

## Erfassung, Analyse und Vergleich des dynamischen Fahrverhaltens von großen- und tiefgangsrelevanten Fahrzeugen auf Unter- und Außenelbe

von Prof. Dr.-Ing. T. Albers<sup>1</sup>, B. Reiter<sup>2</sup>,  
F. Treuel<sup>3</sup>, H. Jansch<sup>4</sup> und J. Behm<sup>5</sup>

### Abstract

Aufgrund stetig zunehmender Schiffsabmessungen ist die Unterkielfreiheit in den letzten Jahren zu einem limitierenden Faktor für den Verkehr auf der Wasserstraße Elbe geworden. Begrenzte Fahrwasserstiefen führen dazu, dass große Container- oder Massengutschiffe den Hamburger Hafen zum Teil nur tideabhängig anlaufen können und die Anfahrt nach einem von der Wasser- und Schifffahrtsstraßenverwaltung geführten Tidefahrplan geregelt wird. Um eine optimale, wirtschaftliche Nutzung des Elbefahrwassers zu gewährleisten, werden zuverlässige, revierspezifische Werte für das dynamische Fahrverhalten von großen- und tiefgangsrelevanten Schiffen benötigt.

Im Auftrag des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes Hamburg und in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Wasserbau sowie der Technischen Universität Hamburg hat die Ingenieurgesellschaft von Lieberman in einer umfangreichen Messkam-

pagne das dynamische Fahrverhalten von großen- und tiefgangsrelevanten Fahrzeugen auf der Revierfahrt von Unter- und Außenelbe erfasst. Insbesondere wurde dabei der tatsächliche Squat ermittelt und anschließend anhand z.B. nautischer und betriebstechnischer Parameter analysiert. Parallel wurden weitere hydrologische und hydrodynamische Größen für die Berechnung des Squat nach Rechenansatz des Tidefahrplanprogramms Elbe bestimmt. Anschließend wurde der tatsächliche Squat mit dem berechneten Squat verglichen. Die Erfassung der relevanten Parameter zum dynamischen Fahrverhalten erfolgte direkt auf dem Bemessungsschiff während der Revierfahrt. Weitere benötigte hydrologische und hydrodynamische Parameter wurden zeitgleich von einem Begleitfahrzeug aus in Vorfahrt erfasst.

Insgesamt wurden 19 Messfahrten auf 6 verschiedenen Containerschiffstypen mit Längen zwischen 294 m und 400 m durchgeführt. Dabei fanden für jeden Schiffstyp in der Regel zwei auslaufende und eine einlaufende Messfahrt statt. Hinzu kamen 2 Messfahrten auf Massengutfrachtern der Capesize-Klasse. Die Messkampagne fand zwischen dem 06.09.2013 und dem 16.08.2016 statt. Die Bemessungsschiffe wurden zwischen ihrem Liegeplatz im Hamburger Hafen und Tonne 11 bei Elbe-km 750 nördlich von Scharhörn bzw. in umgekehrte Richtung messtechnisch begleitet (Abbildung 1). Die Messungen wurden an Bord der Bemessungsschif-

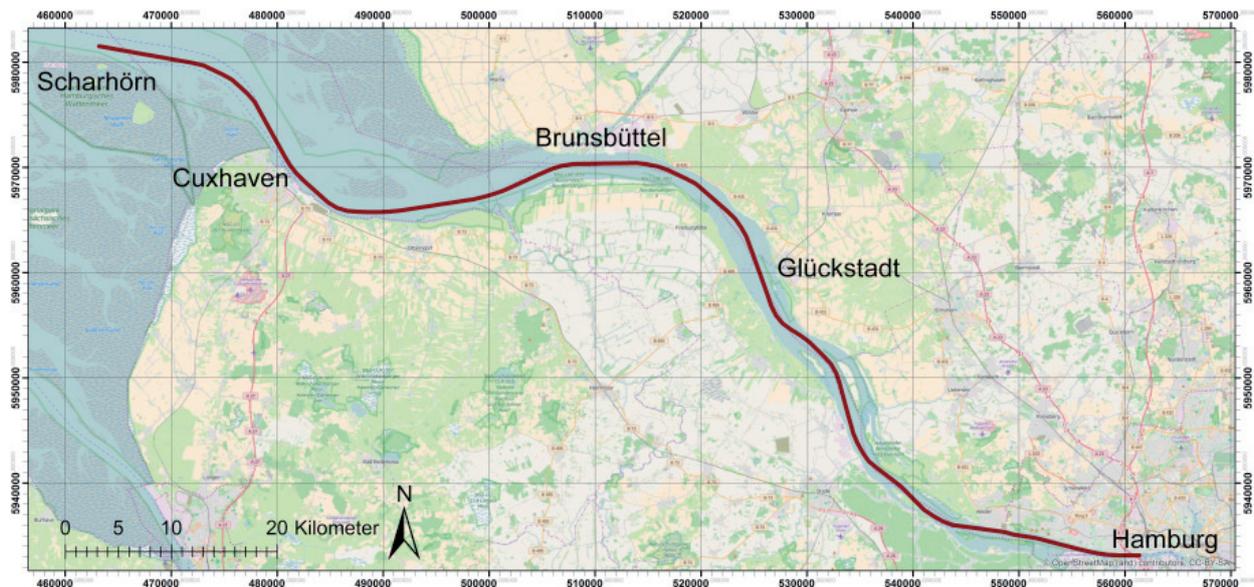


Abbildung 1: Übersicht über die Messstrecke

- 1 Ostfalia Hochschule, Campus Suderburg, E-Mail: [t.albers@ostfalia.de](mailto:t.albers@ostfalia.de)
- 2 Ingenieurgesellschaft von Lieberman, Hamburg
- 3 Technische Universität Hamburg
- 4 Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg
- 5 Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg

fe selbst sowie auf einem Begleitfahrzeug durchgeführt, das die Bemessungsschiffe auf der Revierfahrt vom Hamburger Hafen bis Tonne 11 oder in umgekehrte Richtung eskortierte.

# Erfassung, Analyse und Vergleich des dynamischen Fahrverhaltens von größen- und tiefgangsrelevanten Fahrzeugen auf Unter- und Außenelbe

An Bord der Bemessungsschiffe wurden sechs hochpräzise GNSS-Empfänger installiert, um die Positionen und 3D-Bewegungen der Schiffe mit einer Frequenz von 2 Hz aufzuzeichnen. Die Geräte wurden jeweils an Steuerbord und Backbord an Bug, Heck und auf den Nocken installiert (Abbildung 2 und 3). Die Daten ermöglichten die Berechnung von Trimmung und Krängung, Geschwindigkeit und Kurs über Grund, Vorausrichtung usw. Das Begleitschiff wurde verwendet, um den lokalen Salzgehalt und die Temperatur des Wassers (unter Verwendung einer CTD-Sonde), die lokale aktuelle Geschwindigkeit über Grund und die Vorausrichtung (berechnet aus 2 weiteren GNSS-Empfängern auf dem Begleitfahrzeug) sowie die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung (unter Verwendung eines Doppler Velocity

Log DVL) zu erfassen. Über die Daten der CTD-Sonde konnte die sich über die Revierfahrt verändernde Dichte des Wassers bestimmt werden. Aus den aufgezeichneten Strömungsparametern und der Geschwindigkeit über Grund sowie der Vorausrichtung des Bemessungsschiffes konnte die Geschwindigkeit durch das Wasser errechnet werden. AIS-Signale wurden aufgezeichnet, um Daten über Begegnungen und Überholvorgänge von anderen Schiffen zu sammeln und im Anschluss in die Auswertung einzubeziehen. Aus Daten der Voyage Data Recorder der Bemessungsschiffe wurden zusätzliche Informationen über die Betriebsparameter gewonnen (u.a. Schraubendrehzahl, Ruderlage, Rate-of-Turn).

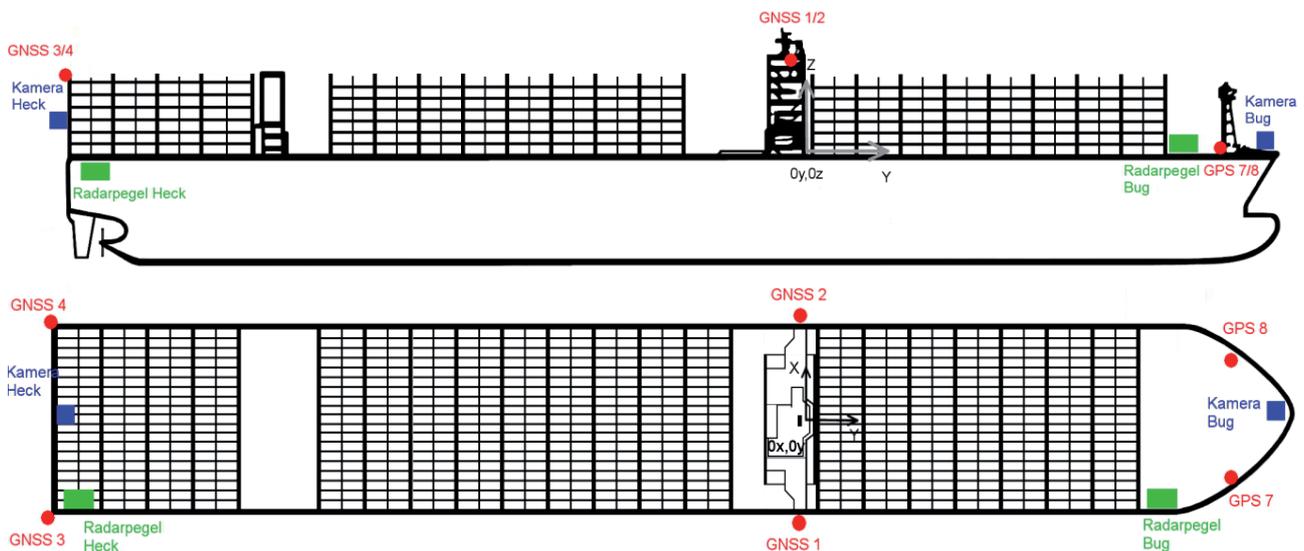


Abbildung 2: Position der Messgeräte auf dem Bemessungsschiff

Über die Höhe der GNSS-Empfänger, den Tiefgang in Ruhelage und den zuvor mithilfe von Pegeldata berechneten ortsabhängigen Wasserstand wurde der tatsächliche Squat an jeder Position des Bemessungsschiffes auf der Elbe bestimmt. Der Tief-

gang in Ruhelage wurde durch zwei Radarpegel vor Fahrtbeginn erfasst (Abbildung 4). Mit diesem ganzheitlichen Ansatz konnte eine Gesamtgenauigkeit der gemessenen Squat von  $\pm 0,10$  m oder besser sichergestellt werden.



Abbildung 3: Installation der GNSS-Empfänger auf den Nocken (links) und am Bug (rechts)

## Erfassung, Analyse und Vergleich des dynamischen Fahrverhaltens von großen- und tiefgangsrelevanten Fahrzeugen auf Unter- und Außenelbe

Die Wassertiefen entlang der Fahrspur des Bemessungsschiffes wurden aus jeweils aktuellen Datensätzen der Verkehrssicherungspeilungen generiert (Abbildungen 5 und 6). Aus der Wassertiefe, dem Tiefgang in Ruhelage, dem Squat und dem Einfluss der Dichteänderung ergab sich dann die Unterkielfreiheit des Bemessungsschiffes.



Abbildung 4: Installation des Radarpegels an der Reling (hier: am Bug)

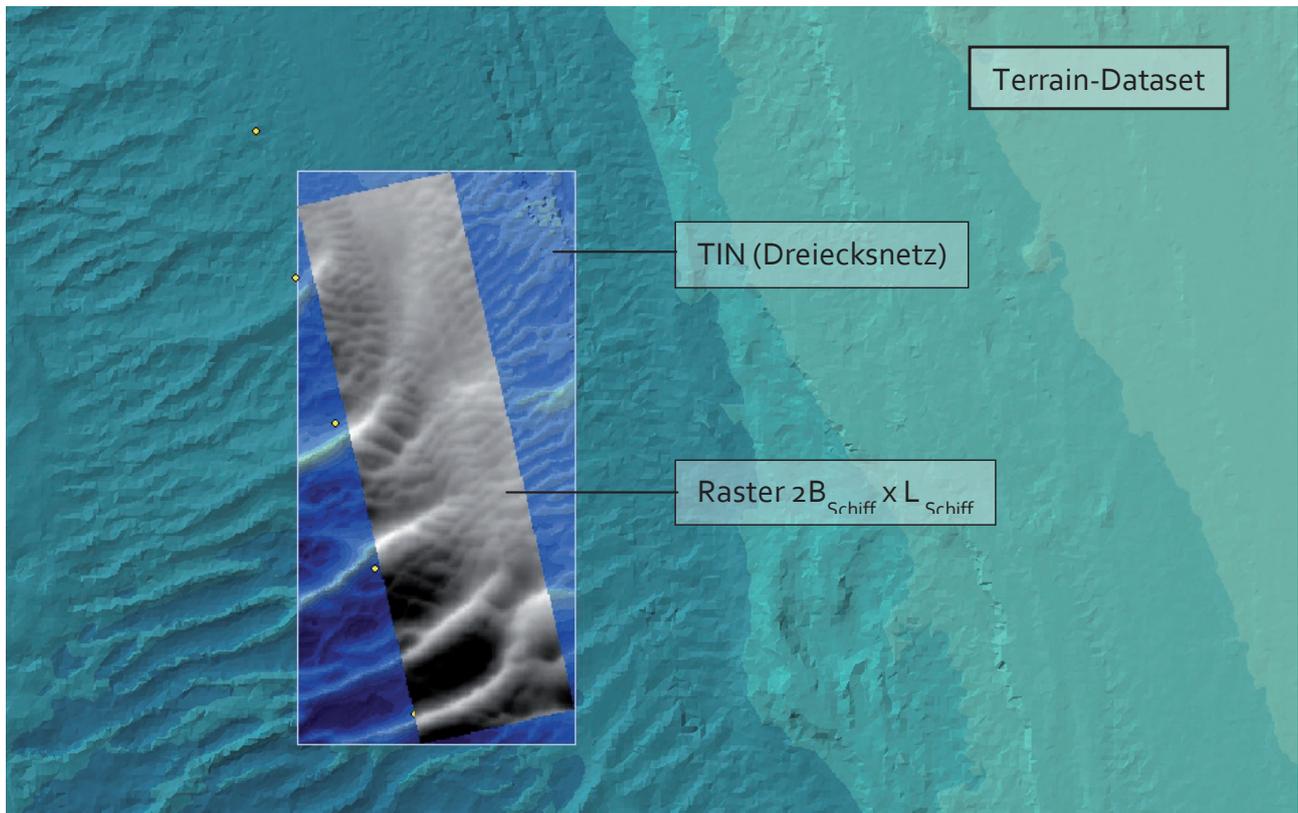


Abbildung 5: Ermittlung des Tiefenrasters für einen Messzeitpunkt

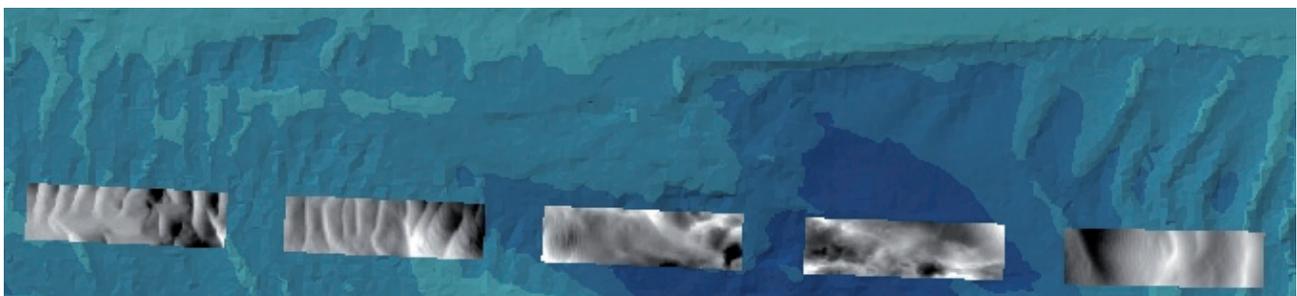


Abbildung 6: Tiefenraster entlang des Kurses

## Erfassung, Analyse und Vergleich des dynamischen Fahrverhaltens von größen- und tiefgangsrelevanten Fahrzeugen auf Unter- und Außenelbe

Der Umfang der Messungen, die Anzahl der berücksichtigten Parameter und die erreichte Genauigkeit bilden einen einzigartigen Datensatz zum Squat-Verhalten großer Containerschiffe und Massengutfrachter. Aufgrund der hohen Auflösung und Vollständigkeit wurde ein detaillierter Vergleich zwischen realem, gemessenen und theoretischem Squat, der beispielsweise anhand der ICORELS-Formel berechnet wird, ermöglicht.

Der theoretische Squat nach der ICORELS-Formel (dts) wird in leicht modifizierter Form im Rahmen des Tidefahrplans der Elbe verwendet. Dieser Ansatz unterscheidet sich um einen Vorfaktor von der 1977 von PIANC veröffentlichten Originalformel. Im Tidefahrplan für die Elbe wird anstelle des empirischen Koeffizienten von 2,4 für konventionelle Schiffsformen ein ortsabhängiger ICORELS-Faktor  $I_c(x)$  verwendet. Dieser Faktor berücksichtigt nicht nur die Schiffsform, sondern auch gewässerspezifische Faktoren.

$$dts = I_c(x) * \frac{B * TG_{SW}(x) * C_B}{L_{PP}} * \frac{Fr_h^2}{\sqrt{1 - Fr_h^2}}$$

$$Fr_h = \frac{v_w(x_s)}{\sqrt{g \cdot h(x_s, t)}}$$

Die Froude-Tiefenzahl  $Fr_h$  ergibt sich aus der Geschwindigkeit des Schiffes durch das Wasser  $v_w(x_s)$ , und der lokalen Wassertiefe  $h(x_s, t)$ . Das Verdrängungsvolumen des Bemessungsschiffes wird durch die Schiffsbreite  $B$ , den ortsabhängigen Tiefgang des Schiffes  $TGSW(x)$ , die Länge zwischen den Loten  $L_{PP}$  und den Blockkoeffizienten des Schiffes  $C_B$  bestimmt. Der  $C_B$ -Wert wurde für den mittleren Tiefgang ausgewählt und für die Fahrt auf der Grundlage der Schwankung der Wasserdichte (abgeleitet aus den CTD-Daten) und der sich daraus ergebenden Änderung des Tiefgangs angepasst.

Der gemessene Squat wurde mit berechneten Squat-Werten unter Verwendung der ICORELS-Formel verglichen (Abbildung 7). Die allgemeine Anwendbarkeit dieses Ansatzes, die in einer früheren Feldstudie für die Elbe für kleinere Schiffsklassen verifiziert worden war, wurde auch für die untersuchten größeren Fahrzeuge als angemessen bestätigt. Unter bestimmten Bedingungen unterschätzte die ICORELS-Formel den gemessenen Squat für Containerschiffe mit einer Gesamtlänge von 347 m und größer. Hier konnte eine Abhängigkeit von der Trimmung des Schiffes beobachtet werden. Zusätzlich konnten aus der Analyse neue Erkenntnisse über lokal erhöhten Squat durch begehende Schiffe abgeleitet werden.

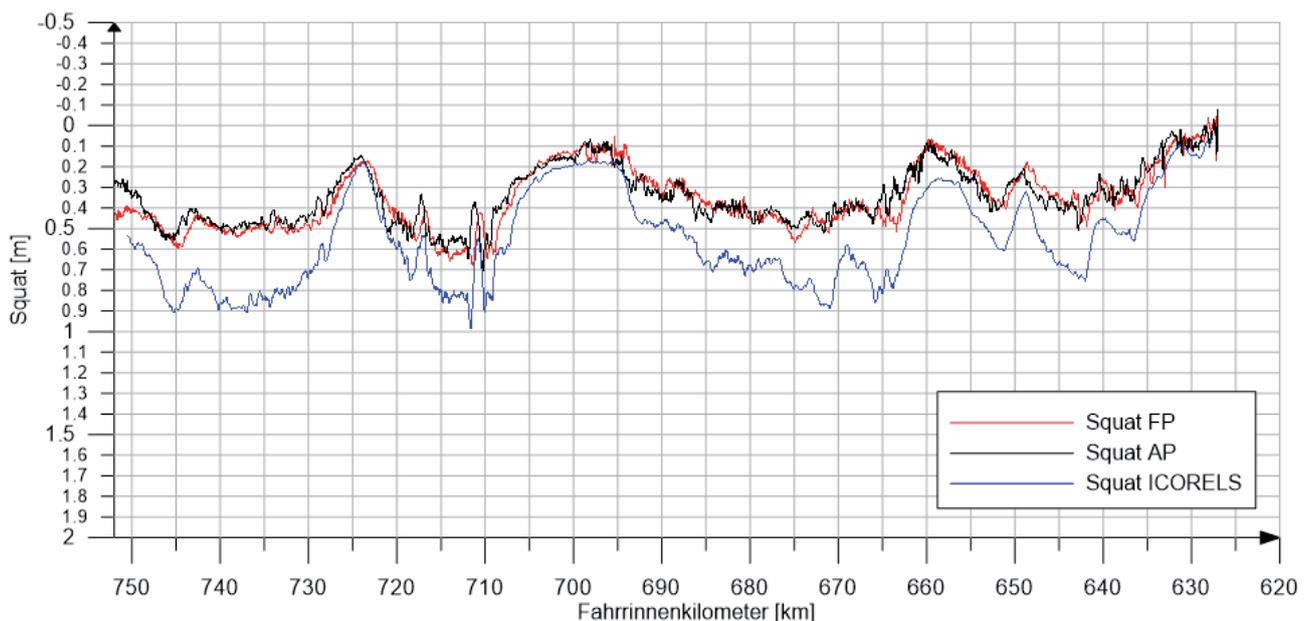


Abbildung 7: Vergleich der gemessenen Squats am vorderen Lot (FP) und am hinteren Lot (AP) und dem theoretischen Squat gemäß ICORELS in der Schiffsklasse C294

# Erfassung, Analyse und Vergleich des dynamischen Fahrverhaltens von großen- und tiefgangsrelevanten Fahrzeugen auf Unter- und Außenelbe

Die aufgezeichneten Daten wurden des Weiteren verwendet, um die folgenden Parameter im Detail zu analysieren:

- Korrelation zwischen Geschwindigkeit durch das Wasser und Squat
- Korrelation zwischen TUCK-Parameter und Squat (Abbildung 8)
- Korrelation zwischen Unterkieffreiheit und Squat
- Korrelation zwischen Flussbreite und Squat

- Auswirkung der Schiff-zu-Schiff-Interaktion auf den Squat (Abbildung 9)
- Korrelation zwischen Strömung und Squat
- Korrelation zwischen der Änderung der Wasserdichte und der Änderung der Trimmung
- Auswirkung der Krängung auf den Tiefgang
- Auswirkung der meteorologischen Einflüsse auf die Schiffsdynamik

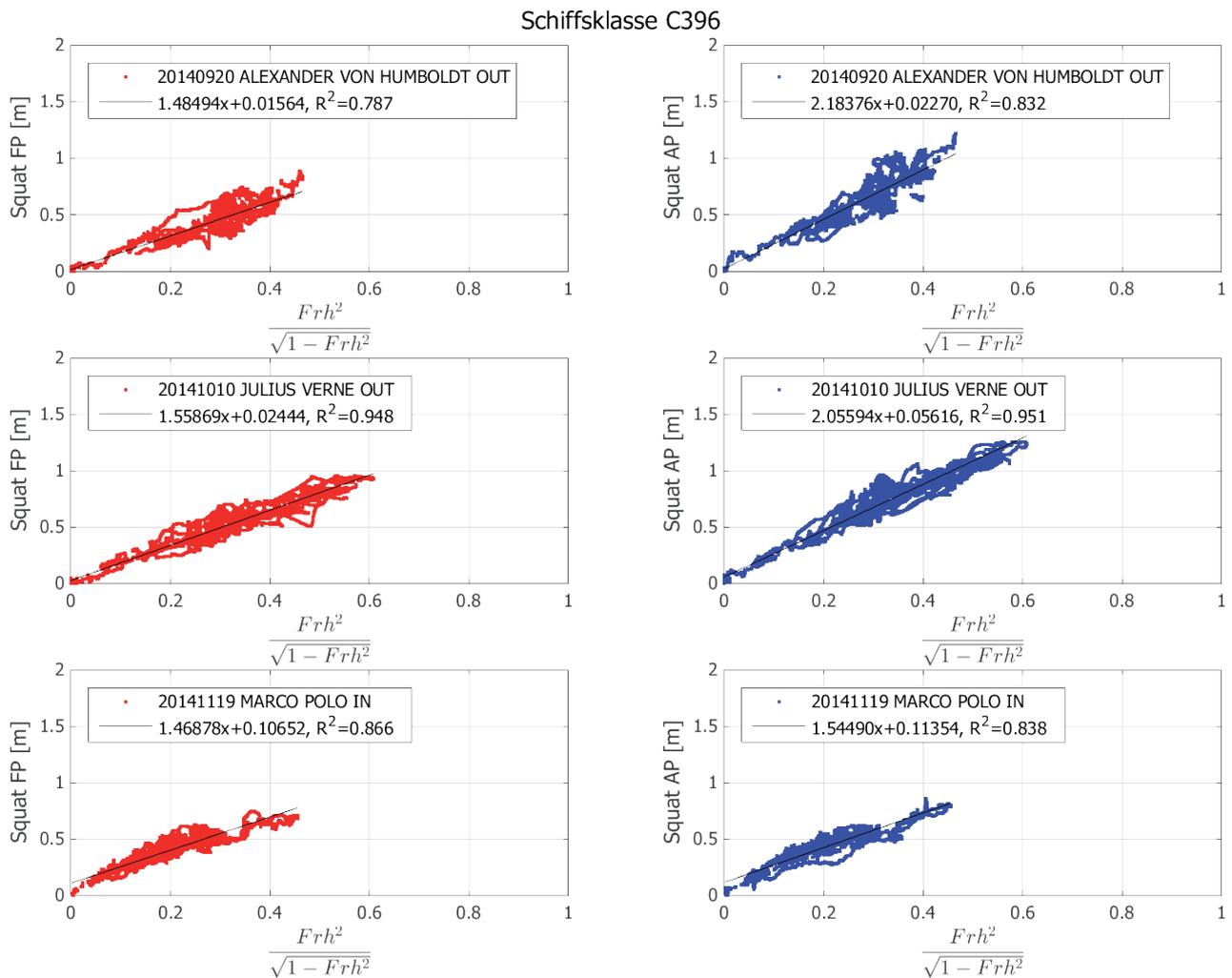


Abbildung 8: Korrelation zwischen Squat FP / AP und TUCK-Parameter für die Schiffsklasse C396

# Erfassung, Analyse und Vergleich des dynamischen Fahrverhaltens von größen- und tiefgangsrelevanten Fahrzeugen auf Unter- und Außenelbe

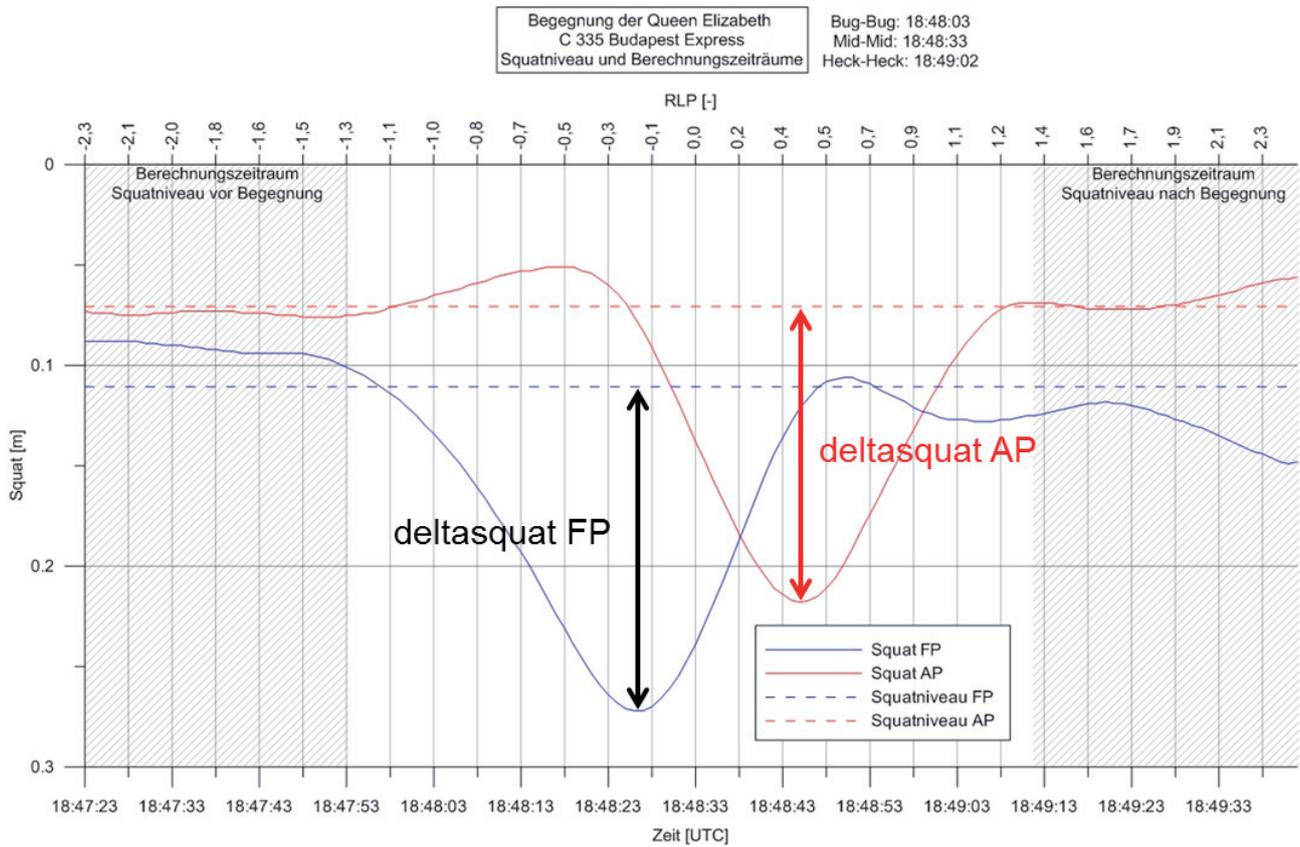


Abbildung 9: Squat-Erhöhung bei Schiff-Schiff-Interaktion