

CFD-basierte evolutionsstrategische Black-Box-Optimierung zur Abschätzung des Potentials des Bionik- propellers im realen Einsatz am Schiff

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Michael Schmid
geb. in Berlin

von der Fakultät III - Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Rudibert King
(TU-Berlin, Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik)

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ingo Rechenberg
(TU-Berlin, ehem. Institut für Bionik und Evolutionstechnik)

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Peter Neubauer
(TU-Berlin, Institut für Biotechnologie)

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ivo Boblan
(Beuth-Hochschule Berlin, FB VII - Elektrotechnik)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 19.02.2019

Berlin, 2019

Kurzfassung

Die Evolution hat in der Natur viele Lösungen unter dem besonderen Gesichtspunkt der Energieeffizienz hervorgebracht. Dabei sind insbesondere bei Vögeln interessante Lösungen entstanden, die sich im Sinne der Bionik als effizienzsteigernde Maßnahmen verstehen und technisch umsetzen lassen. Der bei der Auftriebserzeugung am Vogel- bzw. Tragflügel entstehende Spitzenwirbel ist unvermeidlich, der Energieverlust lässt sich aber durch ein Aufteilen auf kleinere Wirbel mindern. Der Vogelflügel besitzt dazu aufgefächerte Handschwingen, am Tragflügel haben sich hingegen sog. Winglets bewährt. Der Bionikpropeller stellt einen Versuch dar, dieses Prinzip auf elegante Weise auch auf Propellerflügel anzuwenden.

Die deutlich komplexere Form dieses Propellers macht es bestehenden Entwurfsverfahren nahezu unmöglich, eine vorteilhafte Auslegung zu bestimmen. Ein umgekehrter Weg kann jedoch über die Bewertung von Varianten führen, welche eine Optimierungsstrategie vorgibt. Für derart komplexe Aufgabenstellungen eignet sich die Evolutionsstrategie, da sie das Problem als Black-Box betrachten kann. In der Umsetzung dieser Idee ist eine Umgebung für die Optimierung entwickelt worden, welche auf einer CFD-Bewertung basiert. Sie wurde zunächst am konventionellen Propeller erfolgreich getestet. Die auf den Bionikpropeller erweiterte Umgebung arbeitete wegen der komplexeren Geometrie langsamer, insbesondere die CFD-Bewertung wurde aufwändiger. Zusätzlich zur RANSE-CFD-Bewertung wurde daher ein Wirbelgitterverfahren verwendet, welches zwar ungenauer, aber auch deutlich schneller arbeitet.

Mit beiden Bewertungsverfahren und in ständigem Abgleich der Varianten mit dem Projektpartner *SWA*-Potsdam wurden zahlreiche Vorschläge mit über RANSE-CFD-Methoden errechneten und teilweise am Modell gemessenen Freifahrtkurven bewertet. Die beste Variante wurde vom Projektpartner *MMG* in Großausführung gefertigt und im produktiven Einsatz am Schiff getestet. Der Bionikpropeller zeigte bei hohen Schubbelastungsgraden - wie erwartet - auch hier einen Vorteil. Er verursachte auch nach 8 Wochen im Einsatz keine Kavitationsprobleme und erzeugte einen deutlich geringeren Geräuschpegel. Letztlich limitierten nur die empfindlichen Bögen den fortgesetzten realen Einsatz.

Abstract

The evolution in nature has developed a huge amount of solutions, very often favouring those with better energy efficiency. Flying birds especially show interesting solutions to minimize the induced drag loss of their wings. Analyzing the principles behind means following the bionics approach of understanding and transferring them into a technical application. The loss due to the tip vortex, being inevitable, can thus be reduced by splitting the vortex. Therefore bird wings utilize splitted primary feathers. A technical adoption of this principle is the winglet. The bionic propeller represents an attempt to gracefully apply this principle to propeller blades.

Common design procedures are almost overburdened with the complex topology and inner dependencies of the bionic propeller, even to depict an optimum design configuration. Nevertheless an inverse approach is possible by using a cyclic optimization process, where beside the proper optimization strategy only an evaluation of the probe quality is necessary to provide. Here the evolutionary strategy comes into play, proven to be superior appropriate for complex optimization targets, even if these can be treated as black boxes. In realization of this approach an optimization environment has been developed, based on CFD evaluation of the probe quality. Verified to sufficiently perform with the conventional propeller topology, the environment was extended to deal with the more complex one of the bionic propeller. It turns out that the optimization process slowed down, the CFD computation became even more complicated. To keep track on the goal an additional quality evaluation function was established based on the vortex lattice method. This procedure is in fact less accurate, but on the other hand it computes considerably faster than RANSE-CFD.

With both evaluation functions and with permanent alignment of the variants with the project partner *SWA*-Potsdam, numerous promising configurations have been made up, many of them evaluated for their open water characteristics both by RANSE-CFD methods and by real measurement. The most promising variant have been selected and prepared for full-scale manufacturing, which was finally performed by project partner *MMG* Waren. The real life test under productive operation conditions revealed - as expected - an advantage of the bionic propeller at high thrust loading coefficients. No critical cavitation erosion have been observed for 8 weeks of operation. The propeller has yielded a considerably lower noise level. Finally the mission operation was limited after all only by the mechanical sensitivity of the loops.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand anlässlich meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Bionik und Evolutionstechnik an der TU-Berlin. Die Idee zu dem Projekt zeichnete sich aus den vielen Versuchen ab, den bionisch inspirierten Propeller so auszulegen, dass seine Eigenschaften und Vorteile systematisiert werden konnten.

Wenngleich führend bei der Entwicklung der Evolutionsstrategie, gab es im Fachgebiet keine Vorarbeiten in der Entwicklung von Schiffspropellern oder im Umgang mit komplexen kommerziellen CFD-Werkzeugen. So nahm das Projekt mehr Zeit in Anspruch, als ursprünglich geplant war. Vieles wurde noch über den Projektrahmen hinaus bearbeitet.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Mitarbeitern am ehemaligen Fachbereich für ihre Geduld bedanken, ein besonderer Dank gilt hier meinem Mentor Prof. Dr.-Ing. Ingo Rechenberg, aber auch den Gutachtern Herrn Prof. Dr. rer. nat. P. Neubauer und Prof. Dr.-Ing. I. Boblan für ihre Zeit. Ebenfalls bedanken möchte ich mich beim BmBF für die Förderung des Projekts *Anwendung von Erkenntnissen der Bionik zur Funktions- und Strukturoptimierung von Schiffspropellern und anderen Gusskörpern* (Förderkennzeichen 01RW0307), ohne welche diese Arbeit nicht entstanden wäre. Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei den Projektpartnern *SV A* Potsdam und *MMG* für die ertragreiche Zusammenarbeit bedanken.

Berlin, 2018 M. Schmid

Symbole, Abkürzungen und Schreibweisen

Symbole

J	–	Fortschrittsgrad des Propulsors
k_T, k_Q	–	Schub- und Momentenbeiwert des Propulsors
c_T	–	Schubbelastungsgrad
n	–	Propellerdrehzahl; Anzahl der Objektparameter
D	–	Propellerdurchmesser
P	–	Leistung; Steigung des Propellers
T	–	Schubkraft des Propulsors
Q	–	Drehmoment des Propellers; Objektqualität
v_a	–	axiale Anströmgeschwindigkeit
v_2	–	axiale Abströmgeschwindigkeit
u, v	–	lokale tangentielle und radiale Anströmgeschwindigkeit auf dem Propellerflügel
\underline{c}	–	Geschwindigkeit (Vektor)
\underline{u}	–	induzierte Geschwindigkeit (Vektor)
η, η_0	–	Wirkungsgrad, Gesamtwirkungsgrad
p	–	Druck
A_0	–	Propellergrundfläche
A_P	–	in Achsrichtung projizierte Flügelfläche
A_E	–	abgewinkelte Flügelfläche
R, r	–	Propellerradius ($R = D/2$), relativer Propellerradius
R_H	–	Nabenradius
$\alpha(r)$	–	Anstellwinkel, lokaler Profilparameter ¹
$\beta(r)$	–	lokaler hydrodynamischer Steigungswinkel
$\delta(r)$	–	absoluter lokaler Flügelwinkel
$Sk(r)$	–	Rücklage (skew), Parameter der Generatorlinie
$Rk(r)$	–	Hang (rake), Parameter der Generatorlinie
$ch(r)$	–	Profilsehnenlänge (chord length), lokaler Profilparameter
$Wr(r)$	–	Wölbungsrücklage, lokaler Profilparameter
$Pd(x, r)$	–	Dickenverlauf, lokaler Profil-Konstruktionsparameter
$Wb(x, r)$	–	Wölbung, lokaler Profil-Konstruktionsparameter

¹ auf den Zylinderschnitt bei Radius r anzuwenden

Γ	– Zirkulation
F, F_a	– Kraft, Auftriebskraft
E	– Energie
$\underline{\underline{\Pi}}$	– Spannungstensor
$\underline{\underline{\tau}}$	– Reynolds-Spannungstensor
$\underline{\underline{\delta}}$	– Einheitstensor
$\underline{\underline{T}}$	– Verzerrungstensor
k	– Turbulenzenergie; Laufindex
i, j, m	– Laufindizes
x_i	– i -te Komponente des Objektparameters
\mathcal{N}	– Normalverteilung
$\underline{\underline{I}}$	– Einheitsmatrix
$\underline{\underline{C}}$	– Kovarianzmatrix
$Erw()$	– statistischer Erwartungswert
σ	– Streuung einer Normalverteilung
μ	– Erwartungswert einer Normalverteilung; Anzahl der Eltern
ρ	– Dichte; Anzahl der zu rekombinierenden Nachkommen
λ	– Anzahl der Nachkommen
γ	– Anzahl der Generationen
δ	– Schrittweite der Evolutionsstrategie
φ	– Fortschritt der Evolutionsstrategie
Δ	– normierte Schrittweite
Φ	– normierter Fortschritt
G	– Realisierung (Abbildung der Objektparameter)

Abkürzungen

API	–	Application Programming Interface
BSL	–	Baseline-Turbulenzmodell
CAD	–	Computer Aided Design
CAM	–	Computer Aided Manufacturing
CFD	–	Computational Fluid Dynamics
CLT	–	Contracted Loaded Tip
CMA	–	Covariance Matrix Adaption
CPU	–	Central Processing Unit
DDR	–	Double Data Rate
DES	–	Detached Eddy Simulation
DNS	–	Desoxyribonukleinsäure
FDM	–	Finite-Differenzen-Methode
FEM	–	Finite-Elemente-Methode
FVM	–	Finite-Volumen-Methode
KSA	–	Kumulative Schrittweitenadaption
LES	–	Large Eddy Simulation
LWL	–	Lichtwellenleiter
MAES	–	Meta model Assisted Evolutionary Strategy
MSR	–	Mutative Schrittweitenregelung
NACA	–	National Advisory Committee for Aeronautics
NFL	–	No Free Lunch
o.B.d.A.	–	ohne Beschränkung der Allgemeinheit
PC	–	Personal Computer
PFF	–	Propeller Free Format
PXE	–	Preboot Execution Environment
RANSE	–	Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations
RSTM	–	Reynoldsspannungs-Transportmodell
SMP	–	Symmetric Multi Processing
SSG	–	<i>Speziale-Sarkar-Gatski-Turbulenzmodell</i>
SST	–	Shear Stress Transport-Turbulenzmodell
TEU	–	Twenty-foot Equivalent Unit
UML	–	Unified Modeling Language
VRML	–	Virtual Reality Modeling Language

Schreibweisen

- *kursiv*: skalare Größen, Einheiten, Eigennamen (ohne allgemeine Bedeutung)
- Vektor \underline{x} , Matrix \underline{M}
- Mittelwert \bar{m} , auch zur Kennzeichnung der intermediären Rekombination
- Betonung
- **besondere Bedeutung**
- (4.16): Gleichung Nr. 16, lokalisiert in Kapitel 4 (nicht: 16. Gleichung des 4. Kapitels!)
- src/abstractfactory.hh: Datei- und Verzeichnisnamen
- Position der Fußnoten: ³⁴. - spezielle Fußnote für letzten Satz,
³⁴. - allgemeinere Fußnote für letzten Absatz
- [94]: Literaturverweis (siehe Kapitel 10)
- AnExampleClass: Namen aus dem Quellcode
- zitierter Quelltext:

```
anyValue = callAnExampleFunction();
```

- Kommandos oder Dialoge an der Konsole:

```
prompt> make ↵
```

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Forschung.....	6
2.1	Entwurf und Bewertung.....	6
2.2	Einsatzbereiche und Bauformen.....	8
2.3	Optimierungsverfahren.....	11
2.4	Aktuelle Forschungsarbeiten.....	14
3	Grundlagen und Methoden.....	18
3.1	Propeller.....	18
3.1.1	Allgemeines.....	18
3.1.2	Geometrische Kenngrößen.....	20
3.1.3	Kennwerte und Freifahrtkurven.....	23
3.1.4	Theorie.....	24
3.1.4.1	Strahltheorie.....	24
3.1.4.2	Traglinientheorie.....	26
3.1.4.3	Tragflächentheorie.....	30
3.1.5	Möglichkeit der Verlustreduktion.....	32
3.2	Qualitätsbewertung mit RANSE-Lösern.....	37
3.2.1	Allgemeines.....	37
3.2.2	Euler- und Navier Stokes-Gleichung.....	38
3.2.3	Reynolds-Gleichung (RANSE).....	42
3.2.3.1	Reynolds-Dekomposition.....	42
3.2.3.2	Turbulenzmodellierung.....	43
3.2.3.3	Andere Ansätze.....	44
3.2.4	Gittererzeugung.....	45
3.2.4.1	Allgemeines.....	45
3.2.4.2	Strukturiert vs. unstrukturiert.....	46
3.2.4.3	Auflösung.....	48
3.2.4.4	Propeller-Diskretisierung.....	49
3.2.5	Strömungssimulation.....	50
3.2.5.1	Finite Differenzen-Methode (FDM).....	50
3.2.5.2	Finite Elemente-Methode (FEM).....	51
3.2.5.3	Finite Volumen-Methode (FVM).....	52

3.2.6	Auswertung	54
3.2.7	ICEM-CFD und Ansys CFX	54
3.3	Evolutionsstrategie	55
3.3.1	Allgemeines	55
3.3.2	Eine "Lanze für die Bionik"	57
3.3.3	Evolution und Bionik	58
3.3.4	Kausalität	60
3.3.5	Die Evolutionsstrategie	61
3.3.6	Aufbau der Evolutionsstrategie	63
3.3.6.1	Allgemeines	63
3.3.6.2	Fortschritt und Evolutionsfenster	65
3.3.6.3	Schrittweitenregelung	72
3.3.7	Algorithmen	78
3.3.7.1	(1+1)-Evolutionsstrategie mit 1/5-Erfolgsregel	78
3.3.7.2	(1, λ)-Evolutionsstrategie mit MSR	79
3.3.7.3	($\mu/\rho, \lambda$)- bzw. ($\overline{\mu}/\mu, \lambda$)-Evolutionsstrategie mit MSR	80
3.3.7.4	($\overline{\mu}/\mu, \lambda$)-Evolutionsstrategie mit KSA	80
3.3.7.5	($\overline{\mu}/\mu, \lambda$)-Evolutionsstrategie mit CMA	81
3.3.8	Rekombination	82
3.3.9	Algebra und Schachtelung	83
3.3.10	Intrinsische Parallelität	84
4	Optimierungsumgebung	86
4.1	Allgemeines	86
4.2	Komponenten des Optimierungszyklus'	87
4.3	Geometriegenerator	89
4.3.1	Allgemeines	89
4.3.2	Grundprinzip	89
4.3.3	Umsetzung	90
4.3.4	Entwurfsdetails	93
4.3.5	Klassenstruktur des Geometriegenerators	95
4.3.6	Spezialfall Propellerblatt	98
4.3.6.1	Parametrisierung	98
4.3.6.2	Dichte der Stützstellen	100
4.3.6.3	Heuristische Constraints	104

4.3.7	Ankopplung an CFD-Werkzeuge.....	105
4.3.8	Nachparametrisierung.....	108
4.4	Nachweis der Konvergenz.....	110
4.5	Auswahl der Evolutionsstrategie	119
4.6	Verbindungen im Optimierungszyklus	120
4.6.1	Aufruf und Ablauf	120
4.6.2	Spezielles zur Gittererzeugung.....	122
4.6.3	Fehlertoleranz.....	123
4.7	Verwendete Computertechnik	123
5	Ergebnisse.....	125
5.1	Allgemeines.....	125
5.2	Testläufe für den konventionellen Propeller.....	126
5.2.1	Allgemeines.....	126
5.2.2	Optimierung des konventionellen Propellers.....	128
5.2.3	Zusammenfassung.....	139
5.3	Optimierung des Bionikpropellers	139
5.3.1	Allgemeines.....	139
5.3.2	Optimierungsläufe.....	143
5.3.3	Auswertung	151
5.3.4	Endkonfigurationen.....	156
5.4	Versuch am Schiff	158
5.5	Diskussion	164
6	Zusammenfassung.....	168
7	Thesen	171
8	Ausblick.....	172
9	Abbildungen	176
10	Tabellen	181
11	Literatur	182

12 Anhang	188
12.1 VDI-Richtlinie 6224 Bionische Optimierung	188
12.2 Freifahrtkurven zur Validierung	190
12.2.1 Hexaeder-vernetzter <i>P1423</i>	191
12.2.2 Tetraeder-vernetzter <i>P1424</i>	193
12.2.3 Tetraeder-vernetzter <i>P1423</i>	194
12.3 Beispiel einer einfachen Propellerblatt-Parametrisierung	195
12.4 Allgemeinere Optimierungsumgebung	198
12.5 Anschauliche Erläuterung zum Spitzenwirbel	199
12.6 Weitere Anmerkungen	201
12.6.1 Anfahrwirbel.....	201
12.6.2 Unterscheidung zwischen Rand- und Spitzenwirbel	202
12.6.3 Randwirbelinduktion und induzierter Widerstand.....	202
12.6.4 Zirkulationsverteilung.....	203

1 Einleitung

Allgemeines

Energieoptimale Prozesse rücken immer mehr in den Fokus der ingenieurwissenschaftlichen Forschung. Dabei wird es zunehmend wichtiger, die in einen Prozess eingebrachte Energie möglichst effizient zu nutzen. Die Optimierung technischer Systeme ist daher ein Gebiet stetig wachsender Bedeutung. Besonders schwierig ist der Bereich der Strömungsoptimierung, da dort die meisten Problemstellungen kaum analytisch zugänglich sind und reale Vorgänge nur relativ aufwändig über teure Experimente oder aufwändige CFD-Simulationen quantifizierbar werden. Simulationen erlauben zwar eine relativ genaue Einschätzung der Strömungssituation, Ziel einer ingenieurwissenschaftlichen Optimierung ist jedoch oft die Minimierung der Strömungsverluste.

Unvermeidlich bei der Auftriebserzeugung durch Tragflügel ist der induzierte Widerstand. Er entsteht durch den für den Auftrieb nötigen Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite eines Tragflügels. Der Energieverlust durch die dabei entstehenden Spitzenwirbel kann jedoch durch geeignete Konstruktionsprinzipien minimiert werden. Bei einem Tragflügel erfolgt dies beispielsweise durch eine elliptische Auftriebsverteilung in Spannweitenrichtung. Für einen Propeller sind unter Berücksichtigung der Rotation ähnliche Vorgaben zu ermitteln, hier ist im Wesentlichen auch die Theorie der Tragflügel anwendbar.

Die Natur zeigt jedoch hier eine weitere Möglichkeit der Verlustreduktion: Der Spitzenwirbel wird am Flügelende aufgeteilt, beispielsweise der Rabengeier zeigt dies deutlich an seinen Handschwingen (siehe Abbildung 1). Die dabei entstehenden kleineren Wirbel erzeugen in ihrer Gesamtheit zwar die gleiche Zirkulation, jedoch enthalten sie weniger kinetische Energie.



Abbildung 1: Aufgespreizte Flügelenden beim Rabengeier (Foto: Rechenberg)

Bei einem Schraubenpropeller sind durch das Umlaufen der Flügel andere Konstruktionslösungen denkbar. Ein hier ansetzender Vorschlag ist der sog. Bionikpropeller (pat.) bzw. Schlaufen- oder Loop-Propeller. Bei diesem sind die einzelnen Propellerblätter durch Stege bzw. weich anschließende Blattfortführungen verbunden, womit eine Aufteilung des Spitzenwirbels erreicht wird (siehe Abbildung 2). Die Konstruktion verspricht einen deutlichen Vorteil bezüglich des Schubes sowie der Geräuschentwicklung gegenüber konventionellen Propellern gleicher Größe, da die nachteiligen Eigenschaften des Spitzenwirbels abgeschwächt werden.

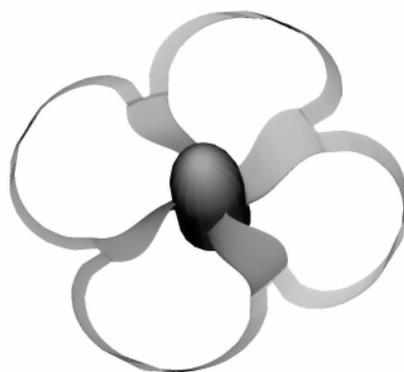


Abbildung 2: Vierflügeliger Bionikpropeller, exemplarisch

Eine Konstruktion dieses Propellers nach den gängigen Verfahren der Propellertheorie führt hier nicht zum Optimum, da die komplexe Strömung um den Aufspaltpunkt nicht ausreichend mit diesen Näherungsverfahren modelliert werden kann. Statt gängige und hier unzureichende Verfahren anzupassen, kann stattdessen auch der "umgekehrte" Weg beschritten werden: eine mögliche Konstruktion qualitativ zu bewerten und sukzessiv bessere Vorschläge zu erarbeiten. Mit dem Einsatz eines Optimierungsverfahrens kann dieser Zyklus auch automatisiert werden. Die ständig zu wiederholende qualitative Bewertung der aktuellen Konstruktion erfolgt dabei nicht über manuelle Experimente (was gegebenenfalls durchaus sinnvoll sein kann), sondern auf Grund der Rechenleistung moderner Computer über CFD-Verfahren, welche eine hohe Realitätsnähe der Modellierung erlauben.

Zur allgemeinen Einführung in die zu Grunde liegende Fluidmechanik können verschiedene etablierte Standardwerke herangezogen werden (z. B. [70], [37] u. a.).

Optimierung

Unter Optimierung versteht man im Allgemeinen, bei einem parametrisierten Zusammenhang nach einem Objektparametersatz (bzw. Satz von Objektvariablen)

zu suchen, welcher eine bestimmte Eigenschaft Q des Zusammenhangs optimal macht. Multikriterielle bzw. Paretooptimierung seien hier ausgenommen. Optimal kann hier ein Minimum oder ein Maximum sein, mitunter eingeschränkt durch zusätzliche Nebenbedingungen. Für den anschaulichen 2D-Fall kann man sich die Funktion Q als eine gebirgige Fläche vorstellen, auf welcher man nun den höchsten Gipfel² sucht. Oft begnügt man sich in Abhängigkeit von der Fragestellung mit einem Gipfel im näheren Umfeld (lokales Optimum). In der Ingenieurwissenschaft steht jedoch oft die Suche nach dem globalen Optimum im Vordergrund (z. B. eine Konstruktion mit dem höchstmöglichen Wirkungsgrad). Während nun im lokalen Bereich der Zusammenhang zwischen den Objektparametern und Objektqualität oft stetig und (bei konvexen Topologien) auch recht einfach mathematisch zugänglich ist, fehlt global - ohne Kenntnis der Topologie - jeder Hinweis auf das Optimum³. Optimierungsverfahren, die das globale Optimum einer Funktion suchen und finden sollen, müssen demnach aus einem lokalen Optimum heraus gelangen und andere lokale Optima erreichen können, was im günstigsten Fall im globalen Optimum mündet.

Die ursprünglich im Fachgebiet entwickelte und später sukzessiv verbesserte Evolutionsstrategie verspricht, auch bei sehr komplexen Problemen im hochdimensionalen Objektparameterraum effektiv und robust nach dem globalen Optimum suchen zu können. Durch diesen universellen Charakter kann sie in einem Black-Box-Ansatz angewendet werden, d. h. zur Optimierung eines Zusammenhangs ohne detaillierte Kenntnis der verborgenen Problemstruktur.

Zielsetzung

Motivation der Arbeit ist die Konzeption und Integration einer Optimierungs-umgebung, die mittels Evolutionsstrategie und CFD-Qualitätsfunktion ein Werkzeug für die effizienzoptimierte Auslegung des Bionikpropellers bietet. Insbesondere die ständig steigende Rechenleistung von im Rahmen öffentlich geförderter Forschungsvorhaben beschaffbarer Computertechnik machte es nun aussichtsreich, die Optimierung komplexer Strömungsvorgänge auch ohne analytische Näherungsverfahren anzugehen und damit verlässlichere Ergebnisse zu erhalten. Wie Kapitel 3.3 später noch erläutert, bietet die Evolutionsstrategie

² auch bildlich als Fitness-Landschaft bezeichnet, um die Funktion analog als Gebirge veranschaulichen zu können

³ Das ist bildlich gesehen vergleichbar mit der Situation, auf einem Berg nicht bestimmen zu können, ob man sich auf dem höchsten Gipfel im gesamten Gebirge befindet.

gegenüber anderen Optimierungsverfahren gerade im Zusammenhang mit komplexen Strömungsproblemen entscheidende Vorteile.

Basis für die Umsetzung war ein Projekt mit renommierten Industriepartnern aus dem Schiffbaubereich (*MMG in Waren*⁴ und *SVÄ-Potsdam*⁵), welche zum einen Interesse an einer verbesserten Konstruktion von Schiffspropellern und zum anderen bewährte und anerkannte Kompetenz in Konstruktion und Bewertung derselben haben. Das Projekt setzte das Ziel, eine gefundene optimale Konfiguration zunächst experimentell und letztlich im realen Einsatz am Schiff zu überprüfen, um so erweiterte Aussagen zu Anwendungsbereichen des Bionikpropellers treffen zu können.

Ursprünglich hatten die beteiligten Projektpartner die testweise Anwendung des optimierten Propellers an einem 1200 TEU-Containerschiff geplant⁶. Mit fortschreitender Projektdauer rückten jedoch kleinere Ziele in den Vordergrund. Dabei wurden die Randbedingungen der Optimierung insofern vereinfacht, dass der Bionikpropeller nicht mehr unter rein kommerziell relevanten Einsatzbedingungen bewertet werden kann, da die Entwicklung einer derart neuen und besonderen Propellerkonfiguration nicht in der zur Verfügung stehenden Zeit zu bewältigen war.⁷

Die vorliegende Arbeit ist daher auf eine praktische Anwendung geeigneter CFD- und Optimierungs-Verfahren orientiert, um in der Zusammenführung für einen speziellen Fall neue Erkenntnisse zu gewinnen. Im Fokus steht daher nicht die Weiterentwicklung der verwandten und verwendeten Verfahren und Theorien.

Kapitelübersicht

Zunächst soll im anschließenden Kapitel ein Überblick über den aktuellen Stand in beiden Teilbereichen Entwurf/Bewertung von Propellergeometrien sowie Optimierung von nichtlinearen komplexen Strukturen gegeben werden (Kapitel 2, *Stand*). Um die vorliegende Arbeit besser einordnen zu können, werden

⁴ Mecklenburger Metallguss GmbH, www.mmg-propeller.de

⁵ Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, www.sva-potsdam.de

⁶ entspricht etwa der Propellergröße üblicher Feederschiffe

⁷ Die Bedeutung der Kavitation und der Interaktion mit dem Nachlauf am Schiff tritt damit in den Hintergrund und wird im weiteren vernachlässigt. Dies bedeutet eine Optimierung für den stationären Fall, die Beachtung der Kavitation erfolgt nur zur Validierung der späteren Experimentalversionen.

nachfolgend einige aktuelle und ähnliche Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Propelleroptimierung angeführt. Im darauffolgenden Kapitel 3 (*Grundlagen und Methoden*) werden die theoretischen Grundlagen und ausgewählten Methoden für die Anwendung beider Teilbereiche auf die Optimierung des Bionikpropellers genauer vorgestellt. Schließlich zeigt Kapitel 4 (*Optimierungsumgebung*) auf, wie genau zum Erreichen des Ziels vorgegangen wurde. Die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse werden in Kapitel 5 (*Ergebnisse*) dargestellt und abschließend einer kritischen Betrachtung unterzogen. Eine zusammenfassende Darstellung und abschließende Wertung findet man erwartungsgemäß am Ende (Kapitel 6, *Zusammenfassung*). Einen Ausblick auf mögliche Verbesserungen und Weiterentwicklungen gibt abschließend Kapitel 8 (*Ausblick*).

2 Stand der Forschung

Die Optimierung von Propellergeometrien über das in der Einleitung skizzierte Verfahren bildet einen Schnittpunkt zumindest zweier Technologien, eines robusten Optimierungsverfahrens und eines verlässlichen Bewertungsverfahrens für geometrisch parametrisierte Propellerformen.

2.1 Entwurf und Bewertung

Die Entwicklung einer Theorie zur Beschreibung und Berechnung von Propellern ist eng mit der Theorie der Tragflügel verbunden. Diese wurde erstmals ab 1910 von *L. Prandtl* als Traglinientheorie entwickelt. Für die Beschreibung bzw. Entwurf gerader und schmaler Tragflügel ist sie auch heute noch ausreichend, da sie elementare Zusammenhänge aufzeigt. In [54] zeigte *A. Betz* die Anwendung dieser Theorie auf Propeller und damit erstmals wichtige Merkmale für deren geringsten Energieverlust.

Für eine nicht zu vernachlässigende Profiltiefe⁸ wurde die Theorie dahingehend erweitert, dass nicht mehr nur eine Überlagerung tragender Hufeisenwirbeln auf einer zentralen Traglinie angenommen wird, sondern vielmehr solche Wirbel auf der Flügelfläche verteilt angeordnet werden. Damit wurde es möglich, auch die Ausdehnung eines Flügels in Strömungsrichtung zu erfassen. Mit Hilfe dieses Verfahrens kann der induzierte Widerstand einer Tragflügelkonfiguration relativ genau bestimmt werden, jedoch geht der Reibungseinfluss auch hier nur empirisch ein.

Bei den Panel-Verfahren werden potentialtheoretische Quellen, Senken und Dipole auf der Flügelkontur derart verteilt, dass dort der Normalengradient der Geschwindigkeit verschwindet. Über eine Verteilung von Wirbelquellen und -senken können zudem die Anströmung und damit auch die Flügelkräfte modelliert werden. Letztlich lässt sich so die komplette 3D-Form des Flügels erfassen. Die Genauigkeit des Verfahrens, aber auch der Rechenaufwand steigt gegenüber den Tragflächenverfahren, der Reibungseinfluss kann aber auch hier nur empirisch einbezogen werden.

Bei noch höheren Anforderungen an die Genauigkeit der errechneten Propellereigenschaften kann eine beliebig genaue und damit einhergehend aufwändige

⁸ Im Allgemeinen gilt dabei Spannweitenlänge zu Profiltiefe < 3 .

Strömungssimulation über die Lösung der zugrunde liegenden Bewegungsgleichungen berechnet werden. Hierbei wird die um- bzw. durchströmte Geometrie in zahlreiche diskrete Volumina zerlegt, über welche dann jeweils die strömungsphysikalischen Differentialgleichungen integriert werden. Das Lösen des zugeordneten Gleichungssystems für das gesamte Strömungsfeld liefert anschließend quantitative Aussagen zur Strömungssituation mit hoher Genauigkeit. Ausgangspunkt können die Euler-, aber auch die Navier-Stokes-Gleichungen (s. u.) sein. Insbesondere die letzteren - mit Erweiterungen um viskose Anteile - werden häufig für wirklichkeitsnahe Berechnungen verwendet. Eine Aufspaltung der Bewegung in eine mittlere und eine Schwankungsgeschwindigkeit erlaubt zudem den Einsatz von Turbulenzmodellen, welche auch komplexe bzw. kleinskalige Strömungssituationen erfassbar machen⁹. Dennoch ersetzt die gute Bewertbarkeit eines Entwurfs im Allgemeinen nicht die o. g. Entwurfsverfahren.

Auf Grund der bei großen Druckunterschieden einsetzenden schädlichen Kavitation¹⁰ haben wassergehende Propeller prinzipiell eine höhere Profiltiefe bzw. ein höheres Flächenverhältnis (siehe Kapitel 3.1.2), als luftgehende Propeller¹¹. Insbesondere für Schiffspeller sind demnach Verfahren vorzuziehen, welche auch die 3D-Kontur des Flügels erfassen können. Dies gilt umso mehr, da erst über diese Verfahren Aussagen über lokale Kavitationsneigungen möglich werden. Die Kavitation ist oft örtlich begrenzt und kann dort sehr zerstörerisch sein!

Mit den bisher genannten Verfahren kann eine gegebene Geometrie zunehmend genauer erfasst und damit auch qualitativ bewertet werden. Davon ausgehend und durch die in den letzten Jahrzehnten enorm verbesserten numerischen Verfahren sowie der stark gestiegenen Rechenleistung verfügbarer Computer wird es immer erfolgreicher, Propeller auch mit iterativen Optimierungsverfahren zu entwerfen.

⁹ Bei Einsatz der viskosen Navier-Stokes-Gleichungen (bzw. Reynolds-Gleichungen für Turbulenzmodellierung) im Rahmen der CFD (Computational Fluid Dynamics bzw. numerische Strömungsmechanik) ergeben sich die genauesten Ergebnisse bei andererseits auch höchsten Rechenanforderungen. Eine vollständige Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen ohne Reynolds-Mittelung kommt auf Grund der extremen Rechenanforderungen derzeit nur für sehr wenige Spezialfälle in Betracht (vgl. Kapitel 3.2).

¹⁰ Kavitation: Durch Druckabsenkung im Wasser entstandene Dampfblasen fallen bei nachfolgender Druckerhöhung wieder zusammen, was wegen der Quasi-Inkompressibilität des Wassers zu sehr hohen Kräften bzw. Druckspitzen führt.

¹¹ um das Druckverhältnis wegen drohender Kavitation zu senken

2.2 Einsatzbereiche und Bauformen

Im weiteren beziehen sich alle Ausführungen einschränkend auf feste Schraubenpropeller. Andere vom einfachen Schraubenpropeller abweichende Bauformen, Verstellpropeller, Mehrkomponenten-Propulsoren (Rotor-Stator-Systeme), Jet-Antriebe, Voith-Schneider-Propeller u. a. sollen hier nicht betrachtet werden.

Die Ansprüche an den Entwurf eines festen Schraubenpropellers können schon je nach Einsatzbereich und -ziel sehr unterschiedlich sein. Die am weitesten verbreiteten Arbeitsmedien sind Luft und Wasser (für Luft- und Wasserfahrzeuge)¹². Auf Grund der Kavitationseigenschaften von Wasser ergeben sich bereits - wie oben erwähnt - grundlegende Geometrieunterschiede in der Propellerform. Fast immer ist hierbei die entscheidende Geometriegröße - der Durchmesser - konstruktiv als Randbedingung vorgegeben.

Grundlegend beim Propellerentwurf ist jedoch meist eines der folgende Ziele:

- **maximaler Schub**
Dies trifft am häufigsten für Schiffspropeller zu, da hier auch aus dem Stillstand des Fahrzeugs heraus eine möglichst hohe Antriebskraft erzeugt werden muss (Schlepper, Pfahlzug).
- **maximaler Wirkungsgrad**
Dies trifft für Luft- und Wasserfahrzeuge gleichermaßen zu, wenn eine Transportaufgabe über längere Wegstrecken der eigentliche Einsatzzweck des Fahrzeugs ist. Hierbei ist die einzuhaltende Geschwindigkeit eine Randbedingung.
- **minimale Geräuschentwicklung**
Der Entwurf mit dem Ziel minimaler Geräuschentwicklung (unter Erfüllung vorgegebener Leistungsparameter) ist eine Spezialanwendung, die jedoch die Formgebung des Propellers beeinflusst. Für wassergehende Propeller sowie Luftpropeller gibt es gleichermaßen militärische wie auch zivile Anwendungsbereiche¹³.

Für Schiffs- bzw. wassergehende Propeller ist die Kavitation grundsätzlich schädlich. Sie kann aber bei geeigneter Auslegung in räumliche Bereiche gedrängt werden, welche dem Propellermaterial nicht direkt zusetzen. Auf einen möglichst geringen Geräuscheintrag durch die Interaktion des Propellers mit dem Nachlauf

¹² Es sollen dabei jedoch keine Spezialanwendungen wie Verdichter für Kühlmedien, Molekularpumpen oder Pumpen für chemische Substanzen etc. interessieren.

¹³ z. B. U-Boot-Propeller, Propeller für Kreuzschiffahrt, leise Turboprop-Triebwerke, leise Ventilatoren wie z. B. Computerlüfter usw.

des Schiffsrumpfes ist ohnehin immer zu achten, da sonst die eventuell entstehenden Schwingungen inakzeptabel werden können¹⁴. Um die o. g. Ziele zu verwirklichen, haben sich einige besondere Bauformen herausgebildet.

Um den Schub auf den Propellerdurchmesser bezogen zu maximieren (hoher Schubbelastungsgrad), wird der Propeller meist ummantelt¹⁵. Der Mantel liegt hinreichend dicht an den Flügelen und verhindert den Druckausgleich zwischen Saug- und Druckseite der Flügel. In der Analogiebetrachtung enden nun die tragenden Wirbel direkt am Mantel, es müssen dort nach dem Helmholtz'schen Wirbelsatz keine freien Wirbel mehr abgehen, der induzierte Widerstand wird stark vermindert. Durch gezielte Formgebung des Mantelprofils kann die Strömung für den Propeller noch verzögert (bei hohen Fortschrittsgraden) bzw. beschleunigt werden (z. B. Kortdüse bei niedrigen Fortschrittsgraden), dennoch ist der Einsatzbereich des Mantelpropellers eher auf geringe Fahrgeschwindigkeiten beschränkt. In der Luftfahrt wird der Mantelpropeller außerhalb von Turbofan-Triebwerken nur sehr selten verwendet, da durch die vergrößerte Oberfläche und Masse gravierende Nachteile entstehen. Im Schiffbau ist der Mantelpropeller jedoch, insbesondere bei Schleppern oder Schubschiffen, sehr verbreitet. Auf Grund der mehrkomponentigen Bauweise soll aber auch der Mantelpropeller - wie oben erwähnt - nicht als Bezug herangezogen werden.

Maximaler Wirkungsgrad ist dort wichtig, wo über einen langen Zeitraum eine eher gleichmäßige Schubleistung erbracht wird. Hier zielt der Entwurf unter Einhaltung der Randbedingungen (Durchmesser, Schub/Schiffsgeschwindigkeit, Kavitation, Geräusch) auf geringsten induzierten Widerstand ab. Derartigen Propellern sieht man ihre hohe Effizienz nicht auf den ersten Blick an, da sie über keine augenfälligen Geometrie-"Raffinessen" verfügen. Der große Nutzen solcher Propeller erwächst aus der langen Einsatzdauer im langjährigen Transportdienst und der damit verbundenen Kraftstoffeinsparung.

Für extra leise Propeller muss im Entwurf besonders die Schwingungsanregung durch periodische Druckschwankungen berücksichtigt werden. Zum einen wird oft über eine ausgeprägte Rücklage¹⁶ ein verschmierter Durchgang des Flügels

¹⁴ Diese Schwingungen entstehen durch Interferenzen der am Umfang angeordneten Propellerflügel mit inhomogenen Anströmbedingungen (z. B. durch den Nachlauf des Schiffskörpers). Sie können ungünstig auf den Schiffsrumpf bzw. die Antriebsanlage wirken.

¹⁵ wird dann als Mantelpropeller bzw. Düsenpropeller bezeichnet; der Mantel bzw. die Düse wird oft als Kortdüse bezeichnet (nach *Luigi Stipa* und *Ludwig Kort*, 1930er Jahre), vgl. auch [53]

¹⁶ Verschiebung der Flügelschnitte in Umfangsrichtung, z. B. sichelförmig

durch den Nachlauf erreicht, die Druckschwankungen werden so ebenfalls über den Umfang verschmiert und damit abgeschwächt. Zum anderen wird die Blattzahl auf die Gegebenheiten des Nachlaufs und der Antriebscharakteristik abgestimmt¹⁷. Der Spitzenwirbel darf nur relativ schwach ausgeprägt sein, da er ebenso eine akustische Quelle darstellt. Auch aus Gründen der Kavitationsneigung wird daher oft an der Flügelspitze der Auftrieb zurückgenommen.

Die Kavitationseigenschaften eines wassergängigen Propellers sind ein entscheidendes Kriterium in dem Sinne, dass ein Propeller mit besonders schädlicher oberflächenzerstörender Kavitation nicht zu einem wirtschaftlich sinnvollen Einsatz kommen kann¹⁸. Daher kommt beim Entwurf kommerzieller Propulsoren der Bestimmung ihrer Kavitationseigenschaften eine immense Bedeutung zu. Für eine erste grobe Abschätzung kann aus dem über verschiedene Verfahren bestimmten Strömungsfeld der lokale Druck entnommen und damit Bereiche unterschrittenen Dampfdrucks ermittelt werden. Für eine ausreichende Kavitationsprognose ist dies jedoch nicht ausreichend.

Nicht nur die strömungsmechanischen Eigenschaften sind heute Gegenstand der Optimierung, auch Einsparmöglichkeiten beim Werkstoffeinsatz sind wegen der Verfügbarkeit immer besserer Berechnungsverfahren aktuell. Über Optimierungs- und FEM¹⁹-Verfahren kann ein Propeller dahingehend ausgelegt werden, dass strömungsmechanisch günstige Form und gleichmäßige mechanische Belastung zu einem minimalen Werkstoffeinsatz führen (vgl. [20] und [22]). Nicht zuletzt haben sich sehr haltbare, technologisch beherrschbare und damit auch teure Cu-Legierungen etabliert, die sparsam verwendet werden müssen (vgl. [21]). Als praktisches Beispiel heute möglicher Propellerausführungen sei der 2006 von der MMG Waren als Weltmarktführer ausgelieferte Propeller genannt, welcher mit knapp 10 m Durchmesser ein Gewicht von etwa 130 t erreicht. Zu diesem Zeitpunkt war dies der größte jemals hergestellte Schiffspropeller der Welt²⁰, eine Grenze ist jedoch noch nicht erreicht.

¹⁷ um möglichst niederfrequente und energiearme Interferenzen zu erreichen

¹⁸ Der Schiffsbetreiber könnte die immensen Reparaturkosten einschließlich der Werft- und Liegezeiten vom Propellerhersteller zurückfordern. Unter Umständen kann dies schon ein mehrfaches des eigentlichen Herstellungspreises sein. Daher stellt die Herstellung von Schiffspropellern im großen Maßstab auch ein beträchtliches unternehmerisches Risiko dar!

¹⁹ FEM - Finite-Elemente-Methode (siehe Kapitel 3.2.5.2)

²⁰ Montage des Propellers am Containerschiff *Emma Mærsk* der dänischen Reederei *Mærsk*, Länge etwa 400 m für 14770 TEU, Antriebsleistung etwa 80 MW

Eine breite Einführung in die Thematik des modernen Schiffsentwurfs einschließlich der Propulsion gibt z. B. [15].

Bionikpropeller

Der Bionikpropeller ist als Einkomponentensystem direkt mit den üblichen nicht-ummantelten Schraubenpropellern zu vergleichen. Durch die konstruktive Auslegung der Flügelspitze wird der Druckausgleich zwischen Ober- und Unterseite behindert, so dass er mit dieser Ausrichtung auch mit dem mehrkomponentigen Mantelpropeller vergleichbar ist. Der Bionikpropeller adressiert damit ebenso Anwendungen mit hohem Schubbelastungsgrad, aber auch solche, bei denen die Geräuschemission gering sein soll.

Aus der Forschung sind keine Arbeiten zur optimalen Auslegung der Geometrie mit dem Ziel bekannt, äußere Parameter des Bionikpropellers zu maximieren/minimieren (Wirkungsgrad, Schub, Verluste, Schalldruck etc.). Seine Geometrie und damit auch das erzeugte Strömungsfeld ist jedoch im Vergleich zum konventionellen Schraubenpropeller wesentlich komplexer. Zudem hat beim Bionikpropeller die Reibung mit den größeren Flächenanteilen im Außenbereich einen größeren Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad, als bei konventioneller Bauweise. Da diese ohnehin nicht in eine feldtheoretische Betrachtung eingehen kann, liegt eine ganzheitliche Strömungsbetrachtung nahe. Heute werden zunehmend aufwändigere CFD-Verfahren einschließlich Reibungsmodellierung genutzt (z. B. als RANSE-Löser²¹, siehe Kapitel 3.2.3), um eine hochgenaue Bewertung bzw. Voraussage der Propellerqualität zu ermöglichen.

2.3 Optimierungsverfahren

Im ingenieurwissenschaftlichen Bereich versteht man unter Optimierung im Allgemeinen die zielgerichtete Veränderung einer Konfiguration, um ein bestimmtes Kriterium zu maximieren bzw. zu minimieren.²² Die Konfiguration lässt sich meist durch einen Objektparametersatz angeben, aus dem sich z. B. eine physikalische Instanz ableiten bzw. ein Prozess/Verfahren einstellen lässt. Die

²¹ RANSE = Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, dt. Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen, bilden den physikalisch exaktesten Ansatz zur Berechnung von Strömungsfeldern, da ein viskoses Modell zu Grunde liegt.

²² Der (unbekannte) funktionale Zusammenhang zum Parametersatz ist die skalare oder vektorielle Zielfunktion (Pareto-Optimierung).

Zusammenhänge zwischen dem Objektparametersatz und der entsprechenden Objektqualität sind in praktischen Fällen meist nichtlinear und oft nicht analytisch zugänglich.²³

Zum Test der Konvergenz und Geschwindigkeit von Optimierungsverfahren haben sich einige Testfunktionen etabliert, die besondere Eigenschaften der Qualitätsfunktion aufweisen (z. B. konvex oder nicht-konvex, mehrere lokale Optima) und dennoch sehr effizient zu berechnen sind. Als Beispiel seien die Rastrigin-Funktion (nicht-konvex, viele lokale Optima) oder die Rosenbrock-Funktion (nicht-konvex, ein flaches Minimum) genannt. Optimierungsverfahren werden oft auch an Hand dieser Testfunktionen miteinander verglichen und gemessen.

Vorausgesetzt sei zunächst, dass der Betrachtungsgegenstand über einen Satz von n Objektparametern eindeutig festgelegt ist. Die Qualität der Realisierung $Q(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sei wenigstens in einigen Punkten bestimmbar (durch Simulation, Messung etc.). Gesucht sind diejenigen Objektparameter $x_{i,opt}$, die das totale Differential dQ unter den gegebenen Randbedingungen verschwinden lassen: $dQ=0$ ²⁴. Wegen der o. g. häufigen Unklarheit über Q muss daher von unstetigem nichtlinearem Verhalten ausgegangen werden. Für viele technischen Probleme sind damit die Voraussetzungen zur Anwendung etablierter mathematischer Optimierungsverfahren nicht gegeben (z. B. fehlende Differenzierbarkeit). Dennoch besteht Bedarf, sich auch in diesen Situationen einem (unbekannten) Optimum zu nähern. Ein solches optimales Optimierungsverfahren könnte nun aus dem Zusammenhang zwischen Objektparametern und erreichter Qualität mit der geringstmöglichen Anzahl an Q -Auswertungen denjenigen Objektparametersatz bestimmen, für den Q extremal wird (globales Optimum).

Nach dem NFL-Theorem²⁵ gibt es jedoch - bezogen auf die gesamte Menge von Optimierungsproblemen bzw. Zielfunktionen - kein universelles Optimierungsverfahren, welches besser ist, als bloßes Raten. Das mag angesichts der

²³ Es soll hier nur auf die Optimierung im ingenieurwissenschaftlichen Bereich Bezug genommen werden. Die theoretische Betrachtung der Optimierbarkeit von Funktionen soll hier nicht interessieren.

²⁴ Wegen der skalaren Qualitätsfunktion ist dies ein skalares Optimierungsproblem. Die Vektoroptimierung für multikriterielle Probleme (Pareto-Optimierung) soll hier nicht beachtet werden, da im vorliegenden Zusammenhang konkurrierende Eigenschaften zu einem skalaren Wert sinnvoll zusammengefasst werden können. Bei anderen Anwendungen können jedoch auch ganze Parameter-Scharen hoher Qualitätswerte interessieren (Pareto-Front).

²⁵ NFL - No Free Lunch-Theorem, Bedeutung: "nichts ist umsonst"

existierenden Fülle von solchen Verfahren seltsam erscheinen. Jedoch trifft zu, dass die üblichen Aufgabenstellungen, die mittels Optimierungsverfahren bearbeitet werden, einschränkende Untermengen aller o.g. Problemstellungen sind. Somit sind existierende Verfahren immer Spezialfälle der Optimierung. Darüber hinaus lässt sich aus dem Theorem folgern, dass Vorteile und Nachteile eines Verfahrens sich mit denen eines anderen Verfahrens ausgleichen. Für die Evolutionsstrategie als Optimierungsverfahren existiert im übrigen eine solche Einschränkung auf Qualitätsfunktionen bzw. Problemstellungen, die der starken Kausalität genügen (siehe Kapitel 3.3.4).

Auch heute noch ist ein ausreichend universelles und dabei allgemeingültiges Optimierungsverfahren nicht bekannt, eine Annäherung aber Gegenstand der Forschung. Mit diesem Ziel haben sich in Abhängigkeit von der Problemstellung bzw. der Topologie der Qualitätsfunktion eine Reihe von möglichen Herangehensweisen zur endlichdimensionalen Parameteroptimierung etabliert. Übergreifendes Problem solcher Verfahren ist, dass nach der relativ einfachen lokalen Suche eines lokalen Optimums dieses für ein evtl. höherwertiges lokales Optimum auch wieder aufgegeben werden können muss. Besonders gut schneiden hier kombinierte stochastisch/heuristische Verfahren ab, die über sukzessive Proben (Q -Auswertungen) ein "Wissen" über die Topologie der Qualitätsfunktion aufbauen können. Durch die Unabhängigkeit von der Stetigkeit und Differenzierbarkeit von Q sind diese Verfahren zudem wesentlich robuster, als Methoden der mathematischen Optimierung. Häufig werden dabei Evolutionäre Algorithmen verwendet, da sie sich in vielen ähnlichen Anwendungen als sehr robust und zielstrebig erwiesen haben (vgl. [38], [7], [31], [74] u. a.). Bei der Anwendung im hochdimensionalen Parameterraum, wie dies bei komplexen Aufgabenstellungen häufig der Fall ist, werden jedoch auch hier sehr viele aufwändige Bewertungen der jeweiligen Realisierung benötigt. Man versucht daher, diese über zusätzliche Annahmen einzusparen (Meta-Modelle, Neuronale Netze) bzw. die Konvergenzgeschwindigkeit der Optimierung zu erhöhen²⁶ (vgl. [49] und [77]). Eine breite Einführung zu Optimierungsverfahren unter dem Aspekt des Vergleichs mit der Evolutionsstrategie bietet z. B. [65] sowie [66].

²⁶ zum Aufbau Metamodell-unterstützter Evolutionsstrategien vgl. auch einleitend [69]

2.4 Aktuelle Forschungsarbeiten

Im Zentrum vieler aktueller Forschungsarbeiten zu marinen Propulsionssystemen stehen die Propeller-Nachlauf-Interaktion sowie die Kavitation. Dies sind entscheidende Aspekte, wenn es um den kommerziellen Einsatz von Schiffspropellern geht. Häufig steht dabei der Mantelpropeller im Mittelpunkt. Bei luftgehenden Propellern liegt das Interesse auf der Verminderung der Geräuschemission, insbesondere im transsonischen Bereich der Blattspitze²⁷. Zunehmend werden übergreifend rechenaufwändigere Verfahren (z. B. Panel-Verfahren, RANSE-Löser) zu Bewertung eingesetzt. Da der Bionikpropeller bisher kein Gegenstand von vergleichbaren Forschungsarbeiten ist, soll der folgende Abriss einiger ähnlicher Arbeiten auf diesem Gebiet die Einordnung des Themas erleichtern.

Benini verwendete für die Optimierung von Schiffspropellern in [7] ein multikriterielles evolutionäres Optimierungsverfahren. Ziel war dort, einen Bereich geometrischer Parameter zu finden, welche zu verbesserten Eigenschaften der Propeller führen (Pareto-Optimierung). Zur Minimierung der Rechenzeit wurde auf ein aufwändiges Qualitätsbewertungsverfahren verzichtet, die Qualität des jeweiligen Nachkommen wurde stattdessen über die Polynomfunktionen der Wageningen B-Screw-Serie errechnet. Auf Grund der dadurch relativ geringen Anforderungen an die Rechenleistung waren die Berechnungen auf einem üblichen PC machbar. Modifiziert wurden bei den Varianten das Steigungs- und Flächenverhältnis sowie die Flügelzahl, die Kavitationseigenschaften gingen als Randbedingung mit ein. Als Ergebnis wurde eine breite Variation der bestimmenden Parameter der Propellervarianten als Diagramme erzeugt und somit für eine Anwendung bereitgestellt. Schon zur Optimierung von Schaufelgittern subsonischer Axialkompressoren verwendeten *Benini* und *Toffolo* ein multikriterielles evolutionäres Optimierungsverfahren²⁸, um das Druckverhältnis gegenüber dem Totaldruckverlust zu optimieren (vgl. [8]). Zur Qualitätsberechnung dienten dort bestehende Codes zur Schaufelgitteranalyse, variiert wurden dabei die NACA-Profilparameter. Das Druckverhältnis konnte um max. 1.5 % gesteigert, der Totaldruckverlust außerdem um max. 20 % reduziert werden.

²⁷ Wie in der Einleitung schon erläutert, liegt der Schiffspropeller projektbedingt im Vordergrund der Betrachtung.

²⁸ eine $(\mu+\mu)$ -Evolutionstrategie, aber mit binärer Kodierung

Kinnas et al. untersuchten die Eigenschaften von Düsenpropellern²⁹ über die variierenden geometrischen (normierten) Parameter Steigungs-, Wölbungs- und Sehnenverhältnis (vgl. [38]). Durch Begrenzung und Unterteilung des jeweiligen Intervalls in 10 Bereiche ergaben sich 1000 Varianten. Diese wurden zunächst einem genauen Bewertungsverfahren unterzogen. Über die dort ermittelten hydrodynamischen Werte (Schub, Drehmoment, Druckbeiwert) wurden Approximationspolynome kalibriert, so dass nun hydrodynamische Werte für alle geometrischen Größen über eine lineare Interpolation angebar wurden. Die eigentliche Optimierung erfolgte nun zu einem gegebenem Schub über die Lagrange-Methode mit Straffunktionen, nicht über eine Evolutionsstrategie. Es zeigte sich ein exponentieller Aufwand mit der Anzahl der geometrischen Parameter (hier nur 3) sowie eine große Abhängigkeit der Lösung vom Startpunkt der Optimierung und somit vom Vorwissen des Untersuchenden.³⁰

Ähnlich zu den Zielen der vorliegenden Arbeit versuchten *Hundemer* et al. in [31], Schiffspropeller weitgehend automatisiert zu optimieren. In die Bewertung gingen hier die Kavitationseigenschaften sowie die Kraftschwankungen am Flügel und damit druckinduzierte Schwingungen am Heck mit ein. Variiert wurden die geometrischen Parameter Steigungs- und Flächenverhältnis sowie die Profilparameter Wölbungsverhältnis, Sehnenlänge und Rücklage. Auf Grund des hohen numerischen Aufwands wurde ein potentialtheoretisches Bewertungsverfahren herangezogen, wenngleich auch punktuell RANSE-Rechnungen zur Validierung eingesetzt wurden. Übereinstimmend folgert *Hundemer* et al. in [31], dass zwar Gradientenverfahren schnell in der sog. Lokalen Suche sind (jeweils ausgehend von einem Startwert werden lokale Optima relativ schnell gefunden), jedoch nicht den gesamten Suchraum explorieren können. Dies gelingt den favorisierten Evolutionären Algorithmen, jedoch auf Kosten von zahlreicheren Bewertungen. Es wurde außerdem die Bedeutung einer problemangepassten geometrischen Parametrisierung hervorgehoben, welche die Effizienz der Optimierung deutlich positiv beeinflusst. Obwohl die Parameterzahl damit anstiege und höheren Aufwand für die Kavitationsmodellierung bedeutete, schlägt *Hundemer* vor, Profilparameter auch in radialer Richtung zu parametrisieren, um im Entwurfsprozess

²⁹ Mantelpropeller, bei dem der Mantel selbst einen profilierten Querschnitt besitzt

³⁰ Die Qualitätsbewertung über eine Lookup-Database einschließlich der Interpolation fehlender Werte stellt bei nicht zu großer Parameterzahl und aufwändiger, aber hinreichend glatter Bewertungsfunktion eine interessante Möglichkeit dar, den Bewertungsaufwand zu senken (vgl. [14] und siehe auch Kapitel 8).

mehr Freiheiten zu haben. Ebenso wird im Sinne eines kompletten Entwurfsprozesses auch eine Kopplung an FEM-Systeme vorgeschlagen.

Bei Schiffsantrieben sind für den Geschwindigkeitsbereich zwischen konventionellen Propellern und Wasserstrahl-Antrieben die Linear Jet-Antriebe sehr vielversprechend. Dies sind Multikomponenten-Systeme aus Propeller, Düse und Stator. Für *Naujoks et al.* in [49] waren auf Grund der Komplexität nur der Propeller Gegenstand einer Optimierung. Als Optimierungsverfahren wurde eine Metamodell-unterstützte Evolutionsstrategie verwendet (MAES³², vgl. auch [69]), Optimierungsziel war die Erhöhung des Wirkungsgrades. Über das Meta-Modell wird eine Reduktion der Anzahl tatsächlich zu berechnender Qualitätswerte erreicht, welche dann letztlich über ein Potentialverfahren ermittelt werden. Eine RANSE-basierte Rechnung diente zur Validierung. Es zeigte sich, dass die Metamodell-unterstützte Evolutionsstrategie schneller gute Resultate, jedoch eine einfache Evolutionsstrategie wie z. B. eine (1+1)-Strategie³³ nach längerer Laufzeit bessere Ergebnisse brachte.

Auch in [77] optimieren *Yu et al.* einen Mantelpropeller mit einer Metamodell-unterstützten Evolutionsstrategie (MAES). Als Bewertungsverfahren fungiert primär ein Randelemente-Verfahren, welches zunächst die zu optimierenden geometrischen Parameter in ihren Bereichen einschränkt. Die Feinoptimierung wird anschließend wieder mit einem RANSE-Löser ausgeführt.

Alle genannten Verfahren nutzen im Sinne einer schnellen Rechnung potentialtheoretische Bewertungsverfahren, entweder allein oder primär als Vorstufe. Durch diese Abfolge wird jedoch der Parameterbereich globaler Optima auf die Menge der zugehörigen Qualitätswerte der potentialtheoretischen Verfahren beschränkt. Vorteilhaft ist weiterhin, dass die räumliche Diskretisierung (sofern nötig) deutlich einfacher als bei der FV-Methode³⁴ einer RANSE-Rechnung ist. Alle genannten Quellen nutzen die Optimierung, um eine Verbesserung gegenüber einer bestehenden Propulsor-Konfigurationen zu erreichen. Die Verbesserung wird meist über eine validierende RANSE-Bewertung bzw. Experimente quantifiziert und damit nachgewiesen.

³¹ was auch in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen wird

³² MAES - Meta model Assisted Evolutionary Strategy

³³ zur Nomenklatur siehe Kapitel 3.3.9

³⁴ FVM - Finite Volumen Methode, siehe Kapitel 3.2.5

Daneben sind auch Forschungsarbeiten interessant, welche die Evolutionsstrategie zur Optimierung anderer als Propellerparameter anwenden (z. B. [10], [62] und [52]), sowie Optimierungsverfahren, die zwar nicht auf der Evolutionsstrategie basieren, jedoch über andere Methoden eine nichtlineare Optimierung von Propellergeometrien anstreben (z. B. [14]). In [73] stellt *Steden* ein ähnliches Projekt wie in dieser Arbeit vor, welches sich jedoch auf die Optimierung von Mehrkomponenten-Propulsoren fokussiert.

3 Grundlagen und Methoden

3.1 Propeller

3.1.1 Allgemeines

Der Propeller im allgemeinen ist eine fluiddynamische Strömungsmaschine, die Wellenleistung in Vortriebsleistung umwandelt. Je nach Einsatzmedium (Wasser oder Luft, Dichteunterschied etwa 10^3) unterscheiden sich die Ausführungen deutlich voneinander, jedoch liegt ein gemeinsames Prinzip zugrunde. Daher bezeichnet man die verschiedenen Vorrichtungen zur Schuberzeugung im Medium als Propulsoren bzw. Propulsionsorgane. Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht der Schiffspropeller, nicht jedoch die Anwendung von Propellern in Luft und in Strömungsmaschinen (Pumpen, Turbinen u.ä.).

Als Erfinder des Propellers gilt der Österreicher *Josef Ressel*, das entsprechende Patent wurde 1827 in Österreich erteilt (vgl. [11]). Vor ihm gab es nur Versuche, die im Grunde bis auf die Archimedische Schraube zurück gingen.

Im Prinzip ist der Propeller ein umlaufender Tragflügel³⁵, weshalb auch die Theorie hierzu eng mit der Theorie der Tragflügel für Flugzeuge verbunden ist. Um die Wirkung des Propellers auf das jeweilige Fahrzeug abzuschätzen bzw. grundsätzliche Auslegungs- oder Wirkungsgradgrenzen zu ermitteln, ist die **Strahltheorie** geeignet. Sie abstrahiert von der genauen Herkunft des Energieeintrags, indem lediglich ein Drucksprung in der Wirkfläche des Propulsors (Propellerebene) angenommen wird³⁶.

Im einfachsten Fall entsteht ein funktionstüchtiger Propeller schon durch Materialisation eines Ausschnittes bzw. mehrerer Ausschnitte aus einer Schraubenfläche, welche die Propellerflügel bilden. Die Propellertheorie untersucht nun, wie diese Propellerflügel gestaltet sein müssen, damit ihr Wirkungsgrad unter den gegebenen Betriebsbedingungen optimal wird. Die einfachste dahingehende Betrachtung geht von der **Traglinientheorie** schmaler Tragflügel aus, die den Flügel als eine wirbelbehaftete Linie abstrahiert. Einige Annahmen der Theorie

³⁵ Die Anzahl der Flügel auf der Propellerachse ist nicht festgelegt, es kamen sogar Einflügler zur Anwendung.

³⁶ Daher kann auch nicht die Bernoulli-Gleichung über diese Ebene hinweg angewendet werden, da dort keine Zu- bzw. Abführung von Energie längs der betrachteten Stromlinie erlaubt ist.

gelten jedoch nur für schwach oder mäßig belastete Propeller³⁷. Da wassergehende Propeller mit dem Kavitationseffekt umzugehen haben, der im Allgemeinen den zulässigen Unterdruck auf der Saugseite des Flügels auf akzeptable Maße begrenzt, kommen schmale Flügel eher in Luft zur Anwendung. Mit der **Tragflächen-theorie** erfahren die für wassergehende Propeller notwendigen breiteren Flügel eine genauere Betrachtung der Auftriebserzeugung auf der gesamten Flügelfläche, indem diese in Untereinheiten zerlegt wird.³⁸ Letztlich liefern die **Panel-Verfahren** die genauesten Potentialtheorie-basierten Vorhersagen der Strömung. Die wirklichkeitsnahe ingenieurtechnische Modellierung der Strömung ist über **RANSE**-Rechnungen möglich (siehe Kapitel 3.2.3). Erläuterungen zu den potentialtheoretischen bzw. Feldtheorien sollen insoweit erfolgen, da sie einen prinzipiellen theoretischen Einblick in die Wirkungsweise der Propeller erlauben. Vertiefende Erläuterungen geben die Standardwerke der Propellertheorie, z. B. [32] und [33]. Speziellere Aspekte der Propellertheorie vermitteln z. B. [50], [13] oder [42].

Die Zirkulation als physikalische Metagröße³⁹ erlaubt die elegante Modellierung und quantitative Erfassung der auftriebserzeugenden Strömungsvoränge. Dennoch liegt der Bewegung der Fluidteilchen letztendlich nur die Impulserhaltung gemäß der Newton'schen Axiome zugrunde: $dp = m \cdot dv = 0 \leftrightarrow p = const$ bzw. $dm \cdot \dot{v} = dF$. Die Umströmung der Tragflügelenden ist kausal nicht eine Folge der Zirkulationsänderung, sondern des Druckunterschiedes zwischen Ober- und Unterseite. Auf der Metaebene der Zirkulation lassen sich diese Erscheinungen allerdings in einem konsistenten übergeordneten Modell zusammenfassen. Die Entstehung des Auftriebs am Tragflügel (wofür immer noch unterschiedliche Erklärungsmodelle kursieren) ist physikalisch sofort über den entgegen der Auftriebsrichtung beschleunigten Massenstrom zu begründen⁴⁰. Dennoch ist die Erklärungsweise über die Zirkulation elegant und oft einfacher. Nichtsdestotrotz

³⁷ Es gilt hier die Vereinbarung bezüglich des Schubbelastungsgrades (s. u.): schwach belastet: < 1, mäßig belastet: zwischen 1 und 2, stark belastet: > 2

³⁸ Ein bekanntes Berechnungsverfahren dieser Theorie ist die Wirbelgittermethode.

³⁹ Die Zirkulation wird als geschlossenes Wegintegral gebildet, was lediglich die Summation der phys. Größe 'vektorielle Geschwindigkeit' bedeutet. Durch die mathematische Operation wird keine neue primäre Größe begründet, sondern nur eine neue Erklärungsebene möglich.

⁴⁰ Auf Grund der Anstellung des Profils erfährt das nach unten beschleunigte Medium auch eine Vorwärtsgeschwindigkeit, das auf der Oberseite zusätzlich nach hinten beschleunigte Medium (um den freien Platz zu füllen, Unterdruck!) eine Rückwärtsgeschwindigkeit. So kann auch über die fundamentale Impulsbetrachtung eine Wirbelentstehung lokal zum Profil erklärt werden. Sie ist nur sehr unhandlich.

müssen alle Erklärungswege äquivalent sein, es gibt nur eine physikalische Kausalität!

3.1.2 Geometrische Kenngrößen

Für die Auslegung bzw. Konstruktion eines Propellers sind einige geometrische Größen wie der Außendurchmesser D und die Flügelzahl N primär. Der Nabdurchmesser d bestimmt zusammen mit D den wirksamen Querschnitt. Der theoretisch erreichbare Wirkungsgrad (s. u.) wird auf Grund der idealisierenden Strahltheorie durch den äußeren Durchmesser bestimmt. Oft ist dieser jedoch einbaubedingt begrenzt und wird daher vorzugsweise so groß wie möglich gewählt.

Die schematische Darstellung eines festen (zweiflügeligen) Propellers in Abbildung 3 zeigt seine grundlegenden geometrischen Größen. Die Generatorlinie als Konstruktionshilfe für die Flügel fällt mit der Mitte der Profildicke auf den Zylinderschnitten zusammen.

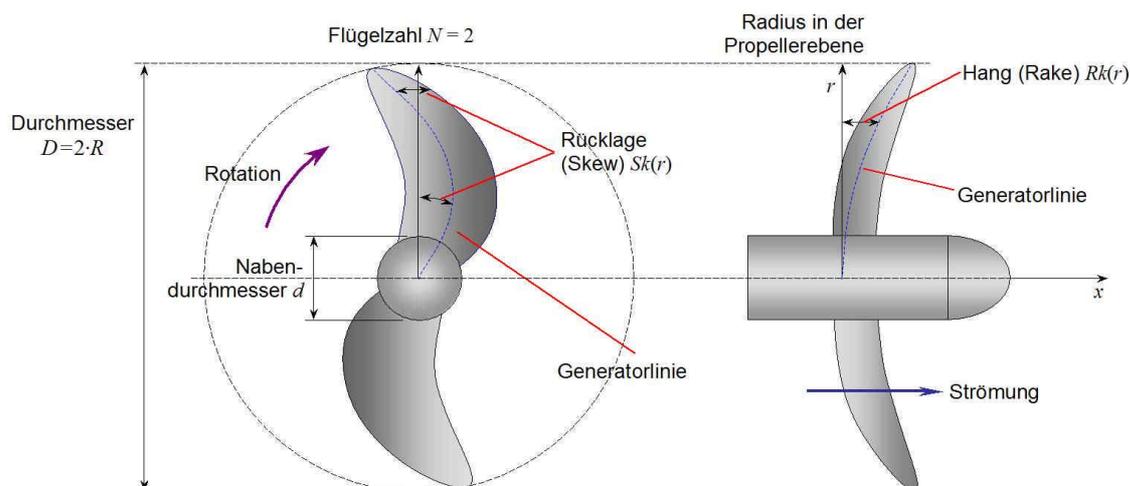


Abbildung 3: Äußere geometrische Kenngrößen des Festpropellers und Lage der Generatorlinie

Die tangentialen und axialen Abweichungen der Generatorlinie vom Radius werden üblicherweise als Winkelmaße für die Rücklage $\varphi_{skew}(r)$ sowie für den Hang $\varphi_{rake}(r)$ angegeben, können aber auch zum Umfangsmaß $Sk(r)$ bzw. Maß längs der Rotationsachse $Rk(r)$ über r integriert werden:

$$Sk(r) = \int_0^R \varphi_{skew}(r) dr \quad \text{bzw.} \quad Rk(r) = \int_0^R \tan \varphi_{rake}(r) dr.$$

Weitere geometrische Konstruktionsgrößen sind die Verläufe der Profilparameter Anstellwinkel $\alpha(r)$, Profilsehnenlänge bzw. chord length $l(r)$ ⁴¹ und Wölbungsrücklage $Wr(r)$, jeweils als Funktion über dem Radius r . Zur Bestimmung des Profils selbst wird noch der Dickenverlauf bzw. thickness $Pd(x,r)$ sowie die Wölbung bzw. camber $Wb(x,r)$ als zusätzliche Funktion über die Profilsehnenlänge parametrisiert. Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt diese geometrischen Verhältnisse, den Profildickenverlauf dabei separat (unten).

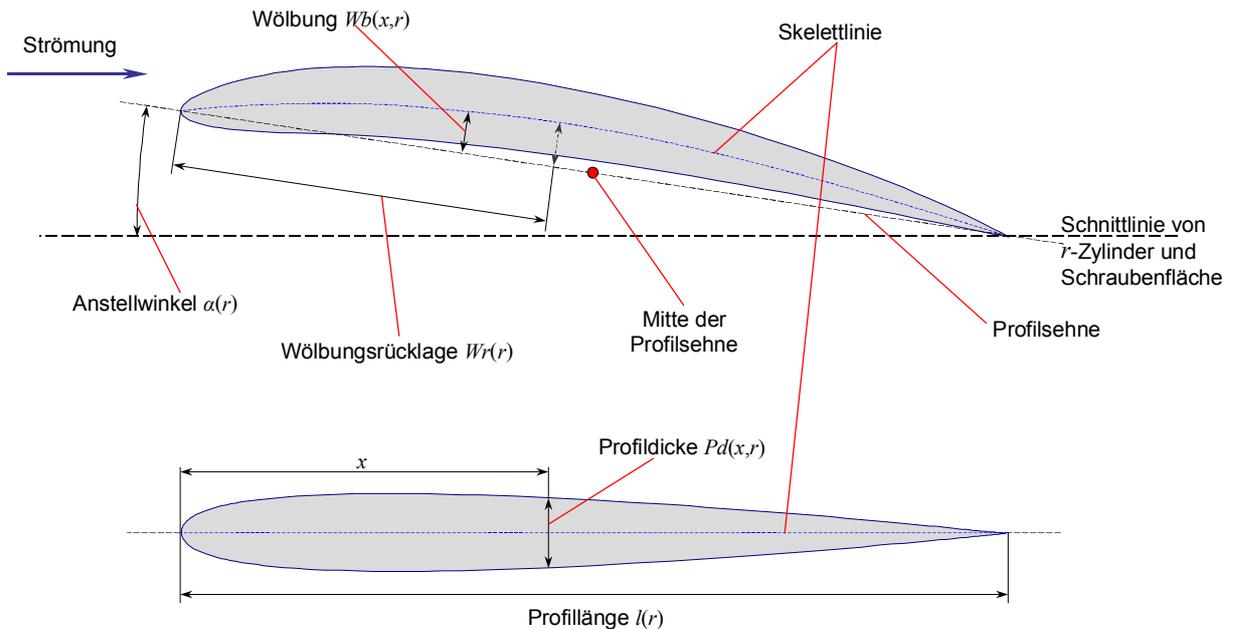


Abbildung 4: Geometrische Kenngrößen der Profilschnitte (Zylinderschnitte) längs der Generatorlinie

Betrachtet man die Radius- bzw. die Generatorlinie eines Propellerblattes als Erzeugende einer Fläche (durch translatorisches Fortschreiten), so beschreibt diese Linie eines sich drehenden und axial bewegten Propellers eine Schraubenfläche. Nimmt man die axiale Geschwindigkeit des Propellers gleich seiner Anströmgeschwindigkeit v_a , seine Drehfrequenz ω bzw. Drehzahl n sowie seinen Durchmesser D , ergeben sich weitere geometrische Kenngrößen:

- Ganghöhe der Schraubenfläche $S = \frac{v_a}{n} = 2\pi \frac{v_a}{\omega}$ bzw.

$$\text{Fortschrittsgrad } J = \frac{S}{D} = \frac{v_a}{n \cdot D},$$

⁴¹ bzw. gleich Sehnenlänge oder Länge der Skelettlinie

- hydrodynamischer Steigungswinkel am Radius r : $\tan \beta = \frac{v_a}{\omega \cdot r}$ ⁴²,
- Steigung $P = 2\pi r \cdot \tan \delta$ bzw. Steigungsverhältnis $\frac{P}{D}$, hierbei bezeichnet $\delta(r) = \alpha(r) + \beta(r)$ den absoluten Flügelwinkel zum Radius r ,
- Flächenverhältnis: $\frac{A_E}{A_0} = \frac{4}{\pi} \frac{A_E}{D^2}$ mit A_E als abgewinkelte Flügelfläche ⁴³.

Bei $\alpha(r) = \text{const}$ wäre auch $P = \frac{v_a}{n}$ bzw. P/D konstant. Jedoch variiert vor allem aus Gründen der Kavitationsvermeidung der Anstellwinkel α über dem Radius, so dass als Referenzwert die Angabe der Steigung bei $r = 0.7 \cdot R$ üblich geworden ist. Die Angabe des Steigungsverhältnisses P/D für einen Propeller basiert ebenfalls auf diesem Steigungswert.

Die Wahl der Blattzahl orientiert sich maßgeblich am Nachstrom des angetriebenen Schiffes, da der Propeller fast ausschließlich als Schubpropeller (hinten) angebracht ist. Durch die Interferenzen des Blattdurchgangs mit dem Nachstrom entstehen Schwingungen, die mit zunehmender Blattzahl an Frequenz zu- und an Bedeutung abnehmen ⁴⁴. Bei Fluganwendungen (mit häufig höheren Anforderungen an die Geräuschemission) wird der Propeller aus diesem Grund meist im ungestört angeströmten Frontbereich montiert. Da der Wirkungsgrad mit zunehmender Blattzahl sinkt, die Flächenbelastung bei luftgehenden Propellern aber unkritisch ist, findet man daher dort eher niedrigere Blattzahlen.

Die Wahl der Profile orientiert sich bei Schiffsanwendung vorrangig an den Kavitationseigenschaften, bei Fluganwendungen eher an der möglichst niedrigen Geräuschemission und Strömungsstabilität (Sicherheit!). Weitere Aspekte zur Profilauswahl bzw. -konstruktion vermittelt z. B. [1], Aspekte der rechnergestützten Konstruktion erörtert u. a. *Harries* und *Käther* in [27].

⁴² Das heißt, bei symmetrischem Profil, Anströmgeschwindigkeit v_a und Drehzahl n wird kein Schub erzeugt.

⁴³ manchmal auch A_p/A_0 mit A_p als projizierte Flügelfläche (A_0 - Fläche des Propellergrundkreises)

⁴⁴ Die Rücklage (skew) verfolgt u. a. den Zweck, durch Verlängerung der Durchgangszeit des Profils durch den Nachstrom die dadurch induzierten Schwingungen zu reduzieren.

3.1.3 Kennwerte und Freifahrtkurven

Wegen der schwierigen bzw. ungenauen theoretischen Modellierung des Propellers besitzen experimentelle Freifahrtversuche eine große Bedeutung. Hierbei werden die Propeller bei unterschiedlichen Fortschrittsgraden hinsichtlich ihres Leistungsverbrauchs und ihrer Schuberzeugung betrachtet. Für größere Propeller werden Modelle nach der **Froude'schen Ähnlichkeit** gefertigt und vermessen⁴⁵. Da Propeller im Allgemeinen vollständig getaucht sind, reduziert sich diese auf gleiche Verhältnisse von $\frac{v}{\sqrt{L}}$ mit der charakteristischen Anströmgeschwindigkeit v und der charakteristischen Länge L bzw. auch konkret normiert auf gleiches $n \cdot \sqrt{D}$.

In einem Freifahrt diagramm werden nun die erreichten Schübe und das dafür erforderliche Moment über dem dimensionslosen Fortschrittsgrad aufgetragen⁴⁶. Der Schub T wird hierbei als dimensionsloser Schubbeiwert k_T gezeichnet, das Moment Q als dimensionsloser Momentenbeiwert $10 \cdot k_Q$ (da k_Q etwa 10-fach kleiner als k_T ist):

$$\boxed{k_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad k_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}}. \quad (3.1)$$

Die Entdimensionierung des Schubes bzw. des Moments erfolgt dabei durch Bezug zum auf die Umfangsgeschwindigkeit bezogenen Staudruck, beim Moment noch um eine Längeneinheit erweitert; Konstanten werden weggelassen.

Der reale Wirkungsgrad ist offensichtlich definiert zu $\eta_0 = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{v_a \cdot T}{2\pi n \cdot Q}$. Über die in Kapitel 3.1.3 eingeführten dimensionslosen Beiwerte sowie mit dem in Kapitel 3.1.2 definierten Fortschrittsgrad lässt sich der reale Freifahrtwirkungsgrad schreiben zu:

$$\boxed{\eta_0 = \frac{v_a}{2\pi n \cdot D} \frac{k_T}{k_Q} = \frac{J}{2\pi} \frac{k_T}{k_Q}}. \quad (3.2)$$

Der Schubbelastungsgrad als dynamischer Kennwert der Einsatzbedingung wird im folgenden Kapitel 3.1.4.1 im Rahmen der Strahltheorie eingeführt. Der für die Gesamtkomposition aus Schiff und Propulsor oft verwendete Gütegrad der

⁴⁵ Eine Reynolds-Ähnlichkeit wird wegen der Dominanz der Trägheitskräfte am Propellerflügel nicht gefordert.

⁴⁶ Daher wird herbei oft auch nur die Anströmgeschwindigkeit bei konstanter Drehzahl variiert.

Propulsion als makroskopischer Wirkungsgrad $\eta_D = \frac{P_{Schlepp}}{P_{zu}}$ ist für die vorliegende Arbeit nicht von Bedeutung, da schon bereits die qualitative Bewertung des Propellers vom Nachstrom, also auch von der Verwendung an einem konkreten Schiff abstrahiert.

3.1.4 Theorie

3.1.4.1 Strahltheorie

Bei der Strahltheorie wird der Propeller bzw. allgemein der Propulsor als eine homogene Ebene idealisiert, wobei folgende weitere Voraussetzungen gelten sollen:

- das Medium ist quasi-inkompressibel ($\rho = const$) und reibungsfrei,
- Strömung ist als Potentialströmung betrachtbar,
- kein Energiefluss in den Drall bzw. in radiale Geschwindigkeitskomponenten,
- relativ geringe induzierte Geschwindigkeiten gegenüber der Anströmgeschwindigkeit ($\Delta v \ll v_a$)⁴⁷

Das Modell beinhaltet nur einen Drucksprung Δp in der Propellerebene, welcher zur Beschleunigung der axialen Strömung führt. Auf Grund der Kontinuität führt dies zur Strahleinschnürung hinter der Propellerebene (siehe Abbildung 5).

⁴⁷ bzw. Drucksprung klein gegenüber dem Staudruck, also $\Delta p \ll \frac{\rho}{2} v_a^2$ (d.h. kleiner Schubbelastungsgrad, s. u.)

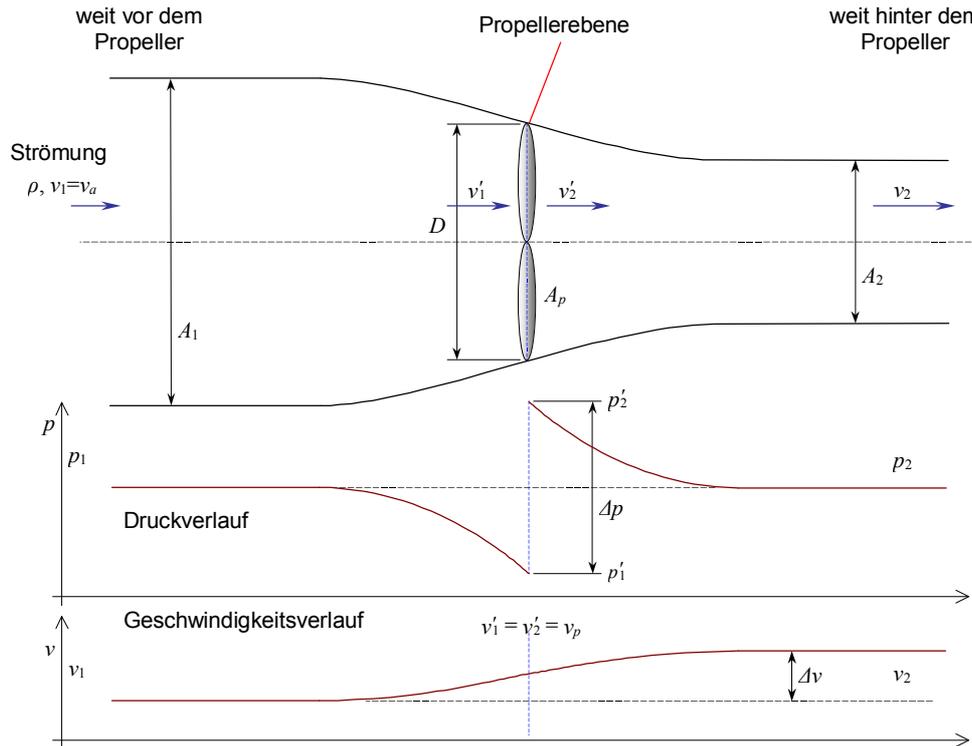


Abbildung 5: Zusammenhänge der Strahltheorie (für Propeller)

Der Schub ergibt sich sofort aus der Druckdifferenz in der Propellerebene zu

$$T = A_p \cdot \Delta p = A_p \cdot (p'_2 - p'_1). \quad (3.3)$$

Andererseits ist der Schub auch über den Impulssatz bestimmt:

$$T = \dot{m} \cdot \Delta v = \rho A_p v_p \cdot (v_2 - v_1). \quad (3.4)$$

In beiden durch die Propellerebene getrennten Gebieten gelten nun jeweils die Bernoulli-Gleichungen⁴⁸

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p'_1 + \frac{\rho}{2} v_p^2 \quad \text{und} \quad p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 = p'_2 + \frac{\rho}{2} v_p^2. \quad (3.5)$$

Subtrahiert man beide Gleichungen in 3.5 voneinander, so ergibt sich der Drucksprung zu $\Delta p = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2)$. Dies in Gleichung 3.3 eingesetzt und letztere mit Gleichung 3.4 gleichgesetzt führt zum Froude'schen Theorem:

$$\boxed{v_p = \frac{v_2 + v_1}{2}}. \quad (3.6)$$

⁴⁸ ohne Schwerfeld, da die Stromröhre eingebettet im gleichen umgebenden Medium verläuft

Das Theorem besagt, dass die Strahlkontraktion zu einer ausreichend weit hinter dem Propeller zu bestimmenden doppelt so großen Strömungsgeschwindigkeit gegenüber der Geschwindigkeit in der Propellerebene führt. In reibungsbehafteten Fluiden wird jedoch der Strahl durch die sich aufrollende Scherschicht am Umfang aufgeweitet, die Strahlenergie dissipiert.

Aus diesen Verhältnissen lassen sich leicht grundlegende Aussagen zum Wirkungsgrad ableiten. Die Nutzarbeit des Propellers ist durch den Schub bei gegebener Anströmgeschwindigkeit gegeben. Der Propeller selbst muss jedoch bei einer etwas höheren Anströmgeschwindigkeit arbeiten. Ein idealer Propeller besitzt daher folgende obere Grenze für den Freifahrt-Wirkungsgrad:

$$\eta_{p,ideal} = \frac{P_{ab}}{P_{zu,ideal}} = \frac{v_a \cdot T}{v_p \cdot T} = \frac{2 \cdot v_a}{(v_2 + v_1)} = \frac{2}{1 + \frac{v_2}{v_a}}. \quad (3.7)$$

Für eine schnelle Einschätzung der dynamischen Verhältnisse am Propeller dient der Schubbelastungsgrad c_T . Er drückt das Verhältnis der Schubkraft zur Staudruckkraft der Propellerfläche aus:

$$c_T = \frac{T}{\frac{\rho}{2} v_a^2 \cdot \frac{\pi}{4} D^2} = \frac{8}{\pi} \frac{T}{\rho v_a^2 D^2}. \quad (3.8)$$

Formuliert man den Schubbelastungsgrad noch mittels Impulssatz aus Gleichung 3.4 und Froudeschem Theorem, so folgt

$$c_T = \left(\frac{v_2}{v_a} \right)^2 - 1. \quad (3.9)$$

Der Wirkungsgrad aus Gleichung 3.7 lässt sich nun mit c_T schreiben und verdeutlicht so anschaulich die Forderung nach geringem Schubbelastungsgrad:

$$\eta_{p,ideal} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + c_T}}. \quad (3.10)$$

3.1.4.2 Traglinientheorie

Während die Strahltheorie gewissermaßen eine äußere Betrachtung der Auftriebswirkung aus der Propellerebene darstellt, behandelt die Traglinientheorie die

⁴⁹ Im Nenner kann auch die aufgebrauchte Wellenleistung $2\pi n Q$ stehen.

Entstehung des Auftriebs am Trag- bzw. Propellerflügel selbst. Sie bietet damit auch einen verständlichen Zugang zur vereinfachten optimalen Wirkungsweise eines Propellers. Auf Grund dieser Vereinfachungen gilt sie eingeschränkt nur für gerade und schlanke Profile.

Elementar für die Entwicklung der Theorie der Auftriebsströmungen und insbesondere für die Traglinientheorie ist die Zirkulation, die aus der Integration der intensiven Wirbelstärke (engl. vorticity) $\underline{w} = \text{rot } \underline{u} = \nabla \times \underline{u}$ wie folgt bestimmt wird:

$$\Gamma = \oint_{\partial A} \underline{u} \cdot d\underline{r} = \iint_A \text{rot } \underline{u} \cdot d\underline{A}. \quad ^{50} \quad (3.11)$$

Die **Helmholtz'schen Wirbelsätze** fassen die grundsätzlichen Eigenschaften der Zirkulation zusammen:

- Wirbelfäden sind immer in sich geschlossen oder enden an einer Begrenzung des Fluids, Zirkulation $\Gamma = \text{const}$ längs des Wirbelfadens!
- Zirkulation Γ bleibt auf jedem beliebig geschlossenen Weg, der den Wirbel einschließt, konstant (Wirbelröhre)
- Existenz von Wirbeln ist an Reibung gebunden!

Ausgangspunkt der Traglinientheorie ist nach dem Satz von **Kutta** und **Joukowski** die Querkraft F_a , die ein mit der Geschwindigkeit v angeströmter Wirbelfaden der Länge l und der Zirkulation Γ im Medium der Dichte ρ erfährt:

$$F_a = \rho \cdot \Gamma \cdot v \cdot l \quad (3.12)$$

Die Kraft folgt aus der Potentialtheorie durch Überlagerung einer Parallel- und einer Zirkulationsströmung und ist auch als Magnus-Effekt bekannt.

Ein Tragflügel wird nun zunächst durch einen Wirbelfaden ersetzt, den man wegen dieser Lokalisierung auch gebundenen Wirbel nennt. Diese Modellierung verlangt Streckungsverhältnisse⁵¹ von > 3 . Die Wirbelsätze bedingen nun, dass an den Tragflügelenden jeweils Wirbel der gleichen Stärke fortgesetzt werden. Da sich der gebundene Wirbel mit dem Tragflügel bewegt, gehen diese freien Wirbel am Ende der Flügelspitze ab, ein sogenannter Hufeisenwirbel entsteht⁵² (siehe Abbildung 6).

⁵⁰ mit Umformung über Stokes'schen Integralsatz

⁵¹ Verhältnis von Spannweite zu mittlerer Profiltiefe bzw. -sehnenlänge.

⁵² Die von den Wirbelsätzen geforderte Geschlossenheit der Wirbelfäden ist über den sog. Anfahrwirbel gegeben.

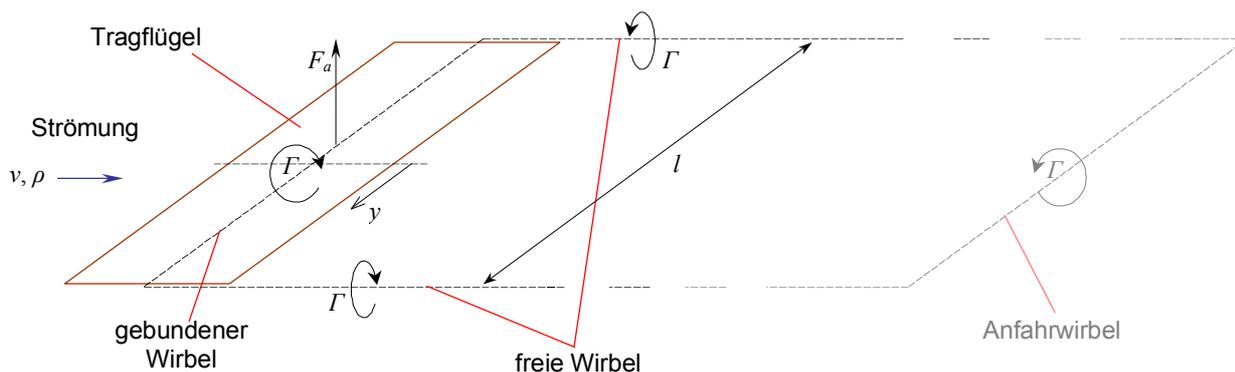


Abbildung 6: Zum Satz von Kutta-Joukowski

Auf den in [54] erwähnten **Satz von Munk** geht zurück, dass das Verhältnis Auftriebskraft zu Widerstandskraft dann maximal wird, wenn die von der Tragfläche erteilten Abwärtsgeschwindigkeiten des Mediums über die Spannweite konstant sind. Wie in [54] gezeigt, gelingt dies nur, wenn die Zirkulation Γ über die Spannweite ellipsenförmig verteilt ist, d. h. an den Flügelspitzen (konstruktiv) zu Null wird. Daraus folgt, dass die Abströmung in der Mitte des Tragflügels vorrangig vom tragenden Wirbel bestimmt ist, zu den Flügelenden hin jedoch zunehmend vom Spitzenwirbel induziert wird.

Die Modellierung der variablen Zirkulation über der Spannweite erfolgt im Rahmen der Traglinientheorie durch Überlagerung vieler Hufeisenwirbel unterschiedlicher Intensität. Auf Grund der genannten Wirbelsätze gehen nun mit jedem $d\Gamma$ in Spannweitenrichtung (Änderung der Zirkulation auf Grund der elliptischen Zirkulationsverteilung) freie Längswirbel der Stärke $d\Gamma = \frac{\partial}{\partial y} \Gamma(y) \cdot dy$

ab, am Tragflügelrand daher mit maximaler Intensität (Spitzenwirbel, siehe Abbildung 7).

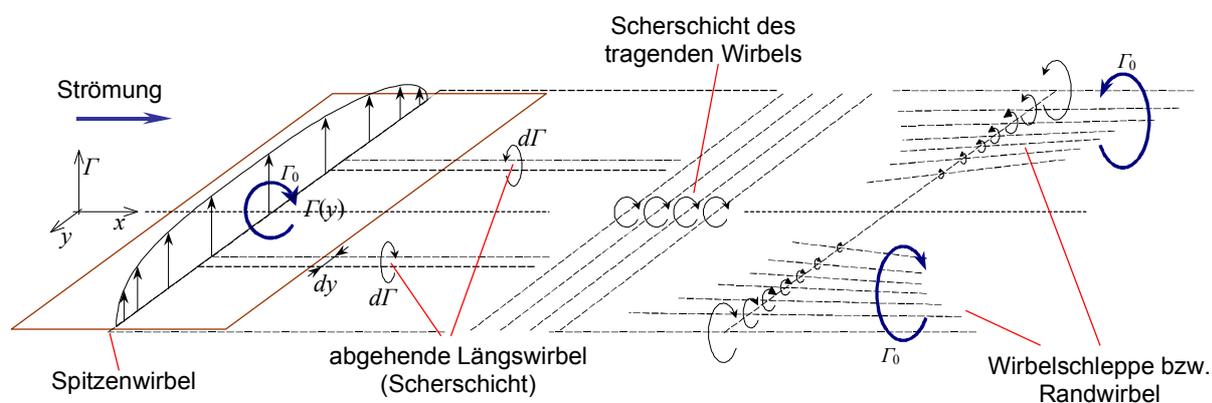


Abbildung 7: Variation der Zirkulation in Spannweitenrichtung

Diese Längswirbel bilden eine horizontale Scherschicht, welche auf der Unterdruckseite nach innen und auf der Druckseite nach außen gerichtet ist. Die Strömung, welche durch diese Wirbelschicht auf dem Tragflügel induziert wird, entspricht der Ausgleichsströmung an der Flügelspitze auf Grund des Druckunterschieds zwischen Ober- und Unterseite. Die abgehenden freien Längswirbel führen im weiteren Abstrom zum Einrollen der gesamten Scherschicht⁵³. Diese Scherschicht zusammen mit dem Spitzenwirbel bildet den gesamten Randwirbel, welcher stromab als sogenannte Wirbelschlepe⁵⁴ mitunter direkt zu beobachten ist. Darüber hinaus führt auch der quer verlaufende tragende bzw. gebundene Wirbel zu einer Scherschicht mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in Bewegungsrichtung⁵⁵.

Für die optimale ellipsenförmige Auftriebsverteilung ist die spannweitig variable Zirkulation über geeignete Profilschnitte bereitzustellen. Ob die unterschiedliche Zirkulation über die Variation der Profillänge, des Anstellwinkels oder über andere Profilparameter geschieht, ist zunächst zweitrangig. Mit den Ergebnissen der Profiltheorie⁵⁶ können passende Profile entworfen sowie auch katalogisierte Profile (z. B. der NACA-Reihe) ausgewählt werden. Der klassische Fall ist der sog. elliptische Flügel, wobei die Zirkulationsverteilung über die variable Sehnenlänge des Profils bei sonst gleichen Parametern erreicht wird.

Bei einem rotierenden Propellerflügel nimmt die Anströmgeschwindigkeit jedoch nach außen hin zu, die optimale Auftriebsverteilung wird komplizierter. Zudem werden neben den wesentlichen axialen auch tangentielle Geschwindigkeiten eingepreßt. Daher muss die einfache Forderung nach konstanter axialer Geschwindigkeit über die Propellerfläche für maximalen Wirkungsgrad (Strahltheorie)

⁵³ wegen $\frac{d\Gamma}{dy} \rightarrow \max$ am Rand sind diese auch stärker als im Zentrum

⁵⁴ Ein bewegter Tragflügel ist anschaulich auch vergleichbar mit dem Erzeugen eines Rauchrings, der ständig vergrößert und aufrecht erhalten wird. Wie der Rauchring ist auch der Wirbelfaden vom gebundenen tragenden Wirbel auf dem Tragflügel über die beiden Randwirbel und den Anfahrwirbel geschlossen. Beim Propeller gilt ähnliches: wie ein Rauchring, der ständig angefacht und dabei axial fortbewegt wird (Dabei sei der Propeller auf eine zur Strahltheorie adäquaten Wirkung reduziert).

⁵⁵ Die Abströmung ist auf der Oberseite schneller als auf der Unterseite, weil die Kutta-Abflussbedingung die Umströmung der Hinterkante "untersagt". (Letzteres lässt auch physikalisch aus der Trägheit der Strömung erklären.)

⁵⁶ linearisierte Theorie dünner Profile: diskrete Quellen- und Senkenverteilung auf der Profilschne, Panel-Methode in der Profiltheorie: diskrete Quellen- und Senkenverteilung auf der Oberfläche der Profile

präzisiert werden. Unter Berücksichtigung endlicher Flügelanzahl sollen nach *Betz* die idealen eingepprägten Geschwindigkeiten so beschaffen sein, wie sie bei der Verschiebung bzw. Drehung einer materialisierten Schraubenfläche entstehen würden (vgl. [54]). Die Beweisführung ist analog zum Tragflügel geringsten Widerstands, indem die durch eine gegebene $\Gamma(y)$ -Verteilung induzierten Geschwindigkeiten aufsummiert werden und anschließend nach dem Minimum der nicht für den Auf- bzw. Vortrieb nutzbaren Energie gesucht wird. Fundamental für die Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes ist hierbei das **Biot-Savart-Gesetz**, welches die induzierte Geschwindigkeitsänderung \underline{du} an einem Ort im Abstand \underline{r} zu einem Wirbelfadenstück \underline{dl} mit der Zirkulation Γ beschreibt:

$$\underline{du} = \frac{\Gamma}{4\pi} \cdot \frac{\underline{dl} \times \underline{r}}{|\underline{r}|^3} \quad (3.13)$$

bzw. in integraler Form zur Berechnung der gesamten induzierten Geschwindigkeit eines unendlich langen Wirbelfadens der Zirkulation Γ :

$$\underline{u} = \frac{\Gamma}{4\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\underline{dl} \times \underline{r}}{|\underline{r}|^3}. \quad (3.14)$$

Formuliert man diesen Zusammenhang für alle Ortsvektoren \underline{u} (gleichbedeutend mit der Beschreibung des Geschwindigkeitsfeldes) und beachtet zudem eine orts- bzw. radiusabhängige Zirkulation $\Gamma(y)$, die alle zirkulationsbehafteten Gebiete umfasst (einschließlich der Wirbelschlepp⁵⁷), so werden die Gleichungen sehr komplex und anspruchsvoll. *Isay* liefert in [32] sehr ausführlich Näheres zu dieser Theorie.

3.1.4.3 Tragflächentheorie

Ebenso wie die Traglinientheorie ist auch die Tragflächentheorie eine Feldtheorie, sie abstrahiert damit ebenso von der Viskosität der Strömung. Im Gegensatz zur ersteren, bei der die übereinander gelegten Wirbellinien einen tragenden Wirbel variabler Zirkulation ergeben, erlaubt letztere die Überlagerung beliebig lokalisierter Wirbelschichten. Hierzu wird die Planfläche des Trag- bzw. Propellerflügels in Spannweiten- bzw. radialer Richtung sowie in Längs- bzw. Umfangsrichtung in diskrete Wirbelflächen (Pannee) mit der jeweiligen Intensität

⁵⁷ Im Allgemeinen ist die Lage der Wirbelschlepp^e nur bei schwach belasteten Propellern ausreichend genau (vgl. dazu folgenden Abschnitt zur Wirbelgittermethode).

$\gamma(x,y)$ für die tragende Wirbeldichte sowie $\delta(x,y)$ für die Dichte der Längswirbel unterteilt (siehe Abbildung 8).

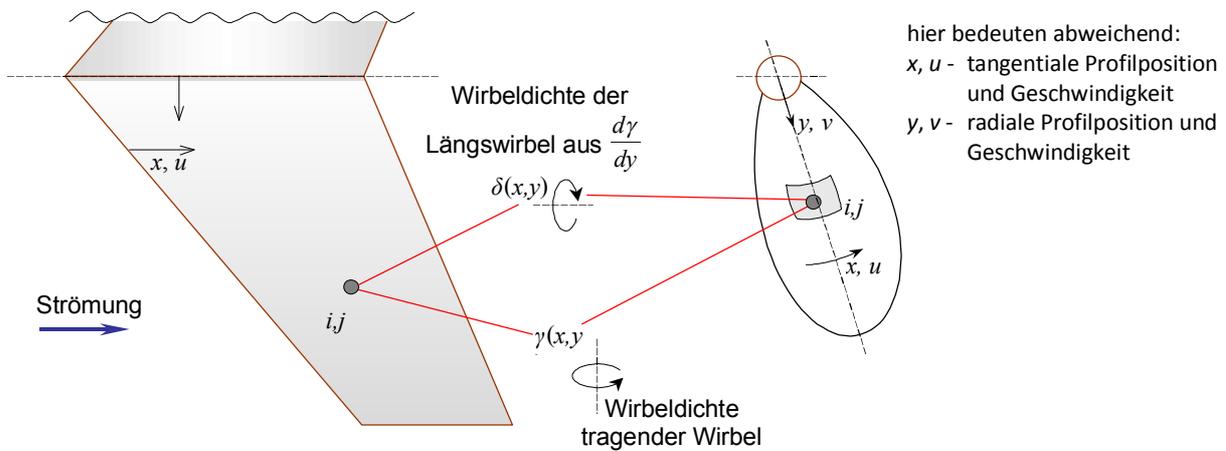


Abbildung 8: Verteilung der Wirbeldichteflächen

Um die Drehungsfreiheit für die induzierten Geschwindigkeiten außerhalb des Flügels zu gewährleisten, muss zudem $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x}$ gelten. Die Profildicke wird optional über eine zusätzliche Quellen- und Senkenverteilung modelliert. Die einzelnen Wirbelstärken γ_{ij} bzw. δ_{ij} auf den jeweiligen Flächen werden nun so bestimmt, dass die resultierenden Geschwindigkeiten analog zur linearisierten Profilttheorie ausschließlich tangential auf der Flügeloberfläche verlaufen. Für den Nachlauf des gering belasteten Flügels bzw. Propellers gilt dann analog zur Traglinientheorie, dass der Nachlauf an der Hinterkante des Flügels beginnend auf der gleichen Schraubenfläche liegt und die Intensität $\delta(y)$ der Hinterkante beibehalten wird. Das gesamte Geschwindigkeitsfeld ergibt sich wieder aus der Superposition aller Wirbelintensitäten auf der Schraubenfläche. Für die Anwendung auf den Schraubenpropeller gilt zusätzlich, dass für die Modellierung des gegenseitigen Einflusses benachbarter Propellerflügel die Profildicke über die o. g. Quellen- und Senkenverteilung nachgebildet werden muss und diese damit in die Superposition eingeht. Letztlich ist es auch möglich, die komplette Kontur des Flügels über eine oberflächenlokalisierte Verteilung der Wirbeldichten nachzubilden⁵⁸.

Für stark belastete (bzw. auch mäßig belastete) Propeller ist die Lage der Wirbelschleppe zunächst weitgehend unbekannt und muss mit iterativen Verfahren sukzessive ermittelt werden. Diese können darüber hinaus Stabilitätsprobleme bei

⁵⁸ analog zur Panel-Methode der Profilttheorie

der numerischen Behandlung verursachen. Insbesondere im ersten Fall entfernt sich die Form der Wirbelschlepe deutlich von der einer Schraubenfläche und macht die Anwendung der Theorie auf diese Propeller schwierig.

Eine anschauliche Einführung in die Tragflächentheorie gibt [41], eine vertiefende Betrachtung vollführt u. a. [33].

Wirbelgittermethode

Bei dieser Berechnungsmethode werden die beiden Wirbelschichten γ_{ij} bzw. δ_{ij} durch jeweils einen Hufeisenwirbel ersetzt, welcher an der $1/4$ -Position von der Paneel-Vorderkante positioniert wird. Ein zusätzlicher Kontrollpunkt wird an die symmetrische Position an der Hinterkante gelegt, wie die folgende Abbildung 9 darstellt:

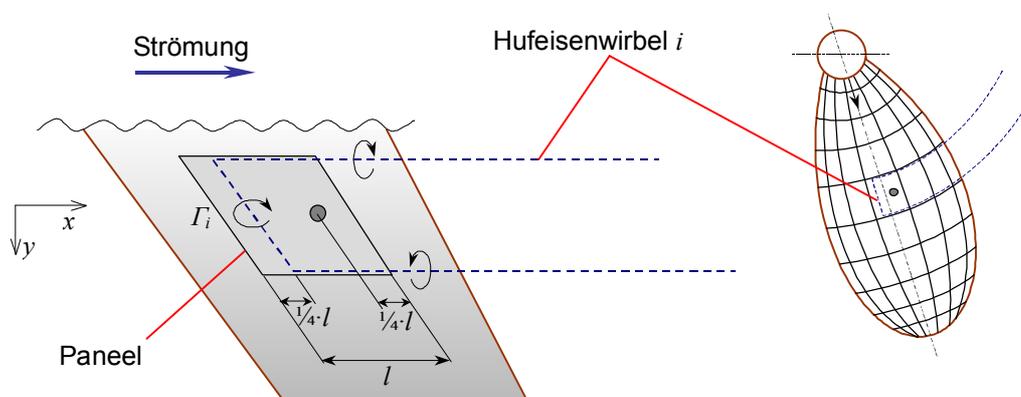


Abbildung 9: Position der Hufeisenwirbel bei der Wirbelgittermethode

Wie bereits erwähnt, kann die Profildicke durch eine zusätzliche Quellen- und Senkenverteilung modelliert werden. Analog zur Tragflächentheorie erfolgt die Berechnung der Γ_i -Wirbelstärken über die Tangential- bzw. Undurchdringlichkeitsbedingung für die Strömung. Das räumliche Strömungsfeld kann danach über das Biot-Savart-Gesetz nach Gleichung 3.14 ermittelt sowie letztlich die gesuchten Größen des Auftriebs- und Widerstandsbeiwerts berechnet werden. Eine Einführung in dieses Verfahren bietet hierzu z. B. [4]. Eine Einführung in die präziseren Feldtheorien bietet u. a. [36] und [9].

3.1.5 Möglichkeit der Verlustreduktion

Wie einleitend bemerkt und nun aus der Traglinientheorie auch ersichtlich wurde, ist die Erzeugung der Randwirbel und mithin der induzierte Widerstand unvermeidlich bei der Auftriebserzeugung am Tragflügel. Aber schon von dieser

Theorie ausgehend kann man zeigen (vgl. [54]), unter welchen Umständen dieser induzierte Widerstand minimiert wird: durch eine elliptische Auftriebsverteilung. Dennoch führt auch der dabei entstehende Spitzenwirbel zu einem Energieverlust, der sich aus den induzierten Geschwindigkeit der Fluidteilchen ergibt. Das mit der Fortbewegung des Tragflügels fortschreitende Durchsetzen des Mediums ergibt die Verlustleistung als Energierate.

Vom bionischen Denkansatz ausgehend finden sich Beispiele in der Natur, wie dieser unvermeidliche Energieverlust minimiert werden kann. Nahezu jedem an der Fliegerei interessierten sind die aus zahlreichen einzelnen Federn zusammengesetzten Handschwingen (siehe Abbildung 10) großer Vögel bekannt.

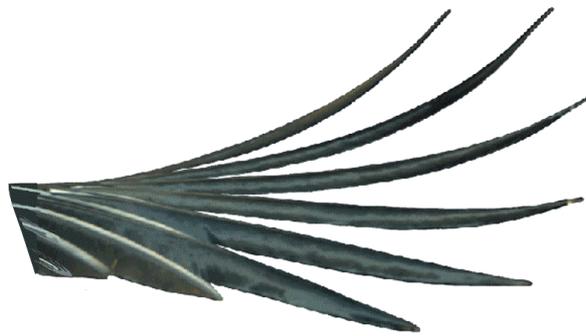


Abbildung 10: Aufgespreizte Handschwingen als Multi-Winglet (Foto: Rechenberg)

Diese nun führen zur Aufspaltung des Spitzenwirbels in mehrere kleinere Wirbel. Auch der Bionikpropeller mit seinem aufgeweiteten Flügelspitzenbereich bedient sich der Aufteilung der Spitzenwirbelzirkulation zur Verlustminimierung. (siehe Kapitel 1)⁵⁹

Für eine einfache Energieabschätzung soll im Folgenden ein mit dem Flügel bewegtes Volumen betrachtet werden, in welchem der Spitzenwirbel als vereinfachter Wirbelfaden die kinetische Energie als Rotation der Fluidteilchen um den Wirbelfaden induziert. Der Aufbau ist in Abbildung 11 veranschaulicht. Die durch die translatorische Bewegung des Flügels eingeprägte Relativgeschwindigkeit soll für diese Betrachtung unbeachtet bleiben, sie möge nur für das Durchsetzen des Volumens als Schlauch mit der Länge $l = |l_1 - l_0|$ mit den induzierten Geschwindigkeiten des Wirbelfadens sorgen. Die ursächliche Zirkulation des Wirbelfadens entstammt dem Spitzenbereich des Tragflügels und ergibt sich aus der randnahen Änderung der spannweiten Zirkulationsverteilung

⁵⁹ Wie nahezu überall in der Bionik gilt auch hier, dass der Ingenieur selbstverständlich auch selbst auf die Idee kommen kann, diesen Effekt auszunutzen. Er kann sich aber inspirieren lassen!

$\Gamma(y)$ mit $d\Gamma = \frac{\partial}{\partial y} \Gamma(y) \cdot dy$. Für einen äußeren Bereich der Spannweite b kann

beispielsweise ein Δb festgesetzt werden: $\Gamma_R = \int_{b-\Delta b}^b \frac{\partial}{\partial y} \Gamma(y) \cdot dy$.

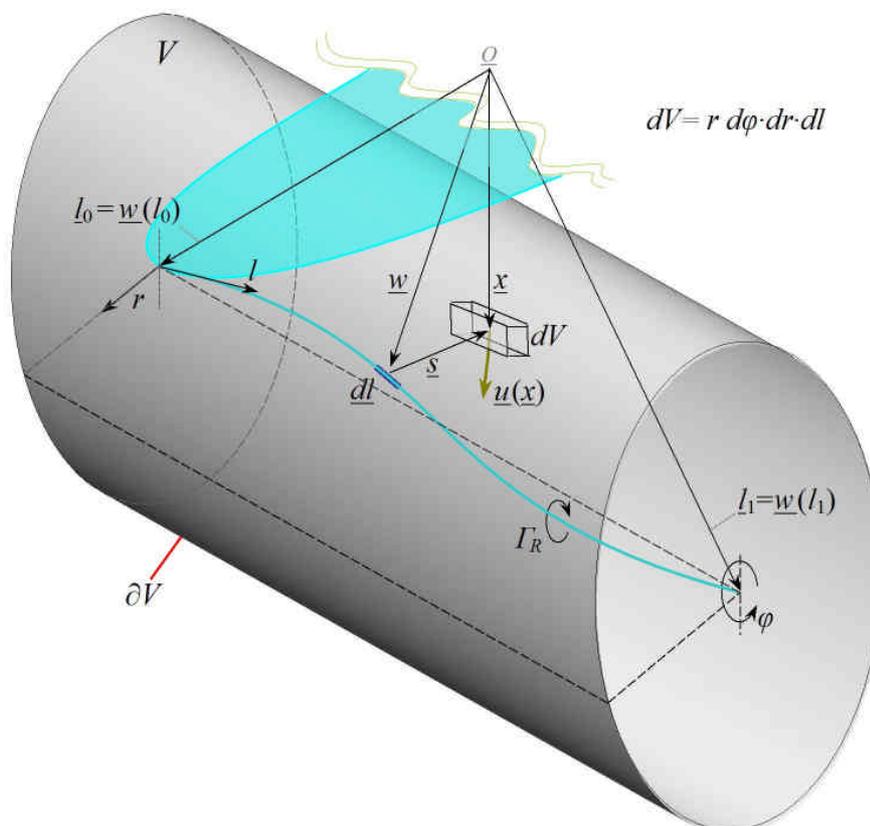


Abbildung 11: Zur Abschätzung der induzierten Wirbelenergie in einem festen Volumen

Für die durch den Wirbelfaden mit der Randzirkulation Γ_R im Gebiet V induzierte Geschwindigkeit $\underline{u}(\underline{x})$ gilt analog zum magnetischen Feld und der Feldstärke das Gesetz von Biot-Savart nach Gleichung 3.14 (integrale Form), wobei hier $\underline{s} = \underline{x} - \underline{w}$ festliegt⁶⁰. Die kinetische Energie der im Volumen V induzierten Geschwindigkeiten folgt sofort mit:

$$E_V = \int_V \frac{1}{2} u^2 dm = \frac{\rho}{2} \int_V u^2 dV = \frac{\rho}{2} \int_V |\underline{u}|^2 dV.$$

⁶⁰ Auch diese Zirkulation entsteht letztlich durch die summierten Änderungen $\int d\Gamma$ in einem spitzennahen Bereich.

Für eine übersichtlichere Schreibung können - unter Annahme eines inkompressiblen Mediums - die geometrischen Abhängigkeiten und Konstanten zu einem (in dieser Betrachtung) konstanten Faktor

$$G := \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\rho}{2}} \cdot \int_{l_0}^{l_1} \frac{1}{s^2} dl \times \frac{s}{|s|}$$

zusammengefasst werden, womit für die induzierte kinetische Energie vereinfacht folgt:

$$E_V = \Gamma_R^2 \int_V G^2 dV .$$

Wird die Randzirkulation nun beispielsweise auf zunächst 2 getrennte und gleich große Spitzenwirbel mit $\Gamma_R = 2 \cdot \Gamma'_R$ aufgeteilt (z. B. durch eine hinreichende Flügelaufspaltung), so folgt für die Gesamtenergie nun

$$E'_V = 2\Gamma_R'^2 \int_V G'^2 dV = \frac{1}{2} \Gamma_R^2 \int_V G^2 dV \quad \text{bzw.}^{61}$$

$$\boxed{E'_V = \frac{1}{2} E_V} . \tag{3.15}$$

Das heißt, die kinetische Verlustenergie durch die Induktion des Spitzenwirbels hat sich halbiert. Das wird auch schon durch die quadratische Abhängigkeit der Energie von der (wiederum linear von der Zirkulation abhängigen) Geschwindigkeit plausibel, gilt jedoch nur für die Annahme völlig getrennter Spitzenwirbel.

Eine anschauliche Plausibilität der Verlustreduktion durch Spitzenwirbelverschmieren gewinnt man auch durch die asymptotische Betrachtung unendlich vieler übereinanderliegender Spitzenwirbel: Sie nähern die verlustoptimale Scherschicht zwischen ruhendem äußeren und beschleunigtem Medium an, welche weniger "verlorene" kinetische Energie enthält. Bei endlicher Ausdehnung einer solchen Vorrichtung blieben nur noch zwei Teilwirbel übrig (oben und unten), die mit größer werdendem Abstand voneinander immer weniger kinetische Energie binden. Je weiter diese beiden Teilwirbel voneinander entfernt sind, desto mehr Medium wird jedoch vom tragenden Wirbel erfasst, so dass auch der Auftrieb ansteigt. Den gleichen Effekt hat auch eine Endplatte an jedem Flügelende. Im Anhang (siehe Kapitel 12.5) soll ergänzend ein anschaulicher Zugang zu dieser Problematik geboten werden.

⁶¹ Es möge $G = G'$ gelten, also gleiche geometrische Verhältnisse, nur an einem anderen Ort.



Abbildung 12: Aufgefächerte Flügelspitze als Multi-Winglet im Windkanal (Falschfarben) und an einem Segelflugzeug (Fotos Rechenberg)

Bei einer endlichen Wirbelaufteilung treten durch die gegenseitige Induktion zusätzlich Effekte auf, die zu einer weiteren (geringen) Widerstandsverminderung führen. Zwischen beiden o. g. Wirbeln werden jeweils entgegengesetzte Geschwindigkeitskomponenten induziert. Dies führt zum Umeinanderdrehen und letztlich zum Verschmelzen der beiden Wirbel. Die damit einhergehende Winkeländerung der Wirbellinien führt zu einer längsgerichteten Geschwindigkeitsinduktion (vergleichbar mit dem Magnetfeld in einer Spule), welche wiederum zu einer Druckerhöhung im Wirbelnachlauf führt und damit widerstandsvermindernd wirkt.

Prinzipiell wären auch an jedem Flügelende eines Propellers Winglets ähnlich denen in Abbildung 12 (rechts) denkbar, um die Verluste durch den Spitzenwirbel zu senken. Der Bionikpropeller mit seiner spezifischen Topologie hingegen spaltet die Flügelenden nun 2-fach auf und verbindet diese jeweils miteinander (siehe Abbildung 13).

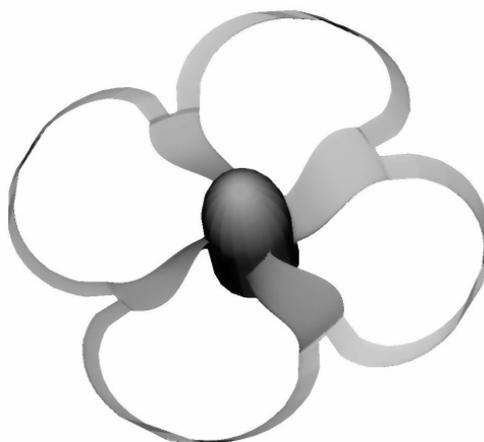


Abbildung 13: Prinzipielle Flügelkonstruktion beim Bionikpropeller durch Aufspalten und Verbinden

Durch eine geeignete Auslegung wird der Druckausgleich an der Flügelspitze behindert. Der Spitzenwirbel wird in seiner Entstehung entlang der Bogenkanten verschmiert.

Eine Parallele aus der Natur ist beim V-Formationsflug von Vögeln zu erkennen. Durch das jeweilige Hintereinanderlegen der Randwirbel benachbart fliegender Vögel wird die gegenseitige Wirbeldrehrichtung zur Verminderung des Randwirbels genutzt, die Effizienz der Vogelflügel steigt.⁶²

3.2 Qualitätsbewertung mit RANSE-Lösern

3.2.1 Allgemeines

Wie in der Einleitung erwähnt, benötigt die iterative Optimierung eine möglichst robuste Qualitätsbewertung, um dem jeweiligen Realisierungsvorschlag - der gewünschten Genauigkeit entsprechend - eine Qualität zuzuordnen. Die komplexe Strömungssituation um einen Bionikpropeller wird zweifellos am genauesten über RANSE-Methoden erfasst (siehe Kapitel 2.1 bzw. Fußnote²¹). Die Anwendung potentialtheoretischer Verfahren ist möglich, aber wegen der komplexen Topologie sehr aufwändig und vermutlich zu ungenau. Zudem haben die lukrativen Anwendungsbereiche genauer Strömungssimulationen und die immer leistungsfähigeren Computer zu einer schnellen Entwicklung auch immer besserer Implementierungen der RANSE-Löser geführt, wodurch sich diese wiederum zunehmend leichter anwenden lassen.

Die geometrische Diskretisierung der zu modellierenden Strömungssituation kann beliebig genau vorgenommen werden, führt aber zu einer beliebig großen Anzahl von zu lösenden Gleichungen und damit zu beliebig hohem Aufwand. Verständlicherweise ist man immer bestrebt, die Diskretisierung nur so fein wie nötig aufzulösen, um eine gewünschte Genauigkeit der Simulation zu erreichen, aber auch so grob wie möglich, um Rechenzeit und Ressourcen zu sparen. Eine schlecht an die Geometrie angepasste Diskretisierung gefährdet die Konvergenz der gesamten Rechnung (zu Konvergenz siehe Kapitel 3.2.5). Ein konvergentes Rechenmodell erlaubt dagegen, die Genauigkeit des Ergebnisses in weiten Bereichen über die Feinheit der Diskretisierung zu bestimmen.

⁶² Durch die Abstände der Vögel in Flugrichtung fliegen nachfolgende Vögel bereits im Randwirbel, welcher im Abstrom aus der aufgerollten Scherschicht und dem Spitzenwirbel entsteht.

Eine Einführung in die Problematik sowie in etablierte Methoden und Verfahren der RANSE-Berechnung findet der Leser z.B. in [16] und [40], eine Vertiefung der Methoden z. B. in [61] und [6].

3.2.2 Euler- und Navier Stokes-Gleichung

Potentialtheoretische Methoden verwenden makroskopische Modelle, um die Bewegung des Fluids zu erfassen. Insbesondere kommt den Wirbeln als besondere Fluidbewegung und der sich mit ihnen ergebenden eleganten Möglichkeit zur Modellierung von Auftriebsströmungen eine große Bedeutung zu. Dennoch sind es nur die Kräfte an einem infinitesimalen Fluidteilchen, die letztlich zu seiner Bewegung (Strömung) führen. Dazu reichen schon die fundamentalen Erhaltungssätze für Masse und Impuls an diesem Teilchen:

- Axiom: Massenerhaltung: $dm = 0$ (Masse ist konstant)
- Axiom: Impulserhaltung: $\frac{dp}{dt} = \underline{F}$ (Impulsänderung nur über Kräfte)

In der Lagrange'schen Betrachtungsweise⁶³ wird untersucht, wie sich eine allgemeine Größe Ψ über ein zeitlich veränderliches Kontrollvolumen V entwickelt. Zunächst sei $\Psi = \int_V \xi dV$ mit der Ψ -Dichte ξ definiert. Gesucht ist

demnach $\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V \xi dV$. Über die Differentiation der variablen Integrationsgrenzen gelangt man schließlich zum **Reynolds'schen Transporttheorem**

$$\boxed{\frac{d\Psi}{dt} = \int_V \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} + \underline{\nabla} \cdot (\xi \underline{c}) \right) dV}. \quad (3.16)$$

Andererseits zeigt in der Euler'schen Betrachtungsweise⁶⁴ die Bilanz einer extensiven Größe Ψ über ein Kontrollvolumen, dass die dortige Änderung von Ψ nur über die lokale Änderung P_ψ (Produktion/Dissipation) oder über Flüsse T_ψ (Konvektion/Diffusion) durch den Rand des Volumens auftreten können:

$$\frac{d\Psi}{dt} = T_\psi + P_\psi.$$

⁶³ Der Beobachter bewegt sich mit dem Kontrollvolumen mit.

⁶⁴ Der Beobachter ist stationär.

Das heißt, die zeitliche Änderung der Größe Ψ im Volumen V ist gleich der über den Rand ∂V von V integrierten nicht-konvektiven Flussdichte \underline{t}_Ψ von Ψ und der über das Volumen V integrierten Produktions- bzw. Dissipationsdichte p_Ψ :

$$\frac{d}{dt} \underbrace{\int_V \xi dV}_\Psi = \underbrace{\oint_{\partial V} \underline{t}_\Psi \cdot d\underline{A}}_{T_\Psi} + \underbrace{\int_V p_\Psi dV}_{P_\Psi}.$$

Dies angewendet auf den Impuls \underline{p} liefert die folgenden Teile:

- $\Psi := \underline{p} \rightarrow \xi := \rho \underline{c}$ (Gesamtimpuls)
- $\underline{t}_p := \underline{\Pi} \cdot d\underline{A}$ (Oberflächenkraft)
- $p_p := \rho \underline{f}$ (Volumenkraft)

Die Impulserhaltung für ein flüssiges Volumen V folgt daher zunächst zu:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \underline{c} dV = \oint_{\partial V} \underline{\Pi} \cdot d\underline{A} + \int_V \rho \underline{f} dV \quad (3.17)$$

Die Zeitableitung auf der linken Seite kann nun mittels des Reynolds'schen Transporttheorems aus Gleichung 3.16 und der Kontinuitätsgleichung $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \underline{\nabla} \cdot (\rho \underline{c}) = 0$ bzw. $-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_j)$ umgeformt werden, so dass auch der

konvektive Fluss einbezogen wird:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \underline{c} dV = \int_V \left(\frac{\partial}{\partial t} (\rho \underline{c}) + \underline{\nabla} \cdot ((\rho \underline{c}) \underline{c}) \right) dV = \int_V \rho \left(\frac{\partial \underline{c}}{\partial t} + (\underline{c} \cdot \underline{\nabla}) \underline{c} \right) dV$$

bzw. in Koordinatendarstellung

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho c_i dV = \int_V \rho \left(\frac{\partial c_i}{\partial t} + c_j \frac{\partial c_i}{\partial x_j} \right) dV.$$

Das zweite Integral über den Volumenrand in Gleichung 3.17 kann mittels des Gauß'schen Integralsatzes als Volumenintegral $\oint_{\partial V} \underline{\Pi} \cdot d\underline{A} = \int_V \underline{\nabla} \cdot \underline{\Pi} dV$ umgeformt werden, so dass letztlich gleiche Integrationsgebiete auf beiden Seiten stehen.

$$\int_V \rho \left(\frac{\partial \underline{c}}{\partial t} + (\underline{c} \cdot \underline{\nabla}) \underline{c} \right) dV = \int_V \underline{\nabla} \cdot \underline{\Pi} dV + \int_V \rho \underline{f} dV \quad (3.18)$$

Bei Gültigkeit für beliebige Gebiete V folgt damit für ein kompressibles infinitesimales "Teilchen" des flüssigen Volumens:

$$\frac{\partial \underline{c}}{\partial t} = -(\underline{c} \cdot \nabla) \underline{c} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \underline{\underline{\Pi}} + \underline{f} \quad (3.19)$$

bzw. in Koordinatendarstellung $\frac{\partial c_i}{\partial t} = -c_j \frac{\partial c_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \Pi_{ji} + f_i$.

Den hierin auftretenden Spannungstensor $\underline{\underline{\Pi}}$ kann man nun in einen isotropen Druck- und einen Verzerrungsanteil $\underline{\underline{\Pi}} = -p \underline{\underline{\delta}} + \underline{\underline{T}}$ zerlegen ($\underline{\underline{\delta}}$ bezeichnet den Einheitstensor und $\underline{\underline{T}}$ den Verzerrungstensor). Geht man zunächst von einem elastischen und inkompressiblen isotropen Fluid aus, so vereinfacht sich der Spannungstensor zu dem diagonalen Drucktensor $\underline{\underline{\Pi}} = -p \underline{\underline{\delta}}$ bzw. $\Pi_{ij} = -p \delta_{ij}$, und die Divergenz des Geschwindigkeitsfeldes verschwindet. Damit folgt aus der allgemeinen Bewegungsgleichung 3.19 die bekannte Euler-Gleichung

$$\boxed{\frac{\partial \underline{c}}{\partial t} = -(\underline{c} \cdot \nabla) \underline{c} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \underline{f}} \quad (3.20)$$

bzw. in Koordinatendarstellung $\frac{\partial c_i}{\partial t} = -c_j \frac{\partial c_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i$.

Für nicht-elastische isotrope Newton'sche Fluide dagegen kann vereinfachend angenommen werden, dass die Verzerrungen nur linear vom Geschwindigkeitsgradienten abhängen, damit ist der Verzerrungstensor $\underline{\underline{T}}$ ebenfalls isotrop und symmetrisch. Für $\underline{\underline{T}}$ können nun einige Aussagen getroffen werden:

- $\underline{\underline{T}}$ hängt nur von der Relativgeschwindigkeit zwischen Fluidteilchen ab und muss daher eine Funktion $f(\nabla \underline{c})$ sein. Annahme: die Abhängigkeit ist linear,
- $\underline{\underline{T}}$ soll invariant gegenüber (starrer) Rotation und Translation sein und
- $\underline{\underline{T}}$ soll symmetrisch sein.

Der linearisierte Ansatz $\underline{\underline{T}} = \eta' (\nabla \cdot \underline{c}) \underline{\underline{\delta}} + 2\mu \underline{\underline{d}}$ ⁶⁵, der $\underline{\underline{T}}$ in einen Spuranteil für die Volumenänderungsspannung und einen spurfreien Deviator $\underline{\underline{d}}$ für Verzerrungen bzw. Scherungen zerlegt, wobei $\underline{\underline{d}} = \frac{1}{2}(\nabla \underline{c} + \underline{c} \nabla)$ und $\eta' = -\frac{2}{3} \mu$ gelten soll, führt damit zu folgendem Ansatz für den Spannungstensor

⁶⁵ mit dem ersten und zweiten Zähigkeitskoeffizienten μ und η'

$$\underline{\underline{\Pi}} = -p\underline{\underline{\delta}} - \underbrace{\frac{2}{3}\mu(\underline{\nabla} \cdot \underline{c})\underline{\underline{\delta}} + \mu(\underline{\nabla}\underline{c} + \underline{c}\underline{\nabla})}_{\text{Deviator}}, \quad (3.21)$$

Verzerrungstensor

damit wird seine Divergenz $\underline{\nabla} \cdot \underline{\underline{\Pi}} = -\underline{\nabla}p + \frac{1}{3}\mu\underline{\nabla}(\underline{\nabla} \cdot \underline{c}) + \mu\Delta\underline{c}$, bzw. in Koordinatendarstellung

$$\frac{\partial \Pi_{ji}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{3}\frac{\partial^2 c_j}{\partial x_i \partial x_j} + \mu\frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j^2}.$$

Diesen Ausdruck in Gleichung 3.19 eingesetzt liefert die vollständigen (viskosen) **Navier-Stokes**-Gleichungen für ein kompressibles und isotropes Fluid:

$$\boxed{\frac{\partial \underline{c}}{\partial t} = -(\underline{c} \cdot \underline{\nabla})\underline{c} - \frac{1}{\rho}\underline{\nabla}p + \nu\left(\Delta\underline{c} + \frac{1}{3}\underline{\nabla}(\underline{\nabla} \cdot \underline{c})\right) + \underline{f}} \quad (3.22)$$

bzw. in Koordinatendarstellung

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -c_j \frac{\partial c_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 c_j}{\partial x_i \partial x_j} \right) + f_i. \quad (3.23)$$

Da in dieser Arbeit vorrangig spezielle Strömungen im flüssigen Medium interessieren, kann das Fluid als inkompressibel angesehen werden. Die Kontinuitätsgleichung $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\underline{\nabla} \cdot (\rho\underline{c})$ reduziert sich damit zu $\underline{\nabla} \cdot \underline{c} = 0$. Der

Spannungstensor vereinfacht sich dadurch ebenfalls und lautet nun $\underline{\underline{\Pi}} = -p\underline{\underline{\delta}} + \mu(\underline{\nabla}\underline{c} + \underline{c}\underline{\nabla})$, dessen Divergenz nimmt zudem die einfachere Form

$\underline{\nabla} \cdot \underline{\underline{\Pi}} = -\underline{\nabla}p + \mu\Delta\underline{c}$ (bzw. $\frac{\partial \Pi_{ij}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu\frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j^2}$) an. Dies in Gleichung 3.19

eingesetzt und unter Beachtung von $\underline{\nabla} \cdot \underline{c} = 0$ liefert⁶⁶ die Navier-Stokes-Gleichungen für ein inkompressibles und isotropes Fluid:

$$\boxed{\frac{\partial \underline{c}}{\partial t} = -(\underline{c} \cdot \underline{\nabla})\underline{c} - \frac{1}{\rho}\underline{\nabla}p + \nu\Delta\underline{c} + \underline{f}} \quad (3.24)$$

⁶⁶ Dabei gilt $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ (ν ist kinematische, μ die dynamische Viskosität).

bzw. in Koordinatendarstellung $\frac{\partial c_i}{\partial t} = -c_j \frac{\partial c_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j^2} + f_i$.

3.2.3 Reynolds-Gleichung (RANSE)

3.2.3.1 Reynolds-Dekomposition

Gleichung 3.24 ist im übrigen völlig ausreichend, um die komplexen Phänomene der Turbulenz zu modellieren. Um die turbulenten Schwankungen des Drucks und der Geschwindigkeit konkret zu erfassen, hat *O. Reynolds* den als Reynolds-Dekomposition bekannten Ansatz eingeführt, mit welchem der Druck p und die Geschwindigkeit \underline{c} jeweils in einen Mittel- und einen Schwankungswert aufgespalten werden:

$$p = \bar{p} + p', \quad c_i = \bar{c}_i + c'_i. \quad (3.25)$$

Um mit solchen Größen zu operieren, müssen einige Regeln für das Rechnen mit Mittelwerten beachtet werden:

$$\begin{aligned} \overline{\bar{A}} &= \bar{A}, \quad \overline{A'} = 0, \quad \overline{A+B} = \bar{A} + \bar{B}, \quad \overline{AB'} = 0, \quad \overline{AB} = \bar{A}\bar{B} + \overline{A'B'}, \\ \overline{\overline{AB}} &= \bar{A}\bar{B}, \quad \overline{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)} = \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Die inkompressible Kontinuitätsgleichung $\nabla \cdot \underline{c} = 0$ bzw. $\frac{\partial c_i}{\partial x_i} = 0$ geht durch

Nutzung des Ansatzes (3.25) in $\underbrace{\frac{\partial \bar{c}_i}{\partial x_i}}_{=0} + \frac{\partial c'_i}{\partial x_i} \rightarrow \frac{\partial c'_i}{\partial x_i} = 0$ über, d. h. die Änderung

des Mittelwertes wird für die Betrachtung der turbulenten Schwankungen vernachlässigt, stattdessen verschwindet nun die Divergenz der Schwankungsbewegungen. Bildet man nun unter Beachtung obiger Regeln (3.26) den Mittelwert von Gleichung 3.24, so ergibt sich durch Einsetzen

$$\frac{\partial \bar{c}_i}{\partial t} = -\bar{c}_j \frac{\partial \bar{c}_i}{\partial x_j} - \overline{c'_j \frac{\partial c'_i}{\partial x_j}} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{c}_i}{\partial x_j^2} + \bar{f}_i.$$

Durch Umformen $\overline{c'_j \frac{\partial c'_i}{\partial x_j}} = \overline{\frac{\partial}{\partial x_j} (c'_i c'_j)} - \underbrace{c'_i \frac{\partial c'_j}{\partial x_j}}_{=0} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{c'_i c'_j})$ mit Weglassen des zu

Null gekennzeichneten Terms bei inkompressibler Rechnung sowie Umformung des Laplace-Terms nach Vereinbarung mit $\nu \frac{\partial^2 \overline{c}_i}{\partial x_j^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_{ij}}{\partial x_j}$ bzw. $\mu \frac{\partial \overline{c}_i}{\partial x_j} = H_{ij}$ folgt

letztlich die bekannte **Reynolds-** bzw. **RANS-Gleichung**:

$$\boxed{\frac{\partial \overline{c}_i}{\partial t} = -\overline{c}_j \frac{\partial \overline{c}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (H_{ij} - \rho \overline{c'_i c'_j}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \overline{f}_i}. \quad (3.27)$$

Mit dem o.g. Dekompositionsansatz modelliert diese Gleichung inkompressible turbulente und viskose Strömungen und ist damit Ausgangspunkt vieler moderner Berechnungsverfahren der CFD. Das nun offene Problem ist die Formulierung des als Reynolds-Spannungstensor bezeichneten Ausdrucks $\tau_{ij} = \rho \overline{c'_i c'_j}$ mit folgender symmetrischer Gestalt⁶⁷:

$$\rho \overline{c'_i c'_j} = \rho \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \dots & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \dots & \dots & \overline{w'^2} \end{pmatrix}$$

Es sind mithin 6 unbekannte Größen zu bestimmen. Dies ist das Aufgabengebiet der statistischen Turbulenzmodellierung.

3.2.3.2 Turbulenzmodellierung

Bisher haben sich verschiedene **Schließungsansätze** zur Bestimmung dieser 6 unbekanntenen Größen etabliert, wobei mit steigendem Aufwand auch meist eine verbesserte Güte der Turbulenzmodellierung einhergeht. Im Allgemeinen verwendet man Ansätze erster und zweiter Ordnung.

Einfachste Möglichkeiten eines Ansatzes erster Ordnung sind sog. Algebraische oder Nullgleichungsmodelle, welche direkt aus den bekannten mittleren Geschwindigkeiten eine Vorhersage der gesuchten Größen erlauben. Beispielhaft

⁶⁷ Schwankungsgeschwindigkeiten $u'=c_1'$, $v'=c_2'$ und $w'=c_3'$, der Term $\overline{c'_i c'_j}$ stellt eine Korrelation dar

seien das Modell nach *Boussinesq*⁶⁸ sowie die Prandtl'sche Mischungsweghypothese⁶⁹ genannt.

Verbesserte Qualität bieten die Eingleichungsmodelle, welche eine weitere Transportgleichung verwenden - meist für die Turbulenzenergie $k = \frac{1}{2} \overline{c'_i c'_i}$ ⁷⁰.

Höhere Ansätze fügen noch eine weitere Transportgleichung hinzu, z. B. meist für die Dissipationsrate ε (Zweigleichungsmodelle). Diese lässt sich ebenso wie die Turbulenzenergie aus der Reynolds-Gleichung herleiten.

Die in diesem Zusammenhang deutlich rechenaufwändigeren Modellierungen sind die Reynolds-Spannungs-Modelle (RS-Modelle) zweiter Ordnung, welche für die o. g. 6 Spannungsterme jeweils eigene Transportgleichungen formulieren. Dem Nachteil des deutlich höheren Aufwands steht jedoch die besonders gute Eignung für anisotrope Strömungszustände gegenüber.

Insgesamt ist das Gebiet der statistischen Turbulenzmodellierung von hohem Interesse, aber auch von großem und anspruchsvollen Umfang. Tieferreichende grundlegende Detailfragen zu diesem Gebiet erörtert z. B. [60]. Eine Einführung in verschiedene Ansätze der Turbulenzmodellierung bietet beispielsweise [34], während z. B. [24] eine Auswahl und Anwendung dieser Modelle für einen konkreten Strömungsfall beschreibt.

3.2.3.3 Andere Ansätze

Obwohl für die in dieser Arbeit ausgeführten Simulationsrechnungen nicht verwendet, sollen kurz weitere Entwicklungsrichtungen genannt werden. Diese beinhalten z. B. die Idee, die Strömungsfuktuationen über einen geeigneten Mechanismus derart aufzuspalten, dass großskalige energietragende Wirbel mit geringem Aufwand simuliert werden können, jedoch die kleinskaligen turbulenten und energiedissipierenden Wirbel über ein Modell ähnlich der im vorigen Kapitel genannten approximiert werden (Grobstruktursimulation bzw. Large Eddy Simulation (LES)). An Stelle der zeitlichen Mittelung bei der RANS-Gleichung

⁶⁸ analog zum Newton'schen Schubspannungsgesetz, $\tau_{ij} = -\rho \overline{c'_i c'_j} = \rho \varepsilon_m \frac{\partial \overline{c_i}}{\partial x_j}$, ε_m ist Wirbelzähigkeit

⁶⁹ Prandtl'sche Mischungsweghypothese: $\tau_{ij} = -\rho \overline{c'_i c'_j} = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial \overline{c_i}}{\partial x_j} \right| \frac{\partial \overline{c_i}}{\partial x_j}$, l_m ist Mischungsweglänge

⁷⁰ Zusammenhang zwischen Spur von τ und der Turbulenzenergie k : $\text{tr} \tau_{ij} = 2k$

tritt hier eine zeitliche und örtliche Tiefpassfilterung. Die Aussagekraft aber auch der Rechenaufwand der Lösung liegt über der von statistischen Modellen, da auch grobskalige turbulente Strukturen aufgelöst werden können.

Die Detached Eddy Simulation (DES) richtet das Augenmerk insbesondere auf die Problematik der Wandgrenzschichten, welche für viele technischen Probleme relevant sind (z. B. Flügelumströmungen) und erreicht dort eine verbesserte Turbulenzmodellierung. Im Prinzip kombiniert die DES die Grobstruktursimulation für die freien Wirbel außerhalb von Grenzschichten und einen statistischen RANS-Ansatz für die Wandgrenzschichten. Die Unterscheidung fällt das Modell je nach Verhältnis der lokalen Gitterweite zur turbulenten Längenskala⁷¹. Eine Einführung zur DES bzw. einen detaillierten Überblick liefert [43] bzw. [71].

3.2.4 Gittererzeugung

3.2.4.1 Allgemeines

Um die eben dargestellten Gleichungen für ein reales dreidimensionales Problem zu lösen⁷², muss das zugehörige räumliche Problemgebiet derart in kleine Gebiete bzw. Elemente zerlegt bzw. diskretisiert werden, dass beim Lösen der Gleichungen auf dieser Substruktur der unvermeidliche Diskretisierungsfehler und dessen numerischen Folgen für das Ergebnis akzeptabel werden. Ausgangspunkt für die Bildung eines (problemangepassten) Rechengitters ist daher die Beschreibung der Problemgeometrie, meist in Form von geschlossenen Oberflächen. Diese Gebietsgrenzen des Problems werden im Zuge der Diskretisierung durch die Oberflächen zusammenhängender Elemente approximiert.

Im allgemeinen verwendet man hierzu einfache räumliche Elemente wie z. B. Tetraeder und Hexaeder. Dabei muss sichergestellt werden, dass die entstehenden Elemente überhaupt verlässlich numerisch behandelt werden können (Orientierung, Winkel, Größe usw.). Nach Möglichkeit sollen dabei die Winkel- und Seitenlängenverhältnisse jeweils gleich sein, um später den numerischen Rechenfehler zu minimieren. Das lässt sich jedoch nicht generell erreichen, z. B.

⁷¹ Abmessung der kleinsten relevanten turbulenten Wirbel

⁷² Beim vorliegenden Problem der Propellerumströmung ist von einem dreidimensionalen Problem auszugehen. Symmetrien, die eine stark vereinfachte Lösung in nur 2 Dimensionen erlauben würden, existieren hierbei nicht.

nicht für spitz zulaufende Geometrien⁷³. Im Extremfall wird die Diskretisierung selbst durch unpassende Auflösung oder schlechte Geometriebeschreibungen fehlerhaft. Der nachfolgende Berechnungsprozess wird kein oder kein verlässliches Ergebnis liefern können.

Die Diskretisierung bzw. Vernetzung⁷⁴ ist ein rein geometrisches, aber mitunter äußerst komplexes Problem. Sie stellt dabei lediglich die möglichst angepasste geometrische Datenbasis bereit, mit welcher sich verschiedene Lösungsstrategien für Differentialgleichungen umsetzen lassen. Eine das komplexe Thema der automatischen Gittererzeugung bearbeitende Forschung zeigt beispielhaft [30].

3.2.4.2 Strukturiert vs. unstrukturiert

Ein wesentlicher Punkt der Gittererzeugung betrifft den algorithmischen Aufbau der Gitterelemente. Diese können strukturiert oder unstrukturiert erzeugt werden, Abbildung 14 möge dies am Beispiel eines Krümmers exemplarisch veranschaulichen.

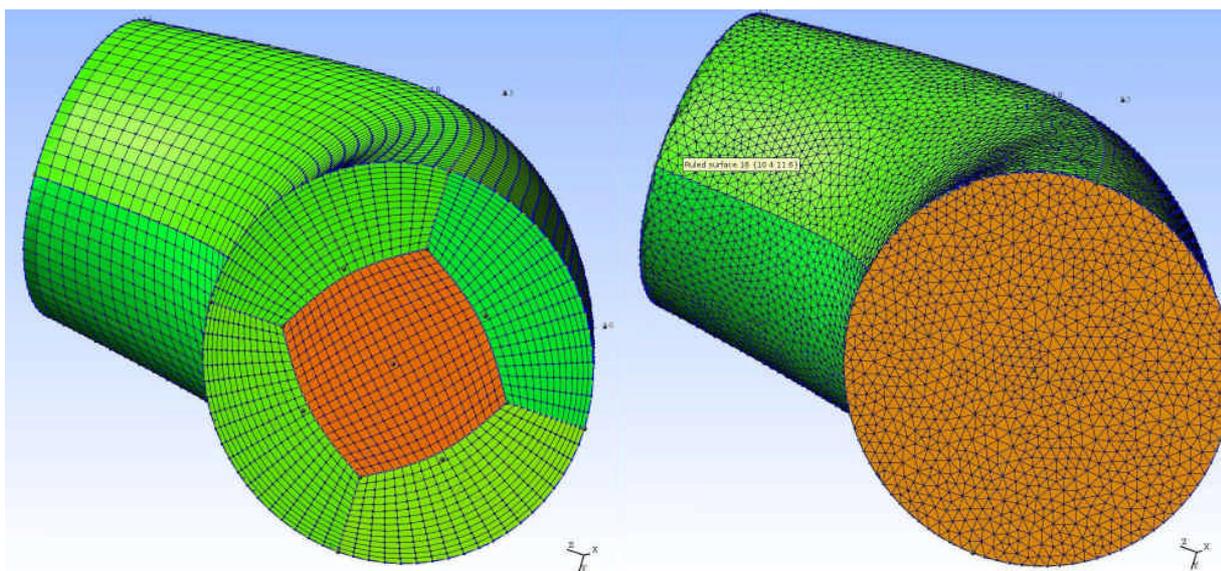


Abbildung 14: Beispielhafter Vergleich einer strukturierten (O-H-Gitter, links) und unstrukturierten Vernetzung (rechts) eines Rohrquerschnittes

⁷³ Man kann eine spitz zulaufende Geometrie durch immer kleinere Tetraeder approximieren, welche für sich ausreichende Elementqualität besitzen, jedoch bedeutet eine feinere Auflösung auch höheren Rechenbedarf. Dies ist jedoch nicht immer erforderlich.

⁷⁴ Zur Begriffsklärung: Die Unterteilung des Problemgebietes in diskrete Einzelemente ist die Diskretisierung, welche bestimmte Datenstrukturen erzeugt. Diese Datenstruktur kann als Vernetzung bezeichnet werden. Mitunter wird als Vernetzung auch der Gesamtprozess bezeichnet. Gitter und Netz sind hier synonym zu verstehen. Häufig verwendet wird auch der englische Begriff Mesh für Gitter und Meshing für die Vernetzung.

Strukturiert bedeutet, dass dem Algorithmus schon alle wesentlichen räumlichen Begrenzungslinien bereitgestellt werden (i. Allg. krummlinig), so dass Gebiete entstehen, die über ein einfaches Verfahren gleichmäßig oder ungleichmäßig unterteilt werden können. Durch die Unterteilung entstehen auf diesen Linien sog. Knoten.

Es werden 3 Grundtypen strukturierter Gitter verwendet, welche an den Außenkanten mit anderen Gittern verbunden werden können⁷⁵ (siehe Abbildung 15):

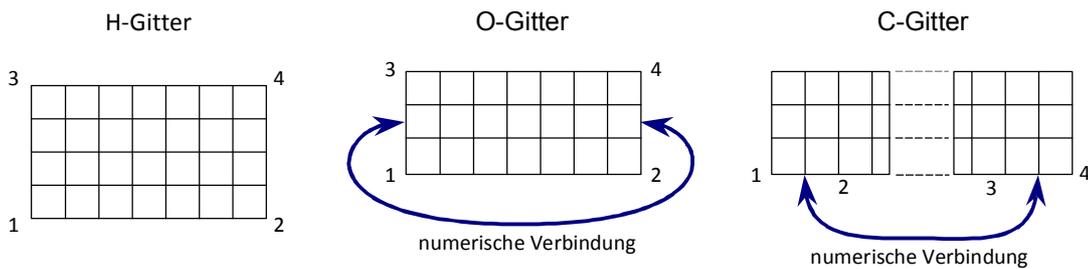


Abbildung 15: Gittertypen bei strukturierter Vernetzung

Die Berechnung der krummlinigen Koordinaten erfolgt dabei über Koordinatentransformationen⁷⁶, welche in folgender Abbildung 16 veranschaulicht ist.

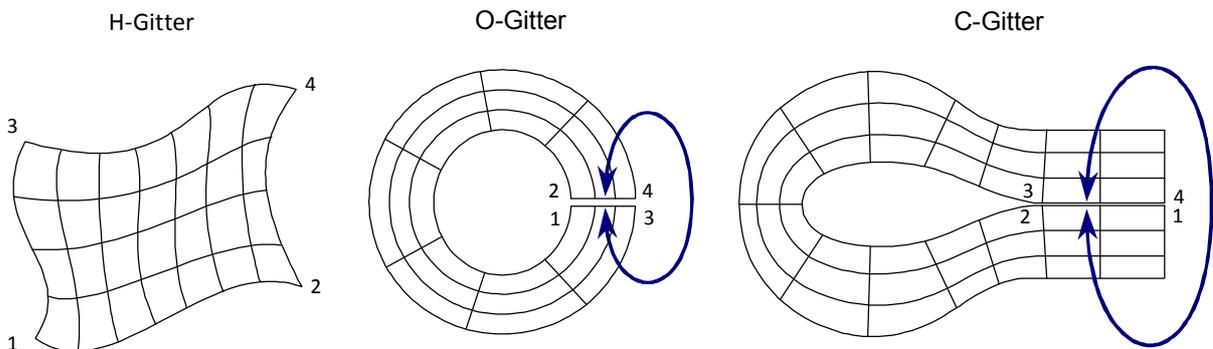


Abbildung 16: Transformationen der Gittertypen

Es ergeben sich damit - geeignete Parameter vorausgesetzt - sehr hochwertige effiziente Gitter mit kleinstem Diskretisierungsfehler. Bei unstrukturierten Gittern dagegen bestimmt der Algorithmus selbst das nächste Element in seinen lokalen geometrischen Eigenschaften.

⁷⁵ Über eine Verbindungsmatrix (Connectivity-Matrix) "kennt" jeder Gitterknoten seinen Nachbarn.

⁷⁶ Dieses recht komplexe Thema soll nur fundamental skizziert werden, einen Einstieg in die Theorie bietet hier z. B. [61].

Das unstrukturierte Unterteilen (Diskretisieren) des Gebiets ist ein Problem aus der Computergrafik. Hierbei werden häufig zunächst die Oberflächen der Gebiete unterteilt bzw. vernetzt⁷⁷. Von diesem Netz aus werden dann 3D-Elemente in das räumliche Gebiet hinaus aufgebaut. Aber auch eine komplette Unterteilung des Volumens mit nachfolgender Behandlung der geschnittenen Elemente ist gebräuchlich⁷⁸. Die einzelnen Verfahren sollen hier nicht weiter betrachtet werden, da diese weithin dokumentiert sind und etablierte Programme hierfür existieren.

Bei strukturierten Gittern ist der Aufbau wesentlich einfacher, da das Gebiet nach gegebenen Angaben lediglich fortlaufend multiplizierend unterteilt wird. Der Vorteil der strukturierten Gitter ist damit deren nahezu sofortige Berechnung, es sind bei korrekten Parametern weder Korrekturen noch Reparaturen erforderlich. Primär werden vorteilhafte Hexaeder erzeugt. Ein im Hinblick auf die vorliegende Anwendung wichtiger Nachteil ist jedoch, dass diese Gitter bei nur leicht variierender Problemgeometrie zwar unter Umständen noch korrekt bleiben können, jedoch bei starken Geometrieänderungen diese Unterteilungen dann oft nicht mehr zulässig werden und manuell angepasst werden müssen. Der Vorteil der unstrukturierten Gitter ist im Gegenzug, dass sie im Prinzip auf jeder Problemgeometrie erzeugt werden können. Wiederum nachteilig ist jedoch, dass unstrukturierte Gitter geglättet, geprüft und gegebenenfalls repariert werden müssen, was im Allgemeinen einen wesentlich höheren Rechenzeitbedarf bedeutet. Dies ist insbesondere bei der automatischen Erzeugung von Bedeutung. Auf Grund der dabei primär erzeugten ungünstigeren Tetraederelemente ist auch das Gitter von schlechterer Qualität. Da dem unstrukturierten Gitter eine gleichbleibende globale Struktur fehlt, ist man während des Lösungsprozesses auf ständige Zugriffe auf die Verbindungsmatrix angewiesen, dies verlangsamt den Lösungsprozess.

3.2.4.3 Auflösung

Wichtig im Zusammenhang mit der Simulation physikalischer Probleme auf solchen Rechengittern ist die Auflösung bzw. Gitterweite. In Bereichen, in welchen sehr kleinskalige Änderungen der relevanten physikalischen Größen auftreten, muss auch das Gitter eine entsprechende Auflösung bieten, um diese Änderungen numerisch abbilden zu können. Anderenfalls kann das Rechenmodell diese lokalen Änderungen schlecht erfassen und bildet nur eine Mittelung, was

⁷⁷ z. B. mittels Delaunay-Triangulation oder Advancing Front-Methode

⁷⁸ z. B. Octree-Verfahren

anschließend zu relevanten Verfälschungen führen kann. Letztlich ist ein grundlegendes Problem bei der Simulation physikalischer Vorgänge, dass diese und das erforderliche Rechengitter nicht kausal verbunden sind. Mithin braucht es eine manuelle oder anderweitig zu ermittelnde Vorgabe, wie fein das Gitter an welchen Orten gestaltet sein muss, damit der Rechenfehler akzeptabel wird. Selbst bei der manuellen Erzeugung von Gittern ausreichender Qualität braucht es daher Fachwissen über das zu lösende Problem, damit die Gitterdichte zum Problem passt. Zudem ist es unpraktikabel, die Gitterdichte im gesamten Gebiet zu erhöhen, da sich so auch der Rechenbedarf beträchtlich erhöht⁷⁹.

Die fehlende kausale Verbindung zwischen Problem und Diskretisierung führt auch häufig dazu, dass moderne robuste numerische Algorithmen selbst dann Lösungen errechnen können, die von einem unangepassten Gitter gar nicht als Problem erfasst wurden. So hat sich zur korrekten Bezeichnung CFD (für Computational Fluid Dynamics) schnell die zynische Umdeutung "Coloured Fluid Dynamics" gesellt.⁸⁰

3.2.4.4 Propeller-Diskretisierung

Wie in Kapitel 3.1.2 ausgeführt, gibt es für Propeller ein etabliertes Vorgehen für die Beschreibung der Naben- und Flügelgeometrie. Ausgehend von dieser Beschreibung wird - meist programm-basiert - ein Satz von Oberflächenbeschreibungen erzeugt. Mit weiteren zusätzlichen Merkmalen versehen⁸¹ ist dieser Satz Startpunkt für im Prinzip beliebige Gittererzeugungsalgorithmen.

Wie später noch ausgeführt wird, stellt der Bionikpropeller durch seine wesentlich komplexere Geometrie gegenüber herkömmlichen Propellern besonders hohe Anforderungen an diese Algorithmen. Die im Zuge der Optimierung automatisch zu erzeugenden Gitter verschärfen das Problem. So wird absehbar, dass die

⁷⁹ genau genommen mit der 3. Potenz, da lineare Änderungen aller Elemente derart das Volumen verändern

⁸⁰ Sicher spielen hier noch andere Faktoren eine Rolle, allen voran die immer einfacher werdende Bedienung komplexer Simulationssoftware, die auch Unkundigen ein buntes Ergebnis präsentiert, gepaart mit der leider immer noch verbreiteten Leichtgläubigkeit gegenüber computer generierten Resultaten.

⁸¹ z. B. Punkte zur Kennzeichnung von innen- bzw. außenliegenden Gebieten, Parameter für die Gitterdichte usw.

automatische Erzeugung erstrebenswerter strukturierter Gitter zumindest äußerst anspruchsvoll erscheint.⁸²

3.2.5 Strömungssimulation

Die im vorigen Kapitel erläuterte Diskretisierung stellt Koordinaten aller räumlichen Elemente bereit, die in ihrer Gesamtheit die reale Geometrie des physikalischen Problems approximieren. Die Gesamtheit der für sich jeweils endlichen Fluidteilchen ergibt den Strömungsraum. Um die Bewegungsdifferentialgleichungen für diese diskreten Bereiche näherungsweise zu lösen, sind verschiedene Strategien entstanden.

3.2.5.1 Finite Differenzen-Methode (FDM)

Die naheliegendste Methode ist, die Differentialquotienten durch Differenzenquotienten zu ersetzen und direkt mit den Koordinaten zu verwenden. Dabei kann man über die Taylorentwicklung eines Funktionswertes an der Stelle x

$$f(x + \Delta x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial x^n} f(x) = f(x) + \frac{\Delta x}{1} \frac{\partial}{\partial x} f(x) + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x) + O((\Delta x)^2) \quad (3.28)$$

mit dem quadratischen Restfehlerglied $O(\Delta x^2)$ durch Umstellen und Beschränken auf den linearen Anteil den linearen (vorwärts gerichteten) Differenzenquotienten

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (3.29)$$

gewinnen⁸³. Analog ist aus der Entwicklung mit $\Delta x \rightarrow -\Delta x$

$$f(x - \Delta x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial x^n} f(x) = f(x) - \frac{\Delta x}{1} \frac{\partial}{\partial x} f(x) + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x) - O(\Delta x^2) \quad (3.30)$$

der rückwärtige Differenzenquotient $f'(x) = \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x)$ bestimmt.

Durch Differenzbildung der Gleichungen 3.28 und 3.30 gelangt man zum zentralen Differenzenquotienten

⁸² In [72] stellen *Staduja* et al. ein insgesamt ähnliches Verfahren zur Gewinnung eines CFD-Modells vor, um Propeller zu bewerten.

⁸³ Das Vorzeichen des Restfehlers $O(\Delta x^2)$ ist hier belanglos.

$$f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (3.31)$$

mit geringerer Fehlerordnung. Durch Addition der Gleichungen 3.28 und 3.30 gelangt man zum zentralen Differenzenquotienten 2. Ordnung:

$$f''(x) = \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \quad (3.32)$$

Offensichtlich hat die Bildungsrichtung eine besondere Verbindung zu Zeitableitungen⁸⁴. Ähnliche Deutungen erfahren die Richtungen der örtlichen Differenzenquotienten bei starken Strömungen, sie sind danach einzusetzen. Die Differenzenquotienten lassen sich auch ohne weiteres für nicht-äquidistante Gitterabstände formulieren.

Bei expliziter Formulierung kann der neue Funktionswert auf der Grundlage der bekannten Werte errechnet werden, womit eine Entkopplung verbunden ist. Bei impliziter Formulierung entsteht ein Gleichungssystem, aus dem die neuen Werte durch Lösen desselben gewonnen werden können. Oft ist nur diese Formulierung numerisch stabil⁸⁵. Für das Lösen dieser Gleichungssysteme existieren viele etablierte Verfahren, z. B. Gauß-Seidel- oder Relaxationsverfahren bzw. Mehrgitterverfahren.

Die Berechnung der Differenzgleichungen ist konsistent, wenn sie mit sinkender Schrittweite in die Differentialgleichung übergehen. Sie ist konvergent, wenn der gesamte Diskretisierungsfehler mit sinkender Schrittweite verschwindet (d. h. die numerische Lösung sich der realen nähert). Insbesondere sei das **Lax-Äquivalenz-Theorem** genannt: Differenzgleichungen sind genau dann konvergent, wenn sie stabil (haben auch bei Störungen eine "echte" Lösung) und konsistent (s. o.) sind.

3.2.5.2 Finite Elemente-Methode (FEM)

Auch die FEM versucht, partielle Differentialgleichungs-Probleme auf einem vernetzten Gebiet zu approximieren. Der Ansatz hier ist, für jedes endliche (finite) Element eine einfache Funktion der gesuchten Größe anzusetzen (Ansatz-

⁸⁴ Zeit ist immer einseitig (nur eine "Fluss"-Richtung); Konvektion wirkt ebenso einseitig, Diffusion dagegen zweiseitig

⁸⁵ z. B. explizite FTCS (Forward Time Central Space) gegen implizite BTCS (Backward Time Central Space) Formulierung, letztere spiegelt meist auch besser die physikalischen Vorgänge wider

funktion), die das Verhalten der gesuchten Größe in dem Element ausreichend gut beschreibt. Zudem muss aus physikalischen sowie aus mathematischen Gründen für den Funktionsverlauf über die Elementgrenzen hinweg die Stetigkeit der gesuchten Größen gegeben sein. Da für diese Ansatzfunktionen lediglich zutreffen muss, dass sie jeweils auf nur wenigen benachbarten Elementen gelten, kann durch Superposition aller Ansatzfunktionen ein lösbares Gleichungssystem erzeugt werden.

Auf Grund der Eigenschaften dieses Verfahrens hat es sich vorzugsweise im Bereich der Festkörpermechanik etabliert, weil hier mechanische Eigenschaften und deren Gesetzmäßigkeiten günstig in den Ansatzfunktionen untergebracht werden können. Dennoch ist es allgemeingültig und auch auf viele andere Problemstellungen mit partiellen Differentialgleichungen anwendbar.

3.2.5.3 Finite Volumen-Methode (FVM)

Bei diesem Verfahren werden zunächst die Differentialgleichungen über den aus der Vernetzung konstruierbaren Typen von Kontrollvolumen⁸⁶ integriert. Auch hier kann man für die gesuchte Größe stückweise Verteilungsfunktionen für den Volumenbereich ansetzen. Durch die Integration wird automatisch ein Erhaltungsprinzip für die jeweilige Größe erfüllt, dabei reduziert sich näherungsfrei die Ordnung der Ortsdifferentialie. Die so umgeformte Differentialgleichung wird wieder (vorzugsweise implizit) mit Differenzenquotienten formuliert und dann unter Einsetzen aller aus der Vernetzung bereitgestellten Ortskoordinaten als Gleichungssystem gelöst.

Um die für ein Kontrollvolumen relevanten Gleichungen zu erhalten, wird auf den Bilanz- bzw. Erhaltungssatz aus der Herleitung der Euler- bzw. Navier-Stokes-Gleichung aus Kapitel 3.2.2 zurückgegangen. Die dort allgemein formulierte Bilanz

$\frac{d\Psi}{dt} = T_\psi + P_\psi$ einer physikalischen Größe Ψ mit einer dichteartigen

Verteilung $\Psi = \int_V \xi dV$ kann auch für eine massegebundene Größe $\Phi = \int_V \rho \phi dV$

(z. B. Impuls, Enthalpie usw.) formuliert werden. Der Quellterm, d. h. die Produktion, verhält sich analog mit $P_\phi = \int_V p_\phi dV$, doch der Transport der Größe

⁸⁶ Die Diskretisierung bzw. Vernetzung generiert eine Menge von Punkten, zwischen denen (ohne Überlappungen und Freiräume) auf verschiedene Weise Volumina aufgespannt werden können. Somit ist das Kontrollvolumen in der FVM mit den finiten Elementen der FEM direkt vergleichbar.

über die Oberfläche des Volumens kann nun auch diffusiv erfolgen. Über ein differentielles Flächenelement $d\mathbf{A}$ ist der diffusive Fluss gradientenabhängig mit $\Gamma_\varphi \underline{\nabla}\varphi \cdot d\mathbf{A}$ (mit Γ_φ als Φ -spezifischem Diffusions- bzw. Leitfähigkeitskoeffizienten):

$$T_\Phi = \oint_{\partial V} \Gamma_\varphi \underline{\nabla}\varphi \cdot d\mathbf{A} = \int_V \underline{\nabla} \cdot (\Gamma_\varphi \underline{\nabla}\varphi) dV \quad ^{87}.$$

Über das Reynolds-Transporttheorem (Gleichung 3.16) geht der konvektive Fluss ein, so dass gilt

$$\frac{d\Phi}{dt} = \int_V \left(\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \underline{\nabla} \cdot (\rho\varphi\underline{c}) \right) dV = \int_V \underline{\nabla} \cdot (\Gamma_\varphi \underline{\nabla}\varphi) dV + \int_V p_\Phi dV.$$

Die Forderung nach Gültigkeit für alle Volumina macht die Integranden direkt vergleichbar. Damit kann eine allgemeine Transportgleichung für massegebundene Größen definiert werden:

$$\boxed{\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} = \underline{\nabla} \cdot (\Gamma_\varphi \underline{\nabla}\varphi) - \underline{\nabla} \cdot (\rho\varphi\underline{c}) + p_\Phi} \quad (3.33)$$

Der linke Term modelliert die instationären Änderungen der Größe, auf der rechten Seite bildet der 1. Term ihren Diffusionsfluss, der 2. Term ihren konvektiven Fluss und der 3. Term eine allgemeine Quellen-/Senkrate für Φ .

Auch die inkompressible Navier-Stokes-Gleichung mit der Geschwindigkeit \underline{c} als Transportgröße (Gleichung 3.24) lässt sich innerhalb dieser allgemeinen Transportgleichung für $\varphi := \underline{c}$ unterbringen, sofern der Diffusionsterm mit $\underline{\nabla} \cdot (\Gamma_\varphi \underline{\nabla}\underline{c}) := \mu \Delta \underline{c} - \underline{\nabla} p$ modelliert wird. Mit Hilfe einer derart allgemeinen Formulierung können viele kommerzielle Programme eine Vielzahl unterschiedlich ausgerichteter Strömungsprobleme berechnen, oft bedienen sie sich dabei der FVM. Obwohl hier nur ein sehr oberflächlicher Einblick geboten werden kann, sollte beachtet werden, dass ein Großteil der Schwierigkeiten beim Aufbau einer solchen Software darin besteht, die mathematische Methode so in eine numerische Berechnungsvorschrift umzusetzen, dass über eine konsistente Rechnung stabile Ergebnisse produziert werden können. Einen solchen Code selbst zu verfassen, ist daher nur für äußerst spezielle Einsatzfälle sinnvoll.

⁸⁷ unter Anwendung des Gauß'schen Integralsatzes

3.2.6 Auswertung

Als Ergebnis der Strömungssimulation steht das Geschwindigkeitsfeld im Strömungsraum direkt über das Impulsfeld und die Kontinuitätsgleichung⁸⁸ zur Verfügung. Leider kann das korrespondierende Druckfeld nicht direkt erhalten werden, da es nur in den Quellterm eingeht. Das richtige Druckfeld würde zwar beim Einsetzen in die Impulsgleichungen korrekte Lösungen für das Geschwindigkeitsfeld liefern, bedeutete aber das simultane Lösen einer zusätzlichen Druckgleichungs-Differentialgleichung. Benötigt wird daher besser ein zusätzlicher Zusammenhang zwischen Druck und Dichte. Für eine Lösung des Problems haben sich im Wesentlichen zwei Verfahren etabliert:

- Ermittlung des Zusammenhangs aus einer Zustandsgleichung des Mediums, ergibt aber Probleme bei inkompressiblen Medien⁸⁹
- sogenanntes Druckkorrekturverfahren (auf versetzten Gittern, auch SIMPLE-Algorithmus genannt, allerdings problematische Interpolation von \underline{c} und \underline{p} an den Kontrollvolumengrenzen)
eine verbesserte Methode von *Rhie* und *Chow* (1983) nutzt zunächst "Pseudo"-Geschwindigkeiten, aus denen ohne Interpolation der Druck bestimmt werden kann

Zur Auswertung und damit Bildung von integralen Größen wie Schub und Moment werden auf Grundlage des Geschwindigkeits- und Druckfeldes die Kräfte an den beteiligten Oberflächen ermittelt. Hochentwickelte Softwaresysteme ermöglichen darüber hinaus eine grafische Darstellung dieser Skalar- und Vektorfelder, wodurch interaktiv eine tiefe Einsicht in das Strömungsverhalten gewonnen werden kann.

Für die vorgesehene Anwendung der Strömungsberechnung im inkompressiblen Medium (Wasser) kann die lokale Unterschreitung des aktuellen Dampfdruckes einen Hinweis auf Kavitationsneigung geben. Die grafisch gestützte Analyse der Drücke im Volumen unterstützt das Aufspüren derartiger potentieller Kavitationszonen.

3.2.7 ICEM-CFD und Ansys CFX

Die Erzeugung korrekter und hochwertiger Gitter ist ein umfassendes Teilgebiet, so dass es im Rahmen dieser Anwendungsforschung nicht sinnvoll erschien,

⁸⁸ zur Bestimmung der lokalen Dichte

⁸⁹ z. B. Methode der künstlichen Kompressibilität

eigene Algorithmen zur Gittererzeugung zu entwickeln. Dies trifft analog auch auf die mit *Ansys CFX* bereitgestellten Rechenverfahren zur Lösung der RANS-Gleichungen zu. Damit solche komplexen Werkzeuge korrekt und numerisch stabil arbeiten, ist ein außerordentlich hoher Entwicklungsaufwand erforderlich. Im Rahmen der Projektmittel wurde daher für die Gittererzeugung das Programmpaket *Ansys ICEM-CFD* beschafft, für die Ausführung der RANSE-Rechnungen *Ansys CFX*.

In der Benutzerdokumentation zu *Ansys CFX* werden neben dem Gebrauch der Software auch die verwendeten Ansätze und numerischen Verfahren ausführlich erläutert (vgl. [5]).

3.3 Evolutionsstrategie

3.3.1 Allgemeines

Warum Evolutionsstrategie

Wie einleitend schon bemerkt, ist die Suche nach einem universellen Optimierungsverfahren für alle Problemstellungen aussichtslos. Optimierungsverfahren können sich nur auf Grund ihrer speziellen Problemklassen unterscheiden und darin auch Vorteile gegenüber anderen Verfahren erreichen. Ohne eine Einführung in alle möglichen Verfahren (und damit Problemklassen) zu geben, soll aber die Wahl der Evolutionsstrategie als Optimierungsverfahren für den vorliegenden Fall motiviert werden.

Der höchst komplexe nichtlineare Zusammenhang zwischen der Umströmung eines (parametrisierten) Propellermodells und den sich daraus ergebenden Kennwerten lässt sich kaum vollständig analytisch beschreiben, viele mathematische Optimierungsverfahren sind daher nicht anwendbar. Zudem sind keine verlässlichen Aussagen über die Stetigkeit dieses Zusammenhangs machbar, womit die Anwendung von Gradientenverfahren ungünstig wird, ableitungsfreie Verfahren sind hier geeigneter. Die in dieser Arbeit verfolgten Auslegungsziele sind globale Eigenschaften, das Optimierungsverfahren darf also nicht in gefundenen lokalen Optima stecken bleiben. Obwohl die globale Optimierung ein nach wie vor ungelöstes Problem darstellt, ist dazu eine sehr umfangreiche Methodik entstanden. Eine umfangreiche Übersicht bietet hier z. B. [65], das trotz des Alters die wesentlichen Herangehensweisen erläutert und evaluiert.

Im vorliegenden Fall ist demnach ein Verfahren der nichtlinearen Optimierung gesucht, welches ableitungsfrei und stochastisch arbeitet sowie in der Lage ist, lokale Optima nicht nur aufzufinden, sondern auch zu überwinden. Einige für diese Probleme bekannte Algorithmen sind der Downhill-Simplex-Algorithmus (Bergsteigeralgorithmus), Direct-Set (Powell's method), sowie die naturanalogen Optimierungsverfahren wie Simulated Annealing und Evolutionäre Algorithmen. Letztere spalten sich im Wesentlichen in Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien auf⁹⁰.

Ein wesentlicher Unterschied der Evolutionsstrategie gegen über den Genetischen Algorithmen ist die direkte Problemrepräsentation (im reellen Raum), es ist keine Übersetzung in eine diskrete Kodierung wie bei den Genetische Algorithmen erforderlich⁹¹. Ebenso wie der Downhill-Simplex-Algorithmus ist auch die Evolutionsstrategie funktionswertfrei, d. h. maßgeblich ist nur die Rangfolgen der Qualitätswerte. Da die Evolutionsstrategie nicht a priori bessere Nachkommen konstruiert, sondern zufällig neue Nachkommen um den letzten erfolgreichen setzt, wird eben keine gerichtete Extrapolation vorgenommen, vielmehr macht das ungerichtete Setzen der Nachkommen die Strategie robust (vgl. [25], Hansen vergleicht dort auf Grund dieser Eigenschaften die Evolutionsstrategie mit dem Downhill-Simplex-Verfahren). Entscheidend für den Erfolg der Strategie sind die Selektion und das kontrollierte Setzen der Nachkommen⁹². Eine ideale Evolutionsstrategie löst zwei Probleme:

- es setzt die Nachkommen möglichst weit weg, aber auch möglichst dicht am vermutlichen Gradienten (höchste Fortschrittsgeschwindigkeit)
- kann aus einem lokalen Optimum durch ansteigende Schrittweite auch andere Optima finden (Universalität)

⁹⁰ neben der Genetischen Programmierung und der Evolutionären Programmierung, die insgesamt weniger Bedeutung haben

⁹¹ Bionisch betrachtet mutet die diskrete Problemkodierung eher wie ein Kopieren der natürlichen Gegebenheiten an. Im Gegensatz zum kontinuierlichen Genotyp der Evolutionsstrategie haben die Genetischen Algorithmen einen aus einem quaternären Symbolvorrat gebildeten Genotyp, so dass die Problemrepräsentation eingeschränkt ist. Die Genetischen Algorithmen übernehmen die natürliche Repräsentation, wogegen die Evolutionsstrategie das Prinzip abstrahiert und eine universellere Darstellung wählt. Die Kodierung des Genotyps in Form der DNS ist nur ein von der Evolution eingeschlagener Weg, der nicht zwangsläufig optimal sein muss.

⁹² Denn ohne Selektion gilt die Goldene Regel der Evolutionsstrategie: im lokalen (linearen) Bereich ist nur im Mittel jeder 2. Versuch erfolgreich. Wählt man nun auch zufällig jeden 2. Nachkommen aus, so verschwindet der Gesamtfortschritt. Ebenso muss die Schrittweite angepasst sein, d. h. im Evolutionsfenster liegen, sonst gibt es keinen Fortschritt.

Evolutionstrategien haben sich bereits bei unzähligen Anwendungen zur Optimierung bewährt und sind in der Vergangenheit zu robusten Verfahren weiterentwickelt worden. Eine Übersicht über die verschiedenen Erweiterungen und Varianten der Evolutionstrategie gibt einführend z. B. [29]. Eine allgemeinere Einführung in Evolutionäre Algorithmen bietet [19], eine der ersten richtungweisenden Arbeiten zur Evolutionstrategie überhaupt findet der Leser in [64].

3.3.2 Eine "Lanze für die Bionik"

Bionik ist heutzutage ein zunehmend präserter Begriff, wenngleich leider verbreitet Unklarheit über seine genaue Bedeutung herrscht. Es wird heute etwas als bionisch akzeptiert, wenn es äußerlich Vorbildern aus Flora und Fauna gleicht, es also offensichtliche biologische Vorbilder gibt. Diesen Umstand etwas anders formuliert würde ihn etwa "*Bionik ist das Kopieren biologischer Vorbilder in die Technik*" klingen lassen, was eine tatsächlich sehr populäre Ansicht - sogar unter (fachfremden) Wissenschaftlern - ist. Ohne hier auf die Geschichte der Bionik einzugehen, soll daher ein weiterer Versuch unternommen werden, den Begriff in seiner ingenieurwissenschaftlichen Bedeutung zu schärfen.

Aus der Biologie sind eine große Menge an erstaunlich gut an ihre jeweiligen Umwelt- und Lebensbedingungen angepassten Tier- und Pflanzenarten bekannt und dokumentiert. Für den Biologen ist seine Arbeit häufig mit der Entdeckung, Beschreibung und Einordnung abgeschlossen, aber den echten Bioniker interessiert nun genau, auf welche Art und mit welchen Mitteln diese besondere Anpassung bzw. Überlebensfähigkeit erreicht wurde. Im einzelnen versucht er aufzudecken, welche Prinzipien sich hinter diesen "Maßnahmen" verbergen. Im Idealfall lassen sich so einzelne allgemeine Prinzipien herausarbeiten, die nun auch in die Konstruktion von Anlagen bzw. Auslegung von Prozessen einfließen können. Der Kern der "bionischen" Methode ist damit ein wissenschaftlicher Ansatz, der aus dem Verstehen der biologischen Anpassung und der nachfolgenden Adaption der damit zusammenhängenden Prinzipien auf den ingenieurwissenschaftlichen Kontext besteht. Um ein zugrunde liegendes Prinzip zu finden, muss der Wissenschaftler also das Anpassungsproblem für die bestehende Lösung identifizieren.⁹³

⁹³ wie in diesem Sinne auch *Herrmann von Helmholtz* sagte: "Einen Naturvorgang verstehen heißt, ihn in Mechanik zu übersetzen."

Die Vielfalt der im Laufe der Evolution entstandenen Wege und Mittel, sich möglichst gut an die Lebensbedingungen anzupassen, bildet gewissermaßen einen Vorrat an Lösungen, welche die Natur für (zunächst unbekannte) Problemstellungen gebildet hat.⁹⁴ Selbstverständlich könnten solche und ähnliche Problemstellungen auch ohne Kenntnis der Bionik rein ingenieurwissenschaftlich gelöst werden, die Natur ist nicht prinzipiell besser. Aber es kann für einen beliebigen Konstruktions- oder Auslegungsprozess nur von Vorteil sein, wenn der ausführende Ingenieur dabei die durch Anwendung der bionischen Methode erhaltenen Prinzipien in seine Überlegungen zur Lösung mit einbezieht, also gewissermaßen "bionisch" denkt. Somit muss der Begriff Bionik korrekterweise als Methode verstanden werden.

Aber selbst dann, wenn eine evolutionäre Lösung als adaptierbare Lösung für ein bestimmtes ingenieurwissenschaftliches Problem identifiziert und verstanden wurde, sind noch weitere Fragen zu klären. Oft sind evolutionäre Anpassungen Ergebnisse einer Pareto-Optimierung (mehrdimensionale bzw. vektorielle Qualitätsfunktion), wie z.B. die Optimierung eines Vogelflügels hinsichtlich Auftrieb und Eigengewicht. Eine Isolierung und nachfolgende Optimierung der Teilprobleme führt daher nicht notwendig zu einem Gesamtoptimum. Zudem können auf Grund mangelnder Werkstoffeigenschaften oder auch unzureichender Fertigungsverfahren nicht alle Lösungen technisch umgesetzt werden.

Um die Bemühungen zur wissenschaftlichen Akzeptanz der Bionik bzw. ihrer Methode durch eine einheitliche Begrifflichkeit zu unterstützen, wurde erst in den letzten Jahren unter Mitwirkung namhafter Bioniker vom *VDI* eine Richtlinie erarbeitet (siehe Kapitel 12.1).

3.3.3 Evolution und Bionik

Nach dem allgemein anerkannten Stand der Wissenschaft ist die Artenvielfalt in Flora und Fauna durch die natürliche bzw. biologische Evolution entstanden. Dabei ist Evolution tatsächlich ein abstraktes Prinzip, universell und auch nicht an

⁹⁴ Der hier oft auch von Bionikern verwendete Begriff "Werkzeugkasten" bezeichnet dabei die Menge an herausgearbeiteten Lösungsprinzipien.

irdische Bedingungen - noch nicht einmal an materielle Phänotypen - gebunden⁹⁵. Es müssen lediglich folgende Stufen umgesetzt sein⁹⁶:

- Anfang: **P1** Erzeuge Realisierungen (Phänotyp) aus jeweils variiertem abstraktem Genotyp einer Basis⁹⁷ (Mutation und Realisation)
- P2** Ordne den Realisierungen über eine (abstrakte) Qualitätsfunktion eine Qualität zu (Bewertung)
- P3** Nehme den abstrakten Genotyp der besten Realisierung(en) als neue Basis der Variation (Selektion)
- P4** Starte mit dieser neuen Generation an **P1**

Unter den irdischen Bedingungen der Genese sind die Realisierungen offensichtlich materiell. Die Bewertung erfolgt über die Reproduktionsfähigkeit, die im Allgemeinen an die konstitutionelle Stärke gekoppelt ist. Diese Bewertung ist zugleich auch Auslese, in dem die beste Realisierung die höchste Reproduktionswahrscheinlichkeit hat. Der Genotyp wird für alle irdischen Arten jeweils in einer Nukleinsäuresequenz (DNS) gespeichert. Der Synthese des Phänotyps erfolgt in überaus komplexer und derzeit noch weitgehend unverstandener Weise, letztlich jedoch durch zeitlich und räumlich koordiniertes Kopieren von Sequenzabschnitten.

Bei der biologischen Evolution auf der Erde gibt es keine Meta-Evolutionsinstanz⁹⁸, welche den Prozess irgendwie steuert, überwacht oder gar vollführt. Vielmehr sind die Realisierungen selbst Träger des Evolutionsprinzips, so dass

⁹⁵ Immaterielle Realisierungen sind z. B. Regeln für Gesellschaftsspiele, wobei die Qualität hier den Spielgenuss in Relation zur Spielkomplexität (Erlernbarkeit) bemisst. Viele solcher Spielregeln werden über Generationen hinweg vererbt, ihre Regeln variieren nur noch gering. Dabei wäre in diesem Fall der Genotyp ein Punkt im Raum der parametrisierten möglichen Spiele.

⁹⁶ Im üblichen Sprachgebrauch wird häufig von Evolution gesprochen (z.B. "Evolution des Universums"), wenn lediglich eine zeitliche Entwicklung gemeint ist. Im allgemeinen stehen bei letzterer die dabei wirksamen Gesetze im Hintergrund bzw. sind unbekannt. Eine beliebige zeitliche Entwicklung ist daher keine Evolution, da nur bei letzter die genannten Prinzipien wie Realisation, Mutation und Reproduktion wirken.

⁹⁷ Mit abstraktem Genotyp sei die abstrahierte Form eines Parametersatzes zur Kodierung einer Realisierung bezeichnet.

⁹⁸ im Gegensatz zu den o. g. Spielen, welche eine Meta-Ebene zur Ausführung der Schritte benötigt

auch alle Parameter der Evolution selbst (z. B. Mutabilität) zu mutablen Eigenschaften der Realisierungen werden⁹⁹.

Im Sinne der Bionik als "Verwerter" der natürlich gegebenen Lösungslandschaft ist insbesondere die dort überaus verbreitete Optimierung auf Energie- und Ressourceneffizienz interessant. Gerade in der modernen Gesellschaft hat das Problem der Ressourcenverknappung eine zunehmende Bedeutung. Dieser Punkt kann in seiner Bedeutung für zukünftige Forschungen nicht überschätzt werden (siehe *Einleitung*, Kapitel 1).

Für einen an einer Einführung zur Bionik und ihrer Anwendung interessierten Ingenieur kann das Werk [48] von *W. Nachtigall* dienen, in welchem er über die Einführung hinaus zahlreiche Beispiele bionischer Anätze praxisnah erläutert.

3.3.4 Kausalität

Bedingung für das Funktionieren einer Optimierungsstrategie, die letztlich versucht, sich dem Gradienten der unbekanntes Funktion zu nähern, ist ein zumindest lokal stetiger Zusammenhang zwischen Änderungen der Objektparameter (bzw. Objektvariablen) und der Änderung der Qualität (differentielle Betrachtung). Dies ist äquivalent zur starken Kausalität eines Problems. Kausalität bedeutet hier, dass dem Problem eine gewisse Ordnung zugrunde liegt, also gleiche Ursachen auch gleiche Wirkungen haben¹⁰⁰. Schwach kausal bedeutet, dass kleine Ursachenänderungen auch große Wirkungsänderungen zur Folge haben können (Schmetterlingseffekt bzw. deterministisches Chaos in Strömungsvorgängen oder Billardeffekt). Starke Kausalität bedeutet dabei einschränkend, dass die Wirkungsänderungen proportional zu Ursachenänderungen sind. Für das Funktionieren der Evolutionsstrategie ist ein stark kausaler Zusammenhang zwischen den Objektparametern und der Objektqualität notwendig¹⁰¹. Die starke

⁹⁹ Nebenbei erklärt dies auch das Vorhandensein sehr unterschiedlicher Lebenslängen, Nachkommenszahlen und vielen weiteren die Fortpflanzung betreffende Eigenschaften. Beispielsweise haben Haie seit über 100 Millionen Jahren einen nahezu konstanten Genotyp und sehr geringe Reproduktionsraten, sie sind offensichtlich optimal angepasst.

¹⁰⁰ Ohne eine solche Ordnung ist eine Such- bzw. Optimierungsstrategie an sich sinnlos und kann sich nur auf rein stochastische Aktionen beschränken.

¹⁰¹ Dies gilt auch für die natürliche Evolution mit DNS-basierten Parametern, bei der sich Parameteränderungen diskret in der DNS-Aminosäure-Struktur niederschlagen. Freilich kann schon eine einzige Änderung fatale Folgen für das damit generierte Individuum durch Ausfälle elementarer Enzyme bzw. Bausteine haben, dennoch gilt die starke Kausalität auch hier in Anbetracht der Gesamtzahl der Codierungen und ihrer phänotypischen Ausprägungen.

Kausalität liegt darüber hinaus auch einem großen Teil der Lebenserfahrung zu Grunde und ist uns mithin selbstverständlich. Im Übrigen ist diese Forderung nach starker Kausalität diejenige Einschränkung, welche die Entwicklung der Evolutionsstrategie als bedingt universelles Optimierungsverfahren wieder aussichtsreich macht (siehe Kapitel 3.3.1).

3.3.5 Die Evolutionsstrategie

Die Idee, die natürliche bzw. biologische Evolution als abstraktes Prinzip zu verstehen, um in dessen Anwendung technische Optimierungsaufgaben zu lösen, geht auf den Forscher *Ingo Rechenberg* zurück. Aus den Eigenschaften der natürlichen Evolution leitete er abstrakte Optimierungsprinzipien her, welche er theoretisch untersuchte, katalogartig klassifizierte und unter dem Begriff Evolutionstechnik praktisch anwendbar aufbereitete.

Rechenberg stellt die Hypothese auf, dass die Evolution ein optimales Verfahren für die Anpassung der Lebewesen an ihre Umwelt darstellt, da die Evolution selbst ihre eigenen Parameter der Anpassung unterwirft (vgl. [58])¹⁰². In dem Sinne, dass überhaupt erst die natürliche Evolution zu Lösungen führt, die unter einem bionischen Aspekt betrachtet werden können, gehört ihre technische Adaption - die Evolutionsstrategie - strenggenommen nicht zur Bionik, sondern ist vielmehr Teil einer "Meta"-Bionik, die außerhalb unseres irdischen evolutionären Geschehens existiert. Die Evolutionsstrategie ist damit eine Anwendung dieser "Meta"-Bionik, da sie einen "natürlichen" (sogar potentiell extraterrestrischen) Prozess versteht, abstrahiert und dadurch als Prinzip anwendbar macht¹⁰³.

Zur Anwendung der Evolutionsstrategie als sog. Evolutionstechnik benötigt man zunächst eine parameterbasierte Realisierungsvorschrift. Als Qualitätsmessung dient ein Skalaroperator $Q(x_1, x_2, \dots, x_n)$ über die Komponenten des Objektparametersatzes bzw. Objektparametervektors¹⁰⁴. In dieser skalaren Operation

¹⁰² Die offensichtliche Frage, welche Qualitätsfunktion bei dieser Optimierung der Evolutionsparameter (z. B. Mutagenität, Lebensdauer, Populationsdichte etc.) für jede Spezies gilt, muss hier unbeantwortet bleiben. Zu vermuten ist, dass sich im Laufe dieser Anpassung ein optimales globales Gleichgewicht zwischen den Spezies einstellt.

¹⁰³ "Natürlich" sei hier insofern verstanden, dass die Natur hier nicht nur als alles irdische, sondern als alles um uns herum existierende verstanden wird, einschließlich des Universums. "Meta-Bionik" möge daher auch den Begriff Bionik als biologisch=erdgebunden inspirierte Methode zu einer kosmischen erweitern. Die Parallelen zur Mathematik oder physikalischen Gesetzen lassen alle drei miteinander verschwimmen.

¹⁰⁴ eines wohldefinierten Vektorraumes

wird das Ziel der Optimierung abgebildet, so dass der skalare Qualitätswert der gewünschten Objektqualität proportional ist.¹⁰⁵ Der Typ des Optimums - Maximum oder Minimum - ist nicht von Belang, da eine Äquivalenz zwischen Minimum- und Maximum-Suche bezüglich der Qualitätsfunktion Q gilt:

$$\max Q(\underline{x}) = -\min[-Q(\underline{x})] \quad ^{106}. \quad (3.34)$$

Da nur die Rangfolge der Qualitätswerte gebildet werden muss, ist für diese lediglich ein Ordnungskriterium nötig. Daher entfallen auch besondere Anforderungen an die Glattheit der unbekanntes Qualitätsfunktion. Leider ist oft auch ihre Topologie unbekannt und damit auch die Anzahl ihrer lokalen Optima. Selbst die Existenz eines gesuchten globalen Optimums ist nicht immer gesichert. Hier können schon im Vorfeld physikalische oder auch logische Überlegungen einen sinnvollen Einsatz einer Optimierung abklären¹⁰⁷.

Rechenberg und später *Hans-Paul Schwefel* entwickelten die Theorie der Evolutionsstrategie ausgehend von der sog. (1+1)-Strategie und erweiterten deren Aussagen sukzessiv auf die (μ, λ) -Strategie (vgl. [57]). Der fundamentale Unterschied beider Strategietypen - in der Schreibweise durch jeweils $+$ (Plus-Strategie) oder $,$ (Komma-Strategie) verdeutlicht - besteht in dem Verbleib der Eltern im "Genpool". Eine Plus-Strategie lässt den Elter nie "sterben", der Elter bildet gewissermaßen eine Elite. *Rechenberg* entwickelte seine Theorien mit dem Ziel, Aussagen über die Fortschrittsgeschwindigkeit herleiten zu können, den entscheidenden Parameter zur Evaluation einer (funktionierenden) Optimierungsstrategie.

Die unbekanntes Qualitätsfunktion wird zunächst durch ein quadratisches Polynom genähert ("Quadrik"), was sich später aus der Theorie selbst als nicht-einschränkend erklären lässt. An Hand von Beispielfunktionen (Kreiskuppe, Korridor) werden verschiedene Parameter der Evolutionsstrategie hergeleitet. Aus der (1+1)-Strategie leitet *Rechenberg* das Fortschrittsmaximum für eine Fortschrittswahrscheinlichkeit von $W_e \approx \frac{1}{5}$ für verschiedene exemplarische Qualitätsfunktionen

¹⁰⁵ Wäre dies als funktionaler Zusammenhang bekannt, wäre die Anwendung der Evolutionsstrategie überflüssig, die Mathematik hält hier viele Verfahren bereit, um das Optimum zu finden (vgl. Kapitel 2.3).

¹⁰⁶ Zum Beispiel entspricht der Suche nach dem maximalen Wirkungsgrad der Suche nach dem minimalen Energieeinsatz für ein gegebenes Resultat.

¹⁰⁷ Beispielsweise ist der Wirkungsgrad als Qualitätswert nach oben beschränkt ($\eta < 1$), also als Ordnungskriterium gut geeignet.

(z. B. Korridor- und Kugelmodell) her¹⁰⁸. Da sich dieser Wert auch bei Betrachtungen anderer Qualitätsfunktionen als Schlüsselwert herausstellt, ist dies auch darüber hinaus unter dem Namen "**1/5-Erfolgsregel**" bekannt.

Bei Einschränkungen des Suchgebietes bzw. sehr anisotropen Topologien (z. B. schmaler Grat) versagt diese einfache Regel jedoch. Überlegen ist hier die mutative Schrittweitenregelung, welche zusätzlich auch die Schrittweite der einzelnen Nachkommen einem mutativen Variationsprozess unterwirft. Das Analogon in der Biologie ist die unterschiedliche Mutabilität verschiedener Gene¹⁰⁹. Der Schrittweitenänderungsfaktor α kann dabei statt als logarithmisch-normalverteilter Multiplikator auch symmetrisch¹¹⁰ angewendet werden.

3.3.6 Aufbau der Evolutionsstrategie

3.3.6.1 Allgemeines

Vorraussetzung für die Anwendung der Evolutionsstrategie als Optimierungsverfahren ist die Konstruktionsvorschrift, die es erlaubt, aus einem Satz reeller Objektparameter eine Instanz des zu optimierenden Objekts (Phänotyp) zu schaffen (entspricht der Genexpression¹¹¹). Sei also $\underline{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ mit $x_i \in \mathbb{R}$ (n -Tupel) ein Individuum. Akzeptiert man die damit verbundenen Bedingungen, kann die Realisierung G im folgenden vereinfachend als ein Punkt im Vektorraum

¹⁰⁸ Der Name "1/5-Erfolgsregel" heißt anschaulich, dass jede 5. Mutation erfolgreich ist, also mit einer Qualitätsverbesserung einhergeht, wenn die Schrittweite optimal eingestellt ist. Die Regel ist: Wird diese Erfolgswahrscheinlichkeit im Test unterschritten, ist die Schrittweite zu verkleinern und vice versa. Der Schrittweitenänderungsfaktor sollte dabei erfahrungsgemäß etwa $\alpha \approx 1.3 \dots 1.5$ sein. Die Erfolgswahrscheinlichkeit wird jede n . Generation geprüft. Exemplarisch: $W_{e,opt} = 1/2e \approx 0.184$ für das Korridormodell, $W_{e,opt} = 0.270$ fürs Kugelmodell.

¹⁰⁹ Der Mutabilität entspricht quasi, wie "ausgereift" bzw. optimiert die phänotypische Entsprechung dieser Sequenz ist. Je mutabler eine genotypische Sequenz, desto fraglicher und damit veränderbarer ist die phänotypische Entsprechung.

¹¹⁰ Die zu variierenden n Schrittweiten werden zu gleichen Anteilen jeweils mit α und α^{-1} multipliziert. Darüber hinaus und insbesondere, falls n ungerade ist, kann α auch bei einem Teil der Schrittweiten unverändert bleiben.

¹¹¹ Es ist dabei völlig ohne Belang, ob dies virtuell am Computer, über ein CAD/CAM-System oder in einer Werkstatt per Hand erfolgt.

\mathbb{R}^n geschrieben werden¹¹². Die Realisierung $G(\underline{x})$ wird über eine skalare Funktion $Q(G)$ bewertet, $Q: G \in \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ordnet also der Realisierung eine reelle Zahl zu, die Qualität.

Wichtiger Bestandteil der Strategie ist eine stochastische Variation der Datensätze. Um ein neues Individuum als Nachkomme zur Bewertung zu bringen, wird aus den bereits erzeugten und bewerteten Datensätzen (Eltern) nach einer noch näher zu bestimmenden Vorschrift ein neuer Datensatz (Nachkomme) generiert.

Punktmutation

Im Speziellen wird jeder reelle Objektparameter des Datensatzes variiert, in dem ihm eine Zufallsgröße z aufaddiert wird. Während die sog. Schrittweite δ für den Mutationsschritt konstant bleibt, ist die stetige Zufallsgröße z mit der Dichtefunktion

$$f(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.35)$$

und den Parametern μ (Erwartungswert) und σ^2 (Varianz) normalverteilt: $z \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ ¹¹³.

¹¹² Der Begriff Vektor bzw. seine Schreibweise soll hier nicht streng tensoriell verstanden werden, sondern lediglich als n -Tupel in einer vereinfachenden Bezeichnung für einen Punkt im \mathbb{R}^n . Insbesondere trifft dies für den realen und nahezu euklidischen Raum mit seiner definierten Metrik zu, wenn die Punkte im Raum über Abbildungen zur Konstruktion einer geometrischen Realisierung verwendet werden.

¹¹³ Für $\mu=0$ und $\sigma=1$ geht die Dichtefunktion in die einer Standardnormalverteilung über.

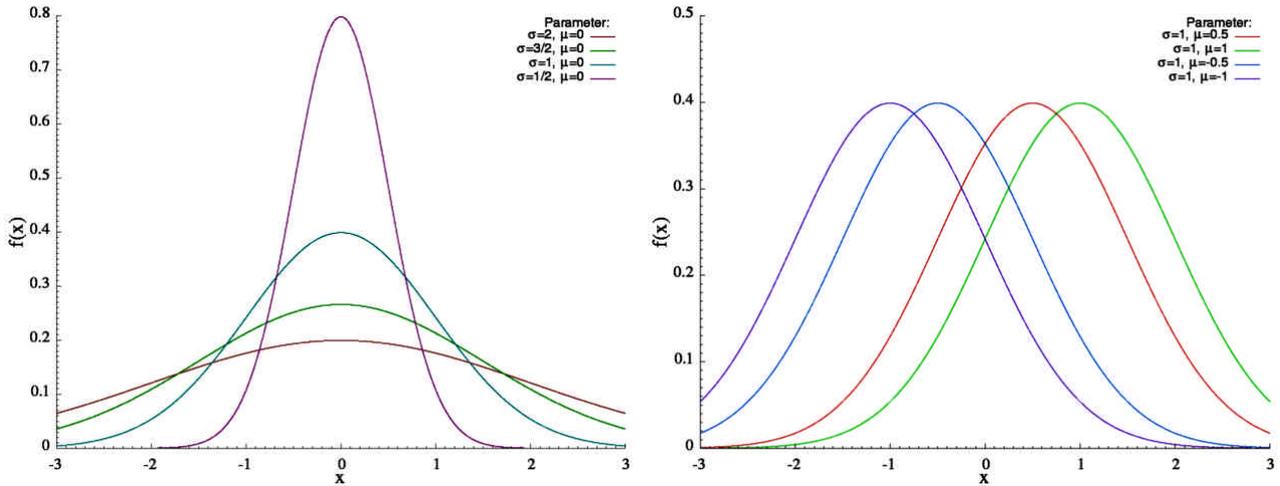


Abbildung 17: Beispiele der Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilungen (Glockenkurve) für unterschiedliche Streuungen (σ) und Erwartungswerte (μ)

Die Abbildung 17 veranschaulicht die Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung. Die Mutationen ergeben eine Punktwolke um die ursprüngliche Realisierung herum, der Punktabstand zur ursprünglichen Realisierung ist normalverteilt. Die Qualität des Zufallsgenerators (die Unkorreliertheit der Werte) ist dabei untergeordnet. Wichtiger ist dessen Isotropie, also die Nicht-Bevorzugung einer Mutationsrichtung.

3.3.6.2 Fortschritt und Evolutionsfenster

Um das Fortschreiten (also Verbessern der Ausgangslage) der Evolutionsstrategie zu bemessen, liegen folgende Konvergenzmaße nahe:

Fortschrittsgeschwindigkeit:
$$\varphi = \frac{\text{zurückgelegter Weg}}{\text{Anzahl der Mutationen}}$$

Erfolgswahrscheinlichkeit:
$$W_e = \frac{\text{erfolgreiche Mutationen}}{\text{Gesamtzahl der Mutationen}}$$

Die starke Kausalität des Zusammenhangs zwischen der Änderung der Objektparameter der Qualitätsfunktion und ihres Wertes bedingt nun, dass in einer ε -Umgebung um den Objektparametervektor \underline{x} auf der tangentialen Hyperebene das Verhalten der Qualitätsfunktion linearisiert werden kann. In diesem Fall verlaufen dort die Hyperlinien gleicher Qualität parallel. Akzeptiert man einen gewissen Linearitätsfehler, so kann man die ε -Umgebung auf ein Gebiet mit dem Linearitätsradius δ ausdehnen. Auf Grund der lokalen Linearität liegen bei N stochastisch verteilten Versuchen mit Objektparametern, die diesem Bereich entstammen, die Hälfte der Qualitäts- bzw. Fitness-Werte im Bereich verbesserter Resultate. Die Abbildung 18 veranschaulicht die Verhältnisse im linearisierten

Nahbereich eines Ausgangspunktes (Elter) ¹¹⁴ für den 2D-Fall bzw. auch im Falle einer ebenen Qualitätsfunktion. Die Hälfte der auf dem Linearitätsradius δ zufällig verteilten (hier zudem randverteilten) Nachkommen stellen einen Fortschritt dar, deren räumlicher Schwerpunkt befindet sich in einem mittleren Abstand S vom Elter entfernt. Nimmt man diesen als mittleren Ausgangspunkt der nächsten Generation, so stellt S ein statistisches Fortschrittsmaß dar: $\varphi(\delta) = \frac{S}{2}$.

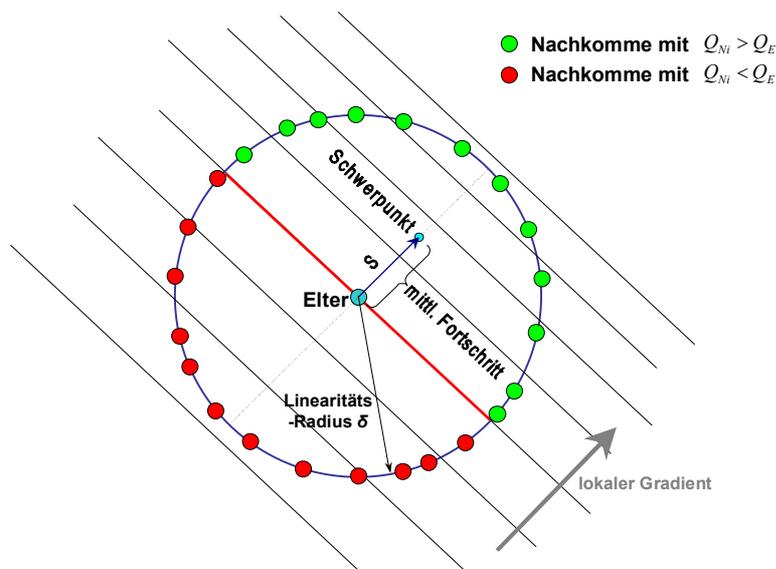


Abbildung 18: Fortschritt im idealisierten linearen Fall

Der Schwerpunkt-Abstand der Halbkugelschale im o. g. 2D-Fall beträgt $S = \frac{2}{\pi} \delta$.

Im Falle von volumenverteilten Nachkommen, bei denen diese in der Kreisfläche gleichverteilt positioniert werden, ändern sich die Verhältnisse nur dahingehend,

dass der Schwerpunkt-Abstand (im 2D-Fall) nun $S = \frac{4}{3\pi} \delta$ beträgt. Interessant

wird dies aber erst für große n , da dann asymptotische Aussagen getroffen werden können. Wie *Rechenberg* durch Rechnung zeigt (vgl. [57]), konvergiert die Fortschrittsgeschwindigkeit der Evolutionsstrategie für große n sowohl für rand-

als auch volumenverteilte ¹¹⁵ Nachkommen zu $\varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\delta}{\sqrt{n}}$, die Fortschritts-

¹¹⁴ In diesem Beispiel möge die bessere Qualität durch höhere Werte bestimmt sein. Die inverse Formulierung ist äquivalent (vgl. Gleichung 3.34).

¹¹⁵ Für steigende Dimensionen n einer Hyperkugel konzentriert sich das Gesamtvolumen zunehmend an der Oberfläche, die Verteilungen rand- und volumenverteilter Zufallsgrößen nähern sich damit immer mehr an.

geschwindigkeit der reinen Gradientenstrategie dagegen nur zu $\varphi_{gr} = \frac{\delta}{n}$, also um \sqrt{n} langsamer!¹¹⁶

Um das Fortschreiten der Evolutionsstrategie auch für nichtlineare Fälle zu ermitteln, kann man sich exemplarisch auf bestimmte Sonderformen der Qualitätsfunktion beschränken. Für einige 2D-Qualitätsgebirge wie Rampengrat und Kreiskuppe untersuchte *Rechenberg* den lokalen Fortschritt in Abhängigkeit von der Schrittweite bzw. $\varphi(\delta)$. Dabei stieß er auf die Gesetzmäßigkeit, dass die Erfolgswahrscheinlichkeit in allen Fällen um den Wert 1/5 lag. Das heißt verallgemeinert, die Schrittweite ist für diese Fälle dann optimal, wenn jede 5. Mutation eine Verbesserung bringt, anderenfalls ist sie anzupassen (siehe Kapitel 3.3.7).

In Verallgemeinerung dieser Beobachtung geht *Rechenberg* von einer allgemeinen stetigen Qualitätsfunktion aus. Er entwickelt die unbekannt Funktion in eine bis zu quadratischen Gliedern beschränkte Taylorreihe, es entsteht eine quadratische Näherung dieser universellen Qualitätsfunktion ("Quadrik"):

$$Q = Q_0 + \sum a_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j \quad ^{117}.$$

Durch eine Hauptachsentransformation lassen sich o. B. d. A. die gemischten Glieder vermeiden¹¹⁸:

$$Q = Q_0 + \sum c_i x'_i + \sum d_i x'^2_i.$$

Um die anschauliche Form eines konvexen Qualitäts-"Gebirges" zu erhalten, lässt man zunächst nur einen negativen 2. Summanden zu, die Hyperebene wird durch die quadratischen Glieder nach "unten" gezogen. Mit der Forderung nach $d_i \geq 0$ ergibt sich die Schreibweise aus [58]:

$$Q = Q_0 + \sum c_i x'_i - \sum d_i x'^2_i.$$

¹¹⁶ Vergleiche *Rechenbergs* "Goldene Regel": Der im linearisierten Bereich zu erwartende Qualitätsgewinn ist gleich dem zu erwartenden Qualitätsverlust gegenüber dem Elter. Würde man nun rein zufällig jede 2. Generation selektieren, wäre der Gesamtfortschritt Null.

¹¹⁷ Eine Anwendung der Einstein'schen Summenkonvention führt hier nicht zu generell leichter lesbarer Notation, so dass auf die entsprechende Schreibweise verzichtet wird. Sofern nicht anders angegeben, soll vereinfachend die Summation über den Laufindex i von $1 \dots n$ ausgeführt werden.

¹¹⁸ Die Erzeugung der Nachkommen erfolgt isotrop bzw. sphärisch gleichverteilt um den Elter, daher wirkt sich eine Drehung des Koordinatensystems hier nicht aus.

Nach der Mutation sind die Variablen x'_i nun $(0, \delta)$ -verteilt. Der 2. Summand $z^* := \sum c_i x'_i$ als Addition von $(0, \delta)$ -verteilten Zufallszahlen ist nun $(0, \delta^*)$ -verteilt mit $\delta^* = \delta \sqrt{\sum c_i^2}$ ¹¹⁹, der 3. Summand streut dabei nur wenig um den Erwartungswert¹²⁰.

$$\text{Erw}\left(\sum d_i x_i'^2\right) = \sum d_i \text{Erw}\left(x_i'^2\right) = \delta^2 \sum d_i.$$

Die mutative Qualitätsänderung $\Delta Q = Q - Q_0$ ergibt sich nun mit der o.g. Abkürzung $z^* := \sum c_i x'_i$ und dem Erwartungswert des 3. Summanden zu

$$\Delta Q = z^* - \delta^2 \sum d_i.$$

Betrachtet man andererseits den lokalen Gradienten der Qualitätsfunktion Q im (2D-) Qualitätsgebirge, so gehört zu einem Fortschritt auf dem Gradienten eine senkrechte Komponente ΔQ und eine horizontale Komponente Δx_k ¹²¹. *Rechenberg* bezeichnet die entsprechenden Blickwinkel auf den Fortschritt als Frosch- und Vogelperspektive (φ_{FP} und φ_{VP}), die jedoch nicht allgemein sind (vgl. [58]), siehe hierzu folgende Abbildung 19.

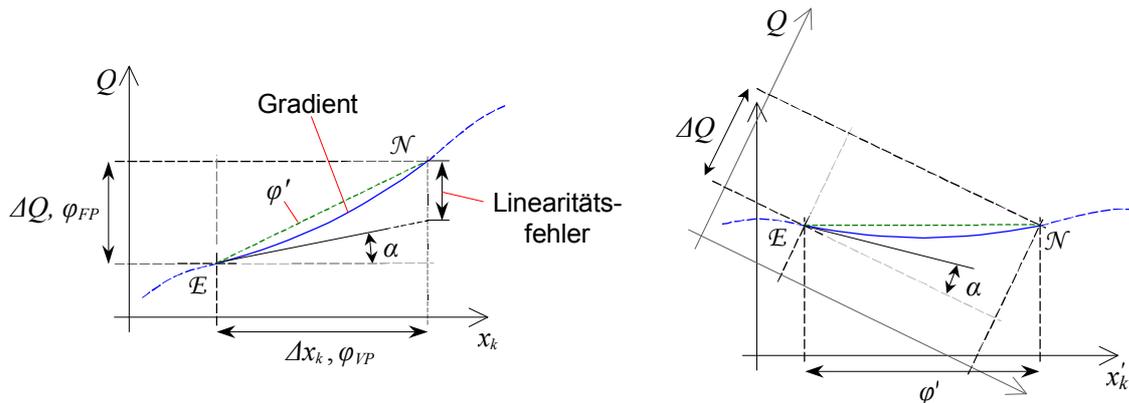


Abbildung 19: Seitlicher Blick auf den Fortschritt in einem 2D-Qualitätsgebirge (links absolut, rechts im lokalen Koordinatensystem)

¹¹⁹ Die Addition normalverteilter Zahlen ergibt wieder eine normalverteilte Zahl.

¹²⁰ Die Addition quadrierter $(0,1)$ -normalverteilter Zahlen ergibt eine $(n, \sqrt{2n})$ -normalverteilte Summe, die Streuung verschwindet also mit zunehmendem n .

¹²¹ Der Index k symbolisiere eine beliebige ausgezeichnete Richtung der n Koordinaten.

Der Anstieg der Hyperebene im Elternpunkt \mathcal{E} in Gradientenrichtung wird von den lokalen partiellen Ableitungen $\frac{\partial(\Delta Q)}{\partial x'_i} = c_i$ bestimmt, deren Mittelwert den Winkel gegenüber der Ebene ergibt:

$$\tan \alpha = \sqrt{\sum c_i^2} = \frac{\Delta Q}{\Delta x_k}.$$

Der eigentliche Fortschritt - weder eine Projektion auf die Ebene (Vogelperspektive) noch auf die Senkrechte (Froschperspektive) - kann nun als Gradientenprojektion $\varphi' = \frac{\Delta Q}{\tan \alpha}$ angegeben werden. Der Linearitätsfehler auf Grund der einer Gradientenkrümmung sei hierbei vernachlässigbar.

Obiges eingesetzt führt mit $z := \frac{z^*}{\sqrt{\sum c_i^2}}$ zum individuellen statistischen Fortschritt eines Nachkommens: $\varphi' = z - \frac{\sum d_i}{\sqrt{\sum c_i^2}} \delta^2$. Da nach Vereinbarung $d_i \geq 0$ gilt und z

sich symmetrisch um 0 verteilt, ist der Fortschritt statistisch zunächst negativ ($\tan \alpha \geq 0$ für $0 \leq \alpha \leq \pi/2$). Durch Selektion der höchsten Zufallszahl ändert sich dies jedoch entscheidend. Der Wert $u := z_{\max}$ aus λ Proben (bzw. Nachkommen) von $(0, \sigma^2)$ -verteilten Zufallszahlen z_i ist wieder eine normalverteilte Größe, aber mit nicht-symmetrischer Verteilung um den Nullpunkt. Mit zunehmender Proben- bzw. Nachkommenzahl $\lambda > 1$ steigt offensichtlich auch der Erwartungswert der Probe. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der höchsten Zufallszahl u einer normalverteilten Größe in Abhängigkeit der Probenzahl λ sei ohne Herleitung angegeben:

$$w_\lambda(u) = \frac{\lambda}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}u^2} \left(\frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{u}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \right)^{\lambda-1}. \quad (3.36)$$

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen exemplarische Verläufe der Wahrscheinlichkeitsdichte $w_\lambda(u)$.

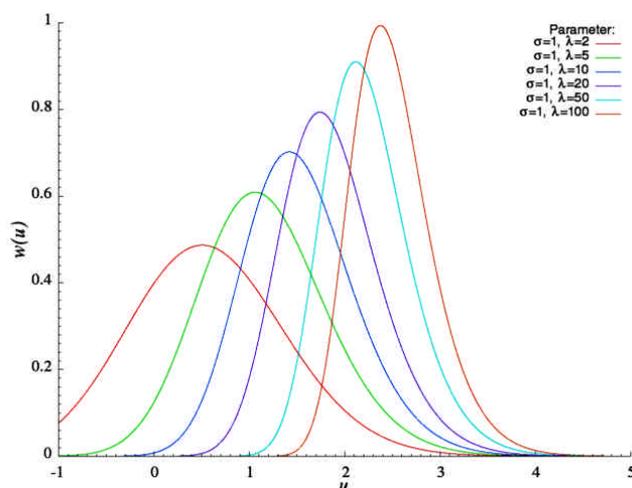


Abbildung 20: Beispiele der Wahrscheinlichkeitsdichte $w_\lambda(u)$ für unterschiedliche λ bei Streuung $\sigma=1$

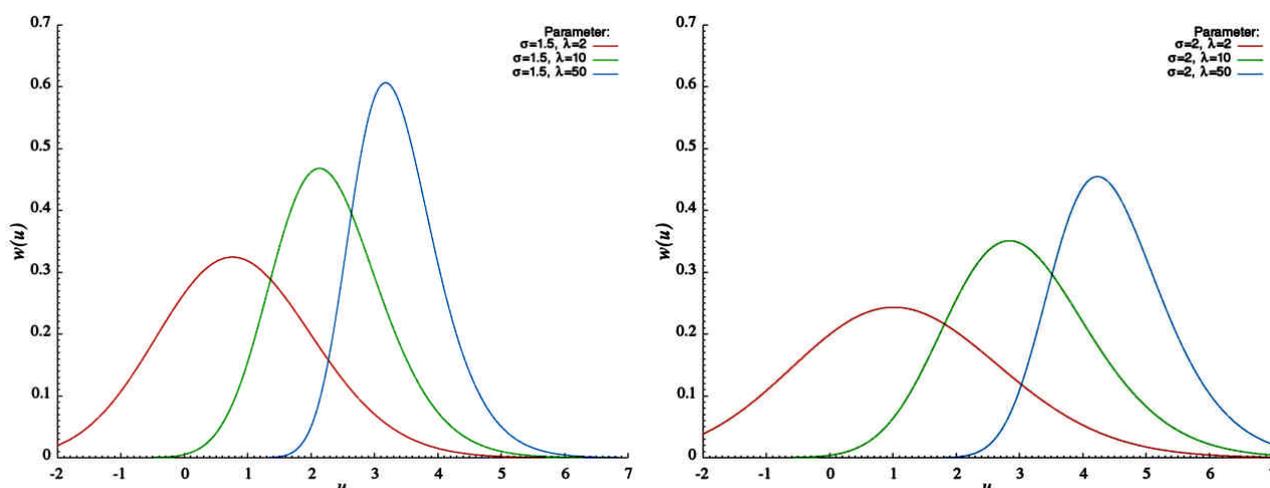


Abbildung 21: Beispiele der Wahrscheinlichkeitsdichte $w_\lambda(u)$ für andere Streuungen σ und Nachkommenszahlen λ

Der Übergang zum Erwartungswert des Fortschritts φ erfordert das Aufsummieren über alle möglichen Werte von u und ihrer jeweiligen Wahrscheinlichkeit, also Bildung des Integrals $F_u = \int u \cdot w_\lambda(u) du$ ¹²². Durch längere

Rechnung (vgl. [58]) lässt sich zeigen, dass das Integral einen nur von λ abhängigen Faktor $c_{1+\lambda}$ enthält:

¹²² Die Integrationsgrenzen sind abhängig von der Strategie. Da bei der Plus-Strategie der Elter im Selektionsvorrat verbleibt, treten keine negativen Werte von u auf.

$$c_{1;\lambda} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\lambda}{2^{\lambda-1}} \int_{z=\begin{cases} 0: "+" \\ -\infty: "," \end{cases}}^{\infty} z \cdot e^{(z^2)} [1 + \operatorname{erf}(z)]^{\lambda-1} dz.$$

Mit diesem sogenannten Fortschrittsfaktor¹²³ lautet nun der Erwartungswert für die Fortschrittsgeschwindigkeit $\varphi_{1;\lambda} = F_u - \frac{\sum d_i}{\sqrt{\sum c_i^2}} \delta^2$ bzw.

$$\boxed{\varphi_{1;\lambda} = c_{1;\lambda} \delta - \frac{\sum d_i}{\sqrt{\sum c_i^2}} \delta^2} \quad (3.37)$$

Setzt man jetzt abkürzend $\Omega := \frac{\sum d_i}{\sqrt{\sum c_i^2}}$ ¹²⁴ und multipliziert in Gleichung 3.37

beide Seiten mit $\frac{1}{c_{1;\lambda}^2} \Omega$, setzt anschließend zur Abkürzung noch $\Phi := \frac{\varphi_{1;\lambda}}{c_{1;\lambda}^2} \Omega$ als

dimensionslose Fortschrittsgeschwindigkeit und $\Delta := \frac{\delta}{c_{1;\lambda}} \Omega$ als dimensionslose

Schrittweite, so entsteht das zentrale Fortschrittsgesetz:

$$\boxed{\Phi = \Delta - \Delta^2} \quad (3.38)$$

Die folgende Abbildung 22 veranschaulicht die Wirkung des subtrahierten quadratischen Gliedes. Es wird deutlich, warum die richtige Schrittweite so bedeutend für das Voranschreiten der Evolutionsstrategie ist.

¹²³ Die Berechnung der Fortschrittskoeffizienten ist relativ aufwändig und wurde daher bereits katalogisiert. Zudem sind die entsprechenden Fortschrittsfaktoren der Komma-Strategie gegenüber denen der Plus-Strategie für Nachkommennzahlen λ ab etwa 5 nahezu gleich.

¹²⁴ *Rechenberg* nennt dies die quadratische Komplexität (vgl. [58]). Sie wird anschaulich durch das Verhältnis der quadratischen Absenkung zur Schiefe der Hyperebene im Elternpunkt gebildet.

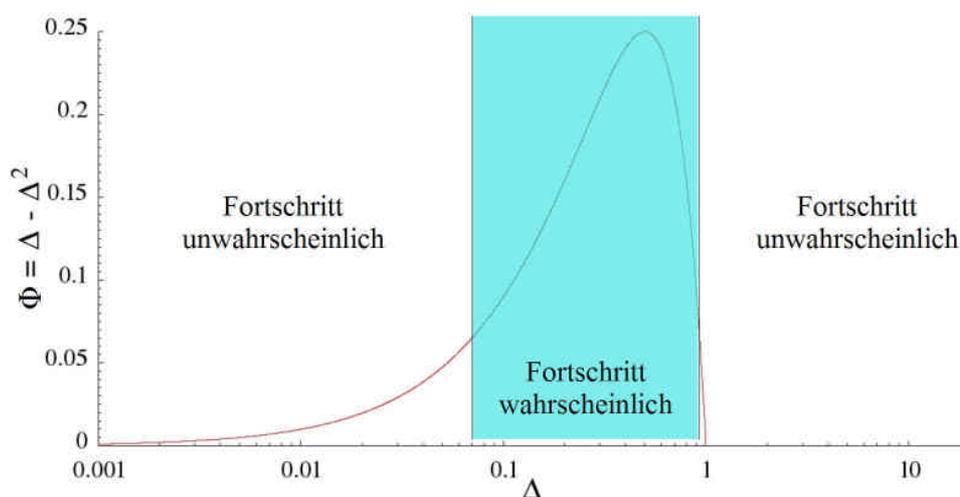


Abbildung 22: Verlauf der Funktion $\Phi=f(\Delta)$ zur Veranschaulichung des Evolutionsfensters

Im Übrigen wird bei dieser Schrittweite die Evolutionsstrategie in ihrer Reichweite bis zum quadratischen Glied beschränkt, sie sucht also immer lokal im Evolutionsfenster. Die anfängliche Einschränkung durch die Linearisierung wird somit gegenstandslos.

3.3.6.3 Schrittweitenregelung

Entscheidend für die Fortschrittsgeschwindigkeit auf dem Weg zum Optimum ist die Wahl der passenden Schrittweite in jeder Iteration. Prinzipiell gibt es hier unterschiedliche Herangehensweisen.

Da die Evolutionsstrategie als Optimierungsverfahren nur für den \mathbb{R}^n mit $n \gg 1$ interessant ist¹²⁵ und mit stochastischen Mutationen operiert, spielt die n -dimensionale Normalverteilung $\mathcal{N}(\underline{\mu}, \underline{C})$ eine wichtige Rolle. Sie ist durch den Mittel- bzw. Erwartungswert $\underline{\mu} \in \mathbb{R}^n$ und die Kovarianzmatrix $\underline{C} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ charakterisiert. Letztere ist eine symmetrische ($\underline{C} = \underline{C}^T$) und positiv-definite Matrix mit den individuellen Varianzen der Objektparameter in der Diagonale c_{ii} und den elementweisen Korrelationen $c_{ij} = c_{ji}$ ($i \neq j$) auf den Nebendiagonalen¹²⁶.

¹²⁵ Niedrigdimensionale Probleme werden gegebenenfalls einfacher mit anderen Verfahren optimiert, vgl. Kapitel 2.3.

¹²⁶ Falls die Korrelationen $c_{ij} = 0$ sind (die Komponenten der n -dimensionalen Normalverteilung sind unkorreliert), die Streuung für jedes Element gleich δ (Diagonale) und der Erwartungswert für alle Elemente gleich μ ist, so geht der allgemeine in den speziellen Fall eines Vektors von Zufallswerten einer Normalverteilung $\mathcal{N}(\mu, \delta)$ über.

1/5-Erfolgsregel

Aus der elementaren Theorie lässt sich eine zur höchsten Fortschrittsgeschwindigkeit führende Schrittweite folgern, die 1/5-Erfolgsregel (siehe Kapitel 3.3.6.2). Die isotrope Mutation $\underline{x}_N = \underline{x}_E + \delta \underline{z}$ (\underline{z} normalverteilt mit $\underline{z} \sim \mathcal{N}(\underline{0}, \sigma^2 \underline{I})$) verwendet eine globale Schrittweite δ , die Nachkommen \underline{x}_N sind damit $\mathcal{N}(\underline{x}_E, \sigma^2 \underline{I})$ -verteilt. Auf Grund der globalen Schrittweite bilden die Iso-Dichteflächen¹²⁷ der Mutationsverteilung konzentrische (Hyper-) Kugelschalen um den Elter-Punkt (siehe Abbildung 23). Die Kovarianzmatrix ist für die globale Schrittweite diagonalbesetzt und korrelationsfrei. Für Näheres zum Algorithmus siehe Kapitel 3.3.7.

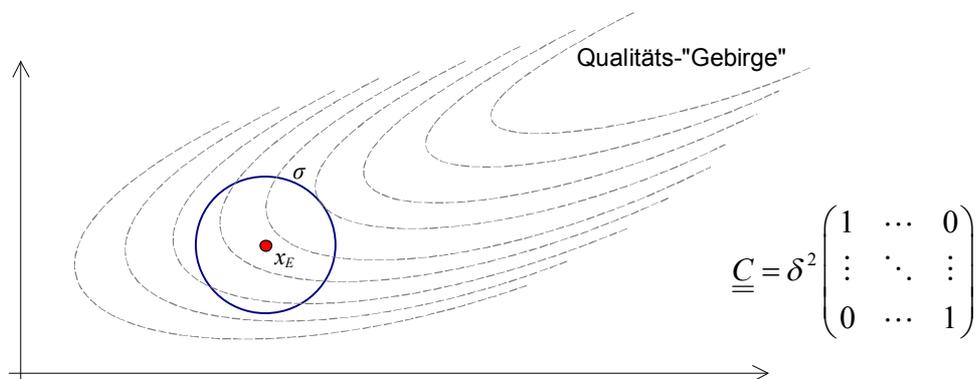


Abbildung 23: Beispielhafte Iso-Dichtelinie der isotropen Mutationsverteilung mit globaler Schrittweite σ um den Elter-Punkt (links); zugehörige Kovarianzmatrix (rechts)

An Beschränkungen des Gebietes und an Anisotropien (z. B. Grat oder spitze Winkel) führt die einfache 1/5-Erfolgsregel jedoch zu geringeren Fortschrittsgeschwindigkeiten in Gradientenrichtung bis hin zum Versagen.

Mutative Schrittweitenregelung - MSR

In Anlehnung an die Natur kann die Mutagenität bzw. Schrittweite selbst zu einer vererbbaaren individuellen Eigenschaft gemacht werden, man schließt daher von der Qualität der Nachkommen auf die hierhin geführte Schrittweite. Die Mutationsverteilungen werden nun für jeden Nachkommen bestimmt, ihre Iso-Dichteflächen bilden weiterhin - zwar unterschiedlich skalierte - (Hyper-) Kugelschalen um den Elter-Punkt. Der Mutation der Eltern-Schrittweite für alle λ Nachkommen $\delta_{Nk} = \delta_{Ek} \cdot \xi_k$ (ξ_k ist logarithmisch-normalverteilt, $k=1, \dots, \lambda$) folgt die Mutation der Nachkommen mit verschiedenen Schrittweiten: $\underline{x}_{Nk} = \underline{x}_E + \delta_{Nk} \underline{z}$. Wird

¹²⁷ welche auch Hyperflächen sind, ff.

die intermediäre Rekombination verwendet, so tritt an Stelle des Eltern \underline{x}_E der Schwerpunkt der μ besten Eltern $\underline{x}_E = \langle \underline{x}_{N1..\mu}^{(g-1)} \rangle$ ¹²⁸. Die Kovarianzmatrix bleibt bis auf unterschiedliche δ je Nachkommen gleich der Kovarianzmatrix der 1/5-Erfolgsregel.

Die Dichtefunktion der logarithmisch Normalverteilung lautet

$$f(x) = \begin{cases} x < 0: 0 \\ x \geq 0: \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \nu}{\sigma}\right)^2} \end{cases}$$

mit dem Parameter ν und $\sigma \in \mathbb{R}$, $\sigma > 0$. Eine hier wichtige Eigenschaft dieser Verteilung ist, dass sie nur positive Werte und dabei die gleiche Häufigkeit für Werte < 1 und > 1 besitzt. Dies verhindert bei der Mutation der Schrittweite eine bevorzugte Richtung. Die folgende Abbildung 24 zeigt diese Verteilungsdichte beispielhaft.

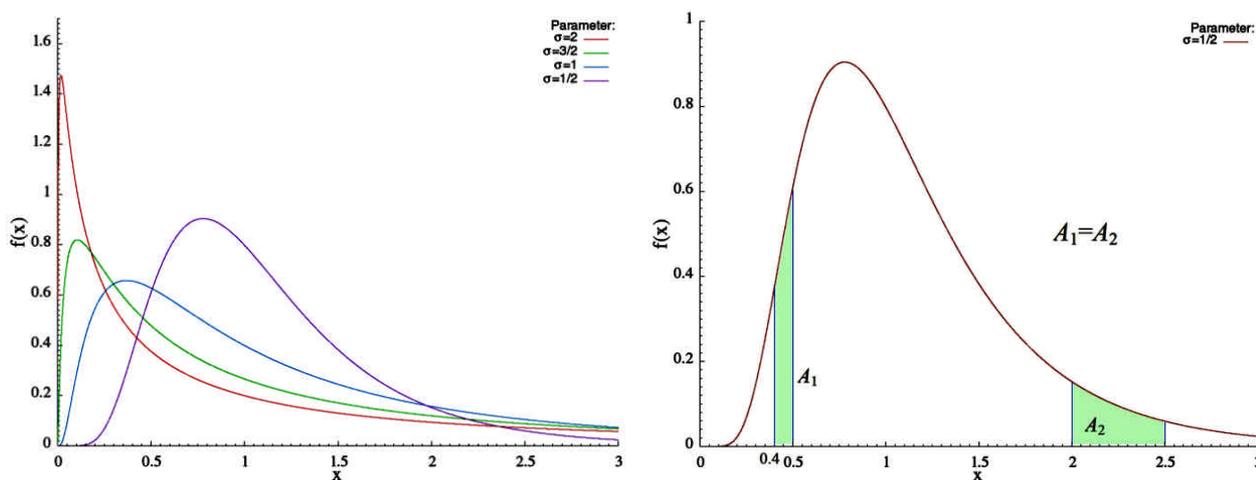


Abbildung 24: Logarithmische Normalverteilung und Flächengleichheit (mit $\nu=0$)

Eine Erweiterung der MSR besteht darin, die Schrittweite nicht skalar, sondern vektoriell zu behandeln. Jede Komponente des Objektparametervektors kann dann mit einer eigenen Schrittweite mutiert werden. Die Variation der Schrittweite erfolgt nun komponentenweise zuerst mit $\underline{x}_{Nk} = \underline{x}_E + \underline{z}'_k$ ($\underline{z}'_k = \underline{\underline{C}} \cdot \underline{z}_k$ für $k=1, \dots, \lambda$ und $C_{ij}=0$ für $i \neq j$) und damit $\underline{x}_{Nk} \sim \mathcal{N}(\underline{x}_E, \underline{\underline{C}})$. Die entstehende Mutationsverteilung bildet

¹²⁸ Der Klammeroperator $\langle \dots \rangle$ möge im Folgenden für die gewichtete Schwerpunktbildung

$$\langle W_{1..N} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1..N} W_i$$

einer allgemeinen Größe W stehen, wobei die Operation zulässig sein soll.

nun (Hyper-) Ellipsoidschalen, welche an den Koordinatenachsen ausgerichtet sind (siehe Abbildung 25). Die Kovarianzmatrix ist nun mit den komponentenweisen Schrittweiten diagonalbesetzt, aber korrelationsfrei.

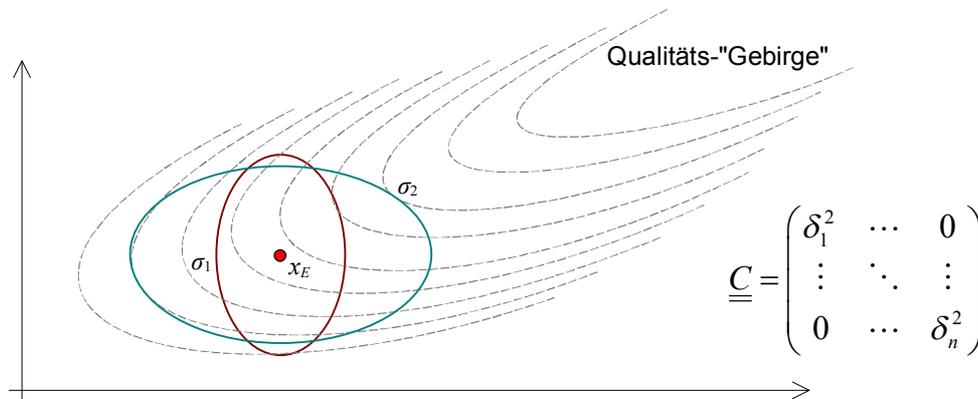


Abbildung 25: Beispielhafte Iso-Dichtelinien und Individuelle Schrittweiten σ_i für 2 Parameterkomponenten um den Elter-Punkt (links); zugehörige Kovarianzmatrix für alle Komponenten (rechts)

Die MSR versagt jedoch in Situationen, wo ungünstige Schrittweiten dennoch zu (unkorreliert) guten Qualitätswerten führen. Die unpassenden Schrittweiten werden vererbt und lassen den Fortschritt stagnieren. Daher sind bei der MSR relativ große Populationen erforderlich, damit aussichtsreiche Kombinationen erhalten bleiben. Die Einführung von komponentenweisen Schrittweiten führt außerdem zu einer nachteiligen Abhängigkeit der Objektparameter vom verwendeten Koordinatensystem. Zudem funktioniert die MSR nicht ohne weiteres mit der Rekombination (siehe Kapitel 3.3.8).

Methoden, welche die Selektion ungünstiger Strategieparameter vermindern, werden unter dem Begriff Entstochastisierung bzw. Derandomisierung zusammengefasst. Das Ziel hierbei ist, nicht rein stochastisch bzw. isotrop zu suchen, sondern durch Ausnutzen von Objektparameter-Korrelationen bzw. dem Gedächtnis über die vergangenen erfolgreichen Schritte zu Aussagen zu gelangen, die eine Vergrößerung des Fortschritts in Richtung höchster Qualitätszunahme ermöglichen.

Kumulative Schrittweitenadaption - KSA

Neben den genannten Methoden kann jedoch auch die Anordnung der bisher erfolgten Mutationsschritte evaluiert werden, denn optimalerweise liegen aufeinanderfolgende Schritte im Mittel orthogonal zueinander. Durch die Kumulation der tatsächlichen Mutationsschritte und Vergleich mit der idealen

Folge kann daher ein Korrekturmaß für die Schrittweite abgeleitet werden (siehe Abbildung 26), gewissermaßen aus dem Gedächtnis der bisherigen Realisierungen:

- Mutationsschritte im Mittel antiparallel orientiert
→ aktuelle Schrittweite zu groß
- Mutationsschritte im Mittel parallel orientiert
→ aktuelle Schrittweite zu klein

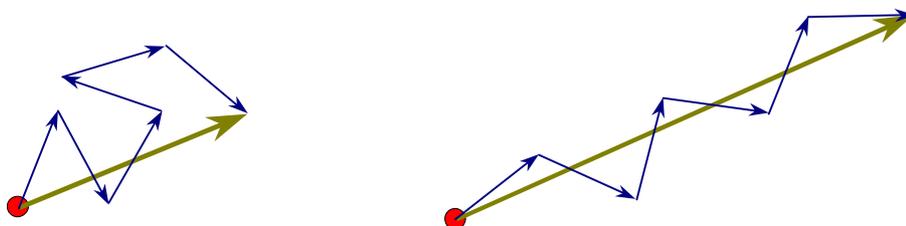


Abbildung 26: Unterschiedliche Länge des Evolutionspfades bei gleicher Einzelschrittlänge und -anzahl (schematisch)

Die Mutation der Nachkommen unterscheidet sich von der MSR darin, dass die bei der Erzeugung der λ Nachkommen zu verwendende Eltern-Schrittweite nicht über den Schwerpunkt derjenigen der μ Eltern durch Rekombination gewonnen wird, sondern durch ein Korrekturmaß im Vergleich zu einer idealen Mutations-schrittfolge. Näheres zum Algorithmus findet der Leser in Kapitel 3.3.7.

Kovarianzmatrix-Adaption - CMA

Schwefel schlug erstmals in [68] sog. korrelierte Mutationen vor, welche die zu einem n -dimensionalen Zufallsvektor gehörende Kovarianzmatrix aus n (Hauptachsen-) Varianzen und $\frac{n^2 - n}{2}$ Drehwinkeln bildete. Mutations-
verteilungen werden damit durch Skalierungen der isotropen Verteilung und nachfolgenden Drehungen des achsparallelen Mutationsellipsoids erzeugt. Leider ist diese Methode nicht invariant gegenüber dem gegebenen Koordinatensystem, da es aus diesem konstruiert wird.

Bisher erfolgt die Steuerung der Schrittweite proportional zur Varianz (Pfadlänge). Eine andere Möglichkeit besteht in der Manipulation der Mutationsverteilung über deren Kovarianzen. Denn bei vielen Problemstellungen gilt, dass die (genotypischen) Objektparameter untereinander korreliert sind. Ein Objektparameter des Genotyps beeinflusst dabei mehrere phänotypische Merkmale. Im Gegenzug kann auch ein phänotypisches Merkmal von mehreren genotypischen

Objektparametern bestimmt sein¹²⁹. Durch diese Korrelationen äußert sich die Nicht-Orthogonalität der (vereinfachend linear angenommenen) Transformation der Genexpression. Mittels einer Orthogonalisierung dieser Transformation lassen sich die Mutationsoperatoren separieren, die Mutationsverteilung kann an der Richtung des maximalen Fortschritts ausgerichtet werden.

Die Iso-Dichtelinien der Mutationsverteilungen sind (Hyper-) Ellipsoidschalen, die in Richtung des Gradienten ausgerichtet sind (siehe Abbildung 27). Um die Mutationsverteilung der Nachkommen am Gradienten auszurichten, ist die Bestimmung der Korrelationen c_{ij} der Kovarianzmatrix $\underline{\underline{C}}$ nötig.

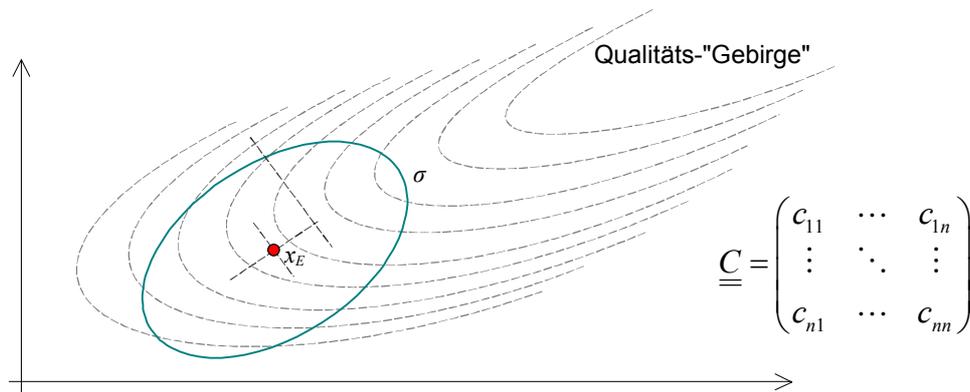


Abbildung 27: Beispielhafte Iso-Dichtelinie und Schrittweite σ im lokalen Koordinatensystem um den Elter-Punkt (links); zugehörige Kovarianzmatrix (rechts)

Ohne Herleitung sei folgendes angegeben (vgl. [25]). Die Kovarianzmatrix lässt sich immer in eine Diagonalmatrix $\underline{\underline{S}}$ und eine Orthogonalmatrix $\underline{\underline{R}}$ zerlegen:

$$\underline{\underline{C}} = \underline{\underline{R}} \cdot \underline{\underline{S}}^2 \cdot \underline{\underline{R}}^{-1} = \dots = \underline{\underline{R}} \cdot \underline{\underline{S}} (\underline{\underline{R}} \cdot \underline{\underline{S}})^T \quad (3.39)$$

Die Spalten von $\underline{\underline{R}}$ enthalten dabei die Komponenten der Hauptachsen (normierte Eigenvektoren von $\underline{\underline{C}}$), die Diagonale von $\underline{\underline{S}}$ die Achslängen des Verteilungsellipsoids¹³¹. Letztere Diagonalelemente S_{ii}^2 sind zudem die Eigenwerte von $\underline{\underline{C}}$. Der gesuchte $\mathcal{N}(\underline{\underline{0}}, \underline{\underline{C}})$ -verteilte Zufallsvektor kann nun aus einem linear transformierten unkorrelierten $\mathcal{N}(\underline{\underline{0}}, \underline{\underline{I}})$ -verteilten Zufallsvektor $\underline{\underline{z}}$ erzeugt werden: $\underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{z}} \sim \mathcal{N}(\underline{\underline{0}}, \underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{A}}^T)$ und $\underline{\underline{A}} := \underline{\underline{R}} \cdot \underline{\underline{S}}$. Die Mutation der λ Objektparametervektoren erfolgt nach $\underline{\underline{x}}_{Nk} = \underline{\underline{x}}_E + \delta_E \underline{\underline{R}} \cdot \underline{\underline{S}} \cdot \underline{\underline{z}}_k$. Die Matrizen $\underline{\underline{R}}$ und $\underline{\underline{S}}$ sind aus der Kovarianz-

¹²⁹ Polyphänie (Pleiotropie) bzw. Polygenie

¹³⁰ mit $\underline{\underline{S}}^2 = \underline{\underline{S}} \underline{\underline{S}}^T$, $\underline{\underline{R}}^{-1} = \underline{\underline{R}}^T$

¹³¹ und damit - trotz global festgelegter Schrittweite - wieder komponentenweise Schrittweiten

matrix berechenbar. Die Änderungen an der Kovarianzmatrix werden ähnlich zur KSA aus dem kumulierten Evolutionspfad abgeleitet (siehe Kapitel 3.3.7). Die Schrittweite δ_E wird über eine gesondert akkumulierte Pfadlänge berechnet, welche nur die unskalierte Richtungsinformation (\underline{R}) auswertet.

Wie sich überraschenderweise herausstellte, verbessert sich durch die CMA auch die Fähigkeit der Evolutionsstrategie, global zu suchen, obwohl die CMA in Hinsicht auf die verbesserte lokale Suche entwickelt wurde. Begründen lässt sich dies auch mit der deutlich gegenüber isotroper Mutationsverteilung vergrößerten Schrittweite. Insgesamt ist daher die CMA-Evolutionsstrategie durch ihre Fähigkeit zur Autoadaption an verschiedene Qualitätsfunktionen besonders als Black-Box-Optimierungsverfahren geeignet. *Hansen* (vgl. [25]) stellt darüber hinaus auch die Ähnlichkeit der Adaptation der Kovarianzmatrix in der Evolutionsstrategie mit der Approximation der inversen Hesse-Matrix in der klassischen Optimierung heraus, wie z. B. im Quasi-Newton-Verfahren. Die CMA-Evolutionsstrategie ist daher mit einem Verfahren 2. Ordnung (mit eben wesentlich verbesserten Konvergenzeigenschaften) vergleichbar. Sie markiert auch einen gewissen Endpunkt in der Entwicklung verbesserter Mutationsverteilungen, da sich diese nicht besser als in Gradientenrichtung ausrichten lassen. Verbesserungen der CMA im Sinne der effektiveren Adaption sind aber noch Gegenstand der Forschung (vgl. z. B. [26]).

3.3.7 Algorithmen

Zusammenfassend werden die praktikablen Algorithmen einiger markanter Evolutionsstrategie in ansteigender Komplexität aufgeführt, welche zur Anwendung kommen können. Auf Grund der geschilderten Vorteile der CMA-Evolutionsstrategie wird diese letztlich für die Anwendung auf die vorliegende Aufgabenstellung favorisiert.

3.3.7.1 (1+1)-Evolutionsstrategie mit 1/5-Erfolgsregel

Die (1+1)-Strategie ist die einfachste und abstrakteste Evolutionsstrategie. Sie liefert gute Ergebnisse für glatte konvexe Qualitätsgebirge und unbeschränkte Suchgebiete. Der Nachkomme N in der Generation g vom Elter E wird mit dem Mutationsvektor \underline{z} und einer globalen Schrittweite δ (Mutabilität) gebildet:

P1 Start mit Elter $\underline{x}_E^{(g)}$ und Schrittweite $\delta^{(g)}$

P2 Erzeuge 1 Nachkommen: $\underline{x}_N^{(g)} = \underline{x}_E^{(g)} + \delta^{(g)} \cdot \underline{z}$, $\underline{z} \sim \mathcal{N}(\underline{0}, \frac{1}{\sqrt{n}})$ normalverteilt

$$\boxed{\text{P3}} \quad \text{Selektion: } \underline{x}_E^{(g+1)} = \begin{cases} \underline{x}_N^{(g)} : & Q(\underline{x}_N^{(g)}) > Q(\underline{x}_E^{(g)}) \\ \underline{x}_E^{(g)} : & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\boxed{\text{P4}} \quad \text{Anpassung der Schrittweite: } \delta^{(g+1)} = \begin{cases} \delta^{(g)} \cdot \alpha : & W_e > \frac{1}{5} \\ \delta^{(g)} \cdot \frac{1}{\alpha} : & W_e < \frac{1}{5} \\ \delta^{(g)} : & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\text{wobei } W_e = \frac{\text{erfolgreiche Mutationen}}{\text{Gesamtzahl der Mutationen}}$$

$\boxed{\text{P5}}$ Ziel erreicht? Ja: **Fertig**

Nein: dann neuen Elter $\underline{x}_E^{(g)} \leftarrow \underline{x}_E^{(g+1)}$ und neue Schrittweite $\delta^{(g)} \leftarrow \delta^{(g+1)}$ setzen; gehe zu $\boxed{\text{P2}}$

Im Allgemeinen wird der Schrittweitenänderungsfaktor mit $\alpha \approx 1.3$ gesetzt und nach jeweils n Generationen getestet¹³². Bei der Implementierung der (1+1)-Strategie muss der Zufallsvektor \underline{z} auf die Länge 1 normiert werden, was durch eine $(0, \frac{1}{\sqrt{n}})$ -Verteilung erreicht wird (vgl. [58]). Der Elter verbleibt bei einer Plus-Strategie zudem im Pool.

3.3.7.2 (1,λ)-Evolutionstrategie mit MSR

Der Algorithmus der MSR soll am Beispiel der Komma-Strategie gezeigt werden, bei welcher in jeder neuen Generation der Elter aus dem Pool der $\lambda+1$ Individuen entfernt wird. Der Ablauf ist wie vorher, aber nun wird über alle Nachkommen iteriert ($\forall k=1, \dots, \lambda$):

$\boxed{\text{P1}}$ **Start** mit Elter $\underline{x}_E^{(g)}$ und Schrittweite $\delta^{(g)}$

$\boxed{\text{P2}}$ Variation der Mutabilität: $\delta_{Nk}^{(g)} = \delta^{(g)} \cdot \xi_k$, dabei ist $\xi_k \sim \mathcal{LN}(0, \varsigma)$, also log-normalverteilt

$\boxed{\text{P3}}$ Erzeuge λ Nachkommen: $\underline{x}_{Nk}^{(g)} = \underline{x}_E^{(g)} + \delta_{Nk}^{(g)} \cdot \underline{z}_k$

Für die Variation der Schrittweiten wird hier eine logarithmisch normalverteilte Größe verwendet.

¹³² Wenn die Schrittweite nach jeder Generationen geändert wird, gilt für $W_e < 1/5$: $\delta^{(g+1)} = \delta^{(g)} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\alpha}}$.

3.3.7.3 $(\mu/\rho, \lambda)$ - bzw. $(\overline{\mu}/\mu, \lambda)$ -Evolutionstrategie mit MSR

Die intermediäre Rekombination verwendet die besten μ Nachkommen für die Bildung der neuen Elterngeneration¹³³. Für die Basis der neuen Generation wird der Schwerpunkt der ausgewählten Nachkommen gebildet:

- P1** Start mit Elter $\underline{x}_E^{(g)}$ und Schrittweite $\delta^{(g)}$
- P2** Variation der Mutabilität: $\delta_{Nk}^{(g)} = \delta^{(g)} \cdot \xi_k$
- P3** Erzeuge λ Nachkommen: $\underline{x}_{Nk}^{(g)} = \underline{x}_E^{(g)} + \delta_{Nk}^{(g)} \cdot \underline{z}_k^{(g)}$
- P4** Selektion der μ besten Nachkommen N ($\forall i=1, \dots, \mu$):
 $\underline{x}_i^{(s)} = \underline{x}_{Ni}^{(g)}$ mit den zugeordneten Qualitäten $Q(\underline{x}_{Ni}^{(g)})$, wobei diese absteigend sortiert sein mögen nach
 $Q(\underline{x}_{N1}^{(g)}) \geq Q(\underline{x}_{N2}^{(g)}) \geq \dots \geq Q(\underline{x}_{N\mu}^{(g)}) \left\{ \geq \dots \geq Q(\underline{x}_{N\lambda}^{(g)}) \right\}$, sowie ihren zugehörigen Schrittweiten $\delta_i^{(s)} = \delta_{Ni}^{(g)}$
- P5** Bildung des neuen Basis-Elters als Schwerpunkt der selektierten Nachkommen: $\underline{x}_E^{(g+1)} = \langle \underline{x}_{1..\mu}^{(s)} \rangle = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1..\mu} \underline{x}_j^{(s)}$. Auch die Schrittweite dieser Nachkommen wird gemittelt: $\delta^{(g+1)} = \langle \delta_{1..\mu}^{(s)} \rangle = \frac{1}{\mu} \sum_{j=1..\mu} \delta_j^{(s)}$ (Vererbung der Mutabilität)
- P6** Ziel erreicht? Ja: **Fertig**
Nein: dann neuen Elter $\underline{x}_E^{(g)} \leftarrow \underline{x}_E^{(g+1)}$ und neue Schrittweite $\delta^{(g)} \leftarrow \delta^{(g+1)}$ setzen; gehe zu **P2**

3.3.7.4 $(\overline{\mu}/\mu, \lambda)$ -Evolutionstrategie mit KSA

Die KSA ändert das Vorgehen gegenüber der vorigen Variante dahingehend ab, dass die neue Basisschrittweite über die Gleichung $\delta^{(g+1)} = \delta^{(g)} \cdot e^d$ mit dem

Exponenten $d = \frac{\| \underline{s}^{(g+1)} \| - \hat{\chi}_n}{D \cdot \hat{\chi}_n}$ bestimmt wird (vgl. [25]). Hierbei ist $\hat{\chi}_n$ der

¹³³ In der Literatur wird $\mu=0.27 \cdot \lambda$ empfohlen.

Erwartungswert eines $\mathcal{N}(\underline{0}, \underline{I})$ -verteilten n -dimensionalen Zufallsvektors¹³⁴. Der Evolutionspfad \underline{s} wird kumulativ durch Summation der Differenzen zweier aufeinanderfolgender Elternschwerpunkte gebildet:

$$\underline{s}^{(g+1)} = (1-c)\underline{s}^{(g)} + c_u \frac{\sqrt{\mu}}{\delta^{(g)}} \left(\underline{x}_E^{(g+1)} - \underline{x}_E^{(g)} \right), \quad (3.40)$$

wobei $\underline{x}_E^{(g)}$ und $\underline{x}_E^{(g+1)}$ die aufeinanderfolgenden Schwerpunkte der μ Eltern der jeweiligen Generation sind¹³⁵. Mit dem Dämpfungsparameter $D \geq 1$ kann die Empfindlichkeit der Schrittweitenregelung eingestellt werden. Der Faktor $c \in (0,1]$ bzw. c_u fungiert als Blendmaß für die Varianz von \underline{s} , da $1 = c_u^2 + (1-c)^2$ gilt. Das Kumulationsverhalten wird wesentlich über das Produkt $c \cdot D$ gesteuert. Je kleiner es ist, desto eher neigt die Schrittweitensteuerung zum Schwingen. Eine stärkere (größere) Dämpfung stabilisiert das Verfahren, reduziert aber auch die Fortschrittsgeschwindigkeit. Nach einem Vorschlag aus [25] wird mit $\underline{s} = \underline{0}$, $c = \frac{1}{\sqrt{n}}$ und $D = \sqrt{n}$ gestartet¹³⁶.

3.3.7.5 $(\overline{\mu}/\mu, \lambda)$ -Evolutionsstrategie mit CMA

Das Vorgehen bleibt - mit Ausnahme folgender Änderungen - gleich. Die λ Nachkommen werden über die Vorschrift

$$\underline{x}_k^{(g+1)} = \underline{x}_E^{(g)} + \delta^{(g)} \underline{\underline{R}}^{(g)} \cdot \underline{\underline{S}}^{(g)} \cdot \underline{\underline{z}}_k^{(g)} \quad (3.41)$$

erzeugt, wobei $\underline{x}_E^{(g)} = \langle \underline{x}_{1..μ}^{(s)} \rangle^{(g-1)}$ und $\delta^{(g)} = \langle \delta_{1..μ}^{(s)} \rangle^{(g-1)}$ wieder aus der vorhergehenden Generation stammen. Hierbei bilden die Isodichteflächen von $\underline{\underline{S}}^{(g)} \cdot \underline{\underline{z}}_k^{(g)}$ der isotropen Zufallsvektoren $\underline{\underline{z}}_k$ zunächst achsparallele Ellipsoide, welche dann noch durch Drehtransformation mit $\underline{\underline{R}}^{(g)} \dots$ in Gradientenrichtung orientiert

¹³⁴ Je mehr also \underline{s} einem $\mathcal{N}(\underline{0}, \underline{I})$ -verteilten n -dim. Zufallsvektor gleicht, desto geringer fallen auch die Änderung der Schrittweite δ aus. $\hat{\chi}_n$ kann laut [25] durch $\sqrt{n} \left(1 - \frac{1}{4n} + \frac{1}{21n^2} \right)$ genähert werden.

¹³⁵ Der normierte Term des letzten Mutationsschrittes kann auch als $\mathcal{N}(\underline{0}, \underline{I})$ -verteilter n -dimensionaler Zufallsvektor dieses Schrittes geschrieben werden: $\frac{1}{\delta^{(g)}} \left(\underline{x}_E^{(g+1)} - \underline{x}_E^{(g)} \right) = \underline{\underline{z}}_E^{(s)}$.

¹³⁶ Aus $1 = c_u^2 + (1-c)^2$ folgt $c_u = \sqrt{2c - c^2}$.

werden. $\underline{\underline{S}}$ ist dabei eine $n \times n$ -Diagonalmatrix und $\underline{\underline{R}}$ eine $n \times n$ -Orthogonalmatrix. Die Bildung des Evolutionspfades erfolgt dabei analog zur KSA. Die Kovarianzmatrix wird generationsweise adaptiert:

$$\underline{\underline{C}}^{(g+1)} = (1 - c_c) \underline{\underline{C}}^{(g)} + c_c \underbrace{\underline{\underline{S}}^{(g+1)} \left[\underline{\underline{S}}^{(g+1)} \right]^T}_{\underline{\underline{C}}'} \quad (3.42)$$

Mit dem Faktor $c_c \in [0,1)$ kann die Stärke der Adaption angepasst werden. Für die Anpassung der Schrittweite wird ein weiterer Evolutionspfad summiert, bei welchem die Skalierung der Diagonalelemente weggelassen wird:

$$\underline{\underline{s}}_{\delta}^{(g+1)} = (1 - c_{\delta}) \underline{\underline{s}}_{\delta}^{(g)} + c_{\delta u} \underline{\underline{R}}^{(g)} \underline{\underline{S}}^{(g)-1} \underline{\underline{R}}^{(g)-1} \frac{\sqrt{\mu}}{\delta^{(g)}} \left(\underline{\underline{x}}_E^{(g+1)} - \underline{\underline{x}}_E^{(g)} \right). \quad (3.43)$$

Die Bestimmung der neuen Schrittweite erfolgt analog zur KSA, nur wird im Exponenten d in der Gleichung $\delta^{(g+1)} = \delta^{(g)} \cdot e^d$ die Größe $\underline{\underline{s}}_{\delta}^{(g+1)}$ statt $\underline{\underline{s}}^{(g+1)}$ verwendet. Für die Konstanten c_{δ} bzw. $c_{\delta u}$ gelten ebenso die Angaben aus der

KSA. Als Startwerte werden der zusätzliche Parameter $c_c = \frac{2}{n(n+1)}$ ¹³⁸ und die

Kovarianzmatrix auf $\underline{\underline{C}} = \underline{\underline{I}}$ gesetzt (vgl. [25]).

3.3.8 Rekombination

Bei einer $(\mu/\rho, \lambda)$ -Strategie erzeugen $\mu \geq \rho \geq 1$ Eltern $\lambda \geq \mu$ Nachkommen. Um einen Vorteil aus der Selektion mehrerer bester Nachkommen zu ziehen, kann man deren Eigenschaften zusammenführen. Allgemein notiert bedeutet die $(\mu/\rho, \lambda)$ -Strategie eine Einschränkung auf nur ρ Eltern (z. B. $\rho=2$ für bisexuell), jedoch erweist es sich immer als Vorteil, alle μ Nachkommen an diesem Prozess zu beteiligen¹³⁹. Diese Rekombination kann nun diskret oder intermediär erfolgen. Bei der diskreten Rekombination spendieren die μ Nachkommen jeweils bestimmte Eigenschaften (Komponenten des Objektparameter-Vektors, vergleichbar mit den

¹³⁷ $\underline{\underline{s}} \underline{\underline{s}}^T$ ist wie ein Tensorprodukt zu berechnen: $C'_{ij} = s_i s_j$ (ohne Basis geschrieben)

¹³⁸ Der reziproke Wert $\frac{1}{2}n(n+1)$ entspricht dann gerade der Anzahl freier Parameter von $\underline{\underline{C}}$.

¹³⁹ Aus der Biologie ist bekannt, dass Phagen diese Multirekombination verwenden ($\rho = \mu$). Zudem ist diese rechentechnisch besonders einfach zu implementieren.

Genetischen Algorithmen bzw. mit der natürlichen Rekombination)¹⁴⁰, bei der intermediären Rekombination wird aus den μ Objektparameter-Vektoren ein Schwerpunkt gebildet, welcher als Basis zur Erzeugung neuer Nachkommen dient. Es ergibt sich eine sehr vorteilhafte Einschnürung des Variationsquerschnittes in Gradientenrichtung¹⁴¹. Darüber hinaus bietet die intermediäre Mischung weitere Vorteile gegenüber der diskreten Mischung. Daher wird fast immer die $(\overline{\mu/\mu}, \lambda)$ -Evolutionstrategie mit intermediärer Rekombination bevorzugt. In der Schreibweise wird aus der diskret rekombinierten $(\mu/\mu, \lambda)$ -Strategie die mit intermediärer Rekombination notierte $(\overline{\mu/\mu}, \lambda)$ -Strategie bzw. verkürzt dargestellt als $(\overline{\mu}, \lambda)$ -Strategie.

Auch in der Biologie verzichten nur wenige primitive Organismen auf die Möglichkeit der Rekombination. Daher lässt sich im Sinne des bionischen Ansatzes vermuten, dass die Rekombination ein effektives Werkzeug der Evolution ist. Die $(\overline{\mu/\mu}, \lambda)$ -Strategie bietet gegenüber der Strategie ohne Rekombination eine um μ erhöhte maximale Fortschrittsgeschwindigkeit gegenüber der Strategie ohne Rekombination sowie eine hierdurch deutlich verbesserte Robustheit. Auch Schwefel verglich in seiner Dissertation (vgl. [67]) die Leistungsfähigkeit der Evolutionstrategie gegenüber klassischen Optimierungsverfahren. Die Rekombination erwies sich dabei besonders bei hochdimensionalen Problemen als notwendig für die Konvergenz (vgl. [29]) und sollte daher immer verwendet werden.

3.3.9 Algebra und Schachtelung

Im Kontext der Evolutionstrategie gibt es auch die Variante, in Analogie zur Natur der Evolution statt nur einzelner Individuen auch zusammenfassende Populationen von Individuen zu unterwerfen. Die Mutation einer Populationen eröffnet dabei zusätzliche Möglichkeiten der Steuerung. Es können auf diese Weise mehrere Evolutionspfade eingeschlagen werden, die erst nach einer Phase der Isolation evaluiert werden.

¹⁴⁰ diskret: Auswahl der Individuen, die eine jeweilige Eigenschaft beisteuern, kontinuierlich: die Parameterwerte der rekombinierenden Individuen werden zu einem Mittelwert verrechnet. Scheinbar ist die biologische Rekombination kontinuierlich, basiert aber letztlich auf der Auswahl unterschiedlicher Gensequenzen beider Individuen, da es keine kontinuierlichen Mischzustände zwischen den 4 elementaren Nukleinsäuren der DNS gibt.

¹⁴¹ Die diskrete und auch die Thales-Rekombination in der einfachen Form sind abhängig vom verwendeten Koordinatensystem.

Analog zur handlichen Klammernotation hat *Rechenberg* in [58] eine allgemein verwendete Algebra vorgeschlagen. Sie ermöglicht für solcherart geschachtelte Evolutionsstrategien die übersichtliche Notation der jeweiligen Selektionsart, der Individuen- und Populationszahlen, Isolationsdauern usw. in folgender Weise:

$$\left[\mu'/\rho' + \lambda'(\mu/\rho + \lambda)^\gamma \right]^{\gamma'} \quad (3.44)$$

wobei gilt:

μ'	Zahl der Eltern-Populationen
ρ'	Zahl der Misch-Populationen (Mischungszahl Populationen)
λ'	Zahl der Nachkommen-Populationen
γ'	Zahl der Populations-Generationen

sowie:

μ	Zahl der Eltern-Individuen
ρ	Zahl der Misch-Individuen (Mischungszahl Individuen)
λ	Zahl der Individuen-Nachkommen
γ	Zahl der Individuen-Generationen (Generationen der Isolation in einer Population).

Die verschiedenen Evolutionspfade lassen sich nun unterschiedlich ausnutzen:

- In der übergeordneten Struktur der Populationsebene werden nur die Strategieparameter variiert, es entsteht dort eine Strategieoptimierung.
- In der Selektion der besten Population wird eine andere Qualitätsfunktion verwendet. Damit entsteht zusätzlich zur Möglichkeit, die konkurrierenden Ziele in einer Qualitätsfunktion unterzubringen, eine elegante Umsetzung der Paretooptimierung.
- Weiterhin können für jede Population weit auseinanderliegende Startpunkte gewählt werden, um die Suche nach dem globalen Optimum zu unterstützen.

3.3.10 Intrinsische Parallelität

Die Evaluation der Nachkommen geht bekanntlich lediglich als sortierbarer Qualitätswert in die Evolutionsstrategie ein. Von der Evolutionsstrategie wird dabei generationsweise ein Objektparametersatz für jedes zu evaluierende Individuum bereit gestellt. Schon für den Fall einer $(1, \lambda)$ -Strategie (und höher mit mindestens $\lambda > 1$) bietet sich die Möglichkeit, die Qualität der Nachkommen parallel zu ermitteln, ohne die Struktur der Evolutionsstrategie ändern zu müssen.

Die im vorliegenden Anwendungsfall der Evolutionsstrategie verwendete Qualitätsermittlung ist ein überaus rechenaufwändiger Prozess (CFD). Hinter

diesem Aufwand tritt der innerhalb der Evolutionsstrategie selbst zu leistende Rechenaufwand vollkommen zurück. Aus diesem Grund ist hier nicht weiter von Belang, in wie weit diese strategieinternen Prozesse parallel gestaltet oder überhaupt in ihrer Effizienz gesteigert werden können.

Das Verteilen der Objektparametersätze auf mehrere Recheninstanzen und die damit verbundene parallele Qualitätsermittlung wird als Farming bezeichnet. Erfolgt dies synchron, muss nach dem Übermitteln der Objektparametersätze jeweils auf das Ende der Berechnung gewartet werden. Dies ist bei relativ gleich bleibenden Rechenzeiten unproblematisch, führt jedoch bei stark variierenden Laufzeiten zu partiellem Leerlauf. Die asynchrone Arbeitsweise setzt dagegen auf die volle Auslastung der Rechenknoten mit überlappenden Generationen, was jedoch bei sich akkumulierenden Verzögerungen problematisch wird. Der sog. Steady-State-Algorithmus der Evolutionsstrategie erlaubt nun, jedes berechnete Individuum sofort der Population zugänglich zu machen. Insbesondere *Wakunda* beschäftigte sich erstmals mit dieser Möglichkeit in [76].

Anders als zu den Anfängen der Evolutionsstrategie kann heute bei computer-gestützten Berechnungen¹⁴² der Individuenqualität auf um viele Größenordnungen schnellere Rechner zurückgegriffen werden. Durch die erreichte Verkleinerung sind heute in Arbeitsplatzrechnern nahezu ausschließlich Prozessoren zu finden, die mehrere CPU-Kerne auf einem Steckplatz vereinen. Im Serverbereich findet man zudem häufig Hauptplatinen mit mehreren dieser CPU-Steckplätze. So ist es heute möglich, schon auf einem einzelnen Arbeitsplatz-PC die Qualitätsberechnung im o. g. Farming für etwa 20 bis 30 Nachkommen gleichzeitig zu berechnen¹⁴³. Auch die natürliche Evolution arbeitet parallel, teilweise mit um Größenordnungen höherem λ . Bei noch größerer Zahl zur Verfügung stehenden Recheneinheiten kann sinnvoll auch über Populationen hinweg parallelisiert werden (siehe Kapitel 3.3.9). Diese intrinsische Parallelität der Evolutionsstrategie ist somit bestmöglich für eine Implementierung auf moderner Computertechnik geeignet.

¹⁴² häufig über komplexe Simulations-Software, die eine sehr realitätsnahe Problemabbildung erlaubt

¹⁴³ Falls die Berechnung der Qualität über einen parallelisierbaren Algorithmus möglich ist, so kann natürlich auch die sequenzielle Qualitätsberechnung für alle Nachkommen einer Generation Vorteile aus mehreren Recheneinheiten ziehen. Bei solchem Vorgehen wird jedoch immer eine bremsende Kommunikation der beteiligten Recheneinheiten untereinander notwendig, die umso zeitaufwändiger wird, je mehr Einheiten an einer Rechnung beteiligt sind.

4 Optimierungsumgebung

4.1 Allgemeines

Wie in Kapitel 3.3 dargelegt, bietet die Evolutionsstrategie als Optimierungsverfahren bei komplizierten und unklaren Zusammenhängen entscheidende Vorteile. Auf Grund ihrer Robustheit und der in Kombination mit der CMA erreichbaren Autoadaptation an die tatsächliche Qualitätsfunktion ist ein Black-Box-Ansatz möglich, der die Notwendigkeit eines tiefen Problemverständnisses umgeht. Die Strömungsvorgänge bei der Propeller-Propulsion sind überaus komplex und detailreich, so dass sich hier ein passendes Anwendungsszenarium ergibt. Viele andere Forschungsprojekte nutzten die Evolutionsstrategie bereits erfolgreich, um eine verbesserte Auslegung von Propulsoren oder eine Optimierung von Propulsionsparametern zu erreichen (siehe Kapitel 2.4).

Die Evolutionsstrategie benötigt - wie bereits in Kapitel 3.3.5 bemerkt - nur eine Aussage über die Rangfolge der Qualitäten $Q_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ der Nachkommen $i=1, \dots, \lambda$, jedoch kein explizites Qualitätsmaß. Unter der Voraussetzung der Konvergenz der numerischen Qualitätsberechnung (CFD) kann daher ihre Genauigkeit zurück genommen werden¹⁴⁴. Dennoch bleiben die Anforderungen an die CFD-Bewertung sehr hoch, allein auf Grund der hohen Anzahl vorzunehmender Berechnungen sollte sie - damit sich die Optimierung überhaupt lohnt - numerisch sehr ausgefeilt sein¹⁴⁵. Es kommt daher im vorgegebenen Rahmen für diese Aufgabe nur eine existierende und bewährte Software in Frage. Obwohl eine solche Software meist für einen interaktiven Einsatz konzipiert wird, ist für ihre Verwendung in der Optimierungsumgebung eine nicht-interaktive Steuerbarkeit für die automatische Bewertung notwendig. Gut entwickelte Software-Pakete besitzen daher meist eine Skript-Schnittstelle, welche die sonst interaktiv vorzunehmenden Einstellungen, Änderungen u. ä. programmgesteuert ausführt. Im vorliegenden Fall einer parametrisierten Strömungskonfiguration und der Simulation der Strömungsvorgänge sind mehrere solcher komplexen Programmpakete skriptbasiert zu verknüpfen. Daher bildet die Evolutionsstrategie zwar den Kern- bzw. Startpunkt der Optimierung, bedeutet aber umfänglich nur einen verschwindenden Anteil am gesamten Software-Aufwand.

¹⁴⁴ Falls die berechnete von der tatsächlichen Qualität nur um einen Faktor abweicht, ist der systematische Fehler Null (optimale Eigenschaft der Qualitätsfunktion).

¹⁴⁵ Das Verfahren muss robust und dabei numerisch stabil sein, siehe Kapitel 3.2.

Aus der zunächst nachzuweisenden Konvergenz der CFD-Rechnung für ein bestimmtes Vorgehen bei der Diskretisierung folgt, dass eine Rangfolge berechneter Qualitäten identisch mit der Rangfolge tatsächlicher Objektqualitäten ist. Sofern die Evolutionsstrategie selbst konvergiert (also zu einer Lösung findet), führt sie daher zu lokalen, evtl. auch globalen Optimalvarianten des Objekts.

4.2 Komponenten des Optimierungszyklus'

Der Zyklus der zum Einsatz kommenden $(\bar{\mu}/\mu, \lambda)$ -Strategie besteht aus folgenden Teilen, die in folgender Abbildung als weiße Ellipsen dargestellt sind (siehe Kapitel 3.3.6):

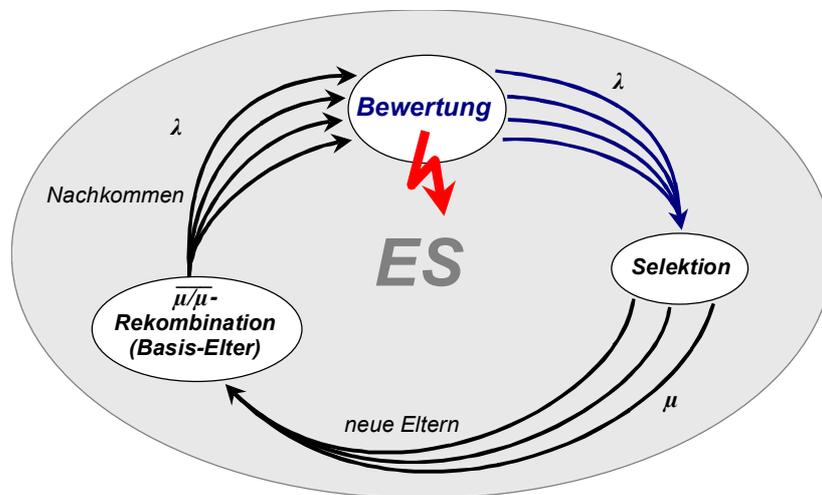


Abbildung 28: Optimierungszyklus der $(\bar{\mu}/\mu, \lambda)$ -Strategie

Ein Basis-Elter (aus dem Schwerpunkt der selektierten besten μ Nachkommen gebildet) ist der Ausgangspunkt für λ Nachkommen, welche durch Variation dieses Basis-Elters entstehen. Die λ Nachkommen werden einer (parallel oder seriell vorgenommenen) Bewertung unterzogen. Aus der Selektion der μ besten Eltern wird wieder ein neuer Basis-Elter durch intermediäre Rekombination gebildet.

Die aufwändige Qualitätsberechnung erfordert eine detailliertere Betrachtung. Trennt man den modellabhängigen Teil als sog. Realisierungskomponente und den berechnungsabhängigen Teil als sog. Qualitätskomponente des Optimierungszyklus' ab, so ergibt sich unter Verwendung der geplanten spezialisierten Software-Pakete folgende Struktur (Abbildung 29):

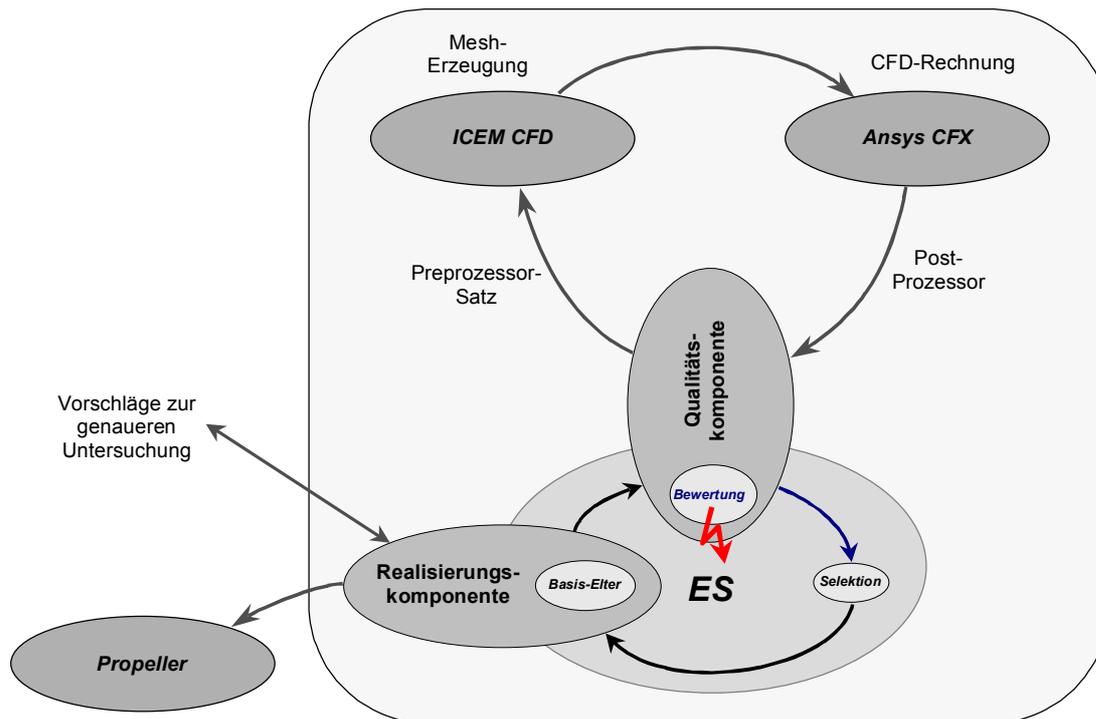


Abbildung 29: Aufbau der Optimierungsumgebung

In der Realisierungskomponente wird aus dem Objektparametervektor des jeweiligen Nachkommens eine geometrische 3D-Parametrisierung erzeugt. Die Eigenschaften der Realisierungskomponente werden vom konkreten Anwendungsfall - hier der Propellerparametrisierung - bestimmt. Die Qualitätskomponente arbeitet nun nicht auf dem Objektparametervektor, sondern auf dem daraus erzeugten geometrischen Modell. Diese Komponente verwaltet den genauen Prozess der Qualitätsberechnung, welcher folgende skriptgesteuerten Schritte in Folge beinhaltet:

- Erzeugen des Gitters (mittels *Ansys ICEM-CFD*)
- Erzeugen des Pre-Prozessor-Dateien und Lauf des Pre-Prozessors (*Ansys CFX-Pre*)
 - fasst Geometrie mit weiteren Randbedingungen zu einem vom Solver lösbaren Satz zusammen
- Starten der CFD-Rechnung ("Solver", *Ansys CFX-Solve*)
 - löst das vollständig beschriebene Problem (z. B. über FDM, FVM, FEM usw.)
- Erzeugen der Post-Dateien und Lauf des Post-Prozessors (*Ansys CFX-Post*)
 - bildet aus der Solver-Lösung integrale Kennwerte, bietet interaktiv auch grafische Aufbereitung der Lösung
- Bilden des skalaren Qualitätswertes aus den Resultaten des Post-Prozesses

Die aus der zentralen Evolutionsstrategie an die übergeordneten Komponenten verschobenen Pfeile in Abbildung 29 mögen im objektorientierten Sinne

verdeutlichen, dass die Evolutionsstrategie nun mit speziellen Komponenten arbeitet.¹⁴⁶

Aus der Realisierungskomponente lassen sich jederzeit interessante Modelle direkt für eine detaillierte Rechnung heraus lösen. Hier können auch aussichtsreiche Objektparameterkonfigurationen eingebracht werden.

4.3 Geometriegenerator

4.3.1 Allgemeines

Der Umsetzung des reellwertigen Individuenvektors in ein geometrisches Modell, welches letztlich eine hinreichende Basis für eine erfolgreiche Gittergenerierung sein muss, kommt auf Grund der komplexen 3D-Struktur schon eines konventionellen Propellers - erst recht der eines Bionikpropellers - eine herausragende Bedeutung zu. Ein fehlerhaftes Gitter führt häufig zum Abbruch der Rechnung, zumindest jedoch zu erschwerten Bedingungen mit vergrößertem Fehler. Wie auch schon *Hansen* (vgl. [25]) betont, ist dabei die Unabhängigkeit der Objektparameter des Individuenvektors für eine schnelle Konvergenz der Evolutionsstrategie bedeutend, idealerweise bilden diese eine Orthogonalbasis.

4.3.2 Grundprinzip

Die Geometrierzeugung G soll durch eine Anzahl n reeller Objektparameter x_i aus jeweils beschränktem Intervall E_i realisiert werden, wobei G diese auf Bildpunkte F im \mathbb{R}^3 eindeutig abbildet. Durch die Beschränkung der Intervalle ist auch die Bildmenge F eine Untermenge des \mathbb{R}^3 .

$$G: x_i \in E_i \subseteq \mathbb{R} \rightarrow F \subseteq \mathbb{R}^3 \quad (\text{mit } i=1, \dots, n) \quad (4.45)$$

G ist dabei eine Menge stetiger und stückweise glatter Abbildungen der Intervalle auf eine Oberfläche F . Ist letztere dabei nicht zusammenhängend, müssen Lücken später außerhalb der Geometrierzeugung geschlossen werden, sie dürfen daher nicht zu groß für den Reparaturalgorithmus der Gittererzeugung sein. Die Anzahl der Objektparameter ist so gering wie möglich zu halten, um die Evolutionsstrategie zu beschleunigen, muss aber die gewünschten variablen Geometriebereiche abbilden können.

¹⁴⁶ Auf eine UML-konforme Darstellung wurde im Sinne der Einfachheit verzichtet. Die internen Konzepte werden später erläutert.

Mögliche Vorschriften für die Abbildung G erlauben nun die detaillierte Parametrisierung eines konventionellen sowie auch eines bionischen Propellerblattes (einschließlich Modellierung der Bögen bzw. Loops). Die exakten Verläufe sollen dabei über Formeln oder Wertetabellen (mit Interpolation) gesteuert werden können. Damit wären auch z. B. bestimmte Konstruktionsvorgaben wie beispielsweise eine Zirkulationsverteilung nach $Betz$ (vgl. [54]) im Vorfeld festlegbar. Für zukünftige Optimierungszyklen kann zudem eine Integration in andere Programmumgebungen notwendig sein, deshalb ist die Geometrieerzeugung offen zu halten (öffentliche Schnittstellen, Erweiterbarkeit).

Insgesamt sollen folgende Eigenschaften erreicht werden:

- einheitliches Konzept zur Abstrahierung von analytischer oder diskreter Beschreibung von Werteverläufen (z. B. Dickenverlauf des Profils in Abhängigkeit vom Radius),
- Implementierung in universeller Programmiersprache (z. B. *C*, *C++*, *Java*, *Fortran* etc.), die einerseits schnelles Verständnis und Einarbeitung erlaubt, andererseits durch einen modularen Charakter offen für Erweiterungen ist.

Durch die Abbildung n gleicher Intervalle auf jeweils eine mögliche Geometrieänderung wird eine gleiche Empfindlichkeit über die Objektparameter erreicht, wie auch schon von *Hansen* für die Anwendung der CMA-Schrittweitensteuerung empfohlen wurde. Damit ist für den Bereich der Objektparameter auch eine Gebietsbeschränkung sowie der Einsatz von Rand- und Nebenbedingungen überflüssig. Auch *Schwefel* schlägt die Anpassung der Empfindlichkeiten durch einfach Skalierung insbesondere für eine (1+1)-Strategie mit globaler Schrittweite vor (vgl. [66]).

4.3.3 Umsetzung

Ein Werkzeug, welches die o.g. Eigenschaften für die Parametrisierung des Bionikpropellers besitzt, stand nicht zur Verfügung (entweder erfüllt es die Anforderungen nicht oder war nicht frei verfügbar). Da der Bionikpropeller eine gegenüber dem konventionellen Propeller wesentlich erweiterte Form besitzt, ist die Erweiterung bestehender Werkzeuge problematisch. Die Möglichkeit, dass das Vorhaben später an den Fähigkeiten des Werkzeugs scheitert, war nicht auszuschließen. Daher wurde eine Neuimplementierung vorgenommen. Auf Grund ihrer überragenden Eigenschaften, der umfangreichen Vorkenntnisse dazu sowie der freien Verfügbarkeit vieler spezieller numerischer und anderer

Zusatzmodule (Bibliotheken) wurde die Programmiersprache C++ gewählt und ein objektorientierter Entwurf umgesetzt¹⁴⁷.

Wesentlich im objektorientierten Entwurf ist ein Zerlegen des Problems in logische und funktionale Entitäten, welche die realen Beziehungen und Gegenstände möglichst gut widerspiegeln. Im Vordergrund steht daher die objektorientierte Abbildung eines Propellers mit mehreren Blättern und eventuellen jeweiligen Blattaufspaltungen mit den daraus folgenden geometrischen Beziehungen.

Das Vorgehen bei der Entwicklung des Geometriegenerators beinhaltete daher ein:

- objektorientiertes Modell der Propellergeometrie einschließlich konventioneller und bionischer Variante
- einheitliches Konzept zur analytischen oder diskreten Beschreibung des Verlaufs von prinzipiell beliebigen Werten (z. B. von Zahlen, Vektoren, aber auch von Koordinatensystemen).

Für die Umsetzung des objektorientierten Ansatzes auf die Aufgabenstellung waren folgende drei Überlegungen bestimmend:

- Ein Propeller besteht aus mehreren im Aufbau identischen Propellerflügeln in radialer Ausrichtung gleicher Winkelaufteilung, ein repräsentativer Flügel entsteht dabei um eine radiale Generatorlinie.
- Ein allgemeiner Propellerflügel besteht aus einem Propellerblatt oder mehreren über Konnektoren aneinander gesetzten einfachen Propellerblättern. Der Konnektor ist selbst auch ein Propellerblatt und erlaubt den Ansatz mehrerer einfacher Propellerblätter. Der Aufspaltpunkt wird relativ zum Radius festgelegt.
- Ein einfaches Propellerblatt bestimmt in seiner radialen Ausdehnung den Verlauf des Profils mit seinen variablen Parametern.

Die übliche Parametrisierung konventioneller Propellerblätter als Funktionen vom Radius lässt sich bei gegebenem Durchmesser mit ausschließlich linear unabhängigen Parametern umsetzen (siehe Kapitel 3.1.2). Auch im Fall des Bionikpropellers wurde bei der geometrischen Parametrisierung versucht, mit geringstmöglicher Objektparameteranzahl auszukommen. Leider sind diese Objektparameter nicht mehr vollständig voneinander unabhängig, da bei der gleichen Vorgehensweise die Lage des Aufspaltradius' die Verteilungen der Objektparameter über den Radius verändert. Der Aufspaltradius wird über einen

¹⁴⁷ Der Sprachstandard der verwendeten C++-Entwicklungsstufe ist ausführlich in [75] dargestellt.

unabhängigen relativen Objektparameter gesteuert. Seine Lage skaliert damit die radialen Verläufe aller abhängigen geometrischen Parameter des Basisflügels und der beiden Bögen, womit diese nicht mehr nur von ihren eigenen Verlaufsparametern abhängen. Noch deutlicher wird dies anhand der Profillänge am Aufspaltradius, die Basisprofillänge bestimmt hier die möglichen Profillängen der ansetzenden Bogenprofile.

Die erste Implementierung beinhaltet folgende Leistungsmerkmale:

- universelle Klassen und Methoden zur analytischen und diskreten Beschreibung von Werteverläufen,
- komfortable Umgebung zur Konstruktion einzelner Propellerblätter (ähnlich einer speziellen Skriptsprache, Beispiel siehe Kapitel 12.3),
- vollständige Parametrisierung eines Propellerblattes (Verlauf der Generatorlinie über den Radius (Blattrücklage in Propellerebene und in Achsrichtung (Hang)), Verläufe der Profillänge, Profildicke, Wölbung und Wölbungsrücklage über den Radius), und
- C++-Klassenbibliothek mit dokumentierter Benutzerschnittstelle (als API für spätere Anwendungen), dokumentiert ist auch der Quellcode (beides über *doxygen*), die Dokumentation wurde mit weitergehender Entwicklung sukzessive vervollständigt.¹⁴⁸

Die Klassenbibliothek hatte zu diesem Zeitpunkt einen Umfang von etwa 100 Klassen (ca. 8000 nichtleere Code-Zeilen in C++). Nach einer ersten Testphase wurden noch folgende Erweiterungen zugefügt:

- Die Konstruktion des gesamten Propellers erfolgt durch Kopieren und Drehen eines repräsentativen Propellerblattes (einfacher als im nachfolgenden Vernetzungswerkzeug).
- Eine Ausgabe-Abstraktionsschicht erlaubt die direkte Ausgabe in Vernetzungswerkzeuge (z. B. *ICEM-CFD*) bzw. CAD-Werkzeuge wie z. B. *OpenNURBS*-Betrachter (unter *Windows: Rhinoceros*).
- Eine optionale Eingabe-Abstraktionsschicht ermöglicht zudem auch das Einlesen von geometrischen Beschreibungen in Form von Wertetabellen.

Während der Projektlaufzeit war die Bibliothek ohne Bedingungen frei zugänglich. Nach einer großen Anzahl von Änderungen im Zuge der Weiterentwicklung wurde es jedoch zunehmend fraglich, die originale Version weiterhin vorzuhalten. Eine neue ausreichend geprüfte Version bereitzustellen, hätte jedoch nicht

¹⁴⁸ Ausgedruckt nähme sie bereits in diesem Stadium einen Umfang von ca. 600 Seiten ein. Aus diesem Grund befindet sie sich auch nicht im Anhang.

verfügbare zeitliche Ressourcen gefordert. So wurde das Angebot nach dem Ende der Projektlaufzeit eingestellt.

4.3.4 Entwurfsdetails

Alle wesentlichen Klassen werden von einer Klasse `AbstractUserClass` abgeleitet, um ihnen später einfach Möglichkeiten zu fügen zu können, wie z. B. interaktiv bearbeitbar zu sein und von einer Datei gelesen bzw. auf eine Datei geschrieben werden zu können. Fehlerausgaben erfolgen generell über den *Exception*-Mechanismus von `C++`. Hierzu wurde ein einfache Hierarchie von Fehlerklassen `AbstractError` entworfen. Formulierungen in unterschiedlichen Koordinatensystemen werden unterstützt. Hierfür existiert die Klassenhierarchie der `AbstractCoords`. Implementiert sind kartesische und Zylinderkoordinaten. Daneben existieren weitere universelle Hilfsklassen wie z. B. zur Unterstützung von Datencaches `AbstractCache` (Verhindern von redundanten Berechnungen zur Zeitersparnis) sowie Wrapper-Klassen, um implementierungsspezifische Vektor- und Matrixklassen zu kapseln.

Der objektorientierte Ansatz für die genannten allgemeinen Verteilungen geht von einem beliebigen stetigen Datentyp X aus, welcher sich über einen reellen und beschränkten Wert skalieren lässt. Begründet werden kann er analog über den Mittelwertsatz der Differentialrechnung. Sind Anfangs- und Endwert eines stetigen Datentyps X gegeben, so lässt sich mindestens eine Parametrisierung bzw. Abbildung

$$D: t \in [0,1] \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \varphi \in [\varphi_0, \varphi_1] \subseteq X \quad (4.46)$$

mit $\varphi_0 = \varphi(t=0)$, $\varphi_1 = \varphi(t=1)$ und $\varphi(t) \in X$ finden, die den Anfangs- in den Endwert überführt. Die Vorschrift D ist dabei beliebiger stetiger glatter Zusammenhang und X ein beliebiger linearer Datentyp in `C++`. Letzteres bedeutet, dass im Sinne der `C++`-Typbehandlung X genau so handhabbar ist, wie die internen linearen Datentypen (`int`, `float` usw.)¹⁴⁹. In einfacher Anwendung sind dies z. B. reelle Funktionen für den Dickenverlauf eines Profils über den Radius. Der große Nutzen besteht jedoch in der Allgemeinheit des Datentyps X ,

¹⁴⁹ Hierfür müssen in `C++` mindestens die Additions- und Multiplikationsoperatoren für den neuen Datentyp überladen werden können. Das funktioniert selbstverständlich nicht für jeden Datentyp, da es für den Anwender einsichtig und nachvollziehbar sein soll. Beispielsweise wäre dies für Zeichenketten als Datentyp nicht der Fall.

der somit auch z. B. Vektoren bzw. Vektorfolgen und auch Flächen umfassen kann.

Der naheliegende Spezialfall der Anwendung dieser Verteilungen ist nun die Beschreibung der Oberfläche von Propellerblättern als Verteilung von Ortsvektoren. Die gewünschten Verteilungen der jeweiligen Propellerdaten werden als sogenannte Distributionsobjekte erzeugt und zugewiesen. Enthalten sind z. B. lineare, quadratische, kubische, transzendente und Spline-Funktionen. Jedes Distributionsobjekt kann darüber hinaus verschoben und skaliert werden. Wegen der zugrunde liegenden gemeinsamen Struktur lassen sich solche Verteilungen auch aneinander setzen, aus ihnen können sogar hierarchisch strukturierte neue Verteilungen zusammengesetzt werden.

Vor dem eigentlichen Softwareentwurf des Geometriegenerators stand die Analyse der Objektentitäten und ihrer Wechselbeziehungen an. Hierzu kamen Werkzeuge der Softwareentwicklung zum Einsatz. Elementare Verbindungen und wurden zunächst mit Unterstützung von UML-notierten¹⁵⁰ Klassen-, Sequenz- und Use-Case-Diagrammen entwickelt (vgl. [12] und auch [51]). Die dabei entstehende Klassenstruktur wurde auf die Anwendung von etablierten Entwurfsmustern (vgl. [17]) geprüft und gegebenenfalls darauf abgestimmt. Bei der anschließenden Codierung in C++ wurden anerkannte Empfehlungen für guten Code beachtet (vgl. [46] sowie [47]). Die Implementierung numerischer Algorithmen stützte sich auf die verbreiteten Numerical Recipes (vgl. [55]) sowie anderer empfohlener Vorgehensweisen (vgl. [2] und [23]). Einige Klassen für elementare geometrische Operationen wurden auch durch Einbettung frei verfügbarer Softwarepakete implementiert¹⁵¹. Für allgemeine Aufgaben kamen - wo immer möglich - die Prozeduren und Funktionen der C++-Standardbibliothek zum Einsatz (vgl. [35]). Der Code selbst wurde, einschließlich der schon erwähnten inline-Dokumentation mit *doxygen*, auch nach anerkannten Konventionen für die Schreibweise (z. B. "Camel"-Schreibweise) notiert (vgl. [45] und [28]), die trotz ihres Alters einen allzeit gut lesbaren Code ermöglichen.

¹⁵⁰ UML - Unified Modeling Language

¹⁵¹ Für die Implementierung der Vektor- und Matrixklassen wurde z. B. die Bibliothek *tvmet* eingebunden und gekapselt.

4.3.5 Klassenstruktur des Geometriegenerators

Anhand der Klassendiagramme des umgesetzten objektorientierten Entwurfs lässt sich die Struktur des Geometriegenerators gut darstellen. Die folgende Auflistung wird auf die wesentlichen strukturgebenden Bestandteile verkürzt, nicht direkt verbundene oder Hilfsklassen wurden unterdrückt.

Klassenstruktur des Propellers

Der Propeller ist im objektorientierten Sinne ein zentrales Objekt und damit Kandidat für die zu implementierende Ein-Ausgabe-Fähigkeit sowie einer später vorzusehenden interaktiven Editierbarkeit. Er hat darüber hinaus Informationen über die Anzahl der Flügel und eine Referenz auf einen Repräsentanten des Propellerflügels `_wingRepr`, aus welchen er zusammengesetzt ist. Die folgende Abbildung 30 zeigt das diesbezügliche Klassendiagramm.

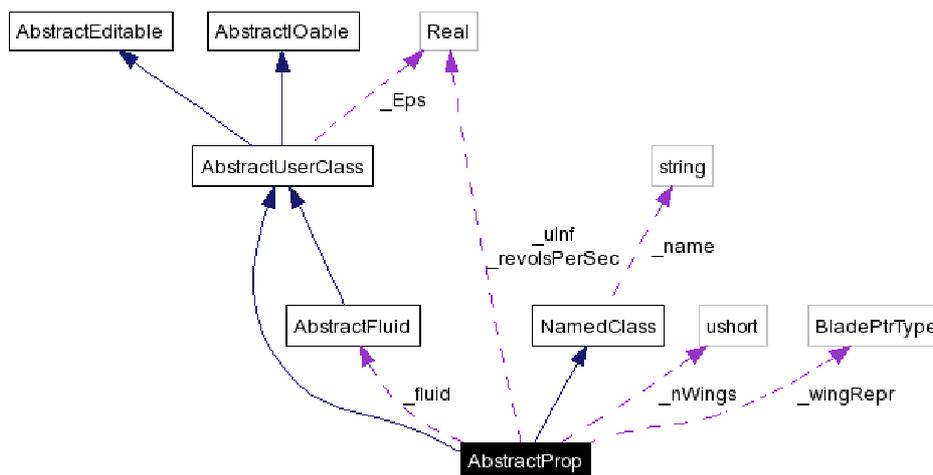


Abbildung 30: Basisklassen und Parameter eines Propellers

Ein Propellerflügel referenziert den Propeller, an dem er montiert ist (`_propBelongingTo`), sowie das erste Propellerblatt `_baseBlade`, wie in folgendem Klassendiagramm dargestellt:

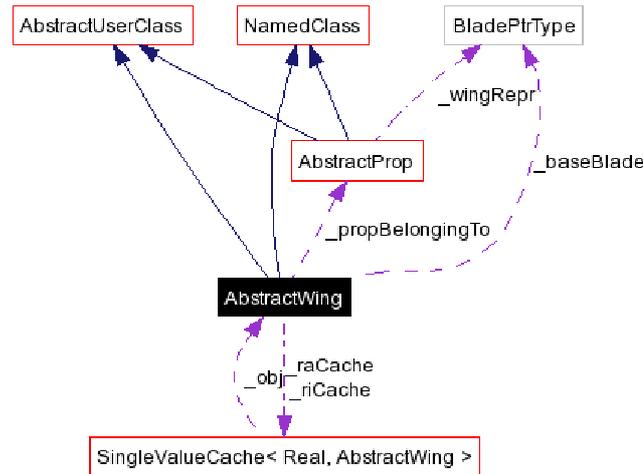


Abbildung 31: Klassenstruktur eines Propellerflügels

Das Propellerblatt steht im Mittelpunkt der objektorientierten Parametrisierung. Es referenziert u.a. den Propellerflügel, zu welchem es gehört (`_wingBelongingTo`). Weiterhin hat es Zugriff auf einen Satz von Diskretisierungsparametern `_discretization`, welche die Art und Weise der diskreten Wertebeschreibungen steuern. (Diese Diskretisierungsvorgaben sind global, so dass es davon nur ein Objekt programmweit gibt.) Abbildung 32 zeigt diese Beziehungen.

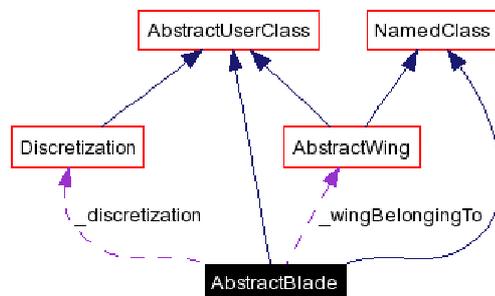


Abbildung 32: Klassenstruktur eines Propellerblatts

Das allgemeine Konzept des Propellerblattes wird nun spezialisiert. Wie o. g. gibt es einfache Propellerblätter `AbstractSingleBlade` und solche, die das Ansetzen wiederum einfacher Propellerblätter ermöglichen, wie `AbstractBladeConnector`. Die abstrakte Klasse `AbstractSingleBlade` erhält ihre reale Ausprägung entweder in einer Klasse für unprofilerte Blätter `PlainBlade` (z. B. für Tests) oder für beliebig profilierte Blätter `ProfileBlade`. Die Konnektorklasse wird in `SimpleBladeConnector` spezialisiert und erlaubt Übergänge der Oberflächen

ineinander bereits mit Polynomen beliebiger Ordnung (glatte Übergänge);
Abbildung 33 stellt diese spezifischen Klassen dar.

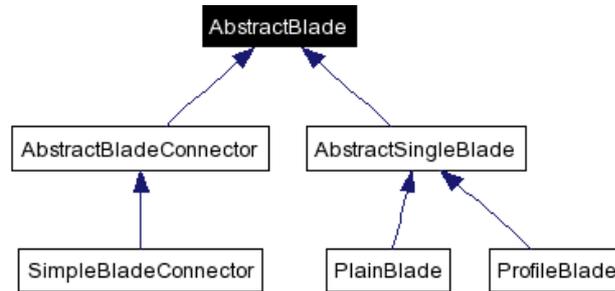


Abbildung 33: Spezialisierungen der Propellerblätter

Klassenstruktur universeller Werteverläufe

Die Schnittstelle `AbstractTypedDistrib<T>` hat universelle Bedeutung, sie steht für eine Verteilung von Werten des Typs `T` mit diskretem oder analytischem Verlauf. Davon abgeleitet sind zusammengesetzte Verläufe, die einfache Operationen ausführen können (links in der folgenden Abbildung 34). Ein konkretes Beispiel eines anwendungsbereiten Verlaufs ist rechts in der selben Abbildung gezeigt (quadratischer Verlauf). Daneben sind noch zahlreiche andere Klassen implementiert, eine Erweiterung ist zudem sehr einfach.

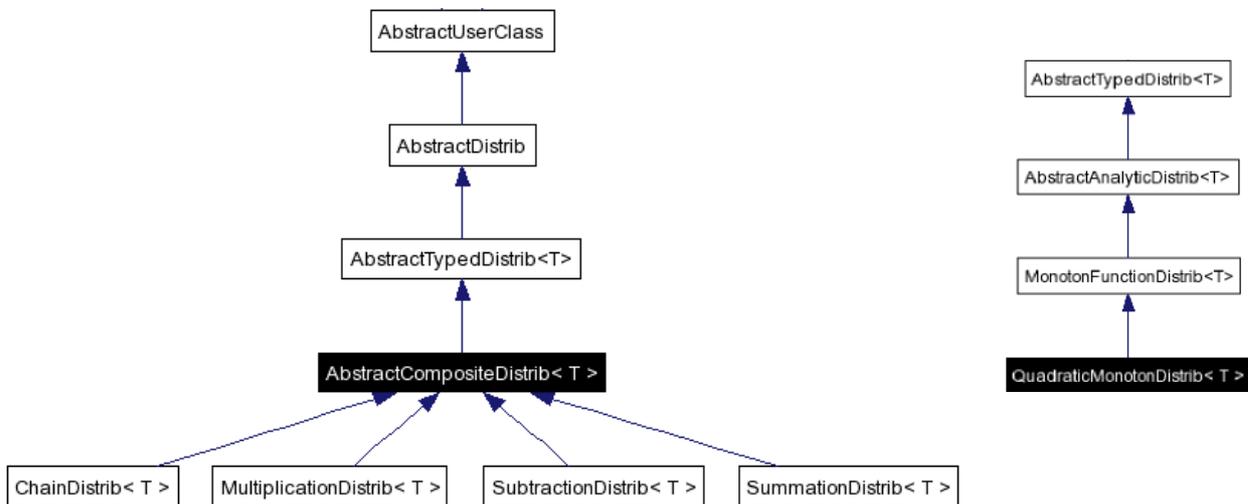


Abbildung 34: Struktur und Beispielklassen der Verläufe

Bedingungen, welche der Datentyp `T` für diskrete Verläufe `AbstractTableDistrib<T>` erfüllen muss, sind Addition seiner Werte untereinander:

$$T_i, T_j \subseteq \mathbb{T} \rightarrow T_i + T_j \subseteq \mathbb{T} \quad (\text{mit } i, j \in \mathbb{N}),$$

sowie Multiplikation mit einem Skalar:

$$T \subseteq \mathbb{T}, s \in \mathbb{R} \rightarrow s T \subseteq \mathbb{T}.$$

Dabei sind T_i Elemente des Typs \mathbb{T} (im Code) bzw. Elemente der Menge \mathbb{T} . Über diese Operationen wird für den Anwender transparent eine Interpolation ausgeführt. Zur Zeit sind zwei Interpolatoren definiert, ein linearer Interpolator sowie ein Spline-Interpolator. Weitere Interpolatoren lassen sich sehr einfach zusätzlich implementieren, Abbildung 35 zeigt einen Ausschnitt dieser Klassenbeziehungen.

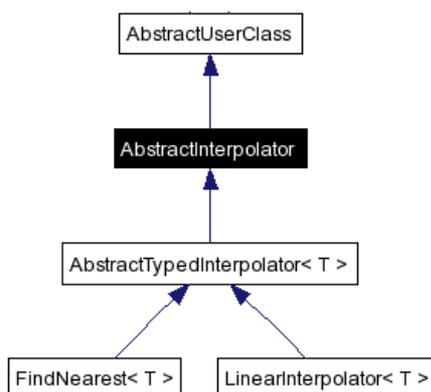


Abbildung 35: Klassen der Interpolatoren

4.3.6 Spezialfall Propellerblatt

4.3.6.1 Parametrisierung

Die im vorigen Kapitel vorgestellten Hilfsmittel dienen dazu, ein einzelnes konventionelles Propellerblatt, aber auch den sich aufspaltenden Flügel eines Bionikpropellers so zu parametrisieren, dass für die Gittererzeugung eine hinreichend gute Oberflächenbeschreibung bereitgestellt werden kann. Sie werden als eine in sich geschlossene Klassenbibliothek zusammengefasst.

Im Folgenden soll zwischen Propellerflügel und Propellerblatt noch insofern begrifflich unterschieden werden, dass beim Bionikpropeller der Flügel die aus einzelnen für sich konventionellen Propellerblättern zusammengesetzte Gesamtheit bezeichnen möge, welche in der Blattanzahl um die Nabe gleichmäßig angebracht ist und am Umfang fortlaufen aneinander anschließt (Bögen). Bei einem konventionellen Propeller sind daher beide Begriffe synonym.

Wie in Kapitel 3.1.2 dargelegt, erfolgt die Konstruktion eines Propellerblattes ausgehend von der Generatorlinie. Die Generatorlinie wird in einem vom Radius der Nabe (hub) bestimmten Abstand zur Rotationsachse radial auf die Propeller-ebene gelegt (siehe Abbildung 36) und bildet im Schnittpunkt mit einer

Zylinderfläche am jeweiligen Radius die Mitte der Profelsehne. Das Profil wird um diese Profelsehne auf der durch den Radius gegebenen Zylinderfläche aufgebaut. Der Schnittpunkt wird tangential an der Zylinderfläche in der Propellerebene verschoben, das Maß hierfür ist die radiusabhängige Rücklage (skew). Die axiale Verschiebung dieses Schnittpunktes auf der Zylinderfläche wird durch den radiusabhängigen Hang (rake) bestimmt. Die ist wie die anderen Profilparameter als radiusabhängiger Verlauf vorgegeben.

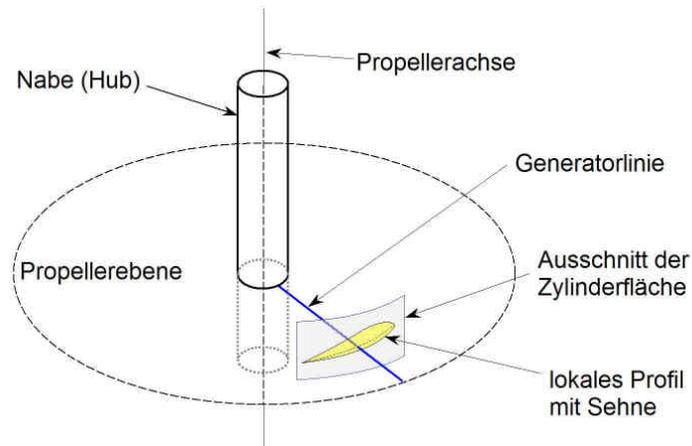


Abbildung 36: Lage der Generatorlinie und der lokalen Profilebene bei der Flügelkonstruktion

Auf der lokalen Zylinderfläche sind neben der radiusabhängigen Länge der Profelsehne auch die anderen radiusabhängigen Konstruktionsparameter des Profils gegeben, zusätzlich als Funktion von der Position auf der Profelsehne (Wölbung, Wölbungsrücklage und Dicke). Damit können beliebige Profile konstruiert werden, aber auch ein Rückgriff auf den Katalog der NACA4- und NACA5-Profile ist möglich. Sogar externe Profilkataloge können eingebunden werden.

Beim konventionellen Propeller erzeugt der Radiusparameter $r \in [0,1]$ die Generatorlinie für das Propellerblatt zwischen dem absoluten Nabenradius R_H und dem absoluten Außenradius R : $R_{conv}(r) = (1 - r) \cdot R_H + r \cdot R$ (siehe Abbildung 37).

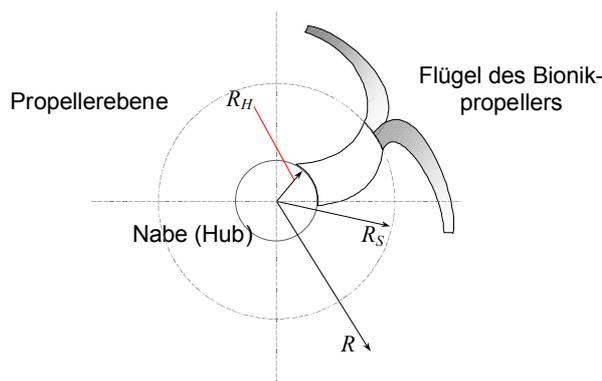


Abbildung 37: Verschiedene Radien bei der Blattkonstruktion

Der Propellerflügel des Bionikpropellers wird auf ähnliche Weise konstruiert, der absolute Radius für die Generatorlinie des inneren konventionellen Blattes läuft jedoch zunächst nur bis $R_S = r_{split} \cdot R$, der Aufspaltpunkt r_{split} wird dabei ebenso relativ (zum äußeren Radius) angegeben, wobei $r, r_{split} \in [0,1]$ gilt. Dort setzt ein Verbindungsstück an, welches einen weichen Übergang sichert, um die Qualität der Gittererzeugung zu verbessern. Nach diesem Radius folgen bis außen zwei weitere Propellerblätter, welche wieder analog zum inneren Blatt konstruiert werden: $R_{Loop}(r) = (1-r) \cdot R_S + r \cdot R$. Eine variierende relative Lage r_{split} verändert daher - trotz gleicher Parameter - die Blattgeometrie aller Blätter.

4.3.6.2 Dichte der Stützstellen

Die Objekte der Verteilungsklassen - die Distributionsobjekte - lassen jedoch auch zu, eine Verteilung hierarchisch verschachtelt zu parametrisieren. Damit sind schließlich beliebige Verteilungen der Stützstellen in radialer und tangentialer Richtung möglich. Dies ist notwendig, um starke Oberflächenkrümmungen genau genug wiederzugeben, jedoch bei geringen Krümmungen Stützstellen einsparen zu können. Folgende Abbildung 38 zeigt die Verdichtung der zwischen benachbarten Stützstellen aufgespannten Linien in tangentialer und radialer Richtung¹⁵².

¹⁵² Daneben ist auch deutlich die erforderliche kreisförmige Anrundung des Propellerblattes an der Nabe zu sehen. Die Implementierung dieses Features kostete durch abstraktes Einfügen eines Kreis-Distributionsobjektes in die radiale Profilverteilung nur wenige Minuten.

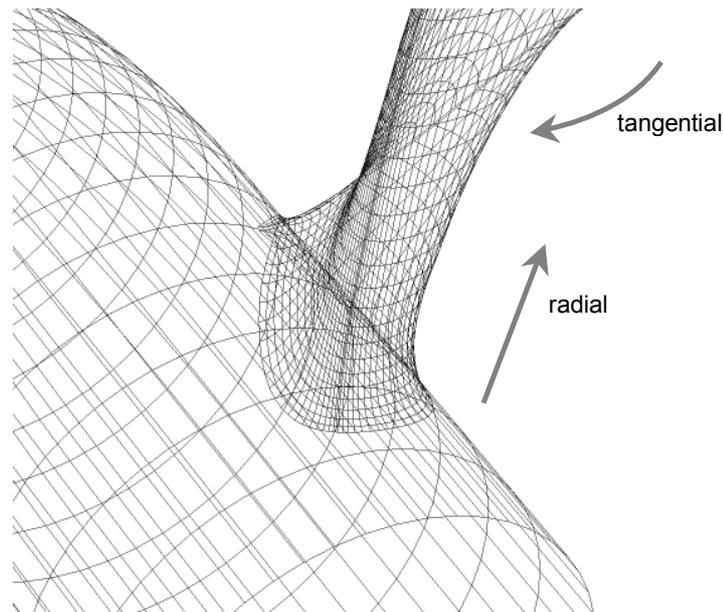


Abbildung 38: Tangentiale und radiale Dichte der Stützstellen

Die Konstruktion des Verbindungsstücks ist geometrisch relativ aufwändig, da Übergänge zu allen drei Querschnitten geschaffen werden müssen. An jedem der drei Ansätze ist zunächst die anzuschließende Fläche des Propellerblattes fortzusetzen, damit der Übergang weich geschieht. Das geschieht über lokale Spline-Verläufe, welche am Anfang bzw. Ende den gleichen Gradienten bekommen. In folgender Abbildung 39 ist diese Anschlussstelle detailliert dargestellt, zu erkennen ist auch die Gitterverdichtung an stark gekrümmten Oberflächen.

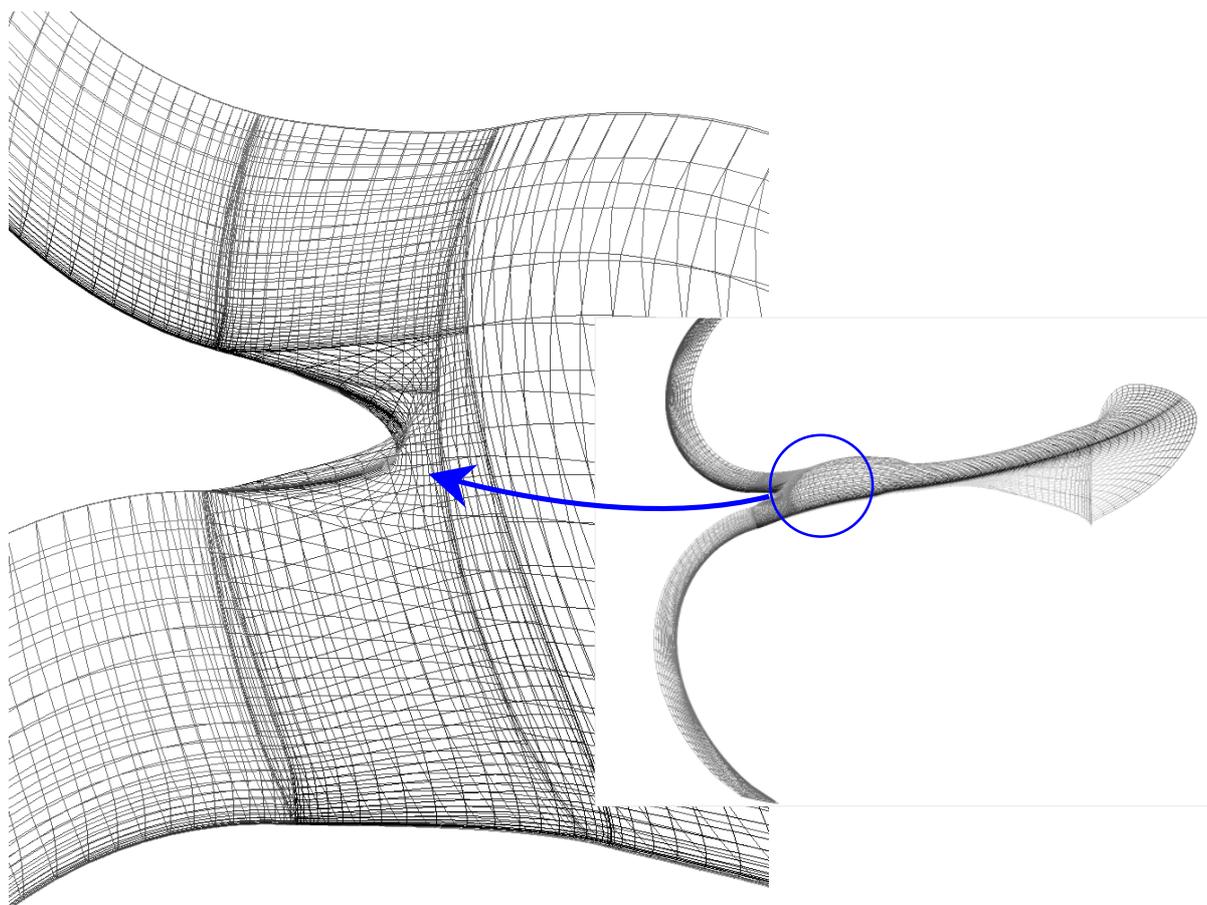


Abbildung 39: Verbindungsstück (im Kreis)

Auf dem obersten Konstruktionsniveau wird dann aus dem derart konstruierten Propellerblatt (beim Bionikpropeller zusammengesetzt) der Propellerflügel definiert. Der Propeller als Gesamtes entsteht dann durch Anfügen des Propellerflügels und der Anzahl der gewünschten Kopien gleichmäßig am Umfang der Nabe.

Das konventionelle Propellerblatt benötigt in der aktuellen Version 31 (unabhängig) Objektparameter. Die Beschreibung des Bionikpropellers konnte bei unwesentlich eingeschränkter Allgemeinheit - einige Konstruktionsparameter der Bögen sind gekoppelt - mit 41 Objektparametern in ausreichender Qualität erfolgen. Für die Konstruktion der Bögen beim Bionikpropeller mussten jedoch besonders im äußeren Bogenbereich die Schnitte verdichtet werden, da die Diskretisierung sonst zu groben und unter Umständen fehlerhaften Gittern führte. Das Konzept der universellen und typunabhängigen Verteilungen (Distributionen) hat sich auch über den Einsatz zur Propellermodellierung hinaus bewährt (z. B. für die Nachparametrisierung, siehe Kapitel 4.3.8).

Die Anwendung der vorgestellten Bibliothek zur Konstruktion eines sehr einfachen, aber vollständig parametrisierten Propellerblattes zeigt exemplarisch Kapitel 12.3. Um die Qualität und mögliche Kontrolle der Geometrie zu veranschaulichen, zeigen die beiden folgenden Abbildungen jeweils den ad-hoc-Entwurf eines konventionellen und eines Bionikpropellers¹⁵³.

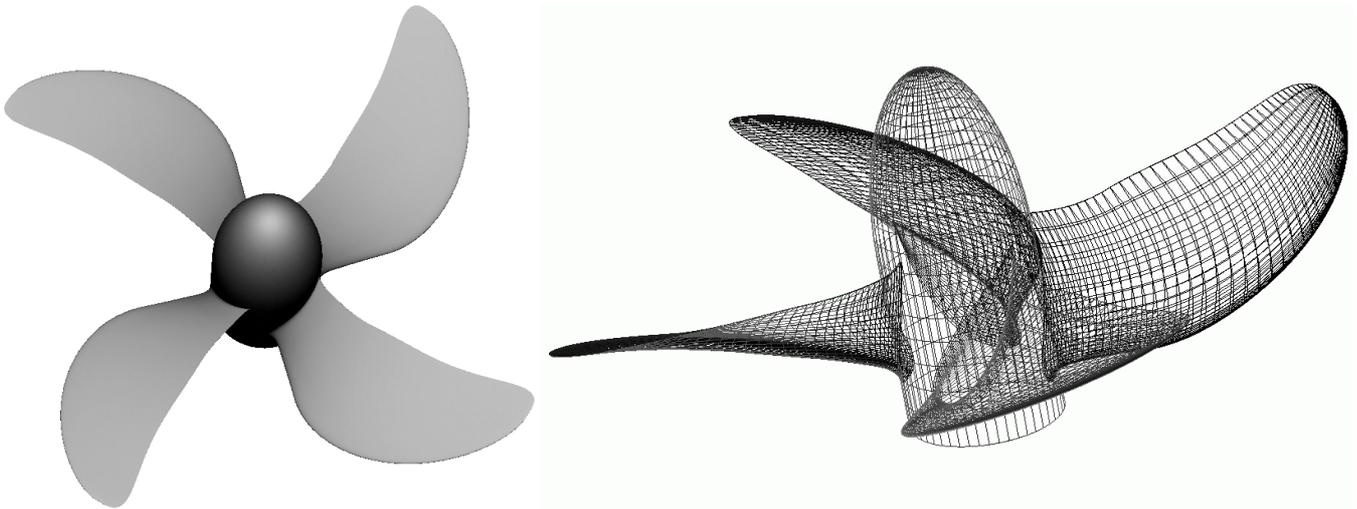


Abbildung 40: Konventioneller ad-hoc Propeller mit allen Parametrisierungen (skew, rake, chord length) sowie radialer und tangentialer Beeinflussung der Stützstellendichte

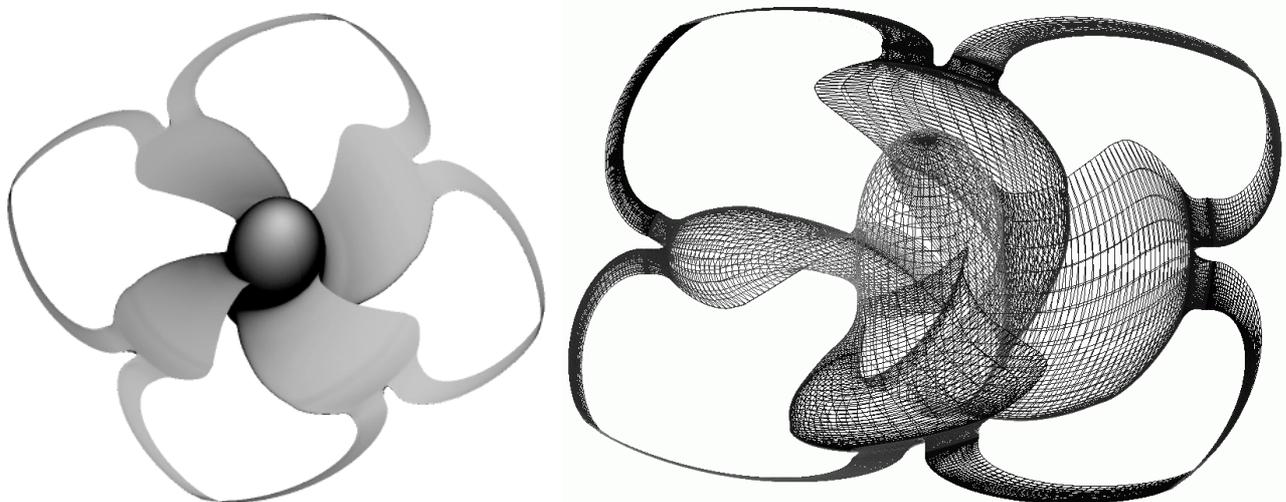


Abbildung 41: ad-hoc Bionikpropeller mit vergleichbarem Parametrisierungsumfang

¹⁵³ ad-hoc (einfachster Entwurf): Nutzung von Voreinstellungen des Geometrie generators, keine speziellen Verteilungen, Profil aus Katalog

4.3.6.3 Heuristische Constraints

Um die Abbildung der n gegebenen $[0,1]$ -Intervalle auf die jeweils im Geometriegenerator kodierte geometrische Ausprägung beider Propellervarianten einzustellen, wurden interaktiv in einer Schleife jeweils n Zufallszahlen als Parametrisierung an den Geometriegenerator gesendet und die daraus erzeugte Geometrie sofort grafisch dargestellt¹⁵⁴. Für eine gewisse Normierung wurde dabei das Flächenverhältnis gleich gehalten. Rechnerisch wäre die Zweckmäßigkeit dieser Realisierungen (später dann Nachkommen) nur sehr aufwändig zu validieren, stattdessen wurde eine sehr einfache visuelle Plausibilitätsanalyse als Test verwendet. Hiemit gelang es sehr schnell, die Bildbereiche im Geometriegenerator auf sinnvolle Werte einzustellen. Diese parameterweise erstellten Beschränkungen der Abbildung (im Folgenden mit Constraint bezeichnet) sichern bei korrekter Einstellung ab, dass nur gültige und sinnvolle Varianten als Nachkommen erzeugt werden. Die Rate der schon vor der CFD-Rechnung als Mutanten prädestinierten Nachkommen¹⁵⁵ wird sehr klein. Damit wird der aufwändige Vernetzungs- und Rechenprozess für diese Nachkommen verhindert und Rechenzeit gespart.

Die parameterweisen Constraints führen im Falle des bionischen Propellerblattes mit seinen teilweise voneinander abhängigen Konstruktionsparametern auch zu Abhängigkeiten der entsprechenden Constraints. Da einige geometrischen Ausprägungen von anderen bestimmt werden, ergeben sich sog. hierarchische Constraints. Die Objektparameter abhängiger Abbildungen gelten daher immer relativ zu den vorgelagerten Basisparametern.

Um Mindestanforderungen an die praktische Umsetzbarkeit der Entwürfe zu genügen, werden die Profildicken entlang des radialen Abstandes von der Nabe nach Festigkeitsvorgaben bestimmt (vgl. [22]). Die Implementierung erfolgt einfach durch entsprechende Mindestwerte der Objektparameter-Abbildung für die Profildicke¹⁵⁶. Eine genaue Berechnung bzw. Vorhersage der lokalen Biegemomente mit einer korrekten Anpassung der Profildicke im Verhältnis zur Profillänge kann hier wegen der zirkulären Abhängigkeit verständlicherweise nicht erfolgen.

¹⁵⁴ Die Zufallszahlen ersetzen hier die von der Evolutionsstrategie erzeugten Parametersätze.

¹⁵⁵ Der Begriff "Mutant" soll hier als eine Nachkomme verstanden werden, der mit Sicherheit eine sehr schlechte Bewertung erhalten würde, daher also a priori für die Qualitätsberechnung nicht lohnenswert ist.

¹⁵⁶ An der Flügelwurzel wird auch die Profillänge mit einem passenden Minimum versehen.

4.3.7 Ankopplung an CFD-Werkzeuge

Der Geometriegenerator erzeugt eine interne parameterbasierte 3D-Geometriebeschreibung des Propellers (siehe Abbildung 29). Aus diesen Informationen wird ein Gitter für den Strömungslöser erzeugt. Im Prinzip könnte der Geometriegenerator diese Umsetzung selbst vornehmen. Wie jedoch schon in den Grundlagen geschildert, ist die Erzeugung eines hochwertigen Gitters ein wesentlich komplexerer und aufwändigerer Prozess, als die Bereitstellung der o. g. Geometriebeschreibung.

Fast alle kommerziellen CFD-Werkzeuge stellen Programmteile zur Verfügung, mit denen interaktiv eine Geometrie erzeugt und danach vernetzt werden kann¹⁵⁷. Meist arbeiten diese Programme mit einem mehr oder weniger zugänglichen Geometrie-Kernel¹⁵⁸, der über die Nutzerinteraktionen gesteuert wird. Die meisten dieser Programme bieten daher eine Schnittstelle an (Interface, API¹⁵⁹), mit der auch nicht-interaktiv (programm- bzw. skriptgesteuert) auf diesen Kernel zugegriffen werden kann. Eine einheitliche Schnittstelle existiert hier jedoch nicht. Für das zu verwendene Vernetzungswerkzeug *Ansys ICEM-CFD* ist diese Schnittstelle zumindest dokumentiert und gibt daher den Weg vor, wie der Geometriegenerator letztlich im Optimierungszyklus eingesetzt werden kann.

Zu Beginn der Arbeiten sind für den Geometriegenerator - zunächst nur zu Debuggingzwecken - einige Schnittstellen entwickelt worden, die eine Ausgabe der Geometriebeschreibung in verschiedene bekannte 3D-Formate erlauben¹⁶⁰:

- *nativ*:
 - einfache Textausgabe (z. B. für Debugging)
 - Lesen/Schreiben des eigenen Formats (Parameter und Interpolationsfunktionen, einfaches Beispiel siehe Kapitel 12.3)
- *OpenDX* (vormals *IBM Data Explorer*, von den Fähigkeiten her vergleichbar mit *tecplot* oder *IDL*)
- *CGNS* (*CFD General Notation System*, von *AIAA* als Standard für CFD vorgeschlagen und von sehr vielen Systemen unterstützt)

¹⁵⁷ Mit diesem Netz arbeiten dann fast alle nachfolgenden Programmteile, zunächst, um die Strömung zu simulieren, und später die Resultate grafisch und leicht fassbar darzustellen.

¹⁵⁸ Im Bereich der Software versteht man unter Kernel meist ein abgeschlossenes System mit grundlegender Bedeutung, oft mit klar abgegrenzter und ausgerichteter Funktionalität.

¹⁵⁹ API - Application Programming Interface

¹⁶⁰ sogenannte Ausgabetreiber

- VRML (Virtual Reality Modeling Language)
- später noch PFF (Propeller Free Format)

Nach der ersten Phase der Entwicklung stellte sich heraus, dass *ICEM-CFD* diese Formate doch nicht verwenden kann. Zwischenzeitlich wurde der Datentransfer über Umwege ermöglicht¹⁶¹, war jedoch nicht automatisierbar. Die Lösung bestand darin, zusätzliche zu den anderen Formaten noch einen Ausgabetreiber für das native *ICEM-CFD*-Format *tetin* zu implementieren. Diese Variante erlaubt zudem die Einbeziehung aller Details und Ausnutzung aller Möglichkeiten beim Geometrietransfer.

Alle anderen Komponenten des Optimierungszyklus' liegen als ausführbare Dateien (Programme) vor. Ihre verwendeten Schnittstellen sind keine APIs, sondern dateibasiert¹⁶². Aus diesem Grund - und da *UNIX/Linux* hier eine ideale Basis bietet - wurden die selbst entwickelten Schnittstellen im Zyklus ebenfalls dateibasiert ausgeführt. Somit operiert der Geometriegenerator - trotz seiner API - im Anwendungsszenarium letztlich als ausführbares Programm (**modeler**), gesteuert über umfangreiche Aufrufparameter mit Dateiangaben.

Um die Qualität ähnlicher Propeller besser vergleichen zu können, ist es sinnvoll, neben Parametern wie Durchmesser und Drehzahl auch das Flächenverhältnis gleich zu halten. Über ein spezielles Aufrufargument des Geometriegenerators kann die Profillänge über der Generatorlinie so skaliert werden, dass das gewünschte Flächenverhältnis erreicht wird (Verfahren nach *Brent*¹⁶³).

Werden dem Geometriegenerator zusätzliche Parameter übermittelt, welche die Dynamik des Strömungsproblems beschreiben, können automatisch ergänzende Geometrien erzeugt werden. Unter anderem werden auf Anforderung hin spezielle Nachlaufflächen erzeugt, die über eine Heuristik noch an den Anstellwinkel des Profils angepasst werden können. Sie eignen sich z. B. zur günstigen Gitterverdichtung in diesem Bereich, können aber später auch zur Implementierung eines Wirbelgitterverfahrens zur Strömungsabschätzung dienen. Die folgende

¹⁶¹ Import des VRML-Formats in *Rhino-3D* mit *NURBS*-Umwandlung, dort Export als IGES-Format, letztlich Import von IGES in *ICEM-CFD*

¹⁶² Zum Beispiel kann ein Skript für ein spezielles Programm erzeugt werden, das Skript wird dann als Aufrufparameter diesem Programm beim Start übergeben und anschließend innerhalb dieses Programms abgearbeitet.

¹⁶³ exakt: *Van Wijngaarden-Dekker-Brent*-Methode

Abbildung 42 zeigt diese automatisch erzeugten Geometrien für Nachlaufflächen bzw. Gitterverdichtungen ¹⁶⁴.

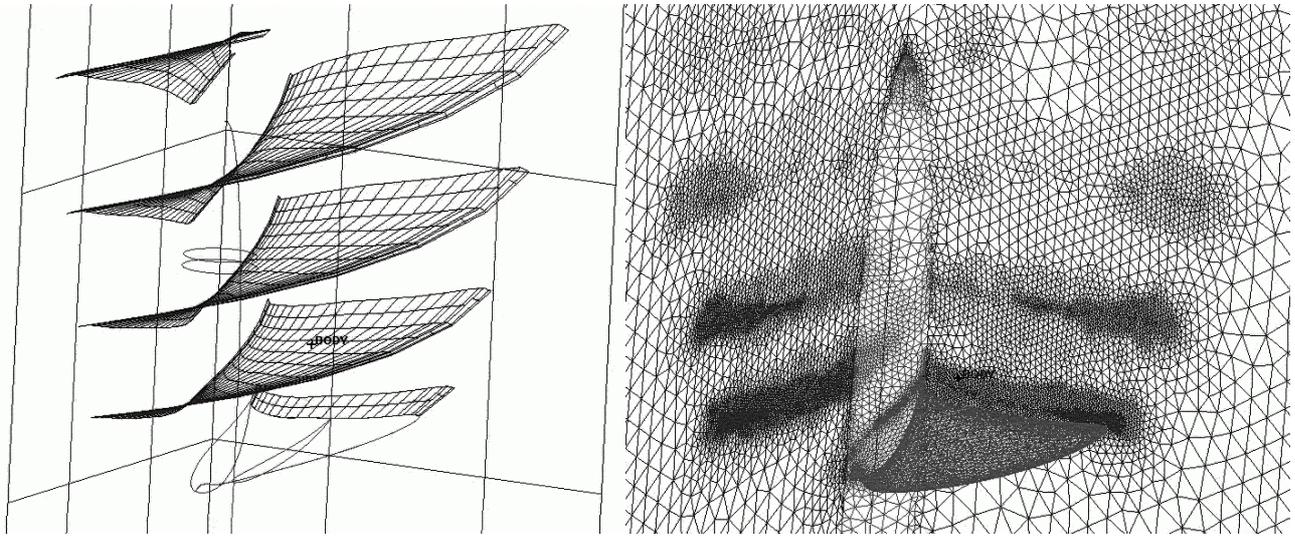


Abbildung 42: Automatische Erzeugung von Nachlaufflächen für Tetraedervernetzung (links) sowie räumliche Gitterverdichtung (rechts, hier sichtbar an den Segmentgrenzen)

Für die automatische Erzeugung des Gitters war noch zu beachten, dass sich der rotierende Propeller mit seinem eigenen Gitter in einem ruhenden Strömungsraum befindet. Derartig eingebettete rotierende Gitter werden oft über ein spezielles Interface verbunden ¹⁶⁵. Der RANSE-Löser übernimmt an einer solchen Grenze die Umrechnung statischer in dynamische Größen. Außerhalb der von der Rotation des Propellers betroffenen Zone (bzw. Rechengebiet oder engl. Domain) ist eine Reduktion der Gitterdichte möglich, der Propeller selbst innerhalb des rotierenden Bereichs wird genau vernetzt. Verwendet wurde anfangs ein gegenüber dem Gesamtgebiet relativ großer rotierender Bereich. Die Auflösung des äußeren stehenden Bereichs war zudem sehr grob (er diente vorrangig der Applikation der Randbedingungen), so dass er für die Rechenzeit kaum ins Gewicht fällt. Auf Grund der ohnehin relativ unbedeutenden Zeit, die für die Gittererzeugung gegenüber dem eigentlichen Lösen der RANS-Gleichungen nötig ist, wurde dieses Vorgehen beibehalten. Im folgenden beziehen sich die Ausführungen daher stets auf den rotierenden Bereich.

¹⁶⁴ Ausschnitte der rotierenden Domain

¹⁶⁵ In der Beschreibung von *Ansys CFX* wird für diese Art der Kopplung der Terminus *Frozen Rotor* verwendet. Sie ermöglicht eine nicht so exakte Rechnung, wie sie instationär (transient) möglich wäre, ist aber deutlich schneller und reicht für die aktuellen Belange völlig aus.

4.3.8 Nachparametrisierung

Um auf gegebenen Propellergeometrien aufzubauen, können diese in einem separaten Verfahren auf die vom Geometriegenerator gegebene Parametrisierung angepasst werden. Als Qualitätsmaß für die Annäherung der erzeugten Fläche an das Original dient eine polynomiale Funktion, welche aus endlich vielen Abständen bestimmter Stützstellen beider Flächen gebildet wird. Die Abstände D_{ij} werden dabei jeweils an den gegebenen m tangentialen Stützpunkten des i -ten Profilschnittes \underline{Q}_{ij} der Originalfläche ausgewertet, auf der erzeugten Fläche werden die Stützpunkte \underline{P}_{ij} dagegen interpoliert:

$$D_{ij} = \underline{P}_{ij}(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m) - \underline{Q}_{ij}(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m) \quad \text{mit } i=1 \dots k \text{ und } j=1 \dots m.$$

Die gegebenen Abstände gehen in eine Qualitätsfunktion ein, deren Polynomfaktoren ζ und ξ einfacherweise iterativ nach bester Anpassung bestimmt werden:

$$Q = \sum_{i=1..k} \left(\sum_{j=1..m} \zeta |D_{ij}| + \xi D_{ij}^2 + \dots \right) \rightarrow \min \quad (4.47)$$

Die folgende Abbildung 43 zeigt beispielhaft die Profilschnitte, welche mit einem CAD-Programm aus dem Verschneiden der Oberflächen eines gegebenen Bionikpropellers mit $k=14$ konzentrischen Zylinderflächen erzeugt wurden¹⁶⁶. Jeder der Schnitte besteht aus mindestens einem B-Spline, aus welchem jeweils die ausreichende Anzahl Stützpunkte gefiltert werden (z. B. $m=20 \dots 30$).

¹⁶⁶ Die senkrechte Achse ist dabei die Propellerachse, die Propellerebene die horizontale Ebene. Die Anzahl der konzentrischen Zylinder ist im Prinzip beliebig, da sie nur in die Qualitätsbestimmung der Flächen-Approximation eingeht. Die Anzahl der Objektparameter der Evolutionsstrategie wird nur durch die Parametrisierung der Oberfläche bestimmt. Das Filtern der Punkte wurde über eigene Skripte und mittels des Programms meshlab realisiert.

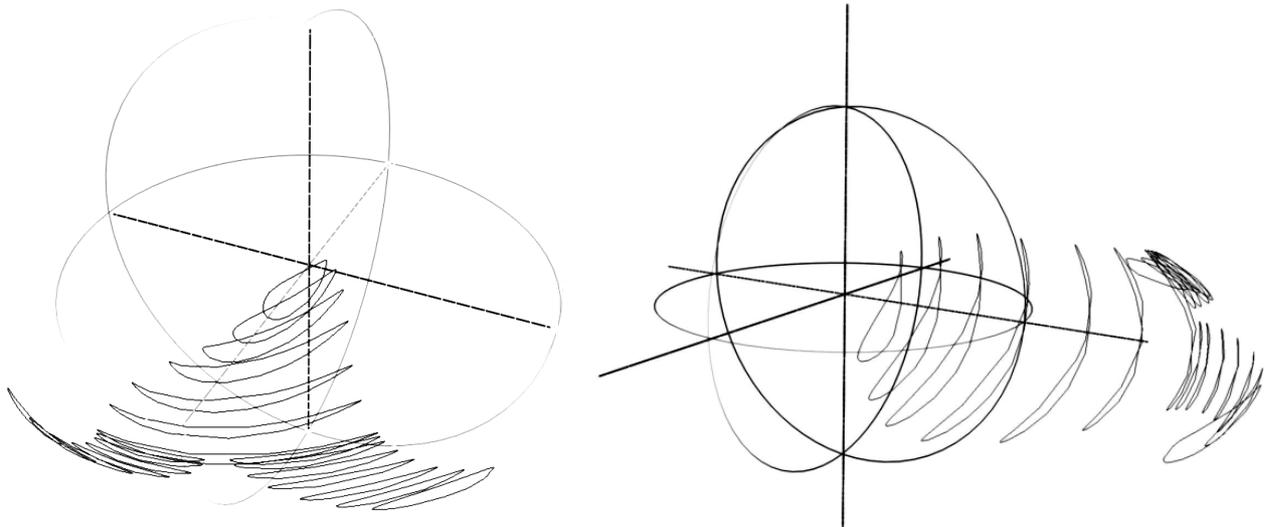


Abbildung 43: Profilschnitte eines Bionikpropellerblattes zur Erzeugung der Stützpunkte

Unter Anwendung der Evolutionsstrategie gelingt hier die sukzessive Annäherung der parametrisierten Oberfläche konventioneller Propeller an die gegebenen Stützstellen auf einfache und erstaunlich schnelle Weise. Mit diesem Verfahren können daher prinzipiell auch gegebene Propellermodelle mit dem Geomtriegenerator im nachhinein parametrisiert und damit auch innerhalb der Optimierungsumgebung bearbeitet werden. Dafür ist nur erforderlich, dass eine Oberflächenbeschreibung existiert bzw. ausgewählte Stützstellen dieser Fläche generiert oder gefiltert werden können.¹⁶⁷

Insbesondere wird die Nachparametrisierung später für die weitere Optimierung eines vom Projektpartner *SLA*-Potsdam bereitgestellten Propellers verwendet¹⁶⁸. Ebenso erlaubt sie später eine Übernahme von Zwischenergebnissen aus anderen Optimierungsverfahren und damit beispielsweise die punktuelle Feinoptimierung von Entwürfen, die mit dem Wirbelgitterverfahren gewonnen wurden.

Bei der Approximation der Bögen des Bionikpropellers treten jedoch - bedingt durch den singulären tangentialen Punkt - prinzipielle Schwierigkeiten auf, die mit der üblichen Darstellung der Profilparameter über der Generatorlinie (und damit über den Radius) kaum überwunden werden können. Die Genauigkeit der Nachparametrisierung im Bereich der tangentialen Bögen ist daher recht gering und erfordert besondere Umsicht bei der Festlegung der Parametrisierung.

¹⁶⁷ Solche Verfahren der Rückführung auf (unbekannte) Ausgangszustände bezeichnet man allgemein auch als Reverse-Engineering.

¹⁶⁸ Kommerzielle Propellerkonturen werden meist im dafür etablierten PFF-Format angegeben. Hierfür existiert bereits eine Import-Routine, welche die nötigen Stützstellen errechnet.

4.4 Nachweis der Konvergenz

Da am Fachbereich bis zu diesem Projekt keine verlässlichen Erfahrungen im Umgang mit CFD-Werkzeugen sowie kaum Erfahrungen mit der Interpretation der solchermaßen errechneten Werte sowie ihrer Genauigkeit gemacht wurden, mussten zunächst einige Vergleichsrechnungen durchgeführt werden. Mit diesen sollten Erkenntnisse gewonnen werden, auf Grundlage derer eine verlässliche CFD-Analyse durch bestimmte Einstellungen und Konfigurationen des komplexen Problems der Propellerumströmung gewährleistet werden kann. Dazu gehört beispielsweise das passende Turbulenzmodell und die minimale, noch eine konvergente Rechnung ermöglichende Gitterauflösung und -größe.

Der Projektpartner *SVÄ*-Potsdam mit langjähriger Erfahrung in der Konstruktion und Bewertung von Propellerentwürfen war zunächst dafür verantwortlich, je einen konventionellen und bionischen Propeller zu entwickeln. Für den Projektpartner war es auch das Ziel, über erste Berechnungen und Messungen eigene Erfahrungen mit der besonderen Topologie des Bionikpropellers zu gewinnen. Obwohl ungleich größer an Erfahrung in diesem Bereich musste auch der Projektpartner seine eigenen Berechnungswerkzeuge für den neuen Anwendungsfall an den Messergebnissen kalibrieren. Durch sukzessive direkte Vergleiche der Ergebnisse der am Fachbereich ausgeführten Rechnungen mit denen der *SVÄ*-Potsdam konnte im weiteren eine ausreichende Verlässlichkeit und Genauigkeit der eigenen Rechnung erreicht werden.

Die vom Projektpartner *SVÄ*-Potsdam durchgeführten Messungen und Rechnungen basieren auf einem dort bewährten Vorgehen. Die Abmessungen der Modellpropeller sowie die dynamischen Kennwerte wurden als Richtwerte übernommen und dienten der Validierung eigener Rechnungen, später auch bei der Optimierung als Nebenbedingungen (siehe Kapitel 3.1.3)¹⁶⁹

Bei der eigenen Nachrechnung der bereitgestellten Modelle gab es anfänglich unerklärliche Geometriefehler. Selbst nach zeitaufwändiger Suche konnte der Fehler nur durch Zufall entdeckt werden: Der Geometrieimport der *Linux*-Version war fehlerhaft, der Import in der adäquaten *Windows*-Version war dagegen fehlerfrei¹⁷⁰. Die Geometrie der vom Projektpartner bereitgestellten Varianten war

¹⁶⁹ ungefähre Werte zur Orientierung: Drehzahl $\approx 20/s$, Durchmesser $\approx 0.22\text{ m}$, Steigungsverhältnis $\approx 0.9\text{ m}$ ($PI423/PI424$), Flächenverhältnis ≈ 0.2

¹⁷⁰ Der Fehler wurde auch von *Ansys* als Bug-Report aufgenommen. Die Entwicklungsumgebung war auf *Linux* festgelegt.

dennoch recht akademisch, was umfangreiche Nacharbeit in Vorbereitung auf erste erfolgreiche Gittergenerierungen erforderte (siehe Abbildung 44).

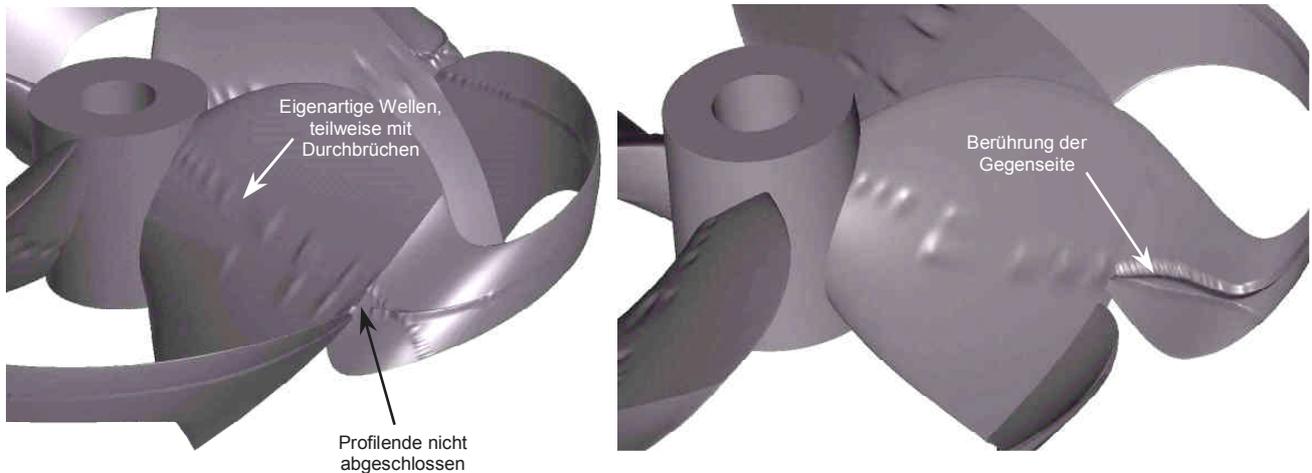


Abbildung 44: Fehler in importierten Geometriedateien

Schon die relativ einfache Vernetzung mit Tetraedern (*ICEM-CFD*-Werkzeug *Tetra*) erwies sich wegen der stark anisotropen Geometrie und Strömungslage als sehr komplex. Die ersten Rechnungen zeigten eine zu große Abweichung von gemessenen Werten, was auf zu grobe bzw. nicht optimal an die Strömung angepasste Gitterdichte deutete. Zudem besitzen die Tetraedergitter zusätzlich zur höheren Elementzahl auch die geringere numerische Qualität gegenüber Hexaedergittern, selbst wenn wandnahe Schichten aus Prismen erzeugt werden¹⁷¹. Für konventionelle Propellervarianten ist daher in der Anfangsphase auch ein strukturiertes Gitter erzeugt worden (Hexaeder-Elemente, Prozess: *Blocking*). Allerdings ist diese räumliche Verblockung des Propellerflügels eine äußerst komplizierte Aufgabe. Mit der Topologie des Bionikpropellers war diese Aufgabe in angemessener Zeit nicht lösbar.

Auf Grund der angestrebten Genauigkeit und der Forderung nach möglichst geringen Rechenzeiten werden generell Turbulenzmodelle verwendet. Diese modellieren die kleinskaligen Wirbel mit ihrem Energie-/Impulstransfer bzw. -dissipation über verschiedene Ansätze¹⁷², so dass diese von der Diskretisierung

¹⁷¹ In Wandnähe verläuft die Strömung annähernd parallel zur Wand. Die dort aus den wandnahen Tetraedern erzeugten Prismen haben günstige orthogonal ausgerichtete Grenzflächen.

¹⁷² Wegen der starken Anisotropie einer Propellerumströmung scheinen hier (wie sich auch bestätigen wird) solche Modelle geeignet zu sein, welche bereits die Anisotropie der Strömung wiedergeben können (z. B. Reynoldsspannungs-Transportmodelle). Die einfacheren Zweigleichungsmodelle wie $k\varepsilon$ oder $k\omega$ sollten hier schlechter abschneiden, da sie über die räumlichen Richtungen insgesamt bilanzieren.

nicht mehr aufgelöst werden müssen. Die Gesamtgenauigkeit wird damit auch von der Güte der Turbulenzmodellierung bestimmt (siehe Kapitel 3.2.3).

Um den nötigen Rechenaufwand weiter zu minimieren, ist man stets bestrebt, die Gitterdichte nur auf das für die Auflösung der Strömungsvorgänge nötige Maß zu reduzieren - trotz Turbulenzmodell. Für außenliegende Bereiche der Strömung, in denen nur große relevante Wirbelstrukturen auftreten, kann daher die Auflösung verringert werden. Während der interaktiven Gittererzeugung am CAD-System "weiß" man bereits, wo solche Zonen liegen, und setzt interaktiv das Gitter dichter (Hexaedervernetzung) oder legt Gitterverdichtungsbereiche fest (Tetraedervernetzung). Wie bereits im Kapitel 4.3.7 vorgreifend beschrieben, kann der Geometriegenerator (bei weiterführenden Angaben zur Dynamik) ergänzende geometrische Strukturen erzeugen, welche unterstützend für die Gitterdichteanpassung sein können (wie z. B. Nachlaufflächen, die mit Gitterdichteparametern belegt werden können, dies ist allerdings nur für Tetraedervernetzung von Nutzen).

Die folgende Abbildung 45 zeigt die Verblockung und Vernetzung des rotierenden Bereichs (Domain) und des konventionellen Propellerblattes zur Rechnung mit einem hochwertigen strukturierten Hexaedergitter. Besonders aus dem rechten Teil des Bildes kann man erahnen, dass ein immenser Zeitaufwand nötig ist, die große Anzahl an Blöcken für diese komplexe Topologie anzusetzen und im Dichteverlauf anzupassen.

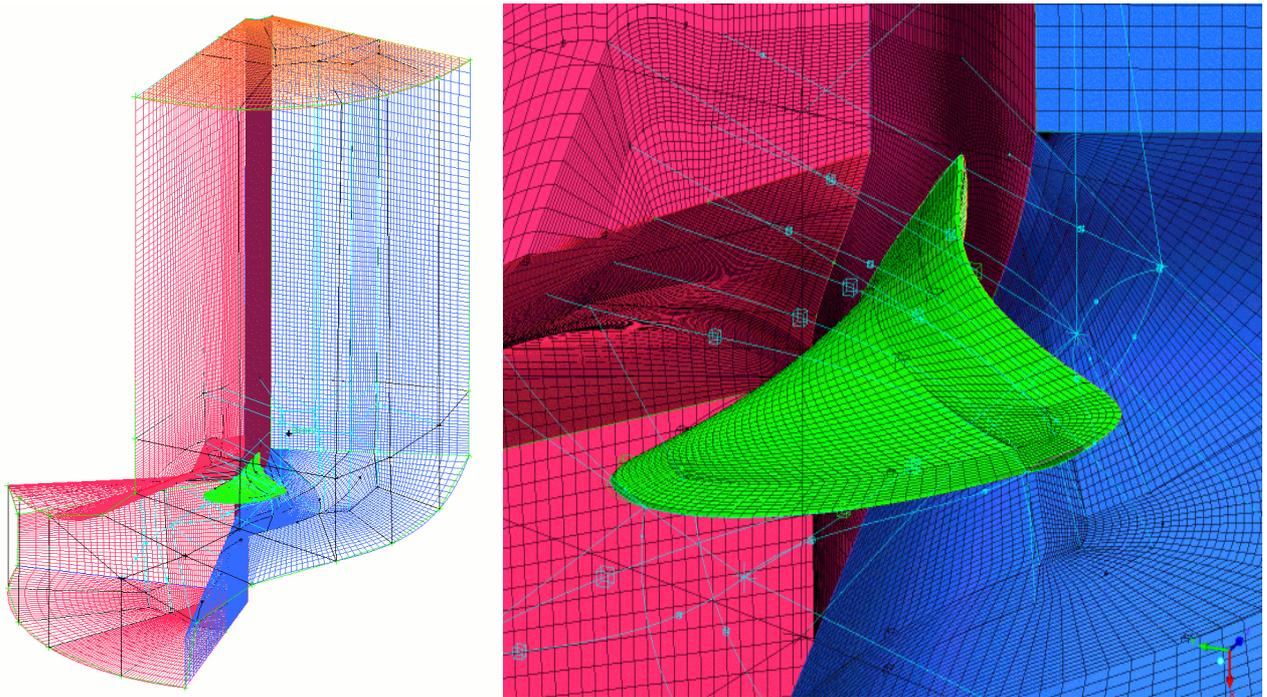


Abbildung 45: Domain mit Hexaedervernetzung, konventionelles Propellerblatt (rotierende Domain, links gesamt, rechts das Propellerblatt vergrößert)

Die Vernetzung mit Hexaedern zeigte erwartungsgemäß die beste Gitterqualität. Während die im Strömungsfall geeigneten Turbulenzmodelle höherer Ordnung auf Tetraedergittern zunächst nicht konvergierten, funktionierte dies auf dem Hexaedergitter für alle Gittergrößen und Turbulenzmodelle.

Um die geeignete Gittergröße und das geeignete Turbulenzmodell zu finden bzw. zu kalibrieren, wurden umfangreiche Rechnungen durchgeführt. Im Anhang, Kapitel 12.2 (Abbildung 98 bis Abbildung 101), sind die Rechenergebnisse anhand der zwei Propellerkennwerte k_T und k_Q grafisch dargestellt. Das Optimum der Rechenergebnisse ist dabei die horizontale Nullabweichungslinie¹⁷³. Als Referenz dienen die Messdaten des Projektpartners *SVÄ*-Potsdam, gewonnen durch Freifahrtversuche mit entsprechenden Modellen.

Deutlich wurde, dass im mittleren Bereich des Fortschrittsgrades alle Modelle etwa gleich gut rechnen, jedoch bei großen (schubfreie Freifahrt) und kleinen (Stand Schub) Fortschrittsgraden große Unterschiede zeigen. Im mittleren Bereich überschätzen alle Modelle in den Rechnungen den Schub und das Moment um etwa 10 %. Interessant ist das vermutliche Auftreten von Interferenzen zwischen den lokalen Wirbelgrößen und der Gitterweite für verschiedene Turbulenz-

¹⁷³ Die Legende listet das verwendete Turbulenzmodell und die erzeugte Gittergröße in Knoten auf.

modelle. Erwartungsgemäß scheiden die für anisotrope Turbulenz besser geeigneten Reynoldsspannungstransportmodelle (BSL- und SSG-RSTM) am besten ab, rechnen aber auch länger. Andere Modellkombinationen wiederum kommen mit und/oder kleinen Fortschrittsgraden nicht zurecht.

Die Abbildung 99 im Anhang zeigt für diese Rechnungen den Verlauf des Wirkungsgrades η_0 , welcher im wesentlichen proportional zum Quotienten der Kennwerte k_T und k_Q ist. Hervorzuheben ist, dass durch die Kompensation gleichgerichteter Ungenauigkeiten der Kennwerte k_T und k_Q eine trügerisch hohe Genauigkeit für den Wirkungsgrad η_0 vorgetäuscht werden kann. Wie in Kapitel 4.5 noch genauer erläutert wird, kann der Wirkungsgrad η_0 aber ohnehin nicht das alleinige Maß der Qualität sein.

Die manuelle Hexaedervernetzung des bionischen *P1424*-Propellerblattes erwies sich als deutlich schwieriger, als zunächst angenommen¹⁷⁴. Ausgegangen wurde zunächst vom gleichen Rechengebiet der Hexaedervernetzung, welche für den konventionellen *P1423* verwendet wurde. Separat dazu erfolgte die sog. Verblockung¹⁷⁵ des *P1424*-Propellerblattes. In Abbildung 46 ist das vorläufige CAD-Modell dieses Propellers sowie dessen Endversion zur Vermessung (mit reduzierter Blattzahl) dargestellt.

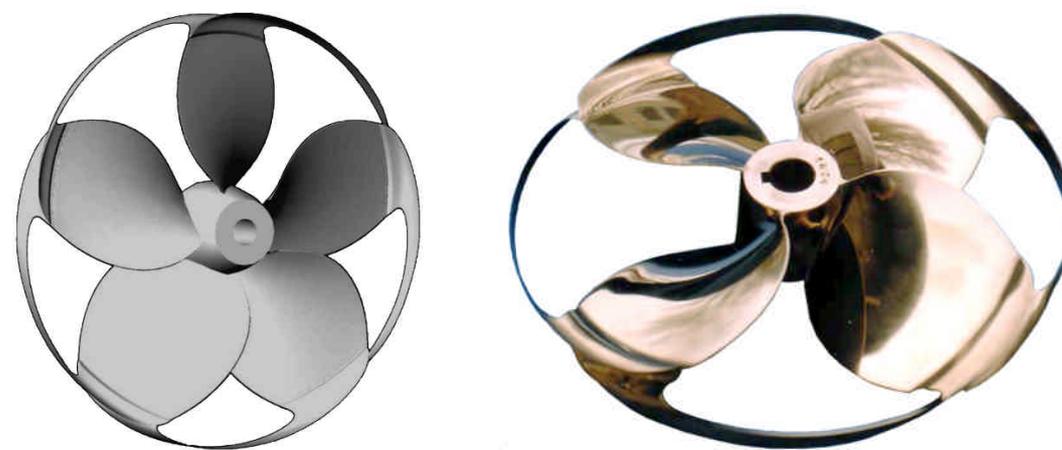


Abbildung 46: *P1424* als CAD-Modell (links) sowie mit reduzierter Blattzahl gefertigtes Messingmodell zur Vermessung (rechts, Foto: SVA)

Nachfolgende Abbildung 47 zeigt rechts ein vervollständigendes Bild vom Hexaedergitter auf dem *P1424*-Propellerblatt (links daneben zum Vergleich das

¹⁷⁴ Selbst die *Ansys*-Support-Ingenieure empfanden diese Aufgabe als besondere Herausforderung.

¹⁷⁵ Verblocken: Festlegen der Blöcke im zu vernetzenden Raum, in welchen jeweils nach Vorgaben die strukturierten Gitter erzeugt werden

Hexaedergitter des *P1423*-Blattes). Die Blockgrenzen sind jeweils an der sich ändernden Verteilungsdichte zu erkennen.

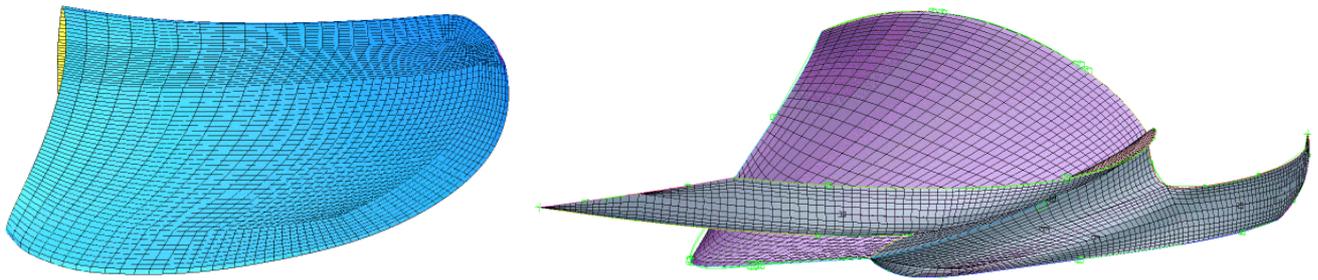


Abbildung 47: Verblockung der Flügel *P1423* und *P1424*

Das Schließen der Blockstruktur des Blattes an die umgebende Blockstruktur aus der *P1423*-Rechnung erwies sich jedoch derart kompliziert, dass parallel versucht wurde, mit allen Mitteln ein brauchbares Tetraedergitter zu generieren. Hierbei wird die äußerst komplexe Topologie um die Blattaufspaltung automatisch vernetzt. Letztlich gelang es, einen Satz geeigneter Parameter und ein entsprechendes Vorgehen bei der Vernetzung zu finden, welche die automatische Erzeugung qualitativ ausreichender Tetraedergitter erlauben; die strukturierte Hexaedervernetzung wurde schließlich aufgegeben¹⁷⁶. Es folgten nun auch hier umfangreiche Untersuchungen zu verschiedenen Gittergrößen und Turbulenzmodellen, um effiziente Konfigurationen zu ermitteln. Im Anhang Kapitel 12.2.2, Abbildung 100 sind die Ergebnisse der Rechnungen für die Bionik-Variante *P1424* dargestellt. Sie zeigen die Genauigkeiten der Rechnung im Vergleich zu den Messungen ($y=0$ -Linie) getrennt in Abweichungen der zentralen k_T - und k_Q -Werte. Deutlich auszumachen ist eine höhere Genauigkeit bei kleinen Fortschrittsgraden, also hohem "Schlupf" des Propellers. Ebenso findet man erwartungsgemäß die besseren Resultate der für anisotrope Turbulenz besser geeigneten Reynoldsspannungs-Transportmodelle (BSL- und SSG-RSTM). Die Rechnungen wurden mit einem vergrößerten Rechengebiet ausgeführt (bisheriges Gebiet skaliert mit 3·Länge und 2.5·Durchmesser, Netzgenerierung im Wesentlichen unverändert). Der Vernetzungsprozess *tetra*¹⁷⁷ erzeugt hierbei etwa 1.7 Millionen Roh-Tetraeder, welche im Verlauf der *tetra*-internen Nachbearbeitung am Ende zu etwa 200000 Knoten mit 250000 Tetraedern, im günstigen Fall auch zu etwa

¹⁷⁶ Es wäre ohnehin äußerst problematisch, diese interaktiv optimierte Verblockung automatisch für stark veränderliche Geometrien des automatischen Optimierungszyklus' zu adaptieren.

¹⁷⁷ Name des *ICEM-CFD*-Programms

25000 wandnahen Prismen und 100000 inneren Hexaedern optimiert werden.¹⁷⁸ Die folgende Abbildung 48 stellt die errechneten Freifahrtkurven für den *P1424* dar und fasst damit die Genauigkeitsdarstellungen des Anhangs aus Kapitel 12.2.2, Abbildung 100 zusammen.

Wie einleitend bereits bemerkt, wurden die Kavitationseigenschaften dieses Propellers nicht in die Optimierung einbezogen. Die Unterschreitung des Dampfdruckes lässt sich aus dem Druckfeld recht einfach ermitteln, ist jedoch für eine verlässliche Kavitationsprognose viel zu ungenau¹⁷⁹. Eine genaue Modellierung der Kavitation führt hier aber zu weit, da es um die prinzipielle Formgebung des Bionikpropellers geht.

Freifahrtkurven (Vergleich Rechnung zu SVA-Messungen): k_T , k_Q und η_0

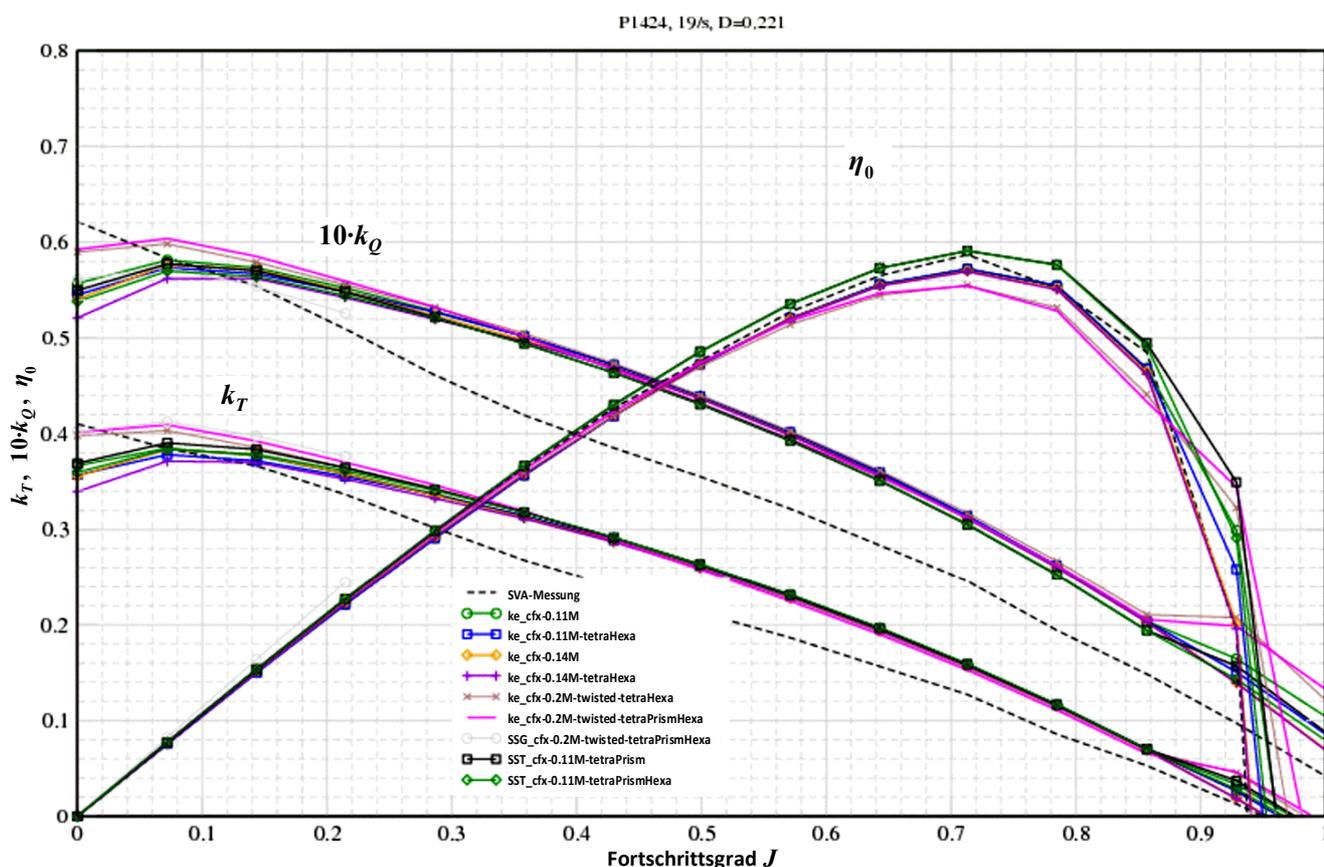


Abbildung 48: Abschließende Freifahrtkurven des *P1424*, Tetraedervernetzung

¹⁷⁸ Bei der Optimierung mit der Evolutionsstrategie erfolgt eine automatisierte Erzeugung, dabei werden etwa generiert (typisch): ca. 300000 Roh-Tetraeder → am Ende optimiert zu 50000 Knoten mit 120000 Tetraedern, 30000 wandnahen Prismen, 10000 Hexaedern (im rotierenden Gitter).

¹⁷⁹ Denn trotz Erreichen des Dampfdruckes in einem Gebiet sind die Folgen stark von der Position abhängig: Die Unterschreitung mitten im strömenden Medium ist weniger kritisch als die Unterschreitung des Dampfdruckes direkt auf der Propelleroberfläche.

Die Genauigkeit stieg, insbesondere rechnet das BSL-Turbulenzmodell mit 200.000 Knoten recht genau, leider war auch der Zeitaufwand am größten.

Da sich nun der Weg der automatischen Vernetzung ausschließlich über die Tetraedervernetzung abzeichnete, wurden zur Kalibrierung der Vernetzungsparameter noch weitere Rechnungen der gleichen Art für den konventionellen Propeller *P1423* nachgeholt. Damit wurde abgesichert, dass mit *tetra* und dessen automatischer Gittererzeugung später ausreichend verlässliche Ergebnisse im Optimierungsprozess erzielt werden können.

Überraschenderweise erwies sich der konventionelle Propeller *P1423* als schwieriger in der Einstellung der Vernetzungsparameter, um eine gute Gitterqualität zu erreichen. Eine vermutliche Erklärung ist, dass die Ausblendung der kritischen Blattspitze beim Bionikpropeller eine gewisse Erleichterung ergibt. Nichtsdestoweniger sind die für den konventionellen Propeller erzeugten Gitter von besserer Qualität.

Im Anhang Kapitel 12.2.3, Abbildung 101 sind die erreichten Abweichungen der neuen Rechnung im Vergleich zu den Messungen ($y=0$ -Linie) für den Propeller *P1423* dargestellt. Die nachfolgende Abbildung 49 zeigt wieder zusammenfassend dessen errechnete Freifahrtkurven für die verschiedenen Turbulenzmodelle und Gittergrößen.

Freifahrtkurven (Vergleich Rechnung zu SVA-Messungen): k_T , k_Q und η_0

PI423, 20/s, D=0,22

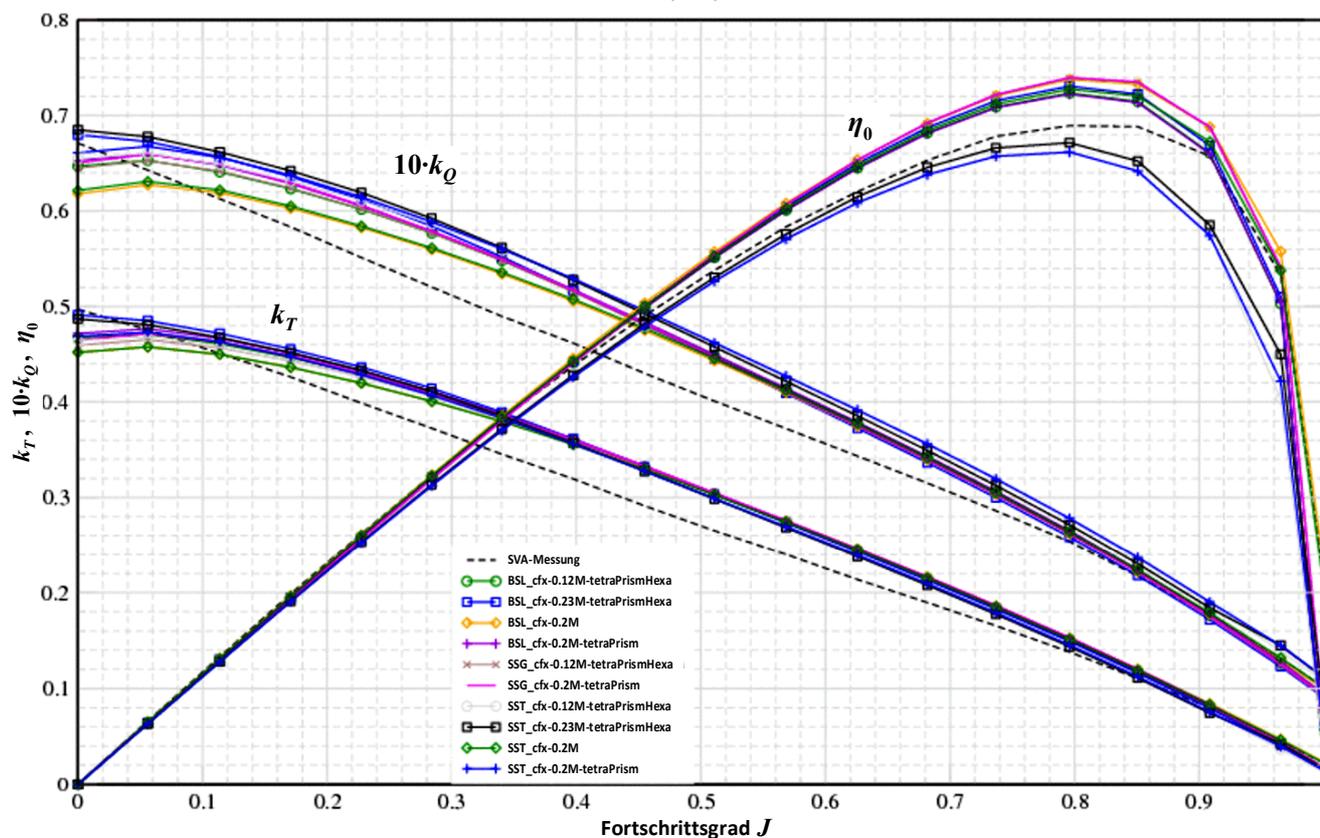


Abbildung 49: Abschließende Freifahrtkurven des PI423, Tetraedervernetzung

Die für den Optimierungszyklus zu verwendende Gittererzeugung stellt - anders als die hier vorgestellten Detailrechnungen - natürlich einen Kompromiss aus Qualität und erforderlicher Berechnungszeit dar. Typischerweise wurden etwa 50.000 Knoten erzeugt. Mit der hier verwendeten skalierten Domain für die Detailrechnungen (3·Länge und 2.5·Durchmesser), welche die Strömungsrandeffekte besser einbezieht und generell genauer ist, wurden manuell Gitter mit etwa 200.000 Knoten erstellt. Erwartungsgemäß war für einige Kombinationen aus Turbulenzmodell und Gittergröße eine deutliche Genauigkeitsverbesserung feststellbar. Die Ergebnisse waren mit denen des Projektpartners konsistent.

Für die weiteren Rechnungen wurde nun einheitlich das SST-Modell mit Transitionsmodellierung (Gamma-Theta) verwendet, da es:

- einen guten Kompromiss aus Rechenzeitbedarf, Stabilität und Genauigkeit aufweist, und
- es auch beim Projektpartner SVA-Potsdam für CFD-Rechnungen an Propellern verwendet wird und daher eine verlässliche Vergleichsbasis bietet.

4.5 Auswahl der Evolutionsstrategie

Wie einleitend und in Kapitel 3.3 dargelegt, kann die Evolutionsstrategie besonders da gut eingesetzt werden, wo über die Qualitätsfunktion des zu optimierenden Zusammenhangs kaum Aussagen getroffen werden können. Im vorliegenden Fall ist bereits die Strömung um konventionelle Propellerblätter - insbesondere bei kleinen Fortschrittsgraden - durch große Druckunterschiede und hohe Beschleunigungen geprägt. Zudem ist die Entstehung großskaliger Randwirbel und kleinskaliger turbulenter Wirbel in ihren Intensitäten und damit Verlusten schwer vorhersagbar. Die Problematik ähnelt der optimalen Auslegung eines Tragflügels: erhöhter Auftrieb ist bei gegebener Kontur proportional zum erhöhten Widerstand. Der Wirkungsgrad ist aber dem Quotienten beider Größen proportional, so dass er allein nicht die skalare Qualität abbilden kann:

$\eta_0 \sim \frac{k_{T,ist}}{k_{Q,ist}}$ ¹⁸⁰ Zur Qualitätsbewertung muss der Wirkungsgrad mithin zusätzlich

auf den jeweils erreichten Schub oder auf das reziproke aufgenommene Moment bezogen werden. Auf Grund der Auslegung für einen realen Anwendungsfall (siehe Kapitel 5.4) wurde entschieden, die Propeller für einen gewünschten Zielmomentenbeiwert $k_{Q,soll}$ (entsprechend der Antriebsmaschine) zu optimieren, daher sind die Abweichungen vom Zielmomentenbeiwert nur gering. Der Qualitätswert ist nun der erreichte Schubbeiwert $k_{T,ist}$, bereinigt um die Abweichungen vom Sollmoment. Dies kann etwa wie folgt implementiert werden:

$Q \sim k_{T,ist} + q \cdot \left(1 - \frac{k_{Q,ist}}{k_{Q,soll}}\right)^{2j-1}$. Der Faktor q bewertet hierin die Abweichungen vom

Sollmoment, der ungerade Exponent bestimmt die Steilheit (mit $j > 0, j \in \mathbb{N}$)

Wie erwähnt, ergibt sich auf Grund des komplexen nichtlinearen Problems ein passendes Szenarium zur Black-Box-Anwendung der Evolutionsstrategie (insbesondere in Verbindung mit der CMA-Schrittweitensteuerung), um die geometrischen Parameter des Bionikpropellers auszulegen bzw. zu optimieren. Während sich eine einfache (1+1)- oder sogar eine $(\bar{\mu}, \lambda)$ -Strategie mit MSR noch innerhalb weniger Stunden bzw. Tage selbst kodieren lassen, wäre die Arbeit bei einer kumulativen oder gar CMA-Schrittweitensteuerung ungleich größer. Insbesondere ist der Aufwand beträchtlich, die Gleichungen aus Kapitel 3.3.7 (Abschnitt *Evolutionsstrategie mit CMA*) numerisch stabil und fehlerfrei zu

¹⁸⁰ zu den Größen k_T und k_Q siehe Kapitel 3.1.3

implementieren. Aus diesem Grund wurde auf eine ausreichend nach diesen Kriterien erprobte und stabile C++-Bibliothek `es_lab`¹⁸¹ verwendet. Die dort implementierte CMA-Strategie ist mit variablen μ - und λ -Parametern einsetzbar, wurde jedoch im Zusammenspiel mit dem für die CFD-Berechnungen zur Verfügung stehenden Rechen-Cluster in der passenden Variante einer $(\bar{3},10)$ -Strategie angewendet.

Wie im nächsten Kapitel noch erläutert wird, ist jedoch für den Optimierungszyklus eine Erweiterung der Bibliothek `es_lab` erforderlich, um ihr eine Datenverbindung über Dateien sowie weitere Optionen für das Zusammenspiel im Optimierungszyklus zuzufügen. Aus diesem Grund wurde die `es_lab`-Version in einem eigenständigen Programm `esloop` gekapselt.

4.6 Verbindungen im Optimierungszyklus

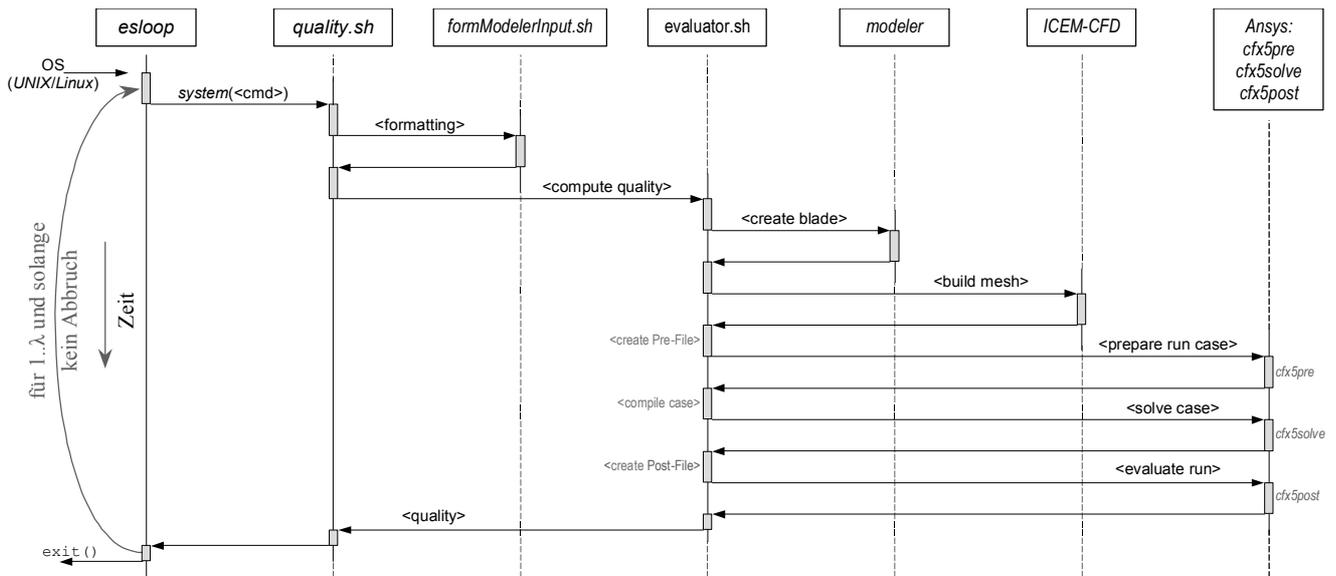
4.6.1 Aufruf und Ablauf

Die Implementierung des Optimierungszyklus erfolgte komplett unter dem Betriebssystem *UNIX/Linux*. Diese Basis ist besonders flexibel und unterstützt die allgemeine Dateiarbeit in höchstem Maße, welche einen großen Teil des Zusammenspiels der Komponenten trägt.

Startpunkt des Optimierungszyklus' ist der Einstieg in die Evolutionsstrategie, hier durch Start des Programms `esloop` (siehe voriges Kapitel). Das nachfolgende UML-Sequenzdiagramm in Abbildung 50 stellt die Standard-Aufrufsequenz zur Berechnung der Qualität eines Nachkommens dar¹⁸².

¹⁸¹ am ehem. Fachbereich Bionik und Evolutionstechnik der TU-Berlin von Dipl.-Math. *Iván Santibañez Koref* entwickelt

¹⁸² Daneben sind noch spezielle Ablaufvarianten für besondere Gegebenheiten implementiert.

Abbildung 50: Aufruf-Sequenz (ohne Details)¹⁸³

Die Generierung eines neuen Nachkommens im Programm `esloop` führt zu einem neuen Objektparametersatz. Für die flexible dateibasierte Kommunikation sind zusätzliche Abstraktionsschichten entstanden, welche in weiteren Hilfsprogrammen umgesetzt sind. Die eigentliche Qualitätsberechnung wird im Skript `evaluator.sh` gesteuert, die o.g. Realisierungskomponente sowie Qualitätskomponente sind hier lokalisiert. Zunächst wird über das in Kapitel 4.3 vorgestellte Programm `modeler` aus dem übergebenen Objektparametersatz einschließlich zusätzlich aufbereiteter Aufrufparameter eine 3D-Beschreibung des kompletten Propellers generiert¹⁸⁴. Über das Vernetzungswerkzeug `ICEM-CFD` wird, wenn es nicht auf Grund schlecht vorbereiteter Geometriebeschreibung scheitert, ein *Ansys-CFX*-kompatibles Gitter erzeugt. Die eigentliche Strömungsberechnung erfolgt im Programm `cfx5solve`, jedoch braucht dieses eine speziell vorbereitete Datei, in welcher das zu verwendende Gitter mit weiteren Angaben zusammengepackt ist. Das erledigt zuvor das *Ansys*-Werkzeug `cfx5pre`. Nach dem erfolgreichen Lauf bzw. dem Erreichen einer konvergierten Lösung erfolgt die integrale Auswertung der Daten über das *Ansys*-Programm `cfx5post`. Letzters wird wieder - wie die anderen beiden *CFX*-Programme - über ein zuvor generiertes

¹⁸³ Die Bezeichnungen der Aufrufe sind i. Allg. Namen der aufgerufenen Funktionen. Jedoch erfolgt hier abweichend die Kennzeichnung von Ausführungsinhalten mit `<...>`, da aus Shell-Skripten heraus keine C++-Funktionen aufgerufen werden können.

¹⁸⁴ Das Skript `formModelerInput.sh` legt fest, welche Werte des Parametervektors die Verläufe der Konstruktionsparameter bestimmen (z. B. nach welchem funktionalen Verlauf und mit wie vielen Werten die Generatorlinie konstruiert werden soll, was z. B. mittels Spline, quadratischen oder linearen Verläufen geschehen kann).

Skript gesteuert und ermittelt die Schub- und Momentwerte. Diese Lösung wird letztendlich wieder an `esloop` als Qualitätsvektor für den aktuellen Nachkommen übermittelt, aus diesem kann abschließend der skalare Qualitätswert gebildet werden.

4.6.2 Spezielles zur Gittererzeugung

Das Erzeugen der kompletten Gitterdatei (im Bild: `<build mesh>`) ist sehr aufwändig. Die zahlreichen "normalerweise" interaktiv in *ICEM-CFD* ablaufenden Vorgänge¹⁸⁵ müssen skriptgesteuert unter Verwertung aller relevanten Informationen ablaufen. Die eigentliche Vernetzung ist dabei nur ein Teilprozess. Die vom Geometriegenerator erzeugte Oberflächenbeschreibung (im *tetin*-Format) führt in *ICEM-CFD* zunächst nur zur Erzeugung einer Blattoberfläche. Aus den allgemeinen Konstruktionsvorgaben liegt zusätzlich der Segmentwinkel mit $\psi = 360^\circ / \text{Blattzahl}$ fest. Unter Ausnutzung der rotatorischen Symmetriebedingung¹⁸⁶ wird das Rechengebiet zu einem langgestreckten Zylindersegment reduziert. Die dafür verantwortliche geschlossene Geometrie wird als fertiges Bauteil dazu geladen. Ist nun der Winkel zwischen vorlaufender und nachfolgender Kante des Blattes größer als der Segmentwinkel ψ , so wird die Blattgeometrie noch zwei mal kopiert und unter Drehung jeweils um ψ und $-\psi$ um die Propellerachse platziert. Die beide Symmetrieflächen schneiden dann an ein oder mehreren Stellen die Propellerflächen, die entsprechenden Schnittlinien werden hinzugefügt und die überstehenden Flächen abgetrennt. Erst nach der Definition von inneren und äußeren Bereichen sowie der Vergabe von Schlüsselnamen für alle Flächen wird das komplette Gitter zusammengestellt.

¹⁸⁵ Schritte sind etwa: Propeller-Flügelgeometrie mit Domain und Nabe vervollständigen, Propellerflügel 2-fach kopieren, mit Domain-Grenzen verschneiden, Geometrie reparieren, ausgezeichnete Domain-Punkte erzeugen, Vernetzung parametrisieren und erzeugen, Glätten, Reparieren, evtl. zusätzliche Prismen-Schichten erzeugen (wieder mit anschließendem Glätten), Namen vergeben, Exportieren

¹⁸⁶ Vereinfachend wurde angenommen, dass der Effekt des Nachlaufs unbeachtet bleibt. Daher herrschen für alle Flügel eines Propellers gleiche Bedingungen, eine transiente Rechnung ist nicht nötig. Es braucht daher stellvertretend nur ein Segment des Propellers berechnet zu werden. Die Symmetrieebenen sind die axial ausgerichteten Segmenttrennflächen (vgl. Abbildung 42 und Abbildung 45).

4.6.3 Fehlertoleranz

Ein universell anwendbares Steuerprogramm verhindert, dass eine gestörte bzw. "hängen"-gebliebene Komponente den Optimierungszyklus zum Stehenbleiben bringt. Dazu wird ein als Argument übergebenes Programm gestartet und in seinem Ablauf überwacht, um nach einer maximalen Laufzeit - falls noch laufend - abgebrochen zu werden. Angewendet wird dieses Werkzeug auf alle kritischen Programme, z. B. auf die zur Gittererzeugung und zur eigentlichen Simulation. Im Abbruchfall werden von `esloop` bzw. den hieraus aufgerufenen Skripten die abgebrochenen Prozesse toleriert und der Nachkomme mit schlechtestmöglicher Qualität bewertet ("Mutant").

4.7 Verwendete Computertechnik

Im Rahmen des Projektes wurde ein einfacher kommerziell angebotener Cluster angeschafft. Der Cluster bestand aus 16 einzelnen Knoten, wobei jeder Knoten auf einem handelsüblichen Mainboard basierte¹⁸⁷. Die Knoten verfügten jeweils über 2 (später 4) CPU-Kerne (*AMD Opteron, 64 bit*), welche mit 2 GHz (später 2.2 GHz) getaktet werden konnten. Pro Knoten standen 2 GB Speicher (später 4 GB) mit DDR-400-Transferrate zur Verfügung. Die Knoten konnten ferngesteuert ein- und ausgeschaltet werden. Eine zentraler Server war für die Datenhaltung bestimmt, die Knoten und der Server wurden jeweils über Gigabit-Ethernet an einen zentralen Switch angebunden.

Zuletzt konnten noch Komponenten für einen Hochgeschwindigkeits-Interconnect nachgerüstet werden. Auf Basis von *Myrinet*-Elementen (LWL-Switch mit 2 GBit/s bidirektional arbeitenden Netzwerkkarten auf LWL-Basis¹⁸⁸) kann besonders das parallele Bearbeiten eines Problems beschleunigt werden.

Softwareseitig war als Betriebssystem *Linux* in der *OpenSUSE*-Distribution knotenweise installiert. Der durch den lokalen Massenspeicher verursachte hohe

¹⁸⁷ Leider war die auf den Mainboards vorhandene Lüfter-Temperaturregelung nicht angeschlossen, so dass der Cluster einen erheblichen Lärmpegel verursacht hatte. Ein Besserung wurde erst später durch einfaches Umstecken der Lüfter-Zuleitungen realisiert, die Temperaturregelung führte zu einem im Leerlauf sehr leisen Cluster.

¹⁸⁸ LWL = Lichtwellenleiter, hier Monomode 50 μm

Wartungsaufwand konnte später über PXE-bootende "diskless"-Knoten¹⁸⁹ und zentralisiertem Betriebssystem-Abbild deutlich reduziert werden. Die Anbindung hierfür läuft über ein zweites von den eigentlichen Nutzdaten unabhängiges Netzwerk. Für die Gittererzeugung und CFD-Berechnung war *Ansys ICEM-CFD* und *Ansys CFX* zunächst knotenweise in der Version 10 installiert, später dann auf Version 11 aktualisiert.

¹⁸⁹ Ein diskless-Computer besitzt keinen lokalen Massenspeicher, sondern startet netzwerkbasiert. Da die notwendigen Daten aber zentral verwaltet werden, sinkt der Administrationsaufwand enorm. Nichtsdestotrotz sinkt auch die Geschwindigkeit von Transfers zum (netzwerkbasierten) Massenspeicher, dies ist hier aber nicht nachteilig.

5 Ergebnisse

5.1 Allgemeines

Um die korrekte Arbeitsweise der vorgestellten Optimierungsumgebung zu testen und gegebenenfalls zu verbessern, wurden zunächst Testläufe mit dem einfacher zu beherrschenden konventionellen Propeller angesetzt. Sie dienten - die in Kapitel 4.4 geschilderten Vergleichsrechnungen aufgreifend - zur weiteren Prüfung der kompletten Optimierungsumgebung.

Einen für alle Einsatzbereiche optimalen Propeller kann es nicht geben, da viele Zieleigenschaften einander widersprechen. Die im vorigen Kapitel zur Validierung errechneten Freifahrtkurven zeigen das Propellerverhalten nur für eine bestimmte Drehzahl. Schon eine Optimierung auf eine idealen Freifahrtkennlinie bei vorgegebener Drehzahl würde das Vorhaben sprengen. Für viele Einsatzfälle ist es darüber hinaus auch nicht notwendig, Eigenschaften breitbandig zu optimieren. Bei den meisten kommerziell eingesetzten Propellern mit hohem Leistungsbedarf (und damit auch hohem Einsparpotential) lassen sich jeweils bestimmte häufig angefahrte Arbeitspunkte finden, auch die Drehzahl liegt durch die jeweils eingesetzte Maschine in engen Grenzen fest. Eine Optimierung in diesen Auslegungspunkten ist daher sinnvoll.

Die parallel verfolgte Optimierung mit dem Wirbelgitterverfahren birgt eine elementare Schwierigkeit, da dieses Verfahren nicht gut für große Profilanstellwinkel der Propellerblätter geeignet ist¹⁹⁰. Der Vorteil des Bionikpropellers ist aber gerade bei hohen Schubbelastungsgraden zu erwarten, da dann der besonders starke Spitzenwirbel die größten Verluste generiert. Die Optimierung sollte also ohnehin unter den Nebenbedingungen eines solchen Arbeitspunktes ablaufen. Die RANSE-CFD-Rechnung hingegen benötigt keine geometrischen Annahmen über die Lage von nachlaufenden Wirbelstrukturen, sie ist aber deutlich rechenaufwändiger.¹⁹¹

¹⁹⁰ Für die Erfassung aller Wirbel müssen dort die Nachlaufflächen modelliert werden. Deren Lage wird aber mit zunehmendem Anstellwinkel des Profils (bzw. steigendem Schubbelastungsgrad) unsicher, so dass iterativ vorgegangen werden muss. Dies erzeugt zusätzliche numerische Schwierigkeiten.

¹⁹¹ Die im vorigen Kapitel erwähnten vom Geometriegenerator erzeugten Nachlaufflächen dienen zur Gitterdichteanpassung und damit nur zur Verbesserung der Genauigkeit.

Die im weiteren Verlauf verwendeten Bezeichnungen für bestimmte Propellervarianten wie z. B. *P1423* u. ä. entstammen den bei der *SVÄ*-Potsdam intern angewendeten Namensregeln für neue oder untersuchte Propellervarianten und wurden der Einfachheit halber übernommen.

5.2 Testläufe für den konventionellen Propeller

5.2.1 Allgemeines

Für den ersten Test der kompletten Optimierungsumgebung wurde ein simpler, vormals zu Testzwecken entworfener konventioneller Propeller per Hand auf ein dem *P1423* entsprechendes Flächenverhältnis getrimmt und automatisch bewertet, allerdings noch ohne eine Optimierung. Hierbei werden wieder die gleichen dynamischen Kenngrößen verwendet, wie im Kapitel 4.4 beschrieben. Zur Interpolation der geometrischen Parameter wurden kubische Splines verwendet, um mit möglichst wenigen Objektparametern glatte Verläufe zu erzeugen. Die folgende Abbildung 51 zeigt diesen ad hoc-Propeller rechts, der sich auf Grund der gleichen Blattzahl und des gleichen Flächenverhältnisses kaum sichtbar vom *P1423* unterscheidet.

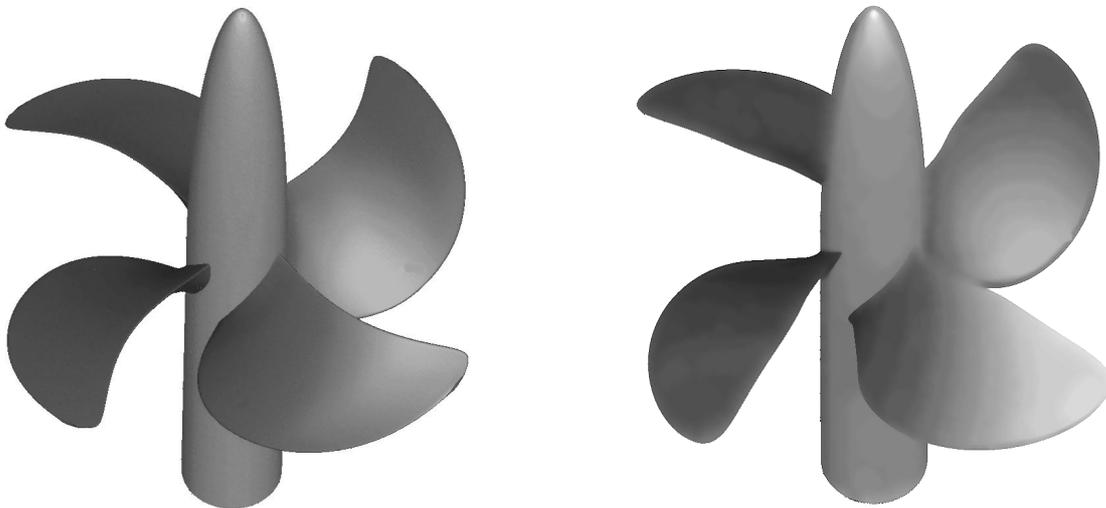


Abbildung 51: Vergleich: *P1423* (links) und sehr einfacher ad hoc Propeller (rechts), gleiches Flächenverhältnis $A_E/A_0=0.6159$ und Steigungsverhältnis P/D

Die Rechnung ergibt die folgende kleine Tabelle mit den Ergebnissen beider automatischen Läufe (mit gleichen Werte für: Steigungsverhältnis P/D , Fortschrittsgrad J und Flächenverhältnis A_E/A_0):

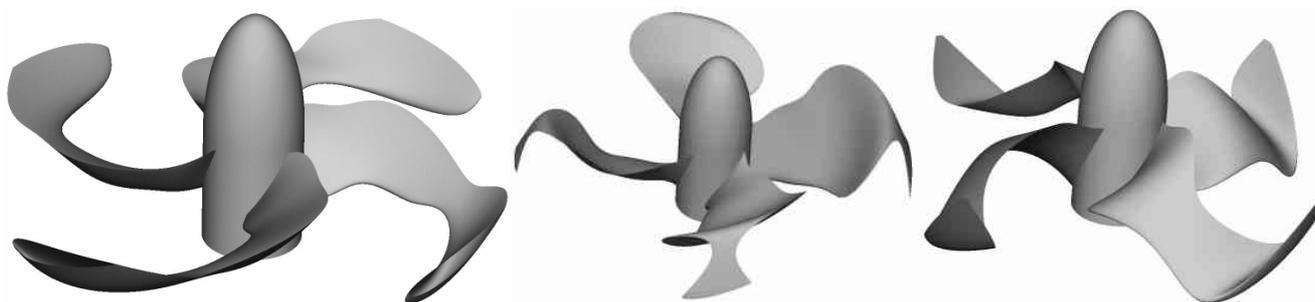
Tabelle 1: Werte des konventionellen ad-hoc Propellers im Vergleich zum PI423

<i>Typ</i>	<i>Schub</i>	<i>Moment</i>	k_T	$10 \cdot k_Q$	k_T / k_Q
PI423-Referenz	143.7	5.455	0.1535	0.2649	5.794
eigener	105.8	3.875	0.1131	0.1882	6.009

Der ad hoc entworfene Propeller lässt hierbei auf Grund des fast gleichen Quotienten k_T/k_Q einen ähnlichen Wirkungsgrad erwarten, jedoch ist dies allein nicht ausreichend, solange nicht der Schub des Vergleichspropellers erreicht wird. Mit diesen Rechnungen - wenngleich noch ohne geschlossenen Optimierungszyklus - wurde der komplette Betrieb der Optimierungsumgebung geprüft.

Über die Steuerung eines globalen Gitterdichtefaktors wurde ergänzend eine einfache dynamische Genauigkeitsanpassung implementiert, welche die Rechnungen in der Startphase auf Kosten der (noch nicht notwendigen) Genauigkeit durch ein gröberes Gitter beschleunigt. Mit zunehmender Generationenzahl wird dieser Faktor zu 1 ausgeblendet.

Nachfolgend sind beispielhaft einige (konventionelle) Propeller der Startphase dargestellt, die vollkommen zufällig erzeugten Varianten noch stark ähneln:

**Abbildung 52: Beispiele von in der Startphase der Optimierung generierten konventionellen Propellern**

Sichtbar sind hier nur die Unterschiede in Hang, Rücklage und Profillänge. Variierende lokale Anstellwinkel und andere Profilparameter sind kaum erkennbar, könnten sich aber als wichtig bei der Qualität des Propellerentwurfs erweisen.

Nach Anregungen der Projektpartner *SVA*-Potsdam und *MMG* wurde eine Fixierung des Antriebsmomentes bzw. des Schubes in die Anforderungen an die Optimierung aufgenommen, um einen höheren praktischen Nutzen der Ergebnisse zu sichern. So bedeutet ersteres die Optimierung des Propellers für ein gegebenes Antriebsaggregat einen Schubgewinn, letzteres ermöglicht evtl. den Austausch dieses Aggregates durch ein kleineres Modell.

Die korrekte Funktion der Nachparametrisierung wie auch der gesamten Optimierung ließ sich auch am Beispiel des Propellers *P1423* nachweisen. Eine Optimierung der nachparametrisierten Variante ergab so kaum noch Änderungen¹⁹².

5.2.2 Optimierung des konventionellen Propellers

Ausgehend vom ursprünglichen Projektziel, eine bionische Variante ähnlich dem Propeller *P1423* zu entwickeln, wurde auf dessen Flächenverhältnis von $A_E/A_0=0.6159$ sowie seinem P/D -Verhältnis von 0.9413 orientiert. Die Optimierung sollte für den Einsatzfall bei $J=0.7960$ und $c_T=0.61$ stattfinden.

Am Ende der ersten Testphase des Optimierungszyklus schien bereits ein interessanter Propeller gefunden, welcher bereits nach 13 Generationen (!) erzeugt wurde¹⁹³. Er ist in der Qualitätsberechnung der Optimierung nach dem *P1423* überlegen, indem er bei etwa gleichem Wirkungsgrad einen um etwa 6 % höheren Schub erzeugt (siehe Abbildung 53). Da noch kaum Erfahrung mit der Wertigkeit derartiger Ergebnisse vorlag, wurde dieses Ergebnis genauer untersucht, insbesondere schon deswegen, weil die Form doch recht ungewöhnlich erscheint.

Tabelle 2: Werte des konventionellen Propellers bei Generation 13 im Vergleich zum *P1423*

Typ ($J=0.7960$)	Schub	Moment	k_T	$10 \cdot k_Q$	η_0	k_T / k_Q
<i>P1423</i> -Referenz	143.7	5.455	0.1535	0.2649	0.7341	5.794
G=13	152.2	5.791	0.1626	0.2813	0.7323	5.780

¹⁹² Vermutlich liegt die Konfiguration des *P1423* sehr dicht am Optimum, da er ein kommerziell erfolgreicher Propellertyp ist.

¹⁹³ Allerdings sind für diese 13 Generationen etwa 140 Qualitätsberechnungen (CFD) notwendig, erzeugt im Optimierungslauf interne Nr. 01

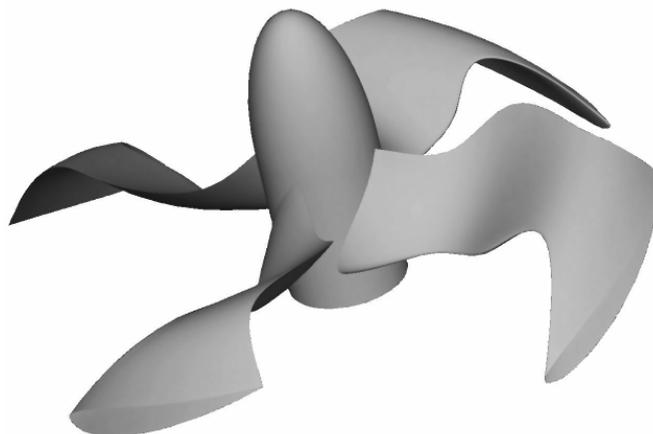


Abbildung 53: Nach 13 Generationen sind die errechneten Werte bereits besser als beim P1423!

Bemerkenswert sind die in Laufrichtung langen Profile am Blattende, da sie in gewissem Widerspruch zur gängigen Praxis stehen. Zudem sind sie am Ende zur Saugseite hin gebogen, was z. B. einerseits der Idee vom *CLT*-Propeller entgegen steht (vgl. [18]), aber andererseits die Idee des Kappel-Propellers bestätigt (vgl. [44]); eine allgemeingültige Präferenz gibt es also hier nicht. Außerdem verschwindet die Zirkulation an der Blattspitze nicht. Da reibungsbehaftet gerechnet wird, kommt für eine plausible Erklärung auch in Frage, dass der Nachteil der höheren Reibung durch die Verschmierung des Spitzenwirbels und damit der Reduktion des induzierten Widerstandes wettgemacht wird¹⁹⁴, zumal bei dem Modellpropeller die Reynoldszahlen relativ gering sind. Hier ergäbe sich dann eine weitere Begründung des Bionikpropeller-Konzepts. Dennoch war bei allen aufkeimenden optimistischen Interpretationen nicht davon auszugehen, dass nach der geringen Anzahl an Generationen der vorliegende Fund ein Ergebnis einer evolutionsstrategischen Optimierung war.

Der Optimierungslauf wurde noch etwas fortgeführt; die nachfolgende Tabelle gibt die von den Daten her interessantesten Nachkommen an¹⁹⁵. Die Daten für den *P1423* entstammen einer Vergleichsrechnung mit dem gleichen Rechenmodell¹⁹⁶.

¹⁹⁴ Dazu wäre noch zu untersuchen (z. B. durch voll-turbulente Rechnung), ob das verwendete Turbulenzmodell in Verbindung mit dem verwendeten Transitionsansatz die Reibung an der Blattspitze evtl. unterschätzt.

¹⁹⁵ In Generation 28 traten 2 bemerkenswerte Nachkommen auf, daher sind auch beide in der Tabelle aufgeführt.

¹⁹⁶ BSL-Turbulenzmodell, wie auch bei den Optimierungsrechnungen

Tabelle 3: Werte späterer Generationen im Vergleich zum *P1423*

<i>Typ (J=0.7960)</i>	<i>Schub</i>	<i>Moment</i>	k_T	$10 \cdot k_Q$	η_0	k_T / k_Q
<i>P1423-Referenz</i>	143.7	5.455	0.1535	0.2649	0.7341	5.794
G=28	158.5	5.992	0.1694	0.2910	0.7372	5.819
G=28	154.9	5.875	0.1655	0.2853	0.7350	5.802
G=30	163.3	6.305	0.1745	0.3062	0.7220	5.699

Auch von den Projektpartnern wurde Interesse daran gezeigt, wie die schnell erreichten Ergebnissen der Evolutionsstrategie zu werten sind. Eine Testrechnung der *SVA*-Potsdam für drei Fortschrittsgrade ergab statt des erhofften Vorteils einen um 2...4 % schlechteren Wirkungsgrad und zeigte zudem eine Zone mit starker Kavitationsneigung auf (s. u.). Des weiteren wurde klar, dass zum Erreichen verlässlicher Aussagen der Kontrollraum erweitert und das Gitter verfeinert werden muss. Zur Validierung wurde eine erfolgversprechende Variante der in der Tabelle genannten dann mit einem wesentlich genaueren Gitter nachgerechnet und dabei auch die Forderung nach konstanten Maschinenparametern einbezogen (gleiche Drehzahl und Leistung, siehe Abbildung 54).

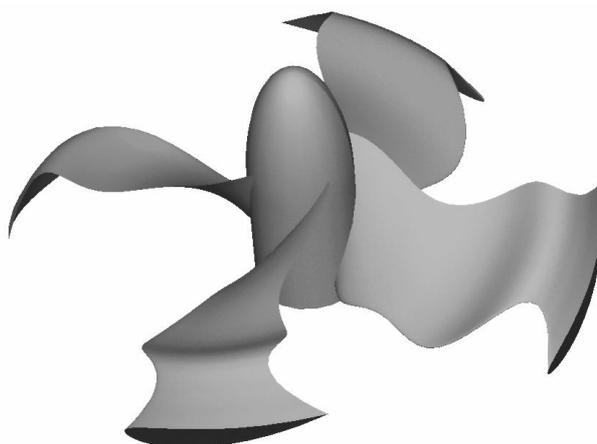


Abbildung 54: Erstes Optimierungsergebnis für konventionelle Propeller

Als Ergebnis dieser Rechnung zeigte sich, dass die Propulsionsdaten¹⁹⁷ dieser Variante denen des *P1423* tatsächlich erst bei hohen Fortschrittsgraden nahe kommen. In der Beuge des in Achsrichtung gebogenen Flügels (Hang) tritt jedoch eine Zirkulationskonzentration auf, die zu starken Druckschwankungen und damit Kavitationsneigung führt. Die nachfolgende Abbildung 55 zeigt die Druckverteilung auf der Saugseite des optimierten Propellers im Vergleich zum *P1423*.

¹⁹⁷ k_T und k_Q

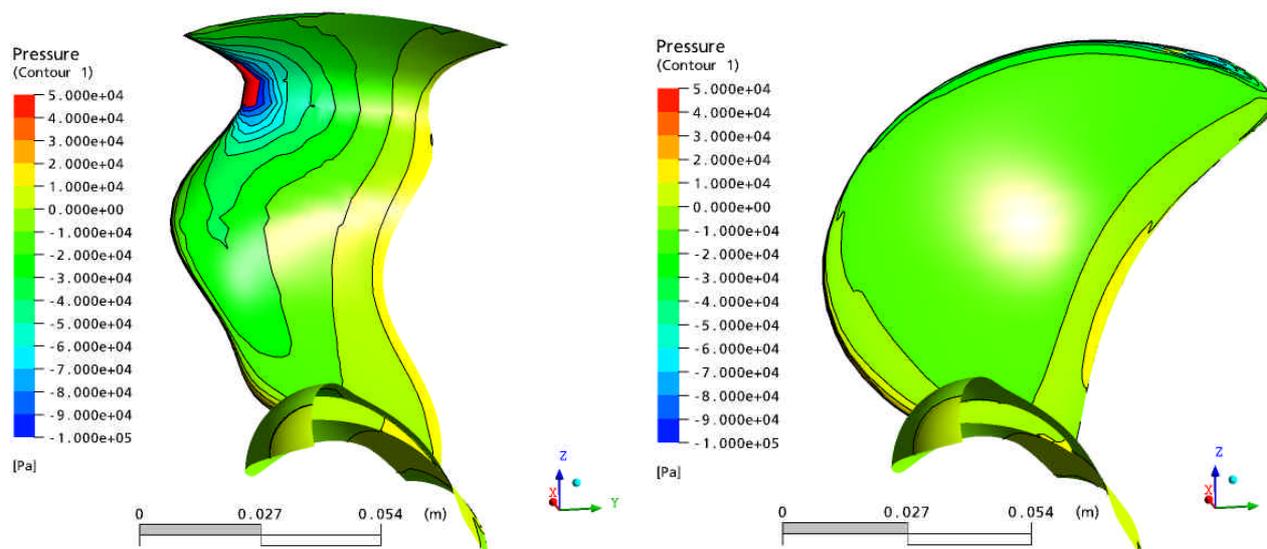


Abbildung 55: Druckverläufe auf der Saugseite des optimierten konventionellen Propellers im Vergleich zum P1423 (SVA, Rieck)

Im Übrigen war klar, dass - wie eingangs erwähnt - dieser Propeller eher ein Zufallstreffer innerhalb der Streuung der Evolutionsstrategie bedeutet.

In der folgenden Abbildung 56 werden die berechneten Freifahrtkurven¹⁹⁸ für den P1423 und der evolvierten Variante des konventionellen Propellers als Zwischenergebnis der Evolutionsstrategie gezeigt. Die Bezeichnungen in den Darstellungen (und folgenden) berechneter Freifahrtkurven folgen dem Schema:

<Turbulenzmodell>_<Knotenzahl>-<Prop.-typ>-<t,p,h>

wobei t für Tetraedergitter, p für eine erfolgreich aufgebaute Prismenschicht an der Wandfläche und h für eine erfolgreiche Tetraeder→Hexaeder-Umwandlung im Strömungsraum steht.

¹⁹⁸ zu Freifahrtkurven siehe Kapitel 3.1.3

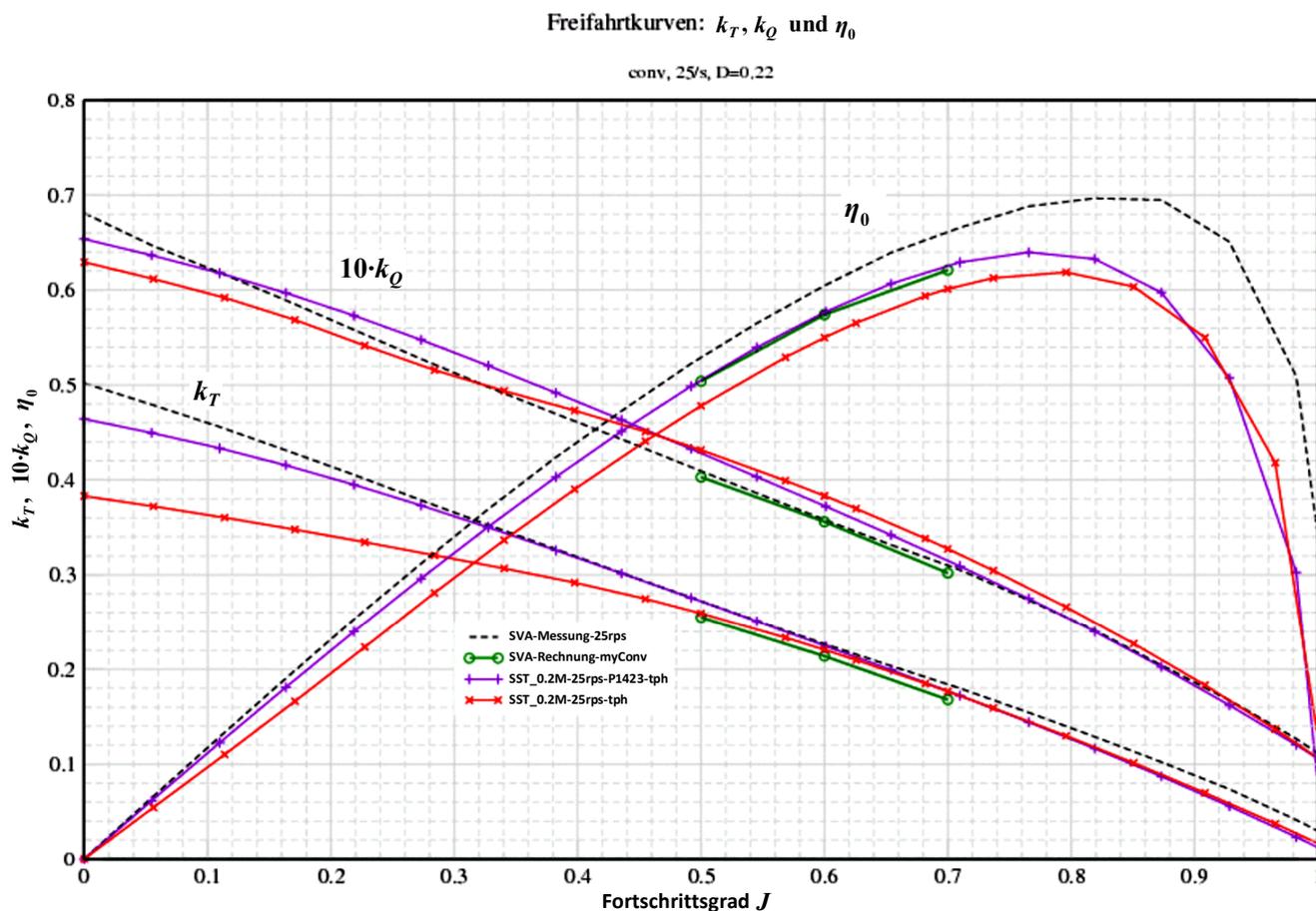


Abbildung 56: Berechnete Freifahrtkurven des optimierten Propellers im Vergleich zum P1423 für 25 s^{-1} (die SVA-Rechnung liegt nur für diese Drehzahl vor.)

Die Werte der Kurven SVA-Rechnung-myConv in der vorstehenden Abbildung stellen die Ergebnisse einer CFD-Rechnung dar, welche die SVA-Potsdam zu den Daten des evolvierten Propeller für eine Drehzahl von 25 s^{-1} errechnet hatte. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wurden sie nur für 3 Fortschrittsgrade ausgeführt. Sie ergeben etwas günstigere Resultate, als die eigenen Rechnungen. Als Fazit lässt sich festhalten, dass sich mit der Genauigkeit der Vorteil der evolvierten Variante bis zu leichter Unterlegenheit verringerte.

Nachfolgend werden noch einige der interessanteren Optimierungsläufe der konventionellen Konfiguration aufgeführt. Sie dienen letztlich aber nur der Kalibration und dem "Feinschliff" der Optimierungsumgebung. Da sie damit nicht direkt dem Ziel der Optimierung des Bionikpropellers unterworfen waren, werden sie im folgenden zur Unterscheidung nur mit *Lauf <n>* bezeichnet.¹⁹⁹

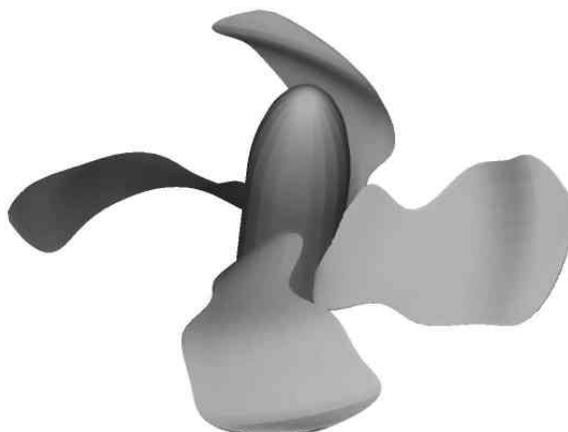
¹⁹⁹ In dieser Phase der Tests am konventionellen Propeller waren pro Nachkomme etwa 40 min Rechenzeit erforderlich. Für eine Generation bedeutete das in der aktuellen Konfiguration der Evolutionsstrategie also 10 Nachkommen.

Lauf 5

In diesem Lauf entstand zunächst an der Blattspitze ein Hang zur Druckseite hin. Auf Grund der starken stochastischen Schwankungen der Objektparameter in der Anfangsphase der Evolutionsstrategie ist dies jedoch lediglich als zufällige Entwicklungsrichtung zu sehen. Zudem bleiben auch im weiteren Verlauf alle Kennwerte unter den erwünschten Werten.

Tabelle 4: Werte konventioneller Propeller aus Lauf 5 im Vergleich zum P1423

Typ ($J=0.7960$)	k_T	$10 \cdot k_Q$	η_0	k_T / k_Q
P1423-Referenz	0.1508	0.2649	0.7211	5.694
0826_095942	0.1459	0.2343	0.7889	6.228
0824_222253	0.1478	0.2420	0.7738	6.109
0825_201903 Abbildung 57	0.1481	0.2405	0.7797	6.156
0826_013223	0.1451	0.2329	0.7888	6.228

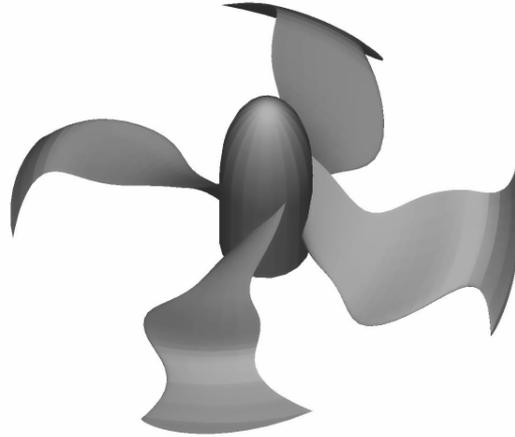
**Abbildung 57: Propeller 0825_201903, Exemplar aus der Tabelle****Lauf 8**

Ab diesem Lauf wird nun als Randbedingung der Optimierung ein vorgegebenes Moment gesetzt ($k_Q = \text{const} = 0.02698$). Dies ermöglicht, die Optimierung schon im Vorfeld auf eine Anwendung mit einer konkreten Antriebsmaschine auszurichten (siehe Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2.1).

Im Gegensatz zum Lauf 5 entstand hier ein deutlicher Hang zur Saugseite des Propellers. Dennoch werden die gewünschten Kennwerte nicht erreicht.

Tabelle 5: Werte eines konventionellen Propellers aus Lauf 8 im Vergleich zum P1423

Typ ($J=0.7960$)	k_T	$10 \cdot k_Q$	η_0	k_T / k_Q
P1423-Referenz	0.1450	0.2698	0.6811	5.376
Abbildung 58	0.1734	0.3039	0.7226	5.705

**Abbildung 58: Propeller aus Lauf 8****Lauf 18**

Die Optimierung erreicht nach ca. 300 Generationen die Vorgaben des P1423 hinsichtlich Moment und Wirkungsgrad innerhalb der Rechengenauigkeit, eine genaue Nachrechnung relativierte diese dem P1423 ähnlichen Werte jedoch wieder um etwa 10 % nach unten.

Interessant war, die Entwicklung der jeweils besten Nachkommen hinsichtlich der Flügelgeometrie zu betrachten. Im Außenbereich entwickelten sich eine sehr stark rückwärtig gerichtete Rücklage sowie wieder zur Druckseite hin gebogene Winglets. Für die Schuberzeugung ist die Rücklage nicht maßgebend, daher kann vermutet werden, dass sie auf Grund fehlender negativer Wirkung durch die Evolution nicht zum Verschwinden gebracht wurde. Nachfolgende Abbildung 59 zeigt die Geometrie nach 411 Generationen sowie darauffolgend ihre geometrischen Verlaufsparemeter.

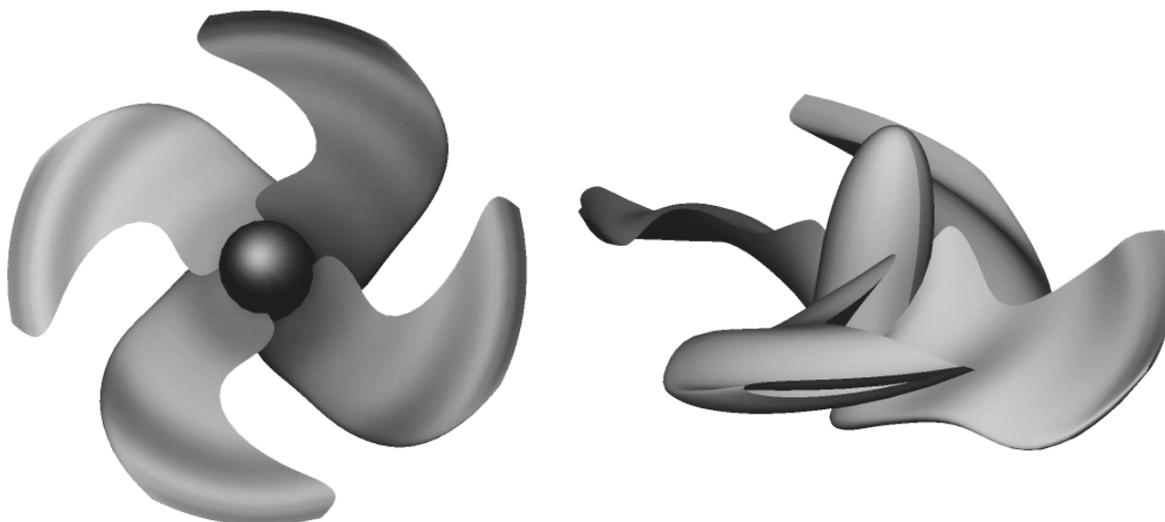


Abbildung 59: Zwischenergebnis nach 411 Generationen (Propeller in zwei Ansichten)

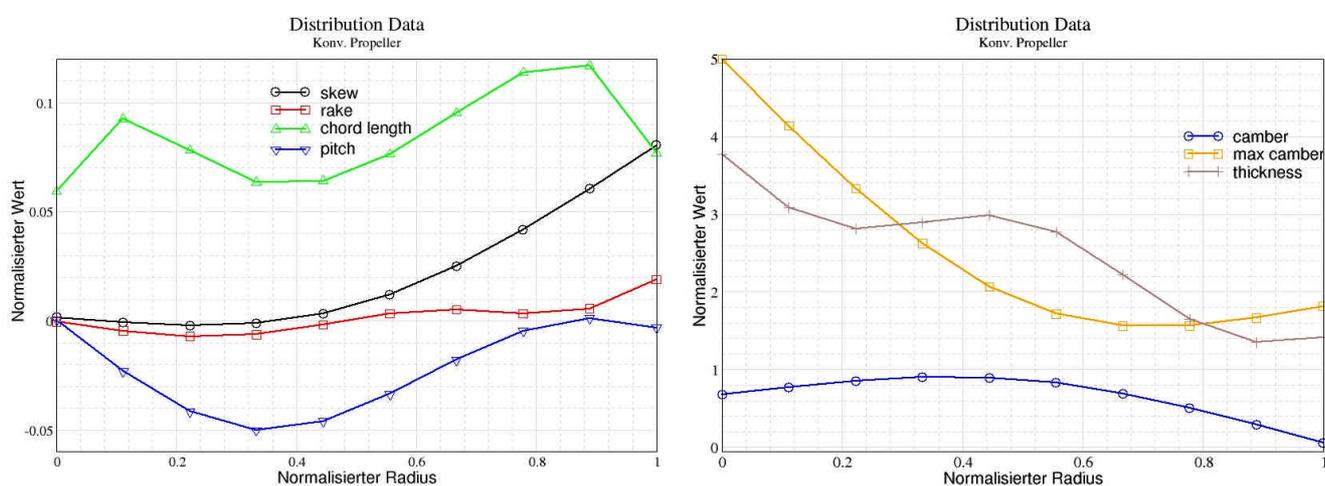
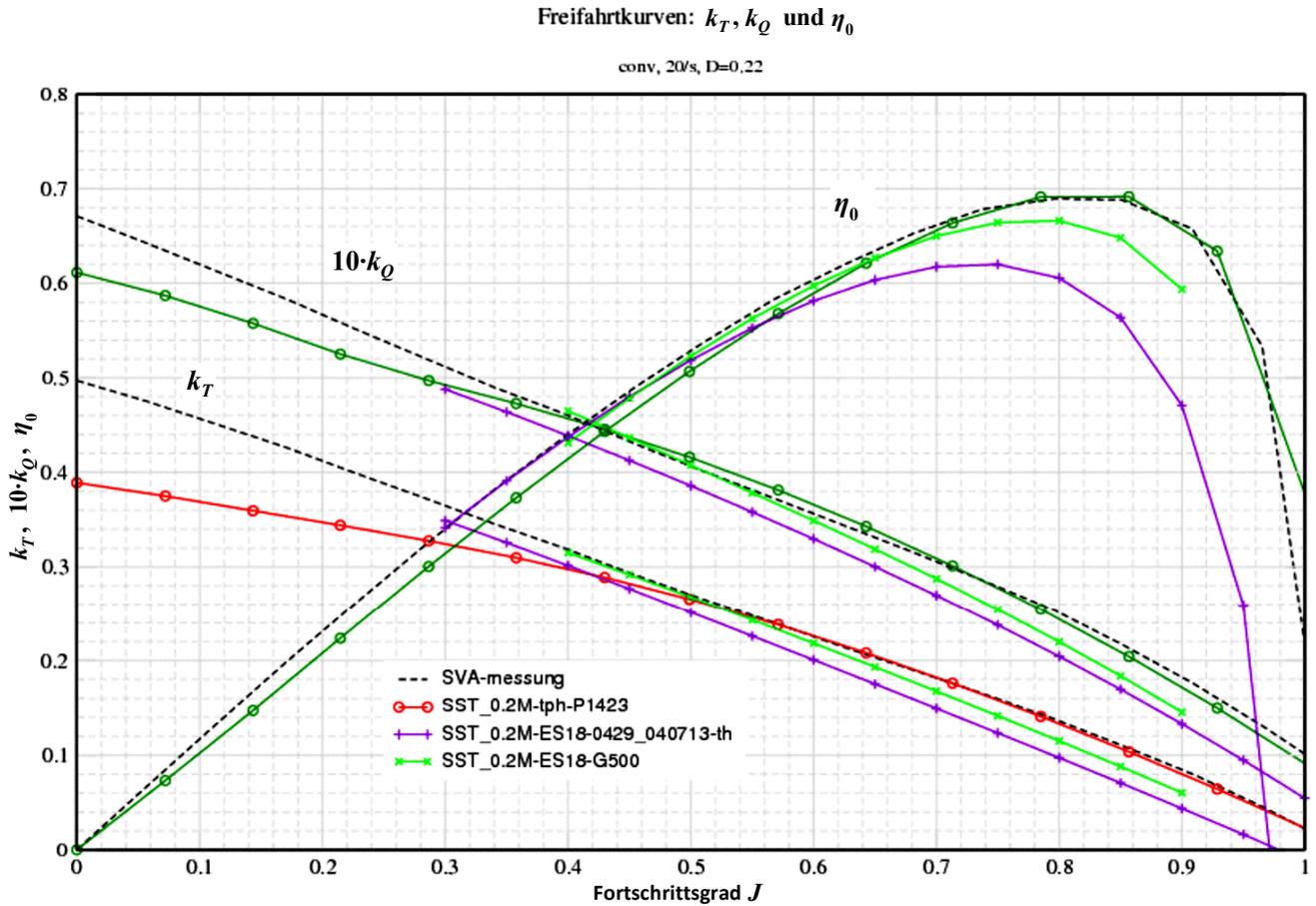


Abbildung 60: links: Rücklage, Hang, Profiltiefe und Anstellwinkel (ohne hydrodyn. Anstellwinkel), rechts: Wölbung, Wölbungsrücklage und Profildicke

Diese Optimierung beim Fortschrittsgrad $J=0.455$ (Drehzahl 20 s^{-1}) lief etwa über 2 Monate. Durch einen Stromausfall wurde dieser Lauf leider bei Generation 500 abgebrochen, obwohl gerade in den letzten Dutzenden Generationen deutliche Verbesserungen bzw. geometrische Konsolidierungen sichtbar wurden²⁰⁰. Die folgenden Freifahrtkurven in Abbildung 61 präsentieren diesen vorläufigen Endstand nach 500 Generationen (SST_0.2M-ES18-G500). Im Bereich des Fortschrittsgrades von $J=0.455$ bis hin zu $J=0.65$ zeigt sich eine Verbesserung gegenüber dem *P1423*, da bei geringerer Leistungsaufnahme der Schub etwa

²⁰⁰ Obwohl die CMA-Schrittweitenregelung einen Restart mit dem letzten intern akkumulierten Status erlaubt, wurde auch dieser beim Stromausfall zerstört.

beibehalten werden konnte. Das Moment wurde für diese Optimierung auf $k_Q=0.04734$ festgehalten.



Nachfolgend sind für einige ausgewählte Fortschrittsgrade die berechneten Schub- und Momentenbeiwerte sowie der sich ergebende Wirkungsgrad für den P1423 aufgeführt:

Tabelle 6: Werte des konventionellen P1423 bei ausgewählten Fortschrittsgraden

J	k_T	$10 \cdot k_Q$	η_0
0.40	0.3174	0.4828	41.9%
0.45	0.2945	0.4558	46.3%
0.50	0.2714	0.4286	50.4%
0.55	0.2480	0.4011	54.1%

Zum Vergleich listet die folgende Tabelle die entsprechenden berechneten Werte für den Propeller der Generation 500 auf:

Tabelle 7: Werte des konventionellen Propellers (Generation 500) aus Lauf 18 bei ausgewählten Fortschrittsgraden

J	k_T	$10 \cdot k_Q$	η_0
0.40	0.3150	0.4650	43.1%
0.45	0.2917	0.4366	47.85%
0.50	0.2677	0.4075	52.3%
0.55	0.2433	0.3784	56.3%

Dabei wird ein vergleichbarer Schub bei niedrigeren Momenten erreicht, der Wirkungsgrad damit verbessert. Es ist auf Grund der Entwicklung zu erwarten, dass noch weitere Verbesserungen hätten erreicht werden können, wenn die Optimierung über 500 Generationen hinaus gelaufen wäre. Dennoch ist mit Sicherheit anzunehmen, dass in einer Detailrechnung mit hoher Genauigkeit wieder eine Korrektur zu geringeren Kennwerten erfolgen würde.

Der genannte Propeller hatte anfangs eine ungewöhnliche und auch unpraktikable große Rücklage (skew), welche aber im weiteren Optimierungsverlauf zurückging (siehe Abbildung 62). Der Stand bei Generation 500 ist geometrisch in etwa mit den Erwartungen zu vergleichen, die sich aus der Optimalvariante des *P1423* ergeben.

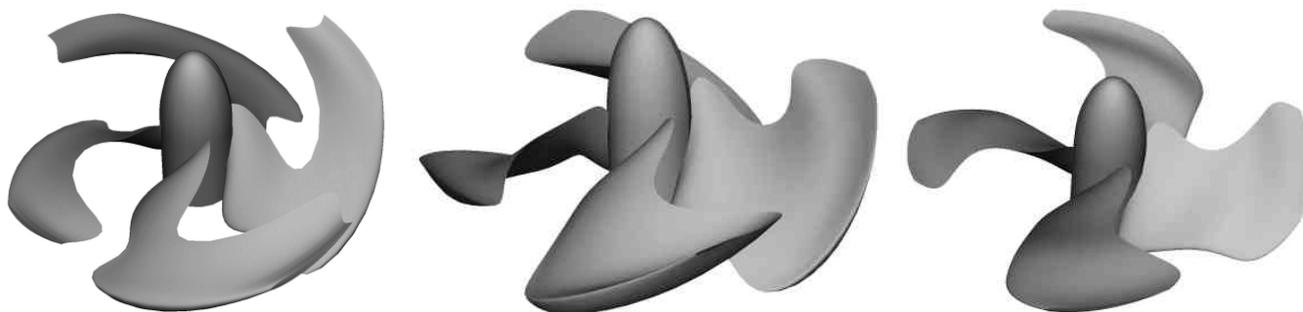


Abbildung 62: Entwicklung der Konfigurationen von Generation 180 bis hin zum Endstand bei Generation 500 (von links nach rechts)

Die folgenden beiden Graphen in Abbildung 63 zeigen die Verläufe der Qualität und der Schrittweite für die Optimierung bis Generation 500. Die Kondition der CMA-Matrix steigt dabei noch gleichmäßig und zeigt damit die andauernde Empfindlichkeitsanpassung. Dies sowie die ständig schwankende Schrittweite lässt den Schluss zu, dass die Optimierung noch nicht abgeschlossen ist.

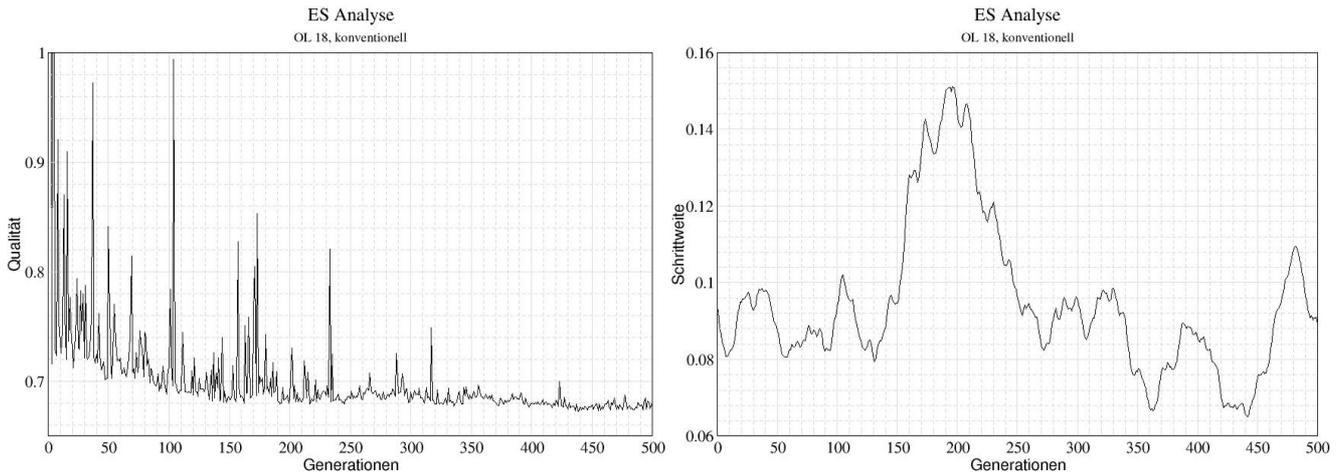


Abbildung 63: Entwicklung der Qualität (links) und der Schrittweite (rechts) der Evolutionsstrategie

Die Konstruktionsdaten der Wölbung, Profiltiefe und Anstellwinkel zeigen einen Rückgang der anfangs ungewöhnlichen Werte (z. B. hohe Rücklage), wie folgende Graphen in Abbildung 64 und Abbildung 65 zeigen.

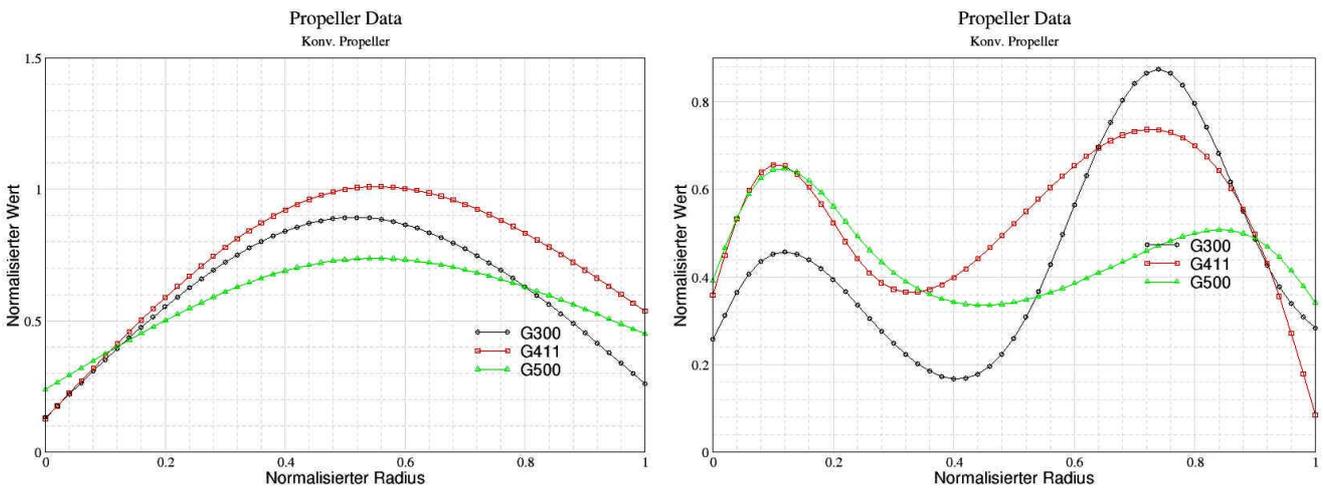


Abbildung 64: Wölbung (links) und Profiltiefe (rechts) des Endstandes im Vergleich zu den Vorgängern

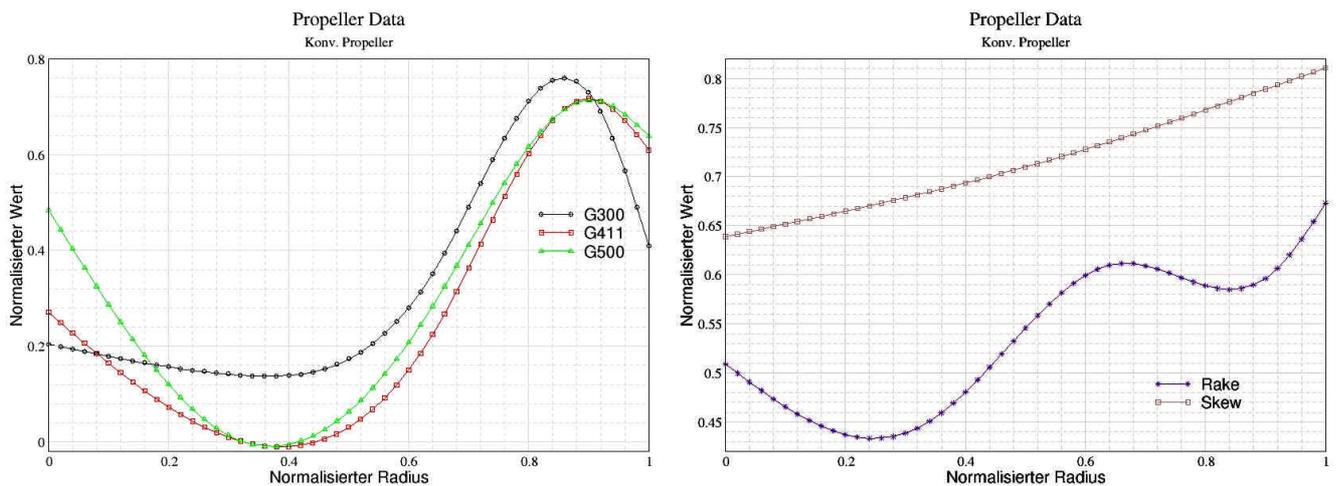


Abbildung 65: Anstellwinkel des Endstandes im Vergleich zu den Vorgängern (links); Hang und Rücklage des Endstandes (rechts)

5.2.3 Zusammenfassung

Insgesamt zeigten die Testläufe mit dem konventionellen Propeller, dass die Optimierungsumgebung zufriedenstellend arbeitet. Die Verläufe der Schrittweite sowie der Qualität legen den Schluss nahe, dass nach deutlich längerer Laufzeit eine sinnvolle Optimalvariante erzeugt werden würde. Die Testläufe wurden daher aus Zeitgründen zugunsten der Optimierung des Bionikpropellers eingestellt.

5.3 Optimierung des Bionikpropellers

5.3.1 Allgemeines

Die Erweiterung der Parametrisierung des konventionellen Propellers auf die Geometrie des Bionikpropellers erfolgte auf die in Kapitel 4.3.6 beschriebene Weise²⁰¹. Abbildung 66 zeigt exemplarisch zwei einfach parametrisierte Bionikpropeller mit geringer Profiltiefe.

²⁰¹ Der Flügel eines Bionikpropellers wird dabei durch rekursive Definition und Aneinanderfügen von einzelnen Propellerblättern konstruiert.

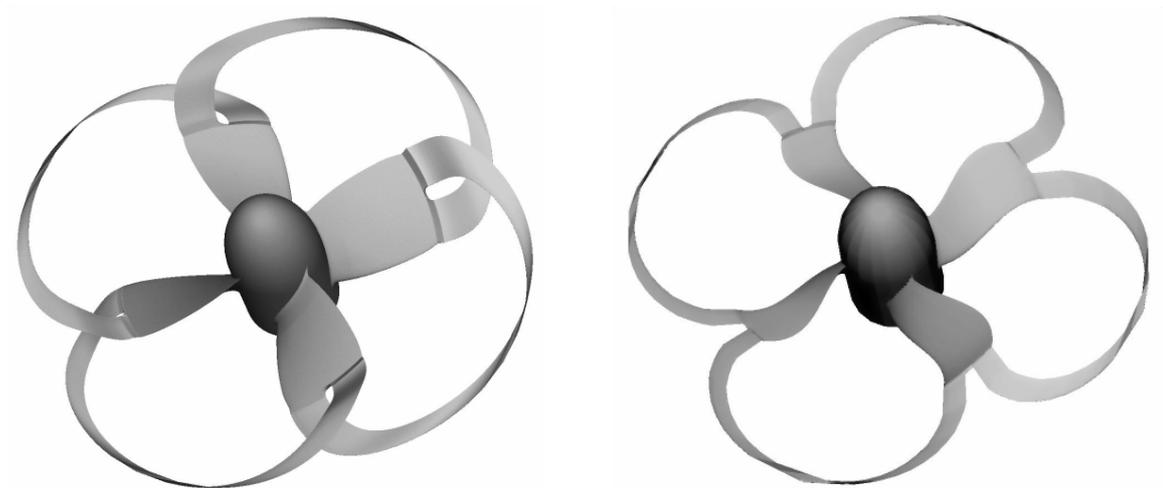


Abbildung 66: Beispiele für simpel parametrisierte Bionikpropeller (hier als CGNS-Datenbank)

Die schon bei der Konstruktion konventioneller Propellerblätter eingeführten Geometrie-Constraints²⁰² kamen auch hier zur Anwendung. Sie hatten sich dahingehend bewährt, dass zur Qualitätsberechnung nur solche Propeller gelangen konnten, die prinzipiell funktionstüchtig sind und gewisse vorgegebene Propellerkenngrößen einhalten (z. B. Durchmesser, Flächenverhältnis, Fortschrittsgrad usw.). War noch das Einstellen der Constraints beim konventionellen Propeller auf Grund der unabhängigen Konstruktionsparameter relativ geradlinig, gestaltete sich dies für den Bionikpropeller deutlich schwieriger. Die Anwendung hierarchisch aufgebauter Constraints mit ihrer klareren Strukturierung vereinfachten diesen interaktiven Prozess jedoch.

Für die Vergleichswerte dient der schon vorgestellte Propeller *P1424*, Ausgangspunkt für die Optimierung sind ferner das Flächenverhältnis von 0.6759, ein Steigungsverhältnis von $P/D=0.9133$ sowie der Fortschrittsgrad $J=0.4298$.

Erste Testläufe der automatisierten Gittererzeugung für den Bionikpropeller scheiterten zunächst. Aus unbekanntem Grund blieb das Vernetzungswerkzeug *ICEM-CFD* mehrfach während des Vernetzens stehen, die Rechnungen mussten dann abgebrochen werden. Die Ursache hierfür konnte nicht abschließend geklärt werden. Insgesamt machte die komplexere Topologie des Bionikpropellers bei der automatischen Vernetzung wesentlich größere Schwierigkeiten, als die des konventionellen Propellers. Einige Beispiele zufällig erzeugter Bionikpropeller zeigt Abbildung 67.

²⁰² Beschränkung der parameterweisen Abbildung (vgl. Kapitel 4.3.6, Abschnitt Constraints)

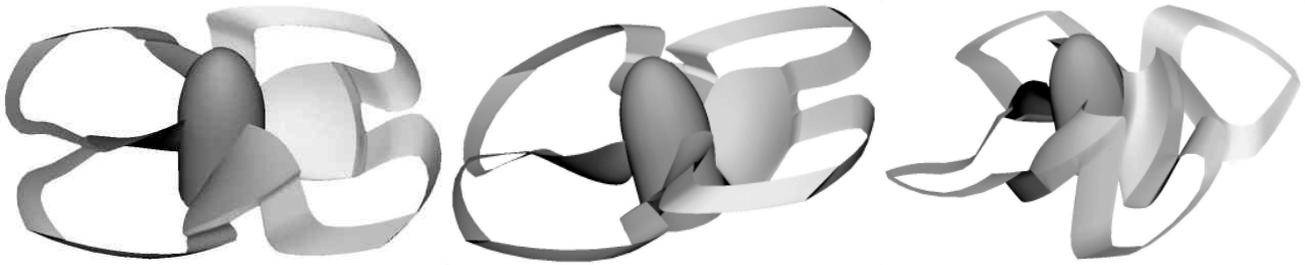


Abbildung 67: Einige Beispiele zufällig erzeugter Varianten korrekter Bionikpropeller

Das automatische Vorgehen war dabei ähnlich dem bei der Vernetzung des konventionellen Propellers:

- 1) Tetraedergitter unter Berücksichtigung der lokalen Gitterdichte im Volumen erzeugen
- 2) Versuch der oberflächennahen Erzeugung von 3-4 Prismen-Lagen (scheitert hier fast immer am Aufspaltspunkt, damit scheitert der gesamte Prozess der Prismenerzeugung)
- 3) Tetraeder → Hexaeder-Umwandlung in freien Gebieten

Die Optimierungsumgebung arbeitete nach Minderung bzw. Behebung dieser Schwierigkeiten auch mit dem Bionikpropeller. Im Gegensatz zum konventionellen Propeller war aber die Fehlerquote auf Grund fehlgeschlagener Vernetzung wesentlich höher als beim konventionellen Propeller ($< 5\%$) und betrug hier nahezu 45% , das heißt, dass etwa die Hälfte der erzeugten Geometrien nicht über die CFD-Rechnung bewertet werden konnte. Über die Qualität der damit ausgeschlossenen Propellervarianten kann somit keine Aussage getroffen werden, denn die Ursachen der abgebrochenen Rechnung können entweder problematische Stellen in der Geometrie²⁰³ oder numerische Probleme im Vernetzungsalgorithmus und damit ein fehlerhafter Aufbau des Lösungsgleichungssystems sein.

Die Nachparametrisierung gegebener konventioneller Propellerkonturen (z. B. als PFF-Datei) wurde auf den Bionikpropeller erweitert und auch getestet. Bei diesem Vorgehen des "Reverse Engineerings" ist jedoch zu beachten, dass eine steigende Approximationsgenauigkeit auch eine ansteigende Objektparameterzahl für eine nachfolgende Optimierung bedeutet. Schnell übersteigt diese Anzahl den für die spätere Optimierung noch akzeptablen Bereich ($< 50\dots 60$), daher ist bei der

²⁰³ Obwohl die Geometrie korrekt ist, können durch den automatisierten Ablauf auch Gebiete entstehen, in welchen die Vernetzungsdichte trotz zugeschalteter Mechanismen zur automatischen Anpassung nicht zur Krümmung der lokalen Oberflächen passt und damit letztlich die komplette Vernetzung scheitert.

Optimierung nachparametrisierter Geometrien eine Abwägung zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit vorzunehmen.

P1450 und P1468

Während der Arbeiten an der Optimierungsumgebung wurden vom Projektpartner *SVÄ*-Potsdam weitere Ideen umgesetzt, zunächst noch nicht auf Basis der durch Optimierungsläufe gewonnenen Erkenntnisse, sondern nach weitergehenden Überlegungen zu den Eigenheiten des Bionikpropellers. Nach dem *P1424* als erstem Versuch mit eher angesetzten Bögen folgten die Modelle *P1450* und *P1468* mit deutlich ausgeprägteren Bogenstrukturen (siehe Abbildung 68).

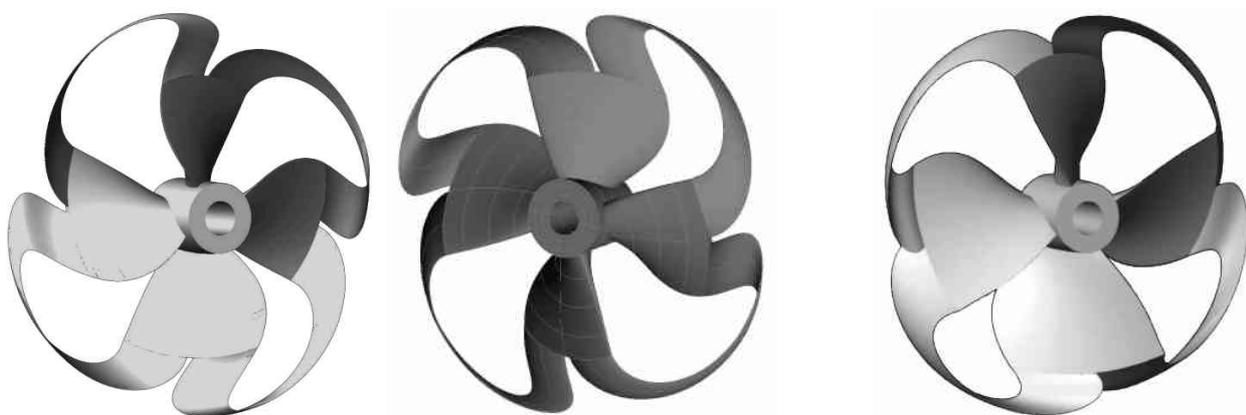


Abbildung 68: links *P1450* (darin links Druck- und rechts Saugseite) sowie rechts *P1468*

Die Varianten *P1450* und *P1468* dienen dem Projektpartner *SVÄ*-Potsdam - wie auch zu Beginn in Kapitel 5.2 erläutert - der Verfeinerung und Verbesserung der hauseigenen CFD-Berechnung. Obwohl die Ringstruktur gegenüber dem *P1424* deutlich anders gestaltet wurde, konnte nur eine Verbesserung von 5 % im Wirkungsgrad bei vergleichbarem Schub erzielt werden.

Der *P1468* wurde nun - abweichend von den anfänglichen Entwurfsvorgaben - bereits für einen hohen Schubbelastungsgrad entwickelt, welcher im Zuge des Erkenntnisgewinns für den Bionikpropeller am aussichtsreichsten erschien. Die Kalibration durch Vergleich der Rechenergebnisse mit den eigenen Messungen konnte auch beim Projektpartner eine ausreichend genaue Qualitätsbewertung auf Basis der RANSE-CFD-Methoden sicherstellen²⁰⁴.

²⁰⁴ Der Vergleich der Genauigkeiten der Methoden der *SVÄ*-Potsdam mit den eigenen zeigt eine bessere Übereinstimmung von Rechnung und Messung beim Projektpartner. Vermutlich gelang dies auf Grund der größeren Erfahrung sowohl mit der Berechnungs-Software als auch mit dem Berechnungsgegenstand, dem Propeller.

5.3.2 Optimierungsläufe

GP5BP

Nach Beratungen der Projektteilnehmer sollte als erste Optimierungsbasis ein erprobter und vom Projektpartner *SVÄ*-Potsdam bereits vermessener konventioneller Propeller dienen, der *CLT*-Propeller²⁰⁵ *GP5OEM* (siehe Abbildung 69). Auf Grund der noch andauernden Arbeiten an der RANSE-CFD-basierten Optimierungsumgebung wurde die parallel verfügbare Umgebung mit dem Wirbelgitterverfahren zur Qualitätsberechnung verwendet²⁰⁶. Die Vorgabe des Fortschrittsgrads von $J=0.1$ für die Optimierung musste (auf 0.4) erhöht werden, da das potentialtheoretische Wirbelgitterverfahren bei hohen Anstellwinkeln der Profile unzuverlässig bzw. zumindest ungenau arbeitet.

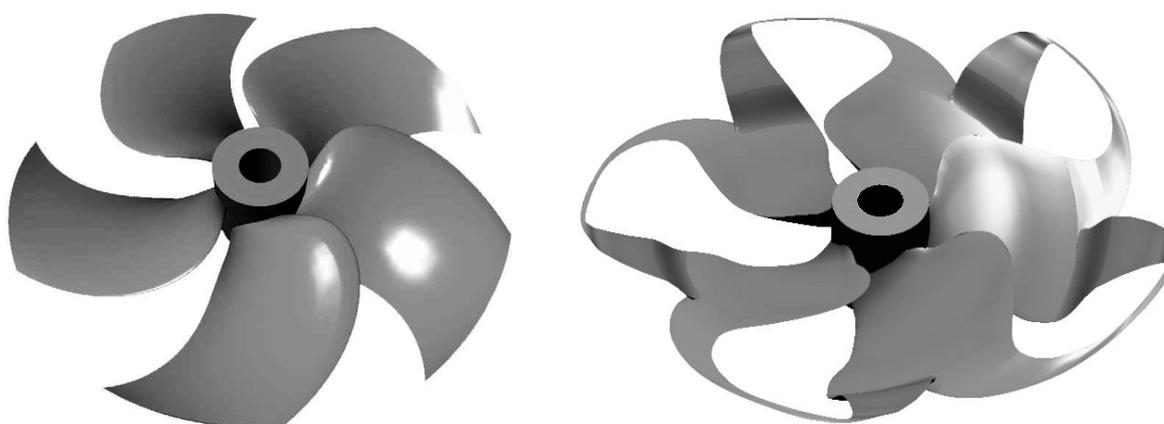


Abbildung 69: CLT-Propeller GP5OEM und abgeleiteter Bionikpropeller GP5BP

Die Optimierungsergebnisse zeigten starke Abhängigkeit vom Fortschrittsgrad und von der Startkonfiguration. Im Laufe der Optimierung wurden Profile an der Flügelwurzel verkleinert, offensichtlich wegen des geringen Beitrags zum Gesamtschub. Daher musste die Umsetzbarkeit des Modells auch hier über die Festigkeitsvorschriften des Germanischen Lloyds für die Mindest-Profildicke abgesichert werden (vgl. [20], [22] und [21]). Für $J=0.4$ konnte eine Verbesserung im Wirkungsgrad erreicht werden.

²⁰⁵ *CLT* = Contracted and Loaded Tip: langgestreckte Spitzenprofile, dadurch geringere Spitzenwirbelintensität und damit Möglichkeit, die Schubbelastung zu erhöhen; kommt dem Ansatz des Bionikpropellers näher, als ein konventioneller Propeller (vgl. [18] und ergänzend [44])

²⁰⁶ Diese Optimierung wurde im Rahmen des Projektes, aber nicht vom Autor selbst durchgeführt.

Nach der erfolgreichen Optimierung²⁰⁷ wurde der Entwurf von der *SVA*-Potsdam noch nach eigenen zusätzlichen Ideen verbessert, um die erreichten Vorteile auch für kleinere Fortschrittsgrade nutzbar zu machen. Der Wirkungsgrad verliert dabei zwar etwas, jedoch wird der geforderte Schub erreicht. Die nachfolgende Abbildung 70 zeigt die berechneten Freifahrtkurven des konventionellen *GP5OEM* zum Vergleich, die mit dem Wirbelgitterverfahren optimierte Variante *GP5BP* und die von der *SVA*-Potsdam verbesserte Variante des *GP5BP*.²⁰⁸

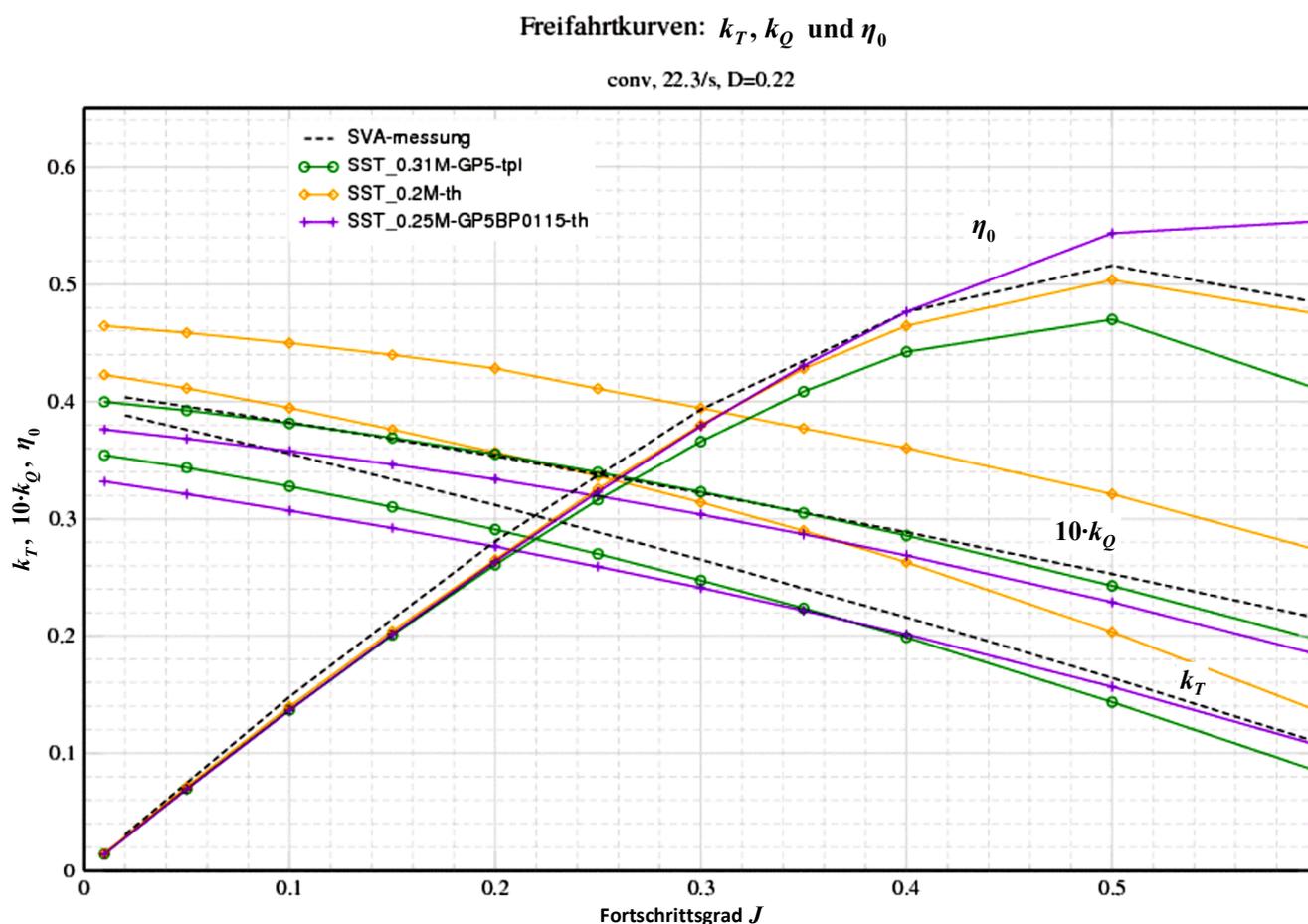


Abbildung 70: Berechnete Freifahrtkurven des konventionellen *GP5OEM* (grün), *GP5BP* bei Generation 7500 (violett) und modifizierter *SVA*-Bionikpropeller (gelb)

Weitere Optimierungsläufe

Nachfolgend werden einige interessante Optimierungsläufe²⁰⁹ des Bionikpropellers mit RANSE-CFD-Qualitätsberechnung mit ihren Resultaten aufgeführt. Die

²⁰⁷ 7500 Generationen

²⁰⁸ Die Messung im Diagramm bezieht sich auf den konventionellen 5-Blatt-Propeller *GP5OEM*.

²⁰⁹ in den folgenden Diagrammen zur Qualität und Schrittweite mit "OL" bezeichnet

Ergebnisse des bereits vorgestellten *P1424* (siehe Kapitel 5.2.3) werden als Vergleich angegeben, die Rechnungen hierzu wurden wieder mit dem gleichen Rechenmodell wie für die Optimierung ausgeführt.

Die hier zu Auswahl herangezogenen Läufe liegen auf Grund der in diesem Zeitfenster verwendeten ähnlichen Einstellungen der Optimierungsumgebung hintereinander. Frühere Läufe werden hier auf Grund noch schlechterer Qualität nicht dargestellt.

Optimierungslauf 13

Tabelle 8: Werte eines Bionikpropellers aus Optimierungslauf 13 im Vergleich zum *P1424*

<i>Typ (J=0.7960, SST)</i>	<i>Schub</i>	<i>Moment</i>	k_T	$10 \cdot k_Q$	η_0	k_T / k_Q
<i>P1424-Referenz</i>	104.9	3.986	0.1242	0.2145	0.7235	5.792
<i>1025_164116</i>	98.9	4.019	0.1171	0.2163	0.6762	5.413

Der Aufspaltpunkt ist hier stark an die Nabe herangezogen, die Flügel liegen nahezu übereinander. Im Endstand (ohne konvergierte Optimierungslösung) wird das Auslegungsmoment erreicht, aber η_0 ist wegen des zu geringen Schubes zu niedrig. Zu beachten ist außerdem der sehr nah an die Nabe herangezogene Aufspaltpunkt. Die Bögen bekamen hier nahezu die Form von Doppeldeckerflügeln (siehe Abbildung 71).

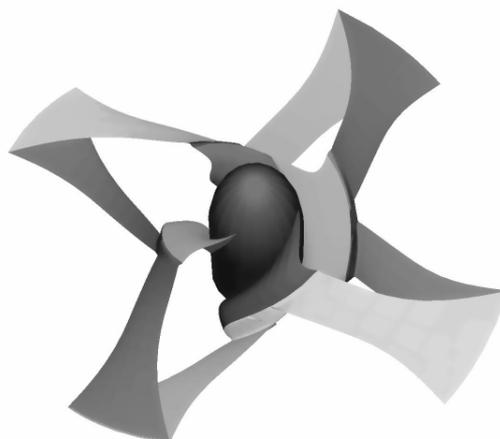


Abbildung 71: Optimierungslauf 13: Propeller mit Doppeldeckerflügeln

Die globale Schrittweite zeigt lediglich eine erste Stufe der Verkleinerung. Bis zum Erreichen der Konvergenz würde sich dieses typische Verhalten bei der CMA-Evolutionsstrategie - ein Auf- und Abschwellen der Schrittweite - mehrfach wiederholen.

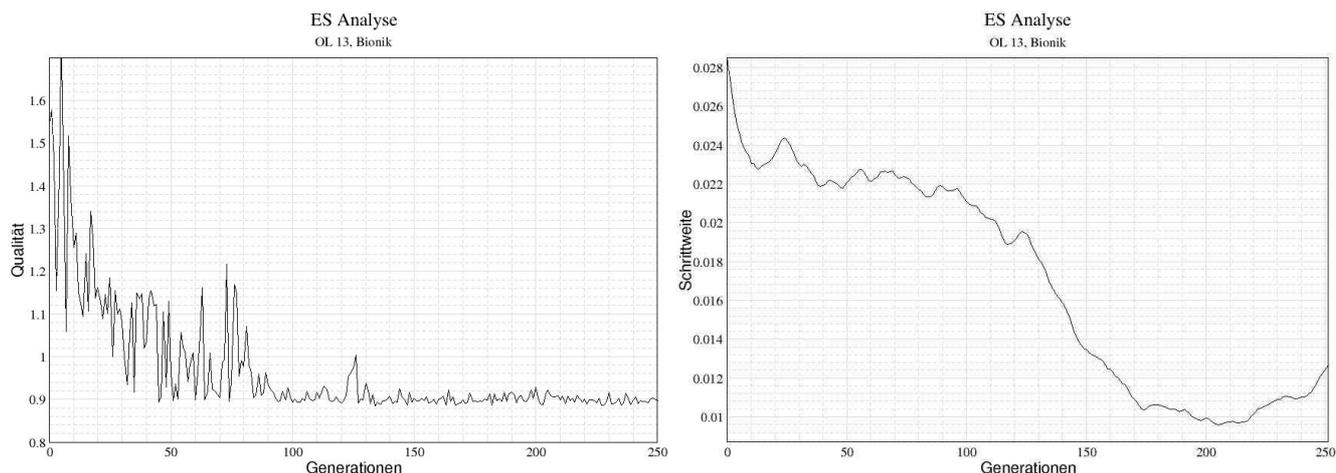


Abbildung 72: Entwicklung der Qualität und der Schrittweite im Optimierungslauf 13

Die Kondition der Kovarianzmatrix steigt auch hier stetig, bis Generation 20 sehr steil, dann etwas flacher und ab etwa 200 Generationen noch steiler bis auf 1.7. Auch hier ist klar, dass keine Konvergenz erreicht wurde.²¹⁰

Optimierungslauf 14

Charakteristisch war hier die Verkürzung der Flügelwurzel und Verlagerung der Auftriebsgenerierung ganz nach außen. Das Sollmoment wird auch hier erreicht, jedoch ist dabei der Wirkungsgrad η_0 zu niedrig.

Tabelle 9: Werte von Bionikpropellern aus Optimierungslauf 14 im Vergleich zum P1424

Typ ($J=0.4298$, SST)	Schub	Moment	k_T	$10 \cdot k_Q$	η_0	k_T / k_Q
P1424-Referenz	256.6	8.261	0.3038	0.4446	0.4674	6.833
1113_010111	247.6	8.269	0.2931	0.4449	0.4506	6.588
1109_215650	254.0	8.966	0.3007	0.4825	0.4264	6.234

Die Kondition der Kovarianzmatrix steigt auch hier stetig, ab etwa 30 Generationen flacher und ab 100 wieder steiler bis auf 1.45. Die Entwicklung der Qualität und der Schrittweite der Evolutionsstrategie zeigen folgende beiden Abbildungen:

²¹⁰ Die grafische Darstellung der Kondition unterbleibt im folgenden zugunsten einer qualitativen Beschreibung.

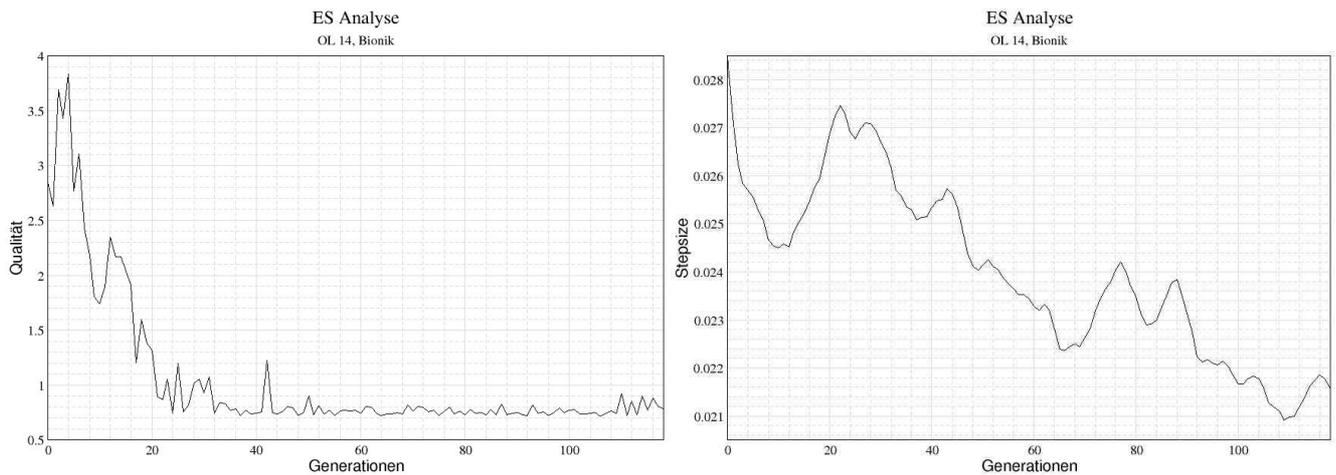


Abbildung 73: Entwicklung der Qualität und der Schrittweite im Optimierungslauf 14

Optimierungslauf 15

Die Startwerte der Evolutionsstrategie wurden aus einer vorgeschalteten Optimierung einer (1+1)-CMA gewonnen²¹¹. Das Basispropellerblatt ist hier relativ lang²¹² und lässt damit kaum einen verbleibenden Radius für die Bögen übrig (siehe Abbildung 74). Damit erinnert die Propellerform an die *P1424*-Variante, bei der die Bögen kaum einen Beitrag zum Schub leisten kann.

Tabelle 10: Werte eines Bionikpropellers aus Optimierungslauf 15 im Vergleich zum *P1424*

<i>Typ (J=0.1435, SST)</i>	<i>Schub</i>	<i>Moment</i>	k_T	$10 \cdot k_Q$	η_0	k_T / k_Q
<i>P1424-Referenz</i>	334.5	10.453	0.3960	0.5625	0.1608	7.040
<i>1129_124018</i>	310.2	10.149	0.3673	0.5461	0.1536	6.725

Während dieses Laufs wird das Sollmoment fast erreicht, jedoch nicht der Schub.

²¹¹ im Gegensatz zur $(\bar{3}, 10)$ -Strategie, welche für die eigentliche Optimierung verwendet wird

²¹² bzw. der Aufspaltpunkt liegt weit außen

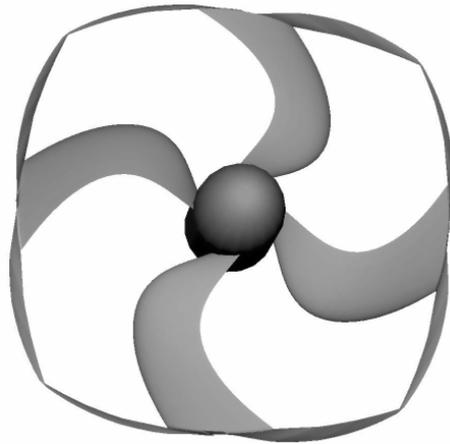


Abbildung 74: Optimierungslauf 15: sehr langes Basispropellerblatt

Die Kondition der Kovarianzmatrix steigt auch hier stetig, ab etwa 30 Generationen bis Generation 80 flacher, ab da wieder ansteigend bis 1.3. Auch hier ergibt die zu niedrige Anzahl an Generationen keine konvergierte Lösung. Einige charakteristische Parameter der Evolutionsstrategie (Qualität und Schrittweite) sind in den beiden nächsten Abbildungen aufgeführt:

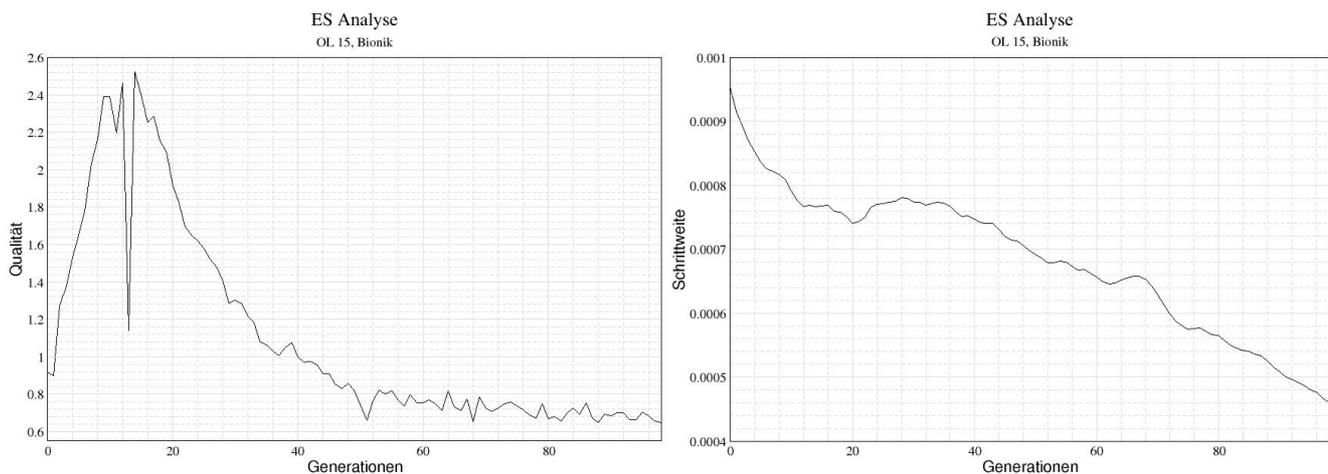


Abbildung 75: Entwicklung der Qualität und der Schrittweite im Optimierungslauf 15

Aus den bisherigen Erfahrungen lässt sich ableiten, dass den Änderungen in der errechneten Qualität kaum Änderungen in der sichtbaren Struktur zugrunde liegen. Das Optimierungsergebnis hängt stark vom Fortschrittsgrad ab, wie auch zu erwarten war. Ebenso zeigt der Startwert bzw. die Startkonfiguration einen großen Einfluss auf die Entwicklung der Qualität.

Optimierungslauf 19

Keiner der Nachkommen innerhalb der erzeugten 426 Generationen in diesem Lauf erreicht einen Wirkungsgrad von mehr als 40 %. Der Schub oder das

Moment wurden jeweils erreicht, jedoch vermindert der jeweils andere Kennwert den Wirkungsgrad erheblich, wie die folgende Tabelle zeigt.

Tabelle 11: Werte von Bionikpropellern aus Optimierungslauf 19 im Vergleich zum P1424

<i>Typ ($J=0.4298$, SST)</i>	Schub	Moment	k_T	$10 \cdot k_Q$	η_0	k_T / k_Q
<i>P1424-Referenz</i>	256.6	8.261	0.3038	0.4446	0.4674	6.833
<i>0912_013114, max η_0</i>	226.3	8.553	0.2680	0.4602	0.3982	3.694
<i>0708_140344, max k_T</i>	257.8	9.872	0.3051	0.5312	0.3929	4.207

Die folgende Abbildung 76 zeigt den Nachkommen mit dem besten Wirkungsgrad, Abbildung 77 dagegen den Nachkommen mit maximalem Schub.

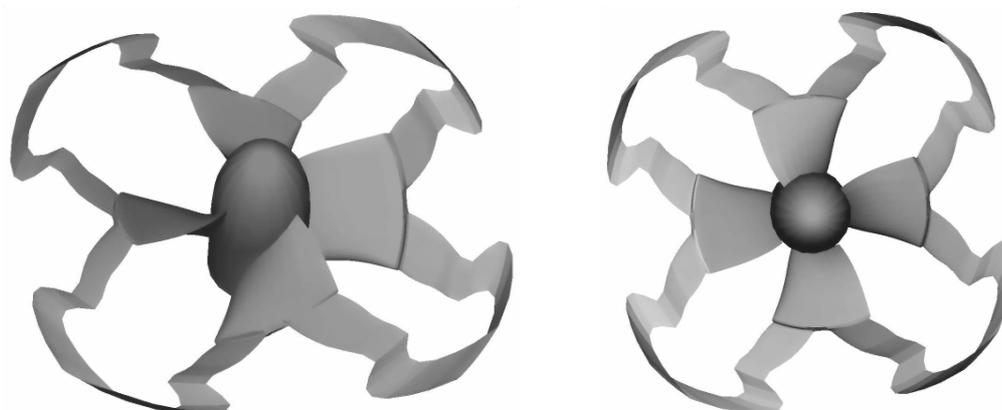


Abbildung 76: Optimierungslauf 19: bestes η_0

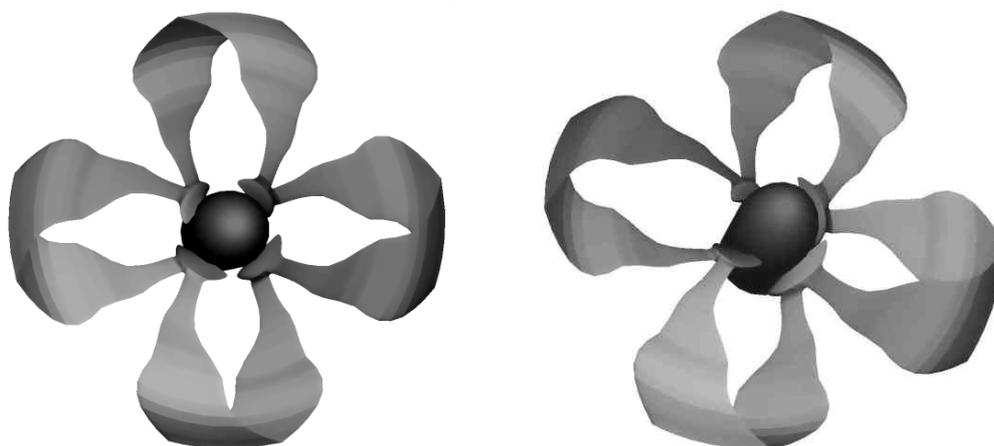


Abbildung 77: Optimierungslauf 19: bestes k_T

Auch diese Optimierung lief über fast 500 Generationen. Erstmals sind hier die charakteristischen Schwankungen in der Schrittweite der Evolutionsstrategie zu finden. Jedoch ist auch dieser Lauf nicht konvergiert.

Die Qualitäts- und Schrittweitenentwicklung zeigen wieder keine Merkmale einer Konsolidierung (siehe Abbildung 78), die Kondition der Kovarianzmatrix bestätigt allerdings erneut die gleichmäßige Empfindlichkeit der Parametrisierung (siehe Abbildung 79).

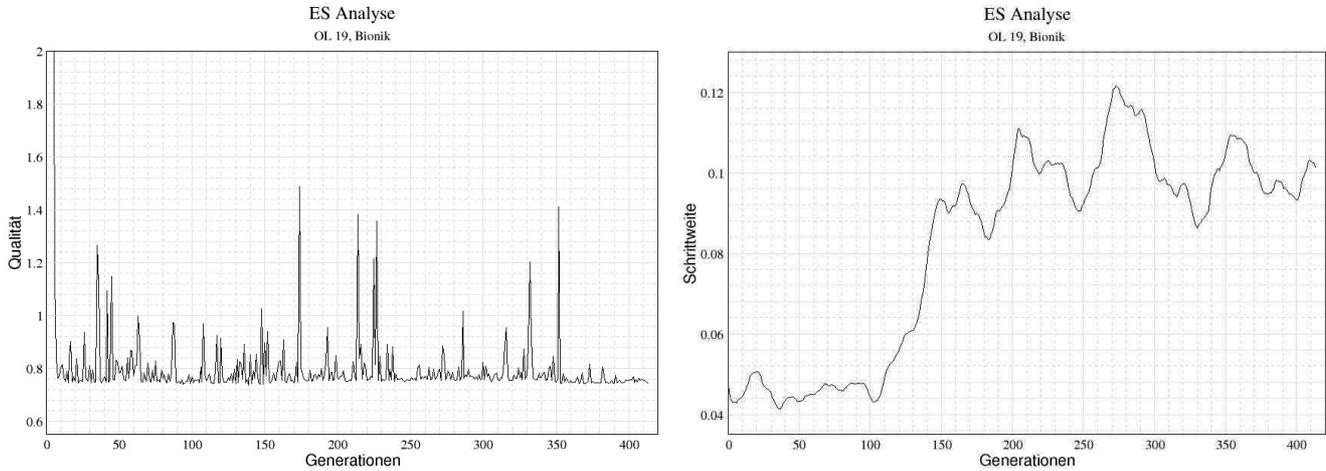


Abbildung 78: Entwicklung der Qualität und der Schrittweite im Optimierungslauf 19

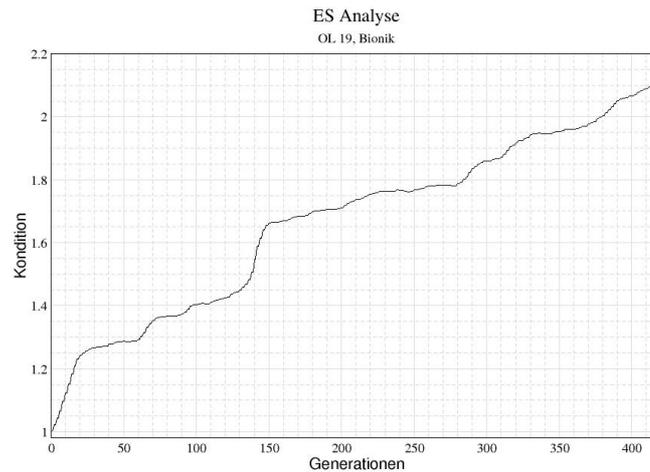


Abbildung 79: Entwicklung der Kovarianzmatrix-Kondition im Optimierungslauf 19

Weitere Optimierungen

Da sich abzeichnete, dass die verfügbare Zeit nicht mehr für zahlreiche weitere Versuche mit der RANSE-CFD-basierten Optimierung ausreicht, wurde auf eine Feinoptimierung der mit dem Wirbelgitterverfahren errechneten Zwischenergebnisse umgeschwenkt. Durch punktuelle Optimierung geeigneter Zwischenergebnisse - auch in ständigem Austausch mit dem Projektpartner *SV A*-Potsdam während dessen Entwicklung am *P1487* (s. u.) - konnte abschließend eine eigene Variante *P1488* mit praktikabel glatten Verläufen generiert werden. Diese wurde den Projektpartnern als Kandidat für den finalen Versuch am Schiff vorgestellt.

5.3.3 Auswertung

Während dieser Zeit arbeitete auch der Projektpartner *SVÄ*-Potsdam einen letzten Propellerentwurf *P1487* aus, in welchen die vorhergehend von allen Beteiligten gemachten Erfahrungen einfließen. Die folgende Abbildung 80 zeigt diesen Entwurf des Projektpartners.

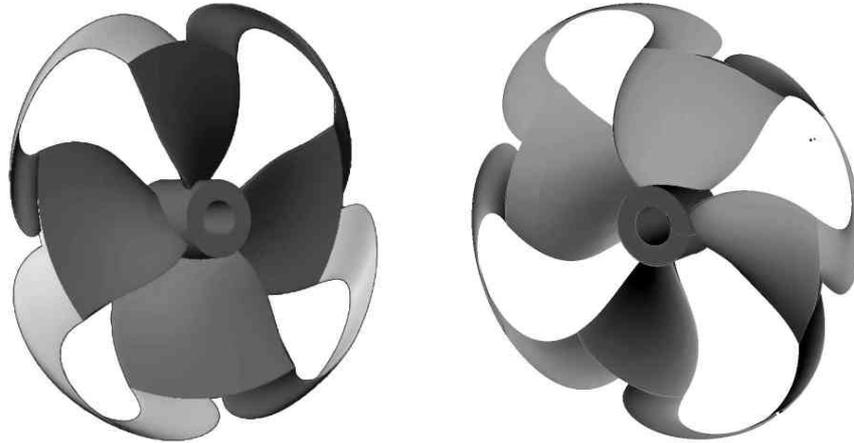


Abbildung 80: *P1487*, Druck- und Saugseite

Der dazu parallel von der TU-Berlin erarbeitete Vorschlag *P1488* zeigt äußerlich eine große Ähnlichkeit zum *P1487* (siehe Abbildung 81).

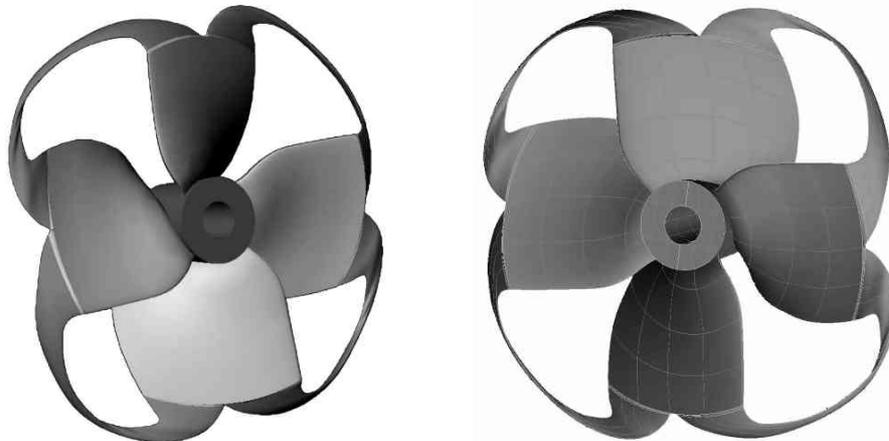


Abbildung 81: *P1488*, Druck- und Saugseite

Beide Varianten wurden jeweils von der TU-Berlin und vom Projektpartner *SVÄ*-Potsdam qualitativ durch eine RANSE-CFD-Rechnung sowie vom Projektpartner durch zusätzliche Modellversuche bewertet. Dazu gehörte auch jeweils die Untersuchung der Kavitationseigenschaften im sogenannten Kavitationstank.

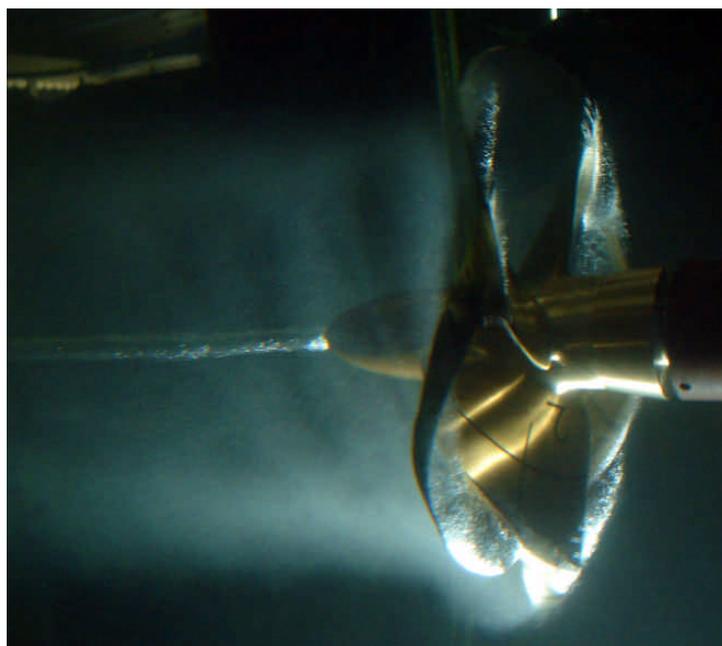


Abbildung 82: Der *P1488* (links) im Kavitationstank (rechts)

Die Abbildung 82 zeigt den Propeller *P1488* als Messingmodell und bei der Untersuchung im Kavitationstank, dabei durch eine Stroboskoplampe beleuchtet. Im rechten Teil des Bildes ist deutlich die Kavitation auf der Saugseite des nachlaufenden Bogens zu erkennen.

Es stellte sich heraus, dass für die nun geplanten Einsatzbedingungen (siehe Kapitel 5.4) das aufgenommene Moment beider Propeller zu gering wäre, um eine günstige Leistungsumsetzung der Hauptmaschine des Schiffes zu gewähren. Um den Schiffseigner nicht zu benachteiligen, wurde durch Erhöhen der Profilsteigung vom Projektpartner *SV A-Potsdam* eine letzte Variante *P1490* entwickelt.

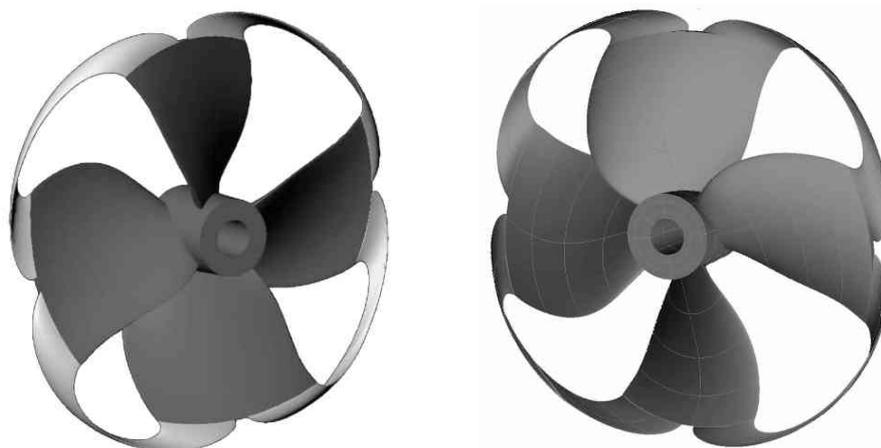


Abbildung 83: *P1490* Endstand, Druck- und Saugseite

Durch zusätzliche Modifikationen konnten letzte praxisnahe Forderungen nach mechanischer Festigkeit der Bögen durch Aufdicken erfüllt werden. Letztlich wurde auch diese finale Variante noch qualitativ mit einer RANSE-CFD-Rechnung bewertet, von der *SVA*-Potsdam zusätzlich noch als Modell gebaut und vermessen (Endstand siehe Abbildung 83). Die folgenden Freifahrtkurven in Abbildung 84 zeigen die eigenen Berechnungsergebnisse in ausreichender Übereinstimmung mit den Resultaten des Projektpartners.

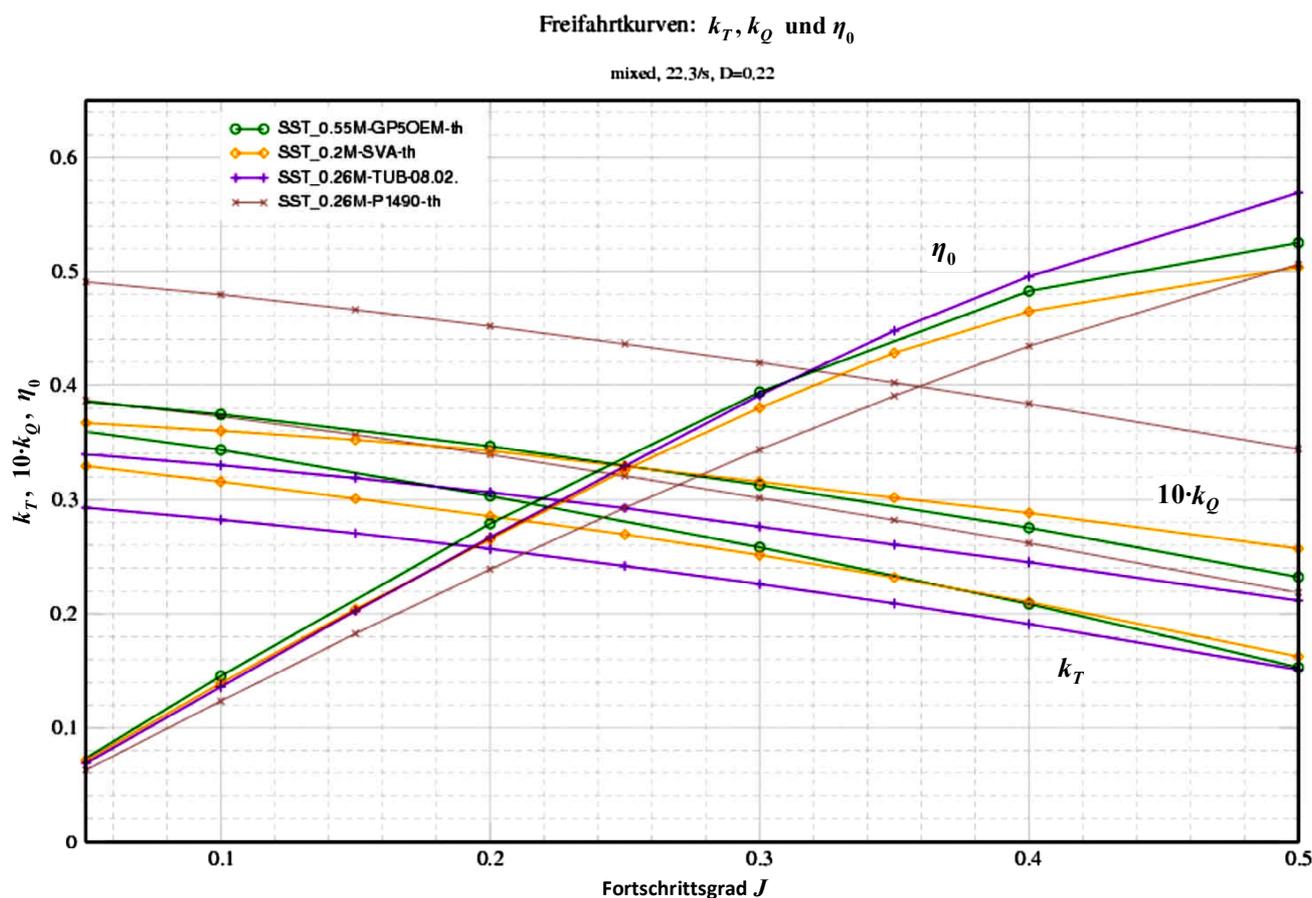


Abbildung 84: Berechnete Freifahrtkurven für die Basisversion *P1487 (SVA)*, die finale Optimierungsvariante *P1488 (TUB-08.02.)* und der letztlich gefertigten Variante *P1490*

Der *P1490* wurde von der *SVA*-Potsdam für einen Fortschrittsgrad von etwa $J=0.16$ entworfen. In der punktuellen Nachrechnung einiger Propellerkennwerte sind die sichtbaren Druckunterschiede bei diesem Fortschrittsgrad gering, insbesondere sind keine kritischen Unterdruckbereiche auszumachen. Lediglich eine anfänglich schon vermutete Zone geringen Drucks ist an der Saugseite des nachlaufenden Bogens auszumachen. Beim gerechneten Fortschrittsgrad $J=0.1$ ist das blaue Unterdruckgebiet noch ausgeprägter (im rechten Teil unten links). Auch vom Projektpartner *SVA*-Potsdam ist dieses Gebiet als Risikobereich für Kavitation identifiziert worden. Nach den Erfahrungen aus Versuchen im

Kavitationstank sprach aus dessen Sicht jedoch einiges dafür, dass dieser Kavitationsbereich nicht auf die Oberfläche trifft (Schichtkavitation) und somit nicht erosiv wirkt.

Die folgende Abbildung 85 zeigt die Druckverläufe auf der Oberfläche des *P1490* bei drei unterschiedlichen und relativ kleinen Fortschrittsgraden. Die Eintrittskanten der Basisblätter befinden sich im linken Teil der Abbildungen unten, im rechten Teil auf der rechten Seite des Bildes; die Nabe ist dunkelblau gefärbt, ihre Rotationsachse ist die X-Achse.

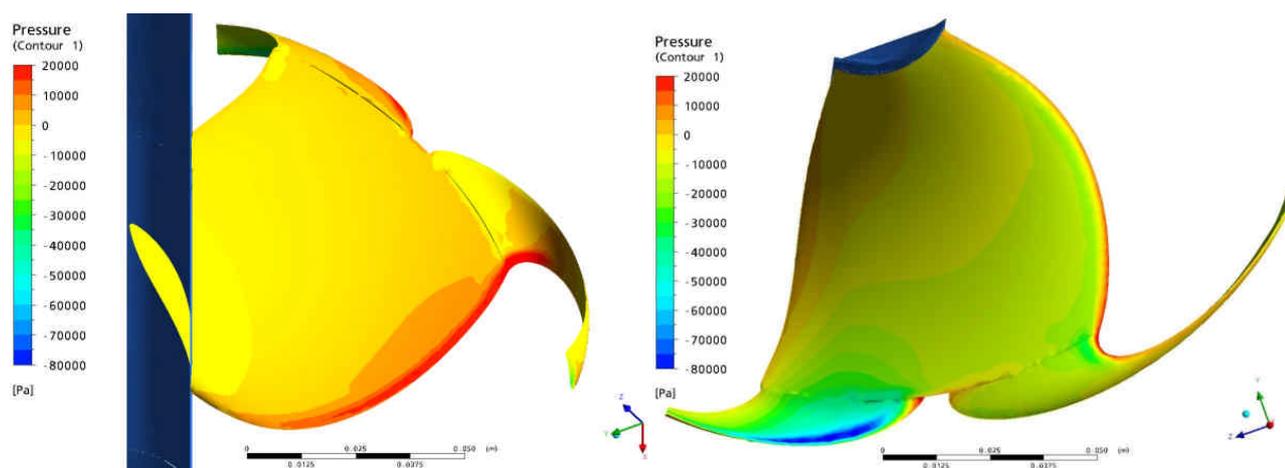


Abbildung 85: Druckbelastung auf Druck- (links) und Saugseite (rechts) des *P1490* bei $J=0.1$

Die Wirkung der Bögen lässt sich gut anhand der folgenden Abbildung 86 ausmachen. Erkennbar ist, wie das Medium auch von den Bögen angesaugt wird²¹³. Über dem vorlaufenden Teil des Bogens ist auch eine abgelöste Wirbelstruktur sichtbar. Da sie sich im Bogenbereich ablöst, übernimmt dieser offensichtlich auch einen Teil des Spitzenwirbels²¹⁴.

²¹³ Dabei dreht sich im Bild der linke Bogen des Propellers ins Bild hinein, das Medium strömt von unten ein, die Nabe befindet sich am rechten Bildrand.

²¹⁴ Im oberen Teil des Bogens ist auch die o. g. Unterdruckzone erkennbar (blau).

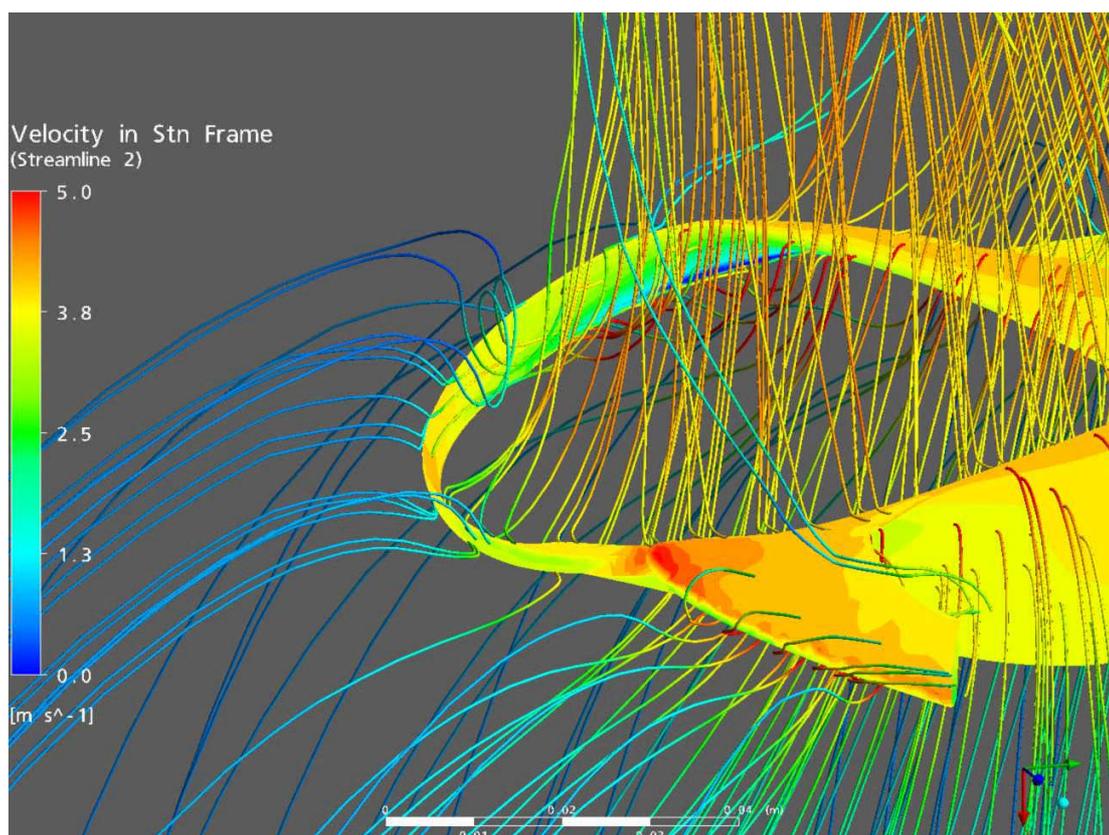


Abbildung 86: Stromlinien am Randbogen des P1490

Vom finalen Propeller *P1490* hat der Projektpartner *SVÄ-Potsdam* noch eine Variante mit gekreuzten Bögen entworfen (siehe Abbildung 87). Die anfängliche Vermutung, dass sich die Überkreuzung nachteilig auswirkt, konnte bestätigt werden. Bei sonst unveränderter Geometrie verschlechterte sich der Wirkungsgrad, es gab keine nennenswerten Verbesserungen. Vermutlich liegen die noch potentiell Schub erzeugenden Fußteile der Randbögen zu dicht nebeneinander und behindern damit gegenseitig ihre Wirkung, die verbesserte Abschirmung gegen den Druckausgleich (Spitzenwirbel) kann dies offensichtlich nicht aufwiegen. Die Propellervariante wurde auf Grund dieser Ergebnisse auch nicht als Modell vermessen.

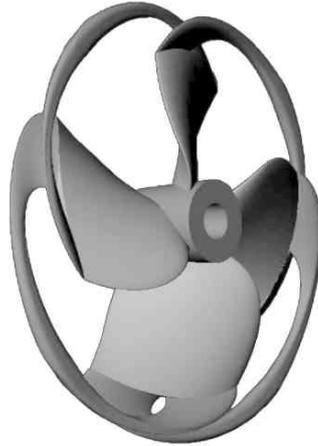


Abbildung 87: Finaler *P1490* mit überkreuzten Bögen (*SVA*)

5.3.4 Endkonfigurationen

Für den Endstand der evolutionären Optimierung *P1488* sowie für die finale Fertigungsvorlage *P1490* werden der Vollständigkeit halber noch die konstruktiven Daten aufgeführt. Sie sind jedoch nicht als Bauanleitung zu verwenden, da die Optimierung für einen speziellen Einsatzpunkt vorgenommen wurde, mithin abweichende Einsatzparameter eine mit Sicherheit auch deutlich abweichende Propulsionscharakteristik zur Folge hätten.

In die finale Variante gingen die bereits im vorhergehenden Kapitel erwähnten Änderungen ein, die vom Projektpartner *SVA*-Potdam zum Zwecke der erhöhten Festigkeit vorgenommen wurden, sowie Korrekturen beim Anstellwinkel zur Leistungsanpassung.

Die Optimierung des *P1488* erfolgte nicht über die Variation der Konstruktionsparameter, sondern direkt über die Punktkoordinaten der Oberflächen. Ebenso wie für den vom o. g. Projektpartner entwickelten Endstand stehen somit die Konstruktionsparameter nicht direkt zur Verfügung, sondern wurden hierfür aus dem bereits erwähnte Nachparametrisierungsverfahren gewonnen (siehe Kapitel 4.3.8). Die folgende Abbildung 88 zeigt die derart erzeugten voll parametrisierten Varianten des *P1488* und des *P1490*.²¹⁵

²¹⁵ Die Lücken in den Bögen gehen auf die bereits in Kapitel 4.3.8 genannten Schwierigkeiten zurück. Zur Verwendung einer solchen lückenhaften Variante in einer nachgeschalteten Optimierung werden die Lücken durch Fortführen der Parametrisierung bis zum Ringschluss gefüllt.

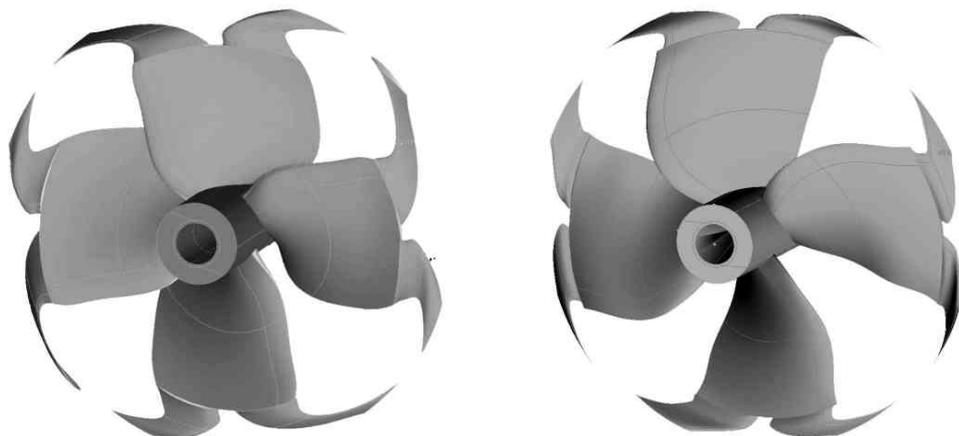


Abbildung 88: Durch Nachparametrisierung erzeugte Varianten des *P1488* (links) und *P1490* (rechts), Blick auf die Saugseiten

Die Durchmesser der beiden Propeller sowie die Radien der Aufspaltpunkte liegen jeweils fest und erleichtern die Nachparametrisierung. Beide haben einen Nabenradius von 0.0182 m und einen Außenradius von 0.1105 m . Der Aufspaltradius des *P1488* liegt bei 0.088 m (relativ 0.752), beim *P1490* liegt er bei 0.096 m (relativ 0.843).²¹⁶

Die wesentlichen konstruktiven Daten, welche mit diesem Verfahren gewonnen wurden, zeigen komprimiert die folgende Abbildung 89 und Abbildung 90. Während Rücklage, Hang und Profillänge relativ gut erfasst werden, lassen die Profilparameter im Bereich der Bögen die Ungenauigkeiten aus den genannten Gründen erahnen.²¹⁷

Die Abbildungen mögen versierten Propellerentwicklern Anhaltspunkte über die Konstruktion geben, können aber hier auf Grund mangelnder Vergleichsmöglichkeiten nicht interpretiert werden. Keinesfalls können Sie als Konstruktionsvorlage dienen, da sie als spezielles Optimierungsergebnis entstanden sind, und nicht mit der Vorgabe einer breitbandig hohen Propellerqualität.

²¹⁶ Die Design-Drehzahl von $20/s$ geht in die Modellierung ein und bestimmt den hydrodynamischen Steigungswinkel.

²¹⁷ Die Ordinate der beiden rechten *P1490*-Abbildungen wurde aus Platzgründen nicht wiederholt, sie ist identisch mit der jeweils linken *P1488*-Abbildung.

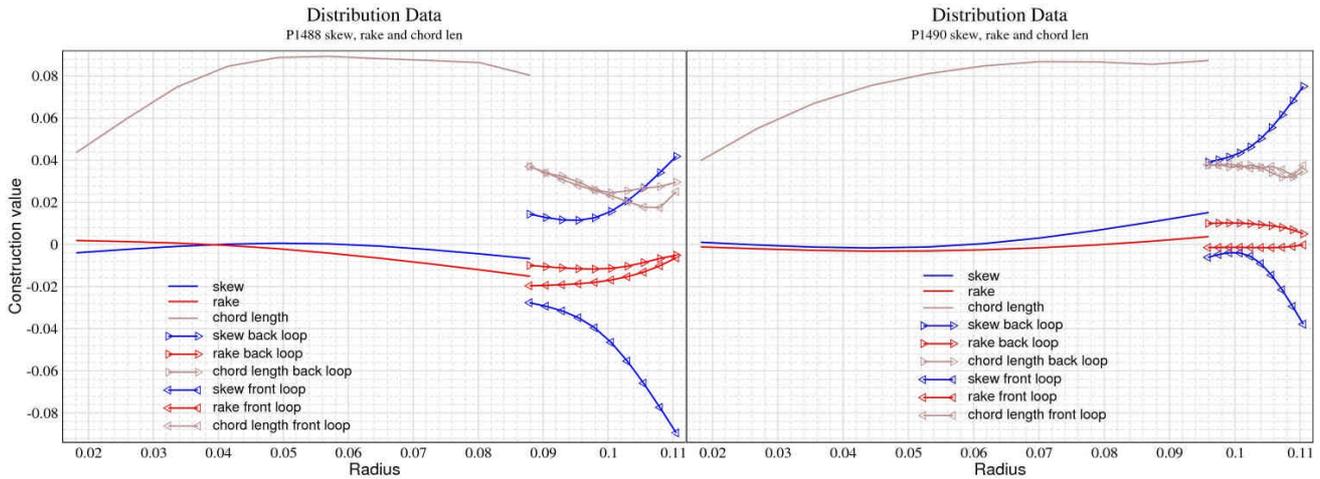


Abbildung 89: Rücklage (skew), Hang (rake) und Profillänge (chord length) des P1488 (links) und des P1490 (rechts)

Auf Grund des zugrunde liegenden lokalen hydrodynamischen Steigungswinkels bildet der lokale Anstellwinkel (pitch) nur einen Offset und ist daher nahe bei 0.

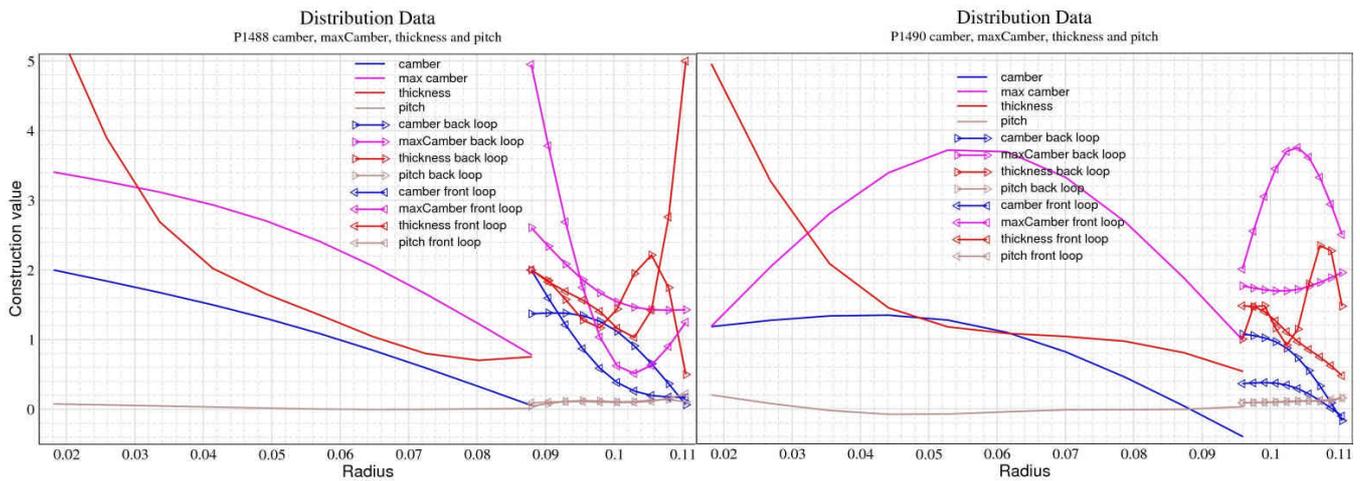


Abbildung 90: Wölbung (camber), Wölbungsrücklage (max camber), Dicke (thickness) und Anstellwinkel (pitch) des P1488 (links) und des P1490 (rechts)

5.4 Versuch am Schiff

In Abweichung von der ursprünglichen Vision, den Bionikpropeller für ein 1200 TEU-Schiff zu entwickeln (siehe *Einleitung*, Kapitel 1), wurde mit den im Laufe des Projektes gewonnenen Erkenntnissen ein passenderer Einsatzzweck für den Propeller gesucht. Unter der Vermittlung der *Schottel*-Werft konnte die *Eggersmann GmbH & Co. KG* für einen Test des Bionikpropellers an ihren Binnenschubschiffen gewonnen werden. Aus dem geplanten produktiven Einsatz der zu testenden Propeller ergab sich auch die strikte Forderung nach deren Einsatztauglichkeit, weshalb auch der finale Propellerentwurf an die gegebenen

Bedingungen angepasst sein musste. Der Projektpartner *MMG* führte zur Sicherheit eigene Festigkeitsrechnungen durch, welche die Einsatzfähigkeit abschließend ausreichend nachwies (vgl. [59]).

Am Schubschiff *Radial* (siehe Abbildung 91), welches für den Test vorgesehen war, werden die vorhandenen Propeller auf Grund von Beschädigungen und sonstigem Verschleiß im Mittel alle 1 bis 2 Jahre ausgetauscht. Dies mag auch als Hinweis darauf dienen, dass der geplante Einsatz die Propeller außerordentlich stark belastet.



Abbildung 91: Das für den Test ausgewählte Schubschiff *Radial* mit Leichter am Pier

Die Entwurfs- bzw. Einsatzbedingungen des Propellers sind durch das Schiff und die verbaute Antriebsmaschine vorgegeben:

- Anzahl der Hauptmaschinen/Propeller: 2/2
- Leistung je Hauptmaschine: 170 kW
- Anzahl der Propellerflügel: 4/5
- Schiffsgeschwindigkeit: 12 km/h
- Fortschrittsgrad: 0.1592
- Schubbeiwert c_T : 30.71
- Propellerdurchmesser: 0.8 m
- Drehzahl: 13.08 s⁻¹
- Design- k_T : 0.3059
- Design- k_Q : 0.03615

Beide Bionikpropeller wurden vom Projektpartner *MMG* nach Standardverfahren in Cu-Al-Ni-Legierung (Klasse *CU 3*) hergestellt. Auf Grund der befürchteten Kavitationsneigung an ausgezeichneten Stellen des Bionikpropellers²¹⁸ wurden von

²¹⁸ Die vermutlich gefährdeten Bereiche zeigten sich bei Untersuchungen im Kavitationstunnel und liegen vornehmlich an den Saugseiten der Bögen.

der MMG begleitend vorbereitende Untersuchungen zur Oberflächenhärtung vorgenommen, so dass ein solches Verfahren für einen Einsatz bei der ersten Propellerinspektion zur Verfügung steht.

Die Demontage bzw. auch die Montage der Propeller ist bei diesem Schiffstyp auf Grund des verwendeten Schottelantriebs relativ einfach. Der eigentliche Propellertrieb lässt sich nach Lösen einiger Verbindungen als Ganzes aus dem Schiffsboden heben, so dass weder Tauchgänge noch eine Docklegung des Schiffes nötig sind (siehe Abbildung 92).



**Abbildung 92: Herausgehobener Schottelantrieb mit originalem Propeller (links),
der demontierte Propeller an Deck (rechts); Blicke auf Saugseite**

Der demontierte Propeller offenbarte deutliche Verschleißerscheinungen, hauptsächlich durch Fremdkörperberührungen an der Eintrittskante²¹⁹. Erstaunlich waren auch die ausgeprägten Spuren der Ruder kavitation am senkrechten Wellentunnel des Schottelantriebs, welche die folgende Abbildung 93 zeigt. Der Propeller drückt in Fahrt den beschleunigten Abstrom direkt auf den Wellentunnel, er zieht gewissermaßen das Schiff²²⁰. Die vorgelagerte mittige Gusskante erzeugt das Unterdruckgebiet²²¹.

²¹⁹ Die gestauchten Eintrittskanten können insbesondere bei hohen Profilanstellwinkeln das Anlegen der Strömung behindern und Kavitation verursachen.

²²⁰ Andererseits ist dabei die nahezu ungestörte Anströmung des Propellers vorteilhaft.

²²¹ Im Bild dreht der Propeller entgegen der Uhrzeigerrichtung, daher verstärkt der Drall die Kavitation auf der linken Seite der Gusskante.



**Abbildung 93: Stauchungen an der Eintrittskante (links),
Spuren der Ruderkavitation (rechts)**

Der Austausch der Propeller nahm dabei nur wenige Stunden in Anspruch. Abbildung 94 zeigt die "neuen" Bionikpropeller auf der Palette bei Anlieferung bzw. montiert.



Abbildung 94: Die neuen Bionikpropeller, angeliefert (links) und montiert (rechts)

Der eigentliche Test war sehr zeitaufwändig und bestand zunächst aus einem Fahrstufenprogramm und einer Pfahlzugmessung. Die Messfahrten mit dem mit 640 t beladenen Kiesleichter als Last wurden dabei über differentielles GPS mitverfolgt. Die Drehmomentmessung erfolgte über Dehnmessstreifen. Die Testreihen wurden praktischerweise zunächst mit den beiden vorhandenen (und bereits gealterten) konventionellen 5-flügeligen Propellern ausgeführt (vgl. [59]).

Für den Fahrstufentest zeigt die folgende Abbildung 95 den Leistungsbedarf über der erreichten Fahrgeschwindigkeit beider Propellerarten. Demnach ergibt der Bionikpropeller bei hohen Belastungen einen höheren Gesamtwirkungsgrad²²². Die Krümmungen beider Kurven ab 10 km/h ist vermutlich auf Wellenausbildung am Schiffsrumpf zurückzuführen.

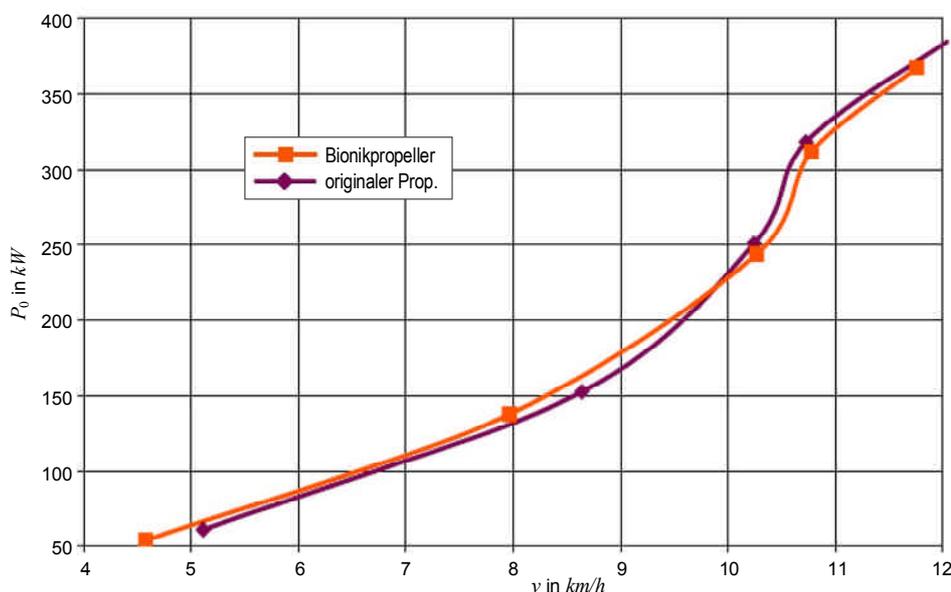


Abbildung 95: Leistungsbedarf über der Geschwindigkeit für beide Propellerarten

Die Pfahlzugmessung bei festgezurrtm Schubschiff zeigt in Abbildung 96, dass der Bionikpropeller bei zunehmender Belastung einen besseren Gesamtwirkungsgrad²²³ aufweisen kann, als der konventionelle Propeller. Durch den nur unterproportional steigenden Schub des konventionellen Propellers ergeben sich bei etwa 350 kW aufgenommener Gesamtleistung Wirkungsgradvorteile von etwa 14 % für den Bionikpropeller.²²⁴

²²² Auf Grund der durch langzeitige Verwendung bedingten Beschädigungen an der Vorderkante des originalen Propellers können allerdings bei hoher Belastung nachteilige Effekte auftreten (Kavitation, Strömungsabriss), die einen Schubabfall zur Folge haben.

²²³ bzw. sog. Pumpenwirkungsgrad

²²⁴ Auch hier gilt, dass der Alterungszustand der konventionellen Propeller einen unbekanntem Einfluss auf die Messungen hat.

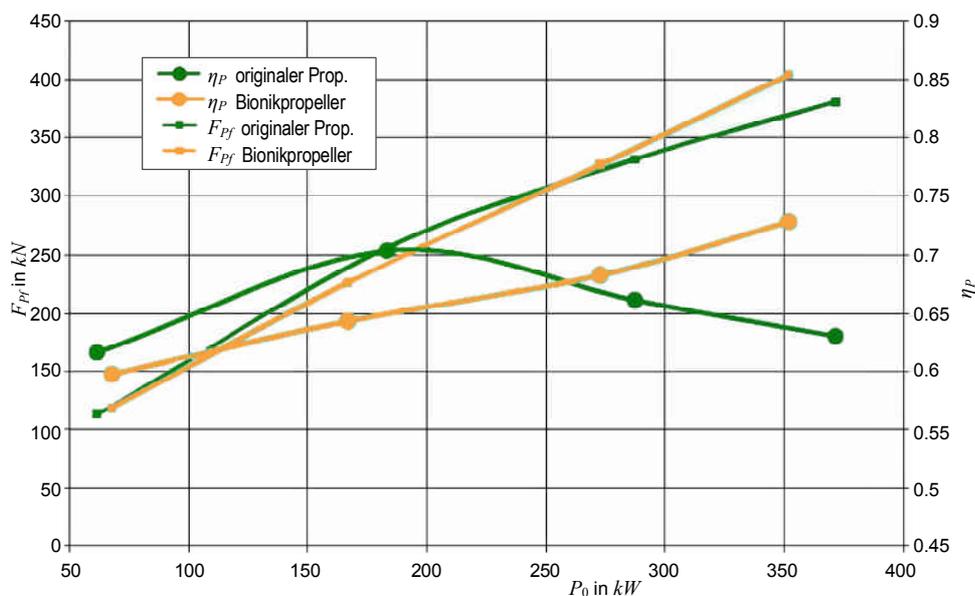


Abbildung 96: Erreichte Zugkraft über der aufgenommenen Leistung für beide Propellerarten

Obwohl dies zunächst sehr vorteilhaft für den Bionikpropeller ist, könnte eine abschließende Aussage hierzu jedoch nur aus einem Vergleich mit ebenso neu hergestellten konventionellen Vergleichspropellern getroffen werden.

Nach dieser Messkampagne verblieben die Propeller für zunächst 5 Tage am Schiff und verrichteten ihren Dienst im Dauereinsatz. Die anschließende Demontage lieferte nun weitere interessante Erkenntnisse. Zur Überraschung waren an den beiden Bionikpropellern kaum Erosionserscheinungen (durch Kavitation) sichtbar, insbesondere nicht an den Bögen, wo sie zuallererst vermutet wurden. Eine leichte Erosion konnte an den Blattaufspaltungen festgestellt werden. Hier wurde vom Projektpartner *MMG* weltweit erstmalig das Laserstrahlumschmelzverfahren eingesetzt, um diese Oberflächenpartien zu härten. Zur besseren Auswertbarkeit behandelte man jeweils unterschiedliche Oberflächen auf beiden Propellern. Anschließend wurden die Propeller wieder montiert.

Nach weiteren 8 Wochen Einsatzzeit (dies entsprach 37 Tagen Dauereinsatz bzw. 2500 km Fahrstrecke, dabei die Hälfte unter Volllast!²²⁵) erfolgte eine erneute Kontrolle, die sich aus Aufwandsgründen nur auf einen der beiden Propeller beschränkte. Wiederum waren keine auf Kavitationswirkung zurückzuführenden Schäden auszumachen. Dennoch haben - in der gleichen Weise, wie auch bei den

²²⁵ Der Schubverband wurde zu wechselseitigen Transportzwecken auf der stark strömenden Weser eingesetzt, d. h. bei stromauf verlaufenden Transporten wurde maximale Schubkraft eingesetzt, um die Fahrzeit so gering wie möglich zu halten.

originalen konventionellen Propellern - offensichtlich Fremdkörper Schäden an den Flügelvorderkanten hinterlassen.

Die folgende Abbildung 97 zeigt den steuerbordseitigen Bionikpropeller nach dieser Testphase. Sichtbar sind auch die gehärteten Bereiche am Fuß der Aufspaltung (links).

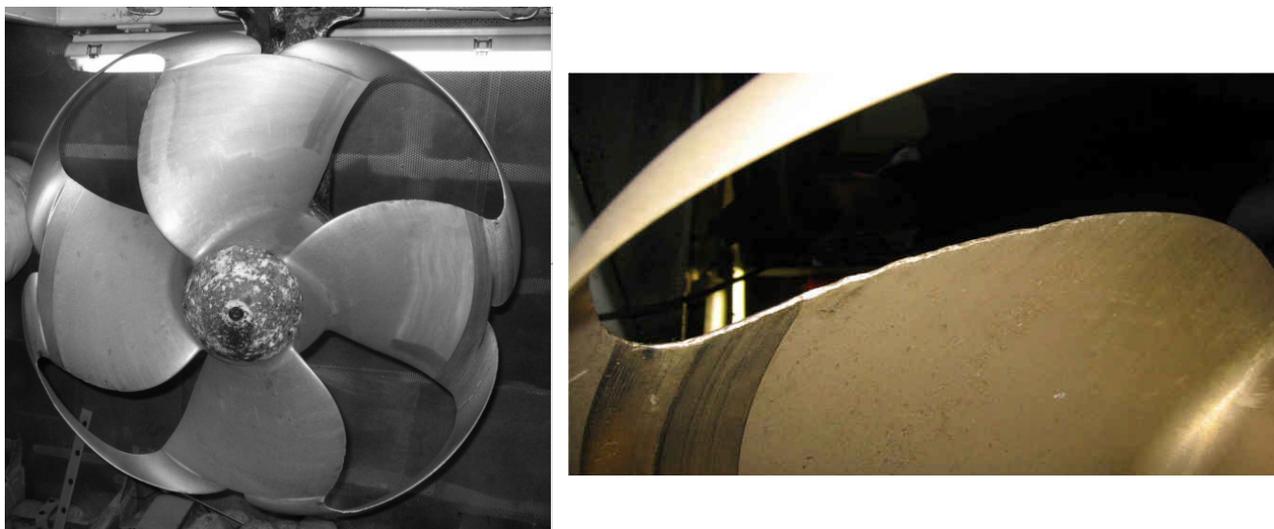


Abbildung 97: Steuerbordseitiger Bionikpropeller nach 2500 km (Fotos: MMG)

Der Schiffseigner zeigte sich insgesamt sehr zufrieden mit der Arbeitsweise der Bionikpropeller, er hob besonders ihren geringeren Geräuschpegel hervor. Auch nach dieser letzten Kontrolle konnten die Bionikpropeller daher im Einsatz am Schiff verbleiben, um den Test bis zu deren Versagen oder turnusmäßigem Austausch fortzuführen. Wie nach Projektende noch zu vernehmen war, wurden die Propeller erst nach mehreren Monaten wohl auf Grund von Bruch der Bögen ausgetauscht. Vermutlich war dieser Defekt auf massive Fremdkörperberührung (z. B. Treibholz) zurückzuführen.

5.5 Diskussion

Da ein analytischer Zugang zur komplexen geometrischen Struktur des Bionikpropellers höchst aufwändig und unerreichbar schien, sollte durch eine Black-Box-Optimierung mit der universellen Evolutionsstrategie versucht werden, gewissermaßen ohne Kenntnis des Weges zum Ziel einer optimalen oder zumindest überlegenen geometrischen Konfiguration zu gelangen. Die für die Funktion der Evolutionsstrategie nötige qualitative Bewertung der Propellervarianten muss dabei trotz ihrer komplexen Struktur ausreichend genau sein. Hierfür schien die RANSE-basierte CFD-Berechnung am besten geeignet. Für

dieses hochdimensionale Problem benötigte die Evolutionsstrategie jedoch offensichtlich mehrere Tausend Generationen, die mit der RANSE-CFD-Bewertung auf Basis der zur Verfügung stehenden Infrastruktur und Zeit nicht erreichbar waren²²⁶. Das Verhältnis zwischen der erforderlichen zur verfügbaren Rechenleistung ist dabei etwa durch eine Größenordnung gegeben, so dass der Erfolg durchaus greifbar scheint.²²⁷

Von der idealisierten Vorstellung, im Ergebnis dieser Arbeit könne ein Katalog von Konstruktionsmerkmalen für unterschiedliche Einsatzfälle des Bionikpropellers entstehen, musste daher zunehmend Abstand genommen werden. Die Variationsmöglichkeiten der geometrischen Konfiguration gegenüber konventioneller Bauweise skalieren durch die zusätzlichen als Propellerblätter ausgeführten Randbögen exponentiell und sind in ihrer Breite nicht in diesem Rahmen abzuhandeln.

Auch der Verzicht auf die vollständige Einbeziehung der Kavitationseigenschaften in den Optimierungsprozess führte nicht zu dessen entscheidender Beschleunigung. Obwohl zur Vermeidung offensichtlicher Kavitationsquellen ein einfaches regelbasiertes Bewertungssystem verwendet wurde, sind zudem die Ergebnisse der Optimierung nur unter Vorbehalt nutzbar. Eine Untersuchung der Kavitationsneigung einer aussichtsreichen Propellervariante musste daher anschließend im Detail erfolgen, was bei nötigen Korrekturen unter Umständen deutliche Änderungen der Propellereigenschaften nach sich ziehen kann.

In Auswertung der Optimierungsläufe, der anschließenden validierenden Rechnungen ausgezeichneter Varianten sowie der abschließenden Versuche am Schiff zeigte sich bestätigend, dass der Bionikpropeller tatsächlich nur bei hohem Schubbelastungsgrad von etwa $c_T=2...10$ einen besseren Wirkungsgrad erwarten lassen kann. Unterhalb dieser Belastung sind die konventionellen Propeller mit ihren ausgefeilten Entwurfsmethoden hinsichtlich des Wirkungsgrades offenbar auf einem nahezu unerreichbaren Niveau. Wenn aus dem Verschmieren des Spitzenwirbels auf die Bögen kein Nutzen gezogen werden kann, so stört vermutlich die erhöhte Reibung der Bogenfläche und die Verblockung der

²²⁶ Insbesondere mit der bereits erwähnten Limitierung auf die "serielle" Evolutionsstrategie (auf Grund der verfügbaren Lizenzen war nur 1 Solver-Prozess möglich).

²²⁷ Beachtet werden muss dabei aber, dass die Auflösung der RANSE-CFD-Rechnung schon soweit wie möglich an die Grenze der Konvergenz getrieben wurde, um die Rechnungen zu beschleunigen. Sofern die Bewertung konvergent ist, nähert man sich auch dem Optimum. Aussichtsreiche Ergebnisse müssen dann aber zur quantitativen Analyse genauer nachgerechnet werden.

Strömung am Aufspaltpunkt. Eine genauere Betrachtung der Strömungsverhältnisse bzw. -eigenheiten des Bionikpropellers ist daher notwendig.

Die weitgehend tangentialen Bereiche der Randbögen können nicht zum Schub beitragen. Sie bedeuten einen nachteiligen Reibungseinfluss²²⁸, sichern jedoch eine gewisse mechanische Stabilität der Bögen. Aus diesem Grund sind sie auch kaum verzichtbar, würde doch sonst eine feine Spitze des Flügels (mit vorwärts gerichtetem skew) direkt in eventuelle Hindernisse im Medium laufen und zur sofortigen Deformation bzw. Bruch des Bogens führen.

Der Aufspaltpunkt selbst offenbart noch ein weiteres Auslegungsdilemma. Zur Erhöhung der Wirksamkeit der beiden dort abgehenden Flügel muss ihr lateraler Abstand in der Strömung möglichst hoch sein. Das bedeutet mithin, dass der vordere Bogenflügel stromab und der hintere stromauf gebogen sein sollte (entgegengesetzter Hang bzw. rake). Am Aufspaltpunkt laufen aber daher große Flächenanteile der beiden Flügel in Strom- bzw. axialer Richtung und können nicht zum Schub beitragen, sie reiben ebenfalls nur. Dies aufnehmend und entgegen gedacht bedeuten aber sich "langsam" aus dem Ende des Basisflügels heraus entwickelnde Bogenflügel ein dort quasi unterbrochenes Tragflügelprofil. Der dadurch mögliche Druckausgleich zwischen Ober- und Unterseite²²⁹ schwächt zwar auf der einen Seite den zum Treiben des Spitzenwirbels verbleibenden Druck, senkt aber auf der anderen Seite den möglichen Schub dieser Flächenanteile. Zudem können die beiden Bogenflügel mit ihrer relativ geringen Profiltiefe - bedingt durch die Kavitationsneigung im Arbeitsmedium - nur einen geringen Druckunterschied und damit geringen Schub erzeugen.

Diese Betrachtungen und letztlich auch die Optimierungsergebnisse legen einen relativ weit nach außen reichenden Basisflügel nahe, welcher für den Hauptteil des Schubes verantwortlich ist. Ähnlich wie in den Optimierungsergebnissen wird die Aufspaltung in relativ kurzer radialer Richtung vollzogen. Ohne eine in axialer Richtung verlaufende Begrenzung (z. B. Kappe oder Winglet) wird damit jedoch auch die Zone des Spitzenwirbels verkleinert und damit der gewünschte Effekt des Verschmierens reduziert, da der Druckausgleich leicht zwischen den sich schnell trennenden Bogenflügeln erfolgt und wieder einen relativ starken Spitzenwirbel erzeugt (Die Zirkulation verteilt sich nicht magisch über alle tangentialen

²²⁸ Senkrecht zur Achse verlaufende Bögen werden zudem immer mit einer Querkomponente angeströmt.

²²⁹ wie auch bei Hochauftriebskonfigurationen am Flugzeugtragflügel verwendet, um die Grenzschicht zu beeinflussen

Bereiche, sondern ist vom Druckunterschied getrieben.). Der Endpunkt dieser Prämisse wird von einem Propeller mit mitlaufendem Mantel markiert²³⁰.

In die andere Richtung argumentiert bringt ein weit nach innen verlagertes Aufspaltzentrum die Auslegung wiederum in die Nähe eines Propellers mit doppelter Flügelzahl, mit allen damit verbundenen Vor- und Nachteilen.

Auf Grund der Betrachtungen zur mechanischen Stabilität der Bögen wurde eine gleichmäßige Aufteilung der Profiltiefe am Aufspaltzentrum bevorzugt. Lässt man diese Bedingung fallen, so bleibt - wieder aus Gründen der mechanischen Stabilität - konsequenterweise nur ein rückwärtiger Bogen übrig, welcher letztlich einen Propeller mit weit außen einsetzender starker Rücklage (skew) darstellt. Abgesehen von dem damit einhergehenden Drehmoment an der Flügelwurzel werden solche Propeller tatsächlich - wegen ihrer weichen Nachlaufinteraktion - bevorzugt für niedrige Geräuschemissionen eingesetzt (s. u.).

Diese Arbeit hat den Einsatz des Bionikpropellers im flüssigen Medium im Blickpunkt. Der Einsatzbereich bei Schiffsanwendungen ist dabei bereits auf Grund der relativ empfindlichen Bögen beschränkt²³¹. Bei speziellen Applikationen in gesichert fremdkörperfreien flüssigen Medien tritt der Bionikpropeller dagegen in direkte Konkurrenz zu ummantelten Propellern (z. B. in Pumpen, Verdichtern u. ä.), wo letztere entscheidende Vorteile haben. Es wären jedoch auch andere Anwendungen denkbar, bei denen die Beschädigung der Randbögen sogar in Kauf genommen werden kann, weil der Gewinn durch die besondere Propellerform die Nachteile einer Reparatur bzw. eines Austauschs ausgleichen kann (z. B. besonders leise Propeller für militärische Anwendungen, Wettkampfsituationen u. ä.).

Ein Propeller in Luft hat jedoch eine deutlich kleinere Wahrscheinlichkeit für Fremdkörperberührung. Hier kann der Bionikpropeller - besonders auf Grund seiner geringeren Geräuschemission - weitere Anwendungsfelder erschließen.

²³⁰ welcher auf Grund der starken Reibung des Mantels und anderer vornehmlich mechanischer Probleme nicht verwendet wird

²³¹ Das Risiko einer Beschädigung ist umso gravierender, je größer (und teurer) der Propeller ist, denn umso teurer und damit auch seltener ist die Reparatur bzw. Austausch des Propellers.

6 Zusammenfassung

Für die Auslegung optimaler Propeller wurde eine heterogene Umgebung geschaffen, die mit der Evolutionsstrategie mit CMA zur Schrittweitensteuerung als Optimierungsverfahren und einer dort integrierten CFD-basierten Qualitätsbewertung erfolgreich arbeitet. Sie besteht aus einer Anzahl miteinander verknüpfter Programme, welche zum einen kommerziellen Ursprungs sind (*ICEM-CFD* und *Ansys CFX*) und zum anderen zusätzlich erstellt wurden, um diese Komponenten mit weiteren eigens erstellten zu einer automatisch arbeitenden Optimierungsumgebung zu verbinden²³².

Eine ausreichende Rechengenauigkeit der CFD-Rechnung zur späteren Qualitätsbewertung der durch die Evolutionsstrategie erzeugten Propellervarianten konnte anhand von Detailrechnungen nachgewiesen werden. Hierfür wurden nach gegebenen Parametern Propeller-Freifahrtkurven berechnet und mit den Rechen- und auch Messergebnissen des renommierten Projektpartners *SVÄ-Potsdam* verglichen.

Im Optimierungszyklus nimmt die Umsetzung des Objektparametersatzes in eine CFD-taugliche Geometriebeschreibung eine zentrale Rolle ein. Sie wurde derart gestaltet, dass ein von der Evolutionsstrategie generierter Objektparametersatz immer eine korrekte Propellergeometrie erzeugt²³³. Von einem großen Teil der so bereitgestellten Objektparametersätze für konventionelle Propeller kann eine verlässliche CFD-basierte Qualität berechnet werden. Für erste Tests wurden solche Propeller nach Vergleichsvorgaben (Randbedingungen) des Projektpartners *SVÄ-Potsdam* mit der Optimierungsumgebung erzeugt und bewertet. Hier konnte gezeigt werden, dass das Verfahren zur Auslegung von Propellern insgesamt funktioniert. Ebenso deutlich wurde jedoch, dass der Rechenaufwand für die Qualitätsbewertung schnell unterschätzt werden kann²³⁴. Die Tests an konventionellen Propellern wurden daher zugunsten der Auslegung des Bionikpropellers beendet. Auf Grund der dann nochmals deutlich gesteigerten

²³² Der Umfang der selbst erstellten Software war am Projektende etwa 25000 nichtleere Codezeilen (C++ und Skripte).

²³³ Diese Propeller würden im Prinzip alle funktionieren (Herstellbarkeit und Festigkeit unbeachtet). Rechenzeit kann gespart werden, wenn nur das berechnet wird, was sich auch lohnt.

²³⁴ Da die Evolutionsstrategie intrinsisch datenparallel arbeitet, die Qualitätsbewertungen also völlig unabhängig voneinander erfolgen können, muss darauf geachtet werden, dass eine evtl. Lizenz einer kommerziellen CFD-Software dies auch unterstützt.

Anforderungen an die Qualitätsbewertung wurden die Kavitationseigenschaften der generierten Propellervarianten a priori aus der Qualitätsbewertung ausgeschlossen.

Die Geometrierzeugung wurde anschließend auf die deutlich komplexe Geometrie des Bionikpropellers erweitert. Insbesondere der Aufspalt punkt stellt hohe Ansprüche an eine CFD-tauglich aufbereitete Geometriebeschreibung. Die automatische Generierung guter Gitter ist hier sehr anspruchsvoll und misslingt oft, da die erzeugten Gitter trotz aller möglichen automatischen Reparaturmaßnahmen fehlerhaft bleiben; eine nachfolgende CFD-Rechnung scheitert dann im Allgemeinen. Etwa 50 % der Objektparametersätze bleiben so ohne zuordenbare Qualität. Die beim Bionikpropeller nicht mehr unabhängigen Geometrieparameter²³⁵ haben einen weiteren negativen Einfluss auf die Arbeitsweise der Evolutionsstrategie. Weiterführende Untersuchungen könnten hier Möglichkeiten aufzeigen, durch modifizierte Parameter die Gittererzeugung zu verbessern.

Um die Auslegung des Bionikpropellers zu beschleunigen bzw. um eine Backup-Strategie zu haben, entstand parallel eine Optimierungsumgebung mit dem Wirbelgitterverfahren als Qualitätsbewertung. Auch diese Optimierung bediente sich der CMA-Evolutionsstrategie. Mit dieser Qualitätsfunktion konnte eine Konvergenz für etwa 10- bis 15-fache Generationenzahl gegenüber den Läufen mit RANSE-Qualitätsfunktion gezeigt werden. Diese Vervielfachung der Rechenleistung ist jedoch schon bei lockerer Auslegung des Moore'schen Gesetzes nach 6...7 Jahren Computerentwicklung erreicht. In der letzten Projektphase wurden daher, statt viel Zeit für wenige Optimierungsläufe zu opfern, vermehrt aussichtsreiche Geometrieparameter zur punktuellen Optimierung mit dieser zweiten Optimierungsumgebung ausgetauscht.

In einem zunehmend interaktiven Prozess entstand letztlich ein Bionikpropeller, der vom Projektpartner *SLA*-Potsdam in seiner Qualität validiert und von der *MMG* für einen produktiven Einsatz gebaut wurde. Die *SLA*-Potsdam brachte hier insbesondere ihre Konstruktionserfahrungen im Umgang mit der Kavitation ein, da das dauerhafte Funktionieren eines verbauten Propellers ökonomische bzw. betriebswirtschaftliche Relevanz hat. Im finalen experimentellen Test an einem im produktiven Betrieb eingesetzten Schiff stellte der neuartige Propeller dann unter Beweis, dass er bei hohen Schubbelastungen durchaus bessere Eigen-

²³⁵ Die radiusbezogene Lage des Aufspaltpunktes beeinflusst die Konstruktionsparameter der Bogenprofile, insbesondere die Profillänge am Aufspalt punkt bzw. Aufspaltradius.

schaften als ein vergleichbarer konventioneller Propeller aufweisen kann. Der Bionikpropeller tritt damit auch in gewisse Konkurrenz zum Düsenpropeller, dessen Ummantelung ebenfalls relativ empfindlich gegenüber Beschädigungen durch Treibgut ist. Durchweg positiv zeigte sich der geringere Geräuschpegel gegenüber einem gleichartigen konventionellen Propeller. Entgegen aller Bedenken konnte der Bionikpropeller im harten betriebsmäßigen Einsatz relativ lange überzeugen, insbesondere schien die befürchtete Kavitation an den Bögen beherrschbar zu sein. Letztlich wurde der Einsatz erst nach Monaten auf Grund von Beschädigungen der vergleichsweise empfindlichen Bögen durch Fremdkörper im Wasser beendet.

Die Analyse der komplexen Strömungsvorgänge am Aufspaltpunkt untermauert die anfängliche Annahme, dass eine geradlinige Auslegung mit einfachen Konstruktionsvorgaben nicht sinnvoll machbar ist. Die aus der Analyse folgenden, aber einander entgegenstehenden Ableitungen für eine gute Auslegung fordern daher eine jeweils anwendungsbezogene Optimierung, welche das durchaus vorhandene Potential dieser neuartigen Propellergattung für den Einzelfall erschließen kann.²³⁶

²³⁶ Zum Abschlussbericht des Verbundprojekts vgl. [63].

7 Thesen

- 1) Propeller sind derzeit die verbreitetsten Propulsionsorgane an Schiffen, werden insbesondere auch im überseeischen Transportverkehr eingesetzt und besitzen daher ein enormes Energie-Einsparpotential. Sie erzeugen jedoch auf Grund des unvermeidlichen energietragenden Spitzenwirbels Verluste und störende Geräusche.
- 2) Der Bionikpropeller ist eine neuartige Propellerform, die eine geringere Energieaufnahme des Spitzenwirbels und damit sowohl höhere Effizienz als auch verminderte Geräuschemission verspricht.
- 3) Er besitzt eine wesentlich komplexere Struktur als der konventionelle Propeller und ist nicht befriedigend mit herkömmlichen Entwurfsmethoden zu konstruieren.
- 4) Eine mögliche Lösung besteht hier in der Black-Box-Optimierung der Konstruktionsparameter. Das geeignetste Optimierungsverfahren hier ist die robuste Evolutionsstrategie mit Kovarianzmatrix-Adaption (CMA).
- 5) Wird die zur Bewertung herangezogene Qualitätsfunktion über aufwändige CFD-Methoden implementiert, führt dies zur anspruchsvollsten aber auch genauesten Optimierung.
- 6) Der Rechenzeitbedarf für diese RANSE-Methode ist hier enorm und wurde unterschätzt. Ein Konvergenz der Optimierung konnte mit etwa 500 Generationen nicht erreicht werden, vermutlich sind etwa mindestens 5000 erforderlich. Weniger genaue Verfahren konnten dies erreichen, jedoch auf Kosten der Realitätsnähe.
- 7) Die Integration dieser Black-Box-Optimierung von Konstruktionsparametern in die ingenieurwissenschaftliche Arbeit wird durch die ständig zunehmende einheitenbezogene Rechenleistung immer interessanter. Der o. g. Faktor von etwa 10 ist nach 6 bis 7 Jahren erreicht.
- 8) Die Evolutionsstrategie als Optimierungsverfahren ist sehr gut für die parallele Implementierung geeignet (intrinsische Parallelität), dies muss jedoch korrekt auf der verfügbaren Rechentechnik umgesetzt werden.
- 9) Der Bionikpropeller konnte die Erwartungen an gestiegene Effizienz nur bei hohen Belastungen erfüllen, dafür blieb ein befürchtetes Versagen gänzlich aus. Besonders hervorzuheben ist die deutlich geringere Geräuschentwicklung gegenüber dem konventionellen Propeller.
- 10) Gegen den angestrebten Einsatz als Schiffspropeller im überseeischen Verkehr steht die geringere Effizienz bei den dortigen Bedingungen. Zudem schränkt die intolerable Empfindlichkeit der Randbögen den Einsatz an großen Schiffen ein. Dagegen ist ein Einsatz für ähnliche Spezialanwendungen sowie als geräuscharme Propulsoren in vielen anderen Bereichen sehr vielversprechend (z. B. Lüfter).

8 Ausblick

Mehr Rechenleistung

Als markantes Hindernis zum Kompletterfolg erscheint die nicht ausreichende Rechenleistung. Eine mögliche Erweiterung des verwendeten oder ähnlichen Clusters sollte sich dabei aber nicht auf eine Vergrößerung der Knotenanzahl beziehen, denn die Vergrößerung der Anzahl (gleichzeitig) evaluierbarer Nachkommen hat einen schwindenden Effekt. Wesentlich günstiger ist die Beschleunigung der einzelnen Knoten, deren Anzahl mit derzeit 16 durchaus passend angesehen werden kann. Eine probate (3/3,12)-Strategie beispielsweise hat mit insgesamt 16 Rechenknoten noch 4 Reserveknoten, um gerade bei komplexen CFD-Rechnungen mit misslungener Gittererzeugung "Ersatz"-Nachkommen nachzuschieben.

Wie bereits in Kapitel 4.7 angedeutet, wurden die Knoten bereits auf die doppelte Anzahl CPUs erweitert. Eine knotenweise Speichererweiterung ist dagegen kaum dienlich, da die nachkommensweisen RANSE-Rechnungen in ihrem Ressourcenbedarf schon soweit wie möglich abgespeckt sind und den Hauptspeicher nicht voll ausschöpfen²³⁷. Selbst langfristig reicht hier eine Umrüstung der Knoten auf modernere SMP-Mainboards²³⁸ mit deutlich gesteigerter Rechenleistung (z. B. über moderne Multi-Core-CPU's mit schneller Speicheranbindung).

Umstieg auf OpenSource-Software

Um von den teuren Lizenzen der bisher verwendeten *Ansys*-Software unabhängig zu werden, bietet sich ein Umstieg auf das mittlerweile recht ausgereifte Open-Source-System *OpenFOAM* an. Dieses Software-Paket besteht im Wesentlichen aus einer Sammlung von C++-Bibliotheken, die sehr effizient codiert sind und sich relativ leicht an unterschiedliche Bedürfnisse anpassen lassen. Eine einfache Bedienung stand bei der Entwicklung von *OpenFOAM* weniger im Vordergrund, so dass die Einarbeitungszeit deutlich über der von kommerziellen Paketen wie *Ansys* liegt. Eine andere interessante Software für zukünftige Änderungen ist *gmsb*,

²³⁷ Ziel ist eine Verringerung der Generationszykluszeit, also des Rechenzeitbedarfs pro Nachkommensevaluation (bei Knotenanzahl $>$ Nachkommenszahl λ).

²³⁸ SMP - Symmetric Multi Processing, Bezeichnung für gängige Mehrprozessorsysteme (Mehrere CPUs arbeiten dabei in einem gemeinsamen Adressraum und erreichen meist eine sehr schnelle Verbindung der Prozesse untereinander.)

welches auf die interaktive Erzeugung von Tetraedergittern spezialisiert ist. Auch diese Software ist in C++ geschrieben und arbeitet daher recht einfach mit anderen C++-basierten Paketen zusammen. Eine Zusammenarbeit mit dem genannten *OpenFOAM* ist in *gmsb* schon vorbereitet. In diesem Zusammenhang erwähnenswert ist auch die Software *ParaView*, welche ebenso im Hinblick auf die Zusammenarbeit mit den o. g. Paketen entwickelt wurde. Sie ist sehr umfangreich und dient der grafisch basierten Analyse der CFD-Rechenergebnisse (Post-processing).

Der Wechsel zu diesen Werkzeugen bedeutet eine grundlegende Änderung der bisherigen Optimierungsumgebung. Teile wie die Geometrieerzeugung ließen sich ohne große Änderungen übernehmen, aber die *ICEM-CFD*- und *CFX*-orientierten Ablaufstrukturen müssen neu strukturiert werden, wenn sie auf C++-basierte Komponenten umgeschrieben werden.

Kopplung mit anderen Bewertungsverfahren

Wie bereits erwähnt, wurde eine zusätzliche parallele Optimierungsumgebung auf Basis des Wirbelgitterverfahrens entwickelt. Sinnvoll ist eine Integration dieses und weiterer Bewertungsverfahren (z. B. Panel-Verfahren) mit einer einheitlichen Schnittstelle, um beispielsweise zwischen Grob- und Feinoptimierung wechseln zu können oder auch neue Bewertungsverfahren für andere Aufgabenstellungen einbinden zu können. Auch diese Erweiterungen erfordern grundlegende Vorbereitungen im gesamten System, um sie in einer übergeordneten Struktur einbinden zu können.

Kavitation

Für die grundlegenden Untersuchungen zur optimalen Auslegung des Bionikpropellers ist der Verzicht auf eine Kavitationsprüfung sicher zulässig. Dennoch sollte mit dem Ziel einer universelleren Anwendbarkeit bei Bedarf auch die lokale Neigung zur Dampfbildung in die Qualitätsfunktion eingehen. Das Thema Kavitation ist sehr komplex, dennoch können einfache Abschätzungen unter Umständen schon sehr hilfreich sein. Softwareseitig ist durch die feine Profilparametrisierung schon die Voraussetzung gegeben, durch Änderung der lokalen Steigung, Krümmung, Rücklage und anderer Parameter Einfluss auf das Kavitationsverhalten zu nehmen.

Reduktion der Objektparameterzahl zugunsten vorherbestimmter Annahmen

Um die Optimierung selbst zu beschleunigen bzw. zu vereinfachen, ist man um eine Minimierung der freien Objektparameter bemüht, ohne die Allgemeinheit der Lösung zu sehr einzuschränken. Daher gilt es, allgemein geltende Regeln oder Gesetzmäßigkeiten zu finden, welche die gesuchte Lösung ohnehin einhalten muss. Damit lässt sich die Variationsbreite der Nachkommen und damit die Anzahl der freien Objektparameter beschränken, ohne die Relevanz der Lösungen zu beschneiden. Folgende Beispiele wären denkbar:

- Bei einer gegebenen Zirkulationsverteilung (z. B. elliptisch) in Spannweitenrichtung lässt sich die Profillänge (chord length) nach der Festlegung des Anstiegswinkels bestimmen und umgekehrt.
- Bei ohnehin festgelegten Profilarten (z. B. bewährte Profile des Propellerbaus) kann die multidimensionale komplette Profilparametrisierung zugunsten nur weniger Objektparameter aufgegeben und eher die Optimierung der Generatorlinie priorisiert werden.
- Da die Rücklage (Skew) geringen Einfluss auf den Wirkungsgrad hat, könnte diese festgelegt oder auf nur wenige Stützstellen beschränkt werden.
- Die variablen Verläufe der Geometrieparameter können statt spline- auch polynombasiert implementiert werden. Dies kann eventuell günstigere Geometrien ergeben.
- Die radiusabhängige Profilhöhe in Relation zur lokalen Profillänge kann iterativ derart angepasst werden, dass Belastungsvorgaben (wie z. B. vom Germanischen Lloyd angegeben) grob eingehalten werden können, ohne eine genaue FEM-Rechnung vorzunehmen.

Metamodelle

Wie im Kapitel 2 schon aufgeführt wurde, sind verschiedene Methoden entwickelt worden, die Qualitätsbewertung der Nachkommen bei der Evolutionsstrategie zu beschleunigen. Einfache Varianten sind die mitlaufende Erstellung einer Datenbank, in welcher die Ergebnisse aufwändiger Qualitätsbewertungen abgelegt werden. Auf die tatsächliche Berechnung kann mit steigender Füllichte dieser n -dimensionalen Tabelle verzichtet werden, wenn für den aktuellen Objektparametersatz eine ausreichend genaue Interpolation möglich ist.

Eine ähnliche Herangehensweise ist die Nutzung neuronaler Netze. Sie können die Qualität eines Nachkommen sukzessiv besser voraussehen, wenn sie fortlaufend mit den Ergebnissen ausführlich (teuer) berechneter Qualitäten trainiert werden. Der Anteil der ausführlichen Berechnungen kann sukzessiv auf ein Mindestmaß zurückgenommen werden.

Erweiterte Optimierungsumgebung

Insgesamt lässt sich der Optimierungsansatz zu einem universellen Werkzeug verallgemeinern. Ohne den immensen Aufwand zu verhehlen, den das Ziel eines integrierten Optimierungswerkzeugs im Zusammenspiel mit einer benutzerfreundlichen CAD-Umgebung darstellt, so ist es doch eine über die bestehenden Lösungen hinaus reichender Ansatz. Bestehende Anwendungen koppeln beide Technologien mehr oder weniger komfortabel miteinander, da die Optimierungskomponente oft akademischen, die CAD-Komponente dagegen häufig kommerziellen Ursprungs ist. Die Konzeption einer integrierten Optimierungsumgebung - zunächst für Strömungssituationen - wird als Produktentwicklung im eigenen Ingenieurbüro fortgeführt (siehe hierzu auch Abbildung 105).

Auch im Open-Source-Bereich sind in den letzten Jahren außerordentlich umfangreiche und leistungsfähige Werkzeuge entwickelt worden, die im CAD- und CFD-Umfeld eingesetzt werden können. Daher wird von vornherein auf Open-Source-Software als Werkzeug zur Programmentwicklung gesetzt. Das zentrale Konzept besteht aus einer nahtlos in eine vereinfachte Konstruktionsumgebung (CAD) integrierten Modellierbarkeit der geometrischen Constraints, welche die Evolutionsstrategie in ihren jeweiligen Intervallen der Objektparameter auf relevante Maße beschränkt. Basis ist eine interaktive parameterbasierte und widerspruchsfreie Geometrieerzeugung, deren mutativer Spielraum jedoch sofort grafisch auf den Bediener rückgekoppelt wird. Die grafische Darstellung erfolgt über die *OSG*-Bibliothek²³⁹, die CAD-Modellierung über die sehr umfangreiche und leistungsfähige *OpenCASCADE*-Bibliothek. Für die CFD-Rechnung kann auf das *OpenFOAM*-Paket zurückgegriffen werden, für die Auswertung wird *ParaView*, *vTk* oder auch eine eigene Komponente zum Einsatz kommen.

²³⁹ *OSG - Open-Scene-Graph*

9 Abbildungen

Abbildung 1: Aufgespreizte Flügelenden beim Rabengeier (Foto: <i>Rechenberg</i>).....	1
Abbildung 2: Vierflügeliger Bionikpropeller, exemplarisch.....	2
Abbildung 3: Äußere geometrische Kenngrößen des Festpropellers und Lage der Generatorlinie.....	20
Abbildung 4: Geometrische Kenngrößen der Profilschnitte (Zylinderschnitte) längs der Generatorlinie.....	21
Abbildung 5: Zusammenhänge der Strahltheorie (für Propeller)	25
Abbildung 6: Zum Satz von Kutta-Joukowski.....	28
Abbildung 7: Variation der Zirkulation in Spannweitenrichtung	28
Abbildung 8: Verteilung der Wirbeldichteflächen	31
Abbildung 9: Position der Hufeisenwirbel bei der Wirbelgittermethode	32
Abbildung 10: Aufgespreizte Handschwingen als Multi-Winglet (Foto: <i>Rechenberg</i>).....	33
Abbildung 11: Zur Abschätzung der induzierten Wirbelenergie in einem festen Volumen	34
Abbildung 12: Aufgefächerte Flügelspitze als Multi-Winglet im Windkanal (Falschfarben) und an einem Segelflugzeug (Fotos <i>Rechenberg</i>)	36
Abbildung 13: Prinzipielle Flügelkonstruktion beim Bionikpropeller durch Aufspalten und Verbinden	36
Abbildung 14: Beispielhafter Vergleich einer strukturierten (O-H-Gitter, links) und unstrukturierten Vernetzung (rechts) eines Rohrquerschnittes.....	46
Abbildung 15: Gittertypen bei strukturierter Vernetzung	47
Abbildung 16: Transformationen der Gittertypen.....	47
Abbildung 17: Beispiele der Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilungen (Glockenkurve) für unterschiedliche Streuungen (σ) und Erwartungswerte (μ)	65
Abbildung 18: Fortschritt im idealisierten linearen Fall	66
Abbildung 19: Seitlicher Blick auf den Fortschritt in einem 2D-Qualitätsgebirge (links absolut, rechts im lokalen Koordinatensystem).....	68
Abbildung 20: Beispiele der Wahrscheinlichkeitsdichte $w_\lambda(u)$ für unterschiedliche λ bei Streuung $\sigma=1$	70
Abbildung 21: Beispiele der Wahrscheinlichkeitsdichte $w_\lambda(u)$ für andere Streuungen σ und Nachkommenszahlen λ	70
Abbildung 22: Verlauf der Funktion $\Phi=f(\Delta)$ zur Veranschaulichung des Evolutionsfensters	72

Abbildung 23: Beispielhafte Iso-Dichtelinie der isotropen Mutationsverteilung mit globaler Schrittweite σ um den Elter-Punkt (links); zugehörige Kovarianzmatrix (rechts)	73
Abbildung 24: Logarithmische Normalverteilung und Flächengleichheit (mit $v=0$)	74
Abbildung 25: Beispielhafte Iso-Dichtelinien und Individuelle Schrittweiten σ_i für 2 Parameterkomponenten um den Elter-Punkt (links); zugehörige Kovarianzmatrix für alle Komponenten (rechts)	75
Abbildung 26: Unterschiedliche Länge des Evolutionspfades bei gleicher Einzelschrittlänge und -anzahl (schematisch)	76
Abbildung 27: Beispielhafte Iso-Dichtelinie und Schrittweite σ im lokalen Koordinatensystem um den Elter-Punkt (links); zugehörige Kovarianzmatrix (rechts).....	77
Abbildung 28: Optimierungszyklus der $(\overline{\mu}/\mu, \lambda)$ -Strategie	87
Abbildung 29: Aufbau der Optimierungsumgebung	88
Abbildung 30: Basisklassen und Parameter eines Propellers	95
Abbildung 31: Klassenstruktur eines Propellerflügels	96
Abbildung 32: Klassenstruktur eines Propellerblatts.....	96
Abbildung 33: Spezialisierungen der Propellerblätter	97
Abbildung 34: Struktur und Beispielklassen der Verläufe	97
Abbildung 35: Klassen der Interpolatoren.....	98
Abbildung 36: Lage der Generatorlinie und der lokalen Profilebene bei der Flügelkonstruktion	99
Abbildung 37: Verschiedene Radien bei der Blattkonstruktion	100
Abbildung 38: Tangentiale und radiale Dichte der Stützstellen	101
Abbildung 39: Verbindungsstück (im Kreis)	102
Abbildung 40: Konventioneller ad-hoc Propeller mit allen Parametrisierungen (skew, rake, chord length) sowie radialer und tangentialer Beeinflussung der Stützstellendichte	103
Abbildung 41: ad-hoc Bionikpropeller mit vergleichbarem Parametrisierungsumfang	103
Abbildung 42: Automatische Erzeugung von Nachlaufflächen für Tetraedervernetzung (links) sowie räumliche Gitterverdichtung (rechts, hier sichtbar an den Segmentgrenzen).....	107
Abbildung 43: Profilschnitte eines Bionikpropellerblattes zur Erzeugung der Stützpunkte	109
Abbildung 44: Fehler in importierten Geometriedateien	111
Abbildung 45: Domain mit Hexaedervernetzung, konventionelles Propellerblatt (rotierende Domain, links gesamt, rechts das Propellerblatt vergrößert).....	113

Abbildung 46: <i>P1424</i> als CAD-Modell (links) sowie mit reduzierter Blattzahl gefertigtes Messingmodell zur Vermessung (rechts, Foto: SVA)	114
Abbildung 47: Verblockung der Flügel <i>P1423</i> und <i>P1424</i>	115
Abbildung 48: Abschließende Freifahrtkurven des <i>P1424</i> , Tetraedervernetzung	116
Abbildung 49: Abschließende Freifahrtkurven des <i>P1423</i> , Tetraedervernetzung	118
Abbildung 50: Aufruf-Sequenz (ohne Details)	121
Abbildung 51: Vergleich: <i>P1423</i> (links) und sehr einfacher ad hoc Propeller (rechts), gleiches Flächenverhältnis $A_E/A_0=0.6159$ und Steigungsverhältnis P/D	126
Abbildung 52: Beispiele von in der Startphase der Optimierung generierten konventionellen Propellern	127
Abbildung 53: Nach 13 Generationen sind die errechneten Werte bereits besser als beim <i>P1423</i> !	129
Abbildung 54: Erstes Optimierungsergebnis für konventionelle Propeller	130
Abbildung 55: Druckverläufe auf der Saugseite des optimierten konventionellen Propellers im Vergleich zum <i>P1423</i> (SVA, Rieck)	131
Abbildung 56: Berechnete Freifahrtkurven des optimierten Propellers im Vergleich zum <i>P1423</i> für 25 s^{-1} (die SVA-Rechnung liegt nur für diese Drehzahl vor.)	132
Abbildung 57: Propeller 0825_201903, Exemplar aus der Tabelle	133
Abbildung 58: Propeller aus Lauf 8	134
Abbildung 59: Zwischenergebnis nach 411 Generationen (Propeller in zwei Ansichten)	135
Abbildung 60: links: Rücklage, Hang, Profiltiefe und Anstellwinkel (ohne hydrodyn. Anstellwinkel), rechts: Wölbung, Wölbungsrücklage und Profildicke	135
Abbildung 61: Berechnete Freifahrtkurven des evolvierten Propellers (Generation 500) im Vergleich zum <i>P1423</i> für 20 s^{-1}	136
Abbildung 62: Entwicklung der Konfigurationen von Generation 180 bis hin zum Endstand bei Generation 500 (von links nach rechts)	137
Abbildung 63: Entwicklung der Qualität (links) und der Schrittweite (rechts) der Evolutionsstrategie	138
Abbildung 64: Wölbung (links) und Profiltiefe (rechts) des Endstandes im Vergleich zu den Vorgängern	138
Abbildung 65: Anstellwinkel des Endstandes im Vergleich zu den Vorgängern (links); Hang und Rücklage des Endstandes (rechts)	139
Abbildung 66: Beispiele für simpel parametrisierte Bionikpropeller (hier als CGNS-Datenbank)	140
Abbildung 67: Einige Beispiele zufällig erzeugter Varianten korrekter Bionikpropeller	141
Abbildung 68: links <i>P1450</i> (darin links Druck- und rechts Saugseite) sowie rechts <i>P1468</i>	142

Abbildung 69: CLT-Propeller <i>GP5OEM</i> und abgeleiteter Bionikpropeller <i>GP5BP</i>	143
Abbildung 70: Berechnete Freifahrtkurven des konventionellen <i>GP5OEM</i> (grün), <i>GP5BP</i> bei Generation 7500 (violett) und modifizierter SVA-Bionikpropeller (gelb)	144
Abbildung 71: Optimierungslauf 13: Propeller mit Doppeldeckerflügeln.....	145
Abbildung 72: Entwicklung der Qualität und der Schrittweite im Optimierungslauf 13.....	146
Abbildung 73: Entwicklung der Qualität und der Schrittweite im Optimierungslauf 14.....	147
Abbildung 74: Optimierungslauf 15: sehr langes Basispropellerblatt.....	148
Abbildung 75: Entwicklung der Qualität und der Schrittweite im Optimierungslauf 15.....	148
Abbildung 76: Optimierungslauf 19: bestes η_0	149
Abbildung 77: Optimierungslauf 19: bestes k_T	149
Abbildung 78: Entwicklung der Qualität und der Schrittweite im Optimierungslauf 19.....	150
Abbildung 79: Entwicklung der Kovarianzmatrix-Kondition im Optimierungslauf 19.....	150
Abbildung 80: <i>P1487</i> , Druck- und Saugseite.....	151
Abbildung 81: <i>P1488</i> , Druck- und Saugseite.....	151
Abbildung 82: Der <i>P1488</i> (links) im Kavitationstank (rechts)	152
Abbildung 83: <i>P1490</i> Endstand, Druck- und Saugseite	152
Abbildung 84: Berechnete Freifahrtkurven für die Basisversion <i>P1487</i> (SVA), die finale Optimierungsvariante <i>P1488</i> (<i>TUB-08.02.</i>) und der letztlich gefertigten Variante <i>P1490</i>	153
Abbildung 85: Druckbelastung auf Druck- (links) und Saugseite (rechts) des <i>P1490</i> bei $J=0.1$	154
Abbildung 86: Stromlinien am Randbogen des <i>P1490</i>	155
Abbildung 87: Finaler <i>P1490</i> mit überkreuzten Bögen (SVA).....	156
Abbildung 88: Durch Nachparametrisierung erzeugte Varianten des <i>P1488</i> (links) und <i>P1490</i> (rechts), Blick auf die Saugseiten	157
Abbildung 89: Rücklage (skew), Hang (rake) und Profillänge (chord length) des <i>P1488</i> (links) und des <i>P1490</i> (rechts)	158
Abbildung 90: Wölbung (camber), Wölbungsrücklage (max camber), Dicke (thickness) und Anstellwinkel (pitch) des <i>P1488</i> (links) und des <i>P1490</i> (rechts)	158
Abbildung 91: Das für den Test ausgewählte Schubschiff <i>Radial</i> mit Leichter am Pier	159
Abbildung 92: Herausgehobener Schottelantrieb mit originalem Propeller (links), der demontierte Propeller an Deck (rechts); Blicke auf Saugseite	160

Abbildung 93: Stauchungen an der Eintrittskante (links), Spuren der Ruderkavitation (rechts).....	161
Abbildung 94: Die neuen Bionikpropeller, angeliefert (links) und montiert (rechts).....	161
Abbildung 95: Leistungsbedarf über der Geschwindigkeit für beide Propellerarten.....	162
Abbildung 96: Erreichte Zugkraft über der aufgenommenen Leistung für beide Propellerarten	163
Abbildung 97: Steuerbordseitiger Bionikpropeller nach 2500 km (Fotos: MMG).....	164
Abbildung 98: Abweichungen (Genauigkeiten) des Schub- und Momentenbeiwertes für den P1423, Hexaedervernetzung	191
Abbildung 99: Höhere Genauigkeit des Wirkungsgrades für den P1423, Hexaedervernetzung.....	192
Abbildung 100: Relative Abweichungen des Schub- und Momentenbeiwertes von der Messung für den P1424, Tetraedervernetzung	193
Abbildung 101: Relative Abweichungen des Schub- und Momentenbeiwerts von der Messung für den P1423, Tetraedervernetzung (neu).....	194
Abbildung 102: Ansicht von der Vorderkante her	195
Abbildung 103: Ansicht von der Flügelspitze her.....	195
Abbildung 104: Ansicht von der Nabe her	196
Abbildung 105: Aufbau der allgemeineren Optimierungsumgebung.....	199
Abbildung 106: Wirbelsystem am Tragflügel.....	200
Abbildung 107: Reale Abwindgeschwindigkeiten am Trapezflügel.....	203

10 Tabellen

Tabelle 1: Werte des konventionellen ad-hoc Propellers im Vergleich zum <i>P1423</i>	127
Tabelle 2: Werte des konventionellen Propellers bei Generation 13 im Vergleich zum <i>P1423</i>	128
Tabelle 3: Werte späterer Generationen im Vergleich zum <i>P1423</i>	130
Tabelle 4: Werte konventioneller Propeller aus Lauf 5 im Vergleich zum <i>P1423</i>	133
Tabelle 5: Werte eines konventionellen Propellers aus Lauf 8 im Vergleich zum <i>P1423</i>	134
Tabelle 6: Werte des konventionellen <i>P1423</i> bei ausgewählten Fortschrittsgraden	136
Tabelle 7: Werte des konventionellen Propellers (Generation 500) aus Lauf 18 bei ausgewählten Fortschrittsgraden.....	137
Tabelle 8: Werte eines Bionikpropellers aus Optimierungslauf 13 im Vergleich zum <i>P1424</i>	145
Tabelle 9: Werte von Bionikpropellern aus Optimierungslauf 14 im Vergleich zum <i>P1424</i>	146
Tabelle 10: Werte eines Bionikpropellers aus Optimierungslauf 15 im Vergleich zum <i>P1424</i>	147
Tabelle 11: Werte von Bionikpropellern aus Optimierungslauf 19 im Vergleich zum <i>P1424</i>	149

11 Literatur

- [1] I. H. Abbott, A. E. von Doenhoff: *Theory of Wing Sections*. Dover Publications, Inc., 1959.
- [2] M. Abramovitz: *Handbook of Mathematical Functions*. Dover Publications, 9. Auflage, 1970.
- [3] D. Anderson, S. Eberhardt: *A Physical Description of Flight - revisited*. McGraw-Hill, 1st Ed. 2001, 2nd Ed. 2009.
- [4] John D. Anderson jr.: *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Series in Aeronautical and Aerospace Engineering, McGraw-Hill, 2nd Ed., 1991.
- [5] AEA Technology. *ANSYS CFX, Release 11.0 - User documentation*, 2006.
- [6] W. W. Baumann, U. Bunge, O. Friedrich, M. Schatz, F. Thiele: *Finite–Volumen–Methode in der Numerischen Thermofluiddynamik*. Skript, 5. Auflage, Herrmann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik, TU-Berlin, 2006.
- [7] E. Benini: *Multiobjective Design Optimization of B-Screw Series Propellers Using Evolutionary Algorithms*. Marine Technology, Vol. 40 No. 4, 2003.
- [8] E. Benini, A. Toffolo: *Development of high-performance airfoils for axial flow compressors using evolutionary computation*. Journal of Propulsion and Power, Vol. 18, No. 3, May–June 2002, Berlin Heidelberg, 2002.
- [9] J. J. Bertin, R. M. Cummings: *Aerodynamics for Engineers*. 6th Ed, Pearson Education Limited, Harlow, England, 2014.
- [10] I. Bertini, M. De Felice, F. Moretti, S. Pizzuti: *Start-Up Optimisation of a Combined Cycle Power Plant with Multiobjective Evolutionary Algorithms*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [11] *Brockhaus' ABC der Naturwissenschaft und Technik*. 2. Auflage. F. A. Brockhaus, Leipzig, 1952.
- [12] R. Burkhardt: *UML - Unified Modeling Language. Objektorientierte Modellierung für die Praxis*. Addison Wesley, 1. Auflage, 1997.
- [13] J.-S. Carlton: *Marine Propellers and Propulsion*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1994.
- [14] Y. Deng: *Performance database interpolation and constrained nonlinear optimization applied to propulsor blade design*. Master's thesis. The University of Texas at Austin, Dept. of Civil Engineering. 2005.
- [15] O.-M. Faltinsen. *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. Cambridge University Press, UK, 2005.

-
- [16] J. H. Ferziger, M. Peric: *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [17] E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J. Vlassidis: *Entwurfsmuster*. Addison Wesley, 1. Auflage, 1996, deutsche Übersetzung: D. Riehle.
- [18] G. Gennaro, J. Gonzalez-Adalid: *Improving the Propulsion Efficiency by means of Contracted and Loaded Tip (CLT[®]) Propellers*. SNAME-Paper, Athen, 2012.
- [19] I. Gerdes, F. Klawonn, R. Kruse: *Evolutionäre Algorithmen*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2004.
- [20] Germanischer Lloyd AG: *Klassifikations- und Bauvorschriften - I Schiffstechnik, Teil 2: Binnenschiffe, Kapitel 4: Zusätzliche Anforderungen für die Zusätze zum Klassenzeichen*. Richtlinie, Unternehmenszentrale Hamburg, 2011.
- [21] Germanischer Lloyd AG: *Klassifikations- und Bauvorschriften - II Werkstoffe und Schweißtechnik, Teil 1: Metallische Werkstoffe, Kapitel 5: Propellerwerkstoffe*. Richtlinie, Unternehmenszentrale Hamburg, 2009.
- [22] Germanischer Lloyd AG: *Klassifikations- und Bauvorschriften - V Berechnungstechnik, Teil 1: Schiffskörper-Entwurfsanalysen, Kapitel 2: Richtlinien für Betriebsfestigkeitsanalysen der Schiffskonstruktion*. Richtlinie, Unternehmenszentrale Hamburg, 2004.
- [23] G. H. Golub, J. M. Ortega: *Wissenschaftliches Rechnen und Differentialgleichungen*. Heldermann, 1995.
- [24] O. Haag: *Studie zur Anwendung von Turbulenzmodellen in Gasturbinenbrennkammern*. Dissertation, FB Maschinenbau, Universität Darmstadt, 2003.
- [25] N. Hansen: *Verallgemeinerte individuelle Schrittweitenregelung in der Evolutionsstrategie*. Mensch & Buch Verlag, Berlin, 1998.
- [26] N. Hansen: *The CMA Evolution Strategy: A Tutorial*. Skript. 2011.
- [27] S. Harries, B.-L. Käther: *Rechnererzeugte Propellergeometrien*. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft e. V. (STG), 91. Band, 1997.
- [28] M. Henricson, E. Nyquist: *Programming in C++, Rules and Recommendations*. Revision C, ELLEMTEL Telecommunication Systems Laboratories - Sweden, Doc. No. M 90 0118 Uen, Dec. 1993.
- [29] L. Hildebrand: *Asymmetrische Evolutionsstrategien*. Dissertation. Universität Dortmund, FB Informatik. 2001.
- [30] M. Hopfensitz: *Numerische Optimierung von Schiffen mit VSP: Automatische Gittergenerierung*. Dissertation, Univ. Ulm, 2010.
-

- [31] J. Hundemer, B. Naujoks, T. Hachmann, M. Abdel-Maksoud: *Auslegung von Schiffspropellern mit evolutionären Algorithmen*. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 2006.
- [32] W.-H. Isay: *Propellertheorie - Hydrodynamische Probleme*. Hrsg. I. Szabó. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1964.
- [33] W.-H. Isay: *Moderne Probleme der Propellertheorie*. Hrsg. I. Szabó. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1970.
- [34] A. Johansson: *Engineering Turbulence Models and their Development, with Emphasis on Explicit Algebraic Reynolds Stress Models*. In: *Theories of Turbulence, Courses and Lectures No. 442*, Ed.: M. Oberlack, F. H. Busse. Springer Verlag Wien, New York, 2002.
- [35] N. Josuttis: *Die C++-Standardbibliothek. Eine detaillierte Einführung in die vollständige ANSI/ISO-Schnittstelle*. Addison Wesley, 1. Auflage, 1996.
- [36] J. Katz J, A. Plotkin: *Low speed aerodynamics: from wing theory to panel methods*. McGraw-Hill, 1991.
- [37] W. Kaufmann: *Technische Hydro- und Aeromechanik*. 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1958.
- [38] S. A. Kinnas, H. Lee, H. Gu, Y. Deng.: *Prediction of Performance and Design via Optimization of Ducted Propellers Subject to Non-axisymmetric Inflows*. Trans. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 113, 2005.
- [39] J.-U. Klar: *Aerodynamik von Wirbelschleppen bei hochmanövrierfähigen Flugzeugen*. Dissertation. Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, TU-München, 2012.
- [40] W. Kley: *Numerische Hydrodynamik*. Skript, Institut für Astronomie und Astrophysik, Universität Tübingen, 2004.
- [41] N. Kornev: *Propellertheorie*. 1. Auflage, Universität Rostock/Shaker Verlag. 2009.
- [42] E. V. Lewis: *Principles of Naval Architecture, Resistance, Propulsion and Vibration, volume II*. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- [43] T. Lischer: *Modifikation von statistischen Turbulenzmodellen zur verbesserten Beschreibung des turbulenten Geschwindigkeits- und Mischungsfeldes bei der Querstrahleinmischung*. Dissertation, Fak. für Chemieing.-wesen und Verf.-technik, Univ. Karlsruhe, Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.
- [44] M. Maghareh, H. Ghassemi: *Propeller Efficiency Enhancement by the Blade's Tip Reformation*. AJME, 2017, Vol. 5, No. 3, 70-75. Science and Education Publishing, Newark, US, 2017.

-
- [45] M. v. Meegen, P. Schless (Hrsg.): *Programmierkonventionen für C++*. Aus: *Softwaretechnik-Trends*, Mitteilungen der Fachgruppen 'Software-Engineering' und 'Requirements-Engineering', Band 12 Heft 3, Siemens AG, Aug. 1992.
- [46] S. Meyers: *Effektiv C++ Programmieren*. Addison Wesley, 3. Auflage, 1998.
- [47] S. Meyers: *Mehr Effektiv C++ Programmieren*. Addison Wesley, 1. Auflage, 1998.
- [48] W. Nachtigall: *Bionik - Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1998.
- [49] B. Naujoks, M. Steden, S.-B. Müller, J. Hundemer, M. Abdel-Maksoud: *Optimisation of a Linear Jet Propeller Blade*. In: P. Neittaanmäki, J. Périaux, and T. Tuovinen, editors: *Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control*. CIMNE, Barcelona, Spain, 2007.
- [50] J. N. Newman: *Marine Hydrodynamics, volume III*. The MIT Press, 1980.
- [51] B. Oestereich: *Objektorientierte Softwareentwicklung*. Oldenbourg, 1995.
- [52] M. Olhofer, T. Arima, T. Sonoda, B. Sendhoff: *Optimisation of a Stator Blade Used in a Transonic Compressor Cascade with Evolution Strategies*. In: *Adaptive Computing in Design and Manufacture (ACDM 2000)*. Springer Verlag, 2000.
- [53] M. W. C. Oosterveld: *Wake Adapted Ducted Propellers*. H. Veenman & Zonen N.V. - Wageningen, Niederlande, 1970.
- [54] L. Prandtl, A. Betz: *Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik*. Kaiser Wilhelm-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, 1927; Universitätsverlag, Göttingen, 2010.
- [55] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery: *Numerical Recipes in C++ - The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, Cambridge, 2. Auflage, 2002.
- [56] R. Radespiel: *Skript zur Vorlesung Tragflügelaerodynamik - WS 2007/2008*. Institut für Strömungsmechanik, Technische Universität Braunschweig, 2007.
- [57] I. Rechenberg: *Evolutionsstrategie. Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Frommann Holzboog, 1973, Dissertation, 1970.
- [58] I. Rechenberg: *Evolutionsstrategie '94*. Werkstatt Bionik und Evolutionstechnik, Band 1. Fromman-Holzboog, 1994
- [59] R. Reuther: *Teilvorhaben: "Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von Gussteilen"*. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben (vgl. [63]) 01RW0308. MMG GmbH. Waren, 2007.
-

- [60] T. Rung: *Statistische Turbulenzmodellierung*. Skript, Herrmann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik, TU-Berlin, 2005.
- [61] T. Rung, L. Xue, J. Yan, M. Schatz, F. Thiele: *Numerische Methoden der Thermo- und Fluidodynamik*. Skript, vorl. Version, Herrmann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik, TU-Berlin, 2002.
- [62] G. Schaldach, L. Berger, I. Razilov, H. Berndt, U. Werner: *Optimierung einer Zerstäuberammer für die Plasmenspektrometrie mit Hilfe von CFD und einer Evolutionsstrategie*. In: Chemie Ingenieur Technik (74). Wiley-VCH Verlag Weinheim, 2002.
- [63] M. Schmid, F. Lumpitzsch, R. Schulze: *Teilvorhaben: Entwicklung, evolutionsstrategische Optimierung und einsatznahe Vermessung einer neuartigen Propellerform (Bionikpropeller) für die Anwendung im Schiffbau*. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben²⁴⁰ 01RW0307. TU-Berlin, FG Bionik und Evolutionstechnik. Berlin, 2008. ISSN 1618-8675.
- [64] H.-P. Schwefel: *Kybernetische Evolution als Strategie der experimentellen Forschung in der Strömungsmechanik*. Herrmann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik, Dipl.-Arbeit, TU-Berlin, , Berlin, 1965.
- [65] H.-P. Schwefel: *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie*. Birkhäuser Verlag, Basel, Stuttgart, 1977.
- [66] H.-P. Schwefel: *Evolution and Optimum Seeking*. 1. Ausgabe. Wiley-Interscience, 1995.
- [67] H.-P. Schwefel: *Evolutionsstrategie und numerische Optimierung*. Dissertation, TU-Berlin, 1975.
- [68] H.-P. Schwefel: *Numerical Optimization of Computer Models*. Chichester. Wiley, 1981.
- [69] M. S. Seidler: *Geometrische Restriktionen bei der geometriebasierten Strukturoptimierung von Maschinenbauteilen mit Freiformgeometrien*. Dissertation. RWTH Aachen. 2012.
- [70] H. Siegloch: *Technische Fluidmechanik*. VDI Verlag, 3. Auflage, Düsseldorf, 1996.
- [71] P. R. Spalart: *Strategies for turbulence modelling and simulations*. In: Int. Journal of Heat and Fluid Flow 21, S. 252-263, 2000.

²⁴⁰ Verbundvorhaben "Anwendung von Erkenntnissen der Bionik zur Funktions- und Struktur-optimierung von Schiffspropellern und anderen Gusskörpern"

- [72] M. Stajuda, M. Karczewski, D. Obidowski, Krzysztof Jóźwik: *Development of a CFD model for propeller simulation*. In: Mechanics and Mechanical Engineering, Vol. 20, No. 4, S. 579–593, 2016.
- [73] M. Steden: *Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung von Mehrkomponenten-Schiffspropulsoren für schnelle Schiffe*. Dissertation. Fakultät für Ing.-wissenschaften, Abt. Maschinenbau, Universität Duisburg-Essen, 2010.
- [74] M. Steden, J. Hundemer, S.-B. Müller, M. Abdel-Maksoud: *Geometrische Parametrisierung und Untersuchung der Umströmung von aus Mehrkomponenten bestehenden Schiffsantrieben*. In: Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 2007.
- [75] B. Stroustrup: *Die C++ Programmiersprache*. Addison Wesley, 2000.
- [76] J. Wakunda: *Parallele Evolutionsstrategien mit der Optimierungsumgebung EvA*. Diss., Tübingen, 2001.
- [77] L. Yu, M. Druckenbrod, M. Greve, M. Abdel-Maksoud: *An Automatic Optimization Process for Optimal Ducted Propeller Design and Its Application Based on CFD Techniques*. 3rd Intl. Symposium on Marine Propulsors. Launceston, Tasmania, Australia, May 2013.

12 Anhang

12.1 VDI-Richtlinie 6224 Bionische Optimierung

Zitiert aus: <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/technologies-of-life-sciences/...fachbereiche/bionik/richtlinienubersicht/vdi-6224/>

Blatt 1: Bionische Optimierung - Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung

- Überprüft und bestätigt: 2017-08

Evolutionäre Algorithmen sind bionische Optimierungsverfahren, deren erste Varianten in den 1960er Jahren entstanden sind. Mit diesen Algorithmen können schwierige Optimierungsprobleme gelöst werden, für die keine Standardverfahren anwendbar sind.

Die Grundidee Evolutionärer Algorithmen leitet sich von den Prinzipien der Darwin'schen Evolution ab: Individuen stehen im Wettstreit um Ressourcen. Besonders gut angepasste starke Individuen haben besseren Zugang zu den Ressourcen und damit eine erhöhte Chance zur Fortpflanzung. Das Maß ihrer Fähigkeit, sich fortzupflanzen (als "Fitness" bezeichnet), hängt von den Eigenschaften des Individuums ab. Diese Eigenschaften ihrerseits werden hauptsächlich (neben der Umwelt) durch den "Bauplan" des Individuums bestimmt. Individuen mit guter Fitness übertragen mit größerem Erfolg ihre Baupläne auf die Nachkommen. Dieses Prinzip stelle die eine Seite des darwinschen²⁴¹ Evolutionsprinzips dar: die Selektion.

Höherentwicklung ist jedoch nur möglich, wenn verschiedene Baupläne, "genetische Variation", in der Population vorhanden sind/ist. Selektion kann dann die bezüglich der Fitness besten Baupläne präferieren.

Evolutionäre Algorithmen verwenden die Prinzipien der Variation (Mutation und Rekombination) und Selektion zum Evolvieren neuer Lösungen mit dem Ziel der Systemverbesserung und Optimierung.

Die Richtlinie wendet sich vorrangig an Ingenieure, die Optimierungsprobleme zu lösen haben,

- für die keine Standardlösungen oder Algorithmen bekannt sind,

²⁴¹ (eigentl. "Darwin'schen"..., auch im Folgenden, Anm. des Autors)

- für die Standardlösungen oder Algorithmen nicht den gewünschten Erfolg bringen,
- deren Lösung mit herkömmlichen Verfahren absehbar zu aufwendig erscheinen

Blatt 2: Bionische Optimierung - Anwendung biologischer Wachstumsgesetze zur strukturmechanischen Optimierung technischer Bauteile

- Erscheinungsdatum endgültige Version (Weißdruck): 2012-08
- Zurückgezogen 2017-04, da sie in die internationale DIN ISO 18459 übergeleitet wurde, die Richtlinie VDI 6224 Blatt 2 ist aber noch beim Beuth-Verlag erhältlich
- Erscheinungsdatum DIN ISO 18459: 2016-08

Die Richtlinie erläutert die Funktionen und Möglichkeiten der verschiedenen bionischen Optimierungsmethoden und verdeutlicht diese mit exemplarischen Beispielen. Durch den Prozess der Evolution haben sich biologische Kraftträger wie Bäume, Knochen, Krallen und Dornen optimal an ihre Belastung angepasst, was sich in ihren Gestaltungsprinzipien erkennen lässt. Aus diesem biologischen Prinzip wurden mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) computerbasierte bionische Optimierungsmethoden für technische Bauteile abgeleitet: Computer Aided Optimization (CAO), Soft Kill Option (SKO) und Computer Aided Internal Optimization (CAIO). Ziel der Methoden ist ein optimaler Materialeinsatz zur Gewichtsreduktion bzw. Steigerung der Belastbarkeit und Lebensdauer der Bauteile. Eine noch einfachere und schnellere Methode, mit denen jeder Konstrukteur Bauteile optimieren kann, ist die "Methode der Zugdreiecke". Die breite Einsatzmöglichkeit bei für die Anwender relativer Einfachheit und Nachvollziehbarkeit der bionischen Optimierungsmethoden eröffnet die Möglichkeit, die Bauteiloptimierung bereits früh im Konstruktionsprozess zu verankern. Zweck der Richtlinie ist, Anwendern die bionischen Optimierungsmethoden als effektives Werkzeug zur Erhöhung der Lebensdauer und Verringerung des Gewichts von Bauteilen bekannt zu machen und deren breiten Einsatz zu fördern und damit auch dem gesellschaftlichen Auftrag gerecht zu werden, natürliche Ressourcen zu schonen.

Blatt 3: Bionik - Bionische Strukturoptimierung im Rahmen eines ganzheitlichen Produktentstehungsprozesses

- 2016-04, Erscheinungsdatum endgültige Version (Weißdruck): 2017-09

Ein wichtiger Anwendungsfall in Natur und Technik ist der Strukturleichtbau, der sich mit der optimalen Auslegung von Bauteilen unter Berücksichtigung der

jeweils herrschenden Randbedingungen beschäftigt. Häufig zu optimierende Eigenschaften sind Gewicht, Stabilität oder Lebensdauer.

Die biologische Grundlagenforschung zeigt, dass die Schalen von Kieselalgen und Strahlentierchen hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Zugleich besteht für diese einzelligen Planktonorganismen aufgrund ihrer Lebensweise die Notwendigkeit, ihre Schalen besonders leicht zu bauen. Die Idee, den Bauplan von Schalenstrukturen von Diatomeen und Radiolarien systematisch und in enger Anlehnung an die evolutiven Mechanismen für technische Entwicklungen einzusetzen wurde entwickelt und patentiert.

Durch eine Weiterentwicklung dieser Idee und durch eine Verknüpfung zwischen der biologischen Grundlagenforschung und der industrienahen Anwendungsforschung konnte ein systematischer Produktentstehungsprozess entwickelt werden. Mit diesem ELiSE[®]-Prozess (Evolutionary Light Structure Engineering) können Ingenieure optimierte Bauteile im Strukturleichtbau entwickeln.

12.2 Freifahrtkurven zur Validierung

Die Bezeichnungen in den Darstellungen der Genauigkeits- und Freifahrtkurven folgen dem Schema:

Turbulenzmodell>-<Knotenzahl>-<tetra, prism, hexa>.

Der Appendix tetra, prism, hexa markiert eine erfolgreiche Elementumwandlung in die genannten Elementtypen.

12.2.1 Hexaeder-ernetzter *P1423*

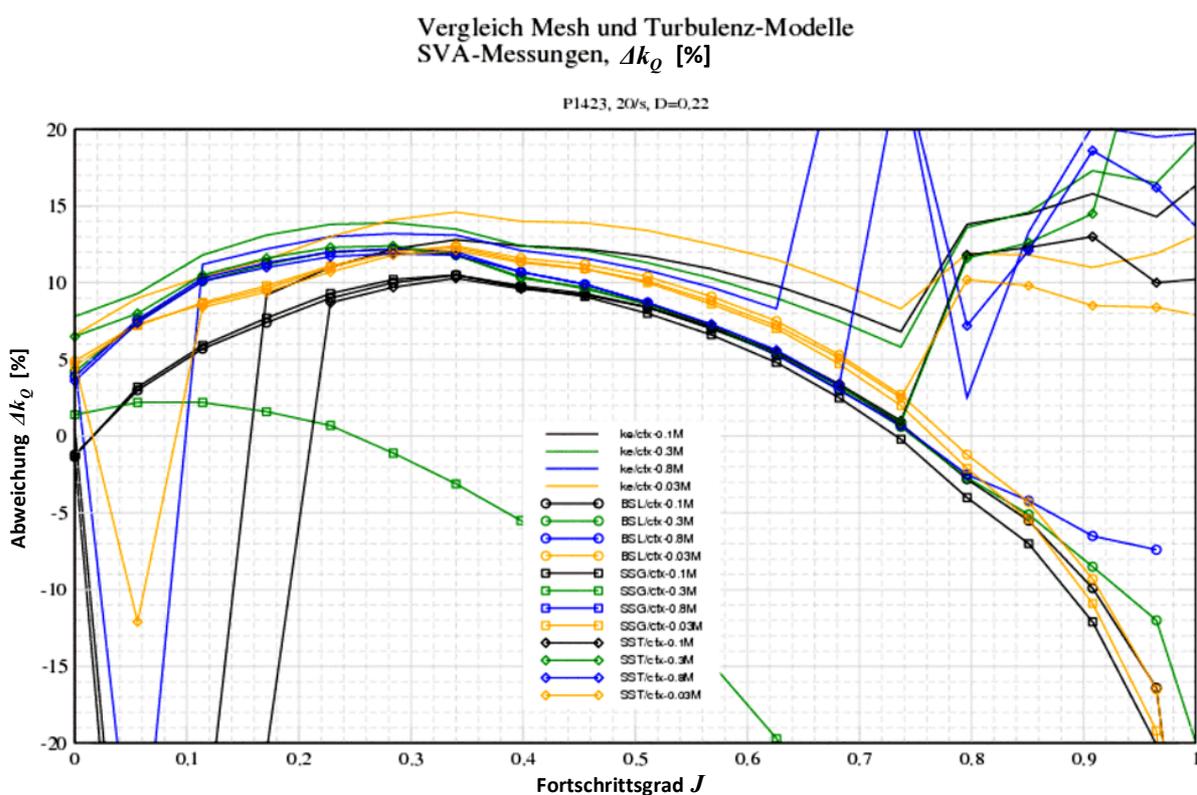
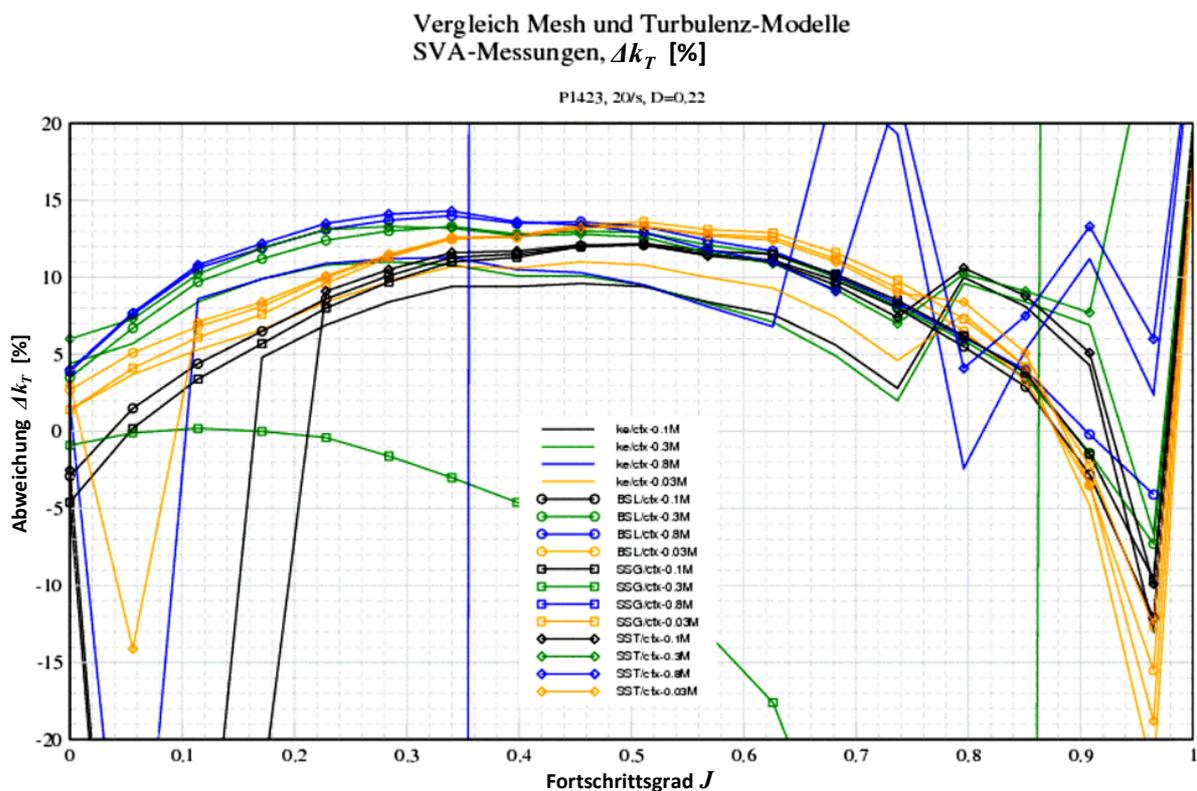


Abbildung 98: Abweichungen (Genauigkeiten) des Schub- und Momentenbeiwertes für den *P1423*, Hexaedervernetzung

Vergleich Mesh und Turbulenz-Modelle
SVA-Messungen, $\Delta\eta_0$ [%]

P1424, 20/s, D=0,22

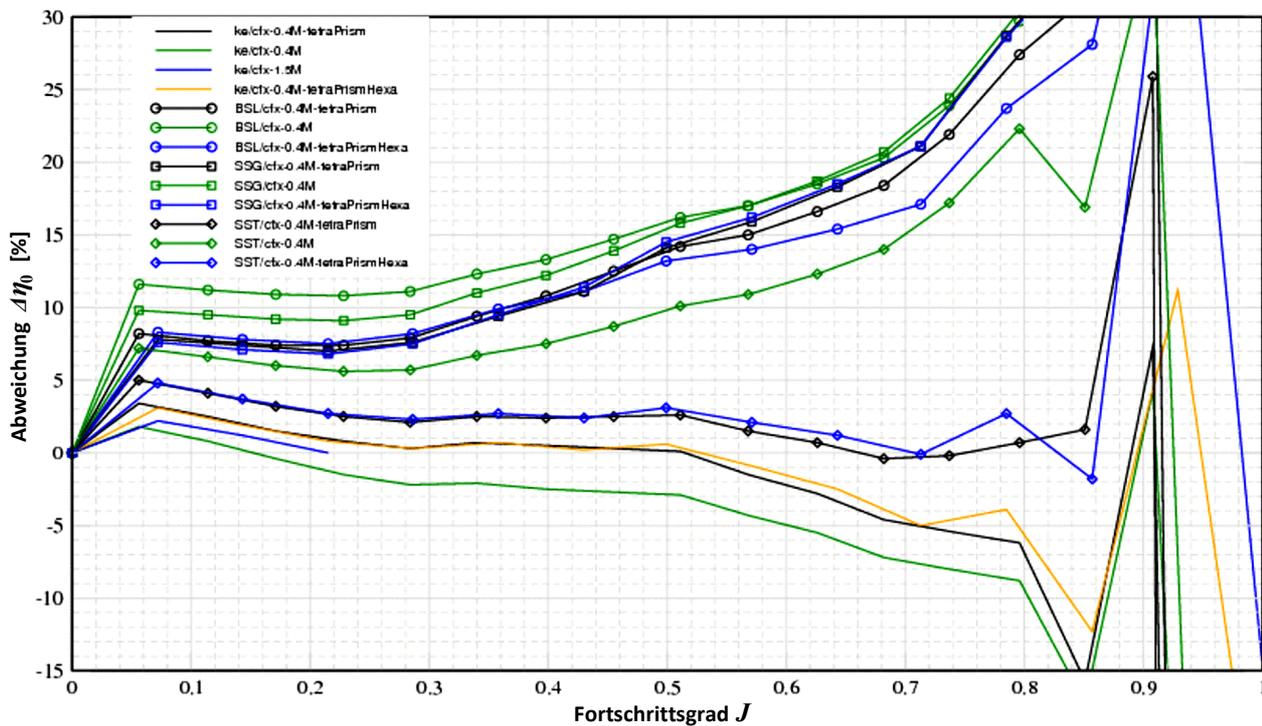
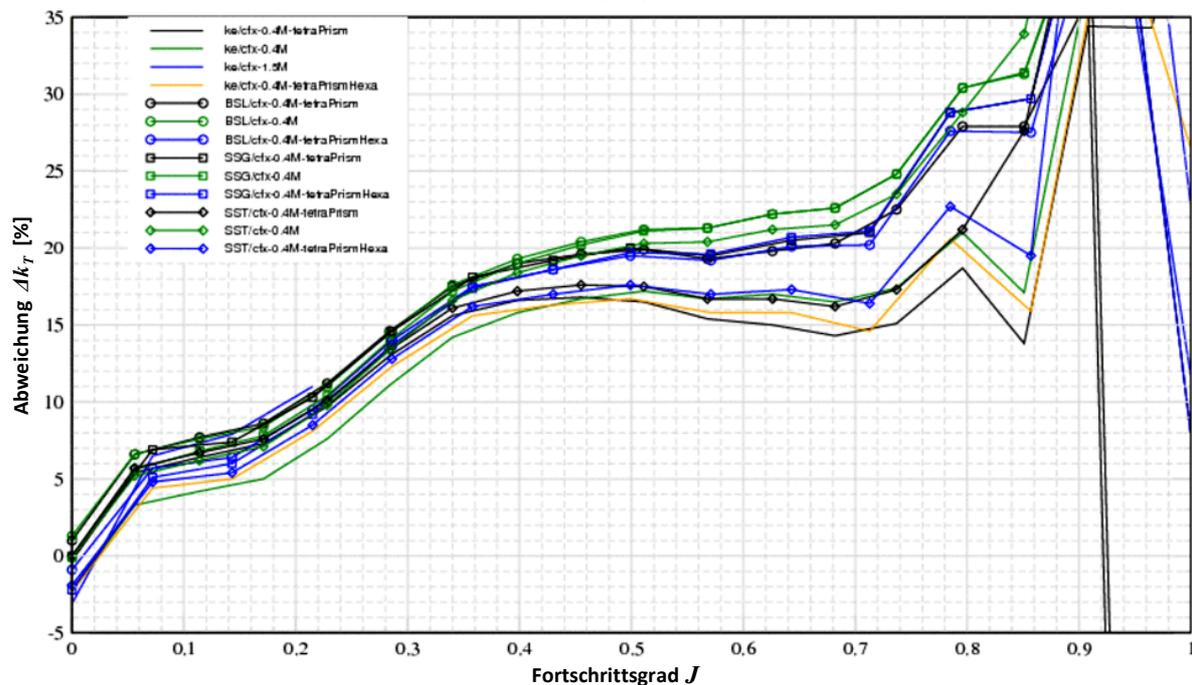


Abbildung 99: Höhere Genauigkeit des Wirkungsgrades für den P1423, Hexaedervernetzung

12.2.2 Tetraeder-vernetzter P1424

Vergleich Mesh und Turbulenz-Modelle
SVA-Messungen, Δk_T [%]

P1424, 20/s, D=0,22



Vergleich Mesh und Turbulenz-Modelle
SVA-Messungen, Δk_Q [%]

P1424, 20/s, D=0,22

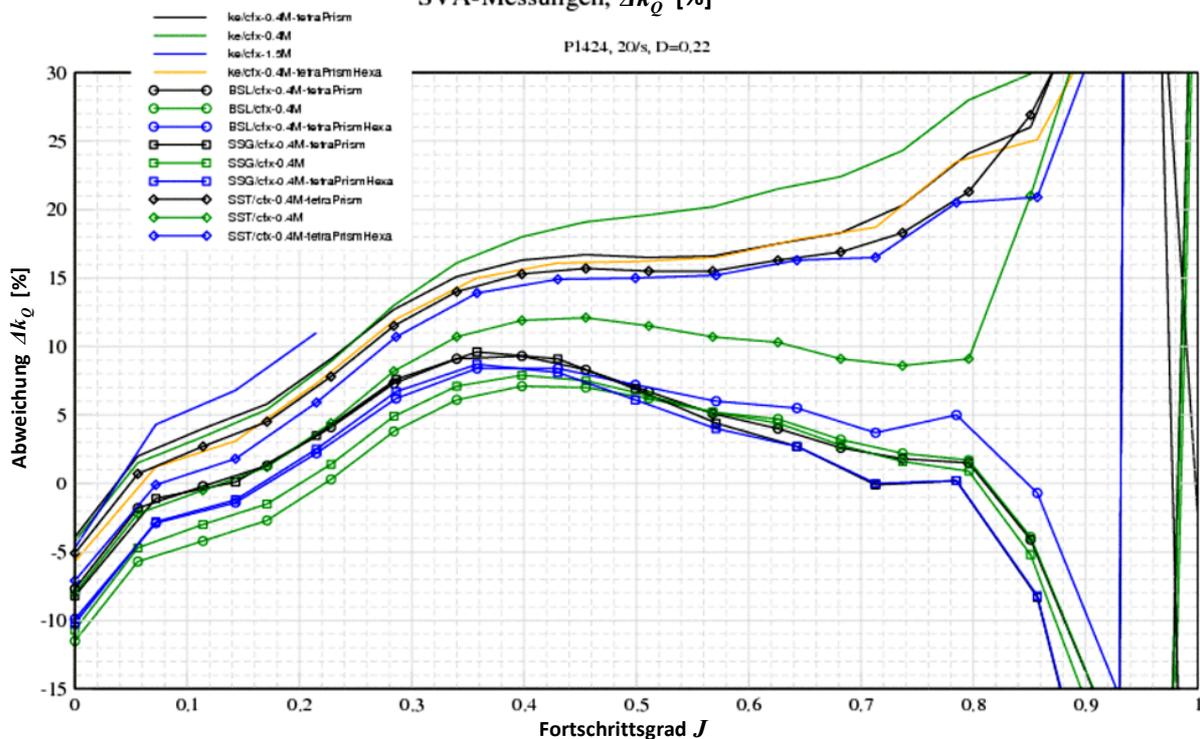
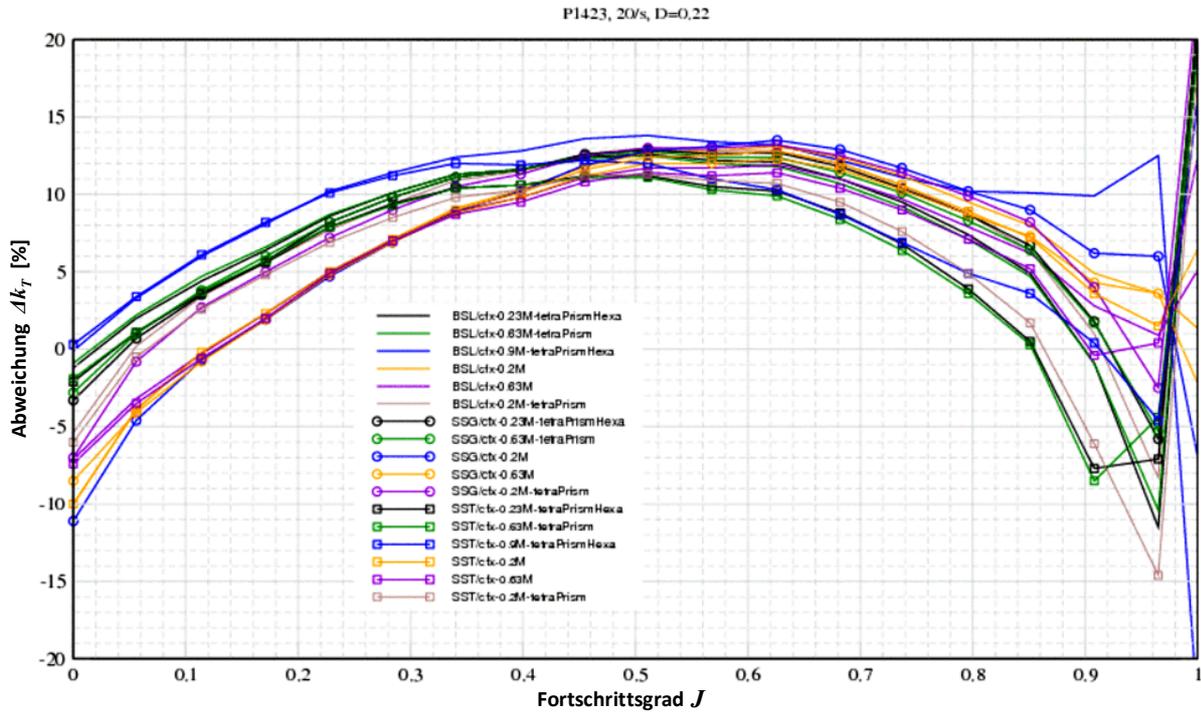


Abbildung 100: Relative Abweichungen des Schub- und Momentenbeiwertes von der Messung für den P1424, Tetraedervernetzung

12.2.3 Tetraeder-vernetzter P1423

Vergleich Mesh und Turbulenz-Modelle
SVA-Messungen, Δk_T [%]



Vergleich Mesh und Turbulenz-Modelle
SVA-Messungen, Δk_Q [%]

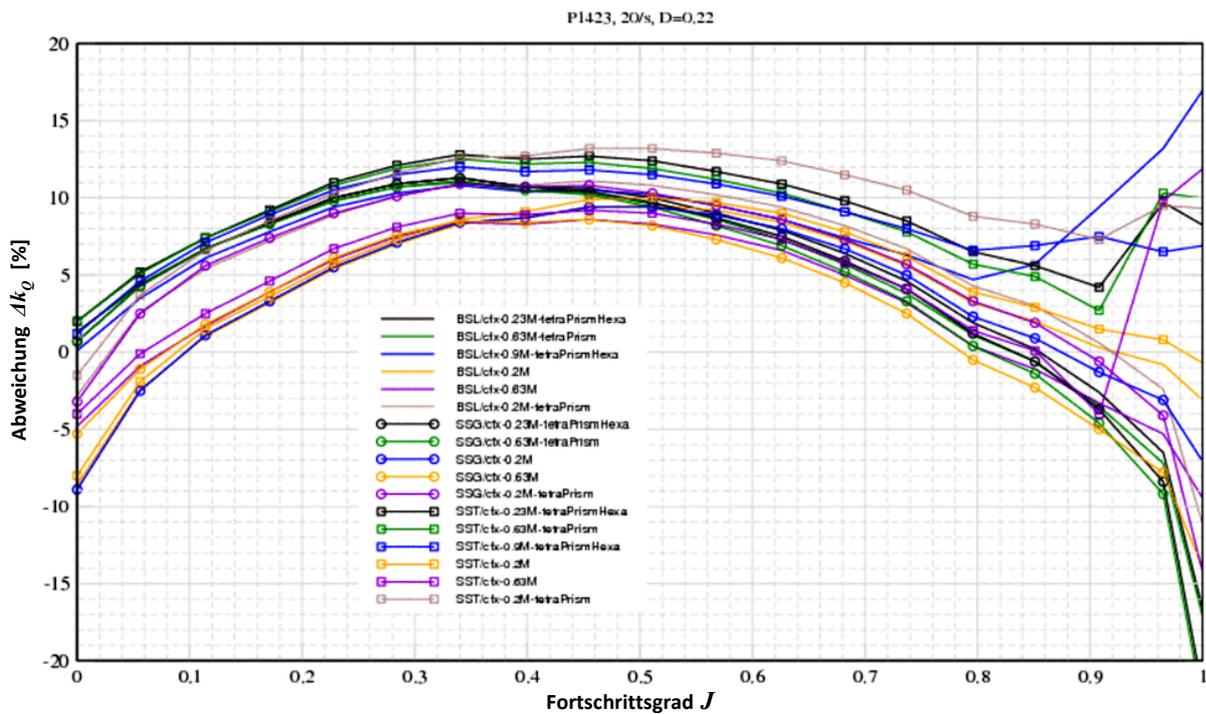


Abbildung 101: Relative Abweichungen des Schub- und Momentenbeiwerts von der Messung für den P1423, Tetraedervernetzung (neu)

12.3 Beispiel einer einfachen Propellerblatt-Parametrisierung

Die folgenden Abbildungen zeigen einen einfachsten Propellerflügel mit vollständiger Parametrisierung (s. o.). Der Einfachheit halber wurde für die bildliche Darstellung die Koordinate in Propellerachse als Farbkanal²⁴² verwendet. Die verwendeten Parameter wie Nabendurchmesser, Außendurchmesser etc. wurden dem Vergleichspropeller angelehnt. Die verwendeten Werteverläufe sind zunächst jedoch noch sehr einfacher Natur (lineare, quadratische, kubische oder elliptische Verläufe).

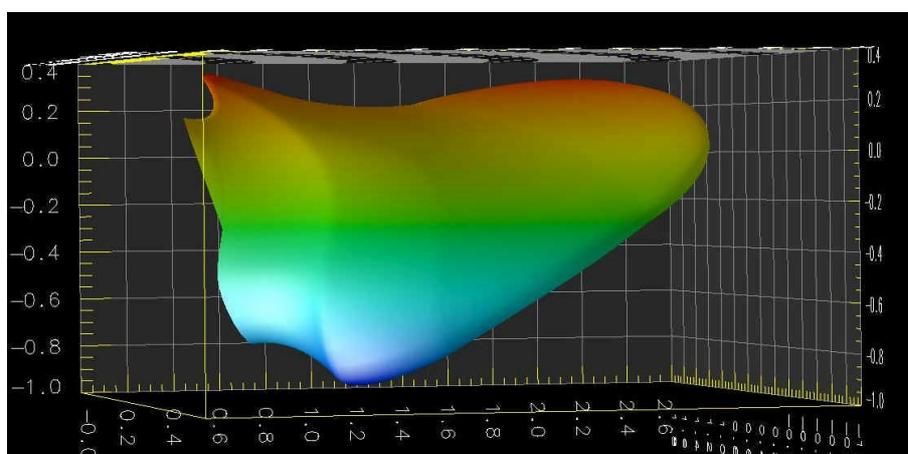


Abbildung 102: Ansicht von der Vorderkante her

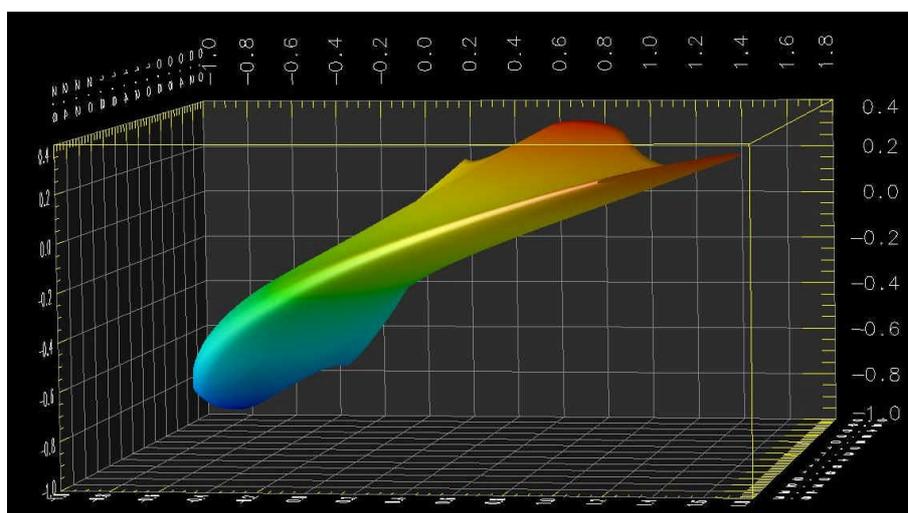


Abbildung 103: Ansicht von der Flügelspitze her

²⁴² Bei einem Grauwert-Druck werden die der Höhe entsprechenden Farben der zugrunde liegenden Farbskale in entsprechende Helligkeiten transformiert.

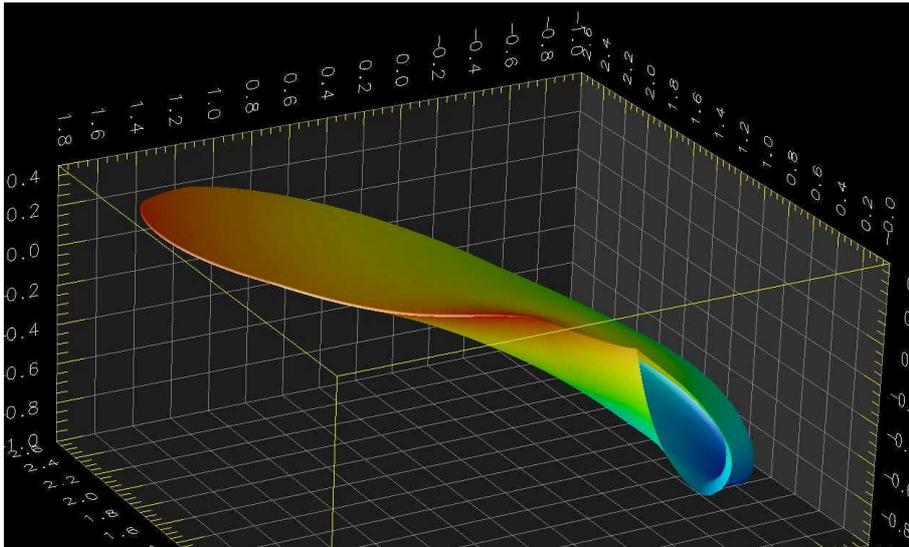


Abbildung 104: Ansicht von der Nabe her

Für die Erzeugung dieses Propellerblattes ist beispielsweise folgendes kleine Programmfragment ausreichend:

```

const Real          radius = 2.75, realIncr = 0.01;
Discretization     discretization( (uint)(1.0/realIncr) );

LinearDistrib<Real>      rDis( 0.495, radius );
CubicMonotonDistrib<Real> skewDist( 0.1, 1.5 );
QuadraticMonotonDistrib<Real> rakeDist( -0.3, 0.3 );

auto_ptr<const GenCartVecDistType>
    chordBasePtr( AbstractBlade::GenerateBaseDistrib(
        rDis, skewDist, rakeDist,
        discretization));

const GenCartVecDistType&
    chordBase(*chordBasePtr);

ChainDistrib<Real>     chordLen;

ChainDistrib<Real>*    nabe = new ChainDistrib<Real>;
nabe->append(new QuadraticMonotonDistrib<Real>(1.0, 1.5) );
nabe->append(new QuadraticMonotonRevDistrib<Real>(1.5, 2.1) );
chordLen.append(nabe);

chordLen.append(new LinearDistrib<Real>(2.1, 1.7) );
chordLen.append(new EllipticMonotonDistrib<Real>(1.7, 0.0) );

LinearDistrib<Real>    pitchDist(5.0*MakeRad);

LinearDistrib<Real>      camberScale(1.0, 0.0);
QuadraticMonotonRevDistrib<Real> maxThicknessDistScale(
    2.5, 1.8);
QuadraticMonotonRevDistrib<Real> thicknessScale(5.0, 1.0);

NacaProfileSys4Scaler*    scaler = new NacaProfileSys4Scaler(
    camberScale,
    maxThicknessDistScale,
    thicknessScale);

```

```

AbstractProfile*   profile = new NacaProfileSys4(
                    "unnamed", discretization,
                    "4112", scaler);

AbstractBlade*     blade = new ProfileBlade("test",
                    discretization,
                    chordBase, chordLen,
                    pitchDist, profile);

TestWing*          wing = new TestWing("Testblade", blade);

Water              waterFluid;
TestProp           testProp("Testpropeller",
                    /* number of blades */ 4,
                    /* rotational-speed (1/s) */ 2.0,
                    /* approach velocity */ 10.0,
                    waterFluid,
                    wing );

// Ausgabe der Profilpunkte:
const AbstractBlade::BladeSurfaceDistType&
    surfaceDist( blade->getSurfacePointDistrib() );

for (t = 0.0; t < 1.0; t += realIncr) {
    const AbstractBlade::BladeCuttingPlaneType
        cuttingPlane( surfaceDist[t] );
    for (s = 0.0; s < 1.0; s += realIncr) {
        p = cuttingPlane[s];
        cout << p << '\t' << p[2] << endl; }

// Die Kontour für OpenDX schließen (nicht unbedingt nötig):
p = cuttingPlane[1.0]; cout << p << '\t' << p[2] << endl;
p = cuttingPlane[0.0]; cout << p << '\t' << p[2] << endl; }

// z. B. Flächenverhältnis errechnen:
cerr << "area ratio = " << testProp.getAreaRatio(radius) << endl;

```

Der Geometriegenerator kann außerdem auch ein eigenes Format schreiben und lesen. Nachfolgende Textdatei illustriert dieses einfache Format an einem Beispiel zur Parametrisierung eines einfachen konventionellen Propellers:

```

skewTable          eqDist  3
    0.326542
    0.869595
    0.533264

rakeTable          varDist 5
    0            0.78961
    0.325        0.251551
    0.65         1
    0.9125       0.0886115
    1            0.545743

chordLenTable      varDist 7
    0            0
    0.0625       0.130364
    0.25         0.250224
    0.5          0.24522
    0.75         0.655907
    0.9375       0.51468

```

1	0.0697306	
camberTable	eqDist	3
0.452894		
0.224007		
0.815138		
maxCamberTable	eqDist	3
0.512407		
0.471523		
0.273671		
thicknTable	varDist	5
0	0.311605	
0.140625	0.0410721	
0.5	0.313659	
0.859375	0.174667	
1	0.415262	
pitchTable	varDist	5
0	0.541711	
0.325	0.961846	
0.65	0.246538	
0.9125	0.0216113	
1	0.639201	

12.4 Allgemeinere Optimierungsumgebung

Die folgende Abbildung 105 illustriert die in Kapitel 8 angedeutete Erweiterung der in dieser Arbeit vorgestellten Optimierungsumgebung (siehe Kapitel 4) zu einer allgemeineren modularen Version, die durch Abstraktion der einzelnen Komponenten auf definierte Schnittstellen zum einen eine Umstellung auf OpenSource-Software erlaubt, und zum anderen leichter auf andere Aufgabenstellungen der Strömungsoptimierung angepasst werden kann.

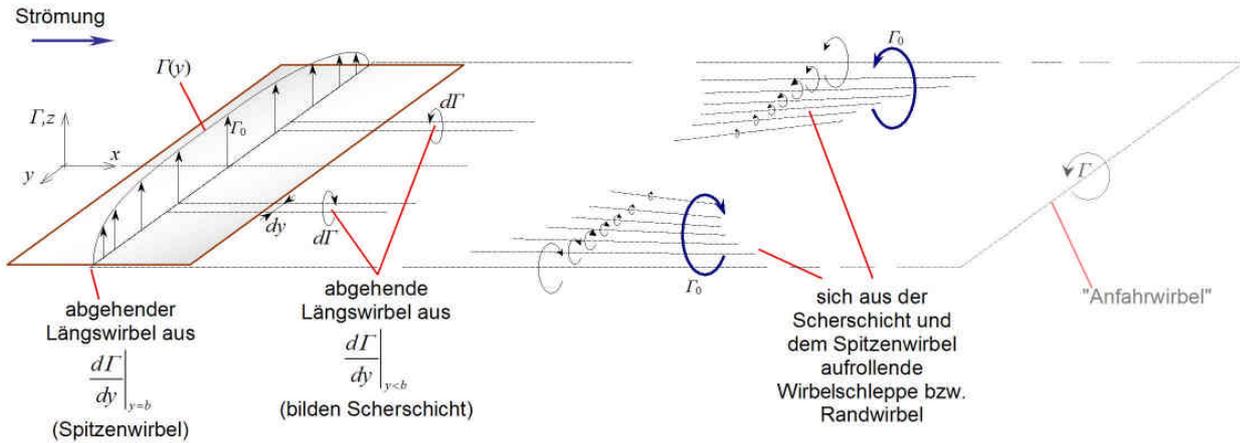


Abbildung 106: Wirbelsystem am Tragflügel

Zum anderen führt der Druckunterschied zu einer Fluidströmung auf dem Tragflügel selbst, welche diese Druckdifferenz auszugleichen trachtet. Der kürzeste mögliche Weg führt dabei in Richtung der Spitze des Tragflügels (auf dem Flügel selbst verhindert dies die *Kutta*-Bedingung). Die Umströmung der Spitze erzeugt einen Wirbel, welcher durch die Strömung fortgetragen und so ständig angefacht wird (Spitzenwirbel).

Da die Zirkulation in der o.g. Wirbelröhre konstant sein muss, umfasst der Spitzenwirbel nur einen Teil der Gesamtzirkulation, der andere Teil wird durch die Scherschicht gebildet, welche durch die Änderung der Zirkulation in Spannweitenrichtung bedingt ist (abgehende differentielle Längswirbel aus $\left. \frac{d\Gamma}{dy} \neq 0 \right|_{y < b}$). Beide

Teile laufen im Abstrom zusammen und rollen sich jeweils zu einem der beiden Randwirbel auf. Insgesamt ergeben alle Längswirbel (einschließlich des Spitzenwirbels) die Zirkulation des tragenden Wirbels bzw. der gesamten Wirbelröhre:

$$\Gamma_0 = \int d\Gamma = \int_b^0 \frac{d\Gamma}{dy} dy'$$

verbunden, der Spitzenwirbel ist hingegen mit einem $\left. \frac{d\Gamma}{dy} \rightarrow 0 \right|_{y=b}$ an der Spitze

vermeidbar. Dann wird der Randwirbel ausschließlich durch die sich aufrollende Scherschicht gebildet²⁴⁴, Verluste durch den Spitzenwirbel würden vermieden.

²⁴⁴ Dies würde konstruktiv eine deutlich größere Spannweite bedeuten und wird daher nur für spezielle Fälle angewendet. Andererseits verringert sich durch steigende Spannweite auch die für den Auftrieb notwendige Zirkulation, große Spannweite ist also das Mittel schlechthin für verlustarme Auftriebserzeugung, ebenso, wie ein großer Propellerdurchmesser für verlustarme Propulsion sorgen kann.

Nähert man sich hingegen einer spannweitigen konstanten Zirkulation an (z. B. Rechteckflügel), so erfolgt die Scherung weniger stark, denn die Zirkulation fällt erst an der Tragflügelspitze stark ab und erzeugt einen intensiven Spitzenwirbel. Dieser bindet "verlorene" kinetische Energie, der eigentliche Nachteil des Spitzenwirbels.

Bei fast immer beschränkter Spannweite ist man bestrebt, möglichst viel Auftrieb innerhalb dieser Beschränkung zu erzeugen. Dem entspricht eine möglichst konstante spannweitige Zirkulation, allerdings mit dem Nachteil des intensiven Spitzenwirbels. Behindert man aber die Umströmung der Flügelspitze (= Druckausgleich), kann der Druck auch an der Flügelspitze höher gehalten werden, der Auftrieb des Tragflügels bei gleicher Zirkulation steigt bzw. die Gesamtzirkulation kann für den nötigen Auftrieb verringert werden. Dies kommt dem Effekt einer größeren Spannweite gleich, welcher ebenso durch die größere einbezogene Masse beschleunigten Mediums die Intensität der Beschleunigung verringern kann.

Die Behinderung der Spitzenumströmung bedeutet quasi eine Aufblähung des Wirbelkerns. Auch die Aufspaltung des Spitzenwirbels in viele kleine Wirbel (Handschwingen) oder die Anbringung einer Endplatte (Winglet²⁴⁵) haben diesen Effekt. Die von einem Wirbel induzierten Geschwindigkeiten sinken mit dem Quadrat der Entfernung vom Kern, die "verlorene" kinetische Energie lässt sich also so vermindern.

12.6 Weitere Anmerkungen

12.6.1 Anfahrwirbel

Der Anfahrwirbel trägt seinen Namen insofern zu unrecht, da er mit dem anschaulichen Anfahren eines Fluggerätes o.ä. direkt nichts zu tun hat. Vielmehr entsteht dieser Wirbel immer dann, wenn sich die Intensität des tragenden Wirbels (z. B. durch Verändern des effektiven Anstellwinkels) und damit der gesamten Wirbelröhre ändert. Anschaulich wird diese Tatsache, wenn man sich ein zum Start rollendes Flugzeug vorstellt, dessen nicht angestellten Flügel (womöglich gar mit symmetrischem Profil) beim Rollen auf dem Boden keinerlei Auftrieb erzeugen. Die Wirbelröhre entsteht also erst mit der Auftriebserzeugung. Folglich zieht also eine Änderung des Auftriebs auch das Entstehen neuer überlagernder

²⁴⁵ eine Endplatte ersetzt die Scherschicht durch eine mechanische Trennwand; Ausrichtung: Flächenvektor horizontal und senkrecht zur Strömung

Wirbelröhren nach sich (auch mit wechselndem Vorzeichen!). Der Anfahrwirbel könnte daher treffender z. B. als "Anstellwirbel" bezeichnet werden.

12.6.2 Unterscheidung zwischen Rand- und Spitzenwirbel

Zwischen Rand- und Spitzenwirbel sollte im Hinblick auf die ursächliche Zirkulationsverteilung genauer unterschieden werden, obwohl sie gleiche Ursachen haben und weitgehend äquivalent sind. Die Intensität des Randwirbels als Längswirbel ist gleich der Wirbelintensität in der gesamten Wirbelröhre, die auch für den Auftrieb am tragenden Wirbel verantwortlich ist. Der Spitzenwirbel hingegen resultiert aus der Änderung der Zirkulation unmittelbar an der Tragflügelspitze.

Am gesamten Tragflügel gehen überall dort differentielle Längswirbel ab, wo sich die spannweite Zirkulation mit $\frac{d\Gamma}{dy} \neq 0 \Big|_{y < b}$ ändert. Diese bilden eine

Scherschicht. Je weiter diese Längswirbel von der Tragflügelspitze entfernt sind, desto später im Abstrom rollen sie sich in den Randwirbel ein. Je dichter diese Längswirbel aber an der Spitze des Tragflügels liegen, desto eher bildet sie durch Aufrollen einen Teil des Spitzenwirbels²⁴⁶. Damit ist der Spitzenwirbel ein Teil der Scherschicht, also auch des Randwirbels, aber er ist im Gegensatz zum Randwirbel

konstruktiv vermeidbar. Mit $\frac{d\Gamma}{dy} \rightarrow 0 \Big|_{y=b}$ erreicht man eine sich etwas später im

Abstrom zum Randwirbel aufrollende Scherschicht, direkt an der Flügelspitze entsteht jedoch kein Wirbel.

12.6.3 Randwirbelinduktion und induzierter Widerstand

Dass der längs verlaufende Randwirbel (bzw. auch der Spitzenwirbel) **nichts** zum Auftrieb beitragen kann, wird schon aus dem Satz von Kutta und Joukowski klar (vgl. Kapitel 3.1.4.2), wonach eine Auftriebskraft nur von einem quer angeströmten Wirbel erzeugt werden kann. Außerdem ist klar, dass die induzierten Abwärtsgeschwindigkeiten im Tragflügelbereich auch außerhalb des Tragflügels gespiegelt mit umgekehrtem Vorzeichen auftreten, ihre Gesamtinduktion in Auftriebsrichtung also Null beträgt.

²⁴⁶ Der Spitzenwirbel ist genau genommen nur der sich "nahe" an der Tragflügelspitze aufrollende Teil der Scherschicht, er ist also nicht scharf begrenzt.

Im Übrigen kann man sich dieser Argumentation folgend auch den induzierten Widerstand anschaulich machen: Der Randwirbel induziert einen zusätzlichen Abwind in die Anströmung des Profils, damit kippt der Auftriebsvektor um den induzierten Anstellwinkel nach hinten, womit in der Vektoraddition die Widerstandskomponente verstärkt wird.

12.6.4 Zirkulationsverteilung

Die Zirkulationsverteilung bei einem geraden Rechteckflügel (mit theoretisch konstanter Zirkulation) ist in der Realität nicht rechteckförmig, sondern fällt am Rand wegen der Druckausgleichsströmung steil ab (vgl. [56]). Mit einer solchen Zirkulationsverteilung wird eine zusätzliche Scherung im Abwind erzeugt, sie ist daher nicht ideal. Man kann den Flügel aber z.B. verwinden, um die optimale elliptische Zirkulationsverteilung zu erreichen (scherfreier Abwind). Folgende Abbildung 107 zeigt den realen Abwind an einem etwas gängigeren trapezförmigen Tragflügel.

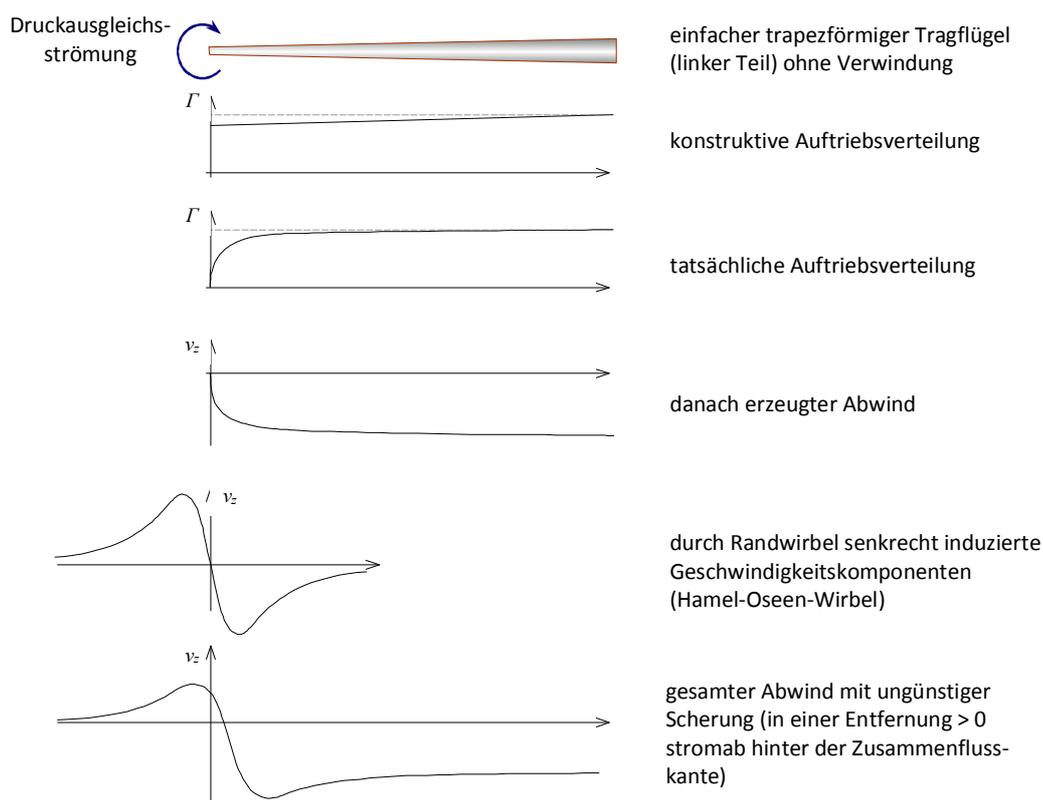


Abbildung 107: Reale Abwindgeschwindigkeiten am Trapezflügel

Die in vorstehender Abbildung unten gezeigte Abwindkonfiguration ändert sich nun mit zunehmender Entfernung von der Tragflügelhinterkante, da die beiden Randwirbel zunehmend aufeinander zu und abwärts laufen (vgl. [39]).

Notizen