Bachelorarbeit

# Abstract

# Verzeichnisse

## Nomenklatur

r – Radiale Koordinate eines Profils – [m]

R – Propellerradius – [m]

r/R – dimensionsloser Radius – [-]

b – Sehnenlänge – [m]

β – Anstellwinkel – [m]

t – maximale Dicke eines Profils – [m]

## Abkürzungsverzeichnis

PCA – Pitch Change Axis

CAD – Computer Aided Design

NURBS – Non Uniform Rational B-Spline

STEP/ STP - Standard for the exchange of product model data

IGES/ IGS - Initial Graphics Exchange Specification

# Einleitung

AT-TWK -> Analyse von Triebwerkskonzepten

InSim -> Strömungsrechnung 2D schnelle Ergebnisse die in Analyse mit einfließen,

Zukünftig 3D um 2D zu validieren und kalibrieren -> Propellermantelfläche benötigt, die als input für 3D Berechnungsverfahren dienen soll

# Geometrischer Aufbau einer Propellerschaufel

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Geometrie einer Propellerschaufel im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wird. Die NASA hat zum Ende der 70er Jahre damit begonnen Studien zu Propellern durchzuführen. Diese beschäftigten sich mit Optimierungen der Propellerblatt Geometrien, um effiziente aerodynamische Eigenschaften zu erreichen, die zu einem reduzierten Treibstoffverbrauch führen sollten. Weiterhin wurden Studien ausgeführt, die untersuchten, wie Lärmemissionen durch die Optimierung der Propellerblatt Geometrie reduziert werden können. Die daraus resultierenden Veröffentlichungen der getätigten wissenschaftlichen Arbeiten liefern eine vollständige Beschreibung von Propellerblatt Geometrien in Form von einer definierten Parametrisierung. Diese Parametrisierung wurde als zielführend betrachtet, um ein Verfahren zur Generierung der Mantelflächen von Propellern zu entwickeln. Diese Parametrisierung soll im weiteren Verlauf dieses Kapitels vorgestellt werden. Weiterhin sollen fundamentale Begriffe, die zur Beschreibung eines Propellerblattes notwendig sind, erläutert werden.

Die geometrische Information eines Propellerblattes liegt häufig in Form von zweidimensionalen axialen Schnitten durch die Propellerschaufel, die sogenannten Profile, vor. Deshalb werden die Profile zunächst betrachtet. Anschließend soll erläutert werden, wie diese Schnitte in radialer Richtung zueinander angeordnet werden. Bei dieser Anordnung spricht man auch vom Fädeln der Profile.

## Profile eines Propellerblattes

Profile sind die aus axialen Schnitten durch die Propellerschaufel resultierenden zweidimensionalen Geometrien, die in radialer Richtung zueinander angeordnet sind. Im Rahmen dieser Arbeit liegen die Profile in radialer Richtung parallel zueinander angeordnet vor (Parallelprofile). Ein Parallelprofil eines Propellerblattes befindet sich in der Ebene deren radiale Koordinate r konstant ist. Häufig wird diese Koordinate auch prozentual zum Gesamtradius des Propellerblattes R angegeben. Man spricht im diesem Fall vom dimensionslosen Radius des Profils r/R. Abbildung X zeigt die Zeichnung einer Propellerschaufel. Zu sehen sind vier Schnitte durch diese Schaufel, sowie die daraus resultierenden Schnittflächen, die Profile.

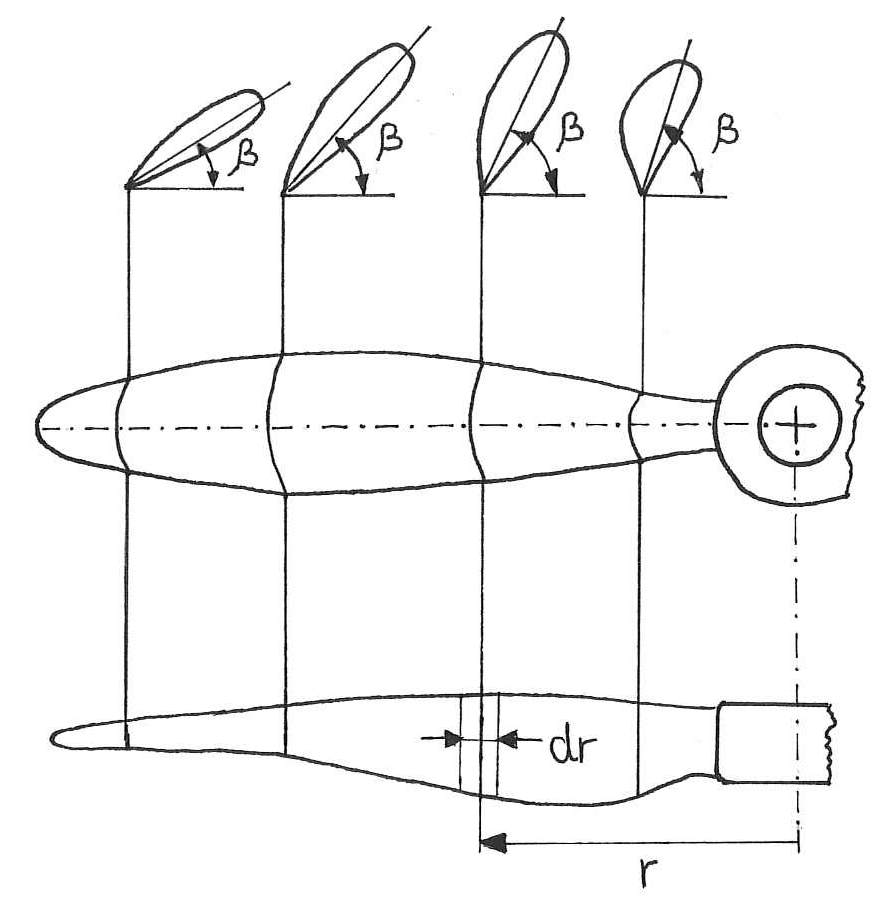


Abbildung X

Profile einer Propellerschaufel

Ein Profil wird in Zeichnungen in der Regel wie folgt angeordnet. Die Vorderkante (leading edge) befindet sich auf der linken Seite der Abbildung und die Hinterkante (trailing edge) entsprechend auf der rechten Seite. Die Saugseite (upper surface) eines Profils befindet sich in der Abbildung oben und die Druckseite (lower surface) unten. Außerdem werden die Vorderkante und die Hinterkante durch eine imaginäre Gerade, die sogenannte Sehne (chord line), miteinander verbunden. Zusätzlich verbindet eine weitere gekrümmte Kurve die Vorder- und Hinterkante eines Profils. Sie wird als Skelettlinie (camber line) bezeichnet. Die Skelettlinie gibt an, wie stark ein Profil gekrümmt ist. Die Druck- und Saugseite eines Profils lassen sich mit Hilfe der sogenannten Dickenverteilung rekonstruieren. Diese gibt an, wie weit Punkte auf der Druck- beziehungsweise Saugseite von der Sehne oder der Skelettlinie entfernt sind. Häufig liegt für die Dickenverteilung eine funktionale Abhängigkeit zwischen der Dicke und dem prozentualen Anteil der Sehnenlänge vor, die als weiteren Parameter die maximale Dicke (max. thickness) eines Profils beinhaltet.

Profile werden an der Vorderkante von einem Fluid angeströmt. Der Anstellwinkel 𝛽 eines Profils ist definiert als Winkel zwischen der Richtung aus der das Fluid strömt und der Sehne des Profils. In Abbildung X-1 sind die Anstellwinkel der einzelnen Profile eingezeichnet. Abbildung X veranschaulicht die Definition des Anstellwinkels und der weiteren erläuterten Begriffe noch einmal.

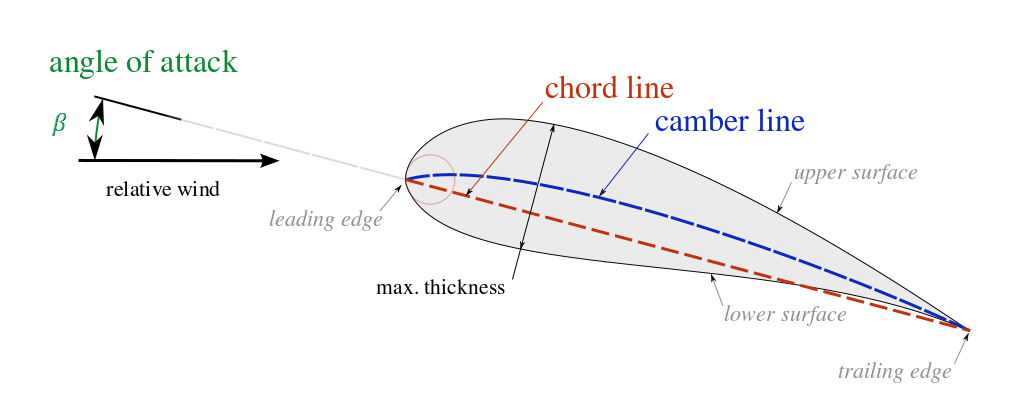


Abbildung X

Darstellung zur Verdeutlichung fundamentaler Begriffe in Bezug auf ein Profil

## Algorithmus zur Erzeugung einer Profilgeometrie

Nachdem im letzten Abschnitt die Profile eines Propellerblattes anhand der Parametrisierung beschrieben wurden, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, soll in diesem Abschnitt erläutert werden, wie durch die Kenntnis dieser Parameter die Geometrie eines Profils erzeugt werden kann. Die Beschreibung der Geometrie eines Profils soll von dem Tool Propster übernommen werden. Innerhalb dieses Tools werden Profile durch eine geordnete Anzahl an Punkten beschrieben. Diese Punkte reihen sich von der Hinterkante eines Profils entlang der Saugseite bis zur Vorderkante des Profils. Anschließend erfolgt die Anreihung der Punkte entlang der Druckseite zurück zur Hinterkante, sodass die Form eines Profils vollständig beschrieben wird.

Im vorigen Abschnitt wurde die Dickenverteilung betrachtet. Soll die Geometrie eines nicht gekrümmten Profils, welches über keine Skelettlinie verfügt, erzeugt werden, so entsprechen die Punkte der Dickenverteilung bereits der Saugseite eines Profils. Die Druckseite kann durch eine Invertierung der y Koordinaten aller Punkte der Dickenverteilung erreicht werden. Abbildung X zeigt die Dickenverteilung eines Profils der Serie NACA65/CA in Abhängigkeit der Sehnenlänge b.

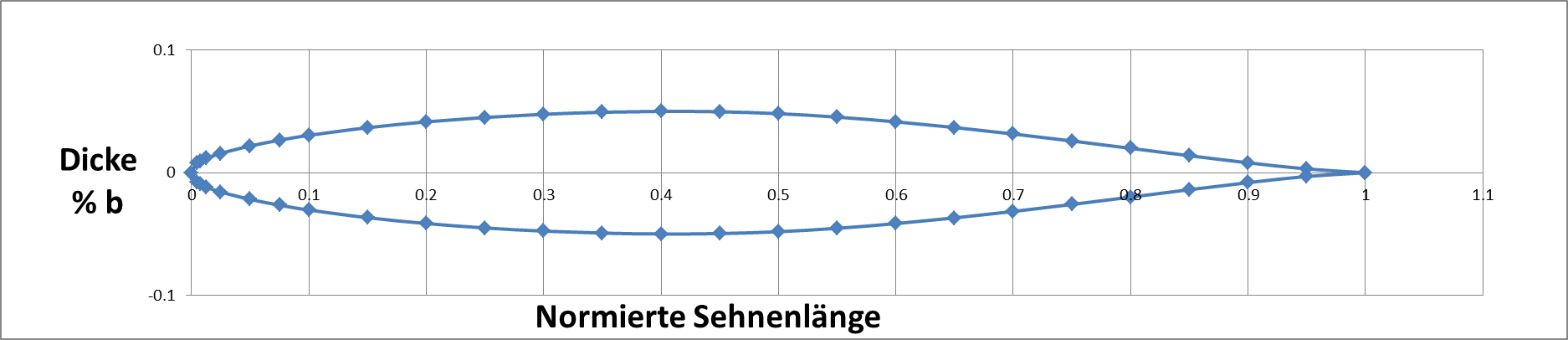
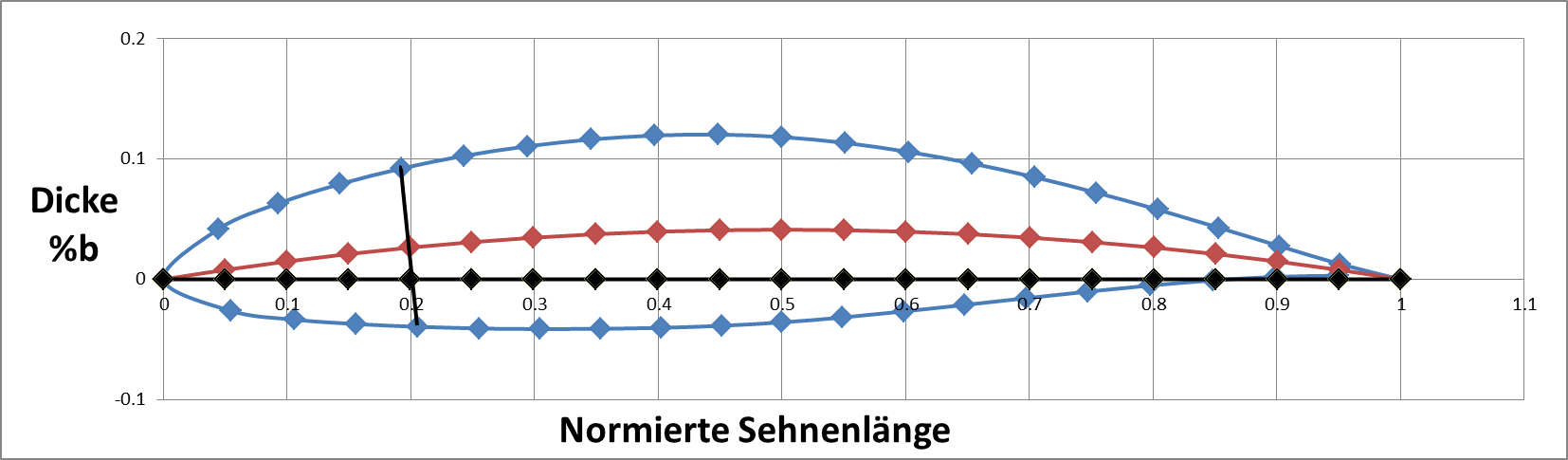


Abbildung X

Beispielhafte Dickenverteilung für die Druck und Saugseite eines nicht gekrümmten Profils der NACA65/CA Serie

Ist es erforderlich die Geometrie eines gekrümmten Profils zu erzeugen, so kann die Skelettlinie und die Dickenverteilung genutzt werden. Ein Punkt, der auf der Druck- oder Saugseite eines gekrümmten Profils liegt, kann ermittelt werden, indem von einem Punkt der Skelettlinie Ps(xs|ys) aus in Richtung des Normalenvektors im Punkt Ps die Strecke mit einer Läge der Dicke zurückgelegt wird. Die Dicke geht aus dem funktionalen Zusammenhang der Dickenverteilung für die Koordinate xs hervor. Je nachdem ob ein Punkt der Druck- oder Saugseite erzeugt werden soll, muss die Strecke in Richtung des Normalenvektors in positiver oder negativer Richtung zurückgelegt werden. Abbildung x veranschaulicht diesen Sachzusammenhang noch einmal und zeig ein gekrümmtes Profil der NAC65/CA Serie, sowie dessen Sehne und Skelettlinie. Ein beispielhafter Punkt Ps befindet sich in der Abbildung an der Koordinate der normierten Sehnenlänge 0.2 und dessen Normalenvektor ist durch eine Linie in beide Richtungen dargestellt.



## Anordnung der Profile im dreidimensionalen Raum

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Flächen der Profile einer Propellerschaufel parallel zueinander in radialer Richtung angeordnet. Die Profile werden in einem ersten Schritt gefädelt. Beim Fädeln wird jedes einzelne Profil im zweidimensionalen Raum verschoben, sodass sich ein eindeutig zu bestimmender Punkt jedes Profils an demselben Punkt im zweidimensionalen Koordinatensystem befindet. Ein solcher Punkt könnte die Vorderkante, die Hinterkante, ein Punkt auf der Sehne oder der Flächenschwerpunkt des jeweiligen Profils sein. Eine Gerade durch diese Punkte liegt parallel zur radialen Achse im dreidimensionalen Koordinatensystem. Sie wird auch als Auffädelstrahl bezeichnet. Abbildung X zeigt die Zeichnung einer Verdichterschaufel, in der auch der Auffädelstrahl eingezeichnet ist.

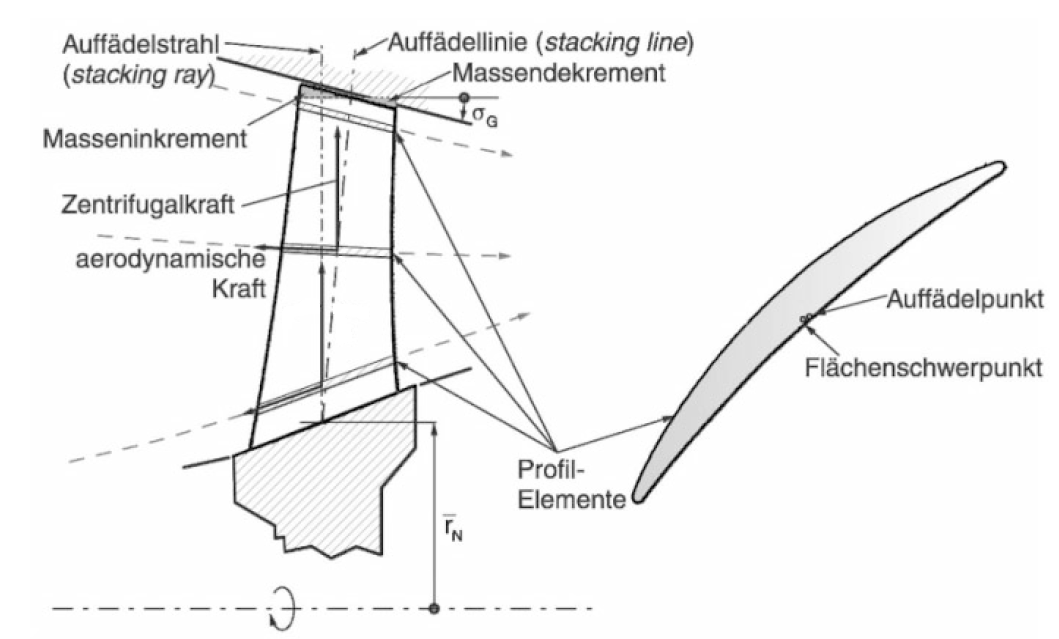


Abbildung X

Zeichnung einer Verdichterschaufel zur Darstellung des Auffädelstrahls und der Auffädellinie

Handelt es sich bei dem Propellerblatt um eines, welches weder eine Pfeilung noch eine Neigung aufweist, so ist die Anordnung der Profile im dreidimensionalen Raum abgeschlossen. Ein Propellerblatt weist eine Pfeilung auf, wenn dessen Vorderkante aus der Perspektive, bei der die Druckseite frontal betrachtet wird, abgerundet ist. Eine Neigung des Propellerblattes liegt vor, wenn die Vorderkante des Propellers aus der Perspektive, bei der die Vorderkante frontal betrachtet wird, eine Rundung aufweist. Die Vorder- und Hinterkante, sowie die Druck- und Saugseite des Propellerblattes befinden sich entsprechend der Ausrichtung aller Profile. Die Pfeilung und Neigung des Propellerblattes wird erreicht, indem die sogenannte Auffädellinie definiert wird. Die Auffädellinie hat den gleichen Ursprung am untersten Profil des Propellerblattes wie der Auffädelstrahl. Allerdings verläuft diese nicht zwingend parallel zur radialen Achse im dreidimensionalen Koordinatensystem, sondern ist bei einer Pfeilung des Propellers rückwärts und bei einer Neigung des Propellers in Umfangsrichtung gebeugt. Abbildung X zeigt eine Zeichnung des Propellers SR-3 aus der Perspektive, bei der die Druckseite des Propellers betrachtet wird. Die Pfeilung des Propellers und die Auffädellinie werden durch diese Abbildung ersichtlich. Abbildung X zeigt ein dreidimensionales Modell des SR-3 Propellers, aus der Perspektive, bei der die Vorderkante betrachtet wird. Aus dieser Perspektive wird die Neigung des Propellers ersichtlich.

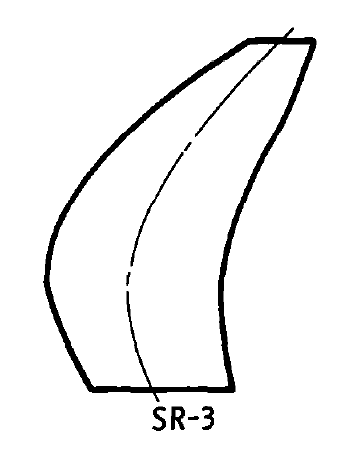


Abbildung X

Zeichnung des SR-3 Propellers und der Auffädellinie

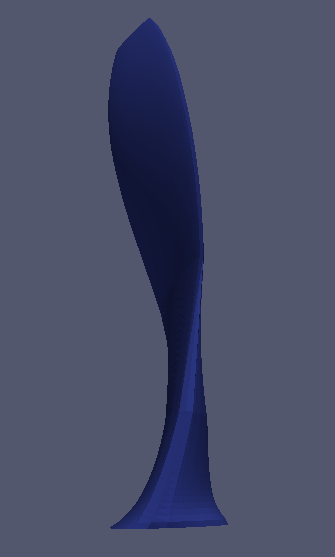


Abbildung X

CAD-Modell des SR-3 Propellers

Beschrieben wird die Pfeilung und Neigung des Propellers über den Pfeilwinkel Λ. Der Winkel wird in der Regel über eine funktionale Abhängigkeit in Bezug auf den dimensionslosen Radius r/R angegeben, sodass für jedes Profil ein Pfeilwinkel angegeben ist. Der Pfeilwinkel ergibt sich aus der Tangente, die die Auffädellinie am entsprechenden dimensionslosen Radius schneidet und aus der Achse zur Veränderung des Anstellwinkels des Propellers (Pitch Change Axis, PCA). Diese Achse dient dazu die Anstellwinkel aller Profile im gleichen Maße während des Fluges zu beeinflussen, um günstige aerodynamische Verhältnisse zu schaffen und beispielsweise für mehr Auftrieb zu sorgen. Abbildung X verdeutlicht die Definition des Pfeilwinkels noch einmal. Die Achse zur Veränderung des Anstellwinkels ist in der Abbildung die x Achse. Die Auffädellinie wird in der Abbildung als sweep line bezeichnet und ist durch eine Linie mit kurzen, voneinander abgesetzten Strichen dargestellt.

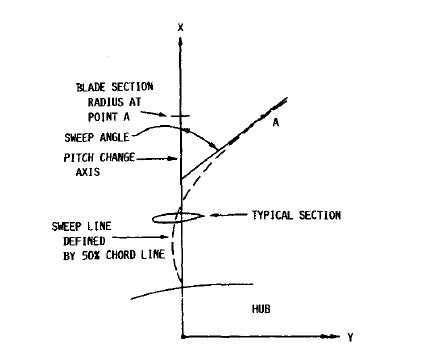


Abbildung X

Schaubild zur Verdeutlichung des Pfeilwinkels

Nachdem die Profile in Abhängigkeit von der Auffädellinie im zweidimensionalen Raum verschoben wurden, ist die Anordnung abgeschlossen. Die Positionen aller Profile beschreiben nun das Blatt des Propellers unter Berücksichtigung der zuvor vorgestellten Parameter.

Die Blätter eines Propellers werden über eine Nabe mit der Welle einer Turbine verbunden, welche für die Rotation sorgt. Der Abstand von der Rotationsachse der Welle in radialer Richtung zur Verbindung des Propellerblattes mit der Nabe (Hub) wird als Hubradius bezeichnet. Die Spitze des Propellerblattes wir auch als Tip beszeichnet.

# IT-Spezifischer Stand der Technik

## CAD-Modellierungssoftware

CAD Modellierungssoftware dient dazu, bei Praktiken des Computer Aided Designs (CAD) zu unterstützen. Unter Computer Aided Design sind alle Verfahren und Techniken zur Entwicklung und Konstruktion technischer Lösungen mit Hilfe eines Rechners zu verstehen. CAD Systeme werden zum Design von zwei- und dreidimensionalen Modellen genutzt. Bei einem Entwurf solcher Modelle werden durch entsprechende Parametrisierungen oder graphische Darstellungen Konstruktionen modelliert oder vorhandene Objekte verändert. Standardisierte Elemente und Datenstrukturen sowie die von CAD Systemen zur Verfügung gestellten Operationen unterstützen in der Regel dabei, komplexere Strukturen mit geringerem Aufwand erstellen zu können.

In dem folgenden Abschnitt sollen zwei Softwarebibliotheken vorgestellt werden. Diese stehen im Rahmen dieser Bachelorarbeit zur Auswahl, um bei der Erzeugung der Propellermantelflächen Einfluss zu nehmen, indem diese Funktionen oder Datenstrukturen zur Modellierung der Propellermantelflächen bereitstellen. Zunächst soll Open Cascade Technology vorgestellt werden.

### Open Cascade Technology

Open Cascade Technology ist ein CAD Software Development Kit von Open Cascade, welches in Softwareprojekte, die in der Programmiersprache C++ geschrieben sind, eingebunden werden kann. Open Cascade Technology steht unter der GNU Lesser General Public License. Zusammengefasst gewährt diese Lizenz jedem Nutzer die Freiheit, den Code der Software einsehen, nutzen und erweitern zu können. Sollte jedoch eine Weitergabe von veränderter Software an Dritte geschehen, so sind den Empfängern die gleichen Freiheiten (Einsehbarkeit, Nutzbarkeit, Erweiterbarkeit) des veränderten Codes) zu gewähren.

Open Cascade Technology stellt Strukturen für grundlegende geometrische Objekte zur Verfügung. Zum Beispiel sind fundamentale Strukturen der CAD Modellierung, wie Punkte, Geraden, Flächen oder Körper nutzbar. Auch komplexere Objekte, wie Bézier- oder NURBS-Kurven und -Flächen, werden bereitgestellt. Zusätzlich stehen für die Modellierung von zusammengesetzten Modellen topologische Strukturen zur Verfügung, die beispielsweise dazu dienen können, um aus mehreren Kurven ein Kantenmodell eines Körpers zu erzeugen. Außerdem liefert die Software geometrische und topologische Algorithmen, wie Bool´sche Operationen oder Approximationen. Für die Generierung von entsprechenden CAD Outputformaten, wie zum Beispiel STEP oder IGES, stehen ebenfalls entsprechende Funktionen bereit.

Im Anschluss an diesen Abschnitt soll nun die zweite zur Auswahl stehende Software vorgestellt werden.

### BladeGenerator

Der BladeGenerator ist ein DLR-internes Softwarewerkzeug zur Erzeugung von Schaufelgeometrien, welches in der Sprache C++ im Institut für Antriebstechnik in der Abteilung Fan und Verdichter entwickelt wurde. Um Schaufelgeometrien zu erzeugen, benötigt das Werkzeug einige Inputparameter, die über entsprechend formatierte Dateien geliefert werden müssen. Der Hauptanwendungsfall des BladeGenerators besteht darin, eine Optimierung von Schaufelgeometrien vorzunehmen, um bestimmte aerodynamische Eigenschaften dieser Schaufeln zu erreichen. Die Parametrisierung der Inputdaten ist deshalb auf die Optimierung ausgelegt. Der BladeGenerator liefert die Funktionalität Profile einer Schaufel zu konstruieren und diese im dreidimensionalen Raum entlang der radialen Achse zu fädeln. Anschließend besteht die Möglichkeit die Mantelfläche des entstandenen dreidimensionalen Modells mit einer B-Spline Tensorproduktfläche zu erzeugen. Die Mantelfläche kann anschließend in das Outputformat STEP oder TEC überführt werden. TEC ist das Datenformat, welches von der Visualisierungssoftware Tecplot verwendet wird.

## Schnittstelle zu den Geometrieinformationen eines Propellers von Propster

Das Tool Propster beinhaltet neben den Verfahren zur Berechnung der zweidimensionalen Strömung entlang einer Propellerschaufel einige Klassen zur Strukturierung der dafür benötigten Daten. Solche Daten, die die Geometrie der Schaufel eines Propellers beschreiben, sollen auch dazu genutzt werden, um die Propellermantelfläche zu generieren, die zukünftig dazu dienen soll eine dreidimensionale Strömungsrechnung des entsprechenden Propellerblattes ausführen zu können. In dem folgenden Kapitel soll die Schnittstelle von Propster betrachtet werden, die es ermöglicht an geometrische Informationen eines Propellers zu gelangen, die für die spätere Modellierung der Mantelfläche eines Propellerblattes notwendig sind. Die Klassenstruktren des Tools Propster, die als Schnittstelle zu den Geometrischen Daten dienen, werden nach dem Ansatz Top Down beschrieben.

Die oberste Hierarchiestufe der Schnittstelle liegt durch die Klasse Propeller vor. Ein Objekt der Klasse Propeller beinhaltet als Membervariablen unter anderem den Namen des Propellers, die Anzahl der Propellerschaufeln und den Durchmesser. Außerdem beinhaltet ein Objekt der Klasse Propeller einen Zeiger auf ein Objekt der Klasse Blade. Die Klasse Blade repräsentiert eine Propellerschaufel. Im Kapitel Geometrischer Aufbau eines Propellerblattes wurde erwähnt, dass das Blatt eines Propellers durch eine Menge an Profilen beschrieben wird. Diese Art der Beschreibung ist auch in der Klasse Blade berücksichtigt. Sie besitzt als Membervariable einen Vektor, der eine Anzahl an Zeigern auf Objekte der Klasse Station beinhaltet. Die Klasse Station repräsentiert eine Querschnittsfläche durch das Propellerblatt. Sie liefert durch Membervariablen wichtige geometrische Informationen, wie den dimensionslosen Radius, die Sehnenlänge und den Anstellwinkel eines durch den Schnitt resultierenden Profils. Das Profil wird durch die Klasse Airfoil beschrieben. Die Klasse Station besitzt einen Zeiger als Membervariable, der auf ein Objekt der Klasse Airfoil verweist. Die Klasse Airfoil beinhaltet sowohl geometrische als auch aerodynamische Informationen des entsprechenden Profils. Die geometrischen Informationen sind in der Klasse AirfoilGeometry hinterlegt, auf die ein Zeiger verweist, der als Membervariable in der Klasse Airfoil hinterlegt ist. Die Geometrie des Profils liegt als Vektor mit einer geordneten Anzahl von Punkten vor. Abbildung X zeigt das Klassendiagramm, welches die in diesem Kapitel vorgestellte Klassenstruktur noch einmal darstellt.

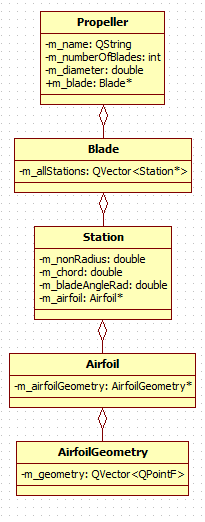


Abbildung X

Klassenstruktur der Schnittstelle zur geometrischen Information eines Propellers in Propster

## Propster Experimentfiles

Im vorigen Abschnitt wurden die Datenstrukturen in Propster vorgestellt, die die geometrischen Informationen eines Propellers beinhalten. Im folgenden Abschnitt soll nun erläutert werden, wie diese Datenstrukturen mit Informationen gefüllt werden können.

Um die geometrischen Daten eines Propellers in die dafür vorgesehenen Datenstrukturen zu integrieren, dienen die sogenannten Experiment Files. In einem Experiment File werden im XML-Datenformat die nötigen Informationen bereitgestellt. Wird ein solches Experiment File an Propster übergeben, so wird eine Output Datei zurückgeliefert. Diese wiederum kann jederzeit in Propster eingelesen werden, um die Datenstrukturen mit den geometrischen Informationen zu füllen. Die vorgesehene Strukturierung eines Experimentfiles wird nun vorgestellt. Zuvor soll das XML-Datenformat noch einmal kurz betrachtet werden, um Grundbegriffe, die in diesem Abschnitt erwähnt werden zu definieren. Innerhalb eines Experiment XML-Files werden drei Strukturen genutzt, um die geometrischen Informationen strukturiert darzustellen. Dazu gehören Elemente, Attribute und Werte. Ein Element kann weitere Elemente, Attribute und einen Wert beinhalten. Attribute haben lediglich einen Wert. Werte können beispielsweise Zahlen oder Zeichenketten sein. Abbildung X soll den Zusammenhang zwischen Elementen, Attributen und Werten verdeutlich. In dieser Abbildung ist das Element Element1 dargestellt, welches zwei Attribute (attribut1 und attribut2) besitzt. Element1 beinhaltet keinen Wert, aber zwei weitere Elemente (Element2 und Element3). Element2 besitzt das Attribut attribut 3 und einen Wert. Element3 besitzt das Attribut attribut4 und einen Wert. Auch jedes der vier Attribute hat jeweils einen Wert zugeordnet bekommen.

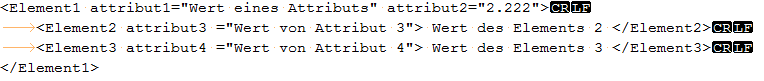


Abbildung X

Elemente, Attribute und Werte im XML-Datenformat

Zunächst müssen in einem Experiment File zwei Pfade als Werte von zwei Elementen angegeben werden. Zum einen muss der Pfad, an dem die Output Datei erzeugt wird, übergeben werden und zum anderen muss ein Pfad für Input Dateien gesetzt werden. Welche Dateien als Input für das Experiment File dienen und sich in dem Inputverzeichnis befinden sollten, wird im weiteren Verlauf dieses Abschnitts erwähnt. Innerhalb des Elements CreateObjects in dem Experiment XML-File finden sich Elemente der Klassenstrukturen aus Propster wieder, welche die geometrischen Informationen beinhalten. Die Elemente innerhalb der Experiment Files beschreiben gleiches, wie die gleichnamigen Klassen in Propster. So können innerhalb des XML-Elements CreateObjects weitere Elemente Airfoil, Station, Blade und Propeller definiert werden. Diese werden innerhalb des Files nach dem Verfahren Bottom Up definiert.

Zunächst werden Airfoil Elemente definiert, die ihren Namen als Attribut besitzen. Außerdem beinhalten diese ein Element, Geometry File, welches als Wert den Pfad zu einem solchen File besitzt. Dieses beschreibt die Geometrie eines Profils, indem es die Koordinaten aller Punkte, welche die Druck- und Saugseite eines Profils beschreiben, beinhaltet. Die Geometry Files aller Airfoil Elemente sollten sich innerhalb des Input Verzeichnisses befinden, welches zuvor im Experiment File angegeben wurde.

Ein Blade Element besitzt neben seinem Namen den dimensionslosen Hubradius als Attribut. Innerhalb eines Blade Elements werden weitere Station Elemente definiert. Diese besitzen als Attribute den dimensionslosen Radius des Profils, welches sie beschreiben, und den Namen des Airfoils, welches die Geometrie dieses Profils beschreibt. Dieses Airfoil sollte zuvor in dem Experiment File als Element definiert worden sein. Zusammengefasst sollte sich innerhalb der Definition eines Blade Elements eine feste Anzahl an Station Elementen befinden, die gleich der Anzahl an zuvor definierten Airfoil Elementen ist, sodass jedes Airfoil Element genau einem Station Element als Attribut zugeordnet werden kann.

Ein Propeller Element besitzt als Attribut den Namen des Propellers und die Anzahl an Profilen, die pro Propellerschaufel innerhalb der Datenstruktur generiert werden soll. Diese Anzahl muss nicht der Anzahl der im Experiment File definierten Station beziehungsweise Airfoil Elemente entsprechen. Dies liegt daran, dass bei der Erzeugung der Output Datei zwischen den im Experiment File definierten Geometrien der Profile interpoliert wird, um die als Attribut des Propeller Elements angegebene Anzahl an Profilen zu erreichen. Die durch die Interpolation erzeugten Profile liegen in gleichmäßigen radialen Abständen vor. Zusätzlich besitzt ein Propeller Element einige weitere Elemente. Definiert werden muss ein Element für den Durchmesser, welches als Attribute die SI-Einheit und den Datentypen sowie den Wert des Durchmessers beinhaltet. Ein Element für die Anzahl der Schaufeln muss definiert werden, welches als Attribut den Datentypen und als Wert die Anzahl der Schaufeln besitzt, sowie eines für die Schaufel selbst. In diesem Element wird als Wert der Name des Schaufel Elements angegeben, welches zuvor im Experiment File definiert worden ist. Außerdem muss ein Element für die Nabe erzeugt werden, sowie eines für die dreidimensionale Geometrie. Da die Nabe im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet wird, sollen die Attribute auch nicht betrachtet werden. Das Geometrie Element besitzt als Wert den Namen des Geometry Files, welches weitere Parameter des Propellers entlang der radialen Achse liefert. Dieses sollte sich ebenfalls im Verzeichnis des zuvor gesetzten Input Pfades befinden. Das Geometry File ist tabellarisch und im CSV-Datenformat aufgebaut. Es besitzt jeweils eine Spalte, in der die Sehnenlänge, der Anstellwinkel, und der Pfeilwinkel einer Propellerschaufel angegeben werden. Diese drei Parameter sind über den dimensionslosen Radius aufgetragen. Auch zwischen den im Geometry File angegebenen Werten wird bei der Erzeugung der Profile interpoliert, um die drei Parameter für den entsprechenden dimensionslosen Radius des jeweiligen Profils zu ermitteln.

Nachdem mit den Elementen Airfoil, Station, Blade und Propeller alle geometrischen Informationen hinterlegt worden sind, muss in einem letzten Schritt im Experiment File innerhalb des Elements Export der Name der Output Datei festgelegt werden. Dazu wird innerhalb des Elements Export ein Element mit dem Namen XML angelegt. Dieses wiederum beinhaltet ein PropellerFile Element, welches als Attribute den Namen des zuvor definierten Propeller Elements beinhaltet, sowie den Namen der Output Datei, welche im XML-Format erzeugt wird.

Für die aerodynamische zweidimensionale Berechnung von Strömungen sind innerhalb eines Experiment Files weitere Elemente oder Attribute vorgesehen. Diese können auch innerhalb der in diesem Abschnitt beschriebenen Strukturen vorkommen. Da diese jedoch nicht von weiterer Bedeutung für diese Arbeit sind, wurde auf eine genauere Betrachtung verzichtet. Im Anhang dieser Arbeit befindet sich ein beispielhaftes Experiment File.

## Modultests mit Google Test

In diesem Abschnitt soll das Testing Framework Google Test vorgestellt werden, welches im Rahmen dieser Bachelorarbeit dazu genutzt wurde, um Unit Tests zu implementieren.

Google Test ist ein plattformunabhängiges C++ Testing Framework zur Integration von Modultests, welches in der Abteilung Triebwerk des DLR genutzt wird. Modultests dienen dazu abgrenzbare Komponenten einer Software, wie zum Beispiel eine Klasse und deren Funktionen, zu testen. Das Testziel lautet, diese Komponenten auf deren funktionelle Korrektheit zu prüfen, um mögliche Fehler innerhalb der getesteten Funktionen frühzeitig innerhalb des Softwareentwicklungsprozesses auszumachen und zu beheben. Deshalb werden Modultests in der Regel bereits während der Implementierungsphase erstellt.

Ein Test von Google Test nutzt sogenannte Assertions, um zu beurteilen, ob bestimmte Bedingungen von den getesteten Komponenten erfüllt werden. Als Resultat einer Assertion sind drei mögliche Varianten zu nennen.

1. Erfolg (success)
2. Misserfolg (non-fatal failure)
3. Fataler Misserfolg (fatal failure)

Sind als Resultate aller Assertions innerhalb eines Tests lediglich Erfolge auszumachen, so ist auch der gesamte Test als erfolgreich festzuhalten. Sobald jedoch in Folge einer Assertion ein Misserfolg resultiert, schlägt der gesamte Test fehl. Dies gilt sowohl für Misserfolge, als auch für fatale Misserfolge. Der Unterschied zwischen einem Misserfolg und einem fatalen Misserfolg besteht darin, dass ein fataler Misserfolg dazu führt, dass der Test umgehend abgebrochen wird, während ein Misserfolg einen möglichen weiteren Verlauf eines Tests nicht beeinflusst. Assertions, welche mit Expect beginnen, führen zu einem Erfolg oder einem Misserfolg. Assertions, welche mit Assert beginnen, führen zu einem Erfolg oder einem fatalen Misserfolg. Es ist somit möglich innerhalb eines Tests mittels der Wahl vom entsprechenden Asserts Abhängigkeiten, beziehungsweise Unabhängigkeiten zu schaffen. Assertions vergleichen in der Regel zwei Werte des gleichen Datentyps miteinander. Dabei ergibt sich ein Wert aus der zu testenden Komponente der Software. Es könnte sich hierbei beispielsweise um einen Rückgabewert einer Funktion handeln. Dieser Wert wird abgeglichen mit einem Wert, den man im Rahmen dieses Anwendungsfalles als korrekten Rückgabewert erwarten würde. Diverse Assertions bieten die Möglichkeit solche Vergleiche beliebig zu gestalten. So können verschiedene Datentypen auf Gleichheit oder Ungleichheit geprüft werden. Vergleiche von Integer- und Gleitkommazahlen sind außerdem durch die üblichen Operatoren (<, >, <=, >=) möglich. Auf eine Darstellung weiterer Assertions wird an dieser Stelle verzichtet.

Zur Strukturierung der einzelnen Tests bietet Google Test die Möglichkeit Test Cases zu definieren. Test Cases können mehrere Tests beinhalten. Die Test Cases sollten die Struktur des zu testenden Codes wiederspiegeln. So könnten beispielsweise mehrere Tests dieselbe Funktion abdecken. Diese könnten allesamt innerhalb eines Test Cases angeordnet werden, sodass eine Übersicht gewährleistet ist und Code, welcher noch nicht von Modultests abgedeckt ist, leichter erkannt werden kann. Test Cases können zu einem Testprogramm zugeordnet werden.

Eine Unabhängigkeit einzelner Tests wird dadurch gewährleistet, dass ein fehlgeschlagener Test auf weitere Tests innerhalb und außerhalb eines Test Cases keine Auswirkungen hat. Ein fehlgeschlagener Test kann zusätzlich in Isolation wiederholt werden und das Debugging erleichtern.

Häufig nutzen einige Tests gleiche Daten, welche zunächst erzeugt werden müssen, bevor diese in entsprechenden Tests berücksichtigt werden können. Damit die Generierung der Daten nicht innerhalb jedes Tests erneut in Form von Code auftritt, können Test Fixture Klassen definiert werden. Diese beinhalten neben den Tests eine Setup Funktion, in der die Generierung der Daten einmalig beschrieben werden kann. Vor dem Durchlaufen jedes Tests innerhalb der Test Fixture Klasse wird die Setup Funktion durchlaufen. Im Anschluss wird zusätzlich eine Funktion (TearDown) zum Bereinigen des Speichers ausgeführt.

Mit Abschluss dieses Abschnittes kann festgehalten werden, dass Google Test mit den vorgestellten Funktionalitäten, die Möglichkeit bietet Modultests zu schreiben, die die implementierten Funktionen, welche im Rahmen dieser Bachelorarbeit entstehen, auf deren korrekte Funktionalität zu prüfen.

# Auswahl eines Verfahrens zur Mantelgenerierung von Propellerschaufeln

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden die zuvor vorgestellten Softwares Open Cascade Technology und BladeGenerator auf ihre Eignung überprüft, die Mantelflächen der Propellerschaufeln in Form von B-Spline- beziehungsweise NURBS-Flächen zu generieren. Die Prüfung sollte durch jeweils einen Prototypen für beide Verfahren realisiert werden, die aufzeigen, welche Arbeitsschritte bei der Implementierung des entsprechenden Verfahrens zu tätigen sind und welche Vor- und Nachteile die Nutzung des jeweiligen Verfahrens hat. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels sollen die Prototypen der beiden Verfahren vorgestellt werden, indem die zu tätigenden Iterationsschritte für die Mantelflächengenerierung erwähnt werden. Anschließend werden beide Verfahren miteinander verglichen und eines der beiden Verfahren unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile für die Implementierung der Propellermantelflächengenerierung ausgewählt. Zunächst soll der Prototyp für die Mantelgenerierung mit Hilfe des Software Development Kits Open Cascade Technology vorgestellt werden.

## Prototyp zur Propellermantelflächengenerierung mit Open Cascade Technology

Bevor mit Hilfe der Bibliothek von Open Cascade Technology die Propellermantelfläche erzeugt werden kann, müssen die dafür notwendigen Daten bereitgestellt werden. Dazu dient die zuvor vorgestellte Schnittstelle zu den Geometrischen Daten eines Propellers von Propster. Ein Objekt der Klasse Propeller liefert alle geometrischen Daten, die für die vollständige Beschreibung der Mantelfläche eines Propellerblattes erforderlich sind. Neben einigen Parametern liefert das Objekt die geometrische Beschreibung von einer festen Anzahl an Profilen eines Propellerblattes in Form von geordneten Punktelisten, die die Druck- und Saugseite eines Profils definieren. Die Profile liegen jedoch normiert im zweidimensionalen Raum vor. Damit die Mantelfläche des Propellerblattes originalgetreu erzeugt werden kann, müssen die Daten durch Transformationen aufbereitet werden. Die Normierung der Profile zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass diese allesamt eine Sehnenlänge von einem Meter aufweisen. Die Profile müssen in einem ersten Schritt der Aufbereitung somit auf ihre tatsächliche Sehnenlänge skaliert werden. Weiterhin zeichnet sich die Normierung der Profile dadurch aus, dass der Anstellwinkel der Profile nicht berücksichtigt wurde. Daraus ergibt sich, dass eine Rotation um den definierten Anstellwinkel des jeweiligen Profils erfolgen muss. Zusätzlich müssen die Punkte zur geometrischen Beschreibung der Profile vom zweidimensionalen in den dreidimensionalen Raum transformiert werden. In einem weiteren Schritt müssen die Profile im dreidimensionalen Raum gefädelt werden. Diese Iterationsschritte zur Aufbereitung der geometrischen Daten sind für die Mantelflächengenerierung eines Propellerblattes zu implementieren. Anschließend können die aufbereiteten Daten in Datenstrukturen von Open Cascade Technology überführt werden, bevor Funktionen der Bibliothek genutzt werden können, um eine Mantelfläche zu generieren. Die Mantelfläche wird in einem letzten Schritt in die CAD-Datenformate STEP und IGES exportiert, sodass eine Visualisierung mit entsprechenden CAD-Programmen erfolgen kann.

Die Implementierung der beschriebenen Iterationsschritte zeigte auf, dass sich Open Cascade Technology für die Generierung der Mantelfläche von Propellerblättern eignet. Auf die Implementierung des Prototypen soll nicht weiter eingegangen werden, da das Verfahren für die Mantelgenerierung, welches im weiteren Verlauf dieses Kapitels für die Bewältigung der Aufgabenstellung dieser Arbeit ausgewählt wird, zu einem späteren Zeitpunkt beschrieben wird. Im folgenden Abschnitt soll der Prototyp zur Propellermantelflächengenerierung mit Blade Generator vorgestellt werden.

## Prototyp zur Propellermantelflächengenerierung mit Blade Generator

Die Software Bladegenerator ist darauf ausgelegt Schaufelgeometrien und deren Profile zu optimieren. Außerdem ist die Software in der Lage die optimierten Geometrien im Dreidimensionalen als Mantelflächen darstellen zu können. Die Parametrisierung, welche die Informationen für die Generierung einer Mantelfläche bereitstellt, ist an den Optimierungsprozess angepasst. Dadurch wird ermöglicht, dass durch die Veränderung weniger Parameter eine beachtliche Veränderung der Profilgeometrie erfolgen kann.

Die Parametrisierung eines Profils in Blade Generator erfolgt über vier B-Spline Kurven dritten Grades. Die Kurven beschreiben die Druck- und Saugseite, sowie die Vorder- und Hinterkante des Profils. Der Verlauf von B-Spline Kurven ergibt sich neben dem Grad unter anderem auch aus der Position der Kontrollpunkte einer Kurve. Eine detailliertere Beschreibung von B-Splines ist im zweiten Kapitel des Buches The NURBS Book zu finden. Die Kontrollpunkte der Kurven der Druck und Saugseite, sowie die Steigungen am Start- und Endpunkt der Druck- und Saugseite sind als Parameter von jedem Profil an die Software zu übergeben, um diese zu definieren. Zur Definition der Kurven der Vorder- und Hinterkante eines Profils sind weitere Parameter zu übergeben. Bei diesen Parametern handelt es sich um Abstände zwischen bestimmten Punkten. Auf eine detaillierte Beschreibung der Parameter soll an dieser Stelle verzichtet werden. Die Parametrisierung wird bei der Auswahl eines der beiden Verfahren im folgenden Abschnitt noch einmal angesprochen.

Um die Parameter zur Definition der einzelnen Profile bereitstellen zu können, müssen die normierten Profilgeometrien, welche über die Schnittstelle von Propster in einem Propeller Objekt übergeben werden, zunächst analog zum ersten Iterationsschritt des Prototyps von Open Cascade Technology auf deren Sehnenlänge skaliert werden. Anschließend muss festgelegt werden, an welcher Stelle des Profils die Vorder- und Hinterkante, sowie die Druck- und Saugseite beginnt und endet, damit eine B-Spline Approximation der Druck- und Saugseite, sowie der Vorder- und Hinterkante erfolgen kann. Die zu übergebenden Parameter stehen in Folge der Approximation bereit oder müssen durch Berechnungsverfahren, die im Rahmen dieser Arbeit zu implementieren wären, ermittelt werden. Die Approximation der B-Splines wird durch eine bereits vorhandene, DLR-interne Bibliothek ausgeführt. Programmintern in der Software Blade Generator werden die vier B-Spline Kurven krümmungsstetig ineinander überführt. Als Zwischenergebnis liegt dann eine stetige Kurve vor, die das entsprechende Profil beschreibt.

Als weitere Parameter müssen dem Blade Generator die Anstellwinkel der Profile übergeben werden, damit diese bei der Generierung der Mantelfläche des Propellerblattes berücksichtigt werden. Außerdem muss der Software die Information übergeben werden, wie die zweidimensionalen Profile entlang der radialen Achse im dreidimensionalen Raum gefädelt werden sollen. Diese Iterationsschritte werden von Blade Generator automatisiert ausgeführt, sodass keine Implementierung von Funktionen, die diese Aufgaben übernehmen würden, erforderlich ist. Nachdem die Profile im dreidimensionalen Raum angeordnet wurden, kann aus dieser Anordnung programmintern eine Mantelfläche (Tensorproduktfläche) generiert werden. Zur Visualisierung der Mantelfläche stehen die Ausgabeformate STP und TEC zur Verfügung, welche von Blade Generator generiert werden können.

Nachdem von beiden Verfahren zur Generierung von Mantelflächen einer Propellerschaufel die Prototypen vorgestellt wurden, sollen die in der Implementierungsphase der Prototypen gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden, um die beiden Verfahren zu vergleichen sowie Vor- und Nachteile der Verfahren gegenüberzustellen. Eines der Verfahren wird anschließend ausgewählt, um in der im Rahmen dieser Arbeit zu implementierenden Bibliothek dazu zu dienen, die Mantelflächen von Propellerblattgeometrien zu erzeugen.

## Wahl eines der beiden Verfahren

Bei der Auswahl des Verfahrens zur Mantelflächengenerierung wurden mehrere Faktoren berücksichtigt. Diese sollen nun betrachtet werden.

Ein wesentlicher Faktor bei der Auswahl des Verfahrens sind die Parameter, die als Input an die Bibliothek zu liefern sind und von dieser zur Generierung der Mantelfläche eines Propellerblattes genutzt werden. Diese Inputparameter sind aus der im Kapitel Geometrischer Aufbau einer Propellerschaufel vorgestellten Parametrisierung, die im Rahmen dieser Arbeit genutzt wird und durch die Schnittstelle von Propster bereitgestellt wird, zu übernehmen oder mit Hilfe dieser zu errechnen. Bei der Implementierung des Prototypen zur Propellermantelflächengenerierung mit Open Cascade Technology konnten alle notwendigen Parameter, die für die Aufbereitung der geometrischen Information benötigt werden, um aus dieser die Mantelfläche zu generieren aus der Schnittstelle zu Propster direkt entnommen werden oder mit Hilfe der gelieferten Daten errechnet werden. Bei der Aufbereitung der Daten, die zur Erzeugung der Mantelfläche mit Open Cascade Technology genutzt werden, ist es erforderlich die normierten, von Propster gelieferten geometrischen Informationen eines Propellerblattes in die Originalgröße und Form zu transformieren. Die für die Transformation genutzten Parameter sind beispielsweise die Sehnenlänge, der Anstell- und Pfeilungswinkel und der dimensionslose Radius jedes Profils, sowie der Radius des gesamten Propellerblattes. Die Parameter, welche an Blade Generator übergeben werden und die geometrische Information des Propellerblattmantels beinhalten, sind im Vergleich zu dem Verfahren mit Open Cascade Technology mit größerem Aufwand zu ermitteln. Unter anderem muss eine Approximation der Profilgeometrien erfolgen. Durch die Approximation sind geringfügige Abweichungen von den Originalgeometrien nicht zu vermeiden. Auch die spätere Überführung der vier B-Spline Kurven in eine Kurve birgt ein Potential zu weiteren Abweichungen. Zu erwähnen ist an dieser Stelle noch einmal, dass Blade Generator das Ziel verfolgt Profilgeometrien zu optimieren. Im Rahmen dieser Arbeit sollen jedoch bereits vorhandene Geometrien von Propellerschaufeln exakt nachmodelliert werden. Eine Optimierung soll nicht stattfinden. In dem Anwendungsfall der Optimierung werden Profilgeometrien verändert, sodass eine exakte Darstellung der ursprünglichen Geometrien nicht als primäres Ziel in Blade Generator verfolgt wird und die Software somit nicht direkt für den Anwendungsfall dieser Bachelorarbeit konzipiert ist. Gleichzeitig soll aber auch betont werden, dass die Generierung der Mantelflächen von Propellerblättern trotzdem möglich ist. Blade Generator benötigt zur Erstellung der Kurven, welche die Vorder- und Hinterkante der Profile definieren weitere Parameter. Die exakte Ermittlung dieser Parameter aus den vorhandenen geometrischen Informationen stellte sich als schwierig heraus. Ohne eine exakte Ermittlung dieser Parameter ist es jedoch nicht möglich die Geometrie des Propellers in eine originalgetreue Mantelfläche zu überführen. Eine Mantelfläche, die nicht dem Original entspricht, obwohl dieses durch die von Propster gelieferte Parametrisierung vollständig definiert wird, wäre das Ergebnis. Open Cascade Technology weist in Bezug auf die Bereitstellung der Parameter somit weniger Potential für Fehler und Abweichungen auf.

Als weiterer Faktor, der auf die Auswahl der Bibliothek zur Mantelflächengenerierung Einfluss genommen hat, ist der Implementierungsaufwand zu nennen. Nachdem die Inputparameter an die Software Blade Generator geliefert wurden, sind dieser nur wenige weitere Informationen zu übermitteln, damit die Mantelfläche generiert werden kann. Dazu gehören beispielsweise die Anstell- und Pfeilungswinkel der Profile und die Weise, wie die zweidimensionalen Profile entlang der radialen Achse im dreidimensionalen Raum gefädelt werden sollen. Die Anordnung der Profile geschieht anschließend automatisiert entsprechend der Parameterübergabe. Zusätzlich wird auch die Mantelfläche der Propellerschaufel erzeugt, deren Geometrie in Form von Dateien in den CAD-Formaten STEP und TEC beschrieben wird. Die Dateien werden automatisiert generiert. Der Implementierungsaufwand bei der Nutzung von Blade Generator ist somit gering, da die Funktionalität zur automatisierten Mantelflächengenerierung bereits gegeben ist. Im Vergleich dazu ist die Nutzung der Bibliothek Open Cascade Technology mit mehr Implementierungsaufwand verbunden. Die Bibliothek ist zwar darauf ausgelegt CAD betreiben zu können, jedoch liefert diese nicht wie der Blade Generator die Funktionalität automatisiert eine Schaufelgeometrie zu erzeugen. Somit ist bereits die Aufbereitung der normierten Geometrieinformationen, die von der Schnittstelle von Propster bereitgestellt werden, mit mehr Aufwand verbunden. Im Vergleich zur Nutzung von Blade Generator müssen die normierten Profilgeometrien nicht nur auf die Sehnenlänge skaliert werden, sondern auch um den Anstellwinkel rotiert werden. Auch die Funktionalität zum Fädeln der Profile entlang der radialen Achse müsste implementiert werden. In dem Kapitel Geometrischer Aufbau einer Propellerschaufel wurden einige Möglichkeiten aufgezeigt, wie Profile einer Propellerschaufel gefädelt werden können. Um die Mantelgenerierung verschiedenster Propellerblattgeometrien zu ermöglichen, müsste die Routine, die die Funktionalität des Fädelns der Profile bereitstellt, flexibel auf die verschiedenen Varianten des Fädelns anpassbar implementiert werden und eine Erweiterbarkeit um weitere Varianten des Fädelns ermöglichen. Nachdem die Profile rotiert, skaliert und gefädelt wurden, können die aufbereiteten geometrischen Informationen an Datenstrukturen von Open Cascade übergeben werden. Die geometrischen Informationen, die als geordnete Punktelisten vorliegen und jeweils ein Profil beschreiben, werden anschließend in eine Mantelfläche übertragen. Die Funktionalität zur Adaption der Daten in ein kompatibles Format von Open Cascade Technology und die anschließende Erzeugung einer Mantelfläche muss bei einer Auswahl des Verfahrens implementiert werden. Auch die Generierung von CAD-Output Dateien, welche es ermöglichen, den erstellten Propellerblattmantel zu visualisieren, müsste implementiert werden. Open Cascade Technology stellt jedoch für diesen Anwendungsfall Klassenstrukturen zur Verfügung, die es ermöglichen aus einer Geometrie im Open Cascade Technology Format, wie zum Beispiel einer Fläche, Dateien im STEP- oder IGES-Format zu erzeugen, welche die Geometrien beschrieben und zur Visualisierung dieser genutzt werden können.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass der Aufwand zur Bereitstellung der Inputparameter unter Verwendung der über die Schnittstelle von Propster gelieferten normierten, geometrischen Informationen bei der Nutzung von Open Cascade Technology geringer ist als bei Blade Generator. Außerdem ist das Potential für Fehler und Ungenauigkeiten bei der Nutzung von Open Cascade Technology geringer. Auch bei der Nutzung von Open Cascade Technology werden die geometrischen Daten bei der Generierung der Mantelfläche durch eine Approximation geringfügige Abweichungen in Bezug auf die Originalgeometrie aufweisen. Jedoch ist dieses Potential bei der Nutzung von Blade Generator größer, da nicht nur die vier B-Splines zur Beschreibung der Druck- und Saugseite sowie der Vorder- und Hinterkante approximiert werden, sondern auch eine Überführung der vier Kurven in einen B-Spline mit möglichen Abweichungen verbunden ist. Zuletzt können weitere Abweichungen durch die Erzeugung der Mantelfläche aus den B-Splines entstehen. Die Beschaffung der Parameter zur Beschreibung der Vorder- und Hinterkante eines Profils stellte sich bei dem Verfahren mit Blade Generator als schwierig dar und führte ebenfalls zu Abweichungen der resultierenden Profilgeometrien in Bezug auf die Originalgeometrie. Der Implementierungsaufwand bei der Verwendung von Open Cascade Technology übersteigt den Aufwand bei der Verwendung von Blade Generator deutlich, da Blade Generator die Funktionalität besitzt aus einer gegebenen Parametrisierung die Mantelfläche einer Schaufelgeometrie zu erzeugen und in ein geeignetes CAD-Outputformat zu konvertieren. Bei der Verwendung von Open Cascade Technology steht ein mächtiges CAD-Werkzeug zur Verfügung, welches alle Möglichkeiten liefert die Mantelfläche einer Schaufelgeometrie zu modellieren. Allerdings müssen die gelieferten normierten, geometrischen Daten vollständig durch implementierte Funktionen transformiert werden, sodass diese die Schaufel in Originalform und Originalgröße beschreiben. Auch für die Konvertierung der Daten in ein geeignetes Format von Open Cascade Technology, sowie für die anschließende Erzeugung der Mantelfläche aus diesen Daten sind Funktionen zu implementieren. Zuletzt ist es erforderlich die Funktionalität zur Generierung von Dateien in CAD-Outputformaten bereitzustellen, welche die erzeugte Mantelfläche eines Propellerblattes beschreibt. Da das primäre Ziel dieser Arbeit lautet, die Mantelfläche einer Propellerschaufel möglichst exakt abzubilden, wurde die Entscheidung getroffen Open Cascade Technology für die Generierung der Mantelflächen zu nutzen. Die resultierenden Mantelflächen sollen dazu genutzt werden dreidimensionale Strömungsrechnungen (CFD-Rechnungen) auszuführen. Die damit gewonnenen Ergebnisse sollen wiederum zur Validierung der bereits in Propster implementierten zweidimensionalen Strömungsrechnung dienen. Eine exakte Modellierung der Originalgeometrie ist von großer Bedeutung. Abweichungen von der Originalgeometrie würden eine Validierung der zweidimensionalen Strömungsrechnung erschweren und zu verfälschten Ergebnissen führen. Damit würde das Gesamtziel dieser Arbeit in Gefahr gebracht werden. Dem ist mit der Auswahl von Open Cascade Technology entgegen gewirkt worden.

# Implementierung des Verfahrens zur Mantelgenerierung von Propellerschaufeln

Im vorangegangenen Kapitel wurde mit Open Cascade Technology die Software zur Generierung der Mantelfläche ausgewählt. Es wurde aufgezeigt welche Iterationsschritte zur Aufbereitung der geometrischen Daten, die von der Schnittstelle von Propster geliefert werden, zu implementieren sind. In dem folgenden Kapitel sollen diese Schritte genauer betrachtet werden. Zunächst sollen die Algorithmen des implementierten Verfahrens zur Propellermantelflächengenerierung vorgestellt werden. Anschließend soll die IT-spezifische Umsetzung beschrieben werden, indem die implementierte Klassenstruktur und die Schnittstellen des Verfahrens vorgestellt werden.

## Algorithmen des implementierten Verfahrens

In dem folgenden Abschnitt sollen die implementierten Algorithmen der einzelnen Iterationsschritte, die für die Erzeugung einer Propellermantelfläche aus den gelieferten Daten der Schnittstelle von Propster erforderlich sind, betrachtet werden. In diesem Kapitel werden häufig die Profile einer Propellerschaufel erwähnt. Die Geometrie eines Profils wird jeweils durch eine geordnete Punkteliste beschrieben. Wird in diesem Kapitel die Geometrie eines Profils mittels einer Transformation verändert, so findet diese Transformation für jeden Punkt innerhalb dieser Liste statt. Dies ist im Verlauf dieses Kapitels zu berücksichtigen.

In dem Kapitel Schnittstelle zu den Geometrieinformationen eines Propellers von Propster wurde beschrieben, wie die geometrischen Daten bereitgestellt werden. Damit die Mantelfläche eines Propellers mit Hilfe von Open Cascade Technology erzeugt werden kann, ist es zunächst erforderlich die normierten Profilgeometrien aufzubereiten. Danach werden die aufbereiteten geometrischen Informationen in ein geeignetes Format von Open Cascade Technology überführt, sodass aus diesem Format anschließend eine Mantelfläche generiert werden kann. Die folgenden Abschnitte dieser Arbeit befassen sich mit den implementierten Algorithmen, die die Geometrien aufbereiten und anschließend in eine Mantelfläche überführen.

### Aufbereitung der normierten geometrischen Daten im Zweidimensionalen

Die über die Schnittstelle von Propster gelieferten normierten Profilgeometrien, die sich im zweidimensionalen Raum befinden, müssen in einem ersten Iterationsschritt auf die Sehnenlänge skaliert werden. Da die Sehnenlänge bei den normierten Profilen immer einen Meter beträgt ergibt sich der Skalierungsfaktor aus der tatsächlichen Sehnenlänge des Profils in Metern. Die x- und y-Koordinaten der Punkte, welche die Profilgeometrie beschrieben, sind mit dem Faktor zu multiplizieren. Anschließend liegen die Profile skaliert in Originalgröße vor.

Die skalierten Profile müssen im folgenden Iterationsschritt um den Anstellwinkel rotiert werden. Die Rotation erfolgt im Uhrzeigersinn für jeden Punkt, welcher die Geometrie eines Profils beschreibt. Die Koordinaten eines um den Anstellwinkel β rotierten Punktes Prot(xrot|yrot) ergeben sich aus der Multiplikation mit der Rotationsmatrix aus Gleichung 1.

(1)

Nachdem die Profile um den Anstellwinkel rotiert wurden, können sie im dreidimensionalen Raum entlang der radialen Achse gefädelt werden. Im folgenden Abschnitt sollen die im Rahmen dieser Arbeit implementierten Verfahren zum Fädeln von Profilen vorgestellt werden.

### Fädeln der Profile

Für das Fädeln von Profilen einer Propellerschaufel gibt es verschiedene Arten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die verbreitetsten Verfahren zum Fädeln implementiert. Bevor die entstandenen Algorithmen vorgestellt werden, sollen zunächst noch Allgemeingültigkeiten beim Fädeln angesprochen werden.

Die Profile, die im Abschnitt zuvor skaliert und rotiert wurden, befinden sich im zweidimensionalen Raum und sollen nun im dreidimensionalen Raum entlang der radialen Achse gefädelt werden. Die Profile und deren Punkte müssen deshalb aus dem zweidimensionalen in den dreidimensionalen Raum transformiert werden, indem diesen jeweils eine radiale Koordinate zugeordnet wird. Die radiale Koordinate jedes Punktes, welche die Geometrie desselben Profils beschreibt, ist identisch. Die radiale Koordinate r ergibt sich aus dem dimensionslosen Radius r/R des Profils multipliziert mit dem Radius R des Propellerblattes. Das Profil befindet sich somit in der xy-Ebene an der radialen Koordinate r. Beim Fädeln wird jedes Profil nun innerhalb dieser Ebene verschoben, sodass sich die gewünschte Form des Propellerblattes ergibt. Bei gepfeilten und geneigten Propellerblättern dient die radial verlaufende Fädellinie dazu zu definieren, wie die Profile zu verschieben sind. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Varianten des Fädelns beschrieben zunächst soll das Fädeln über einen Punkt auf der Sehne prozentual zur Sehnenlänge beschrieben werden.

#### Fädeln über die Sehne

Bei dem Fädeln über die Sehne wird die Propellerschaufel weder gepfeilt noch geneigt, sodass keine Fädellinie benötigt wird. Als Parameter ist anzugeben über welchen prozentualen Anteil pchord der Sehnenlänge b der einzelnen Profile gefädelt werden soll. Von jedem Profil wird dann der Punkt Pchord(xchord|ychord) bestimmt, der sich auf der Sehne befindet und dessen Abstand zur Vorderkante des Profils dem definierten prozentualen Anteil der Sehnenlänge entspricht. Die Geometrie der Profile wird durch eine geordnete Punkteliste beschrieben, deren erster Punkt Pfirst(xfirst|yfirst) immer die Hinterkante des Profils ist. Die Vorderkanten der normierten Profile, die von der Schnittstelle von Propster geliefert werden, liegen allesamt im Ursprung. Die zuvor ausgeführte Skalierung und Rotation ändert an dieser Gegebenheit nichts. Mit dem Erkenntnis, dass sich die Vorderkante jedes Profils im Ursprung befindet und die Koordinaten der Hinterkante im ersten Punkt der Punktelisten, die die Profilgeometrien beschreiben, hinterlegt sind, kann der gesuchte Punkt Pchord bestimmt werden (siehe Gleichung 2).

(2)

Nachdem der Punkt Pchord jedes Profils ermittelt wurde, sollten die Profile so angeordnet werden, dass sich dieser Punkt jedes Profils an den gleichen x- und y Koordinaten befindet, um das Fädeln auszuführen. In dem implementierten Algorithmus wurden die Profile derart verschoben, dass sich der Punkt Pchord jedes Profils im Anschluss an die Verschiebung im Ursprung befindet. Die Verschiebung jedes Punktes, der die Geometrie eines Profils beschreibt, erfolgt in die Richtung des Vektors. Abbildung X veranschaulicht den Vorgang des Fädelns über die Sehne noch einmal anhand eines Profils.

Im folgenden Abschnitt soll das Fädeln über den Flächenschwerpunkt genauer betrachtet werden.

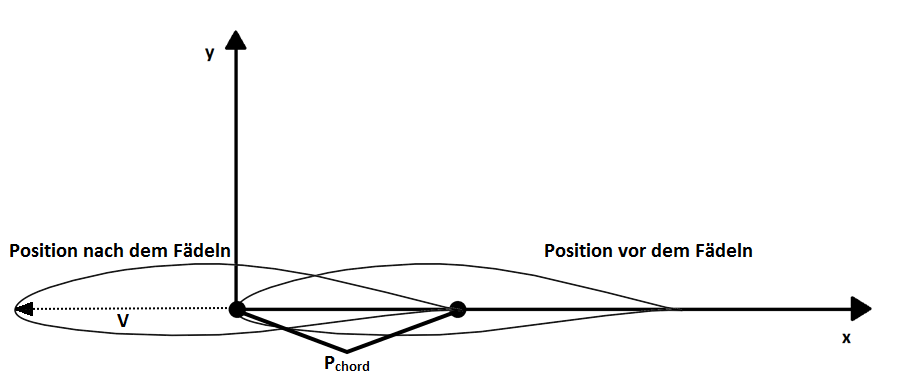


Abbildung X

Schaubild zum Vorgang des Fädelns über die Sehne

#### Fädeln über den Flächenschwerpunkt

Bei dem Fädeln über den Flächenschwerpunkt wird die Propellerschaufel, wie auch bei dem Fädeln über die Sehne, weder gepfeilt, noch geneigt. Der Vorgang des Fädelns über den Flächenschwerpunkt ist dem Fädeln über die Sehne sehr ähnlich. Der einzige Unterschied besteht darin, dass nicht über einen Punkt auf der Sehne Pchord gefädelt wird, sondern über den Flächenschwerpunkt (geometrischer Schwerpunkt einer Fläche), der von jedem Profil errechnet werden muss. Vereinfacht wird dazu angenommen, dass es sich bei den Profilen um geschlossene Polygone handelt. Polygone sind Vielecke, deren Eckpunkte durch einen geschlossenen Kantenzug (Polygonzug) miteinander verbunden sind. Ein Kantenzug ist definiert als eine Kette von Liniensegmenten, die wiederum als Verbindungsgerade zwischen zwei Punkten beschrieben werden kann. Da die geometrische Information eines Profils durch eine geordnete Punkteliste vorliegt, deren Punkte von der Hinterkante entlang der Saugseite in Richtung Vorderkante verlaufen und von dort aus über die Druckseite zurück in Richtung Hinterkante verlaufen, liegt prinzipiell ein Polygon vor. Abbildung X zeigt einen beispielhaften Polygonzug eines Profils.

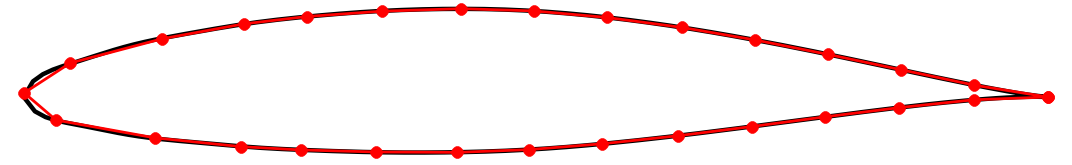


Abbildung X

Polygonzug eines Profils

Ein geschlossenes Polygon zeichnet sich dadurch aus, dass der erste Punkt des Polygonzuges gleich dem letzten Punkt innerhalb des Polygonzuges ist. Liegt ein geschlossenes Polygon, welches durch n Punkte definiert wird, vor, so können die Koordinaten des Flächenschwerpunktes über die Trapezformel aus Gleichung 3 und 4 errechnet werden.

(3)

(4)

Zur Berechnung der Koordinaten ist es erforderlich den Flächeninhalt A des Polygons anzugeben. Dieser lässt sich mit Hilfe von Gleichung 5 ermitteln.

(5)

Nachdem die Koordinaten des Flächenschwerpunktes für jedes Profil errechnet wurden, werden die Punkte, welche die Geometrie des Profils beschreiben analog zu dem Fädeln über die Sehne in Richtung des Vektors V verschoben. Danach ist der Vorgang des Fädelns über den Flächenschwerpunkt abgeschlossen.

#### Fädeln entlang einer Auffädellinie

Bei dem Fädeln von Profilen entlang einer Auffädellinie, die keine Gerade ist, die parallel zur radialen Achse verläuft, wird das Propellerblatt mit einer Pfeilung und Neigung versehen. Prinzipiell werden die Profile beim Fädeln über die Sehne oder den Flächenschwerpunkt ebenfalls über eine Auffädellinie gefädelt. Diese ist jedoch die Radiale Achse, sodass das Propellerblatt weder mit einer Pfeilung, noch mit einer Neigung versehen wird. Abbildung X zeigt ein Schaubild mit zwei Profilen, die über 50% der Sehnenlänge gefädelt wurden, sowie die dazugehörende Auffädellinie (radiale Achse).

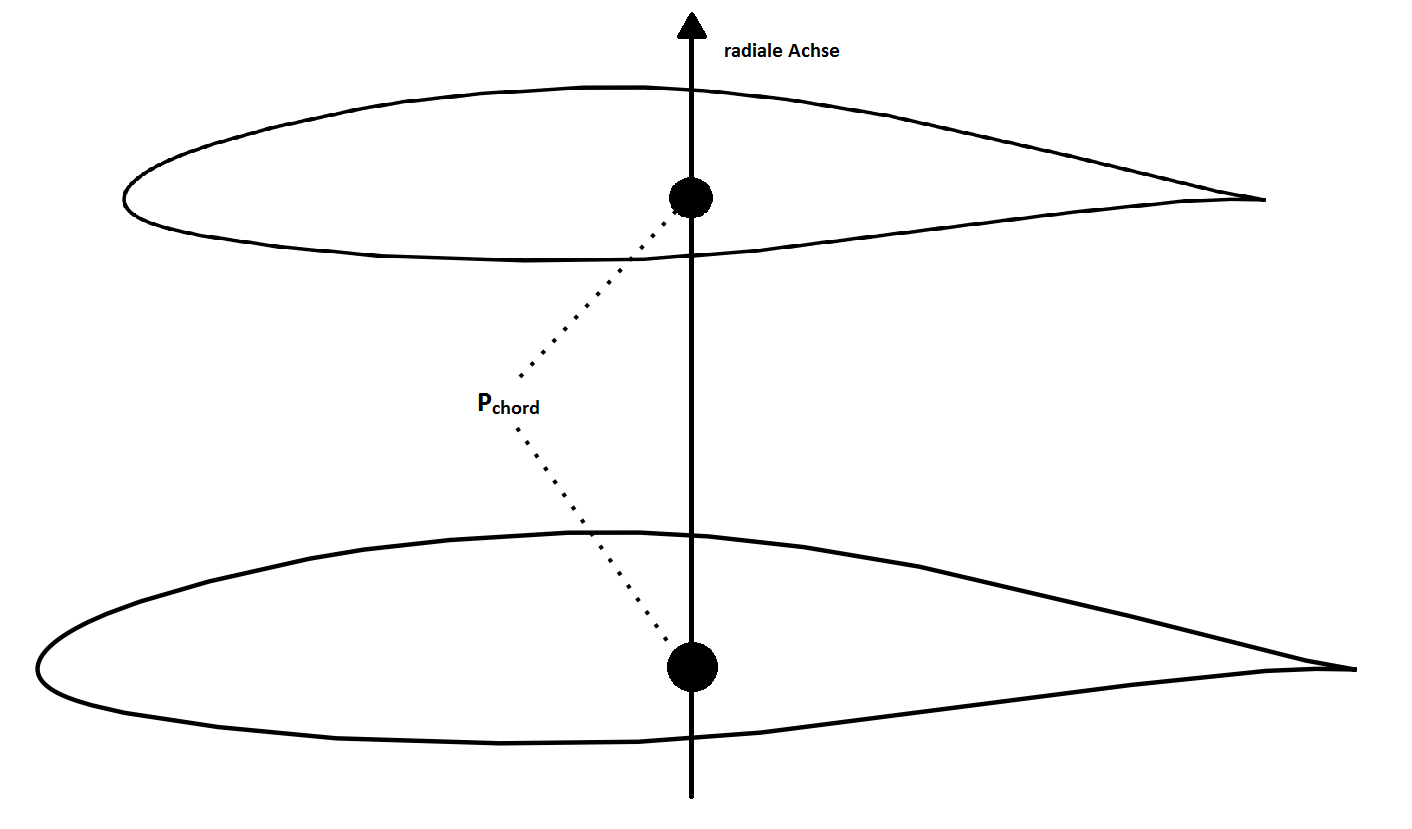


Abbildung X

Schaubild zur Darstellung der Auffädellinie beim Fädeln über die Sehne

Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts wird die Auffädellinie als Kurve im zweidimensionalen Raum innerhalb der xz-Ebene betrachtet, die nicht parallel zur z-Achse (radiale Achse) verläuft. Abbildung X zeigt beispielhaft die auf den Radius von einem Meter normierte Auffädellinie der Schaufel des NASA SRIII Propellers.

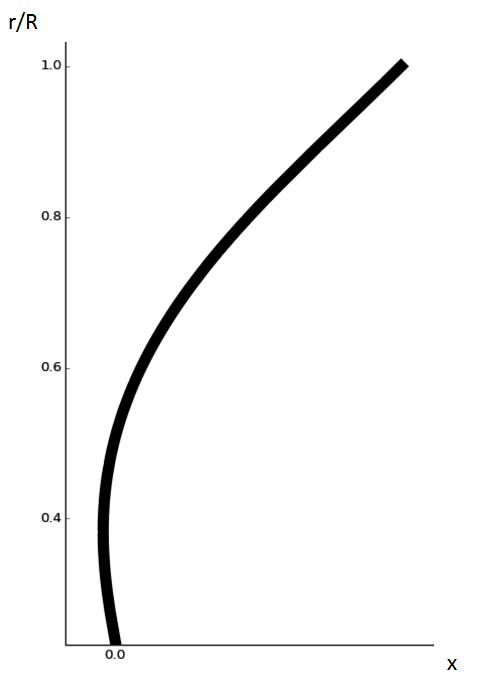


Abbildung X

Normierte Auffädellinie der Schaufel des SRIII Propellers

Die Auffädellinien, die in dieser Arbeit betrachtet werden, beginnen an der radialen Koordinate des Hubs. Bei der Auffädellinie aus Abbildung X liegt der Hub bei dem dimensionslosen Radius von 0,239. Die x-Koordinate jeder Auffädellinie beträgt am dimensionslosen Hubradius innerhalb dieser Arbeit immer null.

Bei dem Fädeln über eine Auffädellinie muss zunächst definiert werden, über welchen Punkt des Profils entlang der Auffädellinie gefädelt werden soll. Ein solcher Punkt Pstack könnte die Vorder- oder Hinterkante des Profils sein oder auch der in dem vorigen Abschnitten erwähnte Punkt auf der Sehne Pchord beziehungsweise der Flächenschwerpunkt. Das Profil wird in diesem Fall jedoch nicht derart verschoben, dass sich Pstack im Ursprung befindet. Das Profil wird lediglich in x-Richtung verschoben. Die Verschiebung (sweep) für ein Profil, welches sich an der Radialen Koordinate r befindet, ergibt sich aus der Differenz der x-Koordinate von Pstack (Minuend) und der x-Koordinate der Auffädelline an der radialen Koordinate r (Subtrahend). Die Auffädellinie wird innerhalb der implementierten Funktionen durch eine geordnete Punkteliste von Hub zu Tip definiert. Liegt kein Punkt mit der gesuchten radialen Koordinate r innerhalb dieser Liste vor, so wird dieser durch eine lineare Interpolation ermittelt. Soll das Propellerblatt lediglich mit Pfeilung versehen werden so muss lediglich die besagte Verschiebung in x-Richtung (sweep) ausgeführt werden. Der Vektor für die Verschiebung lautet also V . Soll das Propellerblatt neben der Pfeilung auch mit einer Neigung versehen werden, so ist der Vektor V noch um den Anstellwinkel des Profils zu rotieren (siehe Gleichung 1). Der daraus resultierende Vektor Vrot gibt die Verschiebung in x- und y-Richtung für alle Punkte vor, die die Geometrie des entsprechenden Profils beschrieben. Damit ist die Vorstellung der Algorithmen zum Fädeln von Profilen abgeschlossen.

Häufig liegt für Propeller mit Pfeilung und Neigung keine Beschreibung der Auffädellinie in Form einer definierten Kurve oder Punkteverteilung vor. Diese wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch benötigt, um die Profile wie zuvor beschrieben wurde zu Fädeln. In dem folgenden Abschnitt sollen deshalb zwei implementierte Algorithmen vorgestellt werden, die mittels der Parametrisierung eines Propellerblattes, welche im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wird, eine Auffädellinie generiert.

### Generierung von Auffädellinien

Im Kapitel Geometrischer Aufbau einer Propellerschaufel wurde der Zusammenhang zwischen dem Pfeilwinkel Λ und der Auffädellinie beschrieben. Die Parametrisierung zur Beschreibung der Geometrie eines Propellers, welche über die Schnittstelle von Propster durch ein Objekt der Klasse Propeller übergeben wird, beinhaltet auch den Pfeilwinkel Λ von jedem Profil, welches übergeben wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Algorithmen entwickelt, mit denen es möglich ist anhand der Pfeilwinkel die Auffädellinie des Propellerblattes, welches durch die gelieferte Parametrisierung beschrieben wird, zu rekonstruieren. Die beiden Algorithmen unterscheiden sich dahingehend, dass ein Algorithmus darauf abzielt, die Auffädellinie möglichst genau zu rekonstruieren, während der andere Algorithmus mit wenigen Inputparametern eine Auffädellinie erzeugt. Letzterer Algorithmus kann verwendet werden, wenn nur sehr wenige Informationen über ein Propellerblatt und dessen Auffädellinie vorhanden sind. Außerdem ist dieser Algorithmus dazu geeignet, um die Auffädellinie durch die Veränderung weniger Parameter schnell anzupassen. Dies könnte in der Optimierung von Propellerschaufeln von großem Nutzen sein. Obwohl die Optimierung von Propellerschaufeln kein definiertes Ziel dieser Arbeit ist, wurde eine Implementierung des zweiten Verfahrens als nützlich angesehen, da die Beschaffung der notwendigen Parameter für das erste Verfahren nicht immer glückt und somit eine Alternative zur Verfügung steht. Zunächst soll der Algorithmus vorgestellt werden, der die Rekonstruktion der Auffädellinie möglichst präzise vollzieht.

#### Präzise Rekonstruktion einer Auffädellinie

Der entwickelte Algorithmus zur präzisen Rekonstruktion der Auffädellinie eines Propellerblattes benötigt einige Inputparameter. Dazu gehören die Pfeilwinkel der Profile und deren dimensionslose radiale Koordinate. Außerdem wird der dimensionslose Hubradius benötigt. Da es sich bei dem zu beschreibenden Algorithmus um ein iteratives Verfahren handelt, muss die Anzahl der Iterationen i vorgegeben werden. Die Präzision der Rekonstruktion der Auffädellinie steigt mit der Erhöhung der Anzahl der Iterationen. Zu einem späteren Zeitpunkt wird auf die Auswirkung einer variierenden Anzahl an Iterationen auf die rekonstruierte Affädellinie eingegangen. Zunächst soll jedoch das Verfahren genauer betrachtet werden.

Innerhalb des nun vorgestellten Algorithmus wird eine normierte Auffädellinie erzeugt, die von dem dimensionslosen Hubradius in Richtung des Tips erzeugt wird. Der dimensionslose Tipradius ist eins. Mit jeder Iteration wird ein weiterer Punkt mit steigender radialer Koordinate, der die Auffädellinie definiert, erzeugt. Der radiale Abstand (diff) dieser Punkte ergibt sich aus der Differenz vom dimensionslosen Tip- und Hubradius geteilt durch die Anzahl an Iterationen subtrahiert mit eins.

(6)

Die Pfeilwinkel der Profile und deren dimensionslose Radiale Koordinaten können in einen Funktionellen Zusammenhang gebracht werden, sodass der Pfeilwinkel sich aus einer Abhängigkeit des dimensionslosen Radius ergibt. Von dieser Funktion liegen lediglich die Punkte an den dimensionslosen radialen Koordinaten der Profile vor. Für die Generierung der Auffädellinie ist es jedoch erforderlich von einer beliebigen dimensionslosen Radialen Koordinate zwischen Hub und Tip den Pfeilwinkel bestimmen zu können. Da eine möglichst präzise Rekonstruktion der Auffädellinie gewährleistet werden soll, sind auch die Pfeilwinkel an einer beliebigen dimensionslosen radialen Koordinate möglichst exakt zu bestimmen. Die Bestimmung der Pfeilwinkel über eine lineare Interpolation wurde deshalb nicht in Betracht gezogen. Stattdessen wurde eine DLR-interne Bibliothek verwendet, um eine B-Spline Kurve aus den gegebenen Punkten zu approximieren. Mit Hilfe des Brent Verfahrens, kann anschließend über die Laufvariable u des B-Splines iteriert werden und ein Punkt mit bestimmter dimensionsloser radialer Koordinate auf dem B-Spline ermittelt werden. Bei dem Brent-Verfahren handelt es sich um einen Algorithmus aus der numerischen Mathematik zur Bestimmung von Nullstellen. Bei der Iteration über die Laufvariable u eines B-Splines wird die x-Koordinate des Punktes auf dem Spline x(u) gesucht, dessen Differenz zur gesuchten dimensionslosen radialen Koordinate gleich Null ist und somit die Nullstelle ergibt. Prinzipiell wird die Funktion, welche durch den Kurvenverlauf des B-Splines beschrieben wird, um die gesuchte dimensionslose radiale Koordinate verschoben. Die daraus resultierende Funktion besitzt dort eine Nullstelle (x(u) = 0). In diesem Fall ist es legitim nach einer Nullstelle für x(u) zu suchen und nicht, so wie es üblich ist nach einem y(u), da sowohl x als auch y von der Laufvariablen u abhängig sind. Von dem ermittelten Punkt kann dann die y-Koordinate y(u) bestimmt werden, welche den gesuchten Pfeilwinkel an der dimensionslosen radialen Koordinate beinhaltet. Abbildung X veranschaulicht das Prinzip des Brent-Verfahrens noch einmal.

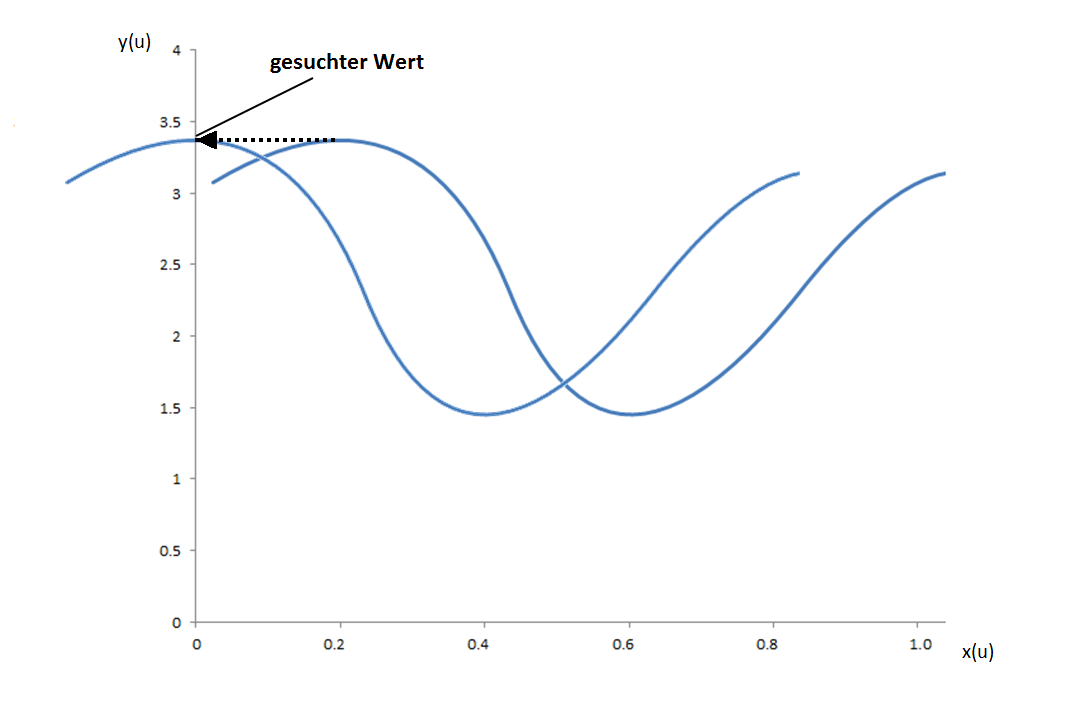


Abbildung X

Schaubild zum Prinzip des Brent-Verfahrens

Mit Hilfe des Brent-Verfahrens ist es nun möglich für jede radiale Koordinate zwischen Hub und Tip einen präzisen Wert des Pfeilwinkels zu bestimmen. In dem Abschnitt Fädeln entlang einer Auffädellinie in diesem Kapitel wurde erwähnt, dass der Verlauf der Auffädellinien, die in dieser Arbeit betrachtet werden immer am dimensionslosen Hubradius mit der x-Koordinate null beginnt. Der erste Punkt, der die Auffädellinie definiert, ist somit gegeben als PHub(0.0|r/RHub). Von diesem Punkt aus beginnt der iterative Abschnitt dieses Verfahrens.

Der Pfeilwinkel Λ an der Stelle r/RHub ist bekannt oder mit dem Brent-Verfahren zu ermitteln. Der Pfeilwinkel an der radialen Koordinate r ist definiert als Winkel zwischen der PCA und der Tangente der Auffädellinie. Die PCA kann mit der radialen Achse gleichgestellt werden. Der radiale Abstand diff soll zwischen den Punkten, die die Auffädellinie definieren, eingehalten werden. Die radiale Koordinate des Punktes, welcher auf PHub zur Definition der Auffädellinie folgt, hat somit einen Wert von r/RHub + diff. Über den Abstand diff und den Pfeilwinkel Λ kann dann mit Hilfe von Gleichung 7 die x-Koordinate des Punktes, der auf PHub folgt, bestimmt werden.

(7)

Abstrakt formuliert beschreibt Gleichung 8 und 9, wie die x- und y-Koordinate eines Punktes Pi+1(xi+1|yi+1) über den Punkt Pi(xi|yi) und den Pfeilwinkel Λi an der radialen Koordinate yi bestimmt werden kann. Die beiden Punkte beschreiben die zu rekonstruierende Auffädellinie. In der folgenden Iteration dient der ermittelte Punkt Pi+1 als neuer Ausgangspunkt Pi. Die Iteration erfolgt so oft, bis die dimensionslose radiale Koordinate eins erreicht wurde.

(8)

(9)

Ist der Pfeilwinkel größer null, so ist in Gleichung 8 eine Subtraktion auszuführen. Andernfalls muss Addiert werden. Das Prinzip einer Iteration basiert auf der Winkelfunktion des Tangens (Gleichung 10). Abbildung X verdeutlicht dies noch einmal.

(10)

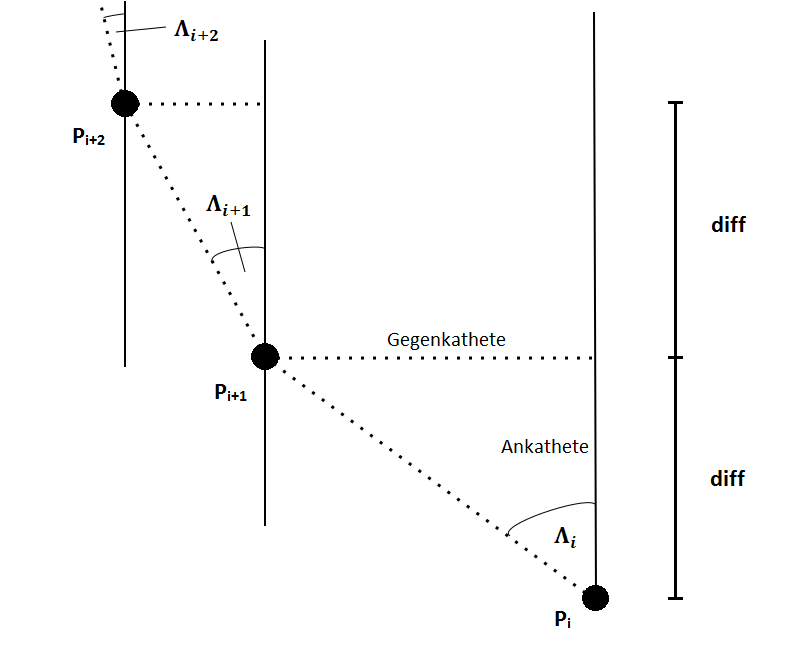


Abbildung X

Schematische Zeichnung zur Verdeutlichung eines Iterationsintervalls zur Rekonstruktion der Auffädellinie eines Propellerblattes

#### Rekonstruktion einer Auffädellinie anhand weniger Parameter

### Mantelflächengenerierung mit Open Cascade Technology

## IT-spezifische Umsetzung

### Schnittstellen der Bibliothek

### Klassenstruktur der Bibliothek

Möglichkeit der Austauschbarkeit und Abstraktionsgrad

### Build Konfiguration

# Tests im Bezug zum implementierten Verfahren

## Eingerichtete Unittestsuite

## Anwendungstests

Generierung des SRII und SRIII Propellermantels

Auswertung der Anwendungstests

# Zusammenfassung

# Ausblick