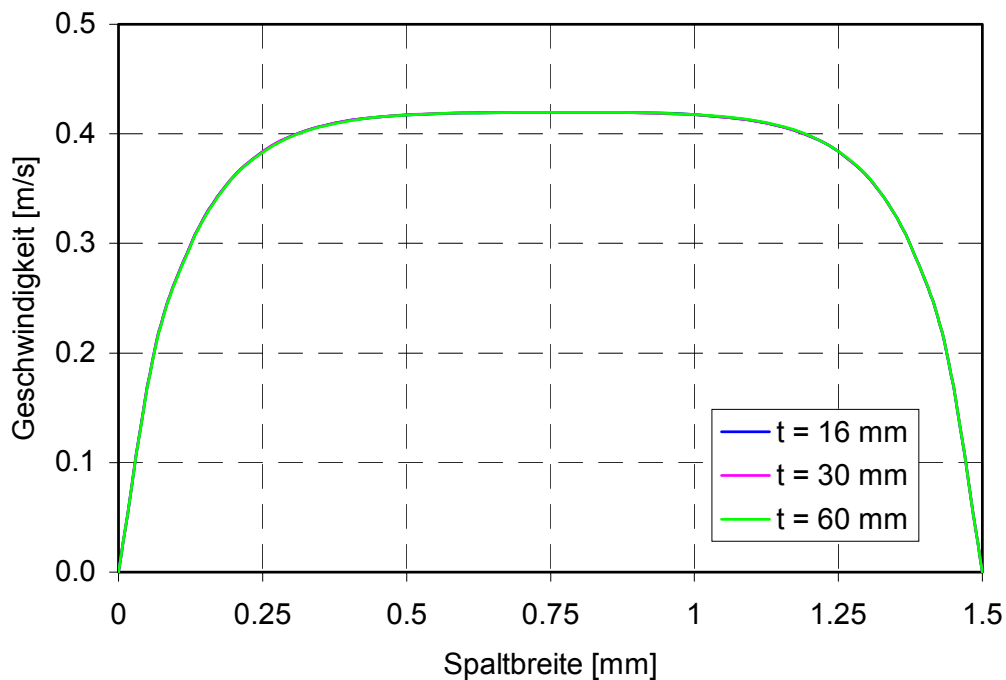


Bild 11: Berechnetes Geschwindigkeitsprofil im Austrittsquerschnitt in Abhängigkeit von der Tiefe (DN 50,  $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 0.46 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 1.5 \text{ mm}$ )

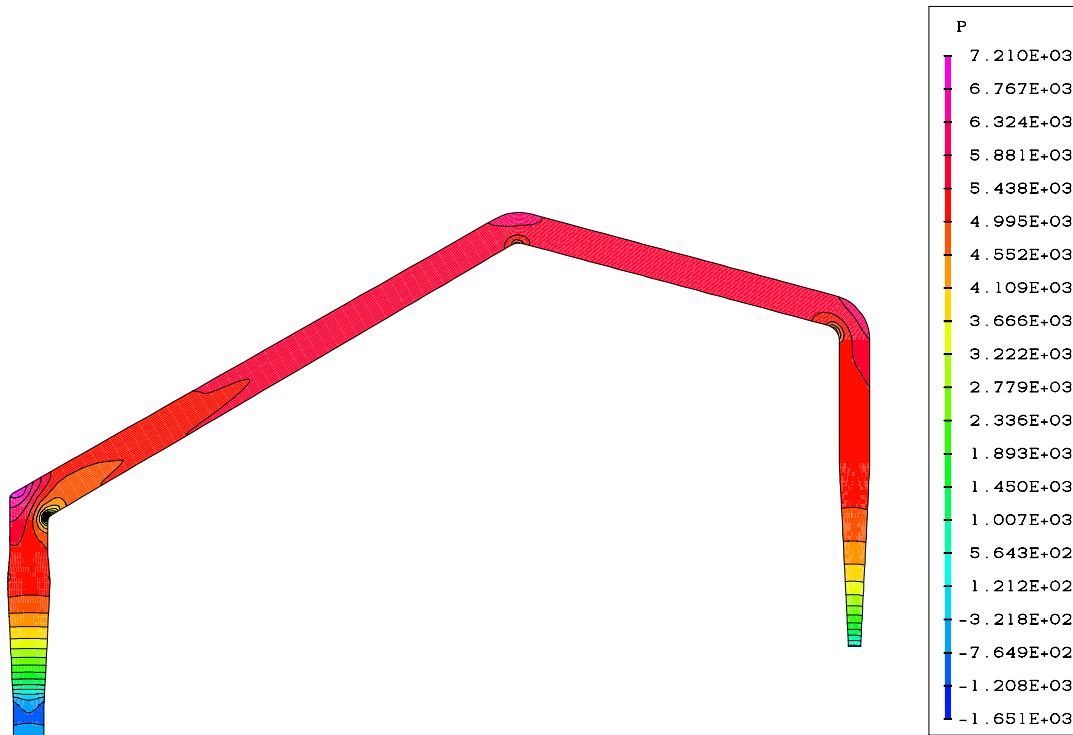


Bild 12: Berechnete Druckverteilung in der Symmetrieebene  
(DN 50,  $Q = 30.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 3.47 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 20 \text{ mm}$ )

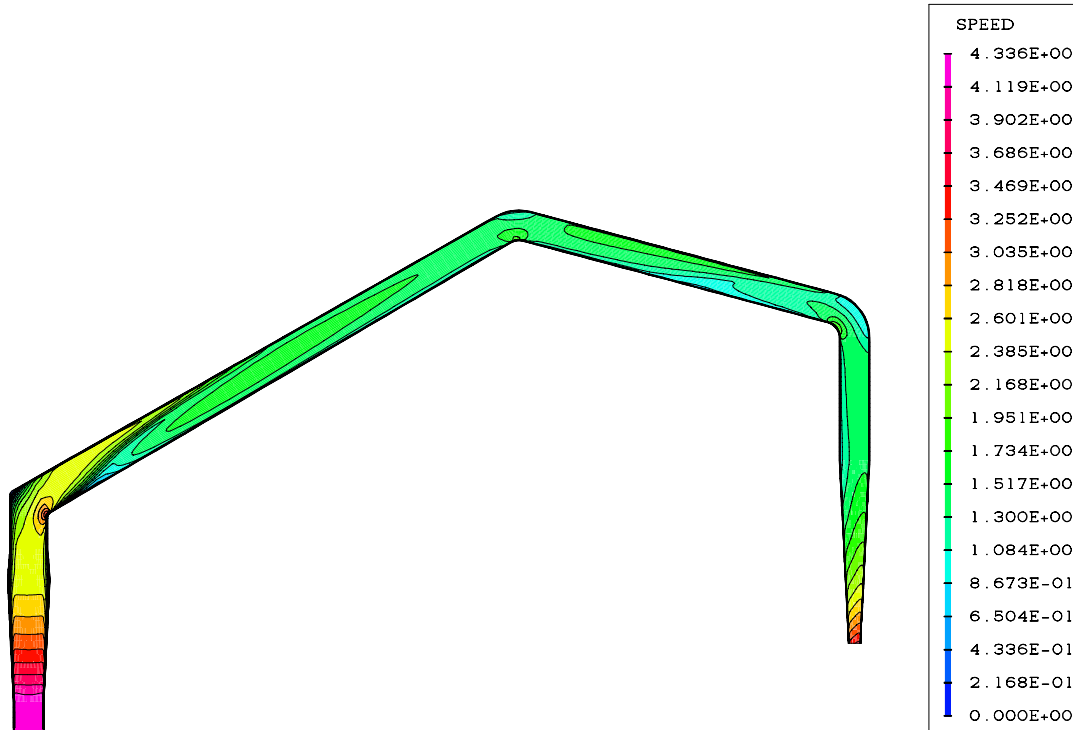


Bild 13: Berechnete Geschwindigkeitsverteilung in der Symmetrieebene  
(DN 50,  $Q = 30.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 3.47 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 20 \text{ mm}$ )

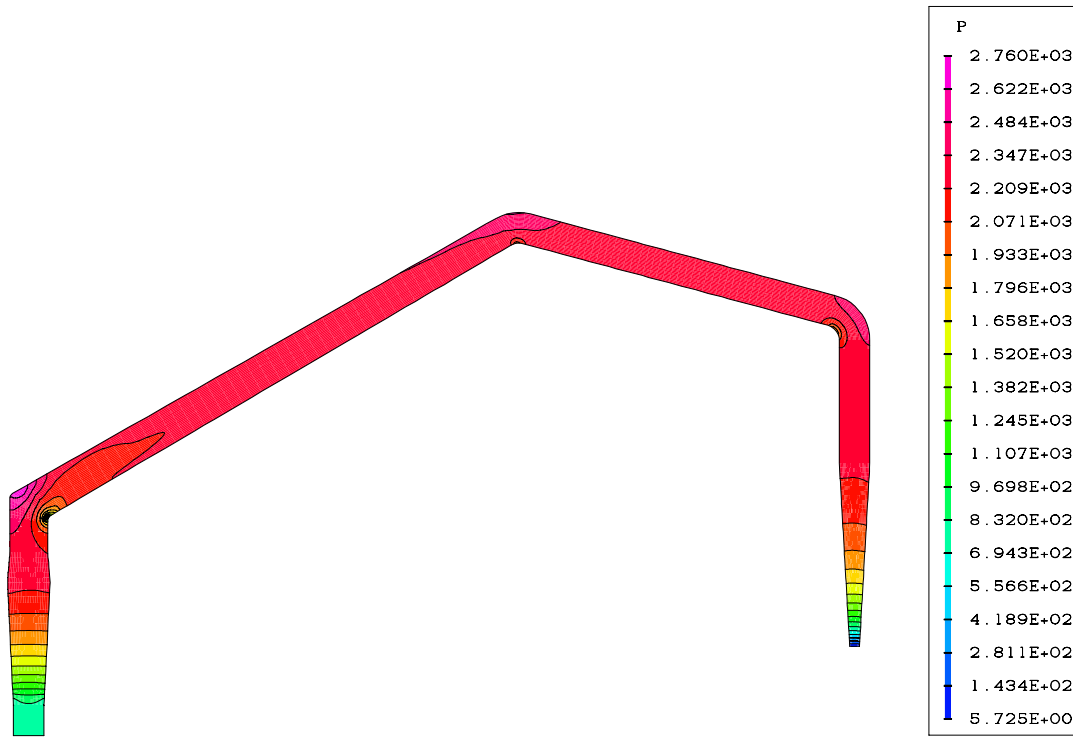


Bild 14: Berechnete Druckverteilung in der Symmetrieebene  
(DN 50,  $Q = 15.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 2.17 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 16 \text{ mm}$ )

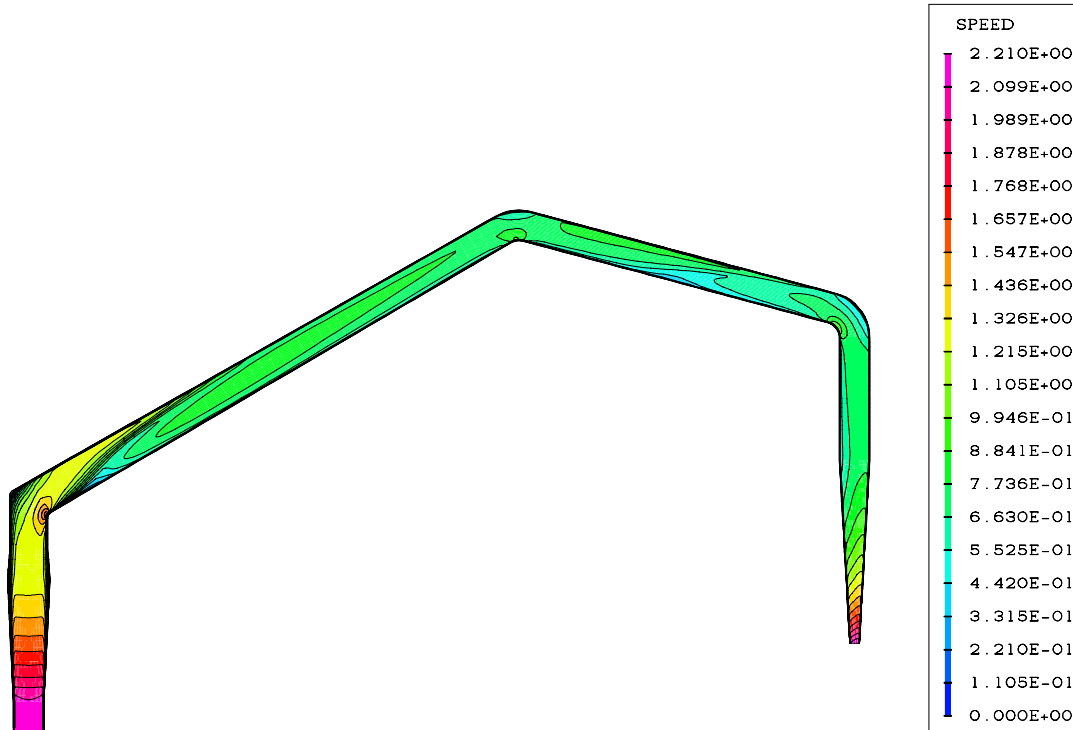


Bild 15: Berechnete Geschwindigkeitsverteilung in der Symmetrieebene  
(DN 50,  $Q = 15.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 2.17 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 16 \text{ mm}$ )

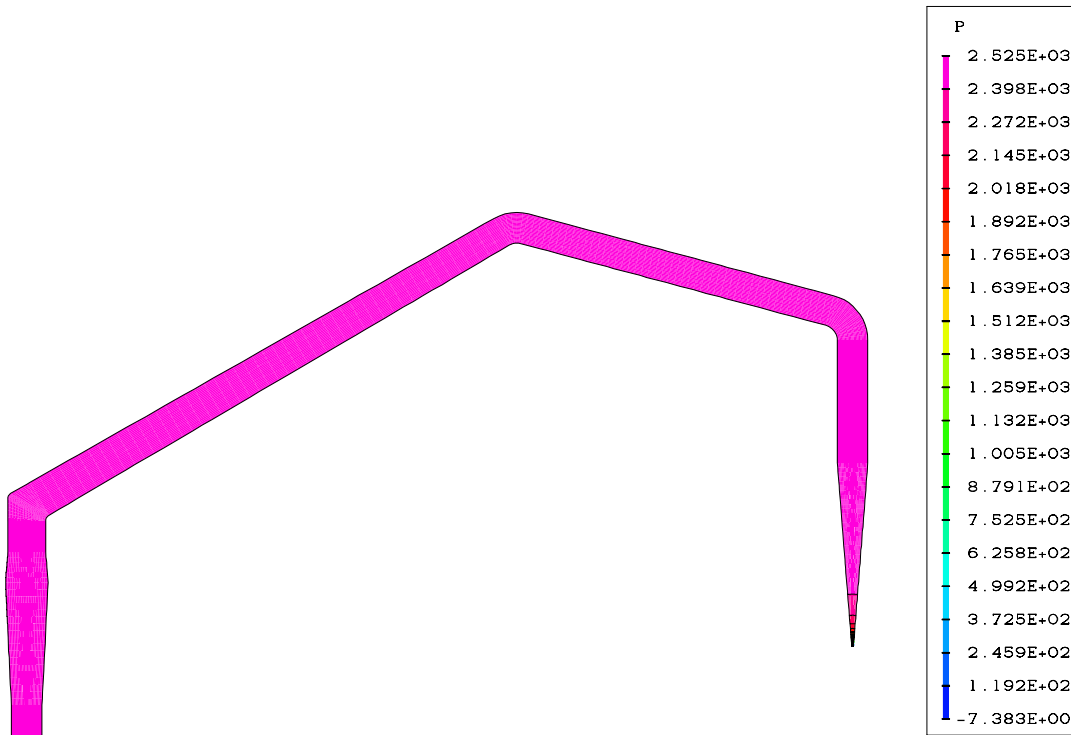


Bild 16: Berechnete Druckverteilung in der Symmetrieebene  
(DN 50,  $Q = 3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 2.31 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 3 \text{ mm}$ )

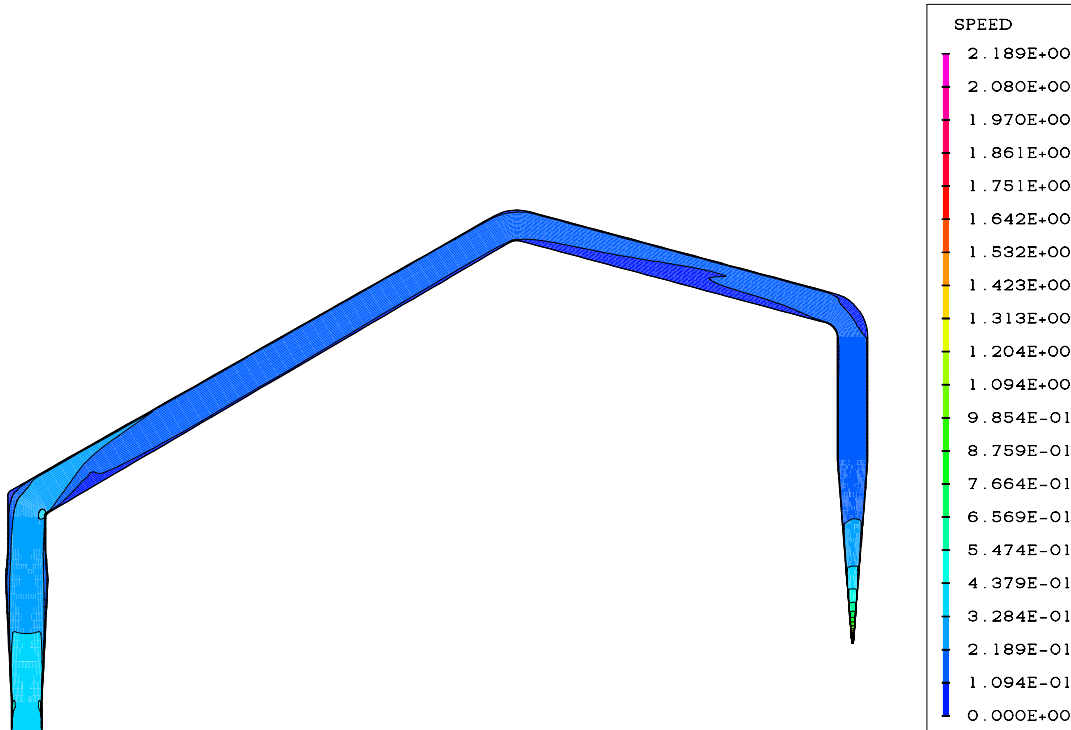


Bild 17: Berechnete Geschwindigkeitsverteilung in der Symmetrieebene  
(DN 50,  $Q = 3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 2.31 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 3 \text{ mm}$ )

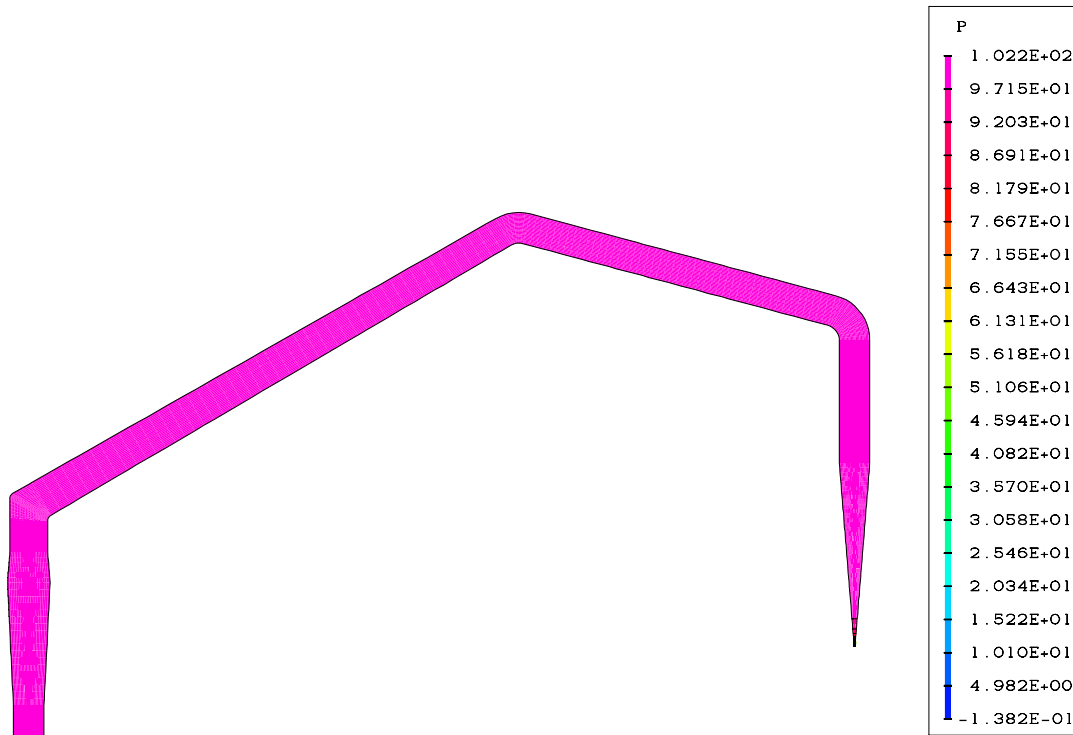


Bild 18: Berechnete Druckverteilung in der Symmetrieebene  
(DN 50,  $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 0.46 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 1.5 \text{ mm}$ )

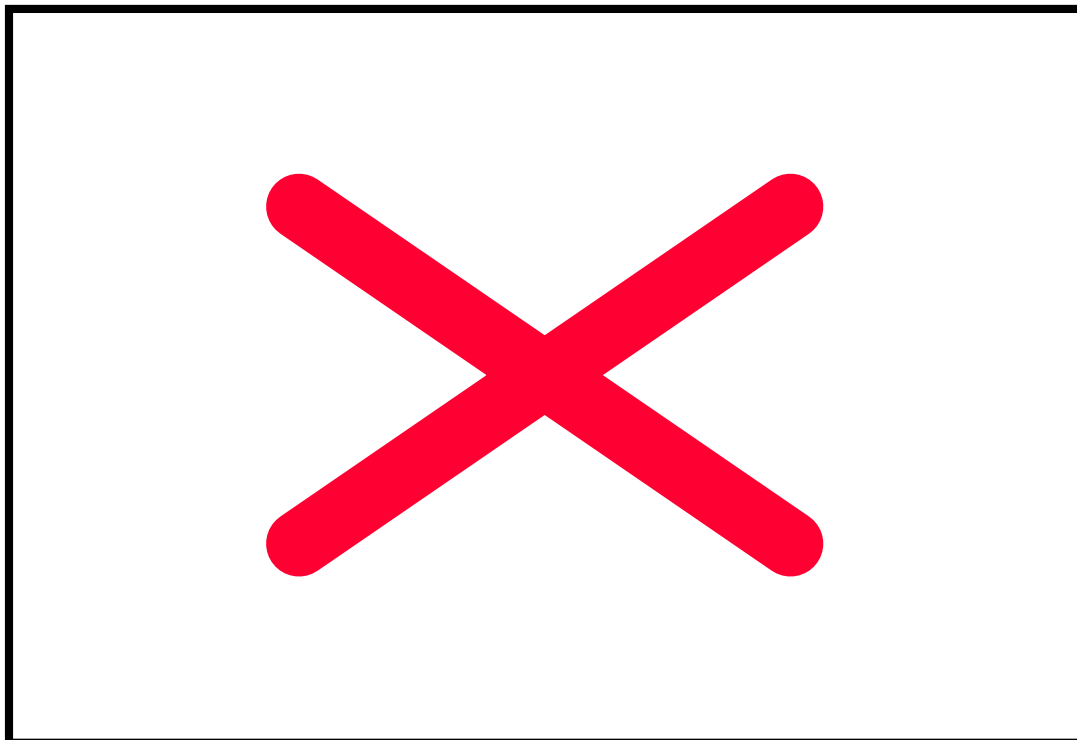


Bild 19: Berechnete Geschwindigkeitsverteilung in der Symmetrieebene  
(DN 50,  $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\bar{u}_A = 0.46 \text{ m/s}$ ,  $B_2 = 1.5 \text{ mm}$ )

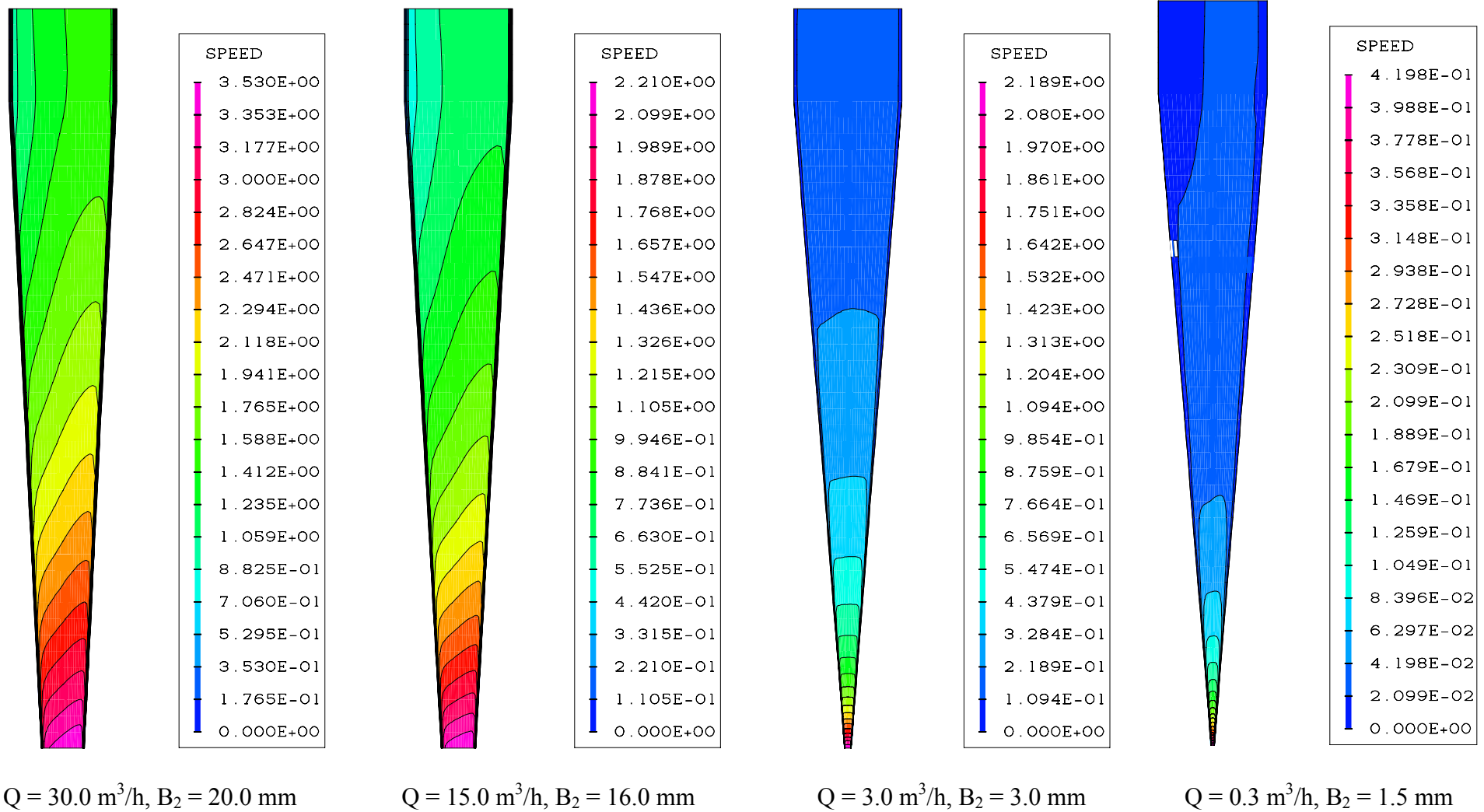


Bild 20: Berechnete Geschwindigkeitsverteilung in der Symmetrieebene im Düsenbereich