

DER GROßE WASSERKANAL "GWB" – EINE VERSUCHSANLAGE FÜR ZEITAUFLÖSENDE MESSUNGEN BEI GROßEN REYNOLDSZAHLEN

P. Scholz, S. Sattler,
TU Braunschweig, Institut für Strömungsmechanik,
Hermann-Blenk.Str. 37, 38108 Braunschweig, Deutschland

D. Wulff,
TU Braunschweig, Institut für Flugantriebe und Strömungsmaschinen,
Hermann-Blenk.Str. 37, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag wird die Auslegung, die Konstruktion und die Technik des großen Wasserkanals an der TU Braunschweig (GWB) beschrieben. Die Motivation für die Entwicklung dieses Kanals ist insbesondere, Messungen an Profilen, Triebwerkseinläufen und generischen Modellen mit einem besonderen Fokus auf zeitauflösenden Messverfahren bei mittelgroßen Reynoldszahlen anbieten zu können. Hierzu eignet sich ein Wasserkanal besser als Windkanäle, da durch die geringere kinematische Viskosität Strömungsprozesse sehr viel langsamer ablaufen. Die Besonderheiten des GWB liegen in der Bedruckung, um Kavitation zu vermeiden, sowie in der Heizung, durch die die Viskosität des Wassers weiter gesenkt werden kann. Es wird so eine Kanal-Reynoldszahl von bis zu $Re_{\square}=880'000$ erreicht, was bei Profilen der Streckung $\Lambda=3$ ($c=330$ mm) einer Profil-Reynoldszahl von $3,0 \cdot 10^6$ entspricht. Als Messmethoden sind insbesondere zeitauflösende Druckmesstechnik und optischen Methoden (PIV) mit hohen Bildraten vorgesehen.

1. EINLEITUNG

An moderne Windkanalanlagen für die aerodynamische Forschung wird – insbesondere im industrienahen Kontext – meist die Anforderung nach einer ausreichend großen Reynoldszahl gestellt. Dies lässt sich im Allgemeinen durch Größe, Geschwindigkeit oder Beeinflussung der Viskosität (z.B. kryogene Kanäle) erreichen. Alle drei Möglichkeiten haben typischerweise den Nachteil, dass die repräsentativen Zeitskalen klein und/oder der konstruktive Aufwand groß und damit zeitauflösende Techniken äußerst komplex oder nicht mehr anwendbar werden.

Hierzu in Kontrast steht das zunehmende Interesse an hochwertigen Messdaten. Zur Validierung von numerischen Methoden ist meist die Messung von nur integralen Werten (Auftrieb, Widerstand) nicht ausreichend, vielmehr sind wenigstens Druckverteilungen, besser aber ortsauflösende und/oder ggf. auch zeitauflösende Daten notwendig.

Bei allen aerodynamischen Versuchsanlagen, beispielhaft seien hier der DNW-NWB in Braunschweig, der ETW in Köln und der DNW-LLF in Nordostpolder benannt, ist daher zur Akquise von ortsauflösenden Daten die Nutzung der PIV-Technik mittlerweile keine Seltenheit. Aufgrund der hohen Datentiefe wird PIV auch für die Anwendung in kryogenen Anlagen erweitert, vgl. [1], und auch in Flugversuchen getestet [2]. Wenngleich prototypische Messungen, gar tomografisch, auch bereits bei mittleren Reynoldszahlen mit zeitauflösender PIV (TR-PIV) erfolgt sind [3], stehen dennoch fundamentale Prinzipien gegen

einen verbreiteten Einsatz der TR-PIV-Technik in Anlagen mit größerer Reynoldszahl: Die notwendige Laserleistung und –qualität zur Illumination sinnvoller Beobachtungsfenster über entsprechend große Entfernungen mit ausreichend großer Repetitionsrate wird in absehbarer Zeit nicht für realistische Kosten verfügbar sein. Zudem sind die Zeitskalen bereits ab mittleren Reynoldszahlen so klein, dass selbst mit vergleichsweise extrem schnellen Systemen (2 kHz ~ 10 kHz) kaum tatsächlich alle turbulenten Skalen erfasst werden, insofern der Begriff „zeitaufgelöst“ durchaus kritisch diskutiert werden könnte.

Eine technologische Möglichkeit diesen Zielkonflikt zu lösen ist die Nutzung eines Mediums mit geringerer kinematischer Viskosität. Wasser als Medium ist gut bekannt und wird bei kleineren Reynoldszahlen konsequent genutzt, als Beispiele seien hier genannt der Laminarwasserkanal¹ des IAG an der Universität Stuttgart ($1,2 \times 0,5$ m², 0,2 m/s, $Re_{\square,15^{\circ}C} \approx 0,013 \cdot 10^6$), der Wasser-schleppkanal² ($1,0 \times 1,5$ m², 2,4 m/s, $Re_{\square,15^{\circ}C} \approx 0,25 \cdot 10^6$) und der Wasserumlaufkanal³ ($1,5 \times 1,0$ m², 1,9 m/s, $Re_{\square,15^{\circ}C} \approx 0,2 \cdot 10^6$) des ILR an der RWTH Aachen, der Große Wasserkanal [4] des LSTM Erlangen ($0,8 \times 1,0$ m²,

¹ <http://www.iag.uni-stuttgart.de/IAG/institut/abteilungen/laminarwasserkanal/laminarwasserkanal.htm>
(abgerufen 9.8.2013)

² <http://www.ilr.rwth-aachen.de/index.php?id=306>
(abgerufen 9.8.2013)

³ <http://www.ilr.rwth-aachen.de/index.php?id=307>
(abgerufen 9.8.2013)

2,3 m/s, $Re_{\square,15^{\circ}\text{C}} \approx 0,17 \cdot 10^6$) oder der Wasserschleppkanal WSG⁴ des DLR in Göttingen ($0,8 \times 1,0 \text{ m}^2$, 2,3 m/s, $Re_{\square,15^{\circ}\text{C}} \approx 0,48 \cdot 10^6$).

Der Große Wasserkanal an der TU Braunschweig (GWB) wurde geplant und aufgebaut, um in das existierende Spektrum an aerodynamischen Versuchsanlagen einen Kanal einzubringen, an dem auch bei mittleren Reynoldszahlen - an typischen Profilen bis etwa $3,0 \cdot 10^6$ - in hoher Qualität vollständig zeitauflösend gemessen werden kann, sowohl mit Druckmesstechnik, als auch mit ortsauflösenden optischen Methoden (PIV). Als weitere Motivation sei benannt, dass die trotz größerer Reynoldszahlen relativ großen Zeitskalen in einem solchen Wasserkanal bisher nicht durchführbare Experimente auf dem Gebiet der aktiven Strömungsregelung ermöglicht werden.

Da Wasser inkompressibel ist, besitzt es eine sehr viel höhere Schallgeschwindigkeit als Luft. Druckstörungen (insb. auch Fluktuationen an einer Druckmessöffnung) bleiben daher ohne signifikante Phasenverschiebung oder Dämpfung auch durch längere Messleitungen erhalten. Die in Luft zwangsläufig notwendige, oft konstruktiv nur begrenzt mögliche Integration von Miniatur-Druckaufnehmern direkt in das Modell kann entfallen (wenngleich die erreichbaren Messraten nicht ganz an die Grenzfrequenzen z.B. von Kulites heran reichen). Allerdings muss in der Vorbereitung der Druckmessung sichergestellt werden, dass alle Leitungen frei von Luftblasen sind.

Die große Dichte von Wasser hat zudem einen sehr vorteilhaften Einfluss auf tracer-basierte optische Messmethoden, z.B. PIV: Das Verhältnis der Dichte von Tracer und Fluid ist entscheidend für das Folgeverhalten der Partikel. Für Messungen in Luft lassen sich keine Tracer mit einer angepassten Dichte finden, daher müssen möglichst kleine Partikel gewählt werden (oft um $1 \mu\text{m}$), die dann aber ein geringes Reflexionsvermögen aufweisen und somit nach großen Laserleistungen verlangen. Gerade bei zeitauflösenden Messungen ist dies sehr ungünstig, da die verfügbare Leistung von Lasern mit ausreichenden Repetitionsraten prinzipbedingt eine Größenordnung kleiner ist als die von „langsamen“ Lasern. Für Wasser hingegen sind Dichte-angepasste Tracer-Partikel kommerziell problemlos erhältlich (z.B. Polyamidkugeln oder silberbeschichtete Hohlglaskugeln). Da deren Dichte dem Wasser sehr ähnlich ist, folgen sie der Strömung quasi ohne Schlupf. Ihr Durchmesser kann recht groß gewählt werden (oft bis $30 \mu\text{m}$), was eine erhebliche Steigerung des Reflexionsvermögens mit sich bringt, und somit die notwendige Laserleistung verringert. Hinsichtlich tracer-basierter Methoden ergibt sich in Wasser also ein doppelter Vorteil: Einerseits sind die Zeitskalen größer und damit die notwendigen Messfrequenzen geringer, andererseits ist aber auch eine präzisere Messung möglich, da effektiv mehr Laserleistung zur Verfügung steht und die Partikel der Strömung besser folgen.

Die Vorteile hinsichtlich der Messmethoden werden bei einem großen Wasserkanal durch einige Nachteile erkauft, die nicht unerwähnt bleiben sollen:

Wenngleich wegen der kleineren kinematischen Viskosität die gleiche Reynoldszahl bei geringerer Geschwindigkeit

erreicht wird, ist die Dichte von Wasser erheblich höher als die von Luft. Bei gleicher Reynoldszahl und Modellgröße sind daher die auf einem Modell wirkenden Lasten in Wasser um ein Vielfaches größer als in Luft (je nach Konfiguration um 3,5-mal bis zu 11-mal größer). Da Wasser für viele Materialien außerdem eine ungünstige Umgebung darstellt, ist der Bau von geeigneten Modellen für den Wasserkanal komplexer als der für Windkanalmodelle.

Ein Zugang zum Modell während einer Messung ist nur nach Ablassen des Wassers aus der Messstrecke möglich. Im Falle des GWB müssen hierzu mehr als 20 t Wasser umgelagert und der Messstreckendeckel geöffnet werden. Im Anschluss an das Befüllen des Kanals nach einer Öffnung muss zudem der Kanal und die Druckmesstechnik entlüftet werden. Aufgrund der Menge an zeitintensiven Prozeduren ist somit die Effizienz einer Messung geringer als in Luft, insbesondere wenn ein regelmäßiger Zugriff auf das Modell notwendig ist.

Im Folgenden werden die Entwicklung des Konzeptes, die Auslegung, sowie die konstruktiven Daten des GWB zusammen getragen. Der Kanal befindet sich am Ende der Inbetriebnahme und wird derzeit in den Messbetrieb überführt. Einige bislang gemachte Erfahrungen zum Betrieb des Kanals werden hier ebenfalls aufgeführt. Abschließend wird die Entwicklung eines für diesen Kanal ausgelegten, innovativen Hochauftriebsprofils mit einer aktiven Coanda-Klappe beschrieben, das im Rahmen des DFG Sonderforschungsbereiches SFB 880 entwickelt wurde und das erste Messobjekt in dem Kanal sein wird.

2. KONZEPT

Wie an der oben aufgeführten Liste bestehender Kanäle zu erkennen ist, liegt das Gros bei einer Wassertemperatur von 15°C bei einer Kanal-Reynoldszahl um $Re_{\square} \approx 0,2 \cdot 10^6$, wobei diese im Allgemeinen definiert ist als

$$(1) \quad Re_{\square} = \frac{0,1 \cdot \sqrt{L \cdot B} \cdot u_{max}}{\nu}$$

Es sei bemerkt, dass o.g. Wert $Re_{\square} \approx 0,2 \cdot 10^6$ etwa einem (Luft-) Windkanal $1 \times 1 \text{ m}^2$, 40 m/s entspricht. Größere Strömungsgeschwindigkeiten werfen in Wasser schnell das Problem der Kavitation auf, die für aerodynamische Untersuchungen nicht gewünscht, ja sogar sehr schädlich ist. Um einen Wasserkanal mit größerer Kanal-Reynoldszahl zu erhalten, sind daher (neben der Wahl von großen L und B) zwei Maßnahmen sinnvoll:

- Kavitation muss durch Anheben des statischen Druckes (Bedruckung) verhindert werden
- Viskosität sollte klein sein, d.h. das Wasser geheizt werden

Die Viskosität von Wasser ist im betrachteten Bereich fast nur von der Temperatur, jedoch quasi nicht vom statischen Druck abhängig. Während Wasser bei ca. 15°C noch einen gut nutzbaren Viskositätsgradienten von ca. $dv/dT \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/(\text{s}\cdot\text{K})$ besitzt, verringert sich dieser für 40°C auf ca. $dv/dT \approx 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/(\text{s}\cdot\text{K})$. Für den hier betrachteten Kanal mit einer Messstrecke von $1,0 \times 1,0 \text{ m}^2$ bei einer maximalen Geschwindigkeit von 6,0 m/s lässt sich die Kanal-Reynoldszahl durch ein Anheben der Wassertemperatur von 15°C ($Re_{\square,15^{\circ}\text{C}} \approx 0,52 \cdot 10^6$) auf 40°C ($Re_{\square,40^{\circ}\text{C}} \approx 0,88 \cdot 10^6$) um fast 70% steigern. Eine weitere Erhöhung der Wassertemperatur ist weniger wirksam. Zudem beginnt der Mensch ab etwa 40°C das Wasser

⁴ http://www.dlr.de/as/desktopdefault.aspx/tabid-192/402_read-1627/ (abgerufen 9.8.2013)

oder den durch das Wasser erwärmten Stahl als unangenehm heiß zu empfinden. Außerdem sei erwähnt, dass insbesondere rostfreier Edelstahl mit steigender Temperatur signifikant an Festigkeit verliert (dies muss in der strukturellen Auslegung bereits für eine Temperatur von 40°C berücksichtigt werden). Eine weitere Erhöhung der Kanaltemperatur bringt dann auch zunehmend konstruktive Probleme.

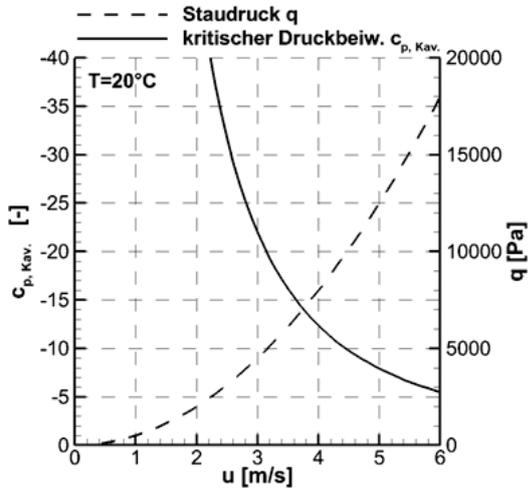


BILD 1. Staudruck q und Kavitations-Druckbeiwert $c_{p,Kav}$ für eine Wassertemperatur von 20°C bei statischem Druck 1013 hPa

Neben der Beheizung liefert aber vor allem eine hohe erreichbare Strömungsgeschwindigkeit einen Beitrag zu einer großen Kanal-Reynoldszahl. Wie oben bereits erwähnt führen größere Geschwindigkeiten jedoch zu Kavitation, welche auftritt, wenn lokal der statische Druck unter den Dampfdruck des Wassers fällt. BILD 1 zeigt den Zusammenhang für Wasser bei 20°C; der Verdampfungsdruck beträgt 2336 Pa. Geht man davon aus, dass in der aerodynamischen Forschung, z.B. in Saugspitzen von modernen Hochauftriebskonfigurationen, um die $c_p \approx -14$ [5] oder $c_p \approx -16$ [6] erreicht werden, so können mit $u \approx 3$ m/s in einem hierfür geeigneten Kanal mit $1,0 \times 1,0 \text{ m}^2$ Messstreckenquerschnitt an einem Profil der Streckung $\Lambda=3$ ($c=0,33 \text{ m}$) ohne weitere Maßnahmen nur Reynoldszahlen um die $Re \approx 850'000$ erreicht werden – Andernfalls besteht

die Gefahr der Kavitation.

BILD 2 zeigt den Kavitations-Druckbeiwert bei einer Kanalgeschwindigkeit von 6 m/s in Abhängigkeit des statischen Druckes und der Temperatur. Die Dichte von Wasser ist im betrachteten Bereich relativ schwach von der Temperatur abhängig. Die Temperaturabhängigkeit des Dampfdruckes wurde hier durch die Beziehung von Goff-Gratch angenähert – zwar ändert sich der Dampfdruck signifikant mit der Temperatur (von 2336 Pa bei 20°C auf 7374 Pa bei 40°C), ist allerdings im Vergleich zu Staudruck und statischem Druck gering, so dass die Konturlinien in BILD 2 trotz variierender Dichte und Dampfdruck nur schwach gekrümmt sind. Durch die Bedruckung des Kanals mit 3 bar (entspricht 2 bar Überdruck gegenüber der Umgebung) lässt sich $c_{p,Kav} \approx -16,5$ erreichen. Durch weitere Bedruckung ließe sich $c_{p,Kav}$ weiter senken, allerdings werden die technologischen Probleme größer – insbesondere müssen die Glasscheiben der Messstrecke dicker oder kleiner gestaltet werden, so dass die Anwendung optischer Messmethoden, was eine der Haupt-Motivationen für den Bau des Kanals war, zunehmend verschlechtert wird.

Zusammen mit diesen Vorüberlegungen zum Konzept und den erreichbaren Randbedingungen wurde die Gesamtgröße des Kanals iteriert. Es sollten in den Kanal Profile einer sinnvollen Profiltiefe mit einer Streckung von mindestens $\Lambda=3$ integriert werden können, was nach den Erfahrungen der Autoren die geringst-sinnvolle Streckung ist, mit der noch Hochauftriebsuntersuchungen ohne weitere Maßnahmen durchgeführt werden können. Dies führt auf eine Messstrecken-Größe von etwa $1,0 \times 1,0 \text{ m}^2$, da andernfalls die Profiltiefen zu klein werden, als dass diese präzise gefertigt werden könnten – zumal auch die Lasten groß sind. Die Messstrecke sollte vergleichsweise lang werden, um z.B. Nachlauf-Untersuchungen (etwa zur Integration von Triebwerken oder Nacelles) zu ermöglichen.

Es entstand so das Konzept eines Kanals mit einer Messstrecke von $1,0 \times 1,0 \text{ m}^2$ Querschnitt und 6 m Länge. Der Antrieb sollte so gewählt sein, dass Strömungsgeschwindigkeiten bis 6 m/s möglich werden. Gemäß obiger Überlegungen sollte der Kanal bis 40°C beheizbar und bis 3 bar bedruckbar sein. Die Kontraktion der Düse sollte $N=5$ betragen, was ein typischer Wert für Niedergeschwindigkeitskanäle ist und ausreichend geringe Turbulenzgrade zulassen sollte.

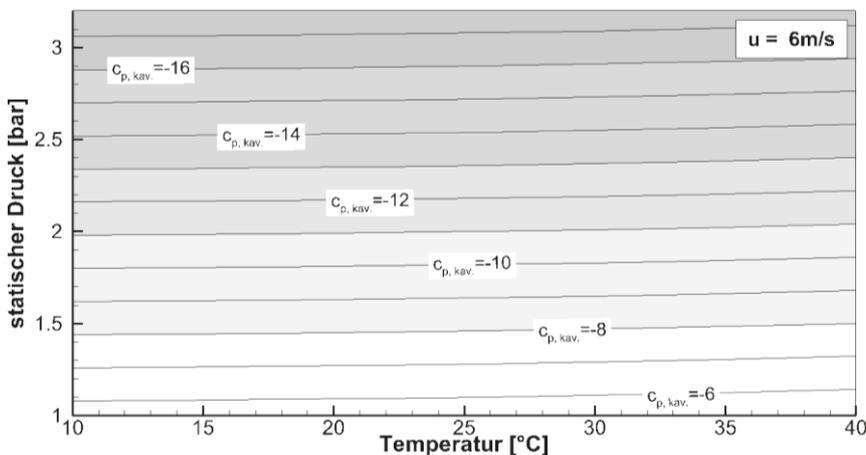


BILD 2. Kavitations-Druckbeiwert $c_{p,Kav}$ in Abhängigkeit des statischen Druckes und der Temperatur

3. AUSLEGUNG

3.1. Gesamtauslegung

Die Auslegung des Kanals erfolgte zunächst mit Hilfe der Stromfadentheorie anhand der in [7] dargestellten Methodik. Diese Rechnungen lieferten eine Abschätzung der in dem Kanal entstehenden Verluste und damit auch eine Größenordnung der notwendigen Antriebsleistung. Diese Nachrechnung wurde validiert anhand von Daten des am ISM betriebenen Windkanals „MUB“ und zeigte dabei sinnvolle Abschätzungen. Zusätzlich zu den strömungsmechanischen Größen wurden in den Auslegungsrechnungen auch Werte berechnet, die charakteristisch für den Bauaufwand (und damit letztlich für den Preis) sind, insb. die Seitenwandfläche, die proportional zu der Menge an Stahl ist, sowie das Füllvolumen, welches den Aufwand für die Sekundärtechnik charakterisiert.

BILD 3 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer solchen Nachrechnung für den letztlich umgesetzten Entwurf. Es ist insbesondere markant, dass das Fangsieb (zwischen Messstrecke und erster Umlenkecke) etwa ein Viertel des gesamten Verlustes ausmacht. Darüber hinaus haben die erste und zweite Umlenkecke mit 18% und 13% einen signifikanten Anteil. Dies ist der in diesem Kanalteil herrschenden großen Strömungsgeschwindigkeit geschuldet und könnte erheblich reduziert werden, wenn zwischen Messstrecke und Umlenkecke zunächst ein Diffusor eingebaut würde. Dies wurde zugunsten der Baulänge des Kanals nicht umgesetzt (bis auf ein sehr kurzes Diffusorstück, dieses dient aber vor allem dazu, den am Ende der Messstrecke nicht-quadratischen Querschnitt wieder in einen quadratischen Querschnitt überzuleiten).

Somit war eine wesentliche Erkenntnis dieser Grundausslegung, dass die notwendige Leistung kaum ein treibender Faktor für die Gesamtauslegung ist. Der am Ende gewählte Entwurf hat rechnerisch einen Leistungsbedarf (ohne Pumpen- und Antriebswirkungsgrade) von 66 kW, während eine auf sehr geringe Verluste ausgelegte Kanalgeometrie auch bereits 52 kW Leistung verlangt. Dies ist nominell zwar fast ein Viertel weniger, da die Antriebsleistung jedoch ohnehin zumeist überdimensioniert wird und auch derart fein gestufte Motoren, Frequenzrichter und Getriebe auf dem Markt nicht zu finden sind, ist diese Leistungersparnis kaum bedeutend. Dabei stehen (ohne

Rippen u.ä.) einer Seitenwandfläche von 201 m² für den „strömungsoptimierten“ Entwurf eine Fläche von 165 m² für den kompakten Entwurf gegenüber. Diese 20% Mehrfläche ist in der Kostenbilanz deutlich relevanter als die notwendige Mehrleistung der Antriebsmaschine, da diese Fläche mehr Schweißarbeiten, mehr Rippen, dickere Stahlplatten und ein größeres Wasser-Volumen bedingt und den Entwurf daher überdimensional komplexer macht.

Diese Betrachtungen führten auf eine eher kompakte Bauweise mit einem Steildiffusor zwischen der vierten Umlenkecke und der Vorkammer. Die Gesamtlänge des Kanals ergibt sich im Wesentlichen aus der Messstreckenlänge sowie der Länge von Vorkammer (Abschätzungen in [7]) und Düse (vgl. Abschnitt 3.2). Da bei einer langen Messstrecke die Reduktion der Geschwindigkeit in den Diffusoren unkritisch möglich ist, wurde der Steildiffusor nur eingeplant, um die Baugröße der dritten und vierten Umlenkecke zu reduzieren. Er wurde so ausgelegt, dass er sicher ohne lokale Ablösungen funktioniert. Hierfür wurde eine empirische Abschätzung aus der Literatur verwendet [8], deren Idee ist, durch Siebe einen Verlust zu erzeugen, der dem möglichen Druckrückgewinn entspricht. Im vorliegenden Falle hat der Steildiffusor eine äquivalente konische Expansion von ca. $\theta=25^\circ$ und ein Flächenverhältnis von 1,73. Es wird dann durch zwei Siebe so viel Verlust erzeugt ($\Sigma\zeta\approx 0,9$, rechnerisch) um die in [8] benannte Bedingung zu erfüllen. Als weiterer Vorteil der kompakten Bauweise mit Steildiffusor ist zu nennen, dass das Volumen des Wassers, welches zum Hantieren in der Messstrecke abgelassen werden muss, kleiner wird.

3.2. Düse

Als Düse wurde ein Konturverlauf nach Börger [9] konstruiert. Da das Verfahren für rotationssymmetrische Düsen entwickelt wurde, wurde die Kontur mit einem empirisch gewählten Faktor von 1,3 in der Länge skaliert, um keine Längswirbel in den Ecken der hier rein quadratischen Düse zu erhalten. Es ist durchaus bekannt, dass das o.g. Verfahren keine optimalen Düsen im Sinne der Gleichförmigkeit liefert. Dennoch wurde hier zugunsten der Gesamtlänge des Kanals sowie des Volumens des abzulasenden Wassers eine sehr kurze Düse mit nur 1,6 m Länge gewählt.

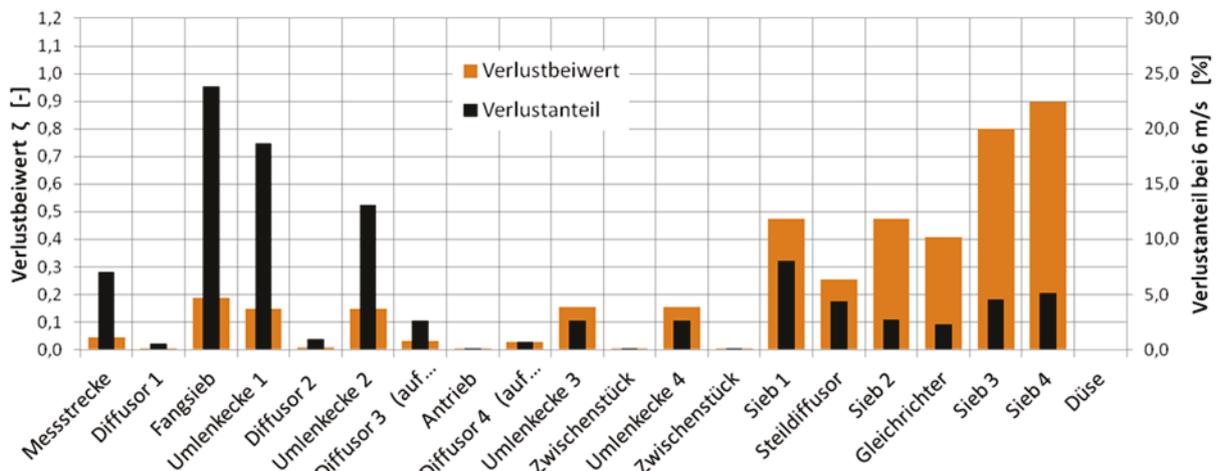


BILD 3. Verlustbeiwerte und -anteile der einzelnen Kanal-Komponenten (bei 6 m/s)

3.3. Umlenkprofile

Anders als in vielen Windkanal-Anlagen kann in einem Wasserkanal mit den angepeilten Daten die Umlenkung nicht über einfache Kreisbogenprofile erfolgen. Die durch das Wasser als Medium auftretenden Kräfte sind sehr groß und würden verlangen die dünnen Profile vielfach zu stützen, was deren prinzipiellen Vorteil (nämliche einfache Fertigung) wieder wettmachen würde.

Es wurden daher Profile aus [10] übernommen, die in Ihren Dimensionen modifiziert und an die Nutzung im hier beschriebenen Wasserkanal angepasst wurden. Nasenradius und Hinterkantendicke wurden zugunsten einer robusten Fertigung (Grauguss) modifiziert. Alle vier Umlenkecken sind mit identischen Profilen versehen, um die Formbaukosten beim Guss gering zu halten. Das genutzte Profil ist in BILD 4 dargestellt. Da die Staffelung der Umlenkprofile einen großen Einfluss auf die Kosten der Ecken hat, wurden die Profile mit unterschiedlicher Staffelung mit dem Verfahren MISES [11] nachgerechnet. Dabei wurde auch der Staffelungswinkel variiert, so dass für jede der vier Umlenkecken bei der größtmöglichen geometrisch (ganzzahlige Zahl an Schaufeln) und strömungsmechanisch (keine Ablösungen) sinnvollen Teilung jeweils der Staffelungswinkel bestimmt wurde, für den das Profil gerade eine Umlenkung von 90° besitzt.

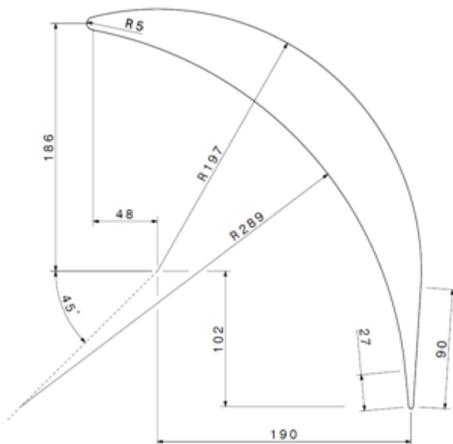


BILD 4. Umlenkprofil, basierend auf dem Entwurf der HYKAT-Profile [10]

Es ergeben sich die im Anhang dargestellten Werte für fünf Profile (kleine Umlenkecken), bzw. neun Profile (große Umlenkecken) mit jeweils angepasstem Einstellwinkel. Es sei erwähnt, dass in der o.g. Auslegung eine empirische Abschätzung für die Umlenkverluste aus [7] betrachtet wurde und nicht der aus MISES berechnete Verlustbeiwert: Da hier Ecken mit relativ wenigen Profilen eingesetzt werden, macht der reine Verlustbeiwert des Profiles nur einen geringen Anteil der Umlenkverluste aus.

Einige exemplarische Fälle der Profile wurden auch mit RANS-Methoden nachgerechnet, um die verfahrensbedingten Einschränkungen von MISES abzusichern. Es zeigte sich, dass MISES für die betrachteten Fälle gute Lösungen erzeugt. Auf eine Detailauslegung der Profile mit RANS wurde daher verzichtet, da kaum neue Erkenntnisse zu erwarten waren.

3.4. Vorkammer-Elemente

In der Vorkammer sind, neben den beiden Sieben im Steildiffusor, Sieb 1 und 2 in BILD 3, vgl. Abschnitt 3.1, ein Gleichrichter und zwei Turbulenzsiebe (Siebe 3 und 4) angebracht.

Für den Gleichrichter finden sich in der Literatur, vgl. [7], [8] recht konkrete Auswahlkriterien. Die Wirkung der Siebe hingegen lässt sich kaum seriös abschätzen, auch da die Anströmbedingungen für die Siebe (i.Allg.: Turbulenzgrad aus Umlenkecken und Steildiffusor) ihrerseits nicht gut abgeschätzt werden können. Grundsätzlich lässt sich formulieren, dass sich für einen Neuentwurf die Qualität der Siebe an der Kontraktion orientieren sollte: Es ist kaum sinnvoll eine geringe Kontraktion (geringe Turbulenzdämpfung) mit einer großen Menge an feinen Sieben (gute Turbulenzreduktion) zu kombinieren, genau wie umgekehrt große Kontraktionen wenig Sinn machen, wenn man nicht zuvor durch feine, hochwertige Siebe einen geringen Turbulenzgrad in der Vorkammer geschaffen hat.

Im vorliegenden Fall werden zwei Siebe aus Edelstahl-Drahtgewebe verwendet. Nach dem Gleichrichter folgt zunächst ein etwas gröberes Sieb aus 0,9 mm Draht mit einer Maschenweite von 4,5 mm, diesem ein etwas Feineres aus 0,8 mm Draht mit 3,7 mm Maschen. Die Wahl dieser Siebe war im Wesentlichen auf den Erfahrungen des ISM mit dem Windkanal „MUB“ begründet, der bei einer ähnlichen Größe und Kontraktion mit ähnlichen Sieben einen Turbulenzgrad von weniger als 0,2% liefert.

4. KONSTRUKTION

4.1. Kreislauf, Vorkammer, Ecken

Der Kreislauf des Wasserkanals, die Umlenkecken-Träger sowie die Vorkammer sind aufgebaut als Schweißkonstruktion aus Stahlplatten. Der Querschnitt des Kanals ist meist quadratisch und wird nur im Übergang von und zur Antriebspumpe auf einen runden Querschnitt überführt. Der Kanal ist außen mit zahlreichen Rippen versehen, um die Last des Innendruckes mit geringer Verwölbung der Seitenflächen aufzunehmen. Diese Konstruktion wurde gewählt, da sie sich als wirtschaftlicher erwies als ein mehrrecker Querschnitt, der zwar potentiell eine bessere Lastverteilung hätte und daher weniger Rippen benötigen würde, dafür aber nach einer komplexeren Vorfertigung der Einzelteile verlangt hätte. Alle Verbindungen zwischen den Bauelementen sind als Flanschverbindungen mit Flachdichtungen ausgeführt. Durch eine große Zahl an Schrauben in diesen Flanschen wurde die Dichtigkeit gewährleistet. Die Dicke der gequetschten Flachdichtungen wurde durch Vortests geprüft und in der Konstruktion berücksichtigt. Jeder Kanalteil ist über Mannloch-Deckel z.B. für Prüfung und Wartung zugänglich.

Die Umlenkecken sind aus Grauguss in einer Negativform gegossen. Diese Profile sind dann über Schrauben mit aus PVC gefrästen Abstandsstücken in den Eckenträger-Rahmen eingeschraubt. Die Profile sind in Ihrem Einstellwinkel nicht veränderbar – hier wurde ganz auf die Ergebnisse der Rechnungen vertraut. Die Elemente der Vorkammer (Steildiffusor-Siebe, Gleichrichter, Turbulenzsiebe) sind jeweils mit Hilfe von Zwischen-Flanschen formschlüssig integriert. Die Siebe sind aus Edelstahl, die Konstruktion des Gleichrichters wird in Abschnitt 4.2 noch detaillierter beschrieben.

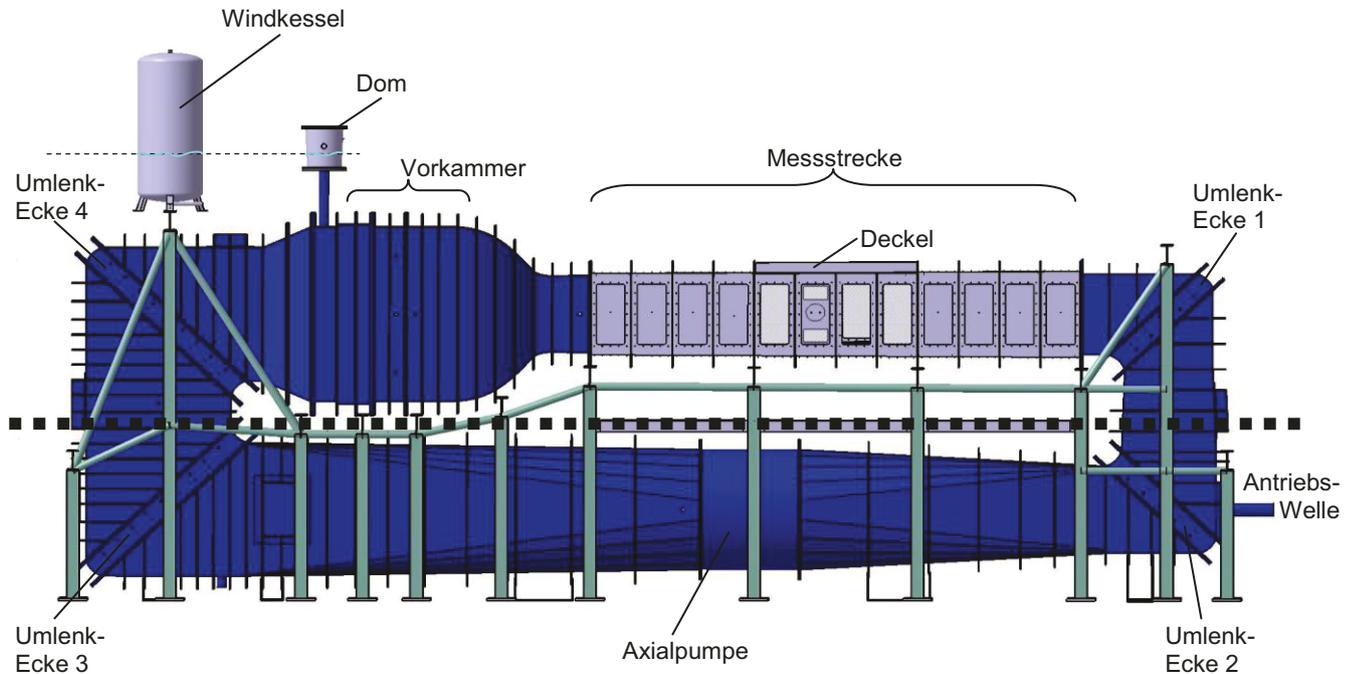


BILD 5. Ansicht des Kanals aus den Konstruktionsdaten; Tragegestell (oliv-grau), Kreislauf (blau) und Messstrecke (hellgrau). Nicht dargestellt die Antriebsmaschine und Teile der Sekundärtechnik; die dick-gestrichelte Linie zeigt das ebenerdige Niveau der Versuchshalle, die dünn-gestrichelte Linie den Wasserstand im Versuchsbetrieb

Die Pumpe ist eine von der Fa. Flowserve⁵ (Hamburg) gebaute 1,58 m-Axialpumpe mit vier im Stillstand von Hand einstellbaren Schaufeln aus zinkfreier Bronze. Das Gehäuse trägt über den 5-flügligen Leitapparat ein wassergeschmiertes Gleitlager. Die Welle ist schwimmend ausgeführt, diese wird über die zweite Umlenkecke sowie einen Kompensator und eine Dichtring-Einheit aus dem Kanal herausgeführt und dort über ein Untersetzungsgetriebe von einem frequenzgeregelten 160 kW Drehstrom-Asynchronmotor angetrieben.

Alle Elemente des Kanals – mit Ausnahme der Messstrecke, des Gleichrichters und der Siebe, sowie der Pumpenbeschaukelung – sind als Rostschutz mit einer hochwertigen, vergleichsweise dicken (ca. 500 µm) Zwei-Komponenten Epoxidbeschichtung (International Interzone 954) versehen. Gegenüber einer Verzinkung hat die Beschichtung den Vorteil einfacher reparabel zu sein. Außerdem wurde von verzinkten Anlagen berichtet, dass diese zu einer leichten Verschlammung neigen, was für optische Messmethoden nicht vorteilhaft ist. Es sei erwähnt, dass bei der 2K-Beschichtung nach wenigen Monaten zahlreiche Fehlstellen offenkundig wurden, insbesondere an Kanten und Schweißsporen, an denen sich deutlich sichtbare Rostfahnen bildeten. Diese Fehlstellen ließen sich jedoch durch Anschleifen und Nachbeschichtung beseitigen.

4.2. Gleichrichter

Als besonders problematisches Bauteil hat sich der Gleichrichter erwiesen: Durch die in Wasser erheblich größeren Lasten kommen die in Luft üblichen Wabenstrukturen oder extrudierten Polykarbonat-Röhrchen nicht in Frage. Gleichzeitig aber sollte der Gleichrichter zugunsten der Strömungsqualität nahtlos und ohne Zwischenrahmen ausgeführt sein, was eine Kantenlänge von 2,3 m

erforderte. Kommerziell verfügbare Produkte waren nicht zu finden.

Der Gleichrichter ist aufgebaut aus 1 mm dickem Edelstahl-Blech, welches auf einer Laserschneidanlage in 300 identische, kammartige Einzelbleche zerschnitten wurde (jeweils auf 50% der Breite mit einer 14mm Zunge und einem 1mm Schlitz). Die Kämmen wurden dann umgedreht ineinander geschoben, wodurch sich rechteckige Zellen mit der gewünschten Kantenlänge von 15 mm ergeben. Dabei stehen die Seitenbleche der Kammern jedoch jeweils zu 50% ohne eine seitliche Fixierung frei. Mithilfe von Test-Bauteilen wurde untersucht, wie sich diese Bleche stabilisieren lassen (Verlöten, Verschweißen, Verkleben), was jedoch aufgrund der großen Menge von insgesamt 45'000 Kreuzungspunkten einen extrem großen Aufwand darstellt. Da durch den damit verbundenen Materialauftrag zudem die Qualität der Kammern leidet, wurden diese Lösungen letztlich allesamt verworfen. Stattdessen wurde durch eine enge Passung der Schlitzes ausreichend Reibung zwischen benachbarten Zungen erzeugt, dass

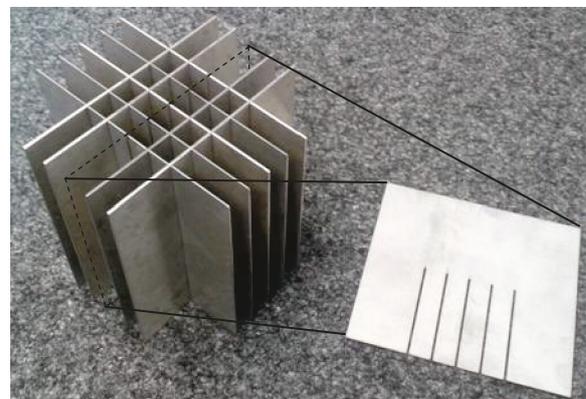


BILD 6. Eines der Gleichrichter-Testbauteile; hier mit herausgenommenem mittlerem Blech

⁵ www.flowserve.de Typ Pleuger

diese stabil bleiben. Diese Lösung hat sich als fest und betriebssicher erwiesen, erfordert bei der Montage des Gleichrichters allerdings eine große Menge Geduld, da für jedes der 150 Bleche einer Seite jeweils 150 eng passende Zungen in die zugehörigen Schlitzte einzufädeln sind.

Nach der Montage und vor der Integration in die Vorkammer wurde der gesamte Gleichrichter gebeizt und passiviert.

Die Festigkeitsrechnung eines Gleichrichters (und auch der Siebe) z.B. mit FEM ist recht aufwändig, da tatsächlich alle Zellen explizit modelliert werden müssen und – bis auf die makroskopische Achsensymmetrie – für die Zellen keine vereinfachenden Randbedingungen angewendet werden können. Die Festigkeit wurde daher für diese Bauteile durch Belastungstests experimentell geprüft.

4.3. Messstrecke

Das aus konstruktiver Sicht komplexeste Bauteil stellt die Messstrecke dar. Einerseits soll diese hochgradig modular sein, um eine Anpassung auf unterschiedlichste Versuche zu ermöglichen. Gleichzeitig aber sind die baulichen Toleranzen am geringsten, da diese unmittelbar die Gleichförmigkeit der Strömung beeinflussen. Die Messstrecke muss einen komfortablen optischen Zugang ermöglichen, aber auch einen Zugang zum Modell für Umbauten. Da in der Messstrecke schwere Versuchsmodelle bewegt werden müssen, kommt zudem zumindest innen eine Beschichtung nicht in Frage, da diese schnell beschädigt würde. Die Messstrecke ist daher aus rostfreiem V2A-Stahl gefertigt.

Alle vier Seitenwände sind in jeweils 12 „Modulen“ mit dazwischen angeordneten Rippen ausgeführt. Als Modul können derzeit entweder Verbund-Sicherheitsglas-Scheiben für optischen Zugang, oder aber reine Edelstahl-Plattenelemente gewählt werden. Jede der vier Seitenwände der Messstrecke ist im Ganzen aus einer einzigen 15 mm Edelstahlplatte per CNC-gesteuerten Laser ausgeschnitten, so dass alle Module untereinander austauschbar sind. Die Module sind über Flachdichtungen von innen an die Seitenwände montiert. Durch aufwändige Prozesse während der Vorbereitung und des Verschweißens der Messstreckenteile konnte eine Präzision der Innenmaße (bei montierten Seitenwänden) von 0,1 mm erreicht werden.

In der Decke der Messstrecke ist ein 2 m × 1 m großer Deckel, der über Gewindestifte angezogen wird und die Messstrecke verschließt. Als einziges Element ist dieser Deckel „von außen“ verschraubt, um schnellen Zugang zum Versuchsmodell zu gewährleisten.

Um den durch die Aufdickung der Grenzschicht leicht abfallenden statischen Druck zu korrigieren, sind Deckel und Boden der Messstrecke in einem Winkel von 0,1° divergierend ausgeführt, während die Seitenwände exakt parallel zueinander angeordnet sind.

4.4. Sekundär- / Betriebstechnik

Bei einem Wasserkanal ist – viel weitergehend als in Luft – eine erhebliche Menge an Sekundärtechnik notwendig:

Ein Teil der Wassermenge (ca. 40 m³ der insgesamt 65 m³) kann in Puffertanks umgepumpt werden. Es ist hierzu eine frequenzgeregelter Pumpe mit entsprechenden Schiebern so angesteuert, dass diese sowohl zum Befüllen wie auch Entleeren verwendet werden kann. Der Kanal lässt sich in etwa 10 min so weit entleeren, dass der Zugang zum Versuchsmodell möglich ist. In der gleichen Zeit lässt sich der Kanal wieder befüllen, muss dann allerdings noch entlüftet werden (vgl. Abschnitt 5).

Der Kanal wird beheizt, indem ein Nebenstrom über eine eigene Umwälzpumpe und einen Wärmetauscher mit der Heizungsanlage des Instituts verbunden ist. Praktische Erfahrungen zu einem beheizten Betrieb liegen derzeit noch nicht vor.

Der statische Druck wird eingestellt und geregelt, indem der Kanal mit einem Windkessel verbunden ist. Der Windkessel ist so angebracht, dass die freie Oberfläche des Wassers knapp oberhalb des höchsten Punktes des Kanals liegt. Dem Kessel wird oberhalb der freien Oberfläche durch Druckluft der gewünschte statische Druck aufgeprägt. Der statische Druck wird durch ein Druckregelventil aktiv ausgegeregelt. Da der Kanal bei Bedruckung durch die elastische Deformation der Kanalwände an Volumen gewinnt, wird auch der Wasserstand im Kessel überwacht und kann korrigiert werden.

Die strukturelle Auslegung des Wasserkanals geht (mit entsprechenden Sicherheiten) von einem maximalen Überdruck gegen die Umgebung von 2 bar aus. Durch zwei mechanische Überdruckventile wird sichergestellt,

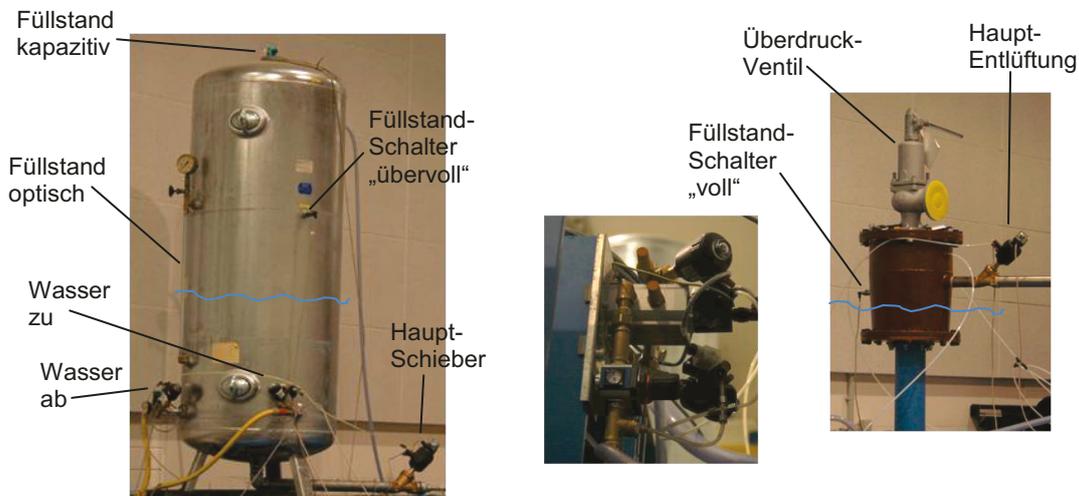


BILD 7. Einige Elemente der Sekundärtechnik, (Links): Windkessel mit Sensoren zur Füllstandregelung, (Mitte): Druckregleinheit, (Rechts): Dom mit Sicherheitsventil und Haupt-Entlüftung



BILD 8. Weitere Elemente der Sekundärtechnik: Die Befüll- und Entleer-Einheit (oben) und der Keller mit den Puffertanks (unten)

dass dieser Druck nicht überschritten werden kann. Einerseits ist in dem Windkessel ein Luft-Überdruckventil eingebracht, welches verhindert, dass sich bei einer Fehlfunktion der Druckregel-Anlage ein kritischer Druck im Windkessel aufbauen kann. Andererseits ist im oberen Bereich des Kanals ein Überdruckventil eingebracht, das bei einem unzulässigen Überdruck den Kanal sofort wieder auf atmosphärische Bedingungen bringt. Letzteres wurde angebracht, da es theoretisch möglich ist, mit Hilfe des in einer normalen Wasserzuleitung anliegenden Überdrucks (ca. 6 bar) den Kanal zu bedrücken (hierzu müsste allerdings eine Vielzahl an Schiebern und Ventilen falsch gestellt sein und die Software-Überwachung abgeschaltet werden).

Wenngleich nur ein sehr geringer Teil des Kanals verglast ist, bilden sich im Wasser ohne weitere Maßnahmen nach wenigen Wochen Kleinst-Algen, die zu einer zunehmenden Trübung des Wassers führen. Um dem entgegen zu wirken ist ein Sekundärkreis des Kanals durch eine Filteranlage geführt – ein kommerzielles System aus der Schwimmbadtechnik. Es besteht im Wesentlichen aus einem Mehrschicht-Filterkessel zur Filterung von Schwebpartikeln und einem UV-Filterssystem, welches Algen, aber auch Bakterien und Viren neutralisiert.

Es wurden bislang keine Systeme zur Entgasung des Wassers integriert. Es ist durchaus bekannt – auch aus eigener Erfahrung mit anderen Prüfständen – dass frisch eingefülltes Wasser, in dem noch viel Gas gelöst ist, in Unterdruckbereichen ausgast, ein Effekt, der der Kavitation nicht unähnlich ist. Dies geht allerdings schnell zurück, wenn das Wasser über mehrere Tage „abgestanden“ ist. Demzufolge ist beim Aufbau der Sekundärtechnik darauf geachtet worden, dass möglichst kein Aufquirlen von freien Oberflächen stattfindet, welches wieder frisches Gas in dem Wasser lösen würde. Insgesamt ist mit der Sekundärtechnik des Kanals vorgesehen, das vorhandene

Wasser über einen langen Zeitraum von ggf. vielen Monaten zu nutzen, so dass es sicher ausgegast ist. Ein Nachbefüllen des Kanals aus der städtischen Versorgungsleitung ist nur dann notwendig, wenn das Wasser (z.B. für Wartung) vollständig abgelassen werden muss. Im normalen Betrieb verbleibt der untere Kanalast immer gefüllt.

4.5. Instrumentierung

Die allgemeine Betriebstechnik des Kanals umfasst eine größere Menge an Sensoren, von denen hier nur die wesentlichen benannt werden.

Die Geschwindigkeit in der Messstrecke wird – wie auch bei Windkanälen üblich – durch die Messung des Düsen-Druckgefälles in Ringleitungen bestimmt. Um etwaige Fehler dieser kritischen Sensoren zu detektieren kommen zwei parallel geschaltete Sensoren gleichen Typs (Honeywell FDW1JD, Differenzdrucksensor 350 mbar) zum Einsatz. Die Strömungsgeschwindigkeit ist derzeit nicht aktiv geregelt, sondern wird über die Umrichterfrequenz des Antriebsmotors gesteuert. Die Wassermasse ist jedoch sehr träge und die Geschwindigkeit somit sehr konstant, so dass eine Regelung nicht notwendig erscheint.

Die Kanaltemperatur wird über insgesamt sieben Sensoren (Typ PT100) gemessen, wobei fünf davon in unterschiedlichen Höhen in der Vorkammer montiert sind, um etwaige Temperatur-Schichtungen zu erkennen. Schichtungen bilden sich nach längerem Stillstand, sind jedoch nach wenigen Umläufen des Wassers bereits ausgeglichen.

Bereits in Abschnitt 4.4 wurde grob die Instrumentierung des Windkessels beschrieben, an dem über einen kapazitiven Sensor sowohl die Feinregelung des Wasserfüllstandes möglich ist, wie auch durch ein elektronisches proportional Druckregelventil (FESTO MPPE-Serie) die Regelung des statischen Druckes. Zusätzlich sind an verschiedenen neuralgischen Stellen im Kanal und im Windkessel Füllstandschalter angebracht, die im Betrieb wichtige Schaltpunkte während des Befüllens oder Entleerens liefern (z.B.: Messstrecke leer, Messstrecke gefüllt, Dom gefüllt, Windkessel gefüllt, Windkessel übertoll, etc.). Zusätzlich zum Kanal wird der Füllstand der Puffertanks überwacht.

Die gesamte Kanaltechnik wird in einem zentralen Schaltschrank zusammen geführt, in dem die Signale aller kanalseitigen Sensoren über ein modulares Scanner-System (Peekel e.bloxx Serie) erfasst und digitalisiert werden und dann über eine TCP/IP-Schnittstelle ausgelesen werden können. Über dieses System können auch zentral alle Ventile, Pumpen, Stellmotoren und Schieber angesteuert werden. Der Frequenzumrichter der Antriebspumpe ist über eine eigene Schnittstelle eingebunden, wird jedoch aus der gleichen Software heraus angesprochen.

4.6. Druckmesstechnik

Zusätzlich zu der kanalseitigen Instrumentierung wurde mit dem Kanal ein Vielkanal-Druckscannersystem erstellt. Messungen der statischen Druckverteilung sind in aerodynamischen Untersuchungen unverzichtbar, allerdings konnte kein kommerzieller Anbieter für ein passendes Scannersystem gefunden werden. Das Ziel war die simultane und relativ schnelle (Abtastrate 100 Hz), simultane Erfassung von 64 Druckmessstellen. An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass aufgrund der Inkompressibilität (und damit großen Schallgeschwindigkeit) von Wasser



BILD 9. Druckmess-Schrank mit 64 Kanälen und automatisierter Spülvorrichtung

Amplituden- und Phasenrichtige Druckmessungen auch durch längere Druckmessröhrchen möglich sind, sofern diese aufmerksam gespült werden. Daher sollte das System die Option einer automatisierten Spülvorrichtung bieten.

In dem erstellten System sind insgesamt 64 Differenzdruck-Sensoren des Typs Keller PD33x mit einer nominalen Genauigkeit von $0,05\%_{FS}$ verbaut. Die Referenzdruck-Seite der Sensoren ist zusammen geführt, d.h. auf alle Sensoren wird ein gemeinsamer Referenzdruck aufgelegt. Die Messdruck-Seite der einzelnen Sensoren ist mit Polyamid-Schläuchen und Schneidring-Verschraubungen zum Modell geführt (Schnellverschlüsse mit O-Ring-Dichtringen sind zwar überdruckfest, ziehen jedoch bei Unterdruck Luft in die Messleitung und sind daher nicht geeignet). Durch eine Kaskade von insgesamt 67 Magnetventilen können die Messleitungen zum Modell kurz vor den Sensoren gemeinsam getrennt und über einen einstellbaren Druckminderer mit dem normalen Hauswassernetz verbunden werden. Durch diese „Spülschaltung“ kann Wasser mit relativ hohem Druck durch die Leitungen gepresst werden, um diese somit von Luftblasen zu reinigen. Die Realisierung eines solchen automatischen Spülens der Leitungen war das komplizierteste Element der Anlage, allerdings muss dieser Vorgang nach jedem Zugang zum Modell (Entleeren der Messstrecke) ausgeführt werden, eine automatisierte Lösung für die 64 Sensoren war daher unabdingbar.

Das von den Sensoren temperaturkompensierte Signal wird analog als Spannungssignal übertragen und wiederum zentral zu einem modularen A/D-Wandler-System (ebenfalls Peekel e.bloxx Serie) geführt und dort digitalisiert. Die Module übernehmen dabei die Digitalisierung der Sensordaten, aber auch die Ansteuerung der Spülventile.

5. BETRIEB

Die bisher bestehenden Erfahrungen beim Betrieb des Kanals zeigen keine grundlegenden Probleme auf. Die gewünschte, maximale Geschwindigkeit von 6 m/s in der Messstrecke wird ohne Probleme erreicht. Pumpe und Antrieb bieten hier noch Reserven, für den Fall, dass ein Versuchsmodell einen großen Druckverlust in der Messstrecke erzeugt. Die Bedruckung des Kanals ist ebenfalls bis zu dem gewünschten Wert von 2 bar Überdruck mög-

lich. Die Heizanlage wurde bislang noch nicht in Betrieb genommen.

Als besonders positiv ist aufgefallen, dass der Kanal mit nur sehr geringen Nacharbeiten „auf Anhieb“ dicht war, was bei der Menge an Flanschen sicher nicht selbstverständlich ist. Mittlerweile wurden alle Mannlöcher und Deckel bereits mehrfach geöffnet und verschlossen; die Fläche um den Kanal ist genauso trocken wie bei einem Windkanal, so dass mit gutem Gewissen auch Messtechnik neben den Kanal aufgebaut werden kann.

Die bislang größte Herausforderung bei der Inbetriebnahme des Kanals ist das Ausspülen der bei der Befüllung entstehenden Blasen: Zugunsten der Strömungsqualität sind die Decken des Kanals in recht guter Näherung horizontal. Dies führt allerdings dazu, dass sich beim Befüllen in allen lokalen Maxima Luftblasen bilden, die kaum die Neigung haben in weit entfernte Entlüftungsleitungen zu schwimmen. Zusätzlich erschwert wird dies in der Vorkammer durch die zahlreichen Elemente wie Siebe und Gleichrichter.

Leider hat sich aber gezeigt, dass das Entfernen dieser Blasen absolut notwendig ist. Andernfalls werden diese bei schnelleren Kanalgeschwindigkeiten (ca. > 2 m/s) aufgeschert, beim Kanalumlauf zerkleinert und bilden dann einen immer dichter werdenden Vorhang aus sehr kleinen Blasen, was einen zuverlässigen Messbetrieb sowohl mit Druckmesstechnik, als auch mit optischen Methoden nicht erlaubt. Als Lösung wurden beim GWB durch Anbohren an allen lokalen Maxima Entlüftungsleitungen integriert, die mit dem Dom oder den Puffertanks verbunden sind. Zusätzlich wurde ein Prozess erarbeitet, der eine möglichst schnelle Entlüftung nach dem Befüllen sicherstellt. Dieser Prozess besteht im Wesentlichen aus dem Drosseln der Befüllpumpe und wiederholtem Anfahren und Stoppen des Kanals. Mit diesem Prozess werden nach und nach alle Blasen zu den Entlüftungsbohrungen transportiert, wo sie dann durch den von der Befüllpumpe vorgegebenen Massenstrom in die Puffertanks gedrückt werden und dort aufsteigen. Dieser Prozess dauert etwa 30 min, um nach Schließen des Kanals wieder messbereit zu sein.

Ferner kann an dieser Stelle darauf hingewiesen werden,



BILD 10. Der Kanal kurz nach der Aufstellung am neuen Standort im Forschungsbau am Campus Forschungsflughafen in Braunschweig

dass die Messung mit Sonden sehr viel komplexer ist als in Windkanälen. Während dort Sonden oft für einfache Ad-Hoc-Messungen in Frage kommen, gestaltet sich eine Sondenmessung in Wasser zumeist so komplex, dass sie gegenüber z.B. PIV kaum einen Vorteil hat:

Einerseits müssen wegen der großen Lasten die Einspannung und der Stiel aller Sonden sehr massiv aufgebaut werden, so dass die Störung der Strömung signifikant wird. Auch neigen die Sonden in Wasser zu starken Schwingungen – einerseits weil die Last (also die Anregung) groß ist, vermutlich aber auch, weil die energietragenden Skalen der Turbulenz den strukturellen Eigenfrequenzen der Sondenträger sehr viel näher sind als dies in Luft der Fall ist. Zusätzlich möchte man bei vielen Anwendungen von Sonden in verschiedene Richtungen traversieren. Dies kann am Wasserkanal bereits bei einer einfachen Traversierung in Stiel-Längsrichtung eine Herausforderung werden (es können z.B. geschliffene Dichtflächen am Sondienstiel notwendig werden), eine Traversierung in andere Richtungen ist nicht mit sinnvollem Aufwand umzusetzen.

Als letzter Punkt soll angesprochen werden, dass trotz o.g. aufwändiger Maßnahmen zur Entlüftung des Kanals nicht konsequent sichergestellt werden kann, dass an der Messstrecken-Decke gelegentlich einzelne Blasen entlang transportiert werden. Dies muss bei Messaufbauten beachtet werden. Einerseits sollte vermieden werden, Versuchsmodelle so anzuordnen, dass diese gelegentlich auftretenden Blasen einen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis haben (was in der Praxis jedoch keine große Einschränkung ist). Andererseits sollte die Messstrecken-Decke nach Möglichkeit nicht genutzt werden, um dort Lichtschnitte einzukoppeln: die Blasen brechen den Laserschnitt, was zu einem Schatten im Beobachtungsfenster führt. Da die Blasen sich relativ langsam bewegen ist damit dann eine Vielzahl von PIV-Bildern unbrauchbar. Sollte ein derartiger Aufbau nicht vermieden werden können, so muss die o.g. Prozedur für das Entlüften des Kanals ggf. stark verlängert werden, was einen weniger effizienten Messbetrieb bedeutet.

6. MODELL EINES HOCHAUFTRIEBSPROFILES IM DFG-SFB 880

In der ersten Messkampagne in dem neuen Kanal wird ein Profil mit aktiver Strömungskontrolle durch eine sog. Coanda-Klappe untersucht werden. Dieses Profilmodell zeigt auf anschauliche Weise einige Erfahrungen im Aufbau von Modellen für den GWB auf und soll daher hier diskutiert werden.

Das Profil basiert ursprünglich auf dem sog. DLR F-15

Profil [12]. In der hier realisierten Variante besitzt das Profil eine sehr stark ausgeschlagene (65°) strahlüberbläsene, spaltlose Hinterkantenklappe. Ähnliche Konfigurationen sind sowohl numerisch, wie auch im Windkanal bereits erfolgreich untersucht worden [5][13][12][14]. Am GWB-Modell wird zusätzlich eine Vorderkante in Form einer „droopnose“ umgesetzt [15], die ohne Konturknicke relativ stark ausgeschlagen ist, da sich hierdurch gemäß der o.a. numerischen Berechnungen die Effizienz des aktiven Systems um ca. 30% steigern lässt. An dem Modell werden Auftriebsbeiwerte um die $c_A \approx 6$ erwartet. Bei der vorgesehenen Konfiguration mit $Re = 2,0 \cdot 10^6$ und $u = 5 \text{ m/s}$ führt dies zu einer Auftriebskraft von etwas über 16 kN (!) bei einer Profiltiefe von $c = 0,3 \text{ m}$.

Diese Kraft muss von dem Modell aufgenommen und in die Anstellwinkel-Traverse eingeleitet werden. Gleichzeitig aber muss das Modell hohl gestaltet sein, um den Wandstrahl zu realisieren. Das hierzu notwendige Wasser wird durch eine KSB Movitec VF32-7 PD 7-stufige Inlinepumpe bedruckt und durch beide Seiten des Profiles in das Modell eingebracht. Innen wird es durch einen Kanal geführt und entlang einer Düse über der Klappen-Scharnierlinie stark beschleunigt, bevor es durch einen durchgehenden, spannweiten Schlitz austritt. Die lokale Geschwindigkeit des Wassers in diesem Wandstrahl bei einem Impulsbeiwert von $c_u = 0,06$ beträgt ca. 35 m/s, der Massenstrom ca. 7 kg/s.

Das Modell wurde in insgesamt 4 Modulen gefertigt: Ein kombiniertes Element für Vorderkante (Droopnose) und Profilerbeseite, Profilerbeseite, Klappenelement und ein kleines Modul, welches die Ausblase-Lippe darstellt. Alle Module sind aus rostfreiem Edelstahl gefräst und gegeneinander verschraubt und verstiftet, wobei alle Schraubköpfe auf der für den Hochauftrieb weniger interessanten Profil-Druckseite versenkt und abgespachtelt sind. Trotz der recht massiven Bauweise wird eine Deformation des Mittelschnittes von bis zu 0,5 mm erwartet. Um diese gering zu halten, ist das Modell über Holmstummel Kraft- und Momentenstarr mit der Anstellwinkel-Traverse verbunden. Die Holmstummel sind beim Fräsen der Profilerbeseite und -oberseite direkt mit aus dem Vollen gefräst worden – sie sind hohl und dienen neben der Kraftübertragung auch der Zuleitung des Wasser-Massenstromes für den Coanda-Wandstrahl. Die strukturelle Festigkeit des Modells wurde durch unterschiedlichste FEM- Nachrechnungen gewährleistet, wobei hier nicht nur die reine Festigkeit, sondern insbesondere auch die Deformation des Coanda-Schlitzes betrachtet wurde.

Das Modell ist im Mittelschnitt mit 68 Druckmessbohrungen instrumentiert. Auf die Klappe sind weitere 4 Bohrungen, die gedacht sind das Signal mit eigenen Sensoren in

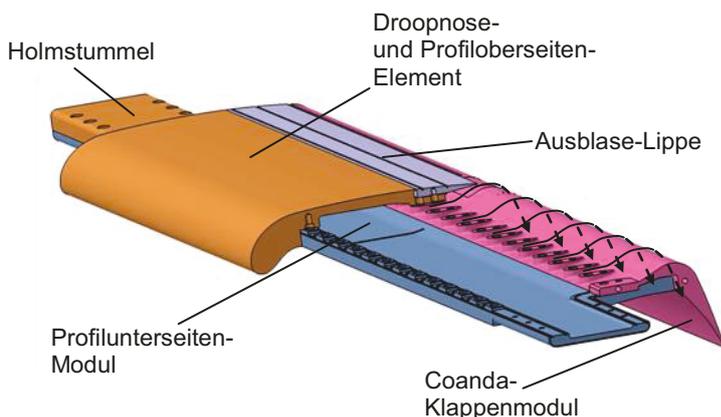


BILD 11. Das Profil für aktiven Hochauftrieb; (Links): CAD-Konstruktion vier Modulen; (Rechts) Fertiges Modell, im Vordergrund der massive Holmstummel, der auch als Wasserzuführung genutzt wird.

eine Strömungsregelungs-Schleife einzubinden. Die Druckmessbohrungen wurden zunächst als $\varnothing=1$ mm drahterodiert, in diese Bohrung wurden Druckmessröhrchen aus Neusilber mit 1 mm Außen- und 0,8 mm Innendurchmesser eingeklebt. Vorversuche hatten gezeigt, dass es keine Korrosion zwischen Neusilberöhrchen und Edelstahlmodell gibt. Wegen der einfacheren Verarbeitung wurde deshalb Neusilber verwendet. Außerhalb des Modells werden Polyamid-Schläuche auf die Neusilberöhrchen geklebt – zur Montage/Demontage des Modells muss diese Verbindung lösbar sein, gleichzeitig aber Unterdruck- (Messung z.B. der Saugspitze) und Überdruck-fest (Spülbetrieb) und zusätzlich relativ klein, um den Strang mit Druckmessröhrchen durch die Aufhängung durchfädeln zu können. Da keine geeigneten Verbindungsmittel gefunden werden konnten, wurde eine Klebverbindung gewählt, die sich unter Wärme wieder lösen lässt.

Abschließend sei erwähnt, dass an dem Modell, neben der Druckmessung und zeitauflösendem PIV, auch andere Messmethoden (z.B. Heißfilm-Arrays) angewendet werden. Über Ergebnisse der Messungen wird an anderer Stelle ausführlich berichtet werden.

DANKSAGUNGEN

Im Vorentwurf und bei der Konstruktion des Kanals wurden zahlreiche Fachgespräche mit Betreibern bestehender Kanäle geführt. Die Autoren danken für sehr offene Diskussionen und wertvolle Hinweise den Teams von: • Kavitationskanal „HYKAT“ bei der HSVA (Hamburg) • Umlaufkanal des Instituts für Schiffbau der Fachhochschule Kiel • Wasserkanal und Wasserschleppkanal des ILR, RWTH Aachen.

Ein großer Dank gebührt auch den mit der Detailkonstruktion und Fertigung beauftragten Firmen für wertvolle Diskussionen mit zahlreichen lehrreichen Hinweisen, sowie deren engagierte und fachgerechte Umsetzung: Fa. Stahl-Projektbau Wentz GmbH⁶, Herr F. Wentz, und die Braunschweigische Maschinenbauanstalt AG⁷ (BMA), Hr. Dohnalek und viele andere.

LITERATUR

- [1] Rudnik, R., Reckzeh, D., Quest, J., *HINVA - High lift Inflight Validation - Project Overview and Status*, 50th AIAA Aerospace sciences meeting, Nashville, USA, 09. – 12. Januar 2012
- [2] Politz, Chr., Lawson, N., Konrath, R., Agocs, J., Schröder, A., *Development of Particle Image Velocimetry for In-Flight Flow Measurement*. In: Research Topics in Aerospace Advanced In-Flight Measurement Techniques (Chapter 16). Springer Verlag, 2013, Seiten 269-289
- [3] Geisler, R., Agocs, J., Schanz, D., Schröder, A., *Time-resolved tomographic PIV of a high-lift configuration in an industrial-grade wind tunnel*. 16th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon, Portugal, 09.-12. Juli 2012
- [4] Pêgo, J.P.G.M., *Moderne Techniken der Strömungsmechanik zur Untersuchung von Schiffsantrieben*,

Dissertation Technische Fakultät Universität Erlangen-Nürnberg, 2007

- [5] Pfingsten, K.C., Cecora, R.D., Radespiel, R., *An experimental investigation of a gapless high-lift system using circulation control*, KATnet II Conference on Key Aerodynamic Technologies, Bremen, 12. – 14. Mai 2009
- [6] Scholz, P, Mahmood, S.S., Casper, M., Radespiel, R., Sitzmann, M., Ciobaca, V., *Experimental and Numerical Investigations on the Control of Airfoil Stall using Vortex Generator Jets*, AIAA 2010-4250, 5th AIAA Flow Control Conference, Chicago, USA, 28. Juni – 1. Juli 2010
- [7] Barlow, J.B., Rae, W.H., Pope, A., *Low-speed wind tunnel testing*, Wiley, 1999, ISBN 0471557749
- [8] Mehta, R.D., Bradshaw, P., *Design rules for small low speed wind tunnels*, Technical Note, The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, 1979
- [9] Börger, G.G., *Optimierung von Windkanaldüsen für den Unterschallbereich*. Zeitschrift für Flugwissenschaft, Bd.23, 1975, S. 45 - 50.
- [10] Weitendorf, E.A., Friesch, J., Song, C.C.S., *Considerations for the new Hydrodynamics and Cavitation Tunnel (HYCAT) of the Hamburg Ship Model Basin (HSVA)*, ASME International Symposium on Cavitation Research Facilities and Techniques, Boston, 13.-18. Dezember 1987
- [11] Drela, M., Youngren, H., *A User's Guide to MISES 2.63*, <http://web.mit.edu/drela/Public/web/mises/> (abgerufen 12.8.2013)
- [12] Wild, J., *Experimental investigation of Mach- and Reynolds-number dependencies of the stall behavior of 2-element and 3-element high-lift wing sections*, AIAA 2012-108, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Nashville, USA, 6.-9. Januar 2012
- [13] Jensch, C., Pfingsten, K. C., Radespiel, R., Schuermann, M., Haupt, M., Bauss, S.: *Design Aspects of a Gapless High-Lift System with Active Blowing*, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009, Aachen, 8.-10. Dezember 2009
- [14] Pfingsten, K.C., Radespiel, R., *Experimental and numerical investigation of a circulation control airfoil*, AIAA 2009-533, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, USA, 5.-8. Januar 2009
- [15] Burnazzi, M., Radespiel, R., *Design of a Droopnose Configuration for a Coanda Flap Application*, AIAA-2013-0487, 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting, Grapevin, USA, 7.-10. Januar 2013.

⁶ <http://www.spwentz.de>

⁷ <http://www.bma-worldwide.com> Abteilung Auftragsfertigung

ANHANG: DATEN ZUM „GROßEN WASSERKANAL BRAUNSCHWEIG“ (GWB)

In der Reihenfolge der Durchströmung:

Messstrecke

Höhe x Breite: 1 m × 1 m; Länge: 6 m

Decke und Boden 0,1° divergierend zur Korrektur des statischen Druckes; Edelstahl-Rahmenplatten mit modularen Edelstahl-Platten- oder Verbund-Sicherheitsglas-modulen; Alle Module gegeneinander tauschbar, Präzision aller Dimensionen besser als 0,1mm

Fangsieb / Fanggitter

Edelstahl Tretgitter in Einbaurahmen, Tiefe 25 mm, Maschenweite 30 mm; Blechdicke 2 mm

Diffusor 1

Von 1,0 m × 1,05 m auf 1,06 m × 1,06 m; Länge: 0,5 m

Umlenkecke 1

Ein- und Austritt: 1,06 m × 1,06 m

Fünf Umlenprofile Typ HYKAT (mod.) mit c=380 mm; Teilung t/c=0,65; Staffelung 6,5°

Diffusor 2

Von 1,06 m × 1,06 m auf 1,16 m × 1,16 m; Länge: 0,89 m

Umlenkecke 2

Ein- und Austritt: 1,16 m × 1,16 m

Fünf Umlenprofile Typ HYKAT (mod.) mit c=380 mm; Teilung t/c=0,70; Staffelung 7,8°

Diffusor 3 (Übergang von eckig auf rund)

Von 1,16 m × 1,16 m auf Ø 1,58 m; Länge: 3,75 m

Antrieb

Innendurchmesser 1,58 m; Länge 1,2 m

Axialpumpe mit vier im Stillstand von Hand verstellbaren Schaufeln, fünf feste Leitschaufeln, Pumpenseitige Lagerung über wassergeschmiertes Gummilager; schwimmende Fernwelle durch Umlenkecke 2

160 kW 4-pol Drehstrom-Asynchronmotor an Siemens Frequenzumrichter; Untersetzungsgetriebe; Kompensator

Diffusor 4 (Übergang von rund auf eckig)

Von Ø 1,58 m auf 1,75 m × 1,75 m; Länge: 5,56 m

Umlenkecke 3

Ein- und Austritt: 1,75 m × 1,75 m

Neun Umlenprofile Typ HYKAT (mod.) mit c=380 mm; Teilung t/c=0,65; Staffelung 6,7°

Zwischenstück

Ein- und Austritt: 1,75 m × 1,75 m; Länge: 0,25 m

Umlenkecke 4

Ein- und Austritt: 1,75 m × 1,75 m

Neun Umlenprofile Typ HYKAT (mod.) mit c=380 mm; Teilung t/c=0,65; Staffelung 6,7°

Zwischenstück

Ein- und Austritt: 1,75 m × 1,75 m; Länge: 0,25 m

Steildiffusor

von 1,75 m × 1,75 m auf 2,3 m × 2,3 m; Länge: 0,6 m

Steildiffusor mit zwei Sieben; äquivalente konische Expansion basierend auf hydraulischem Durchmesser: $\theta=24,6^\circ$; Flächenverhältnis 1,73

Sieb 1 und 2 (Mitte Steildiffusor und Ausgang Steildiffusor)

Edelstahl Gewebe Ø 1 mm; Maschenweite 7 mm; Zwischen Flanschflächen gespannt und verklebt

Vorkammer

2,3 m × 2,3 m; Gesamtlänge: 1,6 m

Gleichrichter

Selbstgefertigtes Gitter aus 1 mm Edelstahlblech; quadratische Zellen mit 14 mm lichter Weite; Tiefe: 132 mm; montiert in Rahmen und über Flansche verklemmt

Sieb 3

Edelstahl Gewebe Ø 0,9 mm; Maschenweite 4,5 mm; Zwischen Flanschflächen gespannt und verklebt

Sieb 4

Edelstahl Gewebe Ø 0,8 mm; Maschenweite 3,7 mm; Zwischen Flanschflächen gespannt und verklebt

Düse

von 2,3 m × 2,3 m auf 1,0 m × 1,0 m; Länge: 1,61 m

Kontur nach Börger [9], in der Länge um Faktor 1,3 skaliert; Stahlblech gewalzt und verschweißt, dann verrippt