

**ANWENDBARKEIT KOMMERZIELLER
RADAR-WASSERSTANDSPEGEL
ZUR SEEGANGSMESSUNG**

***APPLICABILITY OF STANDARD
RADAR LEVEL-GAUGES
IN WAVE-MONITORING***

von
Stephan MAI

ABSTRACT

Besides traditional sensors for wave measurements, like pressure gauges, wave rider buoys or electric level gauges, radar altimeters are more and more applied in wave monitoring. Today various commercial radar altimeters are used as level-gauges, e.g. in the chemical industry. The applicability of three common, comparatively cheap, sensors in wave monitoring is experimentally investigated using wave-flume tests. The sensors used are the VEGAPULS (VEGA GRIESHABER KG, Schiltach), KALESTO (OTT MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, Kempten) and the BM 100 (FA. KROHNE MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, Duisburg). A first analysis shows the need for an improvement of commercial radar altimeters with respect to spatial and temporal resolution. Common problems of today's sensors result from a high noise-level requiring a large averaging interval and from a large footprint of the sensor.

ZUSAMMENFASSUNG

Neben traditionellen Meßgeräten zur Seegangsmessung, wie Druckmeßdosen, Seegangsbojen und Drahtwellenpegeln, finden Radar-Wasserstandspegel mehr und mehr Anwendung im Monitoring. Zur Zeit sind verschiedenste Radar-Füllstandspegel, speziell in der chemischen Industrie, im Einsatz. Die Anwendbarkeit von drei gängigen, vergleichsweise preisgünstigen Radar-Sensoren zur Seegangsmessung ist experimentell im Wellenkanal Schneiderberg der Universität Hannover und im Großen Wellenkanal des Forschungszentrums Küste untersucht worden. Bei den verwendeten Sensoren handelt es sich um das VEGAPULS (VEGA GRIESHABER KG, Schiltach), das KALESTO (OTT MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, Kempten) und das BM 100 (FA. KROHNE MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, Duisburg). Die erste Analyse der Experimente verdeutlicht die Notwendigkeit zur Verbesserung kommerzieller Radar-Sensoren im Hinblick auf die zeitliche und räumliche Auflösung. Die Probleme der Radar-Sensoren bei der Seegangsmessung resultieren im besonderen aus dem hohen Rauschanteil und der zur Zeit verhältnismäßig geringen Apertur der Sensoren.

INHALT

ABSTRACT	102
ZUSAMMENFASSUNG	102
INHALT	103
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	104
TABELLENVERZEICHNIS	107
1 EINLEITUNG	108
2 MEßVERFAHREN ZUR SEEGANGSMESSUNG	108
2.1 Traditionelle Verfahren	108
2.2 Radar-Wasserstandspegel	110
3 VERWENDETE WELLENPEGEL-TYPEN	111
3.1 GHM - Wave Height Meter	111
3.2 GWK-Drahtwellenpegel	112
3.3 Radar VEGAPULS, Fa. VEGA	113
3.4 Radar KALESTO, Fa. Ott	115
3.5 Radar BM100, Fa. KROHNE	116
4 VERSUCHSPROGRAMM	118
4.1 Versuche im Wellenkanal Schneiderberg	118
4.2 Versuche im GROßEN WELLENKANAL (GWK)	119
5 METHODEN DER VERSUCHSAUSWERTUNG	121
5.1 Allgemeines	121
5.2 Auswertung im Zeitbereich	121
5.3 Auswertung im Frequenzbereich	123
6 VERSUCHSERGEBNISSE	124
6.1 Vegapuls	124
6.2 KALESTO	132
6.3 BM100-TYP C	141
6.4 BM100-TYP A	146
7 SCHLUßFOLGERUNG	150
8 LITERATUR	150

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1:	Meßprinzip von Drahtwellenpegeln (Verfahren A)	108
Abbildung 2-2:	Schaltung zur Widerstandsmessung	109
Abbildung 2-3:	Meßprinzip von Drahtwellenpegeln (Verfahren B)	109
Abbildung 2-4:	Seegangmeßboje WAVERIDER [DATAWELL BV, 2000]	109
Abbildung 2-5:	Druckmeßsonden [DRUCK MESSTECHNIK GMBH, 2000]	110
Abbildung 2-6:	Schema des Strahlenganges der Mikrowellen	110
Abbildung 2-7:	Meßprinzip des Radar – Wasserstandspegels – Puls-Verfahren [MAI UND ZIMMERMANN, 2000]	111
Abbildung 2-8:	Meßprinzip des Radar – Wasserstandspegels – FMCW-Verfahren [C & G INDUSTRIAL SUPPLY, 1998]	111
Abbildung 2-9:	Radar-Rückstreusignal und Nutzung des Echos zur Distanzmessung	111
Abbildung 3-1:	Ansicht des Drahtwellenpegels GHM WAVE HEIGHT METER	112
Abbildung 3-2:	Eichung der Wellenpegel GHM	112
Abbildung 3-3:	Ansicht des GWK-Drahtwellenpegels	113
Abbildung 3-4:	Eichung der GWK-Wellenpegel	113
Abbildung 3-5:	Ansicht des Radar VEGAPULS	113
Abbildung 3-6:	Sendekegel der Hornantenne DN150 [VEGA GRIESHABER KG, 1999a]	114
Abbildung 3-7:	Zeitliche Folge der emittierten Radar-Pulse beim Sensor VEGAPULS [VEGA GRIESHABER KG, 1999a]	114
Abbildung 3-8:	Meßwerterfassung und Steuerung des Sensors VEGAPULS [nach VEGA GRIESHABER KG, 1999a]	114
Abbildung 3-9:	Prüfung der Linearität des VEGAPULS (27.04.2000)	115
Abbildung 3-10:	Ansicht des Radar KALESTO	115
Abbildung 3-11:	Abstrahlwinkel von Hornantennen als Funktion von Apertur und Frequenz [ORÉANS & HEIDE, 2000]	115
Abbildung 3-12:	Anschluß des Sensors KALESTO	116
Abbildung 3-13:	Prüfung der Signalausgabe des KALESTO (27.04.2000)	116
Abbildung 3-14:	Skizze und Ansicht des Radar BM100, links: TYP A, rechts: TYP C [KROHNE MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, 1996]	116
Abbildung 3-15:	Feldlinien des elektrischen Feldes, links: BM100 TYP A, rechts: BM100 TYP C [KROHNE MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, 1996]	117
Abbildung 3-16:	Steuerung der Radar-Sensoren BM100	117
Abbildung 3-17:	Prüfung der Linearität des BM100-TYP C (links) und des BM100-TYP A (rechts)	117
Abbildung 4-1:	Instrumentierung des WELLENKANALS SCHNEIDERBERG WKS	118
Abbildung 4-2:	Zuordnung traditioneller Wellenpegel zu Radar-Sensoren	118
Abbildung 4-3:	Position der Meßbühne im WELLENKANAL SCHNEIDERBERG WKS [nach GRÜNE, 1976]	119
Abbildung 4-4:	Schema der Datenerfassung im WELLENKANAL SCHNEIDERBERG WKS	119
Abbildung 4-5:	Photo der Instrumentierung des GROßEN WELLENKANALS GWK	120
Abbildung 4-6:	Position der Meßinstrumente im GROßEN WELLENKANAL GWK	120
Abbildung 4-7:	Schema der Datenerfassung im GROßEN WELLENKANAL GWK	121

Auszug aus : Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 86, S. 102-152

Abbildung 5-1:	Wasserspiegellage als Funktion der Zeit ($H = 0,20$ m, $T = 4$ s, WKS)	121
Abbildung 5-2:	Kreuzkorrelation – beispielhaft für mit die mit zwei Wellenpegeln des Typs GHM gemessene Wasserspiegelauslenkung (Versuch im WKS mit regelmäßigen Wellen: $H = 20$ cm, $T = 4,0$ s)	121
Abbildung 5-3:	Identifikation von Nulldurchgängen unter Festlegung eines Schwellwertes	122
Abbildung 5-4:	Nulldurchgangsverfahren zur Ermittlung der Parameter von Einzelwellen	122
Abbildung 5-5:	Statistik von Wellenhöhe (links) und Wellenperiode (rechts) (Versuch im WKS mit unregelmäßigem Seegang: $H_s = 25$ cm, $T_p = 3$ s, $d = 0,80$ m)	122
Abbildung 5-6:	Amplitudenspektrum bei regelmäßigem Seegang (WKS: $H = 0,20$ m, $T = 4$ s, $d = 0,80$ m)	123
Abbildung 5-7:	Leistungsspektrum bei unregelmäßigem Seegang (WKS: $H_s = 0,25$ m, $T_p = 3$ s, $d = 0,80$ m)	123
Abbildung 6-1:	Zeitreihe der mit den Sensoren GHM-WP3 und VEGAPULS im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung	124
Abbildung 6-2:	Abhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren VEGAPULS und GHM-WP3 gemessenen Wasserspiegelauslenkung (links) und des Varianzverhältnisses (rechts) von Wellenperiode und –höhe bei regelmäßigem Seegang im WKS	124
Abbildung 6-3:	Statistik der Wellenhöhe im WKS bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)	125
Abbildung 6-4:	Verhältnis der mit den Sensoren VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS ermittelten mittleren Wellenhöhen bei regelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und –höhe	125
Abbildung 6-5:	Verhältnis der mit den Sensoren VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und –höhe	126
Abbildung 6-6:	Zeitreihe der mit den Sensoren GWK-WP2 und VEGAPULS im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung	126
Abbildung 6-7:	Abhängigkeit des Varianzverhältnisses zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren VEGAPULS und GWK-WP2 gemessenen Wasserspiegelauslenkung von Wellenperiode und –höhe bei regelmäßigem (links) unregelmäßigem Seegang (rechts)	127
Abbildung 6-8:	Statistik der Wellenhöhe im GWK bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)	127
Abbildung 6-9:	Verhältnis der mit den Sensoren VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und –höhe	128
Abbildung 6-10:	Verhältnis der mit den Sensoren VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK ermittelten mittleren Wellenhöhen bei regelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe	128
Abbildung 6-11:	Amplitudenspektrum der mit den Sensoren GHM-WP3 und VEGAPULS im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)	128
Abbildung 6-12:	Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei regelmäßigen Wellen	129
Abbildung 6-13:	Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei unregelmäßigen Wellen	129
Abbildung 6-14:	Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei regelmäßigen Wellen	130
Abbildung 6-15:	Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen	130
Abbildung 6-16:	Amplitudenspektrum der mit den Sensoren GWK-WP2 und VEGAPULS im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)	131
Abbildung 6-17:	Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei regelmäßigen Wellen	131
Abbildung 6-18:	Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei unregelmäßigen Wellen	131

Auszug aus : Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 86, S. 102-152

Abbildung 6-19:	Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei regelmäßigen Wellen	132
Abbildung 6-20:	Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen	132
Abbildung 6-21:	Zeitreihe der mit den Sensoren GHM-WP2 und Kalesto im WKS gemessenen Wasserspiegel- auslenkung	133
Abbildung 6-22:	Abhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren KALESTO und GHM- WP2 gemessenen Wasserspiegelauslenkung (links) und des Varianzverhältnisses (rechts) von Wellenperiode und –höhe bei regelmäßigem Seegang im WKS	133
Abbildung 6-23:	Statistik der Wellenhöhe im WKS bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)	134
Abbildung 6-24:	Verhältnis der mit den Sensoren KALESTO und GHM-WP2 im WKS ermittelten mittleren Wellenhöhen bei regelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und –höhe	134
Abbildung 6-25:	Verhältnis der mit den Sensoren KALESTO und GHM-WP2 im WKS ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und –höhe	135
Abbildung 6-26:	Zeitreihe der mit den Sensoren GWK-WP2 und VEGAPULS im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung	135
Abbildung 6-27:	Abhängigkeit des Varianzverhältnisses zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren KALESTO und GWK- WP2 gemessenen Wasserspiegelauslenkung von Wellenperiode und –höhe bei regelmäßigem (links) unregelmäßigem Seegang (rechts)	136
Abbildung 6-28:	Statistik der Wellenhöhe im GWK bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)	136
Abbildung 6-29:	Verhältnis der mit den Sensoren KALESTO und GWK-WP2 im GWK ermittelten mittleren Wellenhöhen bei regelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und –höhe	137
Abbildung 6-30:	Verhältnis der mit den Sensoren KALESTO und GWK-WP2 im GWK ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und –höhe	137
Abbildung 6-31:	Amplitudenspektrum der mit den Sensoren GHM-WP2 und KALESTO im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)	137
Abbildung 6-32:	Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GHM-WP2 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei regelmäßigen Wellen	138
Abbildung 6-33:	Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GHM-WP2 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei unregelmäßigen Wellen	138
Abbildung 6-34:	Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GHM-WP2 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei regelmäßigen Wellen	139
Abbildung 6-35:	Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GHM-WP2 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen	139
Abbildung 6-36:	Amplitudenspektrum der mit den Sensoren GWK-WP2 und KALESTO im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)	140
Abbildung 6-37:	Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GWK-WP2 im GWK bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei regelmäßigen Wellen	140
Abbildung 6-38:	Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GWK-WP2 im GWK bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei unregelmäßigen Wellen	140
Abbildung 6-39:	Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GWK-WP2 im GWK bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei regelmäßigen Wellen	141
Abbildung 6-40:	Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GWK-WP2 im GWK bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen	141
Abbildung 6-41:	Zeitreihe der mit den Sensoren GHM-WP4 und BM100-TYP C im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung	142

Auszug aus : Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 86, S. 102-152

Abbildung 6-42:	Abhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren BM100-TYP C und GHM-WP4 gemessenen Wasserspiegelauslenkung (links) und des Varianzverhältnis (rechts) von Wellenperiode und –höhe bei regelmäßigem Seegang	142
Abbildung 6-43:	Statistik der Wellenhöhe bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)	143
Abbildung 6-44:	Verhältnis der mit den Sensoren BM100-TYP C und GHM-WP4 ermittelten mittleren Wellenhöhen bei regelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und –höhe	143
Abbildung 6-45:	Verhältnis der mit den Sensoren BM100-TYP C und GHM-WP4 ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe	143
Abbildung 6-46:	Amplitudenspektrum der mit den Sensoren BM100-TYP C und GHM-WP4 im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)	144
Abbildung 6-47:	Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP C und GHM-WP4 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei regelmäßigen Wellen	144
Abbildung 6-48:	Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP C und GHM-WP4 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei unregelmäßigen Wellen	145
Abbildung 6-49:	Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP C und GHM-WP4 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei regelmäßigen Wellen	145
Abbildung 6-50:	Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP C und GHM-WP4 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen	146
Abbildung 6-51:	Zeitreihe der mit den Sensoren GWK-WP1 und BM100-TYP A im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung	146
Abbildung 6-52:	Abhängigkeit des Varianzverhältnis zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren BM100-TYP A und GWK-WP1 gemessenen Wasserspiegelauslenkung von Wellenperiode und –höhe bei unregelmäßigem Seegang	147
Abbildung 6-53:	Statistik der Wellenhöhe bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)	147
Abbildung 6-54:	Verhältnis der mit den Sensoren BM100-TYP A und GWK-WP1 ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und –höhe	148
Abbildung 6-55:	Amplitudenspektrum der mit den Sensoren GWK-WP1 und BM100-TYP A im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)	148
Abbildung 6-56:	Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP A und GWK-WP2 im GWK bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts)	149
Abbildung 6-57:	Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP A und GWK-WP1 im GWK bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen	149

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1:	Dielektrizitätskonstante und Permeabilitätszahl [nach KERR (1987), LEMKE (1991)]	110
--------------	--	-----

1 Einleitung

Wesentlich für die Bemessung und Konstruktion von Seeverkehrswasserbauten und Küstenschutzbauwerken sind die auf diese wirkenden hydraulischen Beanspruchungen aus Wasserständen und Seegang. Traditionell erfolgt die Messung der genannten Belastungsgrößen mit von einander getrennten Meßsystemen. So kommen heute zur Wasserstandsmessung i.d.R. Lattenpegel, Schwimmerpegel und Druckluftpegel und zur Seegangsmessung Druckmeßdosen, Seegangbojen sowie Drahtwellenpegel zum Einsatz. Bei den genannten Methoden handelt es sich um berührende Meßverfahren. Durch den direkten Kontakt mit Wasser beeinflussen die genannten Sensoren, wenn auch in geringem Maße, die Meßgröße und sind erheblicher chemischer (Korrosion, speziell im Bereich der Wasserwechselzone), biologischer (Algen- und Muschelbesatz) sowie mechanischer Beanspruchung (Wellenschlag) ausgesetzt. Dies erfordert einen großen personal- und kostenintensiven Aufwand der technischen Pflege, Wartung und meßtechnischen Kontrolle [BARJENBRUCH ET AL., 2000]. Berührungslose Meßverfahren reduzieren den Wartungsaufwand, vereinfachen die Messung und verändern die Meßgrößen nicht. Typische berührungslose Meßverfahren sind Ultraschall-, Lidar-, Radar- bzw. Röntgenstrahlung nutzende Altimeter [OTTO, 1997]. Im Gegensatz zu den o.g. traditionellen Meßverfahren ermöglichen diese die zeitgleiche Wasserstands- und Seegangsmessung mit nur einem Sensor. Die Röntgenstrahlungswasserstandspegel werden aufgrund ihrer hohen Kosten sowie der strengen gesetzlichen Auflagen (Strahlenschutzverordnung) i.d.R. nicht verwendet. Auch Ultraschallpegel sind problematisch in der Verwendung, da dieses Meßprinzip die genaue Kenntnis der Schallgeschwindigkeit erfordert. Diese ist jedoch abhängig von Temperatur, Feuchte und Druck, was eine zusätzliche Messung dieser Größen erforderlich macht. Ebenso sind auch Lidar-Verfahren (engl. *light detection and ranging*) wegen der Absorption von Licht in der Luftsäule über der Wasseroberfläche, insbesondere durch Gischt oder bei Nebel, ungeeignet [OTTO, 1997]. Radar-Verfahren (engl. *radio detection and ranging*) weisen keines der genannten Probleme auf und werden daher seit Ende der 1980er Jahre zur Füllstandsmessung, speziell in der chemischen Industrie, verwendet. Die BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (BFG) in Koblenz prüft zur Zeit den Einsatz solcher Radar-Füllstandssensoren in der Hydrometrie [BARJENBRUCH ET AL., 2000]. Im Rahmen dieser Prüfung führt das FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN der Universität Hannover im Auftrag der BFG Einsatztests mit verschiedenen kommerziellen Radarsensoren auf dem Gebiet der Seegangsmessung durch [MAI U. ZIMMERMANN, 2000]. Der Aufbau, die Durchführung und Auswertung sowie die Ergebnisse dieser Experimente werden im Rahmen dieser Arbeit erläutert.

2 Meßverfahren zur Seegangsmessung

2.1 Traditionelle Verfahren

2.1.1 Drahtwellenpegel

Das grundlegende Funktionsprinzip von Drahtwellenpegeln basiert auf der im Vergleich zu Luft erhöhten Leitfähigkeit von Wasser. Auf dieser Grundlage finden zwei unterschiedliche Verfahren Anwendung:

Verfahren A [Delft Hydraulics, 1988]

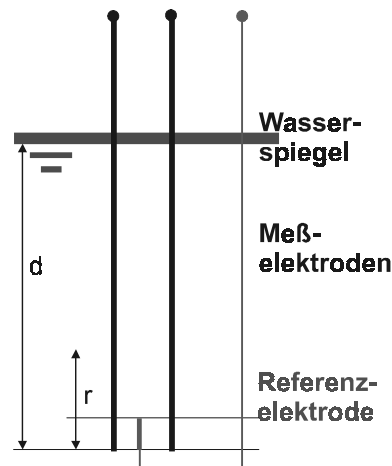


Abbildung 2-1: Meßprinzip von Drahtwellenpegeln (Verfahren A)

Zwei in Wasser eintauchende, vertikale Metallelektroden bilden den eigentlichen Wasserstandspegel (Abbildung 2-1). Der zwischen den Elektroden gemessene elektrische Widerstand R_d ist umgekehrt proportional zur Eintauchtiefe der Elektroden d und zur spezifischen Leitfähigkeit des Wassers G , d.h.

$$R_d = k_1 \cdot \frac{1}{G \cdot d}$$

wobei k_1 die Proportionalitätskonstante bezeichnet.

Um den Einfluß von Leitfähigkeitsschwankungen zu vermeiden, wird eine dauernd benetzte Referenz-Elektrode angeordnet.

Für den elektrischen Widerstand R_r der Referenzelektrode gilt entsprechend:

$$R_r = k_2 \cdot \frac{1}{G \cdot r}$$

Bildet man den Quotienten der elektrischen Widerstände, so verschwindet die Leitfähigkeit in der Bestimmungsgleichung für den Wasserstand:

$$d = \frac{k_1}{k_2} \cdot r \cdot \frac{R_r}{R_d} = \tilde{k} \cdot \frac{R_r}{R_d}$$

Die Proportionalitätskonstante \tilde{k} ist abhängig von den Abmessungen der Elektroden (Durchmesser, Abstand) und ihrem Oberflächenzustand. Der Parameter wird in der Regel vor Versuchsbeginn mittels einer Kalibrierung bestimmt.

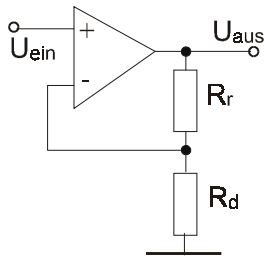


Abbildung 2-2: Schaltung zur Widerstandsmessung

Die beiden Widerstände bilden das Gegenkopplungsnetzwerk eines nicht-invertierenden Operationsverstärkers (Abbildung 2-2), der mit einer konstanten Wechselspannung der Frequenz von 5 kHz gespeist wird. Die Verstärkung der Schaltung ist

$$U_{\text{aus}} = U_{\text{ein}} \cdot (1 + R_r / R_d)$$

Durch diese Schaltung verändert sich die Ausgangsspannung proportional zur Eintauchtiefe d .

Verfahren B [TAUTENHAIN, 1988]

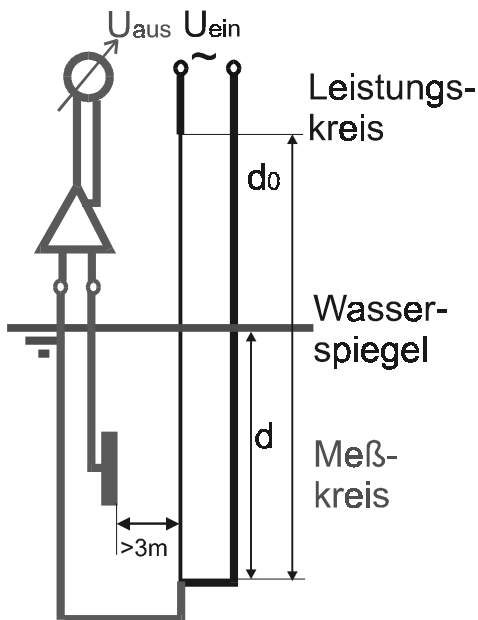


Abbildung 2-3: Meßprinzip von Drahtwellenpegeln (Verfahren B)

Der Drahtwellenpegel nach Verfahren B besteht aus einem Leistungskreis – einem blanken Wellenmeßdraht ($1,5 \Omega/m$) und einer isolierten Kupferspeiseleitung ($0,007 \Omega/m$) – und einem Meßkreis – einer isolierten Kupferleitung zum Fußpunkt und einer Bezugselektrode – (Abbildung 2-3). Durch die im Vergleich zum Meßdraht niederohmige Speise liegt nahezu die gesamte Speisespannung am Meßdraht an. Der Spannungsabfall am Meßdraht zwischen Fußpunkt und Wasseroberfläche wird über den Widerstand des Wassers – dieser kann durch den sehr hohen Eingangswiderstand des Meßverstärkers vernachlässigt werden – gemessen und ist proportional zur Eintauchtiefe d des Pegels. Es gilt

$$d = d_0 \cdot \frac{U_{\text{aus}}}{U_{\text{ein}}} = \tilde{k} \cdot U_{\text{aus}}$$

wobei d_0 die gesamte Länge des Wellenpegels, U_{ein} die an den Referenzkreis angelegte Spannung und U_{aus} die an der Bezugsselektrode gemessene Spannung bezeichnet. Auch bei dem Verfahren B können Schwankungen der Leitfähigkeit G auftreten. Die daraus resultierenden Abweichungen können jedoch wegen des hohen Eingangswiderstands des Meßverstärkers vernachlässigt werden. Problematisch wirken sich jedoch Leitfähigkeitsänderungen bei, z.B. aufgrund von Salz- bzw. Temperaturgradienten, geschichtetem Wasser aus. Diese führen zu Nicht-Linearitäten in der o.g. Beziehung.

2.1.2 Seegangsbojen

Bei Wellenbojen kommen zwei unterschiedliche Meßprinzipien zum Einsatz, entweder die Beschleunigungsmessung oder die Messung der Verankerungskraft [KOHLHASE, 1983].



Abbildung 2-4: Seegangsmeßboje WAVERIDER [DATAWELL BV, 2000]

Da das Prinzip der Messung der Verankerungskraft heute nur noch geringe Anwendung findet, wird im folgenden nur das Beschleunigungsprinzip näher erläutert. Wellenmeßgeräte nach dem Beschleunigungsprinzip bestimmen die Wasserspiegelauslenkung durch zweifache Integration der durch die Wellenbewegung hervorgerufenen vertikalen Beschleunigung der Boje. Die vertikale Beschleunigung wird entweder direkt durch einen Beschleunigungsmesser, dessen Meßachse entweder durch eine kardanische Flüssigkeitslagerung in der Boje (Kompaßprinzip) oder durch eine Stabilisierung der Boje durch einen an der Unterseite herausragenden Stab mit Gewicht (Schwerkraftstabilisierung) in vertikaler Richtung gehalten wird [LUCK, 1984], oder durch drei zueinander senkrecht angeordnete Beschleunigungsmesser ermittelt [SCHADE, 1991].

Das letztgenannte Verfahren der Registrierung von Vertikal- und Horizontalbeschleunigungen findet bei der in Abbildung 2-4 gezeigten Boje vom Typ DIRECTIONAL WAVERIDER Anwendung und ermöglicht neben der Ermittlung der Wellenhöhe auch eine Ermittlung der Seegangsrichtung.

2.1.3 Druckmeßgeräte

Die nach dem Druckmeßprinzip arbeitenden Wellenmeßgeräte messen nicht die Bewegung der Wasseroberfläche selbst, sondern die hierdurch hervorgerufenen Änderungen des hydrostatischen Druckes. Dazu werden die Drucksensoren i.d.R. auf dem Meeresboden eingebaut [LUCK, 1984]. Zur Druckmessung werden heute fast ausschließlich piezoresistive Sensoren verwendet, traditionelle Systeme, wie z.B. nach dem Schwingsaitenprinzip, finden kaum noch Anwendung. Abbildung 2-5 zeigt einen piezoresistiven Drucksensor der Fa. DRUCK MESSTECHNIK GMBH, der auch am FRANZIUS-INSTITUT vorhanden ist.



Abbildung 2-5: Druckmeßsonden [DRUCK MESSTECHNIK GMBH, 2000]

Die Meßgenauigkeit der Wellenhöhe durch Druckmeßgeräte wird in hohem Maße von der Einbautiefe z des Sensors unter der Wasseroberfläche bestimmt. Die Ursache dafür ist die Notwendigkeit zur Umrechnung des gemessenen Druckes p in die Wellenhöhe H an der Oberfläche, welche sich unter Annahme der linearen Wellentheorie zu

$$H = N \cdot \frac{p}{\rho \cdot g} \cdot \frac{\cosh(k \cdot d)}{\cosh(k \cdot (d+z))}$$

mit der Wasserdichte ρ , der Erdbeschleunigung g , der Wellenzahl k ($=2\pi/L$), der Wassertiefe d , der Einbautiefe z (am Boden gilt: $z = -d$) und einem Korrekturfaktor N ($N \approx 1,0$) ergibt [BISHOP u. DONELAN, 1987]. Es ergibt sich also, daß die Messung um so genauer sind, je näher der Drucksensor an der Wasseroberfläche ist. Im tidebeeinflussten Gebieten folgt hieraus eine zeitlich Änderung der Genauigkeit der Messung der Seegangparameter.

2.2 Radar-Wasserstandspegel

Das grundlegende Prinzip der Radar-Wasserstandspegel beruht auf dem gerichteten Senden von Mikrowellen, d.h. elektromagnetischen Wellen des Frequenzbereiches von $f_0 = 1$ GHz bis $f_0 = 25$ GHz. Dies entspricht einer Wellenlänge $\lambda_0 = c / f_0$ von etwa 0,3 m bis 0,012 m, wobei c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet. Die Lichtgeschwindigkeit

im Ausbreitungsmedium c ist abhängig von den elektromagnetischen Eigenschaften des Ausbreitungsmediums, charakterisiert durch Dielektrizitätskonstante ϵ_r und Permeabilitätszahl μ_r :

$$c = \frac{c_0}{n} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c_0 \approx 2,9980 \cdot 10^8$ m/s, der elektrischen Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ AsV⁻¹m⁻¹ und der magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6}$ VsA⁻¹m⁻¹. Die für den Einsatz als Wasserstandspegel maßgebenden Konstanten ϵ_r und μ_r sind für eine Frequenz von 10 GHz in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Medium	ϵ_r	μ_r
	[-]	[-]
Luft	1 - 0 i	≈ 1
Wasser	67 - 23 i	≈ 1
Salzwasser	52 - 37 i	≈ 1
Eis	3,2 - 10 ⁻² i	≈ 1

Tabelle 2-1: Dielektrizitätskonstante und Permeabilitätszahl [nach KERR (1987), LEMKE (1991)]

Treffen die gesendeten Mikrowellen auf ein anderes Medium, z.B. die Wasseroberfläche, so wird ein Teil der elektromagnetischen Wellen reflektiert und schließlich durch einen Empfänger registriert. Abbildung 2-6 stellt den Strahlengang der Mikrowellen schematisch dar.

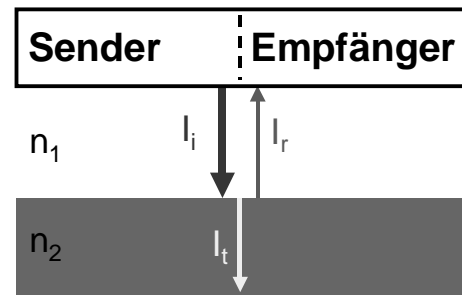


Abbildung 2-6: Schema des Strahlenganges der Mikrowellen

Der Reflexionsgrad, d.h. das Verhältnis der Intensitäten von gesendeten Mikrowellen I_i und reflektierten Mikrowellen I_r ergibt sich bei normalem Einfall zu [FEYNMAN ET AL., 1987]:

$$\frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

Die auf das reflektierende Medium auftreffenden Mikrowellen dringen in Abhängigkeit vom Imaginäranteil der Dielektrizitätskonstante ϵ_r (siehe Tabelle 2-1) in das Medium ein. Die Eindringtiefe δ berechnet sich nach FEYNMAN ET AL. [1987], wie folgt:

$$\delta = \sqrt{2 / (\epsilon_0 \mu_0 (2\pi \cdot f_0)^2 \cdot \text{Im}(\epsilon_r))}$$

Für Wasser ergibt sich so bei einer Frequenz der Mikrowellen von 10 GHz eine Eindringtiefe von $\delta = 1,4$ mm bzw. $\delta = 1,1$ mm (Salzwasser), für Eis ist die Eindringtiefe etwa $\delta = 67$ mm. Die Messung der Wassergrenzfläche ist somit sehr genau möglich, während eine Eisbedeckung die Messung stark erschwert.

Auf der Grundlage der dargestellten elektromagnetischen Eigenschaften werden zwei Verfahren – Puls-Verfahren und FMCW-Verfahren – zur Abstandsmessung zwischen Sender bzw. Empfänger und Wasseroberfläche unterschieden [TAYLOR U. JACKSON, 1986].

Beim Puls-Verfahren (engl. *time domain reflectometry*) werden Mikrowellen-Impulse einer definierten (Träger-) Frequenz f_0 und Bandbreite mit der Intensität I_i vom Meßsystem gesendet und nach der Reflexion an der Wasseroberfläche mit der Intensität I_r empfangen. Die Laufzeit der Impulse Δt – von der Antenne zur Wasseroberfläche und zurück zum Empfänger – ist proportional zur Distanz d zwischen Meßsystem und Wasseroberfläche [HEIM, 2000]:

$$d = 0,5 \cdot c \cdot \Delta t = 0,5 \cdot c \cdot (t_1 - t_0)$$

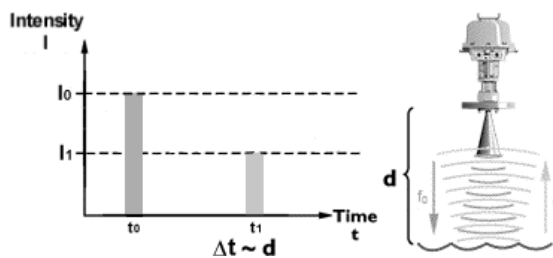


Abbildung 2-7: Meßprinzip des Radar – Wasserstandspegels – Puls-Verfahren [MAI UND ZIMMERMANN, 2000]

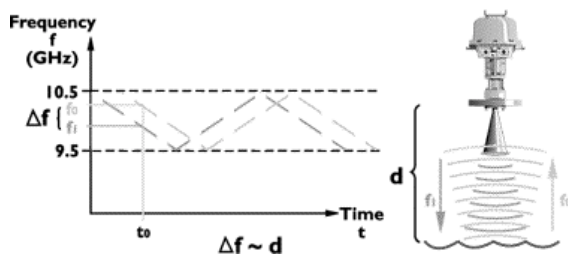


Abbildung 2-8: Meßprinzip des Radar – Wasserstandspegels – FMCW-Verfahren [C & G INDUSTRIAL SUPPLY, 1998]

Abbildung 2-7 verdeutlicht das Meßprinzip des Puls-Verfahrens. Die Genauigkeit der Zeitmessung muß genauer als $6,6 \cdot 10^{-12}$ s sein, um eine Auflösung der Abstandsmessung von 1 mm zu erreichen [TAYLOR U. JACKSON, 1986].

Das FMCW-Verfahren (engl. *frequency modulated continuous wave*) mißt den Abstand mit Hilfe eines Phasenvergleichs (engl. *optical phase ranging*) [TAYLOR U. JACKSON, 1986]. Der FMCW-Radarsensor sendet ein rampenförmig frequenzmoduliertes Signal aus und empfängt ein entspre-

chendes Echo gemäß der Reflexion an der Wasseroberfläche (Abbildung 2-8). Aufgrund der Laufzeit ergibt sich zwischen Sende- und Empfangssignal eine niederfrequente Frequenzverschiebung (engl. *beat frequency*) Δf , die proportional zum Abstand d ist [ORÉANS U. HEIDE, 2000]. Diese wird durch Mixen des gesendeten und reflektierten Signals nachgewiesen [MARFIN ET AL., 1986]. Für den Abstand gilt:

$$d = 4 \cdot c / F_m \cdot \Delta f / \Delta f_{\max}$$

wobei F_m die Modulationsfrequenz und Δf_{\max} die Schwan-
kungsbreite der Sendefrequenz bezeichnet.

Die Reflexion des vom Meßgerät emittierten Radar-Signals erfolgt für beide Verfahren – Puls- und FMCW-Verfahren – in der Regel nicht nur an einer einzelnen Grenzfläche, sondern kontinuierlich entlang der Ausbreitungsstrecke. Abbildung 2-9 zeigt die Intensität des reflektierten Radarsignals in Abhängigkeit von der Entfernung vom Radarsensor. An der Wasseroberfläche findet aufgrund der großen Diskontinuität der Dielektrizitätskonstante eine erhöhte Reflexion statt, welche sich in einem Anstieg des Nutzechos bemerkbar macht und die Entfernungsmessung ermöglicht.

Beide Meßverfahren von Wasserstandspegeln können eine Genauigkeit von 1 mm bei einer Meßlänge von 0 m bis 30 m im Falle von homogenen und ebenen Flächen erreichen. Für rauhe Oberflächen, z.B. Wasseroberflächen mit unregelmäßigem Seegang, vergrößert sich der Meßfehler aufgrund der Modulation des reflektierten Mikrowellen-Strahls durch die Oberflächenrauigkeit [BURENIN, 1998].

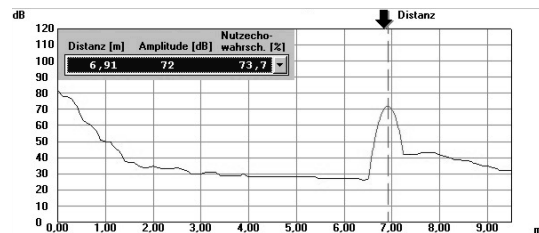


Abbildung 2-9: Radar-Rückstreusignal und Nutzung des Echos zur Distanzmessung

3 Verwendete Wellenpegel-Typen

3.1 GHM - Wave Height Meter

Abbildung 3-1 zeigt den im Rahmen der im folgenden beschriebenen Versuche verwendeten Drahtwellenpegel GHM WAVE HEIGHT METER des Wasserbaulabors DELFT HYDRAULICS [DELFT HYDRAULICS, 1988]. Neben den in

Abbildung 3-1 dargestellten Stahlelektroden mit integriertem Vorverstärker gehört zu diesem System ein separater Hauptverstärker. Die Grundlage des Meßverfahrens ist das in Kapitel 2.1.1 vorgestellte Verfahren A. Der Meßbereich umfaßt 50 cm. Die maximale Meßfrequenz beträgt 10 Hz. Der Hersteller DELFT HYDRAULICS gibt die Genauigkeit mit 0,5 % an.



Abbildung 3-1: Ansicht des Drahtwellenpegels GHM
WAVE HEIGHT METER

Zur Umrechnung des von den Wellenpegeln GHM gelieferten Spannungssignals in die Eintauchtiefe der Stahlelektroden der Wellenpegel in Wasser ist eine Kalibrierung auf der Grundlage der in Kapitel 2.1.1 abgeleiteten linearen Beziehung nötig. Abbildung 3-3 zeigt die gute Qualität der Kalibrierung der fünf Wellenpegel GHM.

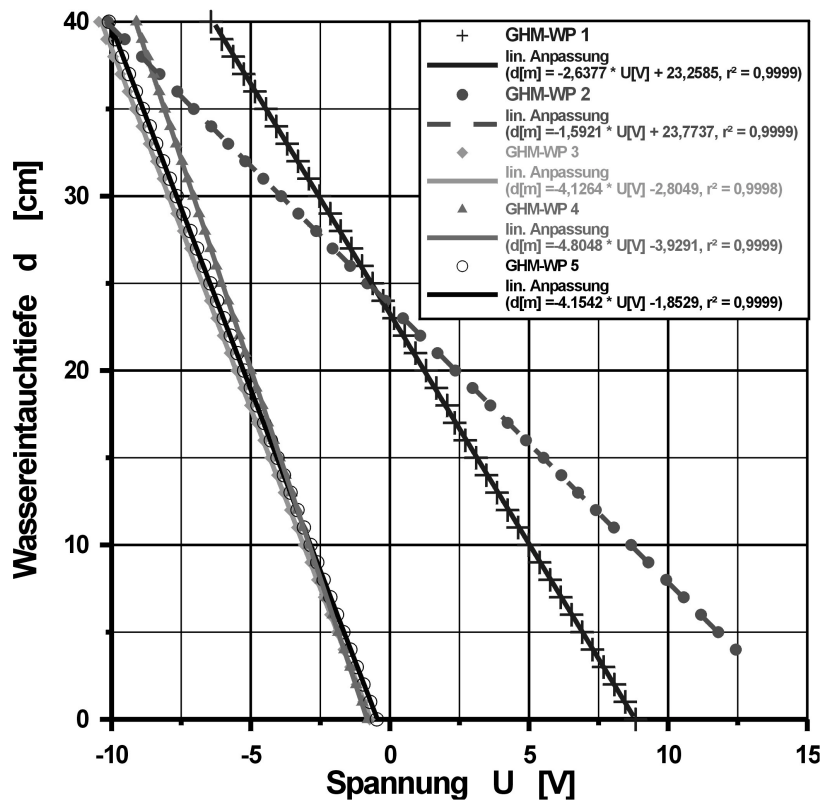
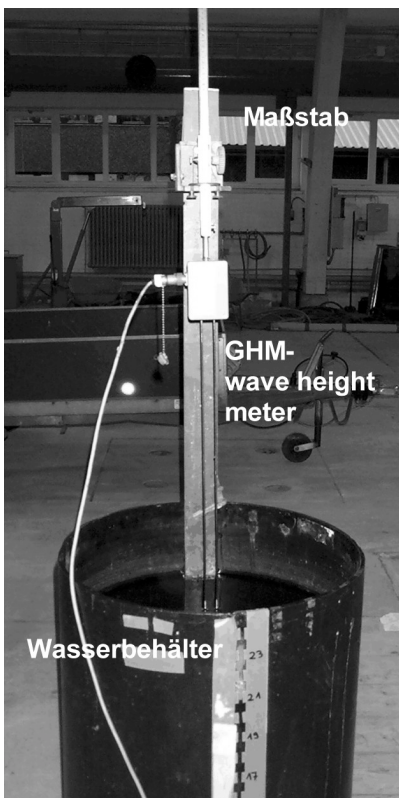


Abbildung 3-3: Eichung der Wellenpegel GHM

3.2 GWK-Drahtwellenpegel

Abbildung 3-4 zeigt den GWK-Drahtwellenpegel, welcher im Rahmen des SONDERFORSCHUNGSBEREICHES SFB 205 vom FRANZIUS-INSTITUT entwickelt worden ist [TAUTENHAIN, 1988]. Die Grundlage des Meßverfahrens der GWK-Drahtwellenpegel ist das in Kapitel 2.1.1 vorgestellte Verfahren B. Der Wellenmeßdraht des Referenzsystems hat einen Durchmesser von 0,9 mm und besteht aus einer federharten, korrosionsbeständigen Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung [JUNGE¹, 2000]. Die Referenzwechselspannung beträgt ca. 0,5 V bei einer Frequenz von 4 kHz bis 5 kHz.

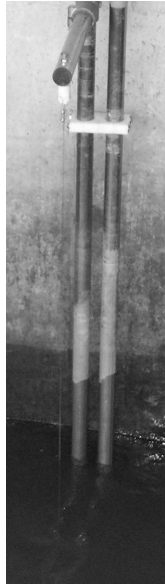


Abbildung 3-4: Ansicht des GWK-Drahtwellenpegels

Die Genauigkeit der Messung wird mit mind. 0,5 % angegeben. Die Grenzfrequenz beträgt mehr als 10 Hz.

Zur Umrechnung des von den GWK-Drahtwellenpegeln gelieferten Spannungssignals in die Wassertiefe im Wellenkanal wurde beim Befüllen des Wellenkanals eine Kalibrierung

3.3 Radar VEGAPULS, Fa. VEGA

Zur Abstandsmessung findet bei dem in Abbildung 3-6 dargestellten Radar VEGAPULS der FA. VEGA GRIESHABER KG, Schiltach, das Puls-Verfahren (siehe Kapitel 2.2) Anwendung. Die Frequenz der Radar-Wellen beträgt für dieses Gerät 5,8 GHz. Die Radarpulse werden als Pulspakete von der Dauer 1 ns mit Pulspausen der Dauer von 278 ns vom Antennensystem ausgesendet. Die Pulspaketfrequenz beträgt entsprechend ca. 3,6 MHz ($= 1/(1 \cdot 10^{-9} + 278 \cdot 10^{-9})$ Hz). Die Pulsfolge ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

Die Abstrahlung der Radar-Signale erfolgt über eine Hornantenne, die sich durch eine gute Fokussierung auszeichnet. Der Öffnungswinkel, welcher den Winkel zwischen Hauptabstrahlrichtung (maximale Intensität des Radar-Signals) und der Richtung, bei der die maximale Intensität um 3 dB reduziert ist, bezeichnet, beträgt 20° bei der im Rahmen dieser Versuche verwendeten Hornantenne mit maximalem Durchmesser von 150 mm.

brierung auf der Grundlage der in Kapitel 2.1.1 abgeleiteten linearen Beziehung durchgeführt. Abbildung 3-3 zeigt die sehr gute Qualität der Kalibrierung der verwendeten zwei GWK-Drahtwellenpegel

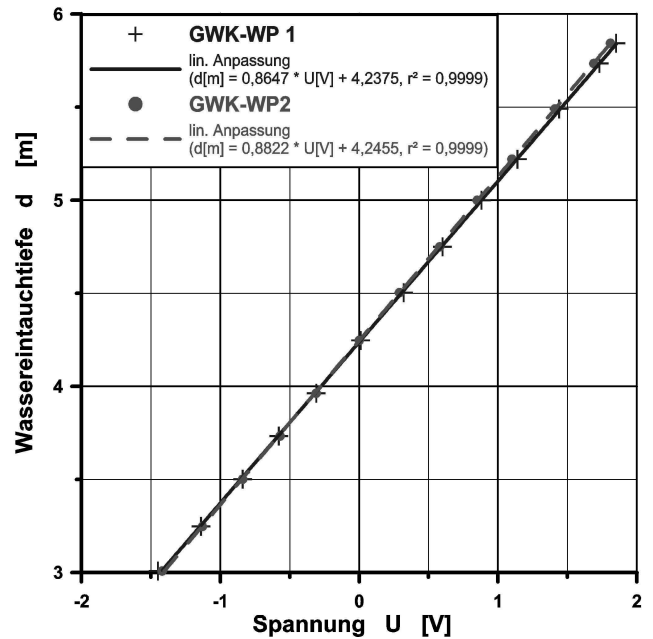


Abbildung 3-5: Eichung der GWK-Wellenpegel



Abbildung 3-6: Ansicht des Radar VEGAPULS

Abbildung 3-6 zeigt den Sendekegel der Hornantenne. Für einen Meßbereich kleiner als 30 m wird die Genauigkeit der Abstandsmessung mit 1mm angegeben.

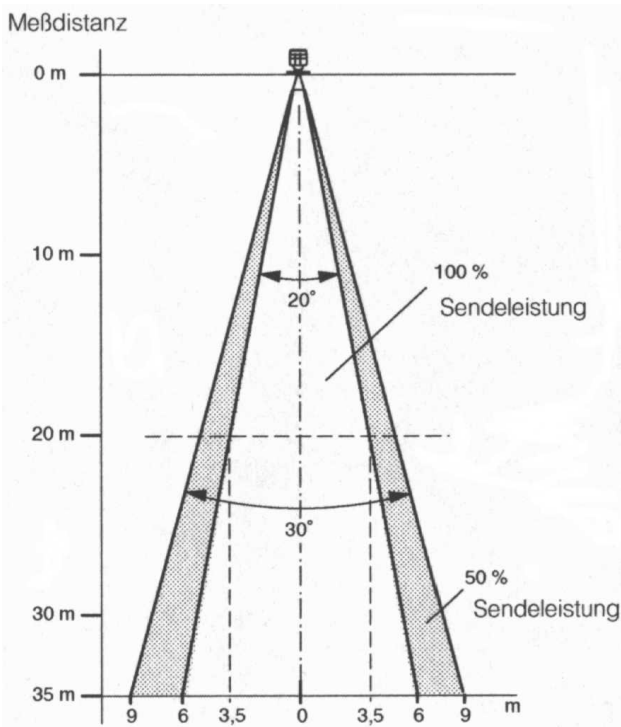


Abbildung 3-6: Sendekegel der Hornantenne DN150 [VEGA GRIESHABER KG, 1999a]

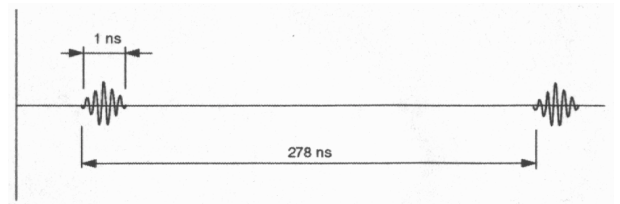


Abbildung 3-8: Zeitliche Folge der emittierten Radar-Pulse beim Sensor VEGAPULS [VEGA GRIESHABER KG, 1999a]

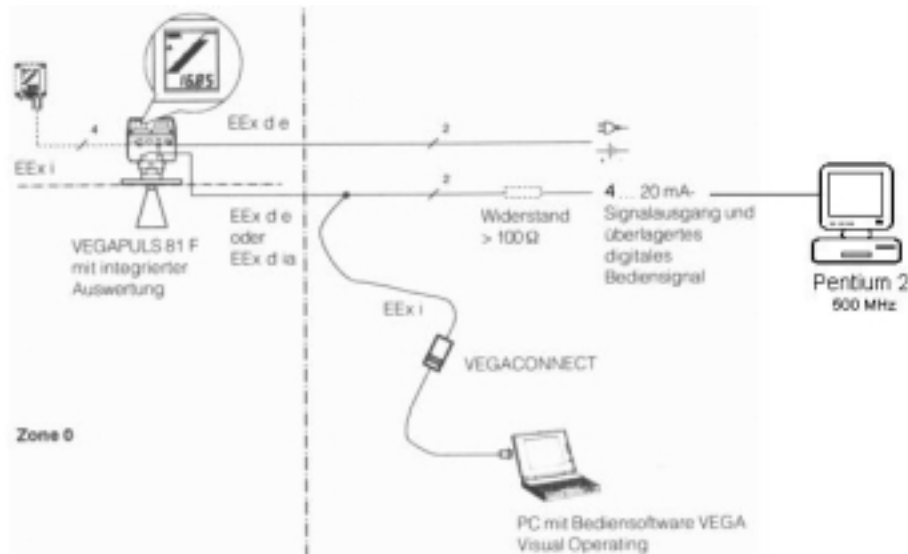


Abbildung 3-8: Meßwertfassung und Steuerung des Sensors VEGAPULS [nach VEGA GRIESHABER KG, 1999a]

Die Steuerung des Radar-Sensors VEGAPULS erfolgt, wie in Abbildung 3-8 dargestellt, über einen PC mit der Bediensoftware VEGA VISUAL OPERATING VVO [VEGA GRIESHABER KG, 1999b]. Die Anbindung des PC erfolgt über ein digitales, auf den Signalausgang des Sensors aufgeschaltetes Bediensignal, welches über den Adapter VEGACONNECT und die RS232-Schnittstelle eines PC eingespeist wird.

Im Rahmen der üblichen Gerätesteuerung (sog. Projektierung) können der Meßbereich, d.h. die minimal und maximal meßbare Distanz (Min-/Max-Abgleich), sowie die Meßbedingungen, d.h. Einbaugeometrie (hier: „Einbauort unberücksichtigt“), die Art des Füllgutes (hier: „Wasser“), die Art

der Meßwertveränderung (hier: „schnelle Meßwertänderung (größer 1m/min)“), die Integrationszeit (hier: 0 s), die Rauschunterdrückung (hier: „ohne“) u.a., vorgegeben werden. Neben der Änderung der genannten Standardparameter ist in der Wartungsumgebung der VVO die Einstellung sog. Spezialparameter möglich.

Im Gegensatz zu den traditionellen Wellenpegeln ist keine Kalibrierung des VEGAPULS erforderlich (vgl. Kap. 2.2). Der o.g. Min-/Max-Abgleich dient lediglich der Anpassung der Vertikalaufösung an das Meßproblem. Für den gemessenen Abstand gilt

$$d = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot (U - U_{\min}) = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{R \cdot (I_{\max} - I_{\min})} \cdot (U - R \cdot I_{\min})$$

wobei d_{\min} den minimalen Abstand, d_{\max} den maximalen Abstand, U die Signalspannung sowie U_{\max} (hier: 10 V) und U_{\min} (hier: 2 V) die maximale und minimale Signalspannung, welche sich nach dem Ohm'schen Gesetz aus der maximalen Stromstärke des Signals (hier: 20 mA) bzw. minimalen Stromstärke (hier: 4 mA) bei einem Abschlußwiderstand von 500Ω ergibt

Eine Prüfung der Installation des Radarsensors sowie seiner Linearität ist während der Befüllung des GROßEN WELLENKANALS GWK erfolgt. Das Ergebnis ist in Abbildung 3-9 dargestellt.

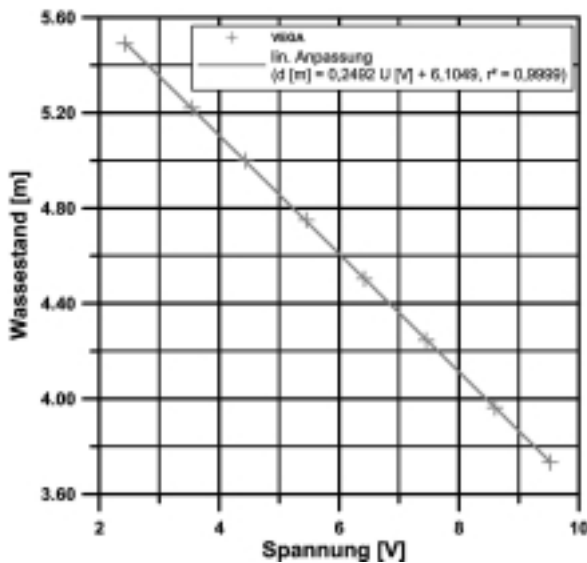


Abbildung 3-9: Prüfung der Linearität des VEGAPULS (27.04.2000)

3.4 Radar KALESTO, Fa. Ott

Das in Abbildung 3-10 dargestellte Radar KALESTO der FA. OTT MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, Kempten, nutzt das FMCW-Verfahren (siehe Kapitel 2.2) zur Abstandsmessung. Die Frequenz der Radar-Wellen beträgt für dieses Gerät 24,125 GHz (ISM-Band). Die Schwankungsbreite der Sendefrequenz Δf_{\max} beträgt 0,5 GHz [ORÉANS & HEIDE, 2000]. Der Meßbereich umfaßt Abstände d von 1,5 m bis 30 m, so daß die Modulationsfrequenz F_m etwa 40 MHz beträgt [OTT MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, 2000].



Abbildung 3-10: Ansicht des Radar KALESTO

Die Abstrahlung der Radar-Signale erfolgt über eine Hornantenne mit einem Abstrahlwinkel von 10° . Der im Vergleich zum Radar VEGAPULS geringe Abstrahlwinkel ergibt sich trotz der geringeren Antennenapertur des Radar KALESTO wegen der besseren Richtwirkung von Antennen bei höheren Frequenzen.

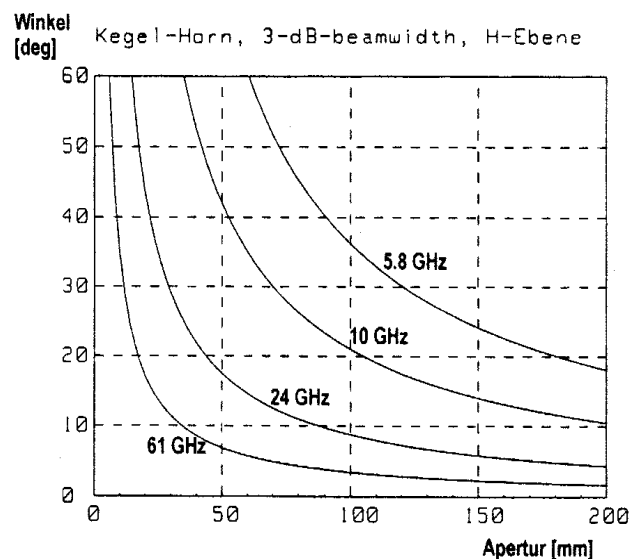


Abbildung 3-11: Abstrahlwinkel von Hornantennen als Funktion von Apertur und Frequenz [ORÉANS & HEIDE, 2000]

Abbildung 3-11 verdeutlicht die Abhängigkeit des Abstrahlwinkel der Antenne, d.h. der 3dB-Bandbreite (vgl. Abbildung 3-6), von der Frequenz und Apertur. So beträgt bei einer Antenne mit einer Apertur von 100 mm der Abstrahlwinkel 35° bei einer Radar-Frequenz von 5,8 GHz und 9° bei einer Frequenz von 24 GHz. Dies bedeutet im Vergleich zum Radar VEGAPULS eine erheblich bessere horizontale Auflösung. Die Genauigkeit der (vertikalen) Abstandsmessung wird vom Hersteller mit 1 mm angegeben.



Abbildung 3-12: Anschluß des Sensors KALESTO

Die Anpassung des Sensors KALESTO auf das Problem der Wellenmessung ist durch den Hersteller OTT in Zusammenarbeit mit der ATTINGIMUS NACHRICHTENTECHNIK GMBH, Braunschweig, erfolgt. Das Schaltbild ist in dargestellt [nach PLAGGE, 2000].

Der vom Sensor gelieferte Meßwert entspricht dem in mm gemessenen Abstand des Sensors von der Wasseroberfläche. Eine Prüfung der Installation des Radarsensors sowie seiner Linearität ist während der Befüllung des GWK erfolgt (Abbildung 3-13).

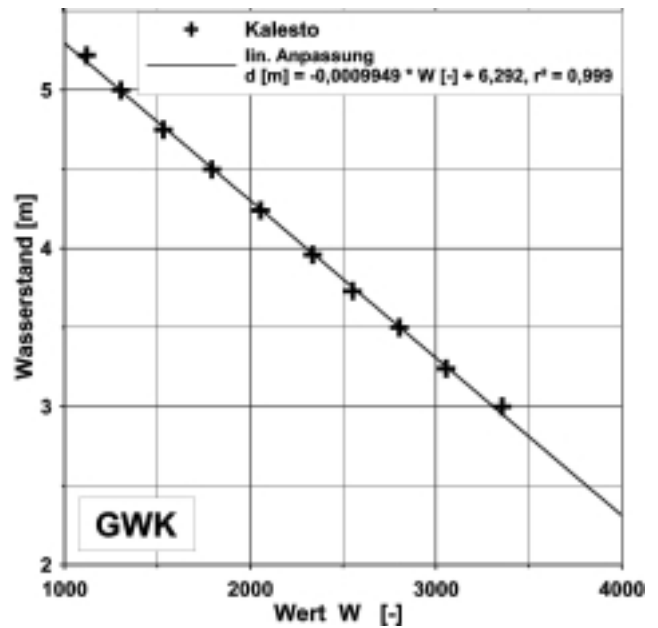


Abbildung 3-13: Prüfung der Signalausgabe des KALESTO (27.04.2000)

3.5 Radar BM100, Fa. KROHNE

Zur Abstandsmessung findet bei dem in Abbildung 3-14 dargestellten Radar BM100 der FA. KROHNE MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, Duisburg, das Puls-Verfahren (siehe Kapitel 2.2) Anwendung. Die Frequenz der Radar-Wellen beträgt für dieses Gerät 8,5 GHz (X-Band) [OTTO, 1997]. Die Radarpulse werden als Pulspakete von der Dauer 1 ns vom Antennensystem ausgesendet [KROHNE MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, 1996]. Im Gegensatz zu den Radars VEGAPULS und KALESTO erfolgt beim Radar BM100 keine freie Abstrahlung, sondern das Signal bleibt entweder an ein starres Zwei-Rohr-System (Abbildung 3-14, oben) oder in einem Koaxialrohr (Abbildung 3-14, unten) gebunden.

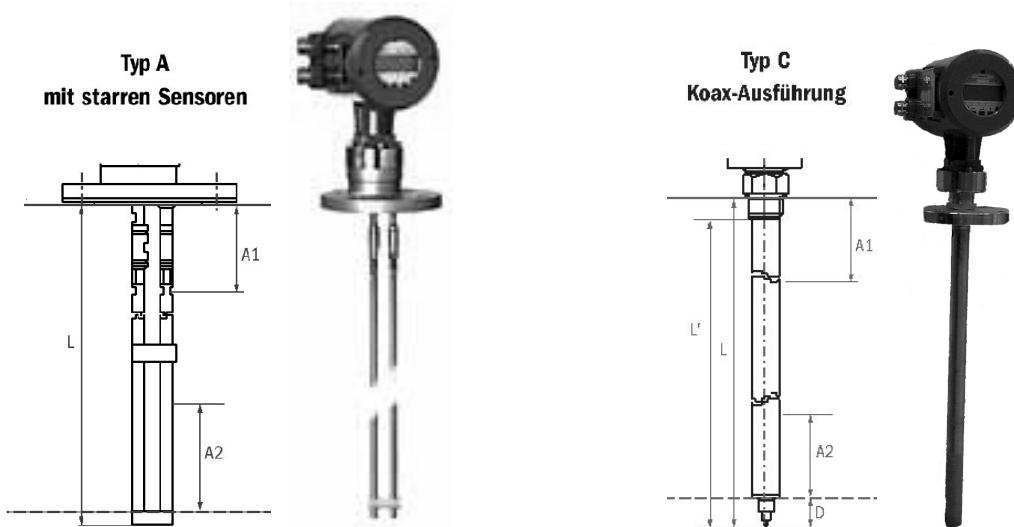


Abbildung 3-14: Skizze und Ansicht des Radar BM100, links: TYP A, rechts: TYP C [KROHNE MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, 1996]

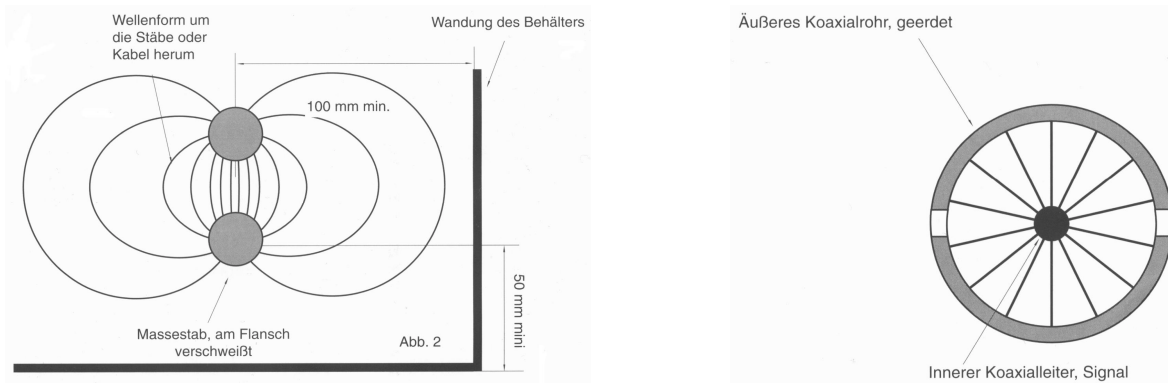


Abbildung 3-15: Feldlinien des elektrischen Feldes, links: BM100 Typ A, rechts: BM100 Typ C [KROHNE MEßTECHNIK GMBH & Co. KG, 1996]

Der Verlauf der elektrischen Feldlinien für ein Zwei-Rohr-System und ein Koaxialrohr ist in Abbildung 3-15 dargestellt. Im Gegensatz zu freiabstrahlenden Radars bleiben die elektromagnetischen Wellen und damit die Ausdehnung des Meßraumes räumlich stark begrenzt, so tritt speziell außerhalb des Koaxialrohrs gar kein elektromagnetisches Feld auf.

die elektromagnetischen Wellen und damit die Ausdehnung des Meßraumes räumlich stark begrenzt, so tritt speziell außerhalb des Koaxialrohrs gar kein elektromagnetisches Feld auf.

Die Radar-Sensoren BM100-TYP A und BM100-TYP C werden über eine Tastatursteuerung direkt an dem Gerät konfiguriert (Abbildung 3-16). Im Rahmen der üblichen Gerätesteuerung können im wesentlichen die Zeitkonstante der Geräte sowie der Meßbereich eingestellt werden. Die Zeitkonstante ist für beide Sensoren minimal, d.h. zu 1 s, gewählt worden. Der Meßbereich ist für den Radar-Sensor BM100-Typ A zu 0,0 m bis 8,0 m und für den Sensor BM100-Typ B zu 0,0 cm bis 54,0 cm gewählt worden. Den genannten Meßdistanzen sind, ähnlich dem Min-/Max-Abgleich des Radar-Sensors VEGAPULS (vgl. Kap. 3.3), die Grenzwerte des Stromausgangs des Radar-Sensors von 4 mA und 20 mA zugeordnet. Dies entspricht bei einem Abschlußwiderstand von 250 Ω einer Signalspannung von 1 V bis 5 V.



Abbildung 3-16: Steuerung der Radar-Sensoren BM100

Eine Prüfung der Installation des Radarsensors sowie seiner Linearität ist während der Befüllung der Wellenkanäle WKS und GWK erfolgt (Abbildung 3-17).

Der Verlauf der elektrischen Feldlinien für ein Zwei-Rohr-System und ein Koaxialrohr ist in Abbildung 3-15 dargestellt. Im Gegensatz zu freiabstrahlenden Radars bleiben

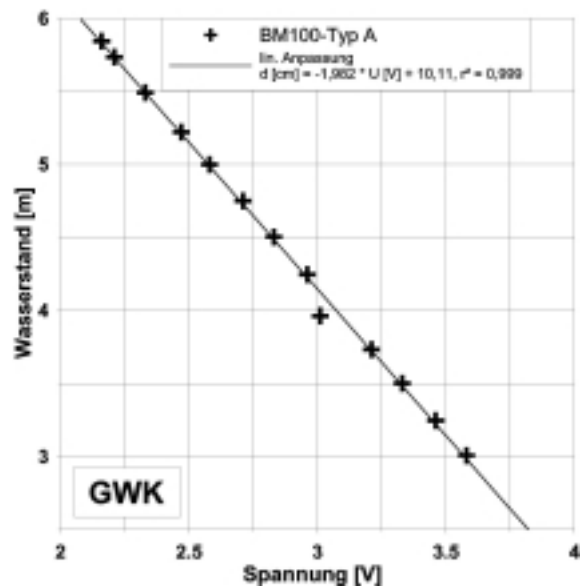
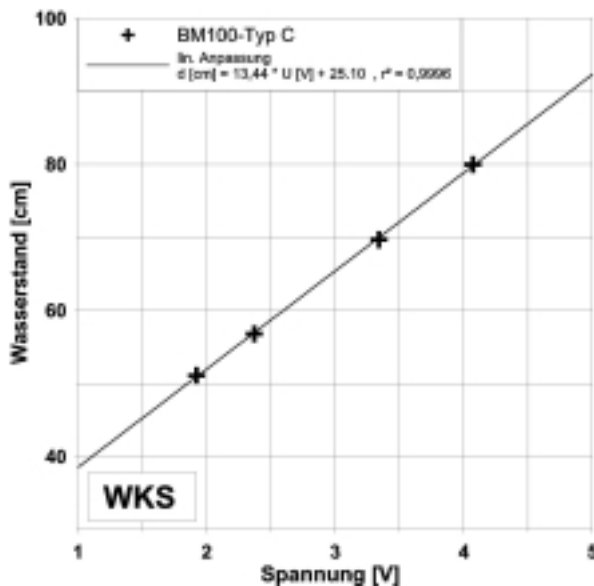


Abbildung 3-17: Prüfung der Linearität des BM100-TYP C (links) und des BM100-TYP A (rechts)

4 Versuchsprogramm

4.1 Versuche im Wellenkanal Schneiderberg

Die erste Versuchsphase der Untersuchung der kommerziellen Radar-Sensoren ist im WELLENKANAL SCHNEIDERBERG WKS des FRANZIUS-INSTITUTS durchgeführt worden.

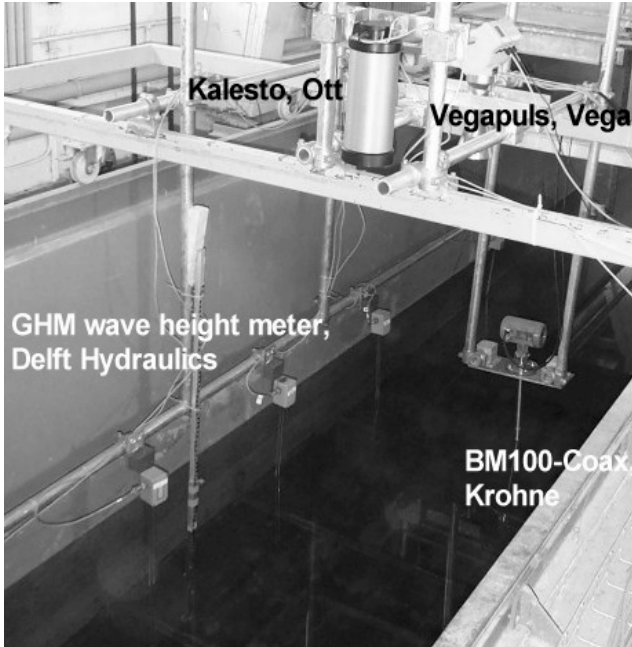


Abbildung 4-1: Instrumentierung des WELLENKANALS SCHNEIDERBERG WKS

Die Abbildung 4-1 zeigt die Instrumentierung der Meßbühne des WKS. Diese umfaßt fünf traditionelle lange Wellenpegel des Typs GHM WAVE HEIGHT METER sowie die

drei kommerziellen Radar-Sensoren – VEGAPULS, KALESTO und BM100-TYP C.

Den einzelnen Radar-Wasserstandspegeln ist jeweils ein traditioneller Draht-Wellenpegel mit gleicher Stationierung zugeordnet, um einen unmittelbaren Vergleich der Meßergebnisse zu ermöglichen (Abbildung 4-2). Die Meßbühne ist in 23,2 m bis 29,4 m Entfernung von der Wellenmaschine auf der Höhe des Sichtfensters im Wellenkanal angeordnet (Abbildung 4-3).

Zur Veranschaulichung der Versuche wird die Wasserspiegelauslenkung durch das Sichtfenster mit einer Videokamera, welche auf einen Lattenpegel fokussiert ist, aufgezeichnet. Die Entfernung der Meßbühne von der Böschung am Ende des WKS, welche die einlaufenden Wellen teilweise reflektiert, beträgt $L \approx 74$ m. Die von Reflexionen unbeeinflusste Meßdauer $t_{\text{ungestört}}$ ergibt sich damit zu

$$c = \sqrt{g \cdot d} \approx 3,1 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{ungestört}} = \frac{2 \cdot L}{c} \approx \frac{2 \cdot 74}{3,1} \text{ s} \approx 48 \text{ s}$$

mit der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, der Wassertiefe $d \approx 1,00 \text{ m}$ und der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit c .

Der Reflexionsgrad beträgt bei Wellensteilheiten H/L bis 20 für die 1:9,5 geneigte Böschung am Ende des WKS weniger als 18 % [CERC, 1984].

Der Datenstrom der verschiedenen Meßinstrumente (8 Kanäle) ist mit Hilfe des Programmsystems DIADEM [GFS SYSTEMTECHNIK GMBH & CO. KG, 1999] erfaßt worden. Dadurch ist eine spätere Synchronisation der Datensätze der Meßinstrumente nicht nötig. Abbildung 4-4 zeigt den programmierten Schaltplan der Datenerfassung.

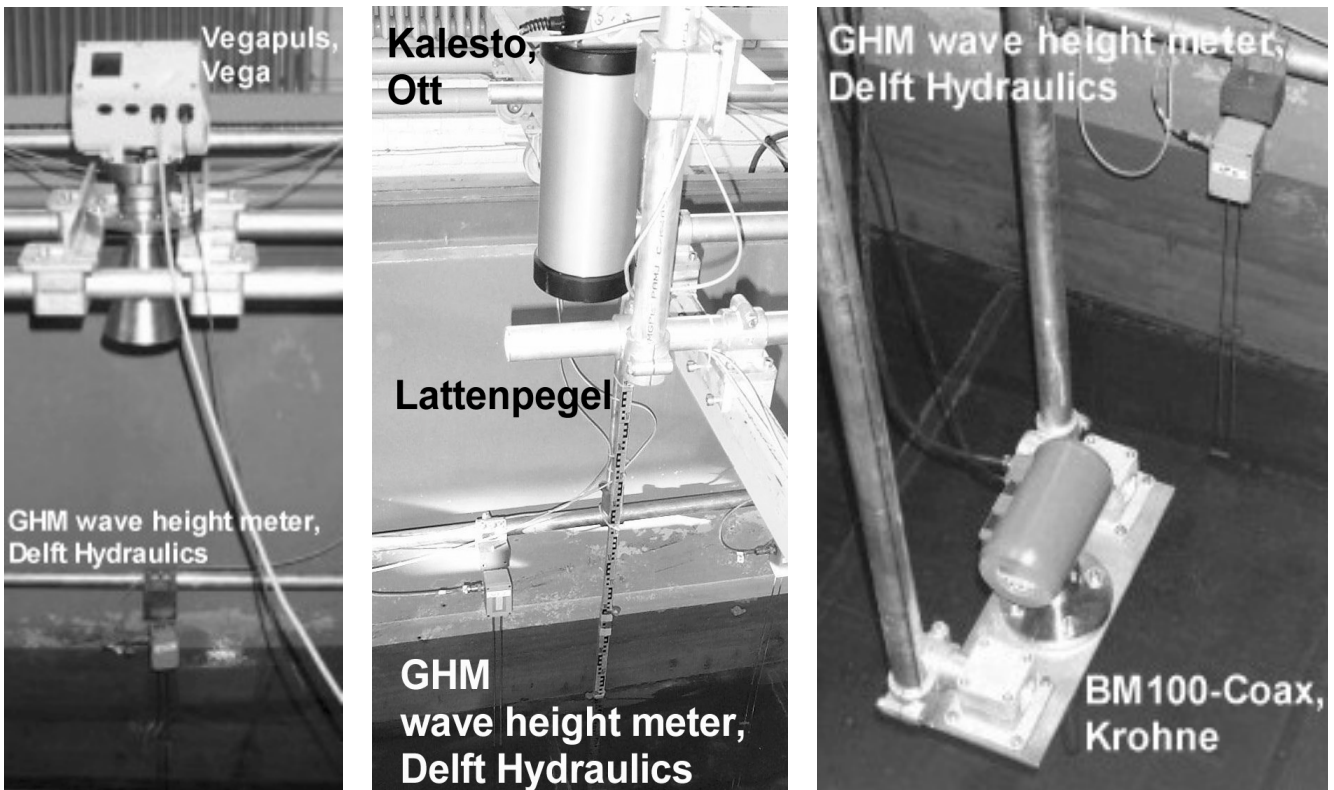


Abbildung 4-2: Zuordnung traditioneller Wellenpegel zu Radar-Sensoren

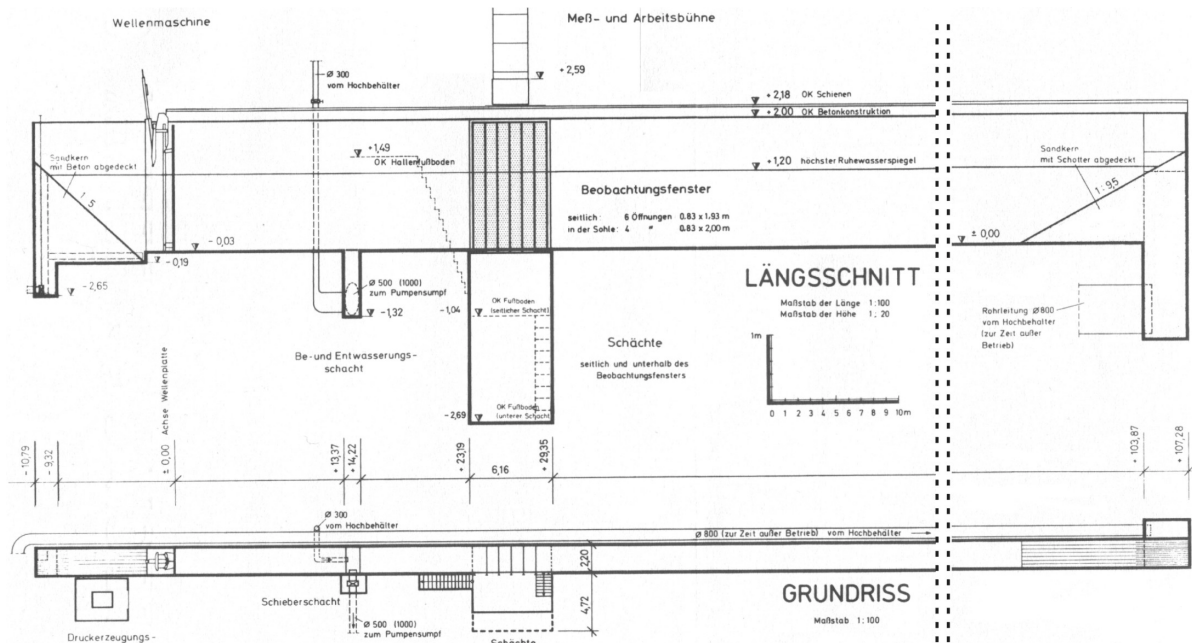


Abbildung 4-3: Position der Meßbühne im WELLENKANAL SCHNEIDERBERG WKS [nach GRÜNE, 1976]

Für die Meßgeräte mit analogem Signalausgang – GHM WAVE HEIGHT METER, VEGAPULS, BM100-COAX – sind in DIADEM vorgefertigte Module im Schaltplan verwendet worden, während für den Radar-Sensor KALESTO mit digitalem Signalausgang ein ergänzendes Modul programmiert worden ist. Die Meßfrequenz ist jeweils zu 10 Hz festgelegt worden. Die Dauer der einzelnen Versuche beträgt aufgrund von Einschränkungen der verwendeten 16-bit Version DIADEMS maximal $819,2 \text{ s}^1$.

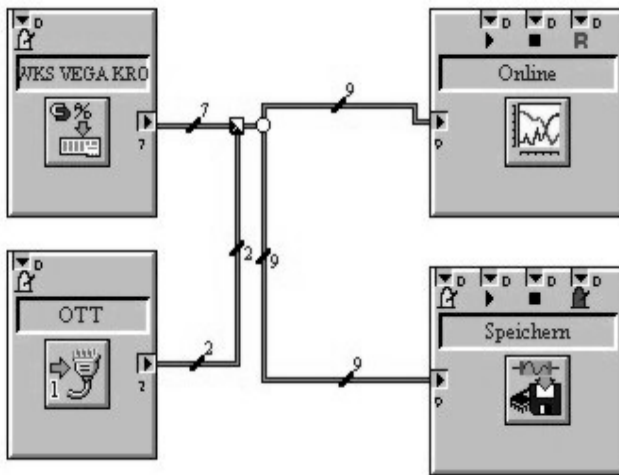


Abbildung 4-4: Schema der Datenerfassung im WELLENKANAL SCHNEIDERBERG WKS

Die Meßergebnisse weisen also einen, wenn auch geringen, Reflexionseinfluß auf.

Im WELLENKANAL SCHNEIDERBERG WKS sind Versuche mit regelmäßigem und unregelmäßigem Seegang durchgeführt

worden. Der unregelmäßige Seegang ist als JONSWAP-Spektrum charakterisiert, unverändert bleiben dabei die Phillips-Konstante $\alpha = 0,0081$, der Peaküberhöhungsfaktor $\gamma = 3,3$ und die Peakbreite $\sigma = 0,07$ bzw. $0,09$ (siehe Kap. 5.3). Das Versuchsprogramm umfaßt Wellenhöhen bzw. signifikante Wellenhöhen von 5 cm bis 40 cm und Wellenperioden bzw. Peakperioden von 1 s bis 7 s bei Wassertiefen von 0,80 m bis 0,90 m.

4.2 Versuche im GROßEN WELLENKANAL (GWK)

Die zweite Versuchsphase der Untersuchung der kommerziellen Radar-Sensoren ist im GROßEN WELLENKANAL GWK des FORSCHUNGSZENTRUMS KÜSTE FZK durch das FRANZIUS-INSTITUT durchgeführt worden. Die Experimente sind zeitgleich zu Untersuchungen des LEICHTWEIß-INSTITUTS der Universität Braunschweig erfolgt, was gewisse Einschränkungen in der Festlegung der Instrumentierung und dem Versuchsumfang mit sich gebracht hat. Die Abbildung 4-5 zeigt die Instrumentierung des GWK. Diese umfaßt zwei traditionelle, am FRANZIUS-INSTITUT entwickelte Draht-Wellenpegel GWK-WP sowie die drei kommerziellen Radar-Sensoren – VEGAPULS, KALESTO und BM100-TYP A. Die freistrahrenden Radars VEGAPULS und KALESTO sind an der Meßbühne des GWK etwa in Kanalmitte befestigt, während das Radar BM100-TYP A sowie die Draht-Wellenpegel GWK-WP an vorhandenen, speziellen Halterungen in der Nähe der Kanalwand befestigt sind. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, den einzelnen Radar-Wasserstandspegeln jeweils einen traditionellen Draht-Wellenpegel mit gleicher Stationierung zuzuordnen, um einen unmittelbaren Vergleich der Meßergebnisse zu ermöglichen. Der instrumentierte Meßbereich ist etwa in 100 m Entfernung von der Wellenmaschine auf der Höhe des ersten Meßcontainers im Wellenkanal angeordnet (Abbildung 4-6).

¹ Die auch am FRANZIUS-INSTITUT vorhandene 32-bit Version DIADEMS weist diese Einschränkung nicht auf.

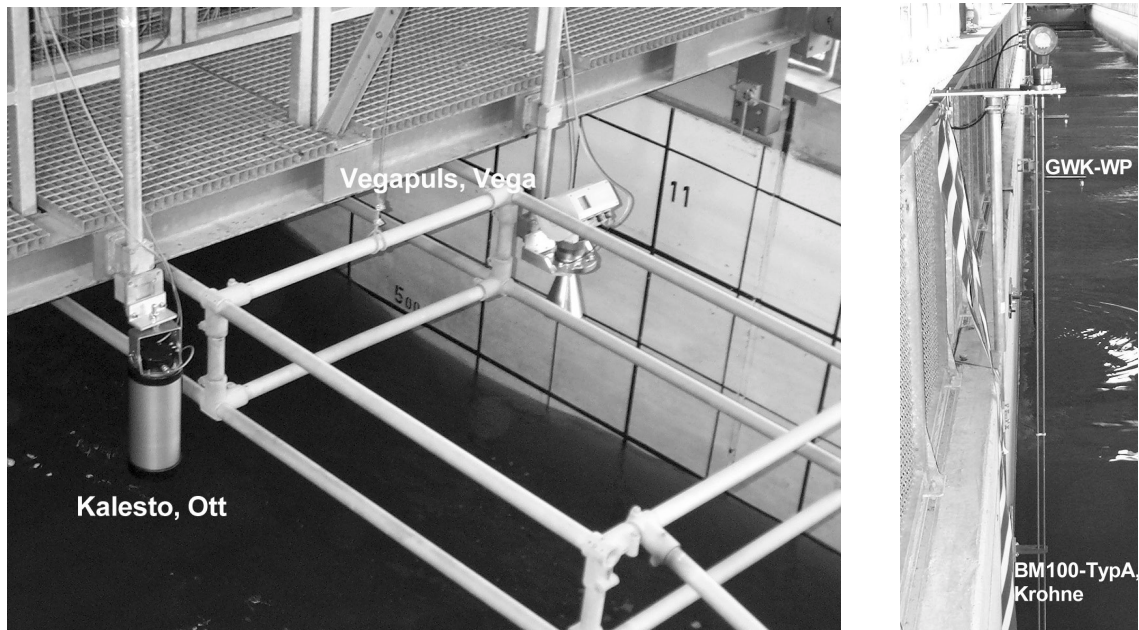


Abbildung 4-5: Photo der Instrumentierung des GROßEN WELLENKANALS GWK

Zur Veranschaulichung der Versuche wird die Wasserspiegelauslenkung vom Kanalrand mit einer Videokamera aufgezeichnet. Die Entfernung der Meßbühne von der Böschung am Ende des GWK, welche die einlaufenden Wellen teilweise reflektiert, beträgt $L \approx 160$ m.

Die von Reflexionen unbeeinflusste Meßdauer $t_{\text{ungestört}}$ ergibt sich damit zu

$$c = \sqrt{g \cdot d} \approx 7,0 \text{ m/s}$$

$$t_{\text{ungestört}} = \frac{2 \cdot L}{c} \approx \frac{2 \cdot 160}{7} \text{ s} \approx 46 \text{ s}$$

mit der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, der Wassertiefe $d \approx 5,00 \text{ m}$ und der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit c .

Der Reflexionsgrad beträgt bei Wellenteilheiten H/L bis 20 für die 1: 6,0 geneigte Böschung am Ende des GWK weniger als 17 % [CERC, 1984]. Die Datenerfassung im GWK erfolgt analog zu der in Kapitel 4.1 beschriebenen Erfassung im WKS, wobei nur 5 Kanäle aufgezeichnet worden sind. Abbildung 4-7 zeigt den programmierten Schaltplan der Datenerfassung für die Meßgeräte mit analogem Signalausgang – GWK-WP, VEGAPULS, BM100-TYP A – und für den Radar-Sensor KALESTO mit digitalem Signalausgang. Die Meßfrequenz ist, wie bei den Versuchen im WKS, zu 10 Hz festgelegt worden, die maximale Versuchsdauer beträgt so 819,2 s², so daß die Meßergebnisse auch im GWK einen, wenn auch geringen, Reflexionseinfluß aufweisen.

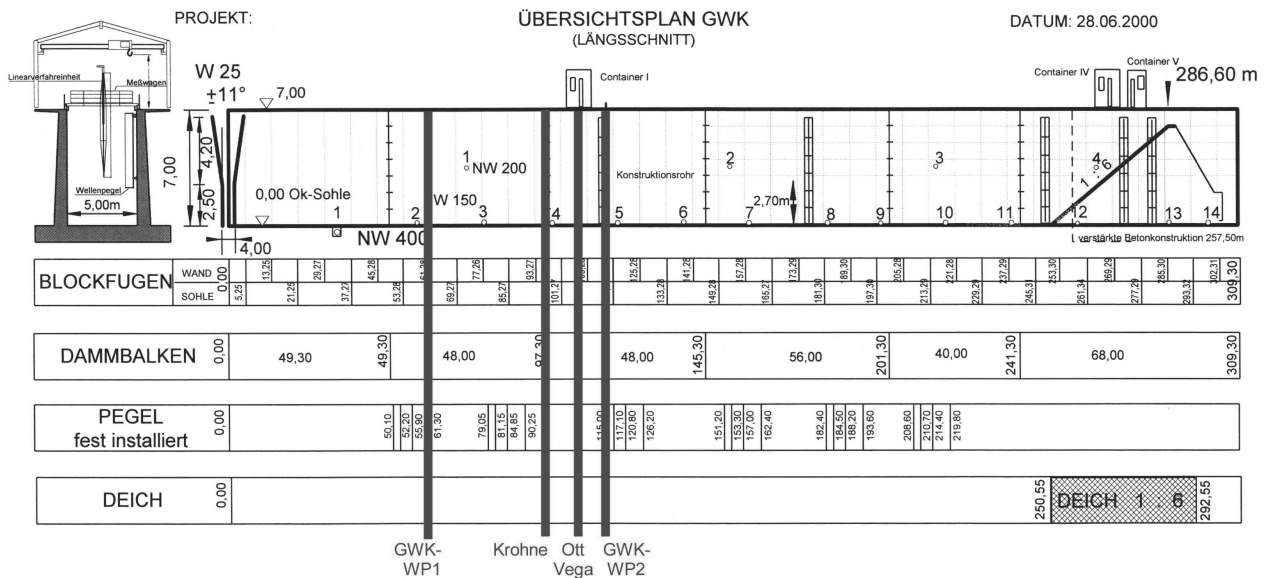


Abbildung 4-6: Position der Meßinstrumente im GROßEN WELLENKANAL GWK

² Die auch am FRANZIUS-INSTITUT vorhandene 32-bit Version DIADEMS weist diese Einschränkung nicht auf.

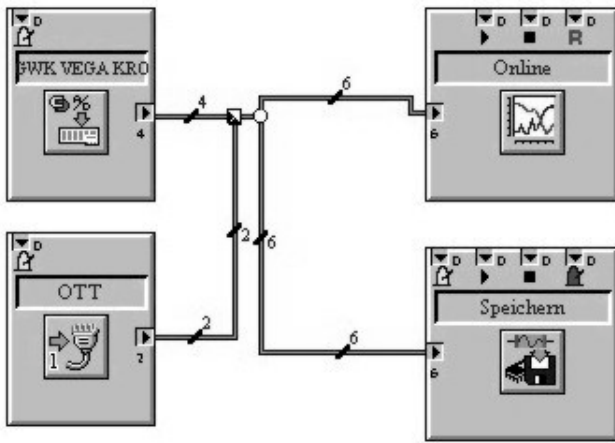


Abbildung 4-7: Schema der Datenerfassung im GROßEN WELLENKANAL GWK

Im GWK sind Versuche mit regelmäßigem und unregelmäßigem Seegang durchgeführt worden. Das Versuchsprogramm umfaßt Wellenhöhen bzw. signifikante Wellenhöhen von 0,60 m bis 1,20 m und Wellenperioden bzw. Peakperioden von 3,5 s bis 13,5 s bei Wassertiefen von 4,25 m bis 5,00 m.

5 Methoden der Versuchsauswertung

5.1 Allgemeines

Den Ausgangspunkt der Versuchsauswertung bilden die in Abbildung 5-1 dargestellten Zeitreihen der mit den verschiedenen Sensoren gemessenen Wasserspiegelauslenkung $\eta(t)$.

Die Weiterverarbeitung der so berechneten Zeitreihen kann entweder im Zeitbereich oder im Frequenzbereich erfolgen.

5.2 Auswertung im Zeitbereich

Bei der Auswertung im Zeitbereich sind zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zu unterscheiden – einerseits der direkte Vergleich der Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkung der verschiedenen Meßsysteme andererseits der Vergleich der aus den Zeitreihen der Meßsysteme abgeleiteten Seegangparameter.

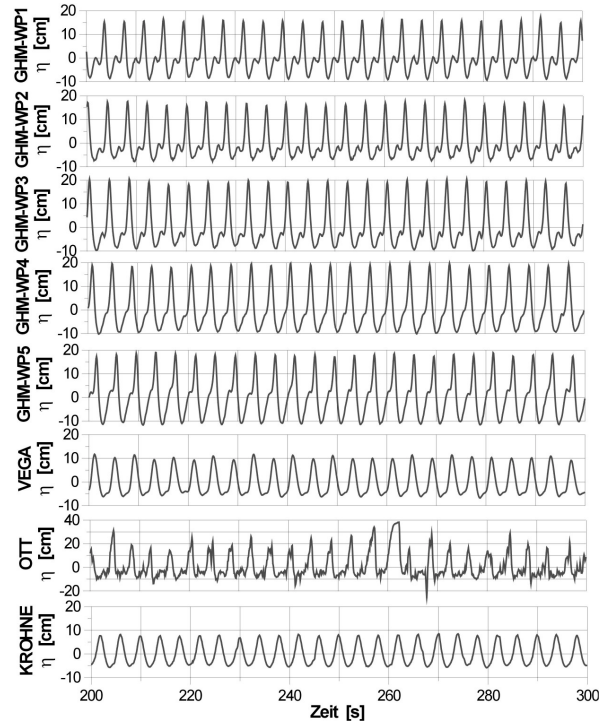


Abbildung 5-1: Wasserspiegellage als Funktion der Zeit ($H = 0,20$ m, $T = 4$ s, WKS)

Der direkte Vergleich der Zeitreihen bedeutet mathematisch eine Untersuchung der Kreuzkorrelation $r_{ij}^2(\tau)$ der mit unterschiedlichen Sensoren gemessenen Wasserspiegelauslenkungen $\eta_i(t)$. Es gilt [vgl. PRESS ET AL., 1989]:

$$r_{ij}^2(\tau) = \frac{\int \eta_i(t+\tau) \cdot \eta_j(t) dt}{\sqrt{\int \eta_i^2(t) dt} \cdot \sqrt{\int \eta_j^2(t) dt}} = \frac{\sum_k \eta_i(t_k + \tau) \cdot \eta_j(t_k)}{\sqrt{\sum_k \eta_i^2(t_k)} \cdot \sqrt{\sum_k \eta_j^2(t_k)}}$$

Wird die Kreuzkorrelation r_{ij}^2 für $\tau = 0$ maximal, so sind die mit den verschiedenen Meßgeräten ermittelten Wasserspiegelauslenkungen nicht phasenverschoben. Gilt $\max(r_{ij}^2(\tau)) = 1,0$, so sind die Zeitreihen der unterschiedlichen Meßgeräte identisch, sofern auch ihre Varianz identisch ist.

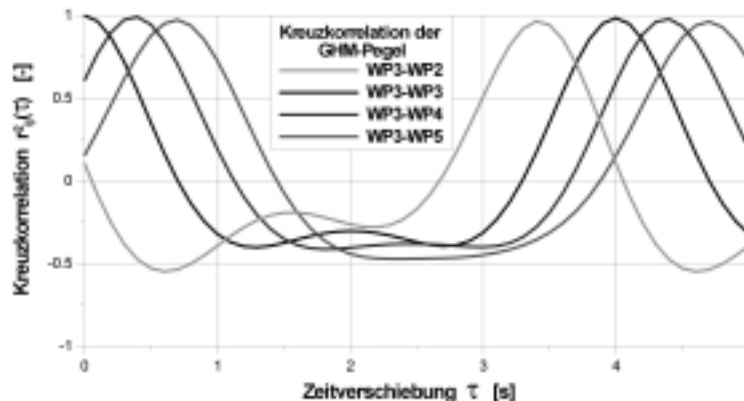


Abbildung 5-2: Kreuzkorrelation – beispielhaft für mit die mit zwei Wellenpegeln des Typs GHM gemessene Wasserspiegelauslenkung (Versuch im WKS mit regelmäßigen Wellen: $H = 20$ cm, $T = 4,0$ s)

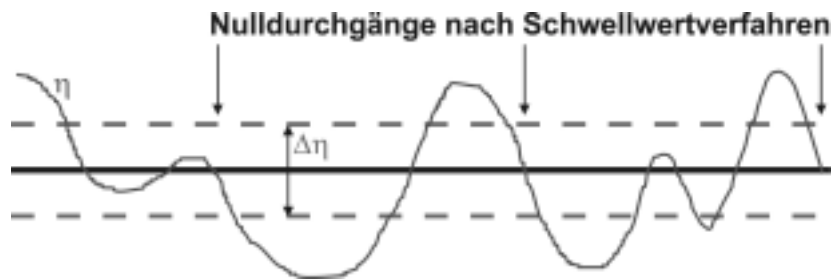


Abbildung 5-3: Identifikation von Nulldurchgängen unter Festlegung eines Schwellwertes

Ein Beispiel einer Kreuzkorrelation gibt Abbildung 5-2 für die mit vier Wellenpegeln des Typs GHM bei regelmäßigen Wellen einer Höhe von 20 cm und einer Periode von 40 s im WKS gemessene Wasserspiegelauslenkung. Es zeigt sich die aufgrund der räumlichen Entfernung der GHM-Wellenpegel zu erwartende Phasenverschiebung, so passiert eine Welle z.B. den Wellenpegel WP4 etwa 0,4 s später als den Wellenpegel WP3.

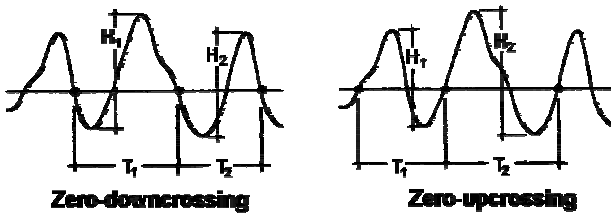


Abbildung 5-4: Nulldurchgangsverfahren zur Ermittlung der Parameter von Einzelwellen

Die maximale Korrelation zwischen den Signalen der Wellenpegel des Typs GHM nimmt mit einer von 0,0 m auf 2,7 m wachsenden Entfernung der korrelierten Wellenpegel von 1,00 auf 0,96 ab. In der Regel kommt dem Vergleich der aus den Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkung, welche mit den verschiedenen Meßsystemen erfaßt worden sind, abgeleiteten Seegangparameter für die Beurteilung der Qualität des Meßgerätes größere Bedeu-

tung zu. Zur Ermittlung abgeleiteter Seegangparameter werden die Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkung im Hinblick auf Nulldurchgänge analysiert und so Einzelwellen des Seegangs ermittelt. Die Einzelwellen werden dabei entweder durch Nulldurchgänge von positiven Werten der Wasserspiegelauslenkung zu negativen Werten (Zero-downcrossing) oder durch Nulldurchgänge von negativen Werten der Wasserspiegelauslenkung zu positiven Werten der Wasserspiegelauslenkung begrenzt (Abbildung 5-4). Im Rahmen dieser Arbeit wird das allgemein empfohlene Zero-downcrossing-Verfahren [AUSSCHUß FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE, 1993] verwendet. Als Nulldurchgänge werden im Rahmen der Auswertung nur die Ereignisse gewertet, welche die Ruhelage deutlich unter- bzw. überschreiten. Die Analyse erfolgt unter Festlegung eines Schwellwertes $\Delta\eta$ (Abbildung 5-3). Der Schwellwert wird zu 15 % der Varianz der Wasserspiegelauslenkung gesetzt:

$$\Delta\eta_i = \frac{4}{25} \cdot \sqrt{\frac{1}{T_{\text{Mes}}} \int_0^{T_{\text{Mes}}} \eta_i(t)^2 dt}$$

Die Wellenperiode T der Einzelwelle bezeichnet den Zeitabstand zweier nach dem Zero-downcrossing-Verfahren ermittelten Nulldurchgänge. Die Wellenhöhe H der Einzelwelle bezeichnet die Differenz von maximaler und minimaler Wasserspiegelauslenkung.

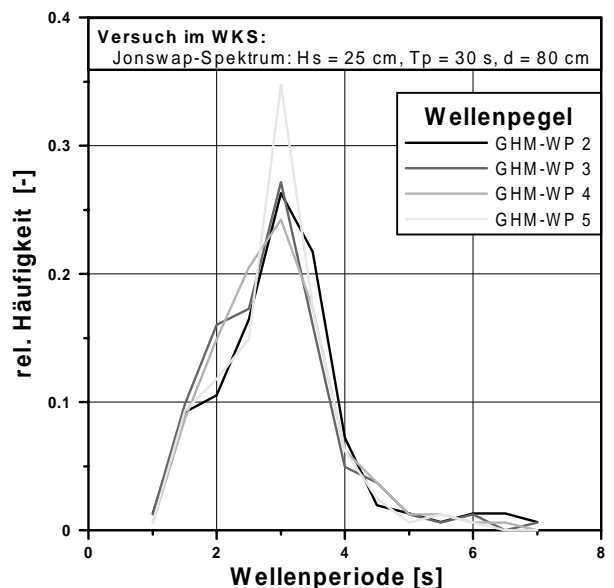
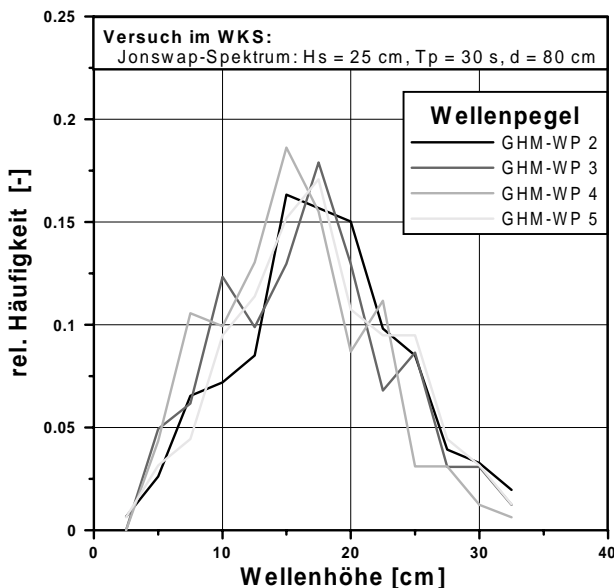


Abbildung 5-5: Statistik von Wellenhöhe (links) und Wellenperiode (rechts) (Versuch im WKS mit unregelmäßigem Seegang: $H_s = 25$ cm, $T_p = 3$ s, $d = 0,80$ m)

Aus den Wellenhöhen und –perioden der Einzelwellen ergeben sich, wie in Abbildung 5-5 exemplarisch dargestellt, die Häufigkeitsverteilungen der genannten Parameter. Für unregelmäßigen (naturähnlichen) Seegang ist z.B. für die Wellenhöhe die Rayleigh-Verteilung typisch [LONGUET-HIGGINS, 1952]. Für diese ergibt sich mit der mittleren Wellenhöhe H_m folgende Wahrscheinlichkeitsdichte der Wellenhöhe $p(H)$:

$$p(H) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{H}{H_m^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{H}{H_m}\right)^2\right)$$

Aus den Kurzzeitstatistiken der Wellenparameter werden folgende signifikante Parameter abgeleitet [AUSSCHUß FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE, 1993]:

- Mittlere Wellenhöhe:

$$H_m = \int_0^{\infty} H \cdot p(H) dH$$

- Signifikante Wellenhöhe:

$$H_s = H_{1/3} = \int_{H_{p=0,66}}^{\infty} H \cdot p(H) dH, \text{ wobei } \int_{H_{p=0,66}}^{\infty} p(H) dH = 0,66$$

- Mittlere Wellenperiode:

$$T_m = \int_0^{\infty} T \cdot p(T) dT$$

5.3 Auswertung im Frequenzbereich

Neben der Auswertung im Zeitbereich erfolgt i.d.R. auch die Auswertung von Seegangsmessungen im Frequenzbereich. Dazu wird die Zeitreihe der Wasserspiegelauslenkungen $\eta(t)$ Fourier-transformiert und das Amplitudenspektrum

spektrum $\eta(f)$ berechnet [PRESS ET AL., 1989]:

$$\eta(f) = \frac{1}{T_{Mes}} \int_0^{T_{Mes}} \eta(t) \cdot \exp(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f \cdot t) dt$$

Für die in Abbildung 5-1 dargestellten und mit verschiedenen Meßgeräten aufgezeichneten Zeitreihen der Wasserspiegellage zeigt Abbildung 5-6 das Amplitudenspektrum. Aus dem Amplitudenspektrum $\eta(f)$ folgt das Leistungsspektrum

$$S(f) = |\eta(f)|^2$$

Für unregelmäßigen Seegang ($H_s = 25$ cm, $T_p = 3,0$ s, $d = 0,80$ m, vgl. Abbildung 5-5) ist ein Leistungsspektrum exemplarisch in Abbildung 5-7 für die GHM-Wellenpegel dargestellt. Für unregelmäßigen (naturähnlichen) Seegang ist das JONSWAP- Spektrum bzw. bei Flachwassereinfluß das TMA-Spektrum typisch [AUSSCHUß FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE, 1993]:

JONSWAP:

$$S_J(f) = \frac{\alpha \cdot g^2}{(2\pi)^4 \cdot f^5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4} \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)^4\right) \cdot \gamma \cdot \exp\left(-\frac{(f-f_p)^2}{2 \cdot \sigma^2 \cdot f_p^2}\right)$$

TMA:

$$S_{TMA}(f) = S_J(f) \cdot \Phi_K(f) \quad \text{mit}$$

$$\Phi_K(f) \approx \begin{cases} 0,5 \cdot (2\pi \cdot f \cdot \sqrt{d/g})^2 \\ 1 - 0,5 \cdot (2 - 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{d/g})^2 \\ 1 \end{cases}$$

mit der Phillips-Konstante $\alpha = 0,0081$, der Erdbeschleunigung $g = 9,81$ m/s², der Peakfrequenz f_p , dem Peaküberhöhungsfaktor γ , dem Formparameter zur Beschreibung der Peakbreite σ und der Wassertiefe d .

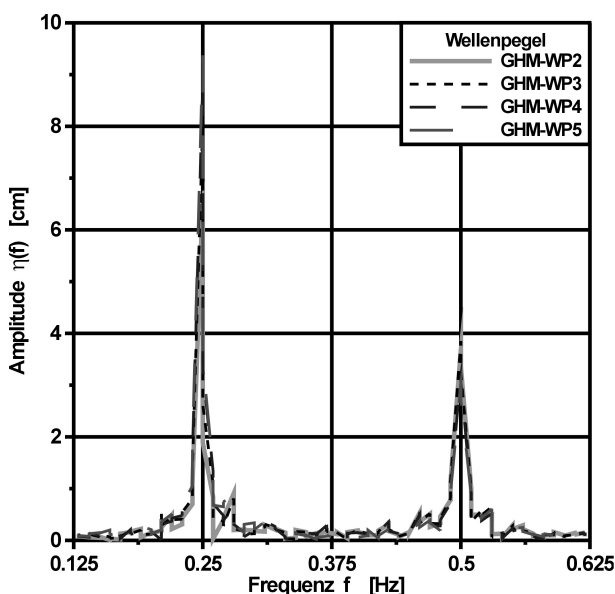


Abbildung 5-6: Amplitudenspektrum bei regelmäßigem Seegang (WKS: $H = 0,20$ m, $T = 4$ s, $d = 0,80$ m)

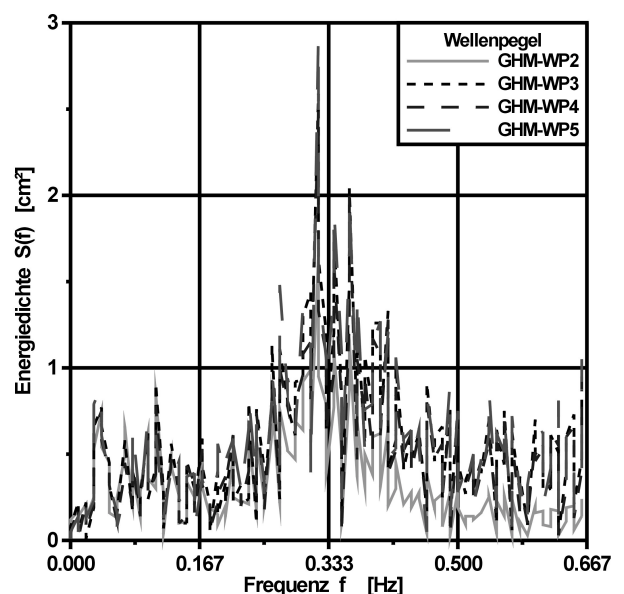


Abbildung 5-7: Leistungsspektrum bei unregelmäßigem Seegang (WKS: $H_s = 0,25$ m, $T_p = 3$ s, $d = 0,80$ m)

Bei der Auswertung im Frequenzbereich sind zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zu unterscheiden – einerseits der direkte Vergleich der Amplituden- bzw. der Leistungsspektren der Wasserspiegelauslenkung der verschiedenen Meßsysteme, andererseits der Vergleich der aus den Amplituden- bzw. Leistungsspektren abgeleiteten Seegangparameter.

Das Ergebnis des direkten Vergleichs der Frequenzspektren sind sog. Übertragungsfunktionen $\varphi_{ij}(f)$ bzw. $\tilde{\varphi}_{ij}(f)$:

$$\varphi_{ij}(f) = \frac{\eta_i(f)}{\eta_j(f)} \quad \text{bzw.} \quad \tilde{\varphi}_{ij}(f) = \varphi_{ij}^2(f) = \frac{S_i(f)}{S_j(f)}$$

Die Bestimmung von Übertragungsfunktionen bietet sich insbesondere für die Auswertung der Versuche mit regelmäßigem Seegang an.

Die abgeleiteten Seegangparameter ergeben sich aus den Momenten des Leistungsspektrums. Für das n-te Moment gilt:

$$m_n = \int S(f) \cdot f^n df$$

Die wichtigsten Parameter sind [AUSSCHUß FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE, 1993]:

- Signifikante Wellenhöhe:

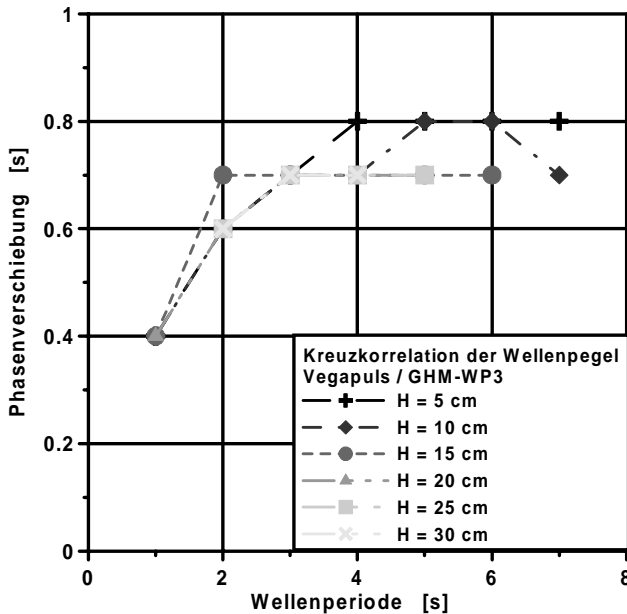
$$H_s = H_{1/3} \approx H_{m0} = 4 \cdot \sqrt{m_0}$$

- Mittlere Wellenperiode:

$$T_m \approx T_{02} = \sqrt{m_0 / m_2}$$

- Peakperiode:

$$T_p = 1 / f_p \quad \text{mit} \quad S(f_p) = \max(S(f))$$



6 Versuchsergebnisse

6.1 Vegapuls

6.1.1 Zeitbereich

Die Auswertung des Gerätevergleichs von VEGAPULS zu den traditionellen Sensoren erfolgt für die Wellenkanäle WKS und GWK getrennt, um einen Einfluß des traditionellen Sensortyps – im WKS: GHM-WAVE HEIGHT METER, im GWK: GWK-Wellenpegel – auf die Ergebnisse auszuschließen.

Im WKS weist der Radar-Sensor VEGAPULS im Vergleich zu dem traditionellen Sensor GHM-WP3 deutliche Abweichungen auf. Beispielhaft ist in Abbildung 6-1 für einen Wasserstand von 0,80 m und regelmäßige Wellen mit einer Höhe von $H = 15$ cm und einer Periode von $T = 4$ s eine Zeitreihe der mit den genannten Sensoren im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung dargestellt. Der Sensor VEGAPULS liefert im Vergleich zum GHM-WP3 deutlich geringere Amplituden der Wasserspiegelauslenkung.

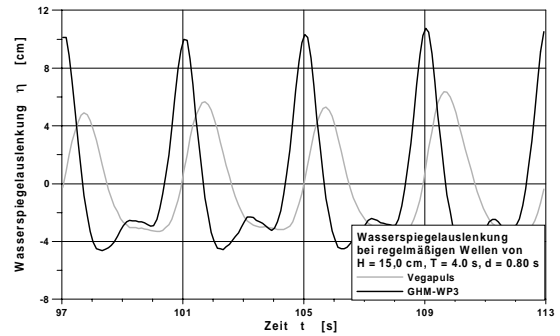


Abbildung 6-1: Zeitreihe der mit den Sensoren GHM-WP3 und VEGAPULS im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung

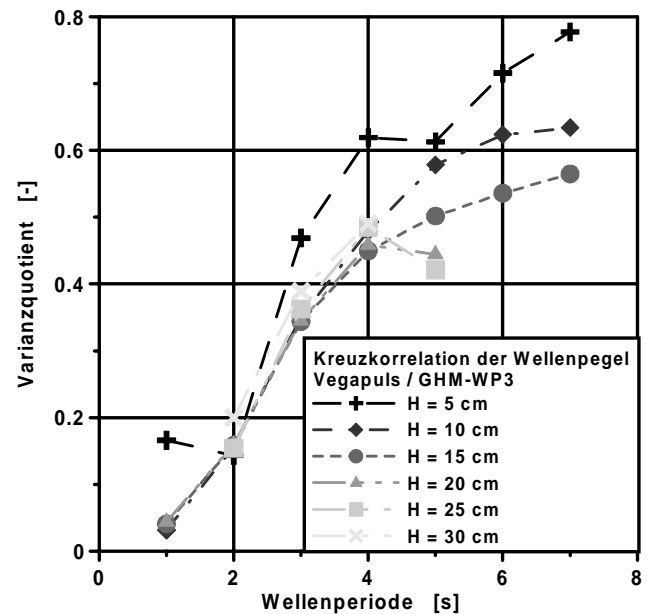


Abbildung 6-2: Abhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren VEGAPULS und GHM-WP3 gemessenen Wasserspiegelauslenkung (links) und des Varianzverhältnisses (rechts) von Wellenperiode und -höhe bei regelmäßigem Seegang im WKS

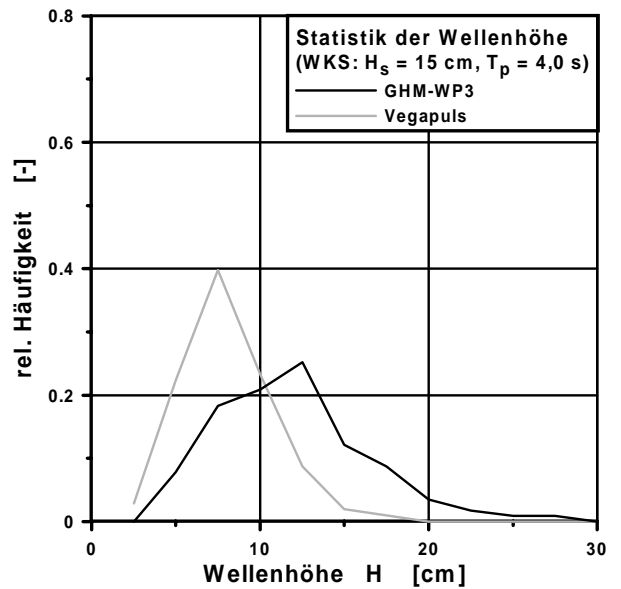
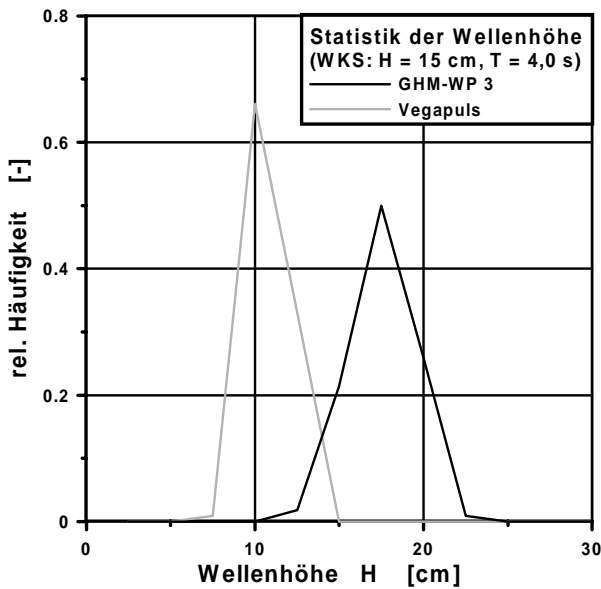


Abbildung 6-3: Statistik der Wellenhöhe im WKS bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)

Außerdem tritt eine Phasenverschiebung zwischen den Meßsignalen des VEGAPULS und GHM-WP3 auf. Für das in Abbildung 6-1 dargestellte Beispiel beträgt die Phasenverschiebung ca. 0,8 s.

Eine exakte Untersuchung der Phasenverschiebung zwischen den mit den verschiedenen Sensoren gemessenen Zeitreihen der Wasserspiegellage ist mit der in Kapitel 5.2 dargestellten Methode der Kreuzkorrelation erfolgt. Außerdem sind die Varianzen der Wasserspiegellagen aus den Messungen der verschiedenen Sensoren zueinander ins Verhältnis gesetzt worden. Ein Überblick über die sich bei regelmäßigen Wellen unterschiedlicher Periode und Wellenhöhe ergebenden Phasenverschiebungen und Varianzquotienten ist in Abbildung 6-2 gegeben. Die Phasenverschiebung steigt mit zunehmender Wellenperiode bis auf 0,8 s bei Wellenperioden von mehr als 4 s an. Der Quotient der Varianz der mit VEGAPULS und GHM-WP3 gemessenen Wasserspiegelauslenkung nimmt ebenfalls mit wachsender Wellenperiode zu. Außerdem zeigt sich eine Zunahme des Varianzquotienten mit zunehmender Wellenhöhe. Für Wellenperioden von 7 s ergeben sich Varianzquotienten von 0,8 bei einer Wellenhöhe von 5 cm und von 0,6 bei einer Wellenhöhe von 15 cm. Als mögliche Ursache kommt eine interne Filterung durch das VEGAPULS in Frage.

Neben der Kreuzkorrelation und Varianzanalyse sind die Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkung mit dem in Kapitel 5.2 dargestellten Zero-downcrossing-Verfahren untersucht worden. Die sich für die Sensoren GHM-WP3 und VEGAPULS ergebende Statistik der Wellenhöhen zeigt Abbildung 6-3 beispielhaft für regelmäßigen und unregelmäßigen Seegang. Sowohl für regelmäßigen als auch für unregelmäßigen Seegang unterschätzt der Sensor VEGAPULS im Vergleich zum Sensor GHM-WP3 die Wellenhöhen. So liefert das VEGAPULS bei regelmäßigen Wellen der Höhe 15 cm und Periode 4,0 s nur etwa 57 % der mit dem GHM-WP3 gemessenen Wellenhöhe. Bei unregelmäßigen Wellen der Höhe von 15 cm und Periode von 4,0 s liefert das VEGAPULS nur 66 % der mit dem GHM-WP3 gemessenen Wellenhöhe. Im folgendem sind die Wellenhöhenverteilungen nach Abbildung 6-3, wie in Ka-

pitel 5.2 dargestellt, durch mittlere Wellenhöhe und signifikante Wellenhöhe charakterisiert.

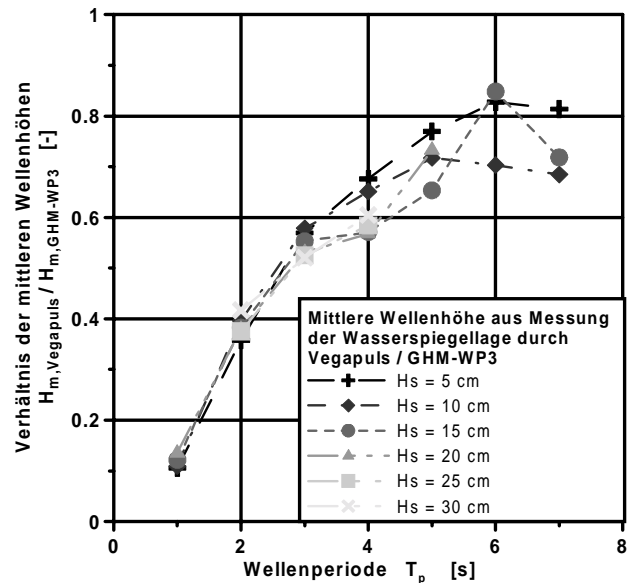


Abbildung 6-4: Verhältnis der mit den Sensoren VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS ermittelten mittleren Wellenhöhen bei regelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe

Für regelmäßigen Seegang stellt Abbildung 6-4 das Verhältnis der mittleren Wellenhöhen in Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe dar. Für Wellenperioden von 1 s beträgt die mit dem Sensor VEGAPULS bestimmte mittlere Wellenperiode etwa 12 % der mit dem Sensor GHM-WP3 bestimmten. Dieses Verhältnis wächst für Wellenperioden von 7 s in Abhängigkeit von der Wellenhöhe auf 70 % bis 80 % an. Auf eine einheitliche Abhängigkeit des Wellenhöhenverhältnisses von der Wellenhöhe lassen die Ergebnisse nicht schließen.

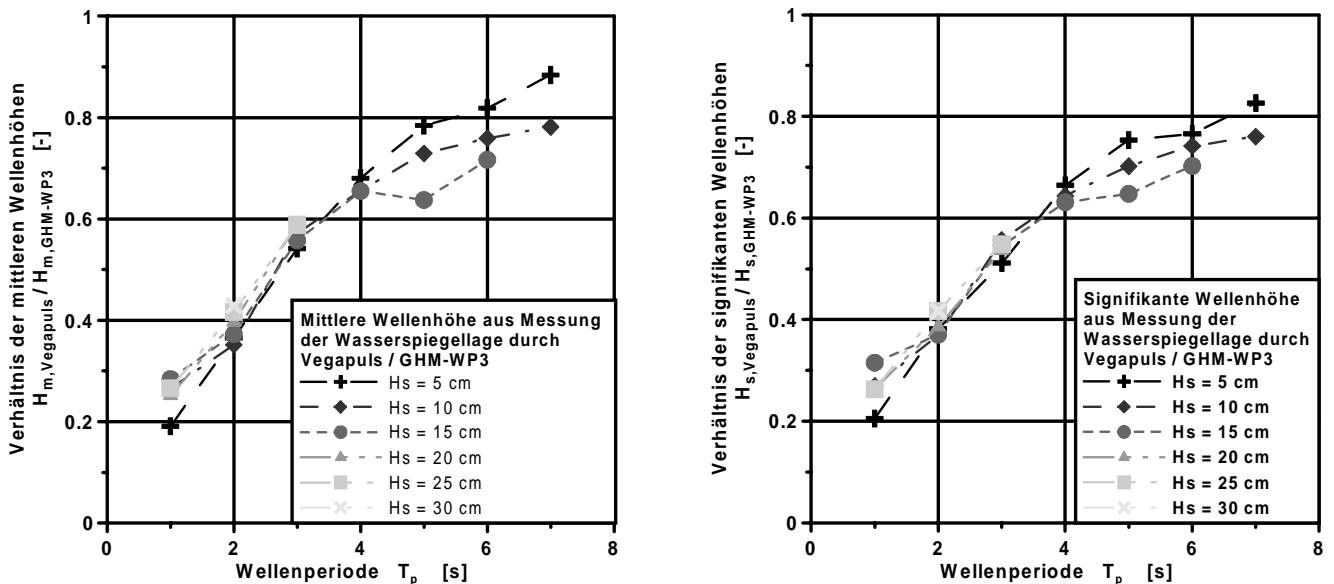


Abbildung 6-5: Verhältnis der mit den Sensoren VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe

Für unregelmäßigen Seegang ist neben dem Verhältnis der mittleren Wellenhöhen auch das der signifikanten Wellenhöhen in Abbildung 6-5 dargestellt. Für unregelmäßigen Seegang zeigt sich eine ähnliche Abhängigkeit des Verhältnisses der Wellenhöhen von der Wellenperiode wie bei regelmäßigem Seegang. Die Verhältnisse der mit VEGAPULS und GHM-WP3 gemessenen mittleren Wellenhöhen sind bei unregelmäßigem Seegang jedoch mit ca. 20 % bis 30 % bei Wellenperioden von 1 s etwas günstiger als bei regelmäßigem Seegang. Für das Verhältnis der signifikanten Wellenhöhe ergeben sich im Vergleich zum Verhältnis der mittleren Wellenhöhe nahezu keine Unterschiede. Für unregelmäßigen Seegang zeigt sich ein Anstieg des Verhältnisses der mit VEGAPULS und GHM-WP3 gemessenen Wellenhöhen mit abnehmender Wellenhöhe.

Im GWK ist der Sortentest des VEGAPULS im Vergleich zu den Untersuchungen im WKS für höhere Wellen größerer Periode durchgeführt worden.

Abbildung 6-6 zeigt beispielhaft eine Zeitreihe der Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen der Höhe von 0,80 m und der Periode von 7,5 s. Wie für die Versuche im WKS unterschätzt das VEGAPULS die vom GWK-WP2 gemessene Wellenhöhe, während die Wellenperiode richtig wiedergegeben wird.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen im WKS lassen die Untersuchungen im GWK keine direkte Aussage über die Phasenverschiebung zu, da sich Radarsensor und traditioneller Wellenpegel nicht an einer Position im GWK befinden (vgl. Abbildung 4-6). Auf eine indirekte Aussage unter Berücksichtigung der Gruppengeschwindigkeit der Wellen wird hier verzichtet, da die Phasenbeziehung direkt aus den Versuchen im WKS ermittelt worden ist. Eine Beschreibung des indirekten Verfahrens findet sich jedoch im Kapitel 6.4.1 für den nur im GWK eingesetzten Sensor BM100-TYP A.

Der Vergleich der Varianzen der von VEGAPULS und GWK-WP2 gemessenen Wasserspiegelauslenkungen ist in Abbildung 6-7 dargestellt. Ergänzend zu der Varianzanalyse bei regelmäßigen Wellen, wie sie auch für die Versuche im WKS durchgeführt worden ist, sind wegen der geringen Zahl der Versuche mit regelmäßigen Wellen im GWK die Varianzen der Wasserspiegelauslenkung auch für unregelmäßigen Seegang berechnet und zueinander ins Verhältnis gesetzt worden.

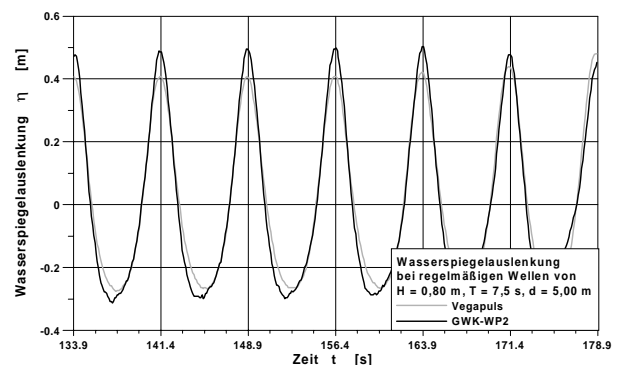


Abbildung 6-6: Zeitreihe der mit den Sensoren GWK-WP2 und VEGAPULS im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung

Der Varianzquotient der mit VEGAPULS und GWK-WP2 gemessenen Wasserspiegelauslenkung steigt mit zunehmender Wellenperiode von etwa 0,4 bei Wellenperioden von 3 s auf etwa 0,7 bei Wellenperioden von 7 s an. Bei den langperiodischen, regelmäßigen Wellen der Periode von 13,5 s liegt offensichtlich eine Fehlmessung vor. Die visuelle Analyse der Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkung zeigt, daß die Versuche mit regelmäßigen Wellen der Periode 13,5 s starke Störungen durch die Entstehung stehender Wellen im Kanal aufwiesen und so nicht repräsentativ sind.

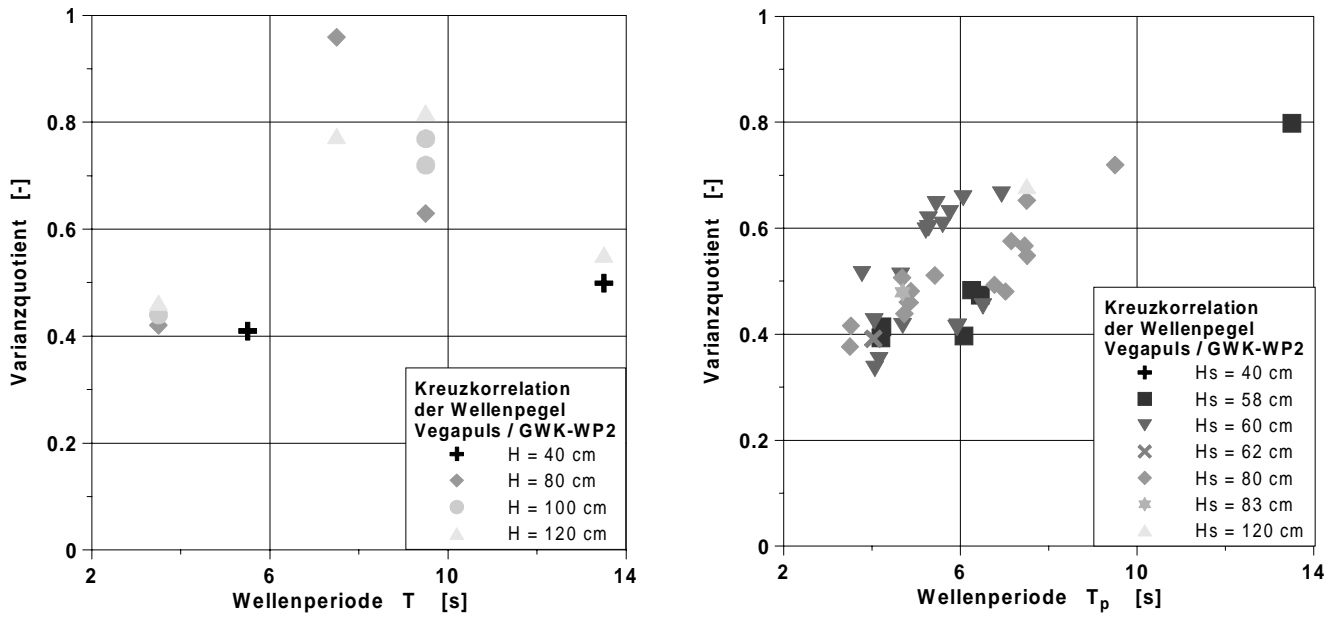


Abbildung 6-7: Abhängigkeit des Varianzverhältnisses zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren VEGAPULS und GWK-WP2 gemessenen Wasserspiegelauslenkung von Wellenperiode und -höhe bei regelmäßigem (links) unregelmäßigem Seegang (rechts)

Die sich nach Zero-downcrossing-Analyse der Zeitreihe der Wasserspiegelauslenkung ergebende Statistik der Wellenhöhen ist in Abbildung 6-8 beispielhaft für regelmäßige Wellen einer Höhe von 0,80 m und einer Periode von 7,5 s bzw. unregelmäßige Wellen einer Höhe von 0,78 m und einer Periode von 7,15 s dargestellt. Wie bei den Versuchen im WKS (vgl. Abbildung 6-3) zeigt sich für das VEGAPULS im Vergleich zu traditionellen Sensoren eine Verschiebung der Wellenhöhenverteilung zu kleineren Wellenhöhen.

Das Verhältnis der aus der Wellenhöhenstatistik der beiden Sensoren abgeleiteten mittleren Wellenhöhen ist für regelmäßige Wellen in Abbildung 6-10 und für unregelmäßige Wellen in Abbildung 6-9 dargestellt. Für unregelmäßigen

Seegang finden sich in Abbildung 6-9 auch die Verhältnisse der signifikanten Wellenhöhen. Unabhängig von der Art des Seegangs – regelmäßig oder unregelmäßig – und der gewählten Wellenhöhe – mittlere oder signifikante – ergibt sich für Wellenperioden von 4 s eine Unterschätzung der Wellenhöhen durch das VEGAPULS um etwa 30 % bis 40 %, für Wellenperioden von mehr als 8 s liefert das VEGAPULS etwa 75 % bis 85 % der mit dem GWK-WP2 gemessenen Wellenhöhe. Ein Einfluß der Wellenhöhe auf das Wellenhöhenverhältnis ist nicht nachweisbar.

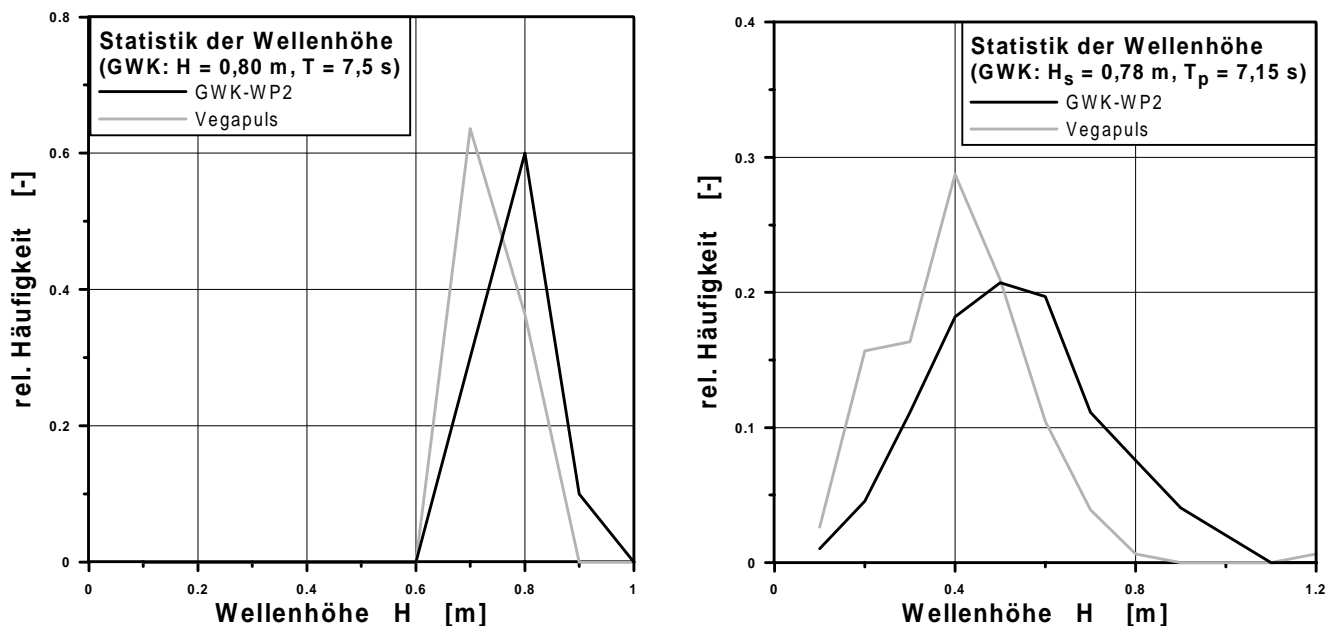


Abbildung 6-8: Statistik der Wellenhöhe im GWK bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)

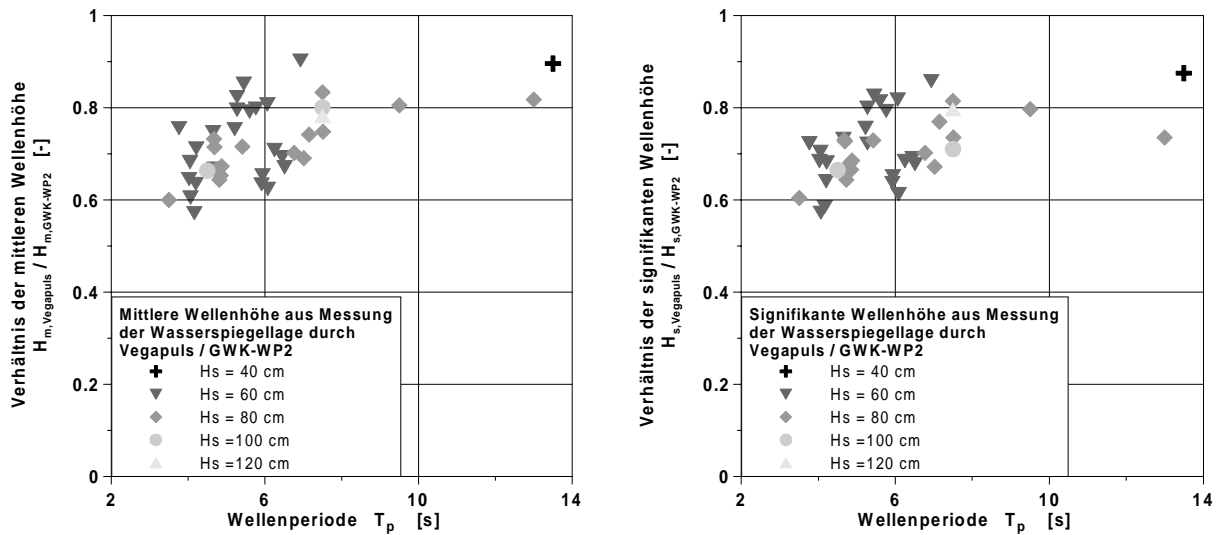


Abbildung 6-9: Verhältnis der mit den Sensoren VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe

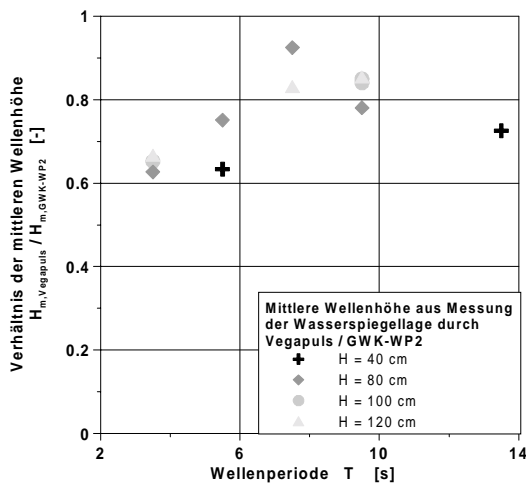


Abbildung 6-10: Verhältnis der mit den Sensoren VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK ermittelten mittleren Wellenhöhen bei regelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe

6.1.2 Frequenzbereich

Neben der Auswertung im Zeitbereich ist, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, auch eine Auswertung des Gerätevergleichs von VEGAPULS und Drahtwellenpegeln im Frequenzbereich möglich. Wie bei der Auswertung im Zeitbereich erfolgt eine getrennte Behandlung der Messungen im WKS und GWK.

Im WKS weist der Radar-Sensor VEGAPULS im Vergleich zu dem Drahtwellenpegel GHM-WP3 eine deutliche Unterschätzung des Amplitudenspektrums auf. Beispielhaft ist in Abbildung 6-11 das aus Messungen mit dem VEGAPULS und GHM-WP3 bestimmte Amplitudenspektrum für regelmäßigen Seegang bzw. unregelmäßigen Seegang dargestellt. Es ist insbesondere erkennbar, daß die Unterschätzung der Amplituden für höhere Frequenzen, d.h. geringere Perioden, zunimmt. Die Ergebnisse der Auswertung im Zeit- und im Frequenzbereich liefern also ähnliche Ergebnisse.

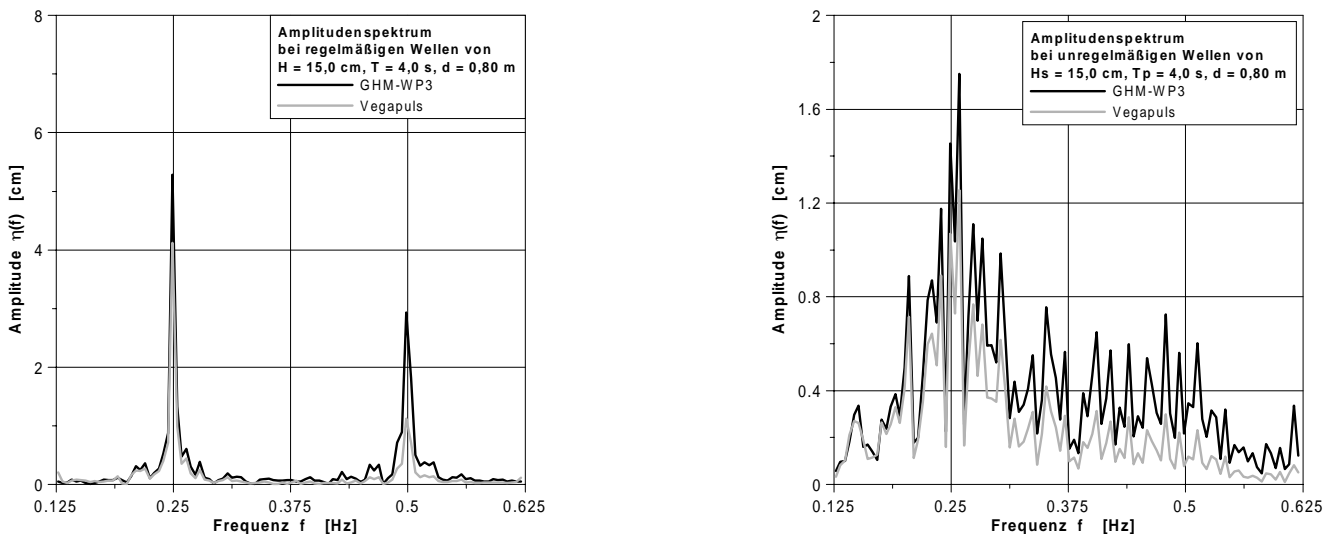


Abbildung 6-11: Amplitudenspektrum der mit den Sensoren GHM-WP3 und VEGAPULS im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)

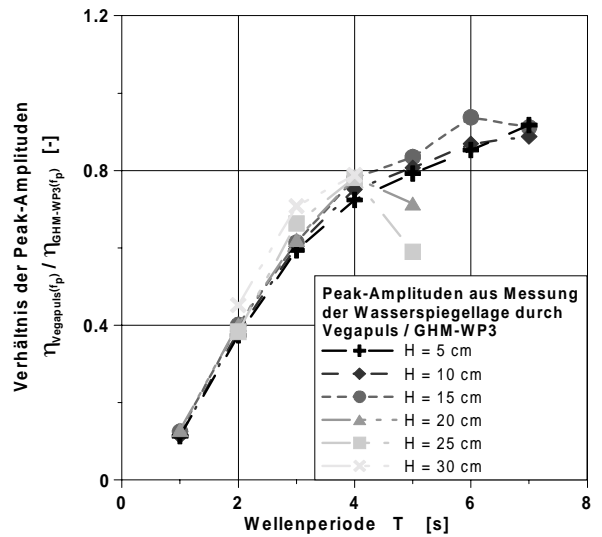
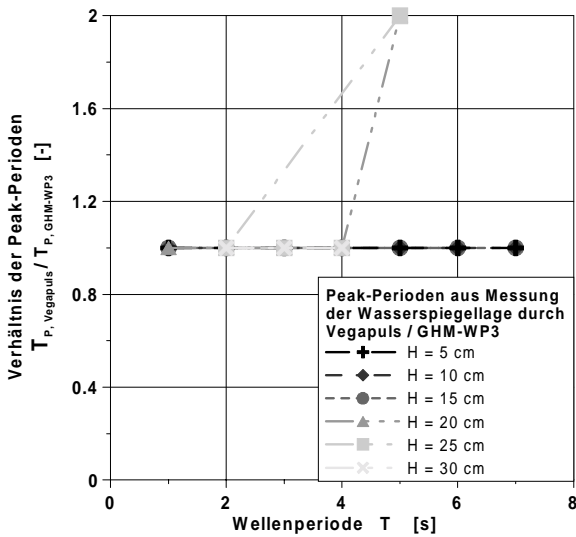


Abbildung 6-12: Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei regelmäßigen Wellen

Charakterisiert man die Spektren durch den spektralen Peak, d.h. Peak-Periode und -Amplitude, bzw. die aus den spektralen Momenten berechneten Parameter, d.h. mittlere Wellenperiode und signifikante Wellenhöhe, so läßt sich die Übereinstimmung der Radarsensoren mit den Drahtwellenpegeln als Funktion der Wellenperiode testen.

Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13 zeigen das Verhältnis der aus Messungen des VEGAPULS und des GHM-WP3 bestimmten Peak-Perioden und Peak-Amplituden für regelmäßige und unregelmäßige Wellen. Bis auf einzelne Ausnahmen werden die Peak-Perioden durch das VEGAPULS richtig wiedergegeben. Für unregelmäßigen Seegang mit Perioden von weniger als 2 s kommt es jedoch zu starken Abweichungen. Die Peak-Amplituden werden, ähnlich wie die bereits im Zeitbereich analysierten mittleren Wellenhöhen, durch das VEGAPULS unterschätzt. Für regelmäßigen und unregelmäßigen Seegang beträgt das Verhältnis der Peak-Amplituden etwa 20 %

bei Wellenperioden von 1 s und 90 % bei Perioden von 7 s. Die aus dem Seegangsspektrum für die Sensoren VEGAPULS und GHM-WP3 ermittelten mittleren Wellenperioden und signifikanten Wellenhöhen sind in der Abbildung 6-14 und der Abbildung 6-15 zueinander ins Verhältnis gesetzt. Die aus dem Seegangsspektrum berechneten mittleren Wellenperioden werden durch das VEGAPULS etwa um 20 % überschätzt. Die Überschätzung ist um so größer, je größer die Wellenhöhe des betrachteten Seegangs ist. Auch die aus den Seegangsspektren berechneten signifikanten Wellenhöhen werden durch das VEGAPULS unterschätzt. Für Wellenperioden von 1 s beträgt die durch das VEGAPULS gemessene signifikante Wellenhöhe etwa 25 % der durch das GHM-WP3 gemessenen. Dieses Verhältnis steigt auf etwa 80 % für Wellenperioden von 7 s an. Dieses Ergebnis ist deckungsgleich mit der auch im Zeitbereich durchgeführten Analyse der signifikanten Wellenhöhen (Abbildung 6-5).

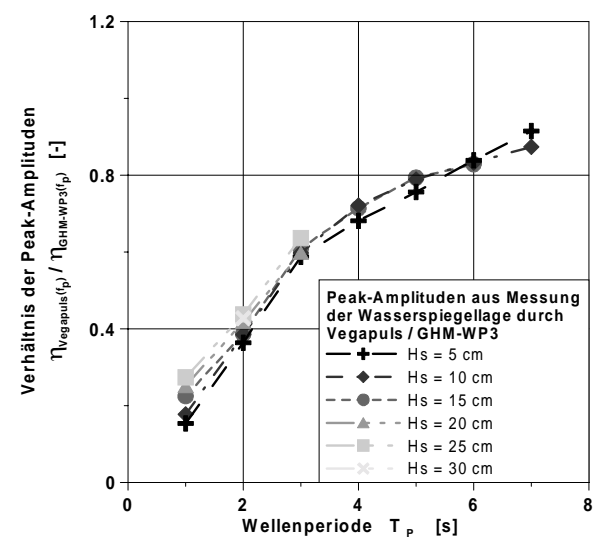
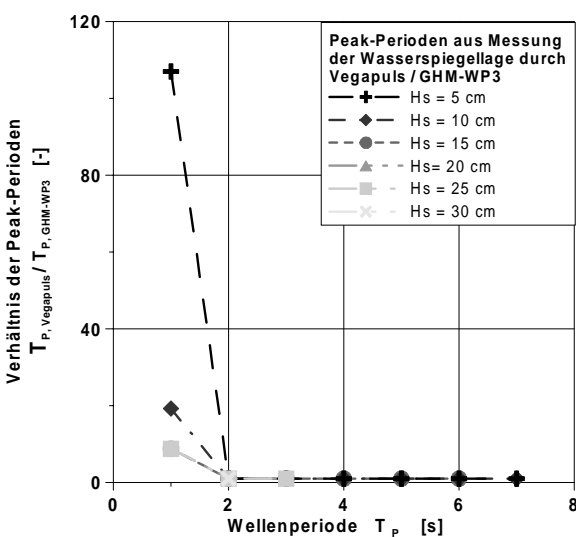


Abbildung 6-13: Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei unregelmäßigen Wellen

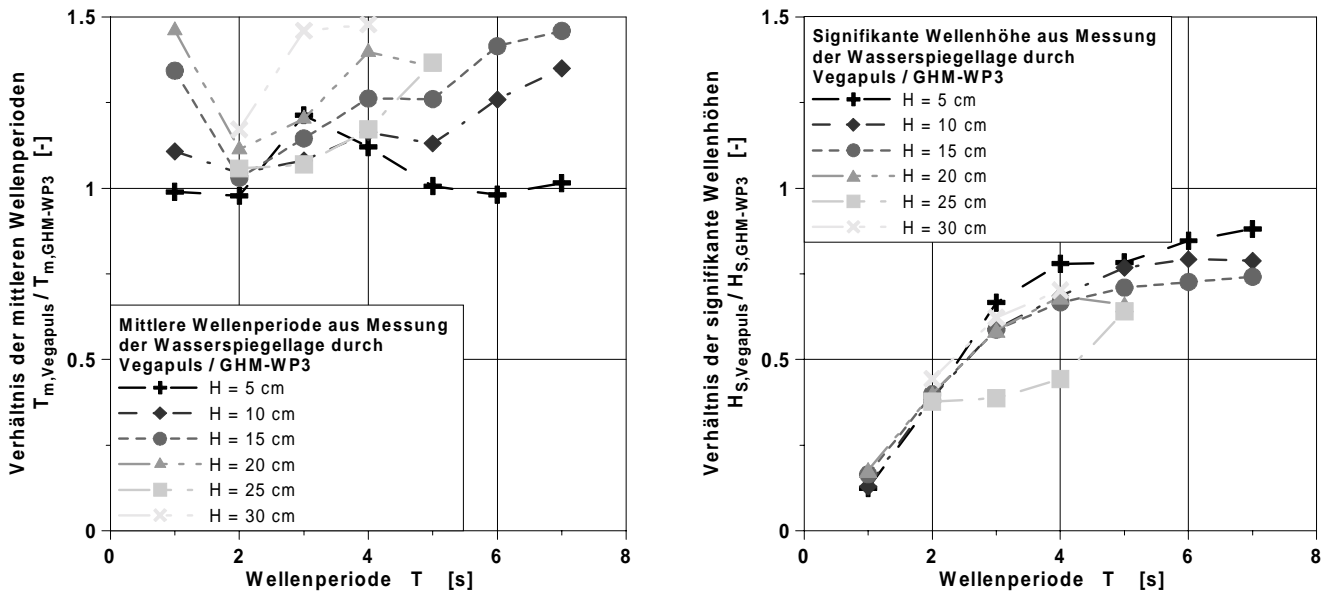


Abbildung 6-14: Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei regelmäßigen Wellen

Für den im GWK durchgeführten Versuchsteil zeigt Abbildung 6-16 beispielhaft die für regelmäßige und unregelmäßige Wellen aus Messungen des VEGAPULS und GWK-WP2 bestimmten Amplitudenspektren. Es zeigt sich auch hier die im WKS festgesellte Unterschätzung der spektralen Amplituden durch das VEGAPULS, welche um so größer ist, je größer die Wellenperiode ist. Die den spektralen Peak charakterisierenden Parameter sind in Abbildung 6-17 (regelmäßige Wellen) und Abbildung 6-18 (unregelmäßige Wellen) für VEGAPULS und GHM-WP3 zueinander in Relation gebracht.

Für regelmäßigen Seegang wird die Peak-Periode exakt wiedergegeben, da im Vergleich zu den Untersuchungen im WKS größere Wellenperioden untersucht worden sind.

Bei unregelmäßigem Seegang kommt es durch das VEGAPULS teilweise zu einer Überschätzung der Peak-Periode, d.h. einer Unterschätzung der Peak-Frequenzen, da Amplituden geringerer Frequenz durch das VEGAPULS besser wiedergegeben werden. Die Überschätzung beträgt in der Regel, d.h. abgesehen von drei im Rahmen dieser Versuche festgestellten Ausnahmen, weniger als 30 %.

Die Peak-Amplituden werden auch für die größeren Wellenperioden und -höhen im GWK durch das VEGAPULS unterschätzt. Bei Wellenperioden von 3 s ergibt sich, wie im WKS, sowohl für regelmäßigen als auch unregelmäßigen Seegang ein Verhältnis der Peak-Amplituden von 60 %. Das Verhältnis der Peak-Amplituden steigt bei größeren Frequenzen auf 80 % bis 100 % an.

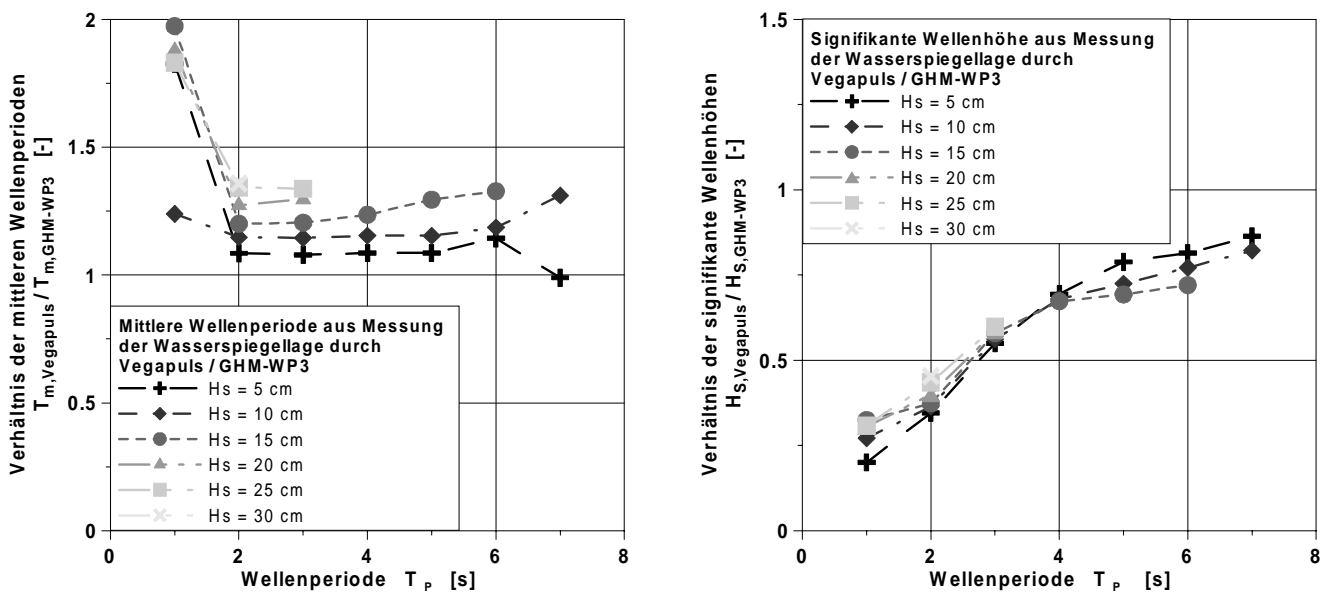


Abbildung 6-15: Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GHM-WP3 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen

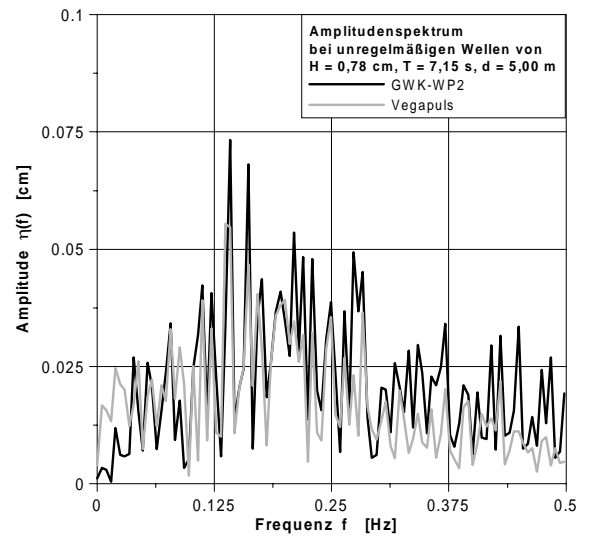
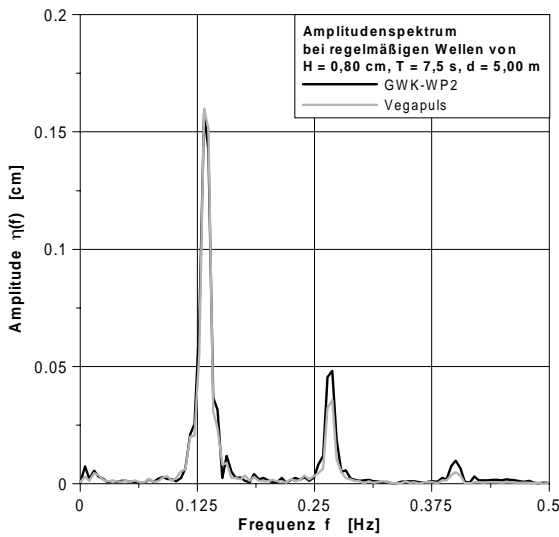


Abbildung 6-16: Amplitudenspektrum der mit den Sensoren GWK-WP2 und VEGAPULS im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)

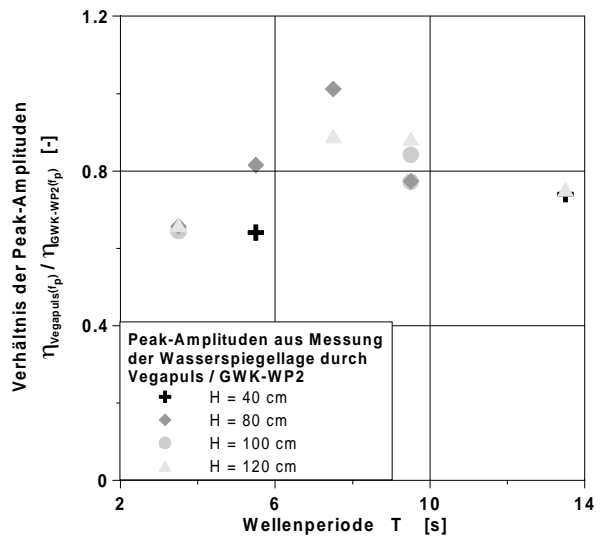
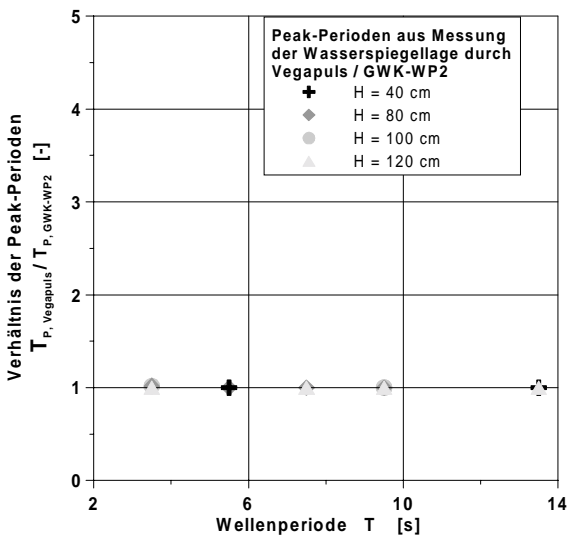


Abbildung 6-17: Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei regelmäßigen Wellen

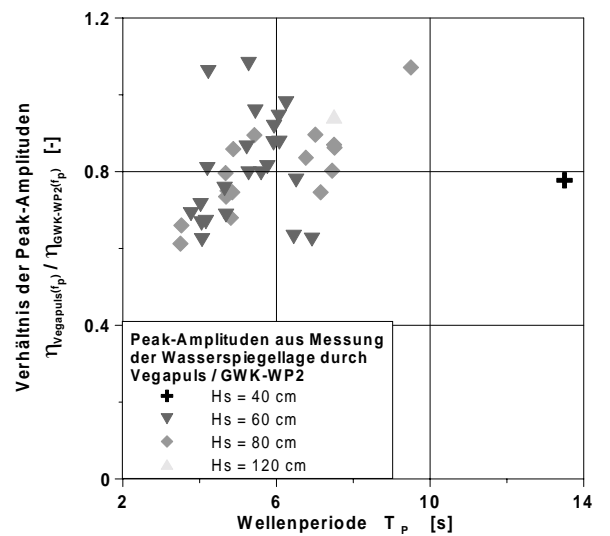
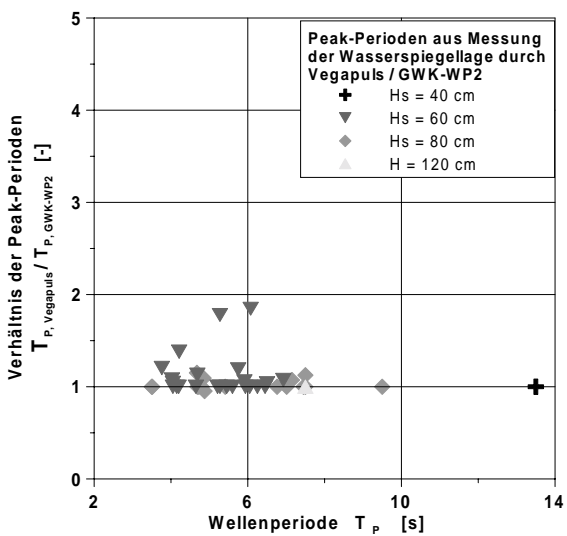


Abbildung 6-18: Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei unregelmäßigen Wellen

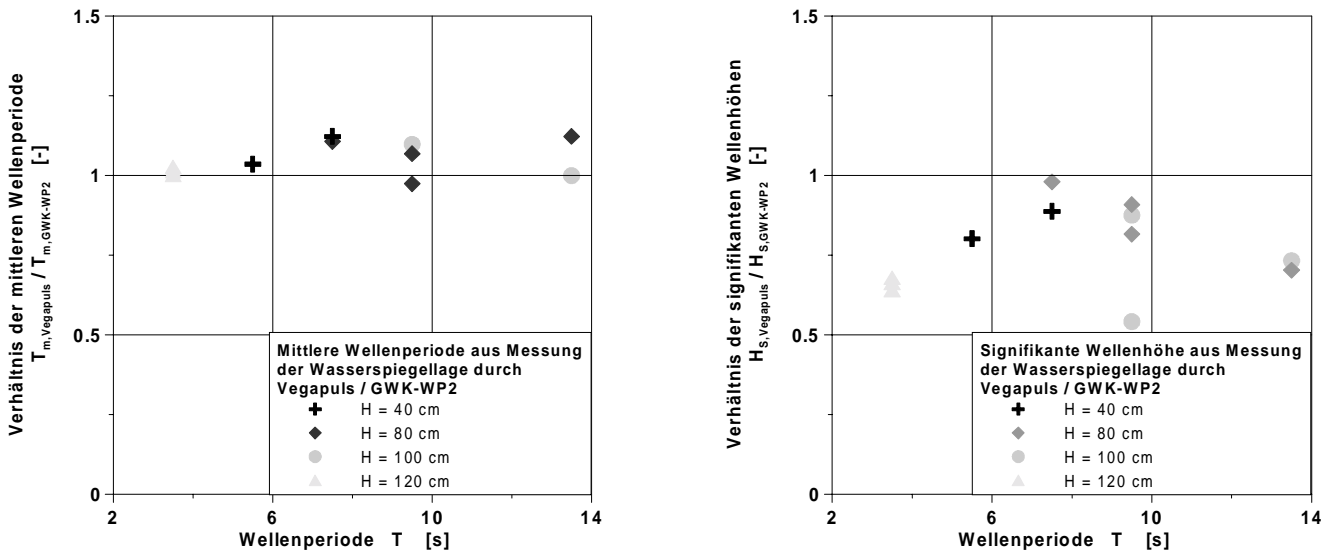


Abbildung 6-19: Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei regelmäßigen Wellen

Die aus den spektralen Momenten berechneten Parameter sind für regelmäßige Wellen in Abbildung 6-19 sowie für unregelmäßige Wellen in Abbildung 6-20 in Relation gebracht. Die aus dem Seegangsspektrum berechnete mittlere Wellenperiode wird durch das VEGAPULS überschätzt. Für regelmäßigen Seegang beträgt das Verhältnis der mittleren Wellenperioden im Mittel 105 %, während für unregelmäßigen Seegang die mit dem VEGAPULS bestimmte mittlere Wellenperiode im Mittel bei 125 % der mit dem GWK-WP2 bestimmten mittleren Wellenperiode liegt. Die aus dem Spektrum bestimmten signifikanten Wellenhöhen werden durch das VEGAPULS unterschätzt. Für Wellenperioden von 3 s beträgt die mit VEGAPULS bestimmte signifikante Wellenhöhe etwa 60 % der mit dem GWK-WP2 bestimmten. Dies deckt sich mit dem im Zeitbereich für unregelmäßigen Seegang ermittelten Wert. Bei Wellenperioden von mehr als 6 s nimmt das Verhältnis der signifikanten Wellenhöhen auf mehr als 75 % zu.

6.2 KALESTO

6.2.1 Zeitbereich

Wie für den Radarsensor VEGAPULS, wird auch für den Sensor KALESTO der Vergleich zu den traditionellen Sensoren getrennt für den Wellenkanal WKS (mit GHM-WAVE HEIGHT METER) und den Wellenkanal GWK (mit GWK-WP) durchgeführt.

Der Radar-Sensor KALESTO weist für die im WKS untersuchten Seegangsbedingungen auf den ersten Blick eine gute Wiedergabe der, mit dem Sensor GHM-WP2 gemessenen, Amplituden der Wasserspiegelauslenkung auf, wie Abbildung 6-21 exemplarisch für regelmäßige Wellen der Höhe von 15 cm und 4 s zeigt. Es wird allerdings auch deutlich, daß dem Meßsignal des KALESTO ein starkes Rauschen überlagert ist, was insgesamt zu einer schlechten Übereinstimmung der Wasserspiegellagen führt.

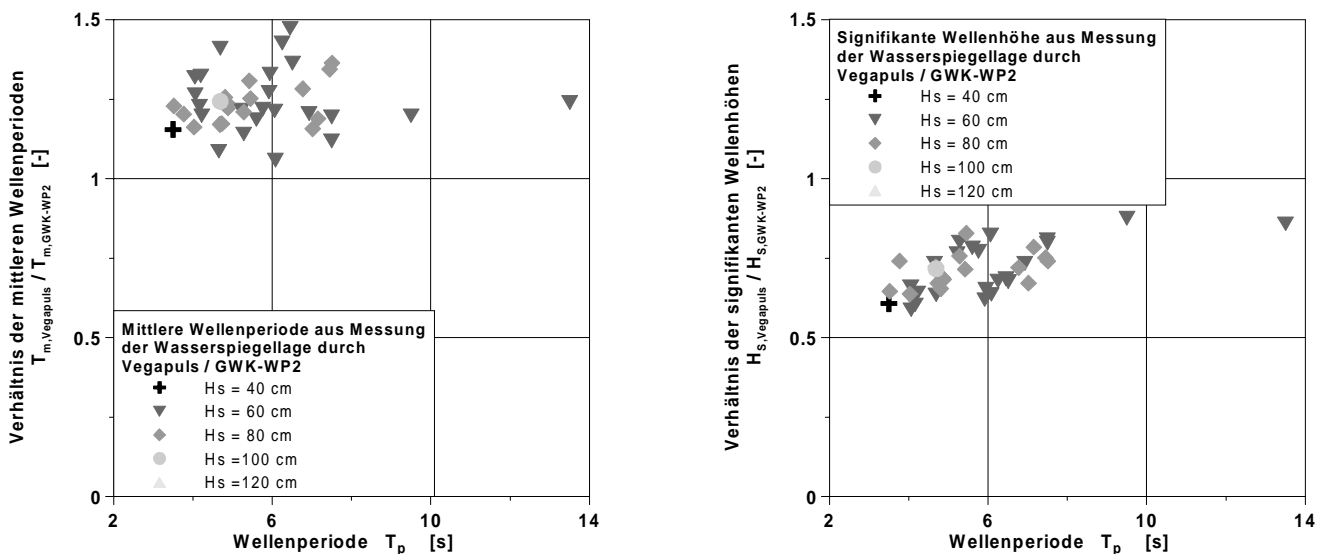


Abbildung 6-20: Verhältnis der aus Messungen von VEGAPULS und GWK-WP2 im GWK bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen

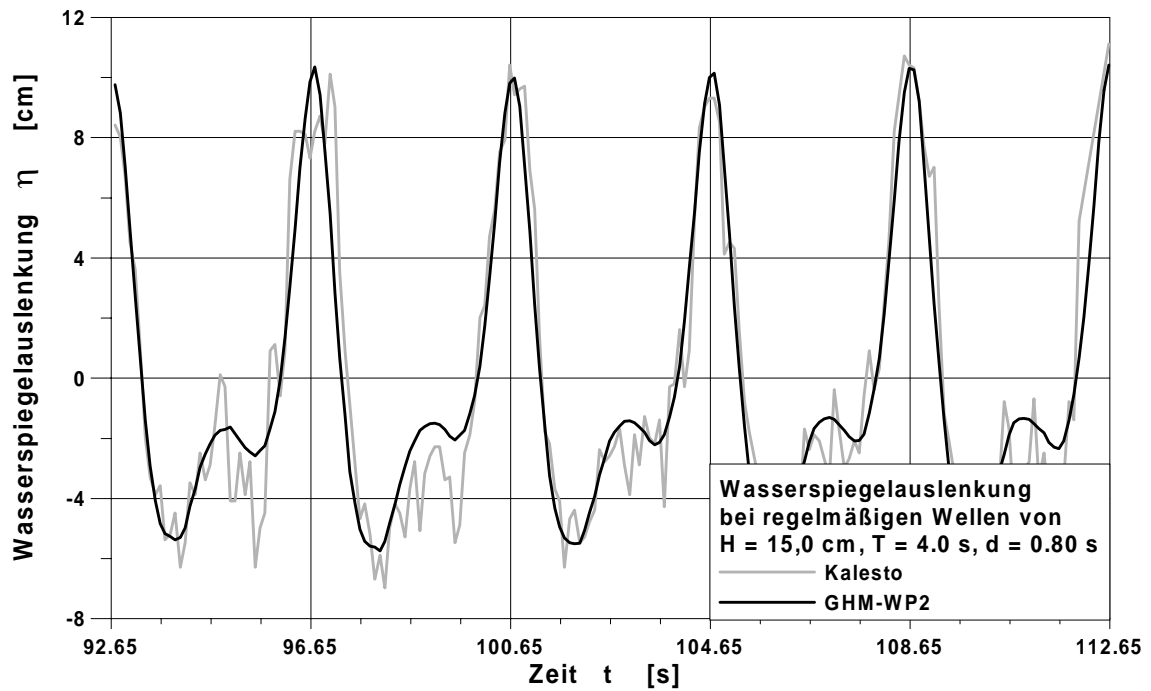


Abbildung 6-21: Zeitreihe der mit den Sensoren GHM-WP2 und Kalesto im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung

Als mögliche Ursache für die Ausreißer ist einerseits die Synchronisation von KALESTO und Datenerfassung und andererseits die Einhaltung des Meßbereichs des KALESTO geprüft worden. Beides kann jedoch als Ursache für das starke Rauschen ausgeschlossen werden. Eine Phasenverschiebung zwischen den Meßsignalen des KALESTO und des GHM-WP2 ist für das in Abbildung 6-21 dargestellte Beispiel nicht festzustellen.

Die in Kapitel 5.2 beschriebene Kreuzkorrelationsanalyse sämtlicher im WKS mit regelmäßigen Wellen durchgeführten Versuche bestätigt, daß keine bzw. nur eine vernachlässigbar geringe Phasenverschiebung zwischen den Zeitreihen des KALESTO und GHM-WP2 vorhanden

ist. Die Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalyse sind in Abbildung 6-22 graphisch zusammengestellt. Neben der Phasenverschiebung zeigt Abbildung 6-22 auch das Verhältnis der Varianzen der mit den Sensoren KALESTO und GHM-WP2 gemessenen Wasserspiegellage. Das dem Meßsignal des Kalesto überlagerte Rauschen führt zu einer gegenüber dem traditionellen GHM-WP2 erhöhten Varianz. Das Verhältnis der Varianzen variiert im Bereich von 1,1 bis 4,3, wobei für Wellenhöhen von 10 cm bis 20 cm der Variationsbereich bis zu 1,9 begrenzt ist. Eine eindeutige Abhängigkeit des Varianzquotienten von der Wellenperiode und der Wellenhöhe läßt sich nicht erkennen.

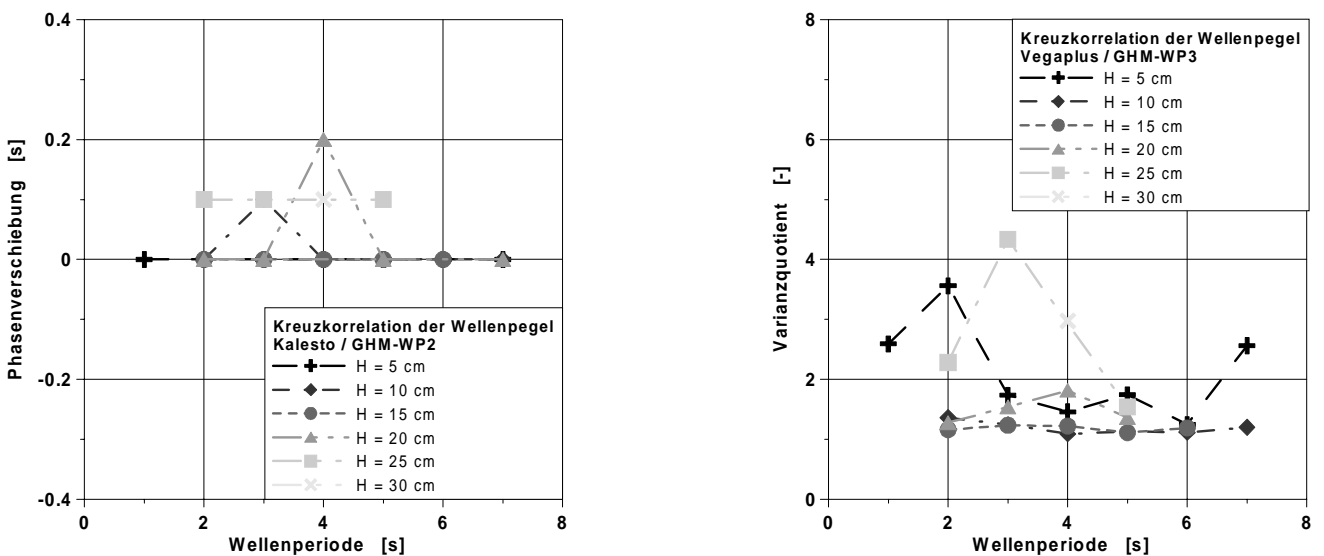


Abbildung 6-22: Abhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren KALESTO und GHM-WP2 gemessenen Wasserspiegelauslenkung (links) und des Varianzverhältnisses (rechts) von Wellenperiode und -höhe bei regelmäßigem Seegang im WKS

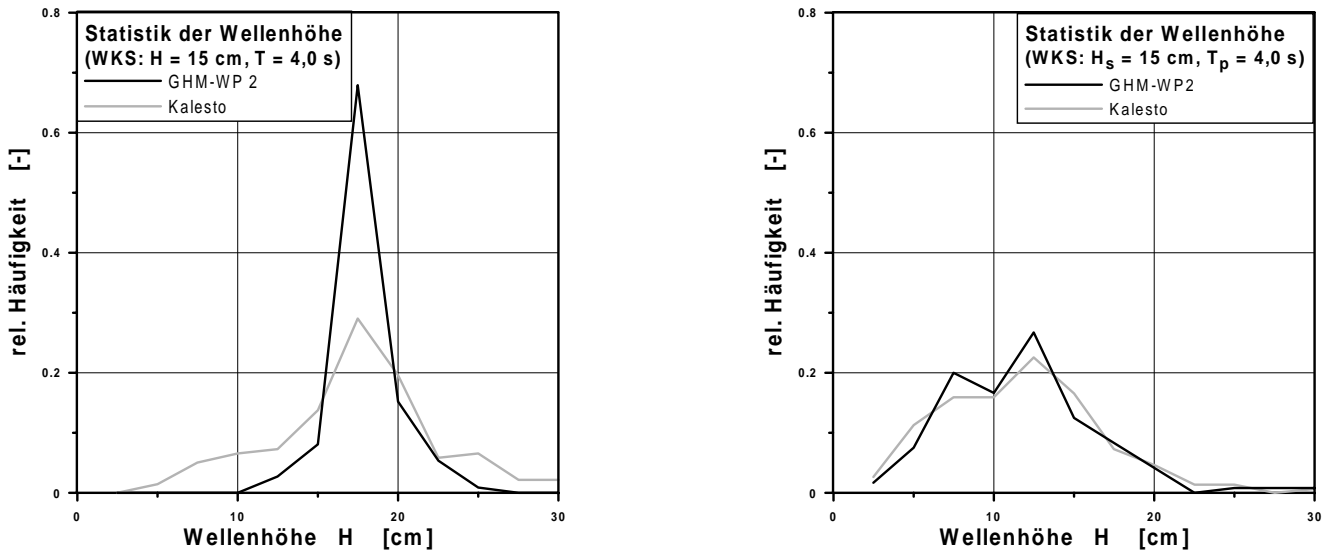


Abbildung 6-23: Statistik der Wellenhöhe im WKS bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)

Das Rauschen des Meßsignals des Kalesto wirkt sich auch bei Analyse der Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkung mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Zero-downcrossing-Verfahren aus. So weist die sich mit der Analyse ergebende Statistik der Wellenhöhen, welche exemplarisch für regelmäßige sowie unregelmäßige Wellen einer Höhe von 15 cm und Periode von 4 s in Abbildung 6-23 dargestellt ist, für das KALESTO im Vergleich zum GHM-WP2 eine größere Standardabweichung auf, wobei der Fehler für regelmäßige Wellen offensichtlicher ist, da die vorhandene Statistik eine schmale Bandbreite hat. Durch beide Sensoren wird jedoch die gleiche am häufigsten auftretende Wellenhöhe bestimmt.

Werden die beispielhaft in Abbildung 6-23 dargestellten Statistiken der Wellenhöhe durch mittlere und signifikante Wellenhöhe charakterisiert, so ergibt sich für regelmäßige Wellen der in Abbildung 6-24 dargestellte Zusammenhang zwischen Seegangsbedingungen – Wellenperiode und -höhe – und dem Verhältnis der mit KALESTO bzw. GHM-WP2 bestimmten mittleren Wellenhöhen. Für unregelmäßige Wellen sind in Abbildung 6-25 entsprechende Verhältnisse der mittleren und signifikanten Wellenhöhe dargestellt. Für regelmäßige Wellen mit Amplituden bis 30 cm und Perioden bis 7 s überschätzt das KALESTO in der Regel die mittlere Wellenhöhe um etwa 10 %.

Bei unregelmäßigem Seegang mit Wellenperioden von weniger als 3 s überschreiten die durch das KALESTO ermittelten mittleren bzw. signifikanten Wellenhöhen um 10 % bis 100 % die durch die GHM-WP2 bestimmten Wellenhöhen. Für Peak-Wellenperioden von weniger als 2 s ist bei signifikanten Wellenhöhen von mehr als 5 cm das Signal so stark verrauscht, daß eine weitere Auswertung nicht möglich gewesen ist. Auch bei Wellenperioden von mehr als 3 s kommt es für geringe Wellenhöhen von 5 cm wegen des Rauschanteils im Signal zu einer Überschätzung der Wellenhöhe durch das KALESTO um 50 %. Die Bedeutung des Rauschens wird mit zunehmender Wellenhöhe geringer. Bei Wellenhöhen von 15 cm scheint sich im Gegensatz dazu eher eine Unterschätzung der Wellenhöhe, speziell der mittleren Wellenhöhe, um bis zu 20 % anzudeuten.

Die Unterschätzung der Wellenhöhen durch das KALESTO bei größeren Wellenhöhen hat sich auch bei den Versuchen im GWK ergeben.

Exemplarisch zeigt Abbildung 6-26 eine Zeitreihe der mit KALESTO und dem traditionellen Wellenpegel GWK-WP2 gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen der Höhe von 0,78 m und Periode von 7,5 s. Für diesen Versuch unterschätzt das KALESTO die Wellenhöhe um etwa 20 %, wobei insbesondere die steilen Wellenberge nicht richtig durch das KALESTO wiedergegeben werden, während die flachen Wellentäler korrekt erfaßt werden. Eine Unterschreitung des erforderlichen Mindestabstandes zwischen KALESTO und Wasseroberfläche (vgl. Kap. 3.4) kann dabei als mögliche Ursache der schlechten Erfassung der Wellenberge ausgeschlossen werden. Weiterhin weist die Messung des KALESTOS auch für das in Abbildung 6-26 gezeigte Beispiel einen Rauschanteil auf.

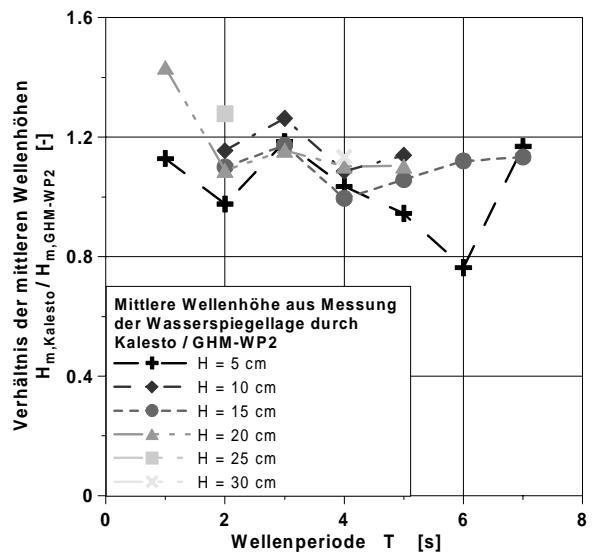


Abbildung 6-24: Verhältnis der mit den Sensoren KALESTO und GHM-WP2 im WKS ermittelten mittleren Wellenhöhen bei regelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe

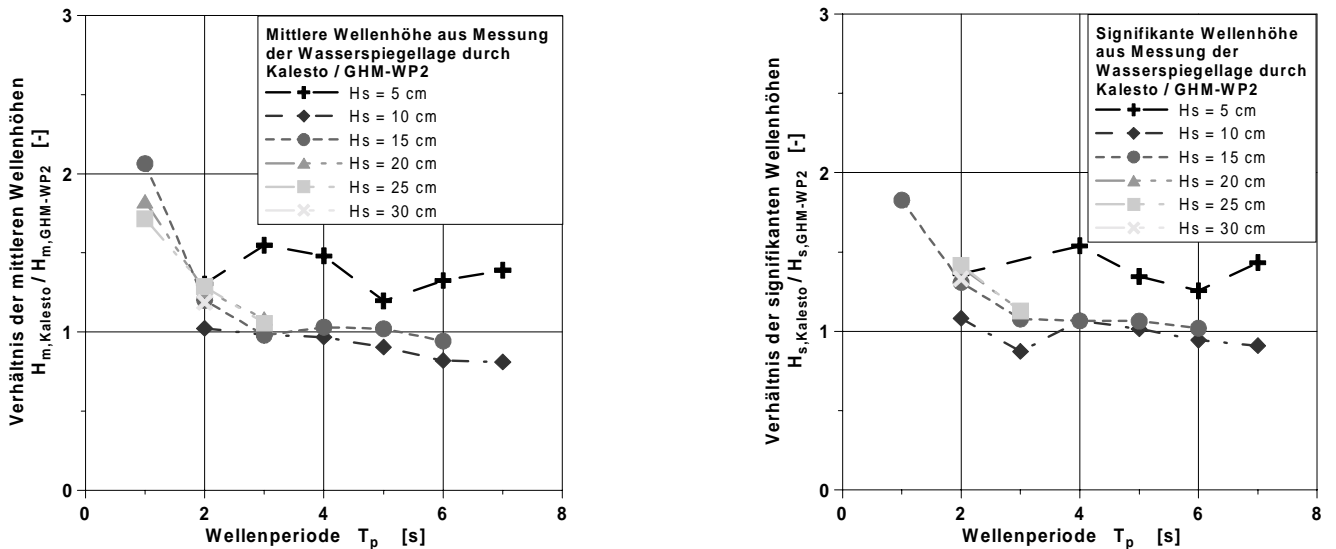


Abbildung 6-25: Verhältnis der mit den Sensoren KALESTO und GHM-WP2 im WKS ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe

Eine Ermittlung der Phasenverschiebung zwischen KALESTO und GWK-WP2 ist, wie bereits in Kapitel 6.1.1 für das Radar VEGAPULS dargestellt, direkt aus den Messungen im GWK nicht möglich.

Die Analyse der Varianz der durch die Sensoren gemessenen Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkung liefert, wie in Abbildung 6-27 gezeigt, keine eindeutigen Ergebnisse. So überschätzt das KALESTO die Varianz für regelmäßige Wellen mit Perioden unter 4 s, während für Perioden von mehr als 6 s die Varianz eher unterschätzt wird. Bei unregelmäßigem Seegang weist das KALESTO eine starke Überschätzung der Varianz auf, was möglicherweise mit einem verstärkten Rauschen bei unregelmäßigen Wasseroberflächen zusammenhängt.

Die aus der Zero-downcrossing-Analyse ermittelte Wellenhöhen-Statistik, welche für regelmäßige und unregelmäßige Wellen in Abbildung 6-28 dargestellt ist, zeigt eine Unterschätzung größerer Wellenhöhen durch das KALESTO.

Für regelmäßige Wellen der Höhe von 0,80 m und Periode von 7,5 s (vgl. Abbildung 6-26) zeigt auch die Wellenhöhen-Statistik eine Unterschätzung der Wellenhöhe durch das KALESTO von 20 %. Bei unregelmäßigen Wellen zeigt sich ein differenziertes Bild, so wird die Häufigkeit von Wellen mit einer Höhe von weniger als 0,30 m ebenso unterschätzt wie die Häufigkeit von Wellen mit einer Höhe von mehr als 0,86 m.

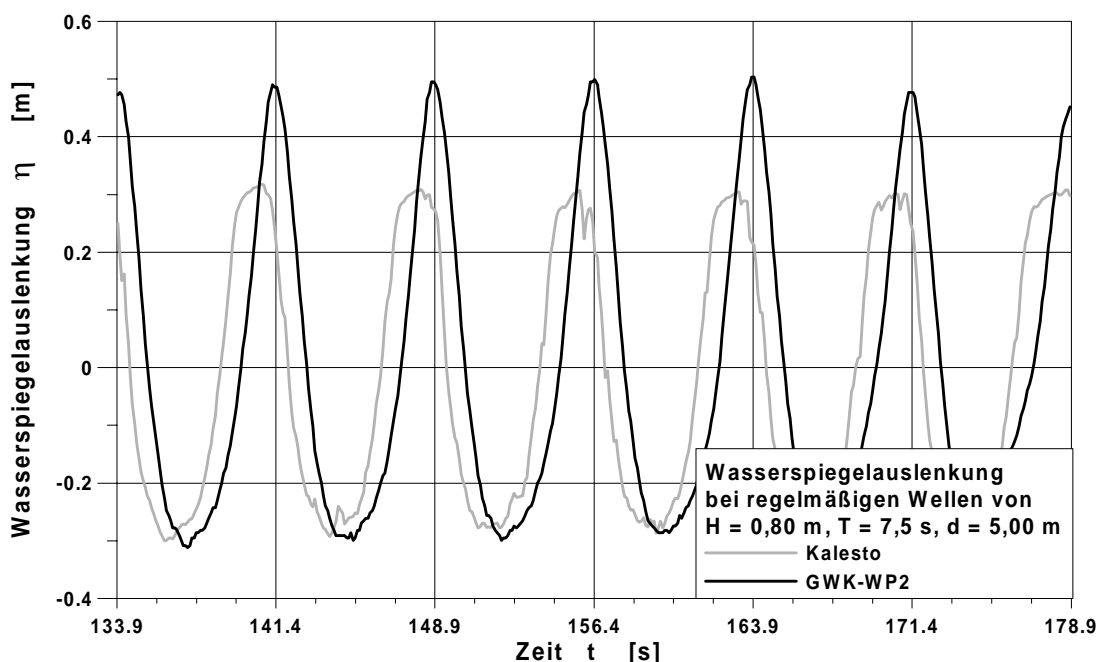


Abbildung 6-26: Zeitreihe der mit den Sensoren GWK-WP2 und VEGAPULS im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung

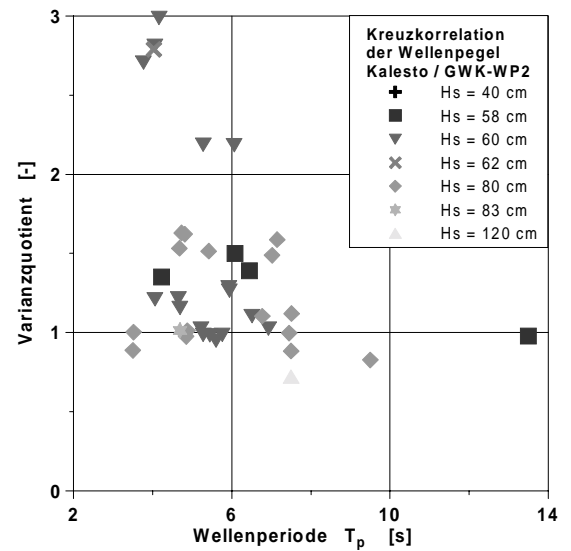
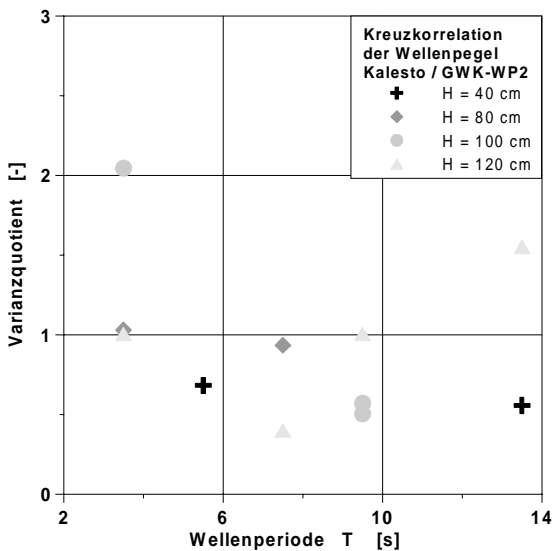


Abbildung 6-27: Abhängigkeit des Varianzverhältnisses zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren KALESTO und GWK-WP2 gemessenen Wasserspiegelauslenkung von Wellenperiode und -höhe bei regelmäßigem (links) unregelmäßigem Seegang (rechts)

Die aus den Statistiken der Wellenhöhen für KALESTO und GWK-WP2 bestimmten mittleren und signifikanten Wellenhöhen (vgl. Kap. 5.2) sind in Abbildung 6-29 für regelmäßige Wellen und in Abbildung 6-30 für unregelmäßige Wellen vergleichend als Funktion von Wellenperiode und Wellenhöhe dargestellt. Während bei regelmäßigem Seegang die durch das KALESTO bestimmten mittleren Wellenhöhen im Mittel um 25 % unter den durch den GWK-WP bestimmten Wellenhöhen liegen, stimmen für unregelmäßigen Seegang die durch beide Sensoren ermittelten Wellenhöhen im Mittel überein, wobei im Einzelfall sowohl für regelmäßige als auch für unregelmäßige Wellen Abweichungen vom Mittel von bis zu 25 % auftreten.

Die bei unregelmäßigen Wellen auch bestimmten signifikanten Wellenhöhen werden im Gegensatz zu den mittleren Wellenhöhen durch das KALESTO unterschätzt.

So beträgt die mit dem KALESTO gemessene signifikante Wellenhöhe im Mittel nur 95 % der mit dem GWK-WP2

gemessenen Wellenhöhe. Die Abweichung von diesem Mittelwert beträgt maximal 45 %. Eine Abhängigkeit des Wellenhöhenverhältnisses von der Wellenperiode ist nicht erkennbar, während bei zunehmenden Wellenhöhen der Sensor KALESTO stärker abzuweichen scheint.

6.2.2 Frequenzbereich

Die Auswertung des Gerätevergleichs von Radarsensor KALESTO mit den Drahtwellenpegeln GHM-WP4 bzw. GWK-WP2 erfolgt, wie die Auswertung im Zeitbereich, getrennt für die Versuchsteile im WKS und GWK. Die Frequenzanalyse der im WKS gemessenen Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkung zeigt eine gute Übereinstimmung des Radarsensors KALESTO mit dem Sensor GHM-WP2. Beispielhaft zeigt Abbildung 6-31 einen Vergleich der Amplitudenspektren der beiden Sensoren für regelmäßigen und unregelmäßigen Seegang mit einer Wellenhöhe von 15 cm und einer Wellenperiode von 4,0 s.

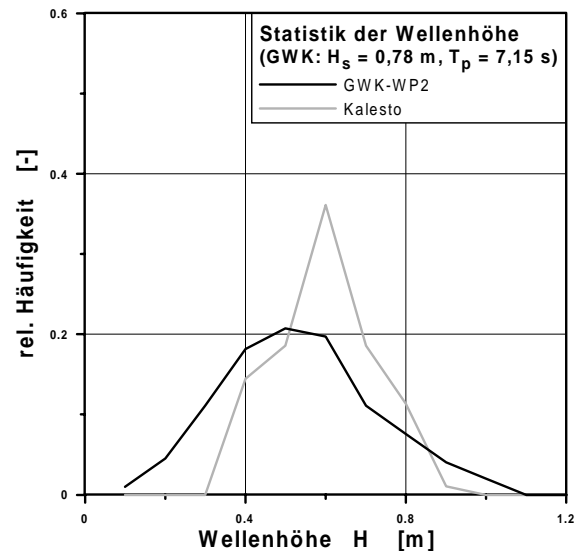
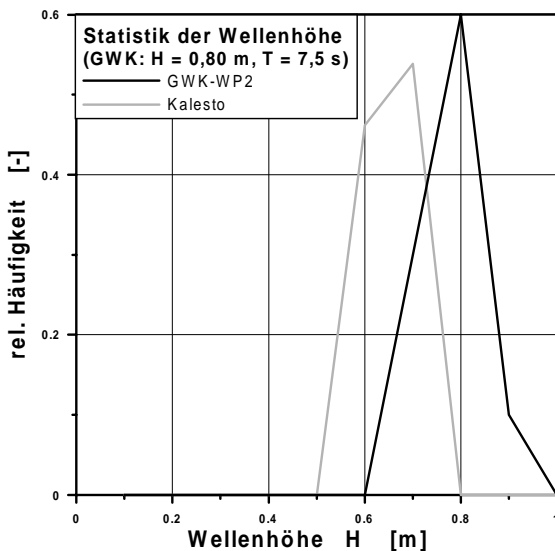


Abbildung 6-28: Statistik der Wellenhöhe im GWK bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)

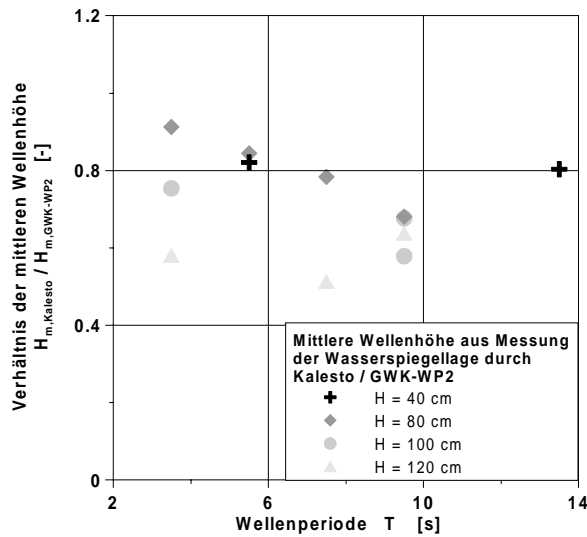


Abbildung 6-29: Verhältnis der mit den Sensoren KALESTO und GWK-WP2 im GWK ermittelten mittleren Wellenhöhen bei regelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe

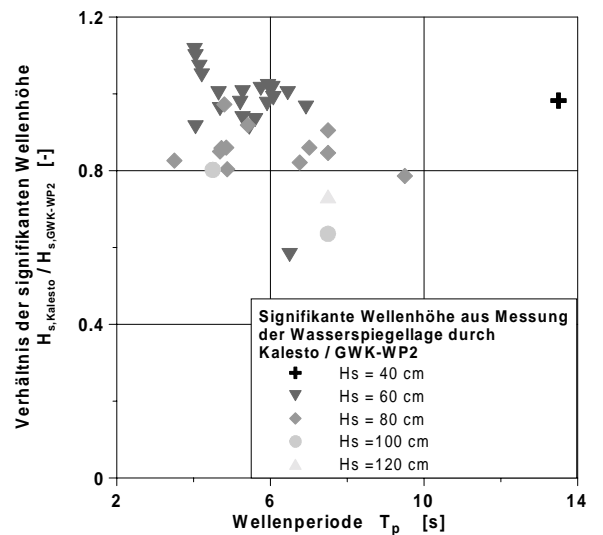
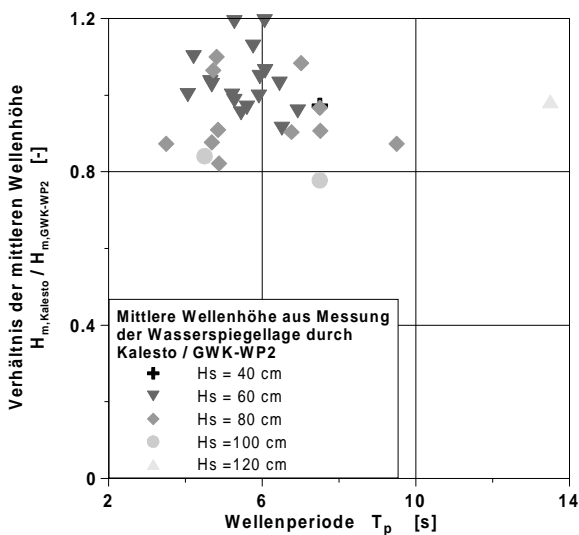


Abbildung 6-30: Verhältnis der mit den Sensoren KALESTO und GWK-WP2 im GWK ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe

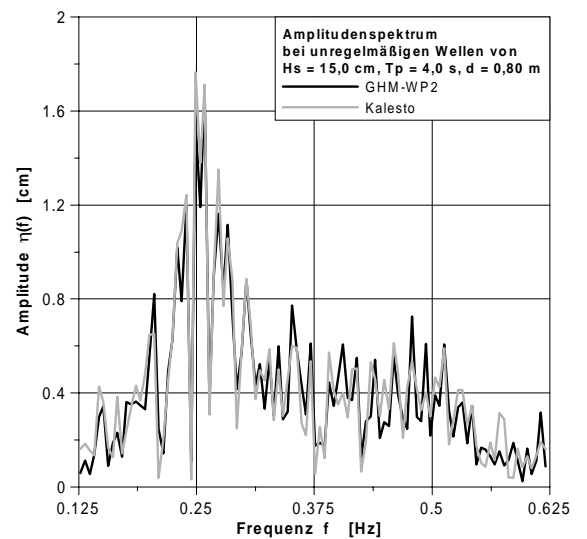
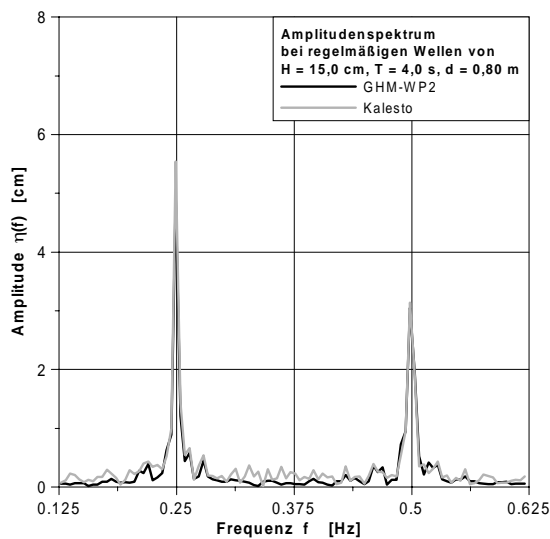


Abbildung 6-31: Amplitudenspektrum der mit den Sensoren GHM-WP2 und KALESTO im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)

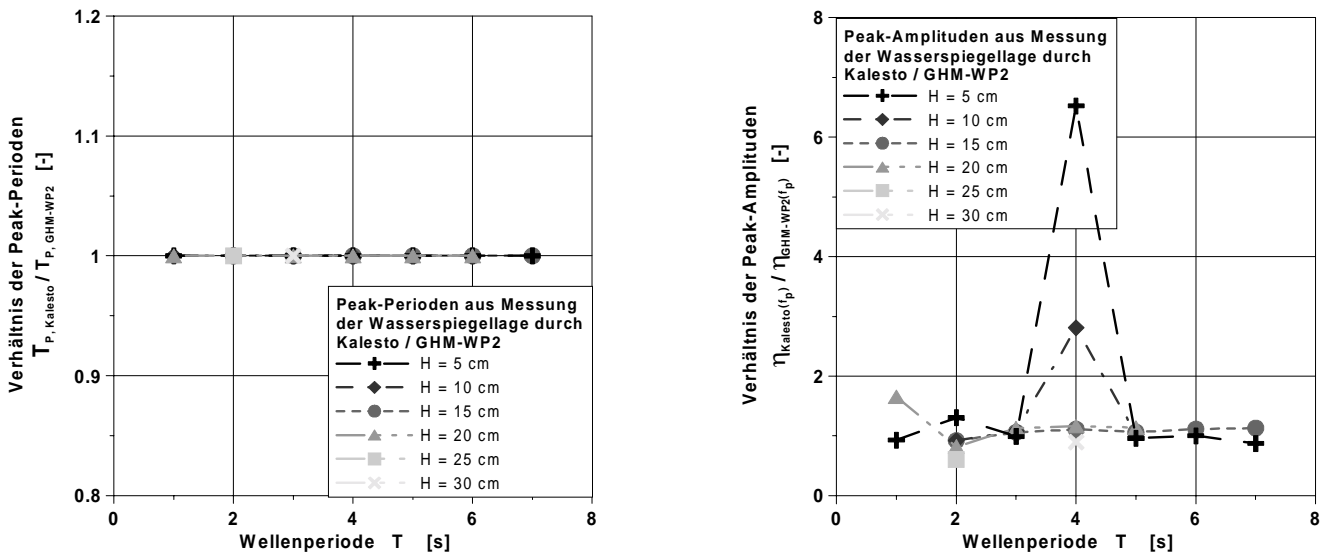


Abbildung 6-32: Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GHM-WP2 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei regelmäßigen Wellen

Die Peak-Amplitude und Peak-Frequenz werden für dieses Beispiel richtig wiedergegeben. Die Charakterisierung der Amplitudenspektren sämtlicher Versuche durch Peak-Periode und Peak-Frequenz ist in Abbildung 6-32 für regelmäßige Wellen und in Abbildung 6-33 für unregelmäßige Wellen als Funktion der Wellenperiode für verschiedene Wellenhöhen dargestellt. Die Peak-Perioden werden für regelmäßigen Seegang exakt durch das KALESTO wiedergegeben. Für unregelmäßigen Seegang ergeben sich bei geringen Wellenhöhen unter 10 cm Abweichungen von bis zu 20 %. Für die Peak-Amplituden ergeben sich sowohl für regelmäßigen als auch für unregelmäßigen Seegang erhebliche Abweichungen zwischen KALESTO und GHM-WP2. Die Abweichungen sind um so größer, je geringer die Wellenhöhe ist, da dann die Bedeutung des bei der Auswertung im Zeitbereich festgestellten Rauschens größer ist.

Neben der Betrachtung der Eigenschaften des spektralen Peaks ist die Beurteilung integraler Eigenschaften des

Spektrums durch die Berechnung der mittleren Wellenperiode und der signifikanten Wellenhöhe aus den Momenten des Leistungsspektrums der gemessenen Wasserspiegelauslenkungen erfolgt. Außerdem sind die aus den Spektren von KALESTO und GHM-WP2 bestimmten Parameter zueinander ins Verhältnis gesetzt worden. Abbildung 6-34 zeigt das Verhältnis der mittleren Wellenperioden bzw. signifikanten Wellenhöhen für regelmäßigen Seegang und Abbildung 6-35 das für unregelmäßigen Seegang.

Die mit dem GHM-WP2 bestimmte mittlere Wellenperiode wird durch das Radar KALESTO sowohl für regelmäßigen als auch für unregelmäßigen Seegang unterschätzt. Die Abweichungen sind hier um so größer, je geringer die Wellenhöhen und je höher die Wellenperioden sind. Die Abhängigkeit der Abweichungen der mittleren Wellenperiode von den Wellenhöhen erklärt sich, wie die Abweichung der Peak-Amplituden, aus der größeren Bedeutung des Rauschens bei geringen Wellenhöhen.

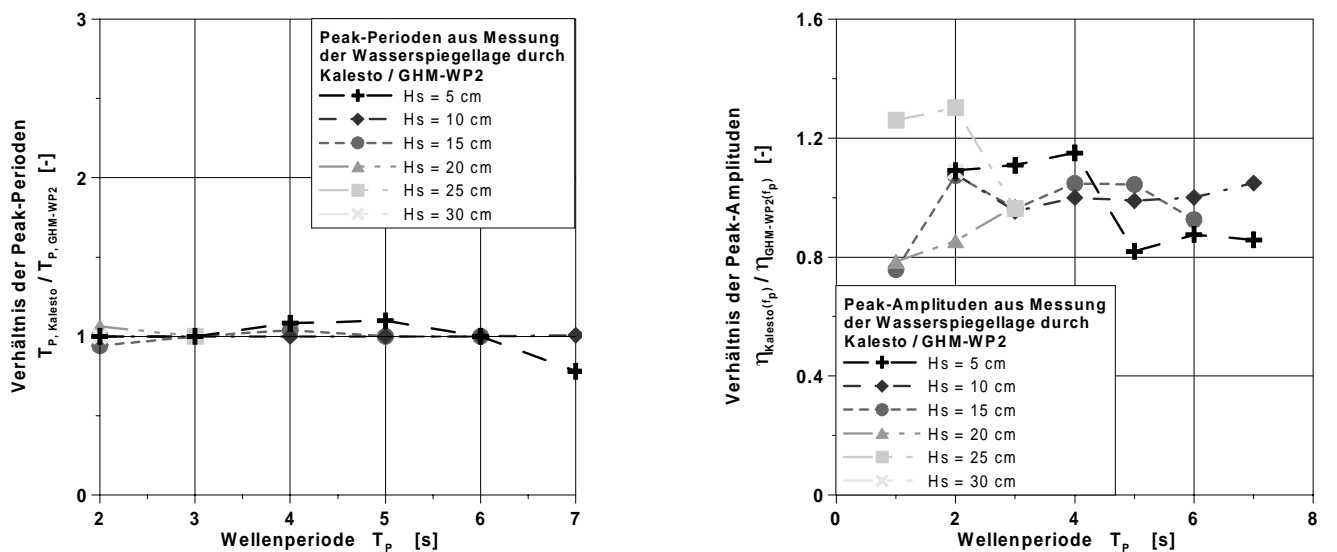


Abbildung 6-33: Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GHM-WP2 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei unregelmäßigen Wellen

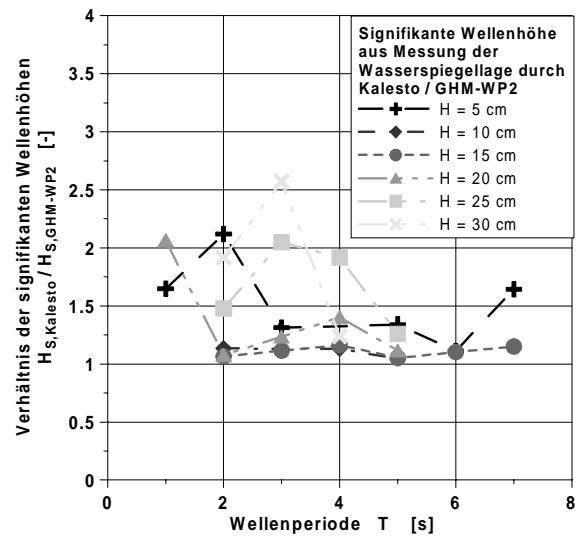
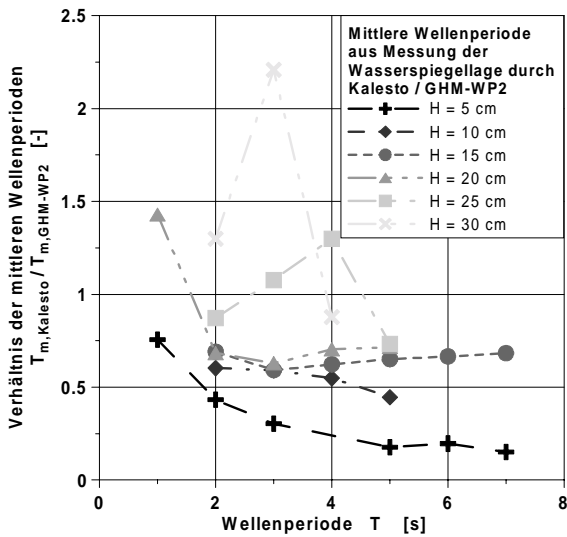


Abbildung 6-34: Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GHM-WP2 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei regelmäßigen Wellen

In ähnlicher Weise kommt dem Rauschen auch bei höheren Wellenperioden eine größere Bedeutung zu, was die Vergrößerung der Abweichungen mit der Wellenperiode erklärt.

Die aus dem Leistungsspektrum bestimmten signifikanten Wellenhöhen werden von dem Radar KALESTO überschätzt, da das 0-te Moment des Spektrums neben einem Seegangsanteil auch einen Rauschanteil enthält. Der Anteil des Rauschens am 0-ten Moment ist um so größer, je geringer die Energie bzw. die Höhe des Seegangs ist. Dies erklärt die bei geringen Wellenhöhen größeren Abweichungen der durch das KALESTO bestimmten signifikanten Wellenhöhen von denen, welche mit dem GHM-WP2 bestimmt worden sind.

Wird der Gerätevergleich bei größeren Wellenhöhen und -perioden, wie sie im GWK vorgelegen haben, durchgeführt, so ergeben sich im Vergleich zum WKS einige Unterschiede. So weisen die in Abbildung 6-36 für regelmäßige und unregelmäßige Wellen dargestellten Amplitudenspektren der Wasserspiegelauslenkung eine Über-

schätzung der Amplituden niedriger Frequenzen durch das Radar KALESTO auf. Außerdem treten, speziell bei unregelmäßigem Seegang, Verschiebungen des spektralen Peaks auf. Eine graphische Darstellung des Vergleichs erfolgt mit Hilfe des Verhältnisses der durch KALESTO und GWK-WP2 bestimmten Parameter des spektralen Peaks in Abbildung 6-37 und in Abbildung 6-38. Bei regelmäßigem Seegang stimmen die Peak-Perioden der KALESTO- und der GWK-WP2-Messung exakt überein, während bei unregelmäßigem Seegang die Peak-Frequenzen durch das KALESTO zum Teil um bis zu 420 % überschätzt werden. Die Peak-Amplituden werden bei regelmäßigem Seegang durch das Kalesto um bis zu 50 % unterschätzt. Dies steht im Gegensatz zu den für geringere Wellenhöhen im WKS gewonnenen Ergebnissen, die im Mittel eine Überschätzung der Peak-Amplitude zeigen.

Bei den GWK-Versuchen mit unregelmäßigem Seegang zeigen sich, wie bei den Versuchen im WKS, sowohl Überschätzungen als auch Unterschätzungen der Peak-Amplitude.

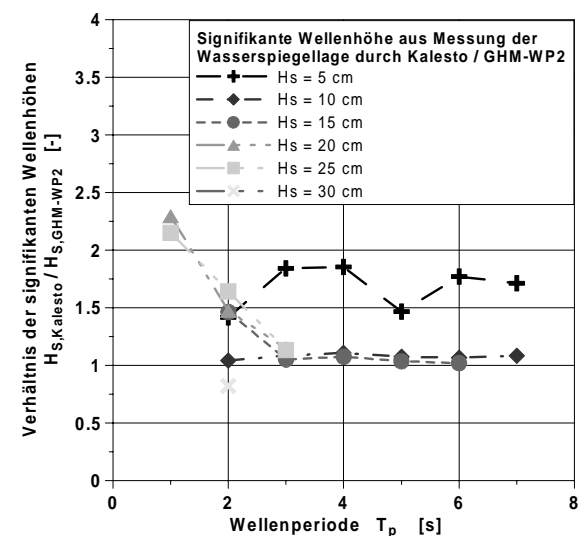
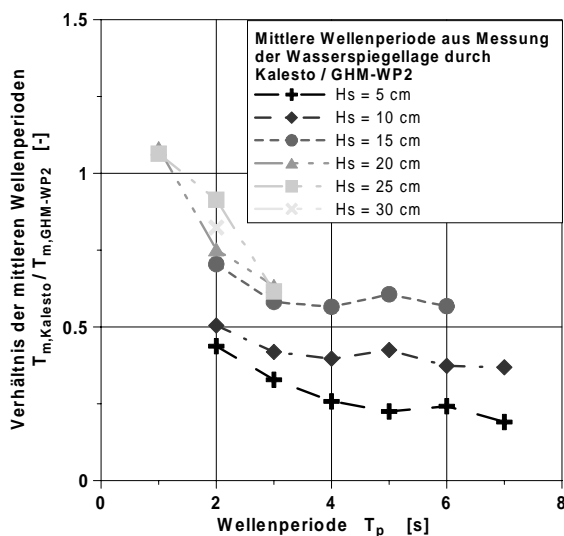


Abbildung 6-35: Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GHM-WP2 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen

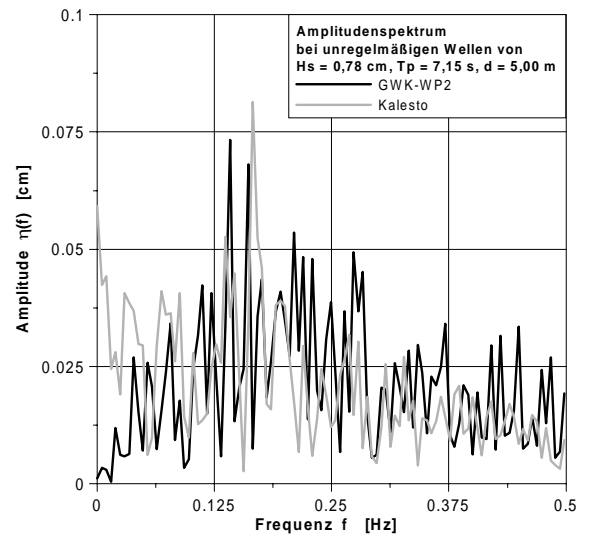
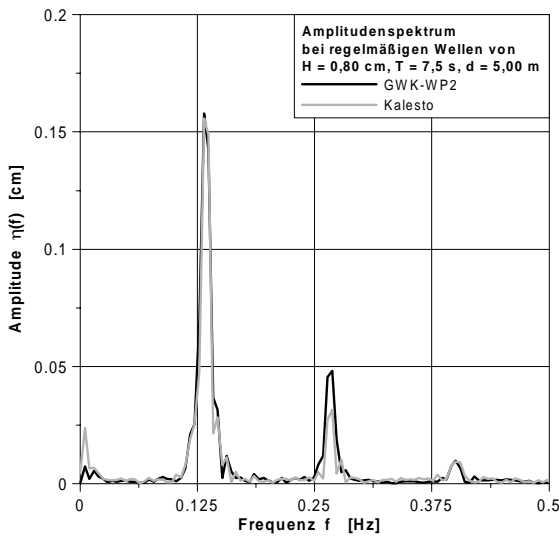


Abbildung 6-36: Amplitudenspektrum der mit den Sensoren GWK-WP2 und KALESTO im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)

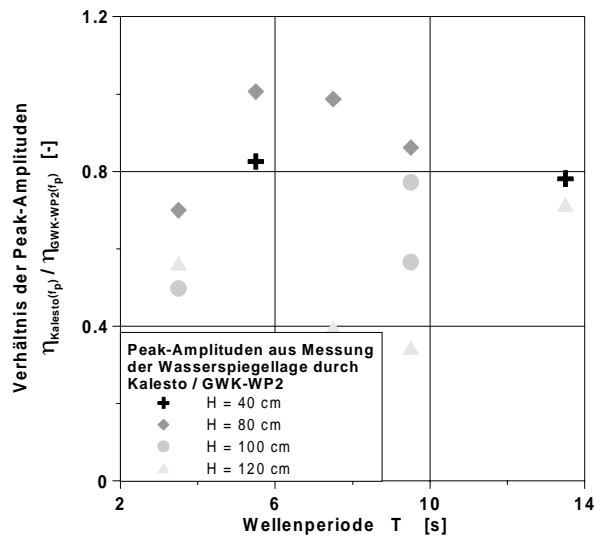
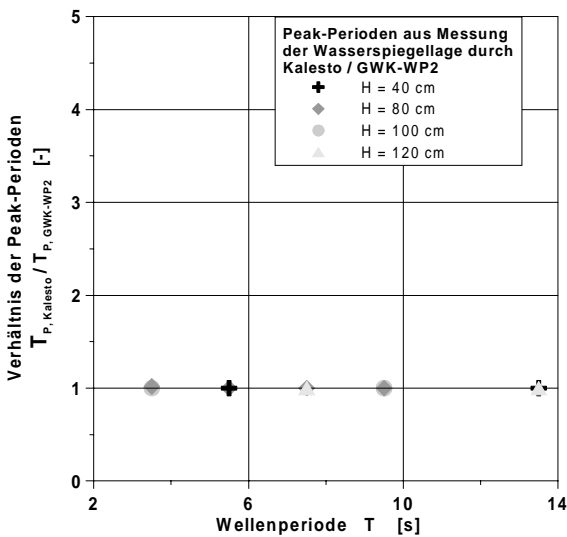


Abbildung 6-37: Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GWK-WP2 im GWK bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei regelmäßigen Wellen

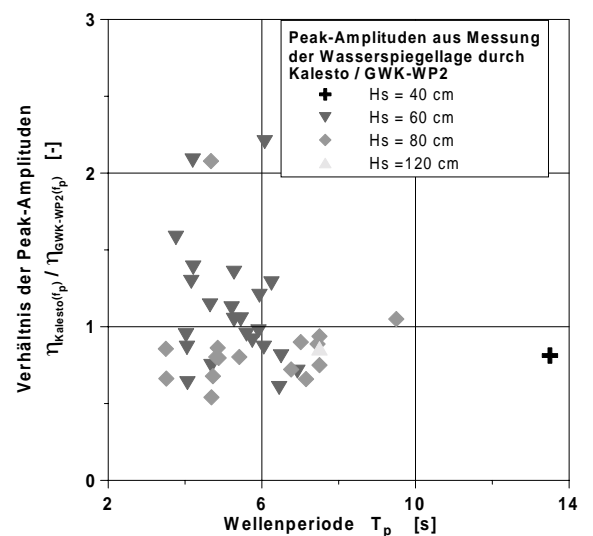
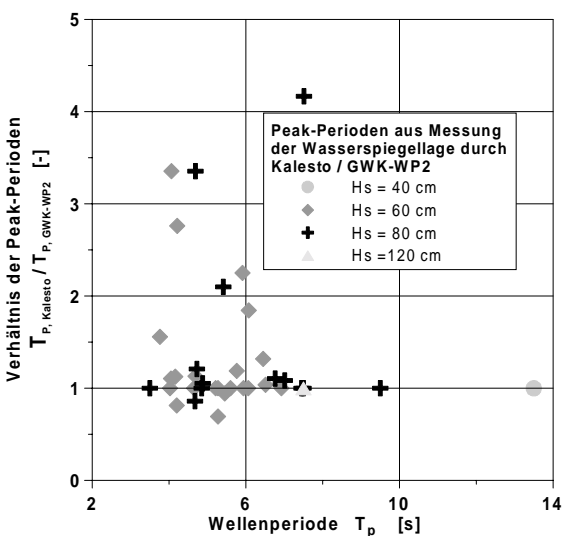


Abbildung 6-38: Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GWK-WP2 im GWK bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei unregelmäßigen Wellen

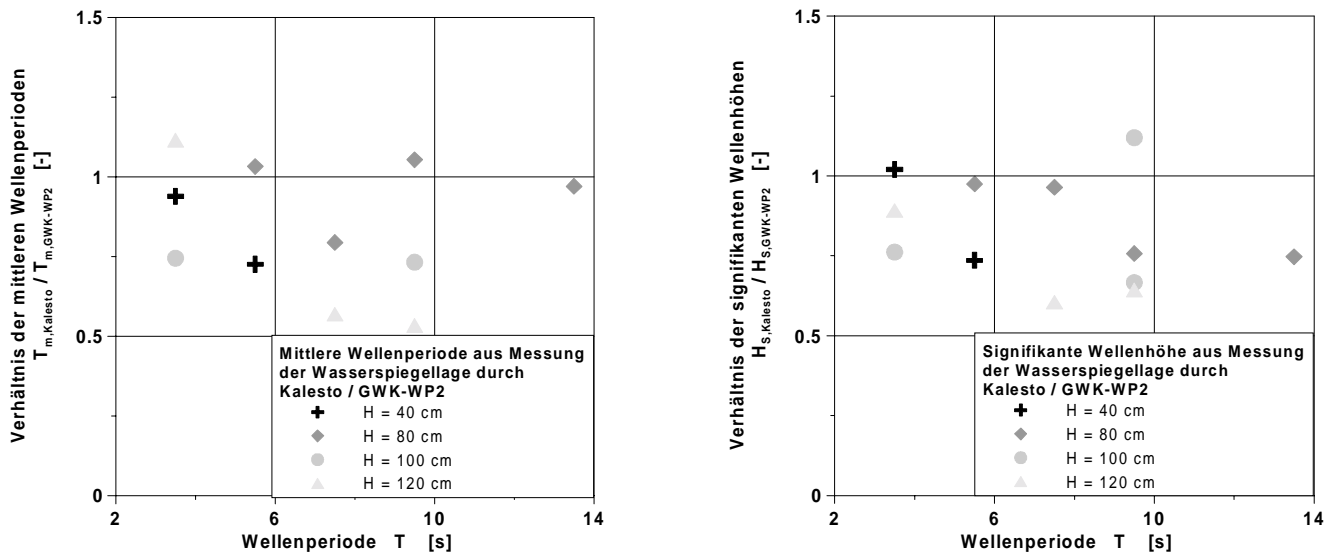


Abbildung 6-39: Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GWK-WP2 im GWK bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei regelmäßigen Wellen

Auch der Vergleich der aus Messungen im GWK für KALESTO und GWK-WP2 bestimmten integralen Parameter weist Übereinstimmungen und Unterschiede zu den oben dargestellten Ergebnissen aus dem WKS auf.

Die graphische Darstellung findet sich in Abbildung 6-39 für regelmäßige Wellen und Abbildung 6-40 für unregelmäßige Wellen. Übereinstimmend mit den Resultaten im WKS ergibt sich sowohl für regelmäßigen als auch für unregelmäßigen Seegang eine Unterschätzung der aus dem Seegangsspektrum bestimmten mittleren Wellenperioden durch das KALESTO. Für das KALESTO beträgt die mittlere Wellenperiode im Mittel nur etwa 90 % der durch den GWK-WP2 bestimmten Perioden. Die signifikanten Wellenhöhen werden im Gegensatz zu den Versuchen im WKS bei den Versuchen im GWK teilweise auch durch das KALESTO unterschätzt. Dies zeigt sich im besonderen bei der Auswertung der Versuche mit regelmäßigen Wellen.

6.3 BM100-TYP C

6.3.1 Zeitbereich

Der Radar-Sensor BM100-TYP C weist im Vergleich zu dem traditionellen Sensor GHM-WP4 deutliche Abweichungen auf. Beispielhaft ist in Abbildung 6-41 für einen Wasserstand von 0,80 m und regelmäßige Wellen mit einer Höhe von $H = 15$ cm und einer Periode von $T = 4$ s eine Zeitreihe der mit den verschiedenen Sensoren im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung dargestellt. Der Sensor BM100-TYP C liefert im Vergleich zum GHM-WP4 deutlich geringere Amplituden der Wasserspiegelauslenkung. Außerdem tritt eine Phasenverschiebung zwischen den Meßsignalen des BM100-Typ C und GHM-WP4 auf. Für das in Abbildung 6-41 dargestellte Beispiel beträgt die Phasenverschiebung ca. 1,1 s.

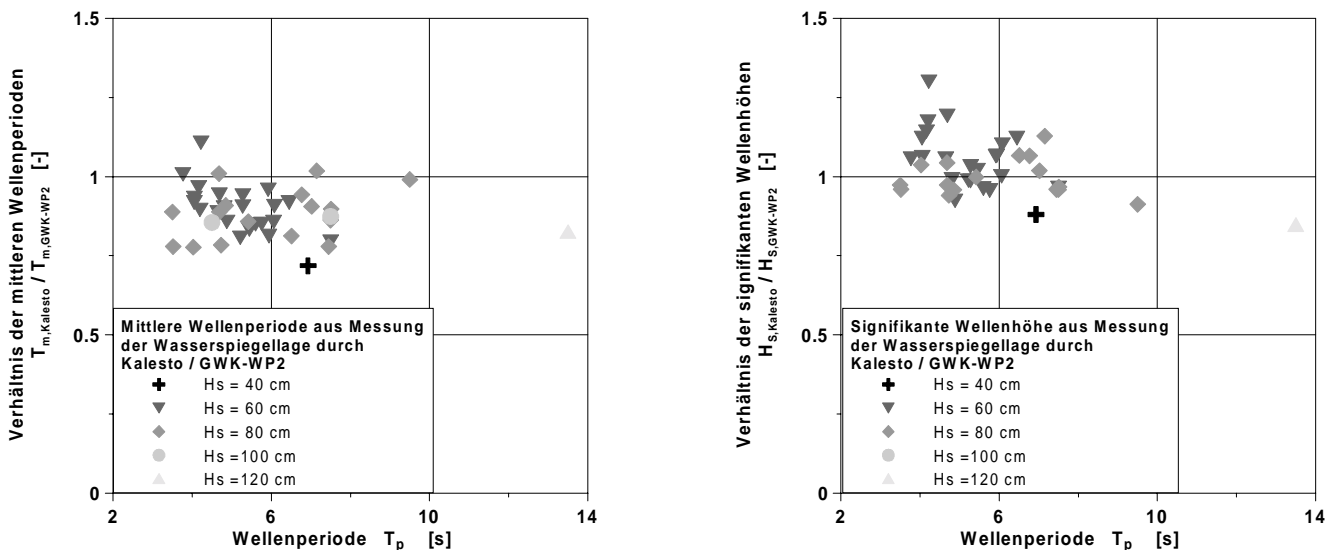


Abbildung 6-40: Verhältnis der aus Messungen von KALESTO und GWK-WP2 im GWK bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen

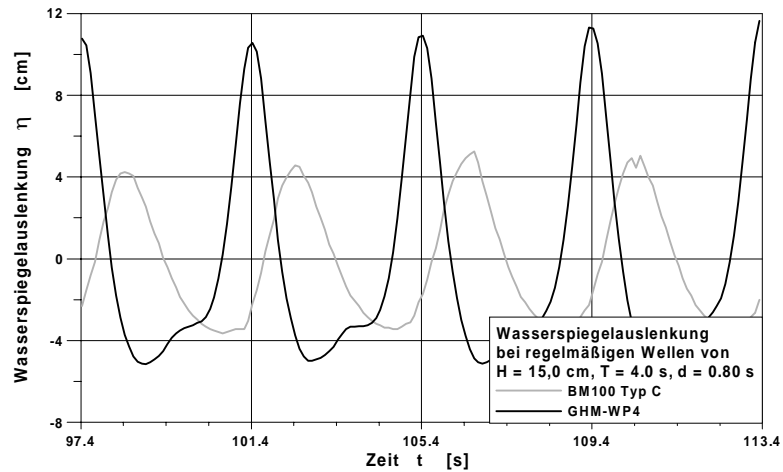


Abbildung 6-41: Zeitreihe der mit den Sensoren GHM-WP4 und BM100-Typ C im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung

Eine exakte Untersuchung der Phasenverschiebung zwischen den, mit den verschiedenen Sensoren gemessenen, Zeitreihen der Wasserspiegellage ist mit der in Kapitel 5.2 dargestellten Methode der Kreuzkorrelation erfolgt. Außerdem sind die Varianzen der Wasserspiegellagen aus den Messungen der verschiedenen Sensoren zueinander ins Verhältnis gesetzt worden. Einen Überblick über die sich bei regelmäßigen Wellen unterschiedlicher Periode und Wellenhöhe ergebenden Phasenverschiebungen und Varianzquotienten ist in Abbildung 6-42 gegeben. Die Phasenverschiebung zwischen BM100-Typ C und GHM-WP4 wächst mit zunehmender Wellenperiode und Wellenhöhe an. Für Wellenperioden von 1 s bis 4 s und Wellenhöhen von 5 cm bis 30 cm beträgt die Phasenverschiebung 0,8 s bis 1,2 s. Das Verhältnis der Varianzen der Wasserspiegelauslenkung nimmt mit wachsender Wellenperiode zu. Größere Wellenhöhen führen zu geringeren Varianzquotienten. Für den genannten Bereich von Versuchsparametern beträgt der Varianzquotient maximal 0,5. Die sehr schlechte Übereinstimmung der Meßergebnisse des BM100-Typ C und des GHM-WP4 ist einerseits auf die mit

1 Hz zu geringe Abtastfrequenz des BM100-Typ C zurückzuführen. Andererseits stellt die Konstruktionsweise des BM100-Typ C eine Ursache für Abweichungen dar (siehe Abbildung 3-15). So erfolgt die Messung der Wasserspiegellage in einem Rohr, welches durch zwei Öffnungen am unteren Rohrende geflutet wird. Aufgrund des geringen Radius der Öffnungen hat der Sensor eine starke Dämpfung, was sowohl die Phasenverschiebung als auch den mit wachsender Wellenhöhe abnehmenden Varianzquotienten erklärt.

Neben der Kreuzkorrelation und Varianzanalyse sind die Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkung mit dem in Kapitel 5.2 dargestellten Zero-downcrossing-Verfahren untersucht worden. Abbildung 6-43 zeigt beispielhaft für regelmäßigen und unregelmäßigen Seegang die sich für die Sensoren GHM-WP4 und BM100-Typ C ergebende Statistik der Wellenhöhen. Es ist erkennbar, daß sowohl für regelmäßigen als auch für unregelmäßigen Seegang der Sensor BM100-Typ C im Vergleich zum Sensor GHM-WP4 zu geringe Wellenhöhen liefert.

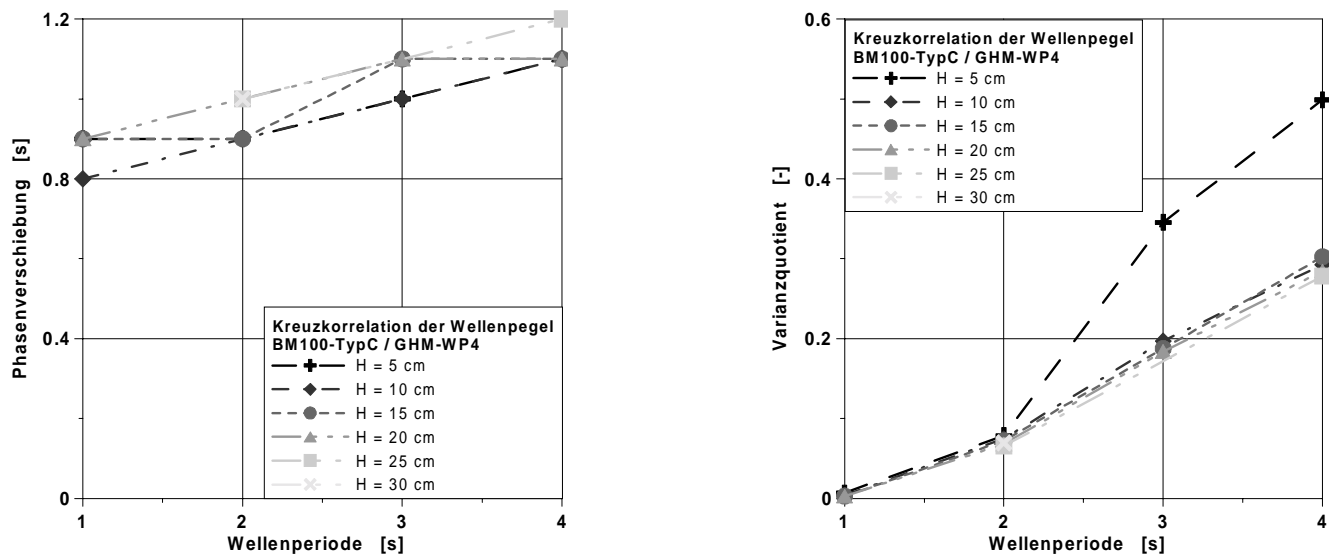


Abbildung 6-42: Abhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren BM100-Typ C und GHM-WP4 gemessenen Wasserspiegelauslenkung (links) und des Varianzverhältnis (rechts) von Wellenperiode und -höhe bei regelmäßigem Seegang

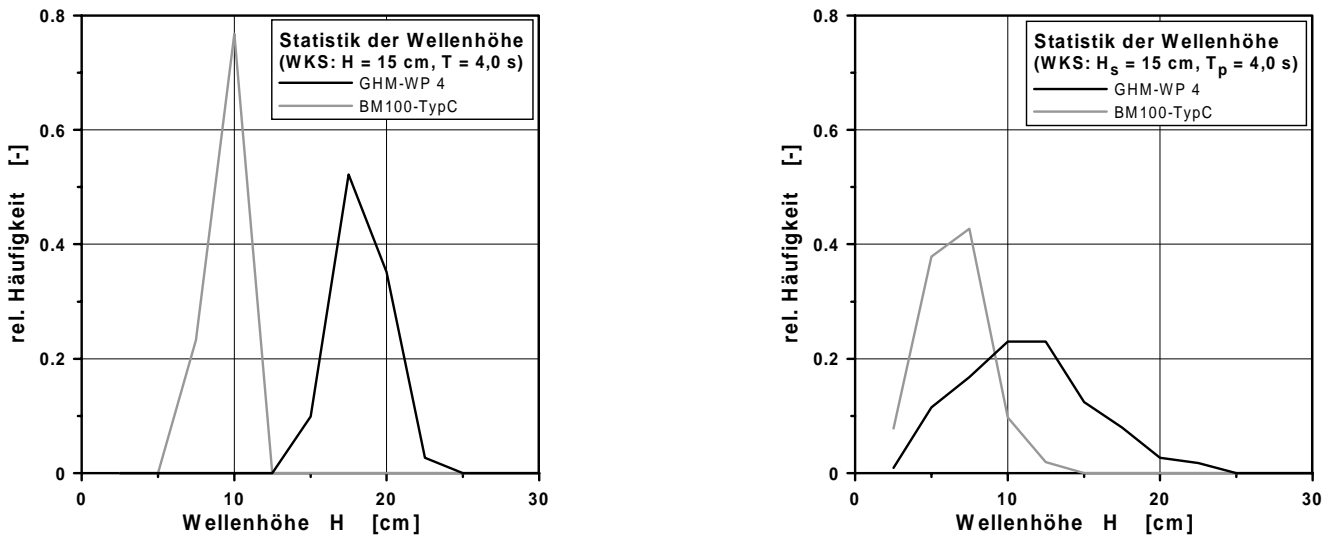


Abbildung 6-43: Statistik der Wellenhöhe bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)

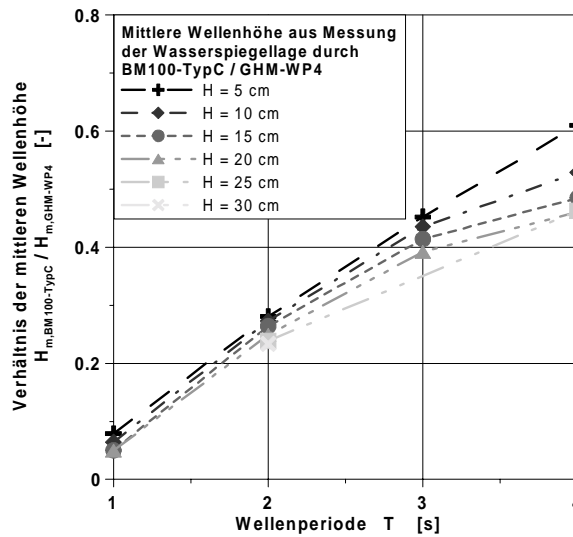


Abbildung 6-44: Verhältnis der mit den Sensoren BM100-Typ C und GHM-WP4 ermittelten mittleren Wellenhöhen bei regelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und –höhe

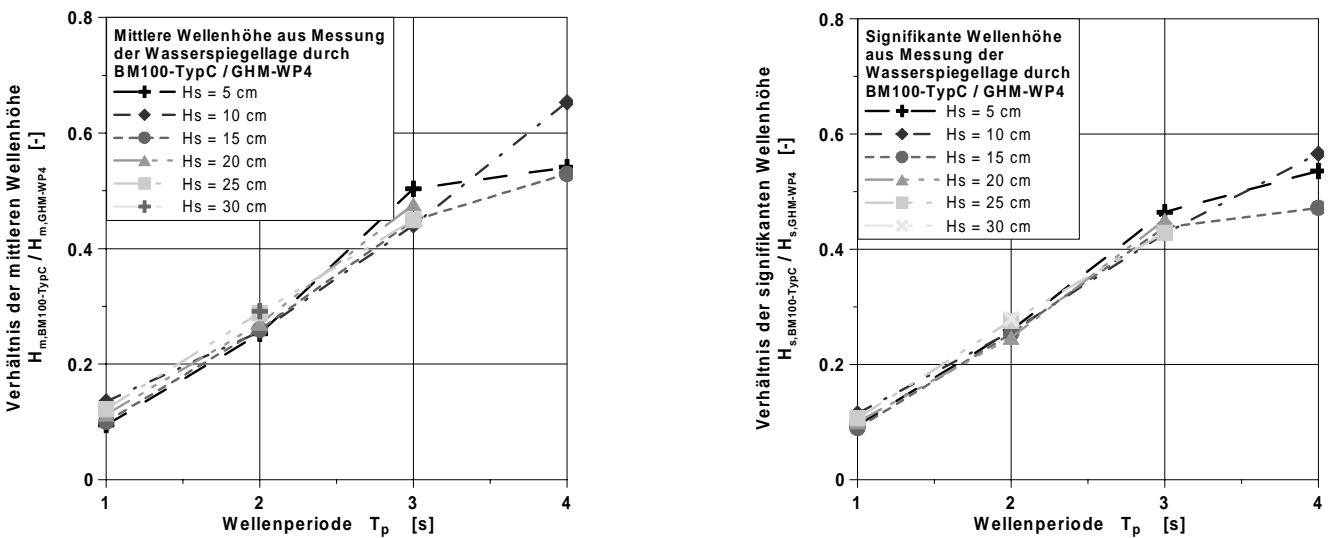


Abbildung 6-45: Verhältnis der mit den Sensoren BM100-Typ C und GHM-WP4 ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe

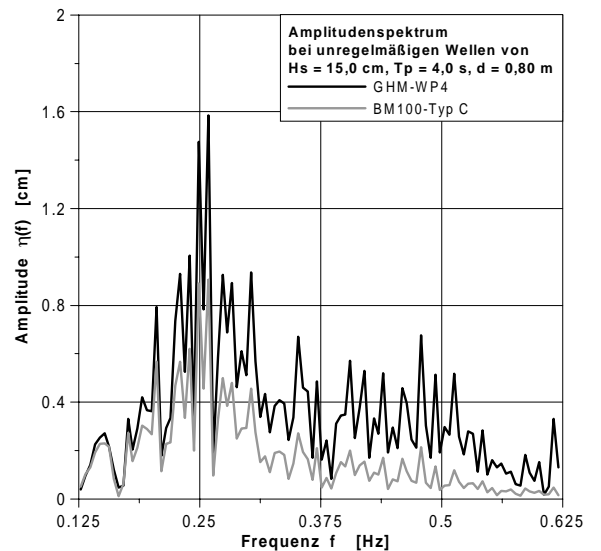
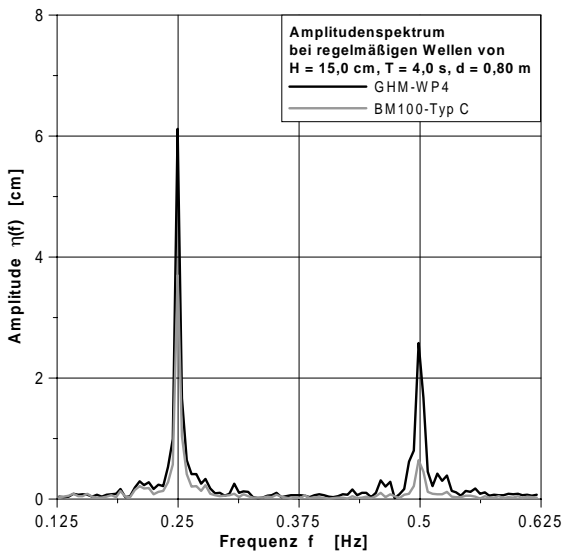


Abbildung 6-46: Amplitudenspektrum der mit den Sensoren BM100-TYP C und GHM-WP4 im WKS gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)

Die Wellenhöhenverteilungen lassen sich, wie in Kapitel 5.2 dargestellt, durch mittlere Wellenhöhe und signifikante Wellenhöhe charakterisieren. Für regelmäßigen Seegang stellt Abbildung 6-44 das Verhältnis der mittleren Wellenhöhen in Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe dar. Für Wellenperioden von 1 s beträgt die mit dem Sensor BM100-TYP C bestimmte mittlere Wellenperiode etwa 8 % der mit dem Sensor GHM-WP4 bestimmten. Dieses Verhältnis wächst für Wellenperioden von 4 s in Abhängigkeit von der Wellenhöhe auf 45 % bis 60 % an. Es ist um so geringer, je höher die Wellenhöhe ist.

Für unregelmäßigen Seegang ist neben dem Verhältnis der mittleren Wellenhöhen auch das der signifikanten Wellenhöhen in Abbildung 6-45 dargestellt. Für unregelmäßigen Seegang zeigen sich ähnliche Abhängigkeiten des Verhältnisses der Wellenhöhen wie bei regelmäßigem Seegang. Außerdem ergeben sich nur geringe Unterschiede bei der Betrachtung des Verhältnisses der signifikanten Wellenhöhe bzw. der mittleren Wellenhöhe.

6.3.2 Frequenzbereich

Die Analyse der durch den Radarsensor BM100-TYP C und den Drahtwellenpegel GHM-WP4 gemessenen Zeitreihen der Wasserspiegellage im Frequenzbereich ist exemplarisch in Abbildung 6-46 für regelmäßige und unregelmäßige Wellen gezeigt. Für regelmäßige Wellen ist erkennbar, daß die Lage des spektralen Peaks, d.h. die Peak-Frequenz bzw. Peak-Periode, richtig durch das BM100-TYP C wiedergegeben wird, während die Peak-Amplitude unterschätzt wird. Aus dem Amplitudenspektrum für unregelmäßige Wellen wird deutlich, daß die spektrale Amplitude durch das BM100-TYP C um so stärker unterschätzt wird, je größer die betrachtete Frequenz ist. Die Ursache für die Unterschätzung der spektralen Amplituden ist, wie auch in Kapitel 6.3.1 dargestellt, die mit 1 Hz zu geringe Abtastfrequenz des BM100-TYP C und die Konstruktionsweise des Koaxialrohres mit zwei zu kleinen Löchern zur Befüllung des Rohrs.

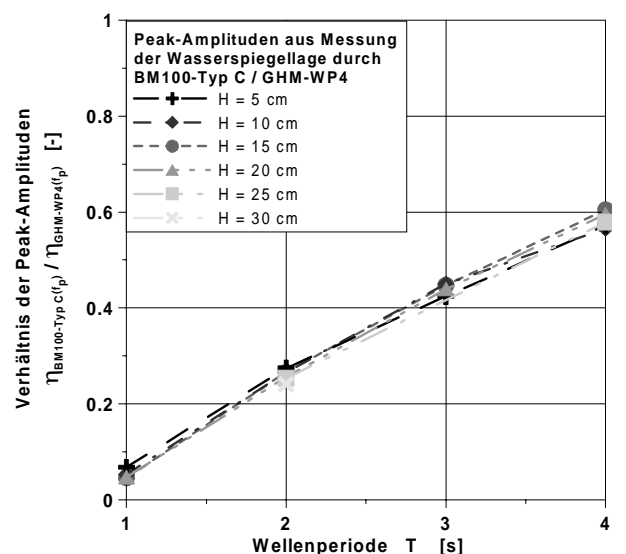
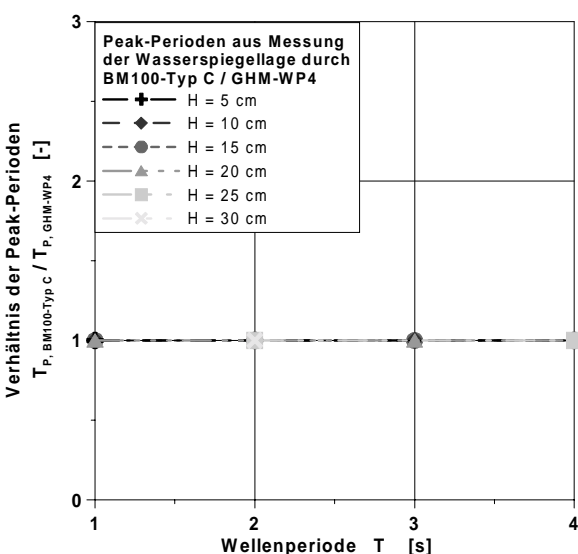


Abbildung 6-47: Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP C und GHM-WP4 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei regelmäßigen Wellen

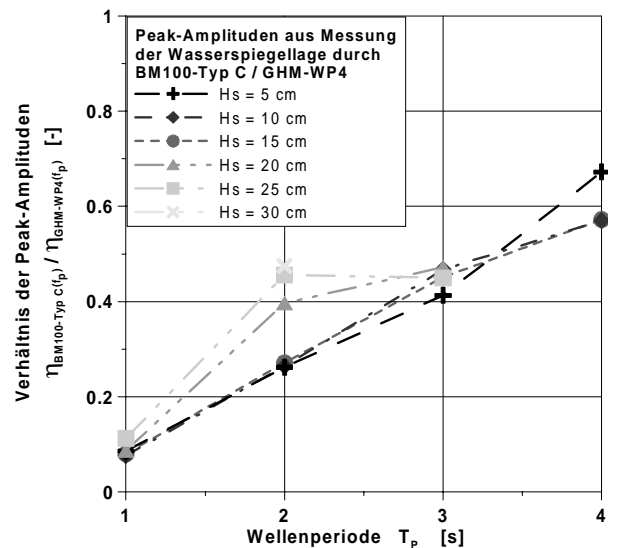
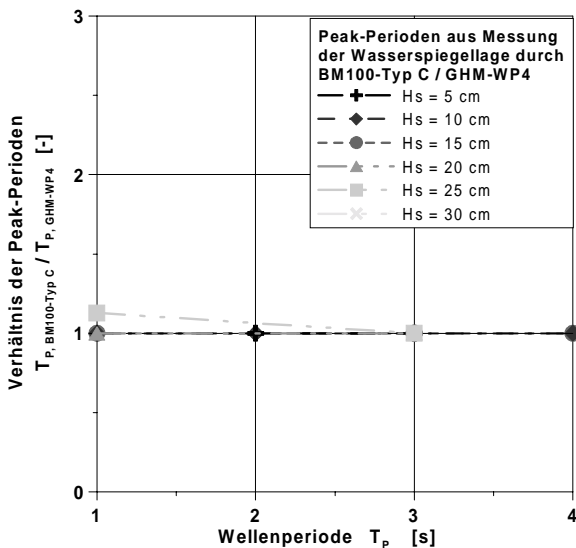


Abbildung 6-48: Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP C und GHM-WP4 im WKS bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts) bei unregelmäßigen Wellen

Eine graphische Darstellung der Abhängigkeit des Verhältnisses der mit den genannten Sensoren ermittelten Peak-Perioden bzw. -Amplituden zeigt Abbildung 6-47 für regelmäßige Wellen und Abbildung 6-48 für unregelmäßige Wellen. Das Peak-Periodenverhältnis ist, unabhängig von der Art des Seegangs und der Periode, stets (abgesehen von einer Ausnahme) eins, d.h. BM100-TYP C und GHM-WP4 geben identische Peak-Perioden. Im Gegensatz dazu wird die Peak-Amplitude durch das BM100-TYP C um so mehr unterschätzt, je geringer die Wellenperiode des untersuchten regelmäßigen oder unregelmäßigen Seegangs ist. Für eine Wellenperiode von 1 s beträgt das Verhältnis der Peak-Amplituden etwa 10 % und steigt nahezu linear auf etwa 60 % bei Wellenperioden von 4 s.

Auch die integrale Betrachtung des Seegangsspektrums mit den aus den spektralen Momenten berechneten Parametern, mittlere Wellenperiode und signifikante Wellenhöhe, zeigt deutliche Differenzen zwischen BM100-TYP C und GHM-WP4. Die genannten Parameter sind in Abbildung

6-49 und Abbildung 6-50 als Verhältnis der Ergebnisse beider Sensortypen als Funktion der Wellenperiode dargestellt.

Bei regelmäßigem Seegang mit geringen Wellenperioden von weniger als 2 s werden die mittleren Perioden durch das BM100-TYP C unterschätzt, während bei größeren Wellenperioden die mittlere Wellenperiode überschätzt wird. Die Überschätzung der Wellenperiode erklärt sich aus dem besseren Übertragungsverhalten des BM100-TYP C bei großen Wellenperioden, so daß Beiträge im Seegangsspektrum mit niedriger Frequenz übergewichtet werden. Im Gegensatz dazu läßt sich für die Unterschätzung der mittleren Wellenperiode keine eindeutige Ursache ausmachen. Bei unregelmäßigem Seegang wird die mittlere Wellenperiode mit Ausnahme der Versuche mit Wellenhöhen von weniger als 5 cm bis zu 60 % überschätzt. Die Überschätzung steigt dabei mit wachsender Wellenhöhe an, was auf die Filtercharakteristik der Geometrie des Koaxialrohres zurückzuführen ist (s.o.).

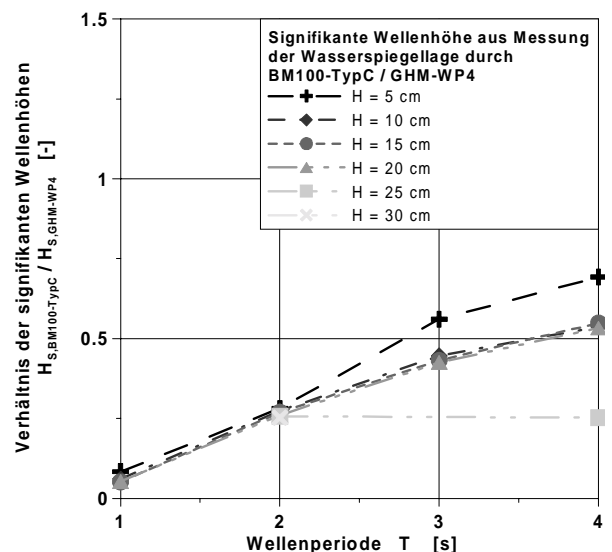
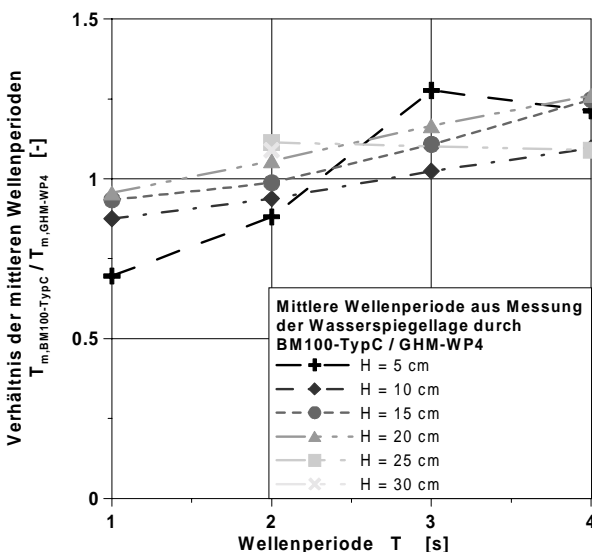


Abbildung 6-49: Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP C und GHM-WP4 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei regelmäßigen Wellen

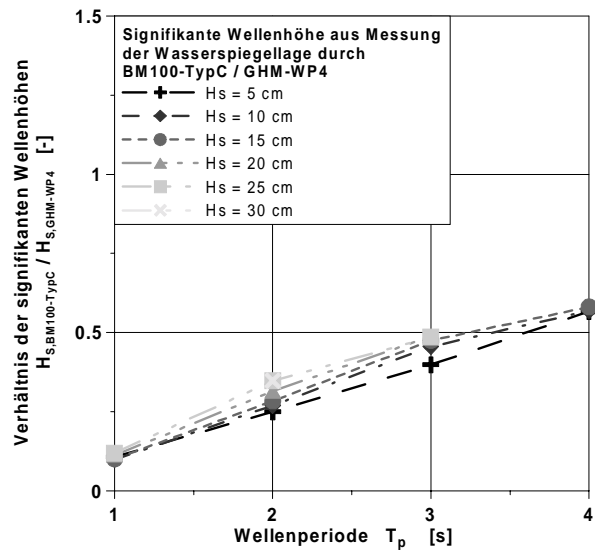
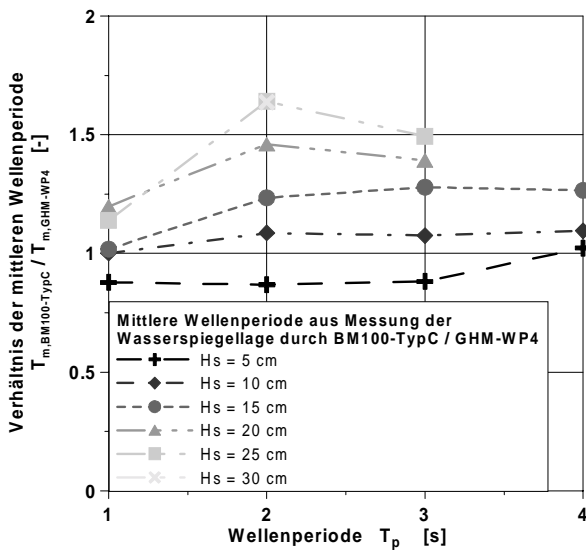


Abbildung 6-50: Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP C und GHM-WP4 im WKS bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen

Für das Verhältnis der signifikanten Wellenhöhen zeigt sich sowohl für regelmäßigen als auch für unregelmäßigen Seegang ein Anstieg von etwa 10 % bei Wellenperioden von 1 s auf im Mittel 60 % bei Wellenperioden von 4 s, was vergleichbar mit dem durch Auswertung im Zeitbereich gewonnenen und in Abbildung 6-45 dargestellten Ergebnis ist.

Während für unregelmäßigen Seegang nahezu kein Abhängigkeit von der Wellenhöhe erkennbar ist, zeigt sich bei regelmäßigem Seegang für geringe Wellenhöhen ein deutlich besseres Meßergebnis des BM100-TYP C.

6.4 BM100-TYP A

6.4.1 Zeitbereich

Der Radar-Sensor BM100-TYP A weist, wie der Radar-Sensor BM100-TYP C, im Vergleich zu traditionellen Sensoren, hier den GWK-WP, deutliche Abweichungen auf. Beispielhaft ist in Abbildung 6-51 für einen Wasserstand von 5,00 m und regelmäßige Wellen mit einer Höhe von $H = 80$ cm und einer Periode von $T = 7,5$ s eine Zeitreihe der mit den verschiedenen Sensoren im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung dargestellt.

Der Sensor BM100-TYP A liefert im Vergleich zum GWK-WP1 deutlich zu geringe Amplituden der Wasserspiegelauslenkung. Die auftretende Phasenverschiebung zwischen den Meßsignalen des BM100-TYP A und GWK-WP1 läßt unmittelbar keine Rückschlüsse auf eine mögliche gegenüber dem GWK-WP1 verzögerte Signalausgabe des BM100-TYP A zu, da beide Meßgeräte an unterschiedlichen Positionen des Kanals eingebaut sind (siehe Kap. 4.2).

Mittelbar kann jedoch die Phasenverschiebung aus dem Abstand der Meßgeräte Δx und der Wellenfortschritts- geschwindigkeit c_g abgeschätzt werden. Die aus der Entfernung der Sensoren resultierende Phasenverschiebung ΔT ist nach linearer Wellentheorie [AUSSCHUß FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE, 1993]:

$$\Delta T = \frac{\Delta x}{c_g} \quad \text{mit} \quad c_g = \frac{g}{2\pi \cdot f} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi}{L} \cdot d\right) \quad \text{und}$$

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L} \cdot d\right)$$

Für den in Abbildung 6-51 dargestellten Versuch ergibt sich so eine Wellenlänge von $L = 49,37$ m, eine Gruppengeschwindigkeit von $c_g = 5,84$ m/s und eine aus dem Abstand der Sensoren resultierende Phasenverschiebung von $\Delta T = 6,17$ s.

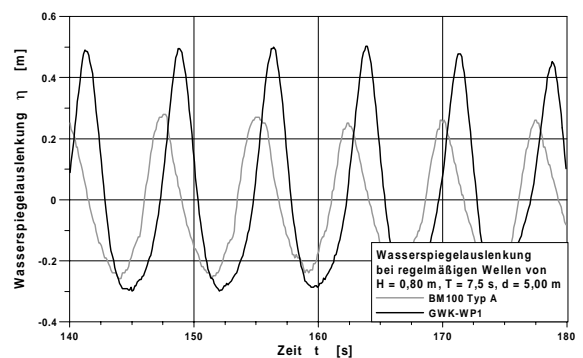


Abbildung 6-51: Zeitreihe der mit den Sensoren GWK-WP1 und BM100-TYP A im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung

Die vorhandene Phasenverschiebung ist etwa 6,2 s, so daß für den Sensor BM100-TYP A im Gegensatz zum BM100-TYP C keine verzögerte Signalausgabe festgestellt werden worden ist. Für den Sensor BM100-TYP A ist daher auf eine weitere Analyse einer möglichen gerätebedingten Phasenverschiebung, wie sie für das BM100-Typ C in Abbildung 6-42 (links) dargestellt ist, verzichtet worden.

Der Vergleich der Varianzen der von BM100-Typ A und GWK-WP1 gemessenen Wasserspiegelauslenkungen ist in Abbildung 6-52 dargestellt und in Tabelle A-15.1 tabellarisch zusammengestellt.

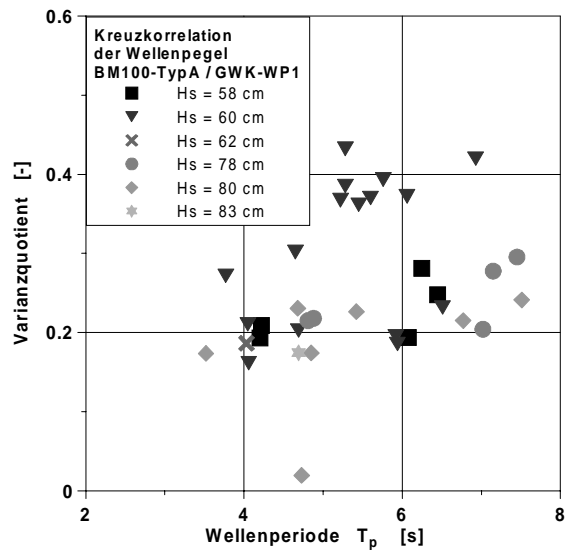


Abbildung 6-52: Abhängigkeit des Varianzverhältnis zwischen den Zeitreihen der mit den Sensoren BM100-Typ A und GWK-WP1 gemessenen Wasserspiegelauslenkung von Wellenperiode und -höhe bei unregelmäßigem Seegang

Im Gegensatz zu der in Abbildung 6-42 (rechts) für den Sensor BM100-Typ C gewählten Darstellung erfolgt die Auswertung für den Sensor BM100-Typ A in Abbildung 6-52 für unregelmäßigen Seegang, was durch das Versuchsprogramm im GWK bedingt ist. Für die untersuchten Wellenperioden von 3,5 s bis 7,5 s und signifikanten Wellenhöhen von 58 cm bis 83 cm variiert der Varianzquotient von 0,18 bis 0,42. Es ist, wie schon für das BM100-TYP C, ein leichter Anstieg des Varianzquotienten mit der Wellenperiode erkennbar. Der Einfluß der signifikanten Wellenhöhe auf den Varianzquotienten läßt sich jedoch nicht eindeutig erkennen. Wesentliche Ursache für das Unterschätzen der Varianz durch das Meßsystem BM100-TYP A dürfte die zu geringe Abtastfrequenz sein³.

Neben der Varianzanalyse sind die Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkung mit dem in Kapitel 5.2 dargestellten Zero-downcrossing-Verfahren untersucht worden. Abbildung 6-53 zeigt beispielhaft für regelmäßigen und unregelmäßigen Seegang die sich für die Sensoren GWK-WP1 und BM100-TYP A ergebende Statistik der Wellenhöhen. Es ist erkennbar, daß sowohl für regelmäßigen als auch für unregelmäßigen Seegang der Sensor BM100-TYP A im Vergleich zum Sensor GWK-WP1 zu geringe Wellenhöhen liefert, was ursächlich auf die zu geringe Abtastfrequenz des Meßgerätes BM100-TYP A von 1 Hz zurückgeht.

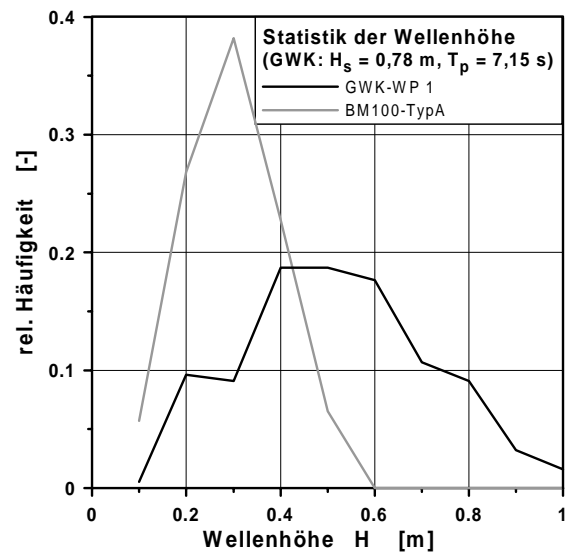
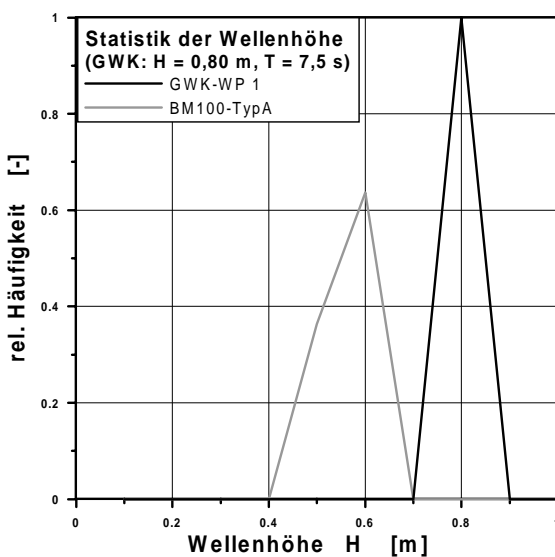


Abbildung 6-53: Statistik der Wellenhöhe bei regelmäßigem (links) und unregelmäßigem Seegang (rechts)

³ Hier werden die Versuche mit der schnellen Version des BM100-TYP A (Meßfrequenz: 5 Hz) Aufschluß geben.

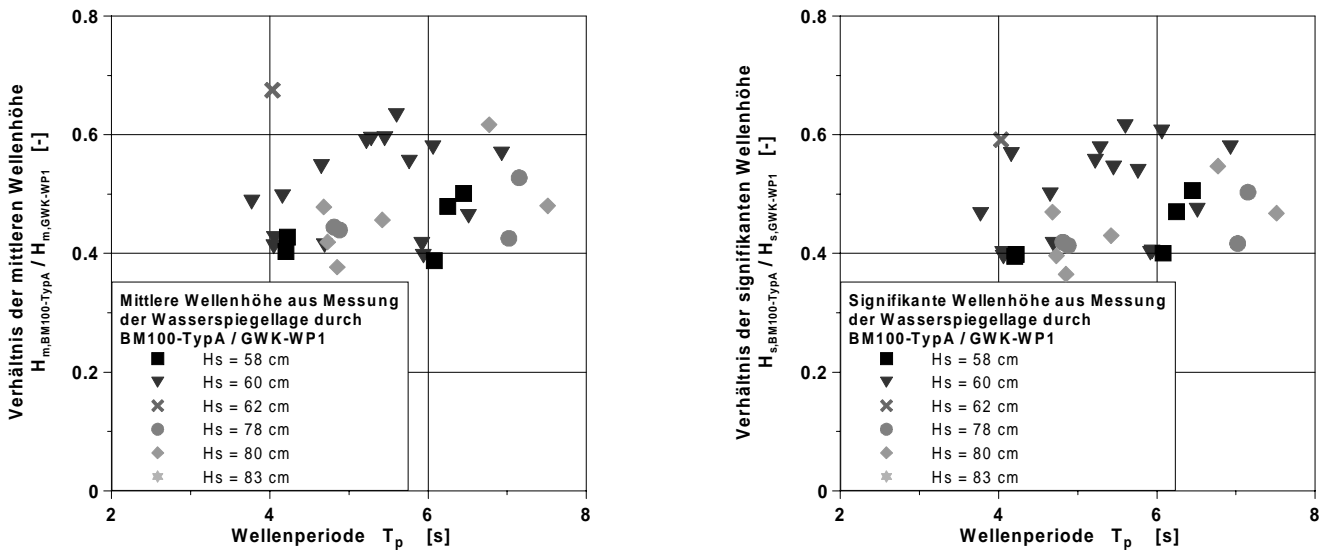


Abbildung 6-54: Verhältnis der mit den Sensoren BM100-TYP A und GWK-WP1 ermittelten mittleren (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigem Seegang und seine Abhängigkeit von Wellenperiode und -höhe

Die in Abbildung 6-53 dargestellten Wellenhöhenverteilungen lassen sich, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, durch mittlere Wellenhöhe und signifikante Wellenhöhe charakterisieren.

Für die im GWK durchgeführten Versuche mit unregelmäßigem Seegang ist das Verhältnis der mittleren Wellenhöhen bzw. das der signifikanten Wellenhöhen in Abbildung 6-54 als Funktion der Wellenperiode dargestellt. Sowohl das Verhältnis der mittleren als auch das der signifikanten Wellenhöhen liegt für Wellenperioden von 3,5 s bis 7,5 s zwischen 40 % und 60 %.

Dabei ist eine geringe Zunahme des Wellenhöhenverhältnisses mit der Wellenperiode zu erkennen. Eine klare Abhängigkeit von der Wellenhöhe ist im Gegensatz zu den im WKS durchgeführten Versuchen mit dem Sensor BM100-TYP C jedoch nicht erkennbar.

6.4.2 Frequenzbereich

Auch die Analyse im Frequenzbereich bestätigt die im Zeitbereich getroffenen Aussagen hinsichtlich der Anwendbarkeit des Radarsensors BM100-TYP A. Wie die Amplituden in der Zeitreihe der Wasserspiegelauslenkung, so werden auch die Amplituden des Spektrums durch das BM100-TYP A unterschätzt. Abbildung 6-55 zeigt exemplarisch den Vergleich zweier sich aus Messungen von BM100-Typ A und GWK-WP1 für regelmäßige und unregelmäßige Wellen ergebender Amplitudenspektren. Es zeigt sich für regelmäßigen Seegang, daß für beide Meßgeräte die spektrale Amplitude bei gleicher Frequenz maximal wird. Die spektrale Amplitude wird jedoch durch das BM100-Typ A etwa um etwa 30 % unterschätzt. Der Vergleich der Amplitudenspektren für unregelmäßigen Seegang deutet darauf hin, daß die Unterschätzung der spektralen Amplitude mit zunehmender Frequenz wächst.

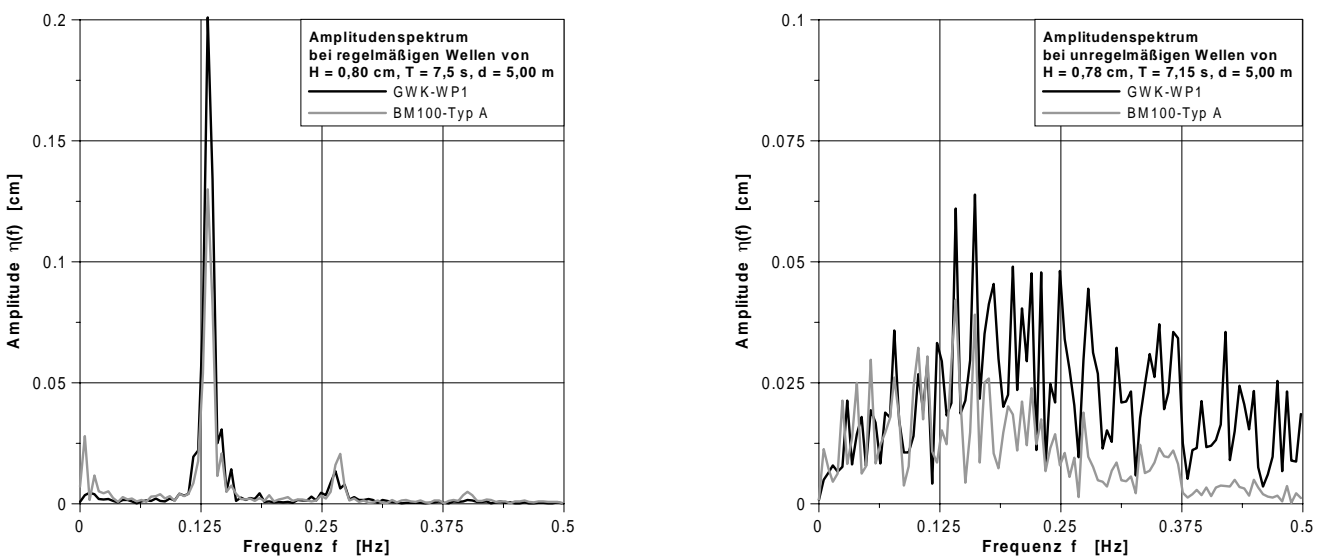


Abbildung 6-55: Amplitudenspektrum der mit den Sensoren GWK-WP1 und BM100-TYP A im GWK gemessenen Wasserspiegelauslenkung bei regelmäßigen Wellen (links) und bei unregelmäßigen Wellen (rechts)

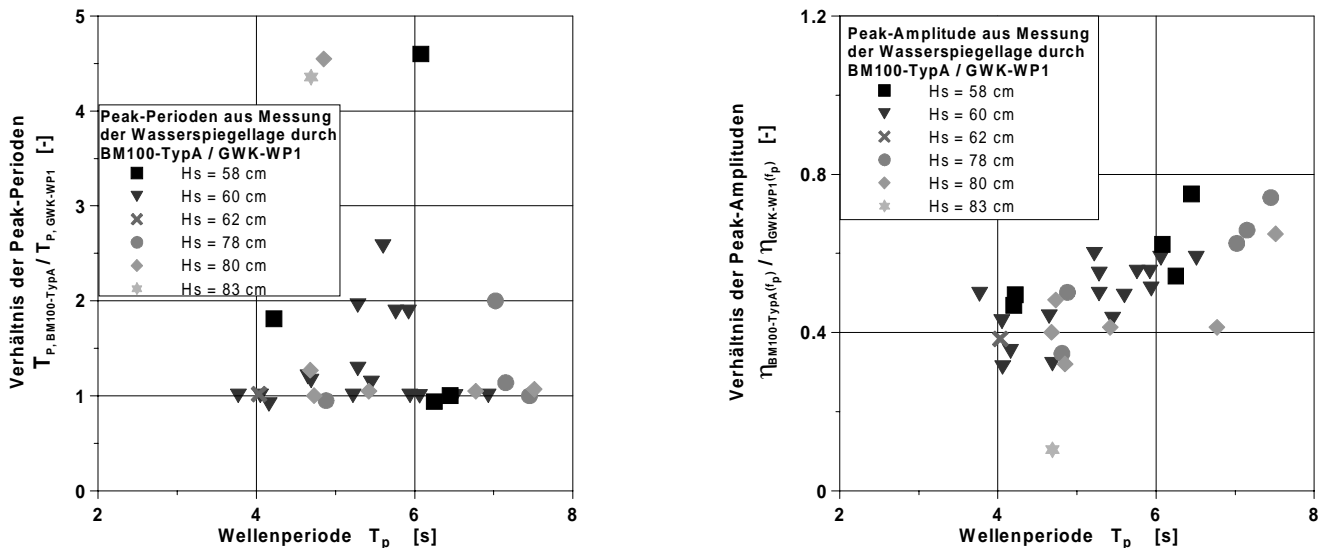


Abbildung 6-56: Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP A und GWK-WP2 im GWK bestimmten Peak-Perioden (links) und Peak-Amplituden (rechts)

Die Relationen der Peak-Perioden und Peak-Amplituden sind in Abbildung 6-56 dargestellt. Die mit dem BM100-Typ A bestimmten Peak-Perioden weisen, insbesondere bei signifikanten Wellenhöhen von mehr als 80 cm, teilweise erhebliche Abweichungen zu den mit dem GWK-WP1 bestimmten Perioden auf. Dies erklärt sich aus dem schlechten Übertragungsverhalten des BM100-Typ A bei niedrigen Wellenperioden, d.h. hohen Frequenzen. Für regelmäßige Wellen tritt dieses Problem wegen der stark ausgeprägten Einzelpeaks nicht auf. Die Peak-Amplituden werden durch das BM100-TYP A bei Wellenperioden von 4 s um 60 % unterschätzt. Für Wellenperioden von mehr als 7 s beträgt das Verhältnis der mit BM100-TYP A und GWK-WP1 bestimmten Peak-Amplituden mehr als 60 %. Eine Ursache für die Unterschätzung der Peak-Amplituden

liegt in der bereits in Kapitel 6.4.1 erwähnten zu geringen Abtastfrequenz des BM100-TYP A.

Abbildung 6-57 zeigt die Verhältnisse der mit BM100-Typ A und GWK-WP1 bestimmten Parameter. Es ist deutlich, daß das BM100-Typ A die mittleren Perioden um bis zu 25 % überschätzt. Die Abweichung ist um so größer, je größer die Wellenperiode ist. Die signifikante Wellenhöhe wird durch das BM100-TYP A bei Wellenperioden von 4 s um ca. 60 % und bei Perioden von 8 s um ca. 45 % unterschätzt. Die Resultate, die sich für die signifikante Wellenhöhe bei einer Auswertung der BM100-TYP A-Daten im Frequenzbereich ergeben, weisen somit ähnliche (etwas geringere) Abweichungen auf wie die durch Auswertung im Zeitbereich gewonnenen Ergebnisse (Abbildung 6-54).

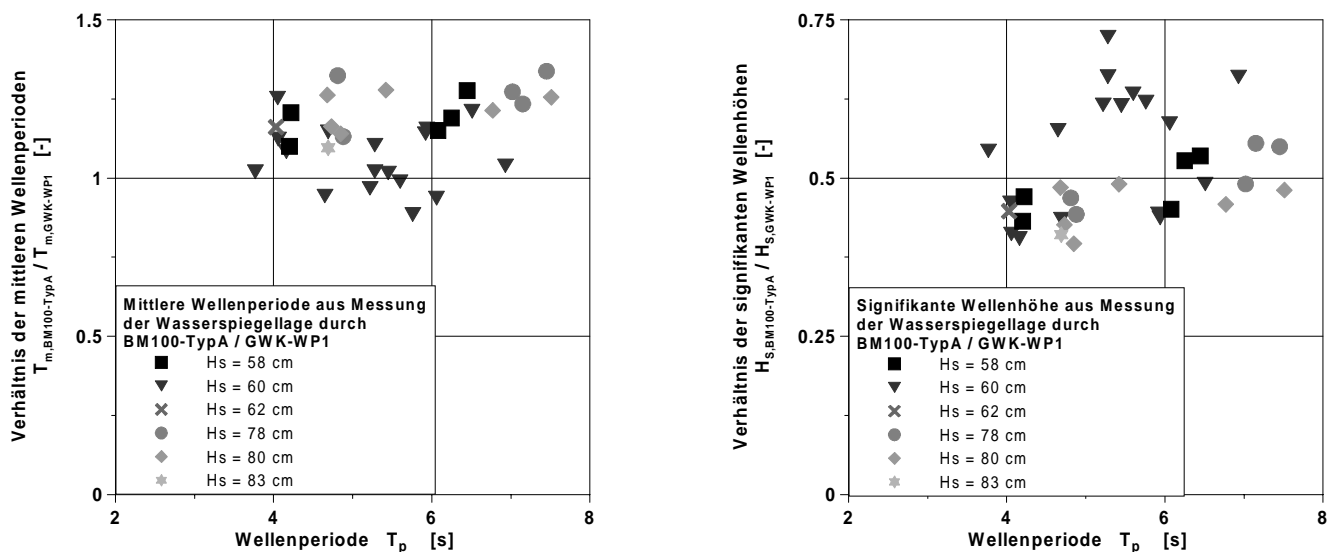


Abbildung 6-57: Verhältnis der aus Messungen von BM100-TYP A und GWK-WP1 im GWK bestimmten mittleren Wellenperioden (links) und signifikanten Wellenhöhen (rechts) bei unregelmäßigen Wellen

7 Schlußfolgerung

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Radarsensoren VEGAPULS (Fa. VEGA GRIESHABER KG), KALESTO (Fa. OTT MEßTECHNIK GMBH & CO. KG) und BM100-TYPA sowie BM100-TYPC (Fa. KROHNE MEßTECHNIK GMBH & CO. KG) weisen bei ihrem Einsatz zur Seegangsmessung durch schnelle Messung der Wasserspiegellage erhebliche Unterschiede zu den herkömmlichen Drahtwellenpegeln GHM-WP des WELLENKANALS SCHNEIDERBERG WKS und GWK-WP des GROßEN WELLENKANALS GWK auf. Diese Abweichungen lassen zur Zeit einen operationellen Einsatz der Radarsensoren zur Seegangsmessung nicht zu, da weder die durch die schnelle Messung gewonnene Zeitreihe der Wasserspiegellage mit der tatsächlichen übereinstimmt, noch das aus dieser bestimmte Spektrum richtig wiedergegeben wird. Auch die integralen Parameter mittlere Wellenhöhe, signifikante Wellenhöhe und mittlere Wellenperiode werden nicht richtig wiedergegeben. Mögliche Fehlerursachen sind für das VEGAPULS eine interne Filterung des Meßsignals, für das BM100-TYPC und BM100-TYPA eine zu geringe Abtastfrequenz⁴ sowie für das KALESTO ein dem Meßsignal überlagertes Rauschen. Für die freiabstrahlenden Radarsensoren VEGAPULS und KALESTO folgt eine weitere Fehlerquelle aus der Größe der sich aus dem Öffnungswinkel der Radarantennen ergebenden reflektierenden Wasserspiegelfläche.

Weiterentwicklungen der genannten Sensoren sollten daher entweder eine bessere Richtwirkung, wie sie mit der 24-GHz-Technologie des KALESTO erreichbar ist, beinhalten oder, wie die BM100, leitungsgelassen sein. Daneben bietet die Erhöhung der Abtastfrequenz auf z.B. 50 Hz mit anschließender Mittelwertbildung eine Möglichkeit zur Rauschunterdrückung und vermeidet zu geringe Abtastraten. Insgesamt ist die Bildung des Radarrückstreusignals an einer sich schnell bewegenden Wasseroberfläche noch nicht hinreichend geklärt. Hier sind weitere grundlegende Untersuchungen notwendig, um eine optimale Signalverarbeitung zu gewährleisten. Es ist daher erforderlich, daß die genannten Sensoren neben dem vorverarbeiteten Radarsignal, d.h. dem Abstand zwischen Sensor und Wasseroberfläche, auch die Echokurve des Radars liefern, was zur Zeit für die Sensoren KALESTO und BM100 nicht und für den Sensor VEGAPULS nur eingeschränkt möglich ist.

Außerdem ist neben dem Einsatz der Sensoren unter Laborbedingungen auch die Einsetzbarkeit in der Natur zu prüfen. Der Messung bei Eisbedeckung bzw. der gleichzeitigen Messung von Eisdicken kommt dabei besondere Bedeutung zu.

⁴ Zur Zeit wird von der Fa. KROHNE MEßTECHNIK GMBH & CO KG ein System des BM100-TYPA konfiguriert, welches den Zugriff auf die Abstandsmessung mit einer Abtastfrequenz von 5 Hz zuläßt. Dieses wird zu einem späteren Zeitpunkt am FRANZIUS-INSTITUT getestet.

8 Literatur

- AUSSCHUß FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE: Empfehlungen für Küstenschutzwerke EAK, Die Küste, Heft 55, 1993
- BARJENBRUCH, U., ZENZ, T., KRANZ, S.: Radar: A New Technology Applicable to Water Level Gauging, Proc. of XXV General Assembly of the European Geophysical Society EGS, Nice, France, 2000
- BISHOP, C. T., DONELAN, M. A.: Measuring Waves with Pressure Transducers, Coastal Engineering, Nr. 11, 1987
- BURENIN, P. V., PAKOV, S. V., SIZIKOV, O. K.: Reducing the Measurement Error of Pulse-Radar Level Gauges for Bulk Media, Measurement Techniques, Nr. 6, 1998
- C & G INDUSTRIAL SUPPLY: Saab TankRadar® – Level Gauging for any of Your Tanks, "<http://www.cgindustrial.com/saab.htm>", Houston, USA, 1998
- COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER CERC: Shore Protection Manual, Vol. 1, 1984
- DAEMRICH, K.-F., GÖTSCHENBERG, A.: Wave Generation and Analysis in Channels of the SFB 205, Proc. of the 2nd Int. Symposium on Wave Research and Coastal Engineering, 1988
- DATAWELL BV: Directional Waverider – Mark II, Produktinformation, 1999
- DELFT HYDRAULICS: GHM WAVE HEIGHT METER, Handbuch, 1988
- DRUCK MESSTECHNIK GMBH: Füllstand und Pegelsonden, Handbuch, 1991
- FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., SANDS, M.: The Feynman Lectures on Physics, Vol. 2, Addison-Wesley, 1987
- GFS SYSTEMTECHNIK GMBH & CO. KG: DIADEM – Die PC-Werkstatt, Handbuch, 1999.
- GRÜNE, J.: Neue Wellenrinne des Franzius-Instituts – Untersuchungen mit Seegang, Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 44, 1976
- HEIM, M.: Puls-Radar for mm-Precision in Level Measurement, Technisches Messen tm, Nr. 67, 2000
- KERR, D. E.: Propagation of Short Radio Waves, McGraw-Hill, 1987
- KOHLHASE, S.: Ozeanographisch-seebauliche Grundlagen der Hafenplanung, Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 57, 1983
- KROHNE MEßTECHNIK GMBH & CO. KG: Reflex-Radar, Montage- und Betriebsanleitung für BM100 und BM100 EEx, 1996
- LEMKE, P.: Meereis und Schelfeis, Universität Bremen, 1991
- LONGUET-HIGGINS, M. S.: On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves, Journal of Marine Research, Vol. 11, Nr. 3, 1952

- LUCK, G.: Meßgeräte und Meßverfahren im Küsteningenieurwesen, Die Küste, Heft 41, 1984
- MARFIN, V. P., KIYASHEV, A. I., ROZENFEL'D, F. Z., IZRAIL'SON, V. M., ATAYANTS, B. A., KAGALENKO, B. V., MESHCHERYAKOV, V. P.: Highly Accurate Contactless Radio-Wave Level Meter, Izmeritel'naya Tekhnika, Nr. 6, 1986
- MAI, S., ZIMMERMANN, C.: Applicability of Radar Level Gauges in Wave Monitoring, Proc. of the 2nd Int. Conf. Port Development & Coastal Environment, PDCE, Varna, Bulgaria, 2000
- ORÉANS, L., HEIDE, P.: Neuartiges Radar-Füllstand-Meßgerät auf Basis von 24-GHz-Technologie, Technisches Messen, Nr. 5, 2000
- OTT MEßTECHNIK GMBH & Co. KG: Radarsensor zur berührungslosen Pegelmessung von Oberflächengewässern KALESTO - Verkaufsprospekt, 1999
- OTTO, J.: Radar Applications in Level Measurement, Distance Measurement and Nondestructive Material Testing, 27th European Microwave Conf., Jerusalem, Israel, 1997
- PRESS, W. H., FLANNERY, B. P., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T.: Numerical Recipes – The Art of Scientific Computing, Cambridge Univ. Press, 1988
- SCHADE, D.: Untersuchungen über das Wellenklima an einer Brandungsküste unter Einschluß der Richtungsstruktur des Seegangs, dargestellt am Beispiel der Insel Sylt, Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 71, 1991
- SORCUS COMPUTER GMBH: Modular-4[®]/486 – Benutzerhandbuch, Eigenverlag, 1999.
- TAYLOR, M., JACKSON, D. A.: High Precision Non-Contacting Optical Level Gauge, Optica Acta, Band 33, 1986
- TAUTENHAIN, E.: Betrieb des GROSSEN WELLENKANALS, Arbeits- und Ergebnisberichte des SONDERFORSCHUNGSBEREICHES 205: KÜSTENINGENIEURWESEN – SEEGANG UND TRANSPORTPROZESSE IM KÜSTENSCHUTZ, SEE- UND HAFENBAU, 1986-1988
- VEGA GRIESHABER KG: Betriebsanleitung VEGAPULS 81, Eigenverlag, 1999a
- VEGA GRIESHABER KG: Handbuch VEGA VISUAL OPERATING VVO, Eigenverlag, 1999