

# EIN MOBILER FLACHWASSERKANAL ZU VISUALISIERUNGSZWECKEN

C. Hoffrogge

st107225@stud.uni-stuttgart.de

B. Kraus

lrt86754@stud.uni-stuttgart.de

Yao L.

a0087302@nus.edu.sg

S. Passeck

st101286@stud.uni-stuttgart.de

D.-M. Zimmermann E. Jost E. Krämer

Institut für Aerodynamik und Gasdynamik (IAG)  
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 21, DE-70569 Stuttgart

## Zusammenfassung

Der mobile Flachwasserkanal des IAG wurde im Sommersemester 2014 als Projektarbeit von Studierenden der Luft- und Raumfahrttechnik entwickelt und gebaut. Er dient im Hörsaal zur Visualisierung zahlreicher Vorgänge der Fluidmechanik und kommt in den Veranstaltungen zur Grundlagenvorlesung Strömungslehre 1&2 zum Einsatz. Er ist in der Lage, viele der Strömungsvorgänge zu visualisieren, die in besagter Vorlesung behandelt werden, wie z. B. die Kármánsche Wirbelstraße, Ablösung an Flügelprofilen oder Prozesse der Gasdynamik, welche mit Hilfe der Flachwasseranalogie gezeigt werden können.

## 1 HINTERGRUND UND ANFORDERUNGEN

### 1.1 Die Vorlesung Strömungslehre Grundlagen

Im Curriculum des Studiengangs *Luft- und Raumfahrttechnik* der Universität Stuttgart ist die Vorlesung *Strömungslehre Grundlagen* im vierten und fünften Semester angesiedelt. In der ersten Hälfte der Veranstaltung stattet Professor Dr. Ewald Krämer die Zuhörer mit Grundwissen zu Hydro- und Aerostatik, Erhaltungssätzen, Rohrströmung und Ablösung aus. Im darauffolgenden Semester werden Wirbel, Potentialströmungen sowie die Gasdynamik behandelt.

Die visuelle Demonstration der verschiedenen Strömungsvorgänge stellte sich jedoch problematisch dar. Die bisherigen Versuchsmethoden beinhalteten die Vorführung eines tragbaren Windkanals, welcher nicht zufriedenstellend funktionierte. Strömungssituationen aus dem Gebiet der Gasdynamik konnten nur durch statische Bilder gezeigt werden. Mit dem Auftrag an eine studentische Projektgruppe, einen mobilen Flachwasserkanal (MFWK) für die Lehre zu bauen, unternahmen die Verantwortlichen des IAG einen Versuch, diese Probleme zu lösen.

### 1.2 Die Projektarbeit LRT

Die Studierenden ergänzen ihr Studium um fachaffine sowie fachübergreifende Schlüsselqualifikationen (SQ). Die *Projektarbeit Luft- und Raumfahrttechnik* findet sich im Katalog der fachaffinen SQ. Sie hat eine Laufzeit von zwei Semestern und wird mit sechs Leistungspunkten angerechnet. Im ersten Kurssemester erlernen die Teilnehmer Grundlagen aus dem Projektmanagement, wie z. B. Zeitaufteilung, Arbeitseinteilung oder Finanzplanung. Am Ende dieses Semesters besuchen Vertreter der Institute den Kurs und stellen aktuell verfügbare Projekte vor, alternativ können sich

Gruppen auch mit eigenen Ideen bei den Instituten melden.

Für das IAG brachten Dipl.-Ing. Eva Jost und Dipl.-Ing. Dina-Marie Zimmermann das „Projekt Tischwasserkanal“ ein. Ziel war die Entwicklung und Herstellung eines kompakten Versuchsapparates zur Visualisierung verschiedener Vorgänge und Phänomene der Fluidmechanik live im Hörsaal, unter Verwendung von Wasser als Strömungsmedium. Die Projektgruppe bestand aus sechs studentischen Mitgliedern aus der Luft- und Raumfahrttechnik sowie dem Maschinenbau.

### 1.3 Anforderungen

Die ursprünglich seitens der Projektleitung vorgegebenen Anforderungen waren recht allgemein gehalten. In der Konzeptfindungsphase wurden diese Anforderungen nicht nur präzisiert, sondern auch um neue Bestandteile erweitert. Besagte Anforderungen lassen sich in vier Bereiche einteilen:

#### Portabilität

- Der Kanal muss mobil sein, er soll vom IAG zu den Hörsälen gebracht werden.
- Der Zugang zu den Hörsälen muss durch die Abmessungen des Kanals gewährleistet sein.
- Der Kanal muss gegen Erschütterungen und Schläge resistent sein, da er über Pflasterwege und unbefestigte Straße gefahren werden soll.
- Der Kanal muss im leeren Zustand anhebbar sein.

## Funktion

- Die geforderten Strömungsvorgänge müssen kontinuierlich dargestellt werden.
- Der Schwerpunkt liegt auf der visuellen Qualität, es sollen keine Messungen stattfinden.
- Der Kanal muss geräuscharm laufen, damit die vorgeführten Phänomene gleichzeitig erklärt werden können.
- Der Kanal muss schwingungsarm sein, um Störungen des laminar strömenden Wassers im Kanal zu vermeiden.
- Der Kanal muss trotz großer Zeitabstände zwischen den Anwendungen funktionieren.

## Visualisierung

- Die Strömungsvorgänge müssen durch eine Kamera mit ausreichender Bildqualität erfasst werden.
- Die Kombination der zur Visualisierung eingesetzten Farben muss die Strömungsvorgänge gut darstellen.
- Die Visualisierung muss für einen ausreichenden Zeitraum aufrecht erhalten werden können.

## Bedienung

- Die Bedienung des Kanals soll so einfach wie möglich sein.
- Die Anzahl der Regelungsmöglichkeiten ist gering zu halten.
- Die Lehrperson soll den Kanal während des Vortrags selbst bedienen können.
- Der Kanal ist gegen Schäden durch falschen Bedienung auszulegen.

Durch die Erweiterung der Anforderungen gegenüber der ursprünglichen Aufgabenstellung entstand am Ende ein deutlich leistungsfähigeres Gerät als zuerst erwartet. Im folgenden Abschnitt wird dargelegt, wie die rechnerische und experimentelle Auslegung des Kanals erfolgte. Im Abschnitt danach wird die Konstruktion des Geräts beschrieben. Die Ergebnisse der Erprobung und die Erfahrungen aus dem Einsatz finden sich im darauffolgenden Abschnitt. Abschließend werden die Grenzen des Konzepts und die empfohlenen Änderungen erläutert.

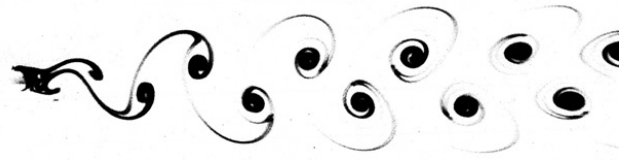


BILD 1. Kármánsche Wirbelstraße bei  $Re = 105$ . Aus [1], digital modifiziert.

## 2 AUSLEGUNG

In diesem Abschnitt soll auszugsweise die rechnerische und experimentelle Auslegung erklärt werden, auf welcher die Konstruktion des MFWK basiert. Diese Auslegung umfasst sowohl die Berechnung der Strömungsparameter wie z. B. der Fließgeschwindigkeit als auch die Bestimmung der Position der Netze, die zur Beruhigung der Strömung eingesetzt werden. Zuerst wurden allerdings die Gesamtmaße des Aufbaus bestimmt.

### 2.1 Außenabmessungen

Die Festlegung der maximalen Außenabmessungen des Kanals erfolgte durch die Erfassung der Breiten von Türen sowie der Innenabmessungen von Aufzügen an allen relevanten Stellen des Campus Vaihingen. Dadurch wurde festgelegt, dass der MFWK maximal 1,5 m lang und 0,75 m breit sein durfte (der MFWK nutzt diese Maximalwerte fast voll aus, siehe Abschnitt 3.4). Daraus wiederum konnten die Baugrößen der internen Komponenten des MFWK eingegrenzt werden. Des Weiteren wurde eine Höchstleermasse von 100 kg festgelegt, damit der Aufbau von vier durchschnittlichen Personen problemlos angehoben werden kann.

### 2.2 Strömung

Ausgehend von anderen Bauformen von Flachwasserkanälen sowie den zuvor festgelegten Außenabmessungen wurde die Geometrie der Laufstrecke bestimmt. Es handelt sich um einen rechteckigen Querschnitt von 510 mm Breite und 98 mm Höhe, welcher nach oben offen ist. Der maximale Wasserpegel im Kanal beträgt 67 mm, für schießendes Wasser wird er auf bis zu 5 mm reduziert. Eine Kármánsche Wirbelstraße (KWS, siehe BILD 1) tritt ab Reynolds-Zahlen von etwa 50 auf [2], wobei ab ca. 200 der Umschlag auf eine turbulente Strömung erfolgen kann. Über die Formel der Reynolds-Zahl wurde mit der dynamischen Viskosität von Wasser ( $1,0 \cdot 10^{-3}$  Pa s) und einem gegebenen Zylinder mit dem Durchmesser 40 mm bestimmt, dass eine Strömungsgeschwindigkeit von mindestens 1,25 mm/s erzeugt werden muss. Da die Erzeugung einer laminaren Strömung mit dem gegebenen Platz jedoch nur schwer möglich ist, wurde eine



BILD 2. Ein Rhombus bei schießendem Wasser im Showbereich des MFWK bei  $Fr \approx 4,2$ .

höhere Reynolds-Zahl akzeptiert, bei der die KWS in turbulenter Form auftritt. Durch Experimente mit einem Prototypen mit dem selben Querschnitt wurde festgestellt, dass eine KWS bei Reynolds-Zahlen von ca. 3000 sehr gut zu erkennen ist. Daher erzeugt die Pumpe des MFWK im Betrieb einen Volumenstrom von 2,4 L/s, was bei einem Strömungsquerschnitt von  $34,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  einer Strömungsgeschwindigkeit von  $69,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  und damit einer Reynolds-Zahl von etwa 2800 entspricht.

Um die Regelungsmöglichkeiten gering zu halten, sollte ursprünglich eine Pumpe mit fester Leistung beschafft werden (siehe hierzu Abschnitt 5). Die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal wird nur durch die Veränderung des Pegels durchgeführt. Dadurch ergibt sich bei schießendem Wasser eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von  $933,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  bei einem Pegel von 5 mm. Die Froude-Zahl<sup>1</sup>, welche hierbei eine Analogie zur Mach-Zahl darstellt, beträgt also rund 4,2 (siehe BILD 2).

### 3 KONSTRUKTION

In diesem Abschnitt soll die Konstruktion des MFWK erläutert werden. Zuerst wird eine Übersicht über das Gesamtsystem gegeben, dann werden der Wasserkreislauf und das Visualisierungssystem genauer behandelt. Schließlich wird gezeigt, wie die Systeme in einem kompakten mobilen Aufbau angeordnet wurden. Die Autoren möchten darauf hinweisen, dass weitere Änderungen empfohlen werden. Diese sind in Abschnitt 5 aufgeführt.

<sup>1</sup> $Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot z}}$  mit Strömungsgeschwindigkeit  $u$ , Erdbeschleunigung  $g$  und Wassertiefe  $z$

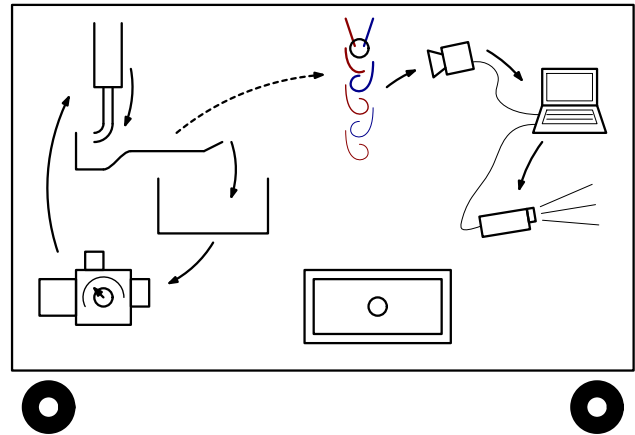


BILD 3. Schematische Darstellung der drei Systeme des MFWK. Links der Wasserkreislauf, rechts das Visualisierungssystem, das ganze samt Zubehör-Schublade eingebettet im mobilen Chassis.

#### 3.1 Übersicht

Der MFWK besteht aus drei wichtigen Systemen. Dabei handelt es sich um das Wassersystem, welches alle wasserführenden Bauteile beinhaltet, das Visualisierungssystem mit den Bauteilen für die Aufzeichnung und Übertragung der Strömungsvorgänge im Kanal sowie das mobile Chassis, in dem die anderen System eingebaut sind.

#### 3.2 Wassersystem

Wie in BILD 3 dargestellt, besteht das Wassersystem aus vier Hauptkomponenten: Ablaufbecken, Pumpe, Reservoir und Laufstrecke. Die Laufstrecke ist in den Beruhigungsbereich und den „Showbereich“ unterteilt. Schläuche und Rohre verbinden diese Bauteile, außerdem ist zur Befüllung des Systems ein Filter installiert.

Das Ablaufbecken ist eine Kunststoffbox mit 130 L Fassungsvermögen. Es ist der zentrale Behälter für die gesamte Wassermenge im System und befindet sich im unteren Bereich des Chassis. Es ist auf einer Schublade montiert, um gegenüber der Pumpe erhöht zu sein. Das Wasser wird vor dem Betrieb über den Filter in das Ablaufbecken eingefüllt. Es verfügt über ein Ventil zum Ablassen des Restwassers aus dem System nach dem Betrieb sowie einen Schlauchanschluss für die Leitung zur Pumpe.

Die Aufgabe der Pumpe besteht darin, den Wasserkreislauf anzutreiben. Dazu saugt sie das Wasser aus dem Ablaufbecken an und pumpt es in das Reservoir. Es handelt sich um eine Pumpe mit variabler Leistung für kleine Schwimmbecken (siehe hierzu auch Abschnitt 5), welche mit Hilfe selbst hergestellter Adapter in das System integriert ist. Die Förderleistung wurde auf 2,4 L/s eingestellt, wozu bei einer Druckdifferenz von 61 kPa eine Drehzahl von  $2000 \text{ min}^{-1}$  erforderlich ist. Dabei läuft die Pumpe vibrationsarm

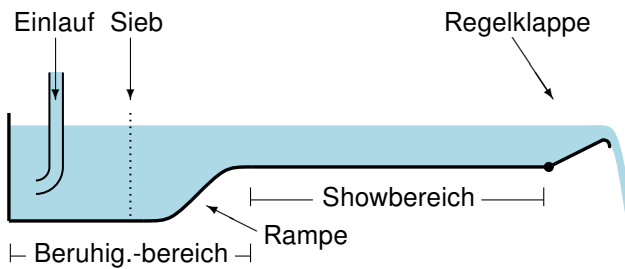


BILD 4. Die Laufstrecke des MFWK im Längsschnitt, schematisch.

und auf einem akzeptablen Geräuschniveau, was ein wichtiges Beschaffungskriterium war. Wie das Ablaufbecken wurde sie mit einem Ablassventil ausgestattet. Da die Pumpe nicht trocken laufen darf, ist das Ablaufbecken erhöht angeordnet, so dass die Pumpe schon beim Befüllen des Kanals komplett geflutet wird. Wenn der Kanal vollständig befüllt ist, steht bereits bei ausgeschalteter Pumpe Wasser in der Leitung zum Reservoir.

Das Reservoir und der Beruhigungsbereich der Laufstrecke dienen der gleichmäßigen Einleitung und Beruhigung der Strömung zu Beginn der Laufstrecke. Vom Reservoir gelangt das Wasser durch sechs Fallrohre („Orgel“) in den Beruhigungsbereich, wie in BILD 4 dargestellt ist. Die Öffnung der Rohre ist dabei gegen die Rückseite des Kanals gerichtet, so dass eine einheitliche Abströmgeschwindigkeit erzielt werden kann. Die dabei erzeugte Turbulenz wird durch ein Sieb reduziert. Über eine aufwärts gerichtete Rampe gelangt das Wasser in den Showbereich.

Der Showbereich ist der zentrale Abschnitt des Wasserkreislaufs, denn hier findet die Visualisierung der Strömungsvorgänge statt. Die gesamte Laufstrecke ist aus Acrylglas gefertigt. Dies ist nicht nur mit der Transparenz des Werkstoffs begründet, sondern auch mit den hervorragenden Oberflächeneigenschaften und der einfachen Verarbeitung des Materials. Um Störungen der Strömung durch Kanten von Bauteilübergängen zu vermeiden, liegt auf den Bodenplatten und der Rampe eine zusätzliche durchgehende dünne Acrylglasplatte, die sich über die gesamte Länge der Laufstrecke erstreckt und dabei den Kurven der Rampe folgt. Durch die platzsparende Bauweise des Beruhigungsbereichs erstreckt sich der Showbereich über 600 mm (40 % der Gesamtlänge des MFWK), so dass für alle fraglichen Strömungsvorgänge ausreichend Platz vorhanden ist. Am Ende des Showbereichs befindet sich die Regelklappe, mit der der Wasserpegel im Kanal stufenlos gesteuert werden kann. Von der Regelklappe fällt das Wasser direkt zurück in das Ablaufbecken.

### 3.3 Visualisierung

Seine Fähigkeit, die verschiedenen Vorgänge im Kanal gut und einfach zu visualisieren, ist ein Highlight des MFWK. Es unterscheidet den MFWK von anderen Wasserkanälen, bei denen der Schwerpunkt eher auf der hohen Qualität der Messung liegt. Das Visualisierungssystem besteht aus einer Kamera, einem Lichtsystem und der Einleitung der Farbe.

Die Farbe wird ausschließlich bei Vorgängen in nicht-schießendem Wasser zur Visualisierung von Körperumströmungen und Grenzschichtablösungen eingesetzt. Sie wird in zweckentfremdeten Nachfüllpackungen für Flüssigseife mitgeführt, über modifizierte Infusionsschläuche direkt in die Versuchskörper eingeleitet und tritt durch Öffnungen unterhalb der Wasserlinie aus. Daraus ergeben sich mehrere Vorteile: Die Visualisierung ist von hoher Qualität z. B. bei Grenzschichtablösungen. Darüber hinaus ist diese Art der Einleitung sehr sparsam und lässt lange Versuchsdauern zu (eine Packung hält über zehn Minuten). Außerdem hält sich die Eintrübung des Wasservorrats dadurch in Grenzen. Am zylindrischen Versuchskörper können zwei, am NACA-4415-Profil sogar drei Farben gleichzeitig eingeleitet werden (mit zwei Farben in BILD 8 dargestellt). Es handelt sich um Wasserfarben, welche günstig im Heimwerkerbedarf erhältlich sind. In schießendem Wasser kommt die Farbe nicht zum Einsatz.

Um den problemlosen Einsatz auch in schwach beleuchteten Räumen zu gewährleisten, verfügt der MFWK über ein eigenes Lichtsystem. Dieses besteht aus ca. 230 starken Weißlicht-LEDs und ist unter dem Showbereich montiert. Es erhellt den Showbereich durch eine opake Acrylglasplatte, wodurch ein gleichmäßiges Hintergrundlicht erzeugt wird, vor dem die Farben sehr gut zu erkennen sind (siehe BILD 5).

Um die Strömungsvorgänge aufzunehmen, ist eine Kamera über dem Showbereich installiert. Dabei handelt es sich um eine Webcam, welche 30 Bilder pro Sekunde mit Full-HD-Auflösung aufnimmt und per USB an einen PC überträgt (der PC gehört nicht zum System, sondern muss vom jeweiligen Dozenten bereitgestellt werden). Sie ist in einer festen Distanz zur Laufstrecke montiert, aber in der Horizontalen in zwei Richtungen verschiebbar. Der PC sendet das Bild an den Beamer des jeweiligen Hörsaals. Damit kann das gesamte Publikum die Situation im Kanal live sehen, unabhängig von der Größe des Hörsaals.

### 3.4 Chassis

Das Chassis ist das fahrbare Gerüst des Aufbaus. Die Komponenten der anderen Systeme sind darin montiert. Zum Chassis zählen die beiden Rahmen, die Räder, die Stützbauteile und das Zubehörfach.

Der große Hauptrahmen ist die Außenstruktur des Aufbaus. Beim Kanalrahmen handelt es sich um die Stützstruktur der Laufstrecke. Der Kanalrahmen ist

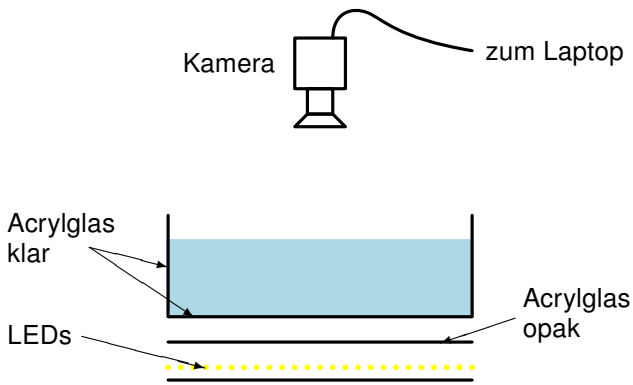


BILD 5. Der Showbereich im Querschnitt, schematisch.

drehbar im Hauptrahmen gelagert und kann durch eine Höhenverstellung unter dem Beruhigungsbereich um bis zu  $1,9^\circ$  angestellt werden, um bei schießendem Wasser einen konstanten Pegel zu erzeugen. Beide Rahmen sind aus Bosch-Rexroth-Profilschienen gefertigt, um eine leichte aber starke Struktur mit geringem Fertigungsaufwand zu erhalten. Der Aufbau misst 1500 mm in der Länge und 730 mm in der Breite.

Die Räder verleihen dem MFWK seine Mobilität. Es kommen zwei feste und zwei lenkbare Vollgummiräder mit 200 mm Durchmesser zum Einsatz, die über dämpfende Gummipplatten am Hauptrahmen montiert sind. Dadurch stellen schwierige Wegabschnitte am Campus Vaihingen kein Problem dar. Die lenkbaren Räder verfügen über Feststellbremsen.

Eine Holzplatte bildet den Boden des MFWK. Darauf befindet sich die Pumpe sowie das Zubehörfach, eine große Schublade zur Unterbringung der Zubehörtteile wie unter anderem Versuchskörper, Farbe, Bedienungsanleitung oder das LED-Netzteil. Außerdem dient die Schublade als Podest für das Ablaufbecken, damit es höher als die Pumpe steht.

#### 4 ERGEBNISSE

Der MFWK wurde ausgelegt, gefertigt und erfolgreich getestet und ist in BILD 6 dargestellt. Er befindet sich im aktiven Einsatz in den Lehrveranstaltungen des IAG. In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Erprobung und dem bisherigen Einsatz zusammengefasst werden.

Der Wasserkreislauf funktioniert wie geplant. Die Pumpe leistet den geforderten Volumendurchsatz und mit der Regelklappe kann die Strömungsgeschwindigkeit einfach eingestellt werden. Die im Beruhigungsbereich angewendeten Methoden zur Reduktion der Turbulenz und Erzeugung einer gleichmäßigen Zuströmung erfüllen ihren Zweck. Die gesamte Palette der geforderten Strömungsvorgänge findet im Showbereich den benötigten Raum.



BILD 7. Kármánsche Wirbelstraße im Showbereich des MFWK bei  $Re \approx 2800$ .

Hinsichtlich der Visualisierung wurden die Anforderungen für die Vorgänge beim fließenden Wasser voll erfüllt. Grenzschichtablösungen am Profil sowie die KWS sind durch das Farbeinleitungssystem des MFWK und die Bildaufnahme hervorragend aufzeigbar. Die Übertragung des Bildes aus dem Showbereich an einen Laptop wurde erfolgreich getestet, das vom Projektor erzeugte Bild bietet den Zuhörern eine akkurate Wiedergabe der Vorgänge im Showbereich. Die LED-Beleuchtung ermöglicht eine hohe Bildqualität unabhängig von der Lichtsituation in der Umgebung. Derzeit gibt es jedoch Schwierigkeiten mit der Erfassung der Vorgänge bei schießendem Wasser, denn die Wasserwellen, die bei der Flachwasseranalogie als Repräsentation der Stoßwellen aus der Gasdynamik dienen, sind vor dem hellen Hintergrund der LED-Beleuchtung schwer zu erkennen. Eine mögliche Lösung dieses Problems wird in Abschnitt 5 behandelt.

Die zentrale Anforderung der Mobilität des gesamten Systems wurde voll erfüllt, der MFWK kann von den Nutzern in jeden relevanten Hörsaal des Campus Vaihingen bewegt werden. Die hohe Festigkeit der Strukturkomponenten verhindert Schäden bei Fahrten auf schlechtem Untergrund, der Aufbau ist aber trotzdem so leicht, dass er von vier Personen angehoben werden kann. Die Inbetriebnahme des Systems gelingt schnell, da alle erforderlichen Anschlüsse für Wasser und Strom in jedem Hörsaal vorhanden sind.

In der Praxis wird der MFWK von allen Mitarbeitern des IAG genutzt, welche mit der Lehre befasst sind. Dabei werden sie von studentischen Hilfskräften unterstützt, die meistens auch die Vor- und Nacharbeiten



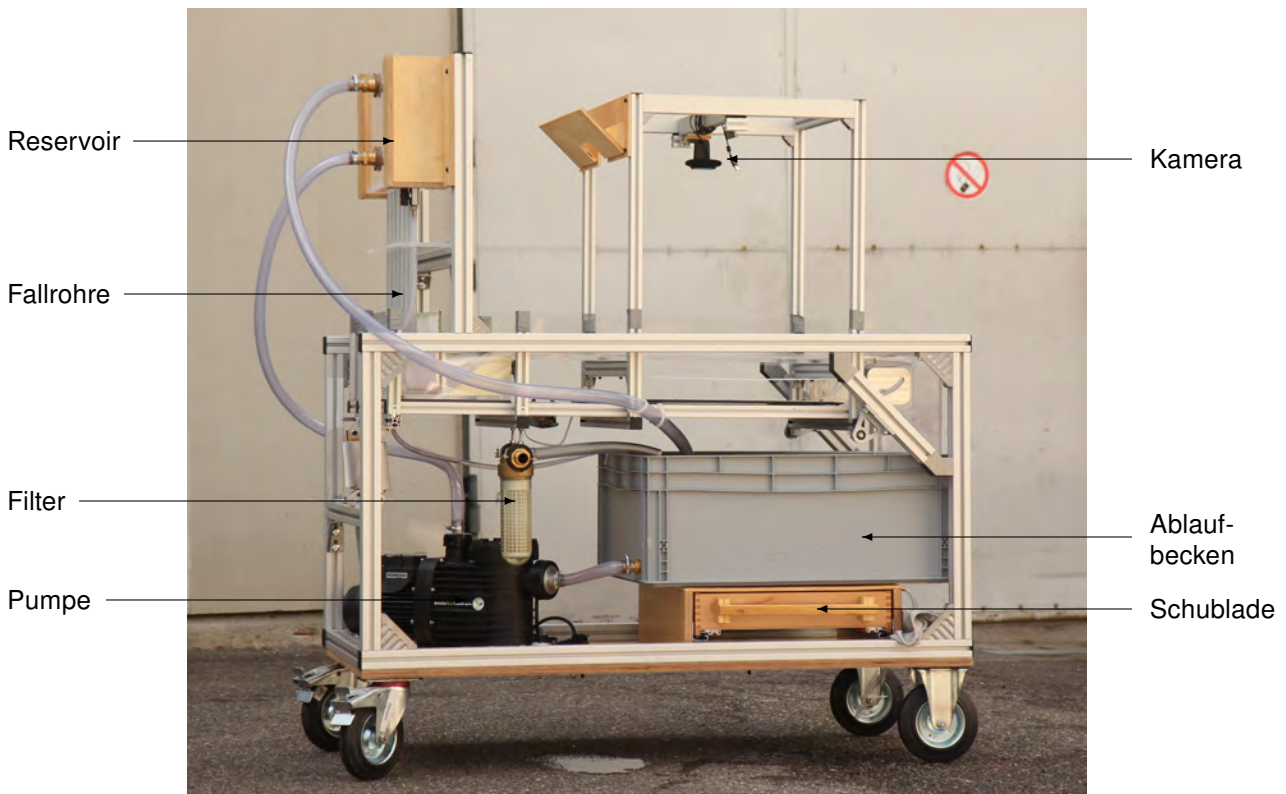


BILD 6. Der mobile Flachwasserkanal des IAG. Die Laufstrecke ist aufgrund der Transparenz des Acrylglases nur schwer zu erkennen.

im Zusammenhang mit dem Kanal übernehmen. Der Kanal wurde so gestaltet, dass er völlig ohne die persönliche Hilfe durch die Erbauer genutzt werden kann. Dabei werden die Nutzer durch eine umfangreiche Bedienungsanleitung unterstützt, welche sämtliche Schritte von der Vorbereitung über die Inbetriebnahme bis zum Abstellen abdeckt. Dadurch ist der Einsatz des MFWK in einer Lehrveranstaltung für die beteiligten Personen problemlos machbar. Entsprechend kommt der MFWK seit dem Wintersemester 2014/15 in Vorlesungen, Tutorien und Präsentationen des IAG zum Einsatz und ruft dabei regelmäßig positive Reaktionen hervor.

## 5 EMPFOHLENE ÄNDERUNGEN UND GRENZEN

Durch die jeweiligen Umstände kam es im Laufe des Projekts zu Entscheidungen, die im Rückblick nicht optimal oder sogar falsch waren und die in einer überarbeiteten Version des Kanals korrigiert werden sollten. Das zentrale Design des Kanals ist davon jedoch nicht betroffen, weshalb man sich hier durchaus an die Vorlage des MFWK des IAG halten kann. Im Folgenden sind vier Probleme aufgelistet, welche von den Autoren als wichtig erachtet werden. Außerdem werden die Grenzen des Konzepts aufgezeigt.

Im Nachhinein stellte sich heraus, dass die Wahl der Pumpe nicht ideal war. Ein zentrales Charakteristi-

kum jeder Pumpe ist die Kennlinie, die den Volumendurchsatz über der zu überwindenden Druckhöhe (ein Ersatzwert für den Druckunterschied zwischen Pumpeneingang und -ausgang) beschreibt. Die Druckhöhe des MFWK war zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt, weshalb auf eine Pumpe mit variabler Leistung zurückgegriffen werden musste. In der Erprobung wurde die benötigte Leistung ermittelt (siehe Abschnitt 3.2). Mit Hilfe dieser Informationen könnte man nun eine passendere Pumpe beschaffen. Als Ersatz bieten sich Umwälzpumpen aus dem Solaranlagenbedarf an, die zwar üblicherweise nur beschränkt regelbar, jedoch kompakter gebaut sind und im Betrieb geräuschlos arbeiten. Darüber hinaus sind sie einfacher ins System zu integrieren und in der Regel auch preiswerter als die bislang genutzte Schwimmbadpumpe.

Weiterer Optimierungsbedarf betrifft die Installation der Beruhigungsnetze. Die Wirkung wird als zu gering betrachtet, weshalb die Installation zusätzlicher Netze mit zunehmender Maschendichte empfohlen wird. Die Länge des Beruhigungsbereichs des MFWK ist hierfür nicht ausreichend. Außerdem wurde beim Betrieb des Kanals eine Oszillation des Netzes in senkrechter Richtung zur Netzebene festgestellt, die stromabwärts übertragen wird und behoben werden sollte.

Nachdem die Regelklappenverstellung in der Erprobungsphase an einer schlecht ausgeführten Klebung brach, kann man hier durchaus von einem „Knack-



BILD 8. Einleitung der Farbe direkt in den Versuchskörper NACA 4415.

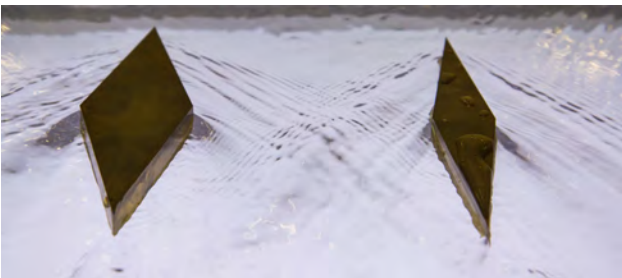


BILD 9. Interaktion im Nachlauf zweier Rhomben bei schießendem Wasser.

punkt“ sprechen. Auch bei sorgfältig ausgeführten Bauarbeiten macht die derzeitige Regelklappenverstellung einen fragilen Eindruck, dazu ist sie schwergängig und muss mit Vorsicht bedient werden. Eine Neukonstruktion wird empfohlen.

Der MFWK soll unter anderem dazu dienen, die Gasdynamik mit Hilfe der Flachwasseranalogie zu visualisieren. Leider ist das aktuelle Visualisierungssystem hierzu nur begrenzt einsetzbar, denn die Wellen sind vor dem hellen Hintergrund kaum zu erkennen (in BILD 10 gezeigt). Es wurde jedoch erprobt, dass eine seitlich über dem Showbereich angeordnete Lichtquelle die Wellen für die Kamera sichtbar macht. Daher wird der feste Einbau einer solchen Lichtquelle als empfehlenswert erachtet.

Durch die begrenzten Außenabmessungen des Fahrzeugs ist die Breite der Laufstrecke gelegentlich nicht ausreichend, um bei schießendem Wasser eine Interaktion der Strömung mit der Kanalwand zu verhindern. Die Reflektionen der Wasserwellen zurück in den Showbereich können bei geringeren Froude-Zahlen den eigentlich gewünschten Strömungsvorgang stö-

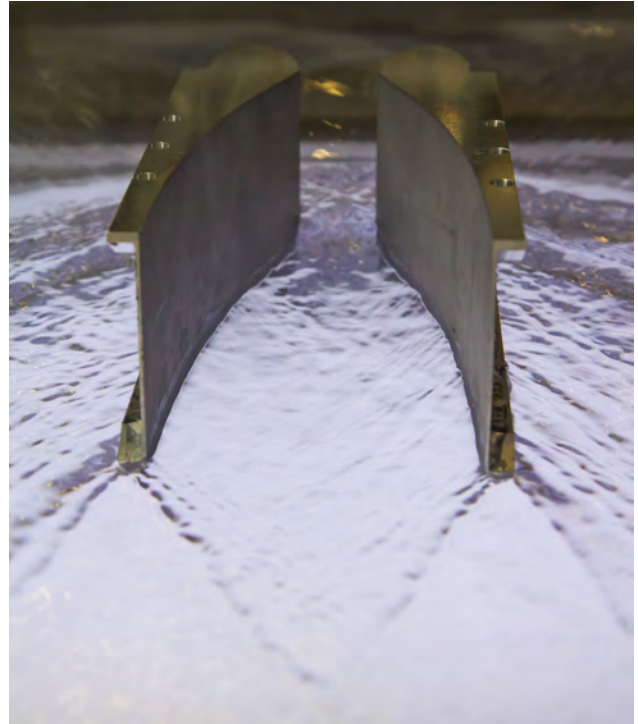


BILD 10. 2D-Simulation einer Lavalldüse bei schießendem Wasser. Die Wellen sind in der gegebenen Lichtsituation schlecht zu erkennen und Wellenreflektionen von der Kanalwand stören im Nachlauf das Bild.

ren. Dies ist insbesondere bei der Demonstration der 2D-Lavalldüse regelmäßig der Fall. Dieses Problem kann durch die Verwendung adäquat bemessener Lavalldüsensegmente behoben werden. Die beim MFWK verwendeten Segmente wurden von einem Überschallwindkanal des IAG bereitgestellt, nachdem dessen Versuchsreihen beendet waren, weshalb hier keine eigenen Versuchskörper hergestellt wurden.

Zuletzt sei noch darauf hingewiesen, dass der MFWK für die Durchführung von wissenschaftlichen Experimenten und Messreihen nicht geeignet ist. Die Konstruktion zielt auf eine repräsentative visuelle Qualität ab, kann die Anforderungen an exakte Forschungsarbeit aber nicht erfüllen. Grund hierfür sind unter anderem der Turbulenzgrad in der Anströmung, die Geschwindigkeitsverteilung über den Strömungsquerschnitt in der Laufstrecke sowie die Vibrationen, die durch die Pumpe und das fallende Wasser im Ablaufbecken an die Struktur übertragen werden. Für genaue wissenschaftliche Experimente muss nach wie vor auf eine größere und massivere Apparatur zurückgegriffen werden.

## 6 FAZIT

In diesem Paper wurde gezeigt, dass der mobile Flachwasserkanal die Anforderungen hinsichtlich der Portabilität, Funktion, Visualisierung und Bedienung erfüllt.

Er ist entsprechend in der Lage, die gesamte Palette der geforderten Strömungsvorgänge live im Hörsaal zu erzeugen und dem gesamten Publikum zur Verfügung zu stellen. Dies stellt eine effektive Steigerung der Qualität der Lehre dar, welche sowohl vonseiten der Studierenden als auch der Lehrenden regelmäßig positiv bewertet wird.

Doch auch die Grenzen des Konzepts werden aufgezeigt. Der interessierte Leser findet darüber hinaus die wichtigsten Empfehlungen der Autoren, welche Änderungen in einer zukünftigen Version des Systems durchgeführt werden sollten, um über ein noch besseres Gerät zu verfügen. Auch am MFWK des IAG werden weiterhin regelmäßig qualitäts- und funktionssteigernde Maßnahmen durchgeführt.

## 7 LITERATUR

- [1] M. van Dyke. *An Album of Fluid Motion*. Stanford: The Parabolic Press, 1982.
- [2] A. Henze und W. Schröder. *Fahrzeug- und Windradaerodynamik*. Vorlesungsfoliensatz. RWTH Aachen, 2014.
- [3] C. Hoffrogge, B. Kraus, S. Passeck, M. Feugeo, Y. Lei und Y. El Azzazy. *Auslegung, Konstruktion, Bau und Erprobung eines mobilen Flachwasserkanaals*. Studienarbeit. Stuttgart: Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, 2014.

## 8 DANKSAGUNGEN

Für die großartige Unterstützung beim Projekt MFWK möchten wir uns herzlich bei der gesamten Werkstatt des IAG bedanken. Hervorgehoben sei der Einsatz von Peter Jost bei der Planung und dem Bau des Kanals. Ebenfalls möchten wir Dipl.-Ing. Bernd Peters für seine Unterstützung und die vielen guten Ratschläge unseren Dank aussprechen. Zum Schluss seien unsere Betreuerinnen Dipl.-Ing. Dina-Marie Zimmermann und Dipl.-Ing. Eva Jost genannt, auf deren Unterstützung wir uns bei allen Tätigkeiten und Entscheidungen verlassen konnten. Ihnen möchten wir nun auch danken für den Vorschlag und die Gelegenheit, unsere Arbeit beim DLRK 2015 in Rostock zu präsentieren.