

*Analyse von Turbulenzmechanismen in  
naturnahen Fließgewässern und ihre  
mathematische Formulierung für hydrodynamische  
Modelle*

Dissertation am Arbeitsbereich Wasserbau 2004

von Kaj Lippert

**Arbeitsbereich Wasserbau, Technische Universität Hamburg-Harburg  
2004**

# INHALTSVERZEICHNIS:

1	PROBLEMFORMULIERUNG.....	1
1.1	Allgemeine Beschreibung.....	1
1.2	Aufgabenstellung.....	5
2	PROBLEMANALYSE.....	7
2.1	Einführung.....	7
2.2	Gegliederte Gerinne.....	7
2.2.1	<i>Physikalische Beschreibung</i> .....	8
2.2.2	<i>Mathematische Beschreibung</i> .....	16
2.3	Kurvenströmungen.....	17
2.3.1	<i>Physikalische Beschreibung</i> .....	18
2.3.2	<i>Mathematische Beschreibung</i> .....	20
2.3.3	<i>Erfahrungen mit 2d-tiefengemittelten Simulationen</i> .....	28
3	MATHEMATISCHE BESCHREIBUNG DER STRÖMUNG.....	33
3.1	Grundgleichungen.....	33
3.2	Corioliskraft.....	35
3.3	Windschubspannung.....	36
3.4	Sohlrauigkeit.....	36
3.5	Beschreibung der Turbulenz.....	40
3.5.1	<i>Null-Gleichungs-Modelle</i> .....	41
3.6	Beschreibung der Dispersion.....	45
4	NUMERISCHES LÖSUNGSVERFAHREN.....	51
4.1	Einführung.....	51
4.2	Galerkin-Finite-Elemente-Methode.....	52
4.2.1	<i>Allgemeine Beschreibung</i> .....	52
4.2.2	<i>Die Schwache Formulierung</i> .....	55
4.2.3	<i>Numerische Integration</i> .....	57
4.2.4	<i>Zeitdiskretisierung</i> .....	63
4.2.5	<i>Lösen der nichtlinearen Gleichungen</i> .....	64
4.2.6	<i>Implementierung der Randbedingungen</i> .....	65
4.3	Kontroll-Volumen-Finite-Elemente-Methode.....	67
4.3.1	<i>Allgemeine Beschreibung</i> .....	67
4.3.2	<i>Massenerhaltung für das Kontrollvolumen</i> .....	68
4.3.3	<i>Numerische Integration</i> .....	69
5	DAS VERSUCHSPROGRAMM.....	73

5.1	Einführung.....	73
5.2	Beschreibung der Untersuchungsabschnitte .....	75
5.2.1	<i>Lippe, Deichstrecke Dorsten</i> .....	75
5.2.2	<i>Stör bei Kellinghusen</i> .....	81
5.2.3	<i>Rhein bei Mündelheim</i> .....	87
5.3	Messmethodik.....	90
5.3.1	<i>Differential Global Positioning System (DGPS)</i> .....	90
5.3.2	<i>Ultraschall-Doppler-Gerät zur Messung von Geschwindigkeitsprofilen (ADCP)</i> .....	98
5.3.3	<i>Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)</i> .....	113
5.4	Zusammenfassung .....	130
6	ERGEBNISSE DER MESSUNGEN.....	133
6.1	Lippe, Deichstrecke Dorsten.....	133
6.1.1	<i>Strömungsgeschwindigkeit</i> .....	133
6.1.2	<i>Turbulenzintensität</i> .....	142
6.1.3	<i>Turbulente Schubspannungen</i> .....	144
6.2	Stör bei Kellinghusen .....	150
6.2.1	<i>Strömungsgeschwindigkeit</i> .....	150
6.2.2	<i>Turbulenzintensität</i> .....	156
6.2.3	<i>Turbulente Schubspannungen</i> .....	157
6.3	Rhein bei Mündelheim .....	160
7	VERIFIKATION DER VERFAHREN ZUR TURBULENZ- UND DISPERSIONSMODELLIERUNG.....	165
7.1	Allgemeine Bemerkungen .....	165
7.2	Verifikation der Turbulenzmodelle.....	166
7.2.1	<i>Beispiel Lippe</i> .....	166
7.2.2	<i>Beispiel Stör</i> .....	174
7.2.3	<i>Beispiel Rhein</i> .....	178
7.3	Verifikation des Dispersions-Ansatzes .....	179
7.4	Vollständige FE-Formulierung versus Vereinfachung.....	182
7.5	CVFEM versus GFEM .....	183
7.6	Zusammenfassung .....	184
8	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	187
	VERZEICHNIS DER SYMBOLE UND FORMELZEICHEN.....	189
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	195
	TABELLENVERZEICHNIS .....	201
	ANHANG A: APPROXIMATIONSFUNKTIONEN.....	203

---

ANHANG B: WICHTUNGSFAKTOREN DER GAUßINTEGRATION .....	205
ANHANG C: ABLEITUNGEN FÜR DAS NEWTON-RAPHSON-VERFAHREN .....	207
ANHANG D: GERÄTESPEZIFIKATION GPS, LEICA SR530 .....	211
ANHANG E: GERÄTESPEZIFIKATION ADCP, WH RIO GRANDE 600 KHZ, FA. RDI .....	213
ANHANG F: GERÄTESPEZIFIKATION ADV-SONDE VECTOR, FA. NORTEK .....	215
ANHANG G: ANALYSE UND BEWERTUNG VON BINÄREN ADV-ROHDATEN .....	217
G.1    Einführung .....	217
G.2    Binäres Vector Datenformat .....	217
G.2.1    Generelle Daten .....	218
G.2.2    Vector spezifische Daten (Messwerte) .....	221
G.3    Datentransfer versus Qualität .....	225
ANHANG H: ÜBERLAGERUNG VON ADV UND VIRTUELLER GPS-BEWEGUNG (LABOR) .....	229
ANHANG I: MESSERGEBNISSE, AUSWERTUNG STÖR PROFIL 02, 14.02.02 .....	233
ANHANG J.1: FE-MODELL LIPPE .....	235
ANHANG J.2: MODELLTOPOGRAPHIE LIPPE .....	236
ANHANG K.1: FE-MODELL STÖR .....	237
ANHANG K.2: MODELLTOPOGRAPHIE STÖR .....	238
ANHANG L.1: FE-MODELL RHEIN .....	239
ANHANG L.2: MODELLTOPOGRAPHIE RHEIN .....	240
ANHANG M: VERIFIKATION DES DISPERSIONSANSATZES VON LIEN ET AL .....	241
AUTORENPROFIL .....	243