

**NUMERISCHE 3D-SIMULATIONEN UND
PHYSIKALISCHE MODELLVERSUCHE VON
ABLÖSEZONEN UND DREHWIRBELN IM WASSERBAU**

***NUMERICAL 3D-SIMULATIONS AND
PHYSICAL MODEL TESTS OF FLOW SEPERATIONS AND
VORTICES IN APPLIED HYDRAULIC ENGINEERING***

von

Jens SCHEFFERMANN

Tobias LINKE

A B S T R A C T

Avoiding vortices and separation zones at hydraulic structures is still an unresolved problem in hydraulic engineering. These effects can affect the efficiency of plants or pumps. To solve these problems mostly physical model tests are still carried out.

Solving these problems in numerical simulations necessary data for calibration of the model is often missing. For the use of required boundaries like free surface and moving meshes experiences are missing.

In this article numerical simulations were performed for two completed physical model tests to show the applications of the used CFD-solver. In the first one investigations for the pump intake of a cooling tower were made. In the second one the flow to the turbines of a water plant was investigated.

Z U S A M M E N F A S S U N G

Beim Bau und Betrieb von Wasser umströmten bzw. durchströmten wasserbaulichen Anlagen kommt es immer wieder zu Strömungsablösungen und Verwirbelungen, die die geplante Funktion beeinträchtigen bzw. die Leistung reduzieren.

Die numerische Simulation derartiger Strömungsvorgänge ist heute sehr weit fortgeschritten, jedoch in ihrer Aussagefähigkeit noch eingeschränkt, da die notwendige Datengrundlage für eine Kalibrierung bzw. Validierung der zeitlich und räumlich hoch auflösenden Modelle vielfach fehlt. Die für einzelne Betriebszustände maßgeblichen Randbedingungen wasserbaulicher Anlagen, wie freie Oberfläche oder bewegliche Geometrien, sind für großflächige und abschnittsweise fein aufgelöste Modellgebiete mit freier Oberfläche noch nicht angewandt worden.

Im vorliegenden Beitrag werden zunächst die Grundlagen eines für geschlossene Systeme entwickelten 3-dimensionalen numerischen Simulationsprogrammes beschrieben und anschließend die Anwendungsmöglichkeiten anhand von zwei Anwendungen demonstriert. Hierbei handelt es sich um zwei abgeschlossene Projekte mit physikalischen Modellversuchen, für die ebenfalls numerische Simulationen zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit dieses numerischen Simulationsprogramms durchgeführt wurden: für den Pumpenzulauf eines Kühlturmkomplexes und für einen Turbinenzustrom in einem Laufwasserkraftwerk.

INHALT

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | EINLEITUNG | 68 |
| 2 | GRUNDLAGEN NUMERISCHER SIMULATIONEN | 68 |
| 2.1 | Allgemeines | 68 |
| 2.2 | Mathematisches Modell | 69 |
| 2.2.1 | Allgemeines | 69 |
| 2.2.2 | Physikalische Voraussetzungen | 69 |
| 2.2.3 | Grundgleichungen | 69 |
| 2.2.4 | Reynoldsgemittelte Navier-Stokes-Gleichung | 69 |
| 2.3 | Turbulenzmodellierung | 70 |
| 2.3.1 | Turbulenzmodelle | 70 |
| 2.3.2 | Wirbelviskosität | 70 |
| 2.3.3 | k- ϵ -Modell | 70 |
| 2.4 | Randbedingungen und Modellierung der freien Oberfläche einer Strömung | 71 |
| 2.5 | Entwicklungsansatz | 72 |
| 3 | DREHWIRBEL IM PUMPENSUMPF EINES ZELLENKÜHLTURMS | 72 |
| 3.1 | Allgemeines | 72 |
| 3.2 | Physikalisches Modell | 73 |
| 3.3 | Numerisches Modell | 73 |
| 3.4 | Untersuchungsprogramm | 74 |
| 3.5 | Ergebnisse | 74 |
| 3.6 | Ergebnisbeurteilung | 76 |
| 4 | ABLÖSEZONEN IM TURBINENZUSTROM EINES LAUFWASSERKRAFTWERKES | 76 |
| 4.1 | Allgemeines | 76 |
| 4.2 | Physikalisches Modell | 77 |
| 4.3 | Numerisches Modell | 77 |
| 4.4 | Versuchsprogramm | 78 |
| 4.5 | Ergebnisse | 79 |
| 4.6 | Ergebnisbeurteilung | 82 |
| 5 | GESAMTBEURTEILUNG / UNTERSUCHUNGSBEDARF | 82 |
| 6 | SCHRIFTTUM | 82 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Abb. 2-1: Arbeitsschritte bei der numerischen Simulation von Strömungen (NOLL, 1998) | 68 |
| Abb. 2-2: Ortsfestes Kontrollvolumen zur Bilanzierung der Transportgleichungen | 69 |
| Abb. 3-1: Kühlturmzellen mit angeschlossenem Pumpensumpf | 73 |
| Abb. 3-2: Physikalisches Modell des Zellenkühlturmes | 73 |
| Abb. 3-3: Numerisches Modell des Zellenkühlturmes | 73 |
| Abb. 3-4: Verteilung der Wanddurchbrüche in Variante 1 zwischen den Zellen 1 und 2 und den Zellen 2 und 3 | 74 |
| Abb. 3-5: Verteilung der Wanddurchbrüche in Variante 2 | 74 |
| Abb. 3-6: Strömungsgeschwindigkeiten in Zelle 2 hinter den Wanddurchbrüchen zwischen Zelle 2 und 3 (Variante 1, LF 1, H = 1,20 m) | 75 |
| Abb. 3-7: Strömungsgeschwindigkeiten in den Pumpenzuläufen (Variante 1, LF 1, H = 1,20 m) | 75 |
| Abb. 3-8: Strömungsgeschwindigkeiten in halber Wassertiefe im Kühlturmbauwerk (Variante 1, LF 1, H = 0,48 m) | 75 |
| Abb. 3-9: Strömungsgeschwindigkeiten im Pumpensumpf 10 cm unterhalb der Ansaugstutzen (Variante 1, LF 1, H = 0,48 m) | 75 |
| Abb. 3-10: Strömungsgeschwindigkeiten in halber Wassertiefe im Kühlturmbauwerk (Variante 2, LF 1, H = 0,48 m) | 76 |
| Abb. 3-11: Strömungsgeschwindigkeiten im Pumpensumpf 10 cm unterhalb der Ansaugstutzen (Variante 2, LF 1, H = 0,48 m) | 76 |
| Abb. 4-1: Wehranlage in der Leine bei Hannover mit integriertem Laufwasserkraftwerk (äußerstes linkes Wehrfeld) | 77 |
| Abb. 4-2: Lage der aufgenommenen Profile oberstrom des Kraftwerkes und Grenzen des physikalischen Modells (Naturmaßstab) | 77 |
| Abb. 4-3: Numerisches Modell des Zustromes zum Laufwasserkraftwerk | 78 |
| Abb. 4-4: Validierung des numerischen Modells anhand von Flügelmessungen am WASSERKRAFTWERK HERRENHAUSEN bei $Q = 29 \text{ m}^3/\text{s}$ | 79 |
| Abb. 4-5: Langzeitaufnahme von Oberflächentreibkörpern im Ist-Zustand bei $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ | 79 |
| Abb. 4-6: Visualisierung der Strömung im Zufluss zu den Turbinen im Ist-Zustand bei $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ | 80 |
| Abb. 4-7: Strömungsgeschwindigkeiten im Ist-Zustand für alle drei Lastfälle | 80 |
| Abb. 4-8: Strömungsgeschwindigkeiten in der Variante 1a für $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ | 81 |
| Abb. 4-9: Strömungsgeschwindigkeiten in der Variante 2a für $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ | 81 |
| Abb. 4-10: Strömungsgeschwindigkeiten in der Variante 3a für $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ | 81 |
| Abb. 4-11: Durchfluss im Turbinenzulauf im Ist-Zustand für $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ | 82 |
| Abb. 4-12: Durchfluss im Turbinenzulauf in der Variante 1a für $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ | 82 |

TAFELVERZEICHNIS

| | | |
|------------|---|----|
| Tafel 2-1: | Konstanten des k- ϵ -Modells | 71 |
| Tafel 3-1: | Versuchsprogramm der physikalischen Versuche und der numerischen Simulationen | 74 |
| Tafel 4-1: | Untersuchungsprogramm zur Strömungssimulation am WASSERKRAFTWERK HERRENHAUSEN (O Physikalisches Modell; X Numerische Simulation) | 79 |

SYMBOLVERZEICHNIS

| | | | | | |
|-----------------|---|---|---------------|---|--|
| c | = | Fluidanteil der Kontrollzelle, $c = 1$ für gefüllte, $c = 0$ für leere Kontrollzellen [-] | x_i | = | Dreidimensionaler Raumvektor [-] |
| c_i | = | Konzentration gelöster bzw. suspendierter Stoffe [kg/m ³] | y | = | Koordinatenrichtung [-] |
| $c_{1\epsilon}$ | = | Konstante des k- ϵ -Modells [-] | P_k | = | Produktion turbulenter kinetischer Energie aus den mittleren Strömungsgrößen [m ² /s ²] |
| $c_{2\epsilon}$ | = | Konstante des k- ϵ -Modells [-] | H | = | Wassertiefe [m] |
| c_μ | = | Konstante des k- ϵ -Modells [-] | Q | = | Abfluss [m ³ /s] |
| f | = | Massenkräfte [N] | T | = | Temperatur [°C] |
| k | = | Turbulente kinetische Energie [m ² /s ²] | δ_{ij} | = | Kronecker-Delta [-] |
| p | = | Druck [N/m ²] | ϵ | = | Dissipation [m ² /s ³] |
| t | = | Zeit [s] | η | = | Abstand bezogen auf die Fließfläche [m] |
| u | = | Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung [m/s] | ν | = | Kinematische Zähigkeit [m ² /s] |
| u_i | = | Dreidimensionaler Strömungsvektor [m/s] | ν_t | = | Wirbelviskosität [m ² /s] |
| v | = | Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung [m/s] | ρ | = | Dichte des betrachteten Stoffes (z.B. von Wasser) [kg/m ³] |
| w | = | Strömungsgeschwindigkeit in z-Richtung [m/s] | τ | = | Schubspannung [N/m ²] |

1 Einleitung

Beim Bau und Betrieb von von Wasser umströmten bzw. durchströmten wasserbaulichen Anlagen kommt es immer wieder zu Strömungsablösungen und Wirbelungen, die die geplante Funktion beeinträchtigen bzw. die Leistung reduzieren.

Die numerische Simulation derartiger Strömungsvorgänge ist heute sehr weit fortgeschritten, jedoch in ihrer Aussagefähigkeit noch eingeschränkt, da die notwendige Datengrundlage für eine Kalibrierung bzw. Validierung der zeitlich und räumlich hoch auflösenden Modelle vielfach fehlt. Die für einzelne Betriebszustände maßgeblichen Randbedingungen wasserbaulicher Anlagen, wie freie Oberfläche, bewegliche Geometrien sind für großflächige und abschnittsweise fein aufgelöste Modellgebiete mit freier Oberfläche noch nicht angewandt worden.

Im vorliegenden Beitrag werden zunächst die Grundlagen eines für geschlossene Systeme entwickelten 3-dimensionalen numerischen Simulationsprogrammes beschrieben und anschließend die Anwendungsmöglichkeiten anhand von zwei Anwendungen demonstriert. Hierbei handelt es sich um zwei abgeschlossene Projekte mit physikalischen Modellversuchen, für die ebenfalls numerische Simulationen zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit dieses numerischen Simulationsprogramms durchgeführt wurden: für den Pumpenzulauf eines Kühlturmkomplexes und für einen Turbinenzustrom in einem Laufwasserkraftwerk.

2 Grundlagen numerischer Simulationen

2.1 Allgemeines

Zur mathematischen Beschreibung von Strömungen und damit verbundener Transportvorgänge muss ein System von Differentialgleichungen gelöst werden, das jeweils den Transport einer einzelnen Strömungsgröße wiedergibt. Zur Lösung dieser Gleichungen werden heute numerische Methoden eingesetzt. Die notwendigen Arbeitsschritte zur Simulation von Strömungen sind in Abb. 2-1 dargestellt und im Folgenden näher erläutert.

Die räumliche Beschreibung der Oberfläche eines umströmten oder durchströmten Körpers, sowie die Ränder des Berechnungsgebietes werden in der Geometriemodellierung festgelegt.

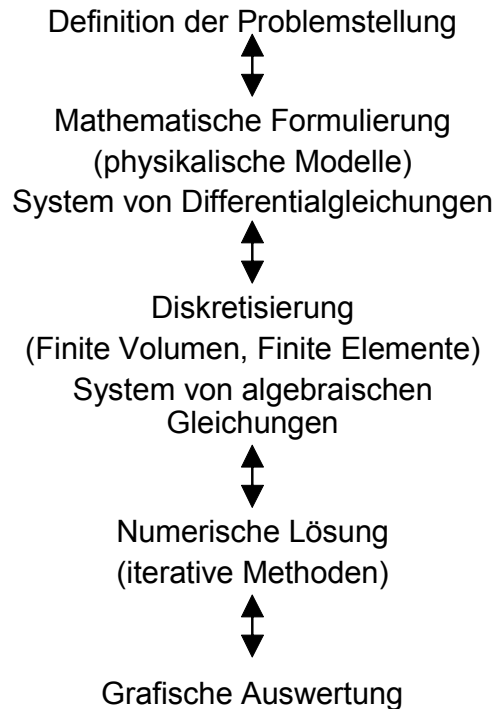


Abb. 2-1: Arbeitsschritte bei der numerischen Simulation von Strömungen (NOLL, 1998)

Bei einem numerischen Modell wird das zu betrachtende Gebiet im Inneren sowie an den Rändern durch räumliche Stützstellen (Diskretisierungsstellen, Knoten, Netzpunkte) festgelegt. Ein Verbinden dieser Punkte durch Geraden ergibt das Rechnernetz (Gitternetz), das in die folgenden Typisierungen unterschieden werden kann:

- Strukturierte, blockstrukturierte und unstrukturierte Gitternetze
- Äquidistante und nicht-äquidistante Gitternetze
- Orthogonale und nicht-orthogonale Gitternetze
- Statische und adaptive Gitternetze

Bei einfachen gleichmäßigen Geometrien (beispielsweise rechteckig oder kreisförmig) folgen die Gitterlinien normalerweise den Koordinatenrichtungen. Eine geordnete (strukturierte) Abfolge von Knoten- und Elementnummern entsteht, wenn bei einem Rechtecksgitternetz an jeden Knoten vier Gitterzellen angrenzen. Diese strukturierten Gitter sind durch eine eindeutige Nachbarschaftsbeziehung zwischen ihren Zellen gekennzeichnet. Sind diese Gitterzellen rechtwinklig, liegt ein orthogonales Gitter in kartesischen oder polar-zylindrischen Koordinatensystemen vor, wobei die Gitterabstände auch variabel (nicht-äquidistant) sein können, so dass eine Verdichtung in einzelnen Bereichen möglich ist.

Bei unstrukturierten Gitternetzen (die bei der Vernetzung komplexer Geometrien die Regel sind) besteht kein Zwang zur Orthogonalität und die Gitterzellen sind nicht nach festen Regeln miteinander verknüpft. Der Vorteil der unstrukturierten Gitter liegt in der großen Flexibilität und der Anpassungsfähigkeit an komplizierte Berandungen.

2.2 Mathematisches Modell

2.2.1 Allgemeines

Das mathematische Modell ist die Grundlage des numerischen Modells. Alle Vorgänge im numerischen Modell beruhen bei der mathematischen Beschreibung von Strömungsvorgängen und den jeweiligen physikalischen Prozessen auf den Grundgleichungen der Strömungsmechanik. Diese Grundgleichungen sind partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung, in denen die Änderungen der Zustandsgrößen kontinuierlich in den räumlichen Richtungen und in der Zeit ausgedrückt werden.

Zunächst werden die grundlegenden Formeln für die Erhaltung von Masse, Impuls und Energie durch die Aufstellung von Differentialgleichungen beschrieben. Diese Formulierungen führen zu der Beschreibung der Turbulenzmodellierung in CFD-Programmen, die eine Lösung der Differentialgleichungen ermöglichen.

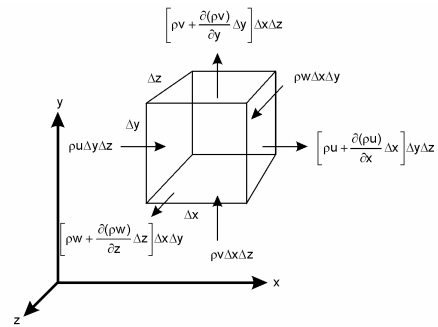
2.2.2 Physikalische Voraussetzungen

Zwei wesentliche Annahmen, die für Fluidströmungen vorausgesetzt werden können, liegen der Beschreibung physikalischer Prozesse zugrunde: Das Fluid wird als ein inkompressibles Newton'sches Fluid der Dichte $\rho = \text{konst.}$ angesehen und die inneren (viskosen) Spannungen werden mit dem Newton'schen Reibungsansatz¹ (Spannungsansatz) beschrieben (Gl. 2-1):

$$\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\text{Schubkraft}}{\text{Berührungsfläche}} \quad \text{Gl. 2-1}$$

2.2.3 Grundgleichungen

Die Grundgleichungen der Strömungsmechanik werden durch die Bilanz von Masse, Impuls und Energie an einem ortsfesten infinitesimalen Kontrollvolumen hergeleitet (Abb. 2-2).



mit: $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ = Seitenlänge des Raumelements in x-, y-, z-Richtung [m]
 u, v, w = Strömungsgeschwindigkeit in x-, y-, z-Richtung [m/s]
 ρ = Dichte des betrachteten Stoffes [kg/m³]

Abb. 2-2: Ortsfestes Kontrollvolumen zur Bilanzierung der Transportgleichungen

Der turbulente Abflussvorgang inkompressibler Fluide wird durch die Kontinuitätsgleichung (Gl. 2-2) und die Navier-Stokes-Gleichungen (Gl. 2-3) beschrieben, welche die innere Reibung, d.h. die viskosen Kräfte des Fluids, berücksichtigen.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Gl. 2-2}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho v \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{1}{\rho} f_i$$

Gl. 2-3

In Gl. 2-3 stehen die Terme der Reihe nach für die lokale und die konvektive Beschleunigung, den Druck, die Spannung und die Massenkräfte.

Durch Definition von Zustandsgleichungen (Gl. 2-4), welche die Dichte in Abhängigkeit von Temperatur T und den Konzentrationen c_i gelöster bzw. suspendierter Stoffe festlegen, wird das System geschlossen.

$$\rho = \rho(T, c_i) \quad \text{Gl. 2-4}$$

2.2.4 Reynoldsgemittelte Navier-Stokes-Gleichung

Die beschriebenen Gleichungen bilden ein System gekoppelter, nichtlinearer partieller Differentialgleichungen, dessen analytische Lösung für praktisch relevante dreidimensionale Strömungen nicht möglich ist. Eine numerische Lösung mittels der direkten numerischen Simulation (DNS), in der die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen gelöst werden, ist aufgrund des benötigten Rechenaufwandes für die meisten technischen Strömungsprobleme nicht möglich, bzw. nur für einfache Geometrien und niedrige Reynolds-Zahlen. Daher wird das turbulente Strömungsfeld meist in räumlichen und / oder zeitlichen Mittelwerten betrachtet. Dazu werden die momentanen

¹ Der Newton'sche Reibungssatz beschreibt Fluide, die sich durch leichte Verschiebungen ihrer Elemente auszeichnen, d.h. einer Formänderung nur geringen Widerstand entgegensetzen.

Größen der Unbekannten der Navier-Stokes-Gleichungen u_i und p in statistische (zeitliche) Mittelwerte \bar{u}_i , \bar{p} mit den Schwankungsgrößen u_i' , p' aufgespalten.

Damit ergeben sich die zeitlich gemittelte Kontinuitätsgleichung (Gl. 2-5) und die zeitlich gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (Reynolds-Gleichungen) (Gl. 2-6):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Gl. 2-5}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \overline{u_i' u_j'} \right] + \bar{f}_i \quad \text{Gl. 2-6}$$

2.3 Turbulenzmodellierung

2.3.1 Turbulenzmodelle

Im Wasserbau auftretende Strömungen sind in der Regel sehr turbulent. Daher spielt die Turbulenzmodellierung bei der numerischen Simulation eine entscheidende Rolle.

Mit Hilfe eines Turbulenzmodells soll die Auswirkung der Turbulenz auf die mittleren Strömungsparameter beschrieben werden, ohne Erfassung der Momentanwerte der turbulenten Bewegung. Fast alle Turbulenzmodelle basieren auf dem von Reynolds vorgeschlagenen Ansatz für die Strömungsvariablen u und p .

Je korrekter die Modelle die physikalischen Gesetzmäßigkeiten wiedergeben, desto größer wird der numerische Aufwand zur Lösung des Strömungsproblems, da die turbulenten Bewegungen zunehmend berechnet und weniger angenähert werden. Daher erweisen sich insbesondere die differentiellen Reynoldsspannungsmodelle als gute Alternative. Alle bestehenden Turbulenzmodelle, auch die in den folgenden Abschnitten vorgestellten, sind ungenaue Darstellungen des zu untersuchenden physikalischen Problems.

2.3.2 Wirbelviskosität

Das Wirbelviskositätsprinzip von Boussinesq von 1877 [aus NOLL, 1998] ist meist Grundlage der statistischen Turbulenzmodelle. In Analogie zu den viskosen Spannungen in der laminaren Strömung werden die turbulenten Spannungen in Beziehung zu den Gradienten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit gesetzt. So beruhen die am weitesten verbreiteten Modelle auf der Modellvorstellung einer Wirbelviskosität (eddy viscosity) ν_t , auch Scheinzähigkeit oder

scheinbare turbulente Zähigkeit genannt (Gl. 2-7 und Gl. 2-8).

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad \text{Gl. 2-7}$$

Die turbulente kinetische Energie k ergibt sich zu:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad \text{Gl. 2-8}$$

Die turbulente Viskosität ist ein Maß für den Turbulenzgrad in Abhängigkeit von der Scherung des mittleren Strömungsfeldes. Während die molekulare Viskosität eine Materialkonstante ist, ist die turbulente Viskosität ein räumlich und zeitlich veränderlicher Proportionalitätsfaktor mit dem die Reynoldsspannungen an die Gradienten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit geknüpft werden. Die Wirbelviskosität ist proportional zum Produkt einer charakteristischen Länge und einer charakteristischen Geschwindigkeit der turbulenten Bewegung.

Die kinetische Energie dient in vielen Turbulenzmodellen als charakteristischer Geschwindigkeitsmaßstab der Turbulenz.

2.3.3 k-ε-Modell

Mit dem beschriebenen algebraischen Ansatz der Wirbelviskosität kann der Transport der turbulenten Strömungen mit der mittleren Strömung nicht modelliert werden. Modelle, die den Transport charakteristischer Turbulenzparameter beschreiben, bieten eine genauere Modellierung. Bei den Turbulenztransportmodellen wird zwischen Ein- und Zweigleichungsmodellen je nach Anzahl der zusätzlichen Differentialgleichungen unterschieden. Eingleichungsmodelle verwenden eine zusätzliche Transportgleichung für den charakteristischen Geschwindigkeitsmaßstab der turbulenten Fließbewegung. Beispielhaft sei hier das von PRANDTL vorgestellte Mischungsweg-Modell genannt.

Das bekannteste Zweigleichungsmodell ist das so genannte k-ε-Modell. Es verwendet eine weitere Transportgleichung für den charakteristischen Längenmaßstab zur Beschreibung der Turbulenzgrößen. Dieses Modell ist standardmäßig in fast allen kommerziellen HN-Modellen implementiert.

Das k-ε-Modell eignet sich bei vielen Anwendungen zur Bestimmung der Verteilung der turbulenten Viskosität ν_t innerhalb des Strömungsgebietes. Auch hier erfolgt eine Reduzierung der Simulation auf gemittelte Größen. Dieses Modell beinhaltet zusätzliche Transportgleichungen für die Modellgrößen turbulente kinetische Energie k (Gl. 2-8) und deren Dissipationsrate ε (Gl. 2-10), auch isotrope Dissipation genannt,

wobei die Gleichung für die turbulente kinetische Energie k die Geschwindigkeitsgröße und die Gleichung für die isotrope Dissipation ε den Längenmaßstab bestimmt.

Die im Feld der turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen gespeicherte kinetische Energie wird als turbulente kinetische Energie bezeichnet. Für die turbulente kinetische Energie k lässt sich eine exakte Gleichung aus den Navier-Stokes-Gleichungen ableiten, indem die Navier-Stokes-Gleichungen (Gl. 2-3) mit der momentanen Fließgeschwindigkeit u_i erweitert und anschließend statistisch gemittelt werden.

$$\begin{aligned} \frac{Dk}{Dt} &= \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{u}_j \left(\frac{p'}{\rho} + \frac{u'_i u'_j}{2} \right) \right) - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \\ &\quad + v \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - v \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-9}$$

Die Terme in der Gleichung Gl. 2-9 stehen nacheinander für die substantielle Änderung, die zeitliche Änderung, den advektiven Transport, die turbulente Diffusion, die Produktion, die molekulare Diffusion sowie für die Dissipation. Bezüglich der unbekanntenen Korrelationen in Gl. 2-9 müssen Modellannahmen getroffen werden, um eine geschlossene Gleichung für die turbulente kinetische Energie k zu erhalten.

Die Dissipation wird durch den folgenden Ausdruck modelliert:

$$\varepsilon = v \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} = c_D \frac{k^{3/2}}{L} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Der Längenmaßstab wird beim k - ε -Modell durch die Dissipation charakterisiert. Die Bestimmungsgleichung für die turbulente Viskosität lautet:

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{Gl. 2-11}$$

Auch für die Dissipation ε lässt sich eine exakte Gleichung aus den Navier-Stokes-Gleichungen herleiten. Gegenüber der Gleichung 2-9 für die turbulente kinetische Energie k müssen jedoch wesentlich mehr Modellannahmen für die unbekanntenen Korrelationen getroffen werden. Nach mathematischen Umformungen können die Gleichungen für die turbulente kinetische Energie k und die Dissipation ε in folgender modellierter Form dargestellt werden (Gl. 2-12, Gl. 2-13, Gl. 2-14):

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad \text{Gl. 2-12}$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{Gl. 2-13}$$

wobei:

$$P_k = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad \text{Gl. 2-14}$$

Die Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie k und die Dissipation ε gelten nur für voll turbulente Strömungen mit hohen Reynoldszahlen (High-Reynolds-Number Modell). Sie müssen deshalb in Wandnähe modifiziert werden, weil dort die turbulenten Schwankungsbewegungen verschwinden. Werden Turbulenzmodelle mit niedrigen Reynoldszahlen (Low-Reynolds-Number Modell) eingesetzt, bei denen die gesamte Grenzschicht einschließlich der viskosen Unterschicht berechnet wird, wird die Nähe zur festen Wand mit Hilfe von Dämpfungsfunktionen berücksichtigt (BRENNISEN, 1999).

Der Quellterm P_k (Gl. 2-14) beschreibt die Produktion turbulenter kinetischer Energie aus den mittleren Strömungsgrößen (DECK, 1996). Er kann sowohl positive als auch negative Werte annehmen.

Die in Tafel 2-1 angegebenen Modellkonstanten wurden durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen festgelegt:

| c_μ | σ_k | σ_ε | $c_{1\varepsilon}$ | $c_{2\varepsilon}$ |
|---------|------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| 0,09 | 1,0 | 1,3 | 1,44 | 1,92 |

Tafel 2-1: Konstanten des k - ε -Modells

Das k - ε -Modell wird in der Praxis wie in der Forschung häufig angewandt. Es erzielt sehr gute Ergebnisse für viele technisch relevante Strömungen. Die Schwächen liegen in der Darstellbarkeit der wandnahen Turbulenz. Neben dem hier dargestellten Standard- k - ε -Turbulenzmodell existieren einige Modifikationen, die u. a. bei RODI (1993) ausführlicher beschrieben sind.

2.4 Randbedingungen und Modellierung der freien Oberfläche einer Strömung

Die zeitabhängigen Differentialgleichungen sind lösbar, wenn zu Beginn einer Simulation die erforderlichen Anfangsbedingungen und die Randbedingungen zu jedem Zeitpunkt auf allen Begrenzungsflächen

vorgegeben werden. Typische Ränder in einer Strömung sind der Ein- und der Auslaufquerschnitt, die freie Oberfläche sowie die feste Begrenzung (Sohle und Wand).

Eine besondere Schwierigkeit stellt die Berücksichtigung der freien Oberfläche einer Strömung (Free Surface Flow) dar, da diese die Ausdehnung des Strömungsgebietes und damit das numerische Lösungsverfahren beeinflusst. Eine freie Oberfläche stellt den Sonderfall einer Randbedingung dar, bei der die Lage des Randes a priori nicht bekannt ist. Die Wasseroberfläche bildet eine unregelmäßige und zeitlich variable vom Strömungsvorgang abhängige Strömungsberandung aus, wobei die Position zu späteren Zeitpunkten als Teil der Lösung bestimmt werden muss. Die freie Oberfläche wird als abgegrenzte Berührungsfläche zwischen zwei Fluiden definiert. Die obere Begrenzung des Strömungsfeldes wird durch die Isofläche $p = 0$ gebildet. Hier findet senkrecht zum Rand weder ein Massenfluss noch ein Impulsaustausch statt.

Die zahlreichen CFD-Methoden, die entwickelt worden sind, um die Form der freien Oberfläche zu finden, können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Die eine Gruppe definiert die freie Oberfläche als eine klar abgegrenzte Zwischenschicht, deren Bewegung verfolgt wird. Es werden Gitternetze benutzt, die die Berandungen genau nachzeichnen und nach jeder Iteration wieder angepasst werden (adaptive Gitternetze), wenn die freie Oberfläche bewegt wurde. Diese Methode versagt jedoch, wenn sich die Zwischenschicht überschlägt, z.B. bei brechenden Wellen.

Die zweite Gruppe definiert keine klare Berandung an der freien Oberfläche. Die Berechnung wird an einem festen Gitter (statische Gitternetze) durchgeführt, welches sich auch oberhalb der freien Oberfläche ausdehnt.

Die Bestimmung der freien Oberfläche kann über zwei Verfahren erfolgen. Als MAC-Schema (Marker-and-Cell) wird das Verfolgen von masselosen Partikeln, die anfänglich in der Nähe der freien Oberfläche des Fluides eingeleitet werden, bezeichnet. Dieses Schema kann komplexe Phänomene, wie das Wellenbrechen, behandeln. Der Berechnungsaufwand ist besonders im Dreidimensionalen groß, da zusätzlich zu dem Lösen der Gleichungen der Fluidströmung die Bewegungen einer Vielzahl von Partikeln verfolgt werden muss.

Das VOF-Schema (Volume of Fluid) definiert das Volumenverhältnis des Fluids in einem Kontrollvolumen. Die Form der freien Oberfläche wird mittels Zellen bestimmt, die nur teilweise gefüllt sind. Nachteilig an dieser Methode ist, dass die freie Ober-

fläche aufgrund der numerischen Diffusion häufig „verwischt“ dargestellt wird. Zusätzlich zu den Erhaltungsgleichungen für die Masse und den Impuls muss in dieser Methode demzufolge die Gleichung für den Fluidanteil c der Zelle gelöst werden. Für gefüllte Kontrollzellen (KZ) wird $c = 1$ und für leere KZ $c = 0$ gesetzt. Die Veränderung von c wird durch die Transportgleichung Gl. 2-15 bestimmt:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div}(cu) = 0 \quad \text{Gl. 2-15}$$

Die VOF-Methode ist effizienter als das MAC-Schema, jedoch ist die Kontur der freien Oberfläche nicht als klare Begrenzung definiert. Um ein genaueres Profil der Oberfläche zu erhalten, können feinere Gitternetze und damit längere Rechenzeiten erforderlich werden. Zellen mit $0 < c < 1$ müssen verfeinert werden. Da die Berandung der freien Oberfläche eine Diskontinuität in c ist, wird sie in der Regel in drei oder mehr Zellen aufgelöst.

2.5 Entwicklungsansatz

Die im Folgenden beschriebenen Simulationen wurden mit dem kommerziellen Programmsystem STAR-CD der Firma CD-ADAPCO London durchgeführt in dem die oben genannten Ansätze implementiert sind. Die Simulationen sollen aufzeigen, ob es mit dem eingesetzten Simulationsprogramm möglich ist, klein- und großräumige Strömungsprozesse im Bereich des Wasserbaus zu modellieren.

Hierbei ist besonders das Zusammenspiel von freier Oberfläche und eingesetztem Turbulenzmodell noch nicht auf den Einsatz für Probleme im Wasserbau bestimmt worden. Bei einem erfolgreichen Vergleich zwischen physikalischem Modellversuch und numerischer Simulation stünde ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem physikalische Modellversuche sinnvoll ergänzt werden könnten.

3 Drehwirbel im Pumpensumpf eines Zellenkühlturms

3.1 Allgemeines

Für einen Zellenkühlturm wurde eine Erweiterung um eine auf insgesamt drei Kühlturmzellen geplant (Abb. 3-1).

Die bis zur Erweiterung getrennt bestehenden Aufangbecken der Kühlturmzellen 1 und 2 sollten durch Mauerdurchbrüche hydraulisch miteinander und mit der Zelle 3 verbunden werden, um eine gleichmäßige Durchströmung der Becken zu ermöglichen. Eine ungleichmäßige Anströmung des Pumpeneinlaufs

aufgrund der Erweiterung war ebenfalls zu vermeiden.

Durch den gesteigerten Wasserdurchsatz der Kühlturmanlage war eine Erhöhung der Pumpenanzahl von zwei auf drei Pumpen notwendig. Die gleichmäßige Beaufschlagung der Pumpen sollte trotz der Erhöhung der Pumpenanzahl gewährleistet bleiben.

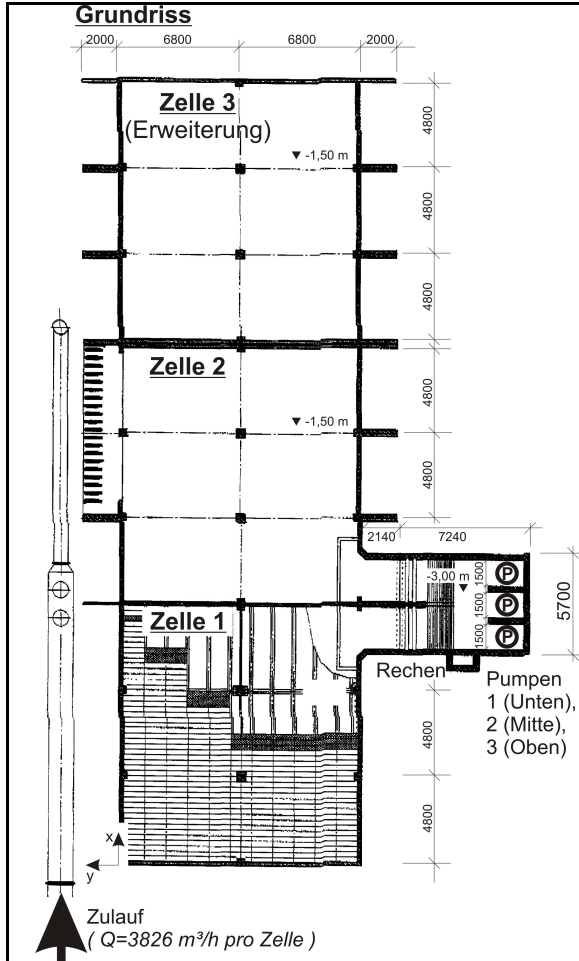


Abb. 3-1: Kühlturmzellen mit angeschlossenem Pumpensumpf

3.2 Physikalisches Modell

Für die Untersuchungen wurde ein physikalisches Modell im Maßstab 1:8 aufgebaut, wodurch die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Natur gewährleistet war (Abb. 3-2).

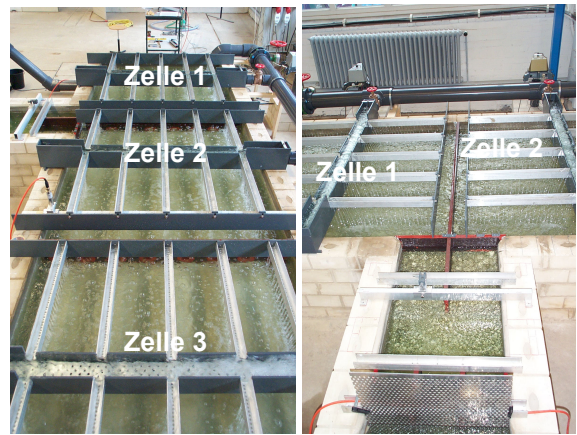


Abb. 3-2: Physikalisches Modell des Zellenkühlturmes

Die gleichmäßige Wasserverrieselung wurde in den einzelnen Kühlturmzellen vereinfacht, da die Strömungsvorgänge in der Zelle nur auf ihre Gleichmäßigkeit zu überprüfen waren (Abb. 3-2).

Zur Beeinflussung der Durchströmung und des Zulaufs zur folgenden Zelle wurden Abstand und Durchmesser der Wanddurchbrüche variiert. Der Rechen zum Pumpensumpf konnte nicht maßstabsgerecht nachgebildet werden und wurde daher vernachlässigt.

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten erfolgte mit einer ADV-Sonde. Aufgrund des niedrigen Wasserstands und der Tatsache, dass eine ADV-Sonde vollständig im Wasser eingetaucht sein muss und erst 0,05 m unterhalb des Sondenkopfes misst, konnte nur in einer Wassertiefe gemessen werden.

3.3 Numerisches Modell

Die beim Aufbau des physikalischen Modells erforderlichen Vereinfachungen bestanden für das numerische Modell nicht. Im numerischen Modell wurde die Rechenanlage zum Pumpensumpf mit nachgebildet und eine gleichmäßige Wasserverrieselung als Randbedingung angesetzt (Abb. 3-3).

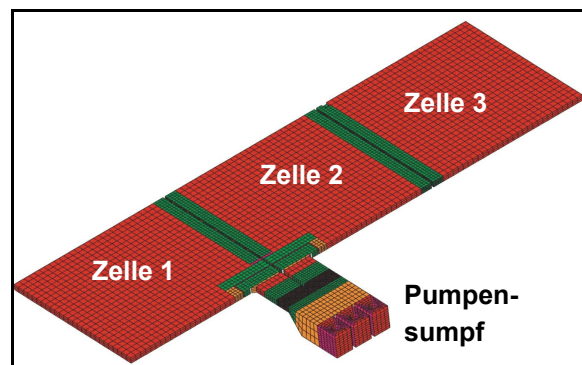


Abb. 3-3: Numerisches Modell des Zellenkühlturmes

Insgesamt bestand das numerische Modell aus 35.000 Zellen mit Kantenlängen zwischen 0,10 m in den Zellen und 0,02 m im Bereich der Rechenanlage. Als Turbulenzmodell wurde das $k-\epsilon$ -Standardmodell eingesetzt.

3.4 Untersuchungsprogramm

Es wurden zwei Wassertiefen von $H = 0,48$ m und $H = 1,20$ m in den Becken untersucht. Beim Lastfall 1 wurden alle drei Zellen mit jeweils $3826 \text{ m}^3/\text{h}$ Wasser beaufschlagt und alle drei Pumpen mit voller Leistung gefahren. Beim Lastfall 2 wurden nur die Zellen 2 und 3 mit jeweils $3826 \text{ m}^3/\text{h}$ Wasser beaufschlagt und alle drei Pumpen gleichzeitig mit $2/3$ ihrer vollen Leistung gefahren.

Aus statischen Gründen waren maximal 8 Wanddurchbrüche je Zellenzwischenwand zulässig. Der vorgegebene Durchmesser der Wanddurchbrüche lag bei 0,50 m, die Höhenlage der Unterkante der Wanddurchbrüche zwischen Zelle 2 und 3 war auf 0,30 m und zwischen Zelle 1 und 2 auf 0,05 m über Zellensohle fixiert.

Für die Verbindung der einzelnen Kühlturmzellen wurde zunächst Variante 1 mit insgesamt 16 Wanddurchbrüchen untersucht. Zwischen jeweils zwei Zellen waren 8 Wanddurchbrüche gleichmäßig über die gesamte Wandlänge verteilt (Abb. 3-4).

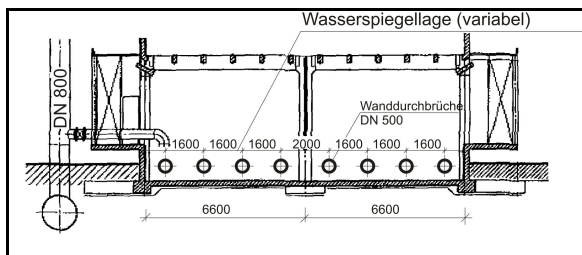


Abb. 3-4: Verteilung der Wanddurchbrüche in Variante 1 zwischen den Zellen 1 und 2 und den Zellen 2 und 3

In Variante 2 wurden insgesamt 12 Wanddurchbrüche für die hydraulische Verbindung der Kühlturmzellen vorgesehen. Die Verteilung erfolgte nicht äquidistant und war in den beiden Zellenzwischenwänden unterschiedlich (Abb. 3-5).

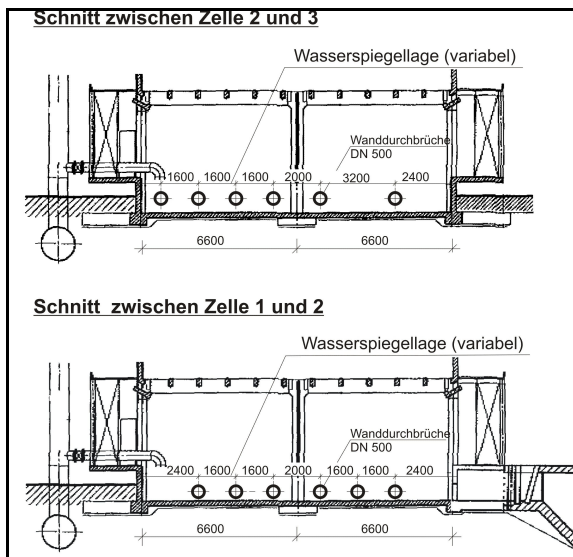


Abb. 3-5: Verteilung der Wanddurchbrüche in Variante 2

Es ergab sich das in Tafel 3-1 dargestellte Versuchsprogramm.

| | | Lastfall 1 | Lastfall 2 |
|------------|------------|------------|------------|
| Variante 1 | H = 0,48 m | 0 X | 0 X |
| | H = 1,20 m | 0 X | 0 X |
| Variante 2 | H = 0,48 m | 0 X | - |
| | H = 1,20 m | 0 X | - |

Variante 1 = 16 Wanddurchbrüche
 Variante 2 = 12 Wanddurchbrüche
 Lastfall 1 = Pumpen 1-3 und Zellen 1-3 in Betrieb
 Lastfall 2 = Pumpen 1-3 und Zellen 2-3 in Betrieb
 O = Untersuchung im physikalischen Modell
 X = Untersuchung im numerischen Modell
 H = Wassertiefe in den Kühlturmzellen

Tafel 3-1: Versuchsprogramm für physikalische Versuche und numerische Simulationen

3.5 Ergebnisse

Die Übereinstimmung von physikalischem und numerischem Modell wurde anhand der Variante 1 und Lastfall 1 für die Wasserspiegellagen 1 und 2 überprüft. Hiefür wurden Strömungsprofile in zwei Bereichen des Bauwerkes erstellt. Das erste Profil (Abb. 3-6) gibt die Strömungsgeschwindigkeiten in Zelle 2 direkt hinter den Wanddurchbrüchen zwischen Zelle 2 und 3 wieder. Das zweite Profil gibt die Strömungsgeschwindigkeiten im Pumpenzulauf vor der Rechenanlage wieder.

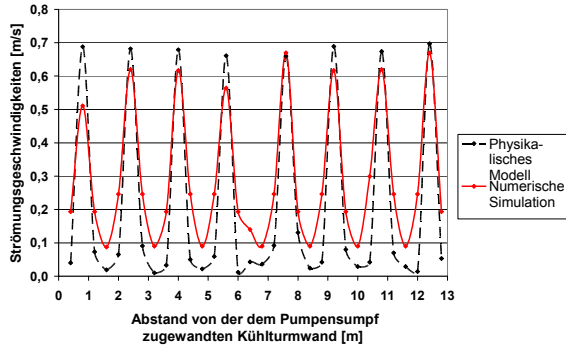


Abb. 3-6: Strömungsgeschwindigkeiten in Zelle 2 hinter den Wanddurchbrüchen zwischen Zelle 2 und 3 (Variante 1, LF 1, H = 1,20 m)

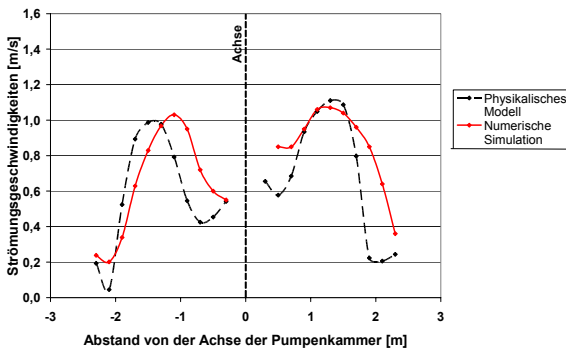


Abb. 3-7: Strömungsgeschwindigkeiten in den Pumpenzuläufen (Variante 1, LF 1, H = 1,20 m)

Der Vergleich der Strömungsprofile aus physikalischem Modell und numerischer Simulation zeigt, dass die Größe der Strömungsgeschwindigkeiten und der Verlauf der Strömungsprofile sehr ähnlich sind. Differenzen in den Strömungsprofilen sind auf Grenzen der im physikalischen Modell eingesetzten Messtechnik zurückzuführen. Im Weiteren wird aufgrund des höheren Informationsgehaltes auf die Ergebnisse der numerischen Simulation eingegangen.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse der Variante 1 mit Lastfall 1 bei H = 0,48 m in halber Wassertiefe zeigte eine gleichmäßige Strömungsverteilung in allen drei Kühlturmbecken (Abb. 3-8). Im Pumpensumpf ergab die Auswertung in einer Ebene 0,10 m unterhalb der Ansaugstutzen kein Anzeichen einer Bildung von Wirbeln, die zu einer Luftansaugung oder zu einem Schlagen der Pumpen hätten führen können (Abb. 3-9).

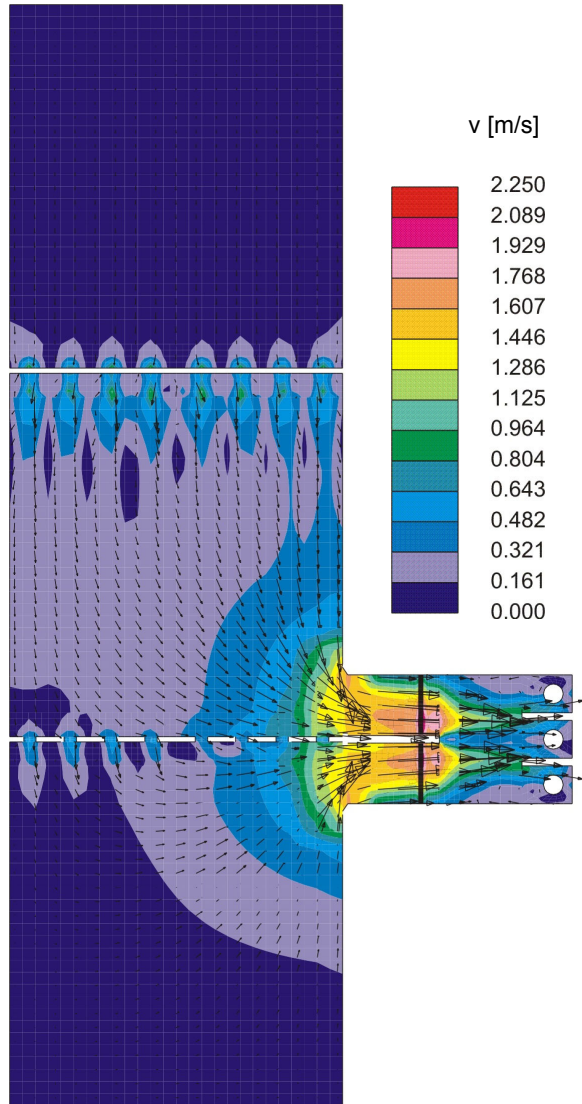


Abb. 3-8: Strömungsgeschwindigkeiten in halber Wassertiefe im Kühlturmbauwerk (Variante 1, LF 1, H = 0,48 m)

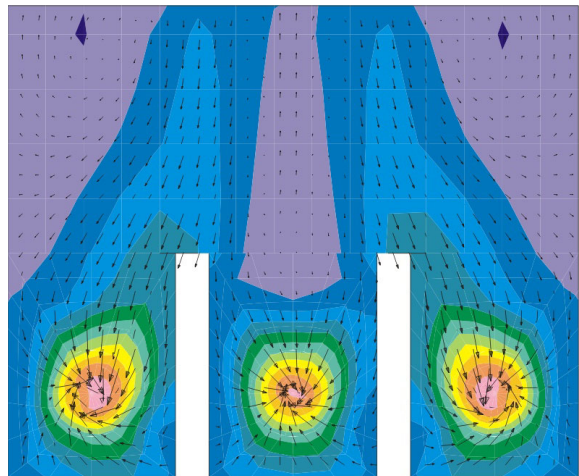


Abb. 3-9: Strömungsgeschwindigkeiten im Pumpensumpf 10 cm unterhalb der Ansaugstutzen (Variante 1, LF 1, H = 0,48 m)

Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde die Anordnung der Wanddurchbrüche modifiziert und je Zellenzwischenwand wurden zwei Wanddurchbrüche geschlossen (Abb. 3-5). Für diese Variante 2 wurden für den Lastfall 1 wiederum die Strömungsgeschwindigkeiten ausgewertet.

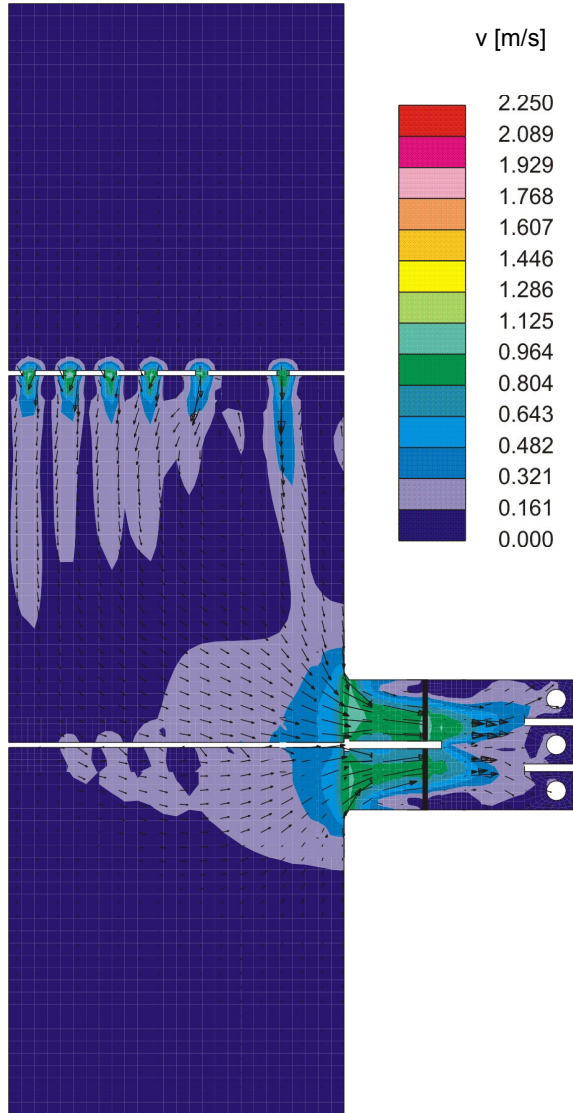


Abb. 3-10: Strömungsgeschwindigkeiten in halber Wassertiefe im Kühlturbauwerk (Variante 2, LF 1, H = 0,48 m)

In den Kühlturmzellen 1 und 2 zeigt sich keine gleichmäßige Durchströmung mehr, vielmehr ist in Zelle 1 eine Walze zu erkennen. Diese würde bei einem längeren Betrieb zu Ablagerungen in der Mitte der Zelle führen. Ansonsten ist die Zuströmung zum Pumpenzulauf wiederum sehr gleichmäßig (Abb. 3-10).

Beim Zustrom zu den Ansaugstutzen sind auch hier keine für die Funktion der Pumpen gefährlichen Wirbel zu erkennen (Abb. 3-11).

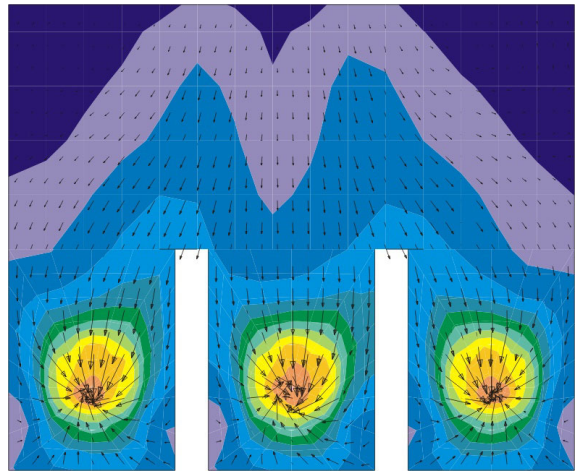


Abb. 3-11: Strömungsgeschwindigkeiten im Pumpensumpf 10 cm unterhalb der Ansaugstutzen (Variante 2, LF 1, H = 0,48 m)

3.6 Ergebnisbeurteilung

Die Untersuchungen ergaben, dass für die Erweiterung des Zellenkühlturms die aus statischen Gründen vorgegebene Anordnung der Wanddurchbrüche (Variante 1; Abb. 3-4) unter hydraulischen Gesichtspunkten für den Lastfall 1 und die Wasserspiegellagen 1 und 2 eine empfehlenswerte Lösung ist. Es zeigten sich gleichförmige Strömungsverteilungen in den einzelnen Zellen des Kühlturms und gleichmäßige Strömungsverteilungen im Zulauf der Pumpen und im unmittelbaren Ansaugbereich. Auch bestand keine Gefahr einer Wirbelbildung an den Pumpen.

4 Ablösezone im Turbinenzufluss eines Laufwasserkraftwerkes

4.1 Allgemeines

In der Leine bei Hannover wurde 1999 ein Laufwasserkraftwerk mit zwei getrennten Turbinen und Turbinenzuläufen in das äußerste linke Wehrfeld einer vorhandenen Wehranlage integriert (Abb. 4-1). Bei einer mittleren Fallhöhe von 2,10 m und einer maximal nutzbaren Abflussmenge von 50 m³/s wurde in der Planungsphase eine Leistung von 940 kW pro Jahr errechnet.

Die Leistungsabgabe des Kraftwerkes blieb erheblich hinter den Planungswerten zurück. Beobachtungen vor Ort legten den Schluss nahe, dass ein wesentlicher Grund der Leistungsminderung die ungünstige Anströmung der Wasserkraftanlage und damit ein unsymmetrisch und einseitig verminderter Durchfluss war, der durch die extreme Seitenlage in der Leine entstand.

Zur Steigerung der Leistungsabgabe sollten in einem geeigneten physikalischen Modell Maßnahmen unter-

sucht werden, mit denen die Strömungsverhältnisse verbessert und damit die Zulaufverluste minimiert werden konnten.



Abb. 4-1: Wehranlage in der Leine bei Hannover mit integriertem Laufwasserkraftwerk (äußerstes linkes Wehrfeld)

4.2 Physikalisches Modell

Das physikalische Modell wurde im Maßstab 1:20 anhand von drei oberhalb des Kraftwerkes gepeilten Querprofilen und Bauplänen des Wehres aufgebaut (Abb. 4-2).

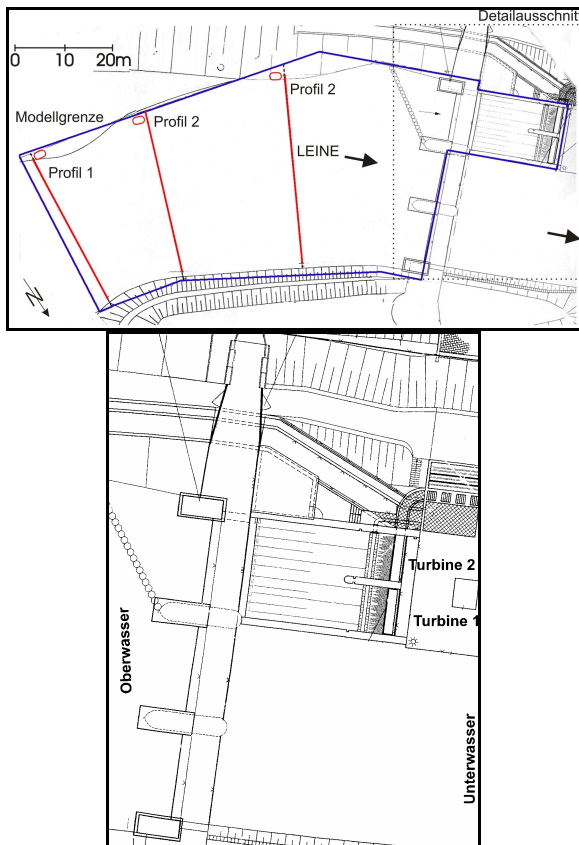


Abb. 4-2: Lage der aufgenommenen Profile oberstrom des Kraftwerkes und Grenzen des physikalischen Modells (Naturmaßstab)

Naturähnliche Wasserstände und Strömungen im Modellbereich wurden durch eine Wasserstandssteuerung an der unterstromigen Modellgrenze und eine Durchflusssteuerung an der oberstromigen Modellgrenze geregelt.

Die Strömungsverhältnisse im Oberwasser und im Zulaufbereich der Turbinen wurden durch Zugabe eines Tracerfarbstoffes und Oberflächentreibkörpern sichtbar gemacht. Die Strömungsgeschwindigkeiten zwischen den Wehrpfeilern wurden mit einem Mikroflügel gemessen.

Bei dem gewählten Modellmaßstab entsprach die Rauigkeit des Modellbetons unter Berücksichtigung der Maßstabsabhängigkeit des Rauigkeitsbeiwertes nach MANNING-STRICKLER annähernd der Rauigkeit der natürlichen Leinesohle vor dem Kraftwerk.

Zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse wurden im Bereich der Pfeiler Einbauten vorgenommen (siehe Kapitel 4-4, Versuchsprogramm).

4.3 Numerisches Modell

Dem physikalischen Modell und damit den örtlichen Verhältnissen entsprechend wurden die Strömungsverhältnisse in dem zuvor beschriebenen 3-dimensionalen numerischen Modell simuliert (Abb. 4-3).

Die Simulation erfolgte mit freier Oberfläche. Insgesamt bestand das Berechnungsgitter für die Ausgangsvariante des Naturzustandes aus etwa 40000 Hexaederzellen mit einer Kantenlänge zwischen 0,10 m im Bereich des Zulaufes zu den Turbinen und 0,50 m im Oberwasser.

Die Turbinen wurden, ebenso wie die Rechen, nicht mit nachgebildet, da diese das Strömungsfeld im Bereich der Zuströmung und zwischen den Pfeilern nicht beeinflussten.

Wie im physikalischen Modell wurden auch im numerischen Modell Konstruktionen im Bereich des Wehres zur Vergleichmäßigung des Zustromes zu den Turbinen eingebaut. Dafür war eine Anpassung des Gitters im Bereich der Einbauten erforderlich.

Die Kalibrierung des numerischen Modells erfolgte durch die Berücksichtigung der für die Strömungszustände am Kraftwerk maßgebenden Parameter (Sohlreibung, Rauigkeit der Pfeiler, etc.) in der Simulation. Die Validierung des numerischen Modells wurde anhand der Strömungsgeschwindigkeiten aus Naturmessungen mit einer Flügelmeßsonde bei einem Abfluss von $Q = 29 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt. Diese Messungen wurden in fünf Höhenlagen bei +45,30 mNN (Messebene 1), +45,90 mNN (2), +46,72 mNN (3), +47,52 mNN (4) und +48,14 mNN (5) durchgeführt. Zur Beurteilung des numerischen Modells wurde dazu

das Strömungsprofil in der Messebene 3 der Naturmessung mit dem Ergebnis der numerischen Simulation verglichen (Abb. 4-4). Sowohl die Strömungsgeschwindigkeiten, als auch der Verlauf der Strömungsprofile stimmte weitgehend überein.

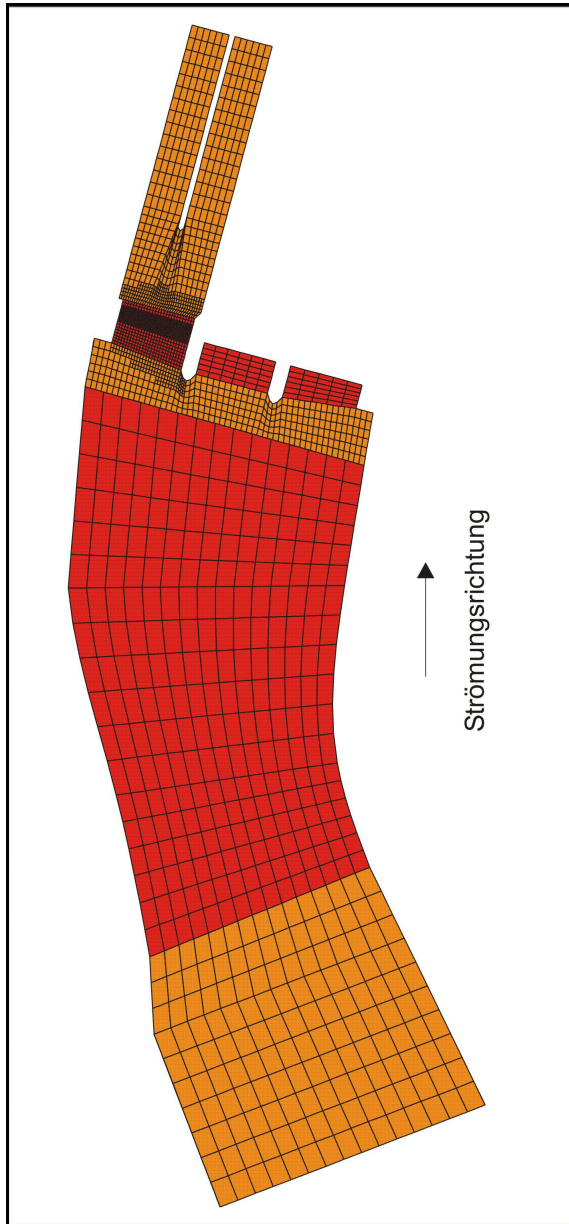


Abb. 4-3: Numerisches Modell des Zustromes zum Laufwasserkraftwerk

Durch die Verifikation und Validierung dieses Modells mit Daten aus den Naturmessungen und den Ergebnissen des physikalischen Modells konnte von einer hohen Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse ausgegangen werden.

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen werden in zweifacher Weise dargestellt. Zum einen werden die resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten in der Tiefe von +46,80 mNN als Isolinienplot ausgegeben, um die Entwicklung der Ablösezone im Be-

reich des Wehres sichtbar zu machen. Zum anderen wird in zwei Querschnitten (im Zulauf zwischen rechtem und linkem Wehrpfeiler und im Bereich der Rechen vor den Turbinen) der Abfluss über die Breite dargestellt, um so Aufschlüsse über die erzielte Vergleichmäßigung der Strömung zu erhalten.

4.4 Versuchsprogramm

Die Untersuchungen im Modell sollten mit drei unterschiedlichen Abflüssen bis zur maximalen Kraftwerksleistung durchgeführt werden. Es wurden daher Abflüsse von 25 m³/s, 37,5 m³/s und 50 m³/s gewählt.

Um die Abflussleistung zu den Turbinen zu erhöhen, war es notwendig, die Walzenzone am rechten Pfeiler zu beseitigen. Hierfür sind Leitwände geeignet, die Strömung zu führen und Walzenzonen nicht entstehen zu lassen.

Aus Vorversuchen wurden die Varianten 1 und 1a entwickelt. In diesen Varianten wurde an dem rechten Pfeiler eine 8 m lange Leitwand (gemessen vom Übergang gekrümmt/gerade) angesetzt. Da sich während der Versuche herausstellte, dass die Strömungen im Pfeilerbereich durch Ansetzen einer kleinen schrägen Wand am linken Pfeiler nochmals besser geführt wurden, wurde in Variante 1a zusätzlich zu Variante 1 diese Wand im Modell untersucht.

Die Varianten 2 und 2a beinhalteten an dem rechten Pfeiler die gleiche Leitwandlänge (8,0 m) wie in Variante 1 und 1a, allerdings wurde ihr Endpunkt in die Flucht der rechten Pfeilerkante des rechten Pfeilers verlegt (d.h. sie erhielt einen größeren Radius). Die Untersuchungen dieser Variante sollten zeigen, ob eine Leitwand, die nicht in das rechts daneben liegende Wehrfeld ragt, eine ebenso effektive Wirkung hat wie die der Variante 1.

In Variante 2a wurde, wie schon in Variante 1a, an dem linken Pfeiler die kleine schräge Wand angesetzt.

Für den Ausbauzustand Variante 3 und 3a wurde am rechten Pfeiler eine Leitwand angesetzt, die der in Variante 1 und 1a entsprach, allerdings wurde sie so verkürzt, dass sie in der rechten Flucht des rechten Pfeilers endete. Ihre Gesamtlänge gemessen ab Pfeilerkrümmung betrug noch 5,60 m.

Für die Untersuchungen der Variante 3a wurde wiederum die schon in den Varianten 1a und 2a an den linken Pfeiler angesetzte kleine Leitwand verwendet.

Mit den zuvor beschriebenen physikalischen Modellversuchen und numerischen Simulationen ergab sich das in Tafel 4-1 zusammengefasste Untersuchungsprogramm zur Strömungssimulation am Kraftwerk Herrenhausen.

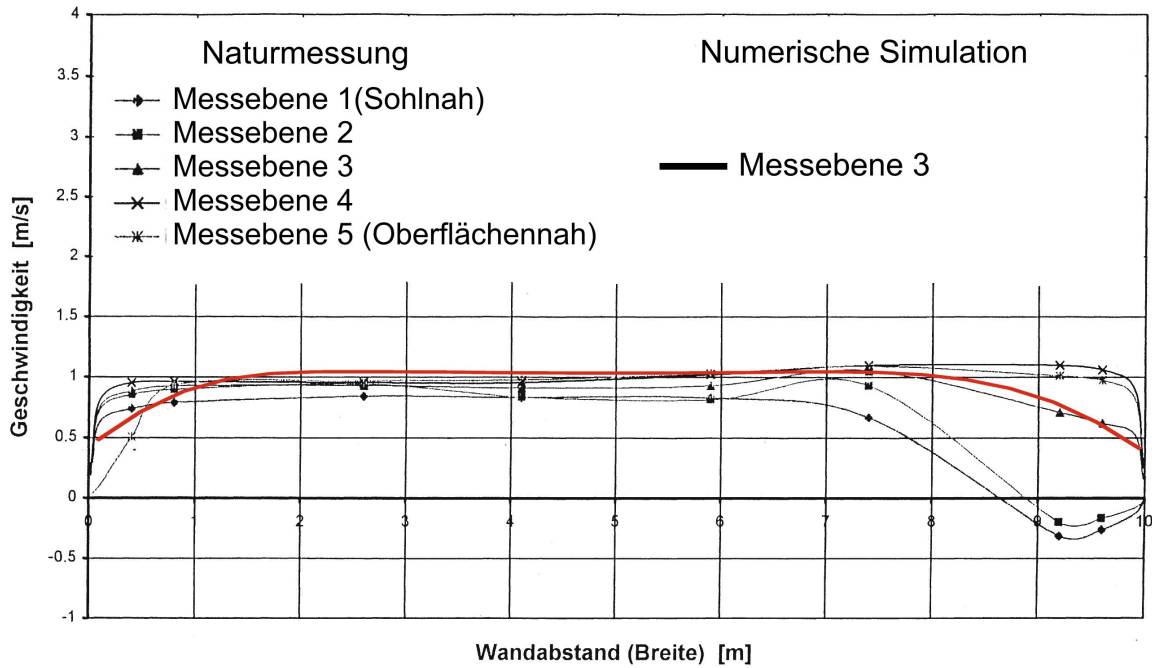


Abb. 4-4: Validierung des numerischen Modells anhand von Flügelmessungen am WASSERKRAFTWERK HERRENHAUSEN bei $Q = 29 \text{ m}^3/\text{s}$

| | Lastfall 1 ($Q=25 \text{ m}^3/\text{s}$) | Lastfall 2 ($Q=37,5 \text{ m}^3/\text{s}$) | Lastfall 3 ($Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$) |
|------|---|---|---|
| V 0 | 0 X | 0 X | 0 X |
| V 1 | 0 X | 0 X | 0 X |
| V 1a | 0 X | 0 X | 0 X |
| V 2 | 0 X | 0 X | 0 X |
| V 2a | 0 X | 0 X | 0 X |
| V 3 | 0 X | 0 X | 0 X |
| V 3a | 0 X | 0 X | 0 X |

V 0 = Naturzustand, keine Einbauten
 V 1 = Leitwand am rechten Wehrpfeiler in ein Wehrfeld hinein
 V 1a = wie V 1, ergänzt um die Leitwand am linken Wehrpfeiler
 V 2 = Leitwandkopf der V 1 in Flucht des rechten Wehrpfeilers
 V 2a = wie V 2, ergänzt um die Leitwand am linken Wehrpfeiler
 V 3 = verkürzte Leitwand mit Leitwandkopf in Flucht des rechten Wehrpfeilers
 V 3a = wie V 3, ergänzt um die Leitwand am linken Wehrpfeiler

Tafel 4-1: Untersuchungsprogramm zur Strömungssimulation am WASSERKRAFTWERK HERRENHAUSEN (O Physikalisches Modell; X Numerische Simulation)

4.5 Ergebnisse

Die Auswertung von Langzeitaufnahmen der Oberflächentreibkörper zeigte für die Variante 0, dass sich am abgerundeten Pfeiler eine Ablösezone bildete, die bis in die beiden Turbinenzuläufe hineinreichte (Abb. 4-5).

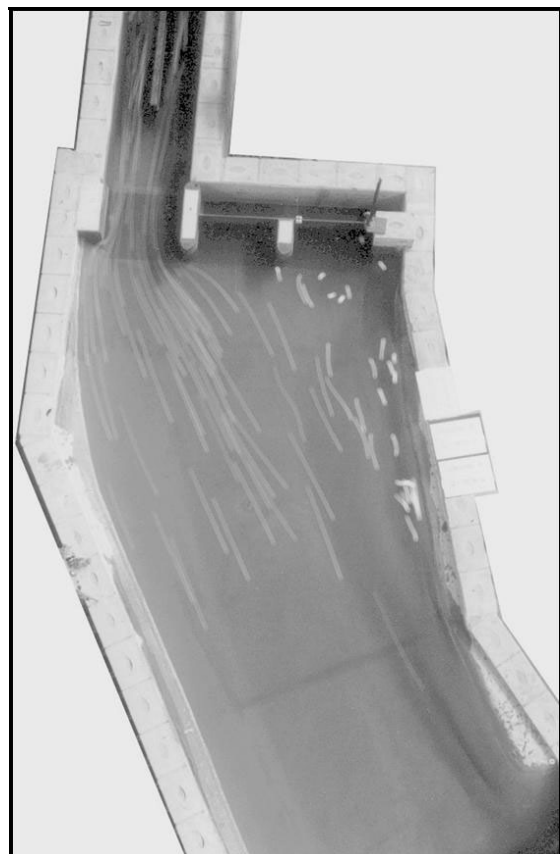


Abb. 4-5: Langzeitaufnahme von Oberflächentreibkörpern im Ist-Zustand bei $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$

Diese Ablösezone zeigte sich ebenso auf Fotos, die die Strömung im Zufluss zu den Turbinen mit Hilfe eines Tracerfarbstoffes sichtbar machten (Abb. 4-6).

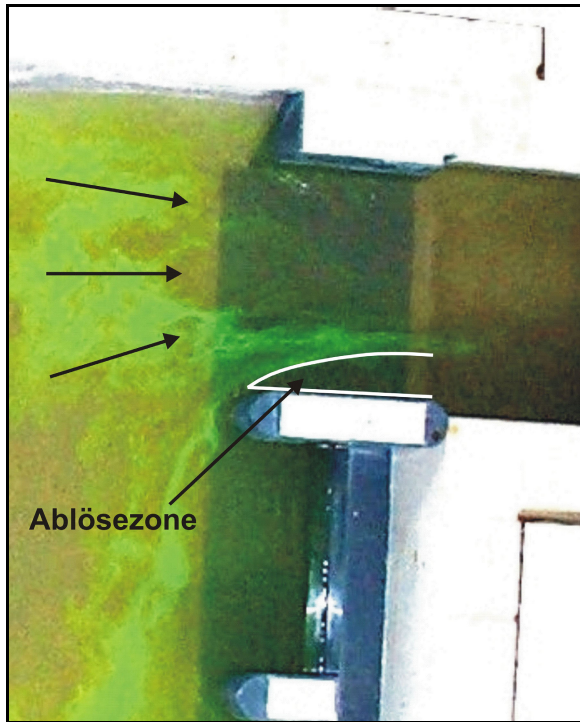


Abb. 4-6: Visualisierung der Strömung im Zufluss zu den Turbinen im Ist-Zustand bei $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$

Bei den Strömungsgeschwindigkeiten zeigte sich am Kopf des rechten Wehrpfeilers korrespondierend mit den physikalischen Modellversuchen eine Zone mit verringerten Strömungsgeschwindigkeiten. Dies deutete darauf hin, dass sich in diesem Bereich die Strömung vom rechten Wehrpfeiler ablöste, womit dieser Bereich des Zulaufes nicht mehr hydraulisch wirksam war. Die Ablösezone weitete sich in Fließrichtung aus, bis sie fast die gesamte Breite des rechten Turbinenzulaufes einnahm. Dies hing zum Teil mit der nach hinten versetzten Wand hinter dem rechten Wehrpfeiler zusammen, da sich auch in diesem Bereich neue Wirbel ablösten (Abb. 4-7).

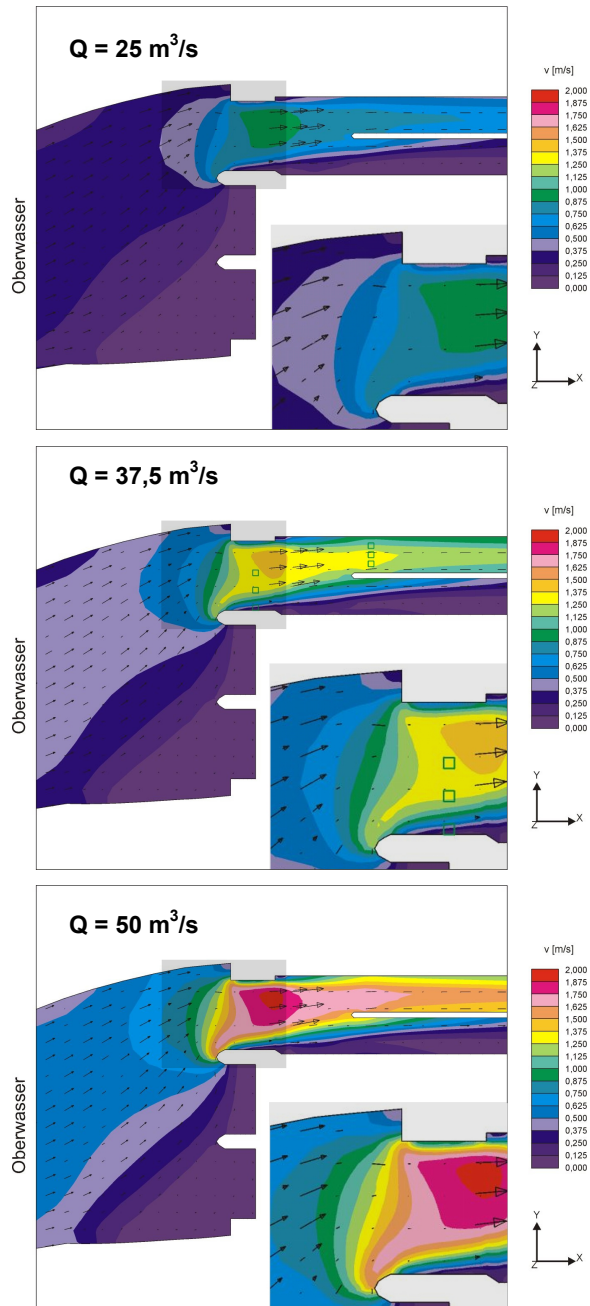


Abb. 4-7: Strömungsgeschwindigkeiten im Ist-Zustand für alle drei Lastfälle

Die Strömungsgeschwindigkeiten im linken Turbinenzulauf lagen weit über denen im rechten Turbinenzulauf. Dieses Strömungsbild war bei allen drei Lastfällen mit $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 37,5 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ in mit steigendem Abfluss stärkerer Ausprägung auf den Isolinienplots zu erkennen.

Bei den im Folgenden beschriebenen Simulationsergebnissen der Varianten 1, 1a, 2, 2a, 3 und 3a wurde nur die Strömungssituation für den Lastfall 3 mit $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ betrachtet, da hier die durch Einbauten zu erzielenden Effekte am deutlichsten zu erkennen waren.

Durch den Einbau einer Leitwand am rechten Pfeiler wurde die Strömung im Pfeilerbereich und im Zulaufbereich zu den Turbinen bei allen untersuchten Abflüssen ($25 \text{ m}^3/\text{s}$, $37,5 \text{ m}^3/\text{s}$ und $50 \text{ m}^3/\text{s}$) erheblich besser als im Ist-Zustand geführt. Am rechten Pfeiler traten keine Verwirbelungen bzw. Ablösungen mehr auf und die Strömung lag am Pfeiler an. Auch der unmittelbare Zulauf zu den Turbinen wurde wesentlich gleichmäßiger als im Ist-Zustand beaufschlagt.

Es war allerdings zu beobachten, dass sich in Variante 1 eine kleine Wirbelzone am linken Pfeiler gebildet hatte. Aus diesem Grund wurde in Variante 1a an dem linken Pfeiler ebenfalls eine kleine Leitwand angesetzt (Abb. 4-8).

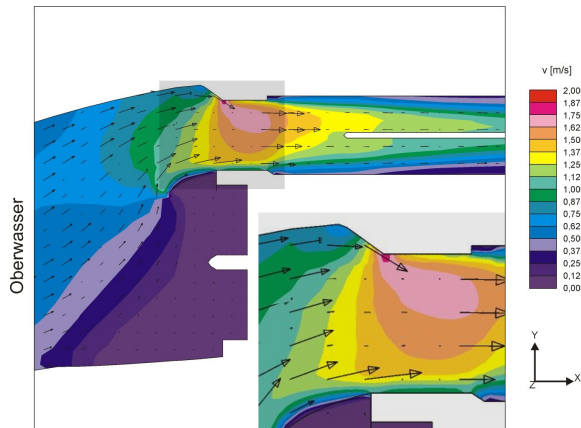


Abb. 4-8: Strömungsgeschwindigkeiten in der Variante 1a für $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$

In der Darstellung der Variante 1a ist zu erkennen, dass die Strömung sehr gleichmäßig dem Turbinenzulauf zugeführt wird. Es war auch zu erkennen, dass die Oberflächentreibkörper annähernd gleichmäßig schnell den Turbinen zutrieben.

Die im Untersuchungsprogramm beschriebenen Modifikationen der Leitwand am rechten Wehrpfeiler brachten keine Verbesserungen des Strömungsfeldes. Den Abbildungen 4-9 und 4-10 ist zu entnehmen, dass die Strömungen in diesen Untersuchungsvarianten ungünstiger verlaufen als in der Variante 1a (Abb. 4-8).

Der Einbau der gegenüber Variante 1 um $2,40 \text{ m}$ kürzeren Leitwand am rechten Pfeiler (Abb. 4-10) bewirkt eine veränderte Strömungsführung, die am rechten Pfeiler Wirbelzonen bewirkt, die sich bis hinter den Anfangspunkt der Trennwand erstrecken.

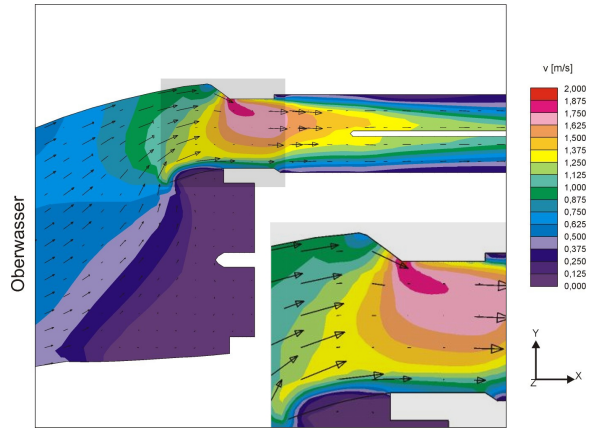


Abb. 4-9: Strömungsgeschwindigkeiten in der Variante 2a für $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$

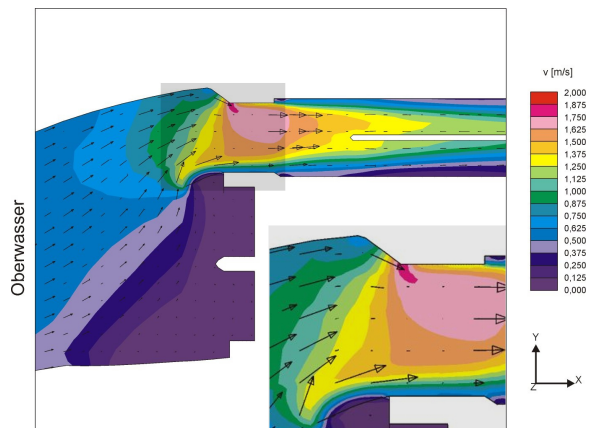


Abb. 4-10: Strömungsgeschwindigkeiten in der Variante 3a für $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$

Der in den Isolienplots zu erkennende ungleichmäßige Zustrom zu den Turbinen zeigt sich auch beim Durchfluss im Bereich des Zulaufes und des Rechens kurz hinter dem Beginn der Trennwand zwischen den Turbinenzuläufen (Abb. 4-11). Im Bereich des Zulaufes ist der Durchfluss bei allen drei Lastfällen (hier dargestellt für $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$) bis auf den Bereich der Ablösezone am Wehrpfeiler gleichmäßig verteilt. In diesem Bereich geht der Durchfluss im Vergleich zum mittleren Durchfluss um ca. 75% zurück.

Im Bereich der Rechen ist der Durchfluss stark auf den linken Bereich konzentriert, was auf die ausgeweitete Ablösezone zurückzuführen und bereits in den Isolienplots der Strömungsgeschwindigkeiten zu erkennen war.

Aus den Auftragungen war zu erkennen, dass die besten Ergebnisse bei allen untersuchten Abflüssen in Variante 1a (Abb. 4-12) erzielt wurden. In dieser Variante traten im Querschnitt recht gleichmäßige und geringere Strömungsgeschwindigkeiten als im Ist-Zustand und den Varianten 2, 2a, 3 und 3a auf. Dies deutete darauf hin, dass im Bereich zwischen den Pfeilern keine Walzenzonen mehr vorhanden

waren und der Querschnitt nun gleichmäßig durchflossen wurde.

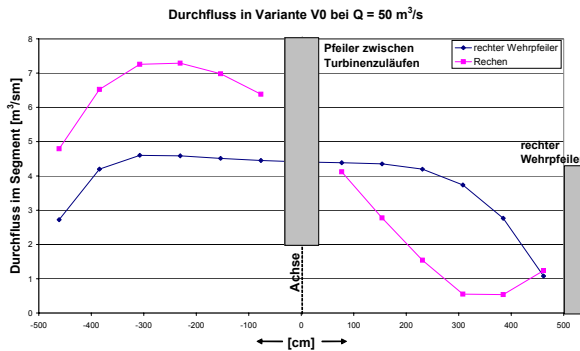


Abb. 4-11: Durchfluss im Turbinenzulauf im Ist-Zustand für $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ergebnis der numerischen Simulation)

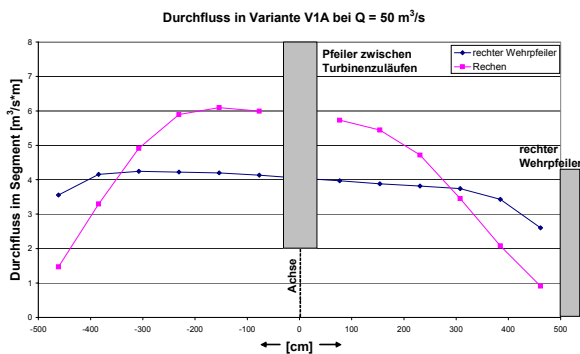


Abb. 4-12: Durchfluss im Turbinenzulauf in der Variante 1a für $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ergebnis der numerischen Simulation)

Auch der Zulaufbereich zu den Turbinen wurde in Variante 1a gleichmäßiger als in den anderen Varianten durchströmt, so dass zu erwarten war, dass den Turbinen mehr Wasser zufließen könnte und so eine Erhöhung der Leistung eintreten würde.

Im Bereich des Rechens zeigte sich im Vergleich zum Ist-Zustand eine deutlich verbesserte Verteilung des Durchflusses auf die beiden Turbinen. Der Verlauf über die Breite der Turbinenzuläufe war ähnlich und am Pfeiler lagen die maximalen Durchflüsse nur um ca. 15% auseinander.

4.6 Ergebnisbeurteilung

Bei den Untersuchungen des aktuellen Zustandes des Kraftwerkes Herrenhausen im physikalischen Modell und der numerischen Simulation zeigte sich, dass die Ursache der verminderten Leistungsabgabe des Kraftwerkes in der aufgrund der außermittigen Lage des Turbinenzulaufes ungleichmäßigen Anströmung der Turbinen zu suchen war.

Zur Behebung dieses Problems wurden verschiedene Einbauten (Leitwände am rechten und linken Wehrpfeiler in der Wehrachse) von unterschiedlicher Größe eingebaut. Dabei zeigten sowohl die Ergebnisse der physikalischen Modelluntersuchungen als auch die der numerischen Simulationen, dass die Strömung im Zulauf zu den Turbinen am besten von den Einbauten der Variante 1a (Leitwand am rechten Wehrpfeiler mit dem Leitwandkopf Oberwasser in das Wehrfeld hinein; Leitwand am linken Wehrpfeiler) vergleichmäßig wurde. Bei dieser Variante zeigten sich im Bereich hinter den Pfeilern nur unvermeidbare Ablösezone, die auf die nach hinten versetzte Wand hinter den Pfeilern zurückzuführen waren. Der Zustrom zu den beiden Turbinen wurde dadurch auf beiden Seiten gleich stark beeinflusst, so dass es zu einer insgesamt gleichmäßigen Anströmung der beiden Turbinen kam.

Die Ergebnisse der Simulationen im physikalischen und numerischen Modell zeigen, dass durch die Einbauten eine fast gleichmäßige Zuströmung zu den Turbinen erreicht wurde.

5 Gesamtbeurteilung / Untersuchungsbedarf

Bei der Auswertung der numerischen Simulationen zeigten sich Vorteile gegenüber den physikalischen Modellversuchen. Die Ergebniswerte lagen in allen Bereichen des Modells vor, was besonders bei großen Flächen (z.B. in den Kühlturmzellen) und in für die Messtechnik nicht zu erreichenden Bereichen (z.B. unterhalb der Pumpen) wichtig für eine umfassenden Beurteilung der baulichen und strömungsmechanischen Maßnahmen ist.

Der Aufbau relativ einfacher Modellstrukturen wie der hier beschriebenen mit vorherrschenden rechtwinkligen Strukturen konnte innerhalb von 1 bis 2 Tagen erfolgen und die Handhabung bei Netzbauten und veränderten Randbedingungen erlaubte eine praktische Umsetzung des Untersuchungsprogramms.

Bei der Netzgenerierung wurde darauf geachtet, dass mit der vorhandenen Rechenleistung – einer Origin 2000 – die Simulationen innerhalb von maximal einem halben Tag durchgeführt werden konnten. So konnten Ergebnisse über Nacht berechnet und am nächsten Tag ausgewertet werden.

6 Schrifttum

Brenneisen, C.: Numerische Simulation und topologische Analyse dreidimensionaler Innenströmungen, Shaker Verlag, Aachen, 1999

Computational Dynamics Limited: Star CD Methodology, London, 1999

Deck, T.: Numerische Simulation einer Kanalströmung um einen quaderförmigen Körper mit Hilfe lokaler Gitternetzverfeinerung, Shaker Verlag, Aachen, 1996

Noll, B. E.: Numerische Strömungsmechanik, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998

Oertel, H.; Laurien, E.: Numerische Strömungsmechanik, Springer-Verlag Berlin, 2001

Rodi, W.: Turbulence Models and their Application in Hydraulics, IAHR, Delft, 1993

