

26. KFKI Seminar

Forschungsvorhaben: RefTide

Bild: vom Pegelturm St. Pauli-Landungsbrücken, eigene Aufnahme



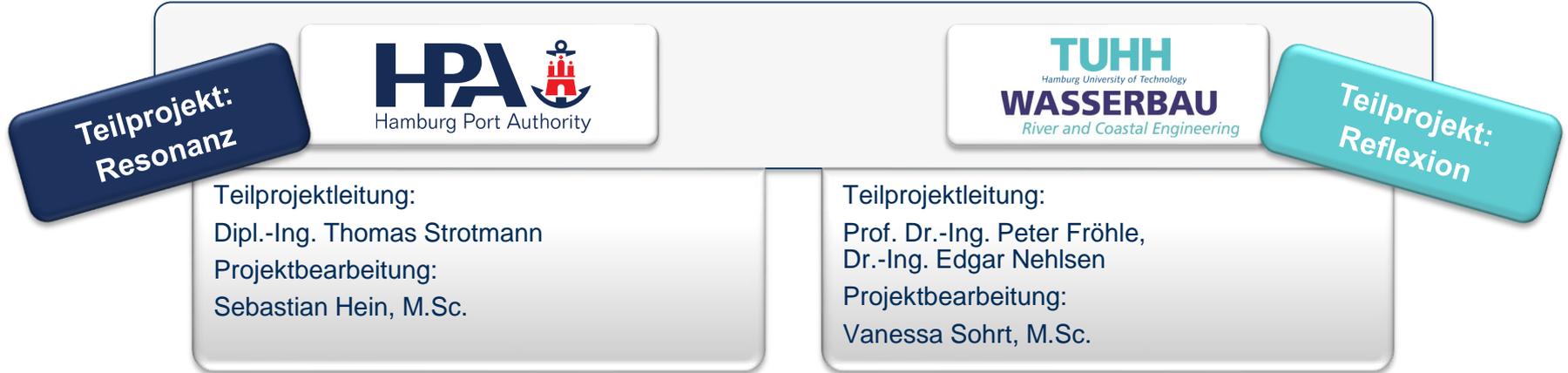
Das Reflexions- und Resonanzverhalten Tide-dominierter Ästuar
Eine Analyse des Antwortverhaltens der Tideelbe auf die Gezeitenanregung

Teilvorhaben „Reflexion“ (TUHH); Teilvorhaben „Resonanz“ (HPA)

17.11.2022

RefTide: Das Reflexions- und Resonanzverhalten Tide-dominierter Ästuar

- Laufzeit: 01.10.2018 – 31.12.2021



Förderung durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



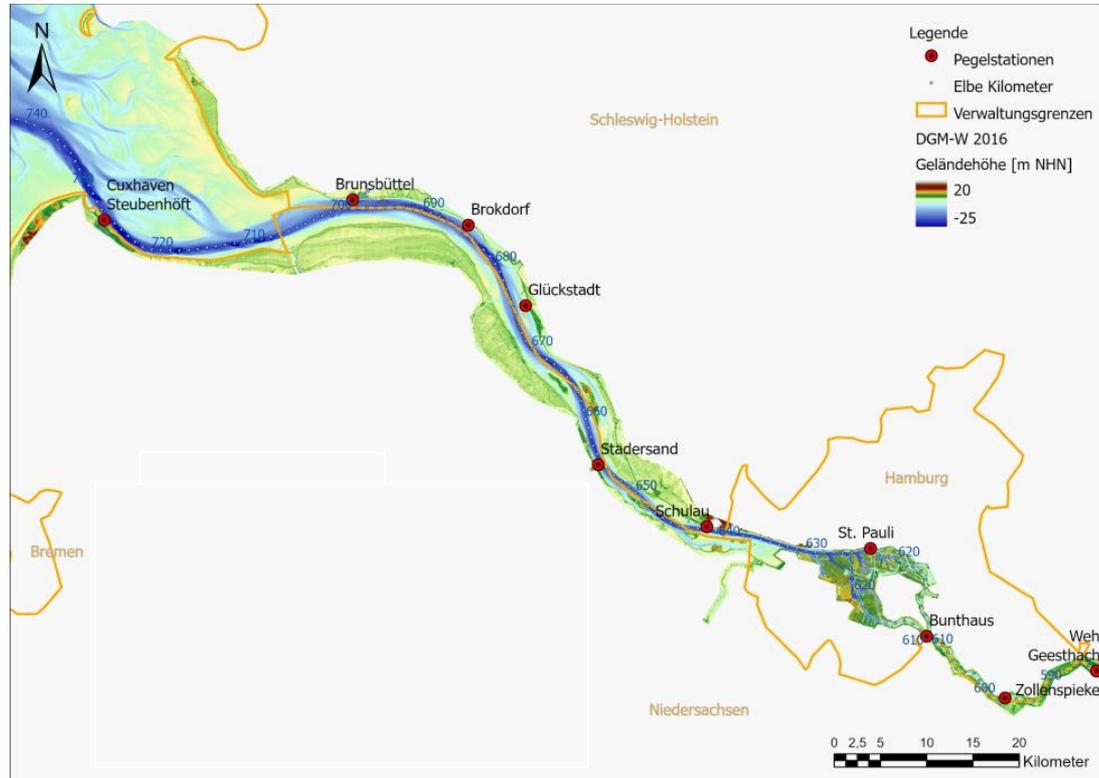
Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen



Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

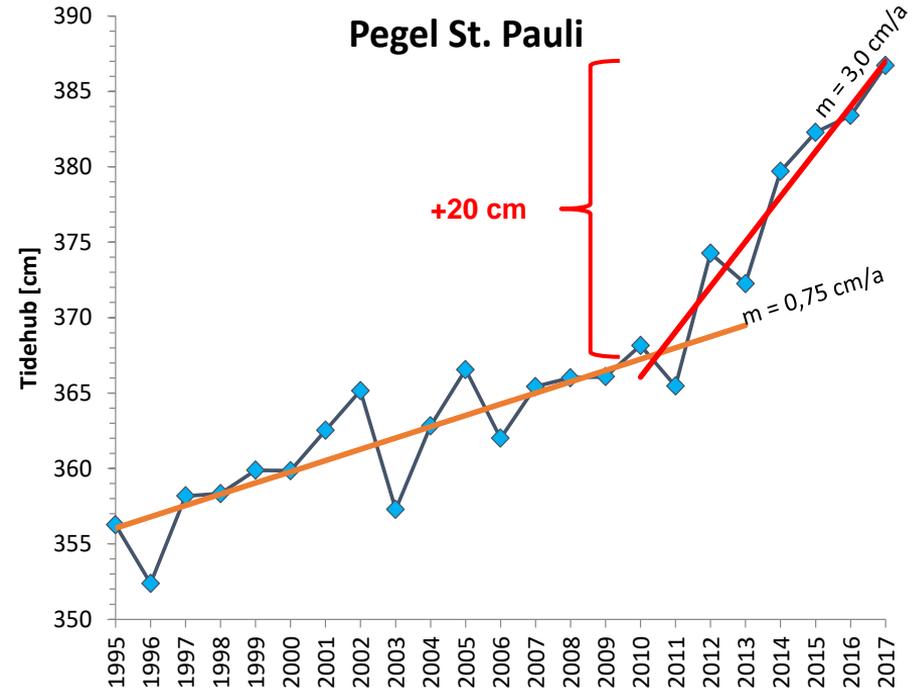
01

Einleitung



Höhenmodell der Tideelbe. Digitales Geländemodell des Wasserlaufes (DGM-W) 2016,
Datengrundlage: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) - www.kuestendaten.de.

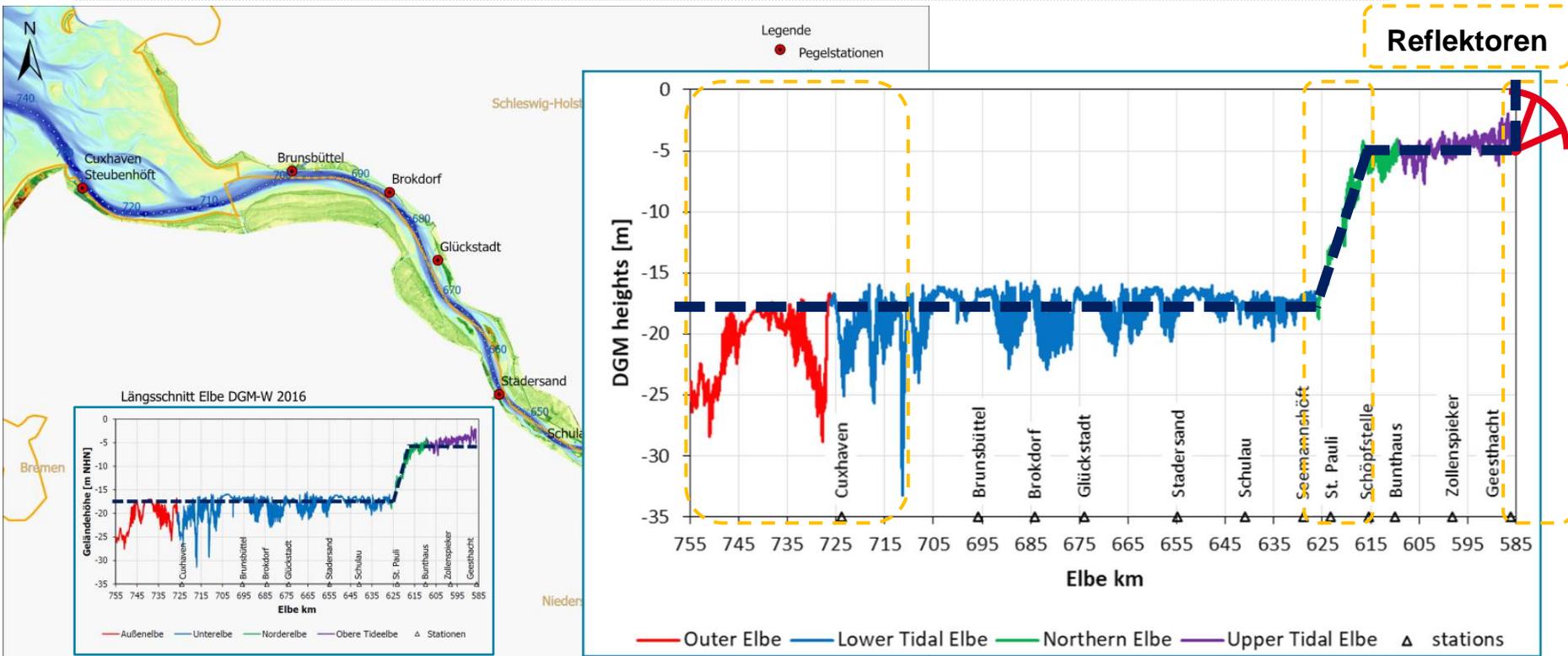
- Ausgangslage
 - Beschleunigter Anstieg des Tidehubs in Hamburg zwischen 2010 und 2017
 - kein zeitlicher Bezug zu anthropogenen Systemveränderungen



Ein Beitrag zur Verbesserung des System- und Prozessverständnisses des Tidegeschehens der Elbe durch

- Kombination von analytischen / systemischen Ansätzen und einer umfassenden Reflexions- und Resonanzanalyse
- Reflektoren in Ästuaren werden systematisch untersucht und Reflexionskoeffizienten an den Hauptreflektoren bestimmt
- Schwerpunkt: Haben die Prozesse Reflexion und Resonanz einen Beitrag zur Tidehubentwicklung in der Tideelbe seit 2010 geleistet?

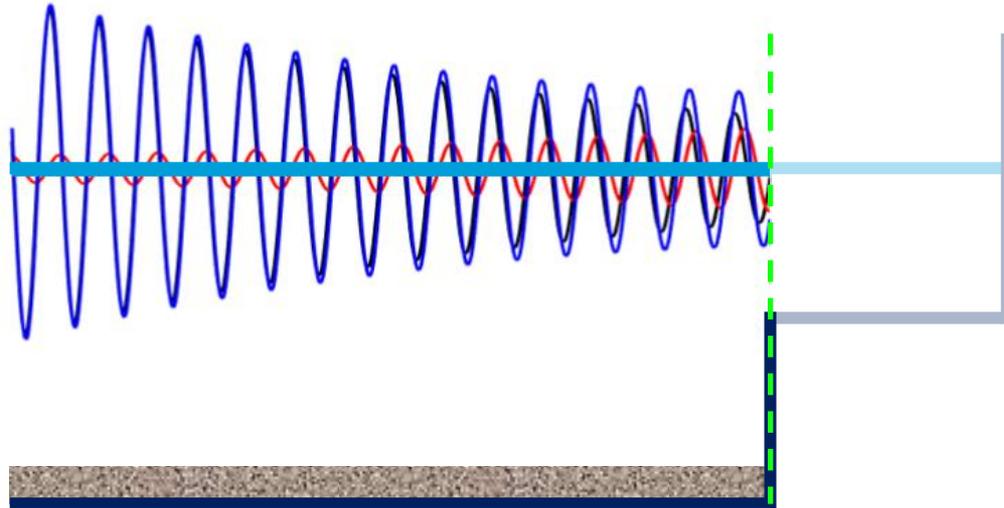
Ziele des Teilvorhabens „Reflexion“



Höhenmodell der Tideelbe. Digitales Geländemodell des Wasserlaufes (DGM-W) 2016,
Datengrundlage: Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) - www.kuestendaten.de.

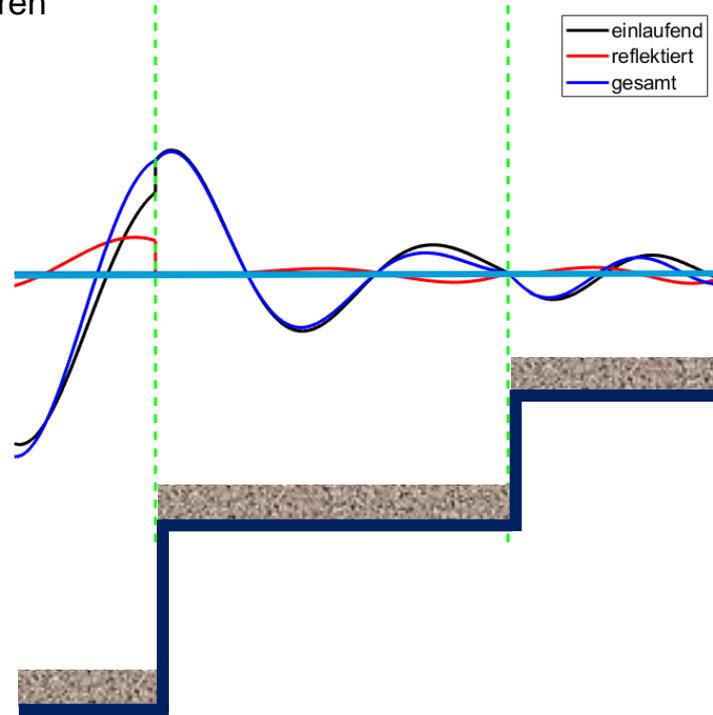
Prinzipmodell „Reflexion“

- Teilreflexion
- mit Dissipation
- Wellenlänge stark verkürzt



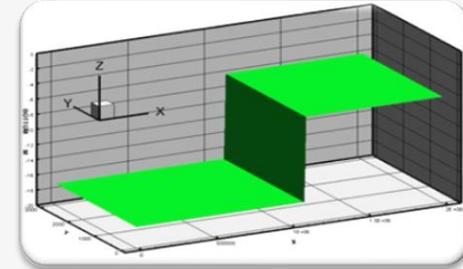
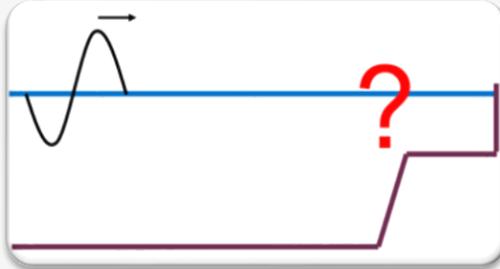
Prinzipmodell „Reflexion“

- Teilreflexion, mehrere Reflektoren
- mit Dissipation und Transmission
- Wellenlänge stark verkürzt



02

Methoden

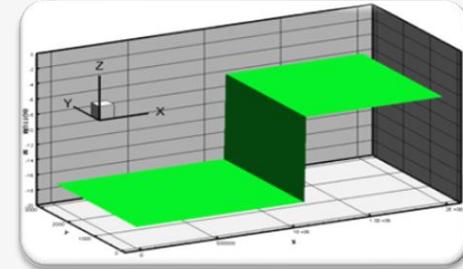
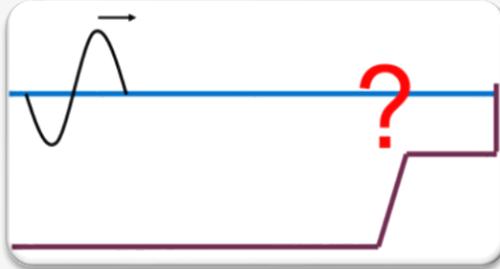


Analytisches Modell

Hydrodynamisch
numerische Modelle

03

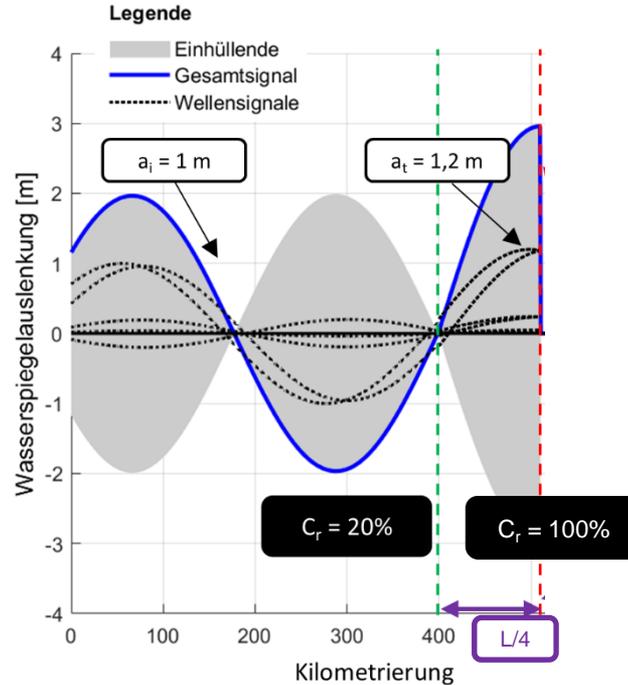
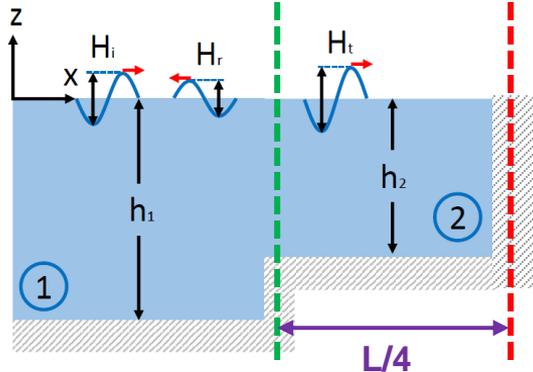
Ergebnisse



Analytisches Modell

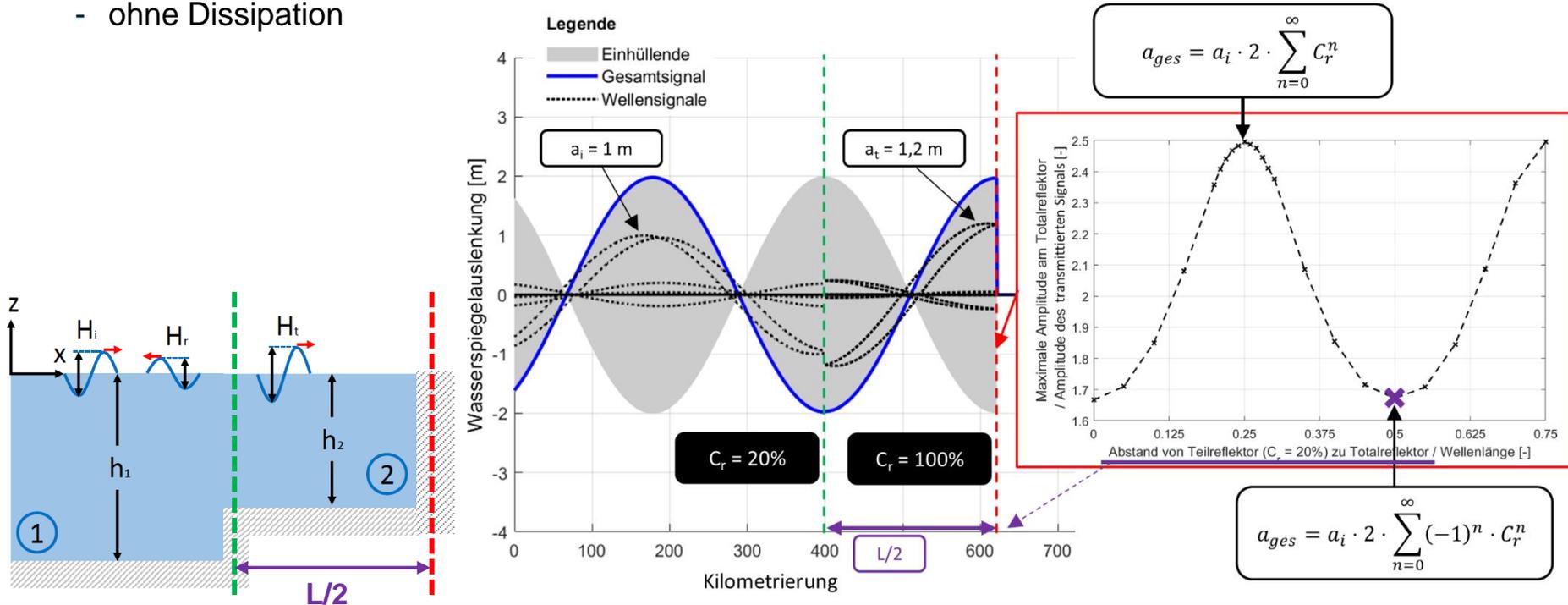
Hydrodynamisch
numerische Modelle

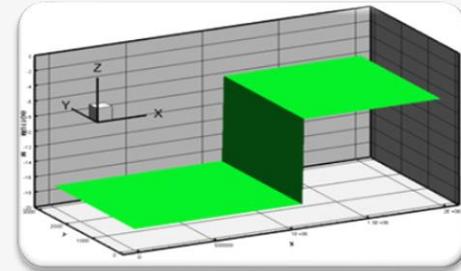
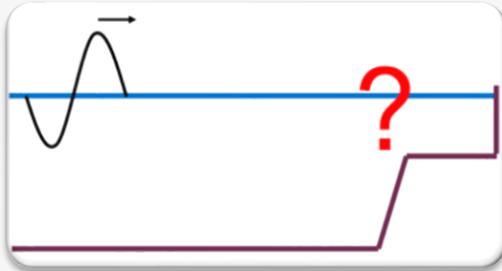
- Der Resonanzfall für $C_r = 20\%$
 - Abstand zwischen Teil- und Totalreflektor = Eine Viertel Wellenlänge
 - ohne Dissipation



$$a_{ges} = 1,2m \cdot 2 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} 0,2^n = 3m$$

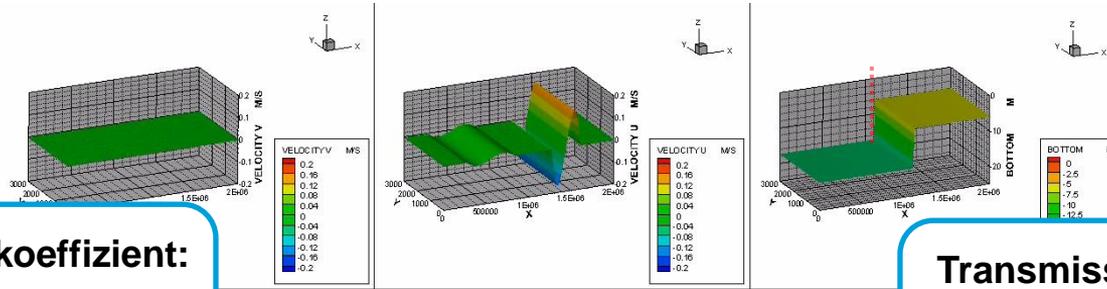
- Schwingungssysteme für $C_r = 20\%$
 - Variation des Abstands zwischen Teil- und Totalreflektor
 - ohne Dissipation





Analytisches Modell

Hydrodynamisch
numerische Modelle



Reflexionskoeffizient:

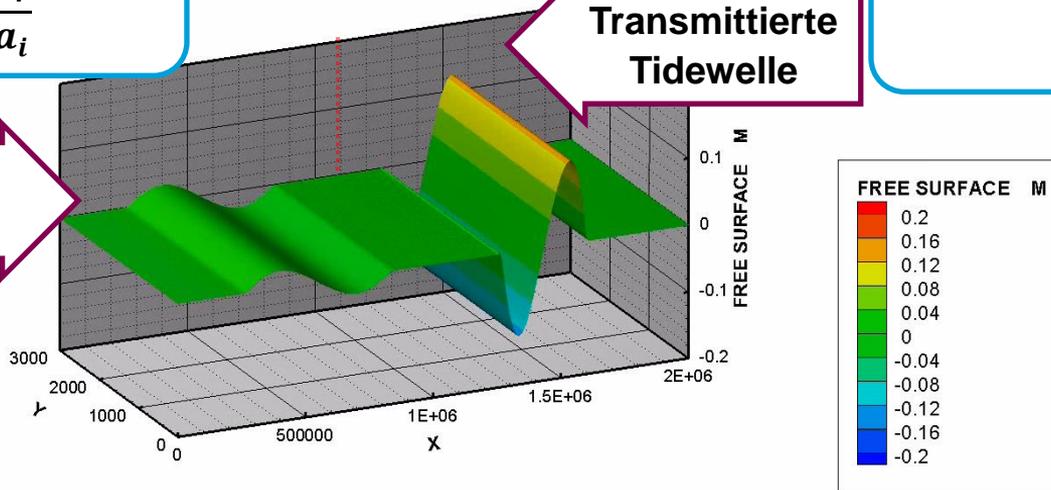
$$C_r = \frac{a_r}{a_i}$$

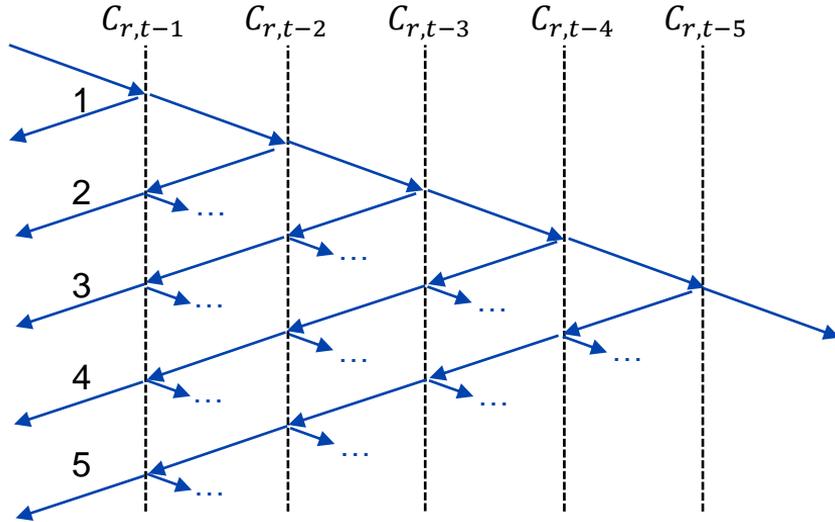
Transmissionskoeffizient:

$$C_t = \frac{a_t}{a_i}$$

Transmittierte
Tidewelle

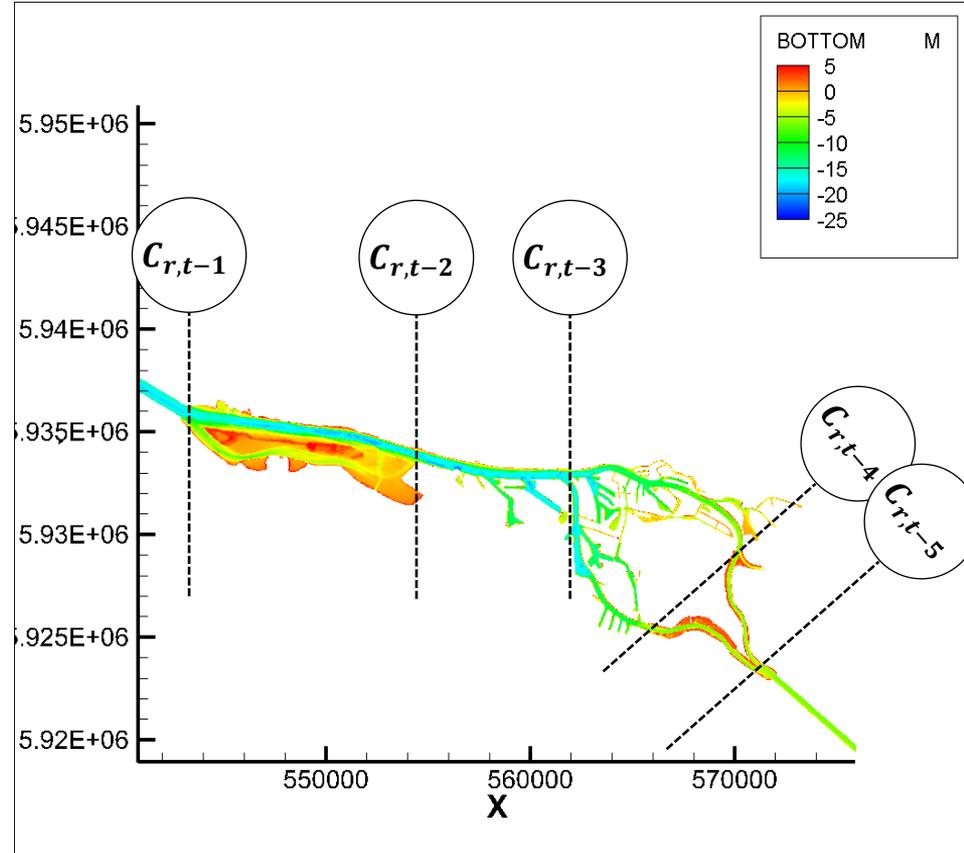
Reflektierte
Tidewelle

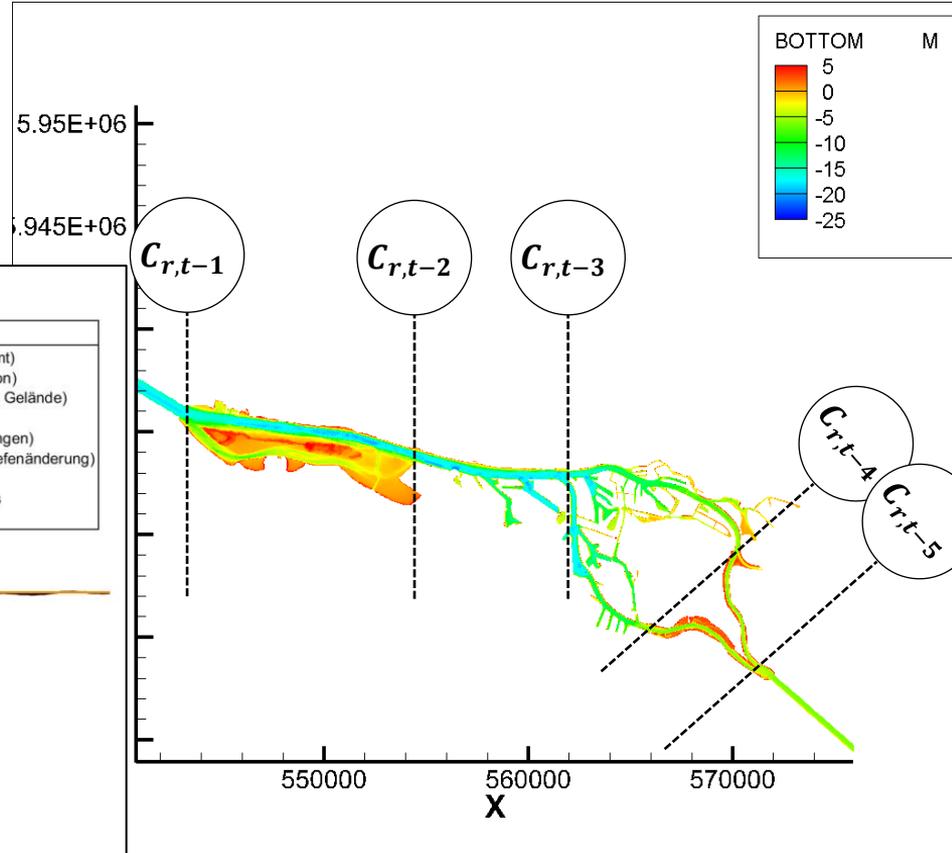
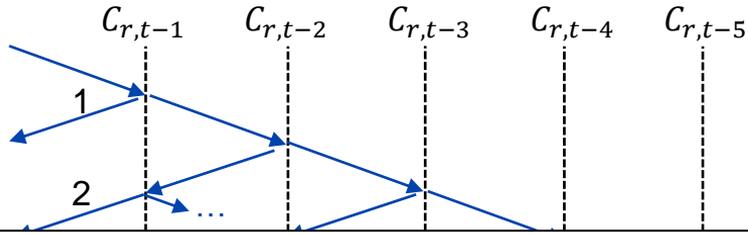




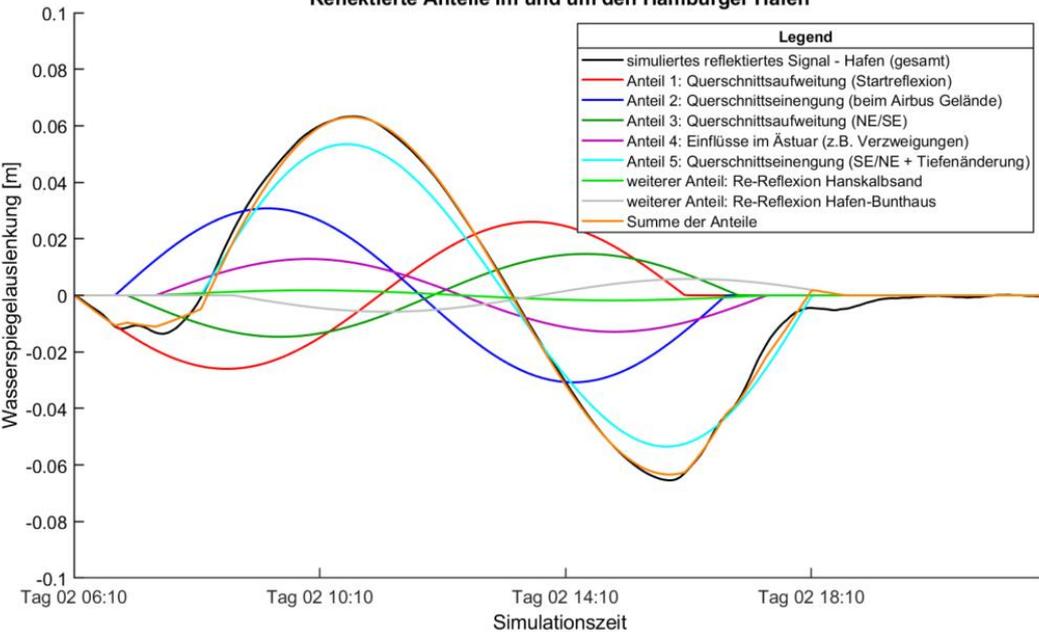
Amplituden der zurückgeworfene Signale

- 1: $a_i \cdot C_{r1}^-$ + : $\varphi = 0^\circ$
- 2: $a_i \cdot C_{t1}^- \cdot C_{r2}^+ \cdot C_{t1}^+$ - : $\varphi = 180^\circ$
- 3: $a_i \cdot C_{t1}^- \cdot C_{t2}^+ \cdot C_{r3}^- \cdot C_{t2}^- \cdot C_{t1}^+$
- 4: $a_i \cdot C_{t1}^- \cdot C_{t2}^+ \cdot C_{t3}^- \cdot C_{r4}^+ \cdot C_{t3}^- \cdot C_{t2}^- \cdot C_{t1}^+$
- 5: $a_i \cdot C_{t1}^- \cdot C_{t2}^+ \cdot C_{t3}^- \cdot C_{t4}^+ \cdot C_{r5}^- \cdot C_{t3}^- \cdot C_{t2}^- \cdot C_{t1}^+$





Reflektierte Anteile im und um den Hamburger Hafen



Ilenhöhenbetrachtung, keine Wellenenergien!

04

Zusammenfassung

- Hauptreflektoren und deren Reflexionsgrade wurden modelltechnisch ermittelt. Dazu zählen:
 - Abrupte geometrische Änderungen (Querschnittseinengungen und Querschnittsaufweitungen)
 - Totalreflektor an einer künstlichen Tidegrenze
 - Für das Elbeästuar sind das der Mündungsbereich, Hamburger Hafenbereich, Wehr in Geesthacht
- Der Reflexionsgrad ist abhängig vom Verhältnis der Wellenlänge der Partialtide zur Länge der abrupten bathymetrischen Änderung
- Die Ausbildung des Schwingungssystems ist bei zwei aufeinanderfolgenden Reflektoren vom Abstand der Reflektoren zueinander abhängig
- Prozessverständnis zur Reflexion und Resonanz von Tidewellen in Ästuaren wurde verbessert
 - „If the length of the bay approaches $\frac{1}{4}L, \frac{3}{4}L, \frac{5}{4}L$ (where L is the length of the tidal wave), then a node occurs at the sea entrance and an antinode at the closed end (...). In that case, resonance occurs. **The water levels in the antinodes become very large (theoretically infinite).** In nature, friction will prevent that the amplitude of the water levels become infinite.“ (Roos 1997)
 - Es stellt sich eine maximale (keine unendlich große!) Amplitude im Schwingungssystem ein;
Aber: Eine unendliche Amplifizierung ist möglich (in Relation zum Schwingungsknoten)
 - Dissipation (z.B. infolge von Reibung) verringert die maximale Amplitude des Gesamtschwingungssystems
- Komplexes Schwingungssystem der Tide im Elbeästuar aufgrund von Reflexionen

05

Inhalte des Teilvorhabens Resonanz

Fragestellungen:

- Was sind die Bedingungen / grundlegenden Prozesse für Tideresonanz in Ästuaren?
- Tritt Tideresonanz im Elbeästuar auf?
- Welche Faktoren beeinflussen die Resonanz und Gezeitenschwingung in Ästuaren?



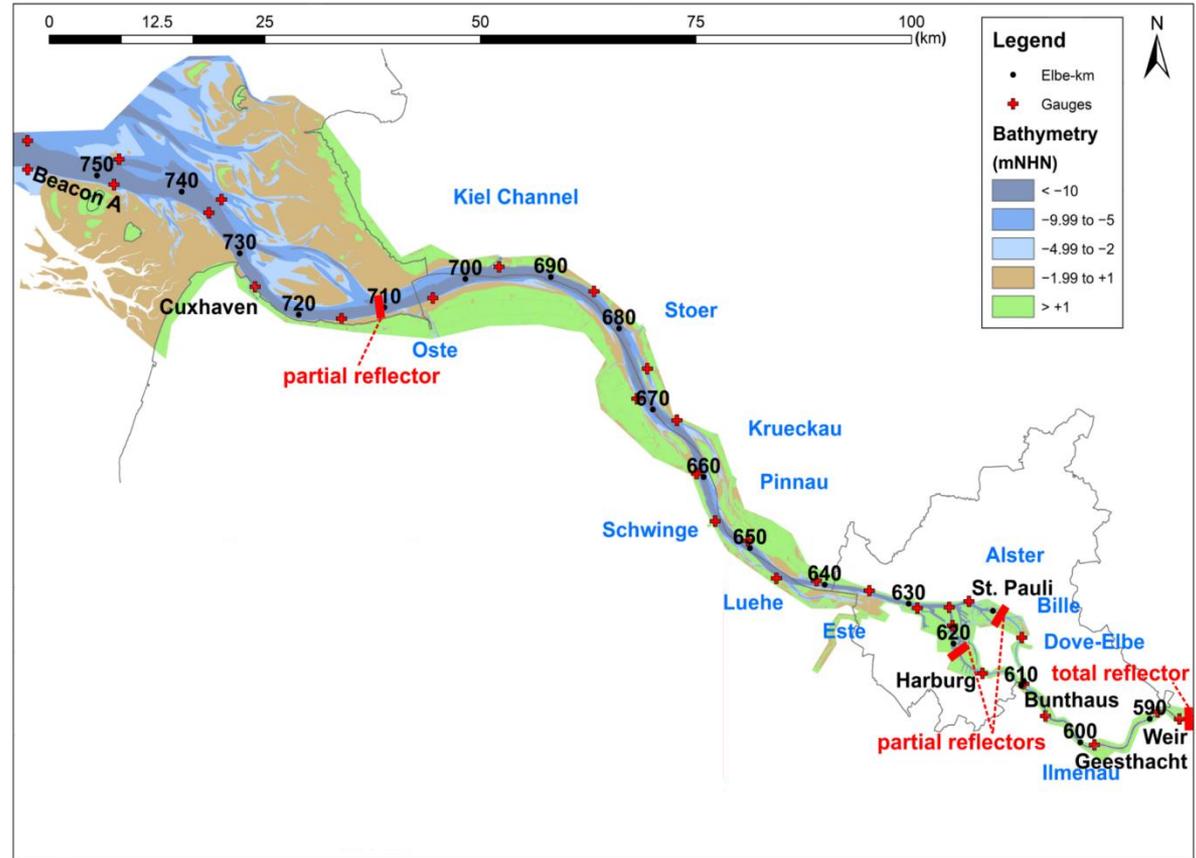
Quelle: hamburg.de GmbH & Co. KG

06

Methodik

Exzellente Datengrundlage

- 25 Pegel liefern kontinuierliche digitale Messreihen seit GKJ 2000
 - Zeitl. Auflösung: 1/min
 - Räuml. Auflösung: Durchschnittlich 1 Pegel alle 7 km von Mündung bis Wehr (170 km)
- Spektralanalyse mittels **HAMELS** (**H**armonic **A**nalysis **M**ethod of **L**east **S**quares)



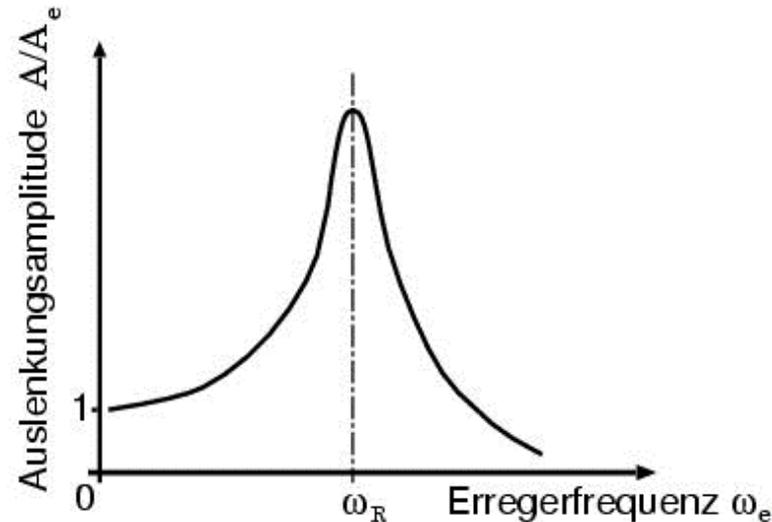
Resonanzbedingungen:

- **Reflexion**
- (Partiell) **stehende Welle (Clapotis)**
- Das schwingfähige System muss eine periodische Anregung mit einer **Erregerfrequenz gleich der Eigenfrequenz** erfahren

→ **Resonanz = verstärkte Mitschwingen**

Resonanzkurve:

- Das ganze ist die *Resonanzkurve*
- *Resonanzfall:*
Erregerfrequenz $\omega_e =$ Eigenfrequenz ω_R
- *latente Resonanz:* Amplifizierung nimmt mit Nähe der Erregerfrequenz zur Eigenfrequenz zu



Quarter-wavelength Kriterium:

- Eigenperiode $T_s =$ Erregerperiode T_e ,
wenn $l = \frac{1}{4} L$

$$T_s = \frac{4l}{\sqrt{g \cdot d}} \stackrel{!}{\Leftrightarrow} \frac{L}{\sqrt{g \cdot d}} = T_e$$

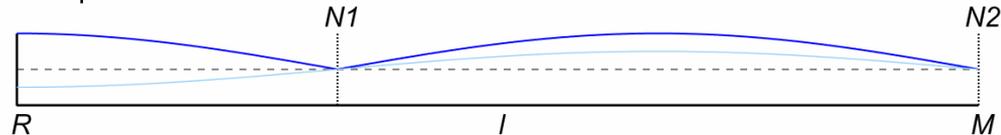
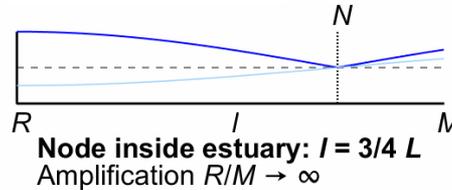
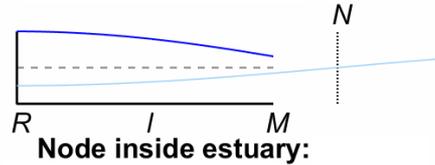
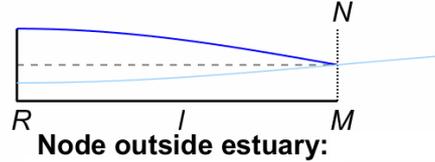
l : Systemlänge; L : Wellenlänge
 d : Wassertiefe; g : Erdbeschleunigung

- Erregerperiode der Tidewelle ist astronomisch vorbestimmt

Neu entwickelte Ansätze:

- Drei-Parameter-Lorentz-Kurvenanpassung zur Bestimmung der Eigenperiode
- Schwingungsknoten-Migration

Quarter wave length criterion met: $l = 1/4 L$
Amplification $R/M \rightarrow \infty$



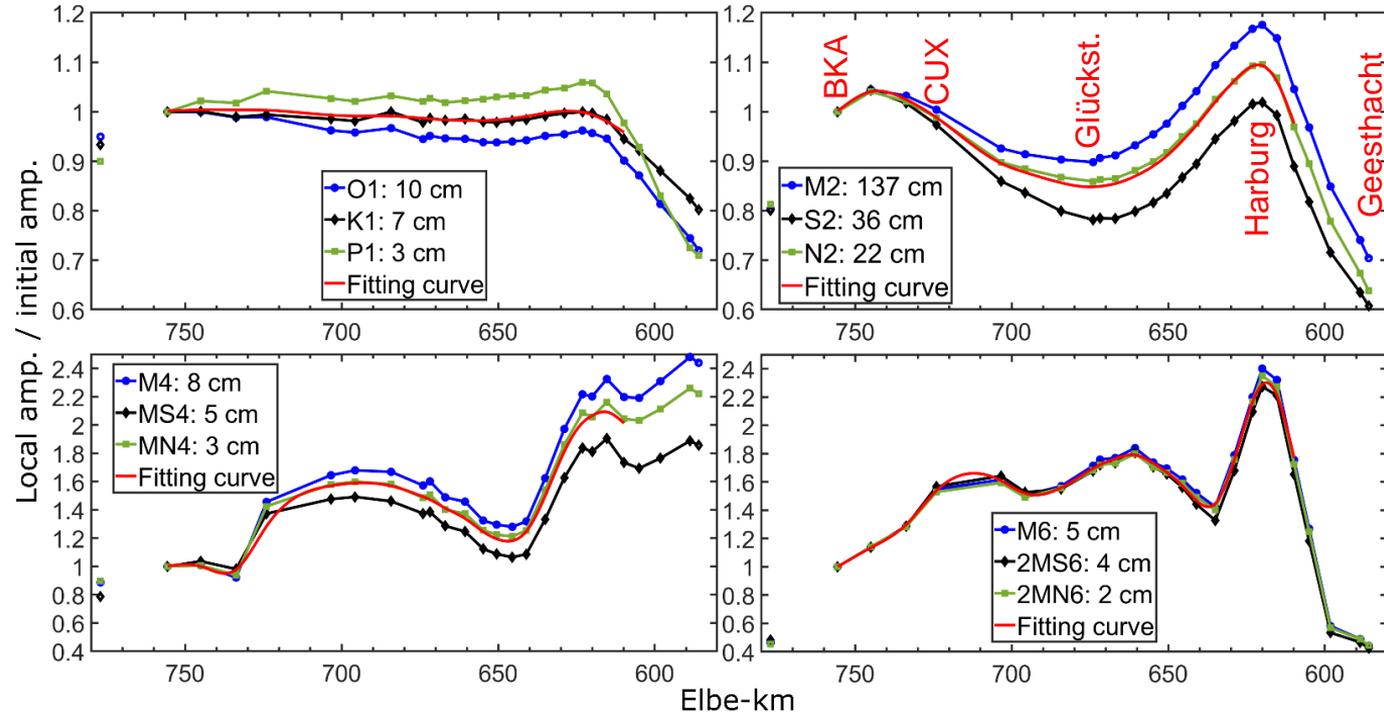
--- Still water level
— Tidal range
..... Node
— Water level elevation
R: reflector
M: river mouth, open end
l: system length
L: wavelength
N: node

07

Untersuchungen

Nachweis stehender Wellen

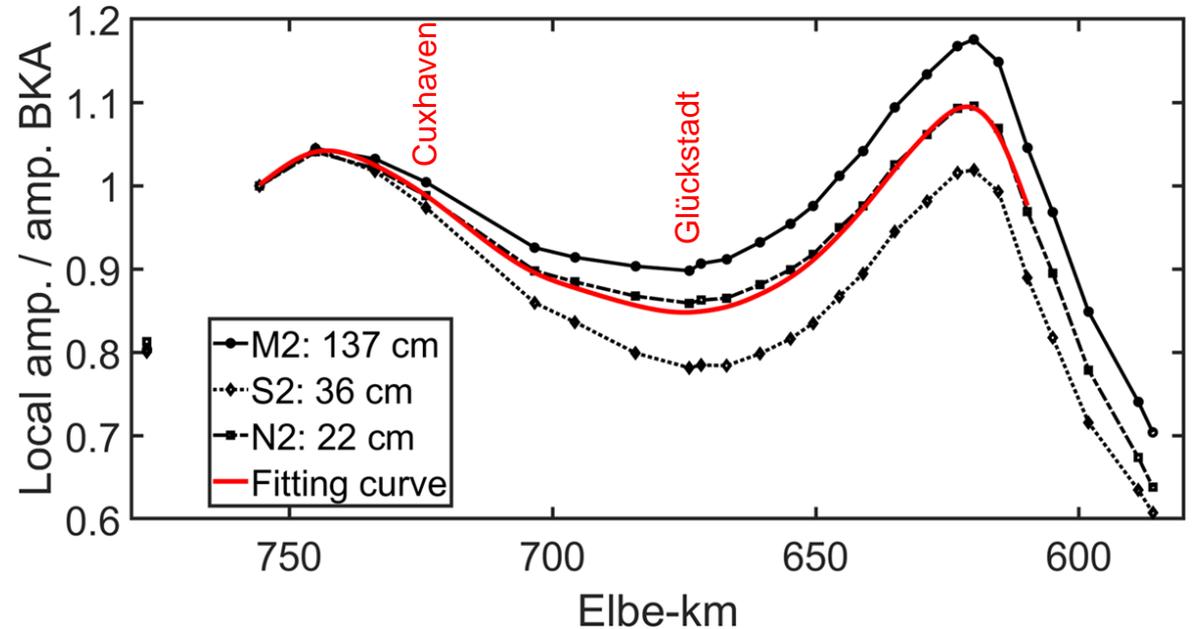
- Die beobachtbaren Gezeiten resultieren aus der Überlagerung hunderter Partialtiden
- Gruppenspezifische partiell **stehende Wellen** nachgewiesen



Quarter-Wavelength Kriterium

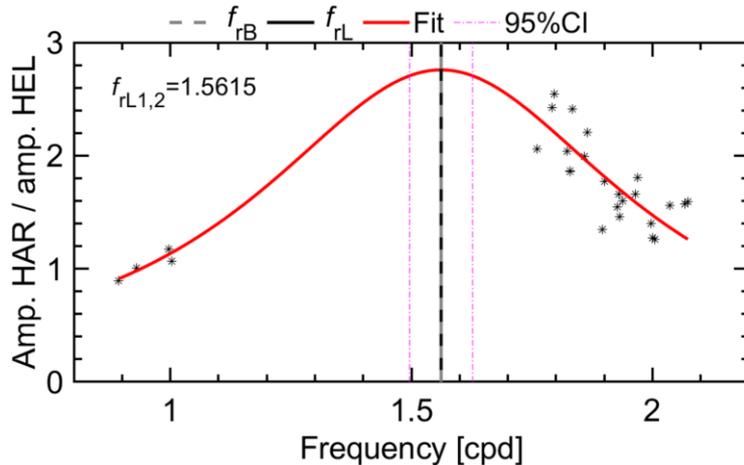
- Wie deutlich zu erkennen ist, liegt der Schwingungsknoten nicht im Mündungsgebiet.

→ Quarter-Wavelength Kriterium nicht erfüllt.

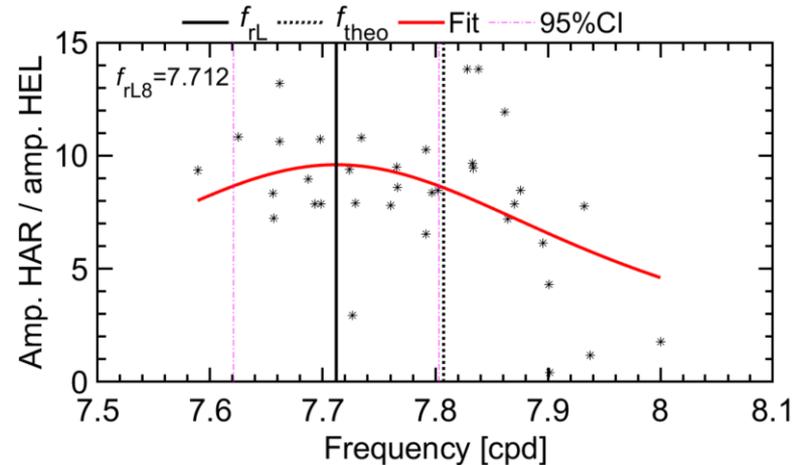


Resonanz – Eigenperiode der Tideelbe

- Drei-Parameter Lorentzfunktion zur Beschreibung der Resonanzkurve
- Eigenfrequenz: **1,56 cpd**
- Eigenperiode: **15,37 h**
→ Tideelbe befindet sich nicht in Resonanz



- Validierung
 - über 5/4-Harmonische:
 $7,71 \text{ cpd} / 5 = 1,54 \text{ cpd}$
 - entspricht Periode von 15,56 h
 - identisch mit der Resonanzperiode von 15,37 h nach Backhaus (2015)



- **Migration des Schwingungsknotens gen Mündung**

→ Annäherung an die Erfüllung des Quarter-wavelength Kriteriums

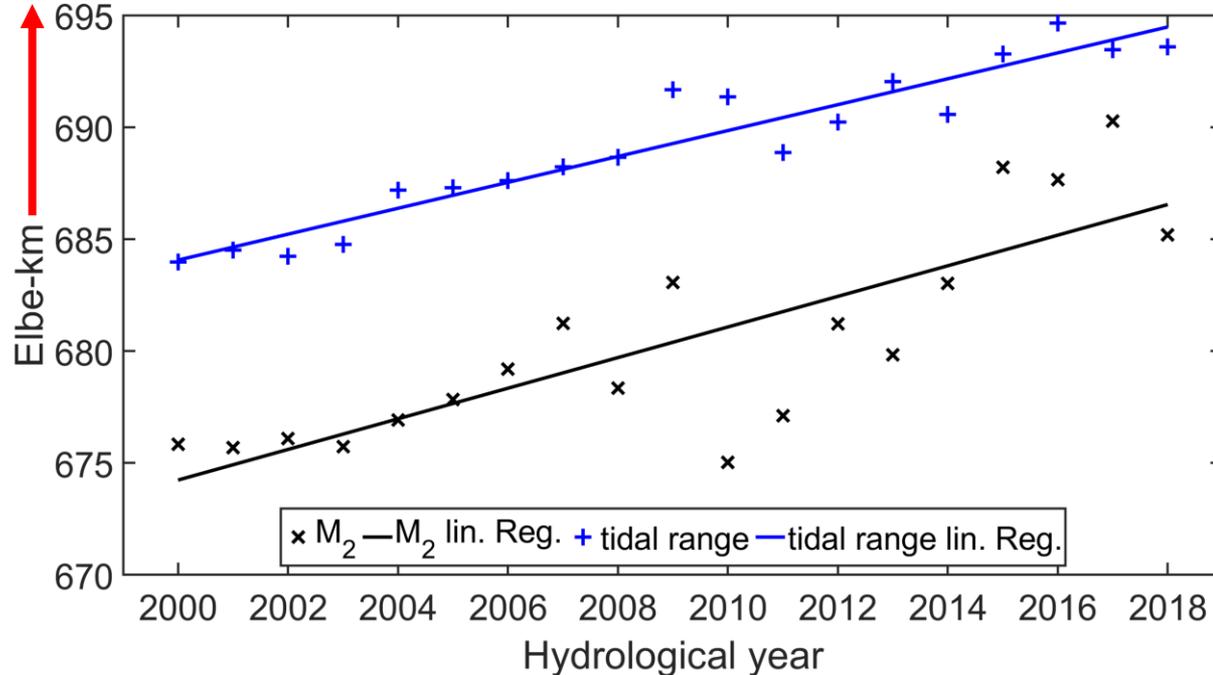
→ **Zunahme der latenten Resonanz**

- Bestätigt durch detektierte tendenzielle Annäherung der Eigenperiode an die dominierende M_2 -Periode

Mündung

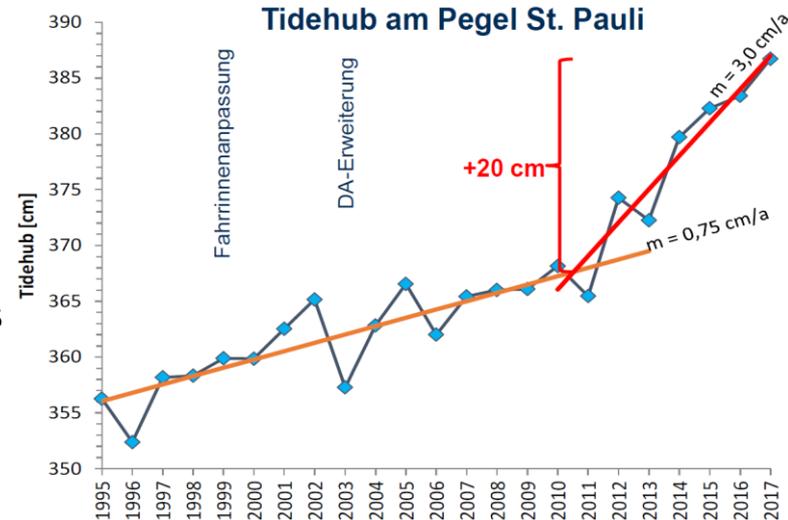
↑
695
690
685
680
675
670

Lage des Schwingungsknotens



Die **beschleunigte Tidehubzunahme** zwischen 2010 und 2017 war multikausal:

- **Abnahme** der oberwasserzufluss- und der transportkörperbedingten **Dissipation**
 - **Erhöhung der Wassertiefe**
 - Vergrößerung des Wasservolumens der mittleren und unteren Tideelbe
 - Anstieg des jährlichen mittleren Tidemittelwassers
- Ebenfalls **ursächlich für die Annäherung an den Resonanzfall**, welche wiederum ebenfalls zur Tidehubzunahme beitrug
- **Anstieg des Nodalfaktors** / der Gezeitenkräfte der dominanten halbtägigen M_2 -Partialtide



Weilbeer et al. (2021): Analyse der Hydrologischen und Morphologischen Entwicklungen in der Tideelbe für den Zeitraum 2013-2018

08

Zusammenfassung und Fazit

- Die **Tideelbe befindet sich nicht in Resonanz** mit den halbtägigen Gezeiten
 - Reflexion und partialtidenspezifische stehende Wellen konnten zwar nachgewiesen werden, das Quarter-Wavelength Kriterium ist jedoch nicht erfüllt
 - Die ermittelte Resonanzfrequenz von 1,56 cpd ($T = 15,37$ h) liegt zwischen den ganz- und halbtägigen Partialtiden
 - Eine Harmonische der Eigenfrequenz liegt im Frequenzbereich der achteltägigen Partialtiden die somit resonanzanfällig sind, ihre Amplituden sind aber gering
- Jedoch zeigen die Untersuchungen, dass die **latente Resonanz über den Untersuchungszeitraum zugenommen** hat, was zur Tidehubentwicklung in der Tideelbe seit 2010 beigetragen hat.
- Qualitative sowie quantitative Aussagen über das Schwingungsverhalten von Tidewellen bei Veränderungen der Systembedingungen des Elbeästuars
- Beispiele nicht gezeigter Untersuchungen:
 - Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten im Frequenzbereich
 - Einflussuntersuchungen (Oberwasserzufluss, Sohlrauheit, Tidemittelwasser, etc.)
 - Wassermassentransport über den Spring-Nipp Zyklus (MSf)

Zur weiteren Verbesserung des Systemverständnisses zum Reflexions- und Resonanzverhaltens des Elbeästuars und Bewertung des Einflusses von Strombaumaßnahmen sollten die Untersuchungen fortgeführt werden

- Wichtig hierfür sind:
 - Aufrechterhaltung der räumlichen Dichte der Pegelmessstationen über die gesamte Tideelbe und besonders auch in der mittleren Tideelbe im Bereich Osteriff bis Glückstadt (Knotenmigration)
 - Die Güte der Messdaten auch im Außenelbebereich (Bake A, Z und C) ist von elementarer Bedeutung für die Interpretation von des Schwingungsverhalten der Tidewelle im Ästuar

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen?

Bild: vom Pegelturm St. Pauli-Landungsbrücken,
eigene Aufnahme



Vanessa Sohrt: vanessa.sohrt@tuhh.de

Sebastian Hein: sebastian.hein@hpa.hamburg.de

Veröffentlichungen im Projekt RefTide:

Sohrt, V.; Hein, S.S.V.; Nehlsen, E.; Strotmann, T.; Fröhle, P. Model Based Assessment of the Reflection Behavior of Tidal Waves at Bathymetric Changes in Estuaries. *Water* 2021, 13, 489. <https://doi.org/10.3390/w13040489>

Hein, S.S.V.; Sohrt, V.; Nehlsen, E.; Strotmann, T.; Fröhle, P. Tidal Oscillation and Resonance in Semi-Closed Estuaries—Empirical Analyses from the Elbe Estuary, North Sea. *Water* 2021, 13, 848. <https://doi.org/10.3390/w13060848>