

**Max Mustermann**

## Titel der Open-Access-Publikation

Untertitel der Open-Access-Publikation



**Max Mustermann**

# Titel der Open-Access-Publikation

Untertitel der Open-Access-Publikation

### Über den Autor

Max Mustermann is currently working at CivilEngine GmbH in Musterstadt. He received his master's degree in Civil Engineering from the HTWK Leipzig, University of Applied Sciences. He is interested in construction engineering and materials science.

### Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie. Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.de> abrufbar.



Der Text dieses Werks ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 DE veröffentlicht. Den Vertragstext der Lizenz finden Sie unter <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>. Die Abbildungen sind von dieser Lizenz ausgenommen, hier liegt das Urheberrecht beim jeweiligen Rechteinhaber.



Die Online-Version dieser Publikation ist abrufbar unter <http://doi.org/12.3456/7890123456789>

© 2021 Max Mustermann

### Herausgeber

Open-Access-Hochschulverlag  
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig  
Karl-Liebknecht-Str. 143  
04277 Leipzig  
Deutschland

Druck und Bindung in Deutschland und den Niederlanden  
Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN (Hardcover) 978-3-12345-678-1  
ISBN (Softcover) 978-3-12345-678-2  
ISBN (ePub) 978-3-12345-678-3  
ISBN (PDF) 978-3-12345-678-4

## Kurzfassung

Die jüngsten Flutereignisse erforderten eine Überarbeitung der hydrologischen Daten für zahlreiche Dämme. Infolgedessen haben sich viele Konstruktionen als ungeeignet erwiesen über die notwendige Hochwassersicherheit verfügen. Die sächsische Lehmühle soll saniert werden. Für eine überlaufsichere Konstruktion ist die Absenkung die bevorzugte Lösung der Kamm mehrerer Wehrfelder. Die daraus resultierende erhöhte Leistung erfordert eine Überarbeitung der Ablaufeigenschaften im Standbild Becken. Diese Arbeit zeigt zunächst die Strömungsverhältnisse des bestehenden Beruhigungsbecken mit numerischer 3D-Modellierung. Zweitens mit dem Ziel von einer verbesserte Energiedissipation wird die Wirksamkeit von Prallblöcken sein geprüft und bewertet.

## Abstract

Recent flood events called for a revision of hydrological data for numerous dams. As a result, many constructions have been found to not possess necessary flood safety. On this account, the flood spillway of the Saxon Lehmühle dam is designated to be upgraded. In order to ensure an overflow-proof construction, the favored solution is to lower the crest of several weir fields. The resulting increased performance requires a revision of the runoff characteristics in the stilling basin.

Firstly, this thesis shows the flow conditions of the existing stilling basin, using 3D numerical modeling. Secondly, with the goal of enhanced energy dissipation the effectiveness of baffle blocks will be examined and evaluated.



*Hier kann eine Widmung des Autors stehen.*





## Danksagung

Er hörte leise Schritte hinter sich. Das bedeutete nichts Gutes. Wer würde ihm schon folgen, spät in der Nacht und dazu noch in dieser engen Gasse mitten im übel beleumundeten Hafenviertel? Gerade jetzt, wo er das Ding seines Lebens gedreht hatte und mit der Beute verschwinden wollte! Hatte einer seiner zahllosen Kollegen dieselbe Idee gehabt, ihn beobachtet und abgewartet, um ihn nun um die Früchte seiner Arbeit zu erleichtern? Oder gehörten die Schritte hinter ihm zu einem der unzähligen Gesetzeshüter dieser Stadt, und die stählerne Acht um seine Handgelenke würde gleich zuschnappen? Er konnte die Aufforderung stehen zu bleiben schon hören. Gehetzt sah er sich um. Plötzlich erblickte er den schmalen Durchgang. Blitzartig drehte er sich nach rechts und verschwand zwischen den beiden Gebäuden. Beinahe wäre er dabei über den umgestürzten Mülleimer gefallen, der mitten im Weg lag. Er versuchte, sich in der Dunkelheit seinen Weg zu ertasten und erstarrte: Anscheinend gab es keinen anderen Ausweg aus diesem kleinen Hof als den Durchgang, durch den er gekommen war. Die Schritte wurden lauter und lauter, er sah eine dunkle Gestalt um die Ecke biegen. Fieberhaft irrten seine Augen durch die nächtliche Dunkelheit und suchten einen Ausweg.\*

We are grateful to Ms. Kylie Kendall for her beautiful artwork and general assistance in helping us finish this huge project on time. The editorial team of HTWK Hochschulverlag for this book, Drs. Elisa Editor, Agata Author-Query, Marek Markup and Ms. Irmina Indent deserves more thanks than we can give for their enthusiastic approach, expert guidance and professionalism in overseeing the publication of this book.

---

\* We also thank Mr. Tsuyoshi Haibara for his assistance in the preparation of the manuscript.



# Inhaltsverzeichnis

---

Abbildungsverzeichnis .....	XIII
Tabellenverzeichnis .....	XIV
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
Formelzeichen.....	XVI
<b>Teil 1 Überschriften-Hierarchien .....</b>	<b>17</b>
<b>1 Überschrift der ersten Ordnung .....</b>	<b>19</b>
1.1 Überschrift der zweiten Ordnung .....	19
1.1.1 Überschrift der dritten Ordnung .....	19
1.1.2 Eine weitere Überschrift der dritten Ordnung .....	21
1.2 Eine weitere Überschrift der zweiten Ordnung .....	22
1.2.1 Eine weitere Überschrift der dritten Ordnung, direkt nach einer Überschrift zweiter Ordnung .....	22
1.2.2 Eine weitere Überschrift der dritten Ordnung .....	22
<b>Teil 2 Elemente einer Open-Access-Publikation .....</b>	<b>25</b>
<b>2 Elemente .....</b>	<b>27</b>
2.1 Textauszeichnungen .....	27
2.2 Fußnoten .....	27
<b>3 Weitere Elemente .....</b>	<b>29</b>
3.1 Zitate .....	29
3.2 Listen und Aufzählungen .....	29
3.3 Tabellen .....	31
3.4 Formeln .....	32
3.4.1 Formeln als Grafik .....	32
3.5 Abbildungen .....	33
3.6 Programmier-Code .....	34
3.7 Textboxen und Infokästen .....	35
3.8 Index-Begriffe und Querverweise .....	36
Literaturverzeichnis.....	39
Index.....	47
<b>Anhang .....</b>	<b>41</b>

**Anhang 1 Überschrift erster Ordnung des Anhangs ..... 43**  
A-1.1 Überschrift zweiter Ordnung des Anhangs ..... 43

**Anhang 2 Zweite Überschrift des Anhangs ..... 45**  
A-2.1 Überschrift zweiter Ordnung des Anhangs, die über mindestens zwei Zeilen  
laufen soll ..... 45

# Abbildungsverzeichnis

---

<b>Abb. 1</b>	Bildunterschrift für Abb. 1 .....	33
<b>Abb. 2</b>	Unter Anwendung des passenden Modellgesetzes und eines geeigneten Maßstabes, liefern sie sehr verlässliche Ergebnisse. ....	34

# Tabellenverzeichnis

---

<b>Tab. 1</b>	Das ist eine Tabellenüberschrift für Tabelle 1 .....	31
<b>Tab. 2</b>	Wasserbauwerke sind jedoch größtenteils Einzellösungen und die Planungen gehen über die Standardfälle hinaus. ....	32

# Abkürzungsverzeichnis

---

BF	Bestandsfeld
CFD	Computational Fluid Dynamics
DES	Detached Eddy Simulation
DN	Nenndurchmesser
DNS	Direct Numerical Simulation
EE	Entnahmeeinrichtung
FD	Finite Differenzen
FE	Finite Elemente
FV	Finite Volumen
GA	Grundablass
HWBF	Hochwasserbemessungsfall
HWE	Hochwasserentlastungsanlage
HQ	Hochwasserabfluss
HQ <sub>max</sub>	maximaler Hochwasserabfluss

# Formelzeichen

---

## Große lateinische Buchstaben

$A_s$	Querschnittsfläche des Bewehrungsstahls
$A_L$	Querschnittsfläche der aufgeklebten CFK-Lamelle
$E_{cm}$	mittlerer Elastizitätsmodul des Betons
$E_d$	Bemessungswert der Einwirkung
$E_{Lm}$	Mittelwert des Elastizitätsmoduls der aufgeklebten CFK-Lamelle

## Kleine lateinische Buchstaben

$a$	Angriffspunkt der Betondruckkraft (Abstand vom oberen Querschnittsrand)
$b$	Breite des Querschnitts
$b_L$	Lamellenbreite
$d$	statische Höhe der Biegezugbewehrung
$d_L$	statische Höhe der aufgeklebten CFK-Lamelle



# Teil 1

## Überschriften-Hierarchien

---



# 1 Überschrift der ersten Ordnung

---

Wasserbauliche Anlagen wie Talsperren oder Hochwasserrückhaltebecken sind in der Regel teure Bauwerke. Je nach Projekt entstehen schnell Kosten in Höhe von einigen Hunderttausend bis hin zu mehreren hundert Millionen Euro. Talsperren erfüllen u. a. Aufgaben wie Trinkwasserbereitstellung und Energiegewinnung. Ferner dienen sie wie Hochwasserrückhaltebecken auch dem Hochwasserschutz.

## 1.1 Überschrift der zweiten Ordnung

Ferner dienen sie wie Hochwasserrückhaltebecken auch dem Hochwasserschutz. Dabei staut ein Absperrbauwerk (Staumauer, Staudamm) große Wassermengen auf. Diese werden zwischengespeichert und den Flüssen nach Abklingen des Hochwassers wieder kontrolliert zugeführt. Die Speicherung des Wassers bewirkt die Kapung der Scheitelabflüsse, wodurch schadhafte Überschwemmungen verhindert werden. Die Dimensionierung solcher Anlagen beruht zum einen auf der statistischen Auswertung zurückliegender Hochwasserereignisse, anhand derer die jeweiligen hydrologischen Daten zur Verfügung gestellt werden. Zum anderen erfolgt der Entwurf in Abhängigkeit des stromab der Anlagen vorhandenen Schadenspotentials. Aus wirtschaftlichen Gründen ist ein absoluter Schutz jedoch nicht möglich. Im Fall extremer Hochwasserereignisse, wie jüngst 2013 in Sachsen zu beobachten war, können die den Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken zufließenden Wassermengen nicht vollständig zwischengespeichert werden. In diesem Fall wird das überschüssige Wasser über Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) in den Unterlauf abgeführt.

Hochwasserentlastungsanlagen dienen nicht dem Schutz unterhalb liegender Industrie- und Siedlungsgebiete, denn die erhöhten Abgaben aus den Speichern während eines extremen Hochwassers gehen ohnehin mit schadhafte Ausuferungen einher. Vielmehr besteht die Aufgabe darin, ein Überströmen der Absperrbauwerke zu verhindern und das Wasser kontrolliert abzuleiten. Unkontrollierte Abflüsse über die Krone von Sperrbauwerken können starke Erosionen an Dammbauwerken hervorrufen, was ein Versagen der Anlagen nach sich ziehen kann. Nach [Aigner, D., Bollrich, G., 2015] ist etwa ein Drittel der im vergangenen Jahrhundert eingetretenen Brüche von Talsperren auf ein Überströmen des Absperrbauwerkes zurückzuführen, was das Erfordernis einer sorgfältigen Planung und Dimensionierung von Hochwasserentlastungsanlagen noch deutlicher macht. Hochwasserentlastungen dienen somit dem Schutz des Absperrbauwerkes selbst.

### 1.1.1 Überschrift der dritten Ordnung

Planungsfehler oder nicht optimale Dimensionierungen führen meist zu aufwendigen und kostspieligen Sanierungs- oder Nachrüstungsmaßnahmen. Ferner hätte ein Versagen des Absperrbauwerkes im Extremfall katastrophale Auswirkungen und muss mit größtmöglicher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund müssen die hydraulischen Ansprüche an die geplanten Wasserbauwerke vor der Errichtung sorgfältig definiert werden. Die komplexen dreidimensionalen Strömungen erfordern Verfahren, die eine hohe Genauigkeit aufweisen. Die zahlreichen Ausführungsmöglichkeiten von Hochwasserentlastungen schließen eine Schematisierung und technische Standardisierung nahezu aus. Einfache rechnerische Nachweise auf Basis empirisch ermittelter Formeln reichen meist nicht aus. Selbst erprobte Lösungen können aufgrund der variierenden örtlichen Gegebenheiten (Hydrologie, Geologie, Geländemorphologie, Bauwerkstyp, etc.) nur selten auf neue Entwürfe übertragen werden. Zwar ist die exakte Beschreibung von Strömungsvorgängen seit etwa Mitte des 19. Jahrhunderts rechnerisch theoretisch möglich, die aufgestellten Strömungsgleichungen sind jedoch so komplex, dass sie analytisch bisher nur für einfachste Spezialfälle gelöst werden konnten. Daher bediente man sich in der Vergangenheit physikalischer Modelle, die zur Bewertung der Strömungsvorgänge sehr gut geeignet sind. Nachteilig ist jedoch der damit verbundene hohe finanzielle als auch zeitliche Aufwand. Aus der rasanten Entwicklung leistungsfähiger Computer in den zurückliegenden Jahrzehnten ging eine alternative Möglichkeit zur verlässlichen Beschreibung der physikalischen Prozesse in Strömungen hervor, die numerische Strömungsberechnung (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD). Dabei werden die bekannten Strömungsgleichungen mit Hilfe mathematischer Modelle numerisch berechnet.

#### 1.1.1.1 Überschrift der vierten Ordnung

Selbst erprobte Lösungen können aufgrund der variierenden örtlichen Gegebenheiten (Hydrologie, Geologie, Geländemorphologie, Bauwerkstyp, etc.) nur selten auf neue Entwürfe übertragen werden. Zwar ist die exakte Beschreibung von Strömungsvorgängen seit etwa Mitte des 19. Jahrhunderts rechnerisch theoretisch möglich, die aufgestellten Strömungsgleichungen sind jedoch so komplex, dass sie analytisch bisher nur für einfachste Spezialfälle gelöst werden konnten. Daher bediente man sich in der Vergangenheit physikalischer Modelle, die zur Bewertung der Strömungsvorgänge sehr gut geeignet sind. Nachteilig ist jedoch der damit verbundene hohe finanzielle als auch zeitliche Aufwand. Aus der rasanten Entwicklung leistungsfähiger Computer in den zurückliegenden Jahrzehnten ging eine alternative Möglichkeit zur verlässlichen Beschreibung der physikalischen Prozesse in Strömungen hervor, die numerische Strömungsberechnung (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD). Dabei werden die bekannten Strömungsgleichungen mit Hilfe mathematischer Modelle numerisch berechnet.

#### *1.1.1.1.1 Überschrift der fünften Ordnung*

Trotz der steten Weiterentwicklung der Rechentechnik, der mathematisch numerischen Modelle sowie der Computerprogramme erlaubt die Anwendung von CFD bereits heute die Berechnung hoch komplexer Strömungen aus den unterschiedlichsten Bereichen wie Industrie, Forschung und Umwelt. Zusätzlich zu den physikalischen Modellierungen nehmen Computersimulationen in Hinblick auf Kosten und Zeit auch im Rahmen der Optimierung neu zu errichtender aber auch bestehender Hochwasserentlastungsanlagen einen zunehmend höheren Stellenwert ein.

#### *1.1.1.1.2 Eine weitere Überschrift der fünften Ordnung*

Zusätzlich zu den physikalischen Modellierungen nehmen Computersimulationen in Hinblick auf Kosten und Zeit auch im Rahmen der Optimierung neu zu errichtender aber auch bestehender Hochwasserentlastungsanlagen einen zunehmend höheren Stellenwert ein.

#### *1.1.1.2 Eine weitere Überschrift der vierten Ordnung*

Selbst erprobte Lösungen können aufgrund der variierenden örtlichen Gegebenheiten (Hydrologie, Geologie, Geländemorphologie, Bauwerkstyp, etc.) nur selten auf neue Entwürfe übertragen werden. Zwar ist die exakte Beschreibung von Strömungsvorgängen seit etwa Mitte des 19. Jahrhunderts rechnerisch theoretisch möglich, die aufgestellten Strömungsgleichungen sind jedoch so komplex, dass sie analytisch bisher nur für einfachste Spezialfälle gelöst werden konnten.

### **1.1.2 Eine weitere Überschrift der dritten Ordnung**

Die in jüngster Vergangenheit vermehrt beobachteten Hochwasserereignisse geben Anlass, die bestehenden hydrologischen Grundlagen der Talsperren zu überprüfen. Die daraus resultierenden aktuellen und teilweise deutlich höheren Abflusswerte machen die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastungen durch die Anlagenbetreiber erforderlich. Für die Bestimmung des Abflussvermögens sind Retentionsberechnungen und damit einhergehend verlässliche Schlüsselkurven unverzichtbar. Entweder sind diese jedoch gar nicht vorhanden oder beruhen häufig auf einfachen analytischen Berechnungen, die aufgrund der zum Teil komplizierten Bauwerksgeometrien mit Unsicherheiten behaftet sind. Neben physikalischen Modellen kommen zur Ermittlung des Abflussvermögens zunehmend numerische Modellierungen zum Einsatz (z. B. [SAS IP 2015]). Darüber hinaus bieten numerische Strömungsberechnungen im Rahmen der Planung neu zu errichtender Bauwerke, aber auch im Zuge der Anpassung bestehender Bauwerkskonstruktionen ein geeignetes Hilfsmittel.

Für die im Freistaat Sachsen etwa 25 km südwestlich von Dresden gelegene Talsperre Lehmühle ergab die Überarbeitung der Hochwasserstatistik eine nicht

zu vernachlässigende Erhöhung der hydrologischen Kennwerte. Aus der Überprüfung der vorhandenen Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastung, die zu  $123 \text{ m}^3/\text{s}$  bestimmt wurde, ging ein Defizit von mehr als 40 % hervor. Damit entspricht sie nicht mehr den heutigen Anforderungen, ein Überströmen der Anlage ist nicht mehr mit der erforderlichen Wahrscheinlichkeit auszuschließen. Daraufhin erfolgten am Institut für Wasserbau und Siedlungswasserwirtschaft an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig hydraulische Modellversuche zur Wiederherstellung der Überflutungssicherheit [acadoo 2019].

### **Das ist eine Zwischenüberschrift ohne Nummerierung**

Die Modellversuche sahen die Ertüchtigung der Überfallgeometrie vor. Die Untersuchung der Energieumwandlungsanlage war nicht Gegenstand der Studie. Es ist jedoch zu erwarten, dass die erhöhten Abflussmengen eine deutlich höhere Beanspruchung des Tosbeckens nach sich ziehen. Dies gab den Anlass zur vorliegenden Arbeit. Auf Grundlage dreidimensionaler numerischer Berechnungen sollte das Tosbecken überprüft und gegebenenfalls optimiert werden.

## **1.2 Eine weitere Überschrift der zweiten Ordnung**

### **1.2.1 Eine weitere Überschrift der dritten Ordnung, direkt nach einer Überschrift zweiter Ordnung**

Die in jüngster Vergangenheit vermehrt beobachteten Hochwasserereignisse geben Anlass, die bestehenden hydrologischen Grundlagen der Talsperren zu überprüfen. Die daraus resultierenden aktuellen und teilweise deutlich höheren Abflusswerte machen die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastungen durch die Anlagenbetreiber erforderlich. Für die Bestimmung des Abflussvermögens sind Retentionsberechnungen und damit einhergehend verlässliche Schlüsselkurven unverzichtbar. Entweder sind diese jedoch gar nicht vorhanden oder beruhen häufig auf einfachen analytischen Berechnungen, die aufgrund der zum Teil komplizierten Bauwerksgeometrien mit Unsicherheiten behaftet sind. Neben physikalischen Modellen kommen zur Ermittlung des Abflussvermögens zunehmend numerische Modellierungen zum Einsatz. Darüber hinaus bieten numerische Strömungsberechnungen im Rahmen der Planung neu zu errichtender Bauwerke, aber auch im Zuge der Anpassung bestehender Bauwerkskonstruktionen ein geeignetes Hilfsmittel.

### **1.2.2 Eine weitere Überschrift der dritten Ordnung**

Für die im Freistaat Sachsen etwa 25 km südwestlich von Dresden gelegene Talsperre Lehmühle ergab die Überarbeitung der Hochwasserstatistik eine nicht zu vernachlässigende Erhöhung der hydrologischen Kennwerte. Aus der Überprüfung der vorhandenen Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastung, die zu  $123 \text{ m}^3/\text{s}$

bestimmt wurde, ging ein Defizit von mehr als 40 % hervor. Damit entspricht sie nicht mehr den heutigen Anforderungen, ein Überströmen der Anlage ist nicht mehr mit der erforderlichen Wahrscheinlichkeit auszuschließen. Daraufhin erfolgten am Institut für Wasserbau und Siedlungswasserwirtschaft an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig hydraulische Modellversuche zur Wiederherstellung der Überflutungssicherheit.

Die Modellversuche sahen die Ertüchtigung der Überfallgeometrie vor. Die Untersuchung der Energieumwandlungsanlage war nicht Gegenstand der Studie. Es ist jedoch zu erwarten, dass die erhöhten Abflussmengen eine deutlich höhere Beanspruchung des Tosbeckens nach sich ziehen. Dies gab den Anlass zur vorliegenden Arbeit. Auf Grundlage dreidimensionaler numerischer Berechnungen sollte das Tosbecken überprüft und gegebenenfalls optimiert werden.





# **Teil 2**

## **Elemente einer Open-Access-Publikation**

---



## 2 Elemente

---

### 2.1 Textauszeichnungen

Die in jüngster Vergangenheit vermehrt beobachteten Hochwasserereignisse geben Anlass, die bestehenden hydrologischen Grundlagen der Talsperren zu überprüfen. Die daraus resultierenden aktuellen und teilweise deutlich höheren Abflusswerte machen die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastungen durch die Anlagenbetreiber erforderlich. Für die Bestimmung des Abflussvermögens sind Retentionsberechnungen und damit einhergehend verlässliche Schlüsselkurven unverzichtbar. Entweder sind diese jedoch gar nicht vorhanden oder beruhen häufig auf einfachen analytischen Berechnungen, die aufgrund der zum Teil komplizierten Bauwerksgeometrien mit Unsicherheiten behaftet sind. Neben physikalischen Modellen kommen zur Ermittlung des Abflussvermögens zunehmend **numerische Modellierungen** zum Einsatz. Darüber hinaus bieten numerische Strömungsberechnungen im Rahmen der Planung neu zu errichtender Bauwerke, aber auch im Zuge der Anpassung bestehender Bauwerkskonstruktionen ein geeignetes Hilfsmittel.

Wie eingangs schon erwähnt, waren physikalische Modelle lange Zeit die einzige Möglichkeit, komplexe Strömungsvorgänge zu erfassen und zu bewerten. Die Untersuchung des physikalischen Verhaltens von Fluiden (Flüssigkeiten und Gase) erfolgt auf dem Gebiet der Strömungsmechanik, auch Fluidmechanik genannt. Theoretisch können Strömungsvorgänge durch Strömungsgleichungen (siehe Kapitel 1.1) exakt beschrieben werden, wenngleich die analytische Lösung dieser Gleichungen nur für einfachste Strömungen möglich ist. Da jedoch nahezu alle Anwendungen sehr viel komplexer sind und diese einfachen Strömungen somit praktisch nicht existieren, wurden und werden verschiedene *Strömungsvorgänge* auf Grundlage von Experimenten in Formeln überführt. Diese setzen bestimmte Bedingungen voraus und beruhen überwiegend auf empirisch ermittelten Beiwerten. Während damit für einige Anwendungsfälle realitätsnahe Ergebnisse erzielt werden können, sind diese mit steigender Komplexität mit größeren Unsicherheiten behaftet. Deshalb erfolgte die Erfassung komplexer Strömungen lange ausschließlich mit Hilfe physikalischer Modelle.

### 2.2 Fußnoten

Die in jüngster Vergangenheit vermehrt beobachteten Hochwasserereignisse geben Anlass, die bestehenden hydrologischen Grundlagen der Talsperren zu überprüfen.

Die daraus resultierenden aktuellen und teilweise deutlich höheren Abflusswerte machen die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastungen durch die Anlagenbetreiber erforderlich. Für die Bestimmung des Abflussvermögens sind Retentionsberechnungen und damit einhergehend verlässliche Schlüsselkurven unverzichtbar.<sup>1</sup> Für die im Freistaat Sachsen etwa 25 km südwestlich von Dresden gelegene Talsperre Lehmühle ergab die Überarbeitung der Hochwasserstatistik eine nicht zu vernachlässigende Erhöhung der hydrologischen Kennwerte.<sup>2</sup> Entweder sind diese jedoch gar nicht vorhanden oder beruhen häufig auf einfachen analytischen Berechnungen, die aufgrund der zum Teil komplizierten Bauwerksgeometrien mit Unsicherheiten behaftet sind.

Die Modellversuche sahen die Ertüchtigung der Überfallgeometrie vor. Die Untersuchung der Energieumwandlungsanlage war nicht Gegenstand der Studie. Es ist jedoch zu erwarten, dass die erhöhten Abflussmengen eine deutlich höhere Beanspruchung des Tosbeckens nach sich ziehen. Dies gab den Anlass zur vorliegenden Arbeit. Auf Grundlage dreidimensionaler numerischer Berechnungen sollte das Tosbecken überprüft und gegebenenfalls optimiert werden.<sup>3</sup>

Aus wirtschaftlichen Gründen ist ein absoluter Schutz jedoch nicht möglich.<sup>4</sup> Im Fall extremer Hochwasserereignisse, wie jüngst 2013 in Sachsen zu beobachten war, können die den Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken zufließenden Wassermengen nicht vollständig zwischengespeichert werden.<sup>5</sup> In diesem Fall wird das überschüssige Wasser über Hochwasserentlastungsanlagen (HWE) in den Unterlauf abgeführt.

---

1 [Blind, H. 1987]

2 Die nachfolgenden Erläuterungen geben einen Einblick in die umfangreiche und anspruchsvolle Thematik der numerischen Strömungsberechnung, ohne sich dabei zu sehr in mathematischen Details zu verlieren.

3 This is a footnote

4 Die Modellversuche sahen die Ertüchtigung der Überfallgeometrie vor. Die Untersuchung der Energieumwandlungsanlage war nicht Gegenstand der Studie.

5 Zum anderen erfolgt der Entwurf in Abhängigkeit des stromab der Anlagen vorhandenen Schadenspotentials.

## 3 Weitere Elemente

---

### 3.1 Zitate

*“Life isn't just about taking in oxygen and giving out carbon dioxide.”<sup>6</sup>*

Trotz der steten Weiterentwicklung der Rechentechnik, der mathematisch numerischen Modelle sowie der Computerprogramme erlaubt die Anwendung von CFD bereits heute die Berechnung hoch komplexer Strömungen aus den unterschiedlichsten Bereichen wie Industrie, Forschung und Umwelt. Zusätzlich zu den physikalischen Modellierungen nehmen Computersimulationen in Hinblick auf Kosten und Zeit auch im Rahmen der Optimierung neu zu errichtender aber auch bestehender Hochwasserentlastungsanlagen einen zunehmend höheren Stellenwert ein.

*“When we speak we are afraid our words will not be heard or welcomed. But when we are silent, we are still afraid. So it is better to speak.”*

Ferner dienen sie wie Hochwasserrückhaltebecken auch dem Hochwasserschutz. Dabei staut ein Absperrbauwerk (Staumauer, Staudamm) große Wassermengen auf. Diese werden zwischengespeichert und den Flüssen nach Abklingen des Hochwassers wieder kontrolliert zugeführt. Die Speicherung des Wassers bewirkt die Kapung der Scheitelabflüsse, wodurch schadhafte Überschwemmungen verhindert werden. Die Dimensionierung solcher Anlagen beruht zum einen auf der statistischen Auswertung zurückliegender Hochwasserereignisse, anhand derer die jeweiligen hydrologischen Daten zur Verfügung gestellt werden. Zum anderen erfolgt der Entwurf in Abhängigkeit des stromab der Anlagen vorhandenen Schadenspotentials.

### 3.2 Listen und Aufzählungen

Trotz der steten Weiterentwicklung der Rechentechnik, der mathematisch numerischen Modelle sowie der Computerprogramme erlaubt die Anwendung von CFD bereits heute die Berechnung hoch komplexer Strömungen aus den unterschiedlichsten Bereichen wie Industrie, Forschung und Umwelt. Zusätzlich zu den physikalischen Modellierungen nehmen Computersimulationen in Hinblick auf Kosten

---

<sup>6</sup> Thus quote is from Malala Yousafzai.

und Zeit auch im Rahmen der Optimierung neu zu errichtender aber auch bestehender Hochwasserentlastungsanlagen einen zunehmend höheren Stellenwert ein.

### Cities

- Leipzig
- Kigali
- London
- Tokyo
- Amsterdam
- Johannesburg
- New York
  - Leipzig
  - Kigali

Neben physikalischen können heutzutage insbesondere dreidimensionale numerische Strömungsmodelle, Erfahrung des Ingenieurs vorausgesetzt, die oft sehr komplexen Strömungen gut abbilden. Zur Gewährleistung gesicherter Ergebnisse bedürfen numerische Modelle jedoch immer einer Kalibrierung bzw. Validierung. Liegen hierzu gesicherte Daten vor, ist die numerische Strömungssimulation den physikalischen Modellversuchen häufig vorzuziehen. Denn während physikalische Modelle vor allem bei kleinen Maßstabszahlen und komplizierten Geometrien sowie in Erwartung einer umfangreichen Variantenuntersuchung einen großen zeitlichen als auch finanziellen Aufwand bedeuten, bieten numerische Modelle oftmals eine merklich effizientere Bearbeitung.

1. First list item
2. Second list item
3. Here comes the third list item
4. Last list item

Im Rahmen wasserbaulicher Planungen kommen zur ersten Vorbemessung überwiegend die gängigen Berechnungsformeln zum Einsatz. Da diese jedoch auf empirisch ermittelten Beiwerten beruhen, sind die Ergebnisse lediglich für bestimmte Standardfälle verlässlich. Wasserbauwerke sind jedoch größtenteils Einzellösungen und die Planungen gehen über die Standardfälle hinaus. Selbst bereits vorhandene und erprobte Lösungen können aufgrund der verschiedensten örtlichen Gegebenheiten sowie der unterschiedlichen Anforderungen an das Bauwerk nicht einfach auf eine andere Anlage übertragen werden. Praktisch immer sind komplexe Strömungen zu erwarten. Infolgedessen ist die Planung wasserbaulicher Anlagen vor der Ausführung zu überprüfen und gegebenenfalls zu optimieren. Hierfür eignen sich sowohl physikalische als auch numerische Modelle.

- a) strömendes Fluid

- b) komplexe Strömungen
- c) Wasserbau
- d) Wasserbauwerke
- e) Modellgesetz nach Froude
- f) Reibung

Trotz der steten Weiterentwicklung der Rechentechnik, der mathematisch numerischen Modelle sowie der Computerprogramme erlaubt die Anwendung von CFD bereits heute die Berechnung hoch komplexer Strömungen aus den unterschiedlichsten Bereichen wie Industrie, Forschung und Umwelt. Zusätzlich zu den physikalischen Modellierungen nehmen Computersimulationen in Hinblick auf Kosten und Zeit auch im Rahmen der Optimierung neu zu errichtender aber auch bestehender Hochwasserentlastungsanlagen einen zunehmend höheren Stellenwert ein.

### 3.3 Tabellen

Ist Wasser das strömende Fluid, so ist die Übertragung von der Natur auf das Modell mit der gleichen Maßstabszahl von mehr als zwei Kräften prinzipiell nicht möglich. Daraus resultierend erfolgt bei wasserbaulichen Modellversuchen die Übertragung der jeweils zwei die Strömung dominierenden Kräfte. In Abhängigkeit der maßgebenden Kräfte wurden verschiedene Modellgesetze formuliert. Im Wasserbau werden in erster Linie Modellversuche für Strömungen mit freier Oberfläche durchgeführt. Dabei wirken vor allem die Trägheit und die Schwerkraft, so dass das Modellgesetz nach Froude zur Anwendung kommt. Dominiert neben der Trägheit hingegen die Reibung, so ist das Modellgesetz nach Reynolds zu verwenden. Darüber hinaus gibt es viele weitere Modellgesetze, die im Wasserbau jedoch eine untergeordnete Rolle spielen.

**Tab. 1** Das ist eine Tabellenüberschrift für Tabelle 1 (<http://doi.org/12.34567/123456789-11-T-01>)

City	Name	Country
Berlin	Barbara	Belgien
Leipzig	Lina	Litauen
München	Martin	Mazedonien

Das ist eine Tabellenzelle, die über alle Spalten der Tabelle geht.

Im Rahmen wasserbaulicher Planungen kommen zur ersten Vorbemessung überwiegend die gängigen Berechnungsformeln zum Einsatz. Da diese jedoch auf empirisch ermittelten Beiwerten beruhen, sind die Ergebnisse lediglich für bestimmte Standardfälle verlässlich. Wasserbauwerke sind jedoch größtenteils Einzellösungen

und die Planungen gehen über die Standardfälle hinaus. Selbst bereits vorhandene und erprobte Lösungen können aufgrund der verschiedensten örtlichen Gegebenheiten sowie der unterschiedlichen Anforderungen an das Bauwerk nicht einfach auf eine andere Anlage übertragen werden. Praktisch immer sind komplexe Strömungen zu erwarten. Infolgedessen ist die Planung wasserbaulicher Anlagen vor der Ausführung zu überprüfen und gegebenenfalls zu optimieren. Hierfür eignen sich sowohl physikalische als auch numerische Modelle.

**Tab. 2** Wasserbauwerke sind jedoch größtenteils Einzellösungen und die Planungen gehen über die Standardfälle hinaus. (<http://doi.org/12.34567/123456789-11-T-02>)

File	Uncompresses to	Description
taxdump.tar.Z	readme.txt	A terse description of the dmp files
	nodes.dmp	Structure of the database; lists each taxid with its parent taxid, rank, and other values associated with each node (genetic codes, etc.)

3.4 Formeln

3.4.1 Formeln als Grafik

Dementgegen sollten physikalische Versuche Anwendung finden, wenn Kalibrierungsdaten, beispielsweise bei Neubauten, nicht zur Verfügung stehen und komplexe Strömungsverhältnisse zu prognostizieren sind. Unter Anwendung des passenden Modellgesetzes und eines geeigneten Maßstabes, liefern sie sehr verlässliche Ergebnisse. Stark verkleinerte Nachbildungen (große Maßstabszahlen) ziehen teilweise Maßstabeffekte nach sich und sind zu vermeiden. Auch sollten mit Blick auf die Kosten keine unnötig kleinen Maßstabszahlen gewählt werden. Ein geeigneter Maßstab ist somit ein Kompromiss aus Ergebnisgenauigkeit und anfallenden Kosten. Darüber hinaus beeinflussen weitere Kriterien wie die vorhandene Versuchsfläche oder Pumpenleistung die Wahl des Maßstabes.

$$l_{bL,max} = \frac{2}{k} \cdot \sqrt{\frac{E_L \cdot t_L \cdot s_{L0k}}{\tau_{L1k}}}$$

(1-01)



Mit:  $k = 1,128$

empirischer Faktor (eingeführt von Niedermeier)

Dementgegen sollten physikalische Versuche Anwendung finden, wenn Kalibrierungsdaten, beispielsweise bei Neubauten, nicht zur Verfügung stehen und komplexe Strömungsverhältnisse zu prognostizieren sind.

## 3.5 Abbildungen

Dementgegen sollten physikalische Versuche Anwendung finden, wenn Kalibrierungsdaten, beispielsweise bei Neubauten, nicht zur Verfügung stehen und komplexe Strömungsverhältnisse zu prognostizieren sind. Unter Anwendung des passenden Modellgesetzes und eines geeigneten Maßstabes, liefern sie sehr verlässliche Ergebnisse.



**Abb. 1** Bildunterschrift für Abb. 1 (<http://doi.org/12.34567/123456789-11-A-01>)

Neben physikalischen Modellen können heutzutage insbesondere dreidimensionale numerische Strömungsmodelle, Erfahrung des Ingenieurs vorausgesetzt, die oft

sehr komplexen Strömungen gut abbilden. Zur Gewährleistung gesicherter Ergebnisse bedürfen numerische Modelle jedoch immer einer Kalibrierung bzw. Validierung.



**Abb. 2** Unter Anwendung des passenden Modellgesetzes und eines geeigneten Maßstabes, liefern sie sehr verlässliche Ergebnisse. (<http://doi.org/12.34567/123456789-11-A-02>)

Dementgegen sollten physikalische Versuche Anwendung finden, wenn Kalibrierungsdaten, beispielsweise bei Neubauten, nicht zur Verfügung stehen und komplexe Strömungsverhältnisse zu prognostizieren sind. Unter Anwendung des passenden Modellgesetzes und eines geeigneten Maßstabes, liefern sie sehr verlässliche Ergebnisse.

### 3.6 Programmier-Code

Dementgegen sollten physikalische Versuche Anwendung finden, wenn Kalibrierungsdaten, beispielsweise bei Neubauten, nicht zur Verfügung stehen und komplexe Strömungsverhältnisse zu prognostizieren sind. Unter Anwendung des passenden Modellgesetzes und eines geeigneten Maßstabes, liefern sie sehr verlässliche Ergebnisse.

```
<!ELEMENT implications (tree+) >
<!ELEMENT tree (root, branches) > <!ELEMENT root (term,
```

```
synonym?) > <!ELEMENT branches (term | (term, synonym) |
tree)* >
```

Neben physikalischen Modellen können heutzutage insbesondere dreidimensionale numerische Strömungsmodelle, Erfahrung des Ingenieurs vorausgesetzt, die oft sehr komplexen Strömungen gut abbilden. Zur Gewährleistung gesicherter Ergebnisse bedürfen numerische Modelle jedoch immer einer Kalibrierung bzw. Validierung.

```
function myFunction() { var x,
text; x =document. getElementById("numb").value; if (isNaN(x) ||
x < 1 || x > 10) { text = "Input not valid"; } else { text
= "Input OK"; }document. getElementById("demo").innerHTML =
text; }
```

Dementgegen sollten physikalische Versuche Anwendung finden, wenn Kalibrierungsdaten, beispielsweise bei Neubauten, nicht zur Verfügung stehen und komplexe Strömungsverhältnisse zu prognostizieren sind. Unter Anwendung des passenden Modellgesetzes und eines geeigneten Maßstabes, liefern sie sehr verlässliche Ergebnisse.

### 3.7 Textboxen und Infokästen

Im Rahmen wasserbaulicher Planungen kommen zur ersten Vorbemessung überwiegend die gängigen Berechnungsformeln zum Einsatz. Da diese jedoch auf empirisch ermittelten Beiwerten beruhen, sind die Ergebnisse lediglich für bestimmte Standardfälle verlässlich. Wasserbauwerke sind jedoch größtenteils Einzellösungen und die Planungen gehen über die Standardfälle hinaus. Selbst bereits vorhandene und erprobte Lösungen können aufgrund der verschiedensten örtlichen Gegebenheiten sowie der unterschiedlichen Anforderungen an das Bauwerk nicht einfach auf eine andere Anlage übertragen werden. Praktisch immer sind komplexe Strömungen zu erwarten. Infolgedessen ist die Planung wasserbaulicher Anlagen vor der Ausführung zu überprüfen und gegebenenfalls zu optimieren. Hierfür eignen sich sowohl physikalische als auch numerische Modelle.

Boxes contain important information.

Teilweise kommen numerische Modelle im Rahmen der Variantenfindung bei der Vorbemessung wasserbaulicher Anlagen auch ohne Kalibrierung zum Einsatz. Eine Bewertung der Varianten anhand qualitativer Unterschiede zwischen den Berechnungsergebnissen ist dennoch möglich, da mögliche Ergebnisungenauigkeiten bezogen auf die Realität gleichermaßen in die Berechnungen einfließen.

Für bestimmte Fragestellungen kann es unter Umständen zweckmäßig sein, ein numerisches mit einem physikalischen Modell zu kombinieren. Sogenannte hybride Modelle vereinen die jeweiligen Vorteile der verschiedenen Modellierungsarten. Gerade im Zuge der Optimierung wasserbaulicher Anlagen ist die Untersuchung zahlreicher Varianten keine Seltenheit. Die zunächst höheren Kosten für die Erstellung zweier Modelle können häufig kompensiert werden. Teilweise ist neben dem finanziellen Aufwand sogar eine Reduzierung des Zeitaufwandes möglich.

Die zunächst höheren Kosten für die Erstellung zweier Modelle können häufig kompensiert werden. Teilweise ist neben dem finanziellen Aufwand sogar eine Reduzierung des Zeitaufwandes möglich.

Neben physikalischen Modellen können heutzutage insbesondere dreidimensionale numerische Strömungsmodelle, Erfahrung des Ingenieurs vorausgesetzt, die oft sehr komplexen Strömungen gut abbilden. Zur Gewährleistung gesicherter Ergebnisse bedürfen numerische Modelle jedoch immer einer Kalibrierung bzw. Validierung.

### 3.8 Index-Begriffe und Querverweise

Für bestimmte Fragestellungen kann es unter Umständen zweckmäßig sein, ein numerisches mit einem physikalischen Modell zu kombinieren. Sogenannte hybride Modelle vereinen die jeweiligen Vorteile der verschiedenen Modellierungsarten. Gerade im Zuge der Optimierung wasserbaulicher Anlagen ist die Untersuchung zahlreicher Varianten keine Seltenheit. Die zunächst höheren Kosten für die Erstellung zweier Modelle können häufig kompensiert werden. Teilweise ist neben dem finanziellen Aufwand sogar eine Reduzierung des Zeitaufwandes möglich.

In den meisten CFD-Programmen ist die Integralform implementiert. Die Diskretisierung erfolgt hierfür nach dem Finite-Volumen-Verfahren (FV). Verdichtungsstöße werden besser erfasst, da Unstetigkeiten innerhalb des Kontrollvolumens zugelassen werden. Im Gegensatz dazu sind die Strömungsgrößen innerhalb des Volumenelementes bei der Differentialform bzw. dem Finite-Differenzen-Verfahren (FD) stetig, was jedoch bei Verdichtungsstößen nicht der Fall ist. Verdichtungsstöße sind unstetige Änderungen des Strömungszustandes, die mit sprunghaften Änderungen der Dichte einhergehen und somit lediglich bei Überschallströmungen in kompressiblen Medien auftreten können. Für Strömungen mit Wasser als Fluid sind Verdichtungsstöße irrelevant. Weitere Erläuterungen zu den Diskretisierungsmethoden werden in (Kapitel 3.1) gegeben.

Mit Hilfe der vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen wird eine Strömung mit kleinsten Wirbeln und Turbulenzen beschrieben. Zur Lösung dieser Gleichungen sind sehr fein aufgelöste Berechnungsnetze erforderlich, was jedoch zu Lasten

der Rechenzeit geht. Daraus resultierend ist deren Einsatz für technische Anwendungen meist nicht praktikabel. Die meisten CFD-Programme lösen deshalb vereinfachte Erhaltungsgleichungen, beispielsweise die Reynolds-gemittelten-Navier-Stokes-Gleichungen (Kapitel 2.2).

Die genaueste Methode zur Berechnung von Strömungen ist direkte numerische Simulation (engl.: Direct Numerical Simulation, DNS). Dabei werden die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen (Kapitel 3.7) gelöst, d. h. alle relevanten, so auch kleinstskalige Turbulenzen, werden sowohl räumlich als auch zeitlich berechnet. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein hochaufgelöstes Berechnungsnetz (Kapitel 3.2). Nicht selten übersteigen die Netze eine Knotenanzahl von 100 Millionen. Dies erfordert extreme Rechenleistungen und -zeiten, die für alltägliche Anwendungen nicht zweckmäßig sind. Auch die erforderliche Speicherkapazität ist wegen des Berechnens der instationären Gleichungen zur Auflösung der Zeit immens, da die Lösung für jeden Zeitschritt gesichert wird. Daher beschränkt sich der Einsatz von DNS hauptsächlich auf die Forschung. Mit dem Ziel weniger rechenintensiver Methoden bildet sie die Grundlage zur Entwicklung neuer und Optimierung bestehender Modelle.



# Literaturverzeichnis

---

## Literatur

- Aigner, D., Bollrich, G.: Handbuch der Hydraulik für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Beuth Verlag GmbH Berlin Wien Zürich, 2015
- SAS IP, Inc.: ANSYS Help Viewer, Version 15.0, 2013
- ANSYS Inc.: ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, Release 15.0, 2013
- ANSYS Inc.: ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 15.0, 2013
- Blind, H.: Wasserbauten aus Beton, Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau, Ernst, Verlag für Architektur u. techn. Wiss., Berlin, 1987
- Bollrich, G.: Technische Hydromechanik 1, Verlag für Bauwesen GmbH, 1996

## Internetquellen

- 1a-Studi (2019): Kostenbeispiele für Korrekturlesen & Lektorat. URL: <https://www.1a-studi.de/korrekturlesen-lektorat-preise> (Aufruf am 08.11.2019)
- acadoo (2019): Wissenschaftliches Lektorat. URL: <https://wissenschaftlicheslektorat.com/> (Aufruf am 08.11.2019)
- Akademischeslektorat.com (2019): Wissenschaftliches Lektorat für Dissertation. URL: <http://www.akademischeslektorat.com/wissenschaftliches-lektorat-fuer-dissertation/> (Aufruf am 08.11.2019)
- Albers, S. et al. (2007): Methodik der empirischen Forschung. Gabler Verlag, 2. Auflage, Wiesbaden. ISBN: 9783834904690
- Allweyer, T. (2015): BPMN 2.0 – Business Process Model and Notation: Einführung in den Standard für die Geschäftsprozessmodellierung. BoD – Books on Demand, Norderstedt. ISBN: 9783738626711





# Anhang

---



# Anhang 1

## Überschrift erster Ordnung des Anhangs

---

### A-1.1 Überschrift zweiter Ordnung des Anhangs

Die Untersuchung des physikalischen Verhaltens von Fluiden (Flüssigkeiten und Gase) erfolgt auf dem Gebiet der Strömungsmechanik, auch Fluidmechanik genannt. Theoretisch können Strömungsvorgänge durch Strömungsgleichungen (siehe Kapitel 2.2) exakt beschrieben werden, wenngleich die analytische Lösung dieser Gleichungen nur für einfachste Strömungen möglich ist. Da jedoch nahezu alle Anwendungen sehr viel komplexer sind und diese einfachen Strömungen somit praktisch nicht existieren, wurden und werden verschiedene Strömungsvorgänge auf Grundlage von Experimenten in Formeln überführt. Diese setzen bestimmte Bedingungen voraus und beruhen überwiegend auf empirisch ermittelten Beiwerten. Während damit für einige Anwendungsfälle realitätsnahe Ergebnisse erzielt werden können, sind diese mit steigender Komplexität mit größeren Unsicherheiten behaftet. Deshalb erfolgte die Erfassung komplexer Strömungen lange ausschließlich mit Hilfe physikalischer Modelle.

Sowohl die Genauigkeit der Ergebnisse als auch die Rechenzeit hängen von vielerlei Faktoren ab, beispielsweise der gewählten Gleichungen, der Diskretisierungsmethode sowie der Art, Feinheit und Qualität des Berechnungsnetzes. Für ein gutes Verhältnis zwischen Genauigkeit und akzeptablem Rechenaufwand wurde in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl verschiedener mathematischer Modelle aufgestellt. Aber auch zukünftig erlauben immer schnellere Prozessoren sowie immer größere Speicherkapazitäten die stete Entwicklung neuer, aufwendigerer und genauerer Modelle. Geometrische Ähnlichkeit besteht, wenn alle geometrischen Maße wie Länge, Breite und Höhe unter Verwendung der gleichen Maßstabszahl von der Natur auf die Modellgrößen und umgekehrt übertragen werden. Bei der kinematischen Ähnlichkeit stehen alle zeitabhängigen Prozesse (z. B. Fließgeschwindigkeit) in einem festen Verhältnis. Dagegen setzt die dynamische Ähnlichkeit voraus, dass die in einer Strömung wirkenden Kräfte (z. B. Schwerkraft, Trägheit, Reibung, Kapillardruck, Elastizität, Staudruck) zwischen Modell und Natur im gleichen Verhältnis stehen. [Bollrich, G. 1996]

Sowohl die Genauigkeit der Ergebnisse als auch die Rechenzeit hängen von vielerlei Faktoren ab, beispielsweise der gewählten Gleichungen, der Diskretisierungsmethode sowie der Art, Feinheit und Qualität des Berechnungsnetzes. Für ein gutes Verhältnis zwischen Genauigkeit und akzeptablem Rechenaufwand wurde in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl verschiedener mathematischer Modelle aufgestellt. Aber auch zukünftig erlauben immer schnellere Prozessoren sowie immer

größere Speicherkapazitäten die stete Entwicklung neuer, aufwendigerer und genauerer Modelle. Geometrische Ähnlichkeit besteht, wenn alle geometrischen Maße wie Länge, Breite und Höhe unter Verwendung der gleichen Maßstabszahl von der Natur auf die Modellgrößen und umgekehrt übertragen werden. Bei der kinematischen Ähnlichkeit stehen alle zeitabhängigen Prozesse (z. B. Fließgeschwindigkeit) in einem festen Verhältnis. Dagegen setzt die dynamische Ähnlichkeit voraus, dass die in einer Strömung wirkenden Kräfte (z. B. Schwerkraft, Trägheit, Reibung, Kapillardruck, Elastizität, Staudruck) zwischen Modell und Natur im gleichen Verhältnis stehen. [Bollrich, G. 1996]

## Anhang 2

### Zweite Überschrift des Anhangs

---

Eine weitere Voraussetzung für das Berechnen von Strömungen ist ein Berechnungsnetz (Kapitel 2.1)). Hierzu wird das Untersuchungsgebiet in eine Vielzahl kleiner Elemente (Kontrollvolumen) zerlegt, die über sogenannte Knoten miteinander verbunden sind. Die Zerlegung wird auch als Diskretisierung bezeichnet. Für jeden Berechnungsnetz-knoten bzw. jedes Element werden nun die die Strömung charakterisierenden physikalischen Größen wie beispielsweise Geschwindigkeit und Druck berechnet. Zwischen den Knoten werden die Ergebnisse interpoliert. Die Lösungsfindung erfolgt iterativ, wobei die Berechnungen so lange wiederholt werden, bis die Unterschiede zwischen zwei aufeinander folgenden Lösungen vernachlässigbar sind bzw. innerhalb einer vorgegebenen Toleranz (Abbruchkriterium) liegen.

Sowohl die Genauigkeit der Ergebnisse als auch die Rechenzeit hängen von vielerlei Faktoren ab, beispielsweise der gewählten Gleichungen, der Diskretisierungsmethode sowie der Art, Feinheit und Qualität des Berechnungsnetzes. Für ein gutes Verhältnis zwischen Genauigkeit und akzeptablem Rechenaufwand wurde in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl verschiedener mathematischer Modelle aufgestellt. Aber auch zukünftig erlauben immer schnellere Prozessoren sowie immer größere Speicherkapazitäten die stete Entwicklung neuer, aufwendigerer und genauerer Modelle. Geometrische Ähnlichkeit besteht, wenn alle geometrischen Maße wie Länge, Breite und Höhe unter Verwendung der gleichen Maßstabszahl von der Natur auf die Modellgrößen und umgekehrt übertragen werden. Bei der kinematischen Ähnlichkeit stehen alle zeitabhängigen Prozesse (z. B. Fließgeschwindigkeit) in einem festen Verhältnis. Dagegen setzt die dynamische Ähnlichkeit voraus, dass die in einer Strömung wirkenden Kräfte (z. B. Schwerkraft, Trägheit, Reibung, Kapillardruck, Elastizität, Staudruck) zwischen Modell und Natur im gleichen Verhältnis stehen.

#### A-2.1 Überschrift zweiter Ordnung des Anhangs, die über mindestens zwei Zeilen laufen soll

Sowohl die Genauigkeit der Ergebnisse als auch die Rechenzeit hängen von vielerlei Faktoren ab, beispielsweise der gewählten Gleichungen, der Diskretisierungsmethode sowie der Art, Feinheit und Qualität des Berechnungsnetzes. Für ein gutes Verhältnis zwischen Genauigkeit und akzeptablem Rechenaufwand wurde in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl verschiedener mathematischer Modelle aufgestellt. Aber auch zukünftig erlauben immer schnellere Prozessoren sowie immer

größere Speicherkapazitäten die stete Entwicklung neuer, aufwendigerer und genauerer Modelle.

Geometrische Ähnlichkeit besteht, wenn alle geometrischen Maße wie Länge, Breite und Höhe unter Verwendung der gleichen Maßstabszahl von der Natur auf die Modellgrößen und umgekehrt übertragen werden. Bei der kinematischen Ähnlichkeit stehen alle zeitabhängigen Prozesse (z. B. Fließgeschwindigkeit) in einem festen Verhältnis. Dagegen setzt die dynamische Ähnlichkeit voraus, dass die in einer Strömung wirkenden Kräfte (z. B. Schwerkraft, Trägheit, Reibung, Kapillardruck, Elastizität, Staudruck) zwischen Modell und Natur im gleichen Verhältnis stehen.

Sowohl die Genauigkeit der Ergebnisse als auch die Rechenzeit hängen von vielerlei Faktoren ab, beispielsweise der gewählten Gleichungen, der Diskretisierungsmethode sowie der Art, Feinheit und Qualität des Berechnungsnetzes. Für ein gutes Verhältnis zwischen Genauigkeit und akzeptablem Rechenaufwand wurde in der Vergangenheit bereits eine Vielzahl verschiedener mathematischer Modelle aufgestellt. Aber auch zukünftig erlauben immer schnellere Prozessoren sowie immer größere Speicherkapazitäten die stete Entwicklung neuer, aufwendigerer und genauerer Modelle. Geometrische Ähnlichkeit besteht, wenn alle geometrischen Maße wie Länge, Breite und Höhe unter Verwendung der gleichen Maßstabszahl von der Natur auf die Modellgrößen und umgekehrt übertragen werden. Bei der kinematischen Ähnlichkeit stehen alle zeitabhängigen Prozesse (z. B. Fließgeschwindigkeit) in einem festen Verhältnis. Dagegen setzt die dynamische Ähnlichkeit voraus, dass die in einer Strömung wirkenden Kräfte (z. B. Schwerkraft, Trägheit, Reibung, Kapillardruck, Elastizität, Staudruck) zwischen Modell und Natur im gleichen Verhältnis stehen.

# Index

---

Berechnungsnetze 36  
CFD-Programmen 36  
Direct Numerical Simulation 37  
DNS 37  
Finite-Differenzen-Verfahren (FD) 36  
Finite-Volumen-Verfahren (FV) 36  
Navier-Stokes-Gleichungen 37  
Überschallströmungen 36

