

Neue Methoden der aerodynamischen Modellierung flussbaulicher Fragestellungen

DIPLO.-ING. PETRA FAULHABER, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, KARLSRUHE

Kurzfassung

Für frei fließende Gewässer haben sich in der Vergangenheit aerodynamische Analogiemodelle (Luftmodelle) bei der Bearbeitung wasserbaulicher Fragestellungen durch ihre hohe Effizienz (geringe Modellabmessungen, kurze Auf-, Umbau- und Messzeiten) bewährt. Sie bieten vielfältige Möglichkeiten der Analyse der Strömungsvorgänge sowohl durch Messung der Strömungsparameter (Druck, Fließgeschwindigkeit, Durchfluss) als auch durch die Sichtbarmachung schwer abbildbarer Strömungsstrukturen wie z. B. der für den Geschiebetransport maßgeblichen Sohlstromlinien. Es wird eine Einführung in die Grundlagen und Methoden der aerodynamischen Modellierung gegeben und Neuerungen in Modellmethodik, Modellaufbau, Messtechnik und Versuchsauswertung vorgestellt. Da sich der Einsatz von Luftmodellen in den letzten beiden Jahrzehnten in der Bundesanstalt für Wasserbau auf aerodynamische Flussmodelle konzentrierte, werden insbesondere diese Erfahrungen vorgestellt.

1 Einleitung

Zur Planung flussbaulicher Maßnahmen werden bei komplizierten Fragestellungen Modelle eingesetzt. Zur Untersuchung der Oberflächenströmung und deren Wirkung auf das Gewässerbett kommen in Abhängigkeit von der jeweiligen Fragestellung numerische und/oder Maßstabs- (physische, gegenständliche, physikalische) Modelle (englisch: scaled models) zur Anwendung. Im Bereich der Maßstabsmodelle unterscheidet man Wasser- (hydraulische) und Luft- (aerodynamische) Modelle¹.

Die Wahl der geometrischen Maßstäbe ist bei hydraulischen Flussmodellen besonders durch die Notwendigkeit, sowohl die FROUDE-ÄHNLICHKEIT $Fr_r = 1$ als auch die REYNOLDS-ÄHNLICHKEIT ($Re_m > Re_{grenz}$) einhalten zu müssen, eingeschränkt (siehe KOBUS 1984 und HENTSCHEL 2007a, im vorliegenden Heft). Deshalb ist ein Modellierungsverfahren besonders verlockend, bei dem die erstgenannte Bedingung entfällt, da man die geometrischen Maßstäbe verkleinern kann, wenn die FROUDE-Zahl nicht als Ähnlichkeitskriterium berücksichtigt werden muss. Diese Möglichkeit ist gegeben, wenn die Freispiegelströmung durch eine Druckströmung ersetzt wird. Wird das freie Wasserspiegelniveau der Naturströmung durch eine Abdeckung simuliert, kann die Modellströmung unter Druck erfolgen. Das strömende

Medium Wasser wird durch Luft ersetzt. Das so entstandene Analogiemodell bezeichnet man im wasserbaulichen Versuchswesen als aerodynamisches oder Luftmodell. Die Luft wird mittels leistungsfähiger Ventilatoren durch das Modell gesaugt.

Die Geometrie des Untersuchungsgebietes wird bei aerodynamischen Modellen grundsätzlich wie bei hydraulischen Modellen maßstäblich verkleinert (Tabelle 1). Die Kalibrierung der Modelle erfolgt ebenfalls durch Anpassung der Sohlrauheit, so dass das Druckgefälle für einen bekannten Naturzustand ähnlich dem Wasserspiegelgefälle abgebildet wird (siehe Kapitel 3).

	Luftmodell aerodynamisches Modell	Wassermodell hydraulisches Modell
Strömungsmedium	Luft	Wasser
Strömung	Druckströmung	Freispiegelströmung
Wesentliche Ähnlichkeitskriterien	Eu (EULER), Re	Fr, Re
Längenmaßstab	1:150 bis 1:2000	1:15 bis 1:200
Fließgeschwindigkeit	bis 50 m/s (10 bis 40 m/s)	bis 1m/s (0,05 bis 0,5 m/s)

Tabelle 1: Charakteristika von aerodynamischen und hydraulischen Modellen

Folgende Besonderheiten und Randbedingungen sind beim Einsatz von Luftmodellen zu berücksichtigen:

- Der Einsatz von Luftmodellen erlaubt kleinere Maßstäbe (größere Maßstabszahl) als bei hydraulischen Modellen zu nutzen (siehe Tabelle 1), wodurch geringe Materialkosten entstehen und der Umbau für Varianten schneller zu realisieren ist. Wegen der kleineren Maßstäbe können Luftmodelle auf Tischen aufgebaut werden (Bild 1), wodurch sich gute Arbeitsbedingungen gewährleisten lassen.
- Wegen der kleinen Modellmaßstäbe werden hohe Genauigkeitsanforderungen an die Modellierung der Geometrie und die Messgeräte gestellt. Messgeräte müssen exakt im Modell positioniert werden können.
- Im Luftmodell darf die Kompressibilität der Luft nur eine untergeordnete Rolle spielen (MACH-Zahl vernachlässigbar), was für Strömungsgeschwindigkeiten $v_m < 50$ m/s (GILJAROV 1973) der Fall ist.
- Die FROUDE-Zahl muss vernachlässigbar gering (LJATCHER und PRUDOWSKIJ 1984) oder örtlich bekannt sein. Der Wasserspiegel wird in Luftmodellen üblicherweise durch eine durchsichtige Deckplatte simuliert (Bild 1, Verfahren siehe Kap. 2.2). Damit die Deckplatte horizontal angeordnet werden kann, wird der Fluss entsprechend des Talgefälles so geneigt, dass die Flusssohle annähernd parallel zur Tischebene liegt.

¹ Einige Begriffe sind im Glossar am Ende des Artikels erläutert; außerdem befindet sich dort ein Symbolverzeichnis.

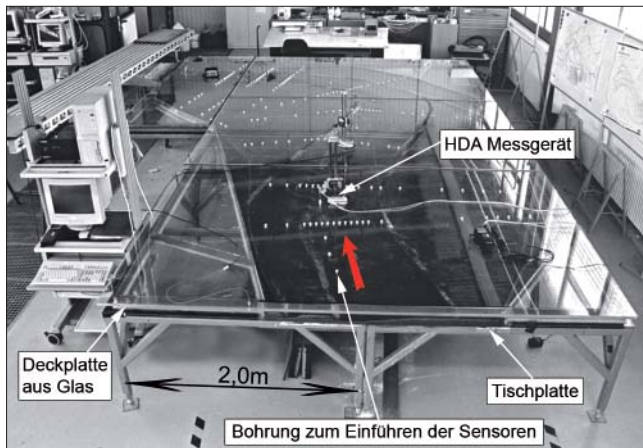


Bild 1: Luftmodell Elbe bei Klöden

- Da der Wasserspiegel durch eine starre Deckplatte simuliert wird, kann mit einem Luftmodell nur eine begrenzte Anzahl stationärer Durchflüsse untersucht werden.

2 Aerodynamische Modellierungsverfahren

Grundlegende Erläuterungen zu aerodynamischen Modellierungsverfahren findet man u. a. in LJATCHER und PRUDOVSKI (1971), GILJAROV (1973), FAULHABER (1983 und 1986), NESTMANN und BACHMEIER (1987). In diesem Artikel werden hauptsächlich Neuerungen beschrieben, die im Versuchsbetrieb der BAW bei der Untersuchung von Flussabschnitten eingeführt wurden.

2.1 Klassifizierung

Man unterscheidet wie bei hydraulischen Modellen in

- **Strömungsmodelle** (Modelle mit fester Sohle, ohne Sohlreaktion) zur Untersuchung der hydraulischen Parameter der Strömung und
- **Geschiebetransport-Modelle** (Modelle mit beweglicher Sohle, mit Sohlreaktion) zur Untersuchung des Geschiebetransportes und der Änderung der Sohlgestalt.

Darüber hinaus stehen entsprechend der zu untersuchenden Fragestellungen unterschiedliche Phänomene im Mittelpunkt und sind verschiedene Modellabstraktionen möglich, wodurch sich drei verschiedene Modelltypen ergeben:

- **Dreidimensionale Modelle**, bei denen neben der Geländegeometrie auch die vertikale Geschwindigkeitsverteilung naturähnlich abgebildet wird. Sie dienen der Simulation räumlicher Strömungsverhältnisse.
- **Übersichtsmodelle**, bei denen entweder auf Grund der starken Überhöhung oder wegen der geringen Modellabmessungen Abweichungen in der Ausbildung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung ge-

genüber der Naturströmung zu erwarten sind. Die Geometrie ist zwar dreidimensional abgebildet, die Untersuchungen werden aber nur in der Ebene ausgewertet (sogenannte quasi zweidimensionale Luftmodelle).

- **Systemmodelle**, die man zur Untersuchung grundsätzlicher Wirkzusammenhänge mit stark auf das Wesentliche vereinfachter Geometrie betreibt. Darunter sind Rinnenversuche oder idealisierte Flussmodelle zu verstehen. Letztere werden auch als geometrisch zweidimensionale Modelle betrieben, die nur in der Horizontalen eine veränderliche Geometrie aufweisen, während die Fließtiefe konstant ist (z. B. für Untersuchung von Bühnenfeldern konstanter Tiefe oder Kolkuntersuchungen in einem gekippten Längsschnitt durch den Kolk).

Die langjährigen Erfahrungen mit aerodynamischen Untersuchungen von Flüssen führten dazu, dass im Rahmen der oben aufgezeigten Modelltypen neue Modellierungsverfahren etabliert wurden. Je nach Aufgabenstellung waren Modelloptimierungen erforderlich, um mit möglichst geringem Aufwand die wesentlichen physikalischen Phänomene ausreichend ähnlich abzubilden. Eine Neuerung, die im Kapitel 2.2 beschrieben wird, besteht in der Verwendung einer „variablen zusätzlichen Überhöhung“. Andere finden sich in den Kapiteln 5 und 6 (Modellaufbau und Messtechnik).

2.2 Aerodynamische Strömungsmodelle

Ein wesentlicher Unterschied der Strömung in Flüssen und in aerodynamischen Modellen besteht darin, dass im Modell das Strömungsmedium Luft anstatt Wasser genutzt wird. Durch die Druckmodellierung bilden sich unterschiedliche Kräfte- und Geschwindigkeitsverteilungen aus. In der Druckströmung des Luftmodells muss die Grenzfläche zwischen Wasser und Luft der zu untersuchenden Natur-Freispiegelströmung auf geeignete Weise simuliert werden. Die Naturähnlichkeit der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung kann auf verschiedene Weise erreicht werden.

Am konsequentesten wäre der Einsatz eines an der Wasseroberfläche gespiegelten Modells (Bild 2b). Da **Spiegelmodelle** äußerst aufwändig in der Untersuchungspraxis sind, kommen sie bei den komplizierten Geometrien flussbaulicher Untersuchungen in der BAW nicht zum Einsatz.

In der Regel wird eine durchsichtige Modellabdeckung aus Kristall- oder Acrylglas zur Simulation der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft der zu untersuchenden Natur-Freispiegelströmung im Luftmodell genutzt. Durch diese Deckplatte kommt es zu einer Verfälschung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung gegenüber der Naturströmung, da die Reibung an der Grenzfläche Luft-Deckplatte im Modell größer ist als die an der Grenzfläche Wasser-Luft in der Natur (Bild 2 a und c).

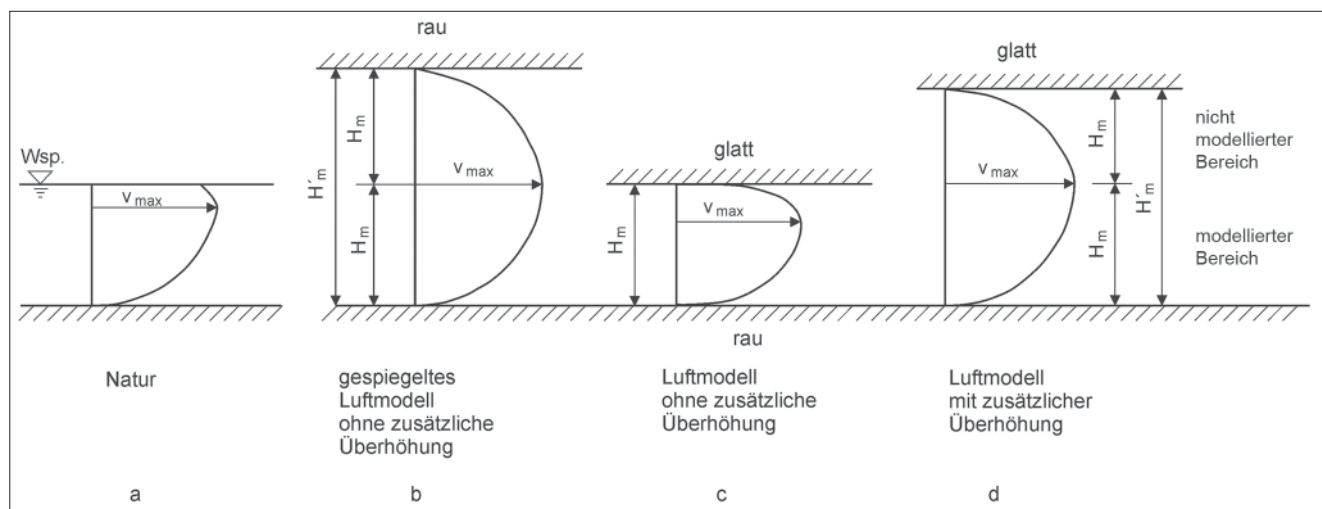


Bild 2: Vertikale Geschwindigkeitsverteilung in Natur und im Luftmodell

Bei der Methode der aerodynamischen Modellierung **ohne zusätzliche Überhöhung** (Bild 2c) wird die Deckplatte in der geometrisch übertragenen Höhe des Naturwasserspiegels aufgelegt. Sie ist in der praktischen Ausführung sehr einfach. Bei dieser Methode wird die vertikale Geschwindigkeitsverteilung insofern nicht ähnlich abgebildet, als durch die Reibung an der Deckplatte das Geschwindigkeitsprofil in der Nähe des Wasserspiegels verfälscht wird. Es kann durchaus eine ähnliche Ausbildung des sohlennahen vertikalen Geschwindigkeitsprofils erreicht werden, die mittleren Geschwindigkeiten werden jedoch etwas zu gering abgebildet (Korrekturfaktor erforderlich). Im Rahmen der Modellkalibrierung können die horizontalen Geschwindigkeitsverteilungen – und damit die Verhältnisse von Durchflüssen verschiedener Querschnittsbereiche – jedoch naturähnlich abgebildet werden. In Luftmodellen ohne zusätzliche Überhöhung können vertikale Geschwindigkeiten nur sohlennah und nicht im Bereich des Wasserspiegels ausgewertet werden. Bei der Untersuchung flächiger Geschwindigkeiten sollten die Messebenen nicht in der Nähe der Deckplatte, sondern in der unteren Modellhälfte liegen.

Um ohne Spiegelmodelle Verfälschungen des vertikalen Geschwindigkeitsprofils im Bereich des Naturwasserspiegels auf Grund der unterschiedlichen Bedingungen bei Freispiegel- und Druckströmung auszugleichen, wird eine zusätzliche Überhöhung des Luftmodells vorgenommen (Bild 2d); die Deckplatte wird höher gelegt, als es der geometrischen Übertragung des Wasserspiegels mit dem gewählten Höhenmaßstab entspräche. Die größte Vereinfachung durch eine **konstante zusätzliche Überhöhung** – Höherlegen der Modelldeckplatte um einen festen Wert für das gesamte Modell – findet bei Flussabschnitten mit wenig differenzierter Geometrie oder bei Übersichtsmodellen häufig Anwendung (Bild 4, links).

Die Methode hat dort ihre Grenzen, wo die Geometrie in der Natur sehr stark wechselnde Wassertiefen

hervorrufft. Durch die konstante zusätzliche Überhöhung werden in einem Querschnitt die Gesamt-Strömungstiefen H_m' der flachen Bereiche vergleichsweise stärker vergrößert als die der tiefen Bereiche, da der nicht modellierte Bereich in flachen und tiefen Abschnitten gleich groß ist ($\Delta H = \text{const.}$, siehe Bild 4, links). Sollen die Durchflussanteile verschiedener Querschnittsbereiche für eine Variantenbewertung verglichen werden (z. B. Verhältnis der Durchflussanteile von Vorland und Flussbett), führt die konstante zusätzliche Überhöhung zu Fehlschlüssen, auch wenn nur der modellierte Querschnittsbereich (Bild 2) unter dem angenommenen Wasserspiegel zur Auswertung herangezogen wird. Das ist darauf zurückzuführen, dass an Engstellen (z. B. Erhebungen der Sohle als Querriegel), die den Zufluss in Seitenbereiche (z. B. Vorlandrinnen) begrenzen, im Modell ggf. eine größere Durchflussmenge in den Seitenbereich eingeleitet wird als in der Natur. Ohne entsprechende Berücksichtigung dieser Einflussgrößen (z. B. Ausführung der Schwelle im Modell nicht nach geometrischer Ähnlichkeit, sondern entsprechend des erforderlichen Durchflussanteils) werden Durchflussanteile der Seitenbereiche überschätzt.

Bei der Methodik der zusätzlichen Überhöhung ist darauf zu achten, dass die Uferländer vom modellierten Wasserspiegel bis zur Deckplatte in der Art hoch gezogen werden, dass nur die Geländebereiche überströmt werden, die beim zu modellierenden Durchfluss auch in der Natur unter Wasser liegen. Dazu werden die nicht überströmten Bereiche durch „Abklebungen“ (z. B. mit Gummistreifen oder -platten) von der Strömung ausgeschlossen (Bild 15).

Soll bei Flussgeometrien mit recht einheitlicher Vorlandgeometrie nur die Ähnlichkeit der Durchflussverteilung gewährleistet werden und kann auf eine Ähnlichkeit der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung über dem Vorland verzichtet werden, so wird dies mit einer Erhöhung der Vorland- gegenüber der Bettauheit im Rahmen der Modellkalibrierung erreicht (Bild 3c).

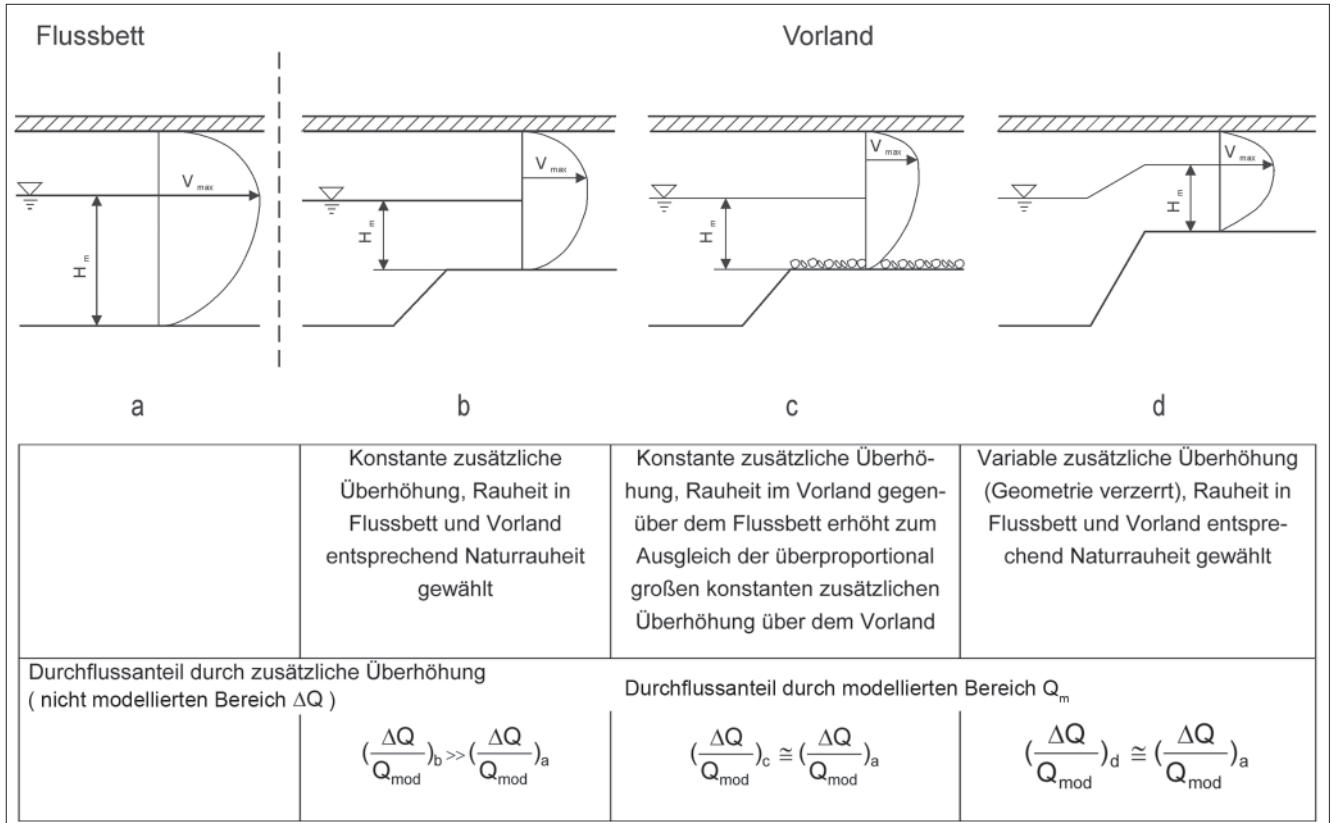


Bild 3: Möglichkeiten der ähnlichen Simulation von Durchflussverteilungen im Luftmodell unter Berücksichtigung des Einflusses unterschiedlicher Durchflusstiefen im Querschnitt bei ebener Modellabdeckung

Ein neues Modellierungsverfahren wurde bei stark strukturierten Querschnitten (z. B. bei Flussabschnitten mit Gräben, Altgewässern und stark in der Höhe veränderlichem Vorland) eingeführt, wenn Maßnahmen sowohl im Flussschlauch als auch in den strukturierten Seitenbereichen untersucht werden sollen. Dann können Luftmodelle mit **variabler zusätzlicher Überhöhung** (Bild 4, rechts) eingesetzt werden, deren Nutzung nur mit rechentechnischer Unterstützung möglich ist.

Dabei wird die Geometrie für den Aufbau des Luftmodells in der Weise verzerrt, dass, ausgehend von einer feststehenden ebenen Modellabdeckung, die den Naturdurchfluss modellierende, maßstäbliche Modelltiefe ergänzt um die zusätzliche Überhöhung (zur Einhaltung

der Ähnlichkeit der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung) nach unten aufgetragen wird, um die Modellsohlpunkte zu erhalten. In Abhängigkeit von der Sohlrauheit in Natur und Modell wird ein prozentualer Anteil der modellierten und der zusätzlichen Strömungstiefe an der Gesamtströmungstiefe bei der Modellplanung ermittelt. Bisher wurden Luftmodelle betrieben, bei denen für das gesamte Modell – unabhängig von kleinräumigen Rauheitsänderungen – eine prozentuale Aufteilung gewählt wurde (siehe Kapitel 4.2).

Da die variable zusätzliche Überhöhung entsprechend ihrer Abhängigkeit von Modelltiefe und angenommener Modellrauheit für jeden Profilpunkt errechnet wird, ist gewährleistet, dass sich das Geschwindigkeitsmaximum im Modell an jeder Stelle in der relativ gleichen

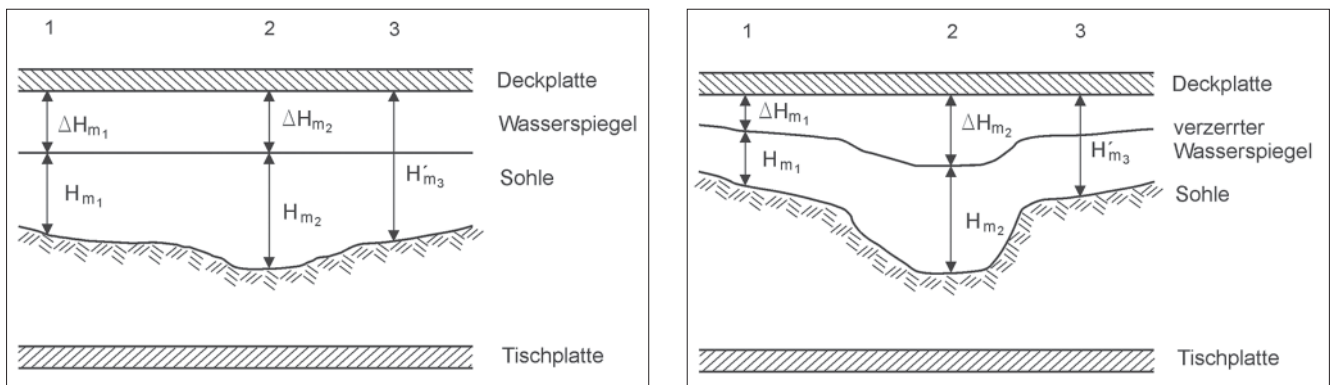


Bild 4: Querschnittsdarstellung bei konstanter (links) und variabler (rechts) zusätzlicher Überhöhung

Höhe ausprägt wie in der Natur, da tiefe Bereiche eine entsprechend größere absolute zusätzliche Überhöhung ($\Delta H = f(\text{Rauheit, Fließtiefe})$) erhalten als flache.

Probleme mit der Ähnlichkeit der Durchflussanteile bei stark strukturierter Geometrie können durch dieses Modellierungsverfahren vermieden werden. Allerdings erhöht sich durch diese Methode die geometrische Überhöhung, da die zusätzliche Überhöhung in die Geometrie einbezogen wird (Tabelle 2). Die Modellgeometrie wird – zusätzlich zur ursprünglich gewählten geometrischen Überhöhung – nochmals verzerrt.

Konstante und variable zusätzliche Überhöhung können bei Bedarf ergänzend angewendet werden.

	Konstante zusätzliche Überhöhung	Variable zusätzliche Überhöhung
Längenmaßstab	1:350	1:350
Höhenmaßstab	1:175	1:175
Geometrische Überhöhung ohne zusätzliche Überhöhung	1:2	1:2
Zusätzliche Überhöhung	8 mm	variabel: 35% der Gesamthöhe H_m
Geometrische Überhöhung mit zusätzlicher Überhöhung	variabel	1:114
Für die Strömung relevanter Höhenmaßstab	1:175	1:114
Für die Strömung relevante Überhöhung	1:2	1:3

Tabelle 2: Beispiel für geometrische Maßstabsverhältnisse bei konstanter und variabler zusätzlicher Überhöhung

Da mit der variablen zusätzlichen Überhöhung zwar die Ähnlichkeit hinsichtlich vertikaler – mit Fokus auf den Nahbereich des Wasserspiegels – und horizontaler Geschwindigkeitsverteilung gewährleistet werden kann, ggf. aber Ähnlichkeitsprobleme (z. B. in der Nähe von Bauwerken) aus einer zu großen Überhöhung entstehen, muss bei der Wahl des aerodynamischen Modellierungsverfahrens sorgfältig abgewogen werden, welche physikalischen Phänomene das Strömungsgeschehen im Untersuchungsgebiet bei der jeweiligen Fragestellung dominieren.

2.3 Aerodynamische Geschiebetransport-Modelle

Für Untersuchungen des sohlennahen Feststofftransports werden einerseits aerodynamische Modelle mit fester Sohle als „Tracermodelle“ eingesetzt, da über geeignete Methoden zur Strömungssichtbarmachung die für den Geschiebetransport maßgebende sohlennahe Strömung qualitativ analysiert werden kann (NESTMANN und BACHMEIER 1987). Andererseits stellten LJATCHER und PRUDOVSKI (1984), HINCU und FINKELSTEIN (1963), SUMBAL (1966) und MATOUŠEK et al. (1983) umfangreiche Untersuchungen an Luftmodellen mit Geschiebetransport vor.

Voraussetzung für den Einsatz von aerodynamischen Modellen zur Untersuchung der Geschiebebewegung

in Flüssen ist die Annahme, dass der Geschiebetransport in druckloser Wasserströmung und Druckströmung mit Luft ähnlich erfolgt. Prinzipielle Vergleiche des Transportverhaltens in Wasser und Luft wurden unabhängig von der speziellen Anwendung der aerodynamischen Modellierung von Freispiegelströmungen mehrfach angestellt (z. B. ALLEN 1968, BAGNOLD 1978 und ZANKE 1982). Für den Geschiebetransport in Flüssen wurden vergleichende Untersuchungen von Naturströmung, hydraulischem und aerodynamischem Modell u. a. von LJATCHER und PRUDOVSKI (1984), SUMBAL (1966) und FAULHABER (1986) durchgeführt. Für Projektuntersuchungen kamen Luftmodelle mit beweglicher Sohle bei Problemstellungen des Pfeilerkolkes, bei Wasserentnahmen und Flussregelungsmaßnahmen zum Einsatz. Einige Rinnenversuche mit Luftströmung (SUMBAL 1966, IKEDA 1982, FAS 1985 und 1987) lieferten systematisch auswertbare Ergebnisse, die teilweise mit Versuchen in Wasserrinnen verglichen wurden.

Aerodynamische Modelle lassen sich zur Untersuchung des Geschiebetransports leicht einsetzen, weil der Geschwindigkeitsmaßstab nicht direkt mit den geometrischen Maßstäben verbunden ist. Er kann somit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei Geschiebebewegungsbeginn des Modellsediments gewählt werden.

Aerodynamische Geschiebetransport-Modelle werden überwiegend zur qualitativen Untersuchung der Geschiebetransportprozesse eingesetzt (u. a. FAS 1988, BAW 1997).

Beispiel Luftmodell Lenzen an der Elbe

An einem Beispiel soll die Einsatzmöglichkeit eines aerodynamischen Geschiebetransport-Modells für flussbauliche Untersuchungen aufgezeigt werden. Es war eine optimale Variante zur Schlitzung des Altdeichs bei einer Deichrückverlegung zu finden.

Zur Untersuchung der zu erwartenden Tendenzen der Sohlenentwicklung nach der Deichrückverlegung wurde ein Luftmodell des Abschnitts Elbe-km 474,2 bis 484,1 mit fester Sohle (Längenmaßstab 1:1000, Höhenmaßstab 1:500, variable zusätzliche Überhöhung 40 % der Gesamtmodelltiefe) zum Geschiebetransportmodell umgebaut (BAW 2000). Dazu wurde die Flusssohle im Abschnitt der geplanten Deichrückverlegung im Gewässerbett entfernt und statt derer ein körniges Material in Höhe der mittleren Sohle eingebracht („Geschiebekoffer“). Nachdem verschiedene Materialien getestet worden waren, erwies sich Sand ($d_m = 0,57$ mm, $U = 2,0$) als geeignet (Bild 5). Das Sohlenmaterial in der Natur (entspricht dem Geschiebe) weist einen mittleren Korndurchmesser d_m von 1,13 bis 1,8 mm und eine Ungleichförmigkeit $U = 2,16$ bis 3,53 auf (BfG 1994).

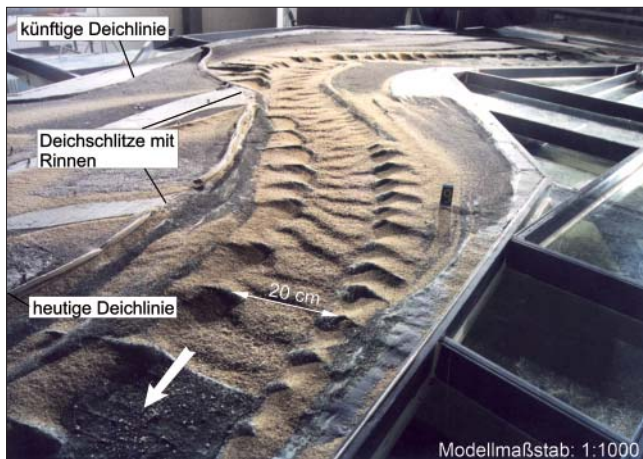


Bild 5: Luftmodell Elbe bei Lenzen: Sohle des Geschiebekoffers nach dem Versuch mit geschlitztem Deich

Die Versuche wurden jeweils ausgehend von einer in Höhe der mittleren Sohle eingeebneten Sohle durchgeführt. Es wurde ein stationärer Durchfluss von der Größe eines 3 bis 4-jährlichen Hochwassers eingestellt. Das Modell wurde so gefahren, dass deutlicher Geschiebetransport nur bei gleichzeitiger Materialzugabe über einen geeichten Dosator stattfand. Bei den Versuchen wurde das Modell 20 Minuten mit insgesamt 5 kg Zugabe betrieben (anschließend 26 Minuten ohne Zugabe), sodass sich eine reproduzierbare Sohle ausprägte. Die Versuche wurden mindestens drei Mal wiederholt. Bei der Auswertung betrachtete man die Mittelwerte der drei Versuche. Insgesamt befanden sich im Geschiebekoffer ca. 60 kg Sand. Jeweils am Ende der Versuche wurde das Material aus dem Geschiebesammler gewogen.

Im Verlaufe des Versuches bildeten sich Riffel aus (Bild 5), wodurch der Geschiebetransport im Modell wie in der Natur in dieser Elbestrecke als „verzögerte“ Bewegung in Transportkörpern ablief, obwohl in der Natur die prägenden Transportkörper Dünen und nicht Riffel sind (Ähnlichkeitsprobleme siehe Kapitel 3.2).

Die Sohlgeometrie wurde mit einem Laserabstandsmesser (siehe Kapitel 6.1) vermessen. Die Daten wurden qualitativ bewertet (relative Sohleneintiefung oder Anlandung siehe Bild 6), aber nicht in Naturhöhendifferenzen umgerechnet. Die Untersuchungen zeigten, dass sich die Sohle im Nullzustand bei Hochwasser in den letzten zwei Dritteln der Länge des Geschiebekoffers eintieft. Bei geschlitztem Altdeich sind die Eintiefungen geringer. Wird in der Strecke der Altdeich vollständig entfernt, kommt es am Beginn der Altdeichentfernung zu starken Eintiefungen der Sohle durch den Materialaustrag aus dem Flussbett in das Vorland. In der stromab gelegenen Hälfte des Geschiebekoffers führt die verminderte Transportkraft durch die Deichrückverlegung zusammen mit dem veränderten Gefälle durch die oberstromige Sohleneintiefung zu Anlandungen.

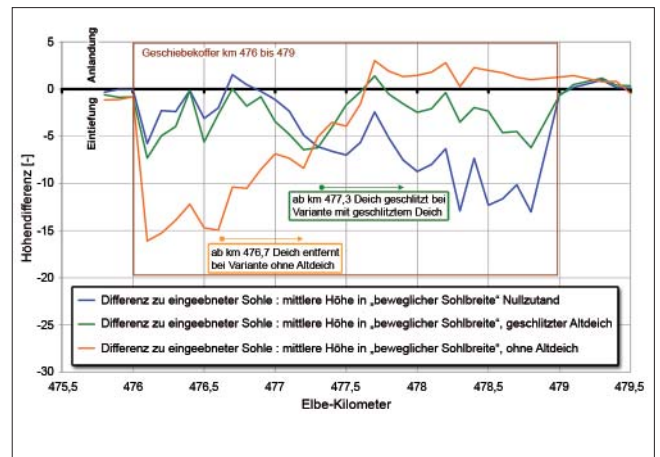


Bild 6: Vergleich der mittleren Sohle im Bereich der beweglichen Sohlenbreite im Luftmodell Lenzen

Die Ergebnisse des aerodynamischen Geschiebetransport-Modells ergänzen die großräumigen und langfristigen Prognosen eines eindimensionalen numerischen Feststofftransportmodells zur Entwicklung der mittleren Sohle um qualitative lokale Aspekte. Mit Hilfe von Videoaufnahmen konnten die Transportvorgänge bei verschiedenen Varianten sichtbar gemacht werden.

3 Ähnlichkeitsbedingungen

Beim Betreiben von aerodynamischen Modellen müssen sogenannte Ähnlichkeitsbedingungen eingehalten werden, um eine naturähnliche Ausbildung der Strömung im Modell zu gewährleisten. Es sind geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit anzustreben. KOBUS (1984) schreibt dazu: „Dynamische Ähnlichkeit liefert die Voraussetzung dafür, dass in geometrisch ähnlichen Modellen zeitabhängige Vorgänge kinematisch ähnlich ablaufen. Dies wird durch die Beziehung zwischen den angreifenden Kräften und dem Strömungsfeld gewährleistet, wie sie in den Bewegungsgleichungen zum Ausdruck kommt. Die Schlussfolgerung bei geometrisch ähnlichen wasserbaulichen Modellen besteht also darin, dass die dynamische Ähnlichkeit gewährleistet sein muss, was dann gegeben ist, wenn alle angreifenden Kräfte im Modell in einem konstanten Verhältnis zur Natur nachgebildet werden.“

Da es bei einer maßstäblichen Verkleinerung nicht möglich ist, alle Kräfte naturähnlich abzubilden, beschränkt man sich auf zwei für den jeweiligen Modelltyp und die zu bearbeitende Fragestellung dominierende Kräftearten und vernachlässigt die übrigen unter Einhaltung entsprechender Grenzkriterien. Dadurch kann eine angenäherte dynamische Ähnlichkeit erreicht werden. Im Folgenden werden Ähnlichkeitsbedingungen mit Fokus auf die Modellpraxis erläutert.

3.1 Ähnlichkeit der Fluid-Strömung

In Luftmodellen für flussbauliche Fragestellungen – die hier ausschließlich betrachtet werden sollen – müssen hauptsächlich Reibungs-, Druck- und Trägheitskräfte berücksichtigt werden. Als strömungsmechanische Kennzahlen kommen somit das REYNOLDSSche und das EULERSche Modellgesetz zur Anwendung. Untersuchungen in aerodynamischen Druckmodellen sind nur möglich, wenn der Einfluss der Schwerkraft auf das Strömungsgeschehen vernachlässigt werden kann.

Turbulenzkriterium (REYNOLDS Zahl)

Eine strikte Einhaltung des REYNOLDSSchen Modellgesetzes ($Re_n = Re_m$) ist – bedingt durch die physikalischen Eigenschaften von Luft (Zähigkeit und Kompressibilität) – nicht möglich, weshalb sich die Anwendung dieses Ähnlichkeitskriteriums auf die Beachtung der Turbulenzgrenze beschränkt (Turbulenzkriterium).

Da die zu untersuchenden Strömungsvorgänge in der Natur im rau turbulenten Bereich erfolgen, soll dies auch im Modell der Fall sein. Es gilt für das Modell die Bedingung

$$Re_m \geq Re_{krit} \tag{1}$$

mit $Re_{krit} = 2$ bis $3 Re_{grenz}$.

Mit $Re_{grenz} = 2300$ für den maßgebenden Übergang von laminarer in turbulente Strömung, folgt als Richtwert $Re_m > 5000$ bis 7000 . Wird dieser Richtwert eingehalten, ist zwar gewährleistet, dass das Luftmodell im turbulenten Bereich (Übergangsbereich oder rau turbulenter Bereich) betrieben wird, die REYNOLDS-Zahlen von Modell und Natur unterscheiden sich jedoch deutlich (Beispiel siehe Tabelle 3, für das hydraulische Modell wurde der theoretische Wert eingetragen, ein solches Modell wurde nicht gebaut).

Für Natur und Luftmodelle lässt sich die REYNOLDS-Zahl

$$Re = \frac{\text{Trägheitsreaktion}}{\text{Zähigkeit}} = \frac{v \cdot d_{hy}}{\nu} \text{ mit } d_{hy} = 4 r_{hy}$$

aus der Fließgeschwindigkeit v , dem hydraulischem Radius r_{hy} und der kinematischen Viskosität ν (Annahme Luft: $\nu = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, Wasser $\nu = 1,17 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) ermitteln. In der Natur und in Modellen kann bei großen Flüssen die Wassertiefe für den hydraulischen Radius eingesetzt werden ($r_{hy} = t$).

Für Fragestellungen, bei denen die ähnliche Darstellung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung gewährleistet sein soll, müssen die Modellkennwerte tatsächlich im hydraulisch rauhen Bereich und nicht nur im Übergangsbereich liegen, da erst hier der Widerstandsbeiwert λ bei gleichem Verhältnis d_{hy}/k unabhän-

	Höhenmaßstab	Maßgebende Tiefe t [m]	Maßgebende Geschwindigkeit v [m/s]	REYNOLDS-Zahl Re [-]
Natur	1:1	3,000	1,00	10 260 000
Hydraulisches Modell	1:40	0,075	0,16	40 000
Aerodynamisches Modell	1:175	0,017	27,00	30 600

Tabelle 3: REYNOLDS-Zahlen der Strömung im Flussbett in der Natur und in Maßstabsmodelle am Beispiel eines zu untersuchenden mittleren Abflusses in der Oder bei Reitwein-Kietz

gig von der REYNOLDS-Zahl ist. In diesen Fällen ist die MOODY-Grenze zu berücksichtigen

$$Re_m \geq \frac{200}{\sqrt{\lambda} \cdot (k / d_{hy})} \tag{2}$$

EULER-Zahl

Die Anwendung der EULER-Zahl als Ähnlichkeitskriterium ist insofern schwierig, als sie nur bei inkompressiblen Fluiden und bei Abwesenheit anderer Kräfte als Druckkraft und Trägheitsreaktion ausschließlich eine Funktion der Form der Strömungsberandung ist. Wenn in diesem Fall geometrische Ähnlichkeit gewährleistet ist, lassen sich die Strömungskennzahlen Druck und Geschwindigkeit unter Berücksichtigung des Dichteverhältnisses unabhängig von den Absolutwerten der Geometrie einfach ineinander umrechnen. Wirken neben diesen beiden Kräften noch weitere Kräfte (z. B. Zähigkeitskräfte), dann ist diese einfache Umrechnung nur dann korrekt, wenn neben der Geometrieähnlichkeit auch die Ähnlichkeitsbedingungen der zusätzlichen Kräfte (z. B. REYNOLDS-Zahl) berücksichtigt wurden.

Das EULER-Kriterium lautet:

$$Eu = \frac{\text{Trägheitsreaktion}}{\text{Druckkraft}} = \frac{v}{\sqrt{2 \cdot \Delta p / \rho}} = \text{const.} \tag{3}$$

Für die praktische Modellplanung werden folgende Beziehungen genutzt, die letztendlich aus dem EULER-Kriterium abgeleitet sind:

Aus der Bedingung $Eu = \text{const.}$ lässt sich durch Umformung (mit $\Delta p = l \cdot \rho \cdot g \cdot L$ und $v = n \cdot l^{1/2} \cdot r_{hy}^{2/3}$) die Ähnlichkeitsbedingung

$$r_{hy_r} = n_r^{3/2} \cdot L_r^{3/4} \tag{4}$$

(siehe Bild 7) bzw. mit

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot v^2 \cdot L \cdot \rho}{8 \cdot r_{hy}} \tag{5}$$

das Ähnlichkeitskriterium

$$\left(\frac{r_{hy}}{\lambda \cdot L} \right)_r = 1 \tag{6}$$

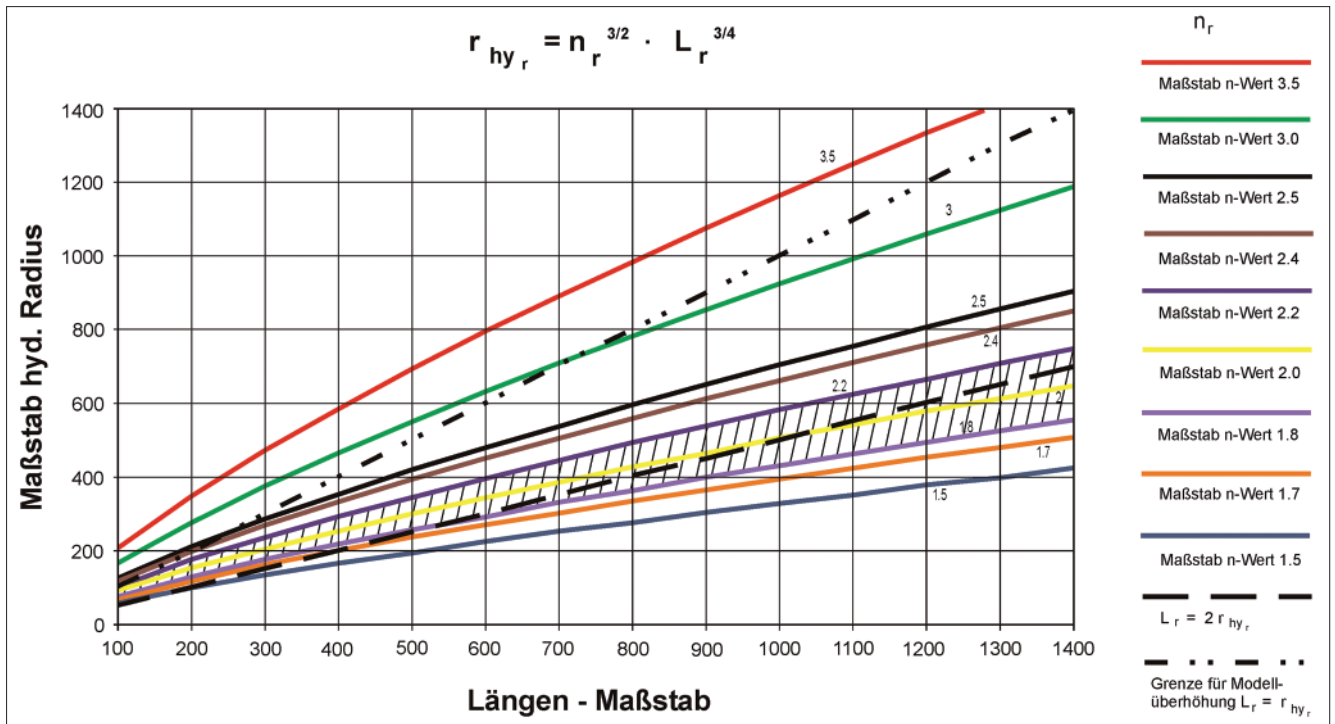


Bild 7: Maßstabsbeziehungen bei Luftmodellen für übliche geometrische und Rauheitsmaßstäbe

entwickeln, welches für Modelle ohne geometrische Überhöhung $L_r = r_{hyr} = H_r$

die Beziehung

$$L_r = n_r^6 \quad (7)$$

ergibt (siehe Bild 8).

Mit Hilfe von Gleichung 4 lässt sich auf der Grundlage eines gewählten Längenmaßstabes und der Rauheitsverhältnisse in Natur und geplantem Modell der erforderliche Höhenmaßstab ermitteln. In Bild 7 ist der sich so ergebende Variationsbereich für übliche Größen- und Rauheitsverhältnisse dargestellt (siehe auch Tabellen 7 bis 9). Für das in den Kapiteln 5 und 6 mehrfach als Beispiel benannte Luftmodell der Oder bei Reitweinkietz ist in Bild 7 ein möglicher Modellbereich schraffiert eingetragen mit $n_r = 1,8$ bis $2,2$, wobei für die Modellrauheit $n_m = 0,011$ bis $0,013$ s/m^{1/3} (lackierte, gefrästes Kunststoffmodell mit abgebildeten Geländestruk-

turen) und die Naturrauheit $n_n = 0,022$ bis $0,024$ s/m^{1/3} angenommen wurde.

Folgende spezielle Ähnlichkeitskriterien müssen in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung bei der Modellplanung berücksichtigt werden:

Ähnlichkeit der Reibungsverluste

In nicht überhöhten Modellen muss für die Gewährleistung der Ähnlichkeit des Wasserspiegelgefälles das Kriterium $\lambda_m = \lambda_n$ eingehalten werden. Oftmals wird eine „geometrische Überhöhung“ gewählt, da sich durch unterschiedliche Längen- und Höhenmaßstäbe ein Variationsbereich für λ_m ergibt (Gleichung 6).

Aus messtechnischen Gründen ist es häufig erforderlich, im Modell größere Abflusstiefen zu erreichen, als es mit dem aus Platzgründen realisierbaren Längenmaßstab in einem geometrisch nicht überhöhten Mo-

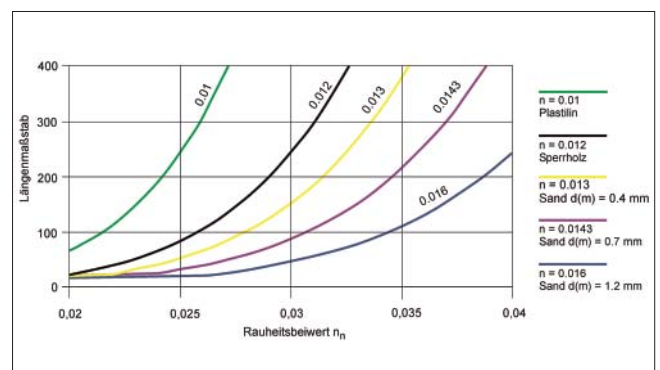
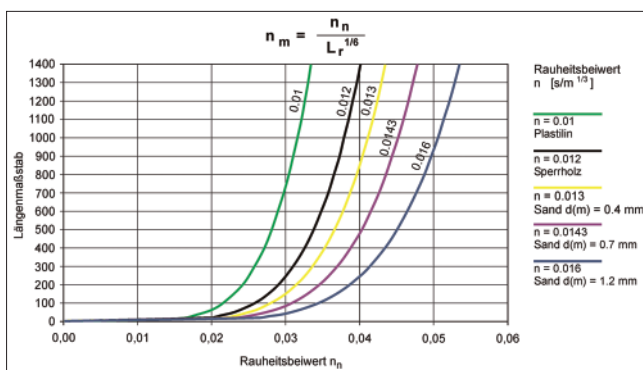


Bild 8: Wahl der Modellrauheit in Abhängigkeit von Naturrauheit und Längenmaßstab für nicht überhöhte Luftmodelle (ohne geometrische Überhöhung)

dell möglich ist. Auch dann wird auf eine geometrische Modellüberhöhung zurückgegriffen, d. h. Längen- und Höhenmaßstab unterscheiden sich ($H_r < L_r$). Die durch die „geometrische“ Modellüberhöhung hervorgerufenen „Verfälschungen“ der Modell- gegenüber der Naturströmung hinsichtlich des Wasserspiegelgefälles können im Luftmodell gemäß Gleichung 4 bzw. 6 durch eine Variation der Modellrauheit (n_m bzw. λ_m) kompensiert werden.

Ähnlichkeit der Strömung in gekrümmten Stromabschnitten

Die Ähnlichkeit von Natur- und Modellströmung ist in diesem Falle erreicht, wenn das Verhältnis von Längs- und Quergefälle in Natur und Modell gleich ist:

$$I_{\text{Längs}} = \frac{\lambda \cdot v^2}{8 \cdot g \cdot r_{hy}} \quad (\text{Fließgleichung}) \quad (8)$$

$$I_{\text{quer}} = \frac{v^2}{g \cdot r} = \frac{v^2}{g \cdot L} \quad (\text{FROUDE-Zahl}) \quad (9)$$

$$\frac{I_{\text{Längs}}}{I_{\text{quer}}} = \text{const.} \Rightarrow \frac{\lambda \cdot L}{r_{hy}} = \text{const.}$$

Dies wird wiederum durch das Ähnlichkeitskriterium in Gleichung (6) gewährleistet.

Ähnlichkeit von Rückströmungsgebieten, Scher- und Ablösezonen bei Querschnittsänderungen

Die REYNOLDS-Zahl ist auch ein Kriterium für die Ähnlichkeit der Verluste an Einbauten. Bei flussbaulichen Untersuchungen ist „praktisch bei vielen Einbauten nur eine schwache oder gar keine Abhängigkeit von der Reynoldszahl festzustellen, wenn nämlich die Verluste durch Strömungsablösung an scharfen, quer zur Strömung liegenden Kanten entstehen...“ (KOBUS 1984). Dies betrifft die Größe des Verlustes mit Blick auf die Gesamtströmung.

Will man allerdings gerade Phänomene an solchen Unstetigkeitsstellen der Strömung – z. B. Wirbel und Walzen im Bühnenfeld – untersuchen, muss eine Ähnlichkeit des Energieaustausches in der Scherzone und damit der Ablöse- oder Einströmwinkel gewährleistet sein. Untersuchungen an Diffusoren (sich erweiternde Kanäle) zeigten, dass der kritische Öffnungswinkel α_c bei dessen Überschreitung in Strömungserweiterungen Ablösungsgefahr besteht, abhängig von der REYNOLDS-Zahl ist. Geht man davon aus, dass sich im hinter dem Bühnenkopf aufweitenden Strömungsfeld Einströmwinkel ausprägen, die sich mit zulässigen Erweiterungswinkeln bei Diffusoren vergleichen lassen, so wären folgende Beziehungen zu beachten (Tabelle 4):

Reynoldszahl in der Anströmung [-]	50 000	100 000	150 000	200 000	2 000 000
Erweiterungswinkel ohne Ablösung α [°]	10,0	8,4	7,6	7,1	4,0

Tabelle 4: Erweiterungswinkel von Diffusoren nach Eck (1988)

Da die REYNOLDS-Zahlen im Luftmodell eine bis zwei Zehnerpotenzen geringer sind als die der Naturströmung (siehe Beispiel in Tabelle 3), werden Form und Ausbildung von Rückstromzonen im Luft- (oder auch Wasser-) Modell und in der Naturströmung voneinander abweichen (siehe Tabelle 4).

Unter dem Gesichtspunkt der Ähnlichkeit von räumlichen Strömungsvorgängen wurde bisher gefordert, dass das Verhältnis L_r/H_r den Wert von 2 bis 3 nicht überschreiten (GILJAROV 1973, KOBUS 1984, NESTMANN und BACHMEIER 1987) soll. Unter bestimmten Umständen (z. B. bei der Untersuchung von Bauwerksüberströmungen) kann jedoch eine geometrische Überhöhung Modellierungseinflüsse aus der geringen REYNOLDS-Zahl kompensieren (siehe Tabelle 4).

Bei der Untersuchung in dreidimensionalen Modellen, die häufig mit einer zweifachen geometrischen Überhöhung betrieben werden, heben sich bei einigen Phänomenen (z. B. Überströmung von Schwellen oder Bühnen) die Wirkungen der vergrößerten Ablösewinkel und der verzerrten Strömung in der Vertikalen durch die geometrische Überhöhung weitgehend auf (Bild 9). Bei entsprechenden Untersuchungszielen kann somit eine geometrische Überhöhung sogar erforderlich sein, um einen naturähnlichen Ablösewinkel zu erreichen oder den Punkt, an dem das Fluid auf eine Berandung trifft, ähnlich abzubilden.

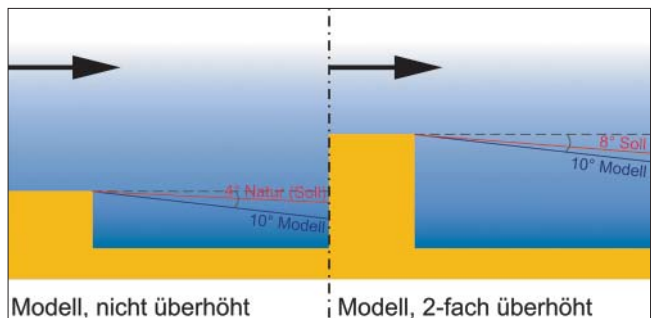


Bild 9: Beispiele für Strömung in überhöhten Modellen im Vergleich zur Naturströmung

Ähnlichkeit der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung

Soll eine angenäherte Ähnlichkeit der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung (mit Fokus auf den Bereich des Wasserspiegels) gewährleistet werden, muss bei der Modellplanung in Abhängigkeit vom geforderten Grad der Ähnlichkeit ein Modellierungsverfahren gewählt werden, dass die durch die Deckplatte eingetragene Verfälschung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung im Modell gegenüber der Natur ausrei-

chend kompensiert. Häufig legt man die Deckplatte höher, als es der maßstäblichen Übertragung des Wasserspiegels entspräche („zusätzliche Überhöhung“), um eine ähnliche vertikale Geschwindigkeitsverteilung in Natur und aerodynamischem Modell zu erreichen (Beschreibung in Kapitel 2.2). Beim Begriff der Überhöhung sind somit die „geometrische Überhöhung“ ($H_r < L_r$) und die „zusätzliche Überhöhung“ (Höherlegen der Deckplatte um ΔH_m zur Einhaltung einer naturähnlichen vertikalen Geschwindigkeitsverteilung) zu unterscheiden. Bei variabler zusätzlicher Überhöhung wird die zusätzliche Überhöhung in die geometrische Überhöhung einbezogen.

Die Ähnlichkeit der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung in Sohlhöhe kann durch Rauheitsvariation im Rahmen der Modellkalibrierung erreicht werden.

3.2 Ähnlichkeit des Geschiebetransports

Für Luftmodelle mit beweglicher Sohle sind neben den Ähnlichkeitsbeziehungen für die Fluidströmung zusätzlich Ähnlichkeitsbedingungen für den Geschiebetransport einzuhalten.

Wie für hydraulische Geschiebetransport-Modelle in ATV-DVWK 2003 und HENTSCHEL 2007a (im vorliegenden Heft) aufgezeigt wird, müssen auch in aerodynamischen Modellen zur Untersuchung verschiedener Geschiebetransportphänomene Ähnlichkeitsbedingungen eingehalten werden, die die Fluid- und Sediment-eigenschaften und die Flussgeometrie als Einflussgrößen berücksichtigen.

Generell wird angestrebt, die Ähnlichkeit

- des Geschiebebewegungsbeginns (Fr_r, D_r) und
- der Art des Geschiebetransports, der Größe der maßgebenden Transportkörper (Re_r, D_r)

einzuhalten.

Die Ähnlichkeit der

- transportierten Geschiebemassen (Frachten) und
- der morphologischen Zeitabläufe

wird bei aerodynamischen Transportmodellen meist nicht berücksichtigt.

Zwischen hydraulischem und aerodynamischem Geschiebetransport treten hauptsächlich folgende Unterschiede auf (FAS 1985 und 1987):

- Der Geschiebebewegungsbeginn in Luft- und Wasserströmung lässt sich z. B. für den hydraulisch rauhen Bereich mit Gleichungen der Form $v_c = A \cdot (\rho' \cdot g \cdot d)^{1/2}$ (10) darstellen. Dabei unterscheidet sich die Kon-

stante A für Luft- und Wasserströmung etwa um den Faktor 2

$A_{Luft} \cong 0,1; A_{Wasser} \cong 0,2$ (s. Bild 10).

Eine umfassende Erklärung für diesen Unterschied der Grenzkurven für den Bewegungsbeginn in Wasser- und Luftströmung fehlt in der Literatur nach wie vor.

In Bild 10 sind die Grenzkurven für den Bewegungsbeginn (SHIELDS-Kurve) in Wasser und Luft nach ZANKKE (1982) dargestellt. Dabei wurden die Parameter und Formeln aus der Tabelle in Bild 10 genutzt.

- Der Transport in der Luftströmung erfolgt mehr springend als in Wasser. Darüber hinaus spielt der Impuls, der durch den Zusammenstoß von bereits in Bewegung befindlichen Teilchen mit noch ruhenden Teilchen der Sohle eine größere Rolle als in der Wasserströmung (größere Geschwindigkeiten, größeres Verhältnis von Geschiebe- zu Fluid-dichte, siehe Tabelle 5). So ist die erforderliche Geschwindigkeit zur Einleitung der Teilchenbewegung durch die Luftströmung (Linie C in Bild 10) deutlich größer als die durch Teilchenstoß (Linie D in Bild 10). Mit Teilcheneintrag von oberstrom beginnt der Transport somit eher als ohne. Sind erst einmal Teilchen in Bewegung, nimmt der Transport schnell zu (Schneeballeffekt).

	Wasserströmung	Luftströmung	Verhältnis
Fluid-dichte [kg/m³]	1000	1,23	813
$\rho' = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$	1,65	2150	0,000767

Tabelle 5: Dichteverhältnisse in Wasser- und Luftströmung mit Sandgeschiebe

- Die geometrischen Maßstäbe der Luftmodelle lassen nur kleine Teilchen als Modellgeschiebe zu. Bei einem Geometriemaßstab von 1:500 entspricht der Korndurchmesser eines Modellteilchens mit 0,5 mm in der Natur 25 cm. Kleine Teilchen werden bei den hohen Fließgeschwindigkeiten in Luftmodellen sehr bald fliegend transportiert (Schwebstoffe). Dadurch ist einerseits die Ähnlichkeit des Transports nicht mehr gegeben und andererseits verstopfen Siebe in der Modellinstallation leicht. Gut realisierbar sind Modelle im Geschwindigkeitsbereich nahe des Bewegungsbeginns der Feststoffe.
- Der Transport der Schwebstoffe wird nicht naturähnlich abgebildet. Die Korndurchmesser des sich in Seitenbereichen (Buhnenfelder, Vorland) ablagernden Materials sind im Luftmodell im Vergleich zur Natur sehr groß, wodurch mit wachsenden Sedimentationen die Geometrie und damit die Strömungsverhältnisse verfälscht werden können.
- In den bisherigen Untersuchungen der BAW erhielt man in Luftmodellen mit überwiegend Sand unterschiedlicher mittlerer Korndurchmesser und Ungleichförmigkeit als Sohl- und Geschiebematerial Transportkörper, die als Riffel zu bezeichnen sind.

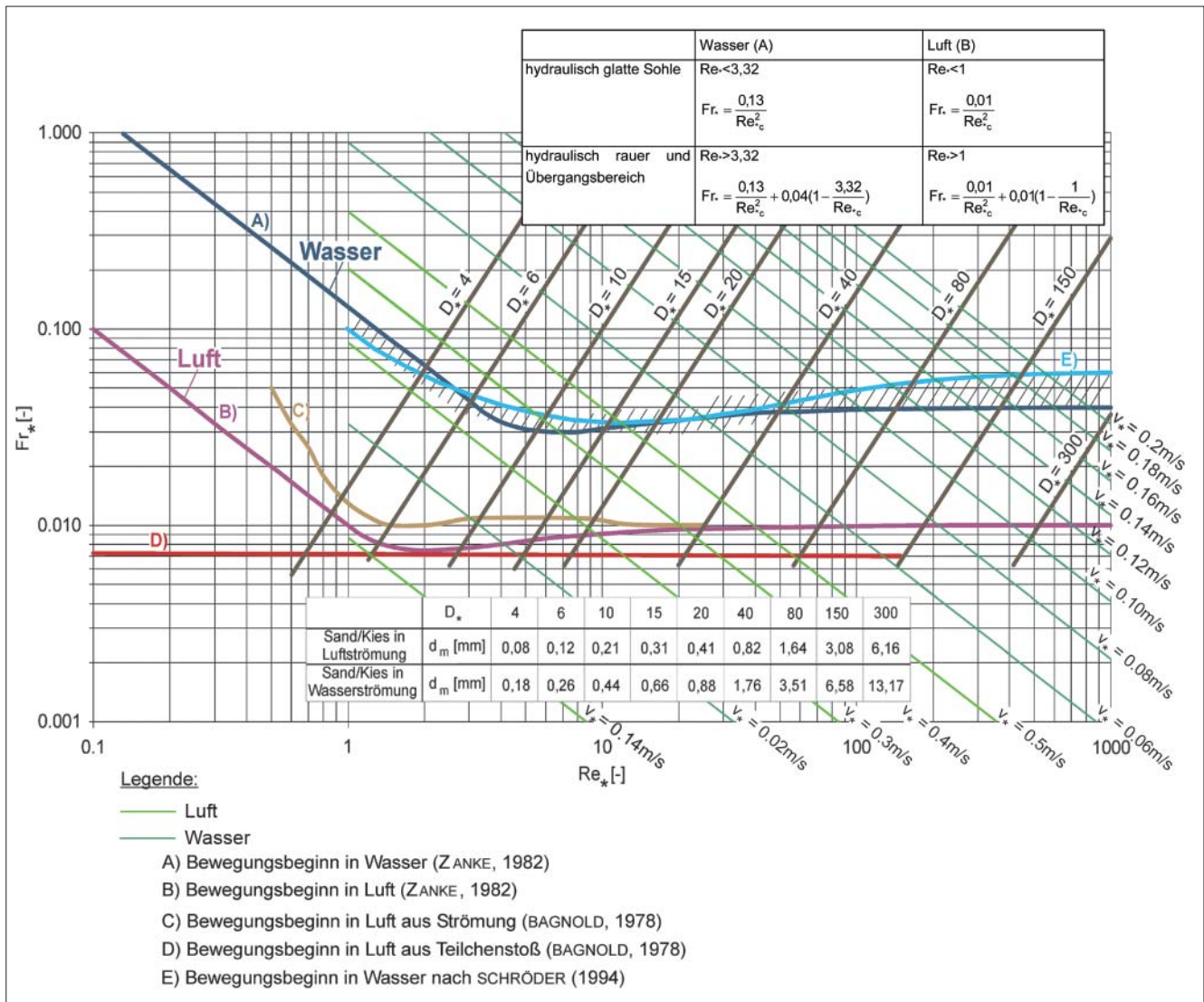


Bild 10: Geschiebetransportbeginn in Wasser- und Luftströmung nach Zanke (1982)

Im Luftmodell verläuft der Geschiebetransport somit wie in der Natur als „verzögerte“ Bewegung in Transportkörpern. Allerdings sind in der Natur in den meisten Untersuchungen an Flüssen die prägenden Transportkörper Dünen und Bänke. Bei der Übertragung der geometrischen Abmessungen der Modell-Riffel auf Naturverhältnisse mit Mittel- und Großformen (Dünen) war somit zwar eine Ähnlichkeit der Transportkörperhöhen zu erreichen, wohingegen die Längen der Transportkörper im Modell zu gering waren.

Bei aerodynamischen Geschiebetransport-Modellen liegen nur wenige Erfahrungswerte hinsichtlich der Ähnlichkeitskriterien und für den praktischen Versuchsbetrieb aus systematischen Untersuchungen vor (FAS 1985 und 1987).

Aerodynamische Geschiebetransport-Modelle können als Tracermodelle mit eingeschränkter Ähnlichkeit betrieben werden, wenn die zu untersuchenden Fragestellungen die Abstraktion entsprechend der oben ge-

nannten Besonderheiten des aerodynamischen Geschiebetransports zulassen.

Bei praxisrelevanten Untersuchungen wurden folgende **Ähnlichkeitsbedingungen für den abzubildenden Geschiebetransport** neben den Ähnlichkeitsbedingungen für die Fluidströmung (Kapitel 3.1) berücksichtigt:

Ähnlichkeit des Geschiebetransportbeginns

Grundsätzlich ist die Ähnlichkeit des Geschiebetransportbeginns gewährleistet, wenn das Verhältnis von Strömungsgeschwindigkeit v und der Geschwindigkeit, bei der sich das Sohlmaterial zu bewegen beginnt (v_c) in Natur und Modell gleich sind

$$\frac{v}{v_c} = \text{const.} \tag{11}$$

Zur Wahl eines geeigneten Sohlmaterials kann die Bedingung

$$D_s = d \left(\frac{\rho^* g}{v^2} \right)^{1/3} = \text{const.} \tag{12}$$

herangezogen werden. Bei gleichem sedimentologischem Korndurchmesser D , für die Geschiebematerialien in Wasser- oder Luftströmung (gleiche Gerade $D_s = \text{const.}$, siehe Bild 10) entsprechen die Zuordnungen der Materialien zu den Grenzkurven für den Geschiebebewegungsbeginn in Luft oder Wasser einander. Kommt in Luft- und Wasserströmung jeweils Sand als Geschiebematerial zum Einsatz folgt aus Gleichung (12) die Bedingung

$$d_n = 2,18 d_m. \quad (13)$$

Zusätzlich muss dann beachtet werden, dass der Korndurchmesser des Modellgeschiebes im Verhältnis zur Strömungstiefe nicht zu groß wird. Erhält man zu große notwendige Korngrößen für das Modellgeschiebe ($d_m > 0,05 t$), so kann im hydraulisch rauen Bereich, in dem für einen weiten Bereich Re_{*c} gilt

in Wasser	$Fr_{*c} = 0,04$,
in Luft	$Fr_{*c} = 0,01$	

von Gleichung 13 abgewichen werden. Es muss dann die Bedingung

$$\frac{v_*}{v_{*c}} = \text{const.} \quad (14)$$

eingehalten werden.

Ähnlichkeit der Art des Geschiebetransports

Bei der Untersuchung der Geschiebebewegung ist zu berücksichtigen, dass sich in Abhängigkeit von Fr_* und Re_* an der Sohle die maßgebenden Transportkörper als Dünen oder Riffel ausbilden. Das Verhältnis von Transportkörperhöhe Δ zu Transportkörperlänge Λ ist bei Riffeln größer als bei Dünen. Folgende Erfahrungswerte können als Richtgrößen dienen:

Wasserströmung mit Sandgeschiebe (hydraulisches Modell):	$\Delta/\Lambda \approx 125$ bis 160
Luftströmung mit Sandgeschiebe (aerodynamisches Modell):	$\Delta/\Lambda \approx 14$ bis 16 .

Aus den Untersuchungen in Wasserströmung sind folgende Faustregeln bekannt:

$D_s < 5$	keine Dünen
$D_s < 15$	Riffel, bei Steigerung der Geschwindigkeit Dünen
$D_s > 15$	Dünen

Aus praktischen Gründen können im aerodynamischen Modell nur Untersuchungen in der Nähe des Geschiebebewegungsbeginns durchgeführt werden, sodass keine Dünenbildung durch Steigerung der Geschwindigkeit erzwungen werden kann. Es kann aber eine Ähnlichkeit der Art des Transportes (mit oder ohne Transportkörper) und der Transportkörperhöhe erreicht werden. Deshalb sollte fraktioniertes Modell- und Naturgeschiebematerial mit ähnlichen Parametern zur

Kennzeichnung der Mischung (z. B. Ungleichförmigkeit U) eingesetzt werden.

Die Geschiebefrachten wurden bisher nur in systematischen Rinnenuntersuchungen für Wasser- und Luftströmung verglichen (FAS 1987). Für praxisrelevante Untersuchungen lassen sich jedoch keine belastbaren Umrechnungen der Geschiebefrachten aus dem Luftmodell für die Wasserströmung in der Natur vornehmen.

Da die Luftmodell-Untersuchungen bisher für stationäre Verhältnisse im Bereich des Geschiebebewegungsbeginns durchgeführt wurden, erfolgte die Bewertung der Transportverhältnisse über Vergleiche von Varianten durch die gemessene Sohlgeometrie.

Zeitmaßstäbe können für Luftmodelle nicht abgeleitet werden.

4 Modellplanung

4.1 Einsatzgebiete von Luftmodellen und Wahl der Modellierungsweise

Der Einsatz von Luftmodellen für flussbauliche Untersuchungen sollte immer dann erwogen werden, wenn

- räumliche Strömungsphänomene eine solche Rolle spielen, dass die Vereinfachung auf eine ein- oder zweidimensionale Strömung nicht zur Untersuchung aller Fragestellungen ausreichend ist;
- aus sehr vielen Varianten in Voruntersuchungen detaillierte zu untersuchende Vorzugsvarianten ausgewählt werden sollen;
- große hydraulische Flussmodelle aus Zeit-, Platz- oder Kostengründen nicht betrieben werden können;
- dreidimensionale numerische Modelle auf Grund der erforderlichen Rechenzeiten bei der komplexen Geometrie und Strömung (noch) nicht eingesetzt werden können;
- Phänomene des Geschiebetransports qualitativ aufgezeigt werden sollen. Luftmodelle können nacheinander mit fester und beweglicher Sohle betrieben werden.

Zur Planung und Begleitung von aerodynamischen (und hydraulischen) Modellen sind eindimensionale numerische Modelle des direkten und benachbarten Untersuchungsgebietes hilfreich.

Luftmodelle unterstützen ihrerseits häufig Untersuchungen mit eindimensionalen hydronumerischen Modellen, indem in Luftmodellen nicht oder wenig durchströmte Bereiche identifiziert werden, die in 1D-HN-Modellen von der Strömung ausgeschlossen werden müssen. Bei Hochwasserströmungen können in Luftmodellen die Strömungsrichtungen ermittelt werden,

sodass die Querprofile in weiten Vorlandbereichen in 1D-HN-Modellen senkrecht zur Hauptströmungsrichtung angeordnet werden können.

Wenn die aerodynamische Modellierung als Modellmethode zur Untersuchung flussbaulicher Fragestellungen erwogen wird, muss – wie bei allen Modellarten – analysiert werden, welche Abstraktionsgrade bei der Untersuchung der wesentlichen Phänomene zugelassen werden können. Für die Untersuchungen flussbaulicher Fragestellungen an Luftmodellen stehen grundsätzlich folgende Modellierungsverfahren zur Verfügung (Tabelle 6, vergleiche auch Kapitel 3):

Modellierungsweise	Bei flussbaulichen Untersuchungen
Gespiegeltes Modell	Praktisch selten einsetzbar (nur bei einfacher Geometrie).
Geometrisch nicht überhöhtes Modell mit und ohne zusätzliche Überhöhung	Praktisch kaum einsetzbar (zu geringe Strömungstiefen und Ähnlichkeitsprobleme).
Geometrisch überhöhtes Modell ohne zusätzliche Überhöhung	Bei kompakten Querschnitten ohne Untersuchung von Maßnahmen in Seitenbereichen einsetzbar.
Geometrisch überhöhtes Modell mit konstanter zusätzlicher Überhöhung	Bei kompakten Querschnitten ohne Untersuchung von Maßnahmen in Seitenbereichen einsetzbar.
Geometrisch überhöhtes Modell mit variabler zusätzlicher Überhöhung (verzerrtes Modell)	Bei strukturierten Querschnitten einzusetzen, wenn keine Bauwerksnahbereiche untersucht werden sollen.
Geometrisch überhöhtes Modell mit variabler zusätzlicher Überhöhung (verzerrtes Modell) mit zusätzlicher konstanter Überhöhung	Bei strukturierten Querschnitten einzusetzen, wenn verschiedene Durchflüsse untersucht werden sollen.

Tabelle 6: Aerodynamische Modellierungsverfahren

Bei den Planungen müssen die beiden Überhöhungsarten

- "geometrische Überhöhung" - innerhalb des modellierten Bereichs - Überhöhung, mit der die Modellgeometrie aufgebaut wird,
- "zusätzliche Überhöhung" – oberhalb des modellierten Bereichs – Überhöhung der Modellabflusstiefe zur Simulation der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung und der Durchflussanteile

gemeinsam betrachtet werden.

4.2 Planung eines Luftmodells mit fester Sohle

Die Aufgabenstellung bestimmt die Modellierungsweise des geplanten Luftmodells. Aus den Analysen der Naturdaten und den Voruntersuchungen mit eindimensionalen Modellen sind auftretende Probleme bekannt und erste Planungszustände können abgeleitet werden, sodass die Entscheidung hinsichtlich der wesentlichen zu untersuchenden Phänomene und Flussabschnitte auf diesen Ergebnissen aufbaut.

Erforderliche Schritte zur Wahl der Modellmaßstäbe bei der Planung von aerodynamischen Modellen sind im Flussdiagramm (Bild 11) zusammengefasst. Vorab muss entschieden werden, wie die Abbildung der vertikalen Geschwindigkeitsverteilung erfolgen soll (siehe

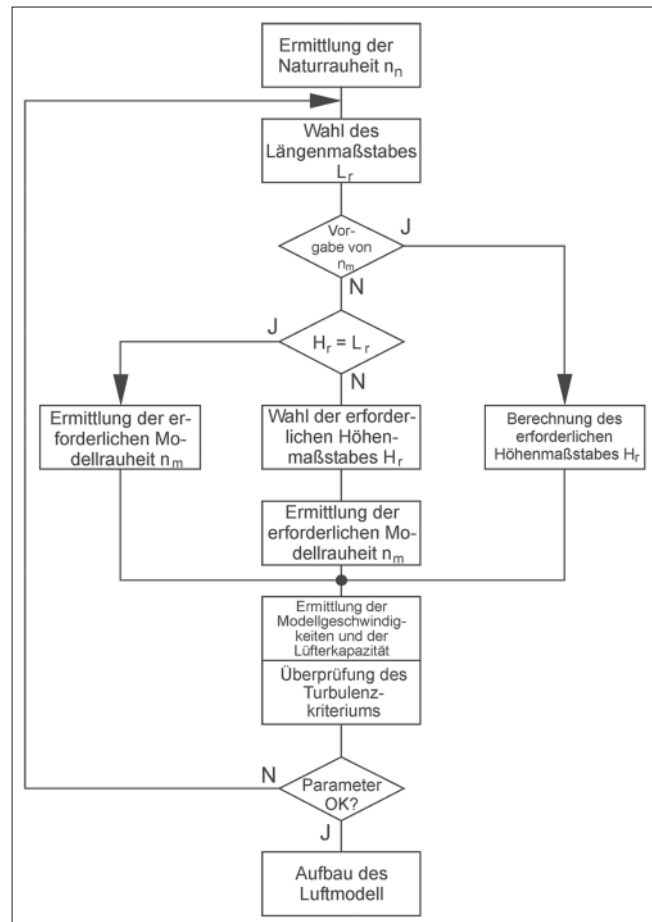


Bild 11: Flussdiagramm für die Wahl der Maßstäbe bei aerodynamischer Modellierung

Kapitel 2.2). Das Flussdiagramm setzt voraus, dass die Wahl einer Modellierungsart für die zusätzliche Überhöhung bereits getroffen wurde.

Festlegung der geometrischen Maßstäbe:

- Ermittlung des Natur-Rauheitsbeiwertes n_n für zu untersuchende Abflusszustände.
- Vorauswahl eines modelltechnisch günstigen Längenmaßstabes entsprechend der Aufgabenstellung unter Berücksichtigung der verfügbaren Platzkapazität.

Prüfen der Möglichkeit eines geometrisch nicht überhöhten Modells:

- Prüfen, ob die Strömungstiefen bei nicht überhöhtem Modell aus hydraulischen und messtechnischen Gründen ausreichend sind (Empfehlung: mittlere modellierte Tiefe $H_m > 10$ mm).
- Berechnung der erforderlichen Modellrauheit $n_m = n_n/L_r^{1/6}$ für geometrisch nicht überhöhte Luftmodelle entsprechend Gleichung (7) oder mit Hilfe von Bild 8.

Als Orientierung für die Größe der „zusätzlichen Überhöhung“ ($\Delta H_m = H_m' - H_m$) kann für die Modellplanung

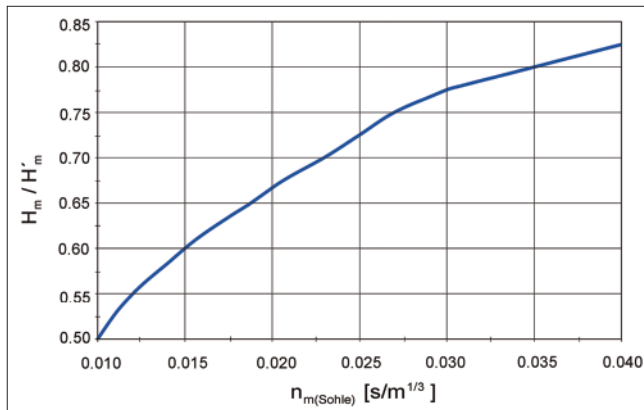


Bild 12: Abschätzung der Lage des Geschwindigkeitsmaximums für Luftmodelle mit Glasabdeckung in Abhängigkeit von der Sohlrauheit n_m

Bild 12 dienen, das auf Erfahrungen bei konstanter zusätzlicher Überhöhung beruht (GILJAROV 1973). Für die Acrylglasplatte wurde $n_{\text{Platte}} = 0,01 \text{ s/m}^{1/3}$ angesetzt. Diese Erfahrungswerte konnten durch Untersuchungen in der Bundesanstalt für Wasserbau bestätigt werden. Die Rauheitswerte des Gesamtmodells variieren in flussbaulichen Modellen letztendlich jedoch für ein Sohlenmaterial bedingt durch die unterschiedlichen anderen Rauheitsanteile (z. B. Form- und Transportkörperrauheit). Die von GILJAROV (1973) angesetzten Richtwerte für Modellrauheiten und Rauheitswerte in Luftmodellen (BAW) sind Tabelle 9 zu entnehmen.

In FAS (1985) wurden für verschiedene Druckgefälle, Fließgeschwindigkeiten und Fließtiefen, die in Luftmodellen auftreten können, Angaben zum Widerstandsbeiwert λ nach Darcy-Weisbach und zur äquivalenten Sandrauheit k für verschiedene Sohlmaterialien gemacht. Die Untersuchungen wurden in einer Rinne mit veränderlicher Strömungstiefe (10 bis 50 mm) und -breite (50 bis 300 mm) durchgeführt. Der Widerstandswert λ wurde bei Verfahren (a) für das Sohlmaterial aus dem gemessenen vertikalen Geschwindigkeitsprofil und bei (b) als Gesamtwiderstandswert aus den gemessenen mittleren Geschwindigkeiten und dem Druckgefälle mit

$$\bar{v}_* = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot H_m'}{L \cdot 2 \cdot \rho_F}} \quad \text{und} \quad \lambda = 8 \left(\frac{\bar{v}_*}{\bar{v}} \right)^2$$

abgeleitet (Tabelle 7).

Für neuere Untersuchungen ist in Tabelle 8 zur Berechnung des Gesamtwiderstandswertes

$$\lambda = 8g \frac{n^2}{r_{hy}}$$

benutzt worden.

Die Auswertung der vertikalen Geschwindigkeitsprofile steht noch aus.

Sohlmaterial	k [mm]	λ [-]	n [s/m ^{1/3}]	Verfahren
PVC (Polyvinylchlorid)	0,34	0,024	0,009	(a)
Gips-Sand-Gemisch	3,30	0,062	0,015	(a)

Sohlmaterial	$\Delta p/L$ [Pa/m]	H_m' [mm]	\bar{v} [m/s]	\bar{v}_* [m/s]	λ [-]	n [s/m ^{1/3}]	Verfahren
PVC (Polyvinylchlorid)	74	22	14,67	0,807	0,023	0,008	(b)
PVC (Polyvinylchlorid)	56	30	15,99	0,820	0,022	0,008	(b)
PVC (Polyvinylchlorid)	19	50	12,90	0,616	0,019	0,008	(b)
Gips-Sand-Gemisch	113	22	12,90	0,997	0,050	0,012	(b)
Gips-Sand-Gemisch	64	30	12,80	0,876	0,039	0,011	(b)
Gips-Sand-Gemisch	27	50	12,09	0,735	0,036	0,012	(b)

Tabelle 7: Parameter aus Gerinneversuchen mit Luftströmung (FAS, 1985)

Sohlmaterial	$\Delta p/L$ [Pa/m]	H_m' [mm]	\bar{v} [m/s]	n [s/m ^{1/3}]	λ [-]	Verfahren
Feste Oberfläche	154	30	27,5	0,0077	0,020	(b)
	104	30	21,8	0,0078	0,020	(b)
	56	30	15,5	0,0080	0,021	(b)
Polyurethan, fräsrâu, unlackiert	171	30	27,5	0,0080	0,021	(b)
	96	30	21,8	0,0077	0,020	(b)
	61	30	15,5	0,0085	0,024	(b)
Scharfkantige Körner aus Schleifkorund, elliptisch: a = 0,65 mm, b = 0,4 mm	285	30	27,5	0,0102	0,034	(b)
	193	30	21,8	0,0105	0,036	(b)
	96	30	15,5	0,0106	0,037	(b)
Sand, d _m = 0,8 mm	356	30	27,5	0,0116	0,044	(b)
	234	30	21,8	0,0118	0,046	(b)
	121	30	15,5	0,0120	0,047	(b)

Tabelle 8: Parameter aus Gerinneversuchen der BAW mit Luftströmung

n [s/m ^{1/3}]	Beschaffenheit der Sohle
Strömungsfluid: Luft (GILJAROV 1973)	
0,016	Sand d _m = 1,2 mm
0,0143	Sand d _m = 0,7 mm
0,013	Sand d _m = 0,4 mm
0,0125	Lack auf Sand (d _m = 0,7 mm)
0,009-0,011	Plastilin
0,0065	Spiegelglas
Gesamtrauheit	
Strömungsfluid: Luft (Flussmodelle, BAW)	
0,018	Gips-Korund-Modell Elbe bei Vockerode (HW), ohne modellierte Transportkörper
0,017	Gips-Korund-Modell Elbe bei Lenzen (HW), ohne modellierte Transportkörper scharfkantige Körner aus Schleifkorund, elliptisch: a = 0,65 mm, b = 0,4 mm
0,013	PUR, lackiert, Fräsmodell Oder bei Reitwein Kietz (MQ, überströmte Bauwerke) mit modellierten Transportkörpern
0,011	PUR, lackiert, Fräsmodell Oder bei Reitwein Kietz (MQ, umströmte Bauwerke) mit modellierten Transportkörpern

Tabelle 9: Ausgewählte Rauheitswerte in aerodynamischen Modellen

Notwendige Wahl eines geometrisch überhöhten Modells:

- Sollte sich bei der Wahl des Höhenmaßstabes eine aus messtechnischen Gründen zu geringe Modellhöhe H_m ergeben (H_m sollte im Flussbett $>10 \text{ mm}$ betragen), so muss unter Annahme einer erforderlichen geometrischen Überhöhung mit dem gewünschten Maßstab des hydraulischen Radius die Modellrauheit n_m ermittelt werden mit

$$n_m = \frac{n_n \cdot L_r^{1/2}}{r_{hy}^{2/3}} \quad \text{siehe (4)}$$

- Lässt sich die so ermittelte erforderliche Modellrauheit praktisch nicht realisieren, kann man für ein vorgegebenes Modellsohlmaterial der Rauheit $n_{m(ist)} \neq n_{m(soll)}$ und dem damit errechneten Rauheitsmaßstab n_r den Höhenmaßstab („geometrische Modellüberhöhung“) mit Hilfe der Gleichung (4) errechnen (siehe Bild 7).
- Führt der so errechnete Höhenmaßstab mit dem gewählten Längenmaßstab zu einer für die zu untersuchende Fragestellung zu großen geometrischen Überhöhung, muss die Wahl des Längenmaßstabs korrigiert werden. Wird eine variable zusätzliche Überhöhung gewählt, ist bei der Prüfung der geeigneten geometrischen Überhöhung zu berücksichtigen, dass in diesem Fall die zusätzliche Überhöhung in die geometrische Überhöhung einbezogen wird (siehe Tabelle 2).

Ermittlung der erreichbaren Modellfließgeschwindigkeiten:

- Überprüfung der ausreichenden Lüfterkapazität bei angestrebter mittlerer Modellgeschwindigkeit v_m und bekannten Parametern der Naturströmung
Beispiel: Annahme $v_m = 10$ bis 30 m/s und

$$v_r = \frac{v_n}{v_m}$$

$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right)_m = (\ln \cdot \rho_n \cdot g) \frac{r_{hy_r}^{4/3}}{v_r^2 \cdot n_r^2 \cdot \rho_r} \leq \left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{\text{Lüftergrenze}}$$

Überprüfung des Turbulenzkriteriums

Anzustreben ist, das Modell bei Geschwindigkeiten zu betreiben, die gewährleisten, dass der Durchfluss im Luftmodell im rau turbulenten Bereich erfolgt. Im Stadium der Modellplanung wird angenommen, dass die mittlere Fließgeschwindigkeit v_m im Hauptstrom im Modell 10 bis 30 m/s betragen soll. Für die noch relevanten Durchflussbereiche mit der geringsten mittleren Tiefe und den kleinsten Fließgeschwindigkeiten im betrachteten Modell (z. B. Flussvorland) wird die minimale Modellgeschwindigkeit, für die das Turbulenzkriterium (1) eingehalten werden kann, berechnet.

Mit $Re_{krit} = 7000$ und der Viskosität von Luft $\nu_m = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ergibt sich für Gleichung (1) mit

$$Re_m = \frac{v_m \cdot d_{hy}}{\nu_m} = \frac{v_m \cdot 4 \cdot r_{hy_m}}{\nu_m}$$

die Bedingung

$$v_m \geq \frac{7000 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{4 \cdot r_{hy_m}}$$

Unter der Annahme

$$r_{hy_m} = \frac{H'_m}{2}$$

ergibt sich die Forderung

$$v_m \geq \frac{0,0525 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}}{H'_m}$$

Weitere für die Versuchsplanung relevante Randbedingungen

- Strömungsgünstige Ausbildung des Modellein- und -auslaufs.
- Ausreichende Einlauflänge zur Ausbildung des turbulenten Geschwindigkeitsprofils. Nach FAS (1985) können folgende Kennzahlen bei der Modellplanung heran gezogen werden (Einlauflänge L_E , Gesamtströmungstiefe H'_m):
 - ohne Einbauten zur Strömungsberuhigung (Stolperschwelle und Turbulenzgitter) $L_E/H'_m \approx 70$,
 - mit Stolperschwelle und Turbulenzgitter $L_E/H'_m \approx 20$.
- Bei Geschiebetransportmodellen ist im Anschluss an die Einlauflänge L_E eine zusätzliche Anlaufstrecke für die Ausbildung der konstanten Geschiebebewegung vorzusehen (ca. 1 bis 1,5 m).

Fazit

Aus den genannten Ähnlichkeitskriterien und Randbedingungen erkennt man folgende prinzipielle Zusammenhänge für die Modellplanung:

- Bei vorgewähltem Längenmaßstab und bekanntem Rauheitswert der Naturströmung kann man nur die Größe der Modellrauheit (Material) **oder** die Größe der geometrischen Überhöhung frei wählen.
- Relativ glatte Modelle (Plastilin) ermöglichen die ähnliche Wiedergabe der Naturströmung bei häufigen Werten der Naturrauheit ($n = 0,030$ bis $0,035 \text{ s/m}^{1/3}$) nur bei großen Flüssen, da ein Längenmaßstab von $L_r \geq 800$ gewählt werden muss.
- Kleine Naturrauheiten ermöglichen die Untersuchung in großen Modellen geringer Rauheit.
- Geometrische Modellüberhöhungen ($H_r < L_r$) ermöglichen den Einsatz von Modellen mit höherer Rauheit als bei nicht überhöhten Modellen.
- Die Wahl der Modellierungsweise wird von der Art der zu untersuchenden Fragestellungen wesentlich beeinflusst. Bestimmte Mess- und Untersuchungsverfahren sind nur bei einigen Modellierungsverfahren einsetzbar. So ist es z. B. nicht möglich, in einem Luftmodell mit extrem rauer Sohle die Sohlstromlinien mit Hilfe eines Erosionsverfahrens (Kapitel 6.2.1) sichtbar zu machen.
- Variable zusätzliche Überhöhungen führen gegenüber der konstanten Überhöhung zu einer stärkeren Verzerrung (geometrische Überhöhung) der Model-

le bei gleicher ursprünglich angenommener, geometrischer Überhöhung.

5 Modellaufbau

Luftmodelle werden in der Regel auf Tischen aufgebaut. Als Grundplatten dienen meist Kristallglas-Tafeln, neuerdings auch lagestabile, plane Kunststoff-Tafeln. Eine gut dichtende Modellumrandung ermöglicht die höhengenaue Auflage der Abdeckplatten aus Kristall- oder Acrylglas. Das gesamte Modell muss so gedichtet werden, dass trotz erheblichem Unterdruck im Modell kein ungewollter Lufteinzug erfolgt. Weiterführende Erläuterungen zum Modellaufbau finden sich in FAULHABER (1986).

Wesentlich für den Betrieb von aerodynamischen Modellen ist der detailgetreue Aufbau des zu untersuchenden Geländes im geeigneten Maßstab. In der Vergangenheit wurden analog zum Aufbau von hydraulischen Modellen auch aerodynamische Modelle mit Hilfe von Querprofilen erstellt, die in der Natur im Abstand von 25 bis 100 m gemessen wurden. Zwischen diesen Querprofilen konnte das Gelände im Modell nur an Hand von Karten und Fotos angepasst werden. Das Gelände wurde zwischen den Querprofilen mit Plastilin oder einem Gips-Sand-Gemisch modelliert und anschließend mit einem Farbanstrich versehen.

Beim Modellaufbau wird das Gelände entsprechend des mittleren Tal- bzw. Wasserspiegelgefälles so geneigt, dass es in einer horizontalen Ebene liegt. Dies erfolgte bei der herkömmlichen Modellierung nur für die durch Querprofile abgebildeten Stationen bezogen auf die Flussachse mit einem konstanten Wert für die gesamte Querprofilbreite.

Das Wasserspiegelgefälle der Natur wird im Modell durch das Druckgefälle abgebildet. Um im Modell naturähnliche Wasserspiegel- resp. Druckgefälle zu erhalten, muss dabei im Rahmen der Modellkalibrierung ggf. eine erhöhte Rauheit durch aufgeklebte Körnungen (Sand, Korund) erreicht werden.

Aus der Natur stehen über Laserscan-Befliegungen des Geländes und Flächenpeilungen der Gewässer- sohle zunehmend umfangreiche Punkt-Informationen des gesamten Untersuchungsgebietes zur Verfügung, die für den Aufbau von numerischen und Maßstabs-Modellen genutzt werden können. Die gescannten Oberflächendaten werden dazu von Bewuchsinformationen befreit (digitales Geländemodell). Da an die BAW in der jüngsten Vergangenheit zunehmend Fragestellungen herangetragen wurden, bei denen aus ökologischen Gründen Regelbauwerke nicht mehr vollständig entsprechend der technischen Sollparameter gebaut oder instand gesetzt werden, sondern naturähnliche Strukturierungen behalten sollen, müssen Geländemodelle in der Lage sein, kleinräumige Strukturen

abzubilden. Für aerodynamische Modelle konnte eine neue Methode der Geländemodellierung – das Bahn- (Schicht-)Fräsverfahren – zum Einsatz kommen, die hier kurz vorgestellt werden soll.

Beispiel Luftmodell Reitwein-Kietz

Das Luftmodell der Oder bei Reitwein-Kietz, Od-km 603,8 bis 606,7 (Bild 13), das im Jahr 2004 erstmals mit einem Bahnfräsverfahren erstellt wurde, bildet eine Strecke von 2,9 km im Längenmaßstab 1:350 und im Höhenmaßstab 1:175 ab. Da mittlere Durchflüsse untersucht wurden, beschränkte sich die Modellierung des durch weite Vorländer charakterisierten Geländes auf den ufernahen Bereich. Es wurde eine konstante zusätzliche Überhöhung vorgesehen.

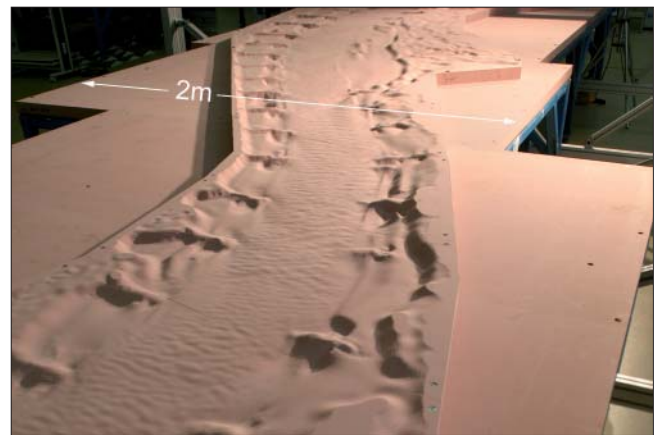


Bild 13: Luftmodell der Oder bei Reitwein-Kietz ohne Farbanstrich

Grundlage der Modellgeometrie waren Punktinformationen in Form von Befliegungs- und Flächenpeilungen, die mit den Daten aus terrestrischen Vermessungen (Querprofile, Einzelobjekte) verschnitten wurden. Es wurde ein Geländemodell im Raster von 2498 x 2498 Elementen erstellt. In der Natur entspricht das Rasterabständen von 87,5 x 87,5 cm und im Modell 2,5 x 2,5 mm.

Bei der Umrechnung des Natur-Geländemodells in Modellhöhen wurde das Gelände über eine Ebene (Talgefälle), die mit drei Höhenpunkten beschrieben wird, gekippt.

Im Modellbetrieb wurden sowohl die Topografiedaten in Lage und Höhe als auch die Lageinformationen der Messdaten (z. B. bei Geschwindigkeitsmessungen) mit Hilfe einer Helmert - Transformation, von den Lage- und Höhensystemen der Natur in die des Modells und umgekehrt transformiert. Auf diese Weise wurde auch die Lagegenauigkeit beim Zusammenfügen des Modells aus 20 Kacheln (Bild 14) überprüft (Tabelle 10).

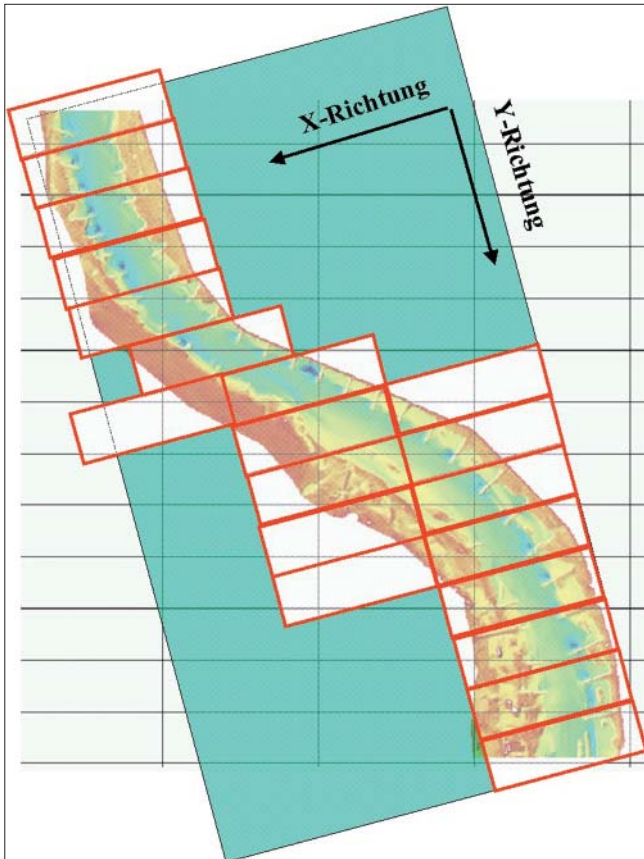


Bild 14: Aufteilung des Modells in 20 Kacheln

	Modell	Natur
mittlerer Fehler	1,80 mm	0,630 m
Standardabweichung	1,45 mm	0,508 m

Tabelle 10: Lagegenauigkeit des Luftmodells Oder bei Reitwein-Kietz

Zur Herstellung des stark strukturierten Geländes für das Luftmodell wurde ein Mehrachsenbahnfräsverfahren genutzt. Es kam ein Kugelfräser mit einem Kopfdurchmesser von 16 mm bei 3 mm Fräsversatz zum Einsatz. Damit konnte eine für das Luftmodell vorteilhafte, definierte raue Oberflächenstruktur erreicht werden (Bild 15). Als Modellmaterial wurde ein Polyurethan (PUR)-Hartschaum der Dichte 500 kg/m³ eingesetzt, der sich in den Materialtests hinsichtlich erforderlicher Festigkeit, Bearbeitungsmöglichkeit und chemischer Beständigkeit bewährte. Nach ersten Erfahrungen mit dem Odermodell ist künftig ein Polyurethan höherer Dichte zu empfehlen. Zum Fräsen wurde das Modell aus zwanzig 50 mm dicken Kacheln 1500 mm x 500 mm zusammengesetzt (Bild 14).

Geländebereiche, die durch die konstante zusätzliche Überhöhung überströmt würden, obwohl sie beim untersuchten Durchfluss in der Natur trocken fallen, wurden mit Gummipplatten abgeklebt (Bild 15). Im Rahmen der Modellkalibrierung mussten in diesem Modell keine zusätzlichen Rauheiten aufgebracht werden. Die im

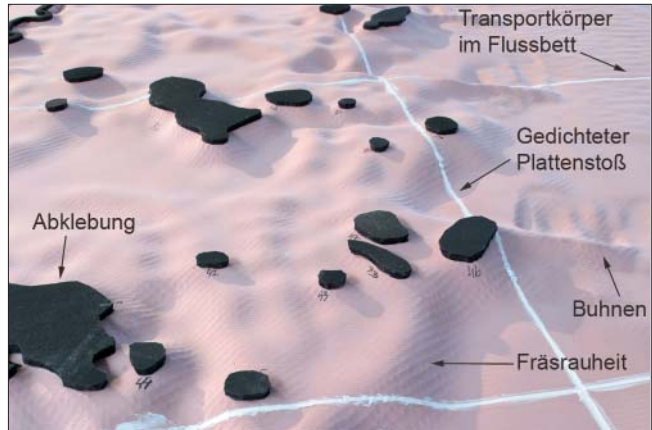


Bild 15: Modellausschnitt mit sichtbarer Oberflächenstruktur, „Ablenkung“ nicht überströmter Bereiche und gedichteten Plattenstößen

Luftmodell exakt nachgebildete Strukturierung des Geländes (Uferstrukturierung, Transportkörper vgl. Bild 13) erzeugte in Verbindung mit der belassenen Rauheit der Oberfläche aus dem Fräsvorgang für eine ausreichende Rauheit, um ein naturähnliches Druckgefälle zu erreichen.

6 Messtechnik

Die Messtechnik bei aerodynamischer Modellierung ist in der Vergangenheit verschiedentlich dargestellt worden (GILJAROV 1973, LJATCHER/PRUDOVSKI 1971 und 1984, FAULHABER 1986, NESTMANN und BACHMEIER 1987). Seither ermöglichte der technische Fortschritt für Luftmodelle den Einsatz neuer Messverfahren nicht nur im wissenschaftlichen Laborbetrieb, sondern auch bei Untersuchungen praxisrelevanter Aufträge des Verkehrswasserbaus. Einige Neuerungen sollen hier vorgestellt werden. Die eigentliche Messtechnik wird dabei nicht näher erläutert, da es sich bei den Messgeräten um auf dem Markt verfügbare Messsysteme handelt. Es werden Beispiele für die Automatisierung der Messvorgänge und die Ergebnisauswertung im Rahmen von Aufträgen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung vorgestellt.

Grundsätzlich werden in aerodynamischen Strömungsmodellen in der BAW die in Tabelle 11 dargestellten Messmethoden eingesetzt:

Besonders für Durchfluss- und Druckmessungen müssen die Klimabedingungen im Labor sorgfältig dokumentiert werden, um die wechselnden Fluideigenschaften (z. B. Dichte) berücksichtigen zu können. Beim Betrieb von Luftmodellen wird als charakteristischer Durchfluss der Varianten bei einem stationären Naturdurchfluss der Betriebsvolumenstrom konstant gehalten. Da einige Durchflussmessgeräte den Normvolumenstrom angeben, muss mit Hilfe der vom Klima abhängigen Fluideigenschaften der Betriebsvolumenstrom berechnet werden.

Parameter	Messmethode
Druckgefälle als Kriterium für das Wasserspiegelgefälle	statische Drucksonden mit Druckaufnehmer
Fließgeschwindigkeit (Größe und ggf. Richtung):	
Strömungsrichtung	Nebelfluid, Erosionsmethode, Fadensonde
Geschwindigkeitsmessungen in horizontalen Ebenen	Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)
Geschwindigkeitsmessungen in Querschnitten	Hitzdrahtanemometer (HDA), Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)
Erfassung von Strömungsstrukturen	Particle Image Velocimetry (PIV)
Durchfluss	Gesamtdurchflussmessung mit Volumenstrommessern (Wirbel-Durchfluss-Messer oder HDA) in definierten Messstrecken (Rohrleitung) sowie Kontrolle über HDA- und LDA-Messungen in Querprofilen des Modells
Topografie	Laserscan oder Nivellement
Temperatur, Luftdruck und -feuchte	Klimastationen

Tabelle 11: In Luftmodellen eingesetzte Messmethoden

6.1 Geometrievermessung

Die Modelle werden im Hauptuntersuchungsbereich meist von einer zweiachsigen Traversiervorrichtung (Bild 16) überdeckt, auf der verschiedene Sensoren (Laser-Abstandsmesser, Laser-Doppler-Anemometer) angebracht werden können. Der Laser-Abstandsmesser dient zum Scannen der Modelltopografie und wird durch einen Rechner gesteuert über die zu vermessende Oberfläche verfahren. Die minimale Schrittweite beträgt 1 mm, die Genauigkeit der Höhenmessung ist < 0,1 mm.

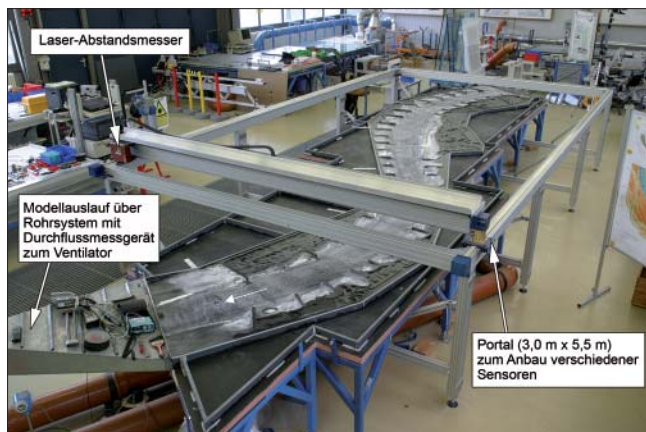


Bild 16: Modell mit Strömungssichtbarmachung nach Erosionsmethode

Die gescannte Modelltopografie wird in Naturdaten transformiert, sodass die verschiedenen digitalen Geländemodelle der Naturmessungen und der Modell-Varianten verglichen werden können.

Auf diese Weise wird auch eine Qualitätskontrolle für das Luftmodell (Vergleich Soll-Ist der eingebauten Variante) durchgeführt. Aus den Geländemodellen lassen sich grafische Darstellungen (z. B. für Planungsunterlagen) ableiten.

Für den Modellauf- und -umbau kann ein Markierungsstift am Portal angebracht werden, mit dessen Hilfe die aus Planunterlagen transformierte Lage- und Höhenkoordinaten präzise auf das Modell übertragen werden.

6.2 Strömungsgeschwindigkeit

Mit Hilfe der Luftmodelle können sowohl qualitative als auch quantitative Angaben zur Strömung erhoben werden. Schnelle Aussagen zur Ausprägung der Strömung (qualitativ) sind über das Sichtbarmachen der Strömung für eine Vorauswahl von Varianten besonders wichtig.

Zur Messung der Geschwindigkeiten in Luftmodellen werden in der BAW zwei Verfahren genutzt: die Hitzdraht-Anemometrie (HDA) und die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA). In den aerodynamischen Flussmodellen wird häufig HDA für die Messung von Geschwindigkeiten in Querprofilen und LDA für Messungen in horizontalen Ebenen eingesetzt.

Particle Image Velocimetry (PIV) wurde für verkehrswasserbauliche Untersuchungen auf Grund des großen Aufwandes und des kleinen realisierbaren Messareals bisher über Sondermessungen hinaus nicht als Standardverfahren eingeführt.

6.2.1 Strömungssichtbarmachung

Die Möglichkeit, die sohlennahe Strömung sichtbar zu machen und somit schnell einen guten Überblick über das Strömungsgeschehen zu gewinnen, ist einer der Gründe, weshalb Luftmodelle zum Einsatz kommen. Im Luftmodell können auch räumliche Strömungseffekte sichtbar gemacht werden.

Mit Hilfe verschiedener Verfahren der Strömungssichtbarmachung (MERZKIRCH 1987) können unterschiedliche Informationen (diskret, gemittelt) zur Strömung an verschiedenen Orten (an der Oberfläche oder nah der Sohle) erhalten werden. Einige der Verfahren für aerodynamische Flussmodelle sind in (NESTMANN und BACHMEIER 1987) und (FAULHABER 1998) erläutert. Bei den Verfahren muss gewährleistet sein, dass eingebrachte Partikel, die die Strömung sichtbar machen sollen, leicht der Strömung folgen.

Im Folgenden werden die Verfahren vorgestellt, die in den letzten 10 Jahren hauptsächlich in der BAW zum Einsatz kamen:

Beim **Erosionsverfahren** wird ein Petroleum-Talkum-Gemisch auf die Modelloberfläche aufgebracht und sofort der Strömung ausgesetzt. In Bereichen starker Strömung werden die weißen Talkumteilchen bewegt und bilden die Stromlinien an der Sohle ab (Bild 17, Bild 22). Weiße Flächen deuten auf langsam durchströmte Sedimentationsbereiche hin. Bei diesem Verfahren wird die sohlennahe, für den Geschiebetransport wesentliche Strömung sichtbar gemacht.



Bild 17: Oder bei Reitwein-Kietz: Erosionsverfahren – Bereich am Ende des Parallelwerks, Bauwerke umströmt

Bei **Nebelfluidinjektionen** wird Nebel, der durch Verspraying eines erhitzten Wasser-Alkohol-Gemisches unter Druck in einem so genannten Nebelgenerator außerhalb des Luftmodells entsteht, am Modelleinlauf oder durch Kanülen in definierter Höhe unter der Modelldeckplatte in das Luftmodell eingeleitet. In Bereichen geringer Strömungsgeschwindigkeiten/Turbulenzen – wie in Bild 18 im weiten Vorland nach einer Deichrückverlegung – bleibt der Nebelstrahl über eine lange Strecke sichtbar, während sich im Bereich der schnellen Hauptströmung der eingeleitete Nebel schnell mit der Luft vermischt. Mit dieser Methode wird die über die gesamte oder einen Teil der Strömungstiefe integrierte Strömungsrichtung sichtbar gemacht.

Die beschriebenen Verfahren erlauben die fotografische Dokumentation der großskaligen stationären Strömungsmuster. Darüber hinaus sind zur Bewertung von wasserbaulichen Varianten auch **zeitliche Entwicklungen** von Interesse. In diesem Zusammenhang wurden bisher Videoaufnahmen der Sohlentwicklung bei aerodynamischen Geschiebetransport-Modellen eingesetzt. Die Sohlbewegung wurde ausgehend von einer ebenen Sohle bis zur Ausprägung von Transportkörpern aufgenommen. Zum besseren Vergleich der Sohlentwicklung bei verschiedenen Varianten lassen sich die Videoaufnahmen im Zeitraffer betrachten.

Versuche mit dem Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera (HENTSCHEL, KAUTHER 2000) für die Betrachtung von Strömungsmustern der Luftströmung waren bisher nicht zufrieden stellend, da Teilchen, die leicht der Strömung folgen, zu klein sind, um mit der Hochgeschwindigkeitskamera gut sichtbar gemacht werden zu können. Der Einsatz einer aufwändigen Technik mit Laserlichtschnitt und Hochgeschwindigkeitskamera brach-

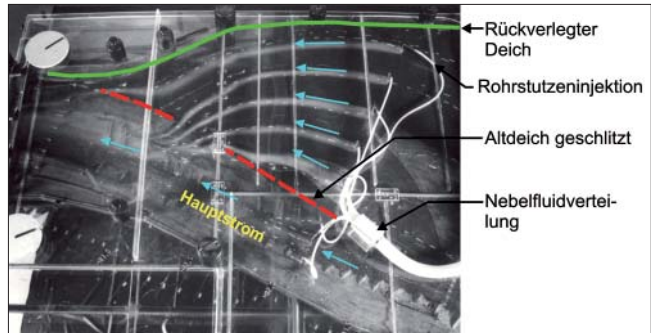


Bild 18: Elbe bei Lenzen: Nebelfluidinjektion zur Strömungssichtbarmachung im Flussvorland

te für die verkehrswasserbaulichen Standarduntersuchungen bisher keinen angemessenen Erkenntnisgewinn.

6.2.2 Geschwindigkeitsmessung mit Hitzdraht-Anemometrie

Die Hitzdraht-Anemometrie (HDA) beruht auf der Bestimmung des Wärmeverlustes eines elektrisch beheizten Drahts, der in die Luftströmung geführt wird. Je höher die Strömungsgeschwindigkeit, desto höher ist der Wärmeverlust des Drahts. Bei der Konstante-Temperatur-Anemometrie (CTA) wird der Widerstand des Drahtes und damit die Temperatur durch Regeln der elektrischen Stromstärke konstant gehalten, wodurch sich als Messgröße die elektrische Spannung ändert. Die Abhängigkeit der Spannungsänderung von der Strömungsgeschwindigkeit wird mit einer Kalibrierung im Freistrahler ermittelt (BRUUN 1995).

Man unterscheidet Ein- oder Zweidraht-Sonden. Eindraht-Sonden werden in Flussbereichen eingesetzt, in denen die Strömungsrichtung über die Zeit und die Messlotrechte konstant ist. Die Strömungsrichtung wird vor der Messung mit Tracern oder Fadensonden bestimmt (ein Winkel zum Profil je Messlotrechte). Die Geschwindigkeit wird in dieser Strömungsrichtung gemessen. Über den gemessenen Winkel können die Komponenten (senkrecht und parallel zum Querprofil) ermittelt werden.

Mit Hilfe von Zweidraht-Sonden lassen sich die Richtungskomponenten v_x und v_y in der Strömungsebene mit Hilfe zweier übereinander angeordneter Drähte bestimmen. Bei vorheriger Kalibrierung kann ein Strömungssektor von ca. $\pm 40^\circ$ erfasst werden. Bei Zweidraht-Sonden ist das Messvolumen deutlich größer als bei Eindraht-Sonden (angeströmte Messfläche: Eindraht-Sonde $0,004 \text{ mm}^2$, Zweidraht-Sonde $0,9 \text{ mm}^2$).

Als Beispiel für die Anwendung der Hitzdraht-Anemometrie werden exemplarisch Messergebnisse des Odermodells bei Reitwein-Kietz vorgestellt. Die Modellmessergebnisse sind mit Hilfe der Maßstabszahlen auf Naturverhältnisse umgerechnet. Die Auswertungen der

Geschwindigkeitsmessungen in Querprofilen erfolgten mit dem Programm >FLIEGE< (HENTSCHEL 2007b, in diesem Heft).

Es wurden Strömungsgeschwindigkeiten in vier Querprofilen mit bis zu 36 Messlotrechten je Profil gemessen. Die Messlotrechten befinden sich im Abstand von 3 cm (Natur 10,5 m) auf dem Profil. Die Messpunkte in einer Lotrechten haben einen vertikalen Abstand zwischen 0,5 mm an der Sohle (Natur 8,75 cm) bis 4 mm im Bereich des Strömungsmaximums (Natur 70 cm). Es wurde in Hauptströmungsrichtung mit Eindraht-Hitzdrahtsonden gemessen.

Die Messungen in den Querprofilen wurden zum einen zur Kontrolle des Durchflusses entlang des Modells genutzt (Prüfung der Modelldichtheit). Zum anderen wurden die Durchflussanteile für einzelne Querschnittsbereiche bestimmt. So konnte der hinter einem Parallelwerk abgeführte Durchflussanteil bestimmt werden. Bild 19 zeigt das gleiche Profil bei zwei verschiedenen Varianten. Die Messungen wurden hier mit dem Finite-Differenzen-Verfahren (HENTSCHEL 2007b, in diesem Heft) ausgewertet.

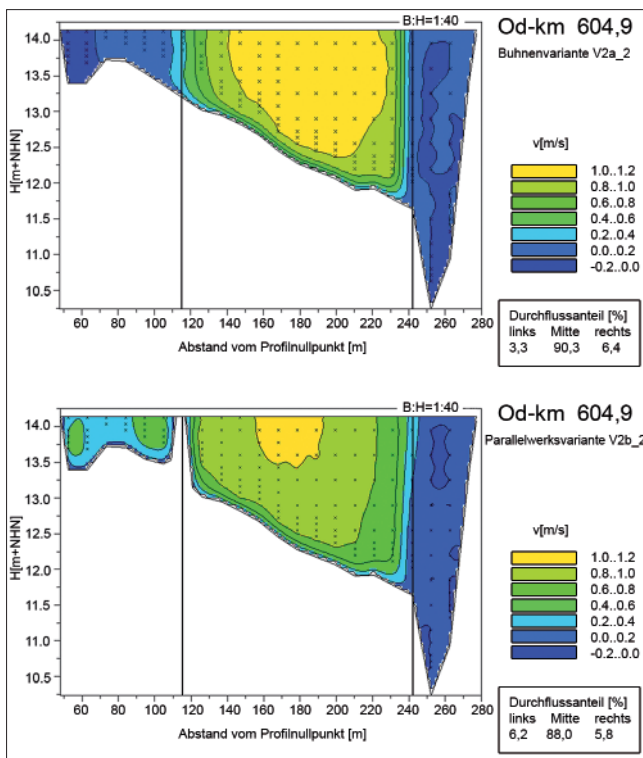
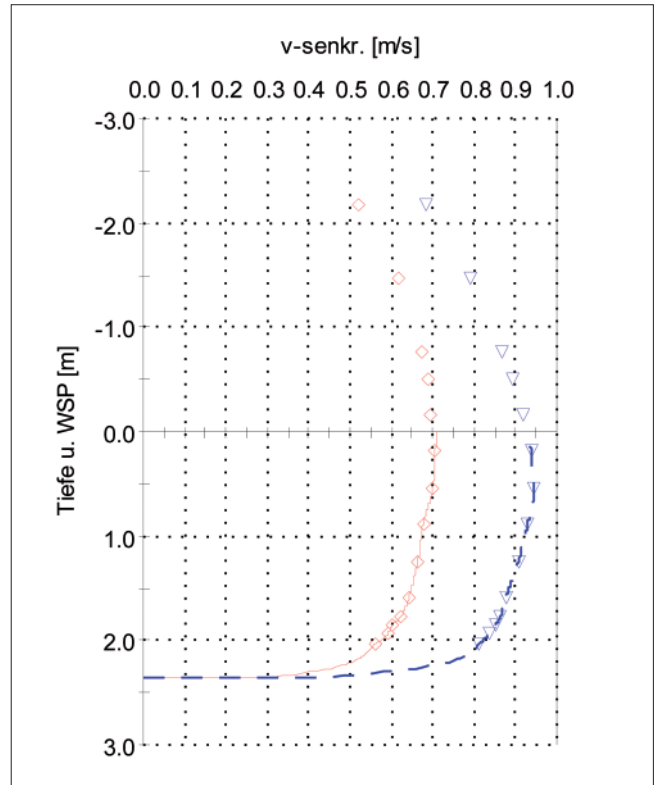


Bild 19: Isotachendarstellung der Geschwindigkeit senkrecht zum Profil (HDA)



	V2a_2	V2b_2
Abstand vom Profil-Nullpunkt [m]	230,98	230,98
Wassertiefe [m]	2,36	2,36
Mittlere Geschwindigkeit v_m [m/s]	0,88	0,64
Geschw. am Wasserspiegel v_{WSP} [m/s]	0,93	0,71
Maximale Geschwindigkeit v_{max} [m/s]	0,94	0,71

Bild 20: Vertikale Geschwindigkeitsverteilung in einer Messlotrechten (HDA) für zwei Varianten

Für Bild 20 und Bild 21 wurden die Messungen entsprechend der Pegelvorschrift (LAWA, BMV, 1998) ausgewertet. In Bild 20 sind die Geschwindigkeiten über der Wassertiefe jeweils in der gleichen Messlotrechten für zwei Varianten dargestellt. Im Luftmodell werden zur Ermittlung des Gesamtdurchflusses auch im nicht modellierten Bereich oberhalb des angenommenen Wasserspiegels Geschwindigkeiten gemessen. Zur Variantenbewertung wird nur der modellierte Durchflussbereich unter dem angenommenen Wasserspiegel (bei Tiefe 0) ausgewertet (Werte v_m , v_{WSP} und v_{max} in Bild 20).

In Bild 21 sind für eine Regelungsvariante mit Buhnen (V2a) und mit Parallelwerk (V2b) die mittleren Geschwindigkeiten in den Messlotrechten unter dem Wasserspiegel aufgetragen.

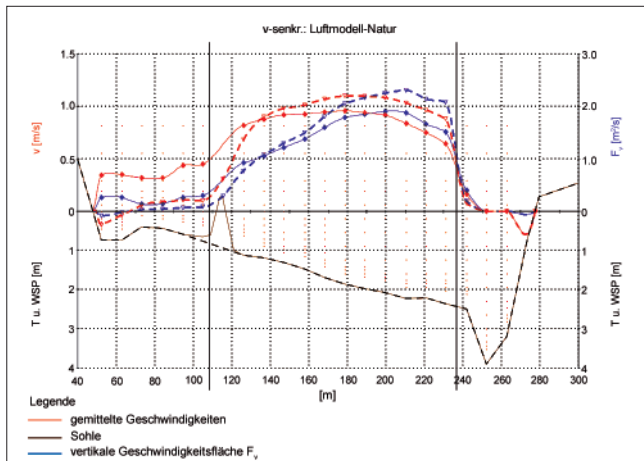


Bild 21: Horizontale Geschwindigkeitsverteilung bei nicht überströmten Bauwerken (HDA)

6.2.3 Geschwindigkeitsmessung mit Laser-Doppler-Anemometrie

Laser-Doppler-Anemometrie nutzt die Gegebenheit, dass kohärente Lichtwellen, die von bewegten Phasengrenzflächen gestreut werden, eine Doppler-Frequenzverschiebung aufweisen und somit Geschwindigkeitsinformationen enthalten (ALBRECHT et al. 2004).

Bei LDA wird der Lichtstrahl eines Lasers in zwei Teilstrahlen gespalten. Die beiden Teilstrahlen werden mit einer Konvexlinse fokussiert und am Brennpunkt der Linse zum Schnitt gebracht. Am Schnittpunkt der beiden Laserstrahlen befindet sich das Messvolumen, das in der Strömung an der gewünschten Messstelle positioniert wird (Bild 22). Quert ein im Fluid suspendiertes Streuteilchen dieses Messvolumen, wird vom Empfänger ein Streulichtsignal registriert. Im Fall von Luftströmung dient in der BAW Nebel aus einem Wasser-Alkoholgemisch (siehe Kap. 6.2.1) als Streuteilchenquelle. Wenn die Streuteilchen hinreichend klein sind und keine Eigendynamik entwickeln, ist ihre Geschwindigkeit als lokale Geschwindigkeit des Fluids anzusehen.

Durch die Verwendung zweier Laserstrahlen können die horizontalen Richtungskomponenten v_x und v_y der Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Die vertikale Geschwindigkeitskomponente wurde in den bisherigen Untersuchungen vernachlässigt.

In den Luftmodellen für verkehrswasserbauliche Untersuchungen wird in der BAW 2D-LDA zur Ermittlung der Richtungskomponenten der Strömung in Querprofilen und in einer horizontalen Ebene parallel zur Deckplatte – und damit zum Naturwasserspiegel – eingesetzt.

Beispiel Bühnenmodell

Für die systematischen Untersuchungen unterschiedlicher Bühnenformen wurde ein Luftmodell als überhöhtes zweidimensionales halbes Flussmodell der



Bild 22: Strömungssichtbarmachung mit Erosionsverfahren und Laser (LDA) – Fotomontage ohne Deckplatte

Mittelbebe konzipiert (Maßstäbe: Länge 1:365, Höhe 1:114). Im gesamten Untersuchungsbereich wurde sowohl im Flussbett als auch in den Bühnenfeldern mit der gleichen Strömungstiefe (modellierter Tiefe 28 mm, Natur 3,2 m) gearbeitet. Die Bühnen wurden vereinfacht mit einer Neigung (Kopf- und Seitenneigung gleich) von 1:1 im Luftmodell (entspricht einer Naturneigung von 1:3) modelliert.

In diesem Prinzipmodell wurden die Richtungskomponenten der Geschwindigkeit im Bühnenfeld und in der angrenzenden Hauptströmung hauptsächlich für umströmte Bühnen in einem Messraster (Rasterweite: Modell 2 bis 4 cm, Natur 7,3 bis 14,6 m) mittels LDA (und HDA) gemessen. Die Messung erfolgte in mehreren Ebenen parallel zum Wasserspiegel und Sohle.

Mit Hilfe des Programms >FIKS< (HENTSCHEL, 1997) wurden die Messwerte weiter verarbeitet, um die Veränderung der Strömungsmuster qualitativ und quantitativ darzustellen (Bild 23). >FIKS< (Flächiges Interpoliertes Koordinaten-Schema) wurde in der BAW entwickelt und dient der Darstellung und Auswertung flächig verteilter Daten. Die Originaldaten werden dazu auf ein rechteckiges Raster (äquidistante Matrix) interpoliert und somit zu einem Datenmodell verarbeitet. Den Elementen der Fläche (Lagekoordinaten) werden die Parameterwerte der z-Koordinate (Höhe) bzw. analoger Parameter (Temperatur, Geschwindigkeit v_x und v_y usw.) zugewiesen. Die Eigenschaften werden dabei als Werte farbig oder zusätzlich mit der Richtungsangabe (Vektorlänge entsprechend des Betrages) dargestellt.

Bild 23 zeigt die unterschiedliche Ausbildung der Strömungswalze bei umströmten Bühnen in der Ebene 12,5 mm (Natur 1,43 m) über der Sohle. Bei der Standardbühne (links) bildet sich eine große Walze mit geringen Geschwindigkeiten in Walzenmitte aus, während bei den geknickten Bühnen (rechts) die große Walze deformiert wird und zusätzlich eine kleine Sekundärwalze entsteht. Der Wasseraustausch zwischen

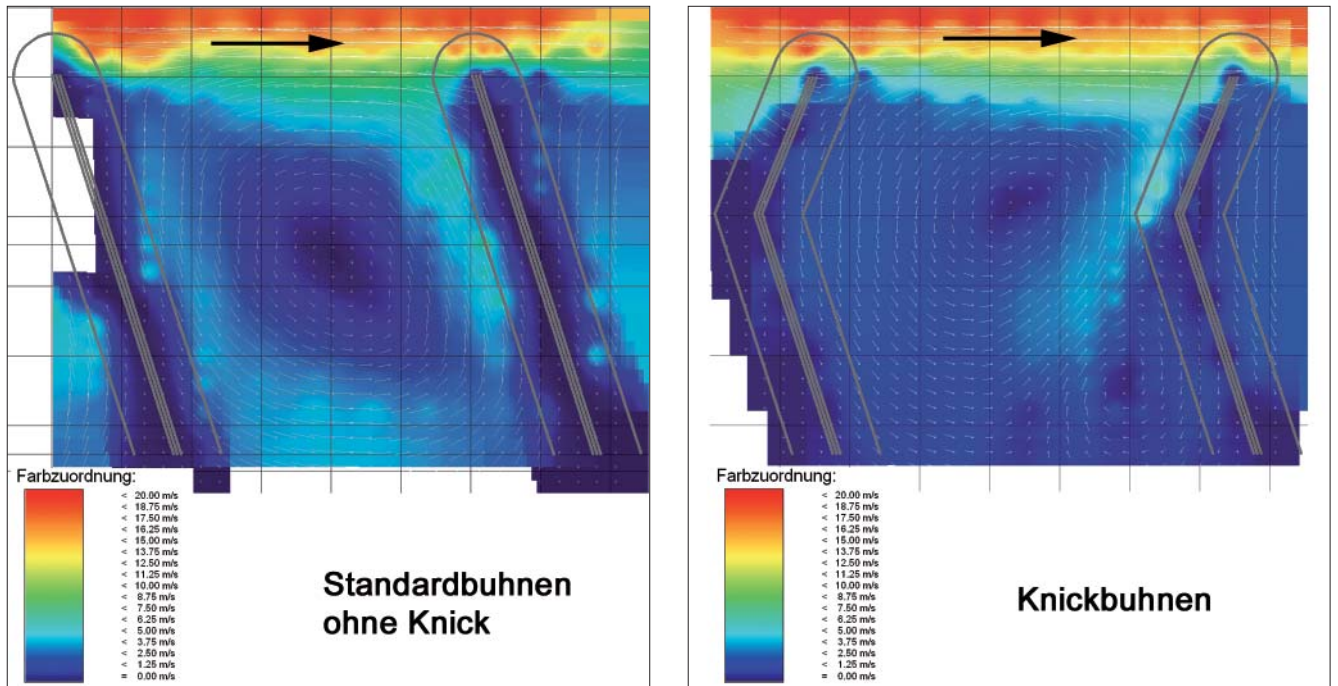


Bild 23: Luftmodell verschiedener umströmter Buhnenformen: Farbgrafik resultierender Geschwindigkeiten mit Vektoren (LDA)

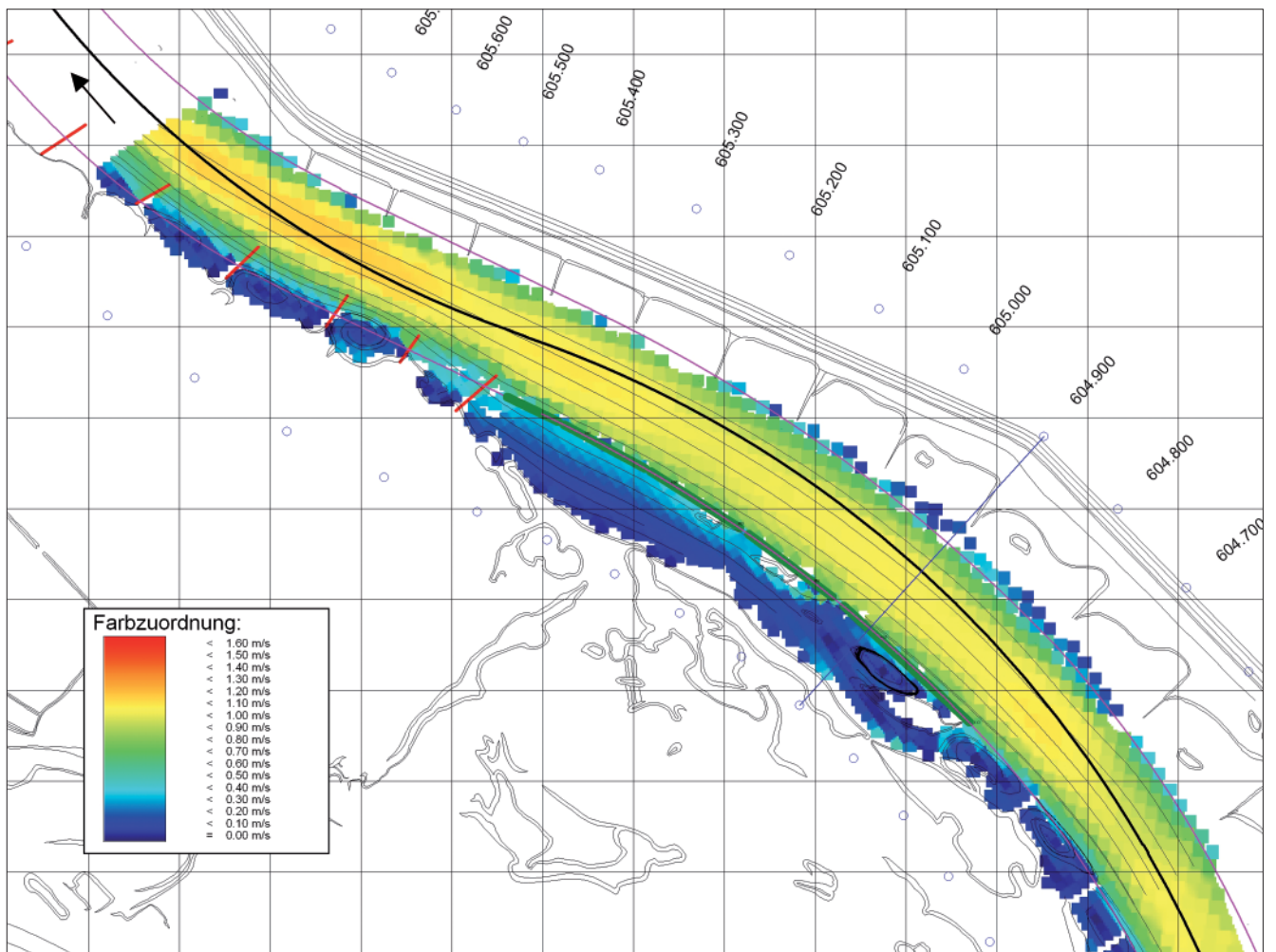


Bild 24: Fließgeschwindigkeitsdarstellung des Modells Oder Reitwein-Kietz, umströmte Bauwerke, Treibkörperdarstellung (LDA)

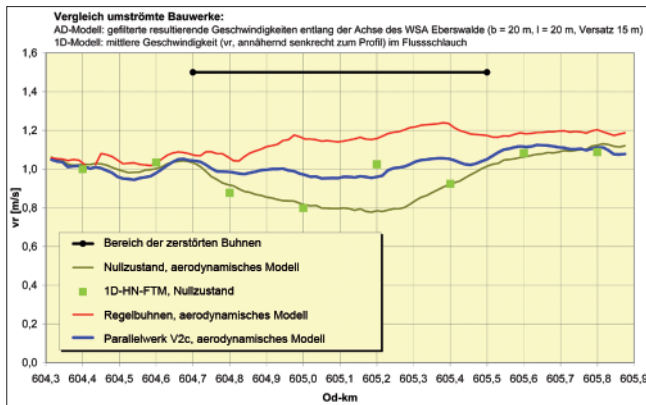


Bild 25: Mittlere resultierende Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche für umströmte Bauwerke (LDA) für Luftmodell Oder bei Reitwein-Kietz

Hauptstrom und Bühnenfeld ist bei geknickten Bühnen auf Grund des kleineren Einströmwinkels und kleinerer Geschwindigkeiten geringer. Im Modell wurden bisher 30 Bühnenvarianten mit unterschiedlichen Knickwinkeln, Länge der Bühnenabschnitte, Bühnenfeldtiefe und verschieden angeordneten Bühnenkerben untersucht und mit Hilfe der LDA- und HDA-Geschwindigkeitsmessungen analysiert.

Beispiel: Odermodell Reitwein-Kietz

Hier wurde LDA ebenfalls eingesetzt, wobei eine Rastermessweite von 3 cm im Modell (Natur 10,5 m) gewählt wurde. Die Geschwindigkeitsmessungen erfolgten in der Ebene, die in der Natur dem Wasserspiegel entspricht. Die Messergebnisse wurden mit >FIKS< ausgewertet und dargestellt (Farbflächen der resultierenden Geschwindigkeiten für eine Variante mit Treibkörper-Bahnlinien, Bild 24, oder Differenzen mehrerer Varianten, Bild 26). Für weitere Auswertungen wurden für definierte Ausschnitte (Filterbereiche) mittlere Geschwindigkeiten und Standardabweichungen ermittelt und Schnitte (z. B. Längsschnitte in Bild 25) ausgewertet.

Die Differenzdarstellung der resultierenden Geschwindigkeiten zweier Varianten (in Bild 26 Parallelwerk und Bühnen) erlaubt die Erfassung der Unterschiede in der vermessenen Strömungsebene. Blaue Farbtöne zeigen eine Verringerung, gelbe und rote Farbtöne eine Erhöhung der Geschwindigkeiten an.

6.2.4 Particle Image Velocimetry

Particle Image Velocimetry (PIV) ist eine Methode zur flächigen Geschwindigkeitserfassung und -analyse (RAFFEL ET AL. 2001). Der Luftströmung werden dazu Teilchen zugeführt, deren Strömungsmuster im Laserlichtschnitt durch Rückstreuung sichtbar werden. Die zeitlich und räumlich hochauflösende flächige Geschwindigkeitserfassung basiert auf der Vektorisierung der Verschiebung der Strömungsmuster zwischen zwei

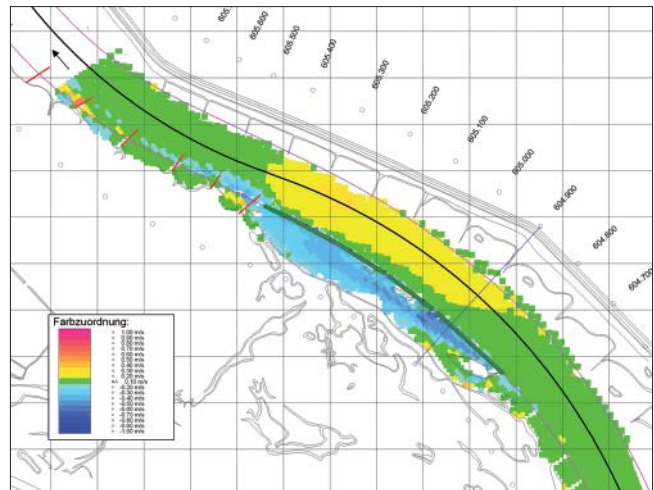


Bild 26: Differenz der Fließgeschwindigkeiten: Parallelwerksvariante – Istzustand, umströmte Bauwerke (LDA)

Bildaufnahmen (CCD-Bilder einer hochauflösenden Kamera). Zeitliche Folgen von Bildpaaren erlauben die Analyse der Bewegung charakteristischer Strömungsstrukturen bis in kleine turbulente Skalen.

PIV wurde für Luftmodelle getestet, da Verfahren zur schnellen Erfassung von Geschwindigkeiten in horizontalen Ebenen gesucht wurden, mit denen möglichst große Modellausschnitte berührungslos erfasst werden können. Die Tests wurden an einem idealisierten Flussmodell (siehe Kapitel 6.2.3) zur Untersuchung der Strömung im Umfeld von Bühnen durchgeführt.

In Wasserströmung konnte PIV bereits mit Erfolg eingesetzt werden (siehe WEITBRECHT ET AL. 2007, im vorliegenden Heft). In Luftströmung traten bei der PIV-Anwendung hauptsächlich folgende Probleme auf:

- Die Luftströmung ist nicht auf natürliche Weise mit Partikeln gesättigt, die durch das Laserlicht sichtbar gemacht werden können. Es mussten geeignete Rückstreuteilchen gefunden werden. Wegen des erforderlichen guten Folgeverhaltens sollte die Teilchengröße in Luftströmung 20 µm nicht überschreiten, sodass sehr kleine (d = 0,8 bis 20 µm) flüssige und feste Teilchen mit unterschiedlicher Dosieretechnik getestet wurden.
- In Luftmodellen gibt es keine freie Strömungsoberfläche. Um PIV einsetzen zu können, müssen die Rückstreuteilchen in der Messebene ausgeleuchtet werden (siehe WEITBRECHT ET AL. 2006, in diesem Heft). Soll eine horizontale Messebene ausgeleuchtet werden, muss der Laserstrahl durch Strahlumlenkung in das Luftmodell eingeleitet werden. Ein ursprünglich berührungsloses optisches Messsystem bedarf dazu eines Spiegels, der innerhalb der Strömung angeordnet wird. Somit ragt ein Körper in die Strömung hinein, der diese beeinflusst. Der Spiegel ist an die Durchführungsöffnungen in der Deckplatte gebunden und die Messmethode des-

halb nicht an beliebig wechselnden Messorten einsetzbar.

- Der Laser muss zur Sichtbarmachung der sehr kleinen Teilchen mit großer Energie betrieben werden, da für die im Luftmodell erforderliche Strahlumlenkung und –umformung ca. 70 % der Laserenergie benötigt werden. Die Oberfläche des in der Strömung befindlichen Umlenkspiegels verschmutzt sehr leicht.
- Es können derzeit nur Bildausschnitte von maximal 8 x 10 cm gemessen werden, was hauptsächlich der geringen Teilchengröße in Zusammenhang mit Bildauflösung und Laserleistung geschuldet ist. Bei Modellmaßstäben im Luftmodell (bei der Untersuchung von kleinräumigen Strukturen) zwischen 1:200 und 1:500 ergeben sich Ausschnitte in der Natur von 16 x 20 m bis maximal 40 x 50 m. Um größere Bereiche aufmessen zu können, müssten mehrere Bildausschnitte zusammengefasst werden, was mit langen Mess- und Auswertzeiten (und großen Datenmengen) verbunden ist. Verzerrungen am Bildrand müssen bei der Auswertung berücksichtigt werden.
- Durch die Notwendigkeit der praxisrelevanten Untersuchung im Nahfeld von Buhnen (z. B. Scherzone zwischen Haupt- und Buhnenfeldströmung) ergab sich die Situation, dass in Bereichen mit sehr unterschiedlichen Geschwindigkeiten gemessen werden musste (Hauptstrom sehr hohe, gerichtete Geschwindigkeiten; Buhnenfeld sehr geringe Geschwindigkeiten mit stark wechselnder Richtung). Solche Bereiche unterschiedlicher Geschwindigkeiten konnten nicht mit einem Bildausschnitt erfasst werden, sodass auch deshalb das Zusammenstellen verschiedener Bildausschnitte zur Gesamtauswertung erforderlich wurde.
- Da bei Versuchen im Flussbau nicht detaillierte, momentane Strömungsmuster (Wirbel) sondern zeitlich gemittelte Strömungserscheinungen („kohärente Strukturen“) relevant sind, wird diese kohärente Struktur durch eine Mittelung über einen ausreichenden Zeitabschnitt erfasst. Im Test am Luftmodell wurden über 250 Bilder zur Mittelwertbildung herangezogen.

PIV wird in der BAW derzeit nicht für flussbauliche Standarduntersuchungen in Luftmodellen eingesetzt, da diese Messtechnik besondere Untersuchungsbedingungen (Arbeitssicherheit), Spezialausrüstungen und auf PIV spezialisierte Ingenieure erfordert und für verkehrswasserbauliche Standarduntersuchungen zu aufwändig ist.

7 Fazit und Ausblick

Die aerodynamische Modellierung von Flussströmungen hat in den letzten 10 Jahren deutlich an Aussagekraft gewonnen. Das ist zum einen auf neue Modellierungsverfahren und zum anderen auf neue Verfahren bei Modellaufbau und Messung zurückzuführen. Mit den neuen Modellbau-Techniken können stark strukturierte Gelände besser abgebildet werden. Über die schnelle qualitative Variantenbewertung hinaus werden mehrere moderne Messverfahren im Routinebetrieb eingesetzt, mit denen im flussbaulichen Versuchswesen übliche quantitative Auswertverfahren angewendet werden können.

Luftmodelle können zur Untersuchung des Geschiebetransports als Tracermodelle für qualitative Untersuchungen zum Einsatz kommen, wobei ein bestehendes Luftmodell mit fester Sohle auch mit beweglicher Sohle betrieben werden kann. Luftmodelle können die Aussagekraft eindimensionaler numerischer Modelle erhöhen (Verbesserung der eindimensionalen Modelle für Teilgebiete mit komplexer Strömung) und werden ihrerseits häufig durch eindimensionale Modelle ergänzt (Detailuntersuchungen im Luftmodell). Luftmodelle können eingesetzt werden, wenn dreidimensionale Effekte die Strömung prägen oder der lokale Geschiebetransports qualitativ aufgezeigt werden soll.

Die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes der verschiedenen derzeit einsatzbereiten aerodynamischen Modellierungsverfahren sind noch nicht umfassend untersucht worden, da sich in den letzten Jahren die Basis der Nutzer von Luftmodellen im wasserbaulichen Versuchswesen verkleinert hat und das Verfahren gegenüber numerischer Modellierung für Lehre und Forschung an Attraktivität verlor. So werden aerodynamische Bauwerksmodelle trotz ihrer Eignung im Wasserbau kaum noch eingesetzt, da hier die dreidimensionalen numerischen Modelle mit Erfolg Anwendung finden.

Dank der Fortschritte in Modellbau und Messtechnik hat sich die aerodynamische Modellierung zu einem Verfahren des wasserbaulichen Versuchswesens entwickelt, das größere Beachtung verdient. Derzeit sind an den Entscheidungsprozessen über bauliche Maßnahmen an den Flüssen zunehmend unterschiedliche Fachleute und interessierte Bürger beteiligt. Es ist deshalb erforderlich, Strömungs- und Transportvorgänge auch Fachfremden verständlich erläutern zu können. In solchen Diskussionsprozessen haben gegenständliche (Maßstabs-) Modelle den Vorteil, dass sie dem fachfremden Publikum oftmals leichter zugänglich gemacht werden können als numerische Modelle. Im Anschluss an die Untersuchungen können Luftmodelle als Funktions- oder Anschauungsmodelle an anderer Stelle (auch in senkrechter Position an Wänden) wieder aufgebaut werden. Auf Grund des vergleichsweise

geringen Platz- und Ausrüstungsbedarfs könnten Luftmodelle auch in der Lehre stärker zum Einsatz kommen.

8 Literaturverzeichnis

ALBRECHT, H.-E.; BORYS, M.; DAMASCHKE, N.; TROPEA, C. (2004): Laser Doppler- and Phase Doppler Measurement Techniques. Experimental Fluid Mechanics, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

ALLEN, J. R. L. (1968): The Nature and Origin of Bedform Hierarchies, Amsterdam

ATV-DVWK (2003): Feststofftransportmodelle für Fließgewässer, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef

BAGNOLD, R.A. (1978): Sediment Transport by Wind and Water, Kent

BAW (1997): Gutachten über hydraulische Untersuchungen der Rückdeichung Lenzen, Bundesanstalt für Wasserbau, Berlin, 1997 (unveröffentlicht)

BAW (2000): Untersuchung der Auswirkung von Maßnahmen im Elbevorland auf die Strömungssituation und die Flussmorphologie am Beispiel der Erosionsstrecke und der Rückdeichungsbereiche zwischen Wittenberge und Lenzen, Schlussbericht der Bundesanstalt für Wasserbau im Forschungsprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung „Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe (Elbe-Ökologie), Karlsruhe

BfG (1994): Kornzusammensetzung der Elbsohle von der tschechisch-deutschen Grenze bis zur Staustufe Geesthacht, Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-0834 (unveröffentlicht), Berlin

BRUUN, H.H. (1995): Hot-Wire Anemometry, Oxford University Press

ECK, B. (1988): Technische Strömungslehre, Band 1: Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

FAS (1985): Rauigkeits- und Geschiebeeinflüsse bei aerodynamischen Modellen, unveröffentlichter Forschungsbericht der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin

FAS (1987): Rationalisierung von Geschiebeuntersuchungen im Flussbau, unveröffentlichter Forschungsbericht der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin

FAS (1988): Kraftwerk Vockerode. Sicherung der Kühlwasserversorgung. Ergebnisse der aerodynamischen Untersuchungen, Berlin (unveröffentlicht)

FAULHABER, P. (1983): Ein Beitrag zur Anwendung aerodynamischer Modelle im wasserbaulichen Versuchswesen. In Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Heft 8, Berlin, S. 274-276

FAULHABER, P. (1986): Aerodynamische Modellierung hydraulischer Abflüsse mit freier Oberfläche, Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Heft 50, Berlin, S. 71-152

FAULHABER, P. (1998) Kombination von aerodynamischen und numerischen Modellen zur Untersuchung von flussbaulichen Problemen. In Wasserbauliche Mitteilungen Heft 13 „100 Jahre Hubert-Engels-Laboratorium“, Institut für Wasserbau und Hydromechanik der TU Dresden, S. 215-224

GILJAROV, N.P. (1973): Modelirovaniye retsnych potokov (Modellierung von Flussströmungen), Gidrometeorizdat, Leningrad

HENTSCHEL, B., KAUTHER, R. (2000): Hochgeschwindigkeitskamera im wasserbaulichen und geotechnischen Versuchswesen. In: Mitteilungsheft der Bundesanstalt für Wasserbau Nr.82, Karlsruhe, S. S. 119-121

HENTSCHEL, B. (1997): FIKS-Benutzerhandbuch, Bundesanstalt für Wasserbau, Berlin

HENTSCHEL, B. (2007a): Hydraulische Flussmodelle mit beweglicher Sohle. Im vorliegenden Mitteilungsheft der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

HENTSCHEL, B. 2007b): Ein finites Differenzen Verfahren zur Strömungsanalyse. Im vorliegenden Mitteilungsheft der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

HINCU, S.; FINKELSTEIN, A. (1963): Unele probleme ale analogiei hidroaerodinamice in modelarea proceselor de albie (Einige Fragen der hydro-aerodynamischen Analogie bei der Modellierung von Flussbettprozessen), Studii de hidraulica V, Bukarest

IKEDA, S. (1982): Incipient Motion of Sand Particles on Side Slopes. In: Proceedings ASCE, Journal of the Hydraulics Division, No. 1, New York, S. 95-114

KOBUS, H. (1984): Wasserbauliches Versuchswesen, DVWK-Schriften, Heft 39, Verlag Paul Parey, Berlin

LAWA, BMV (1998): Pegelvorschrift, Anlage D, Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin

LJATCHER, W. M.; PRUDOVSKI, A.M. (1971): Issledovani-
ja otkrytych potokov na napornych modeljach (Unter-
suchungen offener Strömungen an Druckmodellen),
Energia, Moskau

LJATCHER, W. M.; Prudovski, A.M. (1984): Gidravlitse-
skoje modelirovanije (Hydraulische Modellierung),
Energoatomisdat, Moskau

MATOUŠEK, V., SKALIČKA, J., JIŘINEC, P. (1983): Výmo-
ly kolem pilotových pilířů a jejich jímek (Auskolkungen
um Pfeiler und ihre Fangdämme), Výzkumný ústav
vodohospodářský, Prag

MERZKIRCH, W. (1987): Visualization, 2nd edition, Aca-
demic Press, New York

NESTMANN, F.; BACHMEIER, G. (1987): Anwendung von
Luftmodellen im strömungsmechanischen Versuchs-
wesen des Flussbaus. In: Mitteilungsblatt der Bundes-
anstalt für Wasserbau Nr. 61, Karlsruhe, S. 65-98

RAFFEL, M.; WILLERT, C.; KOMPENHANS, J. (2001): Parti-
cle Image Velocimetry. A Practical Guide. Experimental
Fluid Mechanics, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg,
New York

SCHRÖDER, R.C.M. (1994): Technische Hydraulik, Kom-
pendium für Wasserbau, Springer-Verlag Berlin, Hei-
delberg, New York

SUMBAL, J. (1966): Problematika podobnosti pri aero-
dynamickom modelovaní riečnych procesov (Ähnlich-
keitsprobleme bei der aerodynamischen Modellierung
von Flussbettprozessen), Vyskumny Ustav Vodohos-
podarsky (Forschungsanstalt für Wasserwirtschaft),
Prace a studie 38, Bratislava

WEITBRECHT ET AL. (2007): Geschwindigkeitsmessungen
mit Particle-Image-Velocimetry: Labor- und Feldmes-
sungen. Im vorliegenden Mitteilungsheft der Bundes-
anstalt für Wasserbau, Karlsruhe

ZANKE, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung,
Springer-Verlag, Berlin, Heiderlberg, New York

9 Symbolverzeichnis

Bedeutung der Indizes:

x_n Naturwert

x_m Modellwert

x_r Maßstabsverhältnis x_n/x_m

x_c Wert bei Beginn der Geschiebebewegung

x_{grenz} Grenzwert

\bar{x} Mittelwert

d	Korndurchmesser	[m]
d _m	maßgebender Korndurchmesser nach MEYER-PETER $d_m = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot p_i}{100}$	[m]
	d _i = Siebgröße [mm], p _i = Masseanteil [%]	
d _{hy}	hydraulischer Durchmesser d _{hy} = 4°r _{hy}	[m]
D.	sedimentologischer Durchmesser $D. = \left(\frac{Re_*^2}{Fr_*}\right)^{1/3} = \left(\frac{\rho' \cdot g}{v^2}\right)^{1/3} \cdot d$	[-]
Eu	EULER-Zahl: Verhältnis Trägheitsreaktion zu Druckkraft $Eu = \frac{v}{\sqrt{2\Delta p/\rho}}$	[-]
Fr	FROUDE-Zahl: Verhältnis Trägheitsreaktion zu Schwerkraft $Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$	[-]
Fr	FROUDE-Zahl des Kornes $Fr_* = \frac{v_*^2}{\rho' \cdot g \cdot d}$	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
H	Höhe, Tiefe	[m]
H _m '	Gesamtströmungstiefe im Modell H _m '=H _m +ΔH	[m]
l	Gefälle	[-]
k	absolute Rauheit, Sandrauheit	[m]
k _{St}	Rauheitsbeiwert nach Manning/Gauckler/Strickler $k_{St} \cong 1/n$	[m ^{1/3} /s]
L	Länge	[m]
n	Rauheitsbeiwert nach Manning/Gauckler/Strickler	[s/m ^{1/3}]
r	Radius	[m]
Re	REYNOLDS-Zahl: Verh. von Trägheitsreaktion zu Zähigkeit $Re = \frac{v \cdot L}{\nu}$	[-]
Re*	REYNOLDS-Zahl des Kornes $Re_* = \frac{v_* \cdot d}{\nu}$	[-]
r _{hy}	hydraulischer Radius	[m]
Q	Durchfluss	[m ³ /s]
Q _{mod}	Durchfluss im modellierten Bereich des Luftmodells	[m ³ /s]
U	Ungleichförmigkeit d ₈₄ /d ₁₆	[-]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
v _{max}	maximale Fließgeschwindigkeit	[m/s]
v*	Schubspannungsgeschwindigkeit $v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \cdot \sqrt{g \cdot H \cdot l}$	[m/s]
v*c	Schubspannungsgeschwindigkeit am Geschiebebewegungsbeginn	[m/s]
Δ	Transportkörperhöhe	[m]
ΔH	zusätzliche Überhöhung im Luftmodell	[m]
ΔQ	Durchfluss im nicht modellierten Bereich des Luftmodells	[m ³ /s]
Δp	Druckdifferenz	[Pa]
λ	Widerstandsbeiwert nach DARCY-WEISBACH $\lambda = \frac{8g \cdot n^2}{r_{hy}^{1/3}}$	[-]
Λ	Transportkörperlänge	[m]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
ρ	Dichte ρ _S -Geschiebe-(Sediment)dichte, ρ _F -Fluidichte	[kg/m ³]
ρ'	relative Dichte $\rho' = \frac{\rho_S - \rho_F}{\rho_F}$	[kg/m ³]
τ ₀	Schubspannung $\tau_0 = \rho \cdot g \cdot H \cdot l$	[N/m ²]

10 Glossar

Benennung	Einheit	Erklärung / Definition	Quelle
Abflussquerschnitt <i>(auch: Fließ-, Durchflussquerschnitt)</i>	[m ²]	Fläche normal zur Hauptströmungsrichtung, die von einer Flüssigkeit durchströmt wird.	DIN 4044, DIN 4047-5
Bewegliche Sohle		Gewässersohle mit Lockersedimenten, die auflanden und eintiefen kann.	
Volumenstrom	[m ³ /h]	Volumen, das sich je Zeiteinheit durch einen Querschnitt bewegt. Einheit bei Gasanlagen. Der Betriebsvolumenstrom gibt in Luftmodellen den effektiven Volumenstrom der verdichteten Luft an bei bestimmten Betriebsverhältnissen (Klimaparameter sind beim Vergleich zu berücksichtigen). Der Normvolumenstrom gibt den Volumenstrom für theoretische Vergleichswerte an (0°C, 760 mm HG, 1,294 kg/m ³). <i>Siehe Durchfluss.</i>	DIN 1945
Buhne		Quer zum Ufer liegendes Bauwerk zur seitlichen Begrenzung des Abflussquerschnitts und/oder zum Schutz des Ufers.	DIN 4054
Durchfluss (Q)	[l/s, m ³ /s]	Wasservolumen, das einen bestimmten Querschnitt in der Zeiteinheit durchfließt. <i>Anmerkung: unabhängig von der Zuordnung zu einem Einzugsgebiet; sonst Abfluss, technisch auch Volumenstrom</i>	DIN 4044 DIN 4049-3
Flussbett (Gewässerbett)		Abflussquerschnitt zwischen den befestigten Ufern ohne Vorländer bzw. Altwasser.	DIN 4049-1
Geländemodell		gegenständliches oder digitales Modell der Topografie (Geländeoberfläche)	
Geschiebe		Feststoffe, die nur im Bereich der Gewässersohle mit Kontakt zu derselben bewegt werden.	DIN 4049-3 DIN 4044
HDA		Hitzdraht-Anemometrie	
LDA		Laser-Doppler-Anemometrie	
Modell (Strömungsmodell, Feststofftransportmodell)		Schematische Nachbildung eines Systems bezüglich ausgewählter Eigenschaften und Vorgänge. Im Flussbau ursprünglich maßstäblich verkleinertes gegenständliches Modell (DIN 4049-1). Heute umfassender verwendet z.B. auch für mathematische (statistische, hydrodynamisch-numerische) Modelle oder für „Modellvorstellungen“. <i>Je nach Berücksichtigung des zeitlichen Verhaltens der Vorgänge unterscheidet man stationäre und instationäre Modelle.</i>	vgl. DIN 4049-1
Maßstabs-Modell,		gegenständlich, physisch, physikalisch, engl.: scaled model, maßstäblich verkleinerte Modelle	
Modell, aerodynamisch		Maßstabsmodell, in dem unter Ausnutzung der Analogie von Wasser- und Luftströmung Strömung unter Druck zur Simulation von Natur-Wasserströmungen mit freier Oberfläche genutzt wird	
Modell, hydraulisch		Maßstabsmodell, maßstäblich verkleinertes Modell mit Strömungsfluid Wasser	
Parallelwerk, <i>auch Längswerk, umgangssprachlich immer noch Leitwerk</i>		In Fließrichtung liegendes Regelungsbauwerk zur seitlichen Begrenzung des Abflussquerschnittes.	DIN 4054
PIV		Particle Image Velocimetry	