CFD-Simulation eines Laser-Segelboots

Bericht

31. Mai 2017

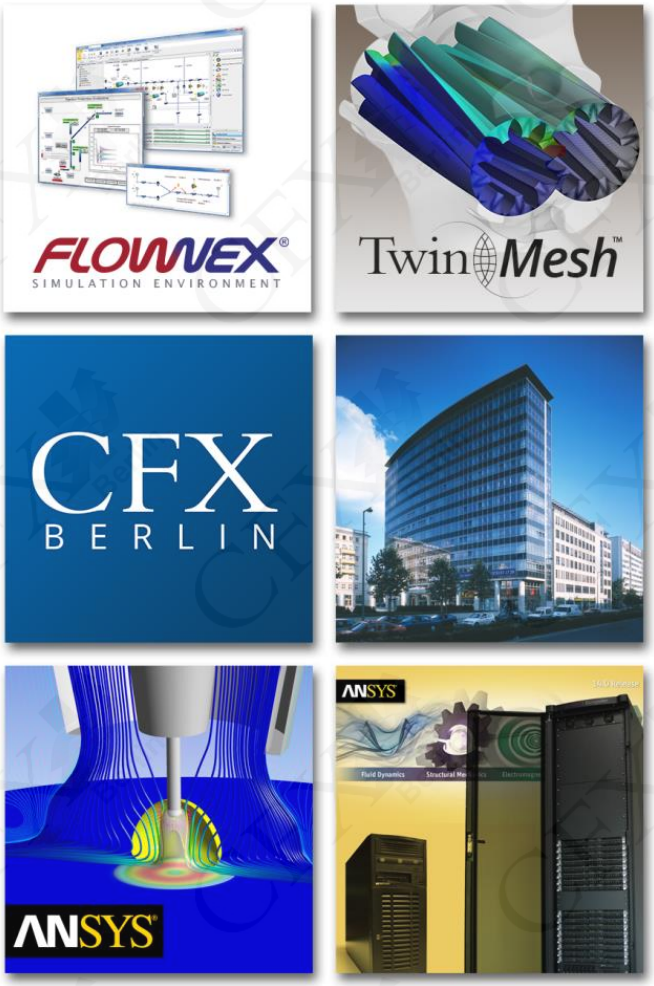
Dr. Andreas Spille-Kohoff
CFX Berlin Software GmbH
Karl-Marx-Allee 90 A
10243 Berlin

CFX Berlin Software GmbH

Simulationskompetenz aus Berlin

- CFX Berlin bietet seit 1997 als Partner von ANSYS, Inc. und M-Tech Industrial Lösungen und Simulationssoftware für:
  - ✓ Strömungsmechanik & Thermodynamik
  - ✓ Elektromechanik
  - ✓ Strukturmechanik
  - ✓ Gekoppelte physikalische Effekte

- CFX Berlin-Geschäftsfelder:
  - ✓ ANSYS®, TwinMesh™, Flownex®SE
  - ✓ Hardware
  - ✓ Berechnung & Optimierung
  - ✓ Beratung & Schulung
  - ✓ Forschung & Entwicklung



CFX Berlin Software GmbH

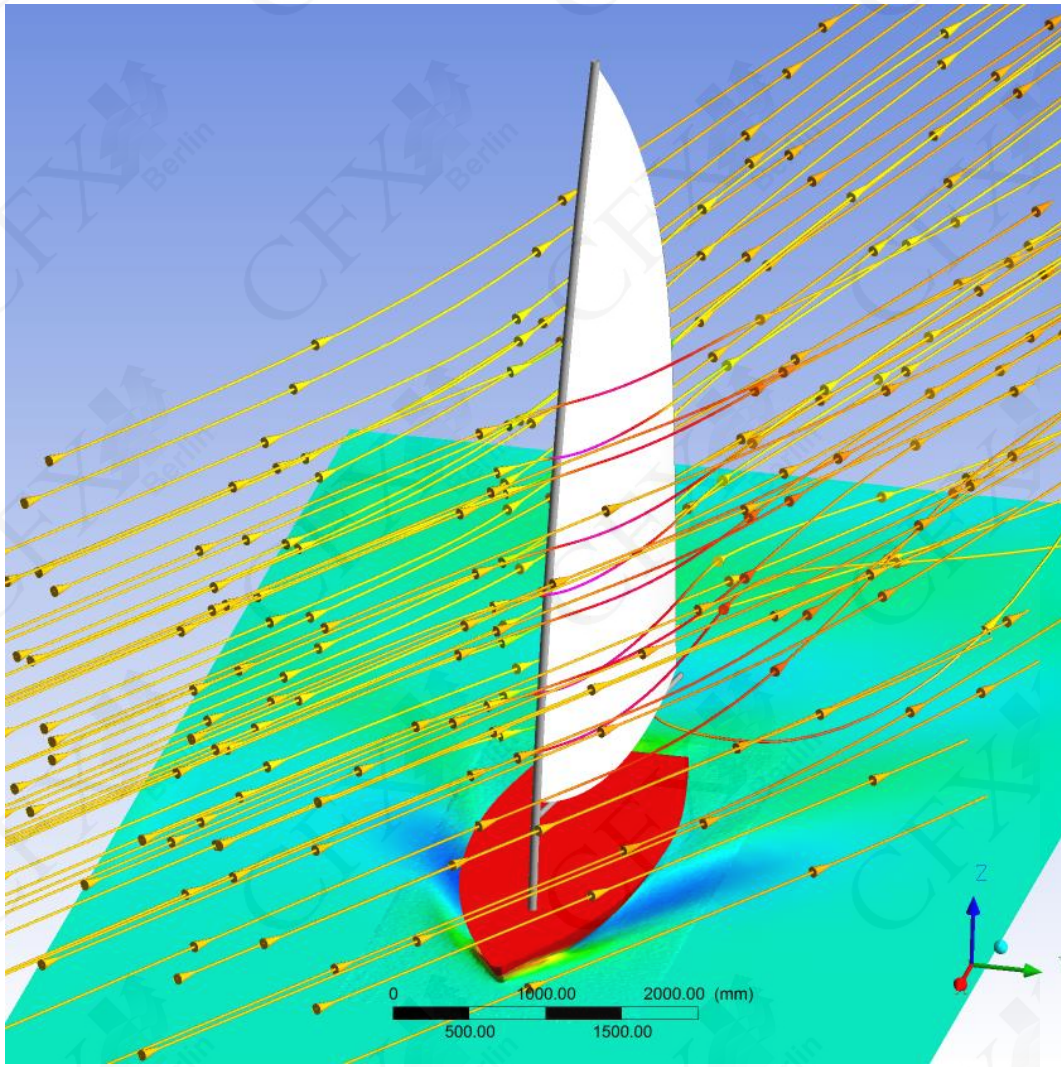
Schlüsselfertige Lösungen für Sie

- Wie bieten Ihnen schlüsselfertige Simulationslösungen, bestehend aus:
  - ✓ Softwarelizenzen,
  - ✓ optimal abgestimmter Hardware,
  - ✓ individuellem Einarbeitungskonzept,
  - ✓ persönlichem Ansprechpartner für Support & Anwendungsberatung.

- Wir unterstützen Sie schon vorher mit:
  - ✓ Prozess- & Bedarfsanalyse, Lastenhefterstellung,
  - ✓ Entwicklung von optimalen Lösungen für Ihr Unternehmen,
  - ✓ Vorbereitung, Begleitung & Auswertung von Testinstallationen,
  - ✓ Erarbeitung individuell abgestimmter Schulungsmaßnahmen.

Inhalt

- Aufgabenstellung
- Berechnungsmodell
  - Geometrie
  - Vernetzung
  - Randbedingungen
  - Modelle und Lösereinstellungen
- Berechnung
  - Voruntersuchung der Windrichtung
  - Ergebnisse für
    - Wasseroberfläche und Benetzung
    - Wasser- und Luftströmung
    - Druck auf dem Segel
    - Kräfte und Momente auf das Boot
- Wechselwirkung zweier Boote
- Zusammenfassung
- Ausblick



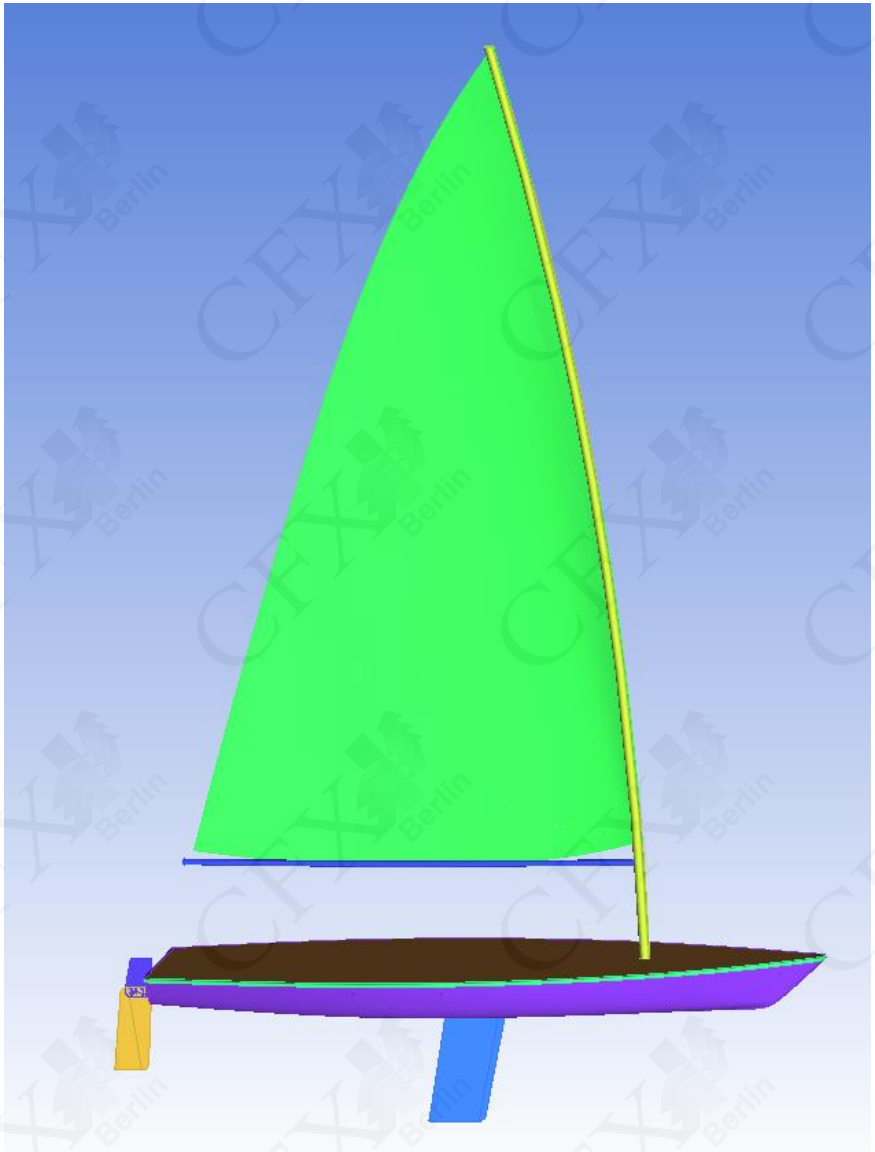
Aufgabenstellung

- CFD-Simulation eines Laser-Segelboots
  - Simulation der Wasserumströmung und Bestimmung von Auftrieb und Strömungswiderstand
  - Simulation der Luftumströmung und Bestimmung von Vortrieb und Kippmoment
  - Bestimmung der Wasserspiegellage und Rumpfbenetzung
- CFD-Simulation der Wechselwirkung zweier Segelboote

- Vereinfachungen in diesen Simulationen:
  - Lage des Boots im Wasser fest : kein Rollen, Stampfen, Gieren
  - Form des Boots fest: keine Anpassung der Ruderlage, keine Drehung oder Verformung des Segels
  - glatte Einströmung: keine einlaufenden Wellen
  - vereinfachte Geometrie: kein Segler, kein Bootsinnenraum, keine Leinen, keine Ruderhalterung

Berechnungsmodelle

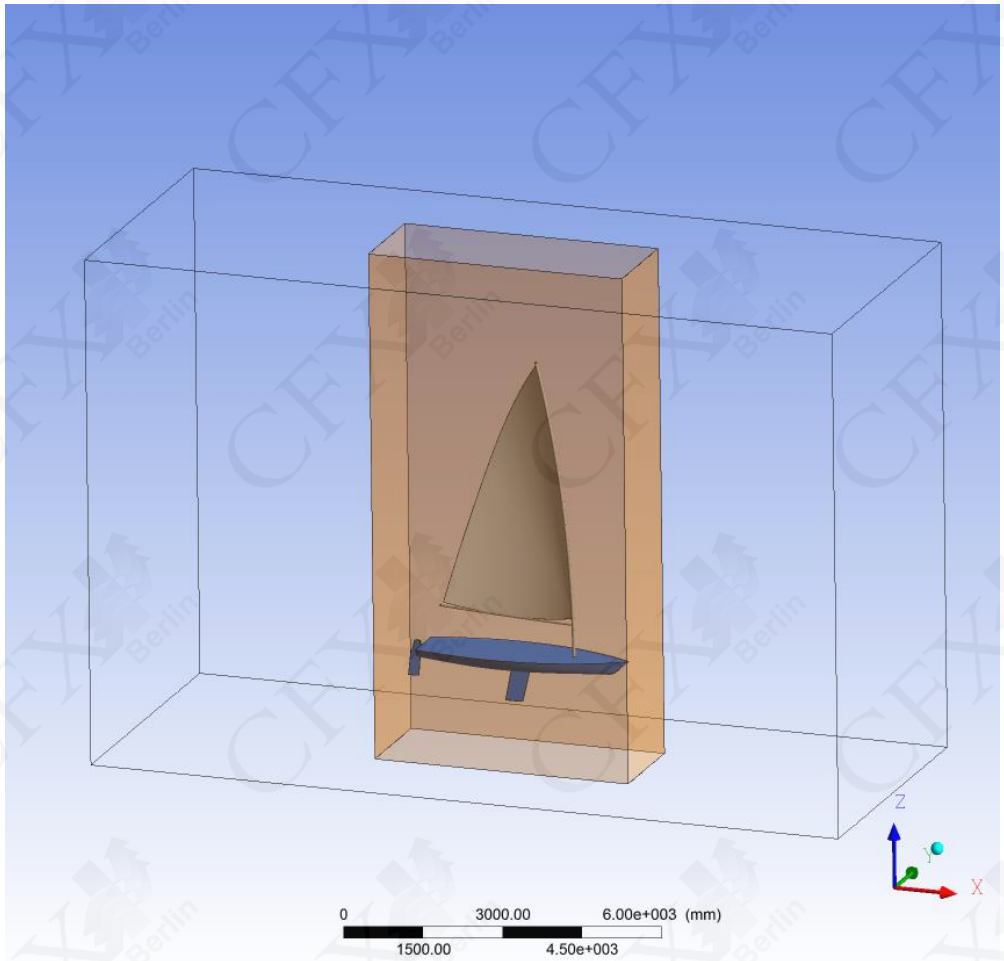
- Geometrie
  - IGS-Datei Laser.igs von https://www.boatdesign.net/threads/3d-model-of-a-laser-sailboat.3589/, bereitgestellt von DaveB am 29.4.2004, ohne Lizenzangaben
- Geometriemodifikationen
  - ANSYS SpaceClaim DirectModeler
  - Zusammenfassung von Flächen
  - Aufdickung der nur als Flächen vorhandenen Teile Ruder und Schwert (auf 10 mm Dicke) und Segel (auf 4 mm Dicke)
  - Drehung von Mast, Segel und Baum um 8° nach Backbord
  - Hinzufügen des Fluidraums um das Boot, Extraktion des Fluidraums



Berechnungsmodelle

- Geometrie
  - Segelboot mit Teilflächen
    - Rumpf (L 4,13 m x B 1,29 m), Ruder, Schwert
    - Mast (H vom Rumpf 5,71 m), Baum, Segel (Fläche 8,4 m²)
    - eingebettet in inneren Quader mit L 5 m x B 2 m x H 10 m für Tetraeder-Prismen-Gitter
  - eingebettet in äußeren Quader mit L 15 m x B 6 m x H 10 m für Hexaeder-Gitter

Ansicht der Geometrie mit Segelboot, innerem und äußerem Quader:



Berechnungsmodelle

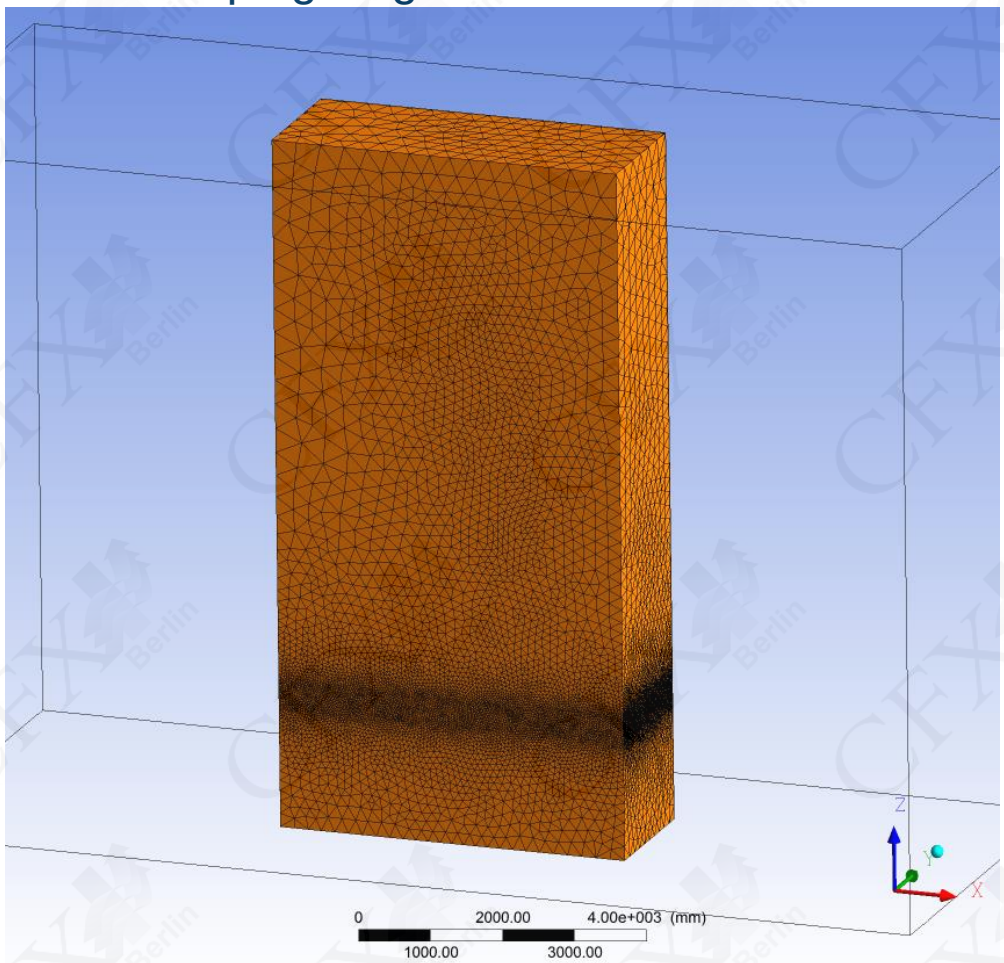
- Vernetzung
  - Art der Vernetzung
    - unstrukturierte Vernetzung mit Tetraedern und Prismen um das Segelboot
    - strukturierte Vernetzung mit Hexaedern in Umgebung
  - Verwendete Programme
    - ANSYS Meshing
    - ANSYS ICEM CFD Hexa
  - Elementstatistik
    - Knoten: 1 831 171
    - Elemente: 8 048 179
      - ✓ Tetraeder 6 982 489
      - ✓ Prismen 938 366
      - ✓ Pyramiden 670
      - ✓ Hexaeder 126 654
    - Grenzschichtauflösung:
      - ✓ 1.5 mm am Rumpf
      - ✓ 10 mm am Segel

Hexaedergitter mit Verfeinerung in Wasserspiegellage:

Berechnungsmodelle

- Vernetzung
  - Art der Vernetzung
    - unstrukturierte Vernetzung mit Tetraedern und Prismen um das Segelboot
    - strukturierte Vernetzung mit Hexaedern in Umgebung
  - Verwendete Programme
    - ANSYS Meshing
    - ANSYS ICEM CFD Hexa
  - Elementstatistik
    - Knoten: 1 831 171
    - Elemente: 8 048 179
      - ✓ Tetraeder 6 982 489
      - ✓ Prismen 938 366
      - ✓ Pyramiden 670
      - ✓ Hexaeder 126 654
    - Grenzschichtauflösung:
      - ✓ 1.5 mm am Rumpf
      - ✓ 10 mm am Segel

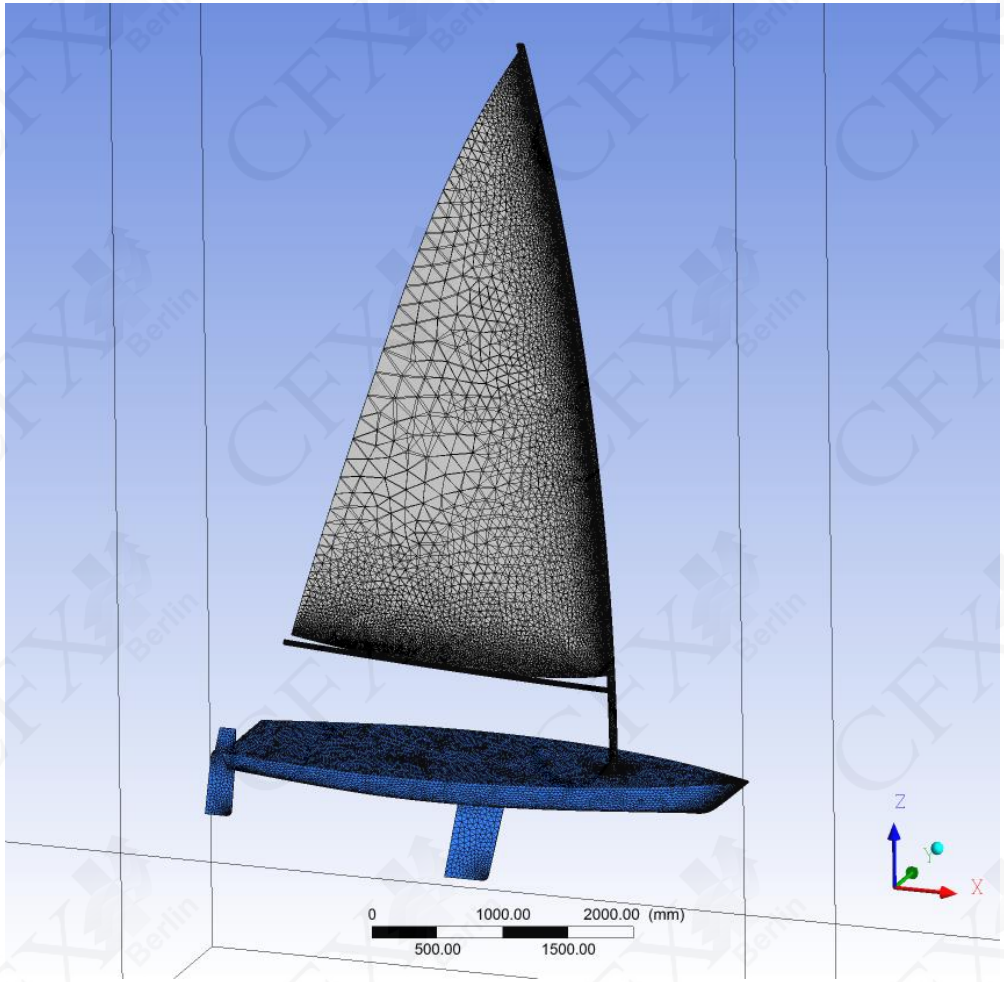
Tetraedergitter mit Verfeinerung in Wasserspiegellage:



Berechnungsmodelle

- Vernetzung
  - Art der Vernetzung
    - unstrukturierte Vernetzung mit Tetraedern und Prismen um das Segelboot
    - strukturierte Vernetzung mit Hexaedern in Umgebung
  - Verwendete Programme
    - ANSYS Meshing
    - ANSYS ICEM CFD Hexa
  - Elementstatistik
    - Knoten: 1 831 171
    - Elemente: 8 048 179
      - ✓ Tetraeder 6 982 489
      - ✓ Prismen 938 366
      - ✓ Pyramiden 670
      - ✓ Hexaeder 126 654
    - Grenzschichtauflösung:
      - ✓ 1.5 mm am Rumpf
      - ✓ 10 mm am Segel

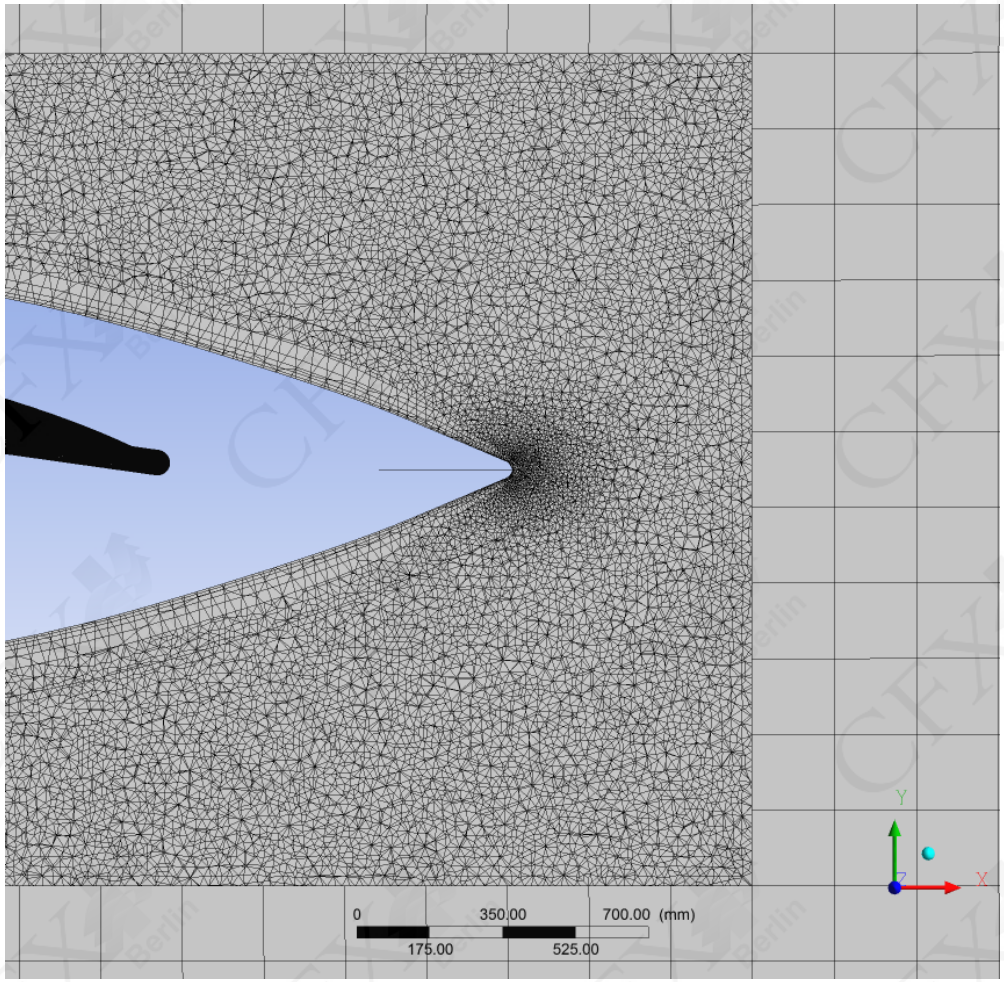
Tetraedergitter auf dem Segelboot, verfeinert an Krümmungen und Details:



Berechnungsmodelle

- Vernetzung
  - Art der Vernetzung
    - unstrukturierte Vernetzung mit Tetraedern und Prismen um das Segelboot
    - strukturierte Vernetzung mit Hexaedern in Umgebung
  - Verwendete Programme
    - ANSYS Meshing
    - ANSYS ICEM CFD Hexa
  - Elementstatistik
    - Knoten: 1 831 171
    - Elemente: 8 048 179
      - ✓ Tetraeder 6 982 489
      - ✓ Prismen 938 366
      - ✓ Pyramiden 670
      - ✓ Hexaeder 126 654
    - Grenzschichtauflösung:
      - ✓ 1.5 mm am Rumpf
      - ✓ 10 mm am Segel

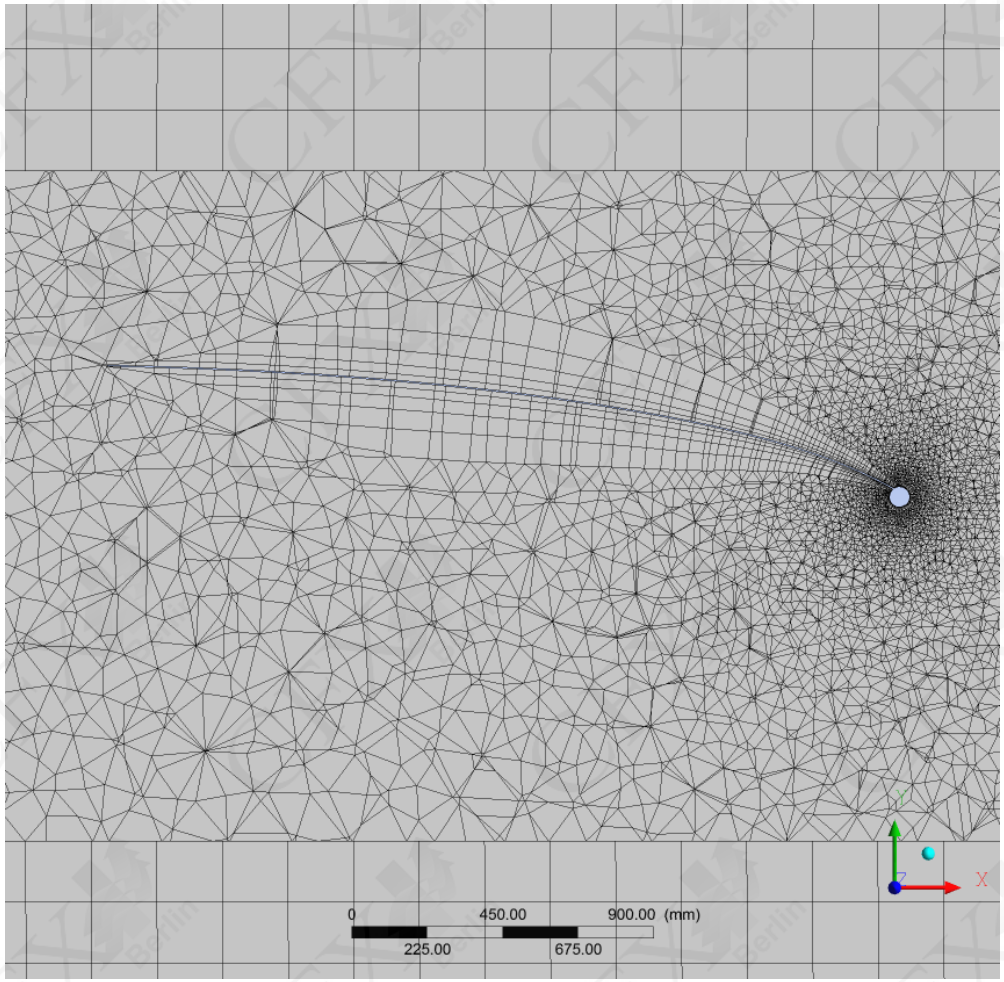
Gitter auf Horizontalschnitt in Wasserspiegellage am Bug:



Berechnungsmodelle

- Vernetzung
  - Art der Vernetzung
    - unstrukturierte Vernetzung mit Tetraedern und Prismen um das Segelboot
    - strukturierte Vernetzung mit Hexaedern in Umgebung
  - Verwendete Programme
    - ANSYS Meshing
    - ANSYS ICEM CFD Hexa
  - Elementstatistik
    - Knoten: 1 831 171
    - Elemente: 8 048 179
      - ✓ Tetraeder 6 982 489
      - ✓ Prismen 938 366
      - ✓ Pyramiden 670
      - ✓ Hexaeder 126 654
    - Grenzschichtauflösung:
      - ✓ 1.5 mm am Rumpf
      - ✓ 10 mm am Segel

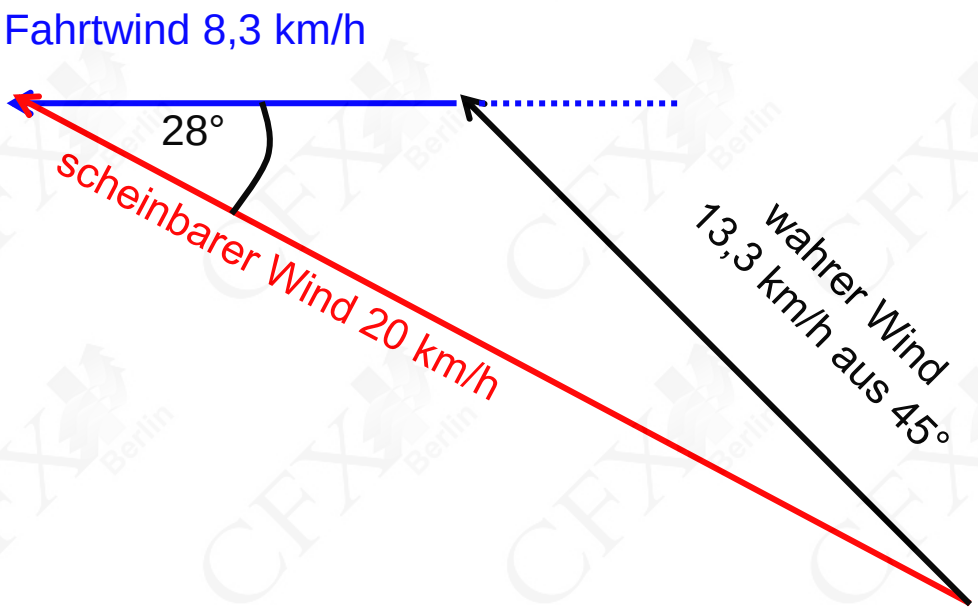
Gitter auf Horizontalschnitt um Segel und Mast in 2 m Höhe:



Berechnungsmodelle

- Wahl der Randbedingungen
  - ➢ Scheinbarer Wind auf 20 km/h festgelegt
  - – Eine Voruntersuchung (siehe hinten) ergab, dass ab 32° Winkel zwischen Fahrtrichtung und scheinbarem Wind Strömungs-ablösung am Segel auftritt.
  - ➢ Scheinbaren Wind auf 28° festgelegt (keine Ablösung)
  - – Simulationen zeigen, dass der Vortrieb durch das Segel dem Widerstand auf den Rumpf bei 8,3 km/h Bootsgeschwindigkeit entspricht.
  - ➢ Fahrt auf 8,3 km/h festgelegt
  - – Dann entspricht der scheinbare Wind einem wahrem Wind von 13,3 km/h aus 45°.

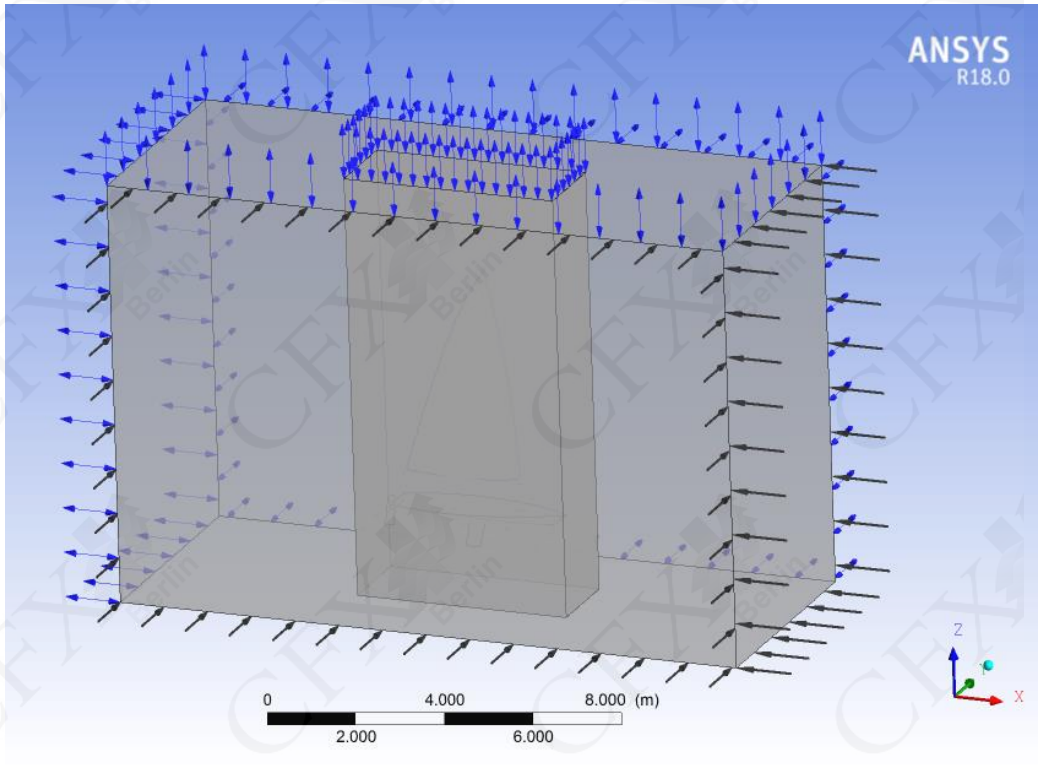
Zusammenhang zwischen Fahrtwind, wahrem und scheinbarem Wind:



Berechnungsmodelle

- Randbedingungen
  - gewünschte Geschwindigkeiten:
    - Simulation im Bootssystem (Boot steht in Simulation)
    - Wasser strömt mit 8,3 km/h
    - Am-Wind-Kurs mit scheinbarem Wind 20 km/h aus 28°

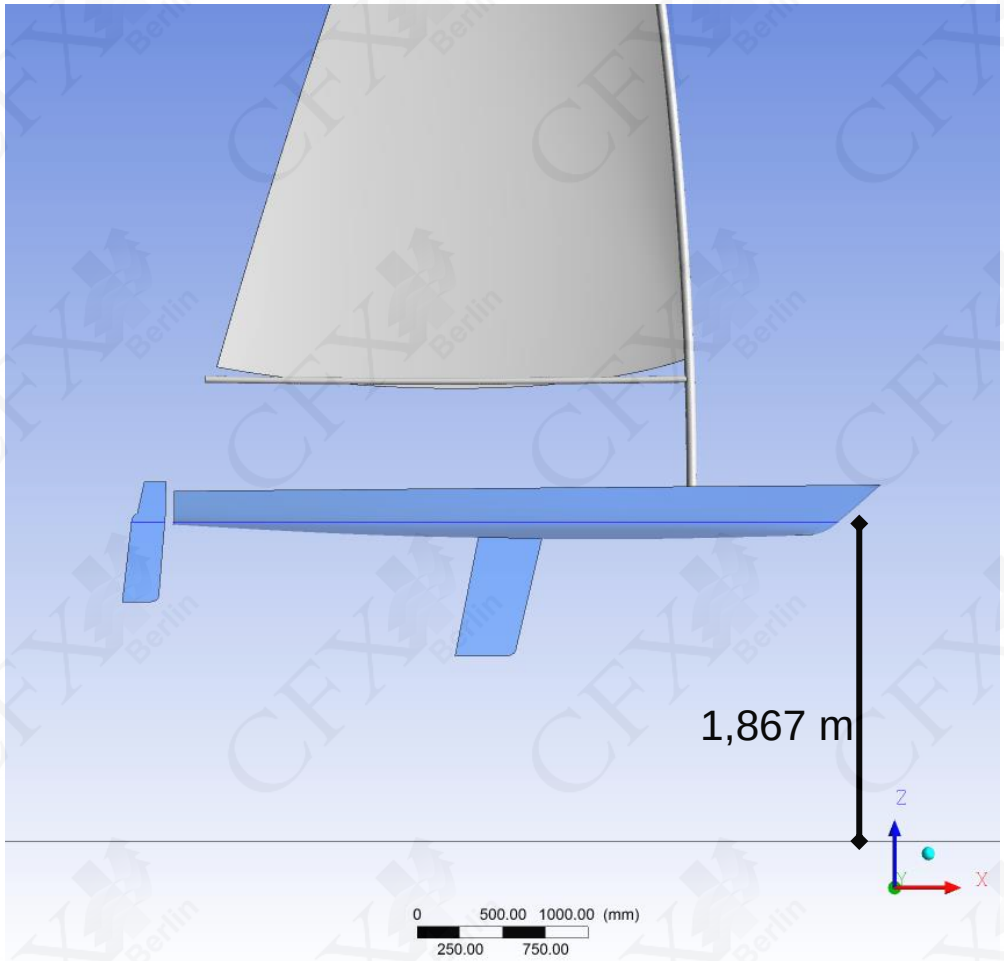
Visualisierung der Randbedingungen in ANSYS CFX-Pre:



Berechnungsmodelle

- Randbedingungen
  - gewünschte Geschwindigkeiten:
    - Simulation im Bootssystem (Boot steht in Simulation)
    - Wasser strömt mit 8,3 km/h
    - Am-Wind-Kurs mit scheinbarem Wind 20 km/h aus 28°
  - Wasserhöhe für Einströmung festgelegt auf 1,867 m über Boden
  - Vorgabe am Einströmrand als Wasserhöhe und am Ausströmrand als hydrostatisches Druckprofil

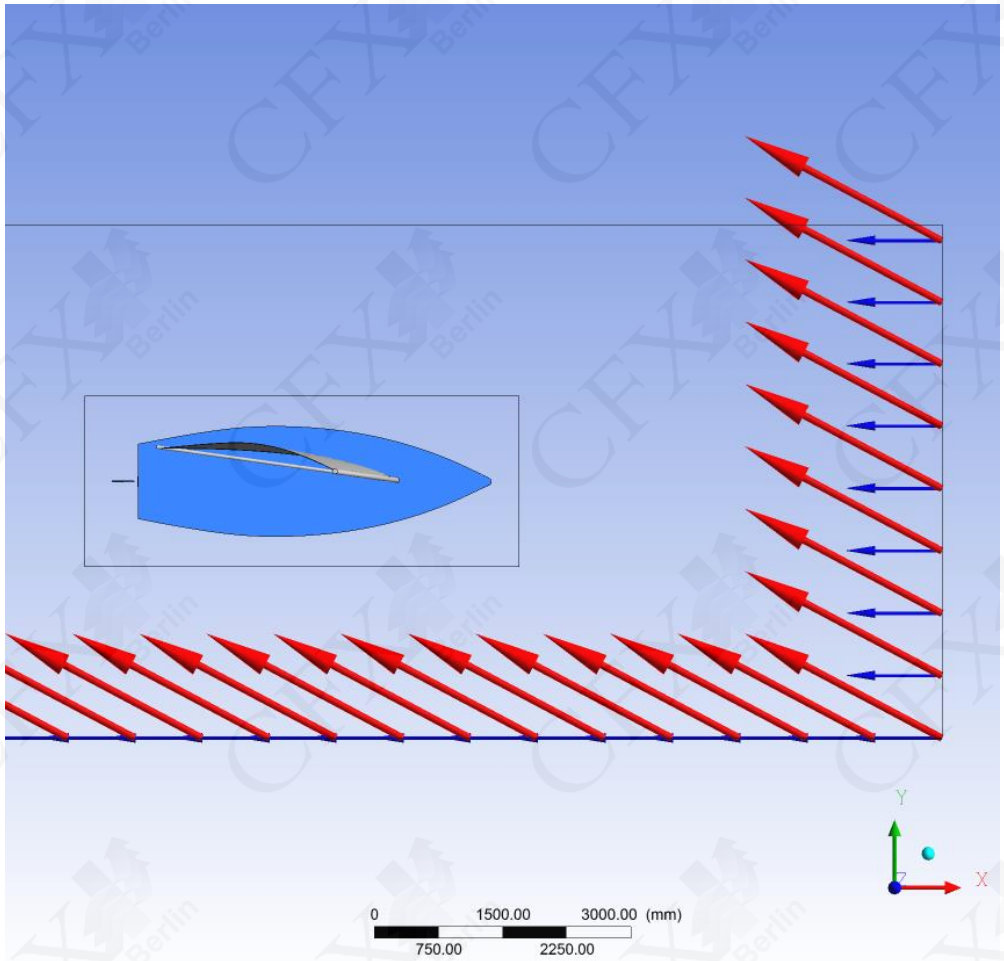
Gewählte Wasserlinie für die Einströmung (blaue Linie):



Berechnungsmodelle

- Randbedingungen
  - gewünschte Geschwindigkeiten:
    - Simulation im Bootssystem (Boot steht in Simulation)
    - Wasser strömt mit 8,3 km/h
    - Am-Wind-Kurs mit scheinbarem Wind 20 km/h aus 28°
  - Wasserhöhe für Einströmung festgelegt auf 1,867 m über Boden
  - Vorgabe am Einströmrand als Wasserhöhe und am Ausströmrand als hydrostatisches Druckprofil
  - Vorgabe der jeweiligen Geschwindigkeiten und Richtungen für Wasser und Luft
  - Boden als reibungsfreie Wand
  - Verbindung der beiden Gitter durch Interface

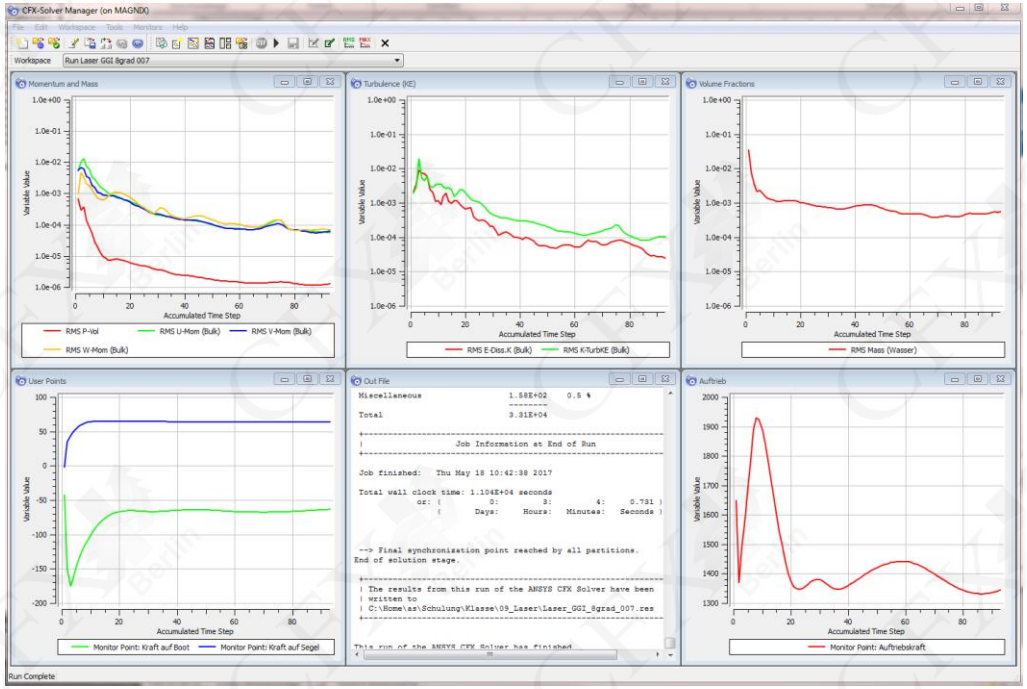
Einströmung Luft (20 km/h) und Wasser (8,3 km/h) mit Richtungen:



Berechnungsmodelle

- Physikalische Modelle:
  - homogenes Mehrphasenmodell mit freier Oberfläche für Wasser und Luft
  - Navier-Stokes-Gleichungen für reibungsbehaftete Strömungen
  - Berücksichtigung der Schwerkraft
  - RANS-Turbulenzmodell k-ε
- Lösereinstellungen:
  - stationäre Simulation mit automatischer Zeitschrittweitensteuerung
  - Konvergenzkriterium RMS<1E-4 (erreicht nach ca. 80 Iterationen)
  - Bilanzen auf <0.5% erfüllt
- Berechnungsaufwand:
  - ca. 3 Stunden auf 4 Kernen
  - Arbeitsspeicherbedarf 11 GB

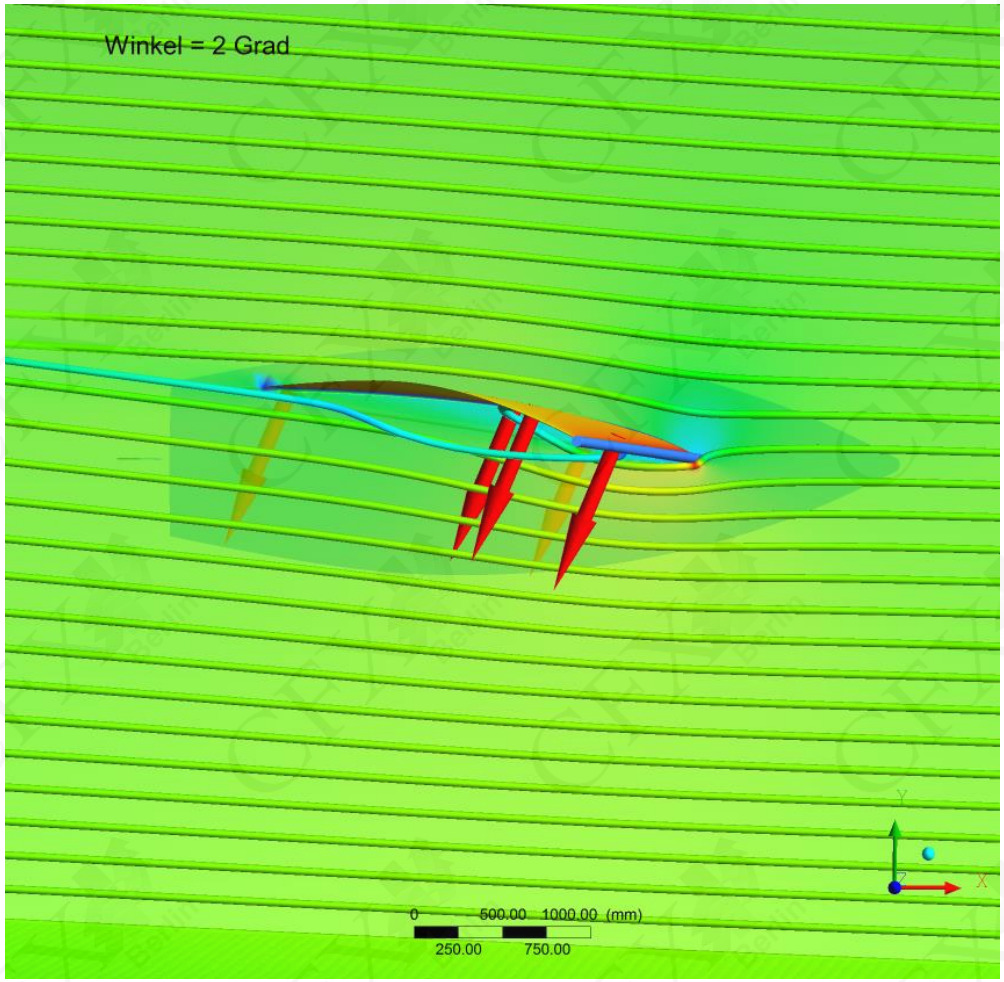
Konvergenzverlauf im ANSYS CFX-Solver Manager:



Voruntersuchung zur Windrichtung

- Voruntersuchung:
  - Einströmung nur mit Luft mit scheinbarem Wind 20 km/h aus Winkeln 2°, 4°, 6°, …, 34°
  - Berechnung der Gesamtkraft auf Segel, Mast und Baum
  - Darstellung als Vektor
- Ergebnisse:
  - bei 2° kein Vortrieb

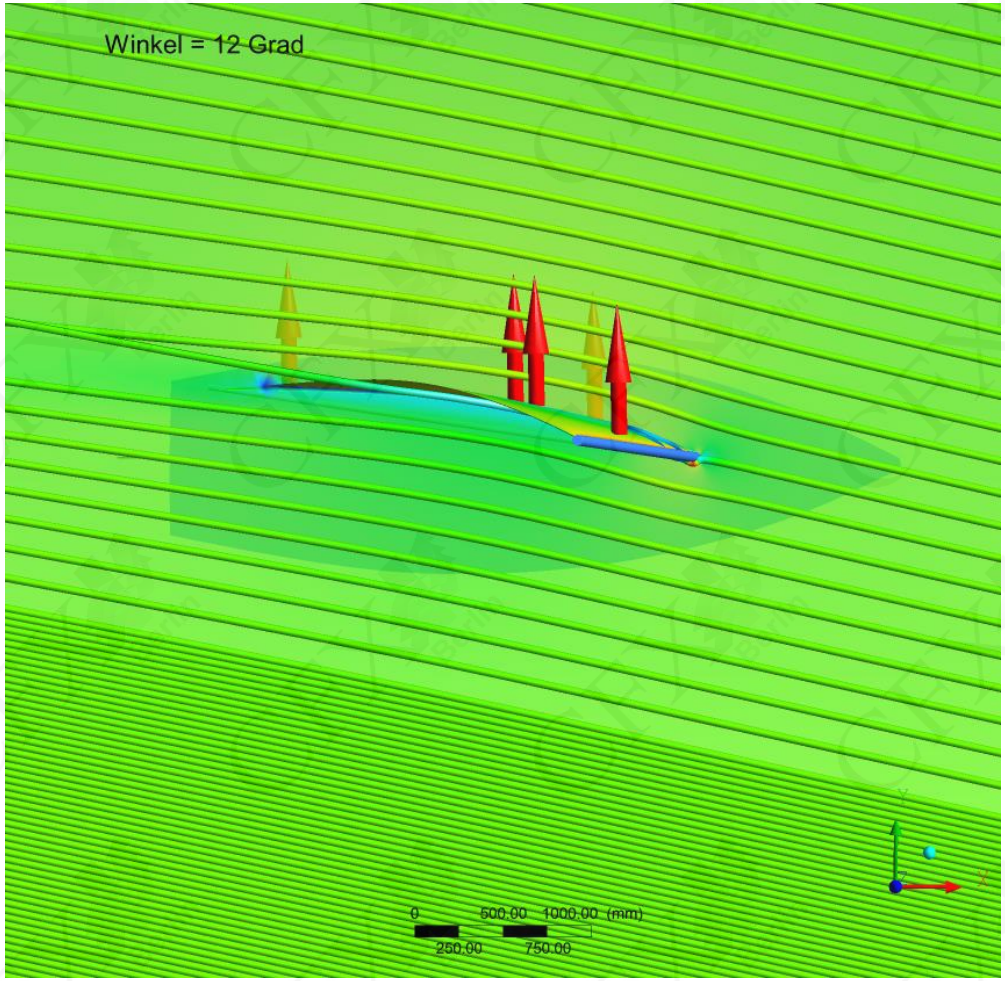
Einströmung mit 20 km/h aus 2°:
(Stromlinien visualisieren Strömung um Segel)



Voruntersuchung zur Windrichtung

- Voruntersuchung:
  - Einströmung nur mit Luft mit scheinbarem Wind 20 km/h aus Winkeln 2°, 4°, 6°, …, 26°
  - Berechnung der Gesamtkraft auf Segel, Mast und Baum
  - Darstellung als Vektor
- Ergebnisse:
  - bei 2-12° kein Vortrieb

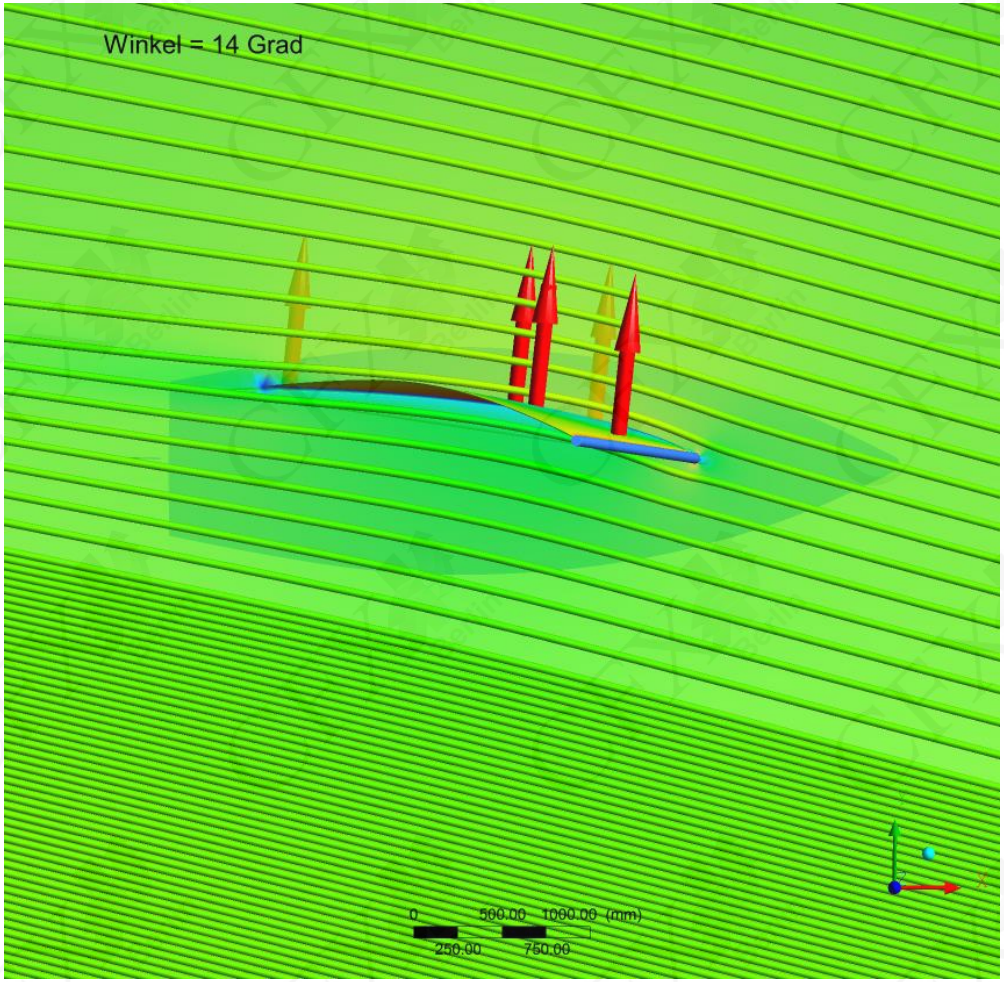
Einströmung mit 20 km/h aus 12°:
(Stromlinien visualisieren Strömung um Segel)



Voruntersuchung zur Windrichtung

- Voruntersuchung:
  - Einströmung nur mit Luft mit scheinbarem Wind 20 km/h aus Winkeln 2°, 4°, 6°, …, 26°
  - Berechnung der Gesamtkraft auf Segel, Mast und Baum
  - Darstellung als Vektor
- Ergebnisse:
  - bei 2-12° kein Vortrieb
  - ab 14° leichter Vortrieb

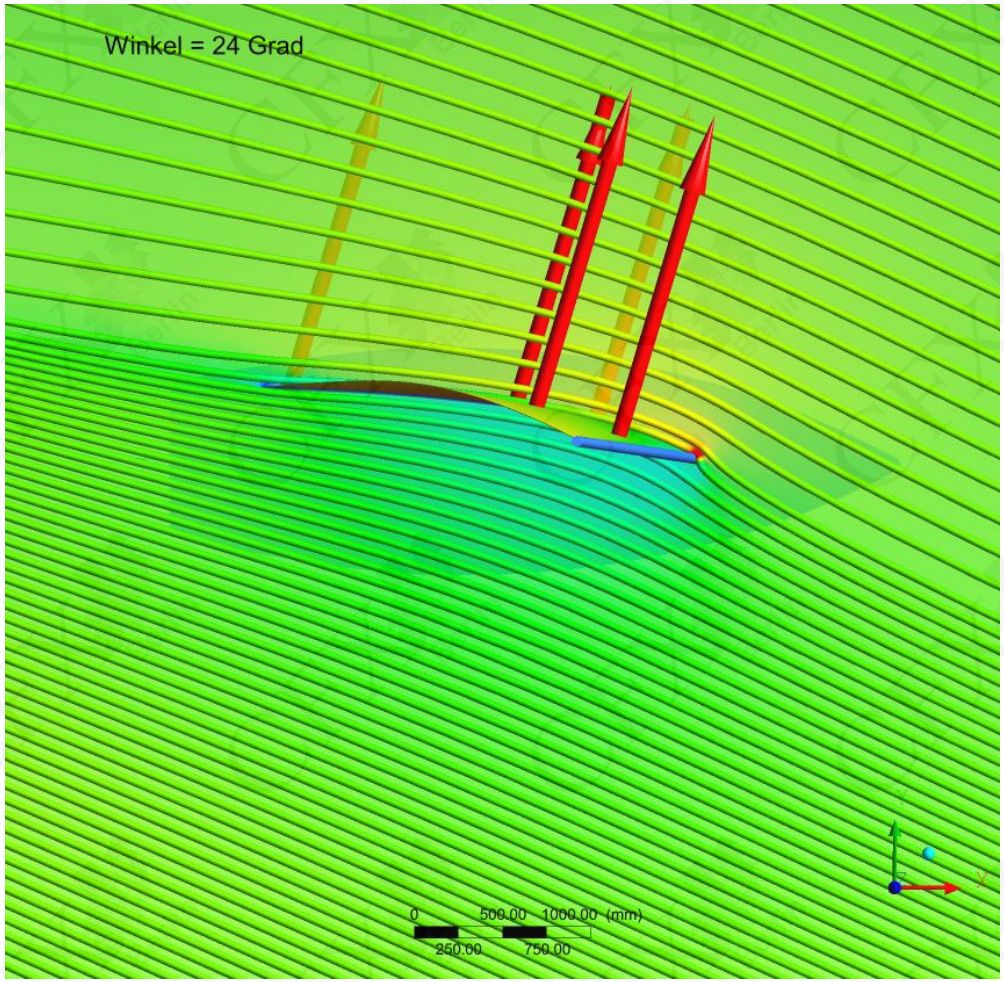
Einströmung mit 20 km/h aus 14°:
(Stromlinien visualisieren Strömung um Segel)



Voruntersuchung zur Windrichtung

- Voruntersuchung:
  - Einströmung nur mit Luft mit scheinbarem Wind 20 km/h aus Winkeln 2°, 4°, 6°, …, 26°
  - Berechnung der Gesamtkraft auf Segel, Mast und Baum
  - Darstellung als Vektor
- Ergebnisse:
  - bei 2-12° kein Vortrieb
  - ab 14° leichter Vortrieb
  - Zunahme von Vortrieb und Seitenkraft (Abdrift) mit Anströmwinkel

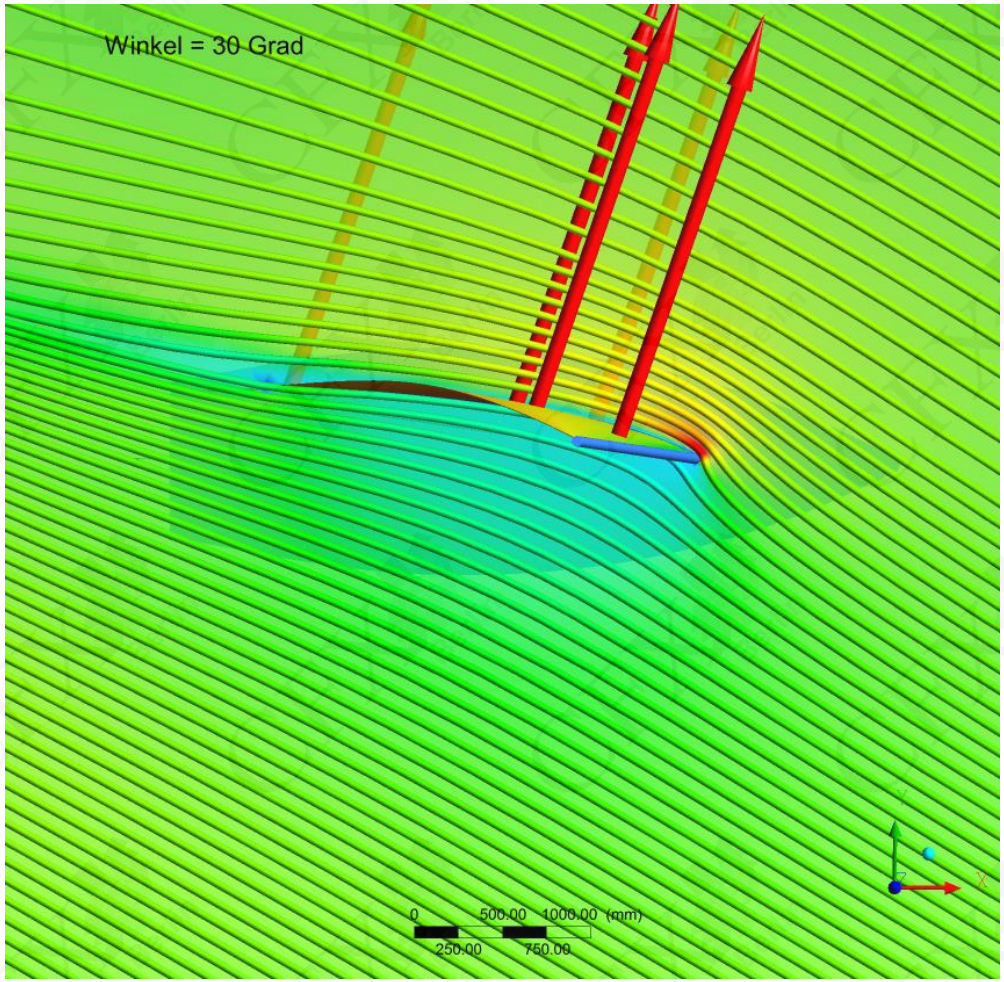
Einströmung mit 20 km/h aus 24°:
(Stromlinien visualisieren Strömung um Segel)



Voruntersuchung zur Windrichtung

- Voruntersuchung:
  - Einströmung nur mit Luft mit scheinbarem Wind 20 km/h aus Winkeln 2°, 4°, 6°, …, 26°
  - Berechnung der Gesamtkraft auf Segel, Mast und Baum
  - Darstellung als Vektor
- Ergebnisse:
  - bei 2-12° kein Vortrieb
  - ab 14° leichter Vortrieb
  - Zunahme von Vortrieb und Seitenkraft (Abdrift) mit Anströmwinkel
  - bei 30° starke Ablenkung des Windes, Luft folgt Segelprofil

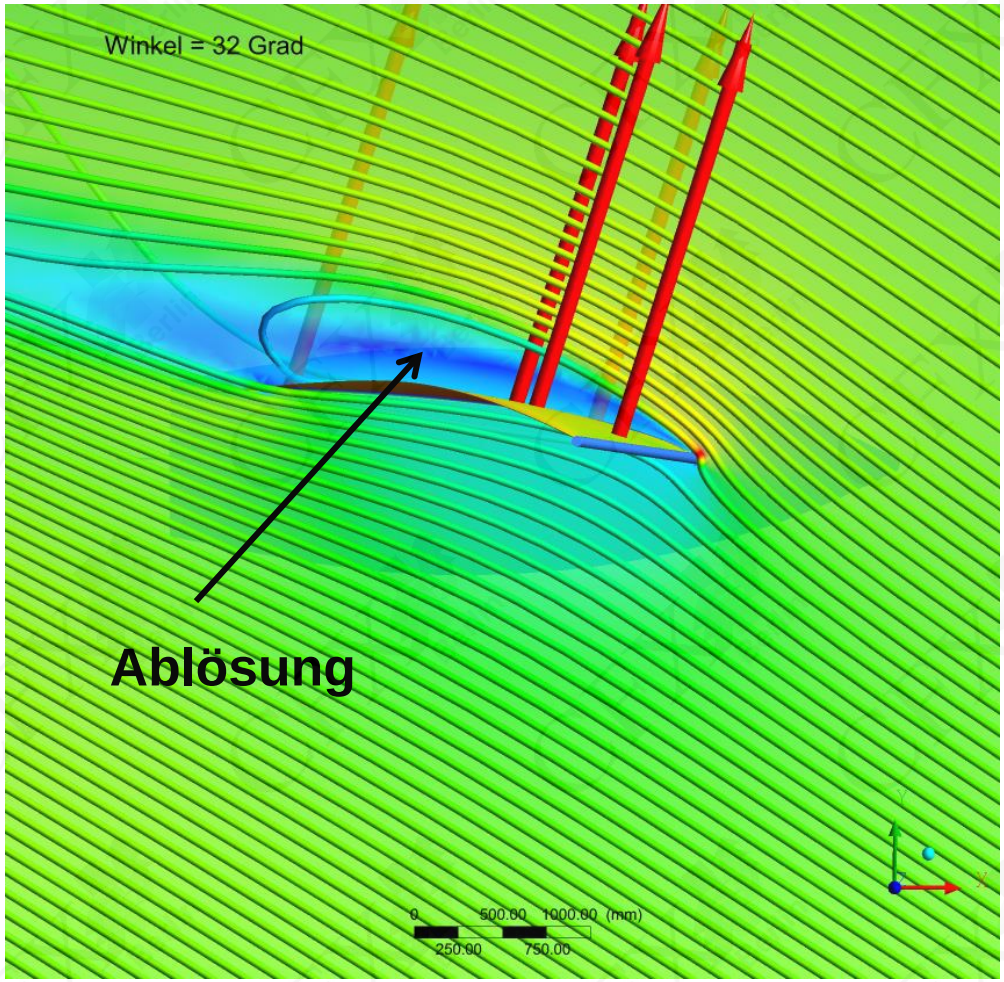
Einströmung mit 20 km/h aus 30°:
(Stromlinien visualisieren Strömung um Segel)



Voruntersuchung zur Windrichtung

- Voruntersuchung:
  - Einströmung nur mit Luft mit scheinbarem Wind 20 km/h aus Winkeln 2°, 4°, 6°, …, 26°
  - Berechnung der Gesamtkraft auf Segel, Mast und Baum
  - Darstellung als Vektor
- Ergebnisse:
  - bei 2-12° kein Vortrieb
  - ab 14° leichter Vortrieb
  - Zunahme von Vortrieb und Seitenkraft (Abdrift) mit Anströmwinkel
  - bei 30° starke Ablenkung des Windes, Luft folgt Segelprofil
  - ab 32° Strömungsablösung, Luft kann Segelprofil nicht mehr folgen, Vortrieb geht zurück (Stall)
  - Segel würde flattern, Segler würde Einstellungen ändern

Einströmung mit 20 km/h aus 32°:
(Stromlinien visualisieren Strömung um Segel)

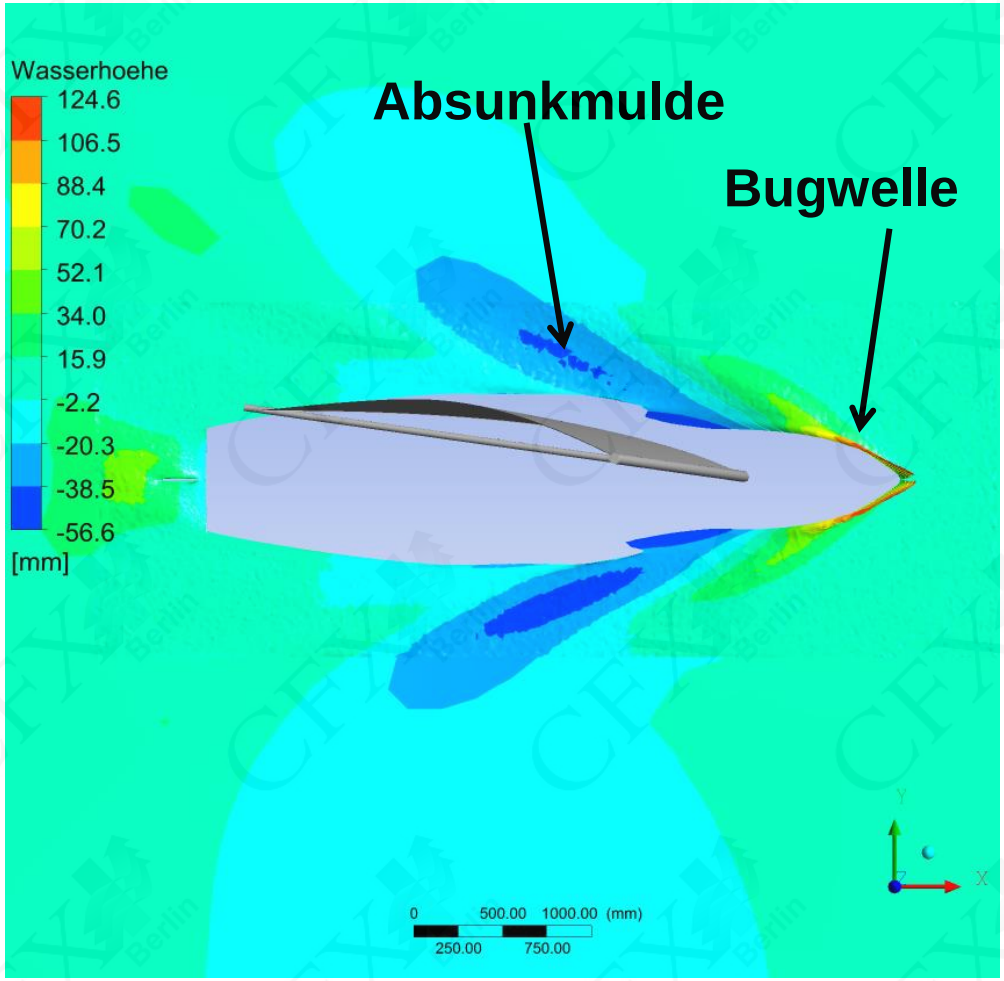


Berechnungsergebnisse

- Wasseroberfläche in Fahrt:
  - dargestellt ist die Lage der Wasseroberfläche als Isofläche
  - Farbe zeigt die Änderung der Höhenlage gegenüber der Einströmhöhe

Darstellung der Wasseroberfläche:

Farbe zeigt Höhenänderung gegen Einströmung

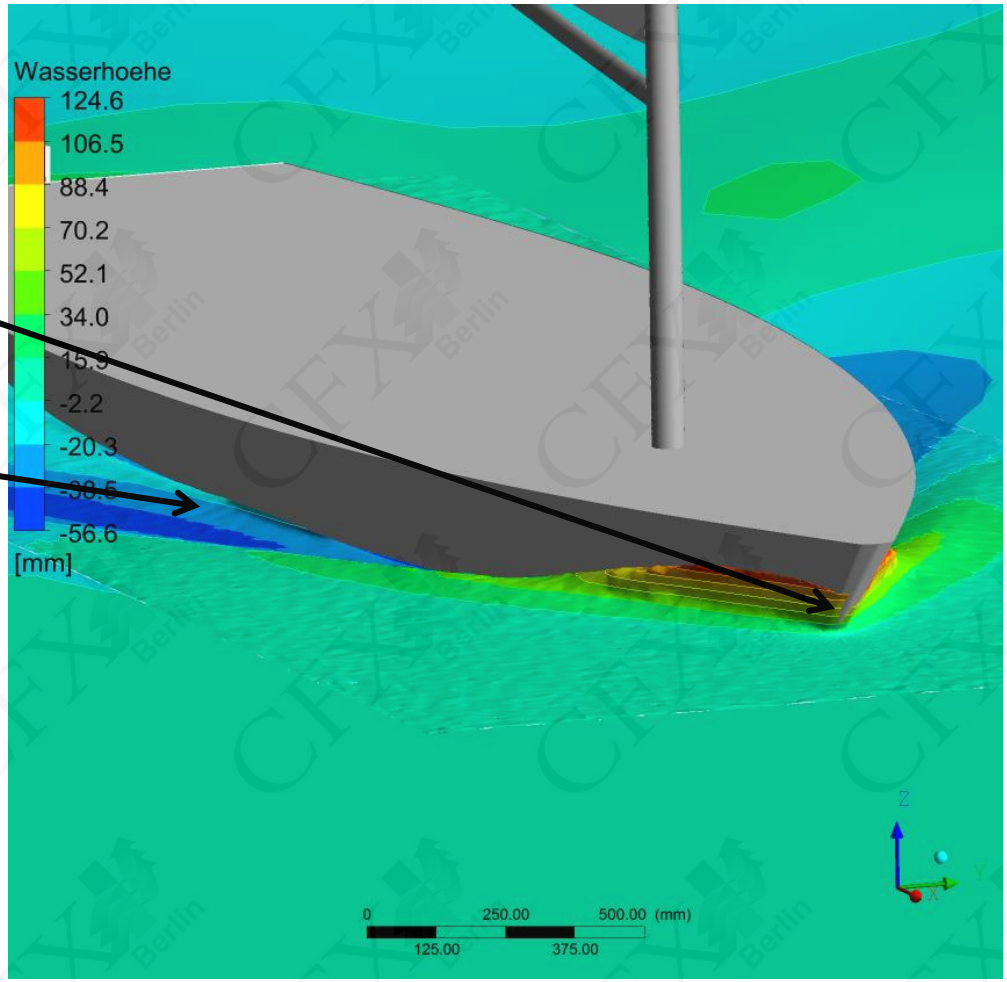


Berechnungsergebnisse

- Wasseroberfläche in Fahrt:
  - dargestellt ist die Lage der Wasseroberfläche als Isofläche
  - Farbe zeigt die Änderung der Höhenlage gegenüber der Einströmhöhe
  - am Bug bildet sich eine Welle mit ca. 12 cm Höhe
  - knapp dahinter eine Absunkmulde mit ca. 6 cm Tiefe

Darstellung der Wasseroberfläche am Bug:

Farbe zeigt Höhenänderung gegen Einströmung

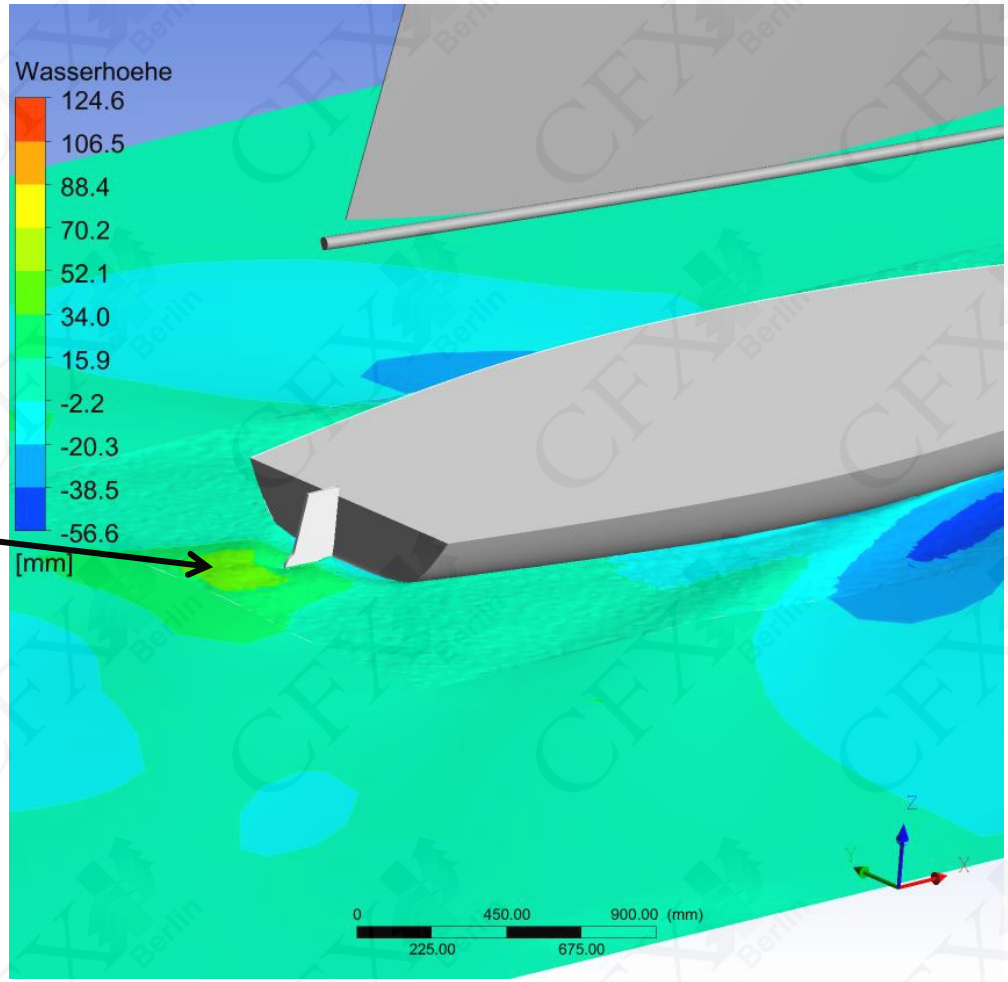


Berechnungsergebnisse

- Wasseroberfläche in Fahrt:
  - dargestellt ist die Lage der Wasseroberfläche als Isofläche
  - Farbe zeigt die Änderung der Höhenlage gegenüber der Einströmhöhe
  - am Bug bildet sich eine Welle mit ca. 12 cm Höhe
  - knapp dahinter eine Absunkmulde mit ca. 6 cm Tiefe
  - am Heck beim Ruder leicht erhöhter Wasserspiegel um ca. 5 cm

Darstellung der Wasseroberfläche am Heck:

Farbe zeigt Höhenänderung gegen Einströmung

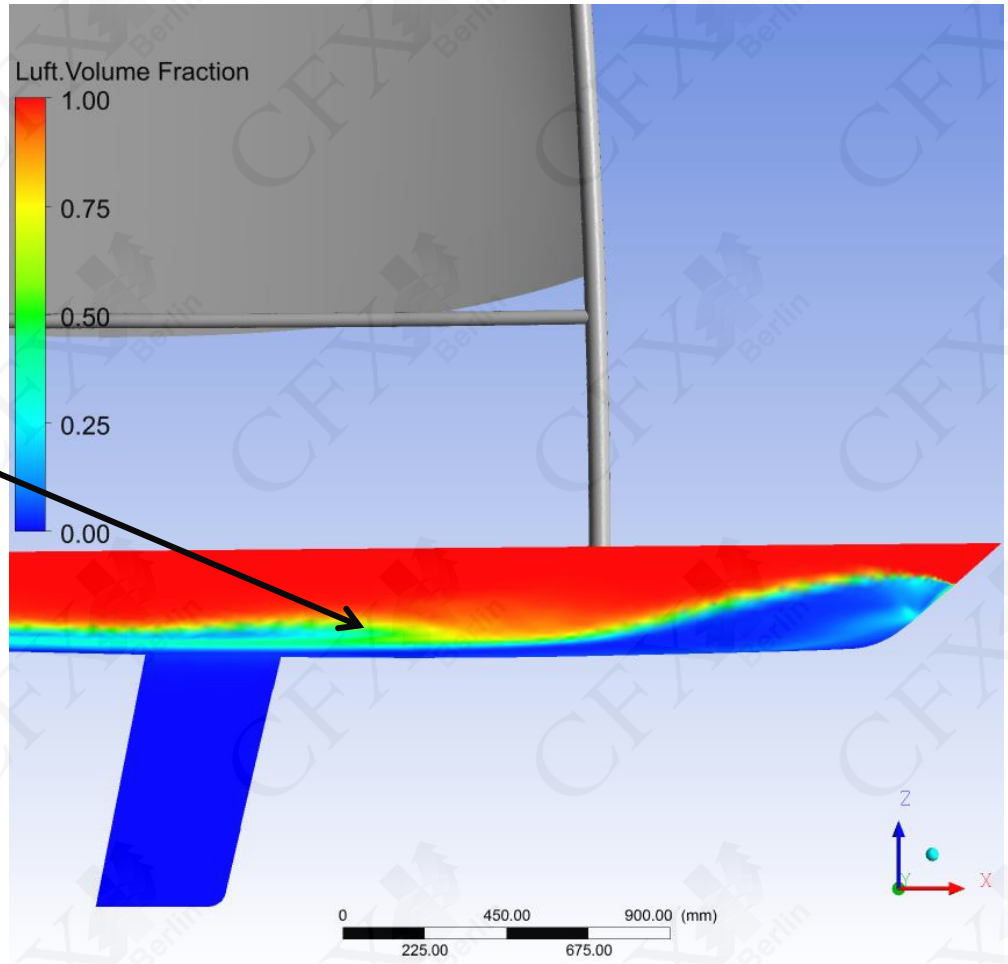


Berechnungsergebnisse

- Wasserlinie am Boot in Fahrt:
  - dargestellt ist der Volumenanteil der Luft am Boot
  - 1 bedeutet: 100% Luft, kein Wasser
  - 0 bedeutet: 0% Luft, nur Wasser
  - 0.5 bedeutet: Luft-Wasser-Gemisch, Übergangsbereich
  - ein breiter Übergangsbereich deutet auf hohe Dynamik (z.B. brechende Welle), starke Durchmischung oder zu grobes Berechnungsgitter hin

Darstellung der Wasserlinie am Boot:

Farbe zeigt lokalen Luftanteil

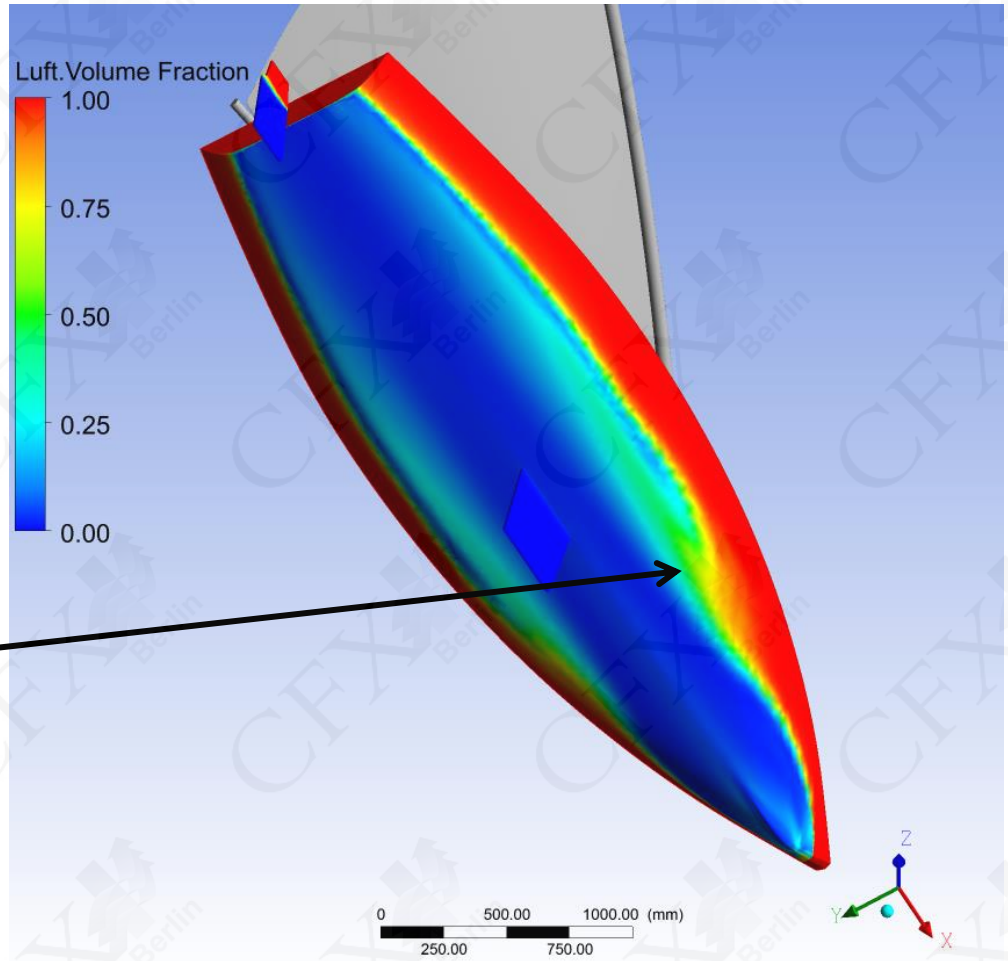


Berechnungsergebnisse

- Wasserlinie am Boot in Fahrt:
  - dargestellt ist der Volumenanteil der Luft am Boot
  - 1 bedeutet: 100% Luft, kein Wasser
  - 0 bedeutet: 0% Luft, nur Wasser
  - 0.5 bedeutet: Luft-Wasser-Gemisch, Übergangsbereich
  - ein breiter Übergangsbereich deutet auf hohe Dynamik (z.B. brechende Welle), starke Durchmischung oder zu grobes Berechnungsgitter hin
  - in der Simulation gerät Luft unter das Boot

Darstellung der Wasserlinie am Boot:

Farbe zeigt lokalen Luftanteil

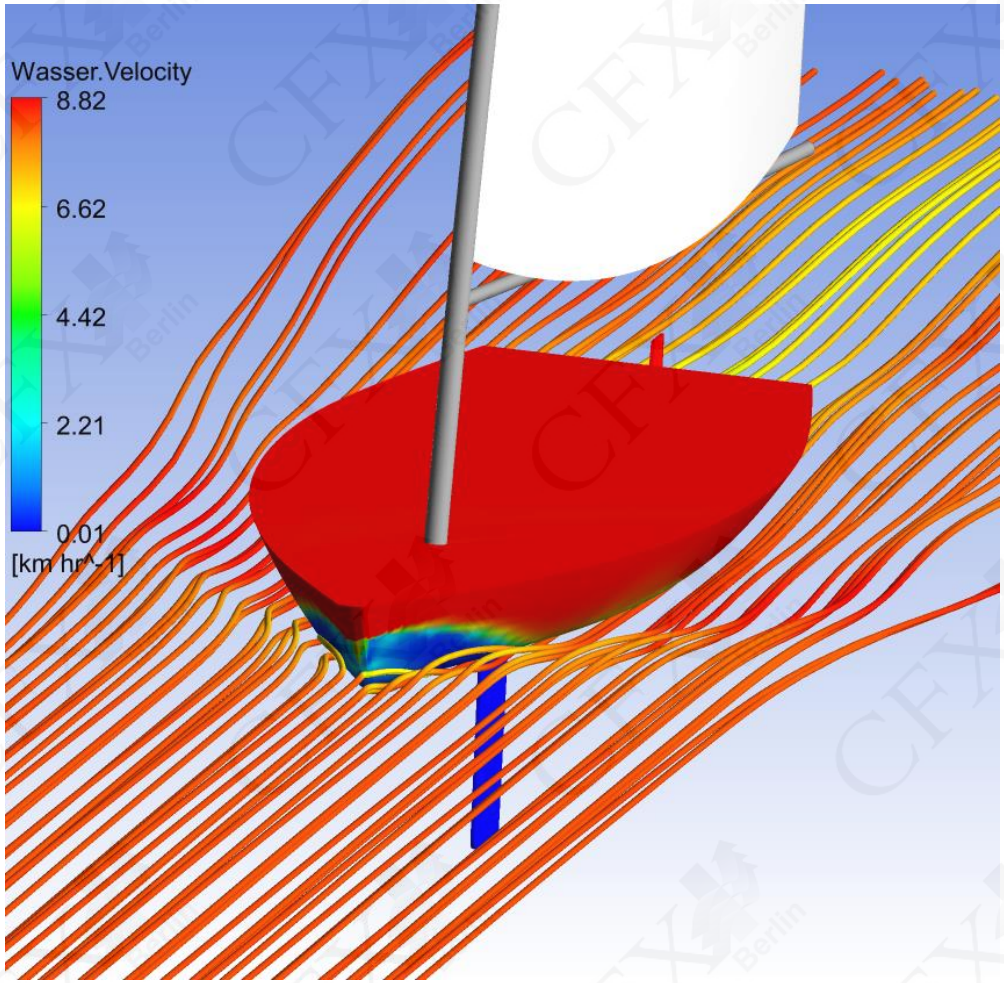


Berechnungsergebnisse

- Wasserströmung um das Boot:
  - dargestellt sind Stromlinien, eingefärbt mit der lokalen Wassergeschwindigkeit
  - Einströmung mit 8,3 km/h
  - Ablenkung des Wassers durch das Boot und Gebiet hinter dem Boot mit niedrigerer Geschwindigkeit sind zu erkennen

Darstellung der Wasserströmung ums Boot:

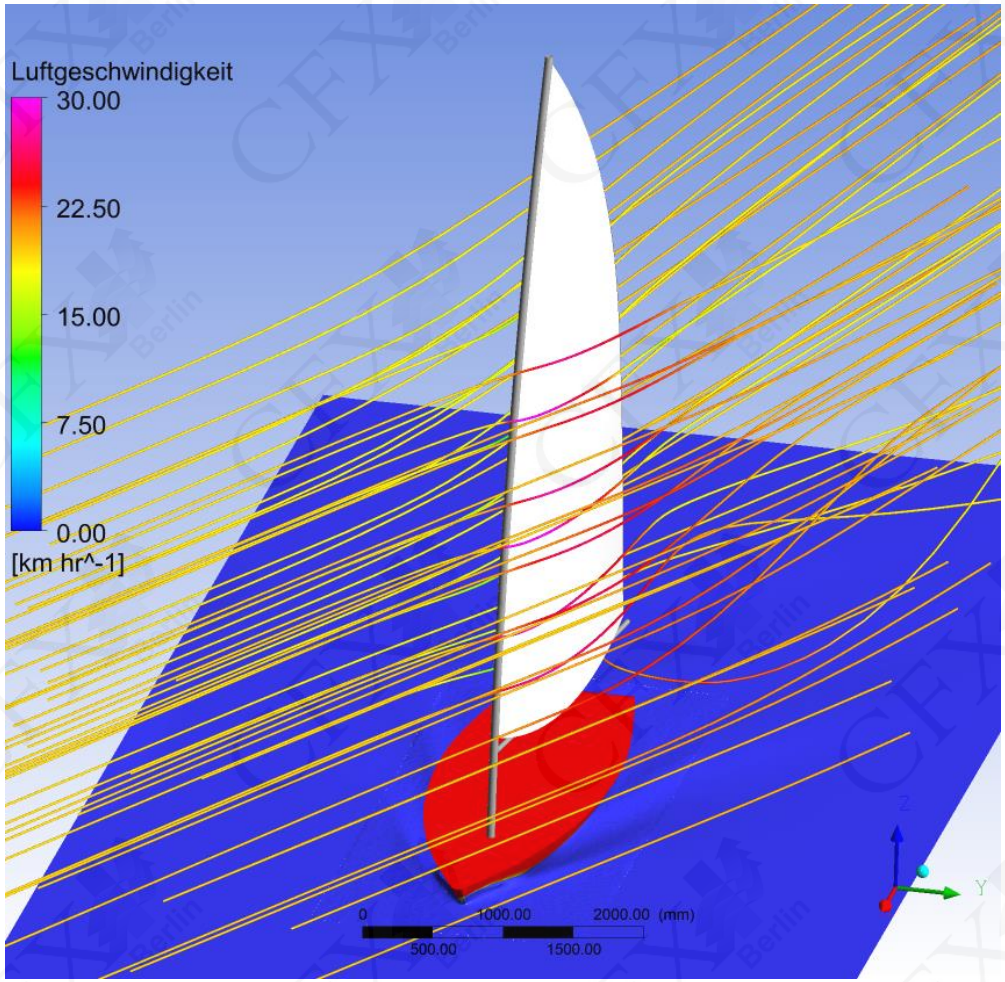
Stromlinien, Farbe zeigt Geschwindigkeit



Berechnungsergebnisse

- Luftströmung um das Boot:
  - dargestellt sind Stromlinien, eingefärbt mit der lokalen Luftgeschwindigkeit
  - Einströmung mit 20 km/h
  - Ablenkung der Luft durch das Segel, Beschleunigung auf Lee, Abbremsung auf Luv

Darstellung der Luftströmung ums Boot:
Stromlinien, Farbe zeigt Geschwindigkeit

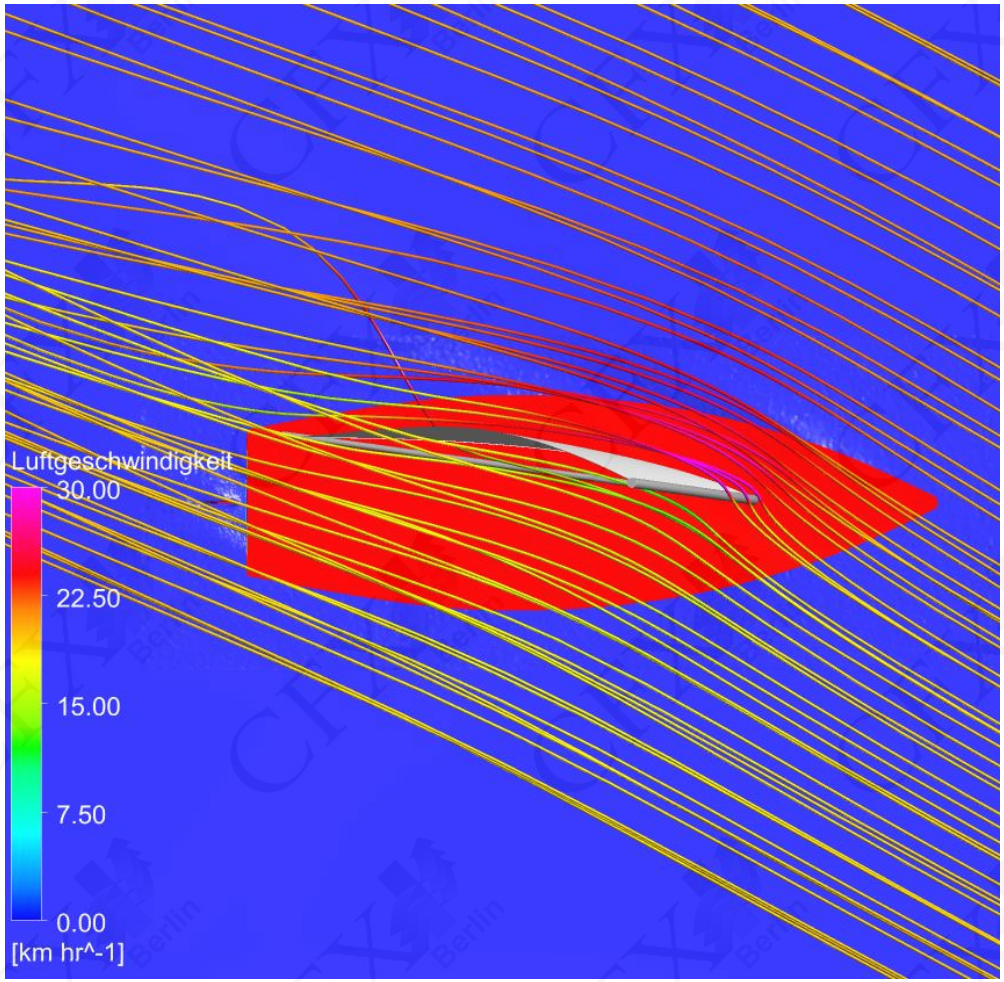


Berechnungsergebnisse

- Luftströmung um das Boot:
  - dargestellt sind Stromlinien, eingefärbt mit der lokalen Luftgeschwindigkeit
  - Einströmung mit 20 km/h
  - Ablenkung der Luft durch das Segel, Beschleunigung auf Lee, Abbremsung auf Luv
  - Stromlinien folgen der Krümmung des Segels
  - Ablenkung auf Luv führt zu höherem Druck, Ablenkung auf Lee zu niedrigerem Druck auf das Segel (Tragflächeneffekt)

Darstellung der Luftströmung ums Boot:

Stromlinien, Farbe zeigt Geschwindigkeit

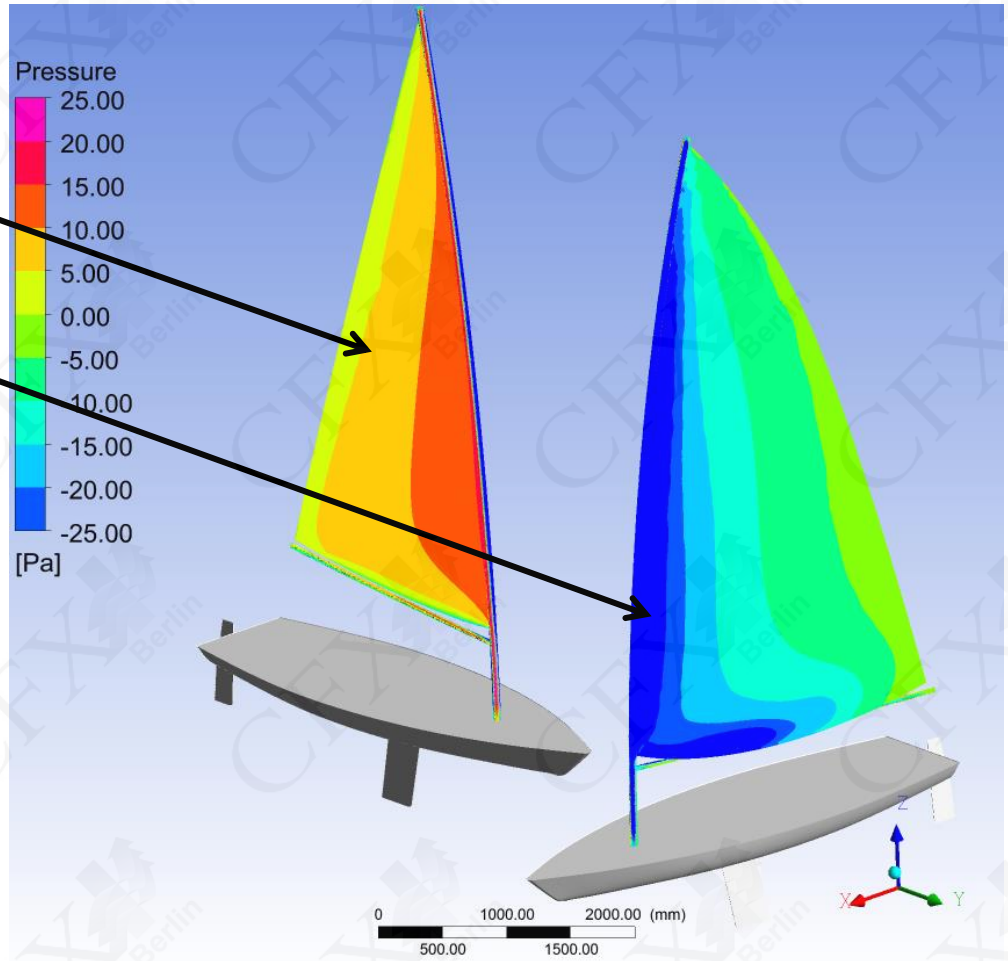


Berechnungsergebnisse

- Druck auf das Segel:
  - dargestellt ist der Relativdruck bezüglich des Umgebungsdrucks auf beiden Segelseiten
  - Ablenkung auf Luv führt zu höherem Druck auf das Segel
  - Ablenkung auf Lee zu niedrigerem Druck auf das Segel
  - wegen der unterschiedlichen Drücke wirkt eine Kraft auf das Segel

Darstellung des Drucks aufs Segel:

Relativdruck bzgl. Umgebungsdruck

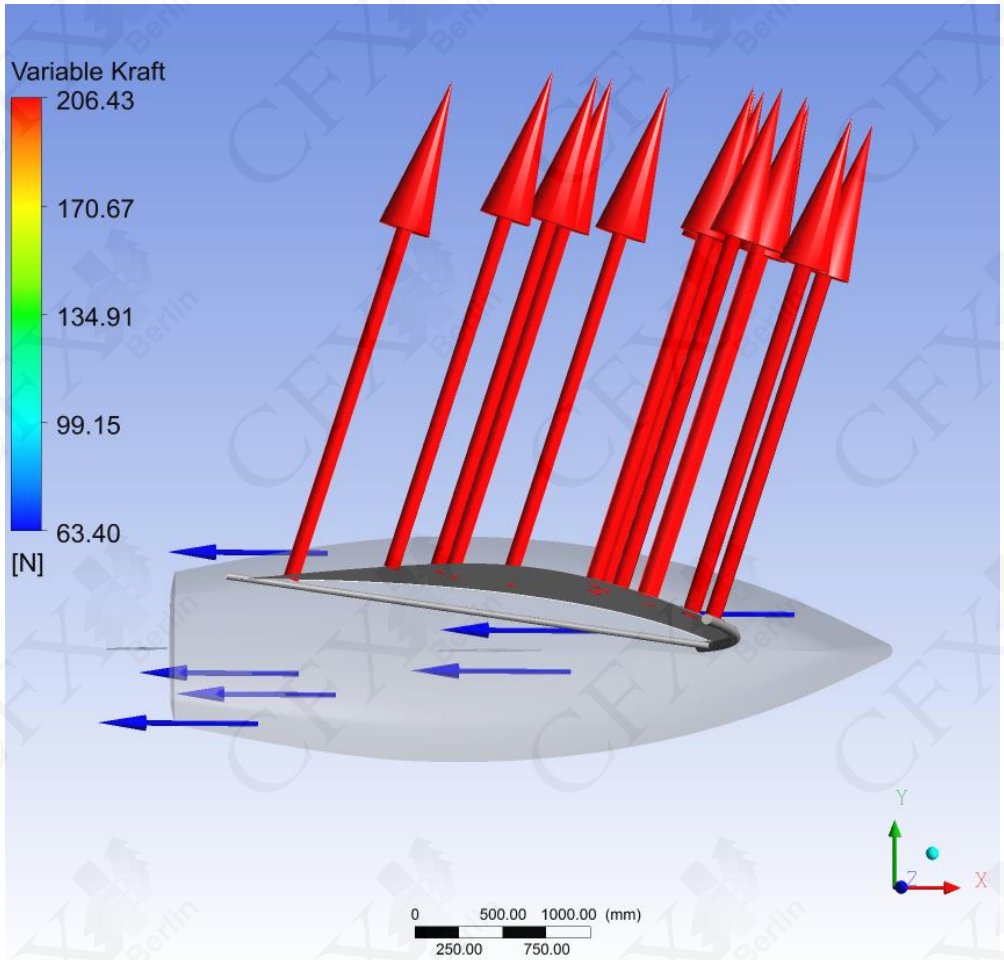


Berechnungsergebnisse

- Kräfte auf Segel und Rumpf:
  - dargestellt sind aufintegrierte Druck- und Reibungskräfte
    - auf Rumpf, Schwert und Ruder (blaue Pfeile)
    - auf Mast, Baum und Segel (rote Pfeile)
  - auf den Rumpf wirkt eine bremsende Kraft
  - auf das Segel wirkt eine vortreibende Kraft mit starker Abdrift
  - vortreibender Teil und bremsende Kraft sind etwa gleich groß

Darstellung der Kräfte auf Rumpf und Segel:

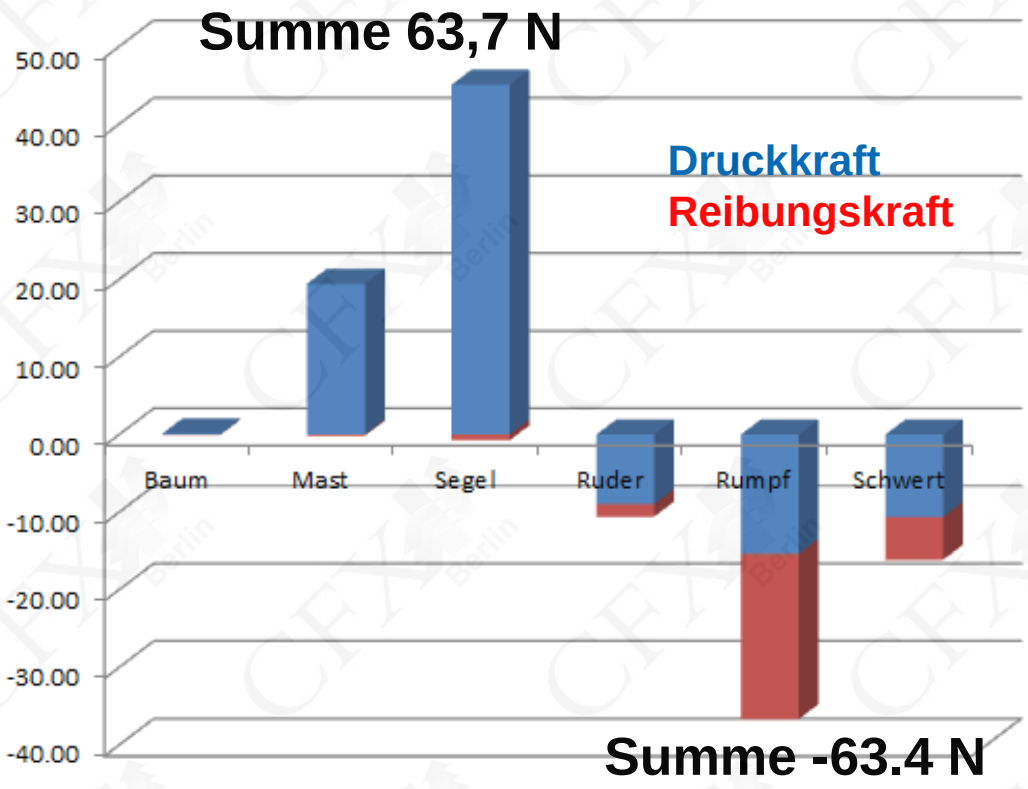
Aufintegrierte Druck- und Reibungskräfte



Berechnungsergebnisse

- Kräfte in Fahrtrichtung:
  - dargestellt sind aufintegrierte Druck- und Reibungskräfte
  - auf Rumpf, Ruder und Schwert wirkt jeweils eine etwa gleich hohe bremsende Druckkraft
  - auf den Rumpf wirkt eine hohe Reibungskraft
  - auf Segel und Mast wirken Druckkräfte in Vortriebsrichtung
  - Bei diesen Bedingungen gleichen sich Vortrieb und Widerstand fast aus, d.h. das Boot hält seine Geschwindigkeit.

Darstellung der Kräfte in Fahrtrichtung:
Aufintegrierte Druck- und Reibungskräfte

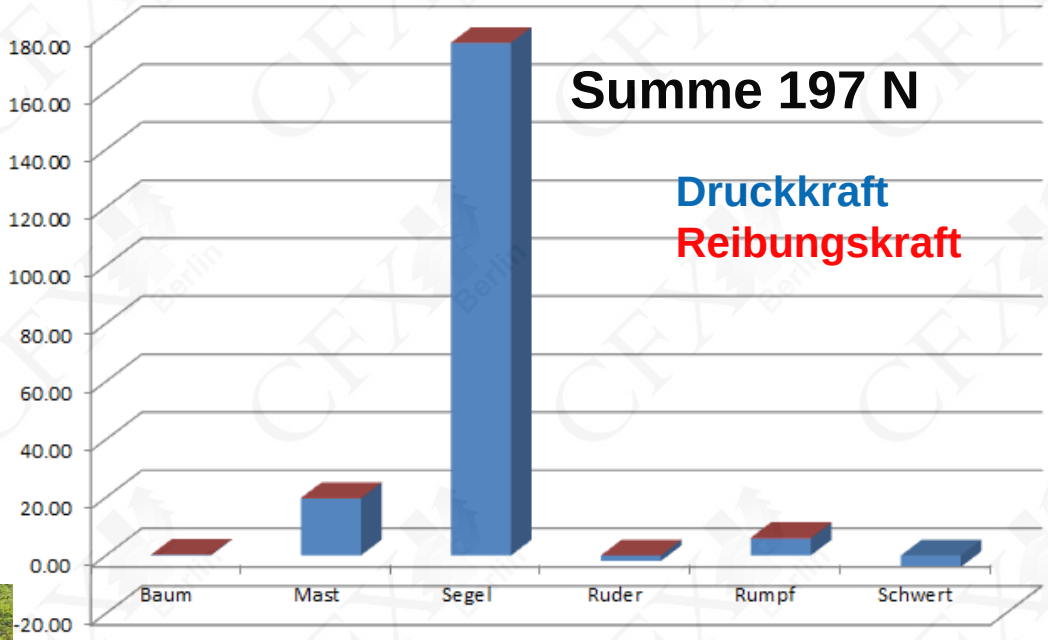


Berechnungsergebnisse

- Kräfte in Querrichtung:
  - dargestellt sind aufintegrierte Druck- und Reibungskräfte
  - Reibungsanteile in Querrichtung vernachlässigbar
  - wesentliche Querkraft wirkt auf das Segel
  - Querkräfte führen zu einem Kippmoment auf das Boot um die Längsachse von 523 N m, das der Segler durch Herauslehnen kompensiert, z.B. muss er bei 70 kg Gewicht den Schwerpunkt 0,76 m aus der Längsachse verlagern.

Darstellung der Kräfte in Querrichtung:

Aufintegrierte Druck- und Reibungskräfte

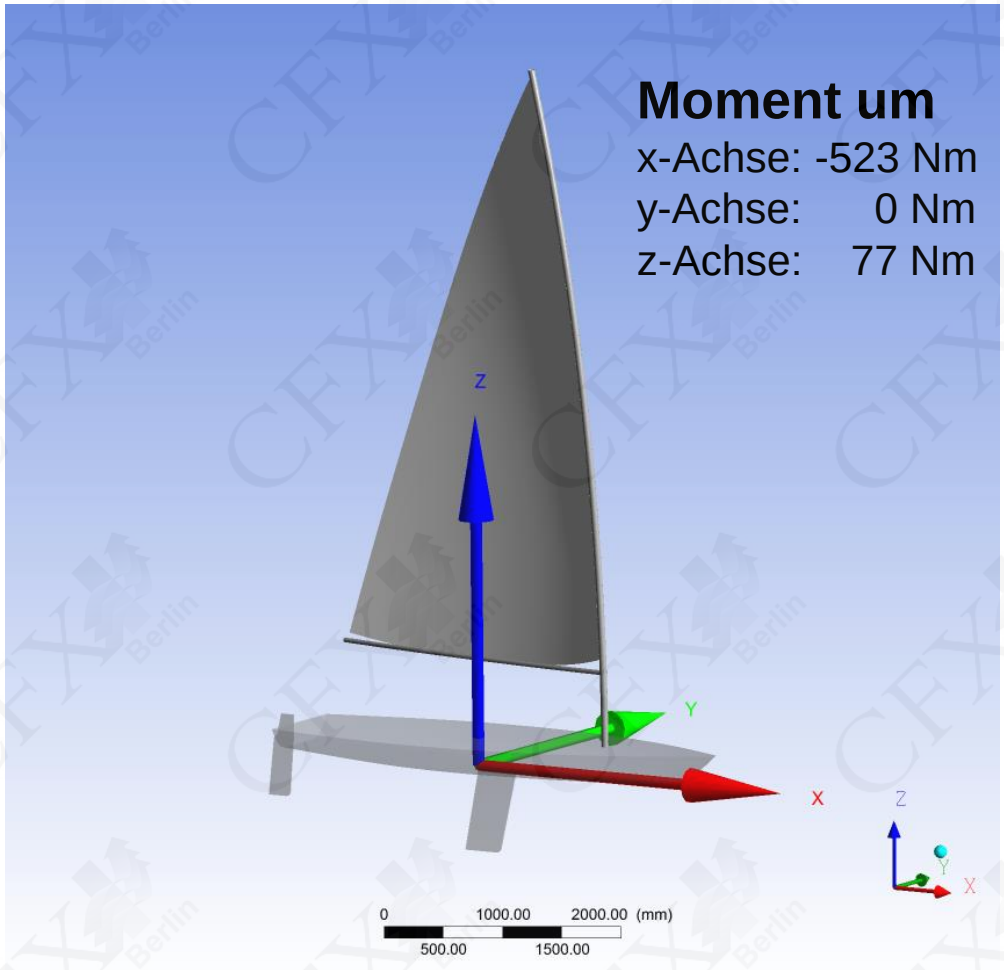


Berechnungsergebnisse

- Kräfte in vertikaler Richtung:
  - in vertikaler Richtung wirkt eine Auftriebskraft von 1347 N auf das Boot
  - entspricht einer Gewichtskraft von 137 kg, bei 68 kg Bootsgewicht also einem Segler von 69 kg Körpergewicht
  - bei leichterem Segler würde sich das Boot aus dem Wasser heben
- weitere Drehmomente:
  - das Boot würde mit dem Bug nach Lee gedreht (Segler würde Ruder einschlagen, auch um Abdrift zu verhindern)

Darstellung der Drehmomente:

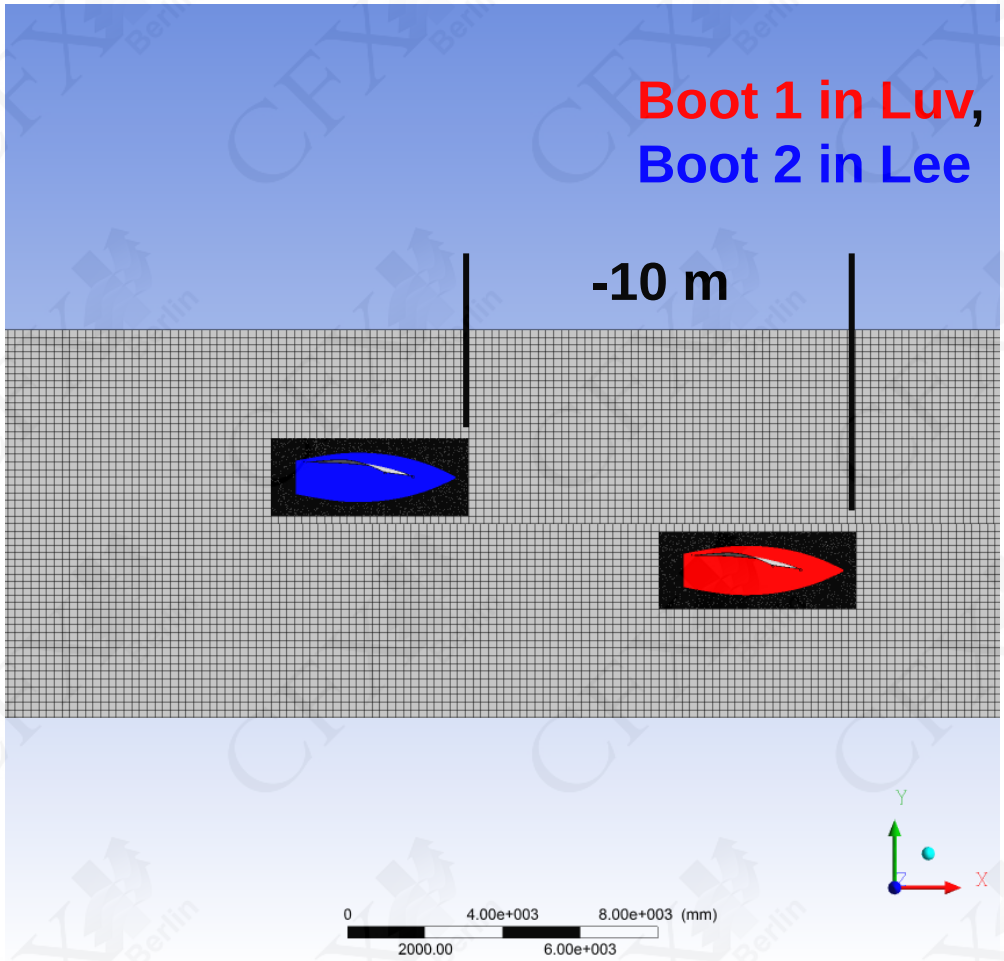
Angenommene Schwerpunktlage



Berechnungsergebnisse

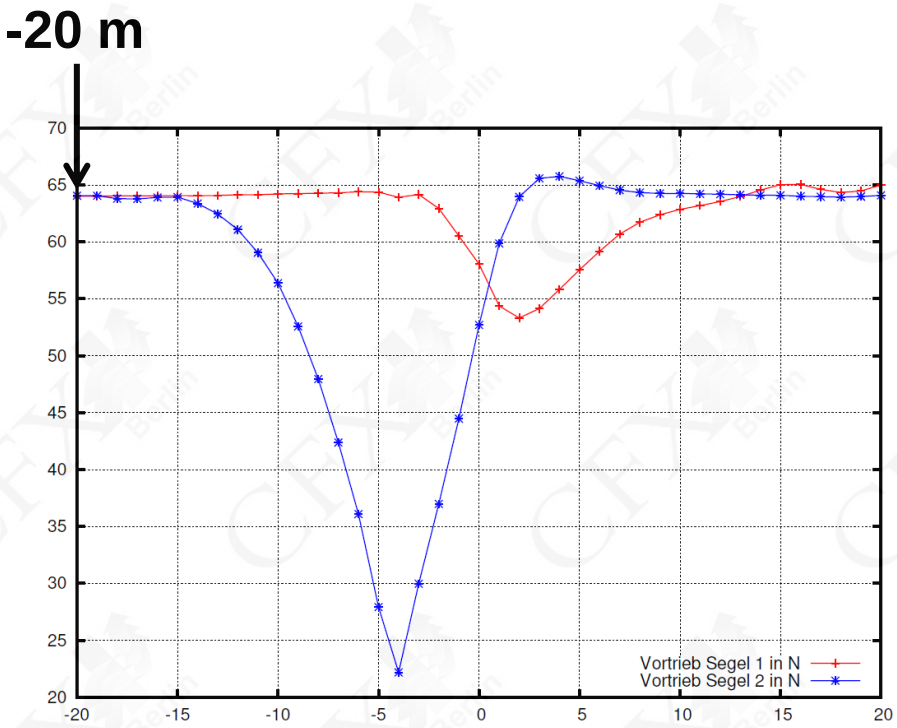
- Wechselwirkung zweier Boote:
  - Simulation zweier Boote mit niedrigem Abstand in Querrichtung
  - Bootslage, Segellage, Bootsgeschwindigkeit, Windgeschwindigkeit festgelegt wie vorher
  - jeweils stationäre Simulationen zu variierenden Abständen in Fahrtrichtung von -20 m bis +20 m
  - Bestimmung der Vortriebskräfte auf Segel, Mast und Baum

Geometrie und Gitter:
im Abstand (Bug zu Bug) -10 m

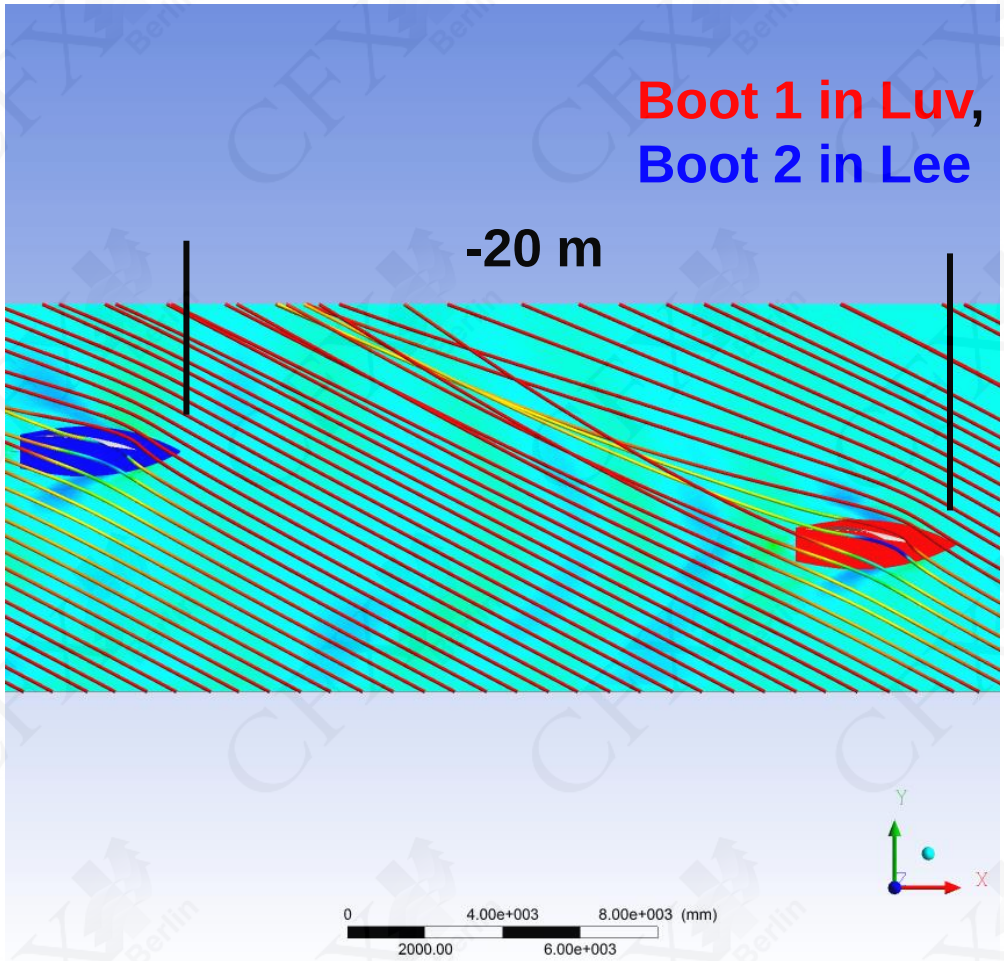


Berechnungsergebnisse

- Wechselwirkung zweier Boote:
  - im Abstand von -20 m noch keine Wechselwirkung der Luftströmung
  - beide Boote haben ungestörten Vortrieb

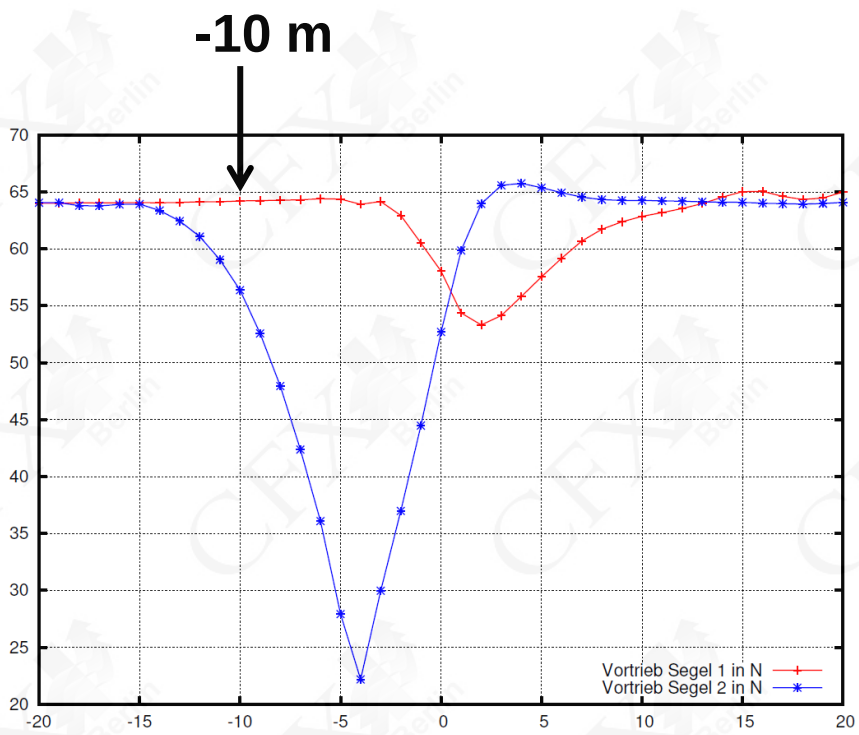


Stromlinien der Luft und Wasseroberfläche:
im Abstand (Bug zu Bug) -20 m

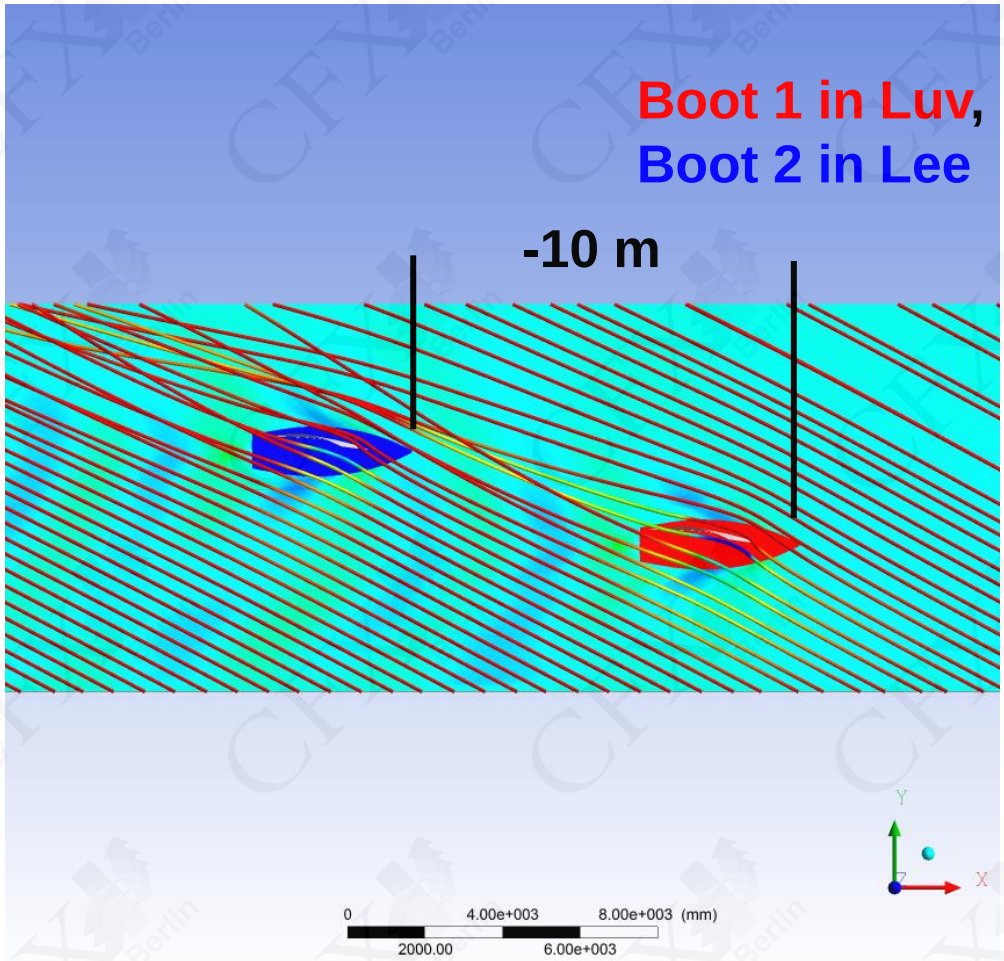


Berechnungsergebnisse

- Wechselwirkung zweier Boote:
  - im Abstand von -10 m kommt Boot 2 in den Nachlauf des Segels von Boot 1, so dass der Vortrieb abnimmt

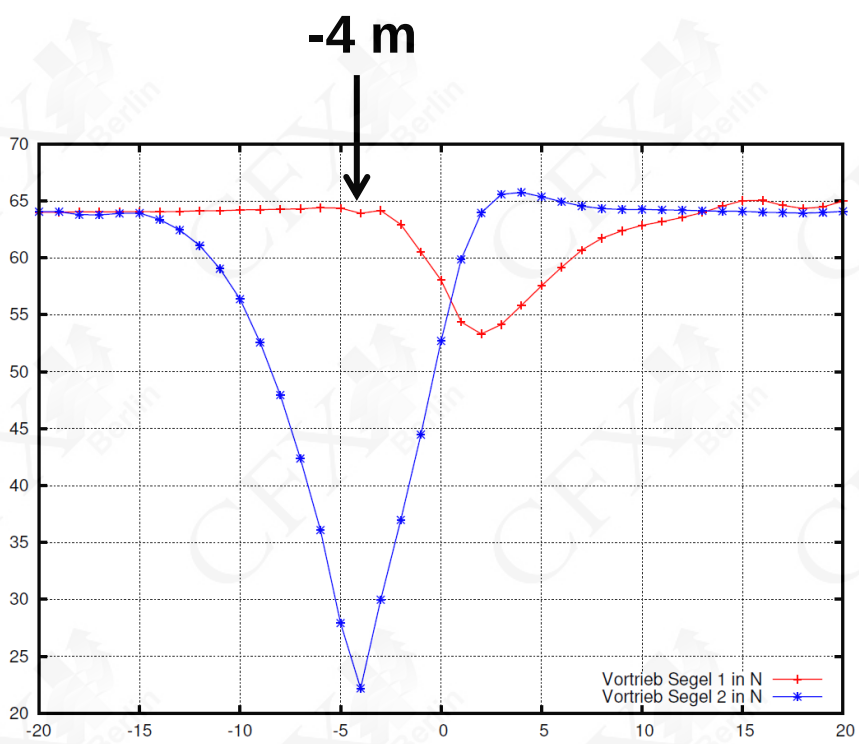


Stromlinien der Luft und Wasseroberfläche:
im Abstand (Bug zu Bug) -10 m

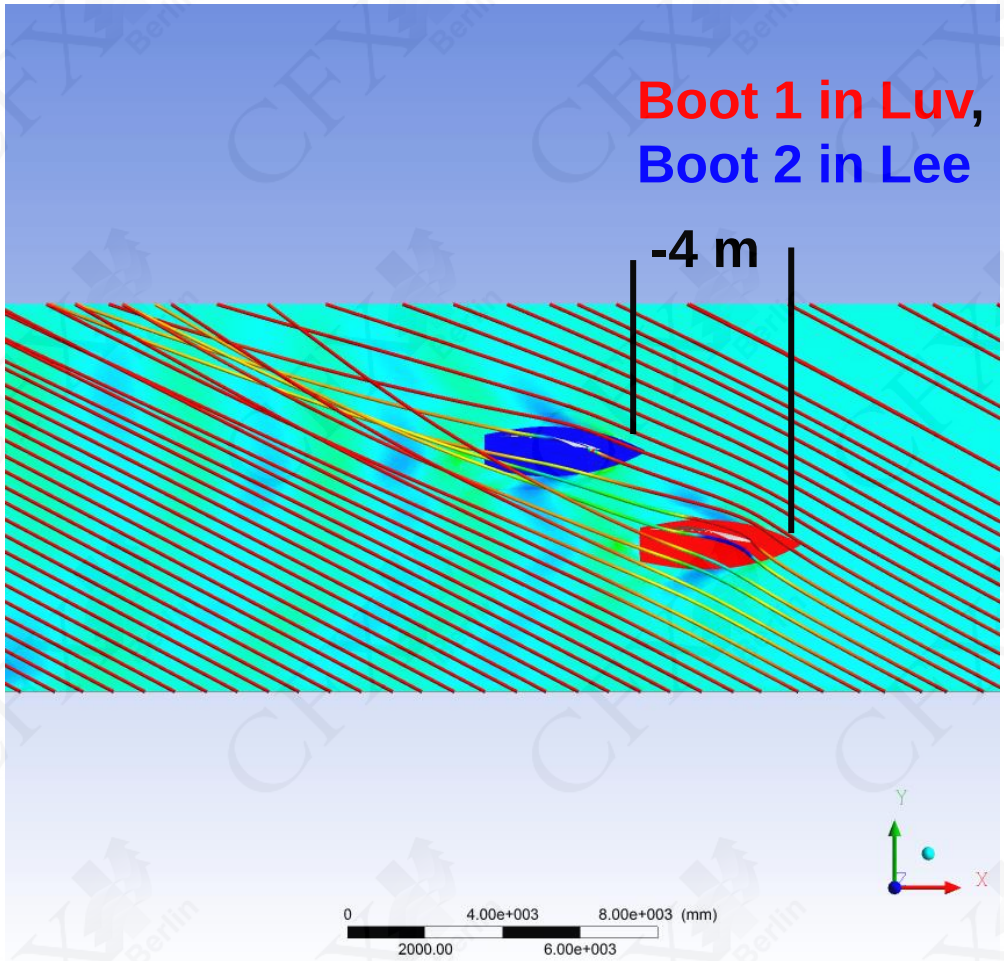


Berechnungsergebnisse

- Wechselwirkung zweier Boote:
  - im Abstand von -4 m ist Boot 2 maximal im Windschatten von Boot 1, so dass der Vortrieb nur noch 1/3 ist

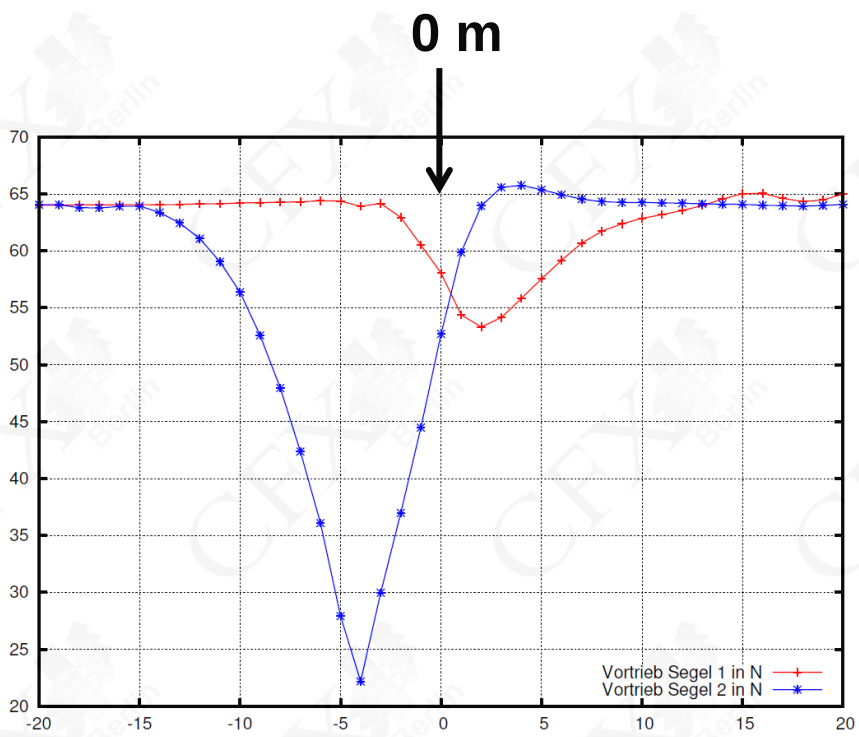


Stromlinien der Luft und Wasseroberfläche:
im Abstand (Bug zu Bug) -4 m

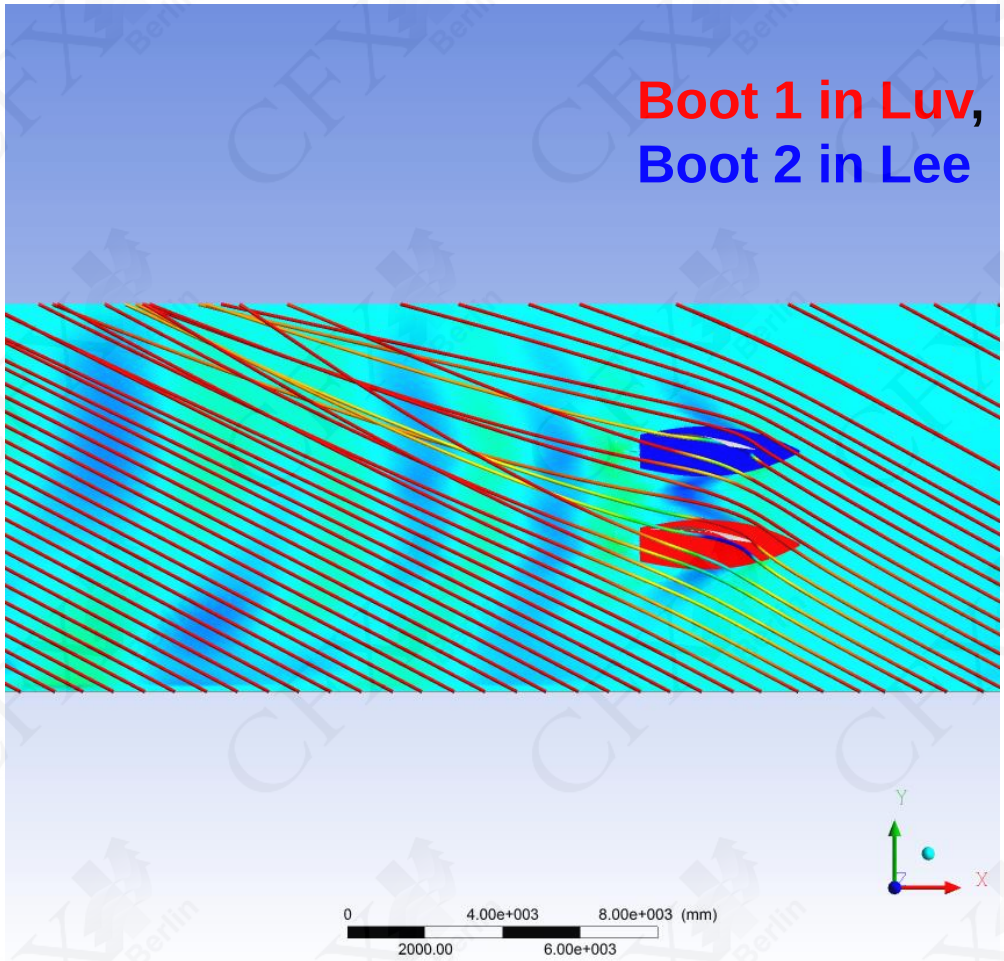


Berechnungsergebnisse

- Wechselwirkung zweier Boote:
  - direkt nebeneinander beeinflussen sich beide Boote gegenseitig und beide haben weniger Vortrieb

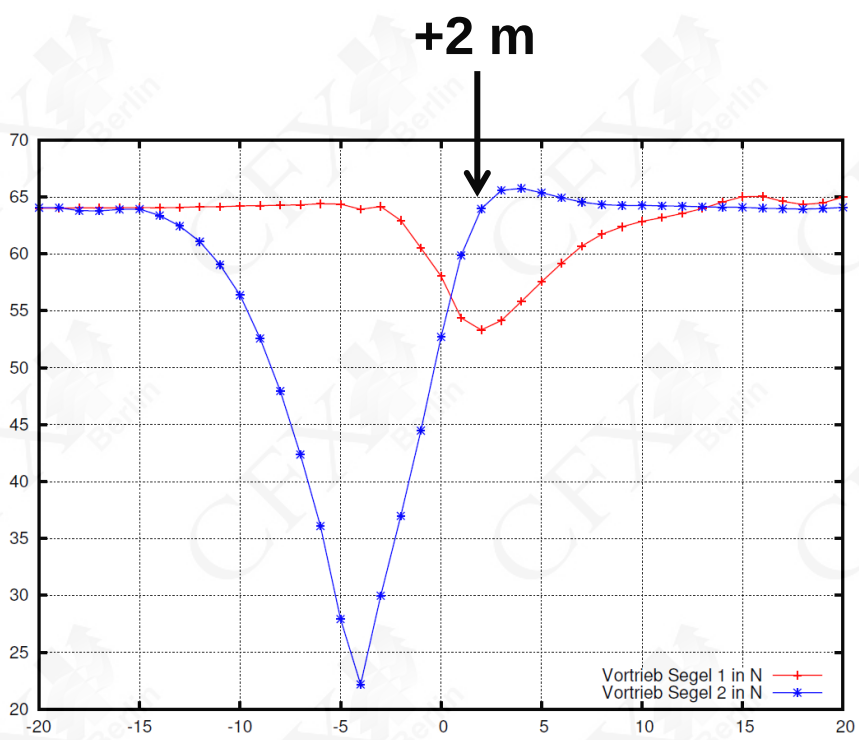


Stromlinien der Luft und Wasseroberfläche:
im Abstand (Bug zu Bug) 0 m

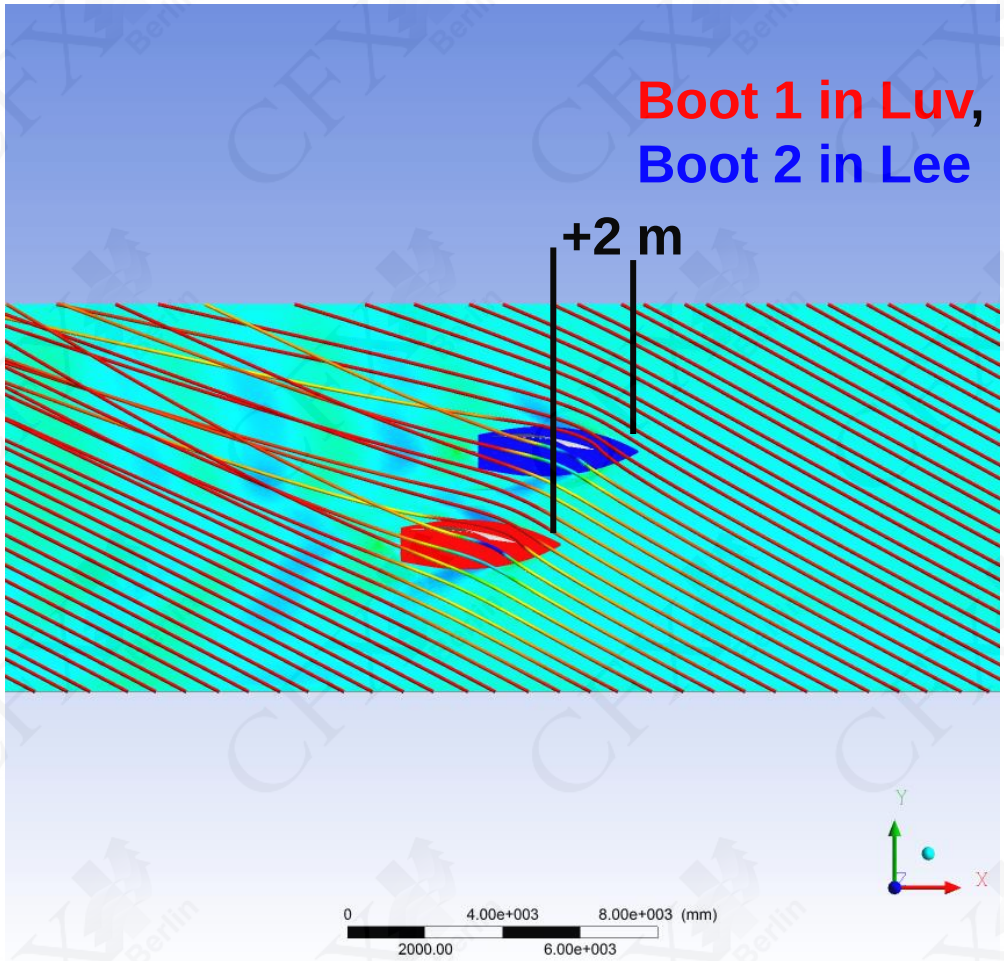


Berechnungsergebnisse

- Wechselwirkung zweier Boote:
  - wenn Boot 2 leicht vor Boot 1 ist, sinkt der Vortrieb für Boot 1 deutlich und Boot 2 hat einen leicht erhöhten Vortrieb

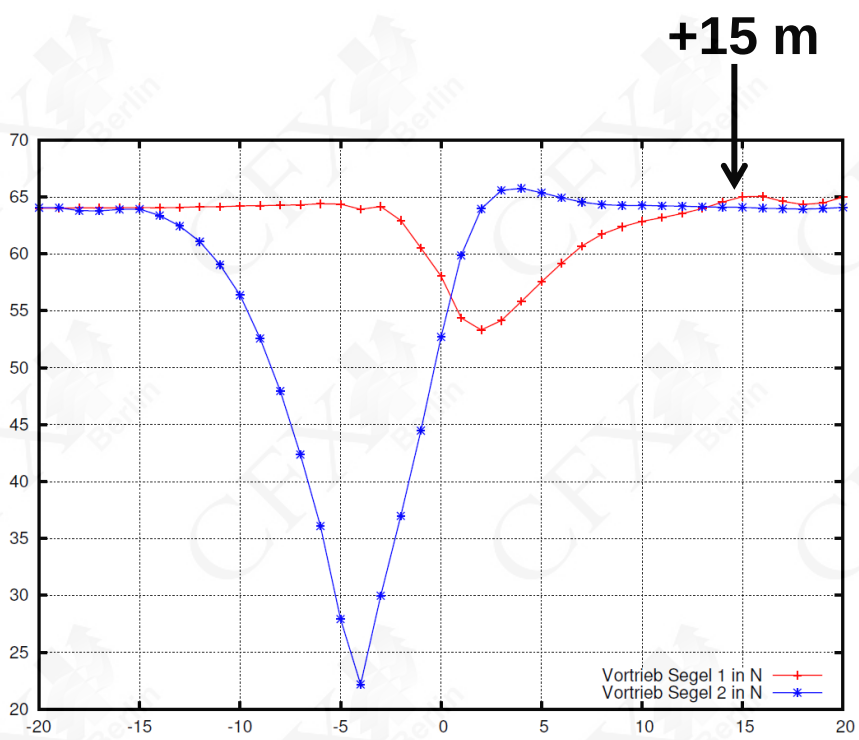


Stromlinien der Luft und Wasseroberfläche:
im Abstand (Bug zu Bug) +2 m

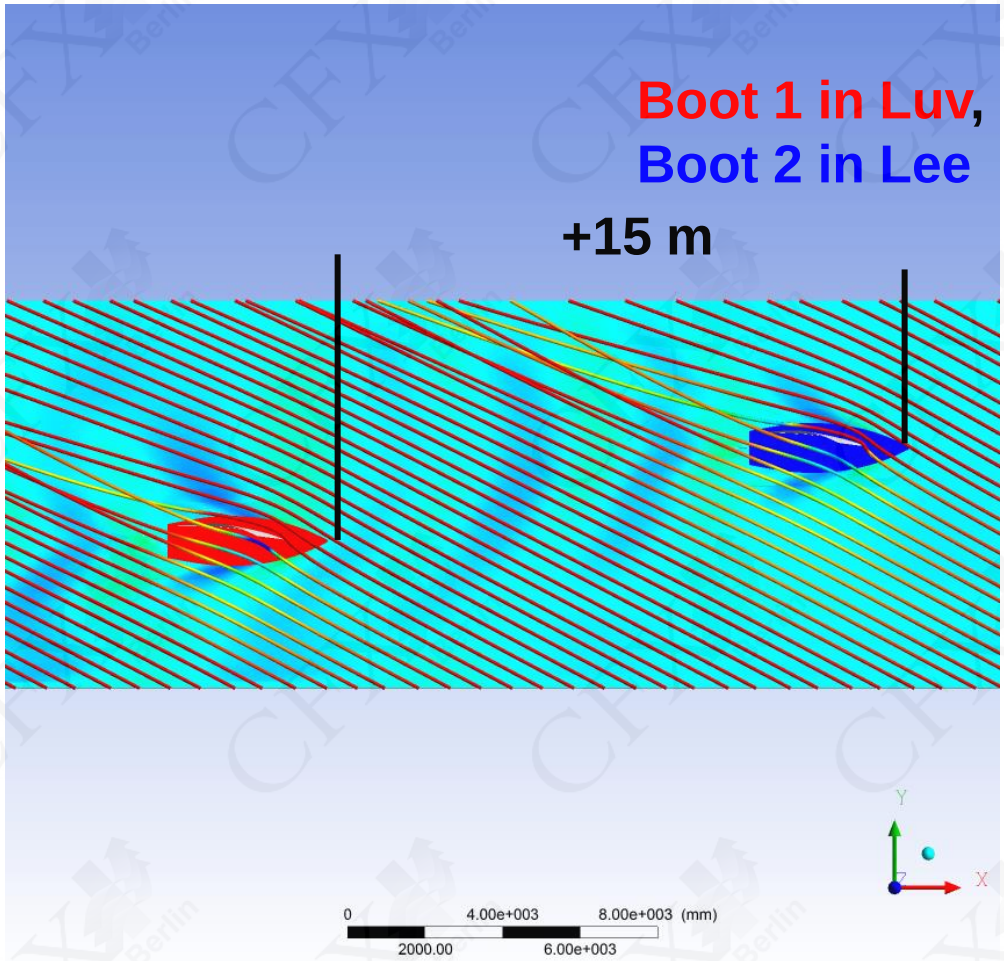


Berechnungsergebnisse

- Wechselwirkung zweier Boote:
  - ab ca. 10 m Abstand haben beide Boote wieder den ungestörten Vortrieb



Stromlinien der Luft und Wasseroberfläche:
im Abstand (Bug zu Bug) +15 m



Zusammenfassung

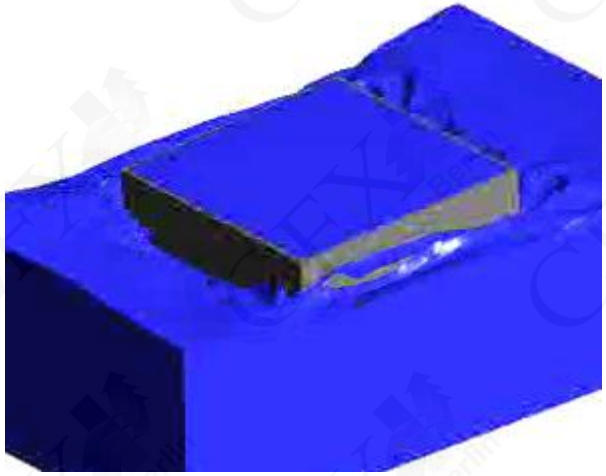
- Darstellung von
  - Geometrieaufbereitung,
  - Vernetzung,
  - Modellauswahl und Randbedingungen
- Voruntersuchung der Windrichtung bei 20 km/ Anströmung:
  - Vortrieb bei aktuellem (festgelegtem) Segel und Kurs ab 14° scheinbarem Wind
  - ab 32° Strömungsablösung und sinkender Vortrieb
- Untersuchung des Segelboots im Wasser bei 8,3 km/h Fahrt und 20 km/h scheinbarem Wind aus 28° Am-Wind-Kurs:
  - entspricht 13,3 km/h wahrem Wind aus 45°
  - Wasseroberfläche zeigt Bugwelle und Absunk neben dem Boot
  - Wasser- und Luftströmung zeigen Verdrängung durch Rumpf und Segel
  - Druck auf dem Segel bewirkt Kippmoment und Vortrieb
- Untersuchung der Wechselwirkung zweier Boote:
  - sinkender Vortrieb für Lee-Boot im Windschatten des Luv-Boots
  - kleiner Bereich mit sinkendem Vortrieb für Luv-Boot kurz nach „Überholen“

Ausblick

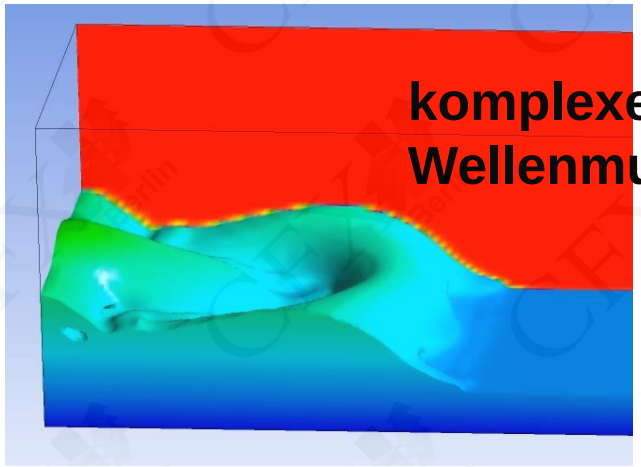
- Verfeinerung der Rechengitter notwendig, um Wasseroberfläche und Reibungsterme besser abzubilden; ggfs. vollständig strukturierte Vernetzung
- Einige bisher vernachlässigte Aspekte könnten, bei Erhöhung des Rechenaufwands, berücksichtigt werden:
  - Veränderung der Lage des Boots im Wasser aufgrund angreifender Kräfte und Momente
    → Starrkörpermodellierung mit bis zu 6 Freiheitsgraden
  - Anpassung der Ruderlage und Sitzposition, Drehung oder Verformung des Segels
    → Berücksichtigung der Aktionen des Seglers
    → Berechnung der Segelform aus Flächenkräften über Fluid-Struktur-Interaktion
  - Berücksichtigung einlaufender Wellen
    → Vorgabe von Wellenmustern am Einströmrand, transiente Simulation
  - realistischere Geometrie:
    → Berücksichtigung des Seglers, des Bootsinnenraums, der Leinen usw.
- Gesamtsystem unter Berücksichtigung aller Aspekte würde sehr aufwändig!

Ausblick

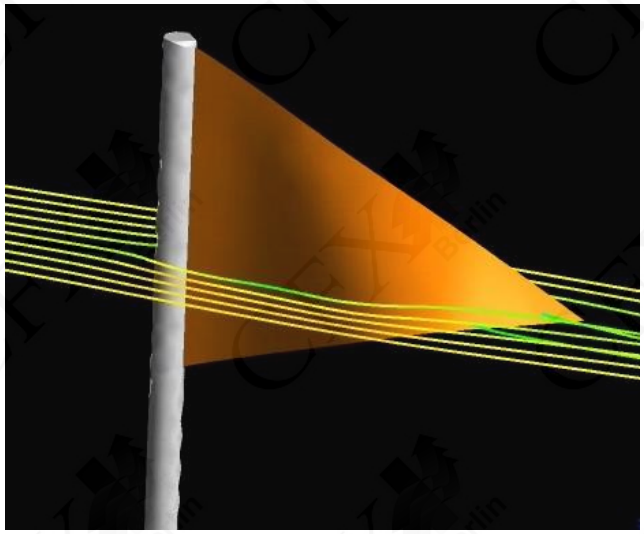
Geometrie-modell eines Seglers



Auftauchender Quader als Starrkörper mit 6 Freiheits-graden



komplexes Wellenmuster

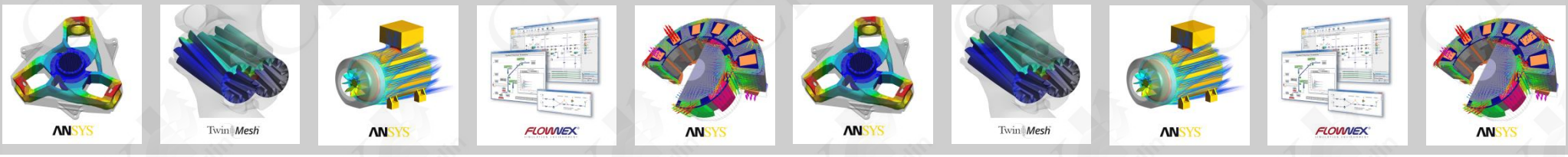


Sich im Wind deformierendes Segel über Fluid-Struktur-Interaktion

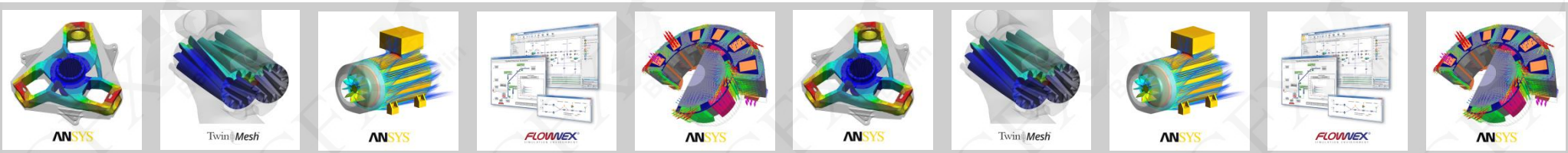
CFX Berlin Software GmbH

Ihr kompetenter Partner rund um Simulation

CFX BERLIN



CFX BERLIN

ist Ihr kompetenter Partner für:

- ✓ ANSYS®-Software
- ✓ TwinMesh™-Software
- ✓ Flownex®SE-Software
- ✓ Berechnung & Optimierung
- ✓ Beratung & Schulung