

AEROLAB - Validierungsbericht

Version 4.3 · 20.10.2026 · Schicht-Werk, Tulln an der Donau · Kern 1.1 Rohdaten:
04_META/validierung_ergebnisse.json, 04_META/beispielergebnisse.json. Nachprüfung: node
05_BUILD/validate_physics.js und node 05_BUILD/beispiele.js.

1 Ergebnis in Kürze

AEROLAB ist **für den Vergleich von Formen im laminaren Bereich geeignet**. Absolute Beiwerte stimmen bei Zylindern gut mit der Literatur überein, wenn der Wandverbau klein ist; bei Profilen fehlt eine unabhängige Referenz. Die Vergleichswerte der Literatur wurden ohne Online-Recherche aus dem Fachwissen angesetzt und sind an den Originalen zu prüfen. Eine Messung liegt nicht vor.

Prüfung	Ergebnis	Bewertung
Zylinder Re 20, Cd	2,43 (10 % Verbau), 2,33 (5 %); frei etwa 2,05	Abweichung durch Wandverbau, 13 bis 19 %
Zylinder Re 40, Cd	1,81 (10 % Verbau), 1,62 (5 %); frei 1,5 bis 1,6	bei 5 % Verbau im Rahmen
Gitterunabhängigkeit Zylinder Re 40 (L = 16 gegen 32)	Cd 1,81 gegen 1,83	gut
Zylinder Re 100, Strouhal-Zahl	0,168 (5 % Verbau, L = 12), 0,179 (10 % Verbau, L = 16); frei 0,164	bestanden; Verbau erhöht den Wert wie erwartet
Zylinder Re 100, Cd	1,45 (5 %), 1,52 (10 %); frei etwa 1,3 bis 1,4	Abweichung durch Verbau, 4 bis 12 %
Gitterunabhängigkeit NACA 0012, Re 200 (L = 24, 32, 48)	Cd 0,299 / 0,304 / 0,296	gut (rund 3 %)
Platte parallel Re 500, Cd	0,175 (Reibung nach Blasius 0,059 zuzüglich Druckanteil der Vorderkante)	Größenordnung plausibel, Anteil nicht getrennt nachgewiesen
Symmetrie NACA 0012, $\alpha = 0$	Cl zwischen -0,008 und +0,013	bestanden (Nullpunktfehler rund 0,01)
Vorzeichen und Größe des Auftriebs	Cl steigt mit α , NACA 2412 liefert bei $\alpha = 0$ positiven Auftrieb	bestanden (Tendenz)
Profile, Cd absolut	rund 0,30 bei Re 200	offen: nach Fachwissen vermutlich zu hoch; ohne unabhängigen Referenzwert nicht entscheidbar

2 Folgerungen für den Gebrauch

- Formvergleich bei gleichem Re, gleichem Verbau und gleicher Auflösung ist zulässig; absolute Beiwerte von Profilen nicht weitergeben.
- Strouhal-Zahlen für Zylinder sind brauchbar (Sehne mindestens 12 Zellen, Verbau höchstens 10 %).
- Die Optimierung liefert Richtungen: im Beispiel (NACA, Re 300) steigt die Gleitzahl bei der Nachprüfung von 0,92 auf 1,96 (Anstellwinkel 8,6°, Dicke 8 %).

3 Befund Auftriebsschwingung bei Profilen (behoben)

In Kern 1.0 zeigten Profile ab etwa 4° Anstellwinkel eine Auftriebsschwingung mit $St \approx 0,76$, deren Amplitude mit der Auflösung wuchs. Untersucht wurden Anfangsstörung, Gebietsränder (zusätzliche Absorptionszone am Einlass) und Gitter-Mach-Zahl. Weder Anfangsstörung noch Randzone änderten die Schwingung; bei einer Halbierung der Gitter-Geschwindigkeit von $U = 0,08$ auf 0,04 (und ebenso bei 0,06 und 0,05) verschwand sie, die Mittelwerte blieben gleich (Cd 0,245, Cl 0,28 bei $\alpha = 6^\circ$). Ursache ist damit die Kompressibilität des Verfahrens bei Gitter-Mach-Zahl 0,14. Der Standard wurde auf $U = 0,06$ (Mach 0,10) gesenkt; alle Rechnungen wurden wiederholt (Tabelle oben). Die Profildipole sind seither stationär. ###
3.1 Zusatztest NACA 0012 bei weiteren Re und Anstellwinkeln

Sehne 24 Zellen, Standardwand, Anstellwinkel 0, 4, 8, 12°, bis zu 30 Sehnenzeiten (Rohdaten:
04_META/zusatztests_profile.json):

Re	Cd (0 / 4 / 8 / 12°)	Cl (0 / 4 / 8 / 12°)	Verhalten
100	0,444 / 0,450 / 0,470 / 0,500	-0,01 / 0,19 / 0,38 / 0,54	stationär, konvergiert

500	0,183 / 0,194 / 0,218 / 0,253	0,01 / 0,19 / 0,31 / 0,43	stationär bis 8° ; bei 12° instationär (St 1,2), nicht sicher konvergiert
1000	0,131 / 0,146 / 0,177 / 0,228	0,02 / 0,16 / 0,26 / 0,42	in allen Fällen instationär (St 1,0 bis 1,15), nicht sicher konvergiert

Der Auftrieb steigt mit dem Anstellwinkel, der Widerstand fällt mit Re, wie nach Fachwissen zu erwarten; die Rangfolge der Winkel ist durchgehend plausibel. Bei Re 1000 ist die ermittelte Frequenz ($St \approx 1$) Ablösung in der Nachlaufströmung bei zweidimensionaler Rechnung und grober Auflösung oder ein numerischer Anteil; beides ist nicht getrennt. Prüfung bei feinerer Auflösung (Re 1000, 4° , Sehne 48 statt 24 Zellen; 04_META/zusatztest_re1000_L48.json): weiterhin instationär (St 1,02), Cd 0,133 (vorher 0,146), Cl 0,20 (vorher 0,16). Die Schwingung bleibt also bei doppelter Auflösung bestehen und ist damit kein reiner Grobgitter-Artefakt, die Mittelwerte sind aber nicht gitterunabhängig (Abweichung rund 10 bis 30 %). Folgerung: Für Profile sind Re bis etwa 500 und Anstellwinkel bis 8° belastbar vergleichbar, darüber nur als Tendenz.

4 Offene Punkte

- Unabhängige Referenz für Profil-Beiwerte (veröffentlichte Rechnung oder Messung bei Re 100 bis 1000) einholen – offen.
- Re 1000: Schwingung besteht bei $L = 48$ fort, Mittelwerte nicht gitterunabhängig; Ursache (zweidimensionale Nachlaufablösung gegen numerischen Anteil) nicht getrennt – offen.
- Zylinder Re 100 mit $L \geq 24$ wiederholen – offen.
- Test der Oberfläche in Firefox, Safari und auf echten Smartphones – offen (Chromium geprüft, einschließlich Smartphone-Emulation 390 Pixel Breite).
- Messung an einem gedruckten Prüfkörper – offen.

5 Literatur (ohne Prüfung am Original)

- Dennis, S. C. R.; Chang, G.-Z. (1970): Numerical solutions for steady flow past a circular cylinder at Reynolds numbers up to 100. Journal of Fluid Mechanics 42.
- Tritton, D. J. (1959): Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers. Journal of Fluid Mechanics 6.
- Williamson, C. H. K. (1996): Vortex dynamics in the cylinder wake. Annual Review of Fluid Mechanics 28.
- Bouzidi, M.; Firdaouss, M.; Lallemand, P. (2001): Momentum transfer of a Boltzmann-lattice fluid with boundaries. Physics of Fluids 13.
- Ladd, A. J. C. (1994): Numerical simulations of particulate suspensions via a discretized Boltzmann equation. Journal of Fluid Mechanics 271.
- Krüger, T. et al. (2017): The Lattice Boltzmann Method – Principles and Practice. Springer.

Offenlegung: Gewerbliches Interesse an gedruckten Bauteilen; Entwicklung unter Einsatz eines KI-Assistenten. Schicht-Werk fertigt als Lohnfertiger nach Kundenvorgabe. Kontakt: office@schicht-werk.eu · www.schicht-werk.eu. Nicht bereitgestellt für Rüstung, Militär, Waffen oder militärisch nutzbare Luftfahrt.