



Automatisierte Vorhersagemethode zur Vermeidung von parametrischem Rollen

Von der Fakultät für Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften der Carl Ossietzky
Universität Oldenburg zur Erlangung des Grades und Titels einer

Doktorin (Dr.)

Angenommene Dissertation

Von Frau Sovanna Chhoeung

geboren am 06. September 1984 in Berlin

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn

Weitere Gutachter: Prof. DSc. S. Ehlers

Tag der Disputation: 22.05.2023

Abstract

Der Welthandel erfolgt mit 90% über die stetig wachsende Welthandelsflotte von über 56.899 Schiffen und davon 5.418 Containerschiffen im Jahr 2021. Allein hier wurden über 1530 Schiffsvorfälle gemeldet, wobei eine kleine Anzahl derer durch große und plötzlich auftretende Rollwinkel hervorgerufen wurde. Trotz der geringen Anzahl wurden hier die größten Verluste von Containern, Schiffen und Menschenleben notiert. Dieses Phänomen ist als parametrisches Rollen in der Schifffahrt bekannt und wurde schon in den Grundzügen untersucht. Dennoch existieren derzeit keine ausreichend genauen Systeme zur Vermeidung des parametrischen Rollens.

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung eines an Bord installierten Systems zur Vermeidung parametrischen Rollens durch Kurs- und/oder Geschwindigkeitsempfehlungen an die Schiffsführung. Hierzu bedient es sich zunächst einfacher Sensorik an Bord des Schiffes, um Daten des bewegten Schiffes und der Umwelt aufzunehmen. Mittels der hier gewonnenen Daten wird die aktuelle See um das Schiff berechnet. Unter Hinzunahme multipler Parameter, welche acht anstatt der bisher vier verwendeten Bedingungen des parametrischen Rollens begünstigen, wird zunächst die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des parametrischen Rollens berechnet. Zusätzlich folgt eine Vorhersage der Schiffsbewegung mittels eines Random Forest Algorithmus für die nächsten zwei Minuten. Im Falle eines positiven Ausschlags für parametrisches Rollen beider Sub-Systeme (Wahrscheinlichkeit und Vorhersage), berechnet das System einen Kurs respektive Geschwindigkeit, für welche die Wahrscheinlichkeit und die Vorhersage für parametrisches Rollen gegen Null tendieren und gibt diese aus. Dies kann von der Schiffsführung oder einem vorangestellten autonomen System genutzt werden. Die Evaluation des Systems wurde mittels erhobener Realdaten des Containerschiffes MSC Madrid der Reederei Offen durchgeführt. Das zentrale Ziel der Entwicklung eines Systems zur Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlung zur Vermeidung parametrischen Rollens im aktuellen Seegang wurde erfolgreich umgesetzt und kann auf verschiedene Schiffstypen angewandt werden. Zusätzlich kann das System zur Vermeidung zu hohen Beschleunigungen an Bord des Schiffes gegen Sea sickness, Motion sickness und leichte bis schwere Arbeit eingesetzt werden, da die Grenzen hierzu von der IMO und NORDFOLK implementiert wurden. Diese Implementierung und Evaluation dieser Zusatzfunktion ist nicht mehr Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

English version

World trade is carried out with 90% via the steadily growing world merchant fleet of over 56,899 ships and of these 5,418 are container ships. Here alone, over 1530 ship incidents were reported in 2021. Here, a small number are caused by large and sudden rolling angles, but with large losses of containers, ships and human lives. This phenomenon is known as parametric rolling in shipping and has been studied in outline. Nevertheless, sufficiently accurate systems to prevent parametric rolling do not currently exist.

This thesis describes the development of an on-board system to avoid parametric rolling by providing course and/or speed recommendations to the ship's command. For this purpose, it first uses simple sensors on board of the ship to collect data of the moving ship and the environment. Using the data obtained here, the current sea around the ship is calculated. Adding multiple parameters that favor the conditions of parametric rolling, the probability for the occurrence of parametric rolling is first calculated. After this is done, a prediction is output using a Random Forest algorithm for the next two minutes. In case of a positive swing of both sub-systems (probability and prediction), the system calculates and outputs a course and speed, respectively, for which the probability and the prediction for parametric roll tend towards zero. This can be used by the ship's command or a preceding autonomous system. The evaluation of the system was performed using collected real-time data from the container ship MSC Madrid of the shipping company Offen. The central goal of developing a system for course and speed recommendation to avoid parametric rolling in the current sea state was successfully realized and can be applied to different types of ships. In addition, the system can be used to avoid excessive acceleration on board the ship against seasickness, motion sickness and light to heavy work, as the limits for this have been implemented by IMO and NORDFOLK. This implementation and evaluation of this additional function is no longer the subject of the present work.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme	VII
Symbolverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung.....	3
1.3 Herleitung der Forschungsfragen	4
1.4 Zielsetzung der Arbeit und ihre Abgrenzung zu bestehenden Ansätzen	8
1.5 Primäre Anforderungen an ein Assistenzsystem.....	9
1.6 Übertragbarkeit.....	10
1.7 Aufbau der Arbeit.....	11
2 Grundlagen	13
2.1 Der aktuelle Seegang und die Wellenspektren.....	13
2.2 Die Schiffsstabilität, das parametrische Rollen, die Bedingungen und die Wahrscheinlichkeitsberechnung.....	21
2.3 Annahmen für simuliertes parametrisches Rollen als Basis für ein Vorhersagemodell ..	29
2.4 Vorhersagezeitraum für eine Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlung	30
3 Existierende Ansätze für den Seegang, das parametrische Rollen und dessen Vorhersage ...	33
3.1 Existierende Ansätze zur Berechnung des aktuellen Seeganges	33
3.2 Auftretswahrscheinlichkeit von parametrischem Rollen.....	36
3.3 Aktuelle Systeme zur Vorhersage von parametrischem Rollen	38
3.4 Ansätze zu Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlungen gegen parametrisches Rollen ..	39
3.5 Handlungsbedarf	40
4 Verfahren für die Vorhersage und Vermeidung parametrischen Rollens	41
4.1 Prinzip des Verfahrens.....	41
4.2 Schritt 1: Verfahren zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten aus dem Regelwerk.....	43
4.2.1 Aufstellen des zu parametrisierenden Baumdiagrammes	44
4.2.2 Simulation zur Parametrisierung der Wahrscheinlichkeitsabschätzung des Regelwerkes	46
4.2.3 Labeln der Daten	47
4.2.4 Klassifizierung nach der Art des parametrischen Rollens.....	49
4.2.5 Baumdiagramm für die Wahrscheinlichkeiten des Regelwerkes	51
4.3 Schritt 2: Verfahren zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten aus der KI.....	53
4.4 Schritt 3: Ermittlung von Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlungen zur effektiven Vermeidung parametrischen Rollens.....	56
4.5 Berechnung der notwendigen Eingabeparameter zur Situationsbestimmung der aktuellen Lage aus den Messdaten mittels an bordbefindlicher Sensorik.....	58
4.5.1 Den Kurs und die Geschwindigkeit aus den globalen Koordinaten	59
4.5.2 Die Beschleunigungen an jedem Ort des Schiffes aus den drei gemessenen Orten	60
4.5.3 Die metazentrische Höhe GM aus den Beschleunigungen	62
4.5.4 Den Gewichtsschwerpunkt G des Schiffes aus der metazentrischen Höhe GM ...	67
4.5.5 Globale Windrichtung und -geschwindigkeit aus der lokalen Windrichtung und - geschwindigkeit.....	69
4.5.6 Berechnung des Seegangsspektrums	70
4.5.7 Berechnung der Wellenparameter	75
5 Abschließende Betrachtung des Verfahrens zur Vermeidung parametrischen Rollens	79
5.1 Auswertung der Wahrscheinlichkeit des Regelwerkes (Schritt 1)	79

5.2	Auswertung der Wahrscheinlichkeit mittels KI (Schritt 2).....	81
5.3	Auswertung der Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlung (Schritt 3).....	82
5.4	Bewertung der Ergebnisse	82
6	Installation an Bord verschiedener Schiffe.....	83
6.1	Die Schiffe	83
6.2	Eingangsdaten des Systems	88
6.3	An Bordbefindliche Sensorik und andere Hardware	89
6.4	Ausgangsdaten des Systems.....	90
7	Ausblick und Übertragbarkeit	97
7.1	Übertragbarkeit und Flexibilität des Systems	97
7.2	Ausblick und mögliche Erweiterungen.....	97
7.3	Haupt- und Wertschöpfung der Arbeit	97
	Literaturverzeichnis	101
	Anhang	105
A	Baumdiagramme	105
i.	Baumdiagramm für die Begegnungsperiode $T_e = 17,87s$	105
ii.	Baumdiagramm für die Begegnungsperiode $T_e = 17,16s$	106
B	Beschleunigungen	107
C	Implementierung	111
i.	Systemarchitektur.....	111
ii.	Service‘ des Systems	113
iii.	Sensormanagement.....	114
iv.	Anforderungsdiagramm Simulation	116
v.	Anforderungsdiagramm künstliche Intelligenz	118

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

ABS	American Bureau of Shipping
BEAmer	Bureau d'enquêtes sur les événements de mer
BPR	Bedingungen für das Parametrische Rollen
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BSU	Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung
COG	Center of gravity, Gewichtsschwerpunkt
DMAIB	Danish Marine Accident Investigation Board
DSB	Dutch Safety Board
DNVGL	Det Norske Veritas Germanischer Lloyd
EMSA	European Maritime Safety Agency
IMO	International Maritime Organization
ISO	International Organization for Standardization
ITTC	International Towing Tank Convention
Kn	Knoten
MAIB	Marine Accident Investigation Branch
MASS	Maritime Autonomous Surface Ships
MSC	Maritime Safety Committee
MSIU	Marine Safety Investigation Unit
NATO	North Atlantic Treaty Organization
PMA	Panama Maritime Authority
RAO	Response Amplitude Operators
SHK	Swedish Accident Investigation Board
STANAG	Standardization Agreement

Symbolverzeichnis

a	Beschleunigung	[m/s ²]
a_0	Anfangsbeschleunigung	[m/s ²]
α_W	Anliegende Windrichtung	[°]
$a(t)$	Beschleunigung in Abhängigkeit der Zeit t	[m/s ²]
A_B	Parameter des Brettschneider Spektrums	[m ² /s ⁴]
A_W	Wasserlinienfläche	[m ²]
A_γ	Normalisierungsfaktor	[1]
Acc X,Y,Z	Beschleunigung entlang der Achse	[m/s ²]
α	Phillips Konstante	[1]
α_0	Maximale Wellenschräge	[°]
α_1	JONSWAP Konstante	[1]
b	Konstante in der Geradengleichung	[1]
B	Auftriebsschwerpunkt Ausgangslage	[1]
B [*]	Ausgewandelter Auftriebsschwerpunkt	[1]
B_φ	Auftriebsschwerpunkt um Rollwinkel φ	[1]
B_B	Parameter des Brettschneider Spektrums	[1/s ⁴]
B_{mla}	Breite des Unterwasserschiffes	[m]
\overline{BM}	Entfernung Auftriebsschwerpunkt zur metazentrischen Höhe	[m]
β_{PM}	Empirische Konstante des Pierson-Moskowitz Spektrums	[1]
β	Begegnungswinkel	[°]
c	Wellenfortschrittsgeschwindigkeit	[m/s]
c_b	Blockkoeffizient	[1]
c_w	Wasserlinienkoeffizient	[1]
d	Wassertiefe	[m]
Δ	Auftriebskraft	[kN]

E	Gesamtvarianz	cm ² s
e	Entfernung Gewicht zur Mitschiffsachse, Krängungsversuch	[m]
ε	Phasenverschiebung	[rad]
f	Frequenz	[1/s]
\widetilde{f}_m	JONSWAP Konstante	[1]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
G	Gewichtsschwerpunkt	[1]
\overline{GM}	Metazentrische Höhe	[m]
\overline{GM}_0	Anfangsmetazentrische Höhe	[m]
\overline{GM}_L	Längsmetazentrische Höhe	[m]
\overline{GM}_m	Mittlere anfangsmetazentrische Höhe	[m]
\overline{GM}_{max}	Maximale anfangsmetazentrische Höhe	[m]
\overline{GM}_{min}	Minimale anfangsmetazentrische Höhe	[m]
γ	JONSWAP Konstante	[1]
$\Gamma(\lambda)$	Gammafunktion	[1]
H	Wellenhöhe	[m]
h	Hebelarm	[m]
h_s	Höhe	[m]
$H_{1/3}$	Mittelwert der 1/3 höchsten Wellen	[m]
H_s	Signifikante Wellenhöhe, $H_{1/3}$	[m]
k	Wellenzahl	[1/m]
K	Kielpunkt	[m]
$k_{1,2,3}$	Konstante der BPR8	[1]
k'_{xx}	Trägheitsradius	[m]
L_{oa}	Länge über alles des Schiffes	[m]
L_{pp}	Länge des Schiffes zwischen den Loten	[m]
λ	Wellenlänge	[m]

λ_j	Ochi Konstante	[1]
m	Steigung in der Geradengleichung	[1]
M	Metazentrum	[1]
M_{Mom}	Moment	[Nm]
M_L	Längsmetazentrum	[1]
$M_{x,y,z}$	Moment um die x-, y-, oder z-Achse	[Nm]
μ	Wellenrichtung	[°]
μ_{BPR7}	Konstante der BPR7	[1]
∇	Verdrängung des Schiffes	[m ³]
Ω	Kreisfrequenz	[rad/s]
ω_0	Kreisfrequenz des Schiffes	[rad/s]
ω_e	Kreisfrequenz der Begegnungsperiode	[rad/s]
ω_m	Mittlere Kreisfrequenz	[rad/s]
ω	Kreisfrequenz Welle	[rad/s]
ω_S	Winkelgeschwindigkeit	[rad/s]
p	Konstante der BPR7	[1]
P	Drehpunkt	[1]
P_G	Gewicht des Krängungsversuches	[kgm/s ²]
φ	Rollwinkel	[°]
φ_J	JONSWAP Konstante	[1]
φ_0	Ochi Konstante	[1]
Ψ	Stampfwinkel	[°]
q	Konstante der BPR7	[1]
r	Abstand des Drehpunktes zum Sensor	[m]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
s_0	Anfangsweg	[m]
s(t)	Weg in Abhängigkeit der Zeit t	[m]

$S_{1,2,3}$	Sensor 1,2 oder 3	[1]
$S(\omega)$	Varianzdichtespektrum, Seegangsspektrum	cm ² s
σ	JONSWAP Konstante	[1]
T	Wellenperiode	[s]
T_S	Tiefgang des Schiffes	[m]
T_1	Wellenperiodenparameter des Brettschneider Spektrums	[s]
T_e	Begegnungsperiode Schiff zu Wellen	[s]
T_m	Mittlere Wellenperiode	[s]
T_R	Rollperiode des Schiffes	[s]
t	Zeit	[s]
t_m	Windeinwirkzeit	[h]
θ_W	Wahre Windrichtung	[°]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
v_O	Anfangsgeschwindigkeit	[m/s]
v_s	Schiffsgeschwindigkeit	[m/s] / [kn]
V_m	Windgeschwindigkeit	[m/s]
V_w	Windgeschwindigkeit (19,5m über der Meeresoberfläche)	[m/s]
V_{w10}	Windgeschwindigkeit (10m über der Meeresoberfläche)	[m/s]
V_{WT}	Wahre Windgeschwindigkeit	[m/s]
$v(t)$	Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit t	[m/s]
x	Fetch	[m]
\tilde{x}	JONSWAP Konstante	[m/s]
x_m	Mindestfetch	[m]
ζ	Wellenamplitude	[m]
ζ_n	Wellenhöhe 0-30m	[m]

1 Einleitung

Die Bedeutung nahtloser Lieferketten für einen problemlosen Waren- und Güterverkehr wurde im März 2020 auf die Probe gestellt, als die Welt auf Grund der Coronapandemie stillstand. In diesem Jahr sank das Weltwarenhandelsvolumen um 5,3% und erfuhr im Folgejahr 2021 wiederum ein Wachstum von 3,6% (Marinekommando Jahresbericht 2021, 2021). Für das Jahr 2022 wird weiterhin ein Wachstum von 3,5% prognostiziert, welches ein Zeichen für eine langsame Erholung des Welthandels ist. Dies schlägt sich in der Welthandelsflotte mit einem Wachstum von 2,3% auf 58.228 Schiffen und einer Gesamtkapazität von 2,09 Mrd. DWT¹ und 90% des transportierten Welthandels nieder (Marinekommando Jahresbericht 2022, 2022).

1.1 Motivation

Für die Welthandelsflotte im Jahr 2021 mit 56.899 Schiffen (Marinekommando Jahresbericht 2022, 2022), wurden weltweit 2.637 Schiffsunglücke und -vorfälle mit 2.854 involvierten Schiffen gemeldet (EMSA, 2022). Dies sind 5% der Flotte. Darunter wurden 725 schwere² und 52 sehr schwere³ Vorfälle mit 621 Verletzten und 36 getöteten Menschen notiert. In 725 Fällen (27,49%) wurde ein Kontrollverlust des Schiffes als Ursache in den Unfallberichten gemeldet (EMSA, 2022). In den Statistiken wird unter dem Begriff Kontrollverlust, der Verlust der Antriebsleistung, der elektrischen Leistung und der Kurssteuerung genannt, jedoch sind die eigentlichen Gründe nur in den einzelnen Unfallberichten zu finden. Hier zeigt sich, dass in einigen Fällen große Rollbewegungen um die Schiffslängsachse und die daraus resultierenden großen Rollwinkeln zu diesen Kontrollverlusten führten. Wie im Jahr 2006 als die MS Finnbirch (SHK, 2008) große Rollwinkel bis zu 45° erreichte und kenterte. Hier wurden zwei Personen tödlich verletzt, eine schwer und die vollständige Ladung ging verloren. Ein aktuelles Beispiel ist die MSC Zoe (PMA, DSB, BSU, 2020), welche in der deutschen Bucht derart großen Rollwinkeln ausgeliefert war, dass 342 Container verloren gingen und 1047 beschädigt wurden. Dies sind keine Einzelfälle, wie folgende Tabelle 1 (Seite 2) zeigt:

¹ Deadweight Tonnage ist die Gesamt-Tragfähigkeit eines Schiffes

² IMO-Code für die Untersuchung von Unfällen und die Richtlinie 2009/18/EG, schwere Vorfälle, welche Feuer, Explosion, Kollision, Grounding, Kontakt, Schwerwetterschäden, Eisschäden, Rissbildung im Schiffsrumpf oder andere Schiffsrumpfverletzungen einbezieht

³ IMO-Code für die Untersuchung von Unfällen und die Richtlinie 2009/18/EG, sehr schwere Vorfälle, welche den Verlust eines Schiffes, Tod oder schwere Schäden für die Umwelt einbeziehen

Tabelle 1: Schiffsunglücke und -vorfälle

Datum	Schiffsname	Schiffsdaten	Ort	Verlust	Rollwinkel
27.01.2006	P&O Nedlloyd Genoa (MAIB, 2006)	Länge: 210,11m Breite: 32,20m	Nordatlantik	27 Container über Bord 28 Container verstreut an Bord	25-30°
17.02.2006	CMA CGM Otello (BEAmer, 2006)	Länge: 334,07m Breite: 42,80m Tiefgang: 14,52m	Nordatlantik Bucht von Biscay	52 Container über Bord	10-20°
01.11.2006	MS Finnbirch (SHK, 2008)	Länge: 156,00m Breite: 22,70m Tiefgang: 7,30m	Ostsee	2 Personen tödlich verletzt 1 Person schwer verletzt Komplettes Schiff Komplette Ladung	40-45°
12.01.2007	JRS Canis (BSU, 2008)	Länge: 129,20m Breite: 20,60m Tiefgang: 7,49m	Elbemündung	10 Container über Bord	20°
24.09.2008	CMV Chicago Express (BSU, 2009)	Länge: 336,19m Breite: 42,80m Tiefgang: 14,94m	Küste von Hong Kong	1 Person tödlich verletzt 1 Person schwer verletzt 6 Container über Bord	44°
14.02.2014	Svendborg Maersk (DMAIB, 2014)	Länge: 346,98m Breite: 42,80m Tiefgang: 14,94m	Nordatlantik	517 Container über Bord 250 Container beschädigt	41°
03.01.2015	Hoegh Osaka (MAIB, 2016)	Länge: 179,90m Breite: 32,20m Tiefgang: 21,62m	The Solent West Bramble	Verlust der Manövrierfähigkeit auf Grund gelaufen	40°
20.01.2018	CMA CGM G. Washington (MAIB, 2020)	Länge: 365,96m Breite: 48,00m Tiefgang: 11,50m	Nordpazifik	137 Container über Bord 85 Container beschädigt	20°
09.10.2018	MC Maersk Jaipur (MSIU, 2019)	Länge: 222,15m Breite: 30,00m Tiefgang: 8,00m	Nordpazifik Beringmeer	1 Person tödlich verletzt	30-35°
02.01.2019	MSC Zoe (PMA, DSB, BSU, 2020)	Länge: 395,46m Breite: 59,00m Tiefgang: 16,00m	Deutsche Bucht	342 Container über Bord 1047 Container beschädigt	<10° (noch offen) T = 8-11s

In der Tabelle 1 ist die JRS Canis mit 129,20m Länge das kürzeste untersuchte Schiff und ist dreimal kleiner als das größte untersuchte Schiff mit 395,46m Länge (MSC Zoe). Die weiteren Schiffe sind in ihren Längen zwischen diesen beiden Extremen positioniert und weisen keinerlei Übereinstimmung in den Schiffslängen auf. Für die Breiten und Tiefgänge der Schiffe sind

ebenfalls keine Übereinstimmungen oder Muster zu erkennen, die darauf schließen lassen könnten, dass bestimmte Schiffsmaße anfälliger für das schnelle Rollen wären. Betrachtet man die Orte der Unfälle sind ebenfalls keine spezifischen Orte zu benennen. Jedoch sind alle aufgezählten Schiffe, Frachtschiffe und im Besonderen zum größten Teil Containerschiffe. Laut der einzelnen Unfallberichte erfuhren diese Schiffe sehr hohe Rollwinkel innerhalb kürzester Zeit von 8-20 Sekunden. Dieses schnelle und starke Aufrollen wird in der Schifffahrt als parametrisches Rollen bezeichnet. Während einfaches Rollen des Schiffes durch seitlich einkommende Wellen angeregt wird, wird das parametrische Rollen durch vorliche¹ oder achterliche² Wellen angeregt. Wenn nun bestimmte Proportionen der Wellenlänge und -periode zur Schiffslänge, -geschwindigkeit, -eigenrollperiode und -kurs herrschen, kann es zu diesen starken und plötzlich auftretenden Rollbewegungen führen (ABS, 2019). Das Schiff verliert in diesem Moment an Stabilität³ (Kapitel 212.2 Die Schiffsstabilität, das parametrische Rollen, die Bedingungen und die Wahrscheinlichkeitsberechnung, Seite 21) und dies kann im schlimmsten Fall zum Kentern führen. Ein Abwenden des parametrischen Rollens ist nur durch eine Kurs- oder Geschwindigkeitsänderung möglich, da die übrigen Parameter feste Werte in einer akuten Situation sind. Zusätzlich kann das parametrische Rollen nicht zum Zeitpunkt des Auftretens verhindert werden, da dieses zu schnell zu Extremwerten neigt, sodass es im Vorfeld vorhersagbar sein muss, um eine rechtzeitige Gegenmaßnahme einzuleiten. Hierzu muss wiederum die aktuelle Wellensituation um das Schiff zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort bekannt sein.

1.2 Problemstellung

Das Erkennen dieser oben genannten aktuellen Wellensituation um das Schiff zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort der Welt, als auch die Gefahrenerkennung des parametrischen Rollens sind hierbei eine große Herausforderung. Während modernste Technik an Bord der Schiffe, die Schiffsführung unterstützt Schlecht-Wettergebiete zu umfahren und Assistenzsysteme zwar das Rollen vermeiden soll, können die akuten Situationen des parametrischen Rollens derzeit nicht vorhergesagt werden. Dies liegt zu einem an den Wetterdaten, welche lediglich Abschätzungen für bestimmte Seegebiete sind und zum anderen, dass keine ausreichende Datengrundlage für das parametrische Rollen existiert.

Hier werden mittels Wellenbojen und empirischen Daten Prognosen zu den aktuellen Wellen zusammengestellt und der Schifffahrt zur Verfügung gestellt. Dies führt dazu, dass lediglich Gebiete umfahren werden, für welche schlechtes Wetter vorhergesagt wurde, jedoch ist dies

¹ Für ein Schiff von vorne kommende Wellen

² Für ein Schiff von hinten kommende Wellen

³ Fähigkeit eines Schiffes sich eigenständig wieder aufzurichten

bezugslos zum parametrischen Rollen, welches in keiner Abhängigkeit zum schlechten Wetter steht. Des Weiteren sind derzeit noch keine Datenbanken des parametrischen Rollens verfügbar. Dies liegt zum einen daran, dass dieses Phänomen in der Realität selten auftritt und zum anderen, dass die Simulation des parametrischen Rollens an viele Bedingungen geknüpft ist.

Eine große Herausforderung ist demnach die aktuelle See um ein fahrendes Schiff herum zu definieren und das parametrische Rollen vorzeitig zu identifizieren, sodass die Schiffsführung in der Lage wäre, Gegenmaßnahmen einzuleiten.

1.3 Herleitung der Forschungsfragen

Für die Herleitung der Forschungsfragen werden existierende Methoden zur Berechnung der aktuellen See und der Identifizierung des parametrischen Rollens herangezogen.

Ziel dieser Methoden ist es die Variablen in der Seegangsspektrums-Formel¹ (Details in Kapitel 2.1 Der aktuelle Seegang und die Wellenspektren, Seite 13) mittels Umweltdaten zu gewinnen. Ein Nachteil dieser Methoden ist die Vielzahl an Parametern, welche benötigt werden, um ein Seegangsspektrum abzubilden, daher versuchen die nachfolgenden Methoden eine Vereinfachung des Spektrums zu erreichen, welches wiederum die Genauigkeit reduziert. Es werden drei Herangehensweisen unterschieden: *parametrische*², *nicht-parametrische*³ und *andere Methoden* (Details in Kapitel 3.1, Seite 33). Zu den *parametrischen Methoden* zählt die Wellenbojen Analogie von Nielsen (Ulrik Dam Nielsen, 2008), welche das Schiff als Boje betrachtet und durch an Bord befindliche Sensoren, Daten über den Seegang sammelt und daraufhin ein Wellenspektrum abschätzt. Auffällig ist hier eine hohe Anzahl unterschiedlicher Sensoren und eine nicht zu vernachlässigende Umrüstung des Schiffes. Eine weitere parametrische Methode ist von Muñoz (Muñoz, 2014). Diese Methode basiert auf Nielsen (Ulrik Dam Nielsen, 2006) und Iseki und Ohtsu (Iseki und Ohtsu, 1998) und verwendet das JONSWAP-Spektrum, um die Unbekannten in der Herleitungs-Formel zu eliminieren und somit eine Vereinfachung des wahren Spektrums zu erhalten, wobei auch hier das Schiff als Wellenboje angenommen wird, um die Umgebungsdaten zu erhalten. Zu einer *nicht-parametrischen Methode* gehört *Schwarz-Röhr* (Schwarz-Röhr, NtambaNtamba, und Härting, 2016), welcher mittels des Response Amplitude Operators (RAO)⁴ und der Lösung der Verteilerfunktion arbeitet. Ein noch nicht gelöstes Problem dieser Methode, ist die unzureichende Identifizierung des Schiffsschwerpunktes, um von der Schiffsbewegung auf die See zu schließen. *Iseki und Ohtsu* (Iseki und Ohtsu 1998) schätzen das Wellenspektrum mittels

¹ Seegangsspektren sind die prognostischen Variablen numerischer Vorhersagemodelle (www.rc.dwd.de)

² Daten aus einer bestimmten Verteilung, meistens einer Normalverteilung

³ keinerlei Annahmen zur Verteilung der Daten

⁴ Die Antwortamplitudenoperatoren sind Übertragungsfunktionen, welche dazu dienen die Auswirkung eines Seezustandes auf die Bewegung eines Schiffes zu bestimmen

eines Bayes'sches Modellierungsverfahren (Akaike, 1980) ab, welches stochastisch ist. Eine weitere Herangehensweise wird von *Johnson und Wilson* (Johnson und Wilson, 2005) vorgestellt. Hier handelt es sich um eine statistische Methode und besitzt derzeit noch eine Fehlerquote von 45%. Wie in der Problemstellung vorgestellt, werden die Wellen und der Seegang geschätzt. Eine weitere Methode ist *WaveSignal SigmaS6*, welches auf WaMoSII der OceanWavesS GmbH (Hilmer und Thornhill, 2015) basiert und ein Warnsystem vor Wellen in einem bestimmten Zeitfenster darstellt, indem ein Wellenfeld vorhergesagt wird, welches aus statistischen Seegangsparametern sowie aus nautischen X-Band-Radargeräten abgeleiteten dreidimensionalen Höhenkarten der Meeresoberfläche besteht.

Die Methoden für die Seegangsberechnungen sind Abschätzungen und bilden nicht das wahre reine Spektrum um ein Schiff wieder. Daraus ergibt sich die erste Forschungsfrage (F1).

F1 Kann der aktuelle Seegang (Wellenhöhe, -periode, -länge) durch die Eigenbewegung des Schiffes mittels an Bord befindlicher Sensoren berechnet werden?

Weiterführend existieren Methoden zur Identifizierung des parametrischen Rollens, welche bereits unterstützend der Schiffsführung zur Verfügung gestellt werden (Details in Kapitel 3.2 Auftrittswahrscheinlichkeit von parametrischem Rollen, Seite 36). Hauptmerkmal und Basis aller Methoden sind die verwendeten Bedingungen, welche als Voraussetzung des parametrischen Rollens gesetzt werden (siehe Kapitel 2.2 Die Schiffstabilität, das parametrische Rollen, die Bedingungen und die Wahrscheinlichkeitsberechnung, Seite 21). In der Auswahl und Anzahl dieser Bedingungen unterscheiden sich die Methoden elementar. Die Bedingungen selbst sind Proportionalitäten zwischen der Schiffslänge, Wellenlänge, Begegnungswinkel, Rollperiode und Begegnungsperiode. Während die International Maritime Organization IMO (IMO, 2007) einen Leitfaden unter Heranziehen von drei Bedingungen für das parametrische Rollen erstellt hat, erweitert die OCTOPUS Software (Acomi u. a., 2016) diese Bedingungen mit zwei weiteren und nutzt somit fünf Bedingungen. S.Ribeiro und C.G. Soares (Ribeiro e Silva und Guedes Soares, 2013) verwenden zwei der oben genutzten Bedingungen und eine neue. Deren Methode basiert auf ein nichtlineares Streifenmodell. Diese drei Methoden resultieren in einem Polardiagramm¹, welches der Schiffsführung Gefahrenbereiche für wahrscheinliches parametrisches Rollen für bestimmte Geschwindigkeiten und Begegnungswinkel widerspiegelt. Die Problematik hierbei ist,

¹ Grafische Darstellung wirkender Kräfte (Wellen) auf einen angeströmten Körper (Schiff) für verschiedene Begegnungswinkel

dass zu jeder Wellenhöhe in Kombination mit jeder Wellenperiode ein Plot existiert und somit die Schiffsführung zum einen keine automatische Empfehlung erhält und zum anderen zur aktuellen Situation den jeweiligen Plot aus dem an Bord befindlichen analogen oder digitalen Katalog wählen muss. Eine weitere Methode ist PAROLL (DNVGL, 2014) von Det Norske Veritas Germanischer Lloyd. Sie verwendet 3 Bedingungen und ist sensorbasiert. Sie warnt schiffsunabhängig vor hohen Rollwinkeln, hat jedoch durch eine nicht konkretisierte Auswahl der Parameter eine hohe Fehlerquote und neigt somit zu Fehlalarmen im laufenden Betrieb.

Die existierenden Methoden bedienen sich vier Hauptbedingungen (ABS, 2019), welche das parametrische Rollen begünstigen. Weiterführend werden in unterschiedlichen Quellen vier weitere Bedingungen (BSU, 2008) (ABS, 2019) (Malenica et al., 2021) genannt, welche derzeit keine Verwendung in den existierenden Methoden finden. Eine zweite Forschungsfrage (F2) kann nun der ersten angestellt werden:

F2 Wie kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens parametrischen Rollens abhängig von der Umgebung (Wetter) und schiffsspezifisch exakt berechnet werden?

Um nun das parametrische Rollen vorherzusagen, existieren zwei Ansätze. Zu einem von MARIN (Gunsing und Wageningen, 2010) und zum anderen von Hilmer & Thornhill (Hilmer und Thornhill, 2015) (siehe Details in Kapitel 3.3 Aktuelle Systeme zur Vorhersage von parametrischem Rollen, Seite 38). Die erste Methode basiert auf einer schiffsspezifischen Einsatzgrenze und kann große Rollwinkel vorhersagen. Letztere ist ein Echtzeitsystem zur Warnung vor Wellen und bedient sich statistischer Daten und einem Wellenradar, allerdings ohne direkten Bezug zum parametrischen Rollen.

Beide Methoden sind nicht auf das parametrische Rollen spezifiziert, sodass sich eine dritte Forschungsfrage (F3) anschließen lässt:

F3 Wie kann die Gefahr des Auftretens des parametrischen Rollens für ein definiertes Aktionsintervall vorhergesagt werden?

Die oben untersuchten Methoden und Systeme, welches sich dem Thema des parametrischen Rollens widmen, dienen derzeit maximal zur Identifizierung des parametrischen Rollens. Weder existiert eine explizite Vorhersage des parametrischen Rollens noch in irgendeiner Art und Weise

Empfehlungen für Gegenmaßnahmen. Die Schiffsführung muss allein basierend auf deren Erfahrungen den Kurs oder die Geschwindigkeit verändern, um potenzielle Gefahrensituationen zu vermeiden. Weder die existierenden Frühwarnsysteme gegen Rollen oder schlechtem Wetter, noch aktuelle Assistenzsysteme greifen unterstützend in den Prozess der Gegenmaßnahmen ein. Nicht allein für die aktuelle Schifffahrt, sondern insbesondere auf den Weg in die autonome Schifffahrt ist ein Assistenzsystem zur Vermeidung parametrischen Rollens mittels adäquater Empfehlungen im Aktionszeitraum ein wichtiger Bestandteil für die Sicherheit auf See. Es ergibt sich die letzte Forschungsfrage (F4) im Anschluss zu den ersten drei Forschungsfragen:

F4 Wie könnte ein Assistenzsystem basierend auf den Vorhersagen und Wahrscheinlichkeiten aussehen, welches parametrisches Rollen durch rechtzeitige, automatisch ermittelte Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlungen verhindert?

Die Arbeit umfasst daher die Bearbeitung der folgenden vier aufeinander aufbauenden Forschungsfragen, deren Lösungen im Rahmen dieser Dissertation eine sichere Vermeidung von Schiffsunglücken durch parametrisches Rollen ermöglicht:

F1 Kann der aktuelle Seegang (Wellenhöhe, -periode, -länge) durch die Eigenbewegung des Schiffes mittels an Bord befindlicher Sensoren berechnet werden?

F2 Wie kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens parametrischen Rollens abhängig von der Umgebung (Wetter) und schiffsspezifisch exakt berechnet werden?

F3 Wie kann die Gefahr des Auftretens des parametrischen Rollens für ein definiertes Aktionsintervall vorhergesagt werden?

F4 Wie könnte ein Assistenzsystem basierend auf den Vorhersagen und Wahrscheinlichkeiten aussehen, welches parametrisches Rollen durch rechtzeitige, automatisch ermittelte Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlungen verhindert?

Aus den bis hier geführten Recherchen zur Herleitung der Forschungsfrage, lässt sich folgende Zielsetzung dieser Arbeit herauskristallisieren.

1.4 Zielsetzung der Arbeit und ihre Abgrenzung zu bestehenden Ansätzen

Aus den vorigen Kapiteln ergibt sich folgende Zielsetzung dieser Arbeit (siehe Abbildung 1):

Ein Assistenzsystem zur Vermeidung parametrischen Rollens

1. Berechnung und Bewertung des aktuellen Seeganges aus der Eigenbewegung eines Schiffes unter Verwendung an bordbefindlicher Sensorik (01a, 01b),
2. Wahrscheinlichkeitsberechnung unter Verwendung aller möglichen Bedingungen des parametrischen Rollens in der akuten Situation (02),
3. Vorhersage des parametrischen Rollens mittels künstlicher Intelligenz für einen gewissen Zeitraum (03), und
4. Kurs- und/oder Geschwindigkeitsempfehlung, um parametrisches Rollen zu verhindern (04)

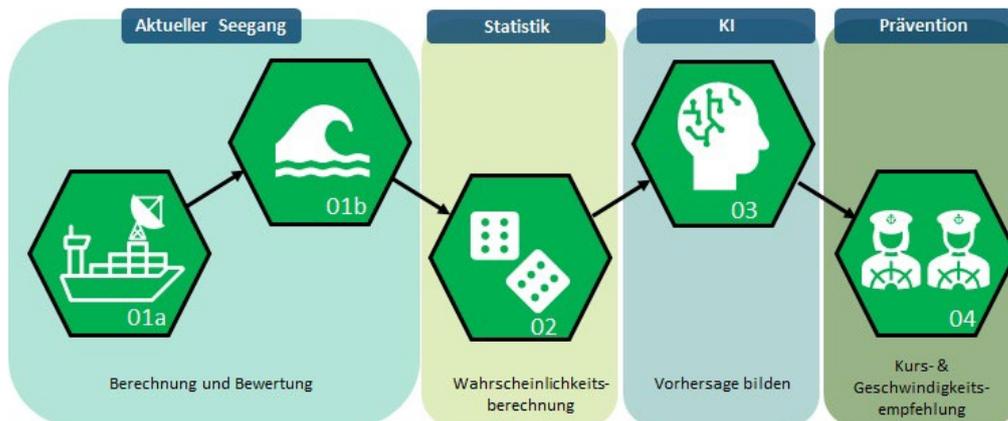


Abbildung 1: Zielsetzung der Arbeit

Bezugnehmend auf die relevanten Vorarbeiten grenzt sich diese Arbeit zu anderen Methoden und Ansätzen ab, indem:

1. ein geringer sensorischer Aufwand benötigt wird und auf die Bewegungsgleichung des Schiffes verzichtet wird, um den Rechenaufwand gering zu halten und die Systemstabilität zu gewährleisten,
2. die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens mittels Simulation berechnet werden, um eine höhere Genauigkeit und somit geringere Fehlerquoten zu erreichen. Hierbei sollen alle Bedingungen verwendet werden,
3. das Auftreten mittels einer künstlichen Intelligenz vorhergesagt wird, um
4. eine Kurs- und/oder Geschwindigkeitsempfehlung zur rechtzeitigen Vermeidung des parametrischen Rollens auszugeben, und
5. das parametrische Rollen wird eindeutig definiert und klassifiziert

Die Besonderheit dieser Arbeit, ist die Synergie des Fachwissens aus der Schiffsdynamik mit den Kenntnissen des parametrischen Rollens samt den Ursachen und Wirkungen und die Anwendung einer künstlichen Intelligenz zur aktuellen Analyse, Vorhersage, Optimierung und die Lernfähigkeit eines auf dem Schiff installierten Systems.

1.5 Primäre Anforderungen an ein Assistenzsystem

Aus den Forschungsfragen und der Zielsetzung ergeben sich folgende vier primären Anforderungen an ein Assistenzsystem:

A1: Spezifischer Vorhersagezeitraum

Das System muss in der Lage sein, in einem bestimmten Zeitraum parametrisches Rollen vorherzusagen, um der Besatzung ausreichend Zeit für Gegenmaßnahmen zu geben. Die einzige bekannte Methode, welche derzeit in der Lage in einem Zeitraum von 1.5 bis 12 Minuten eine Vorhersage zu treffen ist von MARIN (Gunsing und Wageningen, 2010). Jedoch ist eine zusätzliche Schwierigkeit, die Beschaffenheit des parametrischen Rollens (ABS, 2019), welches sich innerhalb 2-3 Rollperioden stark aufbauen kann und somit eine Vorhersage erschwert. Die Rollperiode wiederum ist schiffspezifisch. Der Vorhersagezeitraum ist ebenfalls abhängig von den Schiffseigenschaften, die Geschwindigkeit zu reduzieren oder den Kurs zu ändern. Dementsprechend ist der notwendige Vorhersagezeitraum stark abhängig von der Manövrierfähigkeit des spezifischen Schiffes. Durch weitere spezifischere Berechnungen wird dieser Punkt zu einem späteren Zeitpunkt vertieft (siehe Kapitel 2.4 Vorhersagezeitraum für eine Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlung, Seite 30), sodass zunächst ein Vorhersagezeitraum von 1.5 bis 12 Minuten angesetzt wird. Aus diesem Punkt ergibt sich die Notwendigkeit der Anwendung einer künstlichen Intelligenz, welche eine Vorhersage auf einem sich bewegenden fahrenden Schiff berechnen können muss. Daraus ergibt sich die zweite Anforderung wie folgt.

A2: Autarkie

Die Verfahren bei der IMO und den Klassen, um autonome System zuzulassen sind derzeit noch nicht komplett ausgearbeitet. Hierbei spielen viele Aspekte eine wichtige Rolle, wie zum Beispiel die Cyber-Sicherheit, Datenspeicherung und Datentransfer. Hierzu hat der Schiffssicherheitsausschuss (MSC¹) der IMO hat auf seiner 103. Sitzung im Mai 2021 ein Verfahren zur Analyse einschlägiger Schiffssicherheitsverträge abgeschlossen, um zu beurteilen, wie autonome maritime Oberflächenschiffe (MASS²) reguliert werden könnten (MSC.1-Circ.1638,

¹ Maritime Safety Committee, befasst sich mit allen Fragen der Sicherheit im Seeverkehr und der Gefahrenabwehr im Seeverkehr, die in den Zuständigkeitsbereich der IMO fallen und sowohl Fahrgastschiffe als auch alle Arten von Frachtschiffen betreffen

² Maritime Autonomous Surface Ships

2021). Ebenso haben die Klassen bereits erste Anleitungen für den sicheren Einsatz neuartiger Technologien bei der Anwendung von autonomen und/oder ferngesteuerten Schiffsfunktionen, sowie empfohlene Arbeitsabläufe zur Erlangung der Zulassung veröffentlicht. Es existiert somit ein allgemeiner Rahmen, welcher gewährleisten soll, dass die Anwendung solcher neuartiger Konzepte und Technologien zu einem Sicherheitsniveau führen (DNVGL-CG-0264, 2018). Für autonome Systeme, welche mit dem Schiffsnetz verbunden werden, müssen eine Vielzahl an Vorschriften erfüllt werden, um das Schiff, die Crew und die Umwelt vor unbefugten Zugriffen zu schützen (DNVGL-CG-0264, 2018). Daher sollte ein neues autonomes System autark Daten aufnehmen und verarbeiten können und nicht in Verbindung mit dem Schiffsnetz stehen. Dies gilt ebenso für die Datenaufnahme über Sensoren, als auch die Verarbeitung der Daten.

A3: Erreichbarkeit und Anwendbarkeit

Wie auch die Methoden zur Identifizierung von parametrischem Rollen (IMO Leitfaden (IMO, 2007), OCTOPUS Software (Acomi u. a., 2016), Polardiagramme (Ribeiro e Silva und Guedes Soares, 2013), als auch Vorhersagemethoden MARIN (Gunsing und Wageningen, 2010) und Hilmer & Thornhill (Hilmer und Thornhill, 2015), sollte das System gut erreichbar und anwendbar für die Schiffsführung sein (ABS, 2019) und somit auf der Brücke positioniert sein. Von hier kann die Schiffsführung schnellstmöglich in den Kurs und/oder Geschwindigkeit eingreifen und zusätzlich ist während der Fahrt immer eine Person auf der Brücke vorzufinden (GL DNV, 2016).

A4: Zulassung

Ein Vorhersage-Assistenzsystem, welche mit einer künstlichen Intelligenz ausgestattet sein soll, kann nur seinen Zweck erfüllen, wenn es im Schiffsbetrieb eingesetzt werden kann. Hierzu sind die Zulassungen der Klasse und des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie erforderlich. Diese Zulassungen sind an die aktuellen Regelungen für autonome Schiffe gebunden, welche derzeit noch nicht vollständig ausgearbeitet sind (siehe Anforderung A1).

1.6 Übertragbarkeit

Durch die Gegebenheit, dass das angestrebte Assistenzsystem die Bewegung des Schiffes zunächst erfasst, dann analysiert und zuletzt weitere Bewegungen vorhersagt, kann unter Bezugnahme bestimmter Grenzwerte (NORDFORSK (NORDFORSK, 2000), STANAG (NATO, 2000), ISO (ISO, 1997) und DNVGL (DNV GI Rules and Standards, 2019) eine Vorhersage der Überschreitung für Motion Sickness¹, Sea Sickness² und leichte bis schwere Arbeit erfolgen. Dies

¹ Entsteht durch fehlende Übereinstimmung der Wahrnehmung von Bewegung und der tatsächlichen Bewegung (Kinetose) (<https://www.eurapon.de/themen/lexikon-der-krankheiten/magen-darm/reisekrankheit>, 2022 zugegriffen)

² Seekrankheit ist eine Unterform der Motion Sickness

ist besonders für Schiffstypen wie Kreuzfahrtschiffe oder Forschungsschiffe relevant. Somit könnte das System nicht typspezifisch, sondern schiffstypenfrei für unterschiedliche Zwecke genutzt werden.

1.7 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit ergibt sich aus Kapitel 1.4 *Zielsetzung der Arbeit und ihre Abgrenzung zu bestehenden Ansätzen*, indem folgende vier Themenbereiche die Grundstruktur bilden:

- a. der aktuelle Seegang um ein fahrendes Schiff
- b. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von parametrischem Rollen
- c. Die Vorhersage des Auftretens von parametrischem Rollen
- d. Geschwindigkeits- und Kursempfehlung zur Vermeidung von parametrischem Rollen

Daher fügt sich zunächst ein Kapitel über die *Grundlagen* (Kapitel 2, Seite 13ff) der vier Themenbereiche an. Hier werden eingangs die Wellenspektren und die einzelne Welle dargestellt, um einen Seegang zu beschreiben. Gefolgt von den Bedingungen des parametrischen Rollens, zwecks der Wahrscheinlichkeitsberechnung dessen. Darauf werden erste Kenngrößen (Grenzwerte) des parametrischen Rollens erstellt, welche als Eingabeparameter für ein Vorhersagemodell dienen sollen.

Im dritten Kapitel *Existierende Ansätze für den Seegang, das parametrische Rollen und dessen Vorhersage* (Kapitel 3, Seite 33ff) werden zunächst die existierenden Ansätze für die Berechnung des aktuellen Seeganges eingehend untersucht, sodass folglich die bestehenden Arbeiten über Wahrscheinlichkeitsberechnungen des parametrischen Rollens diskutiert werden und im Weiteren werden Ansätze zu dessen Vorhersage erläutert. Zuletzt werden Ansätze zur Geschwindigkeits- und Kursempfehlungen betrachtet.

Aufbauend auf die Grundlagen und den existierenden Ansätzen, wird im vierten Kapitel *das Verfahren für die Vorhersage und Vermeidung parametrischen Rollens* (Kapitel 4, Seite 41ff) vorgestellt. Das Verfahren teilt sich in drei Schritte auf, welche nacheinander beschrieben werden. Beginnend mit dem ersten Schritt, welcher das Verfahren zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten mittels des Regelwerkes beschreibt, wird zunächst ein Baumdiagramm aufgestellt und dann parametrisiert. Darauf folgt die Beschreibung der durchgeführten Simulationen und das Labeln, sowie Klassifizieren der Simulationsdaten. Auf Basis dessen wird ein Baumdiagramm mit den Wahrscheinlichkeiten des Auftretens des parametrischen Rollens auf Basis des Regelwerkes aufgestellt. In Schritt 2, welcher das Verfahren der Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten aus einer künstlichen Intelligenz (KI) beschreibt, wird ein Random Forest Algorithmus für eine Vorhersage angewandt und getestet. Im dritten Schritt wird die Herleitung der Empfehlung für einen Kurs oder einer Geschwindigkeit zur Vermeidung parametrischen Rollens vorgestellt. Diese drei Schritte

basieren auf aktuelle Messdaten von an bordbefindlicher Sensorik, welche mittels entsprechender Berechnungen, die notwendigen Parameter ermitteln. Diese Berechnungen werden zum Schluss des Kapitels einzeln betrachtet. Hierzu werden die benötigten Eingangsdaten wie die Beschleunigungen, der Wind und die notwendigen Schiffparameter kurz beschrieben, sodass die erste Berechnung für die benötigte Windrichtung und -geschwindigkeit aufgeführt wird und die darauf aufbauenden Kalkulationen für die Wellenparameter und Seegang-Spektren dargestellt werden. In diesem Zuge werden die Beschleunigungen an jedem Ort des Schiffes berechnet, um einen späteren Mehrwert zu erreichen. Des Weiteren wird die Kalkulation des Gewichtsschwerpunktes vorgestellt.

Im fünften Kapitel *die abschließende Betrachtung des Verfahrens zur Vermeidung parametrischen Rollens* (Kapitel 5, Seite 79ff) und Auswertung der drei Schritte des Konzeptes werden die Ergebnisse mit den existierenden Ansätzen verglichen und betrachtet. Es findet eine Bewertung der Ergebnisse statt.

In Kapitel 6 *Installation an Bord verschiedener Schiffe* (Kapitel 6, Seite 83ff) werden der Aufbau des Systems und die Messdatenerhebungen auf verschiedenen Schiffen vorgestellt. Es wurden Daten auf einer Fähre, zwei Forschungsschiffen und einem Containerschiff (siehe Abbildung 2) erhoben. Nachdem die Schiffe vorgestellt wurden, folgt die Beschreibung der Eingangsdaten für das System und die verwendete Sensorik und der weiteren Hardware. Zuletzt werden die Ausgangsdaten des Systems dargestellt.

Im siebten Kapitel *Ausblick und Übertragbarkeit* (Kapitel 7, Seite 97ff) werden die Forschungsfragen abschließend betrachtet, zentrale Ergebnisse vorgestellt und die Übertragbarkeit auf andere Schiffe thematisiert. Zuletzt wird ein Ausblick gestellt und die Wertschöpfung der Arbeit dargelegt.



**Abbildung 2: Installation des Systems auf der MSC Madrid der Reederei Offen
(Quelle: www.marinetraffic.com)**

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zum Verständnis der vier Themenbereiche aktueller Seegang (a), Wahrscheinlichkeiten (b), die Vorhersage (c) und die Empfehlung (d) behandelt.

Hierzu wird zunächst der natürliche Seegang mit seinen Komponenten in Unterkapitel 2.1 beschrieben und die Begrifflichkeit eines Seegangsspektrums. Es folgt die Erläuterung in 2.2 der Stabilität eines Schiffes. Nachdem ein Verständnis der See und der Stabilität erlangt wurde, wird das Phänomen des parametrischen Rollens detailliert erläutert, sodass die Ursachen und somit Bedingungen für das Auftreten des parametrischen Rollens beschrieben werden. Im Zuge eines Vorhersagemodells im Unterkapitel 2.3 wird die aktuelle Definition des parametrischen Rollens diskutiert, als auch die für diese Arbeit notwendigen Grenzen innerhalb derer das parametrische Rollen identifiziert werden kann. Im letzten Unterkapitel 2.4 wird das Themenfeld des Vorhersagezeitraumes und rechtzeitige Empfehlungen für Kurs und Geschwindigkeiten erklärt. Zu diesem Zweck wird zunächst das Thema Vorhersagezeitraum diskutiert. Folgend werden maßgebliche Bedingungen für schiffsspezifische Zeitintervalle einer Kurs- und Geschwindigkeitsänderung schiffsunabhängig hergeleitet.

2.1 Der aktuelle Seegang und die Wellenspektren

Die Definition für den natürlichen Seegang samt dessen Spektren ist maßgeblich für ein Verständnis des parametrischen Rollens und ausschlaggebend für eine rechtzeitige Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlung. Um den natürlichen Seegang zu berechnen, bedarf es zunächst dem Verständnis für diesen und deren Komponenten. In der Schiffsdynamik bedient man sich der Seegangstheorie, um den Seegang abzubilden. Die Hauptfundamente der Seegangstheorie bilden die Spektraltechnik und die Streifentheorie (Lewis, 1989). Die Streifentheorie ist eine Methode, die für den Schiffsentwurf genutzt wird und daher für diese Arbeit nicht relevant ist. Die Spektraltechnik dient der Berechnung der Schiffsbewegung und ist somit ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit. Der Vorteil dieser Technik liegt darin, dass sie mathematisch streng dafür vorgesehen ist, dass die Linearität für alle Geschwindigkeiten, Wellenbegegnungswinkel und Wellenfrequenzen gültig ist. Für kleine Schiffsbewegungen und kleine Wellenamplituden ist dies näherungsweise immer wahr. Die Spektraltechnik wird daher weitestgehend für Seegangsberechnungen verwendet. Um die Spektraltechnik zu erläutern, muss zunächst ein Verständnis für den natürlichen Seegang hergestellt werden. Hierzu werden die Komponenten des natürlichen Seeganges einzeln und nacheinander beschrieben. Dies beginnt mit der regelmäßigen Welle, über den regelmäßigen und dann unregelmäßigen Seegang. Die Überlappung unterschiedlicher regelmäßiger Seegänge wiederum bilden ein Seegangsspektrum (Spektraltechnik). Hier bedient sich die Schiffsdynamik bereits existierenden, vordefinierte

Spektralfamilien. Die für diese Arbeit relevanten Spektralfamilien werden im letzten Teil dieses Unterkapitels einzeln beschrieben und dienen zur Abbildung des Seeganges in unterschiedlichen Seegebieten (Lewis, 1989).

Natürlicher Seegang

Der natürliche Seegang ist unregelmäßig, wobei diese unregelmäßigen Wellen aus einem Zufallsprozess entstehen. Hierbei lässt sich der unregelmäßige Seegang als Überlappung (Superposition) einer großen Anzahl regelmäßiger Wellen geringer Höhe und verschiedener Frequenz, die gegeneinander phasenverschoben, unter jeweils verschiedenen Richtungen beschreiben. Im Grenzfall also aus einer unendlich großen Anzahl regelmäßiger Wellen von jeweils unendlich kleiner Höhe (Lewis, 1989). Daher haben die Eigenschaften der regelmäßigen Wellen einen großen Einfluss auf ein Schiff und werden im Folgenden detailliert beschrieben.

Regelmäßige Wellen

Eine regelmäßige Welle wird durch folgende Parameter (siehe Abbildung 3) beschrieben:

- Wellenhöhe $H = 2 * \zeta$ ist definiert als Höhenunterschied zwischen dem Wellenberg und dem nächstfolgenden Wellental
- Wellenamplitude ζ ist die Wellenamplitude der Wellenbewegung
- Wellenlänge $\lambda = \frac{2\pi g}{\omega_0^2}$ ist gegeben durch den horizontalen Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Wellenbergen
- Fortschrittsgeschwindigkeit $c = \frac{\lambda}{T}$ ist die Geschwindigkeit, mit welcher sich ein Wellenkamm fortbewegt
- Wellenperiode T gibt die Zeit an, in der zwei aufeinanderfolgende Wellenberge einen festen Punkt passieren
- Maximale Wellenschräge
 $\alpha_0 = \frac{2\pi}{\lambda} * \zeta = k * \zeta$
- Wellenneigung, -steigung, -steilheit $\frac{H}{d}$
- Wassertiefe d
- Phasenverschiebung ε
- Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
- Kreisfrequenz $\omega = \frac{2\pi}{T}$
- Frequenz der Wellen $f = \frac{1}{T}$

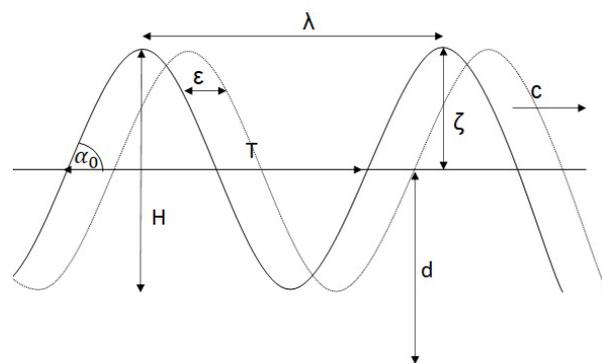


Abbildung 3: Aufbau einer regelmäßigen Welle

Hierbei sind regelmäßige Wellen harmonisch, sinusförmig, langkämmig, schwer, linear und von kleiner Amplitude. Dies bedeutet:

- *Harmonisch*: harmonische Wellen haben eine sinusförmige Geschwindigkeit, Beschleunigung und Bewegung (siehe Abbildung 4).

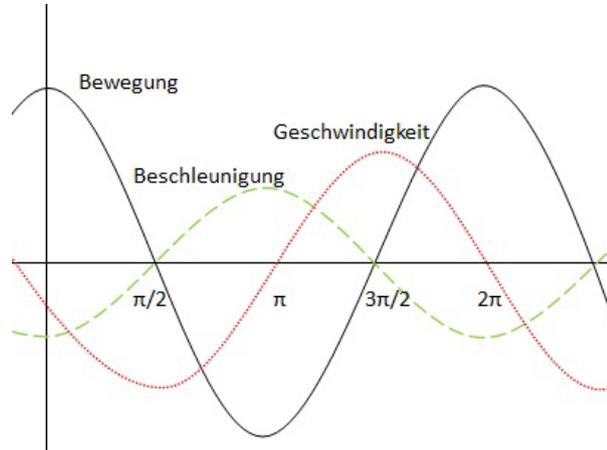


Abbildung 4: Aufbau einer harmonischen Welle

- *Sinusförmig*: die Bahn eines Wellenpartikels ist eine Punkt- und Kreisbewegung und lässt sich in einer kreisförmigen Bewegung und einem trochoiden¹ Profil beschreiben. Für kleine Wellenamplituden (lineare Betrachtung) ist die trochoidale Partikelbewegung näherungsweise sinusförmig. (siehe Abbildung 5)²

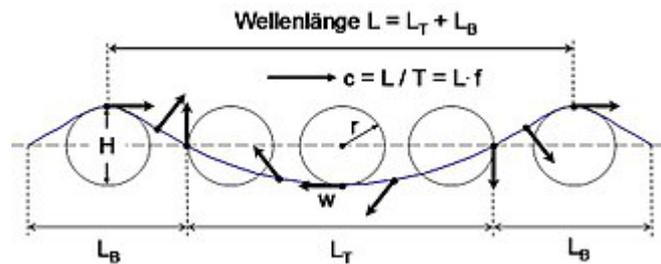


Abbildung 5: Trochoides Profil

- *Langkämmig*: der Kamm ist die Strecke entlang einer Welle auf dem Wellenberg. Es können kurze und lange Käme entstehen. (siehe Abbildung 6)

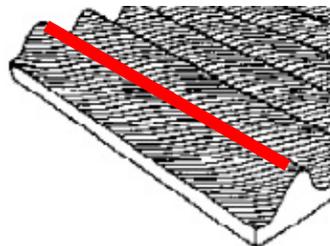


Abbildung 6: langkämmige Welle (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, 2002)

¹ Kurve, welche durch einen ersten Punkt eines rollenden Kreises gebildet wird

² <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserwelle>, zugegriffen am 26.11.2021

- *Schwer*: Mit Hilfe von Bernoulli und dem Kraftpotenzial ergibt sich, dass die Schwerkraft die einzige Kraft ist, die von außen auf die Flüssigkeit wirkt und somit auch die einzige Kraft ist, welche nötig ist, um eine Welle zu erzeugen
- *Linear*: das Schiff wird als lineares System angenommen, sodass eine Erregung eine Antwort bildet. Eine Erregung können die Wellen auf das Schiff sein und die Antwort des Schiffes können Bewegungen, Belastungen, Spannungen oder Beanspruchungen sein. Die Bildung der Antworten wird durch die Verwendung linearer Differentialgleichungen berechnet. (siehe Abbildung 7)

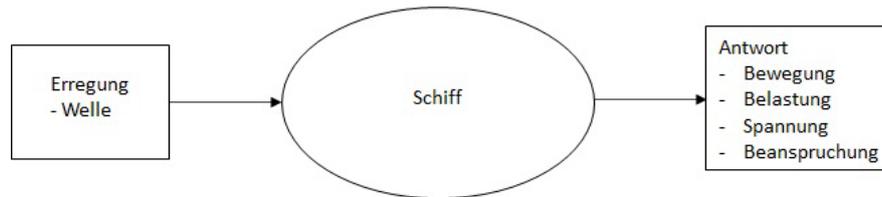


Abbildung 7: Lineares System

Nachdem die Welle und ihre Komponenten beschrieben wurden, folgt nun das Seegangsspektrum. Zusätzlich zur anschließenden Schiffsstabilität kann mit diesem Wissen das parametrische Rollen und die dazugehörigen Bedingungen erklärt werden.

Seegangsspektrum

Die zuvor vorgestellten regelmäßige Wellen bilden zusammen einen regelmäßigen langkämmigen Seegang (siehe Abbildung 8). Diese Art Seegang ist in der Realität eher unwahrscheinlich.

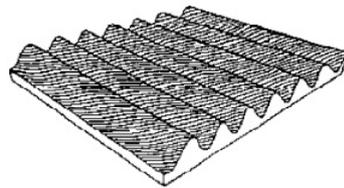


Abbildung 8: Langkämmiger regelmäßiger Seegang (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, 2002)

In der Realität überlagern sich zueinander phasenverschobene Einzelwellen zu einem unregelmäßigen Seegang. Im Falle identischer Wellenrichtung entsteht auch hier ein langkämmiger Seegang wie in Abbildung 9 dargestellt.

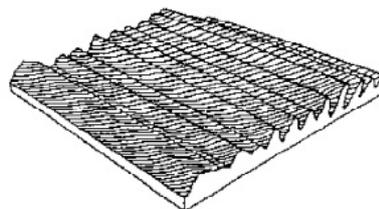


Abbildung 9: Langkämmiger unregelmäßiger Seegang (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, 2002)

Der natürliche Seegang wiederum bildet sich aus der Superposition langkämmiger regelmäßiger Wellen, welche zusätzlich unterschiedliche Laufrichtungen besitzen (siehe Abbildung 10).

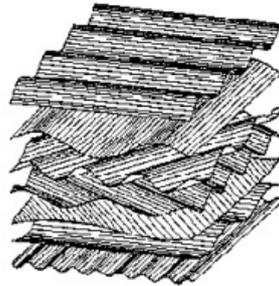


Abbildung 10: Superposition langkämmiger regelmäßiger Wellen (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, 2002)

Daraus ergibt sich ein kurzkämmiger unregelmäßiger Seegang wie abgebildet (siehe Abbildung 11), welcher in der Realität angetroffen werden kann.

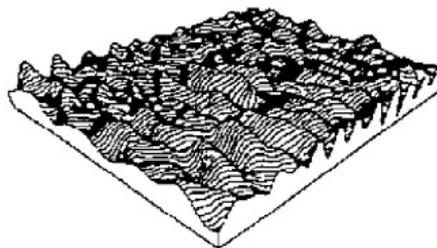


Abbildung 11: Kurzkämmiger unregelmäßiger Seegang (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, 2002)

Diese in Abbildung 11 dargestellte Oberfläche ist durch eine Vielzahl regelmäßiger Wellen i mit jeweils der Wellenamplitude ζ_i , der Phasenverschiebung ϵ_i , die Wellenzahl k_i und die Wellenperiode T_i oder der Kreisfrequenz ω_i definiert (Lewis, 1989). Die Änderung dieser Oberfläche (Oberflächenentwicklung) über den Zeitraum t an einem bestimmten Punkt im Raum, wird durch folgende vereinfachte Formel beschrieben (Denis und Pierson, 1953):

$$\zeta(t) = \sum_i \overline{\zeta_i \cos(-\omega_i t + \epsilon_i)} \quad (1)$$

Nun kann die Oberflächenentwicklung mit der Energie einer Welle in Beziehung gebracht werden, indem ein statistischer Ansatz verwendet wird. Diesen Ansatz nennt man das Varianzdichtespektrum $S(\omega)$, welches proportional seiner Energie ist (Holthuijsen, 2007) und somit ein Indiz für den Schweregrad auf See sein kann. Hierbei kann die Gesamtvarianz E durch die Summierung der Varianz jeder regelmäßigen Wellenkomponente berechnet werden. Wenn nun die Varianz jeder regulären Wellenkomponente bekannt wäre, liefert die Integration des

Varianzspektrums, welche wiederum abhängig von der Kreisfrequenz ω_i ist, eine wichtige Information über den Seegang. Diese Information kann daraufhin genutzt werden, die Antwort eines Schiffes und dessen Stabilität zu berechnen. Des Weiteren muss neben der Kreisfrequenz zusätzlich die Richtung μ jeder Komponente berücksichtigt werden (Lewis, 1989) wie in folgender Formel ersichtlich ist:

$$E = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(\omega, \mu) d\omega d\mu \quad (2)$$

Mittels einer Fourier-Analyse¹ ist man nun in der Lage die einzelnen Amplituden und die einzelnen Komponenten dieses Spektrums zu berechnen. Der Nachteil dieser Berechnung ist die Vielzahl benötigter Parameter (Schwarz-Röhr, NtambaNtamba, und Härting, 2016). Zu diesem Zweck wurden idealisierte Spektren entwickelt. Dies sind Verteilungsfunktionen anhand empirischer Untersuchungen, welche in Abhängigkeit unterschiedlicher Eingangsparameter, Aussagen über das Wellenspektrum treffen können.

Idealisierte Spektren

Idealisierte Spektren sind empirisch abgeleitete Formeln, welche ein Punktspektrum $S(\omega)$ mittels weniger Parameter, wie Wind oder Fetch², beschreiben. Hierbei existieren verschiedene Spektren, welche an verschiedene Verhältnisse der Seegebiete angepasst sind. Somit setzt jedes Spektrum unterschiedliche Grenzen in den Berechnungen, sodass dieses nur für ein bestimmtes Seegebiet angewandt werden kann. In dieser Arbeit werden folgende vier idealisierten Spektren verwendet: (1) das Pierson-Moskowitz, (2) das Bretschneider, (3) das JONSWAP und (4) das Ochi-6-Parameter-Spektrum (Lewis, 1989). Diese vier Spektren stellen eine vollentwickelte, eine sich entwickelnde See, ein Küstengebiet mit konstanter Windrichtung bzw. eine multiple See dar.

1. Das Pierson-Moskowitz Spektrum (voll entwickelte See) (Lewis, 1989)

basiert auf den Grundlagen von Phillips (Phillips, 1957), welche Pierson und Moskowitz (Pierson und Moskowitz, 1964) empirisch zu einem windabhängigen Spektrum abgeleitet haben. Dabei ist α die Phillips Konstante ($\alpha = 0,0081$), β_{PM} eine empirische Konstante ($\beta_{PM} = 0,74$), g die Gravitation und V_w die Windgeschwindigkeit (19,5m über der Meeresoberfläche).

¹ Zerlegen eines Signals in eine Summe von Sinusfunktionen

² Distanz, über die eine konstante Windrichtung herrscht

$$S(\omega) = \frac{a g^2}{\omega^5} e^{-\beta \frac{g}{V_w}} \quad (3)$$

Da hier Einflüsse von einer Distanz zur Küste mit konstanter Windrichtung (Fetch) und Winddauer vernachlässigt werden, beschreibt dieses Spektrum eine voll entwickelte See und wird hauptsächlich für ozeanographische Zwecke bei stürmischen Bedingungen verwendet.

2. *Das Bretschneider Spektrum* (sich entwickelnde See) (Lewis, 1989)

(Bretschneider, 1952) ist in der Lage, auch andere Spektralfamilien wie zum Beispiel Pierson-Moskowitz, darzustellen, indem die Parameter A_B und B_B angepasst werden.

$$S(\omega) = \frac{A_B}{\omega^5} e^{-\frac{B_B}{\omega^4}} \quad (4)$$

Die ITTC (International Towing Tank Conference, 1978) definiert die Parameter A_B und B_B mit $H_{1/3}$ der charakteristischen Wellenhöhe¹, T_1 der Wellenperiode, T_m der mittleren Wellenperiode und ω_m der mittleren Kreisfrequenz für eine sich entwickelnde See wie folgt:

$$A_B = 173 \frac{H_{1/3}^2}{T_1^4}$$

$$B_B = \frac{691}{T_1^4}$$

$$T_1 = 0,773 T_m$$

$$0,857 T_m = \frac{5,385}{\omega_m}$$

3. *Das JONSWAP Spektrum* (Distanz zur Küste und damit konstante Windrichtung) (Lewis, 1989)

Beruht auf dem Joint North Sea Wave Observation Project (JONSWAP), in welchem Hasselmann und Kollegen (Hasselmann et al. 1973) folgende Formulierung veröffentlichten, wobei x der Fetch, α_1 eine Konstante, ω die Kreisfrequenz, ω_m die mittlere Kreisfrequenz, g die Gravitation, γ eine Konstante, φ_j eine Konstante, σ eine Konstante, \tilde{x} eine Konstante, \tilde{f}_m eine Konstante und V_{W10} die Windgeschwindigkeit für 10m über den Meeresspiegel sind.

¹ Mittelwert der 1/3 höchsten Wellen, auch bekannt als kennzeichnende Wellenhöhe

$$S(\omega) = \alpha g \omega^{-5} e^{\left(-\frac{5\omega}{4\omega_m}\right)^{-4}} \gamma^{\varphi_J} \quad (5)$$

$$\varphi_J = e^{-\frac{(\omega-\omega_m)^2}{2\sigma^2\omega_m^2}}$$

Mit

$$\gamma = 3,3$$

$$\sigma = 0,07 \text{ für } \omega < \omega_m$$

$$\sigma = 0,09 \text{ für } \omega > \omega_m$$

$$\alpha_1 = 0,076 \tilde{x}^{-0,22}$$

$$\omega_m = \frac{2\pi \tilde{f}_m g}{V_{W10}}$$

$$\tilde{x} = \frac{gx}{V_{W10}^2}$$

$$\tilde{f}_m = 3,5 \tilde{x}^{-0,033}$$

4. *Das Ochi-6-Parameter Spektrum* (ein wahrscheinliches Spektrum) (Lewis, 1989)

Dieses Spektrum verwendet λ als einen neuen Formparameter (nicht verwechseln mit der Wellenlänge) und $j = 1,2$ steht für die höhere oder niedrigere Frequenzkomponente. Weiterhin ist $\Gamma(\lambda_j)$ die Gammafunktion¹, ω_m die mittlere Kreisfrequenz, ω die Kreisfrequenz, φ_0 eine Konstante und H_s die signifikante Wellenhöhe und ist wie folgt gegeben:

$$S(\omega) = \frac{1}{4} \sum_j \frac{\left(\frac{4\lambda_{j+1}}{4} \omega_{m_j}^4\right)^{\lambda_j}}{\Gamma(\lambda_j)} \cdot \frac{H_{sj}^2}{\omega^{4\lambda_{j+1}}} e^{\varphi_0} \quad (6)$$

mit
$$\varphi_0 = -\frac{(4\lambda_{j+1})}{4} \left(\frac{\omega_{m_j}}{\omega}\right)^4$$

Hierzu entwickelte Ochi statistisch einen spezifischen Katalog von 11 Spektren für eine gegebene signifikante Wellenhöhe. Das erste Spektrum tritt am wahrscheinlichsten mit einer Gewichtung von 0,5 auf und die 10 weiteren mit einer Gewichtung von 0,05 (siehe Tabelle 2, Seite 21).

¹ Erweiterung der Fakultätsfunktion $n!$ von natürliche Zahlen auf komplexe Zahlen

Tabelle 2: Ochi-6-Parameter Wellenspektrum - 6-Parameter Werte in Funktion der signifikanten Wellenhöhe H_s

	H_{s1}	H_{s2}	ω_{m1}	ω_{m2}	λ_1	λ_2
Most Probable Spectrum	$0,84 H_s$	$0,54 H_s$	$0,70e^{-0,046H_s}$	$1,15e^{-0,039H_s}$	3,00	$1,54e^{-0,062H_s}$
0,95 Confidence Spectra	$0,95 H_s$	$0,31 H_s$	$0,70e^{-0,046H_s}$	$0,50e^{-0,046H_s}$	1,35	$2,84e^{-0,102H_s}$
	$0,65 H_s$	$0,76 H_s$	$0,61e^{-0,039H_s}$	$0,94e^{-0,036H_s}$	4,95	$2,48e^{-0,102H_s}$
	$0,84 H_s$	$0,54 H_s$	$0,93e^{-0,056H_s}$	$1,50e^{-0,046H_s}$	3,00	$2,77e^{-0,112H_s}$
	$0,84 H_s$	$0,54 H_s$	$0,41e^{-0,016H_s}$	$0,88e^{-0,026H_s}$	2,55	$1,82e^{-0,089H_s}$
	$0,90 H_s$	$0,44 H_s$	$0,81e^{-0,052H_s}$	$1,60e^{-0,033H_s}$	1,80	$2,95e^{-0,105H_s}$
	$0,77 H_s$	$0,64 H_s$	$0,54e^{-0,039H_s}$	0,61	4,50	$1,95e^{-0,089H_s}$
	$0,73 H_s$	$0,68 H_s$	$0,70e^{-0,046H_s}$	$0,99e^{-0,039H_s}$	6,40	$1,78e^{-0,069H_s}$
	$0,92 H_s$	$0,39 H_s$	$0,70e^{-0,046H_s}$	$1,37e^{-0,039H_s}$	0,70	$1,78e^{-0,069H_s}$
	$0,84 H_s$	$0,54 H_s$	$0,74e^{-0,052H_s}$	$1,30e^{-0,039H_s}$	2,65	$3,90e^{-0,085H_s}$
	$0,84 H_s$	$0,54 H_s$	$0,62e^{-0,039H_s}$	$1,03e^{-0,030H_s}$	2,60	$0,53e^{-0,069H_s}$

Zusammenfassend bildet das *Pierson-Moskowitz Spektrum* eine voll entwickelte See und das *Bretschneider Spektrum* unter Verwendung der ITTC-Parameterwahl eine sich entwickelnde See ab. Somit sind diese beiden Spektren für die offene See anzuwenden. Küstennahe Bereiche, in welchen die konstante Windrichtung durch die Küste begrenzt werden, können mittels des *JONSWAP Spektrum* dargestellt werden. Das *Ochi-6-Parameter Spektrum* ist anzuwenden, wenn ein unbekanntes Seegebiet vorliegt. Für spätere Berechnungen werden diese vier Spektren in dieser Arbeit genutzt, um die aktuelle See unter verschiedenen Bedingungen zu beschreiben.

2.2 Die Schiffstabilität, die parametrische Rollen, die Bedingungen und die Wahrscheinlichkeitsberechnung

In diesem Unterkapitel werden die Bedingungen erläutert, welche dazu führen können, dass ein Schiff parametrisch rollt. Hierzu werden zunächst die Stabilität eines Schiffes und Formparameter erläutert, welche zwingend notwendig sind, um den Stabilitätsverlust während des parametrischen Rollens zu verstehen. Aus den darauffolgenden aufgestellten Bedingungen, welche das parametrische Rollen begünstigen, wird mittels Simulationen die Wahrscheinlichkeitsdarstellung abgeleitet.

Stabilität (Lehmann, 2005)

Stabilität ist die Fähigkeit eines Schiffes, sich einem äußeren Moment zu widersetzen und sich selbst in eine aufrechte Schwimmlage zu bringen. Hierbei können äußere Momente durch eine ungleiche Ladung, Windkräfte, Eis, Manöver oder zum Beispiel Wellen erzeugt werden. Sie wird

Wenn das Schiff nun in eine Schräglage gezwungen wird, bewirkt der Hebelarm h ein aufrichtendes Moment $M_{x,y,z}$, bis das Schiff wieder in einer stabilen Lage liegt. Für einen großen Hebelarm ist daher die Distanz vom Gewichtsschwerpunkt zum Auftriebsschwerpunkt maßgeblich. Während der Gewichtsschwerpunkt im Wesentlichen unveränderlich ist, kann sich der Auftriebsschwerpunkt eines Schiffes im Seegang stark ändern. Dies ist abhängig von der Unterwasserrumpfform und deren Formkoeffizienten. Hierbei sind der Blockkoeffizient c_b und Wasserlinienkoeffizient c_w ausschlaggebend.

Der Blockkoeffizient c_b stellt das Verhältnis des Unterwasservolumens des Schiffes ∇ zum Volumen des Blocks Länge, Breite und Tiefgang dar (siehe Abbildung 14). Die Größe des Blockkoeffizienten ist ein Hinweis auf die Völligkeit eines Schiffes, wobei kleine Blockkoeffizienten für schmale schnelle Schiffe, wie Containerschiffe mit c_b von 0,50-0,70, stehen und große Blockkoeffizienten für langsame Schiffe, wie Massengutschiffe mit c_b von 0,80-0,85 stehen. L_{pp} bezeichnet die Länge zwischen den Loten, wobei dies die Punkte sind, die den Schnittpunkt der Wasserlinie am Vorsteven auf der Konstruktionswasserlinie und den Schnittpunkt Mitte Ruderschaft bilden. B_{mld} bezeichnet die Unterwasserbreite, welche bei Stahlschiffen auf der Außenkante des Spants gemessen wird. Der Tiefgang T_S ist die Höhe von der Unterkante Kiel bis zur Wasseroberfläche und ∇ die Verdrängung des Schiffes. Der Blockkoeffizient wird wie folgt berechnet (Ship Knowledge, 2008):

$$c_b = \frac{\nabla}{L_{pp} * B_{mld} * T_S}$$

Ein zweiter wichtiger Formkoeffizient ist der Wasserlinienkoeffizient c_w . Dieser ist ein Formkoeffizient im Schiffsentwurf, welcher in Kombination mit einem kleinen Blockkoeffizienten c_b eine Größenordnung für die Quer- und Längsstabilität eines Schiffes ist. A_w bezeichnet die Konstruktionswasserlinien, welche die Fläche darstellt, wenn ein Schiff entlang der Wasseroberfläche aufgeschnitten würde.

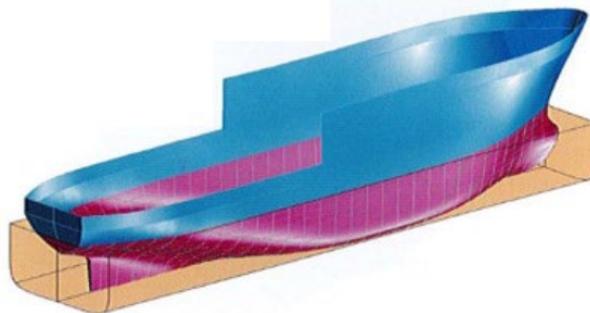


Abbildung 14: Verdrängtes Volumen eines Schiffes (Ship Knowledge, 2005)

Der Wasserlinienkoeffizient c_w ist definiert als (Ship Knowledge, 2005):

$$c_w = \frac{A_w}{L_{pp} * B_{mld}}$$

Im Falle von glatter See ist die Wasserlinienfläche wie abgebildet eine gerade Fläche (siehe Abbildung 15). Wenn sich das Schiff jedoch im Wellenberg oder -tal befindet, kann sie in Abhängigkeit der Rumpfform stark variieren und somit auch die Quer- und Längsstabilität des Schiffes.

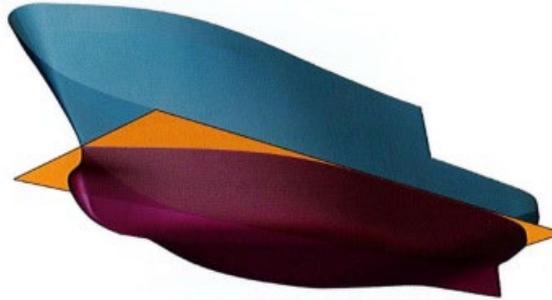


Abbildung 15: Konstruktionswasserlinie A_w (Ship Knowledge, 2005)

Nachdem nun der Gewichtsschwerpunkt, der Auftriebsschwerpunkt, die metazentrische Höhe, der Blockkoeffizient und der Wasserlinienkoeffizient beschrieben wurden, kann im nächsten Schritt der Stabilitätsverlust während des parametrischen Rollens anhand dieser Parameter erklärt werden.

Parametrisches Rollen

Parametrisches Rollen ist eine besondere Form des Rollens eines Schiffes. Während das bekannte Rollen eines Schiffes durch konstante und regelmäßige Anregung provoziert wird und in ein sich langsames aufbauendes Rollen entwickelt, scheint das parametrische Rollen die Grenzen der Dynamik zu ignorieren. Beim parametrischen Rollen wird das Schiff innerhalb weniger Bewegungen bis zum Kentern gebracht und birgt somit eine große Gefahr für die Menschen, Ladung als auch dem Schiff selbst. Hierbei wird das parametrische Rollen durch einen periodischen Wechsel der Längsstabilität des Schiffes über einen kurzen Zeitraum im Wellenberg und -tal bei vorlicher See erzeugt. Dies betrifft insbesondere Schiffe mit einem kleinen Blockkoeffizienten und ausgeweiteten Vorder- und Achterdecks wie zum Beispiel Containerschiffen und Auto/LkW Transportschiffen (The Nautical Institute, 2021).

In der Abbildung 16 und Abbildung 17 ist das Schiff in einem Wellental dargestellt (grün gestrichelte Linie). Hier vergrößert sich die Konstruktionswasserlinie A_w zur Wasseroberfläche, da der Bug und das Heck tiefer in das Wasser eintauchen. Daher erhöht sich der Wasserlinienkoeffizient c_w gegenüber der Ruhelage, was auch die Längsstabilität erhöht. Dies bedeutet, dass das Rückstellmoment sowie die metazentrische Höhe vergrößert sind. Auf dem Wellenberg (orange gepunktete Linie) verhält es sich umgekehrt. Die Wasserfläche nimmt ab, da das Mittschiff tiefer im Wasser liegt, Bug und Heck jedoch aus dem Wasser heraustreten. Dadurch verringert sich die Längsstabilität. Hier sind das Rückstellmoment und die metazentrische Höhe verkleinert.

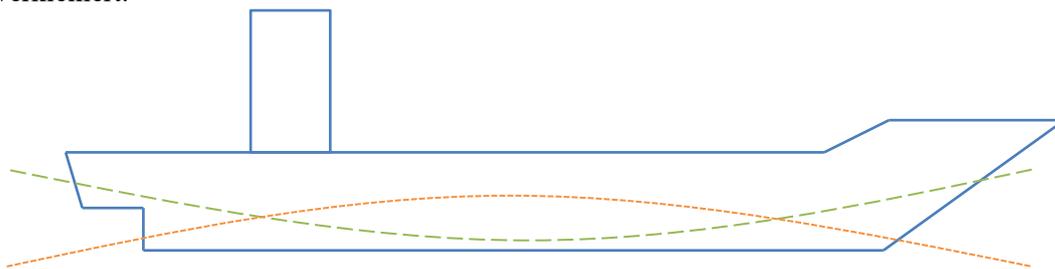


Abbildung 16: Schiff im Wellenberg (orange gepunktet) und -tal (grün gestrichelt)



Abbildung 17: Wasserlinienfläche im Wellental (grün gestrichelt), im Wellenberg (orange gepunktet) und im Glattwasser (blaue Linie)

Folglich ändert sich das Rollrückstellmoment des Schiffes in Abhängigkeit von der Funktion der Längsposition des Schiffes relativ zu den Wellen und die metazentrische Höhe \overline{GM} nimmt periodisch ab und zu. Sind nun die Wellenlänge etwa gleich der Schiffslänge und die Rollperiode des Schiffes etwa doppelt so groß wie die Begegnungsfrequenz, dann entsteht ein aufrichtendes Moment, welches vom Wasser nicht ausreichend gedämpft wird und ein schnelles Aufschaukeln des Schiffes verursacht. Diese Schwingung innerhalb kurzer Zeit wird als parametrisches Rollen oder parametrische Rollresonanz bezeichnet (siehe Abbildung 18, Seite 26).

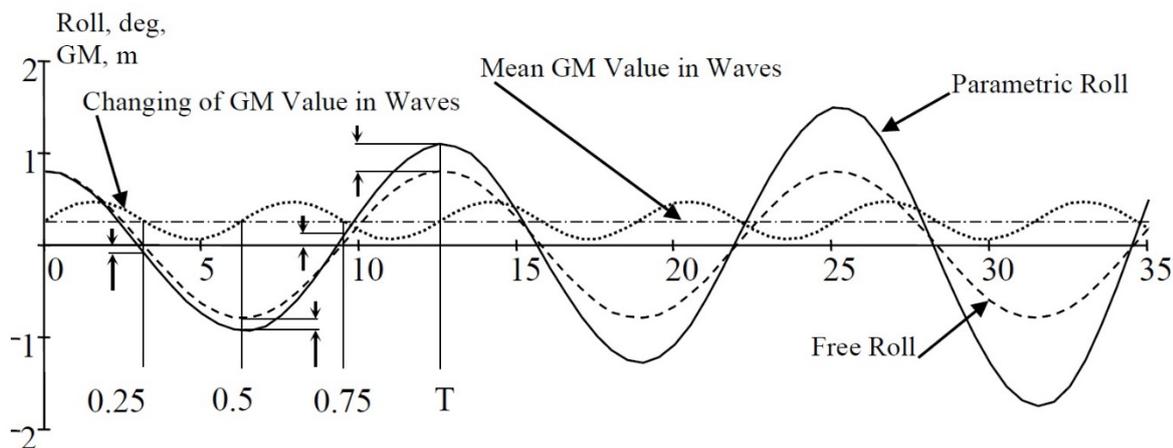


Abbildung 18: Aufbau des parametrischen Rollens (ABS, 2019)

In der Abbildung 18 sind die Rollperioden für das Schiff mit und ohne parametrische Rollen über den Rollwinkel in Grad dargestellt, als auch der periodische Wechsel von GM in Metern über die Zeit in Sekunden. Am Ende des ersten Viertels der Rollperiode T , rollt das Schiff zurück zu seiner Ausgangsstellung auf 0° und rollt dann auf Grund seiner Trägheit weiter. Während des zweiten Viertels begegnet das Schiff einem Wellenberg (GM klein bei 5 Sekunden) und das Rückstellmoment ist nun kleiner als im glatten¹ Wasser, daher rollt das Schiff auf einen größeren Winkel als normalerweise im glatten Wasser. Im dritten Viertel tritt das Schiff in das Wellental ein und ein größeres Rückstellmoment wie im glatten Wasser stellt sich nun der Bewegung entgegen. Diese Situation ist analog zur Situation im ersten Viertel und die Situation im vierten Viertel ist analog zu jener im zweiten Viertel. Rückstellend mit einem größeren Moment als im Glattwasser und mit kleinerem Moment gegen das Rollen gegenwirkend als beim Glattwasser, ergibt sich ein kontinuierlicher wachsender Rollwinkel (parametrische Rollresonanz). Damit diese parametrische Rollresonanz entstehen kann müssen folgende Bedingungen erfüllt sein.

Bedingungen für das Parametrische Rollen (BPR)

Die folgenden *BPR1-4* werden in den einschlägigen wissenschaftlichen Abhandlungen als Hauptbedingungen für das parametrische Rollen genannt (ABS 2019, BSU 2008, IMO 2007, Acomi et al. 2016, Ribeiro e Silva and Guedes Soares 2013, DNVGL 2013). In weiterführenden unterschiedlichen Untersuchungen wurden weitere vier Bedingungen *BPR5-8* identifiziert und evaluiert (Malenica et al 2021, ABS 2019, Ribeiro e Silva and Guedes Soares 2013, Gusing and Wageningen 2010). Diese *BPR5-8* werden, als Erweiterung bestehender Methoden, in dieser Arbeit

¹ Bezeichnung aus der Beaufortskala. Bei 0 Bft (Beaufort) wird die See als völlig ruhig, glatt katalogisiert. Man spricht von einer spiegelglatten See (www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/beaufortskala/1507), Zugriffen am 02.04.2023

zusätzlich verwendet, um eine höhere Genauigkeit und Qualität der in dieser Arbeit entwickelten Methode (bzw. des Systems) zu erreichen.

BPR1: Vorliche Längswellen (0°) ergeben die häufigsten Wechsel der Stabilität und bilden somit die maximalen parametrischen Anregungen (ABS 2019). Die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchungen (BSU, 2008) veröffentlichte einen Bericht, in welchem sie die Begegnungswinkel auf schrägeinkommende See erweiterten, sodass für einen Begegnungswinkel β gilt:

$$315^\circ < \beta < 45^\circ \quad (7)$$

BPR2: Auch achterlich (180°) kommende Wellen ergeben die häufigsten Wechsel der Stabilität und bilden somit die maximalen parametrischen Anregungen (ABS 2019). Die Bundesstelle für Seeunfalluntersuchungen (BSU, 2008) veröffentlichte einen Bericht, in welchem sie die Begegnungswinkel auf schrägeinkommende See erweiterten, sodass für einen Begegnungswinkel β gilt:

$$135^\circ < \beta < 225^\circ \quad (8)$$

BPR3: Parametrische Rollresonanz entwickelt sich, wenn die Periode der Stabilitätsänderung ungefähr dem Doppelten der natürlichen Rollperiode entspricht oder wenn die Begegnungsperiode T_e nahe dem Doppelten der natürlichen Rollperiode T_R ist (ABS 2019).

$$BPR3a \quad T_R \approx 2 \cdot T_e \quad (9)$$

Die BSU (BSU, 2008) veröffentlichte auch hier einen Bericht, welcher die Grenzen wie folgt erweiterte:

$$BPR3b \quad 1,8 \leq T_R/T_e \leq 2,1 \quad (10)$$

BPR4: Die Wellenlänge λ hat einen Einfluss, da sie mit der Wellenperiode verbunden ist und die Begegnungsperiode von der Wellenlänge abhängig ist. Hierbei wird ein Verhältnis zur Schiffslänge L_{pp} aufgebaut (ABS, 2019)

$$BPR4a \quad \lambda \approx L_{pp} \quad (11)$$

Die BSU (BSU, 2008) veröffentlichte auch hier einen Bericht, welcher die Grenzen wie folgt erweiterte:

$$BPR4b \quad 0,7 \leq \lambda/L_{pp} \leq 1,3 \quad (12)$$

BPR5: Die natürliche Rollperiode hängt weiterhin von der metazentrischen Höhe \overline{GM} ab. Die starken Schwankungen von \overline{GM} , wie oben beschrieben, wenn ein Schiff vom Wellental zum -berg wechselt, spielen eine sehr starke Rolle für die Stabilität eines Schiffes. Die Beziehung zwischen der Veränderung von \overline{GM} und der Bedingung *BPR3b* (Formel 10) kann ohne Dämpfung wie folgt vereinfacht werden (Malenica et al, 2021) (siehe Abbildung 19). Hierbei ist \overline{GM}_0 die anfangsmetazentrische Höhe, ω_e die Begegnungskreisfrequenz und ω_0 die Kreisfrequenz des Schiffes.

$$f(x) = -0,25x + 1; \text{ für } 2 < x < 4 \quad (13)$$

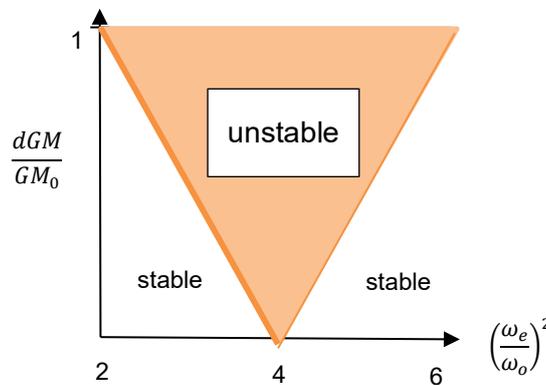


Abbildung 19: Veränderung von \overline{GM}

BPR6: Der zweite Bereich (siehe Abbildung 9) ergibt die sechste Bedingung:

$$f(x) = 0,25x - 1; \text{ für } 4 < x < 6 \quad (14)$$

BPR7: Nach dem Leitfaden für die Bewertung von parametrischer Rollresonanz bei der Konstruktion von Containerschiffen (ABS, 2019) muss folgende Ungleichung erfüllt sein, damit das Schiff anfällig für parametrisches Rollen ist:

$$0,25 - 0,5q - 0,125q^2 + 0,03125q^3 - \frac{q^4}{384} \leq p \quad (15)$$

$$\leq 0,25 + 0,5q$$

$$\text{mit } q = \frac{\omega_0^2}{\omega_e^2} \text{ und } p = \frac{\omega_m - (\mu_{BPR7}\omega_0)^2}{\omega_e^2}$$

$$\text{mit } \mu_{BPR7} = 0,03 \text{ und } \omega_0 = \frac{7,854\sqrt{GM_0}}{B_{mld}}$$

$$\text{und } \omega_m = \frac{7,854\sqrt{GM_m}}{B_{mld}}$$

$$\text{wobei } GM_m = 0,5(GM_{max} + GM_{min})$$

$$\text{für vorliche See: } \omega_e = \omega_e + 0,0524v_s\omega_w^2$$

$$\text{für achterliche See } \omega_e = \omega_e - 0,0524v_s\omega_w^2$$

BPR8: Wenn die Ungleichung (15) erfüllt ist, kann die folgende Gleichung unterstützend genutzt werden (ABS, 2019)

$$\mu \frac{\omega_0}{\omega_e} < qk_1k_2\sqrt{1 - k_3^2} \quad (16)$$

$$\text{mit } k_1 = 1 - 0,1875q^2$$

$$\text{mit } k_2 = 1,002p + 0,16q + 0,759$$

$$\text{und } k_3 = \frac{q^2 - 16}{16q} + \frac{\sqrt{q^4 + 352q^2 + 1024p}}{16q}$$

Diese insgesamt acht Bedingungen für das parametrische Rollen (BPR1-8) werden maßgeblich in dieser Arbeit für die Erstellung der Wahrscheinlichkeiten und der Datenbank für die künstliche Intelligenz sein (siehe Kapitel 4, Seite 41ff). Um die Wahrscheinlichkeiten des parametrischen Rollens mittels der Bedingungen berechnen zu können, wird zunächst die bedingte Wahrscheinlichkeit erläutert.

Mittels der Bedingungen und der bedingten Wahrscheinlichkeit in einem Baumdiagramm wird das Vorgehen zur Vermeidung parametrischen Rollens in Kapitel 4 (Seite 41ff) vorgestellt werden. Die konkreten Baumdiagramme für diese Arbeit werden in Kapitel 4.2.5 (Seite 51ff) vorgestellt.

2.3 Annahmen für simuliertes parametrisches Rollen als Basis für ein Vorhersagemodell

In der Literatur (ABS 2019, BSU 2008, IMO 2007, Acomi et al. 2016, Ribeiro e Silva and Guedes Soares 2013, DNVGL 2013, Gusing and Wageningen 2010) ist das parametrische Rollen als Phänomen bekannt, jedoch existieren keine konkreten Kenngrößen oder Grenzen zu welchem Zeitpunkt ein rollendes Schiff ein parametrisches rollendes Schiff ist. Diese Kenngrößen oder Grenzen sind jedoch essenziell, um in dieser Arbeit spätere Aussagen zur Wahrscheinlichkeit oder Vorhersage treffen zu können. Um nun Kenngrößen einzuführen, welche zu einem späteren Zeitpunkt in dieser Arbeit genutzt werden können, werden die Grundlagen herangezogen.

Aus den Grundlagen für das parametrische Rollen ist bekannt, dass durch das periodische Schwanken der metazentrischen Höhe \overline{GM} , der Rollwinkel ϕ stetig zunimmt. Dies geschieht im Rahmen der Rollperiode T_R des Schiffes bereits innerhalb der ersten Rollperiode, welche

schiffsabhängig ist. Spätestens nach der zweiten Rollperiode T_R ist der Rollwinkel φ gefährlich angewachsen, sodass Rollwinkel über 40° erreicht werden können.

Ohne Einbeziehung von Schiffsspezifika können derzeit lediglich folgende Aussagen für das Begünstigen von parametrischem Rollen getroffen werden:

1. Der Rollwinkel φ steigt stetig an, kein Abfallen
2. Innerhalb der Rollperiode T_R wird φ größer
3. Die metazentrische Höhe \overline{GM} nimmt periodisch ab und zu
4. Für $2 * T_R$ gilt beinahe ein doppelter Rollwinkel φ unter normalen Umständen

Konkrete Kenngrößen werden mit einem spezifischen Schiff in Kapitel 4.2.2 (Seite 46) aufgestellt. Diese dienen zur Berechnung und Simulation des parametrischen Rollens, sodass mit einer konkreten metazentrischen Höhe \overline{GM} , einer Rollperiode T_R des Schiffes und hiervon abhängigen Rollwinkel φ gerechnet werden kann.

2.4 Vorhersagezeitraum für eine Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlung

Das parametrische Rollen erscheint innerhalb einer Rollperiode des Schiffes und kann somit innerhalb kürzester Zeit das Schiff in gefährliche Situationen bringen. Eine aktuelle Vorhersage ist unabdingbar, um parametrisches Rollen rechtzeitig vermeiden zu können. In diesem Unterkapitel wird zunächst untersucht, welchen Zeitrahmen eine Schiffsführung benötigt, um ein Schiff aus dem Gefahrenbereich mittels einer Kurs- oder Geschwindigkeitsänderung zu manövrieren. Hierzu werden die Manövriereigenschaften von Schiffen betrachtet, um später die Grenzen (siehe Kapitel 4.2.1, Seite 44) für diese Arbeit an diesen anzupassen.

Die Manövriereigenschaften jedes Schiffes sind unterschiedlich, jedoch müssen sie den Mindestanforderungen der IMO RES. MSC.137(76) (MSC.137(76), 2002) entsprechen. Die Kriterien für eine Schiffsmanövrierfähigkeit sind wie folgt gegeben:

1. Wendefähigkeit

Der Abstand sollte 4,5 Schiffslängen L_{oa} und der kritische Durchmesser sollte 5 Schiffslängen im Wendekreismanöver nicht überschreiten. Hierbei wird das Manöver nach Steuerbord als auch Backbord mit einem Ruderwinkel von 35° oder dem maximal zulässigen Ruderwinkel ausgeführt.

2. Anfängliche Wendefähigkeit

Bei Anwendung eines Ruderwinkels von 10° nach Backbord/Steuerbord sollte das Schiff nicht mehr als 2,5 Schiffslängen zurückgelegt haben, wenn sich der Kurs bis um 10° gegenüber dem ursprünglichen Kurs geändert hat.

3. Fähigkeit zur Gierkontrolle und Kurshaltung (siehe Abbildung 20)

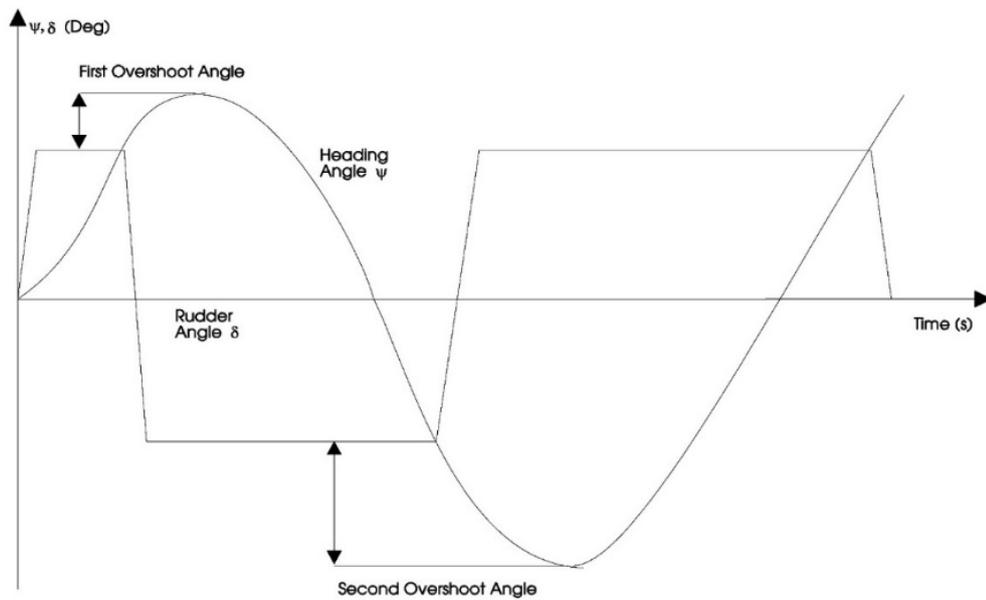


Abbildung 20: Zick-Zack-Manöver (MSC. 137(76), 2002)

- a. Der Wert des ersten Überschwingwinkels bei der $10^\circ/10^\circ$ -Zick-Zack-Prüfung sollte folgende Werte nicht überschreiten (mit L_{oa} Schiffslänge in [m] und v als Schiffsgeschwindigkeit in [m/s]):
 - i. 10° , wenn L_{oa}/v weniger als 10 s beträgt
 - ii. 20° , wenn L_{oa}/v 30 s oder mehr beträgt, und
 - iii. $(5 + 1/2(L_{oa}/v))$ Grad, wenn L_{oa}/v 10 s oder mehr, aber weniger als 30 s beträgt
 - b. Der Wert des zweiten Überschwingwinkels bei der $10^\circ/10^\circ$ -Zick-Zack-Prüfung soll folgende Werte nicht überschreiten:
 - i. 25° , wenn L_{oa}/v weniger als 10 s beträgt;
 - ii. 40° , wenn L_{oa}/v 30 s oder mehr beträgt, und
 - iii. $(17,5 + 0,75(L_{oa}/v))^\circ$, wenn L_{oa}/v 10 s oder mehr, aber weniger als 30 s beträgt.
 - c. Der Wert des ersten Überschwingwinkels bei der $20^\circ/20^\circ$ -Zick-Zack-Prüfung sollte 25° nicht überschreiten.
4. *Stopp-Vermögen*
- Die Spurweite bei der Vollbremsung nach achtern sollte 15 Schiffslängen nicht überschreiten. Für Schiffe mit großer Verdrängung kann der Wert auf 20 Schiffslängen vergrößert werden.

Die Vorgaben der IMO ermöglichen Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlungen in Abhängigkeit der Schiffslänge und Schiffsgeschwindigkeit zu definieren:

1. Maximaler Kurswechsel beträgt 35° nach Steuerbord oder Backbord

$$\varphi_{max} \leq 35^\circ$$

2. Geschwindigkeitsreduktion innerhalb von 20 Schiffslängen L_{oa} bei einer Schiffsgeschwindigkeit v bis auf null Knoten (Stoppvermögen).

Diese zuletzt genannten zwei Grenzwerte werden in Kapitel 4.4 (Seite 56) zur Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlung genutzt und die vier zuvor genannten Grenzwerte werden zur Eingrenzung des Vorhersagezeitraumes in Kapitel 4.3 (Seite 53) benötigt.

Nachdem die Grundlagen für die vier Themenbereiche nun detailliert beschrieben wurden, indem zunächst die Seegangsspektren (a), das parametrische Rollen, die diskrete Wahrscheinlichkeitsberechnung (b), die Grenzen für eine Vorhersage (c) und Empfehlung (d) diskutiert wurden, folgt im nächsten Kapitel die Auseinandersetzung mit existierenden Ansätzen über diese vier Themenbereiche. Dies dient zu einer konkreten Konzepterstellung eines Systems zur Vermeidung parametrischen Rollens auf Basis der acht oben vorgestellten Bedingungen für das parametrische Rollen (*BPRI-8*) und einer KI.

3 Existierende Ansätze für den Seegang, das parametrische Rollen und dessen Vorhersage

In diesem Kapitel werden die vier Themenbereiche nacheinander behandelt. Hierzu werden zunächst die verwandten Arbeiten untersucht, welche sich mit der Darstellung oder Berechnung des aktuellen Seeganges (a) auseinandersetzen, gefolgt von den verwandten Arbeiten über die Wahrscheinlichkeit (b) des Auftretens des parametrischen Rollens und über die Vorhersage (c) im dritten Unterkapitel. Im letzten Unterkapitel werden Ansätze zur Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlungen (d) gegen parametrisches Rollen vorgestellt. Ziel ist die Auseinandersetzung mit aktuellen Ansätzen und das identifizieren von Forschungslücken respektive dem Handlungsbedarf.

3.1 Existierende Ansätze zur Berechnung des aktuellen Seeganges

Wie in der Einleitung beschrieben, existiert die Notwendigkeit der Darstellung eines aktuellen Seegangsspektrums zu jeder Zeit und an jedem Ort. Aus den Grundlagen geht hervor, dass ein Seegangsspektrum aus mehreren Unbekannten besteht. Hierbei können einige Unbekannte direkt mit Wellenbojen, Wellenradaren, Satelliten oder Schiffsdaten aufgeschlüsselt werden. Das Lösen der restlichen Unbekannten wird in *parametrische* und *nicht-parametrische* Lösungsansätze unterteilt. Dies sind statistische Methoden, welche nur mit bestimmten Voraussetzungen gültig oder sinnvoll sind. Hierbei gehen *parametrische Methoden* davon aus, dass die Daten aus einer bestimmten Verteilung stammen, meistens einer Normalverteilung. Im Gegensatz dazu machen *nicht-parametrische Methoden* keinerlei Annahmen zur Verteilung der Daten. Zusätzlich wird hier ein *weiterer Lösungsansatz* vorgestellt, sodass in der Zusammenfassung alle aktuellen Methoden verglichen werden können.

Parametrische Methoden

Nielsen (Nielsen, 2008) stellt eine Methode zur Schätzung des Seeganges unter Verwendung der Wellenbojen Analogie (Nielsen, 2011) vor. Hierbei wird das Schiff als Wellenboje betrachtet und die gesammelten Daten werden verwendet, um einen Teil der Unbekannten des Seegangsspektrums zu berechnen. Da die Verteilungsfunktion des Spektrums weitere unbekannte Parameter beinhaltet, die durch die Daten nicht vollständig abgedeckt werden, wird zusätzlich ein bimodales Zehn-Parameter-Spektrum (Hogben und Cobb 1986) genutzt, um diese Unbekannten zu lösen.

Muñoz (Muñoz, 2014) Methode basiert auf Nielsen (Ulrik Dam Nielsen 2006) und Iseki und Ohtsu (Iseki und Ohtsu 1998). Hier werden die Unbekannten der Verteilungsfunktion durch die Annahme eines JONSWAP-Wellenspektrums (Hasselmann u. a. 1973) als Anfangsspektrum gelöst. Die Daten hierzu werden wie in der vorigen Methode durch die Annahme, dass das Schiff eine

Wellenboje ist, aufgezeichnet. Das JONSWAP Spektrum berücksichtigt als Besonderheit im Gegensatz zu anderen Spektren den Abstand zur nächsten Küste. Diese Methode basiert auf einer Vereinfachung der Annahme.

Nicht-parametrische Methoden

Iseki und Ohtsu (Iseki und Ohtsu 1998) beschreiben ein Bayes'sches Modellierungsverfahren (Akaike, 1980), um das Wellenspektrum abzuschätzen. Es wird eine unendliche Summe von Wellen mit einer vektorwertigen Zeitreihe verglichen. Die Zeitreihe wird aus Messungen eines fahrenden Schiffes gewonnen. Auf Grund der Relation zu der Antwortfunktion, ergeben sich nun mehr unbekannte Koeffizienten als Gleichungen. Mittels des Bayes'sches Modellierungsverfahren durch Maximierung des Produktes aus den Vorverteilungen und der Likelihood Funktion, ist die Evaluierung der unbekannt Koeffizienten möglich. Diese Methode basiert daher auf einem stochastischen Verfahren.

Eine weitere Methode von *Schwarz-Röhr* (Schwarz-Röhr, NtambaNtamba, and Härting 2016) verwendet einen Algorithmus, unter Hinzunahme des Response Amplitude Operators (RAO)¹. Hier werden die Richtungen der Wellen in eine bestimmte Anzahl an Sektoren geteilt. Daraus folgt eine Winkelverteilungsfunktion, welche das Richtungsspektrum wiederum als eine Linearkombination ausdrückt. Durch das Lösen der RAO und der Verteilungsfunktion, können die Unbekannten des Spektrums ebenfalls ermittelt werden, jedoch beruhen Teile der Lösungen auf Annahmen in den RAO's. Letztendlich basiert diese Methode auf einem physikalischen Ansatz durch Integration der RAO's und der Verteilungsfunktion, dennoch führt auch diese Methode zu einem geschätzten Spektrum durch die Annahmen.

Alternative Methode

Johnson und Wilson (Johnson and Wilson 2005) verwenden einen statistischen Ansatz, um das von der Schiffsbewegung abgeleitete Spektrum mittels linearer Regression zu berechnen. Hierzu nutzten sie ein reales Forschungsboot von 90m länge mit verschiedenen Beladungszuständen und Geschwindigkeiten. Daraufhin berechneten sie die signifikante Wellenhöhe mittels der gemessenen Winkel und Beschleunigungen. Diese Daten wurden mit Wellenbojendaten verglichen. Die Fehlerquote liegt hier bei 45%.

¹ Die Antwortamplitudenoperatoren sind Übertragungsfunktionen, welche dazu dienen die Auswirkung eines Seezustandes auf die Bewegung eines Schiffes zu bestimmen

WaveSignal SigmaS6, das auf WaMoSII der OceanWavesS GmbH (Hilmer und Thornhill, 2015) basiert, ist ein Echtzeitsystem zur Warnung vor Wellen in einem bestimmten Zeitfenster. Die Vorhersage deckt die folgenden 180 Sekunden ab und identifiziert anormale Wellen mit Hilfe von X-Band-Radar und prädiktiver Analytik. Zu Beginn wurde ein nicht-adaptiver Algorithmus verwendet, der alle Radarrohdaten über den gesamten Abtastbereich mit Raten von mehr als 2,1MSPs (Abtastrate) assimiliert. Dies vereinfachte die Testphase, sodass in einer späteren Phase adaptive algorithmische Methoden hinzugefügt wurden. Zunächst wird die Meeresoberfläche über einen räumlich-zeitlichen Bereich gemessen, der im Folgenden als Beobachtungsbereich bezeichnet wird. Es folgen die Anwendung von Vorverarbeitungsmethoden und die Berechnung von Betrag und Phase der Wellenvektorkoeffizienten. Schließlich wird die Phasenverschiebung der Wellenvektorkoeffizienten für die Ausbreitung und damit für die Vorhersage des Meeresoberflächenprofils bei raumzeitlichen Verschiebungen verwendet. Dies führt zur Vorhersage (siehe Abbildung 21) eines Wellenfeldes, das aus statistischen Seegangparametern sowie dreidimensionalen Höhenkarten der Meeresoberfläche aus nautischen X-Band-Radargeräten abgeleitet wird. Die Methode basiert auf der Spektralanalyse von Radardaten mittels einer 3-dimensionalen (schnellen) Fourier-Transformation.

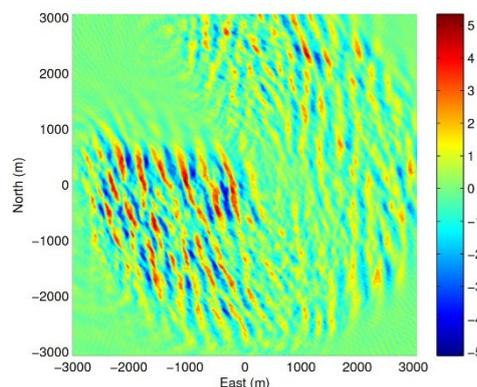


Abbildung 21: Vorhersage für T+180s des Wellenfeldes (Hilmer und Thornhill, 2015)

Zusammenfassend

Die Übersicht zeigt eine kleine Gruppe an Spezialisten, welche sich der Herausforderung der Darstellung eines absoluten wahren Wellenspektrums widmen. Die unregelmäßige See, die unregelmäßigen Antworten des Schiffes, die unbekannt Parameter, achterliche See, die Wellenausbreitung und die Multimodalität sind die Elemente, welche die Berechnungen erschweren.

Ob in der parametrischen oder nicht-parametrischen Methode bleiben die Abschätzungen einiger Parameter für die Verteilungsfunktion, womit die wahre Darstellung noch nicht erreicht ist. Während *Nielsen's* (Nielsen, 2008) und *Iseki und Ohtsu's* (Iseki und Ohtsu, 1998) Methoden aufwändig und sehr rechenintensiv sind, scheint die Optimierungsmethode von *Muñoz* (Muñoz, 2014) vielversprechend durch die Anwendung des JONSWAP-Spektrums, da sie weniger

aufwändig ist. Bei *Schwarz-Röhr* (Schwarz-Röhr, NtambaNtamba und Härting, 2016) werden einige Parameter stark abgeschätzt, womit die Methode an Genauigkeit verliert. Das Gleiche gilt für *Johnson und Wilson* (Johnson and Wilson, 2005). Letztendlich werden lediglich BPR1-4, anstatt der vollen acht bekannten BPR verwendet (siehe Tabelle 3, Seite 40, Kapitel 3.5 Handlungsbedarf)

3.2 Auftretswahrscheinlichkeit von parametrischem Rollen

Die *IMO* (IMO, 2007) hat einen Leitfaden entwickelt, um gefährliche Situationen wie parametrisches Rollen zu vermeiden. Auf der Grundlage der BPR1, 2 und 3a wurde das folgende Polardiagramm (siehe Abbildung 22) erstellt. Zu sehen sind die Abhängigkeiten der Schiffsgeschwindigkeit v , der Wellenperiode T_w und der Wellenrichtung und ein Gefahrenbereich, in welchem das Risiko des parametrischen Rollens hoch ist, wenn BPR1, 2 und 3 in einer bestimmten Kombination erfüllt sind. Mit Hilfe dieses schiffsspezifischen Plots kann die Schiffsführung genau diese Kombination vermeiden, indem sie die Geschwindigkeit oder Kurs ändert. Durch die Annahme, dass alle in die BPR1,2 und 3 fallenden Werte für den Begegnungswinkel β , der Rollperiode T_R und Begegnungsperiode T_e ist die Gefahrenzone allgemein gehalten und birgt somit die Gefahr zu Fehlalarmen.

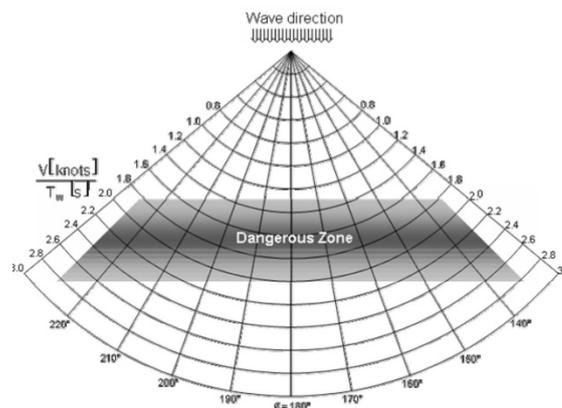


Abbildung 22: Gefährlicher Bereich für das synchrone und parametrische Rollen (IMO, 2007)

Die *OCTOPUS-Software* (Acomi et al. 2016) ist eine Schiffsbewegungsanalyse-Software für die Analyse der Seetüchtigkeit von Schiffen und schwimmenden Offshore-Strukturen. Sie kann daher auch zur Darstellung von parametrischem und synchronem Rollen in Polardiagrammen verwendet werden. Zusätzlich zu den BPR1,2 und 3 der IMO (IMO, 2007) werden hier eine kritische Wellenhöhe und eine geringe Rolldämpfung ergänzt, was zu einem Polardiagramm für die Rollbewegung führt (BPR4). Dieses verdeutlicht verschiedene Bereiche für das Surfen, das parametrische und das synchrone Rollen in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit und dem Auftreffwinkel auf die Wellen. Diese Darstellung (Abbildung 23, Seite 37) dient der Schiffsführung als Orientierung, unter welchen Beladungsbedingungen das Schiff in gefährliche Situationen geraten könnte. So kann die Schiffsführung auch diese Bereiche durch Anpassung der

Zusammenfassend

Die genannten Methoden zeigen Bereiche auf, für welche das parametrische Rollen erwartet und somit wahrscheinlich ist. Hier wird keine Differenzierung der Schwere vorgenommen. Es handelt sich daher um eine wahr oder falsch Annahme. Parametrisches Rollen kann stattfinden oder nicht. Wie hoch jedoch die Wahrscheinlichkeit bei einer bestimmten Geschwindigkeit und einem bestimmten Begegnungswinkel auf parametrisches Rollen zu treffen, wird in keiner Methode angegeben. Zusätzlich sind die Bedingungen, unter welchen diese Aussagen getroffen werden, nicht den erweiterten Grenzen des BSU angepasst, sodass zum Beispiel die Wellenlänge lediglich als nahezu identisch zur Schiffslänge vorausgesetzt wird. Die BSU-Erweiterung auf das 0,7 bis 1,3-fache der Schiffslänge wird vernachlässigt. Das gleiche ist der Fall bei der Begegnungsperiode. Weiterhin wird auch hier nur ein Teil der acht BPR betrachtet (siehe Tabelle 3, Seite 40, Kapitel 3.5 Handlungsbedarf). Die Aussagen sind somit begrenzt.

3.3 Aktuelle Systeme zur Vorhersage von parametrischem Rollen

PAROLL (DNVGL, 2013) ist ein Echtzeit-Erkennungssystem für Handelsschiffe und wurde als Zustandsüberwachungssystem patentiert. Es basiert auf kostengünstigen Bewegungssensoren, wobei ein Algorithmus Informationen über die Frequenz, die Roll- und Nickbewegung extrapoliert. Zunächst untersucht der Algorithmus den BPR3a, indem er die Nickschwingung als Äquivalent verwendet. Zweitens analysiert der Algorithmus die BPR4, ob die Roll- und Stampfbewegungen phasensynchron sind. Dazu müssen neben der Wellenhöhe noch BPR1 und BPR2 erfüllt sein. Damit wird ein Alarm ausgelöst. In der Full-Scale-Validierung wurden korrekte Vorhersagen in annähernd 70% der Fälle getroffen. Dies bezieht sich auf Rollbewegungen über 10° (Abbildung 25). PAROLL ist in der Lage, 40 Rollzyklen im Voraus eine Warnung auszugeben, sodass die Besatzung 1,5 bis 12 Minuten Zeit zum Handeln hat. Das System arbeitet ohne jegliche Schiffsparameter und bezieht somit die BPR5-8 nicht ein.

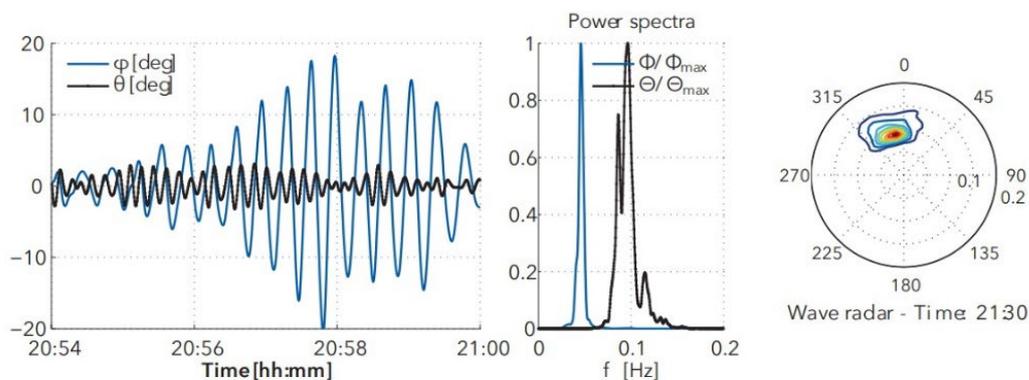


Abbildung 25: Erfassung vom parametrischen Rollen (DNVGL, 2013)

MARIN (Gunsing and Wageningen, 2010) stellt eine Vorhersage vor, die auf linearen Berechnungen der Schiffsbewegungen beruht. Hierbei werden die Schwankungen der hydrostatischen Stabilität als Ursache für das parametrische (BPR5) abgeschätzt. Mit einer Verringerung der Rolldämpfung nach Dunwoody erhält man die sicheren Betriebsgrenzen des Schiffes (Abbildung 26).

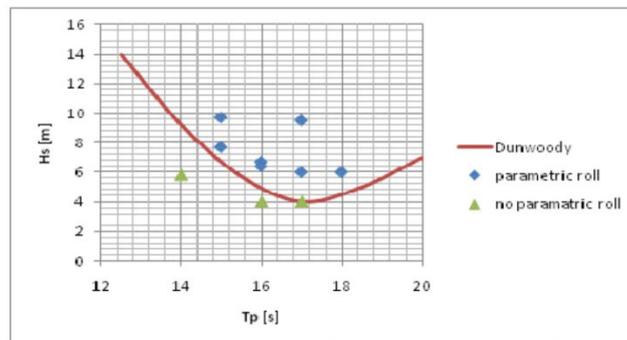


Abbildung 26: Vergleich der Testergebnisse (Gunsing and Wageningen, 2010)

Zusammenfassend

Für die Vorhersagemethoden gilt das gleiche, wie für die Wahrscheinlichkeitsmethoden, dass die Bedingungen aus den Grundlagen nicht in den erweiterten BSU-Grenzen betrachtet wurden. Weiterhin werden in den Methoden nur einige BPR betrachtet und nicht alle acht (siehe Tabelle 3, Seite 40, Kapitel 3.5 Handlungsbedarf)

3.4 Ansätze zu Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlungen gegen parametrisches Rollen

Einige der zuvor aufgezählten Methoden sind Ansätze, um der Schiffsführung einen Kurs oder eine Geschwindigkeit zu empfehlen, indem unter anderem die Wahrscheinlichkeit für parametrischen Rollen in bestimmten Bereichen für wahrscheinlich eingeschätzt wird und somit indirekt empfohlen wird, diese Bereiche zu vermeiden. Direkte Anweisungen, einen Kurs um eine bestimmte Gradzahl zu ändern oder die Geschwindigkeit für eine gewisse Knotenzahl zu ändern, um die Wahrscheinlichkeit parametrischen Rollens zu minimieren, sind in der aktuellen Forschung bisher nicht existent.

3.5 Handlungsbedarf

Aus den zuvor betrachteten Methoden ergibt sich folgende zusammenfassende Tabelle 3. Deutlich zu sehen ist, dass die Erweiterungen der BSU (BPR3b und BPR4b) nicht betrachtet werden. Des Weiteren werden in keiner derzeitigen Methode die aktuell acht bekannten Bedingungen, die parametrisches Rollen begünstigen verwendet. Daraus ergibt sich ein akuter Handlungsbedarf in diesem Forschungsfeld.

Tabelle 3: Verwandte Arbeiten und die Umsetzung der BPR1-8

		IMO (IMO, 2007)	OCTOPUS-Software (Accomi et al., 2016)	S. Ribeiro und C.G. Soares (Ribeiro Silva and Guedes Soares, 2013)	PAROLL (DNVGL, 2013)	MARIN (Gunsing und Wageninger, 2010)	WaveSignal SigmaS6 (Hilmer and Thornhill, 2015)
BPR1	$315^\circ < \beta < 45^\circ$	x	x	x	x		
BPR2	$135^\circ < \beta < 225^\circ$	x	x	x	x		
BPR3a	$T_R \approx 2 \cdot T_e$	x	x		x		
BPR3b	$1,8 \leq T_R/T_e \leq 2,1$						
BPR4a	$\lambda \approx L_{pp}$		x		x		
BPR4b	$0,7 \leq \lambda/L_{pp} \leq 1,3$						
BPR5	GM			x		x	
BPR6	GM			x		x	
BPR7	v						
BPR8	v						

Die vier Anforderungen aus der Einleitung aufgreifend, muss eine **Vorhersagemethode spezifiziert** (A1) sein, um die aktuelle See abbilden zu können und eine rechtzeitige Warnung für die Schiffsführung ausgeben zu können. Hierbei wird das aktuelle Seegangsspektrum derzeit abgeschätzt und erschwert somit eine präzise Einschätzung der Momentansituation des Schiffes. Weiterhin beziehen aktuelle Methoden einen Teil ihrer Daten direkt aus der Schiffsinfrastruktur wie dem Ladecomputer, womit die Verwendung einer künstlichen Intelligenz für eine Vorhersage nicht möglich ist. Dies liegt an der **Zulassung** (A4) der Behörde, welche bei der Anwendung einer künstlichen Intelligenz ein **autarkes** (A2) System ohne Schiffsanbindung voraussetzt und ebenso die Zulassung als Inklinometer. Weiterhin wird nur eine geringe Anzahl an Bedingungen für das parametrische Rollen in die Berechnungen einbezogen, wobei eine höhere Genauigkeit erreicht werden könnte, wenn alle Bedingungen in Abhängigkeit zueinander einbezogen würden. Zuletzt muss ein Assistenzsystem auf der Brücke installiert sein, um der Schiffsführung die Möglichkeit der **Erreichbarkeit und Anwendbarkeit** (A3) zu geben, direkt zu agieren.

4 Verfahren für die Vorhersage und Vermeidung parametrischen Rollens

Basierend auf den Grundlagen und verwandten Arbeiten wird in diesem Kapitel ein Verfahren zur Vermeidung parametrischen Rollens vorgestellt. Zunächst wird die Funktionsweise des Verfahrens erklärt und darauffolgend die notwendigen Berechnungen.

4.1 Prinzip des Verfahrens

Das Prinzip und somit Kernelement des Verfahrens sind die Kombination theoretischer Schiffsentwurfsformeln und praktischer Informatik, um die Genauigkeit der Berechnungen zu erhöhen. Hierzu werden zu einem die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens und zum anderen die Vorhersage des parametrischen Rollens aus Realmessungen berechnet. Falls eine potenzielle Gefahr in der aktuellen Situation für parametrisches Rollen errechnet oder vorhergesagt wird, resultiert eine Empfehlung für eine gezielte Kurs- und Geschwindigkeitsänderung. Diese Empfehlung wird aktuell zu jedem Zeitpunkt neu berechnet und ermöglicht es, Änderungen der See oder der Schiffsparameter sofort einzubeziehen.

Dieses Verfahren wird in Abbildung 27 dargestellt und im Weiteren schrittweise erläutert. Zunächst wird im Groben die Wahrscheinlichkeit berechnet, ob eine Gefahr für parametrisches Rollen unter den aktuellen Bedingungen der See und des Schiffes besteht. Dazu bedient sich das Verfahren diskreter Wahrscheinlichkeiten. Parallel wird eine Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von parametrischen Rollen mittels einer künstlichen Intelligenz ermittelt. Diese Kombination beider Verfahren soll zum einen eine hohe Genauigkeit der Identifizierung und zum anderen eine aktuelle Empfehlung zur Vermeidung des parametrischen Rollens: Bei einer Auftretenswahrscheinlichkeit für parametrisches Rollen aus einem der beiden Verfahren, werden anhand der aktuellen Messdaten alternative Geschwindigkeiten und Kurse ermittelt, für welche die Gefahr des parametrischen Rollens minimiert bzw. auf 0 reduziert wird und der Schiffsführung zur Verfügung gestellt.

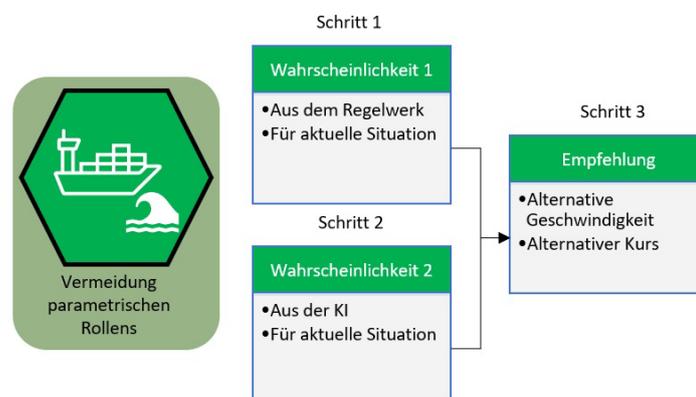


Abbildung 27: Verfahren zur Vermeidung parametrischen Rollens

Besonderheit des Verfahrens ist die Kombination Regelwerk und KI zur Berechnung der Auftretswahrscheinlichkeit von parametrischen Rollen zur Einschätzung der aktuellen Situation und zur Berechnung einer Empfehlung an die Schiffsführung aus aktuellen Messwerten. Die Verfahren für die einzelnen Schritte aus der Abbildung 27 sind wie folgt:

Für den ersten Schritt (siehe Abbildung 28) wird ein Baumdiagramm erstellt, welches Simulationsexperimente parametrisiert. Hierzu werden verschiedene Kombinationen der acht BPR aus Kapitel 2.2 (Seite 21) simuliert und nach dem Auftreten des parametrischen Rollens gelabelt. Es resultiert ein Baumdiagramm mit den diskreten Wahrscheinlichkeiten für die unterschiedlichen Kombinationen.

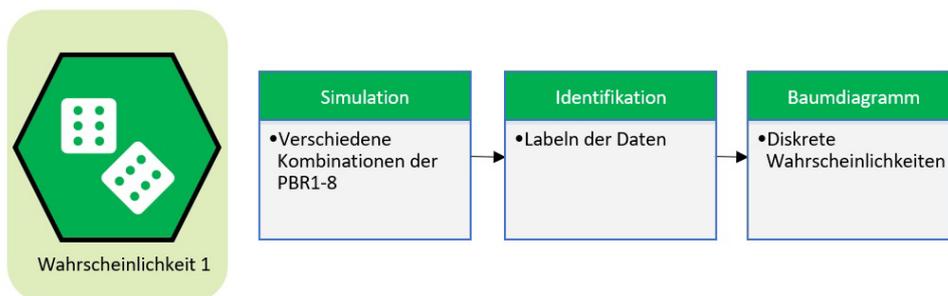


Abbildung 28: Schritt 1, Verfahren der Wahrscheinlichkeiten aus dem Regelwerk

Für den zweiten Schritt (siehe Abbildung 29) wird eine künstliche Intelligenz (KI) dahingehend trainiert, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von parametrischen Rollen zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden die gelabelten Daten des ersten Schrittes weiterverwendet, um die KI zu trainieren.

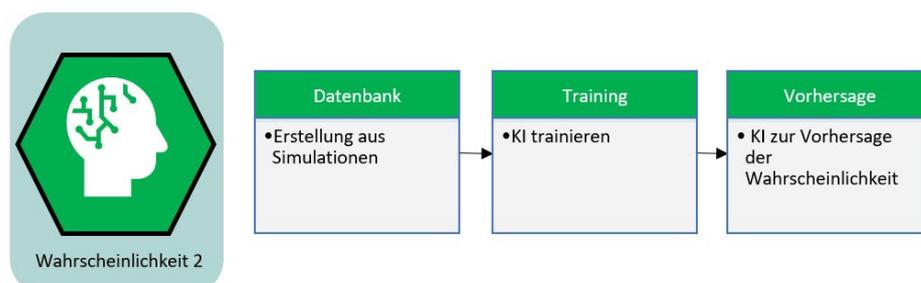


Abbildung 29: Schritt 2, Verfahren der Wahrscheinlichkeiten aus der KI

Für den dritten Schritt (siehe Abbildung 30, Seite 43) wird eine Geschwindigkeit und/oder ein Kurs für die Schiffsführung berechnet, welche parametrisches Rollen minimiert oder ausschließt. Hierzu wird zunächst in sukzessiven Schritten eine Geschwindigkeit ermittelt, für welche die Wahrscheinlichkeiten nach beiden Verfahren für parametrisches Rollen möglichst gering ist. Die Schritte sind ausgehen von der aktuell anliegenden Geschwindigkeit und werden sowohl ab-, als auch zunehmen berechnet. Im Falle, dass eine Geschwindigkeit ermittelt werden kann, für welche keine Gefahr des parametrischen Rollens herrscht, wird diese Geschwindigkeit als Empfehlung an die Schiffsführung ausgegeben. Für den Fall, dass keine geeignete Geschwindigkeit gefunden

werden kann, wiederholt sich der Rechenprozess für den Kurs des Schiffes. Auch hier wird vom aktuellen Kurs ausgehend in ab- und aufwärts gehenden Kursen die Wahrscheinlichkeiten des Regelwerkes und der KI berechnet. Im Falle, dass ein Kurs berechnet wird, für welchen keine Gefahr des parametrischen Rollens herrscht, wird dieser als Empfehlung an die Schiffsführung ausgegeben. Falls auch kein Kurs ermittelt werden kann, wird eine absolute Gefahr des parametrischen Rollens für das Schiff ausgegeben und ein sofortiges Umlenken um mindestens 90° vorgeschlagen. Durch diese Herangehensweise kann das Verfahren zunächst mit einer minimalen Änderung wie der Geschwindigkeit parametrisches Rollen verhindern und erst im zweiten Schritt werden größere Maßnahmen, wie die Kursänderung, herangezogen. Dies ermöglicht der Schiffsführung weitestgehend den Normalbetrieb des Schiffes auch in potenziellen Gefahrensituationen aufrecht zu erhalten.

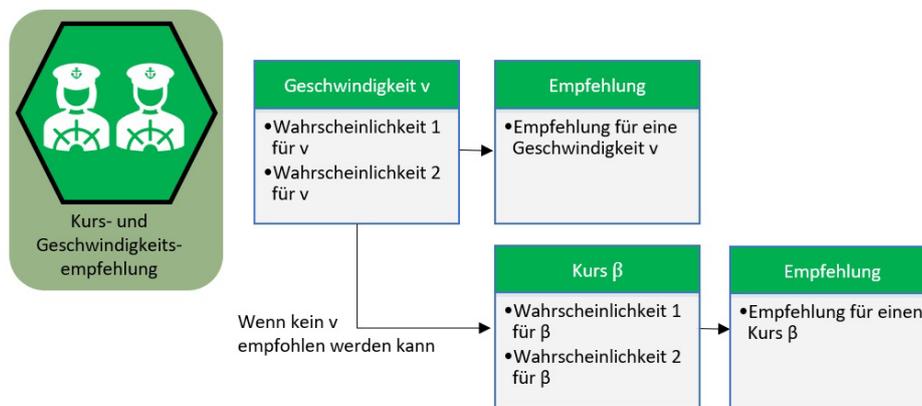


Abbildung 30: Schritt 3, Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlung

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte 1-3 detailliert vorgestellt. Abschließend werden in Kapitel 4.5 (Seite 58) die notwendigen Eingangsgrößen zur aktuellen Situationsbewertung für das Verfahren vorgestellt, sowie deren Berechnung aus gemessenen Daten mittels an Bord befindlicher Sensorik.

4.2 Schritt 1: Verfahren zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten aus dem Regelwerk

In diesem Abschnitt wird das Verfahren vorgestellt, wie die Wahrscheinlichkeiten aus dem Regelwerk aufgestellt werden. Zunächst werden die BPR1-8 in einem Baumdiagramm dargestellt. Hierbei wird das Verhältnis der Rollperiode T_R und Begegnungsperiode T_e , die Schiffsgeschwindigkeit v , der Begegnungswinkel β , Verhältnis Schiffslänge L_{pp} und Wellenlänge λ und die Wellenhöhen ζ_n in Kombination zueinander abgebildet (siehe Abbildung 31, Seite 44). Nachdem das Baumdiagramm erstellt wurde, werden mittels eines geeigneten Schiffes einer Simulationssoftware, die Eingabewerte konkretisiert. Es folgt die Simulation aller Kombinationen.

Nach Abschluss der Simulationen, werden die Daten nach dem Auftreten parametrischen Rollens gelabelt und klassifiziert. Zuletzt wird das Baumdiagramm mit den errechneten Wahrscheinlichkeiten dargestellt.

4.2.1 Aufstellen des zu parametrisierenden Baumdiagrammes

Im Baumdiagramm in der Abbildung 31 sind neben den Abhängigkeiten zusätzlich die Grenzen aus den Grundlagen abgebildet. Hierbei muss die Rollperiode T_R im Bereich $1,8T_e$ bis $2,1T_e$ der Begegnungsperiode (BPR3b) liegen, die Geschwindigkeiten v liegen in etwa zwischen 0-26kn für Containerschiffe, der Begegnungswinkel des Schiffes mit den Wellen liegt zwischen $315-45^\circ$ (vorliche See, BPR1) oder $135-225^\circ$ (achterliche See, BPR2), das Verhältnis der Wellenlänge λ zur Schiffslänge L_{pp} liegt bei $\lambda = 0,7L_{pp}$ bis $1,3L_{pp}$ und die Wellenhöhen ζ_n liegen zwischen 0-30m. Die Verwendung der oben genannten multiplen Bedingungen hat zum Vorteil, dass die Fehlerquote, im Gegensatz zu den existierenden Arbeiten, signifikant sinkt. Die Fehlerquote existierender Arbeiten liegt bei ca. 45-65% das diese lediglich die BPR1-4 einbeziehen.

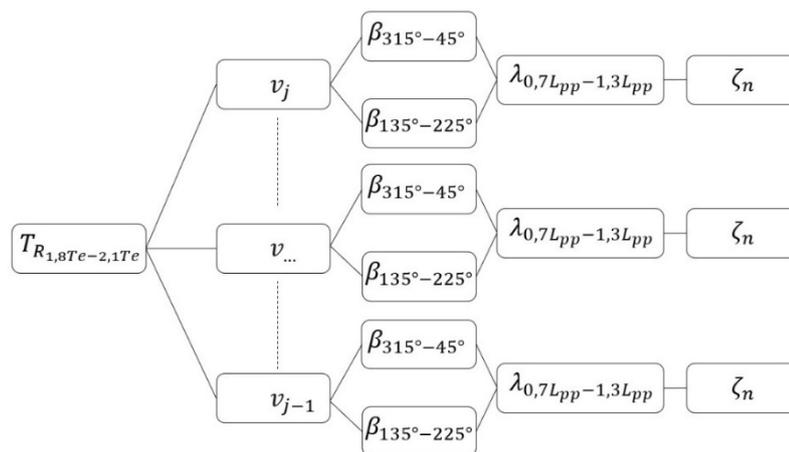


Abbildung 31: Zu parametrisierendes Baumdiagramm der Wahrscheinlichkeiten aus dem Regelwerk

Um das Baumdiagramm zu parametrisieren, müsste jeder Ast des Baumdiagrammes in Realität gefahren werden und die Reaktion des Schiffes gemessen werden. Da dies neben hohen Kosten auch extrem aufwändig wäre und zum anderen eine große Gefahr für die Schiffsbesatzung und das Schiff darstellen würden, nutzt diese Arbeit eine Simulationssoftware. Durch die gezielte Eingrenzung der Parameter und deren Simulation in Kombinationen wird daher eine Parametrisierung mittels einer diskreten Simulation durchgeführt. Aus Zeitgründen wird auf eine vollständige Simulation in allen Grenzen der Bedingungen in dieser Arbeit verzichtet, sind jedoch jederzeit nachholbar.

Für diese Arbeit lauten die Grenzen wie folgt:

1. $T_{R1} = 1,8 * T_{e1}$; $T_{R2} = 2 * T_{e2}$; $T_{R3} = 2,1 * T_{e3}$. Dies sind drei Rollperioden aus dem erweiterten Bereich der BSU. Hierbei handelt es sich um das Maximum, Minimum und den Mittelwert. Weitere können zu jedem Zeitpunkt simuliert werden. BPR3b
2. $\lambda_1 = \lambda * 0,7$; $\lambda_2 = \lambda * 1,0$; $\lambda_3 = \lambda * 1,3$. Dies sind drei Wellenlängen aus dem erweiterten Bereich der BSU. Hierbei handelt es sich um das Maximum, Minimum und den Mittelwert. Weitere können zu jedem Zeitpunkt hinzugefügt werden. BPR4b
3. $\beta = 0^\circ$. Aus Zeitgründen wird ein Begegnungswinkel simuliert, jedoch kann zu jedem Zeitpunkt jeder beliebige Begegnungswinkel hinzugefügt werden. BPR1+2
4. Die Veränderung von \overline{GM} wird zunächst vernachlässigt, um die ersten Durchläufe zu vereinfachen. BPR5+6
5. Es wird die Schiffsgeschwindigkeit von 2 bis 26 Knoten in 2-Knoten Schritten angewandt, um ein Geschwindigkeitsfeld von langsamer bis zur schnellen Fahrt abzubilden. Es werden daher 13 Geschwindigkeiten simuliert. BPR7+8
6. Die Wellenhöhe wird in Schritten von 1m bis 20m erhöht, sodass 20 Wellenhöhen jeweils simuliert werden. Hier kann die Wellenhöhe nicht weiter eingegrenzt werden, da es laut zahlreicher Unfallberichte bei unterschiedlichsten Wellenhöhen zum parametrischen Rollen kam. In einem späteren Schritt könnte man die Schritte noch kleiner wählen, um mehr Simulationen und mehr Ergebnisse zu erhalten.

Aus diesen gesetzten Grenzen ergibt sich folgendes zu parametrisierendes Baumdiagramm für die Wahrscheinlichkeiten des Regelwerkes (siehe Abbildung 32). Die Begegnungsperiode T_{e1} ist in 13 verschiedene mögliche Schiffsgeschwindigkeiten $v_{si_Te2} = v_s \cdot i$ mit $i = 1 \dots 13$ unterteilt. Von hier aus werden zunächst nur der Begegnungswinkel $\beta = 0^\circ$ parametrisiert, weiter in je drei berechnete Wellenlängen λ für $\lambda_1 = \lambda \cdot 0.7$; $\lambda_2 = \lambda \cdot 1.0$; $\lambda_3 = \lambda \cdot 1.3$. Hier wird die Parametrisierung mit zwanzig verschiedenen Wellenhöhen ζ_{1-20} fortgesetzt:

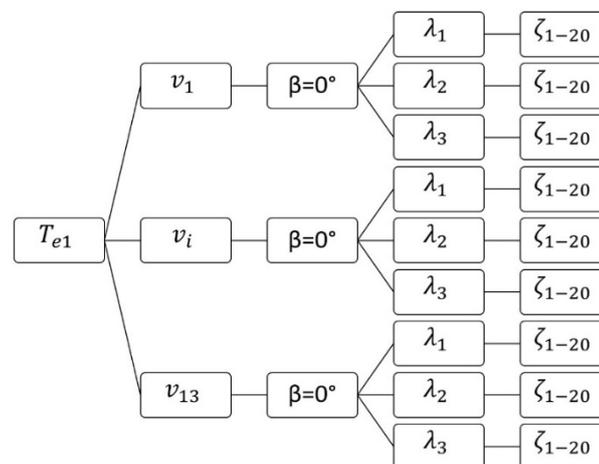


Abbildung 32: Ereignisbaum am Beispiel von T_{e1}

Daraus ergeben sich 2360 Simulationen. Zur Simulation wird die Simulationssoftware MARIN (MARIN, 2021) verwendet.

4.2.2 Simulation zur Parametrisierung der Wahrscheinlichkeitsabschätzung des Regelwerkes

Die Metadaten des verwendeten Schiffsmodells sind beschrieben mit einer Schiffslänge von 382m, einer Schiffsbreite von 56m, einem Tiefgang von 15,50m und einer metazentrischen Ausgangshöhe von 1,57m. Damit werden folgende konkrete Eingabewerte für die in C++ implementierte SDK (siehe Tabelle 4) verwendet. Die für die Simulation festgelegte Schrittweite von 1 bei 7200 Schritten ergeben 2 Stunden Simulationszeit für jede Kombination und somit 4680 Stunden simulierten Rollens. Kleinere Schrittweiten führen zu stark erhöhten Rechenzeiten.

Tabelle 4: Eingabewerte für die Simulation

Begegnungsperioden T_e [s]	Wellenlängen λ [m]	Schiffsgeschwindigkeiten v_s [m/s]	Wellenfaktoren ζ_{1-20}
19,66	267,4	1,029	Faktor 1: 1,2m
17,87	382	2,058	Faktor 2: 2,38m
17,16	496,6	3,086	Faktor 3: 3,57m
		4,115	Faktor 4: 4,76m
		5,144	Faktor 5: 5,96m
		6,173	Faktor 6: 7,15m
		7,202	Faktor 7: 8,34m
		8,23	Faktor 8: 9,53m
		9,259	Faktor 9: 10,73m
		10,29	Faktor 10: 11,92m
		11,32	Faktor 11: 13,11m
		12,35	Faktor 12: 14,30m
		13,37	Faktor 13: 15,5m
			Faktor 14: 16,69m
			Faktor 15: 17,88m
			Faktor 16: 19,07m
			Faktor 17: 20,26m
			Faktor 18: 21,46m
			Faktor 19: 22,65m
			Faktor 20: 23,84m

Für die Ausgabe wird ein Microsoft SQL Server aufgesetzt und mit dem Simulationsquellcode eine Datenbankschnittstelle implementiert. Mittels eines Jupyter Notebooks können die in der

Datenbank gespeicherten Simulationen graphisch dargestellt werden. Darauf folgt das Labeln der Daten, die Klassifizierung nach Art des parametrischen Rollens und die Aufstellung des Baumdiagrammes diskreter Wahrscheinlichkeiten des parametrischen Rollens.

4.2.3 Labeln der Daten

Die Simulationen werden nach parametrischen Rollen gelabelt. Hierzu wird jede Simulation (siehe Abbildung 33) nach den Charakteristika des parametrischen Rollens untersucht. Jede Simulation streckt sich über 7200 Zeitschritte mit 1s als Schrittgröße. Um die herkömmlichen Rollbewegungen vom parametrischen Rollen zu unterscheiden, wird die Definition aus Kapitel 2.3 des parametrischen Rollens zur Analyse verwendet.

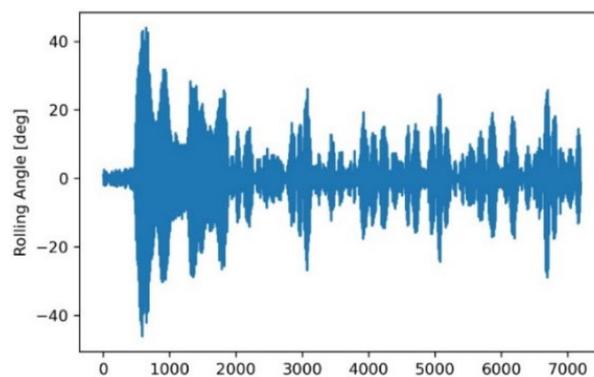


Abbildung 33: Jupyter Notebook normalisierte Rollbewegung

1. Der *Rollwinkel steigt stetig* an, kein Abfallen

Diese Aussage kann direkt für das Labeln verwendet werden.

2. Innerhalb T_R wird φ größer

Für das Labeln der Daten muss φ einen konkreten Wert besitzen. Dieser ergibt sich aus den Grundlagen des Schiffsentwurfes, für welchen kleine Rollwinkel unter 5° definiert sind und große Rollwinkel über 30° . Dies geht auch aus den Vorschriften der Hebelarmkurve hervor. Dies würde in einen Grenzwert von $\varphi = 30^\circ$ resultieren, da jedoch die hier gelabelten Daten später zusätzlich als Trainingsdaten für eine KI dienen werden, empfiehlt es sich, den maximalen Rollwinkel niedriger anzusetzen, um eine rechtzeitige und frühe Warnung vor dem parametrischen Rollen zu erhalten. Daher wird der maximale Rollwinkel um den Betrag kleiner Rollwinkel reduziert, sodass für das Labeln der Daten ein *Rollwinkel von 25°* angenommen wird.

3. \overline{GM} nimmt periodisch ab und zu

4. Für $2 * T_R$ gilt beinahe ein doppelter Rollwinkel unter normalen Umständen

Durch die Eigenrollperiode des Schiffes von $T_R = 35,74s$ würde sich für $2 * T_R = 71,48s$ als zu betrachtender Zeitraum ergeben. Jedoch wird die Eigenrollperiode in einem Bereich vom 1,8-2,1fachen (siehe BPR3) betrachtet, womit sich für die doppelte Eigenrollperiode ein

Bereich von 68,64-78,64s ergibt. Da jedoch auch hier, unter Betrachtung der späteren Verwendung der Daten für die KI als Trainingsdaten, eine rechtzeitige und frühe Warnung des parametrischen Rollens das Ziel ist, wird der Zeitbereich, in dem parametrisches Rollen identifiziert und somit gelabelt werden soll, dem maximalen Rollwinkel von 25° angepasst. Sonst resultiert ein zu *betrachtender Zeitbereich von 60 Sekunden*.

Mittels dieser Definition werden die gewonnenen Daten aus den Simulationen nach parametrischen Rollen untersucht und tabellarisch ausgegeben. Tabelle 5 ist eine beispielhafte Auflistung einiger Simulationen, die ein parametrisches Rollen aufweisen.

Tabelle 5: Simulationsergebnisse für provoziertes parametrisches Rollen

Sim.No	v_s [kn]	T_e [rad/s]	λ [m]	ζ [m]	β [°]	Start time [s]	Max roll angle [°]	Roll moves
21	7,464	17,87	496,6	11,92	0	6670	25,94	>4
139	3,732	17,87	382	11,92	0	477	43,05	>4
140	3,732	17,87	382	13,11	0	3013	30,89	4
144	3,732	17,87	382	17,88	0	840	29	3
145	3,732	17,87	382	19,07	0	678	43,03	3
145	3,732	17,87	382	19,07	0	896	27,43	3
145	3,732	17,87	382	19,07	0	1951	39,81	3
149	3,732	17,87	382	23,84	0	1335	31,26	2
175	3,732	17,87	267,4	11,92	0	477	43,05	>4

In der Tabelle 5 ist zu sehen, dass Rollwinkel von 25,94-43,04° entstanden sind. Weiterhin zeigt die Abbildung 34 graphisch die klassifizierte Zeitpunkte des parametrischen Rollens laut oben genannter Definition auf. In diesem Fall trat parametrisches Rollen drei Mal in einer Simulation auf. Hierbei wiesen die Simulationen starke Unterschiede untereinander auf, wenn parametrisches Rollen identifiziert wurde. Die Simulationen vermerkten starke und weniger starke, sowie schnellere und langsamere Reaktionen des Schiffes. Ein weiteres Merkmal war die Häufigkeit des Auftretens innerhalb einer Simulation, die auf ein einzelnes oder mehrere Ereignisse reduziert wurde. Dies wurde bereits in Unfallberichten (Ribeiro e Silva and Guedes Soares 2013) dokumentiert und weist daraufhin, dass parametrisches Rollen seriell auftreten kann.

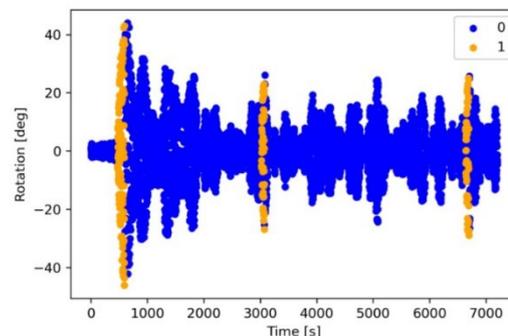


Abbildung 34: Parametrisches Rollen laut aufgestellter Definition

Diese Unterschiede innerhalb des parametrischen Rollens werden im Folgenden erläutert, sodass für ein Warnsystem unterschiedliche Klassen und somit Schweregrade des parametrischen Rollens identifizierbar sind.

4.2.4 Klassifizierung nach der Art des parametrischen Rollens

Parametrisches Rollen kann in unterschiedlichen Ausprägungen auftauchen und wird in dieser Arbeit daher in folgende Klassen unterteilt:

Serielles parametrisches Rollen

Beschreibt das wiederholte Auftreten von parametrischem Rollen innerhalb der gleichen Simulation. Das Schiff erfährt mehrere kontinuierliche parametrische Rollvorgänge (siehe Abbildung 35) innerhalb von 7200 Sekunden.

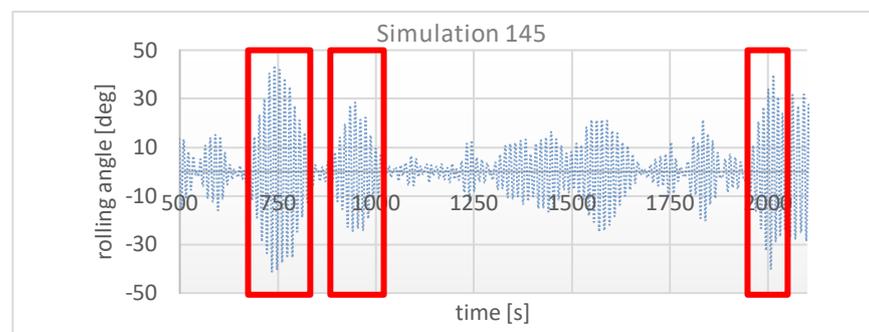


Abbildung 35: $v_s = 7,25kn$, $\beta = 0^\circ$, $T_e = 17,87s$, $\lambda = 382m$, $\zeta = 19,07m$

Klasse I: Sehr extremes parametrisches Rollen

Nach zwei Rollbewegungen des Schiffes (siehe Abbildung 36).

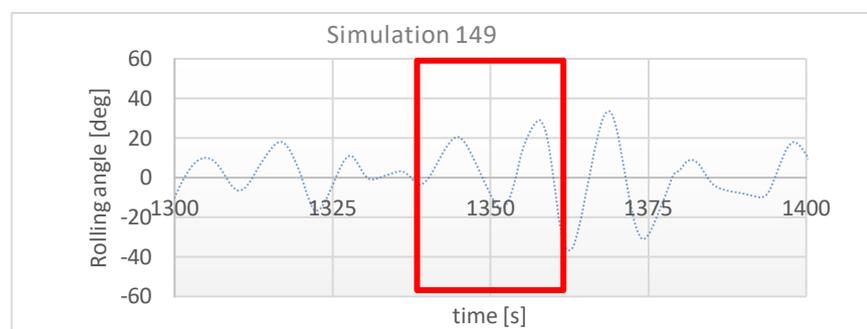


Abbildung 36: $v_s = 7,25kn$, $\beta = 0^\circ$, $T_e = 17,87s$, $\lambda = 382m$, $\zeta = 23,84m$

Klasse 2: Extremes parametrisches Rollen

Nach drei Rollbewegungen des Schiffes (siehe Abbildung 37)

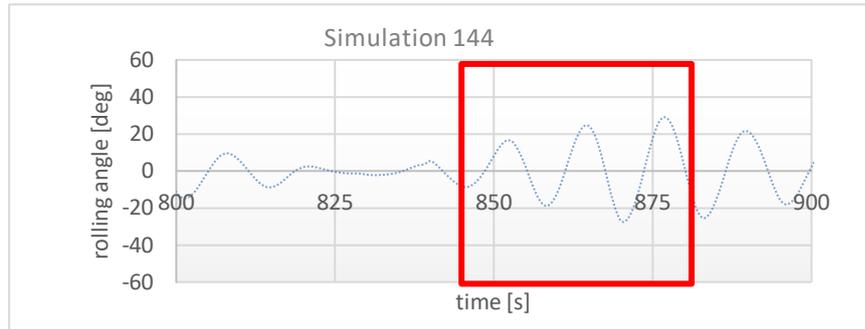


Abbildung 37: $v_s = 7,25kn$, $\beta = 0^\circ$, $T_e = 17,87s$, $\lambda = 382m$, $\zeta = 17,88m$

Klasse 3: Starkes parametrisches Rollen

Nach vier Rollbewegungen des Schiffes (siehe Abbildung 38)

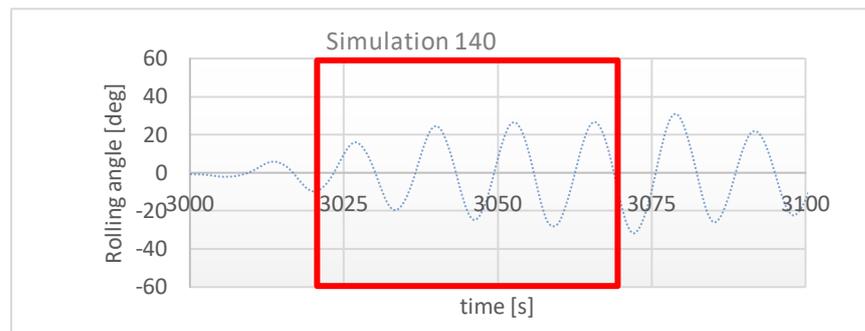


Abbildung 38: $v_s = 7,25kn$, $\beta = 0^\circ$, $T_e = 17,87s$, $\lambda = 382m$, $\zeta = 13,11m$

Klasse 4: Einfaches parametrisches Rollen

Nach mehr als vier Rollbewegungen des Schiffes wird ein parametrisches Rollen festgestellt (siehe Abbildung 39).

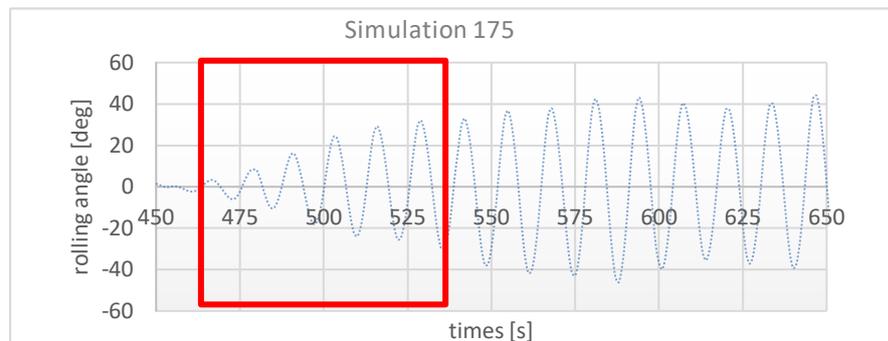


Abbildung 39: $v_s = 7,25kn$, $\beta = 0^\circ$, $T_e = 17,87s$, $\lambda = 267m$, $\zeta = 11,92m$

Es folgt das Baumdiagramm mit den Wahrscheinlichkeiten für jede Kombination für die drei Begegnungsperioden.

4.2.5 Baumdiagramm für die Wahrscheinlichkeiten des Regelwerkes

Aus den Simulationen ergeben sich drei Baumdiagramme für die drei simulierten Begegnungsperioden $T_e = 19,66s$, $T_e = 17,87s$ und $T_e = 17,16s$. In der Abbildung 40 (Seite 52) ist das Baumdiagramm und die dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten für die Begegnungsperiode $T_e = 19,66s$ dargestellt. Zunächst erfolgt die Einteilung in parametrisches Rollen (p.R.) und nicht parametrisches Rollen. Für die Begegnungsperiode 19,66s findet zu 51% parametrisches Rollen statt und unterscheidet sich marginal zu der Begegnungsperiode $T_e = 17,87s$ mit 54% stattfindenden parametrischen Rollens (siehe Anhang Ai: Baumdiagramm für die Begegnungsperiode $T_e = 17,87s$, Seite 105) und zu der Begegnungsperiode $T_e = 17,16s$ mit 53% parametrischen Rollen (siehe Anhang Aii: Baumdiagramm für die Begegnungsperiode $T_e = 17,16s$, Seite 106). Hier ist eine prägnante Abhängigkeit zu den Wellenhöhen ersichtlich. Für Wellenhöhen über 10m findet parametrisches Rollen für diese Begegnungsperioden und Begegnungswinkel zu 100% statt und für Wellenhöhen unter 10m für $T_e = 19,66s$ zu 1%, für $T_e = 17,87s$ zu 4% und für $T_e = 17,16s$ zu 3%. Es zeigt sich für alle Begegnungsperioden, dass das parametrische Rollen von der Geschwindigkeit unabhängig ist, wenn die Wellen von vorne (Begegnungswinkel $\beta = 0^\circ$) kommen. Weiterhin zeigt sich, dass für Wellenlängen im Bereich von 0,7 bis zum 1,3fachen der Schiffslänge parametrisches Rollen zu 100% auftritt, wenn der Begegnungswinkel bei 0° liegt und eine der drei Begegnungsperioden erreicht wird. Diese drei Baumdiagramme für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens unter den simulierten Bedingungen des Regelwerkes, dienen dem Verfahren in Schritt 1. Um eine vollständige Abbildung der Wahrscheinlichkeiten zu erhalten, müssen weitere Begegnungswinkel und Begegnungsperioden in weiterführenden Arbeiten simuliert werden, sodass das Verfahren auf eine größere Datenbank zugreifen kann zur Vermeidung parametrischen Rollens.

Dennoch zeigt sich bereits hier ein großer Unterschied zu aktuellen Systemen, welche in Tabelle 3, (Kapitel 3.5 Handlungsbedarf, Seite 40) nicht die Wellenhöhe als Merkmal zur Identifizierung des parametrischen Rollens verwenden und somit die hohe Fehlerquote und Fehlalarme der Systeme erklärt.

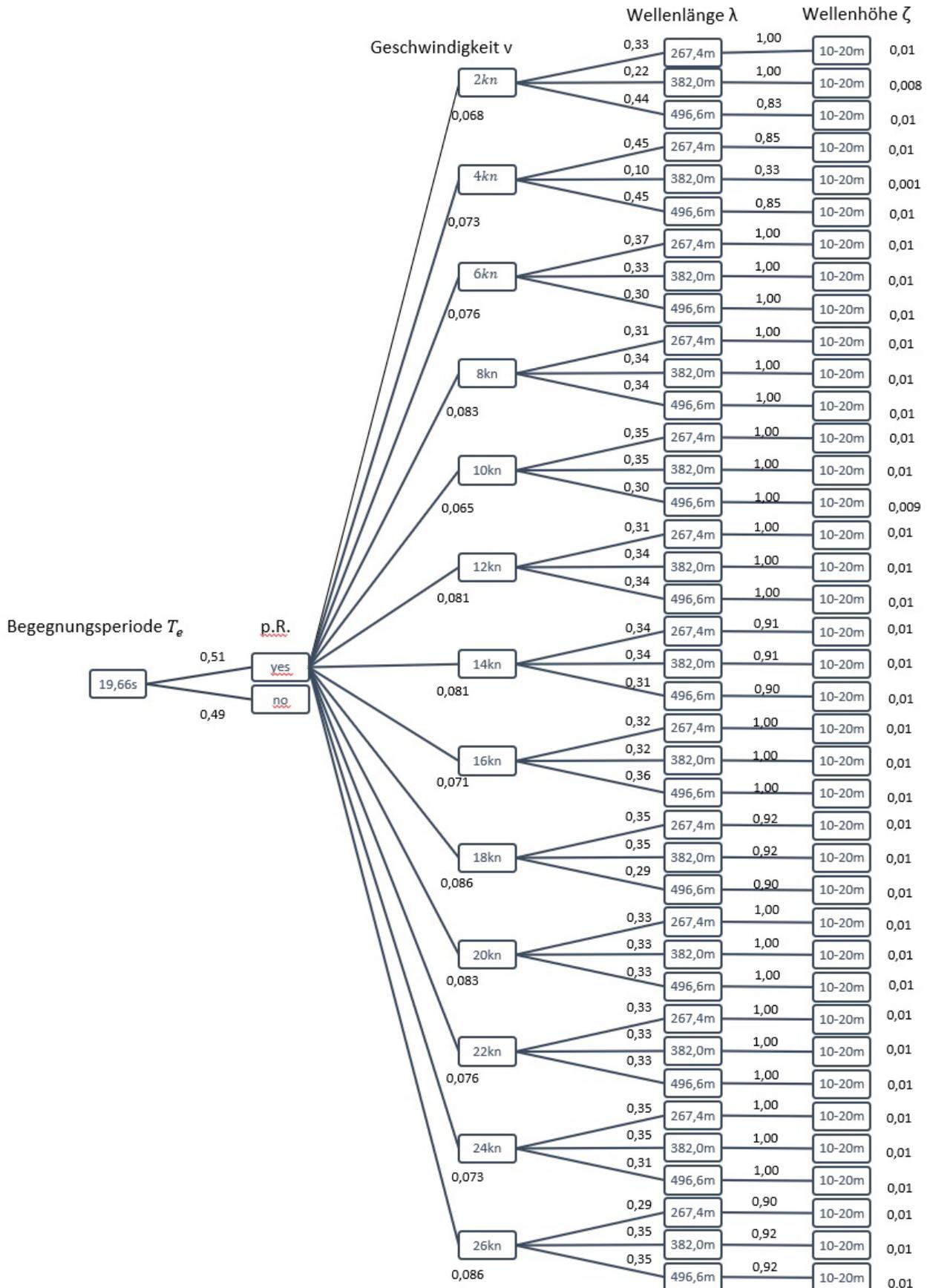


Abbildung 40: Diskrete Wahrscheinlichkeiten des parametrischen Rollens Für $T_e = 19,66s$

Nachdem in diesem Kapitel das Verfahren zur Aufstellung der Wahrscheinlichkeiten für das Regelwerk vorgestellt wurde, folgt im nächsten Kapitel der zweite Schritt mit dem Verfahren der Wahrscheinlichkeiten aus der KI.

4.3 Schritt 2: Verfahren zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten aus der KI

Nachdem die Verwendung der BPR1-8 mit ihren Parametern im vorigen Schritt bereits zu einer geringeren Fehlerquote im Vergleich zu existierenden Arbeiten führt, wird in diesem Teil zusätzlich eine künstliche Intelligenz zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit des parametrischen Rollens verwendet. Diese Wahrscheinlichkeit dient dem Assistenzsystem zur Ausgabe einer rechtzeitigen Warnung für eine Gegenmaßnahme, falls die Gefahr parametrischen Rollens vorhergesagt wird. Die Verwendung einer künstlichen Intelligenz in Bezug auf das parametrische Rollen ist ein neuer Ansatz und kann effektiv in der Zukunft Unfälle vermeiden. Die hier verwendete KI ist ein Random Forest Algorithmus, da aus den Simulationen bereits gelabelte Daten zur Verfügung stehen, der Rechenaufwand vergleichsweise gering ist und die Genauigkeit höher ist durch das überwachte Lernen. Zusätzlich handelt es sich um ein Klassifikationsproblem, sodass sich der Random Forest Algorithmus anbietet für große Datenmengen, viele Merkmale und viele Trainingsdaten (siehe Abbildung 41).

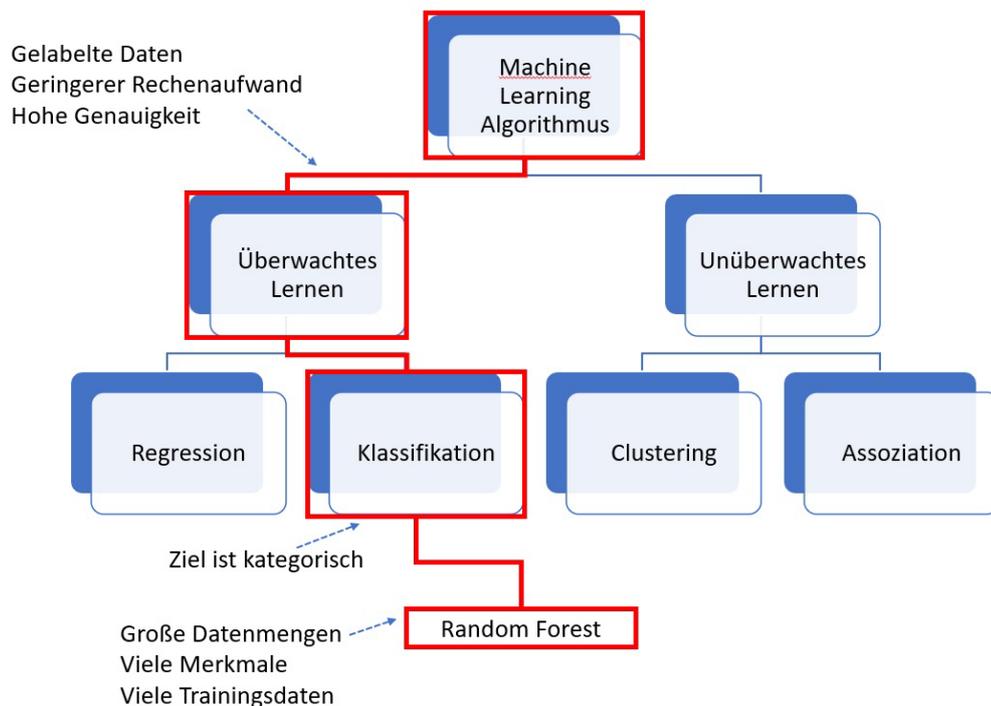


Abbildung 41: KI im Überblick

Die Umsetzung des Random Forest wird unter Verwendung der sklearn-Bibliothek nach Brownlee (Brownlee, 2020) realisiert. Die aus den Simulationen entstandenen gelabelten Daten werden in zweiminütige Abschnitte unterteilt, sodass mittels des Random Forest eine Wahrscheinlichkeit des Auftretens für die nächsten zwei Minuten berechnet werden kann. Diese zwei Minuten Vorhersage ergibt sich aus den Vorschriften des Wendemanövers (Kapitel 2.4, Seite 30) und den Abmaßen des simulierten Schiffes mit 382m Schiffslänge. Für einen Mindestabstand von 4,5 Schiffslängen bei der maximalen Geschwindigkeit von 26 Knoten ergibt sich ein Zeitraum von 2 Minuten und 8 Sekunden. Weiterhin wird der Datensatz aus den Simulationen in Trainings- und Testdaten nach dem Pareto Prinzip (Chopra et al 2019) aufgeteilt, wobei die Testdaten 20% und die Trainingsdaten 80% ausmachen. In der Abbildung 42 ist das Prinzip eines Random Forest dargestellt, welcher sich in beliebig viele Entscheidungsbäume aufteilt. Jeder Baum beginnt mit einem Root Node und verzweigt sich in beliebig viele Child Nodes. In jedem Child Node findet eine Abfrage statt und führt zum nächsten Child Node. Anhand der Trainingsdaten lernt der Random Forest, in welcher Reihenfolge, welche Abfragen folgen müssen, um zum richtigen Ergebnis zu gelangen. Dieses Training findet, wie erwähnt, mit 80% der Daten statt und 20% der Daten werden genutzt, um den trainierten Random Forest zu testen.

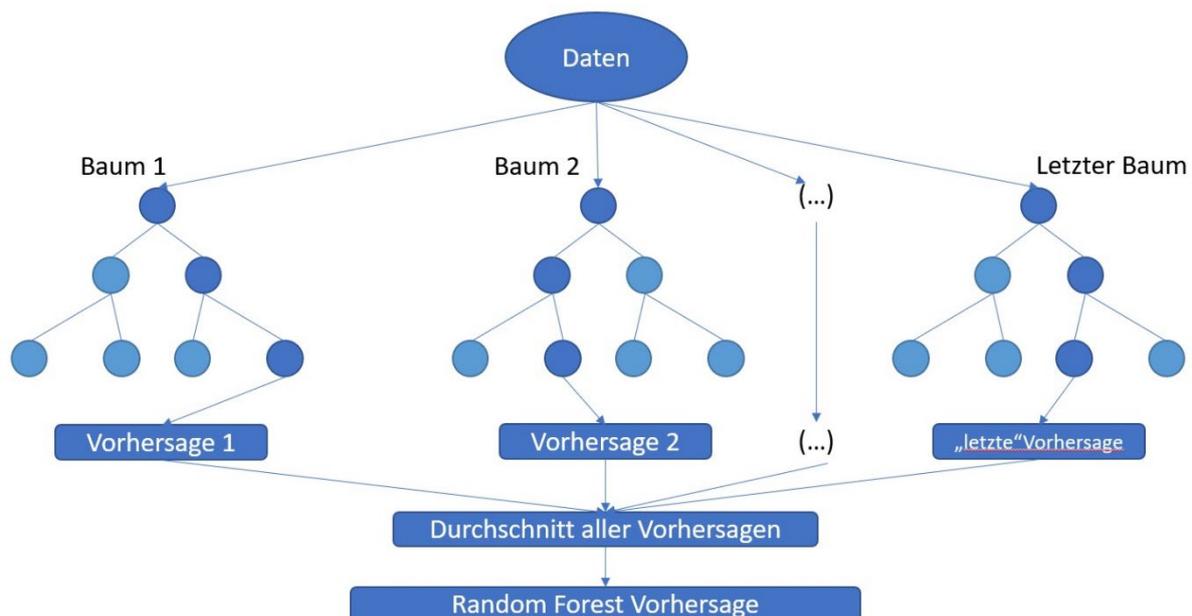


Abbildung 42: Prinzip des Random Forest

Der trainierte Random Forest, in Kombination mit den Wahrscheinlichkeiten aus dem vorigen Kapitel, dient zur Ermittlung von konkreten Empfehlungen für eine Kurs- und Geschwindigkeitsänderung an die Schiffsführung, falls die Gefahr des parametrischen Rollens identifiziert wird. In der Abbildung 43 (Seite 55) wird die Genauigkeit des Random Forest vorgestellt. Von 9025 Simulationen hat der Random Forest 8399 Simulationen korrekt negativ vorhergesagt (93,06%). Daher, dass kein parametrisches Rollen stattgefunden hat und dies korrekt

vorhergesagt wurde. In 218 Simulationen hat der Random Forest parametrisches Rollen vorhergesagt, obwohl keines aufgetreten ist, womit in Realität ein Fehlalarm ausgelöst worden wäre (2,4%). In 408 Simulationen fand parametrisches Rollen statt und der Random Forest hat diese 14-mal nicht vorhergesagt (3,43%). Diese False Negatives (FN) hätten zu schweren Vorfällen führen können. Die Accuracy¹ liegt daher bei 97,43% $((TP+TN)/(TP+FP+FN+TN))$. Für die Anwendung als Assistenzsystem zur Vermeidung des parametrischen Rollens ist jedoch eine lückenlose Erfassung von allem Vorhandenen wichtig, daher wird zusätzlich die Precision² betrachtet, welche bei 64,38% $(TP/(TP+FP))$ liegt, wobei der Recall-Wert³ bei 96,57% $(TP/(TP+FN))$ liegt. Bezogen auf die Natur des parametrischen Rollens, ist ein guter Recall-Wert von höherer Bedeutung als ein hoher Precision-Wert, da ein Fehlalarm weniger Konsequenzen an Bord des Schiffes mit sich bringt als ein falsch nicht-vorhergesagtes parametrisches Rollen. Durch mehr Simulationen kann dieser Wert noch weiter verbessert werden.

Es folgt im dritten Schritt, die Ermittlung eines alternativen Kurses oder einer alternativen Geschwindigkeit, falls die Gefahr des parametrischen Rollens mittels Schritt 1 und 2 identifiziert wurde.

[[8399 218] [14 394]]	<table border="1"> <tr> <td>TP = <u>true</u> positive</td> <td>FP = <u>false</u> positive</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">8399</td> <td style="text-align: center;">218</td> </tr> <tr> <td>FN = <u>false</u> negative</td> <td>TN = <u>true</u> negative</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">14</td> <td style="text-align: center;">394</td> </tr> </table>	TP = <u>true</u> positive	FP = <u>false</u> positive	8399	218	FN = <u>false</u> negative	TN = <u>true</u> negative	14	394
TP = <u>true</u> positive	FP = <u>false</u> positive								
8399	218								
FN = <u>false</u> negative	TN = <u>true</u> negative								
14	394								
<pre> precision recall f1-score support 0.0 1.00 0.97 0.99 8617 1.0 0.64 0.97 0.77 408 accuracy macro avg 0.82 0.97 0.88 9025 weighted avg 0.98 0.97 0.98 9025 </pre>									
0.9742936288088643									

Abbildung 43: Random Forest Auswertung

¹ Genauigkeit eines Modells, Anteil von korrekten Vorhersagen an allen getroffenen Vorhersagen

² Verhältnis korrekt vorhergesagter positiver Beobachtungen zu den gesamten vorhergesagten positiven Beobachtungen

³ Verhältnis korrekt vorhergesagter positiver Beobachtungen und allen Beobachtungen mit parametrischen Rollen

4.4 Schritt 3: Ermittlung von Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlungen zur effektiven Vermeidung parametrischen Rollens

Die Verfahren zur Wahrscheinlichkeitsaufstellung über das Regelwerk und der KI wurden in den zwei vorigen Kapiteln vorgestellt und dienen dazu, die Gefahr des Auftretens des parametrischen Rollens zu ermitteln. Wenn beide Verfahren die Gefahr hoch einschätzen, wird im dritten Schritt oder gänzlich ausgeschlossen. Zu diesem Zweck wird zunächst nach einer alternativen Geschwindigkeit gesucht, bevor ein alternativer Kurs gesucht wird. Dies hat den Vorteil, dass minimal invasiv in die aktuelle Schiffsführung eingegriffen wird, bevor der angelegte und vorgegebene Kurs verändert wird.

Hierzu ist in der Abbildung 44 dargestellt, wie das Verfahren iterativ vorgeht. Es startet mit einer aktuellen Geschwindigkeit v , welche iterativ erhöht respektive reduziert wird und zunächst die Wahrscheinlichkeit aus dem Regelwert für diese alternative Geschwindigkeit berechnet. Für den Fall, dass die ermittelte Wahrscheinlichkeit gering ist, wird für diese Geschwindigkeit die Wahrscheinlichkeit aus der KI berechnet. Wenn beide Verfahren eine geringe Wahrscheinlichkeit für die alternative Geschwindigkeit ergeben, kann diese Geschwindigkeit an die Schiffsführung ausgegeben werden. Im Falle, dass die Gefahr weiterhin hoch ist, beginnt das Verfahren erneut mit der nächsten höheren respektive niedrigeren alternativen Geschwindigkeit. Dieser Prozess wiederholt sich, bis eine alternative Geschwindigkeit mit niedriger Gefahr des parametrischen Rollens gefunden wurde oder die Geschwindigkeit bei 0 Knoten und 26 Knoten weiterhin mit einer hohen Gefahr des parametrischen Rollens ausgegeben wird. Daraufhin wird ein alternativer Kurs β mittels gleicher Vorgehensweise ermittelt.

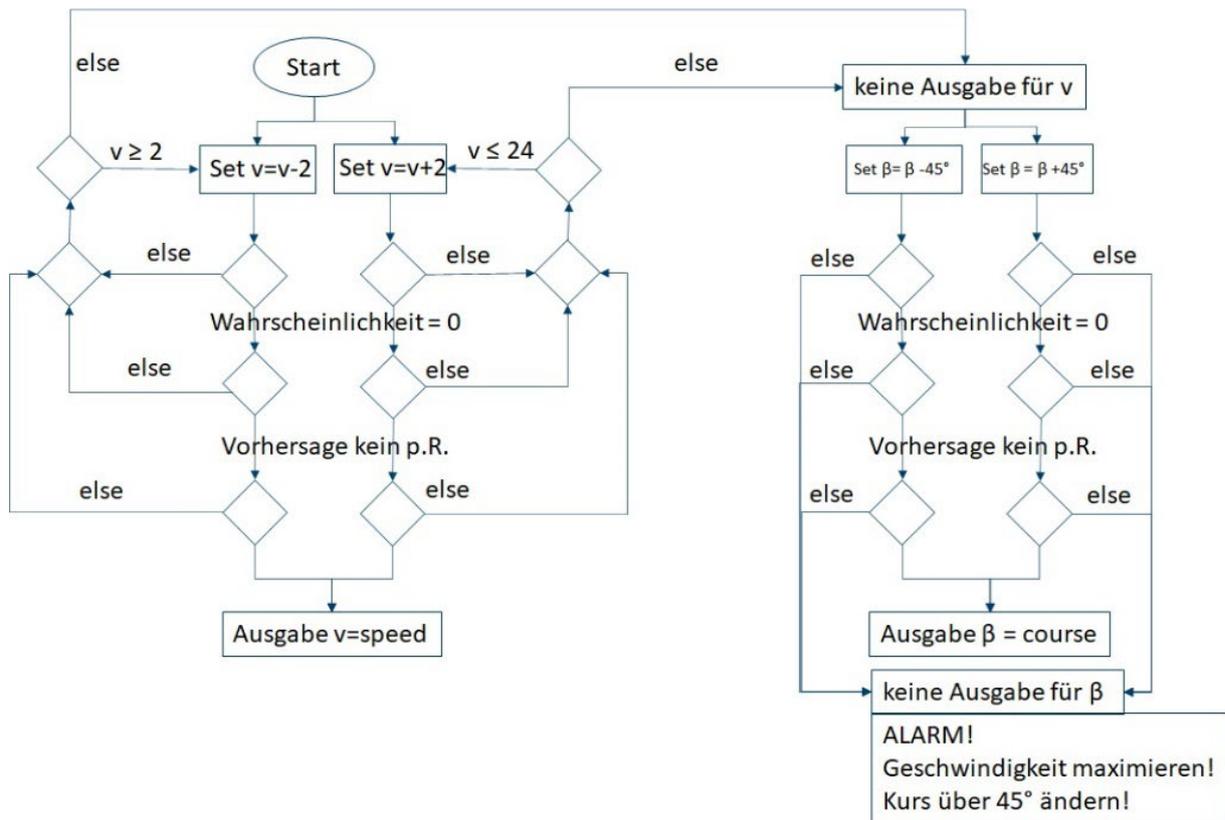


Abbildung 44: Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlungsdiagramm

Eine Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlung wird nur in den Grenzen angegeben, mit denen das System trainiert wurde. Die Trainingsdaten stammen aus der zuvor erstellten Datenbank. Hier wurden Grenzen für die Geschwindigkeit und den Kurs angegeben, in welchem das System die Wahrscheinlichkeiten und die Vorhersage berechnet hat, daher können auch nur in diesen Grenzen Empfehlungen ausgesprochen werden, die die parametrischen Rollen reduzieren.

Für die Geschwindigkeit gilt, dass in 2-Knoten-Schritten von 2 Knoten beginnend bis 26 Knoten das System trainiert wurde und für die Begegnungswinkel wurde lediglich die vorliche See betrachtet und evaluiert. Daraus folgt, dass die Empfehlung für die Geschwindigkeit in 2-Knoten-Schritten und für den Kurs in 90° (um aus der Quereinkommenden See herauszukommen) ausgegeben werden.

Dieses Verfahren bietet der Schifffahrt ein sicheres System zur Vermeidung parametrischen Rollens und unterscheidet sich von bestehenden Systemen durch die Kombination des Regelwerkes und der KI unter Verwendung der BPR1-8. Dies erhöht den Grad der Sicherheit und Genauigkeit des Systems gegenüberstehender Verfahren. Um nun dieses Verfahren anzuwenden zu können und somit die Wahrscheinlichkeiten für die aktuelle Situation berechnen zu können, bedarf es zu jedem Zeitpunkt einem ständigen Abgleich mit den aktuell anliegenden Parametern am Schiff und seiner Umgebung. Die notwendigen Parameter, welche jederzeit abgeglichen werden, ergeben sich aus

dem oben beschriebenen Verfahren. Aus den BPR1-8 ergeben sich als notwendige Parameter der Kurs β , die Schiffsrollperiode T_R , Begegnungsperiode T_e , die Wellenlänge λ , die Schiffslänge L_{pp} , die Schiffsbreite B_{mid} , die Schiffsgeschwindigkeit v_s , die metazentrische Höhe \overline{GM} , die Anfangsmetazentrische Höhe \overline{GM}_0 , die mittlere metazentrische Höhe \overline{GM}_m , die Kreisfrequenz ω_0 , die Begegnungskreisfrequenz ω_e , die mittlere Kreisfrequenz ω_m und die Wellenhöhe ζ aus den Simulationen. Unter Einbeziehung der Roll-, Gier-, Stampfperioden $T_{\varphi,\theta,\psi}$, Roll-, Gier-Stampfwinkel φ,θ,ψ , Winddauer, Fetch und des Seegangsspektrums können alle notwendigen Parameter berechnet werden (siehe Abbildung 45). Um letztere Parameter zu erhalten, bedarf es lediglich weniger aktueller Messdaten um das Schiff herum. Dies sind die aktuellen Koordinaten des Schiffes, die Windgeschwindigkeit und -richtung, die Winkelgeschwindigkeiten an Bord des Schiffes, sowie der Schiffslänge und Breite.

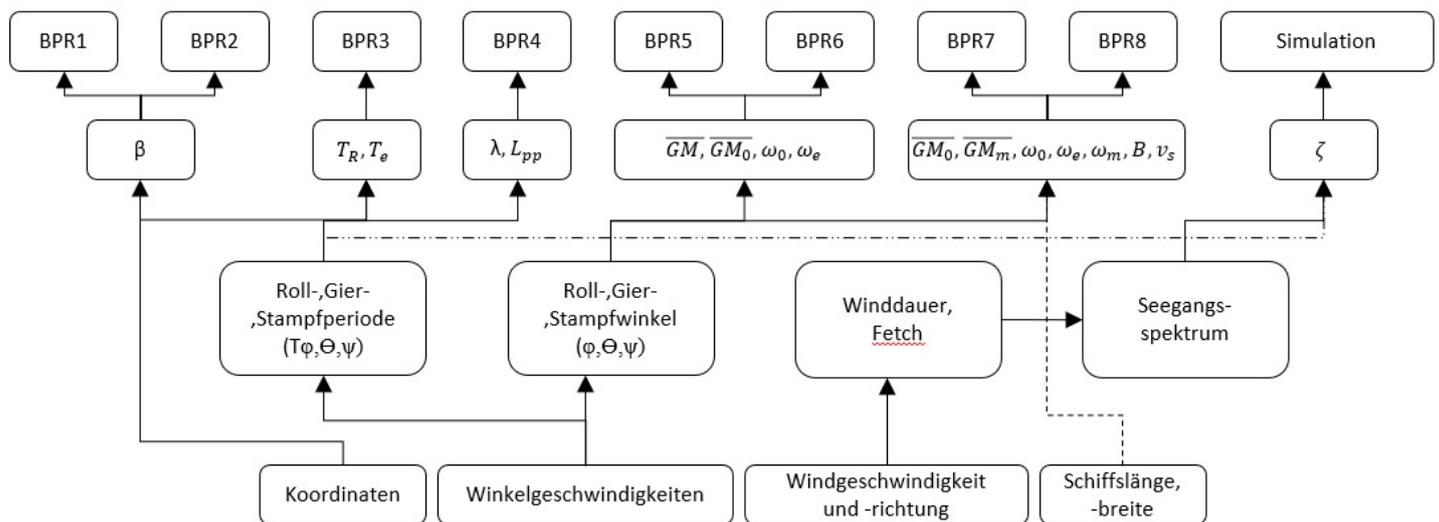


Abbildung 45: Notwendige Eingangsparameter für das Verfahren und die dazugehörigen anliegenden Messdaten des Schiffes

4.5 Berechnung der notwendigen Eingabeparameter zur Situationsbestimmung der aktuellen Lage aus den Messdaten mittels an bordbefindlicher Sensorik

Wie schon erwähnt, werden in diesem Kapitel die notwendigen Eingangsparameter für das Verfahren und seine Unterschritte berechnet. Mittels der aktuellen Messdaten des Windes, der Beschleunigungen, Koordinaten und der Schiffslänge und -breite, werden folgende Berechnungen durchgeführt:

- Kurs- und Geschwindigkeit des Schiffes
- Beschleunigungen an Bord des Schiffes
- Die metazentrische Höhe
- Der Gewichtsschwerpunkt
- Die Windrichtung und -geschwindigkeit
- Das Seegangsspektrum
- Die Wellenparameter

Hierbei wird eine zusätzliche Berechnung der Beschleunigung an jedem Punkt des Schiffes vorgestellt, welche die Erweiterbarkeit dieses Verfahren auf unterschiedliche Schiffstypen und unterschiedliche Gefahren erhöht.

4.5.1 Den Kurs und die Geschwindigkeit aus den globalen Koordinaten

Die Berechnung erfolgt aus GPS-Koordinaten des Schiffes mittels der Java-Bibliothek Geodesic¹ Library, welche mittels des Satz des Pythagoras (siehe Abbildung 46) unter Berücksichtigung der Erdkrümmung die Entfernung zwischen zwei Koordinaten berechnet und so den Kurs und die Geschwindigkeit über Grund berechnet. Um den Begegnungswinkel zu den Wellen und die tatsächliche Geschwindigkeit zu erhalten, müssen die später errechneten Wellenparameter verwendet werden.

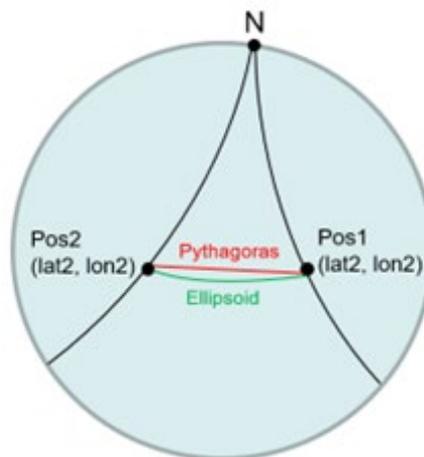


Abbildung 46: Abstand zwischen zwei Koordinaten auf einer Kugel (Martin Kompf, 2020)

¹ Eine Geodäte ist der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten und sind Lösungen zweiter Ordnung einer gewöhnlichen Differentialgleichung. Sie finden Verwendung für gekrümmte Flächen.

Die Genauigkeit der Berechnung mit der Geodesic Bibliothek beträgt bei kleinen Entfernungen etwa 15 Nanometer. Es wird die Kursbestimmungsmethode `Geodesic.WGS84.Inverse` verwendet. Diese Methode verwendet das WGS 84, welches das Standardellipsoid für geografische Berechnungen ist.

```
GeodesicData g = Geodesic.WGS84.Inverse((lat1), (long1), (lat2), (long2),GeodesicMask.DISTANCE);
```

Kurs über Grund

Durch die Nutzung der GPS-Koordinaten, wird der Kurs mittels der Java-Bibliothek Geodesic Library berechnet. Hierzu wird der Kurs zwischen der ersten und zweiten Position durch den Aufruf von `g.s12` in Grad ermittelt. Daraufhin folgt die Umrechnung in das Bogenmaß:

$$course = \frac{\pi}{180} \cdot g.s12 \quad (17)$$

Geschwindigkeit über Grund

Die Geschwindigkeit über Grund wird auch hier mittels der Java-Bibliothek Geodesic Library berechnet. Nun wird `g.s12` genutzt, um die Entfernung zwischen der ersten Position und der zweiten Position in Kilometern zu ermittelt. Im Folgenden wird die Entfernung durch die Zeitdifferenz geteilt, um die Geschwindigkeit [m/s] zu erhalten.

$$speed = \frac{g.s12 \cdot 1000}{\Delta t} \quad (18)$$

Um nun die Geschwindigkeit des Schiffes absolut zu berechnen, muss die Strömung einbezogen werden. Dieser ergibt sich vereinfacht, indem der Wind einbezogen wird. Diese Daten werden mittels eines Anemometers am Schiff ermittelt. Hierzu wird die globale Windrichtung aus dem Schiffskurs und der lokalen Windrichtung am Anemometer berechnet und analog die globale Windgeschwindigkeit aus der Schiffsgeschwindigkeit und der lokalen Windgeschwindigkeit am Anemometer.

4.5.2 Die Beschleunigungen an jedem Ort des Schiffes aus den drei gemessenen Orten

Um die Beschleunigungen zu berechnen, werden Beschleunigungssensoren an Bord des Schiffes benötigt. Mittels der aufgezeichneten Beschleunigung an einem Punkt des Schiffes, kann durch Formeln der Mechanik die Drehachse des Schiffes ermittelt werden. Dies erfolgt für die drei Achsen x, y und z des Schiffes, sodass ein Drehpunkt lokalisiert werden kann. Daraus ergibt sich mittels einfacher Berechnungen die Entfernung des Sensors zu diesem Drehpunkt. Dies wird für drei Sensoren durchgeführt und der Drehpunkt gemittelt. Durch eine exakte Angabe der Lokalisierung der Sensoren auf dem Schiffskoordinatensystem, kann der Drehpunkt in diesem lokalen

Koordinatensystem angegeben werden. Hierdurch ist es dann möglich die Beschleunigung an jedem beliebigen Ort des Schiffes zu berechnen.

Zunächst werden die Formeln für die Drehachse beschrieben. Die Drehachsen sind in Abbildung 47 dargestellt. Hierbei ist $r_{1,2}$ der Abstand vom Drehpunkt zum Sensor $S_{1,2}$ um den Rollwinkel φ und der Winkelgeschwindigkeit ω_S

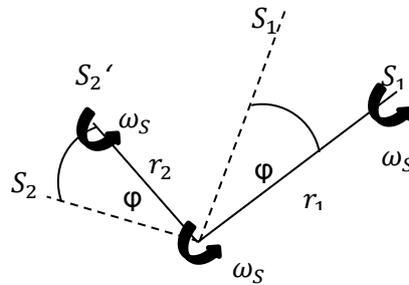


Abbildung 47: Drehachsenberechnung

Es gilt generell für die Winkelgeschwindigkeit ω_S :

$$\omega_S = \frac{2\pi}{T} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\varphi_{\text{ende}} - \varphi_{\text{anfang}}}{t_{\text{ende}} - t_{\text{anfang}}} \quad (19)$$

Und entsprechend für jede Achse:

$$\omega_{Sx} = \frac{d\varphi}{dt} \text{ und } \omega_{Sy} = \frac{d\theta}{dt} \text{ und } \omega_{Sz} = \frac{d\psi}{dt}$$

Weiterhin gilt:

$$v = r \cdot \omega_S \text{ mit } v(t) = \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt$$

Daraus folgt dass

$$\begin{aligned} v(t) &= r \cdot \omega_S \\ [at + v_0]_{t_1}^{t_2} &= r \cdot \omega_S \\ r_{x,y,z} &= \frac{[a_{x,y,z}t + v_{0,x,y,z}]_{t_1}^{t_2}}{\omega_{Sx,y,z}} \end{aligned} \quad (20)$$

Dies ist die Formel 20 zur Berechnung des Abstandes r des Sensors zum Drehpunkt.

Indem nun der Abstand bzw. der Radius r vom Sensor zum Drehpunkt berechnet wurde, kann mittels der Koordinaten der Sensoren der Drehpunkt berechnet werden, indem die Summe aus den Sensorkoordinaten mit dem Radius gebildet wird:

$$P_{Dreh} = \begin{pmatrix} P_{S_x} \\ P_{S_y} \\ P_{S_z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} \quad (21)$$

Nachdem nun der Drehpunkt des Schiffes berechnet wurde, kann an jedem beliebigen Ort des Schiffes die Beschleunigung ausgerechnet werden. Indem nun ein Raster über das gesamte Schiff gelegt wird, kann in jedem Würfel die Beschleunigung berechnet und mit Grenzwerten für Beschleunigungen an Bord von Schiffen (siehe Anhang B, Seite 107) abgeglichen werden (siehe Abbildung 48).

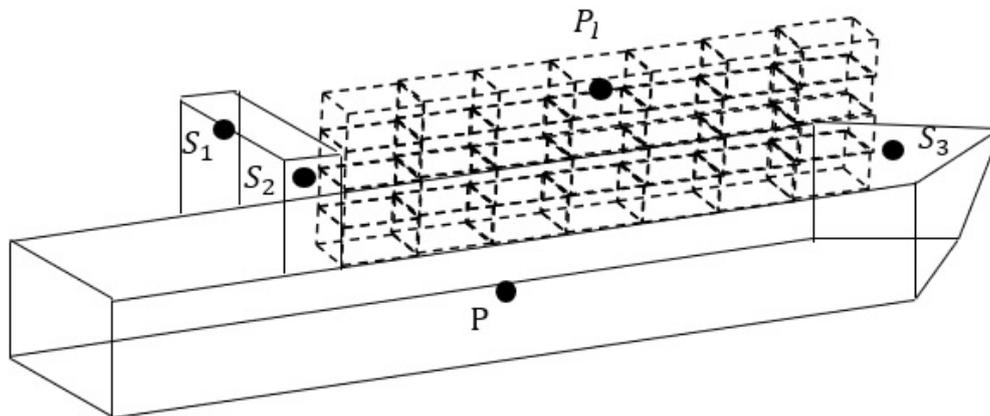


Abbildung 48: Beschleunigungsraster

Für nun jeden beliebigen Punkt P wird zunächst der Abstand zum Drehpunkt wie folgt berechnet:

$$r = \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P_{Dreh_x} \\ P_{Dreh_y} \\ P_{Dreh_z} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Womit nun die Beschleunigung in diesem Punkt berechnet werden kann:

$$a_{x,y,z} = \frac{r_{x,y,z} \cdot \omega_{x,y,z}}{t_2 - t_1} \quad (23)$$

Diese Formel ermöglicht es, die Beschleunigung an jedem Punkt des Schiffes zu berechnen.

4.5.3 Die metazentrische Höhe \overline{GM} aus den Beschleunigungen

Als Basis dieser Berechnung dienen die Entwurfsformeln aus dem Krängungsversuch und der Rolldämpfung, welche nach \overline{GM} umgestellt werden. Zunächst werden der Roll-, Stampf- und

Gierwinkel aus den Beschleunigungen der mindestens drei Beschleunigungssensoren berechnet. Die Verwendung von drei Sensoren ermöglicht die Ermittlung eines arithmetischen Mittels und einer höheren Genauigkeit der Ergebnisse. Nun wird wie im Krängungsversuch \overline{GM} mit Zeitstempel über den Winkel dargestellt. Durch Regression ergibt sich eine Geradengleichung, welche in die zu Beginn aufgestellte \overline{GM} -Gleichung aufgetragen wird, sodass \overline{GM} zu jedem Zeitpunkt t berechnet werden kann.

Krängungsversuch (Lehmann 2005)

In diesem Versuch wird ein Leerschiff bewusst zum Krängen gezwungen, indem Gewichte über die Längs- als auch Querachse verschoben werden und die entstandenen Krängungswinkel gemessen werden. Dies dient der genauen Bestimmung des Gewichtsschwerpunktes G des Leerschiffes. In Abbildung 49 (Seite 64) entsteht der Krängungswinkel φ durch die Bewegung des Gewichtes P_G über eine Strecke e . Hierbei wandert der Auftriebsschwerpunkt B zum Punkt B' aus. Die Senkrechte durch den ausgewanderten Auftriebsschwerpunkt B' schneidet die Schiffslängsachse im Metazentrum M für kleine Krängungswinkel φ ($2-4^\circ$). Die Auftriebskraft im Punkt B wirkt der Gewichtskraft im Punkt G entgegen. Hierbei ist Δ die Verdrängung (Masse vom verdrängten Wasser), \forall das verdrängte Volumen, L_{oa} die Länge über alles, B_{mla} die Breite über das Schiff, D der Tiefgang, c_B der Blockkoeffizient ρ die Dichte des Wassers, g die Gravitation und M_{Mom} ist das Moment.

$$M = P \cdot e \cdot \cos\varphi \quad (24)$$

Für kleine Winkel gilt, dass

$$\cos\varphi \cong 1$$

Daher

$$M \cong P \cdot e$$

$$\sum M_i = 0$$

$$P \cdot e - \overline{GM} \cdot \varphi \cdot \Delta = 0 \quad (25)$$

Mit

$$\Delta = \forall \cdot \rho$$

$$\Delta = L_{oa} \cdot B \cdot T \cdot c_B \cdot \rho \cdot g \quad (26)$$

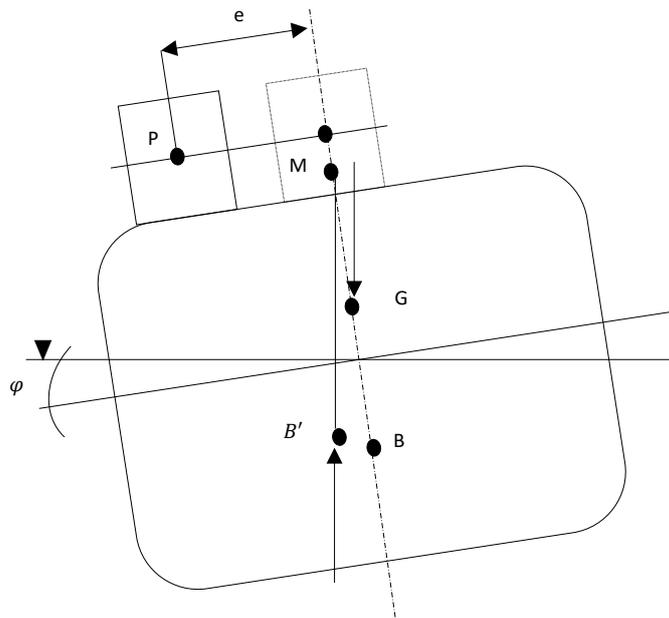


Abbildung 49: Auslenkung des Gewichtes beim Krängungsversuch

Daraus folgt, dass für die metazentrische Höhe gilt:

$$\overline{GM} = \frac{P \cdot e}{\Delta \cdot \tan\varphi} \quad (27)$$

Nachdem die Formel für die metazentrische Höhe aus der Theorie umgestellt wurde, werden weitere Entwurfsformeln benötigt.

Entwurfsformeln (Schneekluth and Bertram 1998)

Es wird die Rolldämpfung in glattem Wasser mit Dämpfung benötigt, in welcher g die Gravitationskraft, T die Rollperiode für den Winkel φ und k'_{xx} der Trägheitsradius ist:

$$T \approx \frac{2\pi \cdot k'_{xx}}{\sqrt{g \cdot \overline{GM}}} \quad (28)$$

$$\overline{GM} \approx \frac{1}{g} \cdot \left(\frac{2\pi \cdot k'_{xx}}{T} \right)^2 \quad (29)$$

Dabei beeinflusst die Dämpfung die Rollperiode kaum, sodass dies auch für größere Winkel gilt. Hierbei liegt der Trägheitsradius zwischen $0.36B_{mld}$ und $0.45B_{mld}$ und wird generell mit $0.4B_{mld}$ als Mittelwert verwendet. Des Weiteren gilt,

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (30)$$

Daraus folgt für $\varphi \leq 5^\circ$:

$$\overline{GM}_0 \approx \frac{0.16 \cdot \omega_0^2 \cdot B_{mld}^2}{g} \quad (31)$$

Und für $\varphi > 5^\circ$:

$$\overline{GM} \approx \left(\frac{2 \cdot B_{mld} \cdot 0.4}{\varphi} \right)^2 \quad (32)$$

Eine weitere Formel nun für die Berechnung des Hebelarmes h für ungedämpfte Schwingung bei vertikalen Seitenwänden und kleinen Winkeln ist:

$$h(\varphi) = \left(\overline{GM} + \frac{1}{2} \overline{BM} \cdot \tan^2 \varphi \right) \cdot \sin \varphi \quad (33)$$

Die Methode zur Berechnung des Schwerpunktes beruht auf den Messungen der Bewegungssensoren, welche auf dem Schiff verteilt sind und die Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten messen. Es bedarf mindestens 3 Sensoren, um am Ende auf eine metazentrische Höhe zu kommen. Diese Sensoren können flexibel auf dem Schiff angebracht werden (siehe Abbildung 50):

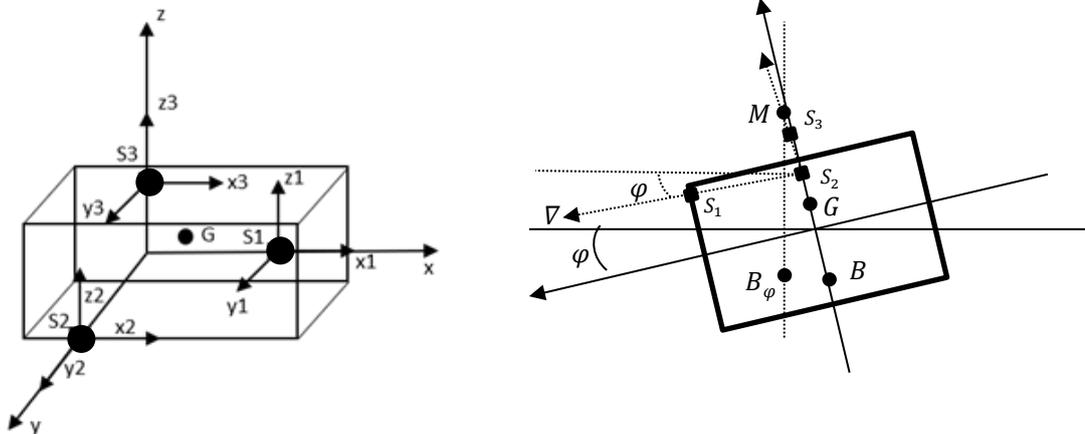


Abbildung 50: Beliebige Verteilung der Sensoren an Bord eines Schiffes und Winkelbildung während der Krängung

Während sich das Schiff bewegt, entstehen Gier- und Rollwinkel, welche auf Basis der Beschleunigungen wie folgt berechnet werden können:

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\text{Acc } Z}{\text{Acc } Y} \right) \quad (34)$$

$$\psi = \arctan \left(\frac{\text{Acc } Z}{\text{Acc } X} \right) \quad (35)$$

Nun kann \overline{GM} für jeden einzelnen Sensor berechnet werden, indem die Formel (31) angewandt wird und darauffolgend das arithmetische Mittel für jeden Sensor ermittelt werden. Hierbei ist die Breite des Schiffes gegeben. Nun werden diese Werte mit ihren jeweiligen Zeitstempeln als Funktion dargestellt:

$$F(x) = \overline{GM} \cdot \tan\varphi \quad (36)$$

Von allen Werten aus verschiedenen Zeitpunkten ergibt sich eine Regression und daraus lässt sich eine Gerade ableiten mit einer Steigung m und einem konstanten Faktor b . Der Nenner darf hierbei nie null sein (siehe Abbildung 51).

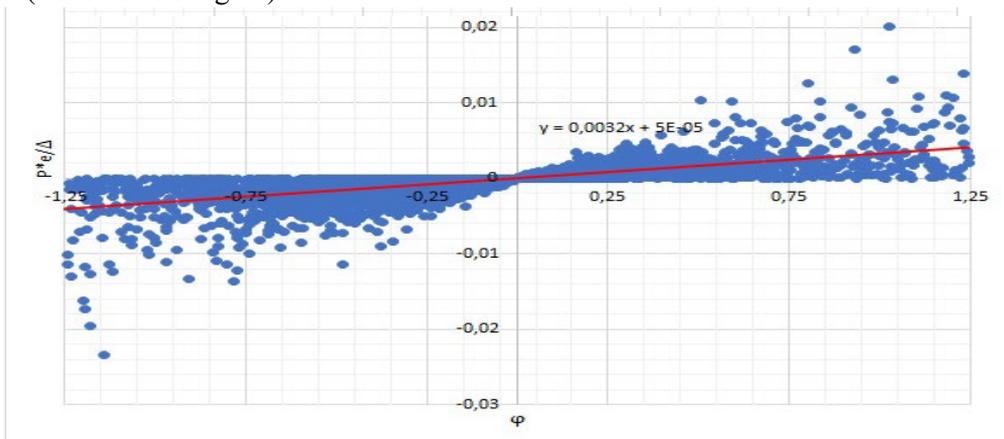


Abbildung 51: Werte für GM und die Geradenableitung

Im Gegensatz zum Krängungsversuch wird \overline{GM} über $P \cdot e$ aufgetragen, da die Verdrängung des Schiffes unbekannt ist, jedoch ein konstanter Wert ist und somit die Werte im Gesamten nicht verfälscht (Abbildung 51).

Für die Geradengleichung ergibt sich:

$$m = \frac{n \cdot \sum(x \cdot y) - \sum x \cdot \sum y}{n \cdot \sum(x^2) - (\sum x)^2} \quad (37)$$

$$b = \frac{\sum y \cdot \sum(x^2) - \sum x \cdot \sum(x \cdot y)}{n \cdot \sum(x^2) - (\sum x)^2} \quad (38)$$

Die ermittelten Werte für m und b können nun in die bekannte lineare Gleichung eingefügt werden:

$$y = m \cdot x + b \quad (39)$$

Und nun kann mittels der vereinfachten Gleichung (27) die metazentrische Höhe \overline{GM} berechnet werden:

$$\overline{GM} = \frac{y}{\tan\varphi} \quad (40)$$

Einfügen von (39) ergibt:

$$\overline{GM} = \frac{m \cdot x + b}{\tan(x)} \quad (41)$$

Und für $x = 57.3$ aus der Hebelarmkurve, zum Bogenmaß umgewandelt:

$$\overline{GM} = \frac{m \cdot \frac{57.3 \cdot \pi}{180} + b}{\tan\left(\frac{57.3 \cdot \pi}{180}\right)} \quad (42)$$

Diese Formel dient zur Berechnung der metazentrischen Höhe \overline{GM} mit welcher im nächsten Schritt der Gewichtsschwerpunkt des Schiffes berechnet wird.

4.5.4 Den Gewichtsschwerpunkt G des Schiffes aus der metazentrischen Höhe \overline{GM}

Um den Gewichtsschwerpunkt G des Schiffes zu berechnen, wird zunächst aus den Beschleunigungen der drei Sensoren der Weg des einzelnen Sensors mittels zweifacher Integration über die Beschleunigung berechnet. Dieser Weg und somit die Strecke vom Zeitpunkt t_1 und zum Zeitpunkt t_2 wird für die XY-,YZ- und XZ-Ebene im Ortsfesten Koordinatensystem berechnet. Für drei Sensoren ergeben sich somit in jeder Ebene drei Strecken $\overline{S_{1t_1}S_{1t_2}}$, $\overline{S_{2t_1}S_{2t_2}}$, $\overline{S_{3t_1}S_{3t_2}}$ für die Zeitpunkte t_1 und t_2 . Für diese drei Strecken wird jeweils mathematisch die Senkrechte ermittelt. Die drei Senkrechten schneiden sich im Punkt M, das Metazentrum des Schiffes zum Zeitpunkt t_2 . So ergeben sich die Metazentren der XY-,YZ- und XZ-Ebenen. Daraus ergibt sich im lokalen Koordinaten System der Punkt M(x,y,z) von welchem der zuvor berechnete \overline{GM} subtrahiert wird, sodass der Gewichtsschwerpunkt G(x,y,z) resultiert.

Im ersten Schritt müssen die Koordinaten des Metazentrums berechnet werden. Hierzu werden die Rotationszentren der jeweiligen Sensoren $S_{1,2,3}$ geometrisch ermittelt, welche das Metazentrum M darstellen (siehe Abbildung 52).

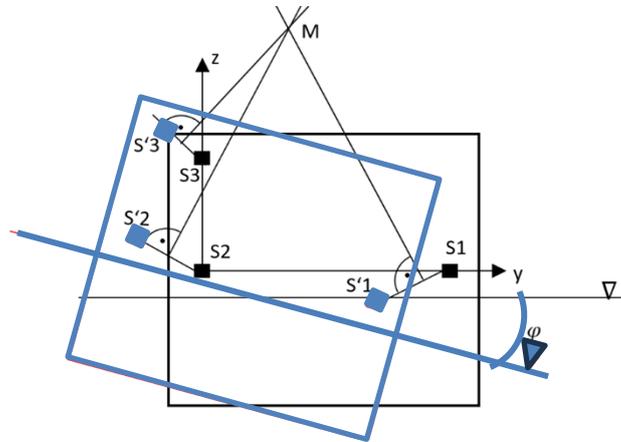


Abbildung 52: Auswanderung der Sensoren bei einem Winkel φ

Die Senkrechten, welche durch das Zentrum der zurückgelegten Strecke $\overline{S_i S'_i}$ der jeweiligen Sensoren gehen, schneiden sich im Metazentrum. Da die Beschleunigungen bekannt sind, kann durch zweifache Integration der zurückgelegte Weg s berechnet werden:

$$v(t) = \int_{t_1}^{t_2} a(t)dt + v_0 \quad (43)$$

$$s(t) = \int_{t_1}^{t_2} v(t)dt + v_0 \cdot t + s_0 \quad (44)$$

Im zweiten Schritt werden nun die Ergebnisse integriert, um die Koordinaten zu erhalten, indem die Wege summiert werden. Hierzu werden zunächst die Sensorkoordinaten $S(x; y; z)$ des Ortsfesten Koordinatensystems ($O: \vec{x}; \vec{y}; \vec{z}$) verwendet. Hier wird die über alle Sensoren gemittelte Höhenachse der zeitlich letzten Messung als Höhe h_s zurückgegeben. Für jeden Sensor wird nun ein zentraler Punkt berechnet, indem der Durchschnitt jeder Achse gebildet wird. Nun muss die Steigung m jeweils für zwei Achsen berechnet werden. Dies wird so oft wiederholt, bis jede Achse mit einer zweiten Achse kombiniert wurde. Hier exemplarisch für die x,y-Achsen:

$$m_{xyt_{Si}} = \frac{s(y)_{t_{Si}} - s(y)_{t-1_{Si}}}{s(x)_{t_{Si}} - s(x)_{t-1_{Si}}} \quad (45)$$

Dies ist die Steigung für jeden Zeitpunkt und jeden Sensor, welche im nächsten Schritt umgedreht und negiert wird. Als nächstes müssen die Konstanten b_{xy}, b_{xz}, b_{yz} für die Geradengleichung in jeder Achse berechnet werden.

$$b_{xyt_{Si}} = y_{M_{Si}} - (m_{xyt_{Si}}) \cdot x_{M_{Si}} \quad (46)$$

Mit $y_{M_{Si}}$ als y-Wert des Mittelpunktes des jeweiligen Sensors. Nun wird von allen Sensoren jedes mögliche Paar gebildet und für die Berechnung x, y und z-Werte des Metazentrums verwendet.

$$x_{it} = \frac{b_{xySq} - b_{xySp}}{m_{xySq}^{-1} - m_{xySp}^{-1}} \quad (47)$$

Alle Parameter werden nun gemittelt, sodass die Koordinaten für das Metazentrum aufgeschrieben werden können, sodass von der Koordinate M, die des Anfangsschwerpunktes abgezogen werden können und somit der aktuelle Schwerpunkt resultiert.

$$\begin{pmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ GM_0 \end{pmatrix} \quad (48)$$

Diese Gleichung ermöglicht es den Gewichtsschwerpunkt des Schiffes zum Zeitpunkt t zu berechnen.

Mit diesen gewonnenen Daten wird nun die Seegangssituation um das Schiff berechnet. Zunächst wird ein Spektrum definiert, mittels welchem die Wellenparameter berechnet werden können.

4.5.5 Globale Windrichtung und -geschwindigkeit aus der lokalen Windrichtung und -geschwindigkeit

Das Anemometer gibt die Windgeschwindigkeit und Windrichtung an Bord des Schiffes wieder, jedoch nicht die wahre Windrichtung und wahre Windgeschwindigkeit im globalen System. Daher werden diese beiden Werte in diesem Unterkapitel wie folgt berechnet (David Burch 2010):

$$V_{WT} = \sqrt{v_s^2 + V_w^2 - (2 \cdot v_s \cdot V_w \cdot \cos(\alpha_w))} \quad (49)$$

$$\theta_w = \arccos \frac{V_w^2 - V_{WT}^2 - v_s^2}{2 \cdot V_{WT} \cdot v_s} \quad (50)$$

Hierbei ist V_{WT} die wahre Windgeschwindigkeit [m/s], v_s die Schiffsgeschwindigkeit [m/s], V_w die anliegende Windgeschwindigkeit [m/s] und α_w die anliegende Windrichtung und θ_w die wahre Windrichtung.

4.5.6 Berechnung des Seegangsspektrums

Um ein konkretes Seegangsspektrum zu berechnen, wird eine Klassifizierungsheuristik angewandt. Die Klassifizierung verläuft nach Art des Spektrums. Es wurden in den Grundlagen vier idealisierte Spektren vorgestellt, welche sich in ihrer Anwendung derart explizit unterscheiden, sodass eine Klassifizierung anhand des Windes, der Zeit und des Fetches vollzogen werden kann. So kann relativ simpel und schnell ein Spektrum angenommen werden. Zu diesem Zweck wird zunächst der Aufbau einer *Klassifikationsheuristik* vorgestellt, gefolgt von den *Schwellen- und Grenzwerten* für diese und dann zum Schluss die *erforderlichen Parameter und Transformationen der Spektren*.

Klassifizierungsheuristik

Die Basis ist ein Entscheidungsbaum mit Wahr/Falsch-Möglichkeiten, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Ausgangspunkt sind die Schwellenwerte für die verschiedenen Klassen. Auf der Grundlage dieser Daten werden die Klassen mit wahr/falsch-Entscheidungen ausgewählt. In dieser Arbeit werden die vier idealisierten Hauptspektralfamilien aus Kapitel 2.1 (Seite 13) als Klassen dargestellt. Die folgenden vier Klassen werden für die Klassifizierungsheuristik genutzt:

- Klasse I: Ochi-Six-Parameter Spektrum
- Klasse II: Brettschneider Spektrum
- Klasse III: Pierson-Moskowitz Spektrum
- Klasse IV: JONSWAP Spektrum

Diese Anordnung der Klassen I-IV ergibt sich aus dem nun folgenden Absatz zu den Schwellenwerten und Transformationen. Ein wichtiger Hintergrund dieser Anordnung und des Entscheidungsbaums ist der Einsatz für ein Assistenzsystem. Deshalb ist der Entscheidungsbaum so aufgebaut, dass die Klassifizierung während der Seereise ständig wiederholt wird. So wird die Veränderung der See kontinuierlich berücksichtigt:

Schwellenwerte für die verschiedenen Klassen I-IV

Schwellenwerte und Grenzwerte werden benötigt, um im weiteren Verlauf dieser Methode die oben gewählten Klassen I-IV im Entscheidungsbaum nacheinander abzufragen. Um eine geeignete Spektralfamilie zu ermitteln und die Transformationsfunktion zu verwenden, können umweltbezogene Schwellenwerte definiert werden. Diese Schwellenwerte hängen von Wind und Fetch ab. Windgeschwindigkeit, -dauer und -richtung können mit einem Richtungswindmesser gemessen werden, während für die Abschätzung des Fetch x folgende Vorbereitungen getroffen werden müssen: Da der Fetch die Entfernung ist, die in der Richtung, aus der der Wind weht, ständig mit Wasser bedeckt ist, ist er die Entfernung zur Küste in dieser spezifischen Richtung. Für jede Richtung kann eine Karte erstellt werden, die die Entfernung von jedem Ort auf dem Meer zur

Küste in dieser Richtung enthält. Je nach Windrichtung kann die entsprechende Karte verwendet werden, um den Fetch abzuschätzen.

Des Weiteren wird zwischen dem voll entwickelten und dem sich entwickelnden Seegang unterschieden. Der voll entwickelte Seegang impliziert ein Gleichgewicht zwischen Quelltermen und Energiedissipation, während das Gleichgewicht asymptotisch durch sehr geringes Wellenwachstum in seiner Nähe erreicht wird.

Nach Komen et al. (Komen et al. 1984) ist es schwierig, zwischen "keinem Wachstum" und "sehr geringem Wachstum" von Wellen zu unterscheiden. Außerdem kann der voll entwickelte Zustand nur erreicht werden, wenn der Wind konstant über einen ausreichend großen Fetch bläst, ohne seine Richtung zu ändern. Abgesehen von den theoretischen Schwierigkeiten, einen vollständig entwickelten Seegang mit Hilfe von Gleichgewichtsgleichungen nachzuweisen, deuten diese Einschränkungen also auf eine geringe Wahrscheinlichkeit für sein Auftreten hin. Pierson et al (W.J. Pierson, R.W. James, and G. Neumann 1955) stellten fest, dass das Stadium einer voll entwickelten See "bei einer unendlich langen Dauer der Windeinwirkung über einen unendlich langen Fetch" erreicht wird. Eine gute Annäherung an diesen Zustand ist die vollständig entstandene See, definiert als der Zustand, bei dem die Energiemenge, die benötigt wird, um die vollständig entwickelte See zu erreichen, vernachlässigt werden kann. Dieser Zustand erfordert eine Mindestdauer der Windeinwirkung t_m über einen Mindestfetch x_m bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit. Eine Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit V_m , t_m und x_m für voll entwickelte See wird von Pierson et al. (W.J. Pierson, R.W. James, and G. Neumann 1955) angegeben und in folgender Abbildung 53 dargestellt. Mit ansteigender Windeinwirkung t_m über die Höhe der Windgeschwindigkeit V_W steigt der Mindestfetch x_m an. Dies bedeutet, dass der Wind umso stärker wehen kann, desto länger er die Richtung nicht wechselt oder umgekehrt, umso länger er gleichbleibend aus einer Richtung weht, desto stärker kann er werden.

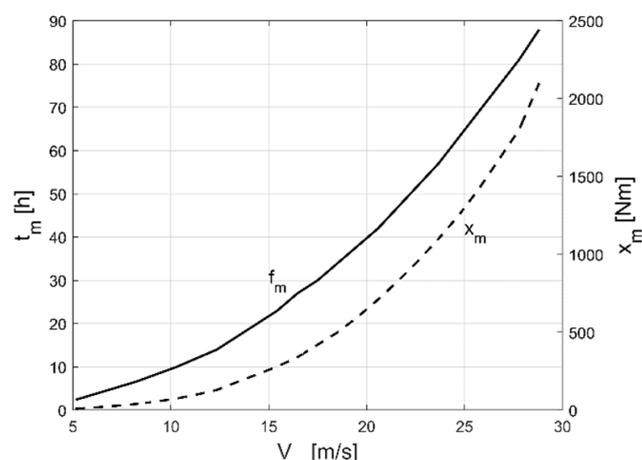


Abbildung 53: Beziehung zwischen der Windgeschwindigkeit und kleinstem als auch Länge des Fetch (W.J. Pierson, R.W. James, and G. Neumann 1955)

Nun werden die Parameter t_m und x_m als Schwellenwerte für die Klassifikationsheuristik verwendet. Die Wahl der Schwellenwerte hängt von den Randbedingungen der jeweiligen Klasse ab siehe Abbildung 54 .

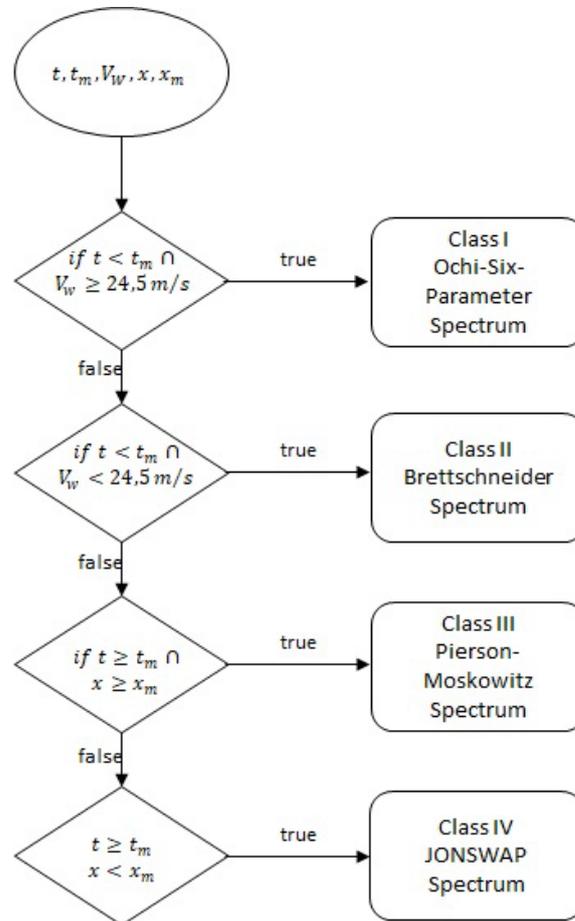


Abbildung 54: Entscheidungsbaum für die Klassifizierungsheuristik

In der Abbildung 54 ist der Entscheidungsbaum für ein späteres Assistenzsystem dargestellt. Es werden hierfür die Zeit t , die Dauer der Windeinwirkung t_m , die Windgeschwindigkeit V_m , der Fetch x und ein der Abstand über eine bestimmte Windgeschwindigkeit x_m benötigt.

Die erste Abfrage führt in die *Klasse I: das Ochi-Six-Parameter Spektrum*

Wie in Kapitel 2.1 (Seite 13) handelt es sich um einen sich entwickelnden Seegang, daher wird $t < t_m$ gesetzt. Weiterhin gilt dieses Spektrum für Sturm und somit wird die zweite Abhängigkeit für den Wind auf $V_w \geq 24,5 \text{ m/s}$ gesetzt. Dieser Wert ist aus der Beaufortskala entnommen, welche ab Windstärke 10 einen Sturm definiert. Auch wenn die Klasse 1 unter stürmischen Bedingungen verwendet wird, können aufgrund des Entstehungsprozesses der Wellen (zunächst) geringe Wellenhöhen auftreten. Ochi und Hubble (Ochi and Hubble 1976) geben für jede Wellenhöhe Parameter für die Gleichung (6) an, um den Entwicklungsprozess ausreichend zu beschreiben.

Wenn nun $t < t_m$ und $V_w \geq 24,5 \text{ m/s}$ erfüllt sind, wird die Klasse I mit der Formel (6) für weitere Berechnungen angewandt. Im Fall, dass diese Bedingungen nicht erfüllt sind, wird die nächste Abfrage eingeleitet.

Die nächste Abfrage führt in die *Klasse II: das Brettschneider Spektrum*

Ebenso wie das Ochi-Six-Parameter Spektrum ist das Brettschneider Spektrum für sich entwickelnde See geeignet, wenn es wie vom ITTC vorgeschlagen, parametrisiert wird. Der Unterschied zur ersten Abfrage besteht in der Verwendung unter schwachen bis mäßigen und nicht unter stürmischen Bedingungen. Die Schwelle, die zwischen Klasse I und II entscheidet, ist also die Windgeschwindigkeit. Bei einer Windgeschwindigkeit unter 24 [m/s] und einer Winddauer unter dem entsprechenden Schwellenwert $t < t_m$ und $V_w \geq 24,5 \text{ m/s}$ wird die Klasse II und die Formel (4) verwendet.

Die dritte Abfrage führt in die *Klasse III: das Pierson-Moskowitz Spektrum*

Das Pierson-Moskowitz-Spektrum ist das einzige Spektrum, welches für die Beschreibung einer voll entwickelten See verwendet wird. Sowohl die Winddauer als auch der Fetch überschreiten ihre jeweiligen Schwellenwerte. Eine vollständig entstandene See ist nicht auf hohe Windgeschwindigkeiten beschränkt, daher gibt es keinen Schwellenwert für die Windgeschwindigkeit der Klasse III. Es gelten hier folgende Bedingungen $t \geq t_m$ und $x \geq x_m$ und die Formel (3).

Die letzte Abfrage führt in die *Klasse IV: das JONSWAP Spektrum*

Dieses Spektrum ist durch den Fetchdistanz begrenzt. Weiterhin wurde das JONSWAP-Spektrum aus dem Pierson-Moskowitz-Spektrum gebildet. Daher wird die Klasse IV verwendet, wenn die Winddauer über dem entsprechenden Schwellenwert liegt, die Fetchdistanz aber unter dem Schwellenwert. Daher $t \geq t_m$ und $x < x_m$ und die Formel (5).

Nachdem nun der Entscheidungsbaum mit den dazugehörigen Bedingungen für die Klassen beschrieben wurde, folgen die notwendigen Parameter für die einzelnen Klassen. Hierbei können einige Klassen durch eine Transformation dazu dienen, eine andere Klasse darzustellen, auch wenn die Parameter für diese Klasse nicht vollständig vorhanden sind. Dies dient dazu, mit so wenig wie möglich Parametern ein Spektrum für das System zu berechnen.

Parameter und Transformationen (siehe Abbildung 55, Seite 75) (Lewis, 1989)

Die erste Klasse I ist das Ochi-Six-Parameter Spektrum und benötigt lediglich die signifikante Wellenhöhe H_s für die Formel (6) und dient dazu, die sechs Parameter für die Berechnung, der aus elf Spektren bestehenden Wellenspektrenfamilie, zu ermitteln. Hierbei ist ein Spektrum das wahrscheinlichste und die zehn anderen treten zu 95% auf. Aus diesem Spektrum können durch Umformung die Klassen II und II gebildet werden. Daher kann das Ochi-Six-Parameter Spektrum durch $\lambda = 1$ und $\omega_m = 0.4\sqrt{g/H_s}$ in ein Pierson-Moskowitz Spektrum umgewandelt werden, sodass Klasse III berechnet werden kann. Im Falle, dass lediglich $\lambda = 1$ gesetzt wird, transformiert sich das Spektrum in ein Brettschneider Spektrum Klasse II.

Das Brettschneider-Spektrum aus Klasse II benötigt als Eingangsparameter die signifikante Wellenhöhe H_s und die Periode T (ITTC, 1987) und kann, wie beschrieben durch $\lambda = 1$ oder direkt mit der Formel (4) berechnet werden. Durch Umformung kann dieses Spektrum in das Pierson-Moskowitz oder dem JONSWAP Spektrum gewandelt werden. Für den ersteren Fall gilt, dass

$$A = \alpha g^2 \quad (51)$$

$$\text{und } \frac{B}{\omega^4} = \beta \left(\frac{g}{V_w} \right)^4 \quad (52)$$

Für die Umwandlung in das JONSWAP Spektrum gilt:

$$A = \alpha g \quad (53)$$

$$\text{und } \cdot \gamma \exp \frac{-(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2}$$

In der Klasse III, dem Pierson-Moskowitz Spektrum, wird nur die Windgeschwindigkeit V_w benötigt, um das Spektrum, wie in der Formel (3) darzustellen. Durch Multiplikation kann dieses Spektrum in ein JONSWAP Spektrum umgewandelt werden. Der dazugehörige Multiplikator und Normalisierungsfaktor A_γ lautet:

$$A_\gamma \cdot \gamma \exp \frac{-(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2} \quad (54)$$

$$\text{mit } A_\gamma = 1 - 0,287 \ln \gamma$$

Die letzte Klasse IV, das JONSWAP Spektrum, ist abhängig von zwei Parametern. Dies sind die Windgeschwindigkeit V_W und die Periode T. Diese Klasse kann entweder aus der Transformation aus Klasse II oder III abgebildet werden oder durch direkte Anwendung der Formel (5).

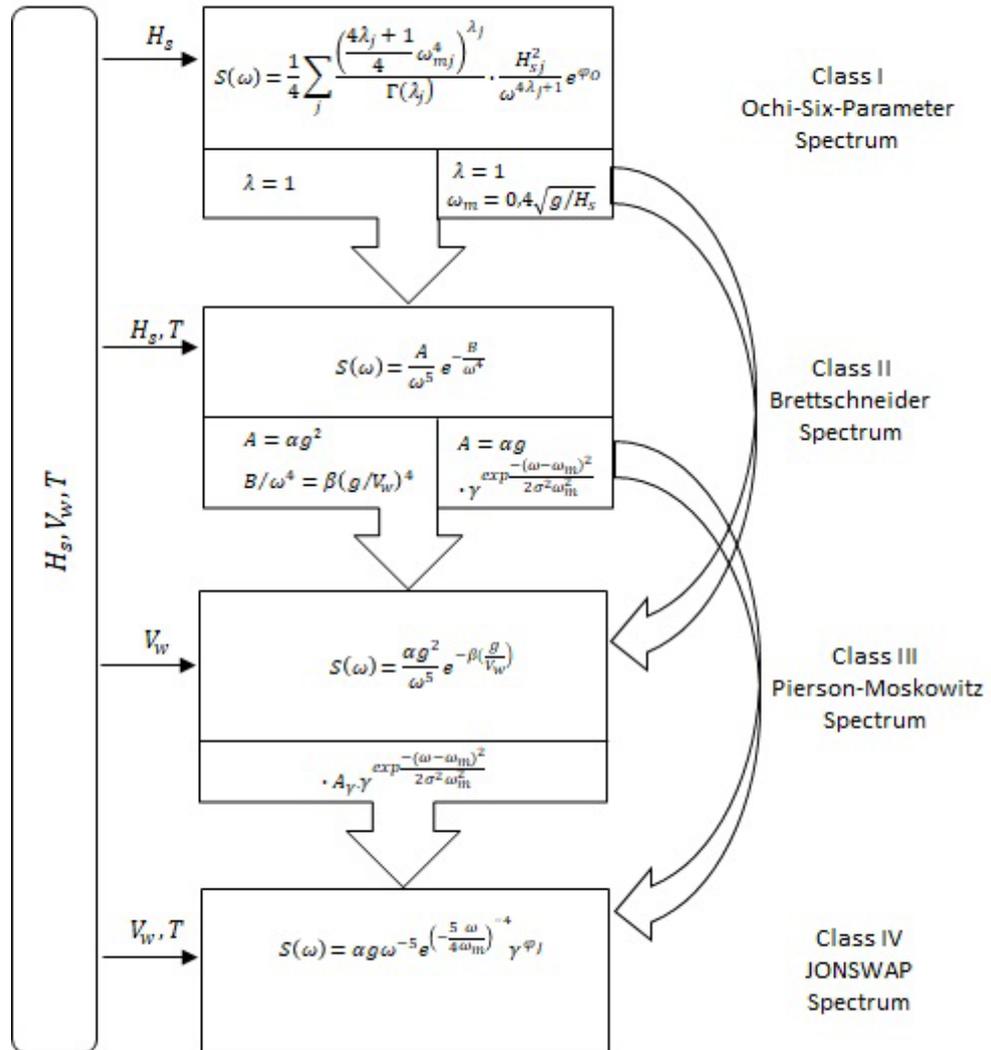


Abbildung 55: Benötigte Parameter und mögliche Transformationen der Spektren

4.5.7 Berechnung der Wellenparameter

Aus den vorigen Berechnungen ist unter anderem der Rollwinkel φ vorhanden und wird im folgenden verwendet, um zunächst die Schiffsrollperiode T_R zu berechnen, indem der Rollwinkel φ über die Zeit t aufgetragen wird, die Maxima berechnet werden und die Zeitdifferenz dieser der Rollperiode entspricht. Unter Annahme der Vereinfachung, dass sich die Schiffslänge L_{pp} im Bereich 0,7-1,3fachen der Wellenlänge λ (BPR4) befindet, ist die Wellenperiode T vereinfacht gleich die Antwortperiode und somit gleich der Rollperiode. Daraus kann mit der Schiffsgeschwindigkeit v_s und der anliegenden Windrichtung θ_W die Begegnungsperiode T_e berechnet werden. Zusätzlich kann aus der Wellenperiode T die Wellenlänge λ berechnet werden.

Unter Verwendung der idealisierten Seegangsspektren und ggf. einer Umformung kann nun die Wellenhöhe H berechnet werden.

Es folgen nun für diese Arbeit eigens entwickelte Berechnungen der Begegnungsperiode T_e , der Wellenperiode T , der Wellenhöhe H , der Wellenamplitude ζ und der Wellenlänge λ .

Natürliche Rollperiode ist die charakteristische Periode, um die Krängungsbewegung unter kleinen Winkeln eines Schiffes zu beschreiben und wird für die weiteren Parameterberechnungen benötigt. Sie wird aus den Winkelgeschwindigkeiten gewonnen, indem für kleine Winkel ($\varphi \leq 5^\circ$) die natürliche Rollperiode berechnet wird. Es wird wie folgt vorgegangen:

Zunächst werden die berechneten Winkel φ über der Zeit aufgetragen. Der Winkel wird wie folgt berechnet:

$$\varphi = \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt = \left[\frac{\omega t^2}{2} + \varphi_0 \right]_{t_1}^{t_2} \quad (55)$$

Nachdem φ_i über die Zeit aufgetragen wurde, werden die Bereiche, in denen die Kurve die x-Achse schneidet einzeln betrachtet (siehe Abbildung 56).

Die Bereiche der Abbildung 56 werden durch vier Punkte aufgeteilt, sodass eine Parabelgleichung mit einem Gauß-Algorithmus aufgestellt werden kann. Es resultiert eine Funktion $z(t)$. Nun werden die Extrempunkte für die Funktion berechnet. Dies wird für zwei positive Berge durchgeführt, sodass die y-Werte der zwei Extrempunkte voneinander differenziert werden können und somit die Rollperiode berechnet wird:

$$T_R = t_{max} - t_{max_vor} \quad (56)$$

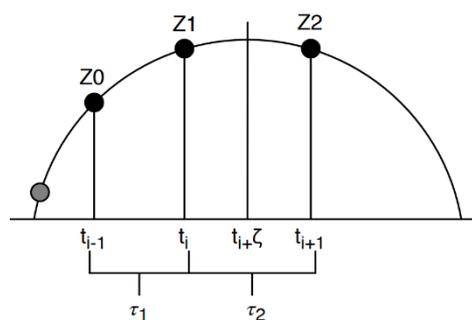


Abbildung 56: Betrachtungsbereich

Wellenperiode T ist die Periode der Welle selbst. Dies bedeutet die Zeit, die zwischen zwei Wellenbergen vergeht, welche dieselbe Stelle passieren. Im Gegensatz zur Begegnungsperiode T_e , die den Zeitraum des Wellenmusters beschreibt, den das durchfahrende Schiff erlebt, hängt die Wellenperiode T ausschließlich von der Wellenform ab. Das bedeutet, dass zwei Schiffe, die sich

durch dasselbe Wellenmuster bewegen, aber unter verschiedenen Winkeln, im Allgemeinen unterschiedliche Begegnungsperioden, aber dieselbe Gesamtwellenperiode messen würden. Wenn man nun vereinfacht annimmt, dass die Wellenperiode gleich der Antwortperiode des Schiffes ist, kann man für große Neigungswinkel ($\varphi > 5^\circ$), die Wellenperiode wie folgt berechnen:

$$T = t_{max} - t_{max_vor} \quad (57)$$

Die Maxima werden, wie zuvor bei der natürlichen Rollperiode ermittelt.

Begegnungsperiode T_e ist die Periode, mit welcher das Schiff auf die Wellenberge trifft oder die Zeit, die zwischen dem letzten Auftreffen auf einen Wellenberg und dem jüngsten Auftreffen verstrichen ist. Die Idee ist, später die umgebenden Wellenformen rückwärts zu berechnen, wobei die tatsächliche Periode auf der Begegnungsperiode T_e des Schiffes basiert. Es gilt (Lewis 1989):

$$\text{mit } T_e = -\frac{T^2 g}{Tg - v_s 2\pi \cos\beta} \quad (58)$$

Die Schiffsgeschwindigkeit v_s wurde aus den GPS-Daten gewonnen und der Begegnungswinkel β wird vereinfacht als die anliegende Windrichtung α_W betrachtet.

Wellenhöhe H ist definiert als der Höhenunterschied zwischen dem Wellenberg und dem nächstfolgenden Wellental. Es gilt, dass die Wellenhöhe H , das Zweifache der Wellenamplitude ζ ist (Lewis 1989):

$$H = 2\zeta \quad (59)$$

Wellenamplitude ζ ist also die Hälfte der Wellenhöhe H . Es gilt (Lewis 1989):

$$\zeta = \sqrt{2 \cdot S(\omega) \Delta\omega} \quad (60)$$

Das Wellenspektrum $S(\omega)$ ist aus der Klassifizierungsheuristik der Seespektren bekannt und muss dementsprechend eingefügt werden, um die Amplitude zu berechnen. Aus den bekannten Formeln ergibt sich jedoch, dass das Ochi-Six-Parameter und Bretschneider-Spektrum aus den Wellenhöhen gebildet werden, sodass diese beiden Spektren für die Berechnung hier nicht angewandt werden können. Daher müssen das Pierson-Moskowitz oder das JONSWAP Spektrum verwendet werden. ω ergibt sich aus der Wellenperiode T :

$$\text{mit } \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (61)$$

Wellenlänge λ ist die Länge der Welle, die den räumlichen Abstand zwischen zwei Wellenbergen zueinander beschreibt. Genau wie die Wellenperiode T ist sie rein von der Wellenform selbst abhängig. Es gilt (Lehmann 2005):

$$\text{mit } T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (62)$$

$$\text{und } \omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} \quad (63)$$

$$\lambda = \frac{gT^2}{\pi} \quad (64)$$

Mittels dieser vorgestellten eigens entwickelten Berechnungen ist es möglich alle notwendigen Eingangsparameter zu jedem Zeitpunkt zu ermitteln und das Verfahren im laufenden Betrieb anzuwenden. Dies ermöglicht es zu jedem Zeitpunkt eine aktuelle Gefahrenermittlung und Empfehlung, falls die Gefahr des parametrischen Rollens hoch ist und unterscheidet sich somit von derzeitigen Systemen. Es folgt die Evaluation des Systems.

5 Abschließende Betrachtung des Verfahrens zur Vermeidung parametrischen Rollens

In diesem Kapitel werden die einzelnen Schritte und das gesamte Verfahren zur Vermeidung parametrischen Rollens abschließend betrachtet und anderen Methoden gegenübergestellt. Zuletzt wird die Umsetzung des Systems an Bord verschiedener Schiffstypen vorgestellt.

Wie schon im Konzept im Kapitel 4.1 (Seite 41) vorgestellt, besteht das Verfahren aus drei Schritten (siehe Abbildung 57). Die Schritte 1 und 2 finden parallel statt und enden mit dem dritten Schritt, der Empfehlung für eine alternative Geschwindigkeit und/oder einem alternativen Kurs.

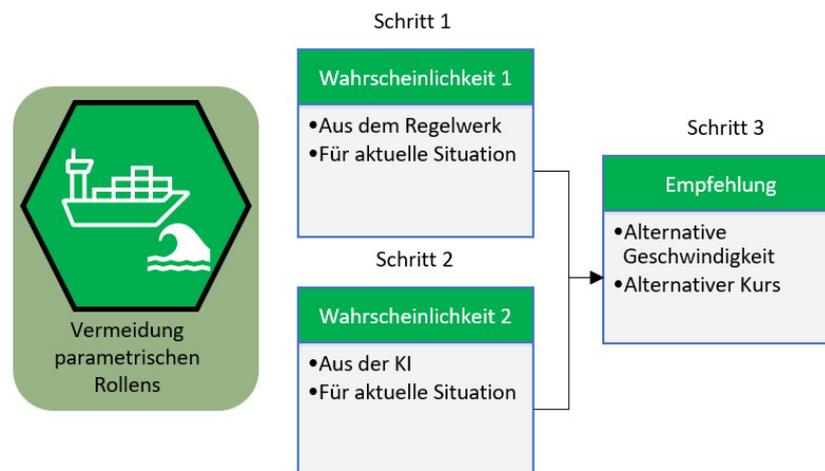


Abbildung 57: Verfahren zur Vermeidung parametrischen Rollens

Es folgen die Auswertungen der einzelnen Schritte.

5.1 Auswertung der Wahrscheinlichkeit des Regelwerkes (Schritt 1)

Die Auswertung der Wahrscheinlichkeiten aus dem Regelwerk wurde anhand der Simulationen aufgestellt. Hierbei werden alle Simulationen anhand des Baumdiagrammes aus Kapitel 4.2.5 (Seite 51) sortiert und anhand dessen ausgewertet, welches System korrekt oder inkorrekt einen Alarm ausgibt. Daraus ergibt sich respektive ein Accuracy¹, Precision² und Recall-Wert³ (siehe Tabelle 6, Seite 60). Es konnten die Methoden der IMO (IMO, 2007), die OCTOPUS-Software (Accomi et al, 2016) und PAROLL (DNVGL, 2013) mit dem hier vorgestellten Verfahren (SAiA, Chhoeung)

¹ Genauigkeit eines Modells, Anteil von korrekten Vorhersagen an allen getroffenen Vorhersagen

² Verhältnis korrekt vorhergesagter positiver Beobachtungen zu den gesamten vorhergesagten positiven Beobachtungen

³ Verhältnis korrekt vorhergesagter positiver Beobachtungen und allen Beobachtungen mit parametrischen Rollen

verglichen werden, da diese die angewandten BPR verwendet haben. Die Verfahren von S.Ribeiro und C.G. Soares (Ribeiro Silva and Guerdes Soares, 2013 und MARIN (Gunsing und Wageninger, 2010) konnten nicht verglichen werden, da diese die BPR5 und BPR6 unter Hinzunahme der metazentrischen Höhe \overline{GM} zusätzlich verwenden und somit ein direkter Vergleich der Verfahren noch nicht möglich ist, solange \overline{GM} noch nicht in die Simulation eingefügt wurde.

Tabelle 6: Auswertung der Wahrscheinlichkeiten des Regelwerkes (Schritt 1)

	BPR	Accuracy	Precision	Recall
IMO (IMO, 2007)	1, 2, 3a	66,79%	75,99%	61,37%
OCTOPUS-Software (Accomi et al, 2016)	1, 2, 3a, 4a	65,93%	90,45%	53,28%
S. Ribeiro und C.G. Soares (Ribeiro Silva and Guedes Soares, 2013)	1, 2, 5, 6	x	x	x
PAROLL (DNVGL, 2013)	1, 2, 3, 4a	65,93%	90,45%	53,28%
MARIN (Gunsing und Wageninger, 2010)	5, 6	x	x	x
SAiA (Chhoeung, Verfahren zur Vermeidung p.R.)	1, 3a, 3b, 4a, 4b, 7, 8	100,00%	100,00%	100,00%

Die zu vergleichenden Methoden besitzen eine Accuracy von 65-67% und das hier vorgestellte Verfahren bei 100% liegt. Dies bedeutet, dass die bestehenden Verfahren zu 65% genau auf Basis der simulierten Daten sind.

Hierbei hätte die Methode der *IMO (IMO, 2007)* zu 33% kein parametrisches Rollen erkannt und zu 16% parametrisches Rollen hervorgesagt, ohne dass es aufgetreten ist. Die Genauigkeit (Accuracy) liegt bei 66,79%. Somit würde für ein Schiff das Risiko in unerkanntes parametrisches Rollen zu geraten bei dieser Methode zu 33% hoch sein und 16% der Alarme wären Fehlalarme des Systems von 75,99%. Die Präzision liegt bei 75,99% erkannten parametrischen Rollens von aufgetretenem parametrischem Rollen.

Die OCTOPUS-Software (Accomi et al. 2016) und die PAROLL Methode (DNVGL, 2013) sind zu 65,93% genau und hätten zu 46,11% kein parametrisches Rollen erkannt und zu 5,56%

parametrisches Rollen hervorgesagt, ohne dass es aufgetreten wäre. Daher wären 46,79% parametrisches Rollen nicht entdeckt worden, jedoch nur zu 5,56% Fehllarme ausgegeben worden. Die Präzision liegt bei 90,45% erkannten parametrischen Rollens von aufgetretenem parametrischem Rollen.

Da das hier vorgestellte Verfahren auf Basis dieses Baumdiagrammes erstellt wurde, ist es entsprechen exakt mit 100% Genauigkeit und Präzision. Dies ermöglicht somit eine sehr genaue Wahrscheinlichkeitsberechnung innerhalb der simulierten Grenzen zum Vermeiden parametrischen Rollens.

Es folgt nun die Auswertung der KI anhand von echten Messdaten und Simulationen.

5.2 Auswertung der Wahrscheinlichkeit mittels KI (Schritt 2)

Die Auswertung der Wahrscheinlichkeiten wurde anhand der aufgezeichneten Messdaten über mehrere Monate an Bord verschiedener Schiffe und Simulationen vorgenommen. Hier ergaben sich 168.852 Datensätze, mit welchen die KI evaluiert werden konnte (siehe Tabelle 7). Die Genauigkeit (Accuracy) der KI liegt bei 97,86%, wobei in 2.390 Fällen kein parametrisches Rollen hervorgesagt wurde, trotz Auftretens. Dies bedeutet, dass zu 1,42% keine Warnung ausgegeben worden wäre, trotz der Gefahr des Auftretens parametrischen Rollens. Zu 0,21% wären Fehllarme aufgetreten. Die Präzision (Precision) liegt bei 99,79% erkannten parametrischen Rollens von aufgetretenem parametrischem Rollen.

Tabelle 7: Auswertung der Wahrscheinlichkeiten mittels KI

TP = 167.922	FP = 359
FN = 2.390	TN = 930

Da keine anderen Verfahren mittels einer KI arbeiten, kann kein Vergleich stattfinden, jedoch arbeitet die hier trainierte KI mit einer Präzision von 99,79% sehr genau. Die Auswertung fand anhand realer Daten und simulierter Daten statt, sodass Schiffsverhalten und Seekonditionen außerhalb der trainierten und simulierten Parameter zur Evaluation der KI herangezogen worden. Und dennoch ist die Präzision sehr hoch und zeigt die sehr hohe Exaktheit der KI. Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit mittels der KI ist fast zu 100% exakt.

Es folgt nun die Auswertung des dritten Schrittes des Verfahrens zur Vermeidung parametrischen Rollens.

5.3 Auswertung der Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlung (Schritt 3)

Im dritten Schritt wird eine Empfehlung für den Kurs oder der Geschwindigkeit auf Basis der Wahrscheinlichkeiten aus dem Regelwerk und der KI für den jeweiligen Kurs oder der Geschwindigkeit ausgegeben. Dadurch, dass das Verfahren zunächst die Wahrscheinlichkeit anhand des Regelwerkes und des aufgestellten Baumdiagrammes prüft, sind nur die zu diesem Zeitpunkt simulierten Wellenperioden, Begegnungsperioden, Wellenlängen, Schiffslängen, Begegnungswinkel, Schiffsgeschwindigkeiten und Wellenhöhen inbegriffen. Somit ist diese Wahrscheinlichkeitsprüfung eher beschränkt. Jedoch wird in dem angewandten Verfahren zusätzlich die Wahrscheinlichkeit mittels der KI geprüft, welche im vorigen Schritt zu 99,79% präzise war, sodass eine Kurs- oder eine Geschwindigkeitsempfehlung im hohen Maße sicher gegen parametrisches Rollen ist.

5.4 Bewertung der Ergebnisse

Das hier vorgestellte Verfahren zur Vermeidung parametrischen Rollens weist eine sehr hohe Präzision auf und ist im Vergleich zu existierenden Methoden zu 24,01 bis 9,55% präziser. Dies betrifft jedoch für den ersten Schritt nur Seegangsbedingungen innerhalb der simulierten Parameter und ist somit, mit einem großen Zeitaufwand, ausbaufähig. Demgegenüber steht die sehr hohe Präzision der KI, welche zufällige und reale Seegangsbedingungen exakt vorhergesagt hat. Durch die Kombination beider Wahrscheinlichkeiten ist das Verfahren zu 33,21 bis 34,7% genauer als die bestehenden Verfahren.

Das beschriebene System wurde implementiert und bereits auf verschiedenen Schiffen installiert, sodass Messdaten aus unterschiedlichen Seegebieten mit unterschiedlichen Schiffstypen entstanden sind.

6 Installation an Bord verschiedener Schiffe

Die Installation des Systems auf verschiedenen Schiffstypen verlief im Laufe der Bearbeitungszeit dieser Arbeit und wurde entsprechend dem Fortschritt der Arbeit sukzessiv erweitert. Zu Beginn wurden lediglich über drei Beschleunigungssensoren die Daten erfasst und in den letzten Messungen ein RaspberryPi und eine Festplatte zur Aufnahme und Berechnung, ein Display zur Ausgabe, drei Beschleunigungssensoren, ein Windsensor und ein GPS-Gerät zur Aufnahme der notwendigen Daten (siehe Abbildung 58). Die Schiffsdaten wie die Länge und Breite wurden dem System direkt zur Verfügung gestellt.

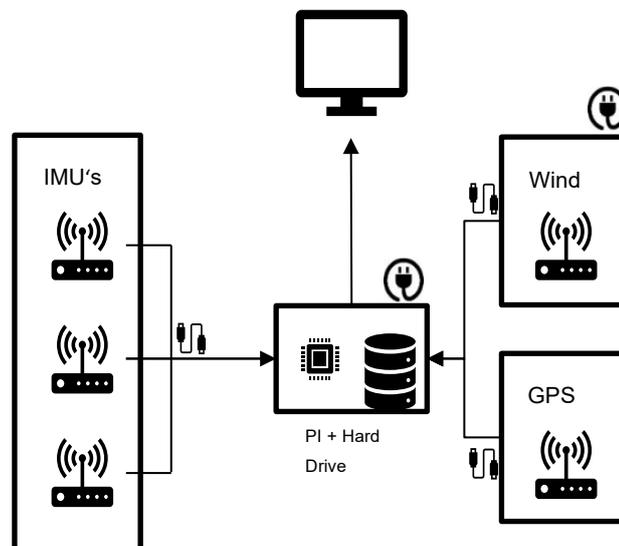


Abbildung 58: Aufbau des Systems für die Datenaufnahme

Im Folgenden werden zunächst die Schiffe vorgestellt, danach die Eingangsdaten in das System und zuletzt die Ausgangsdaten des Systems.

6.1 Die Schiffe

Im Laufe der Bearbeitungszeit wurde auf vier Schiffen und darunter drei unterschiedlichen Schiffstypen Messungen vorgenommen. Hierbei wurden zu Beginn Messungen auf einer Fähre, darauffolgend auf zwei Forschungsschiffen und zuletzt auf einem Containerschiff durchgeführt.

Fähre – DFDS Seaways 07.02.2019 – 08.02.2019



Schiffslänge: 178,40m

Schiffsbreite: 29,61m

Tiefgang: 6,22m

Seegebiet: Ostsee

Aufbau: Im

Konferenzraum

Sensorik: 3 IMUs¹

Abbildung 59: Fähre DFDS Seaways (www.directferries.co.uk)

Das System bestand aus einem Laptop und drei Beschleunigungssensoren (siehe Abbildung 60), welche die Winkelgeschwindigkeiten aufgenommen haben. Der Aufbau fand im Konferenzraum Steuerbord der Fähre statt. Es liegen Messdaten von drei Tagen vor.

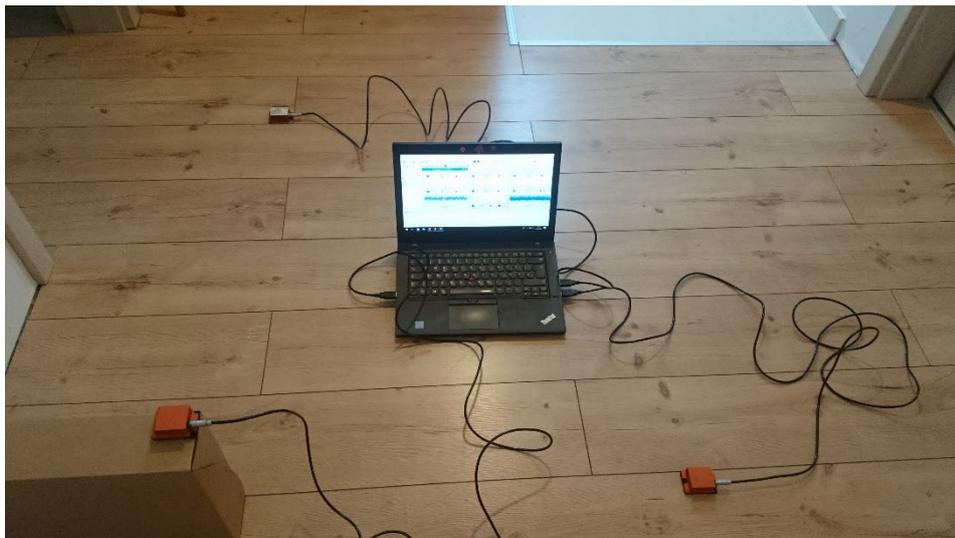


Abbildung 60: Messaufbau Fähre

¹ IMU: Inertial Measurement Unit, Beschleunigungssensoren



Schiffslänge: 64,20m
Schiffsbreite: 12,50m
Tiefgang: 3,90m
Seegebiet: Nord- und Ostsee
Aufbau: Brücke
Sensorik: 3IMUs, Anemometer, GPS

Abbildung 61: Forschungsschiff DENE B vom BSH

Der anfängliche Aufbau des Laptops und der drei Beschleunigungssensoren wurde erweitert um ein Anemometer, um die Windrichtung und -stärke aufzunehmen, als auch ein GPS-Gerät, um die Koordinaten zu ermitteln. Der Aufbau des Laptops fand auf der Brücke statt (siehe Abbildung 64, Seite 86). Die Beschleunigungssensoren wurden auf der Brücke und im Außenstand installiert (siehe Abbildung 65, Seite 86). Das Anemometer wurde am höchstmöglichen Punkt des Mastes befestigt (siehe Abbildung 62) und das GPS-Gerät auf dem Peildeck (Abbildung 63). Es liegen Messdaten von einem Tag vor.



Abbildung 62: Anemometer am Mast



Abbildung 63: GPS-Gerät auf dem Peildeck



Abbildung 64: Systemaufbau auf der DENEb

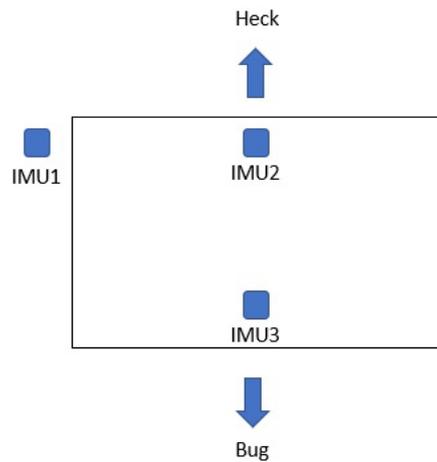


Abbildung 65: Sensoranordnung (IMU's)
WEGA und DENEb auf der
Brücke

Forschungsschiff – WEGA 25.06.2019-01-07-2019



Schiffslänge:
64,20m
Schiffsbreite:
12,50m
Tiefgang: 3,90m
Seegebiet: Nord-
und Ostsee
Aufbau: Brücke
Sensorik: 3IMUs,
Anemometer, GPS

Abbildung 66: Forschungsschiff WEGA vom BSH

Auf dem baugleichen Forschungsschiff WEGA wurde das System mit Laptop, drei Beschleunigungssensoren, Anemometer und GPS ebenfalls auf der Brücke, dem Peildeck und dem Mast identisch zur DENEb realisiert. Es liegen Messdaten für 7 Tage vor.



Schiffslänge: 270m

Schiffsbreite: 40m

Tiefgang: m

Seegebiet: Nordsee,
Mittelmeer

Aufbau: Brücke

Sensorik: 3 IMUs,
Anemometer, GPS

**Abbildung 67: Containerschiff MSC Madrid von der Reederei Offen
(www.marinetraffic.com)**

Der Aufbau des Systems auf der MSC Madrid erfolgte mittels bereits implementierter Software für die Berechnungen der notwendigen Eingangsparameter aus Kapitel 4.5, Seite 58. Hierzu wurde ein RaspberryPi in einen Koffer installiert und ein Display in den Deckel eingearbeitet (siehe Abbildung 69, Seite 88). Die drei IMU's, welche in den vorigen Messungen verwendet wurden, wurden in einer identischen Anordnung auf der Brücke und dem Seitenstand installiert, wie schon auf der DENEb und der WEGA. Der Windsensor wurde an dem höchsten erreichbaren Punkt des Mastes befestigt und das GPS-Gerät auf dem Peildeck. Hinzukamen 6 kostengünstige Beschleunigungssensoren, welche entkoppelt vom System Daten an verschiedenen Orten des Schiffes aufnahmen. Hierbei wurden die Installation in der Messe, den Fluren im Deckshaus und in der Bosumswerkstatt realisiert (siehe Abbildung 68). Es liegen Messungen von 4 Monaten vor.



Abbildung 68: Diverse Beschleunigungssensoren

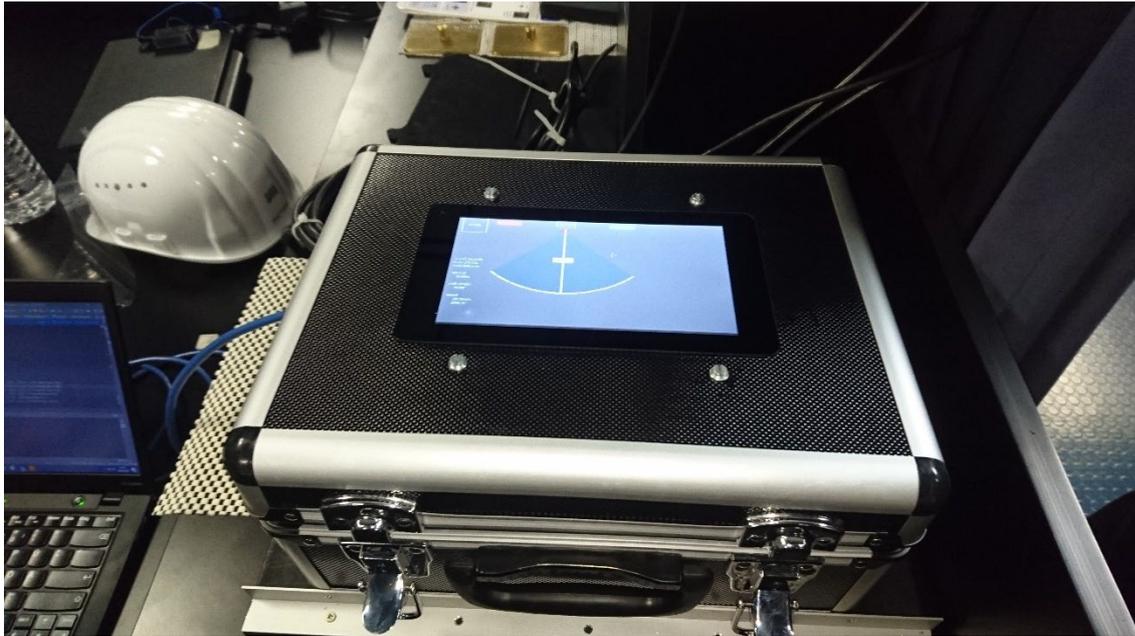


Abbildung 69: Aufbau des Systems auf der MSC Madrid

Nachdem das System an Bord der MSC Madrid installiert wurde, mussten die notwendigen Eingangsdaten zur Verfügung gestellt werden.

6.2 Eingangsdaten des Systems

Eingangsdaten sind die Schiffslänge, -breite, -höhe (wenn verfügbar), die Konstruktionsspanntenweite (für die Berechnung der Beschleunigungen), der Schiffstyp und die Koordinaten jedes einzelnen Beschleunigungssensor im schiffsfesten Koordinaten System (siehe Abbildung 70).

Sys. Config	Ship parameter	
System	Length [m]	150.0
	Width [m]	50.0
	Hight [m]	55.0
	Frame width [m]	0.9
	Ship Type	Container Ship
	origin x [m]	40.0
	origin y [m]	25.0
	origin z [m]	10.0
Sensors		
	...	Position
	-	x [m]
		y [m]
		z [m]

Abbildung 70: Eingangsdaten in das System

Daraus ergibt sich ein Überblick der installierten Beschleunigungssensoren auf dem Schiff (siehe Abbildung 71)

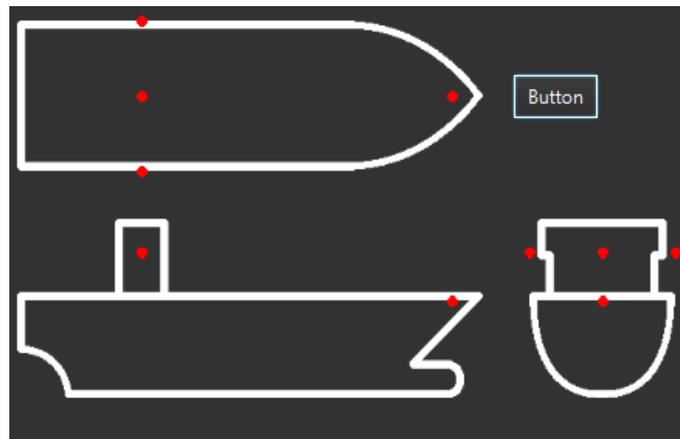


Abbildung 71: Positionierung der Beschleunigungssensoren

Details der installierten Sensorik folgt im nächsten Kapitel.

6.3 An Bordbefindliche Sensorik und andere Hardware

Die verwendeten Sensoren und andere Hardwarekomponenten sind der Tabelle 8 zu entnehmen:

Tabelle 8: Hardwarekomponenten des Systems

Hardwarekomponenten	Spezifikation	
GPS Empfänger	GPS Antenne Simrad GS-25	
Windsensor/Anemometer	B&G Windsensor 608	
IMU	XSENS MTI 100-Serie	
IMU	Xsens MTI 10-Serie	
IMU	AZ Delivery MPU 6050	
NMEA 2000 Network	NMEA 2000 Network:	T-Adapter x3
		Terminator x2
		Power Supply
NMEA 0183 Converter	Actisense NGT-1	
Raspberry Pi	Rasperry PI 4 Modell B 2 GB	
Touchscreen Display	Rasperry Pi3 7"	

Die Verbindung der Hardwarekomponenten ist der Abbildung 72 (Seite 90) zu entnehmen. Hierbei sind der *GPS Empfänger* und das *Anemometer* an ein NMEA2000 Netzwerk verbunden und sind über dieses am Stromkreislauf angeschlossen. Die hier gemessenen Daten werden an ein Raspberry

Pi mittels eines Converters gesendet. Der Converter transformiert die NMEA2000-Daten in NMEA0183 Daten, da dies ein verfügbarer Standard ist.

Die *XSens IMU's* sind mittels USB Kabel an einen USB Hub verbunden, welcher wiederum am Raspberry Pi (Microcomputer) angeschlossen ist.

Die *MPU 6050 IMU's* übertragen kabellos ihre Daten direkt an den Raspberry Pi.

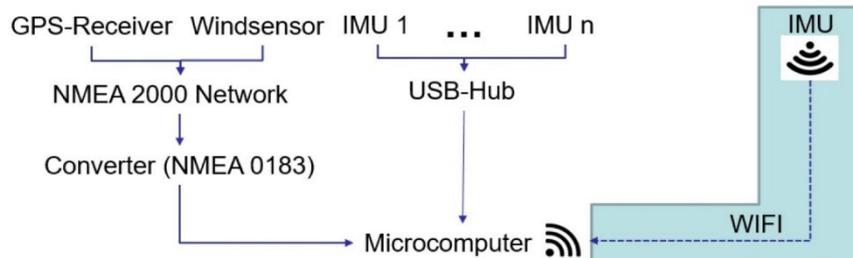


Abbildung 72: Vernetzung der Hardwarekomponenten des Systems

Die Ausgabe des Systems erfolgt über den Touchscreen Display.

6.4 Ausgangsdaten des Systems

Nachdem die Eingangsdaten in das System gepflegt wurden, können über den Startbildschirm (siehe Abbildung 73) unterschiedliche Informationen abgerufen werden. Zunächst ist auf dem Startbildschirm selbst im linken Bereich die aktuelle berechnete Schiffsgeschwindigkeit (speed), der aktuelle berechnete Rollwinkel (roll angle) und die aktuellen berechneten Winddaten (Geschwindigkeit und anliegender Kurs) angegeben. Rechts oben kann man zurück in das Eingabefeld für die Schiffsparameter und Beschleunigungssensoren. In der Mitte kann man über den Touchscreen nun in folgende Themen (Berechnungen) wählen:

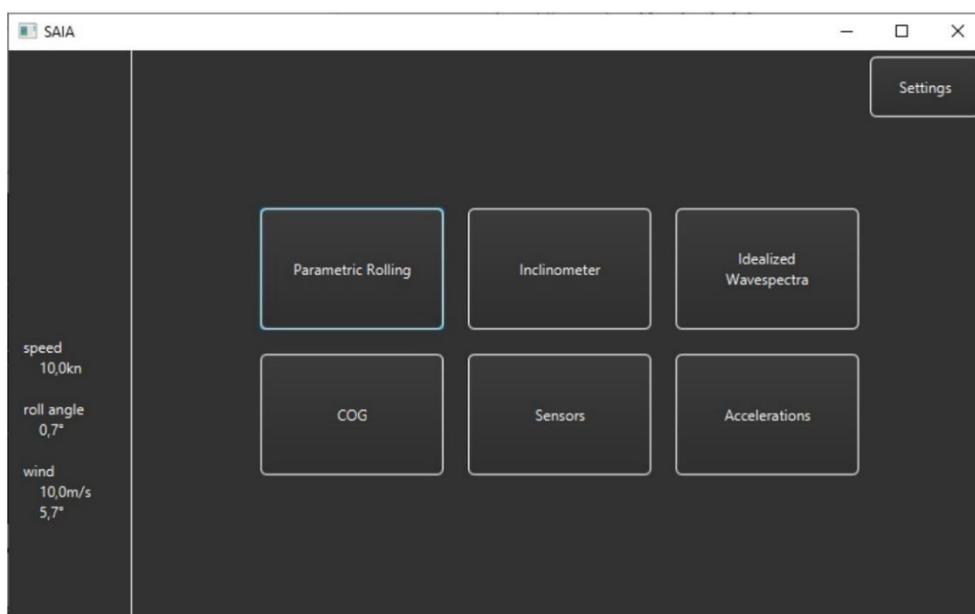


Abbildung 73: Startbildschirm über das Display des Systems

- Parametrisches Rollen
- Inklinometer
- Idealisierte Seespektren
- Schiffsschwerpunkt (COG = center of gravity)
- Sensoren
- Beschleunigungen

Nachfolgend in dieser Reihenfolge beschrieben.

Parametrisches Rollen

Um den Anwender ein schnelles und einfaches Lesen der Ausgabedaten zu gewähren, wurde die Ausgabe der IMO-Präsentation (IMO, 2007) angepasst, sodass der Anwender sich in keine komplizierten neuen Graphiken einlesen muss (siehe Abbildung 74). Hier wird durch den blauen Pfeil der Kurs des Schiffes zu den Wellen angezeigt und durch den gelben Pfeil wird die Windrichtung dargestellt. Weiterhin ist in dieser Ausgabe die Begegnungsperiode T_e durch die rot gestrichelte Linie erkenntlich gemacht. In diesem Zuge wurden hier zusätzlich die Grenzwerte für das BPR3a und 3b eingepflegt, sodass visuell direkt eine Annäherung an diese Grenzen realisiert wurde. Die Anzeige der Risikolevel basiert aus der aktuellen implementierten Version des Verfahrens zur Vermeidung parametrischen Rollens. Die Wahrscheinlichkeiten des Regelwerkes und der KI waren zum Zeitpunkt der Installation an Bord noch nicht implementiert, sodass dass ein vereinfachtes Verfahren zur Risikoermittlung verwirklicht wurde, um der Schiffsführung ein Indiz auf die Gefahr zu geben.

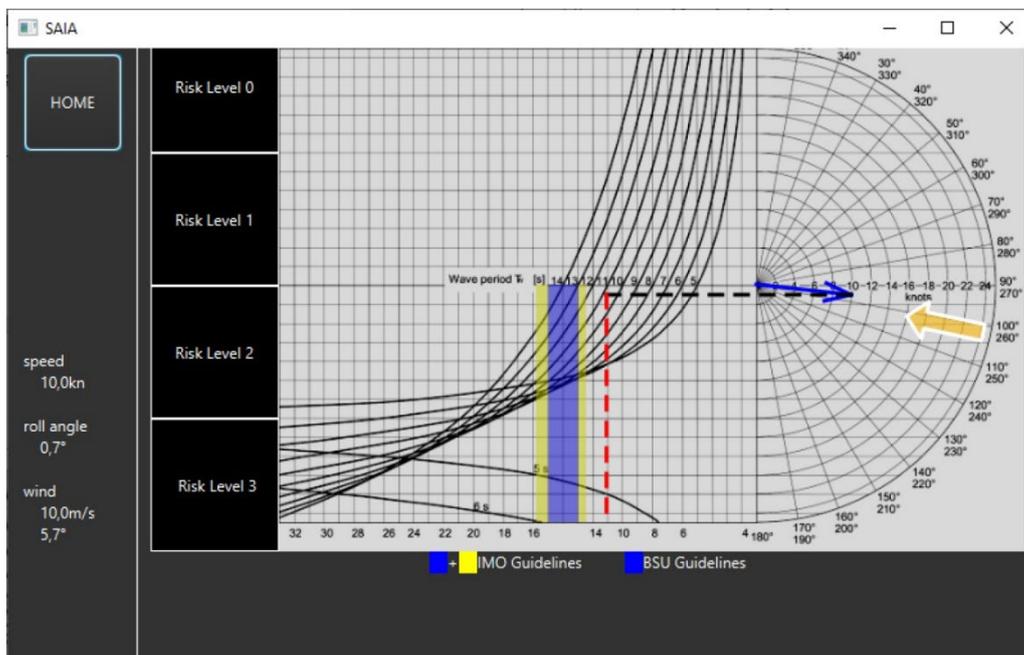


Abbildung 74: Display Ausgabe - Parametrisches Rollen

Um die Risikolevel 0-3 zu bewerten, wurden die BPR1-8 verwendet, indem bei einer Übereinstimmung der aktuellen Berechnungen für den Seegang und der Schiffsparameter das Risiko ansteigt, umso mehr BPR's erfüllt sind (siehe Abbildung 75). Im konkreten Fall bedeutet es, wenn die BPR1, 2, 3a und 3b erfüllt sind ist das Risiko 0 (grün) ausgegeben, wenn zusätzlich die BPR4a und 4b zutreffen, wird das Risiko auf gelb (1) eingestuft. Im Falle, dass die BPR5 und 6 hinzukommend erfüllt werden, steigt das Risiko auf die zweite Stufe (orange) an. Wenn nun noch die BPR7 und 8 ebenfalls erfüllt werden, wird die Risiko Stufe 3 (rot) ausgegeben. Als zusätzliche Stufe, wurde eine Abfrage über die letzten 20 Perioden hinzugefügt, welche überprüft, ob der Rollwinkel stetig ansteigt und 15° übersteigt, sodass in letzter Instanz der höchste Alarm des Impacts parametrischen Rollens ausgegeben wird. Diese Abstufung und anfängliche Alarmausgabe, ermöglichte es bereits in diesem Stadium des Systems, Warnungen für parametrisches Rollen auszugeben.

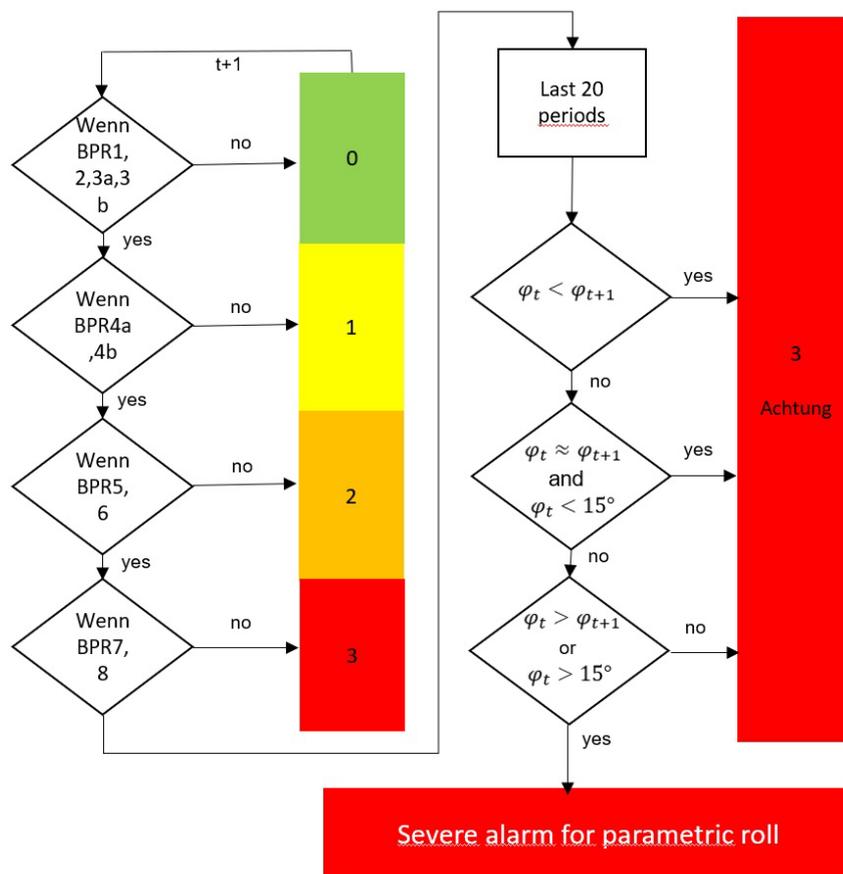


Abbildung 75: Risikoalarme des parametrischen Rollens

Hierbei wurde in dieser frühen Entwurfsphase darauf geachtet, der Schiffsführung keine störenden akustischen Signale vorzugeben, sondern visuelle Alarmer (siehe Abbildung 76).

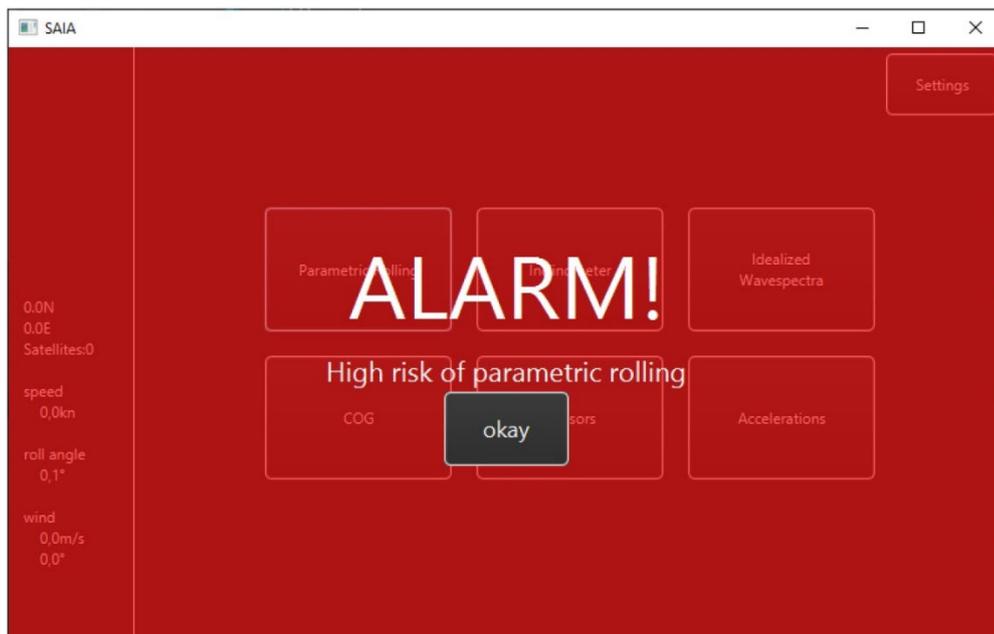


Abbildung 76: Display Ausgabe - Alarm Ausgabe

Inklinometer

Das Inklinometer gibt den Rollwinkel des Schiffes wieder und ist maßgeblich für die Zulassung des Systems. Wie bei einem bordseitigem Inklinometer, werden die maximalen aufgetretenen Rollwinkel der letzten 24 Stunden für Steuerbord (grün, rechts vom Schiff) und Backbord (rot, links vom Schiff), neben dem aktuellen auf dem Inklinometer direkt abzulesenden Rollwinkel, angezeigt (siehe Abbildung 77).

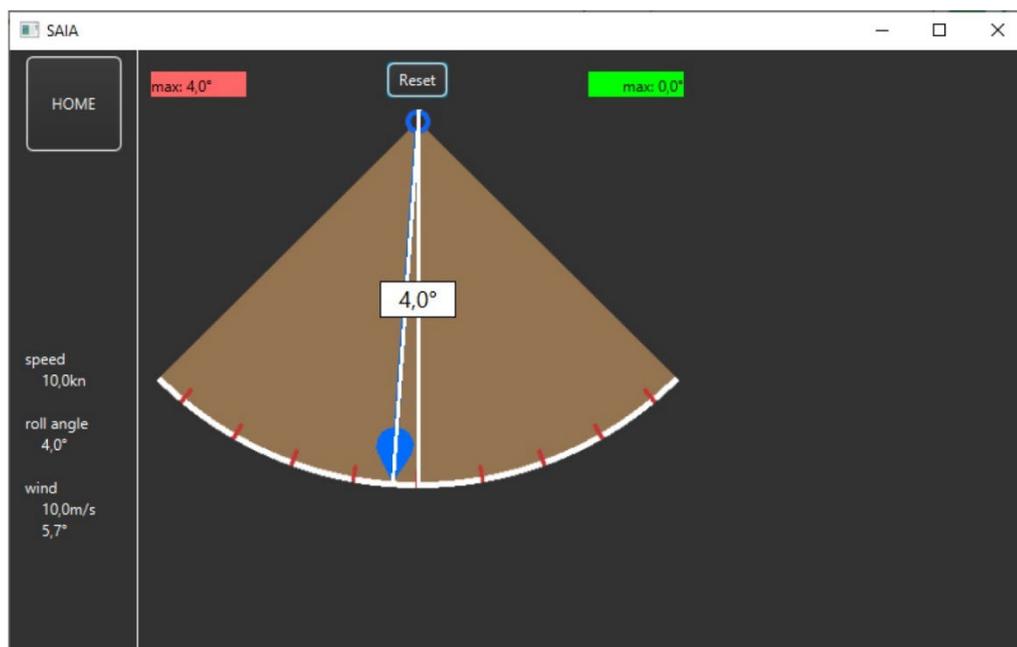


Abbildung 77: Display Ausgabe - Inklinometer

Idealisierte Seespektren

Die idealisierten Spektren werden mit der aktuellen berechneten Wellenhöhe, -periode und -frequenz ausgegeben. Zusätzlich wird die Verteilungsfunktion des identifizierten Spektrums ausgegeben (siehe Abbildung 78).

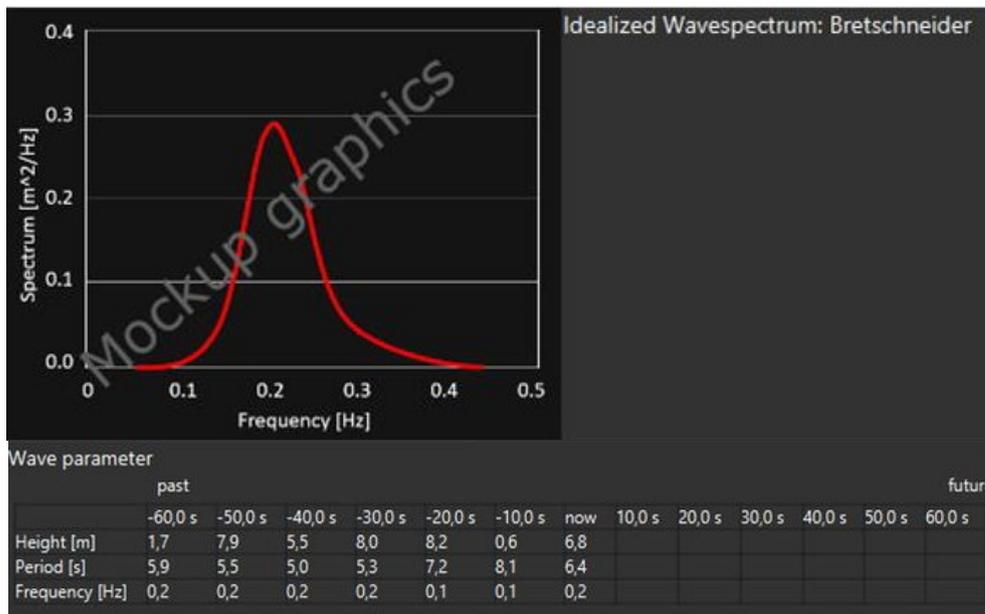


Abbildung 78: Display Ausgabe - Idealisierte Seespektren

Schiffsschwerpunkt G

Der aktuelle Schiffsschwerpunkt wird im Display über die skizzierte Darstellung des Schiffes aufgetragen. Zusätzlich wird das berechnete Metazentrum aufgetragen. Rechts oben sind die Koordinaten im schiffsfesten Koordinatensystem ausgegeben (siehe Abbildung 79).

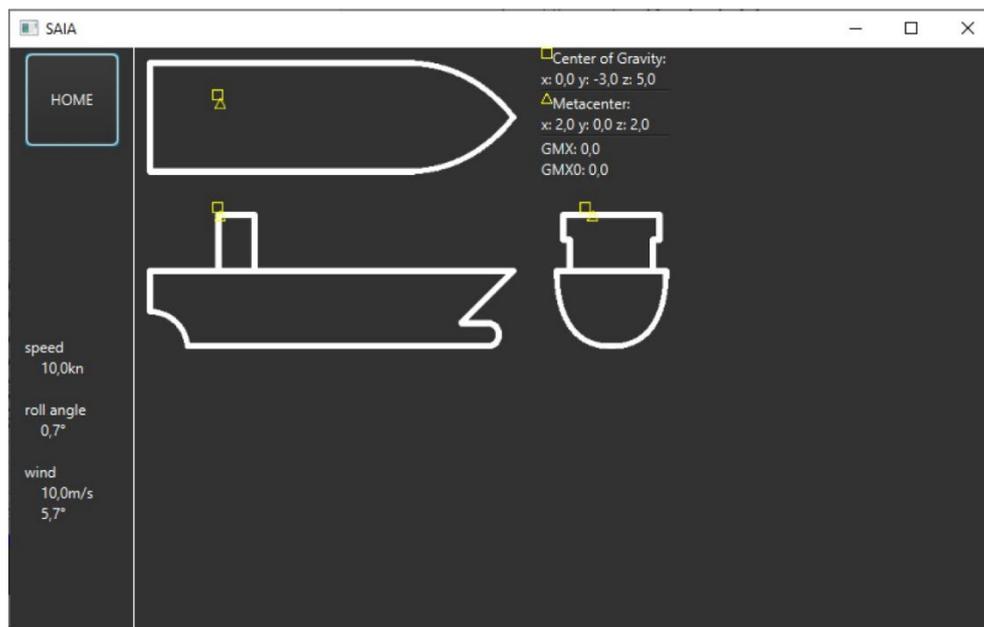


Abbildung 79: Display Ausgabe - Schiffsschwerpunkt G

Sensoren

Nachdem im Eingabefeld die Sensoren und ihre Koordinaten eingetragen wurden, können diese Informationen hier abgerufen werden. Zusätzlich erhält der Anwender Informationen über den Status des jeweiligen Sensors (rechts) und über die direkt gemessenen Winkelgeschwindigkeiten und die berechneten Beschleunigungen. Im Falle eines inaktiven Sensors, wird dieser als roter Punkt dargestellt. Ein aktiver Sensor wird als grüner Punkt dargestellt (siehe Abbildung 80).

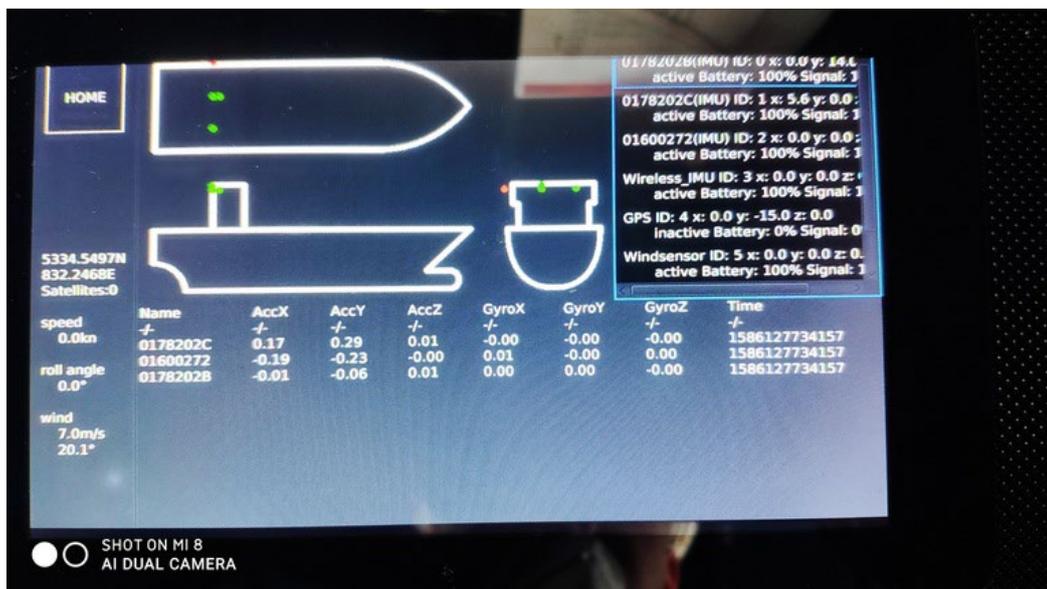


Abbildung 80: Display Ausgabe - Sensoren

Für eine bessere Bedienbarkeit und schnellere Identifizierung inaktiver Sensoren, wird eine Warnung auf dem Startbildschirm ausgegeben (Abbildung 81).

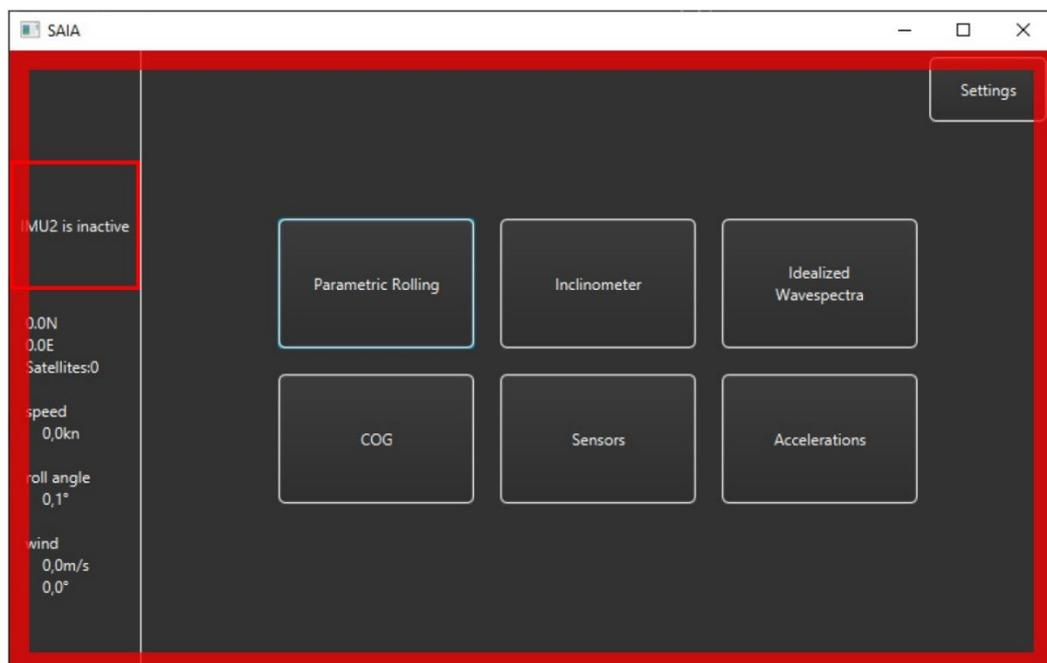


Abbildung 81: Display Ausgabe - Disfunktion der Sensoren

Beschleunigungen

Mittels der Berechnungen für die Beschleunigungen kann an jedem Punkt des Schiffes die Beschleunigung berechnet werden. Unter Hinzunahme der Grenzen für Beschleunigungen aus dem Anhang B (Seite 107) ist eine Darstellung der Überschreitungen an jedem Punkt des Schiffes möglich. In der derzeitigen Implementierung ist es möglich eine Beschleunigungsgrenze wie in Abbildung 82 zu wählen. Überschreitungen werden zusammengefasst als Kugeln dargestellt, sodass der komplette Bereich der Überschreitung erkennbar ist. Diese Unterscheidung der Beschleunigungsgrenzen dient der Verwendung des Systems auf unterschiedlichen Schiffen, sodass zum Beispiel auf Forschungsschiffen mehr Aufmerksamkeit auf die Grenzen von Ermüdung oder Intellektueller Arbeit gelegt werden kann.

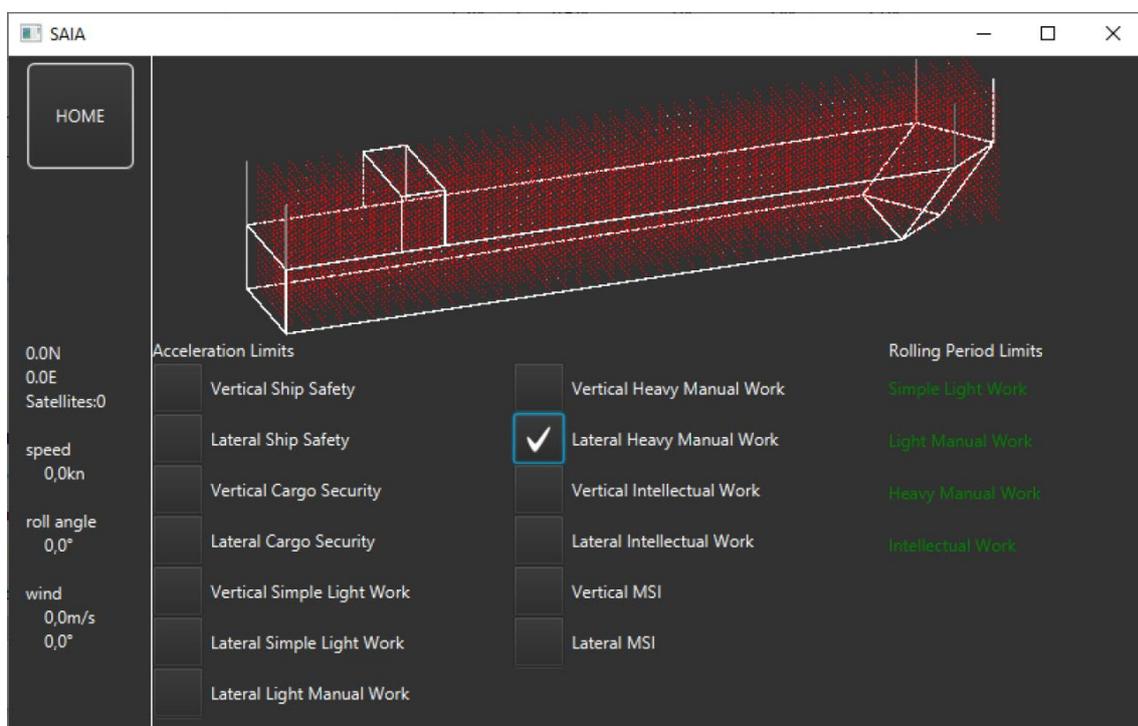


Abbildung 82: Display Ausgabe - Beschleunigungen

Das System fuhr 4 Monate auf der MSC Madrid ohne Störungen und Ausfällen mit, sodass für diesen Zeitraum alle Messdaten zur Verfügung stehen.

7 Ausblick und Übertragbarkeit

In diesem abschließenden Kapitel wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit dargestellt, als auch die Flexibilität des Systems. Es wird ein Ausblick und mögliche Erweiterungen gestellt und zuletzt die Haupt- und Wertschöpfung dieser Arbeit aufgezeigt.

7.1 Übertragbarkeit und Flexibilität des Systems

Dadurch, dass mit Beginn dieser Arbeit darauf geachtet wurde, dass auch weitere Schiffstypen eingepflegt werden können, als auch die Verwendung unterschiedlicher Beschleunigungsgrenzen, welche auf diesen unterschiedlichen Schiffstypen angewandt werden können, ist die Übertragbarkeit als auch Flexibilität des Systems sehr hoch. Es kann nicht nur parametrisches Rollen identifiziert werden, sondern auch unterschiedliche Wichtungen für Seekrankheit, Ermüdung, Stolpern, schwere Arbeit, leichte Arbeit oder auch intellektuelle Arbeit, wie das Arbeiten an einem Computer.

7.2 Ausblick und mögliche Erweiterungen

In das laufende System müssen noch die Berechnungen der Wahrscheinlichkeiten aus dem Regelwerk und der KI implementiert werden, als auch der letzte Schritt der Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlung. Ebenso das BPR7 und 8 müssen noch implementiert werden.

Weiterhin sollten für eine vollständige Identifizierung und absoluten Sicherheit für Menschen und Schiffe auf See, die Simulationen in jeglichen Bereichen für die Begegnungswinkel, Begegnungsperioden, Schiffsgeschwindigkeiten und Wellenlängen ergänzt werden.

7.3 Haupt- und Wertschöpfung der Arbeit

Um die Haupt- und Wertschöpfung der Arbeit darzustellen, sollen im Folgenden, die zu anfangs gestellten Forschungsfragen beantwortet werden:

1. Kann der aktuelle Seegang (Wellenhöhe, -periode, -länge) durch die Eigenbewegung des Schiffes mittels an Bord befindlicher Sensoren berechnet werden?

Die in Kapitel 4.5 (Seite 58ff) dargestellten Berechnungen für die idealisierten Seegangsspektren und die Wellenparameter wurden auf Basis an Bord befindlicher Sensorik aufgestellt und durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden für die abschließende Betrachtung des Verfahrens zur Vermeidung parametrischen Rollens in Kapitel 5 (Seite 79ff) verwendet und haben mit einer Präzision von 99,79% die Wahrscheinlichkeit des Auftretens parametrischen Rollens bestimmt. Im Kapitel 6.4 (Seite 90) werden die Ergebnisse der Berechnungen visuell ausgegeben.

2. Wie kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens parametrischen Rollens abhängig von der Umgebung (Wetter) und schiffsspezifisch exakt berechnet werden?

Dies wurde durch die Kombination aus dem Regelwerk und der Anwendung einer KI realisiert und zeigt in der Auswertung eine sehr hohe Präzision von 99,79%. Hierzu wurden mittels des Regelwerkes Simulationen durchgeführt, sodass Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Bedingungen des Seeganges und des Schiffes ermittelt werden konnten. Zusätzlich wurde eine KI mittels der zuvor aufgestellten Datenbank aus den Simulationen trainiert, welche die Wahrscheinlichkeit des Auftretens zu 99,79% bestimmt.

3. Wie kann die Gefahr des Auftretens des parametrischen Rollens für ein definiertes Aktionsintervall vorhergesagt werden?

Dies wurde mittels eines Random Forest realisiert. Eine zweiminütige Vorhersage der Gefahr des Auftretens des parametrischen Rollens wird zu 99,79% präzise vorhergesagt.

4. Wie könnte ein Assistenzsystem basierend auf den Vorhersagen und Wahrscheinlichkeiten aussehen, welches parametrisches Rollen durch rechtzeitige, automatisch ermittelte Kurs- und Geschwindigkeitsempfehlungen verhindert?

Im vorigen Kapitel 6 wurde das System und dessen Installation an Bord verschiedener Schiffe vorgestellt und weist eine sehr gute Bedienbarkeit auf. Des Weiteren ist es durch die kompakte Bauform, flexibel auf unterschiedlichen Schiffstypen installierbar. Die Verwendung einfacher Sensorik spricht dafür, dieses System auch auf einer laufenden Flotte installieren zu können, ohne große Kosten für Umbauten vornehmen zu müssen.

Aus der Betrachtung verwandter Arbeiten und existierenden Methoden wurde in Kapitel 3.5 (Seite 40) ein Handlungsbedarf und eine Forschungslücke dargelegt, welcher mit dieser Arbeit nicht vollumfänglich erfüllt ist, da nicht alle BPR aus Zeitgründen umgesetzt werden konnten, jedoch bereits jetzt eine sehr hohe Genauigkeit vorweist. Zusätzlich ist die Wertschöpfung dieser Arbeit sehr hoch zu bemessen, da diese Arbeit ein erstes Verfahren auf Basis des Regelwerkes und einer KI vorstellt, um parametrisches Rollen zu vermeiden.

Literaturverzeichnis

- ABS, American Bureau of Shipping, Guide for the assessment of parametric roll resonance in the design of container carriers, April 2019
- Acomi, Nicoleta, Cristian Ancuța, Cristian Andrei, Alina Boștină, und Aurel Boștină. 2016. „Avoiding the Parametric Roll“, herausgegeben von Marian Vladescu, Razvan Tamas, und Ionica Cristea, 100102M. Constanta, Romania. <https://doi.org/10.1117/12.2243360>, 2016
- Akaike, Hirotugu, „Likelihood and the Bayes Procedure“, 24, 1980
- BEAmer, Report on the technical inquiry into the CMA CGM Otello Bay of Biscay 17th February 2006, 2006
- Bretschneider, C. L. 1952. “The Generation and Decay of Wind Waves in Deep Water.” *Eos, Transactions American Geophysical Union* 33 (3): 381–89. <https://doi.org/10.1029/TR033i003p00381>, 1952
- Brownlee, Jason, 2020, Difference Between Algorithm and Model in Machine Learning, <https://machinelearningmastery.com/difference-between-algorithm-and-model-in-machine-learning/>, 2020
- BSU, Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, Loss overboard of 10 containers from JRS Canis at estuary of Elbe River on 12 January 2007 at 02:40, 1 October 2008
- BSU, Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, Fatal accident on board the CMV CHICAGO EXPRESS during Typhoon „HAGUPIT“ on 24 September 2008 off the coast of Hong Kong, 1 November 2009
- Chhoeung, S, and A Hahn. 2019. “Approach to Estimate the Ship Center of Gravity Based on Accelerations and Angular Velocities without Ship Parameters.” *Journal of Physics: Conference Series* 1357 (October): 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1357/1/012028>.
- Chhoeung, Sovanna, Tim Wüllner, and Axel Hahn. 2019. “Classification Heuristic for Selecting a Suitable Idealized Wave Spectrum Based on Excited Ship Motions and Current Weather.” In *Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference*, edited by Research Publishing, 8. <https://doi.org/10.3850/981-973-0000-00-0>.
- Chopra, R., A. England, und M.N. Alaudeen, 2019, Data Science with Python: Combine Python with Machine Learning Principles to Discover Hidden Patterns in Raw Data, 2019
- David Burch. 2010. “STARPATH TrueWind: User’s Guide, 2010
- Denis, Manley St, and W. J. Pierson. 1953. *On the Motions of Ships in Confused Seas*. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1953.
- DMAIB, Danish Maritime Accident Investigation Board, Marine accident report September 2014 Svendborg Maersk Heavy weather damage on 14 February 2014, 5 September 2014
- DNVGL, Det Norske Veritas Germanischer Lloyd, Rules for Classification and Construction, July 2016
- DNVGL, Det Norske Veritas Germanischer Lloyd, Container Ship Update, Parametric Roll – Risk reduction through real-time detection, January 2014
- DNVGL-CG-0264, Autonomous and remotely operated ships, 2018
- EMSA, European Maritime Safety Agency, Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2022, 15th October 2022

- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. 2003. *Containerhandbuch*. Dieburg, 2003
- Gunsing, Michiel and Reint Dallinga, On the Prediction of Parametric Roll, Proceedings of the 11th International Ship Stability Workshop June 2010
- Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, et al. 1973. "Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)." *Ergänzungsheft* 8-12. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:f204e188-13b9-49d8-a6dc-4fb7c20562fc>, 1973
- Hilmer, Tyson, und Eric Thornhill. 2015. „Observations of Predictive Skill for Real-Time Deterministic Sea Waves from the WaMoS II“. In *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, 1–7. Washington, DC: IEEE. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2015.7404496>, 2015
- Hogben, N., und F.C. Cobb. 1986. „Parametric Modelling Of Directional Wave Spectra“. In *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas: Offshore Technology Conference. <https://doi.org/10.4043/5212-MS>, 1986
- Holthuijsen, Leo H. 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IMO, International Maritime Organization, Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions, 11 January 2007
- Iseki, T., und K. Ohtsu. 1998. „Bayesian Estimation of Directional Wave Spectra Based on Ship Motions“. *IFAC Proceedings Volumes* 31 (30): 235–39. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)38446-X](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)38446-X), 1998
- Johnson, M C, und P A Wilson. 2005. „Sea State Estimated From Ship Motions By A Statistical Approach“. *The International Journal of Maritime Engineering* 147 (a1): 15. <https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2005.a1.050161>, 2005
- Komen, G. J., K. Hasselmann, and K. Hasselmann. 1984. "On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum." *Journal of Physical Oceanography* 14 (8): 1271–85. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1984\)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2), 1984
- Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken EAK 2002 - Die Küste, 65th ed., Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Ed. Deutschland: Boyens Medien, 2002.
- Lehmann, Eike. 2005. *Grundzüge des Schiffbaus*. 4. Vol. 2. 2 vols. Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg, 2005
- Lewis, Edward V. 1989. *Principles of Naval Architecture*. 2nd revision (3rd ed.). 3 vols. Jersey City: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1989.
- MAIB, Marine Accident Investigation Branch, United Kingdom, Report on the Investigation of the loss of cargo containers overboard from P&O Nedlloyd Genoa North Atlantic Ocean on 27 January 2006, August 2006
- MAIB, Marine Accident Investigation Branch, Report on the investigation into the listing, flooding and grounding of Hoegh Osaka Bramble Bank, The Solent, UK on 3 January 2015, March 2016
- MAIB, Marine Accident Investigation Branch, Report on the investigation into the loss of 137 containers from the container ship CMA CGM G. Washington in the North Pacific Ocean on 20 January 2018, January 2020
- Malenica S, Chen X.B., Orozco J.M. und Xia J., Parametric roll – validation of an numerical model, 2021
- Marinekommando Jahresbericht 2021, Fakten und Zahlen zur maritimen Abhängigkeit der Bundesrepublik Deutschland, 2021.

- MSC. 137(76), Resolution MSC. 137(76) adopted on 4 December 2002, Standards for ship manoeuvrability, Annex 6, 2002
- MSC.1-Circ.1638, Outcome Of The Regulatory Scoping Exercise For The Use Of Maritime Autonomous Surface Ship, 2021
- MSIU, Marine Safety Investigation Unit, Safety investigation report MV Maersk Jaipur Fatal accident in the engine-room in position 54° 18.9' N 164° 26.9' W 08 October 2018, October 2019
- Muñoz, Miguel Angel Hinojosa. o. J. „Parametric Estimation of the Directional Wave Spectrum from Ship Motions“, 49, 2014
- Nielsen, Ulrik Dam. 2006. „Estimations of On-Site Directional Wave Spectra from Measured Ship Responses“. *Marine Structures* 19 (1): 33–69. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2006.06.001>, 2006
- Nielsen, Ulrik Dam. 2008. „The Wave Buoy Analogy — Estimating High-Frequency Wave Excitations“. *Applied Ocean Research* 30 (2): 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2008.07.002>, 2008
- Nielsen, Ulrik D. 2011. „Onboard Sea State Estimation Based on Measured Ship Motions“, *Proceedings of the 12th International Ship Stability Workshop, Washington*, June, 7th 2011
- NORDFORSK. 2000. “Nordic Co-Operative Organization for Applied Research (NORDFORSK), Assessment of Ship Performance in a Seaway, 2000
- Ochi, M. K., and E. N. Hubble. 1976. “Six-Parameter Wave Spectra.” *Coastal Engineering Proceedings* 1 (15). <https://doi.org/10.9753/icce.v15.%p>, 1976
- Phillips, O. M. 1957. “On the Generation of Waves by Turbulent Wind.” *Journal of Fluid Mechanics* 2 (5): 417–45. <https://doi.org/10.1017/S0022112057000233>, 1957
- Pierson, W. J., and L. Moskowitz. 1964. “A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii.” *Journal of Geophysical Research* 69 (24): 5181–90, 1964
- PMA, DSB, BSU, Panama Maritime Authority, Dutch Safety Board, Bundesstelle für Seefalluntersuchung, Loss of containers overboard from MSC Zoe 1-2 January 2019, June 25th 2020
- Ribeiro e Silva, S., and C. Guedes Soares. 2013. „Prediction of Parametric Rolling in Waves with a Time Domain Non-Linear Strip Theory Model“. *Ocean Engineering* 72 (November): 453–69. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.07.011>, 22 August 2013
- Samson C. Stevens, Michael G. Parsons. 2002. *Effects of Motion at Sea on Crew Performance: A Survey*. Columbia, 2002
- Schneekluth, H., and Volker Bertram. 1998. *Ship Design for Efficiency and Economy*. 2nd ed. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann, 1998
- Schwarz-Röhr, B, B NtambaNtamba, und A Härting. o. J. „Estimating Seaway from Ship Motions“, 2016
- Ship Knowledge, Ship Design, Construction and Operation by Klaas van Dokkum, Dokmar maritime publishers B.V., 5th Edition, 2005
- SHK, Swedish Accident Investigation Board, Report RS 2008:03e Loss of M/S Finnbirch between Öland and Gotland 1 November 2006, 01.12.2008
- SNAME, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Principals of Naval Architecture Vol.III Motions in Waves and Crontrrollability, ISBN No. 0-939773-02-3, November 1989

STANAG, Standardization Agreement, North Atlantic Treaty Organization (NATO), STANAG 4154 Edition 3, Brüssel, 2000

Samson C. Stevens and Michael G. Parsons, *Effects of Motion at Sea on Crew Performance: A Sruves*, Columbia, 2002

The Nautical Institute, *Introduction to parametric Rolling Motion*, 2021 zugegriffen

W.J. Pierson, R.W. James, and G. Neumann. 1955. *Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics*. 603rd ed, 1955

Anhang

A Baumdiagramme

i. Baumdiagramm für die Begegnungsperiode $T_e = 17,87s$

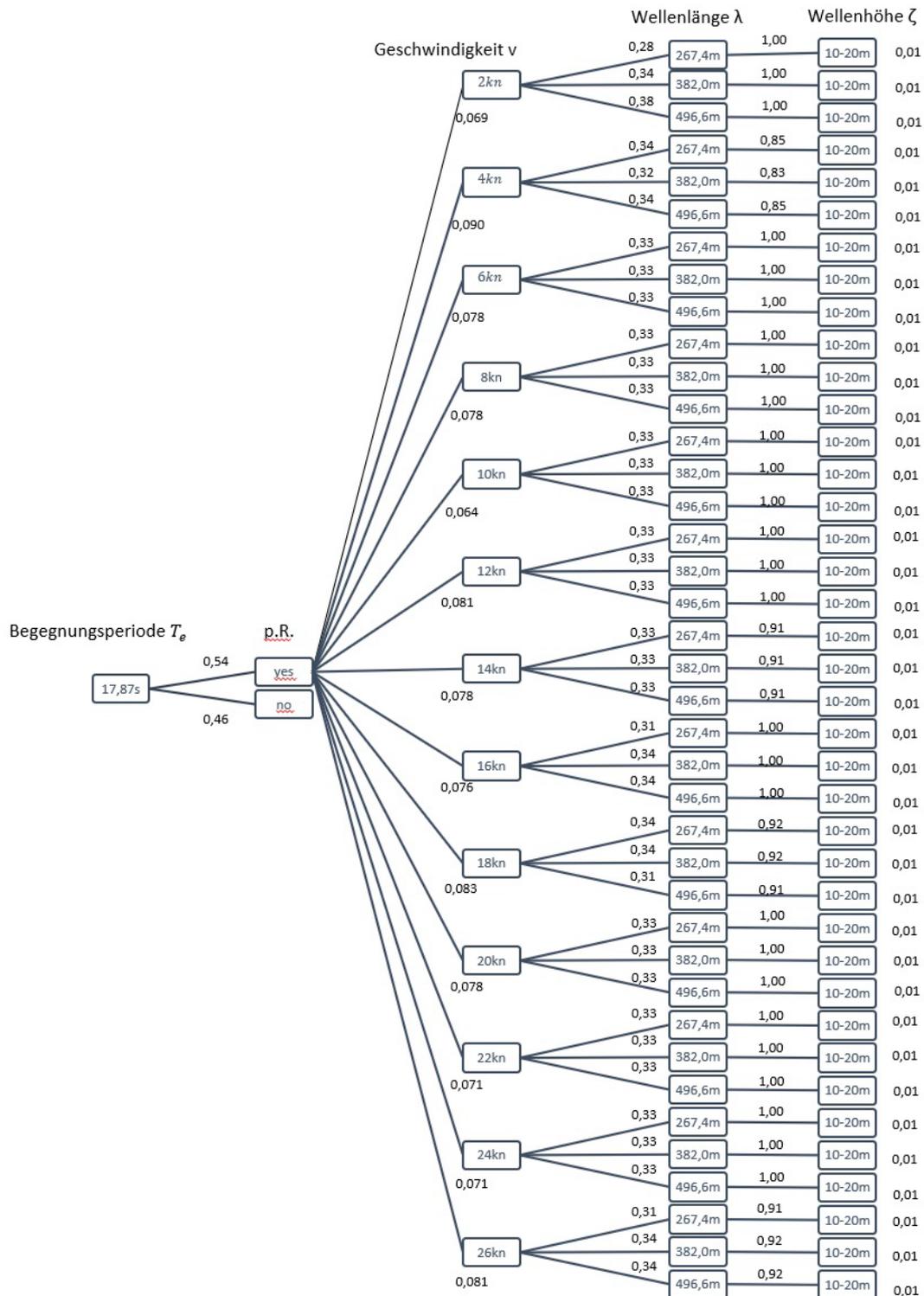


Abbildung 83: Diskrete Wahrscheinlichkeiten des parametrischen Rollens Für $T_e = 17,87s$

ii. Baumdiagramm für die Begegnungsperiode $T_e = 17,16s$

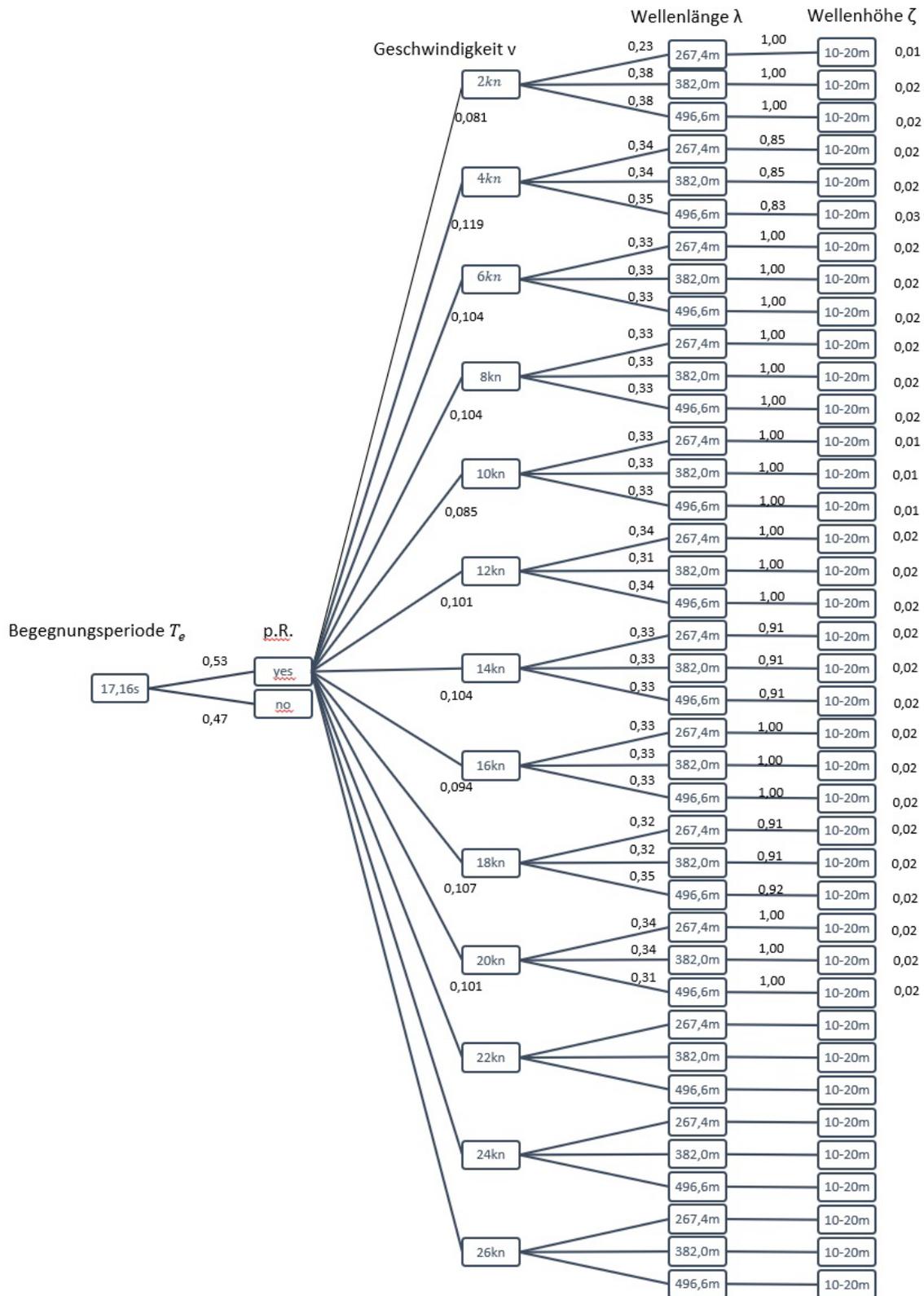


Abbildung 84: Diskrete Wahrscheinlichkeiten des parametrischen Rollens Für $T_e = 17,16s$

B Beschleunigungen

Für die Übertragbarkeit dieser Arbeit auf verschiedene Schiffstypen und verschiedene Belastungen außerhalb des parametrischen Rollens, werden weitere Beschleunigungsgrenzen in das System implementiert. Diese Beschleunigungsgrenzen ergeben sich aus den Richtlinien für sicheres Arbeiten (NATO 2000, ISO 1997, NORDFORSK 2000), sicheres Lashing der Ladung (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., 2003) und Komfort für die Crew und Passagiere (Samson C. Stevens 2002, J.M. Riola 2006). Hierbei entstehen Beschleunigungen an Bord von Schiffen durch die Bewegung des Schiffes im Seegang. Diese werden allgemein in 6 Freiheitsgrade eingeteilt, welche meist als Kombination derer auftauchen (Lewis 1989):

- Translatorische Bewegungen entlang der Achsen
Gleiten (x-Achse), Driften (y-Achse) und Tauchen (z-Achse)
- Rotatorische Bewegungen um die Achsen
Rollen (x-Achse), Stampfen (y-Achse) und Gieren (z-Achse)

Die Bewegung des Schiffes ist die Antwort auf den Seegang. So kann ein Seegangsspektrum zu einem Antwortspektrum führen. Hierbei können die Beschleunigungen an Bord des Schiffes die Arbeitsfähigkeit und die Sicherheit stark beeinflussen, indem Grenzwerte für Ermüdung (Motion Sickness) oder Containerlaschungen überschritten werden. Es werden die vertikale und laterale Beschleunigung unterschieden.

Die vertikalen Beschleunigungen werden von Tauch- und Stampfbewegungen erzeugt, sowie vom Whipping¹ des Schiffes, als Antwort von Slamming². Für harmonische Schwingungen kann hierbei die vertikale Beschleunigung durch ihre Amplitude, ihren Mittelwert oder ihren quadratischen Mittelwert (RMS³-Wert) definiert werden, wobei sich diese Größen durch einen konstanten Faktor unterscheiden. Hierbei werden im Niederfrequenzbereich von 0.1 – 1.0 Hz Kinetoseerscheinungen⁴ verursacht, welche mittels MSI (Motion Sickness Incidence) Faktor als die in Prozenten ausgedrückte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kinetose oder als mittlere, auf die Gesamtzahl der Personen an Bord bezogene Zahl von an Kinetose erkrankten Personen verwendet (Samson C. Stevens 2002). Im mittleren bis hohen Frequenzbereich von 1.0 – 80.0Hz werden Ermüdungserscheinungen aus Maschinenvibrationen und Schiffsvibrationen auf Grund von

¹ Das schnelle Biegen des Schiffskörpers infolge der Einwirkung einer Welle auf den flachen Boden des Schiffes (Analyse von Schock und „Whipping“ (rinagermany.de) 2022 zugegriffen

² Hydrodynamische Stöße, welche durch Auf- und Abbewegungen des Schiffskörpers in einen Wellenberg entstehen (Begriff: Slamming | grosse-seefahrt.de) 2022 zugegriffen

³ Root-Mean-Square ist der Effektivwert und ist das quadratische Mittel

⁴ Reise- oder Bewegungskrankheit: menschlichen Reaktionen auf Beschleunigungen und Bewegungen in Fahrzeugen, die allgemeines Unwohlsein, Übelkeit und Erbrechen auslösen (<https://www.eurapon.de/themen/lexikon-der-krankheiten/magen-darm/reisekrankheit.>, 2022 zugegriffen)

Slamming und Whipping verursacht, welche mittels MIF (Motion Induced Fatigue) Faktor bemessen werden (J.M. Riola 2006).

Die lateralen Beschleunigungen entstehen zumeist aus starkem Rollen, sowie aus Gier- und Querbewegungen. Hierbei kann starkes Rollen auf Grund von parametrischer Resonanz, synchronem Rollen, Stabilitätsverlust auf dem Wellenberg sowie Querschlagen in Wellen quer von hinten entstehen. Zusätzlich können auch hier Whipping und Slamming die Ursache sein.

Laterale und auch vertikale Beschleunigungen, sowie Querkräfte können die Stand- und Gehfähigkeit beeinflussen. Daher wird hier zusätzlich der MII (Motion Induced Interruptions) (Samson C. Stevens 2002) Faktor für die Bemessung verwendet. Des Weiteren kann es zu Ladungsverlusten durch zu hohe Beschleunigungen kommen. Aus einer bereits vorangegangenen Arbeit (Chhoeung, Sovanna 2010) wurden die existierenden Vorschriften und Kriterien für das sichere Arbeiten an Bord von der STANAG (NATO 2000), der ISO 2631-1/3 (ISO 1997) und der NORDFORSK (NORDFORSK 2000) und dem Containerhandbuch (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., 2003) bearbeitet und zusammengetragen (siehe Abbildung 85).

Übersicht der Grenzwerte zum Arbeiten an Bord eines Schiffes:

Ref. Criterion	NATO STANAG 4154	U.S. Coast Guard Cutter Certification Plan	Tasaki et al. (Japan)	NORDFORSK 1987			Cruikshank & Landsberg (USA)
				Merchant ships	Naval vessels	Fast small craft	
Vertical acceleration at forward perpendicular	0.2g RMS	0.4g SSA	0.80g @ P=0.001	0.275g (L≤100 m) or 0.05g (L>330m)	0.275g	0.65g	0.25g
Vertical acceleration at bridge	0.1g RMS	0.2g SSA		0.15g	0.2g	0.275g	0.20g
Lateral acceleration at bridge	0.10g RMS	0.2g SSA	0.60g @ P=0.001	0.12g	0.1g	0.1g	
Motion Sickness Incidence (MSI)	20% of crew in 4 hours	5% in a 30 minute exposure					
Motion Induced Interruption (MII)	1 tip per minute	2.1 tip per minute					
Roll amplitude	4.0° RMS	8.0° SSA	25.0° @ P=0.001	6.0° 6.0° for light manual work 4.0° for heavy manual work 3.0° for intellectual work 2.5° for transit passengers 2.0° for cruise liner	4.0°	4.0°	15.0°
Pitch amplitude	1.5° RMS	3.0° SSA					
Slamming (probability)			0.01	0.03 (L≤100 m) or 0.01 (L>300 m)	0.03	0.03	0.06
Deck wetness (probability)			0.01	0.05	0.05	0.05	0.07
Propeller Emergence (probability)			0.1				0.25

Abbildung 85: Operationsgrenzwerte an Bord von Schiffen (Stevens, 2002)

Um die höchste Sicherheit an Bord zu gewährleisten, werden die niedrigsten Grenzen ausgewählt. Diese sind von der NATO STANAG 4154 mit 0,10g für die vertikale und laterale Beschleunigungen für Menschen. Für Containerlaschungen gelten 1,0g für die vertikale und 0,8g für die laterale Beschleunigungen als Grenzwerte (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. 2003)

Zusätzliche verwendete Grenzen sind die der NORDFORSK (NORDFORSK, 1987), welche für alle Schiffstypen identische Grenzen ausgearbeitet haben (siehe Abbildung 86).

	Vertical Acceleration	Lateral Acceleration
Simple Light Work	0,275g	0,12g
Light Manual Work	0,20g	0,10g
Heavy Manual Work	0,15g	0,07g
Intellectual Work	0,10g	0,05g

Abbildung 86: Grenzwerte der NORDFORSK

Bezüglich der Kinetose (links) und der Ermüdung (rechts), werden die ISO 2631/3 und ISO 2631/1 verwendet (Abbildung 87):

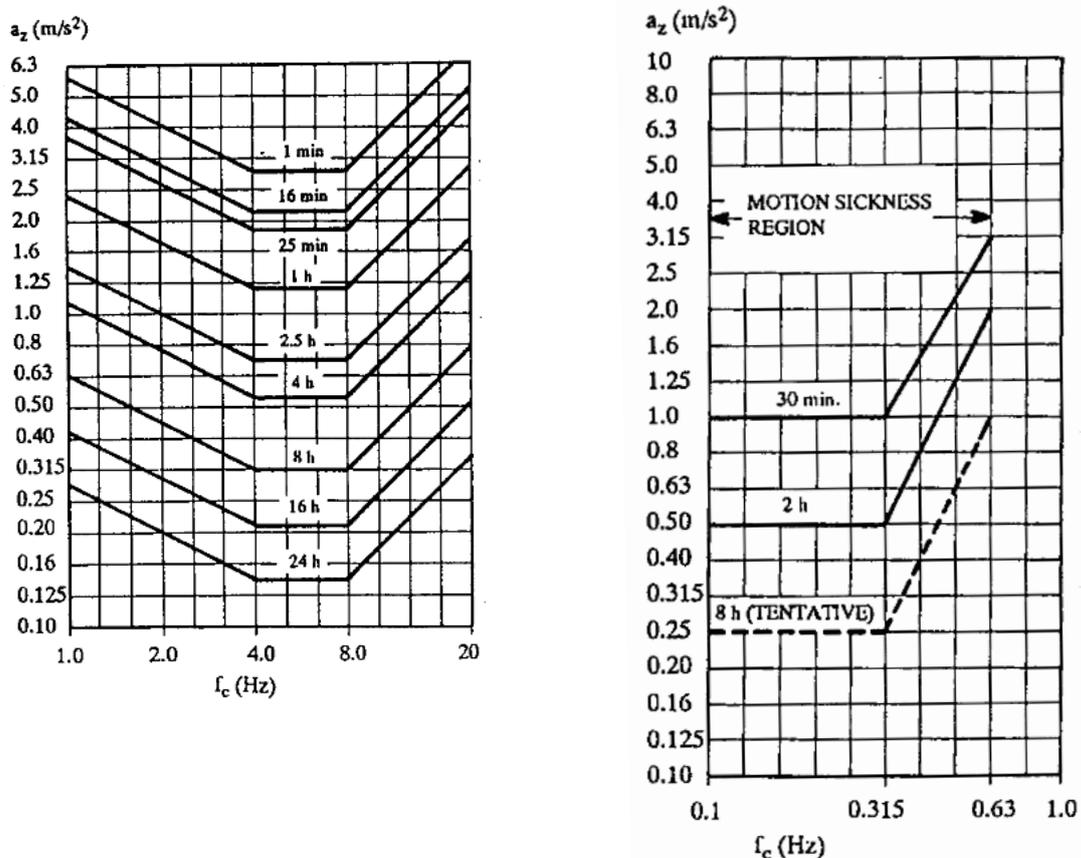


Abbildung 87: ISO 2631/1 und 3 (ITTC, 1999)

Daraus ergeben sich folgende Grenzen für das System (Tabelle 9):

Tabelle 9: Kriterien und Grenzwerte für das System

Themenabschnitt	vert. Beschl.	lat. Beschl.	Rollwinkel	MSI	MIF
Simple Light Work	0,275g	0,15g	7°	26,25% in 0,5h	30Min
Light Manual Work	0,20g	0,10g	6°	16,67% in 2h	2h
Heavy Manual Work	0,15g	0,07g	4°	30,00% in 8h	8h
Intellectual Work	0,10g	0,05g	3°	40,00% in 24h	24h
Schiffsicherheit	0,15g	0,12g	6°		
Ladungsverlust		0,5g			
Laschung	1,0g	0,8g			

Mit diesen hinterlegten Grenzwerten kann das System für andere Zwecke als der Vermeidung parametrischen Rollens genutzt werden. Es kann die Sicherheit an Bord des Schiffes, sicheres Arbeiten oder auch Seekrankheit vermeiden.

C Implementierung

i. Systemarchitektur

Für einen reibungslosen Betrieb des Assistenzsystems, werden drei übergeordnete Ziele verfolgt:

- 1) Stabilität: Unter allen Umständen muss das System laufen. Dies beinhaltet das eigenständige Handling von Fehlern, welche während des Betriebs auftauchen könnten bzw. das Sicherstellen der Funktionalität des Restsystems. Dies beruht auf den Fakt, dass das System unter Umständen monatelang nicht erreichbar ist, wenn es auf einem Containerschiff fährt.
- 2) Wartungsfreundlichkeit: eine langfristige Wartung auf eine einfache Art und Weise muss möglich sein. Die Softwarekomponenten sollen leicht zu identifizieren sein, sodass Fehler zügig behandelt werden können.
- 3) Erweiterbarkeit: das System sollte mit minimalem Aufwand um neue Funktionen erweiterbar sein. Ein offensichtlicher Aufbau, um neue Komponenten zu implementieren, ist erstrebenswert. Dies liegt dem Prototypen zu Grunde, sodass auch nach einer Fertigstellung dieser Arbeit Optimierungen implementiert werden können.

Aus diesen Zielen ergibt sich folgende Systemarchitektur:

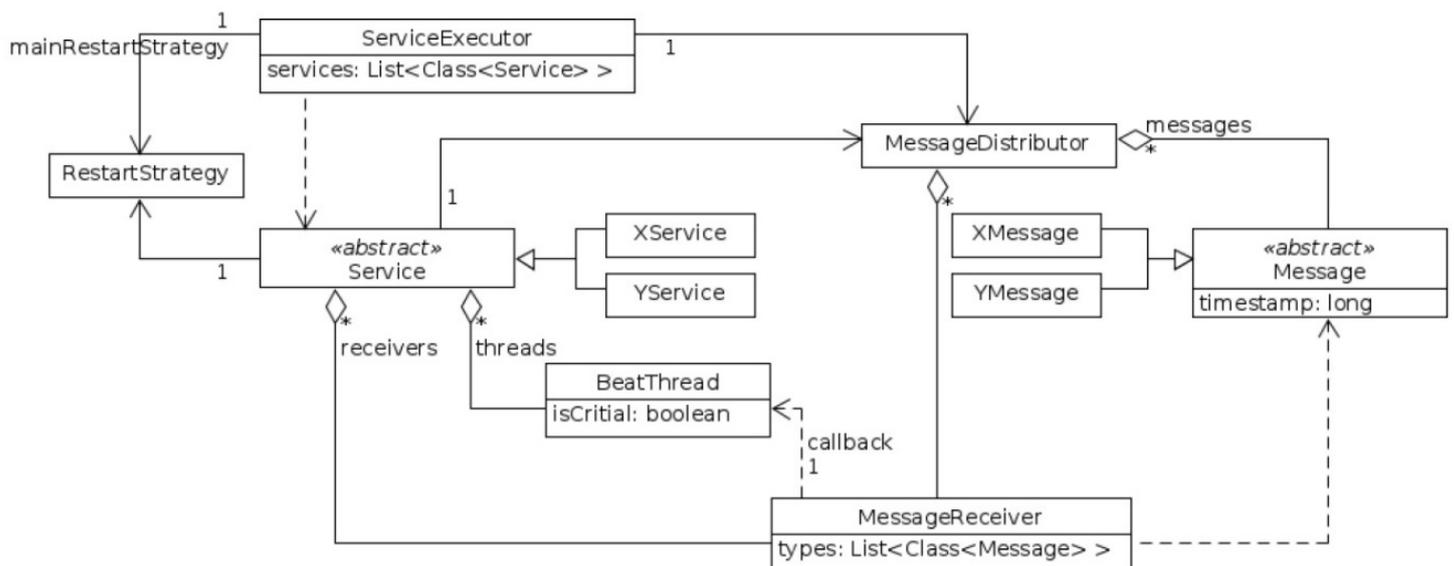


Abbildung 88: Systemarchitektur

In der Abbildung 88 ist die Systemarchitektur dargestellt und beinhaltet als überwachende Komponente den ServiceExecutor. Dieser verwaltet alle anderen Komponenten (Service) des Systems, koordiniert Neustarts und isoliert fehlerhafte Services. Hierzu führt er eine

Liste mit den Klassen aller Service und über die Java Refelction API startet er Service, welche noch nicht laufen. In den Services sind die einzelnen Berechnungen aus dem Kapitel 4.5 implementiert. Der MessageDistributor führt Nachrichten der Service zusammen, indem er die Zeitstempel und Nachrichten an die Service vergleicht. Zusätzlich verwaltet er eine Liste aller Service und für jeden Service eine Liste von MessageReceivern. In diesem wiederum wird eine Liste aller Nachrichten und der auszuführende Algorithmus angegeben, welche für eine bestimmte Berechnung benötigt wird. Der Algorithmus wird erst ausgeführt, wenn alle benötigten Nachrichten mit passendem Zeitstempel gelistet sind. Eine weitere Komponente ist der BeatThread, welcher die Fähigkeit beschreibt, einen Heartbeat zu verfolgen. Dieser ist entweder gesund (healthy) oder ungesund (unhealthy). Im Falle eines ungesunden Service, wird der gesamte Service als dead eingestuft und neu gestartet (siehe Abbildung). Dieser Neustart erfolgt nach der RestartStrategie, welche eine Obergrenze für Neustarts innerhalb eines bestimmtes Zeitfensters erlaubt, bevor der Service komplett ausgeschaltet wird und gewartet werden muss. Dies dient dazu, dass das System im Falle eines defekten Services durch ständiges Neustarten nicht überlastet wird (siehe Abbildung 89).

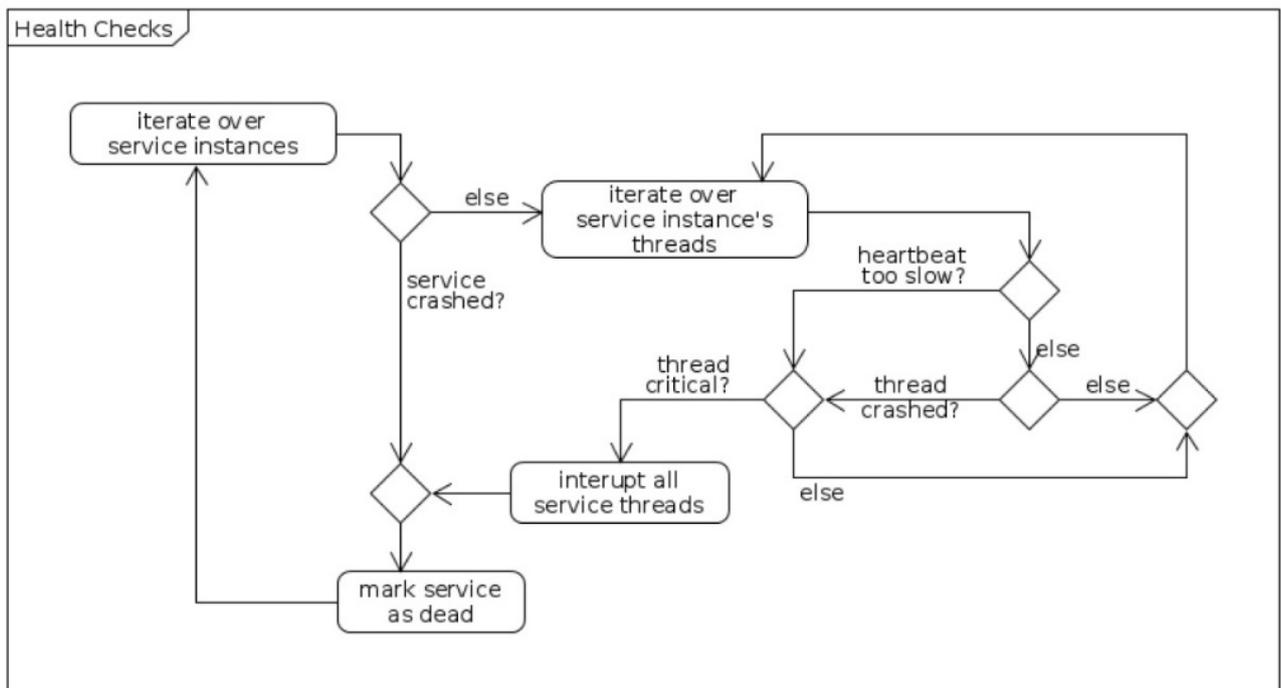


Abbildung 89: Health Checks

Die Abbildung demonstriert nochmal detailliert den Health Check, wobei für jeden Service der Heartbeat kontrolliert wird. Im Falle eines zu langsamen Herzschlages, wird der Service auf unhealthy gestuft und als dead markiert. Es erfolgt ein Neustart laut RestartLogic.

In der Abbildung 90 ist die RestartLogic dargestellt und zeigt auf, ob ein Service neu gestartet wird oder dauerhaft ausgeschaltet. Hierbei wird eine exponentielle Backoff-Strategie verfolgt, indem ein Service bei seinem ersten Absturz nach 10ms neugestartet wird und bei jedem weiteren Absturz wird diese Verzögerungszeit verdoppelt. Dies hat den Vorteil, dass auf kurzzeitige Störungen im System schnell reagiert wird und schwerwiegenden Problemen länger gewartet wird. Nach einer Verzögerung von 300s (5 Minuten) gilt der Service als unwiederbringlich beschädigt und wird nicht mehr neugestartet. Im Falle, dass ein Service nach einem Neustart eine Stundelang nicht mehr abstürzt, gilt dieser wieder als stabil und die Verzögerung wird wieder auf die anfänglichen 10ms gesetzt.

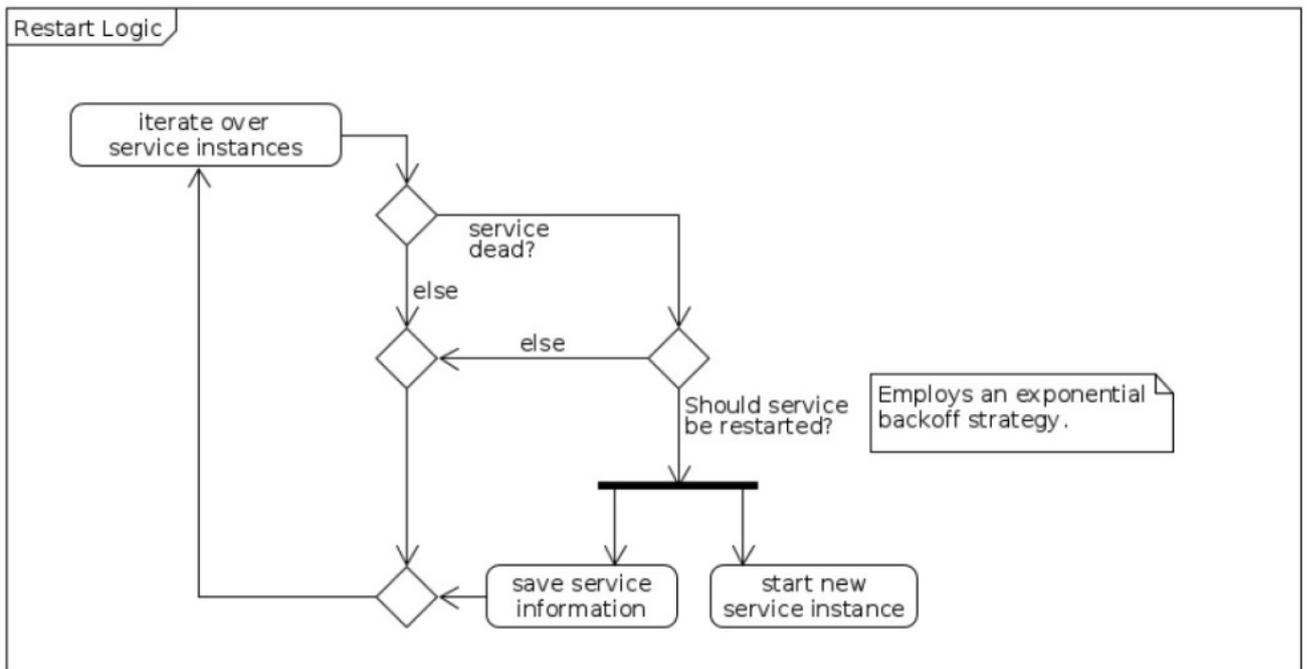


Abbildung 90: Restart Logic

ii. Service‘ des Systems

Wie in Anhang C.i. beschrieben, besteht das System aus unterschiedlichen Services, welche die Berechnungen aus dem Kapitel 4.5 beinhalten. Um die Berechnungen durchführen zu können, werden ermittelte oder berechnete Parameter unter den Services ausgetauscht, sodass folgende Abhängigkeiten entstehen:

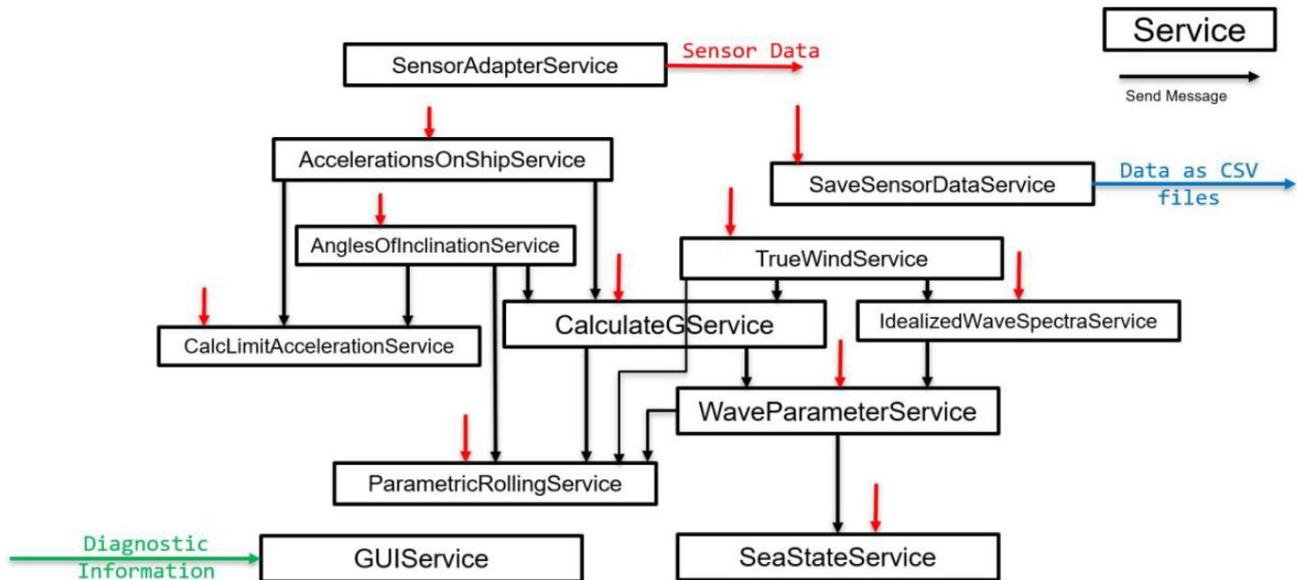


Abbildung 91: Abhängigkeiten der Service

In der Abbildung 91 werden die 12 Service des Systems, ihre Abhängigkeiten und die Nachrichten unter ihnen dargestellt. Hierbei stellen die roten Pfeile die eingehenden Daten von der Sensorik dar und die schwarzen Pfeile die die Nachrichten, welche von einem Service zu einem anderen geschickt werden. Zusätzlich ist ersichtlich, dass alle Daten in einer CSV für eine spätere Auswertung gespeichert werden. Ebenso ist der GUI Service dargestellt, welcher die Resultate auf einem Display bildlich wiedergibt.

iii. Sensormanagement

Ein wichtiger Aspekt für das Assistenzsystem ist die Einbindung der Sensoren in die Software. Die Messdaten werden wie folgt verwaltet (siehe Abbildung 92). Die Klasse SensorManagementService ist, wie alle anderen Service, in der Service-Architektur integriert und wird mit der Methode onCreate() erzeugt. Nach der Initialisierung wird die Methode initializeConsumer() aufgerufen, welche wiederum den Client für den RabbitMQ-Server initialisiert und die Messdaten der Sensor API's empfängt. Hierbei wird ein Objekt in der Klasse SensorManagement für jeden Sensor gespeichert, indem die letzten Messwerte, der Status, die ID und der Sensortyp hinterlegt werden. Auf Grund der Asynchronität der Messdaten, werden empfangene Daten zunächst in den Klassenattributen gespeichert und in einem von der Messfrequenz abhängigen Rhythmus wird ein Objekt erzeugt, in welchem diese Messdaten gespeichert werden. Dieses Objekt wird an weitere Service gesendet, die diese Messdaten benötigen

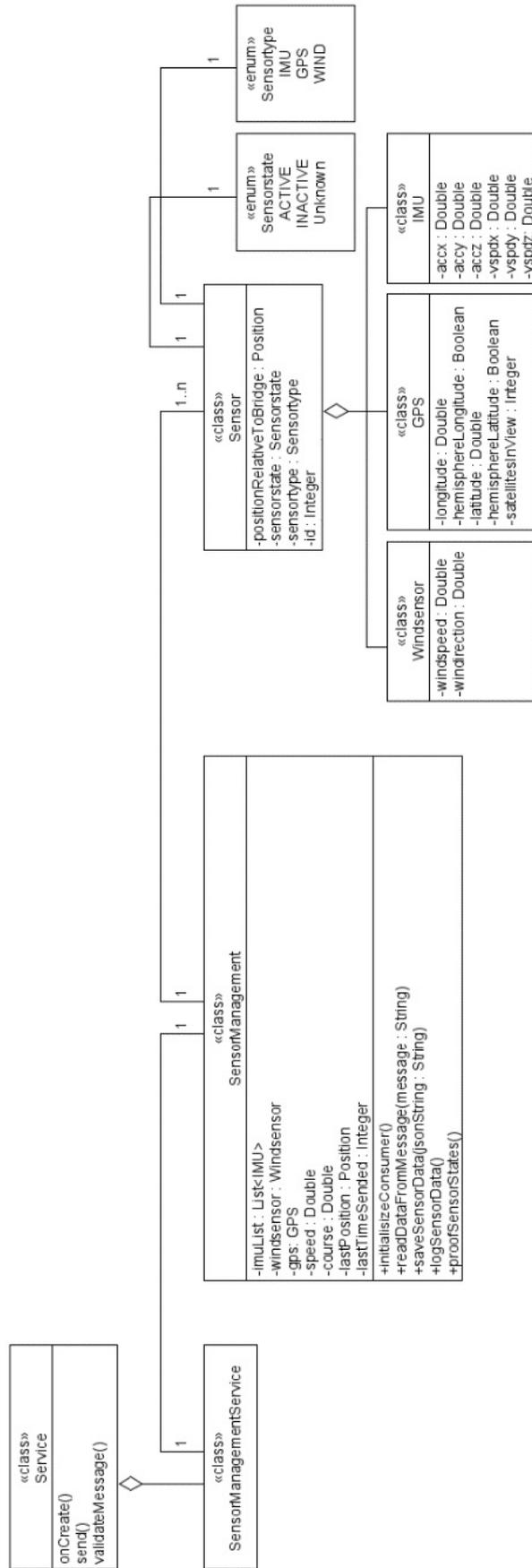


Abbildung 92: Sensormangement Klassendiagramm

iv. Anforderungsdiagramm Simulation

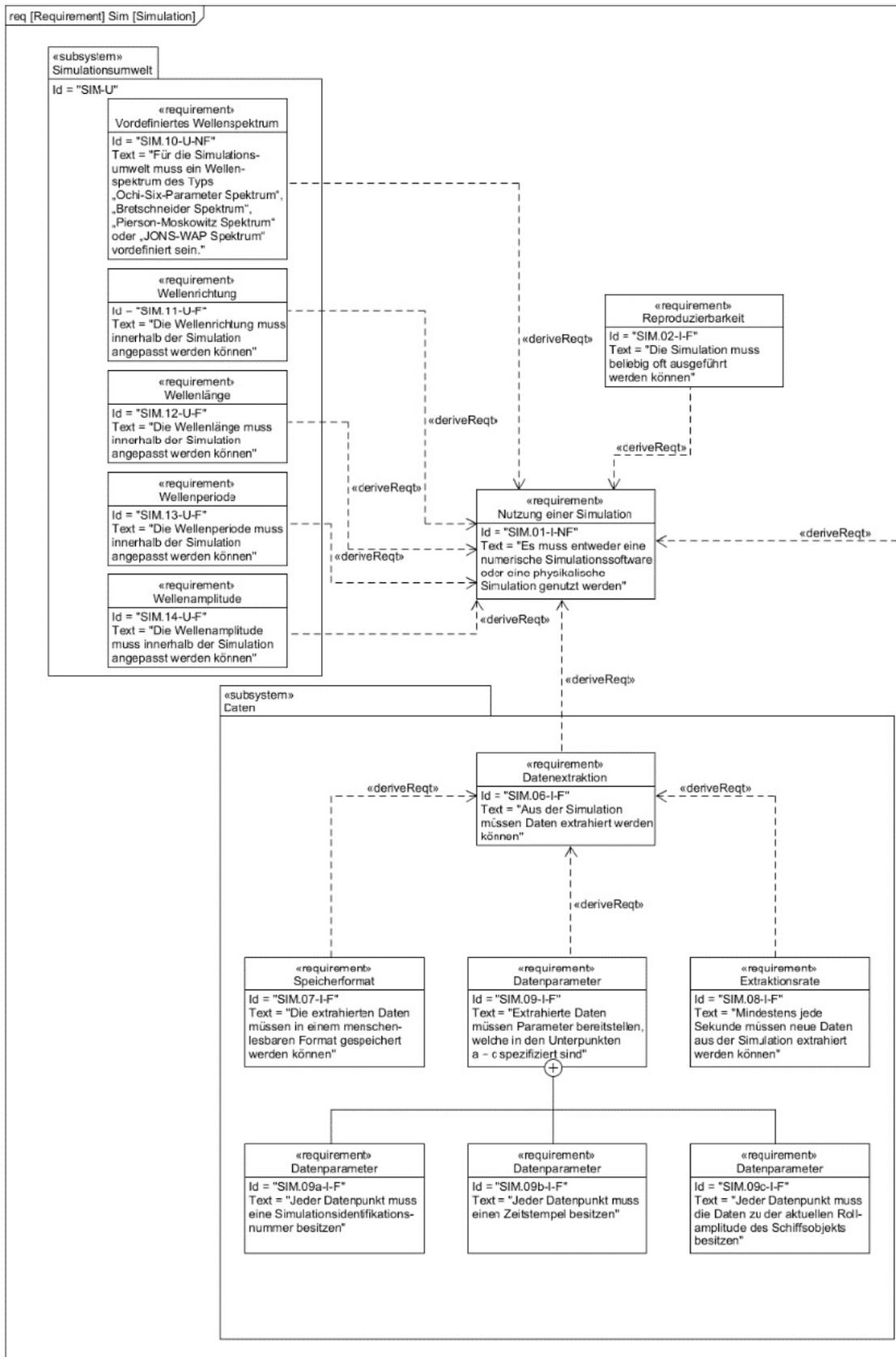


Abbildung 93: Anforderungsdiagramm Simulation Teil 1

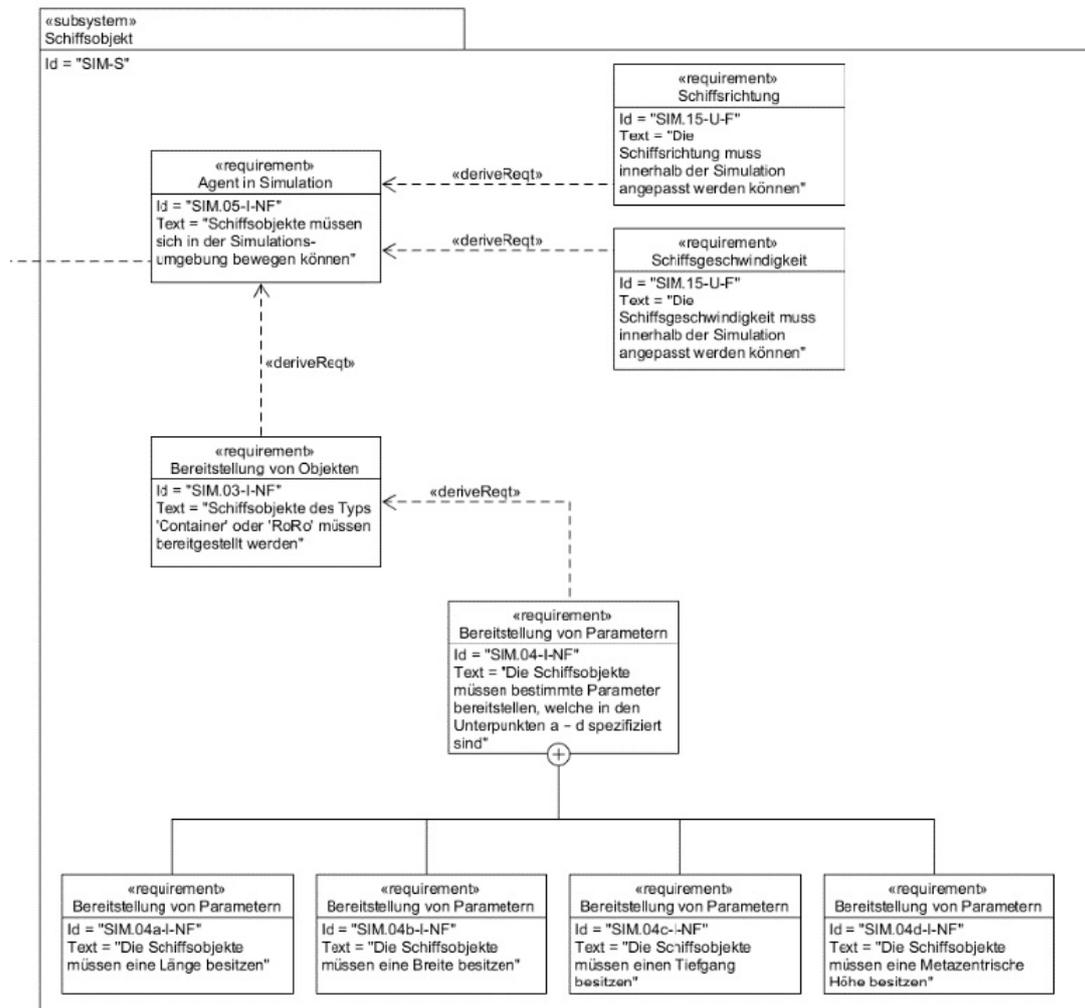


Abbildung 94: Anforderungsdiagramm Simulation Teil 2

v. Anforderungsdiagramm künstliche Intelligenz

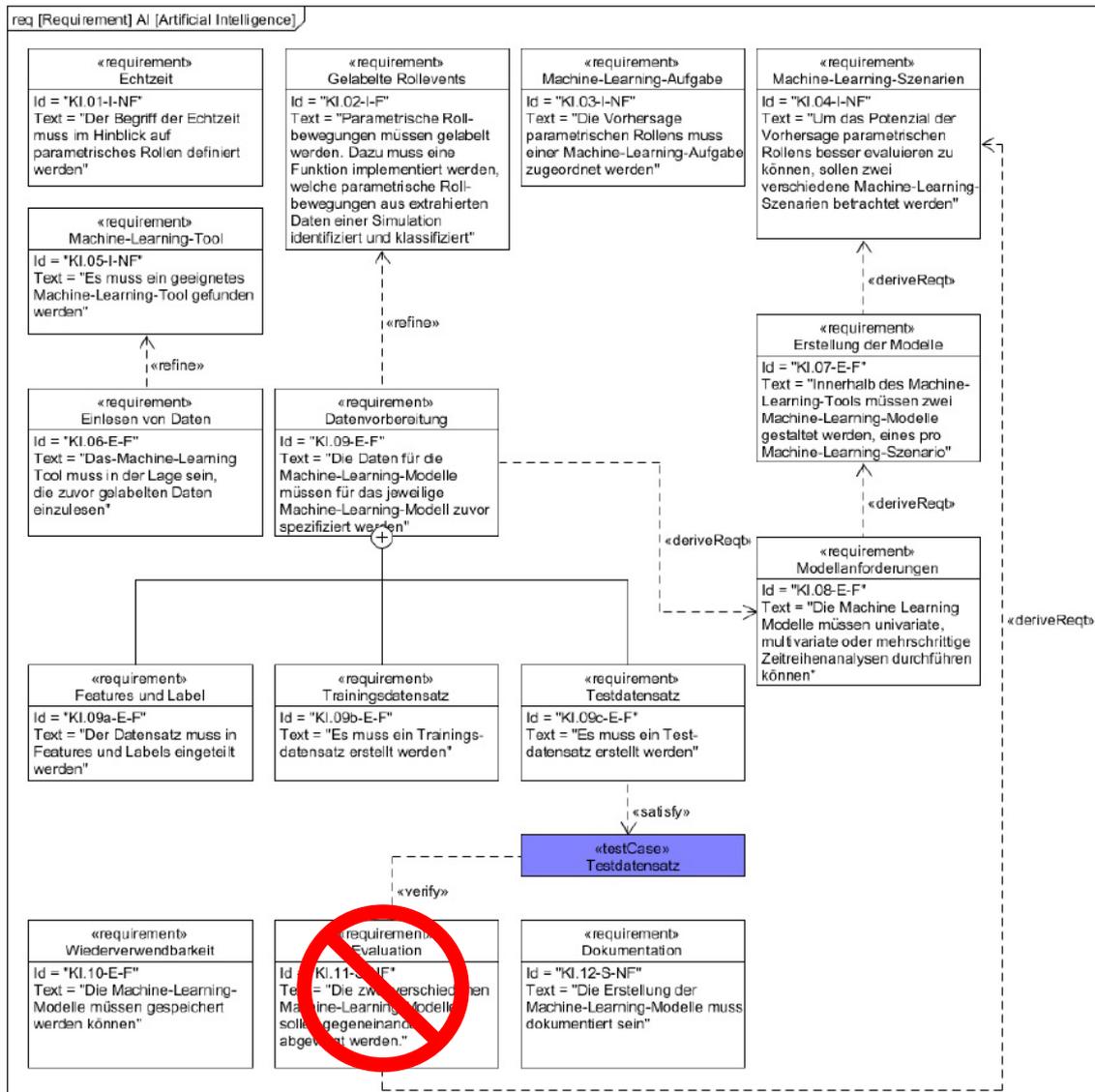


Abbildung 95: Anforderungsdiagramm künstliche Intelligenz

Abschließende Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Außerdem versichere ich, dass ich die allgemeinen Prinzipien wissenschaftlicher Arbeit und Veröffentlichung, wie sie in den Leitlinien guter wissenschaftlicher Praxis der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg festgelegt sind, befolgt habe.

Oldenburg, den _____

Unterschrift _____

Sovanna Chhoeung