



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Projekt 2

Studiendepartment Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Abschätzung von Propellerwirkungsgraden mittels JavaProp

Sebastian Gerber

12. Juni 2008

Kurzreferat

Im vorliegenden Bericht wurde das Programm JavaProp untersucht. JavaProp ist ein auf der Programmiersprache Java beruhendes Programm zur Berechnung und Auslegung von Propellern in verschiedenen Flugzuständen.

Im Folgenden wird auf die Anforderungen des Programms an die Hardware eingegangen und die Installation beschrieben. Die Bedienung des Programms sowie die verschiedenen Möglichkeiten der Propellerauslegung sind zwei weitere wichtige Punkte dieser Arbeit. Des Weiteren wird auf den theoretischen Hintergrund eingegangen und ein Vergleich zwischen der Theorie und der Praxis erstellt. Schließlich geht es um die Frage, inwieweit JavaProp ein sinnvolles Programm für den Flugzeugentwurf ist oder, ob es bei der praktischen Umsetzung zu Problemen kommen kann.





DEPARTMENT FAHRZEUGTECHNIK UND FLUGZEUGBAU

Abschätzung von Propellerwirkungsgraden mittels HamProp und JavaProp

Aufgabenstellung zum *Projekt 2* für eine Teamarbeit mit zwei Studenten

Hintergrund

HamProp und JavaProp sind Programme zur Abschätzung von Propellerwirkungsgraden in unterschiedlichen Flugzuständen. HamProp wurde von der Firma Hamilton-Sunstrand entwickelt und wird in der Industrie auch von weiteren Firmen eingesetzt. Die Programme sollen an der HAW im Rahmen des Forschungsprojekts Grüner Frachter (siehe <http://GF.ProfScholz.de>) zum Einsatz kommen.

Aufgabe

Mit den Programmen HamProp und JavaProp soll der Wirkungsgrad verschiedener Propeller in verschiedenen Flugzuständen abgeschätzt werden. Es gilt, die Grundlagen der Programme zu erklären sowie ihre Arbeitsweise zu beschreiben und zu bewerten.

Dabei soll/sollen:

- die Anforderungen der Programme an Soft- und Hardware des verwendeten Rechners dargelegt werden,
- der Installationsvorgang und die Bedienung des Programme dokumentiert werden,
- die theoretische Basis der Programme kurz beschrieben werden,
- die Ergebnisse hinsichtlich Ihrer Genauigkeit bewertet und mit Methoden aus der Literatur verglichen werden und
- die Möglichkeiten der Programme hinsichtlich einer praktischen Unterstützung des Flugzeugentwurfs bewertet werden.

Die Ergebnisse sollen in einem Bericht dokumentiert werden. Bei der Erstellung des Berichtes sind die entsprechenden DIN-Normen zu beachten.

Inhalt

Verzeichnis der Bilder	6
Verzeichnis der Tabellen	7
Liste der Symbole	8
1 Einleitung	9
1.1 Motivation	9
1.2 Ziel der Arbeit	9
1.3 Aufbau der Arbeit	9
2 Theorie der Propellerberechnung	11
2.1 Allgemeine Blattelementetheorie	11
2.2 Blattelementetheorie nach C. N. Adkins und R. H. Liebeck	13
3 Das Programm JavaProp	16
3.1 Installation von JavaProp	16
3.1.1 Anforderungen an den PC	16
3.1.2 Installation von Java	17
3.1.3 Ausführen von JavaProp	17
3.2 Bedienung von JavaProp	18
3.2.1 Entwurfs-Karte	18
3.2.2 Profile-Karte	20
3.2.3 Geometrie-Karte	21
3.2.4 Ändern-Karte	22
3.2.5 Multi-Analyse-Karte	23
3.2.6 Einzel-Analyse-Karte	25
3.2.7 Strömungsfeld-Karte	26
3.2.8 Optionen-Karte	26

4 Vergleich mit der Theorie	28
5 Fazit	31
Literaturverzeichnis	32
Anhang	33
A Rechnungswerte von JavaProp	33
B Rechnungswerte der Handrechnung	39
C Hoffmann-Propellerdaten	42

Verzeichnis der Bilder

2.1	Geometrie und Schnitte eines Propellerblattes (JavaProp 2008)	11
2.2	Steigung eines Propellers (nach JavaProp 2008)	12
2.3	Geschwindigkeiten und Winkel am Blattelement (Adkins 1994)	13
3.1	Entwurfs-Karte (JavaProp 2008)	19
3.2	Profile-Karte (JavaProp 2008)	20
3.3	Geometrie-Karte (JavaProp 2008)	21
3.4	Ändern-Karte (JavaProp 2008)	23
3.5	Multi-Analyse-Karte (JavaProp 2008)	24
3.6	Einzel-Analys-Karte (JavaProp 2008)	25
3.7	Strömungsfeld-Karte (JavaProp 2008)	26
3.8	Optionen-Karte (JavaProp 2008)	27
A.1	Eingabewerte von JavaProp (JavaProp 2008)	33
A.2	Profil und Anstellwinkel von JavaProp (JavaProp 2008)	34
A.3	Geometriedaten von JavaProp (JavaProp 2008)	34
A.4	Multi-Analyse-Daten von JavaProp (JavaProp 2008)	35
A.5	Multi-Analyse-Graphen von JavaProp (JavaProp 2008)	36
A.6	Einzel-Analyse-Daten von JavaProp (JavaProp 2008)	37
A.7	Einzel-Analyse-Graphen von JavaProp (JavaProp 2008)	37
A.8	Strömungsfeld-Daten von JavaProp (JavaProp 2008)	38
B.1	Eingabewerte der Handrechnung	39
B.2	Rechenschritte und Ergebnisse der Handrechnung	40
B.3	Ergebnisse der Handrechnung	41
C.1	Hoffmann-Propellerdaten	42

Verzeichnis der Tabellen

4.1	Ergebnisse der ersten Rechnungen	28
4.2	Ergebnisse der zweiten Rechnungen	30

Liste der Symbole

a	Axialer Interferenz-Faktor (axial interference factor)
a'	Umdrehungs Interferenz-Faktor (rotational interference factor)
B	Blattanzahl
C_d	Widerstandsbeiwert
C_l	Auftriebsbeiwert
C_P	Leistungsbeiwert
C_T	Schubbeiwert
c	Sehnenlänge
D	Durchmesser
D_{sp}	Durchmesser des Spinners
F	Prandtl-Verlustfaktor (Prandtl momentum loss factor)
G	Zirkulationsfunktion (circulation function)
H	Steigung des Propellers
J	Fortschrittsgrad
n	Drehzahl
P	Leistung
P_c	Leistungsbeiwert (nach Adkins)
Q	Drehmoment
R	Propellerradius
r	lokaler Radius
Re	Reynoldszahl
T	Schub
T_c	Schubbeiwert (nach Adkins)
V	Geschwindigkeit
W	lokale Totalgeschwindigkeit (local total velocity)
x	dimensionslose Distanz (nondimensional distance)

Griechische Symbole

α	Anstellwinkel
β	Blattwinkel
ϵ	Widerstands-Auftriebs Verhältnis (drag-to-lift ratio)
ζ	Verschiebungsgeschwindigkeitsverhältnis (displacement velocity ratio)
η	Wirkungsgrad
η^*	optimaler Wirkungsgrad
λ	Geschwindigkeitsverhältnis (speed ratio)
ξ	dimensionsloser Radius (nondimensional radius)
ρ	Dichte
ϕ	Anströmwinkel (flow angle)
ϕ_t	Anströmwinkel an der Propellerspitze (flow angle at the tip)
Ω	Winkelgeschwindigkeit

1 Einleitung

1.1 Motivation

In Zeiten immer weiter steigender Treibstoffpreise, wird verstärkt darauf Wert gelegt, Flugzeugantriebe effektiver auszulegen. Neben der Optimierung bestehender Strahlantriebe werden auch Propellerantriebe genauer untersucht, da sie gegenüber den Strahlantrieben effektiver arbeiten. Für die Neuauslegung von Flugzeugen ist es daher sinnvoll zu überlegen, ob nicht ein Propellerantrieb die effektivere Antriebsart ist. Dabei müssen eventuell auftretende Nachteile, wie eine geringere Geschwindigkeit oder eine höhere Lärmbelastung gegenüber einer höheren Effektivität, eingeordnet und abgeschätzt werden. Dies alles geschieht im Rahmen des Forschungsprojektes „Grüner Frachter“, das als Ziel hat, ein wirtschaftliches und effektives Flugzeug zu entwerfen.

1.2 Ziel der Arbeit

Dieser Bericht soll die Funktionsweise von JavaProp, sowie den theoretischen Hintergrund des Programms beschreiben. Es soll gezeigt werden, inwieweit die Ergebnisse von JavaProp mit den nach der Theorie ermittelten Werten vergleichbar sind. Des Weiteren wird geklärt, ob sich JavaProp für den Einsatz im praktischen Flugzeugentwurf eignet oder ob es Einschränkungen gibt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Hauptteil dieses Berichts ist nach folgendem Aufbau gegliedert:

Abschnitt 2 beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen der Propellerberechnung.

Abschnitt 3 beschreibt die Funktionsweise des Programms JavaProp.

Abschnitt 4 vergleicht die nach der Theorie ermittelten Werte mit den Ergebnissen aus JavaProp sowie den Angaben eines Herstellers von Propellern.

Abschnitt 5 widmet sich der praktischen Umsetzung der Berechnungsverfahren für den Flugzeugentwurf.

Anhang A enthält die mit dem Programm JavaProp bestimmten Propellerdaten.

Anhang B enthält die nach der Theorie mittels Handrechnung bestimmten Propellerdaten.

Anhang C enthält Propellerdaten der Firma Hoffmann.

2 Theorie der Propellerberechnung

Zur Berechnung eines Propellers können die verschiedensten Theorien herangezogen werden. Die am weitesten verbreiteten sind die **Strahltheorie** und die **Blattelementtheorie**. Dieser Bericht wird sich mit der erweiterten Blattelementtheorie nach C. N. Adkins und R. H. Liebeck (**Adkins 1994**) befassen.

2.1 Allgemeine Blattelementtheorie

Die Blattelementtheorie unterteilt das Propellerblatt, wie der Name schon andeutet, in einzelne Elemente. Diese einzelnen Elemente entstehen, indem man gedanklich das Propellerblatt entlang des Radius in einzelne Schnitte zerlegt. Die Schnitte haben jeder für sich die Form und Eigenschaften eines Flügelprofils. Die Anströmung der einzelnen Elemente setzt sich aus der rotatorischen Bewegung des Propellerblattes und der translatorischen Vorwärtsbewegung des Flugzeuges zusammen. Alle einzelnen Elemente zusammengenommen ergeben dann die Eigenschaften des Propellerblattes. Bild 2.1 zeigt drei Schnitte durch ein Propellerblatt mit zugehörigem Blattwinkel β .

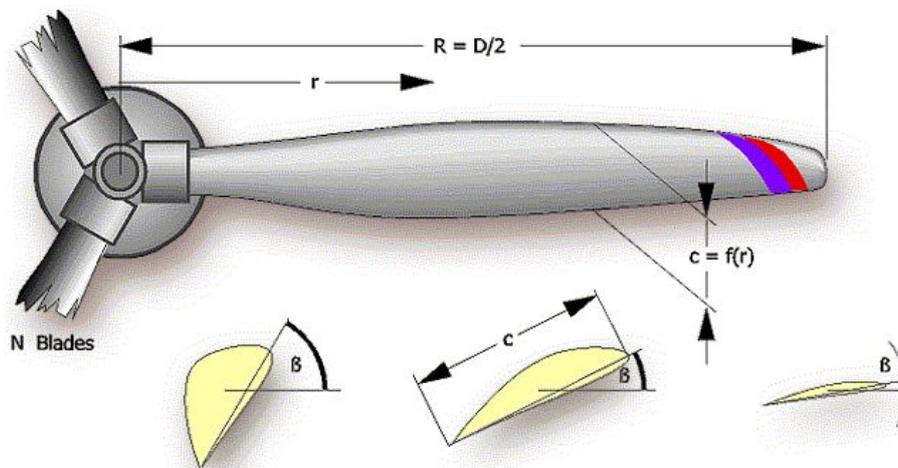


Bild 2.1: Geometrie und Schnitte eines Propellerblattes (**JavaProp 2008**)

Jedes einzelne Blattelement ist unter einem bestimmten Blattwinkel angestellt. Der Winkel nimmt von der Blattnabe zur Propellerspitze hin kontinuierlich ab. Dadurch entsteht eine Verwindung des Propellerblattes. Durch die Verwindung des Propellers und der rotatorischen Bewegung vollführt der Propeller eine Schraubenbewegung. Die dabei zurückgelegte Strecke wird auch als Steigung H bezeichnet. Die Steigung lässt sich nach Gleichung (1) berechnen und ist in Bild 2.2 dargestellt.

$$H = 2r\pi \tan\beta \quad (1)$$

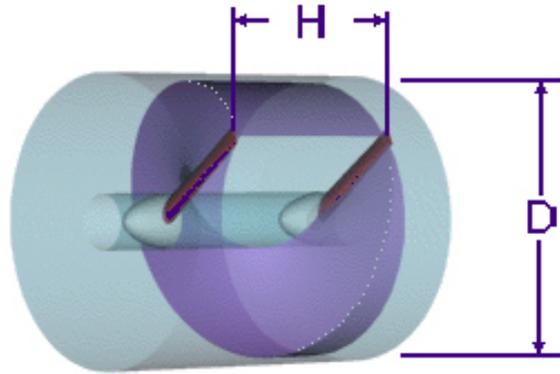


Bild 2.2: Steigung eines Propellers (nach **JavaProp 2008**)

Die Berechnung der Winkel der einzelnen Abschnitte wird im nächsten Abschnitt genauer ausgeführt.

Für die Berechnung des Wirkungsgrades η ist es notwendig die Beiwerte für den Schub und die Leistung zu bestimmen, da über diese Werte der Wirkungsgrad bestimmt werden kann. Allgemein ist der Wirkungsgrad als Verhältnis von der Nutzleistung zu der zugeführten Leistung definiert. Nach **Roskam 1997** ist der Wirkungsgrad folgendermaßen definiert:

$$\eta = J \frac{C_T}{C_P} \quad (2)$$

J ist dabei der Fortschrittsgrad. Der Fortschrittsgrad kennzeichnet die Anströmverhältnisse am Propeller und ist durch Gleichung (3) (**Roskam 1997** S.282) beschrieben.

$$J = \frac{V}{nD} \quad (3)$$

Die Schub- und Leistungsbeiwerte ergeben sich aus folgenden Gleichungen (**Roskam 1997** S.282):

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (4)$$

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (5)$$

Zu Beginn einer Propellerauslegung ist in der Regel nur ein Wert für die Leistung des Antriebs oder ein Wert für den zu erzeugenden Schub vorhanden. Der fehlende Wert muss durch eine Propellerauslegung bestimmt werden. Im folgenden Abschnitt wird dies anhand der Theorie nach **Adkins 1994** gezeigt.

2.2 Blattelementtheorie nach C. N. Adkins und R. H. Liebeck

Das Programm JavaProp basiert auf der Blattelementtheorie von C. N. Adkins und R. H. Liebeck. Die Theorie wurde 1980 im Auftrag von McDonnell Douglas verfasst, um eine einfache Bestimmung von Propellerleistungen zu ermöglichen. In **Adkins 1994** ist eine „Schritt für Schritt-Anleitung“ angegeben, um einen Propeller optimal auszulegen. Die Auslegung erfolgt in einem iterativen Prozess. Im Folgenden werden diese Schritte beschrieben. Bild 2.3 zeigt die Geometrie und auftretenden Geschwindigkeiten an einem Blattelement, die im Folgenden bestimmt werden.

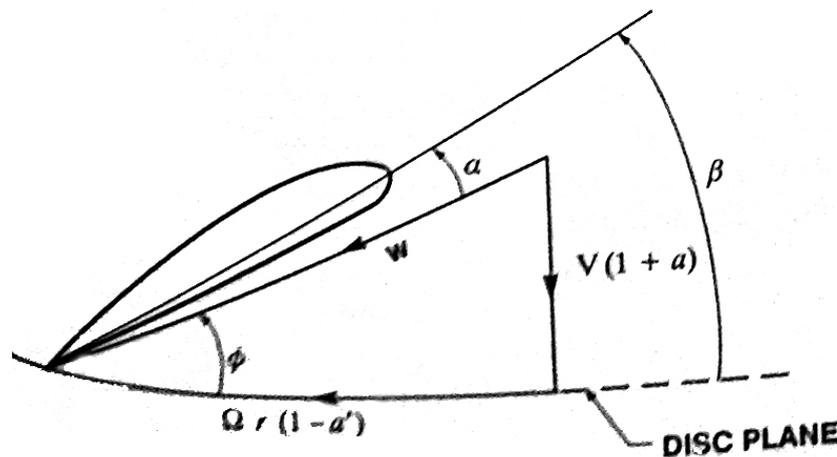


Bild 2.3: Geschwindigkeiten und Winkel am Blattelement (**Adkins 1994**)

Zu Beginn müssen die Werte für Leistung oder Schub, Radius des Propellers, Drehzahl, Geschwindigkeit, Blattanzahl sowie eine endliche Anzahl von Abschnitten, an denen die Blattgeometrie bestimmt werden soll mit zugehörigem Auftriebs- und Widerstandsbeiwert bekannt sein.

Als **erster Schritt** muss ein Einstiegswert für das Verschiebungsgeschwindigkeitsverhältnis ζ gewählt werden. ζ kann zu Beginn auch gleich null gesetzt werden. Am Ende des Entwurfsprozesses erhält man einen neuen Wert für ζ , mit dem man anschließend die komplette Rechnung noch einmal durchführen muss, bis sich die beiden Werte gleichen.

Als **zweiter Schritt** wird der Prandtl-Verlustfaktor F und der Anströmwinkel ϕ für jeden Abschnitt bestimmt. Dies geschieht mit den Gleichungen (6-11), wobei ϕ_t der Anströmwinkel an der Propellerspitze ist.

$$F = (2/\pi) \arccos(e^{-f}) \quad (6)$$

$$f = (B/2)(1 - \xi) / \sin \phi_t \quad (7)$$

$$\tan \phi_t = \lambda(1 + \zeta/2) \quad (8)$$

$$x = \Omega r / V \quad (9)$$

$$\tan\phi = (\tan\phi_t)\xi \quad (10)$$

$$\xi = r/R \quad (11)$$

Als **dritter Schritt** wird das Produkt Wc aus Gleichung (12) bestimmt. Das Geschwindigkeitsverhältnis λ wird aus Gleichung (13) mit $\Omega = 2n\pi/60$ ermittelt. Die für Gleichung (12) benötigte Zirkulationsfunktion G kann aus Gleichung (14) bestimmt werden.

$$Wc = 4\pi\lambda GVR\zeta/(C_l B) \quad (12)$$

$$\lambda = V/\Omega R \quad (13)$$

$$G = Fx \cos\phi \sin\phi \quad (14)$$

Als **vierter Schritt** muss für jeden Abschnitt, falls nicht konstant, das Widerstands-Auftriebs-Verhältnis aus Gleichung (15) bestimmt werden. Dazu muss das zu verwendende Profil mit den zugehörigen Polaren bekannt sein.

$$\epsilon = C_D/C_l \quad (15)$$

Als **fünften Schritt** müssen die Interferenz Faktoren a und a' sowie die lokale Totalgeschwindigkeit W aus den Gleichungen (16-18) bestimmt werden.

$$a = (\zeta/2) \cos^2\phi(1 - \epsilon \tan\phi) \quad (16)$$

$$a' = (\zeta/2x) \cos\phi \sin\phi(1 + \epsilon \tan\phi) \quad (17)$$

$$W = V(1 + a)/\sin\phi \quad (18)$$

Als **sechster Schritt** kann jetzt aus dem im dritten Schritt berechneten Produkt Wc und der zuvor bestimmten Totalgeschwindigkeit W die lokale Sehnenlänge c durch Gleichung (19) berechnet werden. Der Blattwinkel β kann durch Gleichung (20) bestimmt werden.

$$c = \frac{4\pi\lambda GVR\zeta/(C_l B)}{W} \quad (19)$$

$$\beta = \alpha + \phi \quad (20)$$

Als **siebter Schritt** müssen die Werte für I_1 , I_2 und J_1 , J_2 bestimmt werden. Diese Werte bekommt man, indem die einzelnen ' Werte aus den Gleichungen (21a-21d) eines jeden Abschnittes über den kompletten Radius integriert werden.

$$I'_1 = 4\xi G(1 - \epsilon \tan\phi) \quad (21a)$$

$$I'_2 = \lambda(I'_1/2\xi)(1 + \epsilon/\tan\phi) \sin\phi \cos\phi \quad (21b)$$

$$J'_1 = 4\xi G(1 + \epsilon \tan \phi) \quad (21c)$$

$$J'_2 = (J'_1/2)(1 - \epsilon \tan \phi) \cos^2 \phi \quad (21d)$$

Als **achter Schritt** können aus den Werten von I_1 , I_2 und J_1 , J_2 der Leistungsbeiwert P_c , das neue Verschiebungsgeschwindigkeitsverhältnis ζ und die Leistung P aus den Gleichungen (22-24), bzw. der Schubbeiwert T_c , das neue Verschiebungsgeschwindigkeitsverhältnis ζ und der Schub T aus den Gleichungen (25-27) bestimmt werden.

$$\zeta = (I_1/2I_2) - [(I_1/2I_2)^2 - T_c/I_2]^{1/2} \quad (22)$$

$$P_c = J_1\zeta + J_2\zeta^2 \quad (23)$$

$$P = \frac{T_c\rho V^3\pi R^2}{2} \quad (24)$$

$$\zeta = -(J_1/2J_2) + [(J_1/2J_2)^2 + P_c/J_2]^{1/2} \quad (25)$$

$$T_c = I_1\zeta - I_2\zeta^2 \quad (26)$$

$$T = \frac{T_c\rho V^2\pi R^2}{2} \quad (27)$$

Sollte der neue Wert für ζ nicht ausreichend nahe an dem zuvor in Schritt eins gewählten liegen, muss mit dem neuen Wert für ζ von Schritt zwei an die Rechnung wiederholt werden, bis die Werte nahe genug beieinander liegen.

Im **neunten Schritt** kann daraufhin aus den ermittelten Beiwerten der Wirkungsgrad errechnet werden.

$$\eta = T_c/P_c \quad (28)$$

3 Das Programm JavaProp

Das Programm JavaProp wurde von Martin Hepperle entwickelt und programmiert. Es steht im Internet zur freien Verfügung. Aktuell ist es in der Version 1.39 vom 24 März 2008 verfügbar. In erster Linie richtet es sich jedoch an Modellbauer zur Auslegung von Modellflugzeugpropellern. Es hat sich jedoch gezeigt, dass auch größere Propeller damit berechnet werden können. Generell gibt es keine Einschränkungen. Sollten einige Berechnungen keine Ergebnisse liefern, müssen gegebenenfalls einzelne Eingabewerte angepasst werden.

3.1 Installation von JavaProp

Bei JavaProp handelt es sich um eine Java-Anwendung. Zum Ausführen der Anwendung wird daher das Programm Java der Firma Sun Microsystems benötigt.

3.1.1 Anforderungen an den PC

Minimalanforderungen an die Hardware zum Ausführen von JavaProp wurden nicht gefunden, so dass die Minimalanforderungen zum Ausführen von Java herangezogen werden. Die älteste Java Version, auf der JavaProp noch läuft, hat als Systemvoraussetzung ein Windows 98 System mit einem 166 MHz Pentium Prozessor, 125 MB Festplattenspeicher und einen Arbeitsspeicher von 32 MB. In der folgenden Auflistung sind verschiedene Betriebssysteme sowie Java Versionen aufgeführt, die seitens JavaProp mindestens unterstützt werden (**JavaProp 2008**):

- Windows 98, Sun Java 2, 1.4.1
- Windows 98, IE 5.5, Java 1.1.4, Microsoft Java VM 5.0
- Windows 98, Sun Java 2, 1.3.0
- Windows 98, Netscape 6.0: Java 1.3.0
- Windows 2000, IE 5.0, Java 1.1.4
- Windows 2000, Opera 5.11, Sun Java Runtime Environment 1.3
- Windows XP, IE 6.0, Sun Java Plug-in versions 1.4.2_02 to _04
- HotJava for Windows, MacOS, Solaris, Version 3.0

Da die meisten heutigen Systeme die Minimalanforderungen bei weitem übertreffen, sollte es – soweit eine aktuelle Java Version installiert ist – keine Probleme beim ausführen von JavaProp geben. Java ist auch für andere Systeme wie Linux, Solaris oder Apple erhältlich.

JavaProp wurde auf einem PC mit Intel Pentium 4 Prozessor (2,7 GHz) und einem Arbeitsspeicher von 1 GB getestet. Als Betriebssystem steht Windows XP mit dem Service Pack 2 zur Verfügung. Java wurde in der Version 1.6.0_03 verwendet. Mit der genannten Konfiguration ergaben sich keine Probleme beim Ausführen von JavaProp.

3.1.2 Installation von Java

Die aktuellste Java Version kann unter <http://www.java.com> heruntergeladen werden.

3.1.3 Ausführen von JavaProp

Beim Ausführen von JavaProp gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten. Zum Einen kann das Programm direkt über die Webseite des Programmierers online ausgeführt werden, zum Anderen kann man sich die benötigten Dateien herunterladen und dann offline starten.

Online

Die online Version hat den Vorteil, dass man immer mit der aktuellsten Version des Programms arbeitet. Um das Programm zu starten, ruft man die Seite des Programmierers unter folgendem Link auf:

<http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javaprop.htm>

Es erscheint die Startseite von JavaProp. Um JavaProp zu starten, muss man auf „The Applet“ klicken. Daraufhin erscheint die erste Eingabemaske von JavaProp.

Offline

Um JavaProp offline ausführen zu können, kann zum einen eine Windows Installationsdatei oder die benötigten Programmteile einzeln heruntergeladen werden. Dies kann notwendig sein, wenn z.B. keine dauerhafte Internetanbindung verfügbar ist.

Die Windows Installationsdatei ist unter folgendem Link zu finden:

<http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/java/javapropinstaller.msi>

Nach dem Starten der Datei kann das gewünschte Installationsverzeichnis gewählt werden. Das Installationsprogramm installiert alle benötigten Dateien und richtet eine Gruppe im Windows Startmenü ein. Über das Startmenü kann dann JavaProp gestartet werden.

Alternativ können auch die beiden benötigten Java Archive heruntergeladen und lokal gespeichert werden. Die benötigten Dateien sind unter folgenden Links zu finden:

<http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/java/javaprop.jar>

<http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/java/mhclasses.jar>

Die beiden Dateien müssen in dem gleichen beliebigen Verzeichnis gespeichert werden. Zum Ausführen muss doppelt auf die Datei `javaprop.jar` geklickt werden.

3.2 Bedienung von JavaProp

Die Oberfläche von JavaProp ist aus verschiedenen Karteikarten aufgebaut. Die einzelnen Karten und deren Funktion werden im Folgenden genauer beschrieben. Auf fast jeder Karte hat man die Möglichkeit, die erzeugten Daten über Knöpfe im unteren Bereich der Fenster auszugeben, zu speichern oder Daten zu importieren. Alle Graphiken, die durch JavaProp erzeugt wurden, lassen sich über einen Klick mit der rechten Maustaste unter verschiedenen Formaten abspeichern.

3.2.1 Entwurfs-Karte

Auf der „Entwurfs-Karte“ (Bild 3.1) werden alle Daten, die zur Gestaltung eines optimalen Propellers benötigt werden, abgefragt. Aus den gegebenen Daten errechnet das Programm einen Propeller mit der höchstmöglichen Effizienz. Die Einträge für den Durchmesser und die Drehzahl werden später auch noch für die Analyse des Propellers verwendet. Einen weiteren Einfluss auf die Berechnung haben die gewählten Profile unter der „Profile-Karte“, sowie deren Anstellwinkel. Soll die Berechnung des Propellers für eine andere Höhe als die Meereshöhe geschehen, so müssen auf der „Optionen-Karte“ noch die Werte für Dichte, Zähigkeit und Schallgeschwindigkeit angepasst werden.

Folgende Angaben werden auf der „Entwurfs-Karte“ abgefragt:

Propeller Name	Hier kann dem Propeller ein beliebiger Name gegeben werden
Blattzahl B	Anzahl der Blätter des Propellers
Drehzahl n	Drehzahl des Propellers in [1/min]
Durchmesser D	Durchmesser in [m]
Spinner Durchm. Dsp	Durchmesser des Spinners in [m]
Geschwindigkeit v	Fluggeschwindigkeit im [m/s]

Der Propeller kann nach einem der folgenden Werte ausgelegt werden:

Leistung P	aufzunehmende Leistung in [W]
Schub T	zu erzeugender Schub in [N]
Drehmoment Q	aufzunehmendes Wellendrehmoment in [Nm]

Sollte ein Spinner Durchmesser angegeben sein, wird er als Loch in der Mitte des Propellers in die Berechnung mit einbezogen. Durch die Aktivierung der Mantelschraubenoption werden die Verluste an den Propellerspitzen nicht mehr mit einberechnet. Die Form der Mantelschraube wird hierbei ebenso wenig berücksichtigt wie deren Schub und Widerstand. Die „breite Spitze“-Option kann aktiviert werden, um eine endliche Sehnenlänge an der Blattspitze zu erhalten. Dies wird erreicht, indem die Sehnenlänge an der Blattspitze aus den Längen der beiden vorletzten Segmente extrapoliert wird (**JavaProp 2008**).

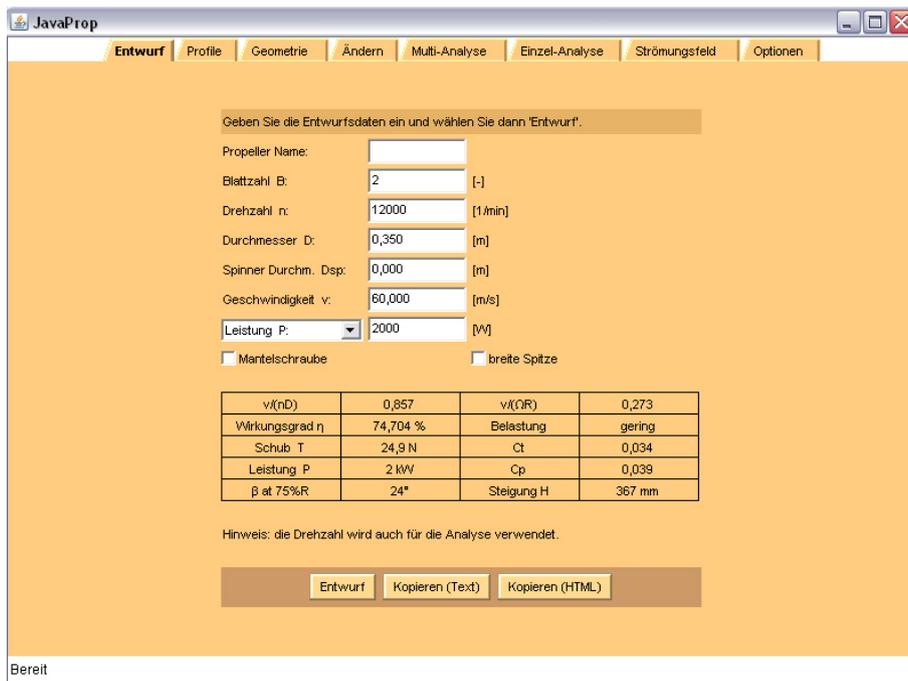


Bild 3.1: Entwurfs-Karte (JavaProp 2008)

Sind alle Eingaben vorgenommen, berechnet das Programm nach einem Klick auf die „Entwurf“ Taste den Propeller. Es werden daraufhin im unteren Bereich des Fensters alle Propellerdaten für die gewählten Entwurfsparameter aufgelistet. Folgende Werte werden ausgegeben:

$v/(nD)$	Der Fortschrittsgrad auch als J bezeichnet
$v/(\Omega R)$	Geschwindigkeitsverhältnis
Wirkungsgrad η	Der Wirkungsgrad des Propellers in %
Belastung	Die Belastung des Propellers
Schub T	Der Schub in Newton
Leistung P	Die aufgenommene Leistung Watt
Ct	Der Schubbeiwert
Cp	Der Leistungsbeiwert
β at 75%R	Der Blattwinkel bei 75 % des Radius
Steigung H	Die Steigung des Propellers in mm

3.2.2 Profile-Karte

Auf der „Profile-Karte“ (Bild 3.2) kann man sich die Profile aussuchen, die man entlang des Radius verwenden möchte. Man hat die Möglichkeit, für vier Bereiche ein Profil aus der Auswahlliste festzulegen. Für diese Bereiche kann man jeweils noch einen Anstellwinkel des Profils wählen. Die Wahl des Anstellwinkels beeinflusst direkt die Verteilung der Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte.

Die rechte Seite des Fensters zeigt, jeweils für den gerade gewählten Bereich und das gewählte Profil, die zugehörigen Polaren. Es werden ebenfalls die Werte für C_l und C_d , abhängig vom Anstellwinkel, ausgegeben. Es stehen neun verschiedene Profile zur Auswahl. Es ist leider nicht möglich, ein eigenes Profil zu importieren. Die folgende Liste zeigt die Profile, die man auswählen kann (**JavaProp 2008**):

Flat Plate	angeströmte flache Platte
Clark Y	Profil mit flacher Unterseite und einer Dicke von 12%
E 193	ähnliches Profil wie das Clark Y
ARA D 6%	dünnes Profil für die Propellerspitze
MH 126	dickes Profil für den Wurzelbereich
MH 112 16.2%	Profil für den Bereich nach der Wurzel
MH 114 13%	Profil für den mittleren Propellerbereich
MH 116 9.8%	Profil für die Propellerspitze bis $Ma = 0,6$
MH 120 11.5%	Hochgeschwindigkeitsprofil für die Propellerspitze

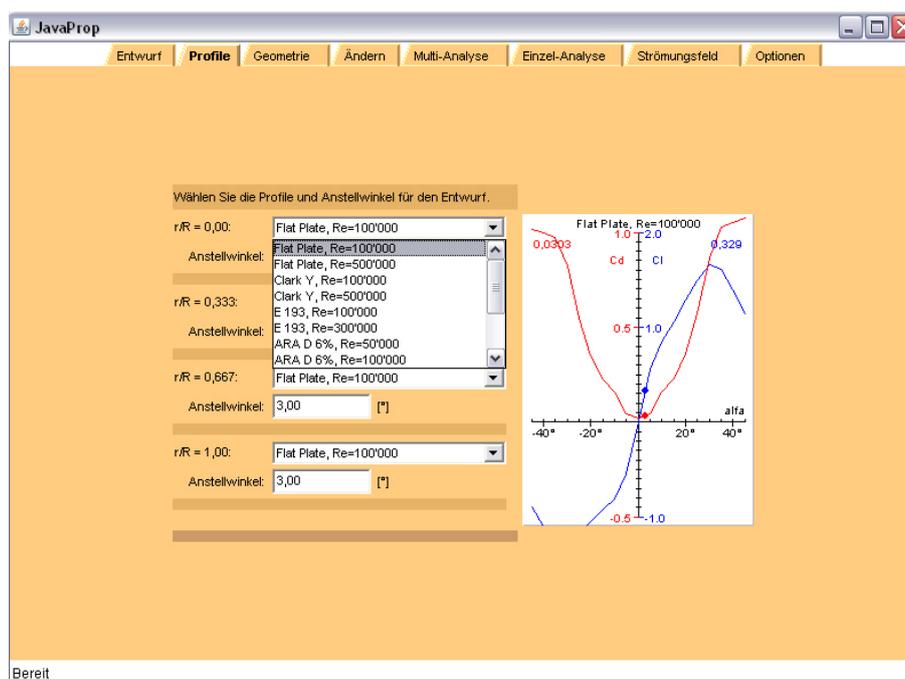


Bild 3.2: Profile-Karte (**JavaProp 2008**)

3.2.3 Geometrie-Karte

Die „Geometrie-Karte“ (Bild 3.3) zeigt die berechnete Geometrie des Propellers. Es werden folgende Werte ausgegeben:

- r/R** dimensionslose Position entlang des Radius
- c/R** das Verhältnis der Sehnenlänge zum Radius
- β der aktuelle Blattwinkel
- H/D** das Verhältnis der Steigung zum Durchmesser
- r** der Radius in mm
- c** die Sehnenlänge in mm
- H** die Steigung in mm
- Profil** das jeweilige verwendete Profil

Im unteren Teil des Fensters erhält man zwei Ansichten des Propellers. Über die Unterkarte „Steigung“ erhält man eine Graphik, die den Verlauf der Steigung entlang des Radius zeigt.

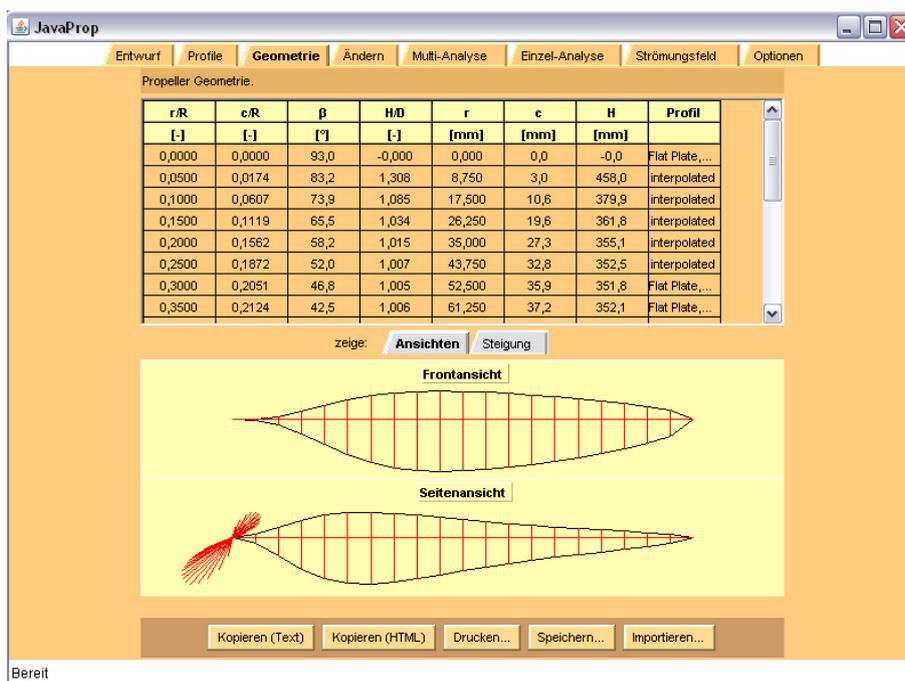


Bild 3.3: Geometrie-Karte (JavaProp 2008)

Ganz unten auf der Karte hat man verschiedene Möglichkeiten, die erzeugten Geometriedaten weiter zu verarbeiten bzw. eigene Daten zu importieren.

Kopieren (Text)	Die obere Tabelle mit den Geometriedaten wird im Text Format in die Zwischenablage kopiert.
Kopieren (HTML)	Die obere Tabelle mit den Geometriedaten wird im HTML Format in die Zwischenablage kopiert.
Drucken...	Die obere Tabelle mit den Geometriedaten wird ausgedruckt.
Speichern...	Die Geometrie kann in zwei verschiedenen Formaten gespeichert werden: als Textdatei oder als AutoCAD-Datei. Die AutoCAD-Datei bildet die Oberfläche des Propellers ab.
Importieren...	Es wird ein Fenster geöffnet, in dem man Spaltenweise die Werte für den Radius, die Sehnenlänge und den Blattwinkel eintragen kann.

3.2.4 Ändern-Karte

Auf der „Ändern-Karte“ (Bild 3.4) kann man die zuvor berechneten Geometriewerte modifizieren. Dazu stehen einem eine Reihe von Parametern zur Verfügung (**JavaProp 2008**):

Blattwinkel vergrößern um	Addiert den angegebenen Wert an allen Positionen zum Blattwinkel
Blattwinkel multiplizieren mit	Multipliziert den Blattwinkel mit dem angegebenen Faktor an jeder Position
Tiefe vergrößern um	Addiert den angegebenen Wert zur Sehnenlänge an jeder Position
Tiefe multiplizieren mit	Multipliziert die Sehnenlänge mit dem angegebenen Faktor an jeder Position
Tiefe zuspitzen um	Multipliziert beginnend mit 1,0 an der Wurzel bis zum angegebenen Wert an der Spitze linear die Sehnenlänge
v/V an r/R = 0	Das Verhältnis von gestörter zu ungestörter Anströmung an r/R = 0
r/R an dem v/V = 1 ist	Die Position entlang des Radius an der die Anströmung wieder ungestört ist

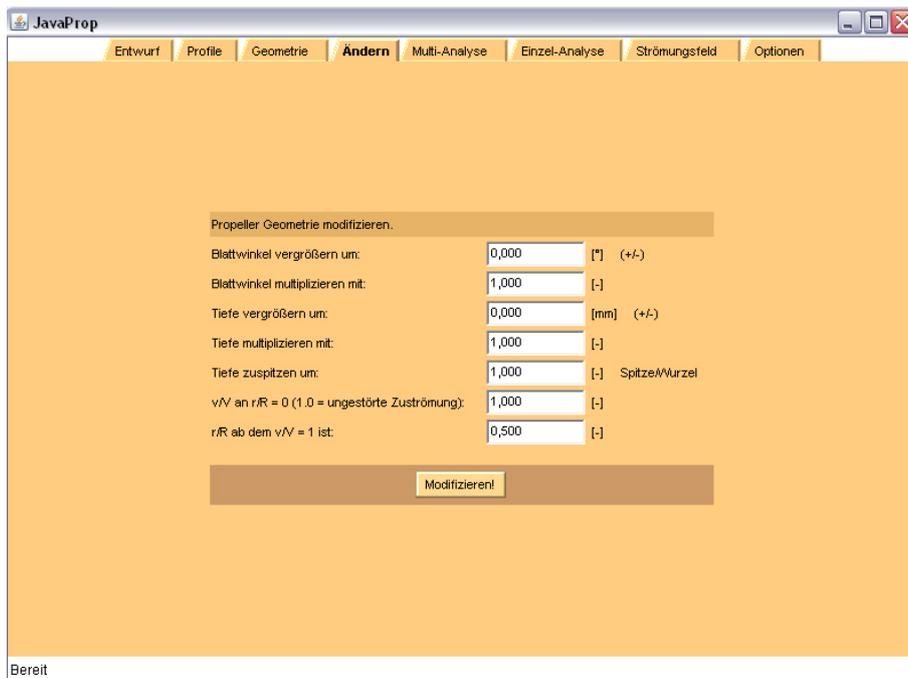


Bild 3.4: Ändern-Karte (JavaProp 2008)

3.2.5 Multi-Analyse-Karte

Auf der „Multi-Analyse-Karte“ (Bild 3.5) analysiert das Programm den entworfenen Propeller für einen Bereich von $v/nD = 0$ bis zu dem Bereich, in dem der Wirkungsgrad ins Negative umschlägt. Dazu wird automatisch der Fortschrittsgrad in fest eingestellten Schritten erhöht. In dem Bereich, indem der Wirkungsgrad anfängt abzufallen, werden die Schritte automatisch verkleinert. Die Analyse kann jeweils für eine konstante Drehzahl, eine konstante Leistung oder einen konstanten Schub durchgeführt werden. Dies geschieht über die Auswahl im „Analyse für... Feld“ (JavaProp 2008).

Die Ergebnisse werden in eine Tabelle im oberen Fensterbereich geschrieben. Folgende Werte können der Tabelle entnommen werden:

v/nD	Der Fortschrittsgrad
C_p	Der Leistungsbeiwert
C_t	Der Schubbeiwert
η	Der Wirkungsgrad in Prozent
η^*	Der optimale Wirkungsgrad in Prozent
abgelöst	Gibt an, an wie vielen Bereichen des Propellers die Strömung abgelöst ist.
v	Die Geschwindigkeit in m/s
n	Drehzahl des Propellers in [1/min]
Leistung	Die Leistungsaufnahme in Watt
Schub	Der Schub in Newton

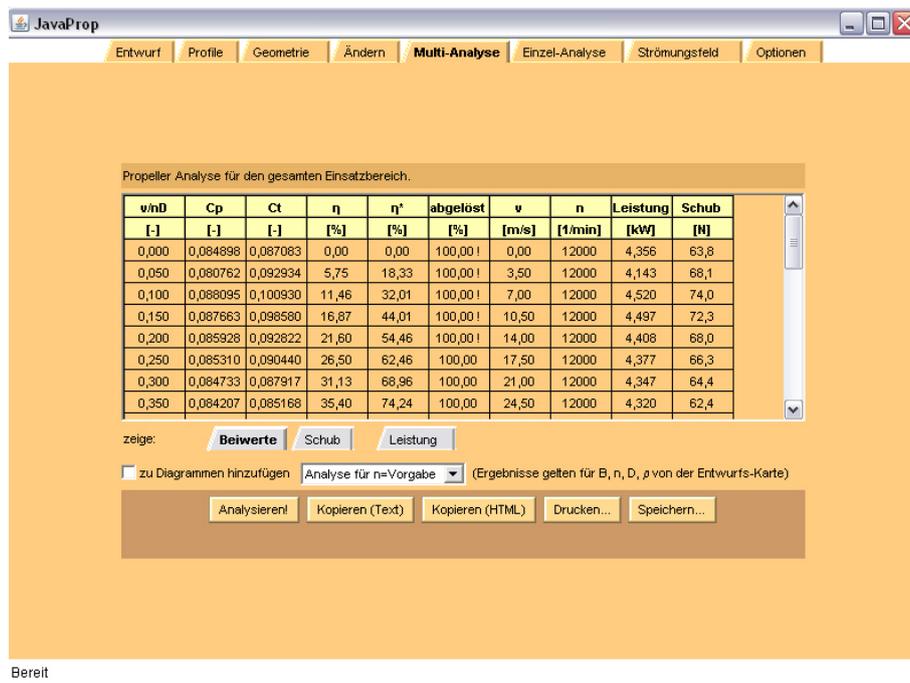


Bild 3.5: Multi-Analyse-Karte (JavaProp 2008)

Aus den Tabellenwerten werden im unteren Bereich des Fensters Graphen für die Beiwerte (C_p , C_t), den Wirkungsgrad, den Schub, die Leistung und die Umdrehungen pro Minute jeweils in Abhängigkeit von dem Fortschrittsgrad ausgegeben. Die verschiedenen Graphen lassen sich über die jeweiligen Unterkarteikarten auswählen.

3.2.6 Einzel-Analyse-Karte

Auf der „Einzel-Analyse-Karte“ (Bild 3.6) wird der Propeller abschnittsweise für die auf der Entwurfskarte angegebenen Werte analysiert. Das Programm erstellt im oberen Bereich des Fensters eine Tabelle, in der in Schritten von $r/R = 0,05$ über den gesamten Radius für jeden einzelnen Abschnitt folgende Werte aufgelistet werden:

r/R	Position entlang des Radius
α	der Anstellwinkel
Cl	Auftriebsbeiwert
Cd	Widerstandsbeiwert
L/D	Verhältnis vom Auftrieb zum Widerstand
Re	Reynoldszahl
Ma	Machzahl
a	Axialer Interferenz Faktor
a'	Tangentialer Interferenz Faktor
delta	Winkel des Randwirbels am Propeller
delta_ff	Winkel des Randwirbels weit hinter dem Propeller

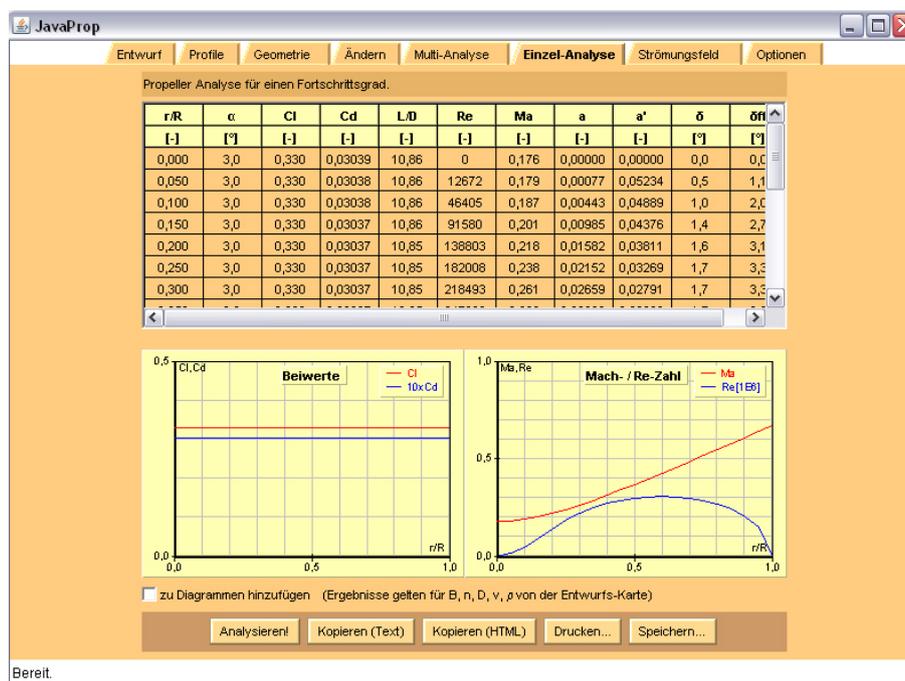


Bild 3.6: Einzel-Analys-Karte (JavaProp 2008)

Im unteren Bereich des Fensters werden aus den Tabellendaten Graphen in Abhängigkeit von der Position entlang des Radius, für die Beiwerte (Cl, Cd), die Machzahl und die Reynoldszahl ausgegeben.

3.2.7 Strömungsfeld-Karte

Auf der „Strömungsfeld-Karte“ (Bild 3.7) ist ein angenähertes Strömungsbild des Propellers gezeigt. Es wird aus den Daten der „Entwurfs-Karte“ erzeugt und stellt einen Bereich von jeweils $2R$ vor und nach dem Propeller da. Die Grenze des Strömungsfeldes wird durch eine schwarze Linie dargestellt. Das Verhältnis von axialer Geschwindigkeit zur Fluggeschwindigkeit (V_x/V) wird für drei Bereiche angegeben. Das Verhältnis V_x/V wird auch als Farbverlauf dargestellt, wobei die blaue Farbe für eine unbeschleunigte und die gelbe Farbe für eine komplett beschleunigte Strömung steht.

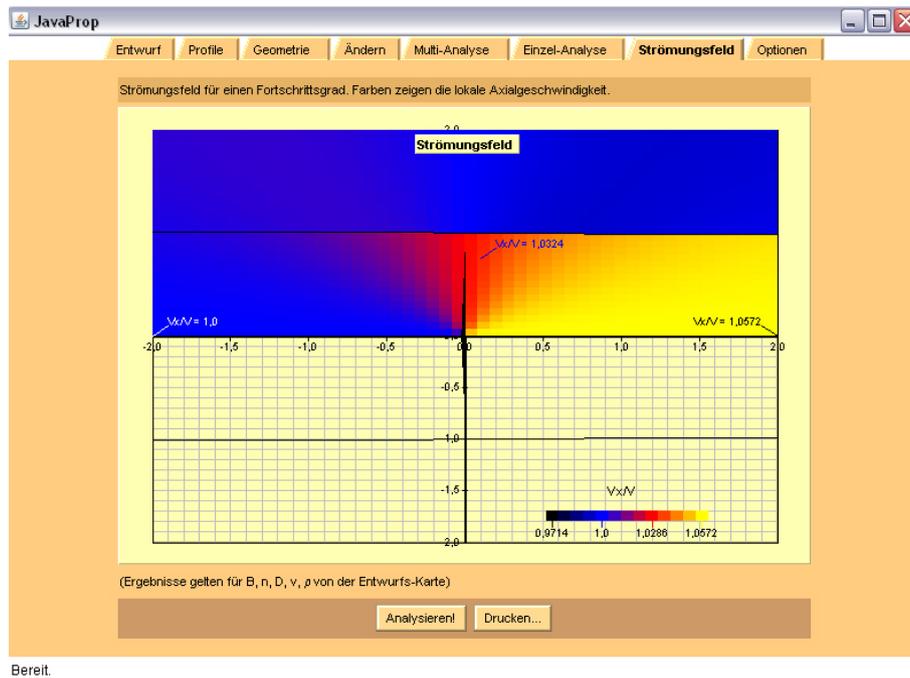


Bild 3.7: Strömungsfeld-Karte (JavaProp 2008)

3.2.8 Optionen-Karte

Auf der „Optionen-Karte“ (Bild 3.8) können grundlegende Einstellungen vorgenommen werden, auf die auch für die Berechnung zurückgegriffen wird. Folgende Einstellmöglichkeiten stehen zur Verfügung:

Ländereinstellungen	Ändert, falls das Sprachpaket vorhanden ist, die Sprache sowie das Dezimaltrennzeichen
Dichte	Hier kann man die Dichte [kg/m^3] und somit auch die Höhe beeinflussen, für die der Propeller ausgelegt werden soll
Kinematische Zähigkeit	Einstellung für die Kinematische Zähigkeit [m^2/s]
Schallgeschwindigkeit	Einstellung für die Schallgeschwindigkeit [m/s]

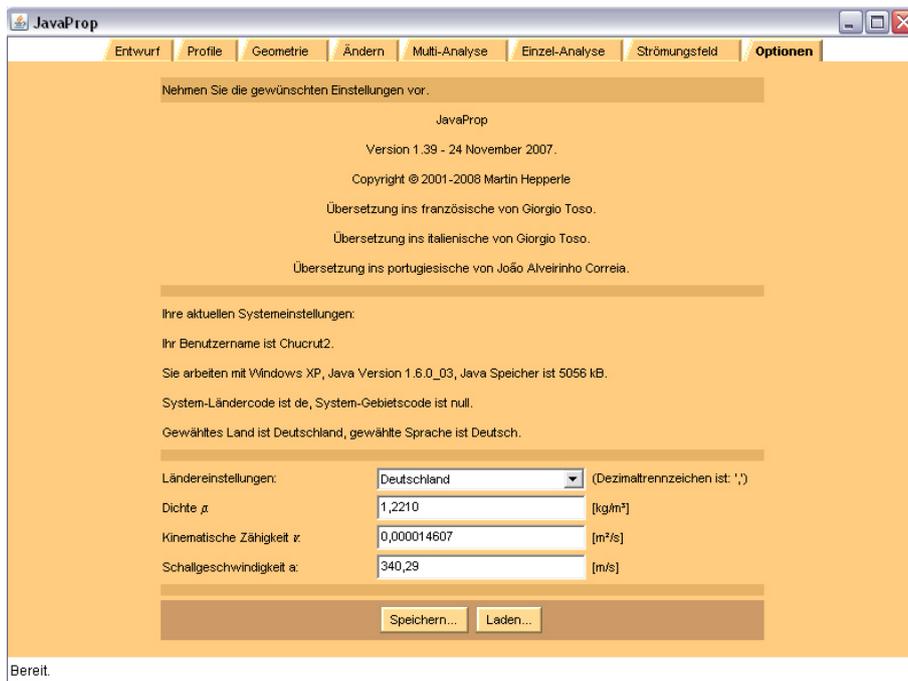


Bild 3.8: Optionen-Karte (JavaProp 2008)

Die gewählten Einstellungen können jeweils über die „Speichern...“, „Laden...“ Buttons gespeichert bzw. geladen werden. Auf der Karte sind ebenfalls noch die aktuelle Versionsnummer sowie Systemangaben des eigenen Rechners aufgelistet.

4 Vergleich mit der Theorie

Um die Ergebnisse die JavaProp liefert mit der Theorie zu vergleichen, sollen im Folgenden eine Auslegung, die mit JavaProp erstellt wurde, mit einer handgerechneten Theorie-Auslegung sowie den Propellerdaten des Herstellers verglichen werden. Die Handrechnung wurde mittels einer Excel-Tabelle durchgeführt und ist somit auch für andere Konfigurationen einsetzbar. Bei dem gewählten Propeller handelt es sich um einen Hoffmann-Propeller (Bezeichnung HO-V62R/170FA). Weitere Daten zu dem Propeller befinden sich im Anhang C.

Folgende Auslegungsdaten wurden für den Entwurf genommen:

Blattzahl:	2	
Drehzahl:	2000	1/min
Durchmesser:	1,7	m
Geschwindigkeit:	27,78	m/s
Leistung:	49700	W
Schallgeschwindigkeit:	340,29	m/s
Auftriebsbeiwert:	0,452	
Widerstandsbeiwert:	0,0251	
Dichte:	1,225	[kg/m ³]

Als Profil wurde bei JavaProp das Clark Y Profil gewählt und der Anstellwinkel so eingestellt, dass sich ein Auftriebsbeiwert von 0,452 ergeben hat. Um einen Vergleich mit den Hoffmann-Propellerdaten herstellen zu können, wurde der Auftriebsbeiwert so gewählt. Der resultierende Widerstandsbeiwert wurde daraufhin für die Handrechnung genommen, da in den Daten des Hoffmann-Propellers keiner angegeben ist. Der aus JavaProp resultierende Anstellwinkel von $\alpha = 2,12^\circ$ wurde ebenfalls für die Handrechnung übernommen.

Die folgende Tabelle 4.1 zeigt die Ergebnisse der einzelnen Rechenverfahren. Eine genauere Auflistung der Ergebnisse befindet sich in den Anhängen A-C.

Tabelle 4.1: Ergebnisse der ersten Rechnungen

	JavaProp	Handrechnung	Hoffmann
Wirkungsgrad [%]	62,90	70,37	67,92
Schub [N]	1125	1259	1214
Leistungsbeiwert	0,0772	0,0772	0,0771
Schubbeiwert	0,099	0,111	0,107
Blattwinkel bei 0,75R [°]	17,5	17,95	21,26 ¹

¹In den Daten von Hoffmann, ist nicht explizit angegeben, ob es sich um den Winkel an 0,75R handelt

Es zeigt sich, dass die einzelnen Ergebnisse teilweise recht deutlich von einander abweichen. Die größte Abweichung gibt es zwischen den Ergebnissen von JavaProp und der Handrechnung. Die Daten von Hoffmann liegen ungefähr im mittleren Bereich. Es überrascht, dass gerade die Ergebnisse der Handrechnung am stärksten von den Ergebnissen aus JavaProp abweichen, da beide Verfahren auf der gleichen Theorie basieren. Es ist zu vermuten, dass sich das Berechnungsverfahren von JavaProp etwas von dem theoretischen Verfahren unterscheidet und eventuell noch andere Faktoren mitberücksichtigt werden.

Die stärkeren Abweichungen zeigen sich auch, wenn man die errechnete Geometrie des Propellers miteinander vergleicht. In Bild A.3 und Bild B.2 sind die jeweiligen Geometriedaten aufgelistet. Betrachtet man die Sehnenlänge an der Position $0,25r$ zeigt sich, dass es eine Abweichung von ca. 60 mm gibt. Generell fällt die errechnete Sehnenlänge der Handrechnung größer aus als die JavaProp Auslegung. Einen Vergleich mit der Geometrie des Hoffmann-Propellers lässt sich leider nicht anstellen, da keine Geometriedaten vorhanden sind. Betrachtet man die Blattwinkel an $0,75R$ so zeigt sich, dass zumindest die Werte der Handrechnung und von JavaProp relativ nahe beieinander liegen. Die Abweichungen im Vergleich zu den Hoffmann-Daten können darauf basieren, dass dort das Profil unter einem Anstellwinkel α angestellt wurde, dieser Winkel in den Daten aber nicht aufgeführt ist.

Ein weiterer Faktor, der die unterschiedlichen Ergebnisse erklären könnte, ist die Wahl des Widerstandsbeiwertes. Der Widerstandsbeiwert hängt stark von der Wahl des Profils ab. Da bei den Hoffmann-Daten kein Widerstandsbeiwert angegeben ist, wurde eine weitere Rechnung mit einem anderen Profil und somit einem anderen Widerstandsbeiwert durchgeführt. Die neuen Auslegungsdaten sind hier aufgeführt:

Blattzahl:	2	
Drehzahl:	2000	$1/min$
Durchmesser:	1,7	m
Geschwindigkeit:	27,78	m/s
Leistung:	49700	W
Schallgeschwindigkeit:	340,29	m/s
Auftriebsbeiwert:	0,452	
Widerstandsbeiwert:	0,0146	
Dichte:	1,225	$[kg/m^3]$

Das unter JavaProp eingestellte Profil ist diesmal das MH 116 9,8 %. Es wurde wieder über den Anstellwinkel α der passende Widerstandsbeiwert eingestellt. Der resultierende Anstellwinkel ist $\alpha = 0,34^\circ$. Die folgende Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht der ermittelten Werte:

Tabelle 4.2: Ergebnisse der zweiten Rechnungen

	JavaProp	Handrechnung	Hoffmann
Wirkungsgrad [%]	66,91	71,53	67,92
Schub [N]	1197	1280	1214
Leistungsbeiwert	0,0772	0,0772	0,0771
Schubbeiwert	0,105	0,113	0,107
Blattwinkel bei 0,75R [°]	15,9	16,2	21,26

Es zeigt sich auch hier ein relativ großer Unterschied zwischen den Ergebnissen der Handrechnung und denen von JavaProp. Die Ergebnisse von JavaProp im Vergleich zu den Hoffmann-Ergebnissen hingegen weichen nicht mehr so stark ab.

Es hat sich herausgestellt, dass die Wahl des Profils und somit des Widerstandsbeiwertes einen erheblichen Einfluss auf die Rechnung hat. Da der Widerstandsbeiwert des Hoffmann-Profiles leider nicht bekannt ist, lässt sich abschließend nicht feststellen welcher Rechenweg der genauere ist. Dennoch bleibt der Unterschied zwischen den Werten von JavaProp und den Werten der Handrechnung bestehen, was – wie schon erwähnt – auf eine etwas andere interne Rechnung zurück schließen lässt.

5 Fazit

Das in diesem Bericht untersuchte Programm JavaProp bietet unter bestimmten Voraussetzungen eine gute Möglichkeit den Wirkungsgrad eines Propellers zu bestimmen. Die Eingabe der Entwurfsparameter erfolgt übersichtlich und kann schnell durchgeführt werden. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt ebenfalls zügig und in einer gut geordneten Form. Die Menge an Ergebnissen, die JavaProp liefert, ist ebenfalls positiv anzumerken. So ist es z.B. möglich, sich Graphen ausgeben zu lassen, die die Eigenschaften des Propellers über den gesamten Betriebsbereich anzeigen, zudem ist es möglich, sich Werte für jeden einzelnen Abschnitt des Profils anzuschauen. Ein weiterer Vorteil der JavaProp Berechnung ist der, dass das Programm die komplette Geometrie des Propellerblattes bestimmt. Auch die Export-Möglichkeiten des Programms sind gut. So lassen sich alle Tabellen und Graphiken, die das Programm erzeugt, zur Weiterverarbeitung in verschiedenen Formaten ausgeben.

Der Import von Daten ist leider nicht so einfach möglich. So besteht nicht die Möglichkeit, die für den Entwurf notwendigen Daten aus einer Datei zu importieren. Nur der Import einer Flügelgeometrie (Sehnenlänge, Blattwinkel) ist möglich. Der wohl größte Nachteil ist der, dass man nur auf die bereits vorhandenen Flügelprofile zurückgreifen kann und somit auf die Verhältnisse von C_d zu C_l keinen großen Einfluss hat.

Insgesamt ist eine automatische Einbindung des Programms JavaProp in den praktischen Flugzeugentwurf z.B. mittels PrADO als schwierig anzusehen, da eine Kommunikation zwischen den beiden Programmen nicht möglich ist. Alle Eingabe- bzw. Ausgabewerte müssten manuell übertragen werden.

Eine Möglichkeit, das JavaProp Berechnungsprinzip zu übernehmen, besteht darin, die Theorie nach **Adkins 1994** für PrADO umzusetzen. Die Theorie bietet eine gute Möglichkeit der Automatisierung. So ist ein großer Vorteil des Berechnungsverfahrens nach **Adkins 1994** der, dass es ohne Ablesungen aus Tabellen oder Graphen auskommt. Das Verfahren bestimmt den Wirkungsgrad unter Angabe nur weniger Werte. Bei der Wahl des zu verwendenden Profils ist man freier, da man die Werte für C_d und C_l gesondert von einander angeben kann. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Polaren von anderen Profilen in die Rechnung zu integrieren. Eine erste Umsetzung der Theorie mittels Excel ist diesem Bericht auf CD-Rom beigelegt.

Literatur

- Adkins 1994** ADKINS, Charles N.; LIEBECK, Robert H.: *Design of Optimum Propellers*. Journal Of Propulsion And Power, Vol. 10, No. 5, Sept.-Oct. 1994, S. 676-682.
- JavaProp 2008** HEPPERLE, Martin: JavaProp Homepage, URL: <http://www.mh-aerotools.de/airfoils/javaprop.htm> (2008-06-01)
- Roskam 1997** ROSKAM, Jan; LAN, Chuan-Tau E.: *Airplane aerodynamics and performance*. Lawrence, Kan.: Darcorporation, 1997

A Rechnungswerte von JavaProp

Entwurf Profile Geometrie Ändern Multi-Analyse Einzel-Analyse Strömungsfeld Optionen

Geben Sie die Entwurfsdaten ein und wählen Sie dann 'Entwurf'.

Propeller Name:

Blattzahl B: [-]

Drehzahl n: [1/min]

Durchmesser D: [m]

Spinner Durchm. Dsp: [m]

Geschwindigkeit v: [m/s]

Leistung P: [W]

Mantelschraube breite Spitze

$v/(nD)$	0,49	$v/(\Omega R)$	0,156
Wirkungsgrad η	62,898 %	Belastung	sehr hoch
Schub T	1.125,29 N	Ct	0,099
Leistung P	49,7 kW	Cp	0,0772
β at 75%R	17,5°	Steigung H	1,27 m

Hinweis: die Drehzahl wird auch für die Analyse verwendet.

Entwurf Kopieren (Text) Kopieren (HTML)

Bild A.1: Eingabewerte von JavaProp (JavaProp 2008)

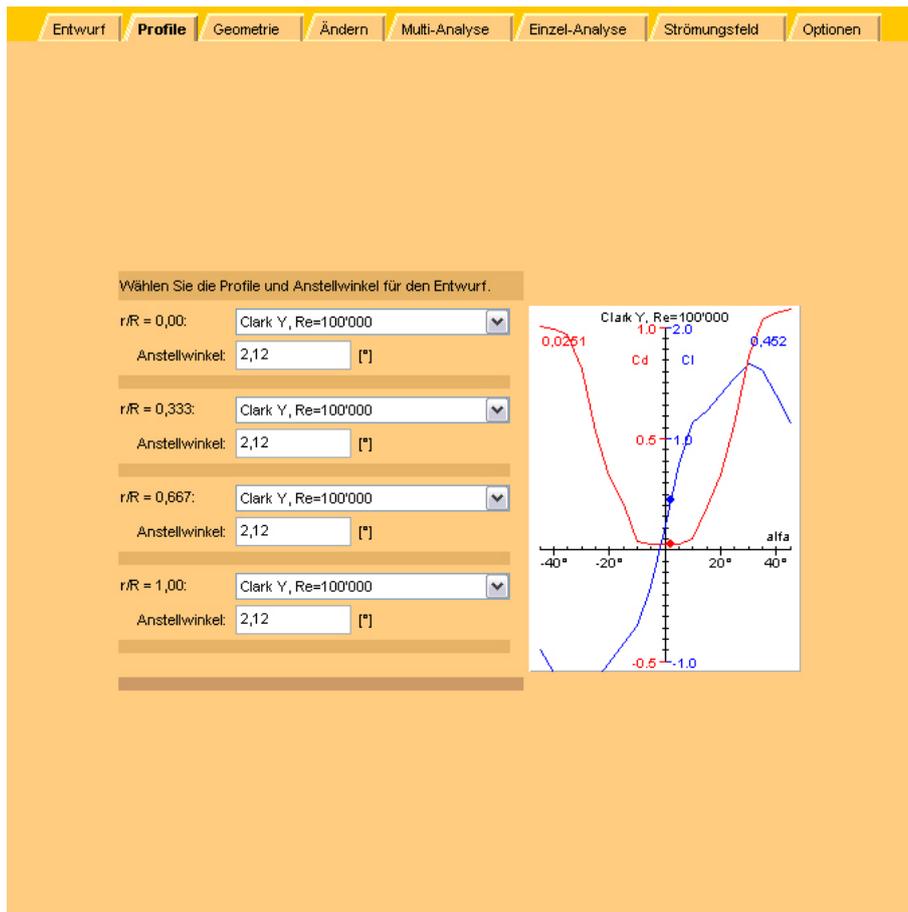


Bild A.2: Profil und Anstellwinkel von JavaProp (JavaProp 2008)

r/R	c/R	β	H/D	r	c	H	Profil
[-]	[-]	[°]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	
0,0000	0,0000	92,1	-0,000	0,000	0,0	-0,0	Clark Y, R...
0,0500	0,0988	78,5	0,775	42,500	84,0	1317,2	interpolated
0,1000	0,3014	66,3	0,717	85,000	256,2	1218,6	interpolated
0,1500	0,4702	56,2	0,704	127,500	399,7	1196,2	interpolated
0,2000	0,5612	48,1	0,700	170,000	477,0	1190,6	interpolated
0,2500	0,5908	41,7	0,701	212,500	502,2	1191,4	interpolated
0,3000	0,5843	36,7	0,703	255,000	496,7	1195,3	Clark Y, R...
0,3500	0,5597	32,7	0,706	297,500	475,7	1200,9	Clark Y, R...
0,4000	0,5271	29,5	0,710	340,000	448,0	1207,7	interpolated
0,4500	0,4918	26,8	0,715	382,500	418,0	1215,1	interpolated
0,5000	0,4563	24,6	0,719	425,000	387,9	1223,1	interpolated
0,5500	0,4217	22,7	0,724	467,500	358,4	1231,4	interpolated
0,6000	0,3881	21,2	0,729	510,000	329,9	1239,9	interpolated
0,6500	0,3554	19,8	0,735	552,500	302,1	1248,7	Clark Y, R...
0,7000	0,3231	18,6	0,740	595,000	274,6	1257,6	Clark Y, R...
0,7500	0,2905	17,5	0,745	637,500	246,9	1266,7	interpolated
0,8000	0,2566	16,6	0,750	680,000	218,1	1275,8	interpolated
0,8500	0,2200	15,8	0,756	722,500	187,0	1285,1	interpolated
0,9000	0,1783	15,1	0,761	765,000	151,5	1294,4	interpolated
0,9500	0,1253	14,4	0,767	807,500	106,5	1303,8	interpolated
1,0000	0,0000	13,8	0,772	850,000	0,0	1313,2	Clark Y, R...

Bild A.3: Geometriedaten von JavaProp (JavaProp 2008)

v/nD	Cp	Ct	η	η^*	abgelöst	v	n	Leistung	Schub
[-]	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[m/s]	[1/min]	[kW]	[kN]
0,000	0,099072	0,210277	0,01	0,00	47,00 !	0,00	2000	63,822	2,390
0,050	0,089182	0,185300	10,39	13,21	94,00 !	2,83	2000	57,450	2,107
0,100	0,094538	0,212895	22,52	23,07	73,00 !	5,67	2000	60,901	2,420
0,150	0,097417	0,218265	33,61	32,02	47,00 !	8,50	2000	62,756	2,481
0,200	0,103657	0,206033	39,75	40,92	10,00 !	11,33	2000	66,775	2,342
0,250	0,101120	0,167778	41,48	51,50	0,00 !	14,17	2000	65,141	1,907
0,300	0,096188	0,148261	46,24	59,82	0,00	17,00	2000	61,964	1,685
0,350	0,092326	0,136087	51,59	66,45	0,00	19,83	2000	59,476	1,547
0,400	0,087685	0,123355	56,27	72,32	0,00	22,67	2000	56,486	1,402
0,450	0,082208	0,110074	60,25	77,50	0,00	25,50	2000	52,958	1,251
0,500	0,075831	0,096240	63,46	82,05	0,00	28,33	2000	48,850	1,094
0,550	0,068495	0,081859	65,73	86,05	0,00	31,17	2000	44,124	0,931
0,600	0,060139	0,066929	66,77	89,56	0,00	34,00	2000	38,741	0,761
0,650	0,050709	0,051459	65,96	92,64	0,00	36,83	2000	32,666	0,585
0,660	0,048690	0,048302	65,47	93,21	0,00	37,40	2000	31,366	0,549
0,670	0,046623	0,045120	64,84	93,76	0,00	37,97	2000	30,034	0,513
0,680	0,044511	0,041917	64,04	94,30	0,00	38,53	2000	28,673	0,477
0,690	0,042352	0,038694	63,04	94,83	0,00	39,10	2000	27,283	0,440
0,700	0,040148	0,035450	61,81	95,34	0,00	39,67	2000	25,863	0,403
0,710	0,037895	0,032184	60,30	95,84	0,00	40,23	2000	24,412	0,366
0,720	0,035598	0,028901	58,46	96,32	0,00	40,80	2000	22,932	0,329
0,730	0,033250	0,025594	56,19	96,80	0,00	41,37	2000	21,420	0,291
0,740	0,030851	0,022261	53,40	97,26	0,00	41,93	2000	19,874	0,253
0,750	0,028406	0,018912	49,93	97,71	0,00	42,50	2000	18,299	0,215
0,760	0,025900	0,015524	45,55	98,15	0,00	43,07	2000	16,684	0,176
0,770	0,023341	0,012113	39,96	98,58	0,00	43,63	2000	15,036	0,138
0,780	0,020736	0,008686	32,67	99,00	0,00	44,20	2000	13,358	0,099
0,790	0,018080	0,005237	22,88	99,40	0,00	44,77	2000	11,647	0,060
0,800	0,015369	0,001762	9,17	99,80	0,00	45,33	2000	9,900	0,020
0,810	0,012604	-0,001735	-11,15	99,99	0,00	45,90	2000	8,120	-0,020

Bild A.4: Multi-Analyse-Daten von JavaProp (JavaProp 2008)

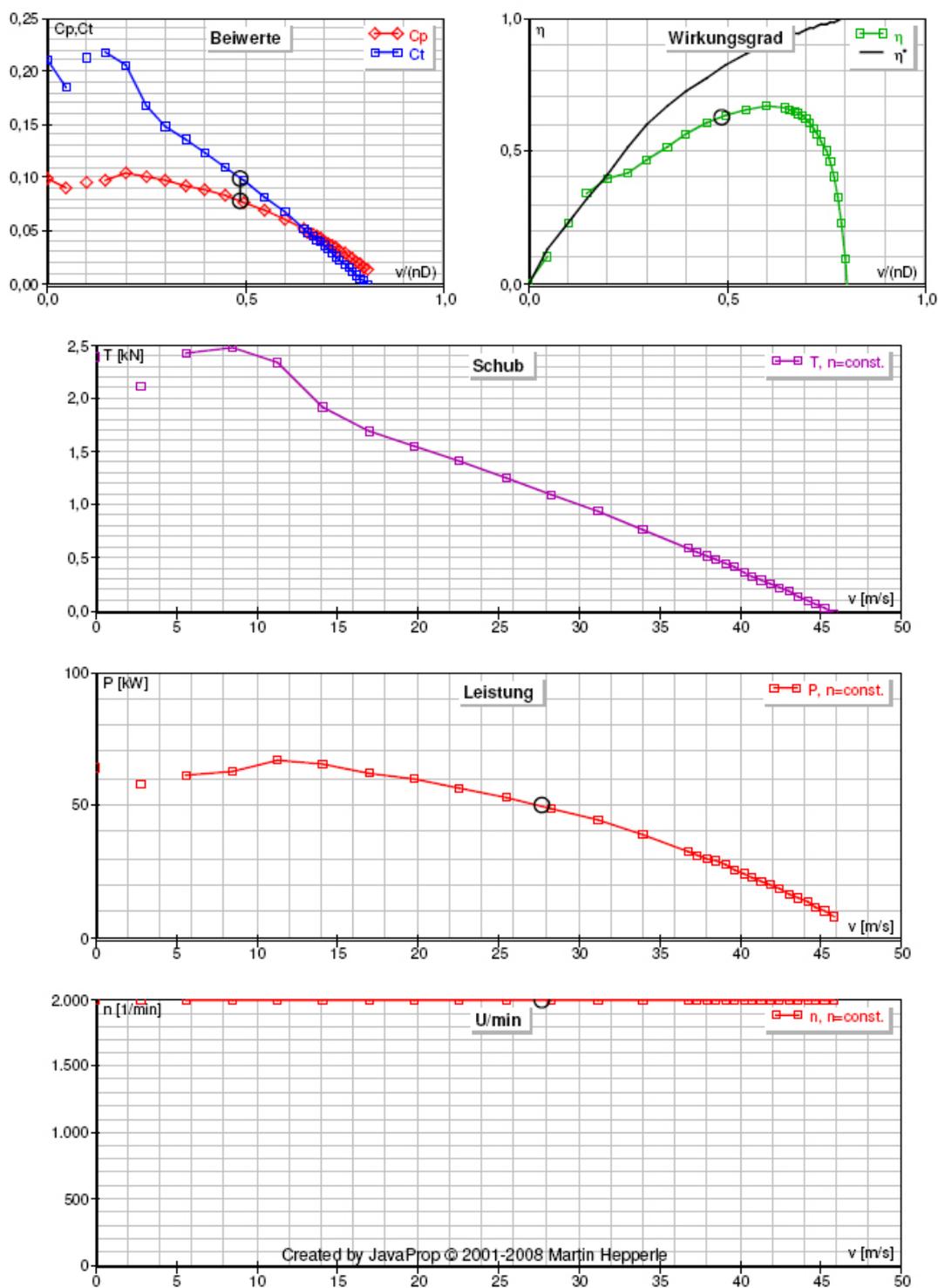


Bild A.5: Multi-Analyse-Graphen von JavaProp (JavaProp 2008)

r/R	α	Cl	Cd	L/D	Re	Ma	a	a'	δ	δ_{ff}
[-]	[°]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[°]	[°]
0,000	2,1	0,453	0,02512	18,02	0	0,082	0,00000	0,00000	0,0	0,0
0,050	2,1	0,452	0,02511	18,01	166539	0,085	0,01389	0,23583	4,3	8,4
0,100	2,1	0,452	0,02511	18,01	570670	0,096	0,05474	0,20502	7,1	13,3
0,150	2,1	0,452	0,02511	18,00	1036184	0,111	0,10388	0,16794	8,3	15,0
0,200	2,1	0,452	0,02511	18,00	1449033	0,130	0,14868	0,13417	8,5	14,8
0,250	2,1	0,452	0,02511	18,00	1774336	0,152	0,18497	0,10687	8,2	14,0
0,300	2,1	0,452	0,02511	18,00	2017043	0,174	0,21288	0,08581	7,7	13,0
0,350	2,1	0,452	0,02511	18,00	2193083	0,198	0,23413	0,06980	7,2	12,0
0,400	2,1	0,452	0,02511	18,00	2317582	0,222	0,25035	0,05759	6,7	11,1
0,450	2,1	0,452	0,02511	18,00	2401903	0,247	0,26286	0,04820	6,3	10,3
0,500	2,1	0,452	0,02511	18,00	2453612	0,272	0,27265	0,04087	5,9	9,6
0,550	2,1	0,452	0,02511	18,00	2477108	0,297	0,28029	0,03506	5,5	9,0
0,600	2,1	0,452	0,02511	18,00	2474260	0,322	0,28653	0,03041	5,2	8,5
0,650	2,1	0,452	0,02511	18,00	2444648	0,347	0,29161	0,02663	4,9	8,0
0,700	2,1	0,452	0,02511	18,00	2385643	0,373	0,29567	0,02352	4,7	7,6
0,750	2,1	0,452	0,02511	18,00	2292081	0,399	0,29916	0,02094	4,4	7,2
0,800	2,1	0,452	0,02511	18,01	2155192	0,424	0,30211	0,01877	4,2	6,8
0,850	2,1	0,452	0,02511	18,00	1960153	0,450	0,30448	0,01693	4,0	6,5
0,900	2,1	0,452	0,02511	18,01	1679174	0,476	0,30664	0,01536	3,9	6,3
0,950	2,1	0,452	0,02511	18,00	1244464	0,502	0,30836	0,01401	3,7	6,0
1,000	2,1	0,452	0,02511	18,00	0	0,527	0,31009	0,01265	3,5	5,7

Bild A.6: Einzel-Analyse-Daten von JavaProp (JavaProp 2008)

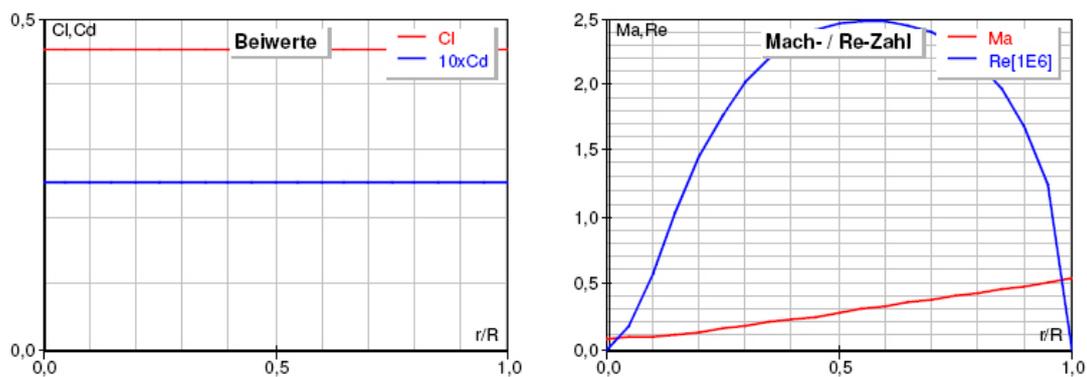


Bild A.7: Einzel-Analyse-Graphen von JavaProp (JavaProp 2008)

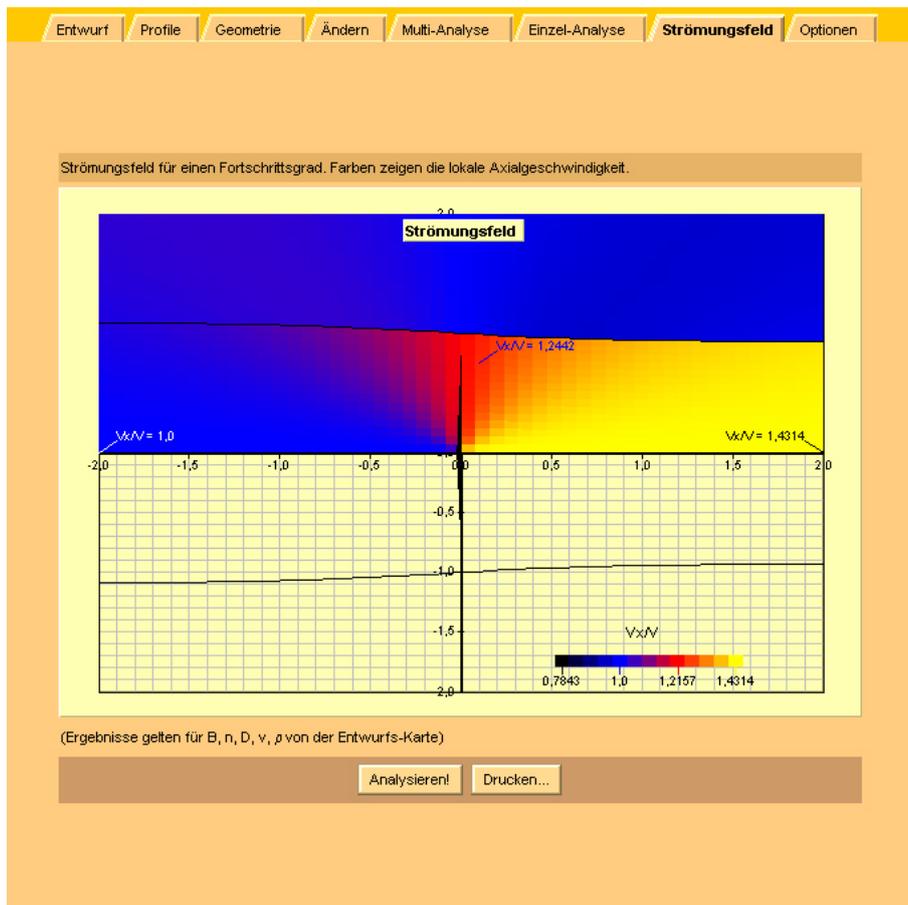


Bild A.8: Strömungsfeld-Daten von JavaProp (JavaProp 2008)

B Rechnungswerte der Handrechnung

P	49700 W
B	2
D _{sp}	0 m
D	1,7 m
Cl	0,452
Cd	0,0251
V	27,7777778 m/s
n	2000 1/min
a	340,29 m/s
α	2,12 °
roh	1,225
ε	0,05553097
1)	
ζ	0,72488
2)	
λ speed ratio	0,15603426
Φ t flow angle tip	0,20946893 12,0016858 °

Bild B.1: Eingabewerte der Handrechnung

$\% / \xi$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
r	0,000	0,043	0,085	0,128	0,170	0,213	0,255	0,298	0,340	0,383	0,425	0,468	0,510	0,553	0,595	0,638	0,680	0,723	0,765	0,808	0,850
F		1,340	1,131	0,956	0,816	0,705	0,616	0,546	0,489	0,441	0,402	0,369	0,341	0,316	0,295	0,276	0,260	0,245	0,232	0,220	0,209
Φ	0,995	0,993	0,992	0,989	0,986	0,983	0,978	0,972	0,964	0,955	0,942	0,927	0,907	0,881	0,848	0,806	0,750	0,677	0,576	0,424	0,000
Φ in grad	0,000	76,765	64,808	54,793	46,747	40,376	35,322	31,274	27,989	25,287	23,034	21,133	19,510	18,111	16,893	15,825	14,882	14,042	13,290	12,614	12,002
G	0,000	0,071	0,245	0,448	0,631	0,777	0,887	0,967	1,025	1,063	1,087	1,098	1,098	1,084	1,058	1,016	0,955	0,868	0,743	0,550	0,000
Wc	0,000	2,634	9,087	16,632	23,425	28,846	32,930	35,914	38,036	39,479	40,369	40,779	40,743	40,255	39,275	37,719	35,447	32,218	27,579	20,423	0,000
a		0,015	0,058	0,111	0,160	0,200	0,232	0,256	0,274	0,289	0,300	0,309	0,316	0,321	0,326	0,330	0,334	0,336	0,339	0,341	0,343
a'		0,255	0,224	0,185	0,148	0,119	0,096	0,078	0,065	0,054	0,046	0,040	0,034	0,030	0,027	0,024	0,021	0,019	0,017	0,016	0,015
W		28,950	32,475	37,770	44,245	51,474	59,180	67,197	75,423	83,794	92,269	100,821	109,431	118,086	126,776	135,494	144,236	152,996	161,772	170,561	179,362
Ma		0,085	0,095	0,111	0,130	0,151	0,174	0,197	0,222	0,246	0,271	0,296	0,322	0,347	0,373	0,398	0,424	0,450	0,475	0,501	0,527
c [m]		0,091	0,290	0,440	0,529	0,560	0,556	0,534	0,504	0,471	0,438	0,404	0,372	0,341	0,310	0,278	0,246	0,211	0,170	0,120	0,000
c [mm]		91,0	279,8	440,3	529,4	560,4	556,4	534,5	504,3	471,1	437,5	404,5	372,3	340,9	309,8	278,4	245,8	210,6	170,5	119,7	0,0
β		78,88	66,93	56,91	48,87	42,50	37,44	33,39	30,11	27,41	25,15	23,25	21,63	20,23	19,01	17,95	17,00	16,16	15,41	14,73	14,12
I'1	0	0,011	0,086	0,248	0,475	0,740	1,023	1,309	1,591	1,864	2,124	2,365	2,582	2,768	2,912	3,000	3,010	2,910	2,639	2,065	0
I'2	0	0,004	0,027	0,063	0,097	0,121	0,135	0,141	0,142	0,139	0,135	0,129	0,122	0,115	0,107	0,098	0,088	0,077	0,063	0,045	0
J'1	0	0,018	0,109	0,290	0,535	0,814	1,106	1,400	1,688	1,964	2,226	2,469	2,686	2,871	3,012	3,096	3,101	2,992	2,710	2,117	0
J'2	0	0,000	0,009	0,044	0,118	0,225	0,354	0,494	0,639	0,782	0,920	1,051	1,170	1,273	1,356	1,410	1,427	1,388	1,266	0,995	0

Bild B.2: Rechenschritte und Ergebnisse der Handrechnung

I1		1,686096
I2		0,092463
J1		1,7601
J2		0,74608
Pc		1,6679
ζ		0,724884
Tc		1,173638
eta		0,703662
T		1258,992
Ct		0,11075
Cp		0,077151

Bild B.3: Ergebnisse der Handrechnung

