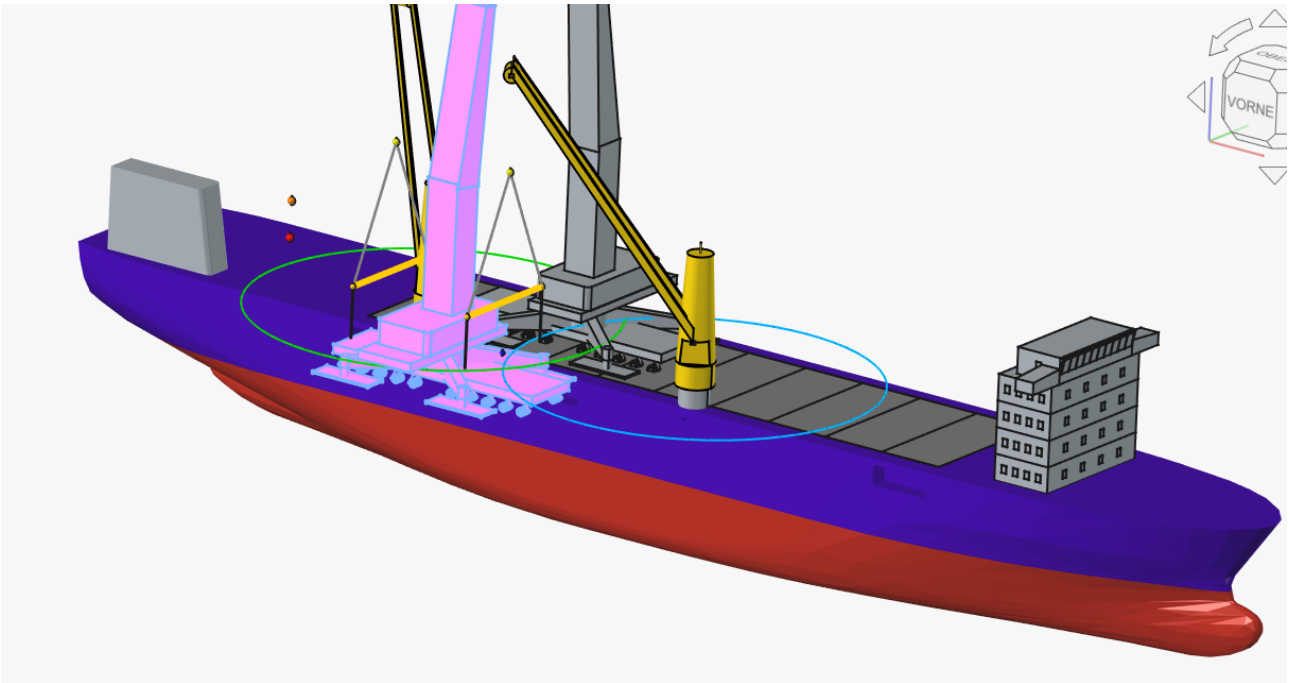

VORNE

Wichtige Hinweise – Verwendungszweck, Verifizierung und Haftung

Verwendungszweck

StowMind ist eine Software zur Unterstützung ingenieurtechnischer Aufgaben im Bereich der Schiffsbeladung, Hydrostatik, Stabilität, Hebeoperationen, Lastverteilung, Ladungssicherung sowie verwandter maritimer Berechnungen.

Die Software dient ausschließlich als Hilfsmittel für qualifizierte Anwender. Sie ersetzt weder die fachliche Beurteilung eines Schiffsingenieurs noch genehmigte Schiffsunterlagen oder behördlich bzw. klassifikationsseitig vorgeschriebene Nachweise.

Verifizierung der Berechnungsergebnisse

Alle mit StowMind erzeugten Berechnungen beruhen auf den vom Benutzer bereitgestellten oder importierten Eingabedaten. Für deren Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität ist ausschließlich der Benutzer verantwortlich.

Vor einer Verwendung der Berechnungsergebnisse für betriebliche Entscheidungen, Transportfreigaben, Hebevorgänge oder sonstige sicherheitsrelevante Anwendungen sind sämtliche Ergebnisse durch den verantwortlichen Ingenieur unabhängig zu überprüfen.

Insbesondere sind die Berechnungsergebnisse mit den für das jeweilige Schiff gültigen und genehmigten Unterlagen abzugleichen. Hierzu gehören insbesondere:

- das genehmigte Stabilitätsbuch (Approved Stability Booklet),
- das Loading Manual,
- die Werft-Hydrostatik einschließlich Hydrostatiktabellen und Pantokarenen,
- das Cargo Securing Manual (CSM),
- genehmigte Lade- und Deckslastgrenzen,
- Kranhandbücher, Lastdiagramme und Betriebsgrenzen sämtlicher eingesetzter Hebezeuge,
- Herstellerunterlagen und gültige Zertifikate für Kräne, Anschlagmittel, Hebezeuge, Schäkel, Traversen, Drahtseile, Ketten, Rundschlingen, Zurrmittel und sonstige Lastaufnahmeeinrichtungen,
- die Anforderungen der zuständigen Klassifikationsgesellschaft,
- die Vorschriften des Flaggenstaates,
- sowie alle weiteren anwendbaren nationalen und internationalen Vorschriften.

Abweichungen zwischen den Berechnungsergebnissen von StowMind und den genehmigten Schiffsunterlagen sind vor einer Verwendung der Ergebnisse vollständig zu klären. Im Zweifelsfall

haben stets die genehmigten Originalunterlagen sowie die Anforderungen der zuständigen Behörden und Klassifikationsgesellschaft Vorrang.

Haftung

StowMind wurde mit größtmöglicher Sorgfalt entwickelt und anhand anerkannter ingenieurwissenschaftlicher Verfahren sowie internationaler Regelwerke implementiert und getestet.

Dennoch kann keine Gewähr dafür übernommen werden, dass die Software in jedem Einzelfall fehlerfrei arbeitet oder für jeden Anwendungsfall geeignete Ergebnisse liefert.

Soweit gesetzlich zulässig, übernimmt der Autor bzw. Lizenzgeber keine Haftung für unmittelbare oder mittelbare Schäden, Folgeschäden, Vermögensschäden, Betriebsunterbrechungen oder entgangenen Gewinn, die aus der Nutzung oder Nichtnutzung der Software entstehen.

Die Haftung für Vorsatz, grobe Fahrlässigkeit sowie in gesetzlich zwingend vorgeschriebenen Fällen bleibt hiervon unberührt.

Mit Installation oder Verwendung der Software erkennt der Benutzer diese Bestimmungen an.

StowMind wurde entwickelt, um die Planung, Berechnung, Verifizierung und Dokumentation schiffstechnischer Aufgaben zu unterstützen. Die Software führt Berechnungen und technische Informationen aus unterschiedlichen Quellen zusammen und unterstützt den Ingenieur bei der Vorbereitung, Überprüfung und nachvollziehbaren Dokumentation technischer Entscheidungen. StowMind ersetzt weder die genehmigten Schiffsunterlagen noch die nach den geltenden Vorschriften erforderlichen Nachweise, Freigaben oder die fachliche Verantwortung des verantwortlichen Ingenieurs.

1 StowMind Capytaine Hydrodynamic Analysis

1.1 Zweck und Anwendungsbereich

Das Modul dient der hydrodynamischen Analyse von Schiffen und schwimmenden Offshore-Strukturen im Frequenzbereich. Es berechnet auf Basis der Boundary-Element-Methode (BEM) die seegangsrelevanten Kenngrößen für sechs Freiheitsgrade (Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw). Die Analyse liefert:

- Hydrodynamische Koeffizienten (Added Mass, Damping)
- Wellenerregungskräfte (Excitation Forces)
- Response Amplitude Operatoren (RAO) für alle Freiheitsgrade
- Hydrostatische Steifigkeiten

Anwendungsfälle sind die Bewertung des Seegangsverhaltens, die Vordimensionierung von Passiven Roll-Dämpfungssystemen, die Auslegung von Positionierungs-Systemen sowie die Erzeugung von Eingabedaten für zeitdomänenbasierte Nachlaufsimulationen.

1.2 Systemarchitektur und Modulübersicht

Das System besteht aus drei eng verknüpften Python-Modulen, die zusammen den kompletten Workflow von der Geometrie bis zur Report-Erzeugung abdecken.
Tabellen

Modul	Aufgabe	Laufumgebung
CapytaineTools.py	Geometrie-Export, Mesh-Reparatur, Skript-Generierung, Solver-Ausführung, Ergebnis-Lesen und Basis-Plots	FreeCAD-Pythonumgebung
CapytaineTaskPanel.py	Grafische Bedienoberfläche (GUI) innerhalb von FreeCAD, Parameter-Eingabe, Ansteuerung der Kernfunktionen, interaktive Plot-Anzeige	FreeCAD-GUI
capytaine_analyse.py	Erweiterte Post-Processing-Routinen: Heatmaps, 3D-Oberflächen, automatische PDF-Report-Erzeugung	Externer Python-Subprozess

Der Datenfluss verläuft wie folgt:

1. FreeCAD-Dokument mit Schiffsgeometrie und Lastdaten
2. Export und Säuberung des Oberflächen-Meshes (STL/NPZ)
3. Generierung und Ausführung des Capytaine-Python-Skripts
4. Ergebnisspeicherung als NetCDF-Datei
5. Darstellung im TaskPanel oder erweiterte Analyse via capytaine_analyse.py

1.3 Physikalische Grundlagen

1.3.1 Das hydrodynamische Randwertproblem

Capytaine löst das linearisierte Potentialproblem für einen in harmonischen Wellen schwimmenden starren Körper. Das Gesamtpotential setzt sich aus drei Anteilen zusammen:

- Froude-Krylov-Potential: Vom ungestörten Wellenfeld herrührend
- Diffractions-Potential: Störung des Wellenfelds durch den festgehaltenen Körper
- Strahlungspotentiale: Vom oszillierenden Körper in ruhigem Wasser erzeugt

Die Körperoberfläche wird in ebene Dreieckspanels diskretisiert. Für jedes Panel wird die Quellstärke so bestimmt, dass die Randbedingung an der Körperhülle erfüllt ist.

1.3.2 Hydrodynamische Koeffizienten

Aus den berechneten Potentialen leitet Capytaine frequenzabhängige Koeffizienten ab:
Tabellen

Größe	Bezeichnung	Einheit	Physikalische Bedeutung
Added Mass	Aij(omega)	kg	Zusätzliche träge Masse des mitbewegten Wassers
Radiation Damping	Bij(omega)	kg/s	Energiedissipation durch erzwungene Schwingungen des Körpers
Excitation Force	Fexc,i(omega,beta)	N	Gesamte Wellenkraft auf den festgehaltenen Körper

Diese Größen werden als komplexe Zahlen berechnet. Da das NetCDF-Format keinen komplexen Datentyp unterstützt, speichert das System Real- und Imaginärteil getrennt (z. B. added_mass_real und added_mass_imag) und setzt sie beim Einlesen wieder zusammen.

Viskose Zusatzdämpfung

Die lineare Potentialtheorie unterschätzt die Rolldämpfung von Schiffen systematisch, weil sie keine Wirbelablösung an scharfen Kanten (Schlingerkiele, Ruder, Flossen) kennt. Bei mittleren bis großen Rollamplituden liefert sie Roll-RAOs, die um Faktor 2–4 zu hoch liegen. Bei Resonanz kann der Potential-Peak zudem numerisch divergieren (Werte zwischen 0.5 und 0.9 rad/m je nach Frequenzauflösung), weil die Strahlungsdämpfung B_{44} im Rollen sehr klein ist.

Das Seakeeping-Modul ergänzt die Potentialtheorie um ein **plattenbasiertes Modell viskoser Zusatzdämpfung**, das methodisch an PDSTRIP angelehnt ist. Jedes Anhängsel (Schlingerkiel, Ruder, Flosse) wird als dünne Platte mit Normale, Bezugsfläche, Zusatzmasse und quadratischem Querwiderstandsbeiwert modelliert. Der quadratische Widerstand wird äquivalent linearisiert:

- regelmäßige Welle: $b = ½ \cdot \rho \cdot S \cdot cd \cdot 8/(3\pi) \cdot |v_{rel}|$
- stochastische See: $b = ½ \cdot \rho \cdot S \cdot cd \cdot \sqrt{(8/\pi)} \cdot \sigma_{vrel}$

Da die Relativgeschwindigkeit von der Antwort abhängt, wird das System iterativ gelöst. Die BEM-Koeffizienten (Added Mass, Radiation Damping, Steifigkeit, Anregung) werden dabei **nicht neu berechnet** — die viskose Dämpfung wird nur der Bewegungsgleichung

hinzugefügt. Das Ergebnis ist eine zweite RAO-Kurve, die als `RAO_viscous` im Dataset gespeichert wird.

1.3.3 Response Amplitude Operator

Der RAO beschreibt das Übertragungsverhalten von der Wellenamplitude auf die Bewegungsamplitude des Körpers:
RAO_j(omega, beta) = Bewegungsamplitude_j / Wellenamplitude
Er ergibt sich aus der Lösung der Bewegungsgleichung:
(-omega^2 * (M + A(omega)) - i*omega * B(omega) + C_hydro) * RAO = F_exc(omega, beta)
Dabei ist M die Massenmatrix, A die Added-Mass-Matrix, B die Dämpfungsmatrix und C_hydro die hydrostatische Steifigkeitsmatrix.#

1.3.4 Mesh-Systeme und Geometrieverarbeitung

Das Modul unterscheidet zwei Geometrietypen und wendet jeweils optimierte Verarbeitungspipelines an.
Solide BREP-Körper (geschlossene Volumenkörper):

- Das Solid wird an der Wasserlinie (Z=0) geschnitten
- Das eingetauchte Volumen wird mit der Sollverdrängung (Masse / 1025) verglichen
- Die Steuerbordhälfte wird extrahiert, getesselliert und anschließend gespiegelt
- Das finale Mesh ist bewusst an der Wasserlinie offen

Nicht-Solide Geometrien (Shells, importierte Meshes, Compounds):

- Tessellierung über mehrere Fallback-Mechanismen
- Z=0-Clipping direkt im Mesh mittels Sutherland-Hodgman-Algorithmus
- Entfernung geometrisch doppelter Facetten und nicht-mannigfaltiger Kanten
- Erzwingung exakter Symmetrie durch Halbierung bei Y=0 und Spiegelung

Beide Pfade führen zu einem wasserdichten, symmetrischen Dreiecksmesh, das bewusst an der Wasserlinie offen bleibt, da Capytaine eine geschlossene Oberfläche an dieser Stelle nicht erwartet.

1.3.5 Schwimmlage mit Trimm

Das Modul berücksichtigt die **tatsächliche Schwimmlage** des Schiffes, nicht nur einen ebenen Kiel. Die LoadCondition liefert drei Tiefgangswerte (siehe 1.4.2):

- **B11**: Tiefgang achtern (AP)
- **C11**: Tiefgang mittschiffs
- **D11**: Tiefgang vorn (FP)

Aus diesen Werten wird der Trimmwinkel berechnet:

$\theta = \text{atan2}(D11 - B11, LOA)$

Die Rumpfgeometrie wird vor dem Mesh-Export um die Y-Achse um diesen Winkel rotiert, sodass die reale Wasserlinie nach der Translation auf Z=0 zu liegen kommt. Ein Schiff mit Hecklastigkeit (B11 > D11) erhält damit einen positiven Trimmwinkel (Bug hoch), der der tatsächlichen Schwimmlage entspricht.

Konsequenz für die Hydrostatik: Die Wasserlinienfläche und ihre Trägheitsmomente werden aus dem tatsächlich getrimmten Schnitt berechnet. C33 (Heave) bleibt praktisch unverändert, C44 (Roll) und C55 (Pitch) können je nach Trimmwinkel um einige Prozent abweichen. Das ist die **physikalisch korrekte** Antwort — die vorherige Rechnung mit ebenem Kiel war eine Näherung.

Konsequenz für die RAOs: Die Anregung und die hydrodynamischen Koeffizienten werden ebenfalls für die getrimmte Geometrie berechnet. Bei einem Heavy-Lift-Schiff mit 1–2° Trimm sind die Unterschiede klein, aber systematisch — und bei der Kopplung mit Crane Analysis und Operability relevant, weil dort die Roll-Winkel und damit die Hakenbeschleunigungen eingehen.

1.4 Voraussetzungen und Vorbereitung

1.4.1 FreeCAD-Dokument

Das aktive Dokument muss enthalten:

- Ein Schiffsmodell als Solid, Shell oder importiertes Mesh-Objekt
- Eine Spreadsheet-Tabelle mit dem exakten Namen LoadCondition

1.4.2 Das LoadCondition-Spreadsheet

Die Tabelle muss folgende Zellenbelegung aufweisen. Die Einheiten sind kritisch und werden vom System so interpretiert:
Tabellen

Zelle	Parameter	Einheit	Bedeutung
D4	Masse	kg	Gesamtmasse des Schiffes inklusive Nutzlast
E4	Draft	mm	Mittlerer Tiefgang (wird intern nach m umgerechnet)
F4	KM	mm	Metazentrische Höhe über Kiel (wird nach m umgerechnet)
G4	GM	m	Metazentrische Höhe über Schwerpunkt
E5	LCG	m	Longitudinale Schwerpunktslage
F5	TCG	m	Transversale Schwerpunktslage
G5	VCG	m	Vertikale Schwerpunktslage über Kiel
H4	FSM	tm	Free Surface Moment
I7	Ixx	kg*m^2	Rollträgheitsmoment um den Schwerpunkt
I8	Iyy	kg*m^2	Pitchträgheitsmoment um den Schwerpunkt
I9	Izz	kg*m^2	Yawträgheitsmoment um den Schwerpunkt
B11	Draft aft (AP)	mm	Tiefgang am achteren Lot
C11	Draft mid	mm	Tiefgang mittschiffs (Bezug für Trim-Rotation)

D11	Draft fwd (FP)	mm	Tiefgang am vorderen Lot

Hinweis: Draft und KM sind in Millimetern anzugeben, alle anderen Werte in den angegebenen Basiseinheiten.

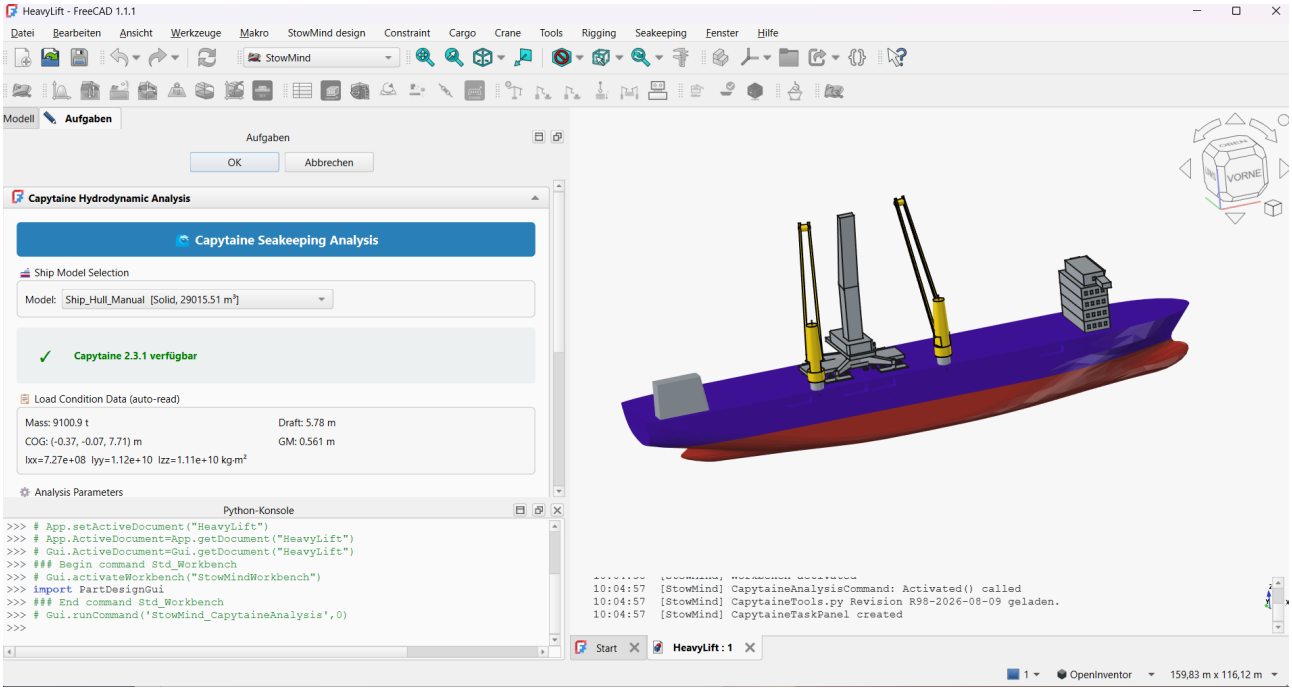
Hinweis zu den Tiefgängen: B11, C11 und D11 müssen in Millimetern angegeben werden. Das System berechnet daraus den Trimmwinkel und die Midship-Referenz für die CoG-Transformation. Wenn C11 leer ist oder 0.0 enthält, fällt das System auf E4 zurück (ebener Kiel) und gibt eine Warnung im Log aus.

Die Zellen B10, C10, D10 enthalten die Spaltenüberschriften („Aft Point [mm]", „Mid Point [mm]", „Fwd Point [mm]"). Sie werden beim Anlegen der LoadCondition automatisch gesetzt.

1.4.3 Geometrieanforderungen

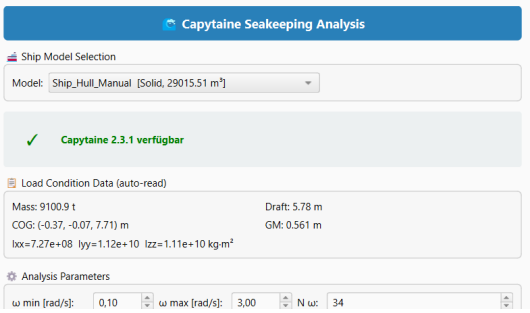
- Das Modell sollte im Maßstab 1:1 modelliert sein (FreeCAD-Standard ist mm)
- Die Kiel-Linie sollte bei Z=0 liegen, der Draft wird später durch das System berücksichtigt
- Für symmetrische Rümpfe genügt eine Halbgeometrie (Y>=0 oder Y<=0), das System spiegelt automatisch
- Bei Monohulls erzwingt das System exakte Symmetrie durch Clipping und Spiegelung

1.5 Bedienungsanleitung



1.5.1 Öffnen des TaskPanels

Die Analyse wird über das Capytaine-TaskPanel gesteuert. Nach dem Start erscheint ein Fenster mit mehreren Abschnitten:



- Ship Model Selection
- Load Condition Data (nur Anzeige)
- Analysis Parameters
- Run-Button und Fortschrittsanzeige
- Results-Bereich (zu Beginn ausgeblendet)

1.5.2 Auswahl des Schiffsmodells

Im oberen Dropdown-Menü werden alle Top-Level-Objekte des Dokuments aufgelistet, die ein gültiges Shape besitzen (Solids, Shells, Meshes). Die Liste ist nach Volumen absteigend sortiert. Das größte Objekt steht meist an erster Stelle und ist in der Regel der Rumpf.
Wichtig: Wählen Sie explizit das korrekte Objekt aus. Das System sucht nicht mehr automatisch, sondern verwendet strikt die Dropdown-Auswahl.

1.5.3 Parameter-Eingabe

Die Parameter werden in der Gruppe Analysis Parameters eingestellt. Die Bedeutung der einzelnen Felder:
Tabellen

Parameter	Standardwert	Einstellbereich	Bedeutung
omega min	0.1 rad/s	0.01 bis 10.0	Untere Grenzfrequenz der Analyse
omega max	3.0 rad/s	0.1 bis 10.0	Obere Grenzfrequenz der Analyse
N omega	30	5 bis 200	Anzahl der Frequenzstützstellen
Dir min	0 Grad	0 bis 360	Kleinster Wellenanlaufwinkel
Dir max	180 Grad	0 bis 360	Größter Wellenanlaufwinkel
N dir	19	1 bis 72	Anzahl der Richtungsstützstellen
Water depth	unendlich (-1)	-1 bis 5000	Wassertiefe in Metern; -1 bedeutet Tiefwasser
Mesh tol	5.0 mm	0.1 bis 100.0	Tessellierungstoleranz für den Mesh-Export

Richtlinien für die Parameterwahl:

- omega min: 0.1 bis 0.3 rad/s für Seegangsprobleme (entspricht Wellenlängen über 60 m)
- omega max: 1.5 bis 3.0 rad/s; höhere Werte sind nur für kleine Strukturen oder Druckkörper relevant
- N omega: 30 bis 60 Stützstellen ergeben ausreichend glatte Kurven
- Richtungen: Für symmetrische Rümpfe genügt 0 bis 180 Grad; das System nutzt die Symmetrie aus
- Mesh tol: 2 bis 10 mm je nach Modellgröße und gewünschter Panelanzahl
-

Zusätzliche Parameter für die viskose Dämpfung

Die viskose Dämpfung wird über einen separaten Dialog konfiguriert (siehe 1.5.6). Die Konfiguration wird in `appendages.json` neben der `.FCStd`-Datei gespeichert. Folgende Parameter werden dort abgelegt:

Parameter	Standardwert	Bedeutung
`zeta_a`	0.5 m	Referenzwellenamplitude für die quadratische Linearisierung
`model`	`regular`	Linearisierungsmodell (`regular` = regelmäßige Welle, `seastate` = stochastische See)
`bilge_keels`	1 Eintrag	Liste der Schlingerkiele
`fins`	0 Einträge	Liste der Ruder/Flossen

Richtwerte für `zeta_a`:

- 0.3 m: ruhige See (Hs ≈ 0.6 m)
- 0.5 m: moderate See (Hs ≈ 1.0 m)
- 1.0 m: raue See (Hs ≈ 2.0 m)

- 1.5 m: Sturm (Hs ≈ 3.0 m)

Der viskose Effekt ist stark von `zeta_a` abhängig (quadratisch in der Dämpfung). Für Operability-Analysen empfiehlt sich `zeta_a ≈ Hs/4` des dominierenden Seegangs.

1.5.4 Analyse starten und überwachen

Nach Klick auf Run Capytaine Analysis durchläuft das System folgende Phasen:

1. Mesh-Export (Fortschritt ca. 10 Prozent): Das Schiffsmodell wird getesselliert, gesäubert und als STL/NPZ im Temp-Verzeichnis abgelegt.
2. Skript-Generierung (ca. 25 Prozent): Das Python-Skript für Capytaine wird geschrieben.
3. Solver-Lauf (ca. 35 bis 80 Prozent): Capytaine berechnet die hydrodynamischen Koeffizienten für alle Kombinationen aus Frequenz, Richtung und Freiheitsgrad. Dies ist der zeitintensivste Schritt.
4. Ergebnis-Einlesen (ca. 90 Prozent): Die NetCDF-Datei wird gelesen und komplexe Variablen werden rekonstruiert.
5. Fertigstellung (100 Prozent): Die Ergebnisse stehen zur Verfügung.

Während des Laufs werden Meldungen im Log-Fenster unten im Panel angezeigt. Fehler erscheinen rot, Warnungen gelb, Erfolgsmeldungen grün.

1.5.5 Automatische Speicherung

Wenn das FreeCAD-Dokument bereits gespeichert wurde (Dateiname bekannt), wird das Ergebnis-NetCDF automatisch in den Projektordner kopiert. Der Dateiname enthält Zeitstempel und Parameter zur Wiedererkennung. Ist das Dokument noch nicht gespeichert, erfolgt keine automatische Ablage; Sie können die Datei aber manuell über den Save NetCDF-Button sichern.

1.5.6 Viskose Dämpfung konfigurieren

Die viskose Zusatzdämpfung wird über zwei Buttons im unteren Bereich des TaskPanels gesteuert (Gruppe „🌊 Viscous Damping"):

1. „Configure appendages..."

Öffnet einen Dialog mit zwei Tabellen:

- **Bilge Keels** (Schlingerkiele): | Spalte | Bedeutung | Typischer Wert | |---|---|---| | x from [m] | Anfang Kiel (Midship = 0) | −0.35·LOA | | x to [m] | Ende Kiel | +0.20·LOA | | y [m] | Bilge-Position | 0.85·(B/2) | | z [m] | Bilge-Höhe | 0.65·Draft | | height [m] | Kielbreite (radial) | 0.3–0.6 m | | cd [-] | Querwiderstandsbeiwert | 4–6 | | n seg | Anzahl Segmente pro Seite | 6–10 |
- **Rudders / Fins** (Ruder/Flossen): | Spalte | Bedeutung | Typischer Wert | |---|---|---| | Name | Bezeichnung | „Rudder" | | x [m] | Kraftangriffspunkt | −0.48·LOA | | z [m] | Position | −0.5·Draft | | axis | `vertical` (Ruder) oder `horizontal` (Flosse) | vertical | | length [m] | Spannweite | 3–6 m | | chord [m] | Sehne | 2–4 m | | cl_alpha [-] | Auftriebsgradient | 0 (ohne Fahrt) oder 2π (mit Fahrt) | | cd [-] | Querwiderstandsbeiwert | 1.0 |

Zusätzlich die Linearisierungsparameter:

- `ζ_a`: Referenzwellenamplitude (siehe 1.5.3)
- `model`: `regular` oder `seastate`
- Bei `seastate`: `Hs` und `Tp` des Zielseegangs

Nach dem Schließen des Dialogs wird die Konfiguration in `appendages.json` gespeichert.

2. „Apply viscous damping"

Berechnet die viskose RAO und speichert sie im aktuellen Dataset (`RAO_viscous`) sowie persistent in der `.nc`-Datei. Der Button ist erst aktiv, nachdem ein BEM-Lauf erfolgreich abgeschlossen wurde.

Im Log müssen nach dem Klick diese Zeilen erscheinen:

```
Viscous damping: N plate(s), VCG_mesh = X.XXX m
RAO_viscous stored in dataset (in memory).
Dataset re-saved with RAO_viscous: ...
Project RAO file updated: ...
```

Wenn eine Zeile mit `WARNING:` beginnt, ist die Persistenz gescheitert — die Berechnung ist dann nur im Speicher vorhanden, nicht in der Datei.

Was das System berechnet:

1. Platten aus der Konfiguration erzeugen (Segmente pro Bilge-Keel-Seite + Flossen)
2. Für jede Frequenz und Richtung: Fixpunkt-Iteration der viskosen Dämpfung
3. RAO mit viskoser Dämpfung berechnen
4. Ergebnis als `RAO_viscous` ins Dataset schreiben
5. Beim Persistieren: `_real`/`_imag`-Split für NetCDF
6. `prefer_viscous_rao = 1` als Flag setzen

Wann welche Werte erwarten:

Konfiguration	**Roll-Peak viskos (relativ zu Potential)**
1 Bilge-Keel, h=0.4 m, cd=5, ζ_a=0.5	ca. 0.85–0.95
1 Bilge-Keel, h=0.6 m, cd=5, ζ_a=1.0	ca. 0.55–0.70
1 Bilge-Keel + Ruder, h=0.6 m, cd=5, ζ_a=1.0	ca. 0.45–0.60
Ohne Anhängsel	keine Änderung (Warnung im Log)

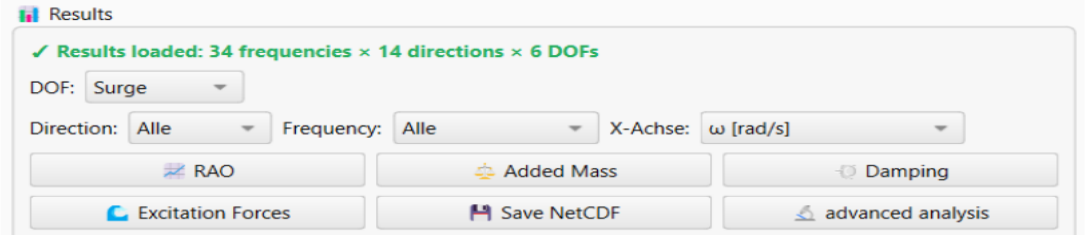
Bei Surge und Heave wirkt die viskose Dämpfung nicht — dort bleibt die RAO praktisch unverändert. Nur Roll und (in geringerem Maße) Yaw werden beeinflusst.

1.6 Ergebnisse im TaskPanel

1.6.1 Übersicht

Nach erfolgreicher Analyse erscheint der Results-Bereich. Er zeigt eine Zusammenfassung:

- Anzahl der Frequenzen
- Anzahl der Wellenrichtungen
- Anzahl der Freiheitsgrade (immer 6)



1.6.2 Filter und Plot-Steuerung

Vor dem Erzeugen von Grafiken können Sie filtern:
Tabellen

Steuerung	Optionen	Wirkung
DOF	Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw	Wählt den Freiheitsgrad für den Plot
Direction	Alle oder einzelne Grade	Zeigt alle Richtungen oder nur eine als Kurve
Frequency	Alle oder einzelne Werte	Setzt einen roten Marker in den Plot
X-Achse	omega, Period T, wave length lambda	Ändert die horizontale Achse

Hinweis: Bei Auswahl einer einzelnen Richtung werden die Werte als Linienplot über der Frequenz dargestellt. Bei Alle wird eine überlagerte Darstellung aller Richtungen erzeugt.

1.6.3 Verfügbare Plots im Panel

Tabellen

Button	Ausgabe	Dateiname im Temp-Ordner
RAO	Betrag des Response Amplitude Operators über der gewählten X-Achse	rao_[DOF].png
Added Mass	Diagonalelement der Added-Mass-Matrix A_ii	added_mass_[DOF].png
Damping	Diagonalelement der Dämpfungsmatrix B_ii	damping_[DOF].png
Excitation Forces	Kraftamplituden für alle 6 DOFs bei gewählter Richtung	forces_[Richtung]deg.png

Die Grafiken werden im Temp-Verzeichnis gespeichert und gleichzeitig im Panel angezeigt. Die Anzeige skaliert automatisch auf die verfügbare Fläche.

RAO-Plot mit viskoser Dämpfung

Wenn das Dataset eine `RAO_viscous`-Variable enthält, zeigt der RAO-Plot **zwei Kurven pro Wellenrichtung**:

- **gestrichelt** (dünn, halbtransparent): Potentialtheorie ohne viskose Dämpfung
- **durchgezogen** (dick, farbig): mit viskoser Dämpfung

Bei Surge und Heave liegen beide Kurven praktisch übereinander. Bei Roll (und bei starker Roll-Anregung auch Sway/Yaw) ist die viskose Kurve im Resonanzbereich deutlich niedriger. Die Differenz ist ein direktes Maß für den Beitrag der Schlingerkiele und Ruder.

Die Legende zeigt die Wellenrichtung (`pot β=90°` vs. `visc β=90°`). Bei Auswahl einer einzelnen Richtung (Dropdown „Direction") wird nur ein Paar gezeichnet; bei „Alle" alle 19 Paare überlagert.

1.6.4 Manuelles Speichern

Über den Button Save NetCDF kann die Ergebnisdatei an einen beliebigen Ort kopiert werden. Das Format ist NetCDF 4, welches sich mit Python (xarray), MATLAB oder Ocean Data View öffnen lässt.

1.7 Erweiterte Auswertung (Advanced Calculation)

1.7.1 Aufruf

Die erweiterte Auswertung wird über den Button Advanced Analysis im TaskPanel gestartet. Alternativ kann das Skript manuell aufgerufen werden:

python capytaine_analyse.py [NetCDF-Datei] [optional: omega_min]
Das Skript läuft als eigener Prozess und öffnet kein FreeCAD-Fenster. Es ist für die detaillierte Offline-Auswertung vorgesehen.

1.7.2 Automatisch erzeugte Grafiken

Das Skript erzeugt für jeden der sechs Freiheitsgrade automatisch fünf Grafiken. Diese werden als Einzel-PNGs im selben Verzeichnis wie die NetCDF-Datei gespeichert.
Tabellen

Grafik	Dateiname	Inhalt	Darstellungsart
RAO Heatmap	rao_[DOF]_heatmap.png	RAO-Amplitude über Frequenz (Y) und Wellenrichtung (X)	2D-Farbplot mit Colorbar
RAO 3D	rao_[DOF]_3d.png	Dasselbe als dreidimensionale Oberfläche	3D-Surface-Plot mit Viewing-Angle
Added Mass	added_mass_[DOF]_heatmap.png	Added-Mass-Diagonalelement über Frequenz und Richtung	2D-Heatmap oder Linienplot
Damping	damping_[DOF]_heatmap.png	Damping-Diagonalelement über Frequenz und Richtung	2D-Heatmap oder Linienplot
Excitation Forces	excitation_[DOF]_heatmap.png	Erregungskraft-Amplitude über Frequenz und Richtung	2D-Heatmap

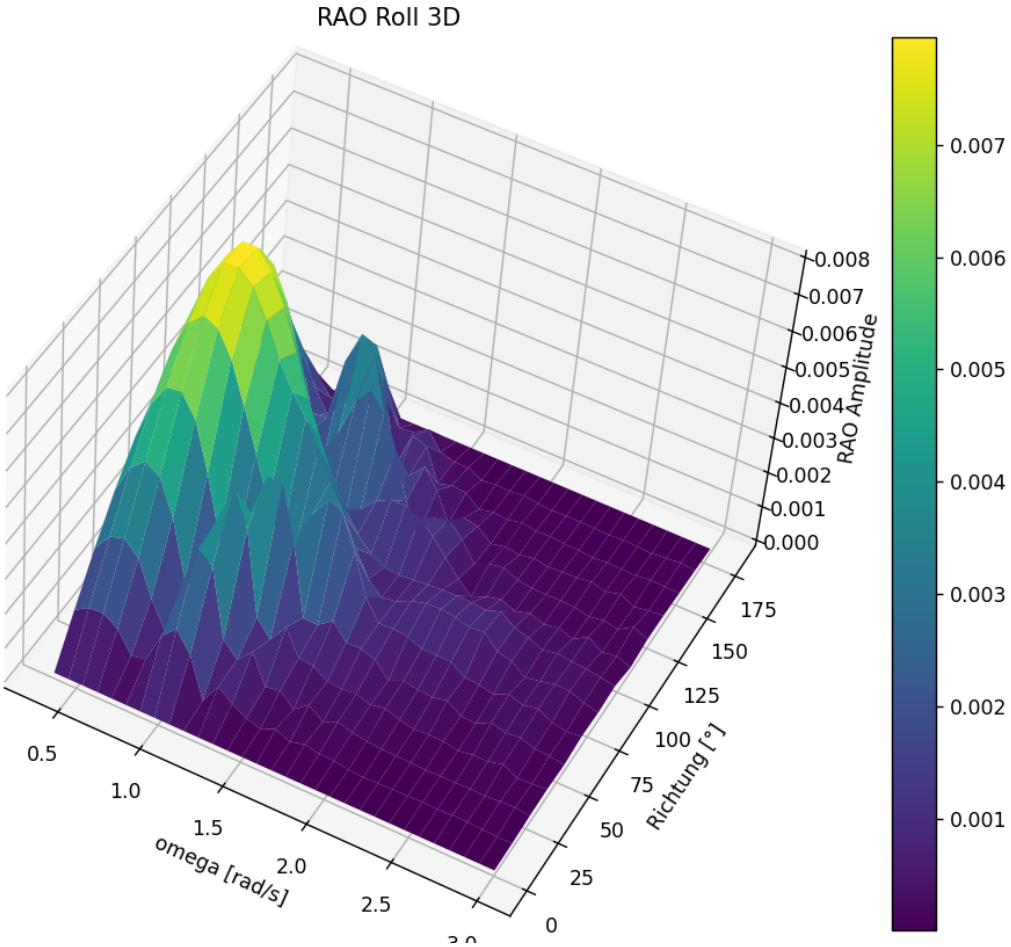
Hinweis zu Heatmap vs. Linienplot: Enthalten die Ergebnisse mehrere Wellenrichtungen, wird automatisch eine Heatmap erzeugt. Liegt nur eine Richtung vor, wird ein eindimensionaler Linienplot über der Frequenz erstellt.

Report mit viskoser Dämpfung

Wenn die `.nc`-Datei eine `RAO_viscous`-Variable enthält, zeigt der PDF-Report auf den RAO-Seiten beide Kurven (Potential gestrichelt, viskos durchgezogen). Die Titelseite enthält zusätzlich einen Hinweis auf die viskose Konfiguration:

```
Viscous damping: ACTIVE (bilge keels: 2×8 segments, zeta_a = 1.0 m)
```

Bei Datasets ohne `RAO_viscous` bleibt der Report unverändert (nur Potential-Kurve).



1.7.3 Der PDF-Report

Zusätzlich zu den Einzelgrafiken erzeugt das Skript einen zusammenfassenden Report mit dem Namen report.pdf im Ergebnisverzeichnis.
Aufbau des Reports:

- Seite 1: Titelseite mit Projektparametern
  - Schiffsmasse in kg und Tonnen
  - Schwerpunktkoordinaten (LCG, TCG, VCG)
  - Trägheitsmomente Ixx, Iyy, Izz
  - Frequenzbereich und Anzahl Stützstellen
  - Wellenrichtungsbereich und Anzahl Stützstellen
  - Wassertiefe (numerischer Wert oder Unendlich)
  - Angewendeter Omega-Cutoff (unterdrückte niedrige Frequenzen)
- Seiten 2 bis 31: Pro Freiheitsgrad fünf Seiten
  - RAO Heatmap
  - RAO 3D-Oberfläche
  - Added Mass Plot
  - Damping Plot

- Excitation Forces Heatmap

Der Report wird im A4-Landscape-Format erzeugt und ist ohne weitere Nachbearbeitung direkt für Dokumentationen und Gutachten verwendbar.

1.7.4 Omega-Cutoff

Das Skript filtert standardmäßig Frequenzen unterhalb von 0.3 rad/s heraus. Diese werden als unrealistisch verworfen, da sie extrem langen Wellen entsprechen (bei 0.3 rad/s Wellenlänge ca. 685 m im Tiefwasser). Der Cutoff-Wert kann als zweites Kommandozeilenargument angepasst werden.

1.7.5 Dateiablage

Alle Ausgabedateien landen im selben Verzeichnis wie die eingegebene NetCDF-Datei: [Verzeichnis der .nc-Datei]/ report.pdf rao_Surge_heatmap.png rao_Surge_3d.png added_mass_Surge_heatmap.png damping_Surge_heatmap.png excitation_Surge_heatmap.png rao_Sway_heatmap.png ... (analog für alle 6 DOFs)

1.8 Fehlerbehebung und Qualitätssicherung

1.8.1 Geometriefehler und deren Behandlung

Tabellen

Symptom im Log	Ursache	Systemreaktion
Boundary is not closed	Offene Ränder im Mesh (Löcher, nicht verschweißte Flächen)	Automatisches Kappen kleiner Löcher, Zippern von Nahtlücken
overlapping panels	Geometrisch überlappende Facetten	Entfernung geometrisch doppelter Facetten
Nicht-mannigfaltige Kanten	Kanten mit mehr als 2 angrenzenden Facetten	Heilung durch Entfernen kleinster Facetten an betroffenen Kanten
Viele getrennte Inseln	Mehrere nicht verbundene Flächen im Modell	Analyse der Komponenten, Verwerfung von Kleinstinseln, Debug-STL-Export

1.8.2 Plausibilitätsprüfungen

Das System führt während des Exports folgende Checks durch:

- Volumenvergleich: Eingetauchtes Volumen wird mit Sollverdrängung (Masse / 1025) verglichen
- Abweichung 20 bis 100 Prozent: Warnung im Log
- Abweichung über 100 Prozent: Abbruch des Exports mit Fehlermeldung
- Asymmetrie-Check: Bei Ganzrümpfen wird exakte Symmetrie erzwungen

1.8.3 Hinweise zur Mesh-Qualität

- Die Panelanzahl sollte zwischen 500 und 5000 liegen. Weniger als 500 Panels führt zu ungenauen Ergebnissen, mehr als 5000 erhöht die Rechenzeit übermäßig.
- Das Verhältnis von längster zu kürzester Kante innerhalb eines Panels (Aspect Ratio) sollte unter 50 liegen. Extrem schmale Dreiecke (Sliver) an der Wasserlinie können zu numerischen Singularitäten führen.

- Die Wasserlinie muss als saubere, geschlossene Kontur im Mesh resultieren. Das System entfernt automatisch flache Deckelfacetten, die an der Wasserlinie entstehen können.

1.9 Viskose Dämpfung – physikalische Grundlagen und Praxis

1.9.1 Warum Potentialtheorie bei Rollen versagt

Die lineare Potentialtheorie geht von einer reibungsfreien, wirbelfreien Strömung aus. Sie kann deshalb keine Energie durch Wirbelablösung an scharfen Kanten (Schlingerkiel, Ruderblatt, Flossen) dissipieren. Bei Rollbewegungen mit nennenswerter Amplitude ist dieser Verlust aber der dominierende Dämpfungsmechanismus.

Konsequenz: Die Roll-RAO aus reiner Potentialtheorie ist bei Resonanz oft um Faktor 2–4 zu hoch. Bei einem Heavy-Lift-Schiff mit GM = 0.94 m und Roll-Eigenperiode ≈ 17 s kann der Potential-Peak Werte von 0.5–0.9 rad/m erreichen (entspricht 30–50° Rollwinkel bei 1 m Welle), was physikalisch nie auftritt.

Zusätzlich ist der Potential-Peak oft **nicht konvergent** — der Wert hängt von der Frequenzauflösung ab, weil die Strahlungsdämpfung B_{44} im Rollen extrem klein ist (~3×10^4 kg·m²/s bei deinem Schiff) und die RAO-Formel $1/(2\zeta)$ dort numerisch instabil wird.

1.9.2 Methodik

Das Modul verwendet ein **plattenbasiertes Modell**, das methodisch an PDSTRIP angelehnt ist (dem etablierten Standard in der Naval Architecture für viskose Rolldämpfung):

- Jedes Anhängsel (Bilge-Keel-Segment, Ruder, Flosse) wird als dünne Platte modelliert
- Der quadratische Querwiderstand wird äquivalent linearisiert ($8/(3\pi)$ für regelmäßige Welle, $\sqrt{(8/\pi)}$ für stochastische See)
- Die Relativgeschwindigkeit an der Platte hängt von der Antwort ab → Fixpunkt-Iteration
- Die BEM-Koeffizienten werden **nicht** neu berechnet; die Platten-Terme werden nur der Bewegungsgleichung hinzugefügt

Das Modell ist validiert gegen den Grenzfall unendlicher Dämpfung (RAO → 0) und gegen den Potential-Fall (keine Platten → `rao_potential()` reproduziert `ds['RAO']` bitgenau).

1.9.3 Konfiguration – typische Werte

Bilge-Keel-Position:

- `x0/x1`: entlang der Bilge, wo sie parallel zur Wasserlinie verläuft (typisch 40–60 % der LOA)
- `y`: auf der Rumpfoberfläche, ca. 0.85–0.90 × B/2
- `z`: wo die Bilge den Knick zwischen Seite und Boden hat (typisch 0.6–0.7 × Draft)
- `height`: 0.3–0.6 m (bei Heavy-Lift-Schiffen 400–600 mm)

Ruder/Flossen:

- `x`: 0.48 × LOA hinter AP (Ruderposition)
- `z`: 0.5 × Draft unter SWL
- `length × chord`: nach Herstellerangaben
- `cd`: 1.0 für schlanke Profile, 2.0 für stumpfe
- `cl_alpha`: 0 ohne Fahrt, 2π mit Fahrt (aber dann nur bei Vorwärtsfahrt wirksam)

Querwiderstandsbeiwerte `cd` für Bilge-Keels:

- 2.0: sehr konservativ (unterschätzt Dämpfung)
- 4.0–5.0: realistisch für mittlere Rollamplituden (5–10°)
- 6.0–8.0: für große Rollamplituden oder Ikeda-kalibrierte Modelle
    - 8.0: unrealistisch hoch, meist Anzeichen für falsche Plattenposition

1.9.4 Ergebnisse validieren

Nach dem Apply-Lauf immer prüfen:

1. **Roll-Peak-Reduktion:** erwartet Faktor 1.5–3.0 je nach Konfiguration
2. **Surge/Heave unverändert:** keine Reduktion (Warnung wenn doch)
3. **Persistenz:** `RAO_viscous_real` in der `.nc`, `prefer_viscous_rao = 1`
4. **Crane/Mooring:** die viskose RAO wird automatisch verwendet (Flag in den Attrs)

Häufige Fehler:

- Roll-Peak reduziert sich nicht: Platten liegen außerhalb der benetzten Fläche (`y` oder `z` falsch) → `damping_matrix` in der Konsole prüfen
- Reduktion zu stark (Faktor > 5): `height` oder `cd` zu groß → typische Werte prüfen
- Unterschied zwischen `zeta_a = 0.5` und `zeta_a = 1.0` sehr groß: normal, ist quadratisch in `zeta_a`

1.9.5 Grenzen der Methodik

- Das Modell ist **linearisiert**. Es gilt nur für moderate Rollamplituden (bis ca. 15–20°).
- Es berücksichtigt **keine** Vorwärtsfahrt-Effekte auf die Platten (das ist bei Heavy-Lift-Operationen meist unkritisch, weil die Schiffe langsam fahren).
- Es berücksichtigt **keine** Sloshing-Effekte in Tanks.
- Es berücksichtigt **keine** Wechselwirkung zwischen Bilge-Keel und Rumpf-Grenzschicht (die Platte wird als freie Platte in ungestörter Strömung modelliert; das ist konservativ im Sinne einer Dämpfungs-Unterschätzung).

Für die meisten Operability-Fragestellungen ist die Modellgenauigkeit ausreichend. Für Klassifikationsnachweise mit strengen Anforderungen (z. B. DNV-Standard für dynamische Positionierung) sollte das Ergebnis mit Ikeda-Formeln oder Messdaten abgeglichen werden.

Kapitel 2: Kranlastanalyse (Crane Load Analysis)

2.1 Zweck und Anwendungsbereich

Das Kranlastanalyse-Modul dient der dynamischen Bewertung von Schiffskränen unter Seegangseinfluss. Es berechnet auf Basis der hydrodynamischen Analyse (RAOs) die resultierenden Beschleunigungen am Hakenpunkt und leitet daraus die dynamische Tragfähigkeitsreduktion ab. Die Analyse liefert:

- **Beschleunigungsspektren** am Hakenpunkt für alle drei Raumrichtungen
- **Signifikante Beschleunigungen** (vertikal und resultierend) für definierte Seegangsparameter
- **Dynamische Tragfähigkeit** der Kräne unter Berücksichtigung der vertikalen Beschleunigung
- **Grafische Darstellungen** der Beschleunigungsverläufe und Antwortspektren

Anwendungsfälle sind die sicherheitstechnische Bewertung von Hebeoperationen, die Auslegung von Lastbegrenzungssystemen, die Optimierung von Kranpositionen an Bord sowie die Erstellung von Betriebsgrenzendiagrammen für verschiedene Seegangszustände.

2.2 Systemarchitektur und Modulübersicht

Das System besteht aus zwei eng verknüpften Python-Modulen, die zusammen den kompletten Workflow von der Datenauslesung bis zur Ergebnisdarstellung abdecken.

Modul	Aufgabe	Laufumgebung
CraneAnalysis.py	Kernberechnungen: RAO-Extraktion, Beschleunigungen am Hakenpunkt, spektrale Antwort, dynamische Lastreduktion, Plot-Funktionen	FreeCAD-Pythonumgebung, unabhängig nutzbar
CraneTaskPanel.py	Grafische Bedienoberfläche (GUI) innerhalb von FreeCAD, Kranauswahl, Parameter-Eingabe, interaktive Ergebnisanzeige	FreeCAD-GUI

Der Datenfluss verläuft wie folgt:

1. **FreeCAD-Dokument** mit Kranobjekten und LoadCondition-Spreadsheet
2. **Auslesen der Kranparameter** aus LoadCondition (Positionen in Metern, Massen)
3. **Identifikation von Kranobjekten** im Dokument (StowMindCrane, ShipCrane)
4. **RAO-Dataset-Auswahl** aus dem Projekt-Speicher (Capytaine-Ergebnisse)
5. **Berechnung der Hakenbeschleunigungen** mittels starrer Körper-Kinematik

6. **Spektrale Antwortanalyse** unter Verwendung von JONSWAP- oder Pierson-Moskowitz-Spektren
7. **Berechnung der dynamischen SWL-Reduktion** basierend auf signifikanter Vertikalbeschleunigung
8. **Darstellung im TaskPanel** als Tabelle und interaktive Plots

---

2.3 Physikalische Grundlagen

2.3.1 Kinematik am Hakenpunkt

Die Bewegung eines beliebigen Punktes an Bord eines schwimmenden Schiffes ergibt sich aus der Überlagerung der sechs Starrkörper-Freiheitsgrade. Für einen Punkt mit den Koordinaten r=(x,y,z)r=(x,y,z) relativ zum Referenzpunkt (meist der Schwerpunkt) gilt:

Komplexe Verschiebung (phasenkorrekte Überlagerung):

δx=Surge+Pitch⋅z−Yaw⋅yδy=Sway+Yaw⋅x−Roll⋅zδz=Heave+Roll⋅y−Pitch⋅xδxδyδz =Surge+Pitch⋅z−Yaw⋅y=Sway+Yaw⋅x−Roll⋅z=Heave+Roll⋅y−Pitch⋅x

Die **Beschleunigung** in jeder Richtung ergibt sich durch zweifache zeitliche Ableitung, was im Frequenzbereich einer Multiplikation mit −ω2−ω2 entspricht:

ai(ω)=ω2⋅∣δi(ω)∣ai(ω)=ω2⋅∣δi(ω)∣

Die **resultierende Beschleunigung** (Magnitude) wird aus der euklidischen Norm der komplexen Verschiebungskomponenten berechnet:

∣a(ω)∣=ω2⋅∣δx∣2+∣δy∣2+∣δz∣2∣a(ω)∣=ω2⋅∣δx∣2+∣δy∣2+∣δz∣2

Wichtiger Hinweis: Die RAOs für die einzelnen Freiheitsgrade liegen als komplexe Zahlen vor und besitzen unterschiedliche Phasenlagen. Eine direkte Betragsbildung der einzelnen Komponenten vor der Überlagerung würde die Phaseninformation verlieren. Daher muss die Überlagerung **komplex** erfolgen, und erst danach wird der Betrag gebildet.

2.3.2 Spektrale Antwort

Die signifikante Beschleunigung ergibt sich aus der Integration des Antwortspektrums über die Frequenz:

σai2=∫0∞Sζζ(ω)⋅∣Hi(ω)∣2 dωσai2=∫0∞Sζζ(ω)⋅∣Hi(ω)∣2dω

Dabei ist:

- Sζζ(ω)Sζζ(ω) das Seegangsspektrum (JONSWAP oder Pierson-Moskowitz)
- Hi(ω)Hi(ω) die Übertragungsfunktion vom Wellenamplitude auf die Beschleunigung in Richtung ii

Die **signifikante Beschleunigung** ist definiert als:

$a_{i,sig} = 4 \cdot \sigma_{ai}$$a_{i,sig} = 4 \cdot \sigma_{ai}$

Das Modul berechnet die signifikante Beschleunigung für:

- Vertikale Richtung ($a_z$$a_z$)
- Resultierende Beschleunigung ($|a|$$|a|$)
- Alle drei Raumrichtungen separat ($a_x, a_y, a_z$$a_x, a_y, a_z$)

2.3.3 Dynamische Tragfähigkeitsreduktion

Die dynamische Belastung eines Krans unter Seegang ergibt sich aus der statischen Last und der vertikalen Beschleunigung am Hakenpunkt. Der **Reduktionsfaktor** ist:

$f_{red} = \frac{g}{g + a_z}$$f_{red} = \frac{g}{g + a_z}$

Die **dynamische Tragfähigkeit** (dynamische SWL) berechnet sich zu:

$SWL_{dyn} = SWL_{stat} \cdot f_{red}$$SWL_{dyn} = SWL_{stat} \cdot f_{red}$

Der **dynamische Faktor** (Laststeigerung gegenüber statisch):

$f_{dyn} = 1 + \frac{a_z}{g}$$f_{dyn} = 1 + \frac{a_z}{g}$

2.3.4 Verwendete Seegangsspektren

JONSWAP-Spektrum (Joint North Sea Wave Project):

$S_{JONSWAP}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-1.25 \cdot \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2\omega_p^2}\right)}$$S_{JONSWAP}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-1.25 \cdot \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2\omega_p^2}\right)}$

mit:

- $\alpha = 0.076 \cdot \left(H_s \cdot \omega_p^2 / g\right)^{0.75}$$\alpha = 0.076 \cdot \left(H_s \cdot \omega_p^2 / g\right)^{0.75}$
- $\sigma = 0.07$$\sigma = 0.07$ für $\omega \leq \omega_p$$\omega \leq \omega_p$, $\sigma = 0.09$$\sigma = 0.09$ für $\omega > \omega_p$$\omega > \omega_p$
- $\gamma = 3.3$$\gamma = 3.3$ (Peak-Enhancement-Faktor, einstellbar von 1.0 bis 10.0)

Pierson-Moskowitz-Spektrum (voll entwickelte See):

$S_{PM}(\omega) = 516 \cdot H_s^2 \cdot \omega_p^4 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-1.25 \cdot \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right)$$S_{PM}(\omega) = 165 \cdot H_s^2 \cdot \omega_p^4 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-1.25 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4\right)$

2.4 Voraussetzungen und Vorbereitung

2.4.1 FreeCAD-Dokument

Das aktive Dokument muss enthalten:

- **Kranobjekte** vom Typ `StowMindCrane` oder `ShipCrane` (optional)
- **LoadCondition-Spreadsheet** mit Kranpositionen und Massen
- **RAO-Dataset** aus vorheriger Capytaine-Analyse

2.4.2 Das LoadCondition-Spreadsheet – Kranabschnitt

Die Tabelle muss einen Abschnitt mit der Überschrift **CRANES** enthalten. Die erwartete Struktur:

Spalte	Inhalt	Einheit	Bedeutung
A	Kranname (z. B. "Kran 1")	—	Identifikation
B	Komponente ("Kranbaum" oder "Last am Haken")	—	Unterscheidung der Komponenten
C	Masse	kg	Masse des Kranbaums oder der Last
D	LCG (x)	m	Longitudinale Position des Schwerpunkts
E	TCG (y)	m	Transversale Position des Schwerpunkts
F	VCG (z)	m	Vertikale Position des Schwerpunkts

Wichtige Hinweise:

- Alle Positionsangaben **in Metern** (nicht mm!)
- Für jeden Kran müssen **beide** Einträge vorhanden sein: "Kranbaum" und "Last am Haken"
- Die Position der "Last am Haken" definiert den **Hakenpunkt** für die Beschleunigungsberechnung
- Der Kranname in Spalte A muss für beide Einträge identisch sein

Beispiel für einen vollständigen Crane-Abschnitt:

A	B	C	D	E	F
CRANES					
Kran 1	Kranbaum	4500	2.5	-1.2	8.0
Kran 1	Last am Haken	12000	4.8	-1.5	12.5
Kran 2	Kranbaum	3800	-3.2	0.8	8.2
Kran 2	Last am Haken	8500	-5.5	1.0	13.0

2.4.3 Kranobjekte im Dokument (optional)

Das System sucht automatisch nach Kranobjekten mit den Proxy-Typen `StowMindCrane` oder `ShipCrane`. Diese Objekte können zusätzliche Eigenschaften enthalten:

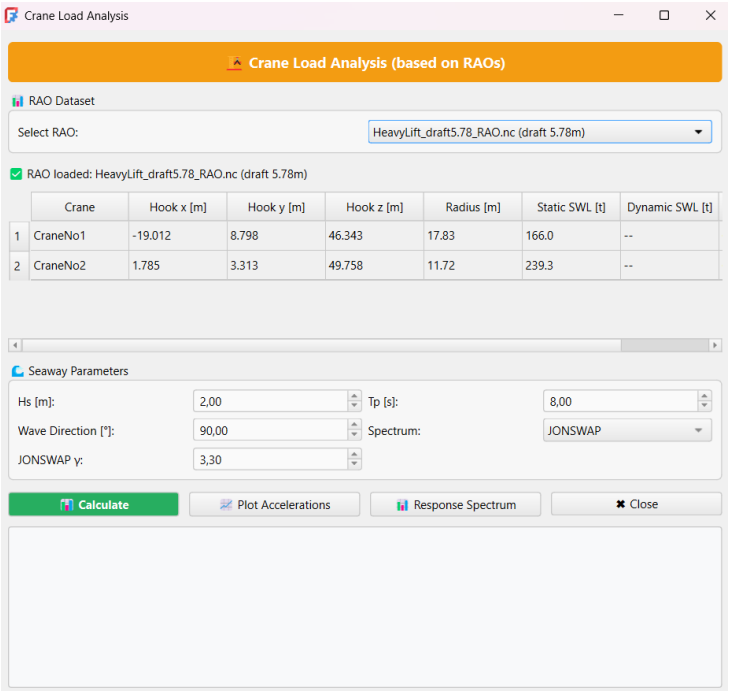
- `CurrentRadius` / `CurrentMaxLoad`: Direkte Vorgabe von Radius und SWL
- `UseLoadStages`: Aktiviert die Verwendung von Laststufen
- `Stage1_Weight`, `Stage1_MinRadius`, `Stage1_MaxRadius`: Laststufen-Definition
- `Auto_MinRadius`, `Auto_MaxRadius`, `Auto_MinWeight`, `Auto_MaxWeight`: Automatische SWL-Kurve

Fallback-Mechanismus: Falls kein Kranobjekt gefunden wird, verwendet das System die Daten aus der LoadCondition.

2.4.4 RAO-Dataset

Das RAO-Dataset muss aus der Capytaine-Analyse stammen und im Projekt-Speicher verfügbar sein. Es muss enthalten:

- **Komplexe RAOs** für alle 6 Freiheitsgrade (oder Real-/Imaginärteile)
- **Frequenzarray** (ωω)
- **Wellenrichtungen** (in Grad)
- **Koordinatensystem** (Referenzpunkt ist der Schwerpunkt)



2.4.5 Verwendung der viskosen RAO

Das Crane-Modul prüft beim Laden des RAO-Datasets automatisch, ob eine viskose RAO vorhanden ist:

- Wenn `RAO_viscous` in der `.nc`-Datei existiert **und** `prefer_viscous_rao = 1` gesetzt ist, wird die viskose RAO verwendet.
- Wenn nur `RAO` (Potential) vorhanden ist, wird diese verwendet (Fallback mit Warnung im Log).

Die Auswahl wird durch eine Checkbox **„Use viscous RAO (if available)"** im TaskPanel gesteuert:

- Beim Laden einer Datei wird die Checkbox automatisch mit dem Flag aus der Datei synchronisiert.
- Manuelles Umschalten ändert das Verhalten für die laufende Sitzung, **nicht** die Datei.
- Wenn die Datei keine viskose RAO enthält, ist die Checkbox ausgegraut.

Was die viskose RAO bewirkt:

- **Roll-bezogene Beschleunigungen** (a_y bei Quersee, a_x/az bei Roll-Anregung) sinken im Resonanzbereich um Faktor 1.5–3.0.
- **Heave-bezogene Beschleunigungen** (a_z bei Kopf-/Hecksee) bleiben praktisch unverändert.
- **Dynamische SWL-Reduktion:** wird realistischer, weil die a_z-Signifikanz nun physikalisch belastbar ist.

2.4.6 Welche Datei ist die richtige?

Im Projektordner können mehrere `.nc`-Dateien liegen (verschiedene Drafts, verschiedene BEM-Läufe). Die Combobox im TaskPanel listet alle auf. **Wichtig:**

- Die Datei mit dem passenden Draft zur aktuellen LoadCondition wählen.
- Bei mehreren Dateien mit gleichem Draft (alte und neue Version): die mit dem neueren `saved_at`-Zeitstempel und den meisten ω-Punkten wählen.
- Die Datei mit `RAO_viscous` ist immer zu bevorzugen, wenn die viskose Dämpfung aktiv sein soll.
- Im Zweifel: Prüfen mit der Konsole — `PS.load_rao(draft_m=...)` und `'RAO_viscous' in ds`.

2.4.7 Einheitenkonventionen

Kritische Einheiten – Das System erwartet ausdrücklich:

Größe	Einheit	Quelle
Positionen (x, y, z)	**Meter**	LoadCondition, Kranobjekte (Placement.Base wird von mm nach m konvertiert)
Massen	kg	LoadCondition, Kranobjekte
SWL	Tonnen	Aus Kranobjekten oder berechnet
Beschleunigungen	m/s²	Berechnet aus RAOs
Frequenzen ωω	rad/s	RAO-Dataset
Seegangsparameter Hs,TpHs,Tp	m, s	Benutzereingabe

Hinweis: FreeCADs Placement.Base ist standardmäßig in Millimetern. Das System konvertiert diese Werte **automatisch** vor jeder Berechnung in Meter.

2.5 Bedienungsanleitung

2.5.1 Öffnen des TaskPanels

Das Crane-TaskPanel wird über die entsprechende Schaltfläche in der FreeCAD-Oberfläche oder über den Projekt-Speicher gestartet. Nach dem Start erscheint ein Fenster mit mehreren Abschnitten:

- **RAO Dataset** – Auswahl des hydrodynamischen Datensatzes
- **Kran-Tabelle** – Auflistung aller gefundenen Kräne mit Positionen und SWL
- **Seaway Parameters** – Eingabe der Seegangsparameter
- **Steuerungsbuttons** – Berechnung, Plots, Schließen
- **Ergebnisausgabe** – Textfeld mit Berechnungsergebnissen

2.5.2 Auswahl des RAO-Datasets

Im oberen Dropdown-Menü werden alle im Projekt-Speicher verfügbaren RAO-Datensätze aufgelistet. Die Einträge enthalten Informationen über:

- **Draft** (Tiefgang) der Analyse
- **Datum/Zeitstempel** der Erstellung
- **Dateiname** des NetCDF

Wichtig: Das ausgewählte RAO-Dataset muss zum aktuellen Schiffszustand (Lastbedingung, Tiefgang) passen. Die Hakenpositionen werden relativ zum Schwerpunkt des Schiffes interpretiert.

2.5.3 Kran-Tabelle

Die Tabelle zeigt alle aus der LoadCondition gelesenen Kräne mit folgenden Informationen:

Spalte	Inhalt	Bedeutung
Crane	Kranname	Identifikation
Hook x [m]	x-Position	Longitudinale Position des Hakens
Hook y [m]	y-Position	Transversale Position des Hakens
Hook z [m]	z-Position	Vertikale Position des Hakens (über Kiel)
Radius [m]	Horizontaler Radius	Abstand vom Kranfuß zum Haken
Static SWL [t]	Statische Tragfähigkeit	Aus Kranobjekt oder berechnet
Dynamic SWL [t]	Dynamische Tragfähigkeit	Nach Berechnung aktualisiert
Source	Datenquelle	"LoadCondition", "Crane object" oder "LoadCondition (fallback)"

Die Tabelle ist **nicht editierbar**; alle Werte werden automatisch aus dem Dokument gelesen.

Tooltip: Bei der statischen SWL wird bei Mausüberlagerung eine detaillierte Information zur Berechnung angezeigt (z. B. verwendete Laststufe oder Interpolationsparameter).

2.5.4 Seegangsparameter

Die Parameter werden in der Gruppe **Seaway Parameters** eingestellt:

Parameter	Standardwert	Bereich	Bedeutung
Hs [m]	2.0	0.1 – 20.0	Signifikante Wellenhöhe
Tp [s]	8.0	2.0 – 30.0	Spitzenperiode des Seegangsspektrums
Wave Direction [°]	90	0 – 360	Wellenrichtung (relativ zum Schiff)
Spectrum	JONSWAP	JONSWAP / Pierson-Moskowitz	Spektrumstyp
JONSWAP γ	3.3	1.0 – 10.0	Peak-Enhancement-Faktor (nur JONSWAP)

Richtlinien für die Parameterwahl:

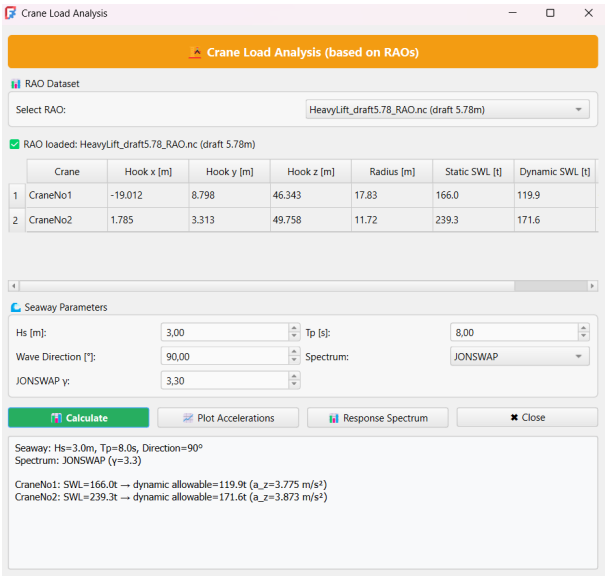
- **Hs:** Typische Werte für Nordsee: 2–4 m; für küstennahe Gewässer: 1–2 m
- **Tp:** Abhängig von Hs; typisch 5–12 s; kurze Perioden bei Windsee, lange bei Dünung
- **Wave Direction:** 0° = von achtern, 90° = von Steuerbord, 180° = von vorn
- **JONSWAP γ:** 3.3 für Nordsee; 1.0 für voll entwickelte See (PM-Äquivalent); höhere Werte für schärfere Peaks

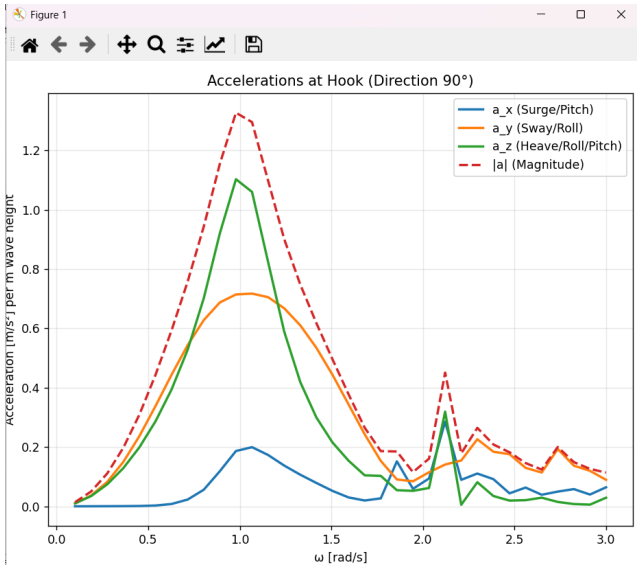
2.5.5 Berechnung starten

Nach Klick auf 📊 **Calculate** durchläuft das System folgende Schritte:

1. **Prüfung:** RAO-Dataset geladen? Keine Fehler?
2. **Für jeden Kran in der Tabelle:**
    - Extraktion der Hakenposition
    - Berechnung der Beschleunigungen mit `compute_hook_accelerations()`
    - Spektrale Antwort mit `compute_spectral_response()`
    - Dynamische SWL-Reduktion mit `crane_load_reduction()`
3. **Aktualisierung der Tabelle:** Spalte "Dynamic SWL" wird gefüllt
4. **Ergebnisausgabe:** Textfeld zeigt Zusammenfassung aller Berechnungen

Die Berechnung verwendet die **signifikante Vertikalbeschleunigung** az,sigaz,sig zur Bestimmung der dynamischen Tragfähigkeit. Die resultierende Beschleunigung ∣a∣sig∣a∣sig wird ebenfalls berechnet und im Textfeld ausgegeben.





2.5.6 Plot-Funktionen

Das Panel bietet drei Plot-Funktionen:

📈 Plot Accelerations

- Zeigt die Beschleunigungsamplituden ax,ay,az,∣a∣ax,ay,az,∣a∣ über der Frequenz
- Darstellung als Linienplot
- Nützlich zur Identifikation von Resonanzfrequenzen

📊 Response Spectrum

- Zeigt das Antwortspektrum SazSaz (vertikale Beschleunigung)
- Überlagerung mit dem Seegangsspektrum (skaliert)
- Zeigt die signifikanten Beschleunigungen als Text im Plot
- Ermöglicht die visuelle Bewertung der spektralen Energieverteilung

Beide Plots werden in separaten Fenstern angezeigt und können über die Matplotlib-Oberfläche interaktiv bearbeitet werden (Zoom, Pan, Speichern).

2.5.7 Ergebnisauswertung

Nach der Berechnung wird das Textfeld im unteren Bereich des Panels mit einer Zusammenfassung gefüllt:

text

```
Seaway: Hs=2.0m, Tp=8.0s, Direction=90°
Spectrum: JONSWAP (γ=3.3)

Kran 1: SWL=12.0t → dynamic allowable=9.8t (a_z=2.45 m/s²)
Kran 2: SWL=8.5t → dynamic allowable=6.9t (a_z=2.51 m/s²)
```

Die Werte können für die Erstellung von Betriebsgrenzendiagrammen oder Lastbegrenzungsplänen verwendet werden.

2.6 Ergebnisse und Interpretation

2.6.1 Beschleunigungsamplituden

Die Funktion `compute_hook_accelerations()` liefert für jede Frequenz und Wellenrichtung:

Größe	Einheit	Bedeutung
axax	m/s² pro m Wellenhöhe	Beschleunigung in x-Richtung (Surge/Pitch/Yaw)
ayay	m/s² pro m Wellenhöhe	Beschleunigung in y-Richtung (Sway/Roll/Yaw)
azaz	m/s² pro m Wellenhöhe	Beschleunigung in z-Richtung (Heave/Roll/Pitch)
(	\mathbf{a}	) m/s² pro m Wellenhöhe Resultierende Beschleunigungsamplitude

Die Amplituden sind **linear** in der Wellenhöhe; d.h. bei Hs=2 mHs=2m verdoppeln sich die Beschleunigungen gegenüber Hs=1 mHs=1m.

2.6.2 Signifikante Beschleunigungen

Die signifikanten Beschleunigungen sind **direkt** vergleichbar mit der Erdbeschleunigung g=9.81 m/s2g=9.81m/s2:

Wert	Interpretation
asig<0.5 m/s2asig<0.5m/s2	Geringe dynamische Belastung (< 5 % von g)
0.5<asig<2.0 m/s20.5<asig <2.0m/s2	Moderate Belastung (5–20 % von g)
2.0<asig<5.0 m/s22.0<asig <5.0m/s2	Hohe Belastung (20–50 % von g)
asig>5.0 m/s2asig>5.0m/s2	Sehr hohe Belastung (> 50 % von g) – Einschränkungen erforderlich

Praxisempfehlung: Hebeoperationen sollten in der Regel bei az,sig<2.0 m/s2az,sig<2.0m/s2 durchgeführt werden. Bei höheren Werten ist eine dynamische Analyse der Lasthalterung und Anschlagmittel erforderlich.

2.6.3 Dynamische Tragfähigkeit

Die dynamische Tragfähigkeit hängt von der statischen SWL und der Vertikalbeschleunigung ab:

SWLdyn=SWLstat · gg+az,sigSWLdyn=SWLstat · g+az,sigg

Beispiele für typische Reduktionen:

az,sigaz,sig [m/s²]	Reduktionsfaktor	Reduktion bei 10 t SWL
1.0	0.907	9.07 t (–9.3 %)
2.0	0.831	8.31 t (–16.9 %)
3.0	0.766	7.66 t (–23.4 %)
5.0	0.662	6.62 t (–33.8 %)

2.6.4 Einfluss der Hakenposition

Die Beschleunigungen am Hakenpunkt sind stark von dessen Position relativ zum Schwerpunkt abhängig:

- **Hebelarmeffekte:** Große horizontale Abstände (x, y) führen zu höheren Beschleunigungen durch Roll- und Pitch-Bewegungen
- **Vertikale Position:** Ein hoher Hakenpunkt (großes z) verstärkt die Beschleunigungen durch Pitch und Roll

- **Kranpositionierung:** Kräne in der Nähe des Schwerpunkts (kleine x, y) erfahren geringere Beschleunigungen

Optimierungsempfehlung: Bei der Planung von Hebeoperationen sollten möglichst Kräne in zentrumsnahen Positionen verwendet werden.

2.7 Fehlerbehebung und Qualitätssicherung

2.7.1 Häufige Fehler und Lösungen

Symptom	Ursache	Lösung
"No LoadCondition spreadsheet found"	Spreadsheet nicht vorhanden oder falscher Name	Spreadsheet mit Namen "LoadCondition" erstellen
"No CRANES section found"	Abschnitt fehlt oder falsch geschrieben	Abschnitt mit **CRANES** in Spalte A einfügen
"No crane hook positions found"	Fehlende Einträge "Last am Haken"	Für jeden Kran beide Komponenten eintragen
SWL = 0.0	Kein Kranobjekt, keine Laststufen	Kranobjekt im Dokument erstellen oder SWL direkt in LoadCondition
"No RAO dataset loaded"	Kein RAO im Projekt-Speicher	Zuerst Capytaine-Analyse durchführen
Negative oder unplausible Beschleunigungen	Falsche Einheiten (mm statt m)	Positionen auf Meter prüfen
Plots erscheinen nicht	Matplotlib-Backend-Problem	Backend automatisch umgeschaltet; ggf. tkagg manuell setzen

2.7.2 Plausibilitätsprüfungen

Das System führt während der Berechnung folgende Checks durch:

- **Einheitenkonvertierung:** Placement.Base wird von mm nach m konvertiert
- **RAO-Integrität:** Prüfung auf Vorhandensein von 'RAO' oder 'RAO_real'/'RAO_imag'
- **Frequenzbereich:** Filterung unrealistisch niedriger Frequenzen (< 0.1 rad/s)
- **SWL-Plausibilität:** Keine negativen oder extrem hohen Werte

2.7.3 Debug-Modus

Das Modul enthält einen Debug-Modus, der durch Setzen von `DEBUG_CRANE = True` in `CraneAnalysis.py` aktiviert wird:

python

```
DEBUG_CRANE = True  # Aktiviert Debug-Ausgaben
```

Im Debug-Modus werden folgende Informationen ausgegeben:

- **Hakenpositionen** in Metern
- **Zwischenergebnisse** der Beschleunigungsberechnung
- **Verwendete Laststufen** bei der SWL-Bestimmung

Die Debug-Ausgaben erscheinen im FreeCAD-Report-View.

2.7.4 Hinweise zur Ergebnisqualität

- Die Genauigkeit der Beschleunigungen hängt von der Qualität der RAOs ab (Mesh-Auflösung, Frequenz- und Richtungsdiskretisierung)
- Die Spektralintegration erfordert eine ausreichende Frequenzauflösung (mindestens 30 Stützstellen im relevanten Bereich)
- Die Annahme linearer Wellen (kleine Amplituden) ist bei Hs>5 mHs>5m nicht mehr uneingeschränkt gültig
- Die Berechnung berücksichtigt keine nichtlinearen Effekte wie Schlagseite oder dynamische Trimmlagen

---

2.8 Anhang: Technische Referenz

2.8.1 Wichtige Funktionen in CraneAnalysis.py

Funktion	Parameter	Rückgabe	Beschreibung
`read_crane_data_from_loadcondition(doc)`	FreeCAD-Dokument	Liste mit Kran-Daten oder Fehlermeldung	Liest Kranpositionen und Massen aus LoadCondition
`find_crane_objects(doc)`	FreeCAD-Dokument	Liste von Kranobjekten	Findet StowMindCrane/ShipCrane im Dokument
`get_crane_static_swl(crane_obj, hook_pos_m)`	Kranobjekt, Hakenposition in m	SWL in t, Beschreibung	Berechnet statische SWL aus Laststufen oder Auto-Kurve
`compute_hook_accelerations(dataset, hook_pos_m, wave_direction_deg)`	RAO-Dataset, Position, Richtung	Dictionary mit Beschleunigungen	Berechnet komplexe Überlagerung der RAOs
`compute_spectral_response(dataset, hook_pos_m, Hs, Tp, ...)`	RAO, Position, Seegangsparameter	Dictionary mit Spektralergebnissen	Führt spektrale Antwortanalyse durch
`crane_load_reduction(stat_load_tonnes, accel_z_significant)`	Statische Last, Beschleunigung	Dictionary mit Reduktionsfaktoren	Berechnet dynamische Tragfähigkeit

2.8.2 Datenstrukturen

Kran-Daten (aus LoadCondition):

python

```
{
    'name': 'Kran 1',           # Kranname
    'hook_pos_m': (4.8, -1.5, 12.5),  # Hakenposition in Metern
    'boom_pos_m': (2.5, -1.2, 8.0),   # Kranbaumposition in Metern
    'hook_mass_kg': 12000.0,     # Masse der Last in kg
    'boom_mass_kg': 4500.0       # Masse des Kranbaums in kg
}
```

Beschleunigungsergebnisse:

python

```
{
    'omega': array([...]),       # Frequenzarray in rad/s
    'a_x': array([...]),         # Beschleunigung x in m/s² pro m
    'a_y': array([...]),         # Beschleunigung y in m/s² pro m
    'a_z': array([...]),         # Beschleunigung z in m/s² pro m
    'a_abs': array([...]),       # Resultierende Beschleunigung
    'wave_direction_deg': 90.0,  # Wellenrichtung in Grad
    'hook_pos': (4.8, -1.5, 12.5) # Hakenposition in Metern
}
```

Spektrale Antwort:

python

```
{
    'a_z_significant': 2.45,     # Signifikante vertikale Beschleunigung in m/s²
    'a_abs_significant': 3.12,   # Signifikante resultierende Beschleunigung in
m/s²
    'omega': array([...]),       # Frequenzarray
    'S': array([...]),           # Seegangsspektrum
    'S_a_z': array([...]),       # Antwortspektrum (vertikal)
    'S_a_abs': array([...]),     # Antwortspektrum (resultierend)
    'a_z': array([...]),         # Vertikale Übertragungsfunktion
    'a_abs': array([...]),       # Resultierende Übertragungsfunktion
```

```
    'wave_direction_deg': 90.0,
    'Hs': 2.0,
    'Tp': 8.0,
    'spectrum': 'JONSWAP (γ=3.3)',
    'gamma': 3.3
}
```

2.8.3 Abhängigkeiten

Modul/Bibliothek	Verwendung	Bemerkung
FreeCAD	CAD-Datenzugriff	Placement, Dokumentenobjekte
numpy	Numerische Berechnungen	Arrays, trigonometrische Funktionen
matplotlib	Plots	Optional; bei Fehlen keine grafische Ausgabe
xarray	RAO-Datenzugriff	Aus Capytaine-Ergebnissen
PySide2/PySide6	GUI	Qt-Bindungen für FreeCAD

Kapitel 3: Mooring-Analyse (Mooring Analysis)

3.1 Zweck und Anwendungsbereich

Das Mooring-Analyse-Modul dient der statischen und dynamischen Bewertung von Vertäusystemen für schwimmende Strukturen. Es berechnet auf Basis der hydrodynamischen Analyse (RAOs) die resultierenden Leinenkräfte und Ankerkräfte unter Einwirkung von Wind, Strom und Seegang. Die Analyse liefert:

- **Statische Gleichgewichtsberechnung** mit 3 Freiheitsgraden (Surge, Sway, Yaw) für Mooring-Leinen und Ankerketten
- **Spektrale Antwortanalyse** der Leinenkräfte unter Seegangseinfluss
- **Zeitbereichssimulation** für transienten Leinenzug und Driftbewegungen
- **Systematische Richtungsvariation** zur Identifikation kritischer Belastungsfälle
- **Ausfallsimulation** (Damaged Condition) für den Verlust einzelner Leinen
- **Teilsicherheitsbewerte** nach DNV/ISO für den Festigkeitsnachweis
- **Interaktiver Mooring-Editor** zur visuellen Platzierung von Fairleads und Pollern
- **PDF-Report-Export** mit Tabellen und Grafiken

Anwendungsfälle sind die Auslegung von Vertäusystemen für Schiffe und Offshore-Strukturen, die Bewertung von Betriebsgrenzen, die Erstellung von Belastungsplänen sowie die Zertifizierung von Mooring-Designs nach Klassifikationsvorschriften.

3.2 Systemarchitektur und Modulübersicht

Das System besteht aus drei Hauptmodulen, die den kompletten Workflow von der Geometrieerstellung bis zur Ergebnisdokumentation abdecken:

Modul	Aufgabe	Laufumgebung
MooringAnalysis.py	Kernberechnungen: Katenarmodell, 3-DOF Gleichgewicht, Spektralanalyse, Zeitbereich, PDF-Export	FreeCAD-Pythonumgebung, unabhängig nutzbar
MooringTaskPanel.py	Grafische Bedienoberfläche (GUI) für Analyseparameter, Ergebnisdarstellung, Plot-Funktionen	FreeCAD-GUI
MooringEditor.py	Interaktiver Editor zur visuellen Platzierung von Fairleads und Pollern, automatische Leinenerzeugung mit Materialparametern	FreeCAD-GUI

Der Datenfluss verläuft wie folgt:

1. **FreeCAD-Dokument** mit Schiffsgeometrie und Lastdaten

2. **MooringEditor** – visuelle Platzierung der Fairleads (am Schiff) und Poller (am Kai)
3. **Export der Mooring-Daten** in die MooringData-Spreadsheet
4. **RAO-Dataset-Auswahl** aus dem Projekt-Speicher (Capytaine-Ergebnisse)
5. **Lesen der Umgebungsdaten** aus LoadCondition (projizierte Flächen für Wind und Strom)
6. **Statische Gleichgewichtsberechnung** (Newton-Raphson mit 3 DOF)
7. **Spektrale Antwortanalyse** oder Zeitbereichssimulation
8. **Darstellung im TaskPanel** als Tabelle, Textausgabe und interaktive Plots
9. **PDF-Report-Export** für Dokumentationszwecke

3.3 Physikalische Grundlagen

3.3.1 Statisches Gleichgewicht mit 3 Freiheitsgraden

Das System betrachtet das Schiff als starren Körper mit den Bewegungsfreiheitsgraden:

- **Surge** (XX): Translation in Längsrichtung
- **Sway** (YY): Translation in Querrichtung
- **Yaw** (ψψ): Drehung um die Hochachse

Die Gleichgewichtsbedingung lautet:

Fmooring(q)+Fenv=0Fmooring(q)+Fenv=0

mit dem Zustandsvektor q=(X,Y,ψ)Tq=(X,Y,ψ)T.

Die Mooring-Kräfte setzen sich zusammen aus:

- **Leinenkräften** (elastische Federn mit Vorspannung)
- **Ankerkräften** (Katenarmodell mit Bodenkontakt)

Die Lösung erfolgt mit einem **Newton-Raphson-Verfahren**, das mit Skalierung und Dämpfung arbeitet, um numerische Instabilitäten zu vermeiden.

3.3.2 Leinenkraft-Modell

Jede Mooring-Leine wird als lineare Feder mit Vorspannung modelliert:

T=max(0, T0+k⋅(L−L0))T=max(0,T0+k⋅(L−L0))

Dabei ist:

- T0T0: Vorspannung [kN]
- kk: Leinensteifigkeit [kN/m]
- L0L0: Ursprüngliche Länge [m]
- LL: Aktuelle Länge [m]

Die Leinensteifigkeit ergibt sich aus dem E-Modul, dem Durchmesser und der Länge:

$$k = E \cdot A L0 k = L0E \cdot A$$

mit:

- EE: E-Modul [Pa]
- $A = \pi \cdot (d/2)2 A = \pi \cdot (d/2)2$: Querschnittsfläche [m²]

Die Kraftkomponenten am Fairlead werden aus der Richtung der Leine und der Zugkraft berechnet. Das Moment um den Referenzpunkt ergibt sich aus:

$$Mz = x \cdot Fy - y \cdot Fx Mz = x \cdot Fy - y \cdot Fx$$

3.3.3 Katenar-Modell für Ankerketten

Das Katenar-Modell beschreibt die Form einer schweren Kette unter Eigengewicht. Die **horizontale Distanz** XX als Funktion der horizontalen Spannung THTH ist:

$$X = a \cdot \text{asinh}(Sa) X = a \cdot \text{asinh}(aS)$$

mit:

- $a = TH/w a = TH/w$: Katenar-Parameter
- ww: Gewicht der Kette pro Meter unter Wasser [kN/m]
- SS: Freihängende Kettenlänge (Scope)

Die **Scope-Faktor** ist definiert als:

$$\text{Scope} = \text{LKette} d \text{Scope} = dLKette$$

wobei dd die Wassertiefe ist. Typische Werte:

- **3.0**: Offshore (Standard)
- **4.0–5.0**: Flachwasser
- **1.5–2.0**: Hafen (begrenzter Platz)

Bodenkontakt (Grounding): Wenn die horizontale Distanz XX kleiner ist als die maximale Reichweite, liegt ein Teil der Kette am Boden:

$$\text{LBoden} = \text{LKette} - \text{Sfrei} \text{LBoden} = \text{LKette} - \text{Sfrei} \text{Sfrei} = d2 + 2 \cdot a \cdot d \text{Sfrei} = d2 + 2 \cdot a \cdot d$$

Bei komplett liegender Kette ($X \leq L_{Boden}$) ist die horizontale Spannung $T_H = 0$ (Slack).

Holding Capacity: Die maximale horizontale Kraft, die der Anker im Boden aufnehmen kann (abhängig von Bodentyp, Ankergröße und Einbettung). Überschreitet die Kettenkraft die Holding Capacity, wird sie begrenzt.

3.3.4 Umweltkräfte

Die Umgebungskräfte setzen sich aus Wind und Strom zusammen. Beide werden aus den **projizierten Flächen** (aus ProjectedAreas.py) und den Geschwindigkeiten berechnet:

Windkraft:

$$F_{Wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Luft} \cdot v_{Wind}^2 \cdot c_f \cdot A_{proj}$$

Stromkraft:

$$F_{Strom} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Wasser} \cdot v_{Strom}^2 \cdot c_d \cdot A_{proj}$$

Die **projizierte Fläche** in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β:

$$A_{proj}(\beta) = A_{longitudinal} \cdot |\cos\beta| + A_{lateral} \cdot |\sin\beta|$$

Konventionen (FROM/TO):

- **FROM**: Die Richtungsangabe gibt an, aus welcher Richtung der Wind/die Strömung kommt (industrieller Standard)
- **TO**: Die Richtungsangabe gibt an, wohin der Wind/die Strömung weist/fließt (mathematische Konvention)

Heuristische Wellen-Drift: Das Modul bietet eine vereinfachte Abschätzung der mittleren Wellen-Driftkraft:

$$F_{Drift} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot B \cdot \int (|RAO_{Surge}|^2 + |RAO_{Sway}|^2) \cdot S(\omega)\, d\omega$$

Dies ist eine **Heuristik** (keine QTF-basierte Berechnung) und dient nur für erste Abschätzungen.

3.3.5 Spektrale Antwort

Die spektrale Antwort der Leinenkräfte wird durch die Übertragungsfunktion $H_T(\omega)$ beschrieben:

$$S_T(\omega) = S_{\zeta\zeta}(\omega) \cdot |H_T(\omega)|^2$$

Die signifikante Leinenkraft ergibt sich aus:

$$T_{sig} = 4 \cdot \int_0^\infty S_T(\omega)\, d\omega$$

Die maximale Leinenkraft (4σ-Wert) ist:

$T_{4\sigma} = \bar{T} + T_{sig}$T4σ=T¯+TsigT4σ=T+Tsig

3.3.6 Sicherheitsfaktoren nach DNV/ISO

Die **design-relevante Leinenkraft** wird aus der mittleren Kraft und der dynamischen Komponente mit Teilsicherheitsbeiwerten berechnet:

$T_{Design} = T_{mean} \cdot \gamma_{pret} + T_{4\sigma} \cdot \gamma_{env}$TDesign=Tmean⋅γpret+T4σ⋅γenv

Der **Nutzungsgrad** (Utilization) ergibt sich aus:

$Utilization = \frac{T_{Design}}{MBL / SC}$Utilization=MBL/SCTDesign

mit:

- MBL: Mindestbruchlast (Minimum Breaking Load)
- SC: Sicherheitsfaktor (Safety Factor)

Typische Werte:

- $\gamma_{pret} = 1.0$γpret=1.0 (für Vorspannung)
- $\gamma_{env} = 1.3$γenv=1.3 (für Umgebungslasten)
- $SC = 1.67$SC=1.67 (für dynamische Analyse)

3.4 Voraussetzungen und Vorbereitung

3.4.1 FreeCAD-Dokument

Das aktive Dokument muss enthalten:

- **Schiffsmodell** als Solid, Shell oder importiertes Mesh-Objekt
- **LoadCondition-Spreadsheet** mit Schiffsdaten und projizierten Flächen (optional, aber empfohlen)
- **MooringData-Spreadsheet** mit Leinenparametern (wird automatisch erstellt oder vom Editor befüllt)
- **RAO-Dataset** aus vorheriger Capytaine-Analyse

3.4.2 Die MooringData-Spreadsheet – LINES-Abschnitt

Die Tabelle muss einen Abschnitt mit der Überschrift **LINES** enthalten. Die erwartete Struktur:

Spalte	Inhalt	Einheit	Bedeutung
A	Name	—	Identifikation der Leine

Spalte	Inhalt	Einheit	Bedeutung
B	Fairlead x	m	Position des Fairleads (am Schiff)
C	Fairlead y	m	Position des Fairleads
D	Fairlead z	m	Position des Fairleads
E	Poller x	m	Position des Pollers (am Kai)
F	Poller y	m	Position des Pollers
G	Poller z	m	Position des Pollers
H	Stiffness	kN/m	Leinensteifigkeit (wird automatisch berechnet)
I	Pretension	kN	Vorspannung
J	Breaking load	kN	Bruchlast

Optional – WIND/CURRENT/SHIP-Abschnitte für Umgebungsdaten:

Abschnitt	Spalten	Inhalt
WIND	B: area_SB, C: area_PS, D: area_FWD, E: area_AFT, F: form_factor, G: height_above_wl	Projizierte Windflächen
CURRENT	B: area_SB, C: area_PS, D: area_FWD, E: area_AFT, F: drag_coeff, G: depth_below_wl	Projizierte Stromflächen
SHIP	B: beam, C: draft, D: lpp	Schiffsabmessungen

3.4.3 LoadCondition-Spreadsheet (für Umgebungsdaten)

Das Modul verwendet die projizierten Flächen aus der LoadCondition (erzeugt von ProjectedAreas.py). Die relevanten Zellen:

Zelle	Parameter	Einheit	Bedeutung
B7	Wind lateral area	m²	Projizierte Seitenfläche für Wind
E7	Wind CoG x	m	Longitudinale Lage des Windangriffspunkts
G7	Wind CoG z	m	Vertikale Lage des Windangriffspunkts
B8	Wind frontal area	m²	Projizierte Bug-/Heckfläche für Wind
B9	Current lateral area	m²	Projizierte Seitenfläche für Strom
E9	Current CoG x	m	Longitudinale Lage des Stromangriffspunkts
G9	Current CoG z	m	Vertikale Lage des Stromangriffspunkts
B10	Current frontal area	m²	Projizierte Bug-/Heckfläche für Strom
C4	Beam	m	Schiffsbreite
D4	LPP	m	Länge zwischen den Loten
E4	Draft	mm	Tiefgang (in mm!)

3.4.4 Einheitenkonventionen

Größe	Einheit	Hinweis
Positionen (x, y, z)	**Meter**	Alle Positionsangaben in der MooringData
Kräfte	**kN**	Leinenkräfte, Umweltkräfte
Steifigkeiten	**kN/m**	Leinensteifigkeit
Geschwindigkeiten	**m/s**	Wind und Strom

Größe	Einheit	Hinweis
Wassertiefe	**m**	Für Katenarmodell
Frequenzen	**rad/s**	Aus RAO-Dataset

Wichtig: Die LoadCondition enthält den Draft in **mm** – das System konvertiert automatisch.

3.4.5 Verwendung der viskosen RAO

Wie in der Crane Analysis prüft das Mooring-Modul automatisch, ob eine viskose RAO vorhanden ist. Die Checkbox **„Use viscous RAO (if available)"** synchronisiert sich beim Laden mit dem Flag in der Datei.

Auswirkung auf Mooring-Ergebnisse:

- Die Leinenkräfte werden über die Bewegungen des Fairleads berechnet, die aus den 6-DOF-RAOs stammen. Da die viskose Dämpfung die Roll-Amplitude reduziert, sinken die **Roll-induzierten Leinenkräfte** (typischerweise bei Quersee 90°/270°) um 10–30 %.
- Die **Surge/Sway/Yaw-dominierten Leinenkräfte** bleiben praktisch unverändert.
- Die **statische Gleichgewichtslage** wird nicht von der RAO beeinflusst (sie hängt von Umgebungskräften und Leinensteifigkeit ab).
- Die **spektrale Antwort** (`T_sig`) wird realistischer, weil die Roll-Bewegung nicht mehr überschätzt wird.

Für Operability- und Bemessungsanalysen ist die viskose RAO die richtige Grundlage. Die Potential-RAO kann für Vergleichsrechnungen dienen, ist aber für die Bemessung zu konservativ.

3.5 Bedienungsanleitung

3.5.1 Der MooringEditor – Visuelle Erstellung der Mooring-Konfiguration

Der MooringEditor ist ein interaktives Werkzeug zur visuellen Platzierung von Fairleads und Pollern sowie zur Erstellung von Mooring-Leinen.

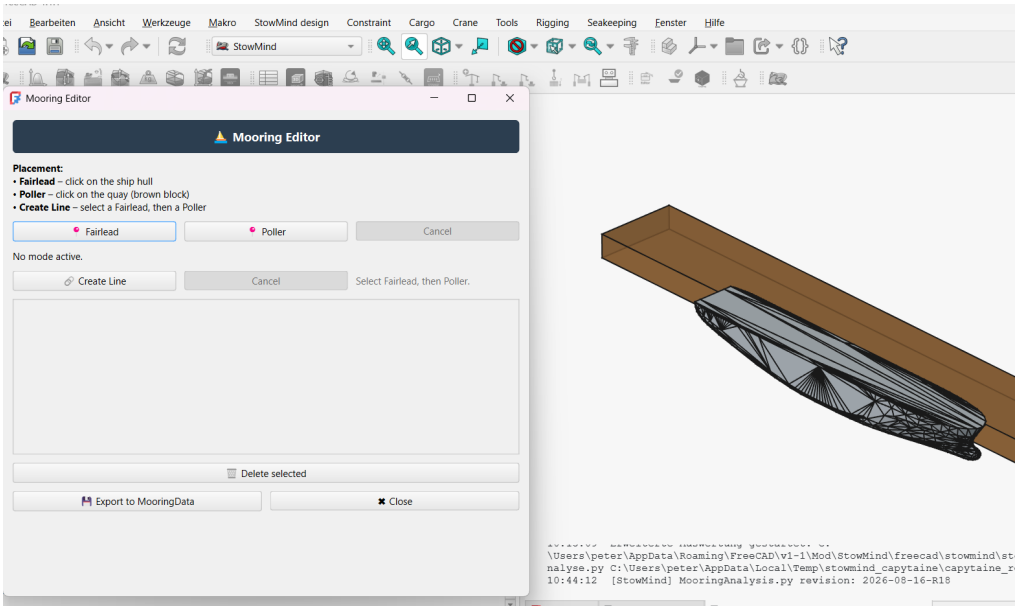
Öffnen des Editors:

Der Editor wird über den entsprechenden Menüpunkt oder Befehl gestartet:

python

```
from StowMind import MooringEditor as ME
ME.start_mooring_editor()
```

Ablauf im Editor:



1. **Automatische Erstellung eines Arbeitsdokuments:**
   - Das aktuelle Schiffsmodell wird in ein neues Dokument kopiert
   - Ein Kai-Block (brauner Quader) wird automatisch generiert
   - Die Position des Kais wird aus der Schiffsbreite und dem Tiefgang berechnet
2. **Platzieren von Fairleads (am Schiff):**
   - Klicken Sie auf 📍 **Fairlead**
   - Klicken Sie auf eine Stelle am Schiffsrumpf (3D-Ansicht)
   - Geben Sie die Bruchlast (Breaking Load) in kN ein
3. **Platzieren von Pollern (am Kai):**
   - Klicken Sie auf 📍 **Poller**
   - Klicken Sie auf eine Stelle am Kai-Block

- Geben Sie die Bruchlast (Breaking Load) in kN ein

4. **Erstellen von Mooring-Leinen:**
    - Klicken Sie auf 🔗 **Create Line**
    - Wählen Sie zuerst einen Fairlead (roter Punkt) aus
    - Wählen Sie dann einen Poller (orangefarbener Punkt) aus
    - Im Dialog: Wählen Sie Material, Durchmesser, Vorspannung und Bruchlast
5. **Verwaltung der Objekte:**
    - Die Liste zeigt alle Punkte und Leinen mit Parametern
    - Mit 🗑️ **Delete selected** können Sie Objekte löschen
    - Mit 💾 **Export to MooringData** werden die Daten in die Spreadsheet exportiert

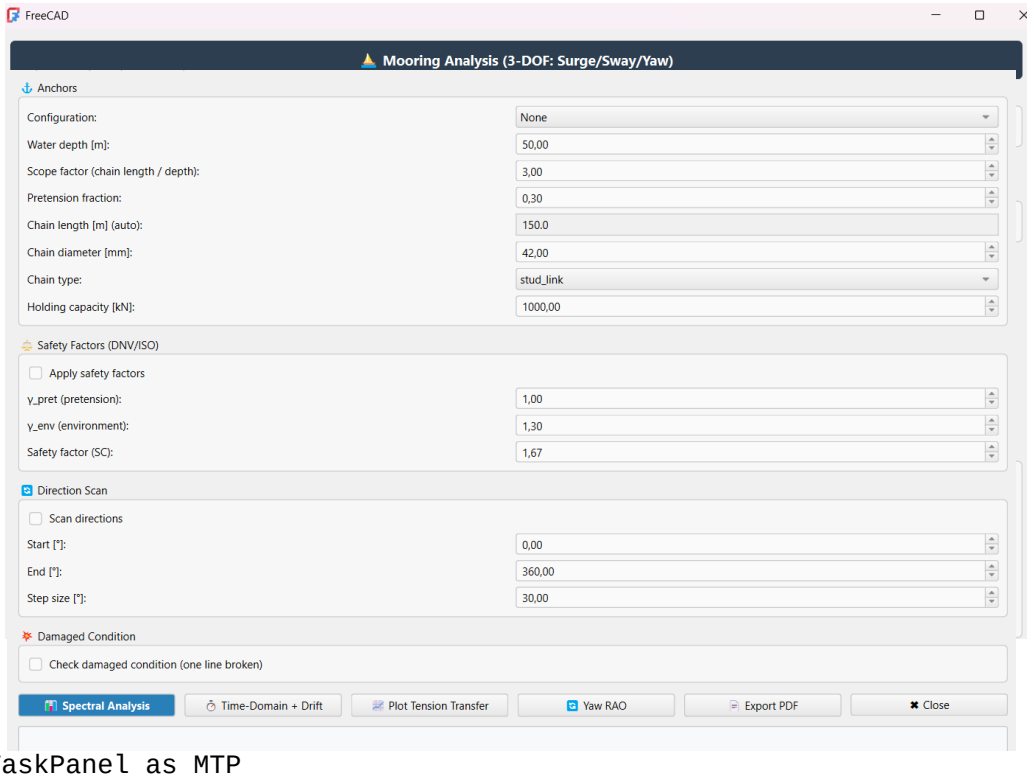
Materialbibliothek:

Material	E-Modul [GPa]	Dichte [kg/m³]	Standard-Durchmesser [mm]
Wire Rope	120	7850	36
Chain	200	7850	42
Synthetic (HMPE)	45	970	60

Tipp: Die Steifigkeit $k = E \cdot A / L$ wird automatisch aus E-Modul, Durchmesser und Leinenlänge berechnet.

3.5.2 Öffnen des MooringTaskPanels

Das Mooring-TaskPanel wird über die entsprechende Schaltfläche in der FreeCAD-Oberfläche oder über den Projekt-Speicher gestartet.



python

```
from StowMind import MooringTaskPanel as MTP

MTP.createTask(dataset, output_dir)
```

Nach dem Start erscheint ein Fenster mit folgenden Abschnitten:

- **RAO Dataset** – Auswahl des hydrodynamischen Datensatzes
- **Analysis Mode** – Auswahl zwischen Leinen, Ankern oder beidem
- **Mooring Lines Tabelle** – Übersicht der geladenen Leinen
- **Seaway & Environment** – Seegangsparameter, Wind, Strom
- **Anchors** – Konfiguration von Ankerketten
- **Safety Factors** – DNV/ISO Teilsicherheitsbeiwerte
- **Direction Scan** – Systematische Richtungsvariation
- **Damaged Condition** – Ausfallsimulation
- **Buttons** – Berechnung, Plots, PDF-Export
- **Ergebnisausgabe** – Textfeld mit Berechnungsergebnissen

3.5.3 Auswahl des RAO-Datasets

Im oberen Dropdown-Menü werden alle im Projekt-Speicher verfügbaren RAO-Datensätze aufgelistet. Die Einträge enthalten Informationen über:

- **Draft** (Tiefgang) der Analyse
- **Datum/Zeitstempel** der Erstellung
- **Dateiname** des NetCDF

Wichtig: Das ausgewählte RAO-Dataset muss zum aktuellen Schiffszustand passen.

3.5.4 Auswahl des Analysemodus

Modus	Beschreibung	Anwendung
Mooring Lines	Nur konventionelle Leinen	Vertäusysteme mit Pollern am Kai
Anchors only	Nur Ankerketten	Verankerung auf See
Both	Leinen und Anker kombiniert	Hafenanlagen mit zusätzlicher Verankerung

3.5.5 Seegangsparameter und Umgebung

Parameter	Standardwert	Bereich	Bedeutung
Hs [m]	1.5	0.1 – 20.0	Signifikante Wellenhöhe
Tp [s]	7.0	2.0 – 30.0	Spitzenperiode
Wave Dir [°]	90	0 – 360	Wellenrichtung
Spectrum	JONSWAP	JONSWAP / PM	Spektrumstyp
Wind speed [m/s]	0	0 – 60	Windgeschwindigkeit
Wind Dir [°]	90	0 – 360	Windrichtung
Current speed [m/s]	0	0 – 10	Strömungsgeschwindigkeit
Current Dir [°]	90	0 – 360	Strömungsrichtung
Convention	FROM	FROM / TO	Richtungskonvention

Wind- und Stromkonventionen:

- **FROM** (industrieller Standard): 90° = Wind/Strom kommt von Steuerbord
- **TO** (mathematisch): 90° = Wind/Strom weist nach Steuerbord

Heuristische Drift:
Die Option **"Include wave drift in equilibrium"** aktiviert die vereinfachte Abschätzung der mittleren Wellen-Driftkraft. Diese wird zur statischen Gleichgewichtsberechnung hinzugefügt.

> ⚠ **Hinweis:** Dies ist eine Heuristik, keine QTF-basierte Berechnung. Für finale Auslegungen ist eine detaillierte Driftanalyse erforderlich!

3.5.6 Konfiguration von Ankerketten

Die Anker-Konfiguration bietet folgende Optionen:

Parameter	Standardwert	Bedeutung
Configuration	None / 1 Anchor / 4 Anchors	Ankeranordnung
Water depth [m]	50	Wassertiefe
Scope factor	3.0	Kettenlänge / Wassertiefe
Pretension fraction	0.3	Vorspannungsfaktor (0.3 = 30% der maximalen Reichweite)
Chain diameter [mm]	42	Ketten-Durchmesser
Chain type	stud_link	Kettenart (stud_link / open_link)
Holding capacity [kN]	1000	Maximale Haltekraft des Ankers

Ankerpositionierung:

Die Anker werden so positioniert, dass bei Nullauslenkung eine definierte Vorspannung (Slack) vorliegt. Die horizontale Distanz vom Fairlead zum Anker ergibt sich aus:

$$XAnker = Xmax \cdot fpret$$

mit:

- $Xmax$: Maximale horizontale Reichweite der Kette
- $fpret$: Vorspannungsfaktor (typisch 0.2–0.5)

Bei $fpret = 1.0$ ist die Kette am Anschlag (kein Slack) – dieser Zustand ist fehlerhaft und sollte vermieden werden.

3.5.7 Sicherheitsfaktoren (DNV/ISO)

Die Sicherheitsfaktoren können optional auf die spektralen Ergebnisse angewendet werden:

Faktor	Standardwert	Bedeutung
γ_pret	1.0	Teilsicherheitsbeiwert für Vorspannung
γ_env	1.3	Teilsicherheitsbeiwert für Umgebungslasten
Safety factor (SC)	1.67	Sicherheitsfaktor auf Bruchlast (für dynamische Analyse)

Der design-relevante Nutzungsgrad wird berechnet und in den Ergebnissen ausgewiesen.

3.5.8 Richtungsscan

Der Richtungsscan durchsucht systematisch verschiedene Wellen-, Wind- und Strömungsrichtungen:

Parameter	Standardwert	Bedeutung
Start [°]	0	Startwinkel
End [°]	360	Endwinkel
Step size [°]	30	Schrittweite

Die Analyse wird für jede Kombination aus Wellen-, Wind- und Strömungsrichtung durchgeführt. Das Ergebnis ist der **kritischste Belastungsfall** (maximale Leinenkraft).

Hinweis: Die Rechenzeit skaliert mit (End−StartStep)3(StepEnd−Start)3.

3.5.9 Beschädigter Zustand (Damaged Condition)

Wenn diese Option aktiviert ist, simuliert das System den **Ausfall jeder einzelnen Leine** nacheinander:

1. Leine ii wird entfernt
2. Das statische Gleichgewicht wird neu berechnet
3. Die maximale Kraft in den verbleibenden Leinen wird ermittelt

Das Ergebnis zeigt die **maximale Leinenkraft** im beschädigten Zustand und die **ausgefallene Leine**.

3.5.10 Berechnung starten

📊 **Spectral Analysis:**

- Berechnet die spektrale Antwort der Leinenkräfte
- Zeigt TmeanTmean, TsigTsig, T4σT4σ und Nutzungsgrad
- Schnellere Berechnung, da keine Zeitbereichssimulation erforderlich ist

⏱️ **Time-Domain + Drift:**

- Führt eine Zeitbereichssimulation durch
- Zeigt die zeitliche Entwicklung der Leinenkräfte
- Berücksichtigt die heuristische Driftkraft

Nach der Berechnung werden die Ergebnisse in der Tabelle und im Textfeld angezeigt.

3.5.11 Plot-Funktionen

📈 **Plot Tension Transfer:**

- Zeigt die Übertragungsfunktionen HT(ω)HT(ω) für alle Leinen
- Darstellung als Linienplot über der Frequenz

- Nützlich zur Identifikation von Resonanzfrequenzen

🔁 **Yaw RAO:**

- Zeigt den Yaw-RAO für die aktuell eingestellte Wellenrichtung
- Darstellung als Linienplot

3.5.12 PDF-Report-Export

Mit 📄 **Export PDF** wird ein umfassender Bericht erstellt, der folgende Inhalte umfasst:

1. **Titelseite** mit Analyseparametern
2. **Umgebungskräfte** und statische Leinen-/Ankerkräfte (Tabelle)
3. **Spektrale Ergebnisse** (Tabelle mit TmeanTmean, TsigTsig, etc.)
4. **Zeitreihen** (falls Zeitbereichssimulation durchgeführt)
5. **Tension Transfer Functions** (Grafik)

Der Report wird im A4-Querformat erstellt und ist direkt für Dokumentationen und Gutachten verwendbar.

3.6 Ergebnisse und Interpretation

3.6.1 Statische Gleichgewichtsergebnisse

Die statische Gleichgewichtsberechnung liefert:

Größe	Einheit	Bedeutung
Offset dx	mm	Longitudinale Verschiebung des Schiffs
Offset dy	mm	Transversale Verschiebung des Schiffs
Yaw	°	Drehung des Schiffs um die Hochachse
T_stat	kN	Statische Leinenkraft (nach Gleichgewicht)
Moment	kN·m	Moment der Leine um den Referenzpunkt

Interpretation der Offset-Werte:

- dx<100 mmdx<100mm: Geringe Verschiebung (gut)
- dx>500 mmdx>500mm: Signifikante Verschiebung (prüfen)
- dy<100 mmdy<100mm: Geringe Verschiebung (gut)
- dy>500 mmdy>500mm: Signifikante Verschiebung (prüfen)
- Yaw<2◦Yaw<2◦: Geringe Drehung (gut)
- Yaw>5◦Yaw>5◦: Signifikante Drehung (prüfen)

3.6.2 Spektrale Ergebnisse

Die spektrale Antwort liefert für jede Leine:

Größe	Einheit	Bedeutung
TmeanTmean	kN	Mittlere Leinenkraft (Vorspannung + statischer Anteil)
TsigTsig	kN	Signifikante dynamische Leinenkraft
T4σT4σ	kN	Maximalwert (Tmean+TsigTmean+Tsig)
TminTmin	kN	Minimalwert (max(0,Tmean−Tsig)max(0,Tmean−Tsig))
Utilization	%	Nutzungsgrad bezogen auf Bruchlast

Interpretation der Nutzungsgrade:

- <50%<50%: Geringe Auslastung (unproblematisch)
- 50–80%50–80%: Moderate Auslastung (akzeptabel)
- >80%>80%: Hohe Auslastung (kritisch – Optimierung erforderlich)
- >100%>100%: Überlastung (nicht zulässig)

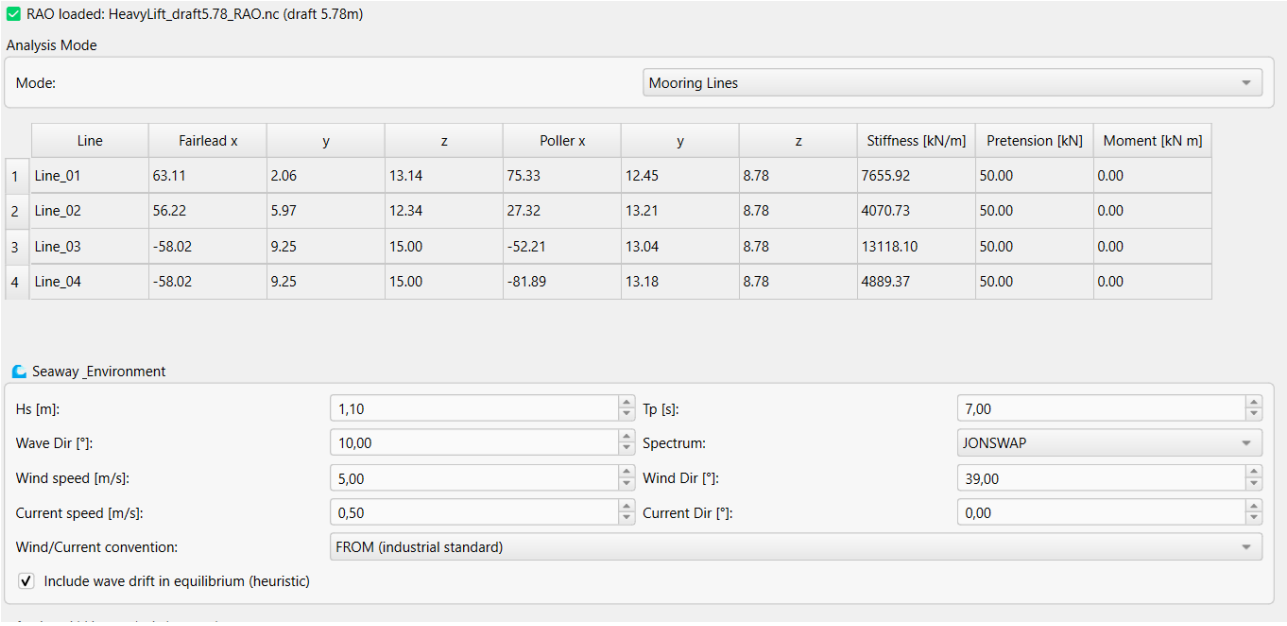
3.6.3 Typische Ergebnisse im Vergleich

Zustand	TmeanTmean	TsigTsig	T4σT4σ	Nutzung
Ruhe (kein Seegang)	50 kN	0 kN	50 kN	5%
Leichter Seegang (Hs=1.0m)	55 kN	15 kN	70 kN	7%
Mittlerer Seegang (Hs=2.0m)	65 kN	35 kN	100 kN	10%
Starker Seegang (Hs=4.0m)	90 kN	80 kN	170 kN	17%

3.6.4 Einfluss der Wellenrichtung

Die kritischste Wellenrichtung hängt von der Anordnung der Leinen ab:

- **Leinen längs:** Kritisch bei Wellen aus Längsrichtung (0°/180°)
- **Leinen quer:** Kritisch bei Wellen aus Querrichtung (90°/270°)
- **Kombination:** Worst-Case liegt oft bei schrägem Seegang (45°/135°)



3.6.5 Einfluss der Ankerkonfiguration

Konfiguration	Vorteile	Nachteile
1 Anker (zentral)	Einfach, kostengünstig	Geringe Stabilität gegen Yaw
4 Anker (Ecken)	Hohe Yaw-Stabilität	Mehrere Anker, höhere Kosten
Keine Anker	Einfach, für Hafen	Keine zusätzliche Sicherheit

3.7 Fehlerbehebung und Qualitätssicherung

3.7.1 Häufige Fehler und Lösungen

Symptom	Ursache	Lösung
"No MooringData spreadsheet found"	Spreadsheet nicht vorhanden	Editor verwenden oder manuell erstellen
"No LINES section found"	Abschnitt fehlt	**LINES** in Spalte A einfügen

Symptom	Ursache	Lösung
"No valid mooring lines found"	Fehlende oder ungültige Einträge	Fairlead- und Poller-Positionen prüfen
"Equilibrium: NOT CONVERGED"	Numerische Instabilität	Dämpfung erhöhen, Vorspannung reduzieren, Schrittweite verkleinern
"RAO not found in dataset"	Veraltete NetCDF-Datei	Capytaine-Analyse mit aktualisierter Version neu durchführen
Unplausible Leinenkräfte (>MBL)	Falsche Einheiten (mm statt m)	Positionen in MooringData auf Meter prüfen
"No wind/current areas found"	ProjectedAreas nicht ausgeführt	LoadCondition prüfen oder ProjectedAreas.py ausführen
Drift force NaN	Fehler bei RAO-Interpolation	Wellenrichtung prüfen; ggf. nächste verfügbare Richtung verwenden

3.7.2 Plausibilitätsprüfungen

Das System führt während der Berechnung folgende Checks durch:

- **Leinenlängen:** L>0L>0 und nicht extrem kurz (L>0.5L>0.5 m)
- **Leinensteifigkeiten:** k>0k>0 und nicht extrem hoch (k<1e6k<1e6 kN/m)
- **Vorspannung:** T0≥0T0≥0 und T0<MBLT0<MBL
- **Katenar-Parameter:** a>0a>0, d>0d>0, S>dS>d
- **Umweltkräfte:** Keine NaN-Werte; Begrenzung auf physikalisch sinnvolle Werte

3.7.3 Debug-Modus

Das Modul enthält Debug-Ausgaben, die im FreeCAD-Report-View erscheinen. Wichtige Debug-Informationen:

- **Ankerpositionierung:** Fairlead-Position, Anker-Position, Kettenlänge, Scope
- **Gleichgewicht:** Residual-Norm, Iterationen, Konvergenzstatus
- **Leinenkräfte:** TT, FxFx, FyFy, FzFz für jede Leine
- **Umweltkräfte:** Wind- und Stromkomponenten mit projizierten Flächen

3.7.4 Hinweise zur Ergebnisqualität

- Die **spektrale Antwort** hängt von der Qualität der RAOs ab (Mesh-Auflösung, Frequenz- und Richtungsdiskretisierung)
- Die **Katenar-Berechnung** setzt idealisiertes Kettenverhalten voraus (keine Reibung, keine Dehnung)

- Die **Wellen-Drift-Heuristik** ist keine QTF-Berechnung – für finale Auslegungen ist ein QTF-basierter Ansatz erforderlich
- Die **Zeitbereichssimulation** ist ein linearer Ansatz (keine nichtlinearen Effekte wie Slack/Schlag)
- Der **Richtungsscan** kann bei feiner Schrittweite rechenintensiv sein – mit Bedacht einsetzen

---

3.8 Anhang: Technische Referenz

3.8.1 Wichtige Funktionen in MooringAnalysis.py

Funktion	Parameter	Rückgabe	Beschreibung
`read_mooring_data_from_spreadsheet()`	doc (optional)	Leinen-Liste oder Fehler	Liest Mooring-Leinen aus Spreadsheet
`read_wind_current_data()`	doc (optional)	Wind/Strom-Daten	Liest Umgebungsdaten
`compute_env_forces()`	Wind-/Stromdaten, Geschwindigkeiten, Richtungen	Kräfte und Momente	Berechnet Wind- und Stromkräfte
`solve_static_equilibrium_general()`	Leinen, Anker, Umgebungskräfte, Referenzpunkt	Verschiebung, Yaw, Konvergenzstatus	3-DOF Newton-Raphson
`catenary_horizontal_tension()`	Distanz, Wassertiefe, Scope, Kettengewicht	Horizontale Spannung	Katenar-Berechnung
`compute_spectral_mooring_response()`	Dataset, Leinen, Hs, Tp, Richtung	Spektrale Ergebnisse	Spektrale Antwortanalyse
`full_mooring_analysis()`	Dataset, Leinen, Anker, Seegangsparameter	Vollständige Ergebnisse	Hauptfunktion für Analyse
`export_pdf_report()`	Ergebnisse, Dateiname, Titel	—	PDF-Report-Export

3.8.2 Datenstrukturen

Mooring-Leine (aus Spreadsheet):

python

```
{
    'name': 'Line_01',
    'fairlead': (2.5, -1.2, 0.0),  # (x, y, z) in Metern
    'poller': (15.0, 8.0, 2.0),    # (x, y, z) in Metern
    'stiffness': 150.0,            # kN/m
    'pretension': 50.0,            # kN
    'breaking_load': 2000.0,       # kN
    'length_initial': 13.5         # m (automatisch berechnet)
}
```

Anker-Konfiguration:

python

```
{
    'name': 'anchor_1',
    'fairlead_pos': (2.5, -1.2, 0.0),   # (x, y, z) in Metern
    'anchor_pos': (15.0, -8.0, -50.0),  # (x, y, z) in Metern
    'water_depth': 50.0,                 # m
    'chain_length': 150.0,               # m
    'weight_per_m': 0.85,                # kN/m (unter Wasser)
    'holding_capacity': 1000.0           # kN
}
```

Ergebnisse der spektralen Antwort:

python

```
{
    'name': 'Line_01',
    'T_mean': 52.3,          # kN
    'T_sig': 12.5,           # kN
    'T_4sigma': 64.8,        # kN
    'T_min': 39.8,           # kN
    'utilization': 0.032,    # 3.2%
```

```
    'omega': array([...]),   # rad/s
    'tension_transfer': array([...]),  # kN/m
    'S_T': array([...])      # kN²·s
}
```

3.8.3 Abhängigkeiten

Modul/Bibliothek	Verwendung	Bemerkung
FreeCAD	CAD-Datenzugriff	Platzierung, Dokumentenobjekte
numpy	Numerische Berechnungen	Arrays, lineare Algebra
matplotlib	Plots und PDF-Export	Optional; bei Fehlen keine grafische Ausgabe
xarray	RAO-Datenzugriff	Aus Capytaine-Ergebnissen
PySide2/PySide6	GUI	Qt-Bindungen für FreeCAD
matplotlib.backends.backend_pdf	PDF-Erstellung	Für Report-Export

3.8.4 Konstanten und Standardwerte

Konstante	Wert	Bedeutung
`rho_air`	1.225 kg/m³	Luftdichte
`rho_water`	1025 kg/m³	Meerwasserdichte
`g`	9.81 m/s²	Erdbeschleunigung
`POINT_RADIUS_MM`	500 mm	Radius der Fairlead-/Poller-Punkte im Editor
`QUAY_WIDTH_M`	30 m	Breite des Kai-Blocks im Editor
`QUAY_CLEARANCE_M`	1 m	Abstand Schiff–Kai im Editor

Chain Weight Coefficient:

Kettenart	Koeffizient	Formel
Stud Link	0.0219	wLuft=0.0219 · d2wLuft=0.0219 · d2 [kg/m]
Open Link	0.0186	wLuft=0.0186 · d2wLuft=0.0186 · d2 [kg/m]

Der Unterwassergewichtsfaktor beträgt 0.869 (Auftrieb).

3.9 Praktische Anwendungshinweise

3.9.1 Workflow für eine Mooring-Analyse

1. **Vorbereitung:**
    - Schiffsmodell in FreeCAD erstellen oder laden
    - LoadCondition-Spreadsheet mit Schiffsdaten und projizierten Flächen

- Capytaine-Analyse durchführen (RAO-Dataset erzeugen)

2. **Mooring-Konfiguration erstellen:**
    - MooringEditor öffnen
    - Fairleads am Schiff platzieren
    - Poller am Kai platzieren
    - Leinen zwischen Fairleads und Pollern erstellen
    - Material und Parameter einstellen
    - In MooringData-Spreadsheet exportieren
3. **Analyse durchführen:**
    - MooringTaskPanel öffnen
    - RAO-Dataset auswählen
    - Seegangsparameter einstellen
    - Wind- und Stromparameter einstellen
    - Optional: Anker konfigurieren
    - Optional: Sicherheitsfaktoren, Richtungsscan, Damaged Condition aktivieren
    - "Spectral Analysis" oder "Time-Domain + Drift" starten
4. **Ergebnisse interpretieren:**
    - Statische Verschiebung und Yaw prüfen
    - Leinenkräfte und Nutzungsgrade bewerten
    - Kritische Leinen identifizieren
    - Plots für visuelle Analyse nutzen
5. **Dokumentation:**
    - PDF-Report exportieren
    - Ergebnisse in Berechnungsbericht übernehmen

3.9.2 Empfehlungen für die Praxis

- **Vorspannung:** Typisch 5–10% der Bruchlast, aber nicht weniger als 50 kN für Stahlseile
- **Scope-Faktor:** Bei Ankerketten mindestens 3.0, besser 4.0–5.0 in flachem Wasser
- **Leinenanordnung:** Verteilen Sie die Leinen symmetrisch, um Yaw-Momente zu minimieren

- **Richtungsscan:** Verwenden Sie Schrittweiten von 30–45° für eine erste Abschätzung, 15° für detaillierte Analysen
- **Damaged Condition:** Prüfen Sie, ob das System auch bei Ausfall einer Leine noch standsicher ist
- **Sicherheitsfaktoren:** Wenden Sie DNV/ISO-Faktoren für design-relevante Nachweise an

Fehlerquelle	Vermeidung
Falsche Einheiten (mm statt m)	Alle Positionen in MooringData in Metern angeben
Zu geringe Vorspannung (Slack)	Mindestens 5% der Bruchlast vorspannen
Zu hohe Vorspannung	Kann zu Überlastung bei kleiner Auslenkung führen
Unrealistische Wellenrichtung	Wellenrichtung auf tatsächliche Standortbedingungen abstimmen
Fehlende projizierte Flächen	ProjectedAreas.py vor der Analyse ausführen
Unzureichende Frequenzauflösung	Capytaine-Analyse mit mindestens 30 Frequenzstützstellen

Kapitel 4: Points of Interest – Beschleunigungsanalyse für beliebige Punkte

4.1 Zweck und Anwendungsbereich

Das Points-of-Interest (POI)-Modul dient der Bewertung von Beschleunigungen an beliebigen Punkten an Bord eines Schiffes unter Seegangseinfluss. Es erweitert die in der Krananalyse verwendete Kinematik auf **beliebige Punkte** – von Ladungsecken über Laschpunkte bis hin zu empfindlicher Ausrüstung. Die Analyse liefert:

- **Signifikante Beschleunigungen** in allen drei Raumrichtungen (axax, ayay, azaz) sowie die resultierende Beschleunigung (|a||a|)
- **Vergleich mit benutzerdefinierten Grenzwerten** für jede Achse separat
- **Spektrale Antworten** für jeden Punkt (Frequenzspektren der Beschleunigungen)
- **Grafische Darstellungen** der Beschleunigungsverläufe und Antwortspektren
- **Interaktive Erstellung von Points of Interest** über manuelle Eingabe oder Auswahl von 3D-Objekten

Anwendungsfälle sind die sicherheitstechnische Bewertung von Ladungssicherungssystemen, die Auslegung von Verzurrungen, die Überprüfung von Beschleunigungsgrenzen für empfindliche Fracht (z. B. Elektronik, Medizintechnik) sowie die Erstellung von Betriebsgrenzendiagrammen für bestimmte Ladungspositionen.

4.2 Systemarchitektur und Modulübersicht

Das System besteht aus drei eng verknüpften Python-Modulen, die den kompletten Workflow von der Punkterstellung bis zur Ergebnisdarstellung abdecken:

Modul	Aufgabe	Laufumgebung
PointOfInterest.py	Definition der POI-Objekte (App::FeaturePython), Eigenschaften (Position, Beschleunigungsgrenzen, Ergebnisse), View-Provider mit 3D-Marker	FreeCAD-Pythonumgebung, FreeCAD-GUI
PointOfInterestAnalysis.py	Kernberechnungen: Wiederverwendung der CraneAnalysis-Kinematik für beliebige Punkte, Grenzwertprüfung, Plot-Funktionen	FreeCAD-Pythonumgebung
PointOfInterestTaskPanel.py	Grafische Bedienoberfläche (GUI) für Punkterstellung, Grenzwertdefinition, Berechnung und Ergebnisdarstellung	FreeCAD-GUI

Der Datenfluss verläuft wie folgt:

1. **FreeCAD-Dokument** mit Schiffsgeometrie und Lastdaten
2. **Erstellung von POI-Objekten** – manuell über X/Y/Z-Eingabe oder durch Auswahl eines 3D-Objekts
3. **Definition von Beschleunigungsgrenzwerten** für jeden Punkt (optional)
4. **RAO-Dataset-Auswahl** aus dem Projekt-Speicher (Capytaine-Ergebnisse)
5. **Berechnung der Beschleunigungen** am POI mittels starrer Körper-Kinematik
6. **Spektrale Antwortanalyse** unter Verwendung von JONSWAP- oder Pierson-Moskowitz-Spektren
7. **Grenzwertprüfung** und farbliche Statusanzeige (PASS/FAIL)
8. **Darstellung im TaskPanel** als Tabelle, Textausgabe und interaktive Plots

---

4.3 Physikalische Grundlagen

4.3.1 Kinematik am beliebigen Punkt

Das Modul verwendet **dieselbe Kinematik** wie die Krananalyse (siehe Kapitel 2.3.1). Für einen Punkt mit den Koordinaten r=(x,y,z)r=(x,y,z) relativ zum Referenzpunkt (Schwerpunkt) gilt die komplexe Überlagerung der sechs Starrkörper-Freiheitsgrade:

δx=Surge+Pitch⋅z−Yaw⋅yδy=Sway+Yaw⋅x−Roll⋅zδz=Heave+Roll⋅y−Pitch⋅xδxδyδz =Surge+Pitch⋅z−Yaw⋅y=Sway+Yaw⋅x−Roll⋅z=Heave+Roll⋅y−Pitch⋅x

Die **Beschleunigung** in jeder Richtung ergibt sich durch Multiplikation mit −ω2−ω2:

ai(ω)=ω2⋅|δi(ω)|ai(ω)=ω2⋅|δi(ω)|

Die **resultierende Beschleunigung** (Magnitude) wird aus der euklidischen Norm der komplexen Verschiebungskomponenten berechnet:

|a(ω)|=ω2⋅|δx|2+|δy|2+|δz|2|a(ω)|=ω2⋅|δx|2+|δy|2+|δz|2

Wichtiger Hinweis: Die RAOs für die einzelnen Freiheitsgrade liegen als komplexe Zahlen vor und besitzen unterschiedliche Phasenlagen. Die Überlagerung muss **komplex** erfolgen, und erst danach wird der Betrag gebildet.

4.3.2 Spektrale Antwort

Die signifikante Beschleunigung ergibt sich aus der Integration des Antwortspektrums über die Frequenz:

σai2=∫0∞Sζζ(ω)⋅|Hi(ω)|2 dωσai2=∫0∞Sζζ(ω)⋅|Hi(ω)|2dω

Die **signifikante Beschleunigung** ist definiert als:

ai,sig=4 · σai2ai,sig=4 · σai2

Das Modul berechnet die signifikante Beschleunigung für:

- Alle drei Raumrichtungen separat (ax,ay,azax,ay,az)
- Die resultierende Beschleunigung (|a||a|)

4.3.3 Grenzwertprüfung

Für jeden POI können **separate Grenzwerte** für jede Achse definiert werden:

Eigenschaft	Einheit	Bedeutung
`AccelLimitX`	m/s²	Zulässige signifikante Längsbeschleunigung (0 = nicht geprüft)
`AccelLimitY`	m/s²	Zulässige signifikante Querbeschleunigung (0 = nicht geprüft)
`AccelLimitZ`	m/s²	Zulässige signifikante Vertikalbeschleunigung (0 = nicht geprüft)
`AccelLimitAbs`	m/s²	Zulässige signifikante resultierende Beschleunigung (0 = nicht geprüft)

Die Prüfung erfolgt durch einfachen Vergleich:

PASS ⟺ ai,sig≤Limitifu¨r alle gepru¨ften Achsen iPASS⟺ai,sig≤Limitifu¨r alle gepru¨ften Achse n i

Ein Grenzwert von **0.0** bedeutet: "nicht geprüft" – diese Achse wird bei der Statusbewertung ignoriert.

Typische Grenzwerte für verschiedene Ladungstypen:

Ladungstyp	azaz [m/s²]	|a||a| [m/s²]	Begründung
Schüttgut (Stahl)	5.0	8.0	Hohe Eigenstabilität
Container (Standard)	3.0	5.0	Containerstapel stabil
Papierrollen	2.0	3.5	Empfindlich gegen Umfallen
Elektronik / Medizin	1.5	2.5	Stoßempfindliche Komponenten
Flüssiggut (Tanks)	2.0	3.0	Sloshing-Effekte berücksichtigen
Fahrzeuge (PKW)	2.5	4.0	Sicherungssysteme begrenzen

4.4 Voraussetzungen und Vorbereitung

4.4.1 FreeCAD-Dokument

Das aktive Dokument muss enthalten:

- **RAO-Dataset** aus vorheriger Capytaine-Analyse (für Beschleunigungsberechnung)
- **Schiffsmodell** (für die Auswahl von Objekten zur POI-Erstellung, optional)

Keine weiteren Voraussetzungen – Points of Interest können auch ohne vorhandenes Schiffsmodell erstellt werden.

4.4.2 Koordinatensystem

Die POI-Positionen werden im **Schiffskoordinatensystem** angegeben:

Achse	Richtung	Einheit
xx	Longitudinal (Bug positiv)	Meter
yy	Transversal (Steuerbord positiv)	Meter
zz	Vertikal (nach oben positiv, Kiel bei z=0)	Meter

Referenzpunkt für alle Bewegungen ist der Schwerpunkt des Schiffes (wie in der RAO-Analyse).

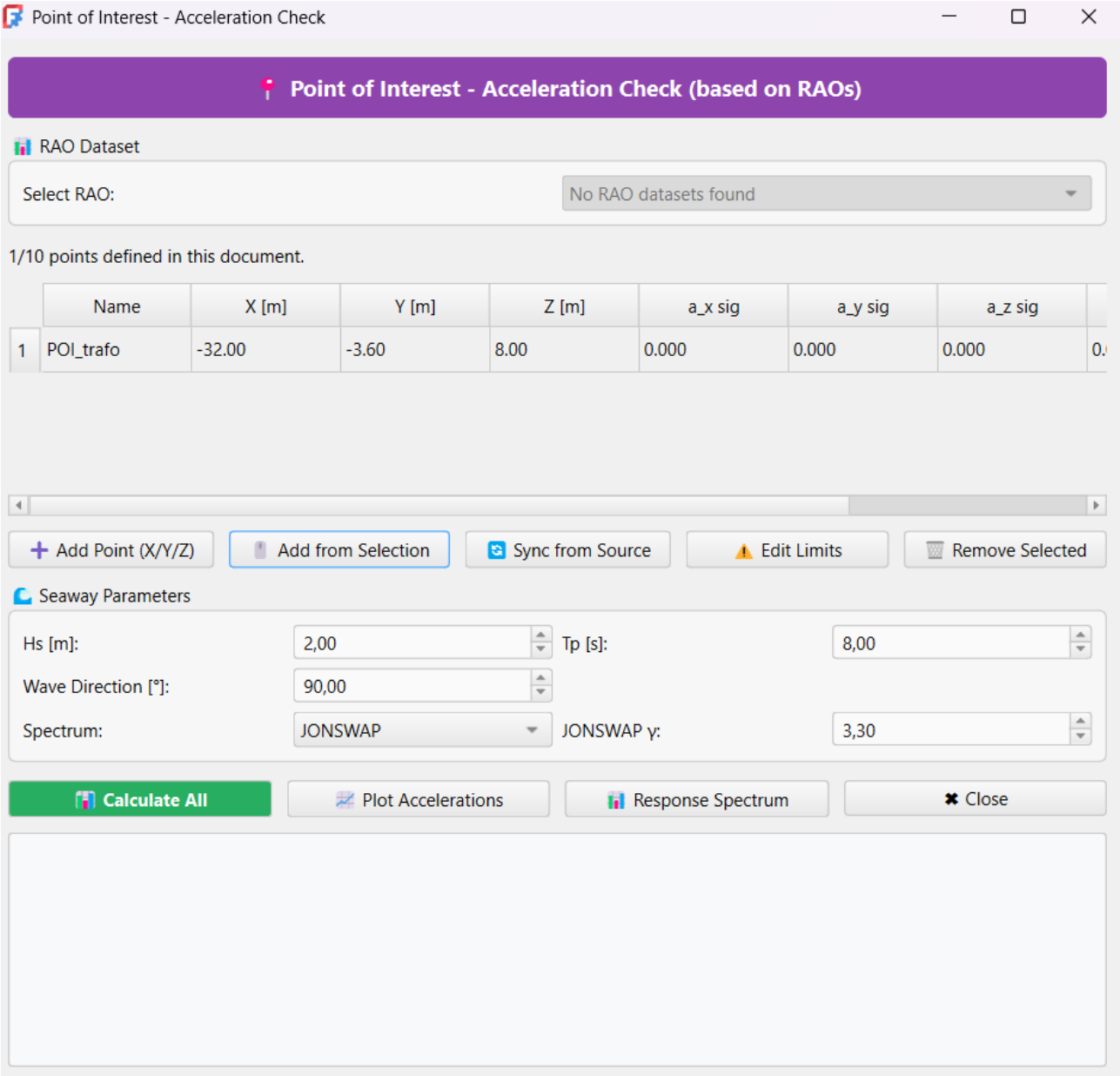
4.4.3 Begrenzung der Punktanzahl

Die Anzahl der Points of Interest ist auf **maximal 10 Punkte** begrenzt (Konstante `MAX_POI`). Dies dient der Performance und Übersichtlichkeit.

4.5 Bedienungsanleitung

4.5.1 Öffnen des TaskPanels

Das POI-TaskPanel wird über die entsprechende Schaltfläche in der FreeCAD-Oberfläche gestartet:



python

```
from StowMind import PointOfInterestTaskPanel as POITP
POITP.createTask(dataset)
```

Nach dem Start erscheint ein Fenster mit folgenden Abschnitten:

- **RAO Dataset** – Auswahl des hydrodynamischen Datensatzes
- **Point Table** – Übersicht aller definierten POIs mit Positionen und Ergebnissen
- **Point Management** – Buttons zum Erstellen, Synchronisieren und Löschen
- **Seaway Parameters** – Seegangsparameter für die Berechnung
- **Buttons** – Berechnung, Plots, Schließen

- **Ergebnisausgabe** – Textfeld mit Berechnungsergebnissen

4.5.2 Erstellen von Points of Interest

Das Modul bietet zwei Methoden zur Erstellung von POIs:

Methode 1: Manuelle Eingabe (Add Point (X/Y/Z))

1. Klicken Sie auf **Add Point (X/Y/Z)**
2. Geben Sie im Dialog ein:
    - **Name:** Aussagekräftige Bezeichnung (z. B. "Container_Stapel_1")
    - **X, Y, Z:** Position in Metern im Schiffskoordinatensystem
    - **Description:** Freitext (z. B. "Untere Ecke Stapel 1")
3. Bestätigen Sie mit **OK**

Methode 2: Auswahl eines 3D-Objekts (Add from Selection)

1. Wählen Sie in der 3D-Ansicht ein Objekt aus (z. B. einen Container, eine Lasche, ein Ausrüstungsteil)
2. Klicken Sie auf **Add from Selection**
3. Der Name wird automatisch aus dem Objektnamen abgeleitet (editierbar)
4. Die Position wird aus dem **Placement.Base** des Objekts übernommen (automatische Konvertierung von mm → m)

Hinweis: Bei der Auswahl eines Objekts wird die Verknüpfung als `SourceObject` gespeichert. Über **Sync from Source** kann die Position später aktualisiert werden.

4.5.3 Definition von Beschleunigungsgrenzen

Für jeden POI können separate Grenzwerte definiert werden:

1. Wählen Sie den gewünschten POI in der Tabelle aus
2. Klicken Sie auf ⚠ **Edit Limits**
3. Geben Sie für jede Achse einen Grenzwert in m/s² ein
    - **0.0** bedeutet: "nicht geprüft" (diese Achse wird ignoriert)
4. Bestätigen Sie mit **OK**

Die Grenzwerte werden als Eigenschaften des POI-Objekts gespeichert und bleiben auch nach dem Schließen des Panels erhalten.

4.5.4 Auswahl des RAO-Datasets

Im oberen Dropdown-Menü werden alle im Projekt-Speicher verfügbaren RAO-Datensätze aufgelistet. Die Einträge enthalten Informationen über:

- **Draft** (Tiefgang) der Analyse
- **Datum/Zeitstempel** der Erstellung
- **Dateiname** des NetCDF

Wichtig: Das ausgewählte RAO-Dataset muss zum aktuellen Schiffszustand passen.

4.5.5 Seegangsparameter

Die Parameter werden in der Gruppe **Seaway Parameters** eingestellt:

Parameter	Standardwert	Bereich	Bedeutung
Hs [m]	2.0	0.1 – 20.0	Signifikante Wellenhöhe
Tp [s]	8.0	2.0 – 30.0	Spitzenperiode
Wave Direction [°]	90	0 – 360	Wellenrichtung (relativ zum Schiff)
Spectrum	JONSWAP	JONSWAP / Pierson-Moskowitz	Spektrumstyp
JONSWAP γ	3.3	1.0 – 10.0	Peak-Enhancement-Faktor

4.5.6 Berechnung starten

Klicken Sie auf 📊 **Calculate All**, um die Berechnung für alle definierten POIs durchzuführen.

Ablauf der Berechnung:

1. Für jeden POI in der Tabelle:
    - Extraktion der Position aus dem POI-Objekt
    - Berechnung der Beschleunigungen mit `compute_hook_accelerations()` (identisch zur Krananalyse)
    - Spektrale Antwort mit `compute_spectral_response_xyz()`
    - Grenzwertprüfung mit `check_limits()`
    - Speicherung der Ergebnisse auf dem POI-Objekt (`LastAccelX`, `LastAccelY`, `LastAccelZ`, `LastAccelAbs`)
2. Aktualisierung der Tabelle mit:
    - Signifikanten Beschleunigungen (4 Spalten)

- Statusanzeige: **PASS** (grün), **FAIL** (rot) oder **no limit set** (grau)

4.5.7 Plot-Funktionen

📈 **Plot Accelerations**

- Zeigt die Beschleunigungsamplituden ax,ay,az,|a|ax,ay,az,|a| über der Frequenz
- **Limit-Linien** werden als gestrichelte Linien in der entsprechenden Farbe eingetragen
- Nützlich zur Identifikation von Resonanzfrequenzen und zur visuellen Überprüfung der Grenzwerte

📊 **Response Spectrum**

- Zeigt die Antwortspektren Sax,Say,Saz,S|a|Sax,Say,Saz,S|a|
- Darstellung als Linienplot über der Frequenz
- Anzeige der signifikanten Beschleunigungen als Text im Plot

4.5.8 Synchronisation von Positionsänderungen

Wenn der `SourceObject` (das ursprüngliche 3D-Objekt) verschoben wurde, kann die Position des POIs aktualisiert werden:

1. Wählen Sie den POI in der Tabelle aus
2. Klicken Sie auf 🔁 **Sync from Source**
3. Die Position wird aus dem `Placement.Base` des Quellobjekts neu eingelesen

Hinweis: Die Verknüpfung ist **nicht live** – Änderungen am Quellobjekt werden nicht automatisch übernommen.

4.5.9 Löschen von Points of Interest

1. Wählen Sie den gewünschten POI in der Tabelle aus
2. Klicken Sie auf 🗑️ **Remove Selected**
3. Bestätigen Sie die Löschung

4.6 Ergebnisse und Interpretation

4.6.1 Ergebnisübersicht in der Tabelle

Spalte	Inhalt	Bedeutung
Name	POI-Bezeichnung	Identifikation

Spalte	Inhalt	Bedeutung
X, Y, Z [m]	Position	Im Schiffskoordinatensystem
a_x sig	Signifikante Längsbeschleunigung	m/s²
a_y sig	Signifikante Querbeschleunigung	m/s²
a_z sig	Signifikante Vertikalbeschleunigung	m/s²
	a	sig	Signifikante resultierende Beschleunigung	m/s²
Status	PASS / FAIL / no limit set	Farbliche Bewertung

Farbcodierung der Statusanzeige:

Status	Farbe	Bedeutung
PASS	Grün (#d5f5e3)	Alle geprüften Achsen liegen innerhalb der Grenzwerte
FAIL	Rot (#fadbd8)	Mindestens eine Achse überschreitet den Grenzwert
no limit set	Grau (#dddddd)	Keine Grenzwerte definiert – keine Bewertung möglich

4.6.2 Signifikante Beschleunigungen

Die signifikanten Beschleunigungen sind **direkt** vergleichbar mit der Erdbeschleunigung g=9.81 m/s2g=9.81m/s2:

Wert	Interpretation
asig<0.5 m/s2asig<0.5m/s2	Geringe dynamische Belastung (< 5 % von g)
0.5<asig<2.0 m/s20.5<asig<2.0m/s2	Moderate Belastung (5–20 % von g)
2.0<asig<5.0 m/s22.0<asig<5.0m/s2	Hohe Belastung (20–50 % von g)
asig>5.0 m/s2asig>5.0m/s2	Sehr hohe Belastung (> 50 % von g) – Sicherung überprüfen

4.6.3 Typische Ergebnisse für verschiedene Positionen

Position	axax	ayay	azaz	⎪a⎪⎪a⎪	Charakteristik
Schwerpunkt (0,0,0)	0.5–1.5	0.5–1.5	1.0–2.5	1.5–3.0	Geringe Hebelarme
Bug (+,0,0)	2.0–4.0	1.0–2.0	2.0–4.0	3.0–5.5	Stark durch Pitch und Heave
Heck (-,0,0)	1.5–3.5	1.0–2.0	2.0–4.0	3.0–5.0	Stark durch Pitch
Steuerbord (0,+,0)	1.0–2.0	2.0–4.0	2.0–4.0	3.5–5.5	Stark durch Roll
Hohe Position (0,0,+)	2.0–4.0	2.0–4.0	1.0–2.0	3.5–5.0	Stark durch Pitch und Roll

4.6.4 Einfluss der Wellenrichtung

Die Beschleunigungen an einem POI sind stark von der Wellenrichtung abhängig:

Wellenrichtung	Dominierende Bewegung	Kritische POI-Position
0° (von achtern)	Pitch, Heave	Bug- und Heckpositionen
90° (von Steuerbord)	Roll, Sway	Steuerbord- und Backbordpositionen
180° (von vorn)	Pitch, Heave	Bug- und Heckpositionen
45° / 135°	Kombination	Ecken und hohe Positionen

Empfehlung: Führen Sie die Analyse für mehrere Wellenrichtungen durch, um den Worst-Case zu identifizieren.

4.7 Fehlerbehebung und Qualitätssicherung

4.7.1 Häufige Fehler und Lösungen

Symptom	Ursache	Lösung
"No RAO dataset loaded"	Kein RAO im Projekt-Speicher	Zuerst Capytaine-Analyse durchführen
"Maximum of 10 points reached"	Punktelimit erreicht	Nicht benötigte POIs löschen
POI zeigt falsche Position	Falsche Einheiten (mm statt m)	Position in Metern eingeben; bei Sync aus mm konvertiert
SourceObject gefunden, aber Position falsch	Objektbewegung nach Erstellung	**Sync from Source** ausführen
Status bleibt "no limit set"	Keine Grenzwerte definiert	**Edit Limits** für den POI ausführen
Plot erscheint nicht	Matplotlib-Backend-Problem	Backend automatisch umgeschaltet; ggf. tkagg manuell setzen
Beschleunigungen negativ/unplausibel	Falsche Einheiten in RAO	RAO-Dataset auf Konsistenz prüfen

4.7.2 Plausibilitätsprüfungen

Das System führt während der Berechnung folgende Checks durch:

- **Positionsbereich:** x,y,zx,y,z innerhalb der Schiffsabmessungen?
- **Grenzwerte:** Nicht negative Werte (0 = nicht geprüft)
- **RAO-Integrität:** Vorhandensein von 'RAO' oder 'RAO_real'/'RAO_imag'
- **Frequenzbereich:** Filterung unrealistisch niedriger Frequenzen (< 0.1 rad/s)

4.7.3 Debug-Modus

Das Modul verwendet die gleiche Debug-Flag wie die Krananalyse (`DEBUG_CRANE` in `CraneAnalysis.py`). Bei aktiviertem Debug-Modus werden folgende Informationen ausgegeben:

- **POI-Positionen** in Metern
- **Zwischenergebnisse** der Beschleunigungsberechnung
- **Grenzwertprüfung** mit detaillierten PASS/FAIL-Informationen

4.7.4 Hinweise zur Ergebnisqualität

- Die Genauigkeit der Beschleunigungen hängt von der Qualität der RAOs ab (Mesh-Auflösung, Frequenz- und Richtungsdiskretisierung)
- Die Spektralintegration erfordert eine ausreichende Frequenzauflösung (mindestens 30 Stützstellen im relevanten Bereich)
- Die Annahme linearer Wellen (kleine Amplituden) ist bei Hs>5 mHs>5m nicht mehr uneingeschränkt gültig
- Die Berechnung berücksichtigt **keine** nichtlinearen Effekte wie Schlagseite oder dynamische Trimmlagen
- **Grenzwerte sind vom Anwender zu definieren** – das System prüft nur, ob sie eingehalten werden

---

4.8 Anhang: Technische Referenz

4.8.1 Wichtige Funktionen

Funktion	Parameter	Rückgabe	Beschreibung
`create_poi(doc, label, position_m, description)`	Dokument, Name, Position (m), Beschreibung	POI-Objekt	Erstellt einen neuen POI
`create_poi_from_object(doc, label, source_obj, description)`	Dokument, Name, Quellobjekt, Beschreibung	POI-Objekt	Erstellt POI aus 3D-Objekt
`sync_poi_from_source(poi_obj)`	POI-Objekt	(Erfolg, Meldung)	Aktualisiert Position aus SourceObject
`find_poi_objects(doc)`	Dokument	Liste von POIs	Sucht alle POIs im Dokument
`get_poi_position_m(obj)`	POI-Objekt	(x, y, z) in m	Liest Position in Metern
`compute_poi_spectral_response()`	Dataset, POI, Hs, Tp, ...	Spektrale Ergebnisse	Berechnet spektrale Antwort
`check_limits(poi_obj, spec)`	POI, Spektrum	{checks, ok, any_checke	Prüft Grenzwerte

Funktion	Parameter	Rückgabe	Beschreibung
		d}	
`run_poi_calculation()`	Dataset, POI, Hs, Tp, ...	(spec, limits)	Vollständige Berechnung + Grenzwertprüfung

4.8.2 Datenstrukturen

POI-Objekt (App::FeaturePython):

python

```
{
    'Placement': App.Placement,           # Position (in mm)
    'Label': 'Container_1',               # Name
    'Description': 'Untere Ecke Stapel 1', # Freitext
    'SourceObject': <Object>,             # Verknüpftes 3D-Objekt (optional)
    'AccelLimitX': 2.0,                   # Grenzwert in m/s² (0 = nicht
geprüft)
    'AccelLimitY': 2.0,                   # Grenzwert in m/s² (0 = nicht
geprüft)
    'AccelLimitZ': 3.0,                   # Grenzwert in m/s² (0 = nicht
geprüft)
    'AccelLimitAbs': 4.0,                 # Grenzwert in m/s² (0 = nicht
geprüft)
    'LastAccelX': 0.0,                    # Letztes Ergebnis in m/s²
    'LastAccelY': 0.0,                    # Letztes Ergebnis in m/s²
    'LastAccelZ': 0.0,                    # Letztes Ergebnis in m/s²
    'LastAccelAbs': 0.0,                  # Letztes Ergebnis in m/s²
}
```

Ergebnisse der spektralen Antwort:

python

```
{
    'a_x_significant': 2.45,     # Signifikante Längsbeschleunigung in m/s²
    'a_y_significant': 1.87,     # Signifikante Querbeschleunigung in m/s²
    'a_z_significant': 3.12,     # Signifikante Vertikalbeschleunigung in m/s²
    'a_abs_significant': 4.56,   # Signifikante resultierende Beschleunigung in
m/s²
    'omega': array([...]),       # Frequenzarray in rad/s
    'S': array([...]),           # Seegangsspektrum
```

```
    'S_a_x': array([...]),       # Antwortspektrum (x)
    'S_a_y': array([...]),       # Antwortspektrum (y)
    'S_a_z': array([...]),       # Antwortspektrum (z)
    'S_a_abs': array([...]),     # Antwortspektrum (resultierend)
    'a_x': array([...]),         # Übertragungsfunktion (x)
    'a_y': array([...]),         # Übertragungsfunktion (y)
    'a_z': array([...]),         # Übertragungsfunktion (z)
    'a_abs': array([...]),       # Übertragungsfunktion (resultierend)
    'pos': (4.8, -1.5, 12.5),    # POI-Position in Metern
    'wave_direction_deg': 90.0,
    'Hs': 2.0,
    'Tp': 8.0,
    'spectrum': 'JONSWAP (γ=3.3)',
    'gamma': 3.3
}
```

Grenzwertprüfung:

python

```
{
    'checks': {
        'x': True,   # PASS (a_x ≤ LimitX)
        'y': True,   # PASS (a_y ≤ LimitY)
        'z': False,  # FAIL (a_z > LimitZ)
        'abs': None  # nicht geprüft (Limit = 0)
    },
    'ok': False,     # Gesamtbewertung: FAIL (weil 'z' False ist)
    'any_checked': True  # Mindestens eine Achse wurde geprüft
}
```

4.8.3 Abhängigkeiten

Modul/Bibliothek	Verwendung	Bemerkung
FreeCAD	CAD-Datenzugriff	Placement, Dokumentenobjekte
FreeCADGui	3D-Interaktion	Auswahl von Objekten, Marker
numpy	Numerische Berechnungen	Arrays, trigonometrische Funktionen
matplotlib	Plots	Optional; bei Fehlen keine grafische Ausgabe
xarray	RAO-Datenzugriff	Aus Capytaine-Ergebnissen

Modul/Bibliothek	Verwendung	Bemerkung
PySide2/PySide6	GUI	Qt-Bindungen für FreeCAD
CraneAnalysis	Kernberechnungen	Wiederverwendung der Kinematik
PointOfInterest	POI-Definition	Objektmodell und View-Provider

4.8.4 Konstanten und Standardwerte

Konstante	Wert	Bedeutung
`MAX_POI`	10	Maximale Anzahl von Points of Interest
`PROXY_TYPE`	"StowMindPOI"	Kennung für POI-Proxy-Objekte
`DEFAULT_COLOR`	(1.0, 0.55, 0.0)	Marker-Farbe (orange)
`DEFAULT_SIZE`	150.0 mm	Marker-Durchmesser in mm

4.9 Praktische Anwendungshinweise

4.9.1 Workflow für eine POI-Analyse

1. **Vorbereitung:**
    - Schiffsmodell in FreeCAD erstellen oder laden
    - LoadCondition-Spreadsheet mit Schiffsdaten
    - Capytaine-Analyse durchführen (RAO-Dataset erzeugen)
2. **Points of Interest definieren:**
    - POI-TaskPanel öffnen
    - RAO-Dataset auswählen
    - POIs manuell oder aus 3D-Objekten erstellen
    - Grenzwerte für jeden POI definieren
3. **Analyse durchführen:**
    - Seegangsparameter einstellen (Hs, Tp, Richtung, Spektrum)
    - 📊 **Calculate All** ausführen
    - Tabelle auf PASS/FAIL prüfen
4. **Ergebnisse interpretieren:**
    - Überschreitungen identifizieren
    - Plots für visuelle Analyse nutzen
    - Gegebenenfalls Grenzwerte anpassen oder Sicherungsmaßnahmen verstärken

5. **Dokumentation:**
    - Tabelle als Screenshot oder Export
    - Plots für Berichte nutzen

4.9.2 Empfehlungen für die Praxis

- **Platzieren Sie POIs an den relevanten Punkten:**
    - Ecken von Containern oder Ladungsstücken
    - Befestigungspunkte von Laschungen
    - Empfindliche Ausrüstung (Maschinen, Elektronik)
    - Hochgelegene Punkte (Überbau, Masten)
- **Definieren Sie realistische Grenzwerte:**
    - Orientieren Sie sich an Herstellerangaben
    - Berücksichtigen Sie die Art der Ladungssicherung
    - Nutzen Sie die in Abschnitt 4.3.3 angegebenen Richtwerte als Startpunkt
- **Führen Sie mehrere Szenarien durch:**
    - Unterschiedliche Wellenrichtungen (0°, 45°, 90°, 135°, 180°)
    - Verschiedene Seegangszustände (leichte, mittlere, schwere See)
    - Variation der Spektrumsparameter (JONSWAP vs. PM, verschiedene γ)
- **Dokumentieren Sie die Ergebnisse:**
    - Welche POIs haben FAIL?
    - Welche Beschleunigungen wurden überschritten?
    - Welche Maßnahmen wurden ergriffen?

4.9.3 Typische Fehlerquellen und Vermeidung

Fehlerquelle	Vermeidung
Falsche Einheiten (mm statt m)	POI-Positionen in Metern eingeben; bei Sync aus mm konvertiert
Keine Grenzwerte definiert	⚠ **Edit Limits** für jeden POI ausführen
Unrealistische Grenzwerte	Herstellerangaben oder Richtwerte nutzen
Falsche Wellenrichtung	Richtung auf tatsächliche Standortbedingungen abstimmen
RAO-Dataset nicht passend	Draft und Lastbedingung prüfen
POI an falscher Position	Position mit 3D-Ansicht verifizieren; ggf. Sync ausführen

4.9.4 Integration mit anderen Modulen

Das POI-Modul ist **eng mit der Krananalyse** verknüpft und verwendet deren gesamte Berechnungsinfrastruktur. Die Konsistenz der Ergebnisse ist daher gewährleistet.

Vorteile dieser Architektur:

- Keine Duplizierung von Physik-Code
- Gleiche RAO-Interpretation wie bei der Krananalyse
- Einheitliche Plot-Funktionen
- Wiederverwendung der Spektralanalyse

Einschränkungen:

- Die POI-Analyse verwendet die gleiche Koordinatensystem-Konvention (Schwerpunkt als Referenz)
- Die gleichen RAO-Einschränkungen gelten (lineare Theorie, kleine Amplituden)

4.10 Schlussbemerkung

Das Points-of-Interest-Modul stellt eine **schlanke, aber leistungsfähige Erweiterung** der StowMind-Suite dar. Es ermöglicht die Bewertung von Beschleunigungen an beliebigen Punkten an Bord, ohne dass für jeden Punkt eine separate Krananalyse durchgeführt werden muss.

Die **enge Integration mit der CraneAnalysis** gewährleistet konsistente physikalische Grundlagen, während die **einfache Punktverwaltung** und die **übersichtliche Grenzwertprüfung** die praktische Anwendung im Schiffsbetrieb und in der Ladungssicherung erleichtern.

Mit der Möglichkeit, POIs sowohl **manuell** als auch **aus 3D-Objekten** zu erstellen, und der **automatischen Synchronisation** von Positionsänderungen bietet das Modul eine hohe Flexibilität für verschiedene Anwendungsszenarien – von der Ladungssicherungsplanung bis zur Überprüfung empfindlicher Ausrüstung.

Kapitel 5: Operative Planung (Operability Analysis)

5.1 Zweck und Anwendungsbereich

Die Einsatzbereitschaftsanalyse (Operability Analysis) dient der Bewertung der **Betriebsfähigkeit von Kranen unter variierenden Seegangsbedingungen**. Sie verknüpft die Ergebnisse der hydrodynamischen Analyse (RAOs) mit statistischen Seegangsverteilungen (Scatter-Diagrammen), um die **prozentuale Einsatzfähigkeit** eines Krans für eine bestimmte Last zu quantifizieren. Die Analyse liefert:

- **Antwortmatrix** der signifikanten Hakenbeschleunigung azaz über einem HsHs- und TpTp -Gitter
- **Dynamische Tragfähigkeit** für jeden Seegangszustand
- **Operabilitätsprozent** unter Berücksichtigung der statistischen Seegangsverteilung
- **Identifikation der limitierenden Seegangszustände** (welche Zustände schränken die Einsatzfähigkeit tatsächlich ein)
- **Vergleich verschiedener Lastfälle und Schiffe** hinsichtlich ihrer Einsatzbereitschaft
- **Persistenz der Antwortmatrizen** für schnelle Wiederauswertung ohne erneute BEM-Berechnung

Anwendungsfälle sind die Planung von Hebeoperationen, die Bewertung von Betriebsgrenzen für verschiedene Ladungsgewichte, die Auswahl geeigneter Kränen für bestimmte Einsatzgebiete sowie die Erstellung von Betriebsgrenzendiagrammen für die Borddokumentation.

5.2 Systemarchitektur und Modulübersicht

Das System besteht aus drei eng verknüpften Modulen, die eine **kostengetrennte Architektur** umsetzen – teure Berechnungen werden einmalig durchgeführt und persistent gespeichert, während die eigentliche Operabilitätsbewertung **sofort und beliebig oft wiederholbar** ist:

Modul	Aufgabe	Kosten	Laufumgebung
operability_matrix.py	Kernberechnungen: Antwortmatrix az(Hs,Tp)az(Hs,Tp) aus RAOs, Operabilitätsbewertung, Scatter-Interpolation, Vessel-Vergleich	Hoch (BEM + Spektralintegration)	FreeCAD-Pythonumgebung, unabhängig nutzbar
operability_storage.py	Persistenz der Antwortmatrizen (NetCDF + JSON-Index) mit Metadaten (Tiefgang, GM, Fingerabdruck)	Gering (Datei-I/O)	FreeCAD-Pythonumgebung
OperationTaskPanel.py	Grafische Bedienoberfläche (GUI) für Berechnung, Speicherung, Laden, Bewertung und Vergleich	Gering (UI)	FreeCAD-GUI

Der Datenfluss verläuft wie folgt:

1. **FreeCAD-Dokument** mit Schiffsmodell, LoadCondition und Kranobjekten
2. **RAO-Dataset-Auswahl** aus dem Projekt-Speicher (Capytaine-Ergebnisse)
3. **Kranauswahl** – Extraktion von Hakenposition und statischer SWL
4. **Scatter-Diagramm laden** – statistische Seegangsverteilung (CSV)
5. **Antwortmatrix berechnen** (teuer, einmalig) – az(Hs,Tp)az(Hs,Tp) für alle Seegangszustände
6. **Speicherung** der Antwortmatrix mit Metadaten (Tiefgang, GM, Fingerabdruck)
7. **Operabilitätsbewertung** (günstig, beliebig wiederholbar) – Anwendung der statischen SWL und des Lastgewichts
8. **Statistische Auswertung** – Verknüpfung mit Scatter-Diagramm → Operabilitätsprozent
9. **Vergleich verschiedener Lastfälle** – Ranking nach Einsatzbereitschaft

---

5.3 Physikalische Grundlagen

5.3.1 Die Antwortmatrix – az(Hs,Tp)az(Hs,Tp)

Die Antwortmatrix ist das zentrale Zwischenergebnis der Operabilitätsanalyse. Sie enthält die signifikante vertikale Hakenbeschleunigung azaz für jedes Wertepaar aus signifikanter Wellenhöhe HsHs und Spitzenperiode TpTp:

az(Hs,Tp)=4⋅∫0∞Sζζ(ω;Hs,Tp)⋅∣Hz(ω)∣2 dωaz(Hs,Tp)=4⋅∫0∞Sζζ(ω;Hs,Tp)⋅∣Hz(ω)∣2dω

Dabei ist:

- Sζζ(ω;Hs,Tp)Sζζ(ω;Hs,Tp): Seegangsspektrum (JONSWAP oder Pierson-Moskowitz)
- Hz(ω)Hz(ω): Übertragungsfunktion von der Wellenamplitude auf die vertikale Beschleunigung am Haken
- ωω: Kreisfrequenz [rad/s]

Die Übertragungsfunktion Hz(ω)Hz(ω) wird aus der komplexen Überlagerung der RAOs am Hakenpunkt berechnet (siehe Kapitel 2.3.1).

Besonderheit: Die Antwortmatrix hängt nicht von der Kran-SWL oder dem zu hebenden Gewicht ab. Sie ist eine reine seegangsspezifische Eigenschaft des Schiffs und der Hakenposition. Das ist der Schlüssel zur differenzierten Architektur.

5.3.2 Richtungsmittelung

Die Antwortmatrix kann auf zwei Arten gebildet werden:

Worst-Case (Standard): Für jedes (Hs,Tp)(Hs,Tp)-Paar wird die höchste Beschleunigung über alle Wellenrichtungen gewählt. Dies ist der konservative Ansatz für die Planungsphase, wenn die Wellenrichtung noch nicht festgelegt ist.

az(Hs,Tp)=maxθaz(Hs,Tp,θ)az(Hs,Tp)=θmaxaz(Hs,Tp,θ)

Mittelwert: Es wird der Mittelwert über alle Richtungen gebildet. Dies ist sinnvoll, wenn die Wellenrichtung statistisch gleich verteilt ist.

az(Hs,Tp)=1Nθ∑θaz(Hs,Tp,θ)az(Hs,Tp)=Nθ1θ∑az(Hs,Tp,θ)

5.3.3 Dynamische Tragfähigkeit und Operabilität

Die dynamische Tragfähigkeit für einen Seegangszustand ergibt sich aus der statischen SWL und der signifikanten Vertikalbeschleunigung:

SWLdyn(Hs,Tp)=SWLstat · gg+az(Hs,Tp)SWLdyn(Hs,Tp)=SWLstat · g+az(Hs,Tp)g

Ein Seegangszustand gilt als **operabel**, wenn die dynamische Tragfähigkeit größer oder gleich der erforderlichen Last ist:

operabel(Hs,Tp) ⟺ SWLdyn(Hs,Tp)≥Lerfoperabel(Hs,Tp)⟺SWLdyn(Hs,Tp)≥Lerf

5.3.4 Statistische Operabilität (Scatter-Diagramm)

Die **Gesamtoperabilität** ergibt sich aus der gewichteten Summe aller operablen Seegangszustände, gewichtet mit ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit aus dem Scatter-Diagramm:

Operabilita¨t[%]=100 · ∑operabelP(Hs,Tp)∑alleP(Hs,Tp)Operabilita¨t[%]=100 · ∑alleP(Hs,Tp)∑operabelP(Hs,Tp)

Das Scatter-Diagramm enthält die **relative Häufigkeit** von Seegangszuständen an einem bestimmten Standort. Typische Quellen sind:

- **Nordsee:** GONO (German Oceanographic Datacentre) oder DNV-Statistiken
- **Global:** Globaler Seegangskatalog (z. B. ERA5, ESA CCI)
- **Standortspezifische Messungen:** Von Bojen oder Schiffsmessungen

Format des Scatter-Diagramms:

Hs \ Tp	3.0s	4.0s	5.0s	6.0s	...
0.5m	0.12	0.18	0.25	0.20	...
1.0m	0.08	0.15	0.22	0.18	...
1.5m	0.05	0.10	0.18	0.15	...

Hs \ Tp	3.0s	4.0s	5.0s	6.0s	...
2.0m	0.02	0.05	0.12	0.10	...

Die Werte können als Prozent (Summe = 100 %), Promille (Summe = 1000 ‰) oder absolute Häufigkeiten (Summe variabel) vorliegen – das System normalisiert automatisch.

5.3.5 Differenzierte Architektur – Begründung

Die Berechnung der Antwortmatrix az(Hs,Tp)az(Hs,Tp) ist rechenintensiv, weil:

- Für jede Wellenrichtung die RAOs am Hakenpunkt berechnet werden müssen
- Für jedes (Hs,Tp)(Hs,Tp)-Paar eine Spektralintegration durchgeführt wird
- Ein typisches Gitter mit 12×13=15612×13=156 Zellen und 1212 Richtungen ≈1.872≈1.872 Einzelberechnungen erfordert

Die **Operabilitätsbewertung** hingegen ist sehr schnell:

- Nur elementare Arithmetik (g/(g+az)g/(g+az), Vergleich mit Last)
- Keine BEM, keine Spektralintegration
- Kann in Echtzeit auf Benutzereingaben reagieren

Architektonische Konsequenz:

1. Die Antwortmatrix wird **einmalig** berechnet und **gespeichert**
2. Die Operabilitätsbewertung kann **beliebig oft** mit verschiedenen SWLs, Lasten und Scatter-Diagrammen durchgeführt werden
3. Ein **Vergleich verschiedener Lastfälle** ist ohne erneute Berechnung möglich

---

5.4 Voraussetzungen und Vorbereitung

5.4.1 FreeCAD-Dokument

Das aktive Dokument muss enthalten:

- **Schiffsmodell** als Solid (für den Fingerabdruck und die Lastbedingung)
- **LoadCondition-Spreadsheet** mit Schiffsdaten (Draft, GM, Masse)
- **Kranobjekte** vom Typ `StowMindCrane` oder `ShipCrane` (für Hakenposition und SWL)
- **RAO-Dataset** aus vorheriger Capytaine-Analyse

5.4.2 Scatter-Diagramm (CSV)

Das Scatter-Diagramm muss im **CSV-Format** vorliegen:

Spalten: Tp-Bin-Zentren in Sekunden (erste Zelle leer)
Zeilen: Hs-Bin-Zentren in Metern (erste Zelle, dann Wahrscheinlichkeiten)

Beispiel:

text

```
,Tp=3.0,Tp=4.0,Tp=5.0,Tp=6.0,Tp=7.0,Tp=8.0,Tp=9.0,Tp=10.0,Tp=11.0,Tp=12.0,Tp=13.0,Tp=14.0,Tp=15.0,Tp=16.0
Hs=0.5,0.12,0.18,0.25,0.20,0.12,0.06,0.03,0.02,0.01,0.01,0.00,0.00,0.00,0.00
Hs=1.0,0.08,0.15,0.22,0.18,0.12,0.08,0.05,0.03,0.02,0.01,0.01,0.01,0.00,0.00
...
```

Die Werte werden **automatisch normalisiert** – Sie können absolute Häufigkeiten, Promille oder Prozent verwenden.

5.4.3 Speicherort der Antwortmatrizen

Die Antwortmatrizen werden im Verzeichnis `~/StowMind/operability/` gespeichert:

Datei	Inhalt
`index.json`	Metadaten (Schiffsname, Lastfall, Tiefgang, GM, Fingerabdruck, Zeitstempel)
`<vessel>__<load_case>.nc`	NetCDF-Datei mit der Antwortmatrix (azaz, ggf. richtungsgebende Winkel)

Der **Fingerabdruck** (Hash aus Hull-Volumen, Abmessungen, Draft und GM) dient der Erkennung von Änderungen – wenn sich das Modell oder die Lastbedingung ändert, wird die gespeicherte Matrix als veraltet markiert.

5.4.4 Verwendung der viskosen RAO

Die Antwortmatrix wird aus der RAO des gewählten Datasets berechnet. Wenn die `.nc`-Datei `RAO_viscous` enthält und `prefer_viscous_rao = 1` gesetzt ist, fließt die viskose RAO in die Matrix ein. Andernfalls die Potential-RAO.

Wichtige Konsequenz:

Die Antwortmatrix und das `prefer_viscous_rao`-Flag sind **nicht** miteinander verknüpft. Wenn du nach dem Erzeugen einer Antwortmatrix die viskose RAO änderst (z. B. andere `cd`-Werte), muss die Antwortmatrix **neu berechnet werden**. Das System erkennt das nicht automatisch.

Empfehlung: Beim Wechsel zwischen Potential und viskos immer die gesamte Kette neu durchlaufen:

1. Capytaine: `Apply viscous damping` (falls noch nicht geschehen)
2. Operability: `Compute Response Matrix` (neu, mit viskoser RAO)

3. Operability: `Evaluate` (auf der neuen Matrix)

Auswirkung auf Operability-Ergebnisse:

- Die viskose RAO reduziert die Roll-Beschleunigungen → niedrigere `a_z(Hs,Tp)` in der Antwortmatrix → höhere dynamische SWL → **höhere Operabilität**.
- Bei einem Heavy-Lift-Schiff mit Schlingerkiel kann die Operabilität um 5–15 Prozentpunkte steigen.
- Der Effekt ist bei mittleren Perioden (Tp = 6–10 s) am größten, weil dort die Roll-Resonanz am stärksten angeregt wird.

5.5 Bedienungsanleitung

5.5.1 Öffnen des TaskPanels

Das Operation-TaskPanel wird über die entsprechende Schaltfläche in der FreeCAD-Oberfläche gestartet:

python

```
from StowMind import OperationTaskPanel as OTP
OTP.createTask(dataset, hull_shape)
```

Nach dem Start erscheint ein Fenster mit drei Registerkarten:

- **1. Compute / Save** – Berechnung und Speicherung der Antwortmatrix
- **2. Evaluate** – Laden und Bewertung der Operabilität
- **3. Compare Vessels** – Vergleich verschiedener Schiffe/Lastfälle

5.5.2 RAO-Dataset auswählen

Oben im Panel befindet sich die Combobox **RAO Dataset**. Hier werden alle im Projekt-Speicher verfügbaren RAO-Datensätze aufgelistet. Die Einträge enthalten:

- **Tiefgang** der Analyse
- **Datum/Zeitstempel** der Erstellung
- **Dateiname** des NetCDF

Wichtig: Das ausgewählte RAO-Dataset muss zum aktuellen Schiffszustand passen.

5.5.3 Registerkarte 1: Compute / Save – Berechnung und Speicherung

Lastbedingung (Load Condition):

- Wird automatisch aus der LoadCondition-Spreadsheet gelesen
- Anzeige von **Draft [m]** und **GM [m]**

Kranauswahl:

- Auswahl des Krans aus der Dropdown-Liste
- Anzeige von **Hook position [m]** und **Static SWL [t]**

Scatter-Gitter:

Parameter	Standardwert	Bedeutung
Hs max [m]	6.0	Maximale signifikante Wellenhöhe
Hs step [m]	0.5	Schrittweite der Wellenhöhe
Tp max [s]	16.0	Maximale Spitzenperiode
Tp step [s]	1.0	Schrittweite der Periode
Direction step [deg]	30	Schrittweite der Wellenrichtung (für Worst-Case-Sweep)

Hinweis: Wenn bereits ein Scatter-Diagramm geladen ist (Registerkarte 2), werden dessen Bins automatisch übernommen – die manuellen Einstellungen werden dann ignoriert.

Berechnung starten:

Klicken Sie auf 📊 **Compute & Save Response Matrix**. Die Berechnung kann je nach Gittergröße und Richtungsanzahl **mehrere Minuten** dauern.

Nach erfolgreicher Berechnung:

- Die Antwortmatrix wird im Verzeichnis `~/StowMind/operability/` gespeichert
- Der Eintrag erscheint in der Liste der gespeicherten Matrizen
- Der Status wird im Textfeld angezeigt

5.5.4 Registerkarte 2: Evaluate – Bewertung der Operabilität

1. Gespeicherte Matrix laden:

- Wählen Sie einen Eintrag aus der Dropdown-Liste
- Klicken Sie auf **Load**
- Die Metadaten (Draft, GM, Speicherzeitpunkt, SWL) werden angezeigt

2. Scatter-Diagramm laden:

- Klicken Sie auf 📁 **Load Scatter CSV**
- Wählen Sie eine CSV-Datei im beschriebenen Format aus
- Der Status zeigt die Dimensionen des geladenen Scatter-Diagramms an

3. Operabilität bewerten:

- Geben Sie die **erforderliche Last [t]** ein (standardmäßig 80 t)
- Klicken Sie auf ⚙️ **Evaluate Operability**

Ergebnisse:

Das Textfeld zeigt:

text

```
Operability: 78.3%
Static SWL: 120.0t
Dynamic SWL at these conditions: 95.2t (worst-case reduction)
Required: 80.0t


Top limiting sea states (non-operable, by probability):
  Hs=2.5m Tp=6.0s  (p=1.85%)
  Hs=3.0m Tp=7.0s  (p=1.23%)
  Hs=3.5m Tp=8.0s  (p=0.67%)
  ...
```

Die **limitierenden Seegangszustände** sind diejenigen Zustände, die die Operabilität tatsächlich einschränken – nicht der absolut schlimmste Zustand, sondern diejenigen mit der höchsten Auftrittswahrscheinlichkeit, die nicht operabel sind.

Interpretation der Operabilität:

Operabilität	Bewertung	Bedeutung
> 95 %	Exzellent	Kran kann nahezu uneingeschränkt eingesetzt werden
85–95 %	Gut	Geringe Einschränkungen bei extremem Seegang
70–85 %	Befriedigend	Spürbare Einschränkungen – Betriebsplanung erforderlich
50–70 %	Ausreichend	Signifikante Einschränkungen – nur bei günstiger Wettervorhersage
< 50 %	Unzureichend	Kran ist für diesen Standort nicht geeignet

5.5.5 Registerkarte 3: Compare Vessels – Vergleich verschiedener Lastfälle

Diese Registerkarte ermöglicht den **Vergleich mehrerer gespeicherter Antwortmatrizen** hinsichtlich ihrer Operabilität unter dem gleichen Scatter-Diagramm und der gleichen erforderlichen Last.

Ablauf:

1. **Einträge auswählen:** Wählen Sie in der Liste die zu vergleichenden Einträge aus (Mehrfachauswahl mit Strg+Klick)
2. **Aktualisieren:** Klicken Sie auf ↻ **Refresh List**, um die Liste zu aktualisieren
3. **Vergleich starten:** Klicken Sie auf 🏆 **Compare Selected**

Ergebnis:

Die Tabelle zeigt:

Vessel / Load Case	Operability %
MV Nordwind / Draft 8.5m GM 1.8m	82.3 %
MV Nordwind / Draft 8.5m GM 2.4m	87.1 %
MV Ostwind / Draft 9.2m GM 2.0m	79.5 %

Anwendungsbeispiele:

- Vergleich verschiedener **Ballastzustände** (unterschiedliche GM)
- Vergleich verschiedener **Kränen** am selben Schiff
- Vergleich verschiedener **Schiffe** für eine bestimmte Operation

---

5.6 Ergebnisse und Interpretation

5.6.1 Die Antwortmatrix – az(Hs,Tp)az(Hs,Tp)

Die Antwortmatrix kann als **Heatmap** visualisiert werden (nicht im Panel enthalten, aber mit eigenem Skript möglich):

text

```
Tp [s]  →  3  4  5  6  7  8  9 10 11 12 13 14 15 16
Hs [m]  ↓
0.5       0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 0.9 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2
1.0       0.9 1.1 1.3 1.5 1.6 1.7 1.6 1.5 1.3 1.1 0.9 0.7 0.5 0.4
1.5       1.3 1.6 1.9 2.2 2.4 2.5 2.4 2.2 1.9 1.6 1.3 1.0 0.8 0.6
2.0       1.8 2.1 2.5 2.9 3.2 3.3 3.2 2.9 2.5 2.1 1.8 1.4 1.0 0.8
2.5       2.2 2.6 3.1 3.6 4.0 4.1 4.0 3.6 3.1 2.6 2.2 1.7 1.3 1.0
3.0       2.6 3.1 3.7 4.3 4.8 4.9 4.8 4.3 3.7 3.1 2.6 2.0 1.5 1.2
3.5       3.0 3.6 4.3 5.0 5.6 5.7 5.6 5.0 4.3 3.6 3.0 2.3 1.8 1.4
...
```

Beobachtungen:

- Die höchsten Beschleunigungen treten bei **mittleren Perioden** (5–9 s) auf – das ist die typische Resonanzregion
- Bei sehr langen Perioden (> 12 s) nehmen die Beschleunigungen ab (das Schiff folgt den Wellen)
- Die Beschleunigung skaliert **linear** mit HsHs

5.6.2 Dynamische SWL und Operabilitätskarte

Aus der Antwortmatrix und der statischen SWL ergibt sich die **dynamische SWL**:

SWLdyn(Hs,Tp)=SWLstat · gg+az(Hs,Tp)SWLdyn(Hs,Tp)=SWLstat · g+az(Hs,Tp)g

Die **Operabilitätskarte** zeigt für jeden Seegangszustand, ob die erforderliche Last gehoben werden kann:

text

```
Tp [s]  →  3  4  5  6  7  8  9 10 11 12 13 14 15 16
Hs [m]  ↓
0.5        ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅
1.0        ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅
1.5        ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅
2.0        ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅
2.5        ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅
3.0        ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅
3.5        ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ❌ ❌ ❌ ❌ ❌ ❌
4.0        ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ✅ ❌ ❌ ❌ ❌ ❌ ❌ ❌ ❌
```

5.6.3 Limitierende Seegangszustände

Die Ausgabe der limitierenden Seegangszustände ist besonders wertvoll für die **operative Planung**:

text

```
Top limiting sea states (non-operable, by probability):
  Hs=2.5m Tp=6.0s  (p=1.85%)
  Hs=3.0m Tp=7.0s  (p=1.23%)
  Hs=3.5m Tp=8.0s  (p=0.67%)
```

Interpretation:

- Der Zustand Hs=2.5 m,Tp=6.0 sHs=2.5m,Tp=6.0s tritt mit 1.85 % Wahrscheinlichkeit auf und ist **nicht operabel**
- Dieser Zustand ist der **größte Einzelbeitrag** zur Nicht-Operabilität
- Maßnahmen zur Verbesserung sollten auf diesen Zustand abzielen (z. B. Verringerung der Last, andere Kranposition)

Wichtiger Unterschied zum Worst-Case:

- Der **Worst-Case** (Hs=6.0 m,Tp=8.0 sHs=6.0m,Tp=8.0s) tritt vielleicht nur mit 0.01 % auf

- Der **limitierende Zustand** ist der mit der **höchsten Wahrscheinlichkeit**, der nicht operabel ist – er hat den größten Einfluss auf die Gesamtoperabilität

5.6.4 Einfluss des Schiffs- und Lastzustands

Der **dynamische Einfluss von GM und Tiefgang** auf die Operabilität:

Zustand	Tiefgang [m]	GM [m]	azaz bei Hs=3 m,Tp=8 sHs=3m,Tp=8s	Operabilität
Ballast	5.0	2.5	3.2 m/s²	82 %
Halbvoll	7.5	1.8	3.8 m/s²	74 %
Voll	9.5	1.2	4.5 m/s²	61 %

Interpretation:

- **Ballastzustand:** Höheres GM → geringere Rollbewegungen → niedrigere Beschleunigungen → höhere Operabilität
- **Vollzustand:** Niedrigeres GM → stärkere Rollbewegungen → höhere Beschleunigungen → geringere Operabilität
- Die **Lastbedingung** hat einen signifikanten Einfluss auf die Einsatzfähigkeit

---

5.7 Fehlerbehebung und Qualitätssicherung

5.7.1 Häufige Fehler und Lösungen

Symptom	Ursache	Lösung
"No RAO dataset – run Capytaine first"	Kein RAO im Projekt-Speicher	Capytaine-Analyse durchführen
"No hook position – select a crane"	Kein Kran im Dokument oder keine Hakenposition	Kranobjekt erstellen oder LoadCondition prüfen
"Scatter interpolation failed"	Scatter-Gitter weicht von Antwortmatrix ab	Scatter mit gleichen Bins erstellen oder Interpolation zulassen
"No valid entries loaded"	Ausgewählte Matrizen fehlen oder beschädigt	Matrix neu berechnen
Fingerabdruck stimmt nicht überein	Hull/Lastbedingung geändert	Antwortmatrix neu berechnen
Berechnung sehr langsam	Zu große Gitter oder zu viele Richtungen	Hs/Tp-Step erhöhen oder Richtungsauflösung reduzieren
Operabilität = 0 %	SWL zu niedrig oder Last zu hoch	Größeren Kran oder geringere Last wählen

5.7.2 Plausibilitätsprüfungen

Das System führt während der Berechnung folgende Checks durch:

- **RAO-Integrität:** Vorhandensein von 'RAO' oder 'RAO_real'/'RAO_imag'
- **Hakenposition:** Innerhalb der Schiffsabmessungen?
- **Scatter-Normalisierung:** Summe der Wahrscheinlichkeiten = 1 (nach Normalisierung)
- **Dynamische SWL:** Nicht negativ und plausibel (SWL_reduziert ≤ SWL_statisch)
- **Fingerabdruck:** Erkennung von Änderungen an Hull oder Lastbedingung

5.7.3 Fingerabdruck – Erkennung von Änderungen

Der Fingerabdruck wird aus folgenden Größen gebildet:

- Hull-Volumen
- Hull-Abmessungen (X-, Y-, Z-Länge)
- Tiefgang [m]
- GM [m]

Bei Änderungen (z. B. Modell geändert, Lastbedingung aktualisiert) wird die gespeicherte Matrix als **veraltet** markiert.

Der Fingerabdruck enthält seit Version X auch einen Hash der `appendages.json`. Wenn die viskose Konfiguration geändert wird (anderer `cd`, andere `height`, andere `zeta_a`), ändert sich der Fingerabdruck, und die gespeicherte Antwortmatrix wird als veraltet markiert.

Beim Laden einer veralteten Matrix erscheint die Warnung:

WARNING: stored matrix fingerprint does not match current appendages config.
Please re-run compute_response_matrix() before trusting this entry. Das System warnt beim Laden:

text

```
⚠ WARNING: stored matrix fingerprint does not match current hull/draft/GM.
   Please re-run compute_response_matrix() before trusting this entry.
```

5.7.4 Hinweise zur Ergebnisqualität

- Die **Antwortmatrix** ist nur für die **spezifische Lastbedingung** (Draft, GM, Trim) gültig
- Die **Scatter-Statistik** muss für den **Standort** repräsentativ sein
- Die **Worst-Case-Richtungsmittelung** ist konservativ – für standortspezifische Richtungsstatistiken ist der Mittelwert besser geeignet
- Die **Driftkräfte** werden in der Operabilitätsanalyse nicht berücksichtigt (nur vertikale Beschleunigung)

5.8 Anhang: Technische Referenz

5.8.1 Wichtige Funktionen

Funktion	Parameter	Rückgabe	Beschreibung
`compute_response_matrix()`	Dataset, Hook-Pos, Hs/Tp-Bins, Richtungen, Modus	Antwortmatrix-Dict	**Teuer!** Berechnet az(Hs,Tp)az(Hs,Tp)
`evaluate_operability()`	Antwortmatrix, SWL, Last	Operabilitäts-Dict	**Günstig!** Bewertet einzelne Matrix
`apply_wave_scatter()`	Evaluate-Result, Scatter-P	Operabilitätsprozent	**Günstig!** Statistische Auswertung
`interpolate_scatter_to_response_grid()`	Scatter-Grid, Antwort-Gitter	Interpoliertes P	Interpoliert Scatter auf Antwortgitter
`compare_vessel_operability()`	Liste von Einträgen, Scatter, Last	Ranking-Liste	Vergleicht mehrere Lastfälle
`save_response_matrix()`	Antwortmatrix, Metadaten	Key	Speichert Matrix mit Index
`load_response_matrix()`	Vessel-Name, Load-Case	(Matrix, Metadaten)	Lädt gespeicherte Matrix
`list_entries()`	optional: Vessel-Name	Index-Einträge	Listet alle gespeicherten Matrizen
`check_stale()`	Vessel-Name, Load-Case, Hull, Draft, GM	Bool	Prüft auf Veraltung

5.8.2 Datenstrukturen

Antwortmatrix (response_matrix):

python

```
{
    'Hs_bins': array([0.5, 1.0, 1.5, ...]),          # m
    'Tp_bins': array([3.0, 4.0, 5.0, ...]),          # s
    'directions_deg': array([0, 30, 60, ...]),       # °
    'a_z_sig': ndarray(n_Hs, n_Tp),                  # m/s²
```

```
    'governing_direction_deg': ndarray(n_Hs, n_Tp),   # ° (bei worst_case)
    'direction_mode': 'worst_case' | 'mean',
    'spectrum': 'jonswap' | 'pm',
    'gamma': 3.3,
}
```

Operabilitätsergebnis (evaluate_operability):

python

```
{
    'Hs_bins': array([...]),
    'Tp_bins': array([...]),
    'dyn_swl_t': ndarray(n_Hs, n_Tp),                 # t
    'reduction_factor': ndarray(n_Hs, n_Tp),          # g/(g+a_z)
    'operable': ndarray(n_Hs, n_Tp, dtype=bool),
    'swl_static': 120.0,                               # t
    'required_load_t': 80.0,                           # t
}
```

Scatter-Auswertung (apply_wave_scatter):

python

```
{
    'operability_pct': 78.3,                          # %
    'covered_prob': 0.783,                            # normale
Wahrscheinlichkeit
    'total_prob': 1.0,                                # Summe nach
Normalisierung
    'excluded_cells': [                               # Top 10 limitierende
Zustände
        (2.5, 6.0, 0.0185),
        (3.0, 7.0, 0.0123),
        ...
    ]
}
```

Index-Eintrag (index.json):

json

```
{
  "MV_Nordwind__Draft_8.50m_GM_1.80m": {
```

```
    "vessel_name": "MV Nordwind",
    "load_case_label": "Draft_8.50m_GM_1.80m",
    "nc_path":
"/home/user/StowMind/operability/MV_Nordwind__Draft_8.50m_GM_1.80m.nc",
    "source_nc_path": "/home/user/StowMind/project/2026-08-14_RAO.nc",
    "hook_pos_m": [4.8, -1.5, 12.5],
    "swl_static_t": 120.0,
    "draft_m": 8.5,
    "gm_m": 1.8,
    "hull_fingerprint": "a3f4e7b2c1d9",
    "notes": "worst-case direction sweep, 30 deg steps",
    "saved_at": "2026-08-14 15:30:22"
  }
}
```


5.8.3 Abhängigkeiten

Modul/Bibliothek	Verwendung	Bemerkung
FreeCAD	CAD-Datenzugriff	LoadCondition, Kranobjekte, Hull-Shape
numpy	Numerische Berechnungen	Arrays, Vektorisierung
xarray	NetCDF-I/O	Speicherung und Laden der Antwortmatrizen
scipy	Interpolation	RegularGridInterpolator für Scatter-Interpolation
matplotlib	Optionale Plots	Heatmaps der Antwortmatrix (nicht im Panel)
CSV	Eingabe	Scatter-Diagramm-Import
JSON	Metadaten	Index-Datei für gespeicherte Matrizen
hashlib	Fingerabdruck	SHA1-Hash für Änderungserkennung
CraneAnalysis	Kernberechnungen	RAO-Extraktion, Spektralanalyse
CapytaineTools	LoadCondition	Lesen von Draft, GM, Masse
project_storage	RAO-Zugriff	Laden von RAO-Datasets

5.8.4 Speicherpfad und Konfiguration

Konstante	Wert	Bedeutung
`STORAGE_DIR`	`~/StowMind/operability/`	Basisverzeichnis für gespeicherte Matrizen
`INDEX_PATH`	`~/StowMind/operability/index.json`	Metadaten-Index
NetCDF-Datei	`<vessel>__<load_case>.nc`	Antwortmatrix
Scatter-CSV	Benutzerdefiniert	Eingabe für Scatter-Diagramm

5.9 Praktische Anwendungshinweise

5.9.1 Workflow für eine Operabilitätsanalyse

1. **Vorbereitung:**
    - Schiffsmodell in FreeCAD erstellen oder laden
    - LoadCondition-Spreadsheet mit Schiffsdaten (Draft, GM, Masse)
    - Capytaine-Analyse durchführen (RAO-Dataset erzeugen)
    - Kranobjekt im Dokument erstellen oder vorhandenen Kran verwenden
2. **Scatter-Diagramm beschaffen:**
    - Standortspezifische Statistik beschaffen (z. B. GONO, DNV, Messungen)
    - Im CSV-Format aufbereiten (siehe Abschnitt 5.4.2)
3. **Antwortmatrix berechnen (einmalig):**
    - Operation-TaskPanel öffnen
    - RAO-Dataset auswählen
    - Kran auswählen (Hakenposition und SWL werden übernommen)
    - Gitterparameter einstellen (oder Scatter-Diagramm laden)
    - 📊 **Compute & Save Response Matrix** ausführen
    - Warten – Berechnung kann mehrere Minuten dauern
4. **Operabilität bewerten (beliebig oft):**
    - Registerkarte **2. Evaluate**
    - Gespeicherte Matrix laden
    - Scatter-Diagramm laden (falls nicht bereits beim Compute verwendet)
    - Erforderliche Last eingeben
    - ⚙️ **Evaluate Operability** ausführen
    - Operabilitätsprozent und limitierende Zustände prüfen
5. **Vergleich und Optimierung:**
    - Registerkarte **3. Compare Vessels**
    - Verschiedene Lastfälle (Ballast, Voll) vergleichen
    - Verschiedene Kränen oder Hakenpositionen vergleichen

- Operabilitätsergebnisse für Entscheidungen nutzen

5.9.2 Empfehlungen für die Praxis

- **Gitterauflösung:**
  - HsHs-Schrittweite: 0.5 m für grobe Übersicht, 0.25 m für detaillierte Analyse
  - TpTp-Schrittweite: 1.0 s für grobe Übersicht, 0.5 s für detaillierte Analyse
  - Richtungsschrittweite: 30° für Übersicht, 15° für detaillierte Analyse
- **Scatter-Diagramm:**
  - Verwenden Sie repräsentative Standortstatistiken
  - Aktualisieren Sie die Statistik bei Änderungen des Einsatzgebiets
  - Berücksichtigen Sie saisonale Schwankungen
- **Worst-Case vs. Mittelwert:**
  - Verwenden Sie **Worst-Case** für konservative Planungen (wenn die Wellenrichtung nicht festgelegt ist)
  - Verwenden Sie **Mittelwert** für standortspezifische Analysen mit Richtungsstatistik
- **Operabilitätsziele:**
  - Für planmäßige Operationen: > 85 % angestrebt
  - Für kritische Operationen: > 95 % angestrebt
  - Für Notfalloperationen: > 70 % akzeptabel

5.9.3 Typische Fehlerquellen und Vermeidung

Fehlerquelle	Vermeidung
Falsche RAO-Draft	RAO-Dataset mit passendem Tiefgang auswählen
Falsche Hakenposition	Hakenposition aus Kranobjekt oder LoadCondition prüfen
Falsche SWL	SWL aus Kranobjekt oder Laststufen prüfen
Scatter-Gitter mismatch	Scatter mit gleichen Bins erstellen oder Interpolation zulassen
Veraltete Antwortmatrix	Bei Änderungen an Hull oder Lastbedingung neu berechnen
Unrealistische Operabilität	Ergebnis mit Erfahrungswerten und Betriebsgrenzen abgleichen

5.9.4 Integration mit anderen Modulen

Die Operabilitätsanalyse ist die **Klammer** zwischen:

- **Capytaine (Kapitel 1):** Liefert die RAOs als Eingabe
- **CraneAnalysis (Kapitel 2):** Liefert die Beschleunigungsübertragung am Haken

- **MooringAnalysis (Kapitel 3):** Liefert die statische Verschiebung (nicht direkt verwendet, aber für Vollständigkeit relevant)
- **POI (Kapitel 4):** Analogie – Beschleunigungen an beliebigen Punkten

Die **Antwortmatrix** ist das Bindeglied zwischen **hydrodynamischer Analyse** (teuer) und **operativer Entscheidungsfindung** (günstig).

5.10 Schlussbemerkung

Die Einsatzbereitschaftsanalyse (Operability Analysis) stellt eine **strategische Erweiterung** der StowMind-Suite dar. Sie überführt die Ergebnisse der hydrodynamischen Analyse in eine **praktische, entscheidungsrelevante Kennzahl**: die prozentuale Einsatzfähigkeit eines Krans unter realen Seegangsbedingungen.

Die **kostengetrennte Architektur** (teure Berechnung einmalig, günstige Bewertung beliebig oft) ermöglicht:

- **Schnelle "What-If"-Analysen** – verschiedene Lasten, Kränen oder Scatter-Diagramme ohne Neuberechnung
- **Vergleich verschiedener Lastfälle** – Ballast vs. Voll, unterschiedliche GM
- **Vergleich verschiedener Schiffe** – für Ausschreibungen oder Flottenmanagement
- **Identifikation der tatsächlichen Limitierungen** – nicht der extremste Seegang, sondern die wahrscheinlichsten nicht-operablen Zustände

Die **Persistenz der Antwortmatrizen** stellt sicher, dass einmal investierte Rechenzeit nicht verloren geht – die Ergebnisse stehen für verschiedene Szenarien und Benutzer zur Verfügung.

Mit der Möglichkeit, Scatter-Diagramme zu importieren und die Operabilität für beliebige Lasten zu berechnen, bietet die Einsatzbereitschaftsanalyse ein **leistungsfähiges Werkzeug** für die **operative Planung, die Auswahl von Kränen und die Bewertung von Betriebsgrenzen**.

Anhang A: Appendages-Konfiguration (appendages.json)

A.1 Dateiformat

```
{
  "bilge_keels": [
    {
      "x0": -45.0,
      "x1": 25.0,
      "y": 8.5,
      "z": -4.0,
      "height": 0.6,
      "cd": 5.0,
      "cm": 1.0,
      "n_seg": 8,
      "mirror": true
    }
  ],
  "fins": [
    {
      "name": "Rudder",
      "x": -50.0,
      "z": -3.0,
      "axis": "vertical",
      "length": 5.0,
      "chord": 3.0,
      "clalpha": 0.0,
      "cd": 1.0,
      "cm": 1.0,
      "r": 1.0
    }
  ],
  "zeta_a": 1.0,
  "model": "regular",
  "seastate_Hs": 2.0,
  "seastate_Tp": 8.0
}
```

A.2 Parameterbeschreibung

Bilge Keels:

Feld	Einheit	Bedeutung	Empfohlener Bereich
x0, x1	m	Anfangs-/Endposition in Längsrichtung (Midship = 0)	−0.35·LOA bis +0.20·LOA
y	m	Transversale Position (auf Rumpfoberfläche)	0.85·(B/2)
z	m	Vertikale Position (Bilge-Knick)	0.65·Draft
height	m	Kielbreite (radial abstehend)	0.3–0.6
cd	–	Querwiderstandsbeiwert	4.0–6.0

Feld	Einheit	Bedeutung	Empfohlener Bereich
cm	–	Zusatzmassenbeiwert	1.0
n_seg	–	Anzahl Segmente pro Seite	6–10
mirror	bool	Beide Seiten (true) oder nur eine (false)	true

Fins/Rudders:

Feld	Einheit	Bedeutung	Empfohlener Bereich
name	–	Bezeichnung	„Rudder", „Fin_Port" etc.
x	m	Kraftangriffspunkt (1/4-Sehne)	−0.48·LOA (Ruder)
z	m	Vertikale Position	−0.5·Draft
axis	–	`vertical` (Ruder) oder `horizontal` (Flosse)	vertical
length	m	Spannweite	3–6
chord	m	Sehne	2–4
clalpha	1/rad	Auftriebsgradient	0 (ohne Fahrt) oder 2π (mit Fahrt)
cd	–	Querwiderstandsbeiwert	1.0

A.3 Wo die Datei liegt

Die `appendages.json` wird **im Projektordner** gespeichert (neben der `.FCStd`-Datei). Wenn keine Datei existiert, wird beim ersten Öffnen des Dialogs die Standard-Konfiguration verwendet und beim Speichern die Datei angelegt.

Nicht im Modulordner — das ist ein häufiger Fehler. Der Modulordner enthält nur die Python-Dateien. Die `appendages.json` gehört zum jeweiligen Projekt.

A.4 Konfiguration per Konsole prüfen

```
import FreeCAD as App
from freecad.stowmind.stowmindSeakeeping import appendages as APP
cfg = APP.load(doc=App.ActiveDocument)
print(cfg)
```

Wenn dort andere Werte stehen als erwartet, ist entweder die falsche Datei geladen (Modulordner statt Projektordner) oder die Änderung wurde nicht gespeichert.

Zusammenfassung der Änderungen

#	Abschnitt	Art	Inhalt
1	1.3.2	Erweiterung	Viskose Dämpfung als Ergänzung zur Potentialtheorie
2	1.3.5	**Neu**	Trim-Berechnung aus B11/C11/D11
3	1.4.2	Erweiterung	B11/C11/D11 in der LoadCondition-Tabelle
4	1.5.3	Erweiterung	Appendages-Parameter und `zeta_a`-Richtwerte
5	1.5.6	**Neu**	Dialog „Configure appendages" und „Apply viscous damping"
6	1.6.3	Erweiterung	RAO-Plot mit zwei Kurven (Potential + viskos)
7	1.7.2	Erweiterung	PDF-Report mit viskoser Konfiguration
8	1.9	**Neu**	Physikalische Grundlagen und Praxis der viskosen Dämpfung
9	2.4.5	**Neu**	Crane: Verwendung der viskosen RAO
10	3.4.5	**Neu**	Mooring: Verwendung der viskosen RAO
11	5.4.4	**Neu**	Operability: Verwendung der viskosen RAO
12	5.7.3	Erweiterung	Appendages-Hash im Fingerabdruck
13	Anhang A	**Neu**	Appendages-JSON-Format

Die Abschnitte 2.4.5, 3.4.5 und 5.4.4 sind die **wichtigsten Neuerungen** — sie dokumentieren, dass die viskose RAO als Grundlage für alle nachgelagerten Module (Crane, Mooring, Operability) verwendet werden kann. Das war vorher nicht möglich und ist jetzt der zentrale Mehrwert des Moduls.