

4 Netzgenerierung

Die Grundlage für jede numerische Strömungsberechnung ist die geometrische Diskretisierung des Problemgebietes. Das Rechenetz beeinflusst neben der Turbulenzmodellierung und der Genauigkeit des Diskretisierungsverfahrens in Raum und Zeit die Qualität der erzielbaren Ergebnisse. Aus diesem Grund werden einige grundlegende Sachverhalte zum Themengebiet Netzgenerierung aufgezeigt.

Bei der Netzgenerierung muß bereits auf das zu erwartende Strömungsergebnis als auch auf den CFD-Code eingegangen werden. Dies soll im folgenden erläutert werden. Die CFD-Codes können im Hinblick auf das Rechenetz in zwei Klassen eingeteilt werden:

- strukturierter Code
- unstrukturierter Code

Dementsprechend muß auf die logische Anordnung der einzelnen Gitterzellen geachtet werden. Ein strukturierter Code verlangt ein strukturiertes Netz. Dieses ist durch eine regelmäßige Anordnung der Gitterpunkte gekennzeichnet. Es gibt somit Richtungen, entlang derer die Anzahl der Gitterpunkte gleich ist. Im zweidimensionalen Fall bedeutet dies, daß die Gitterpunkte durch die Zähler i und j eindeutig beschrieben werden können und sich benachbarte Punkte um 1 im Zähler unterscheiden. Dies hat als Nachteil zur Folge, daß die geometrische Lage der Gitterpunkte eingeschränkt ist, da eine gewisse Struktur eingehalten werden muß.

FLUENT 5.0 ist ein unstrukturierter Code. Es gibt somit keine Beschränkung in der Gestaltung der Netzstruktur, und die Gitterpunkte müssen keiner Ordnung folgen. Dies hat den Vorteil, daß die Wahl der Gitterzellentypen uneingeschränkt ist, diese beliebig miteinander kombinierbar sind und die Flexibilität der Netzgenerierung in Bezug auf komplexe Geometrien gegenüber strukturierten Netzen erheblich höher ist. Bei sehr aufwendigen Geometrien schließt sich sogar die Verwendung strukturierter Netze aus. Auch im Hinblick auf eine Automatisierung der sehr zeitintensiven Netzgenerierung bietet der unstrukturierte Netztyp erhebliche Vorteile. Der Nachteil ist im erhöhten Speicherbedarf zu sehen, da die Nachbarschaftbeziehungen zu benachbarten Gitterzellen mittels aufwendiger Datenstrukturen gespeichert werden müssen.

Unabhängig von dem Netztyp gibt es unterschiedliche Gitterelemente. Die wichtigsten sind im zweidimensionalen Fall Dreiecke und quadrilaterale Elemente. Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die Simulationen ausschließlich quadrilaterale Kontrollvolumina verwendet. Der Grund hierfür ist in der höheren Konvergenzgeschwindigkeit zu sehen, auch wenn der Aufwand steigt, ein gutes Netz zu generieren. Dieser Sachverhalt wurde durch eine Voruntersuchung abgeklärt. Hierfür wurde eine stationäre Einzelprofilumströmung sowohl mit ca. 30.000 quadrilateralen Zellen als auch mit ca. 21.000 unstrukturiert angeordneten Tetraederelementen berechnet. Die beiden Rechnungen wurden nach Erreichen der gleichen Ergebnisqualität beendet. Das Konvergenzverhalten ist nachstehenden FLUENT-Plots der Residuenverläufe zu entnehmen, wobei rechts Tetraeder- und links quadrilaterale Elemente verwendet wurden.

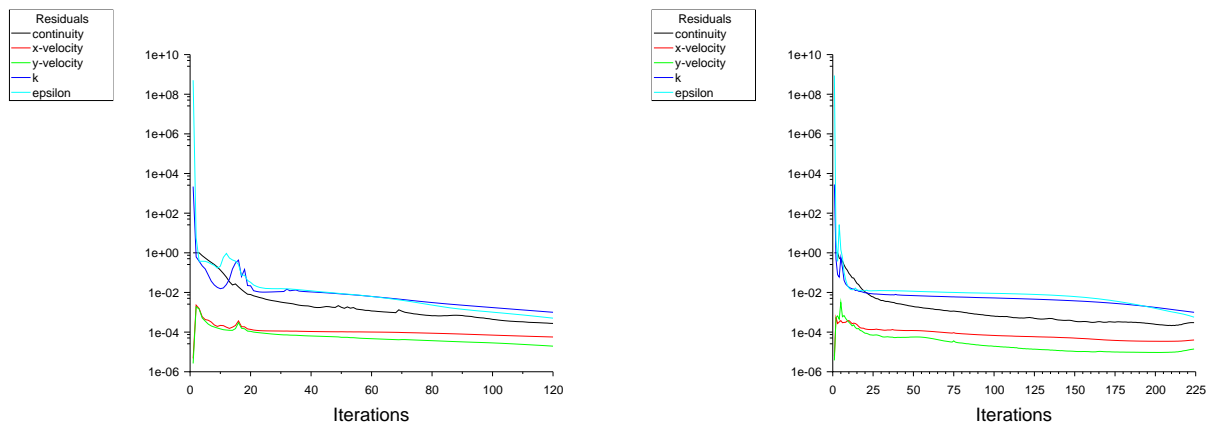


Abb. 4.1: Konvergenzgeschwindigkeit dargestellt durch den Residuenverlauf

Es zeigt sich bei dem Vergleich dieser beiden Elementtypen, daß die Anzahl der benötigten Iterationen sich um den Faktor 2 unterscheidet. Ein weiterer Vorteil ergibt sich bei der Verwendung von quadrilateralen Zellen, wenn die Netzgenerierung betrachtet wird. Es ist ein wesentlich größerer Einfluß auf eine definierte Knotenverteilung möglich, und es kann das Netz exakt auf das Strömungsproblem abgestimmt werden. Demgegenüber läuft bei der Verwendung von Tetraedern die Netzgenerierung automatisch ab, was den Zeitaufwand einerseits minimiert, sich aber andererseits negativ auf die Netzqualität auswirkt.

4.1 Netzstruktur

Durch die Verwendung des unstrukturierten Löser von FLUENT kann der Netzelementtyp frei gewählt werden, aber auch die allgemeine Struktur. Für die Berechnung von Profilmströmungen mit Hilfe von rechteckigen Netzelementen werden grundsätzlich drei Strukturarten unterschieden:

- H-Netz
- C-Netz
- O-Netz

Die drei unterschiedlichen Großbuchstaben sind für sich aussagefähig genug, und in Abbildung 4.2 sind sie durch eine Skizze veranschaulicht.

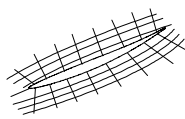
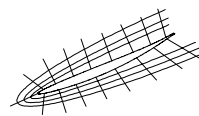
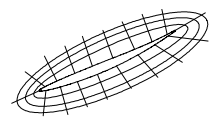


Abb. 4.2: H-Netz



C-Netz



O-Netz

Die drei Netzstrukturen können frei wählbar miteinander kombiniert werden. Das einfach zu generierende H-Netz hat eine Schwäche im Profilvorderkantenbereich. Hier wird die Geometrie schlechter als in den beiden anderen Varianten wiedergegeben. Da dieser Strömungsbereich für Turbomaschinenberechnungen aber sehr entscheidend ist, sollte dieser Netztyp auf das Kernströmungsgebiet beschränkt bleiben.

Das C-Netz hat den Vorteil, daß im Nachlaufbereich des Profils weiterhin eine gute Auflösung gegeben ist. Dies setzt allerdings voraus, daß die Ausbreitungsrichtung des Profilauflaufes bekannt und stationär ist.

Für den instationären Fall verbleibt somit im profilnahen Bereich das O-Netz. Es bietet eine hohe Auflösung des Strömungsgeschehens in der Grenzschicht und vermeidet unnötige Zellen stromab des Profils. Es ruft auch keine unnötigen Probleme am Interface zweier relativ zueinander bewegten Rechengitter hervor, wie später zu sehen ist.

4.2 Netzqualität

Aus Kapitel 3 lassen sich die drei folgenden Kriterien ableiten, nach denen die Güte eines Rechengitters beurteilt werden kann:

- Skewness
- Aspect Ratio
- Expansionsrate

Die **Skewness** ist ein Maß für die Verzerrung der einzelnen Kontrollvolumina, bzw. für die Orthogonalität. Die Winkel eines Kontrollvolumens sollten möglichst nahe dem rechten Winkel sein, da die konvektiven und diffusiven Flüsse bei Finite-Volumen-Verfahren als Skalarprodukte des entsprechenden Flußvektors mit dem Oberflächenvektor bestimmt werden. Aus diesem Grund ist es auch sinnvoll das Rechennetz in Strömungsrichtung zu orientieren.

Unter dem **Aspect Ratio** wird das Seitenverhältnis eines Netzelementes verstanden. Dieses Maß übt Einfluß aus auf die Konditionierung des diskretisierten Gleichungssystems, was sich wiederum auf die Effizienz der Lösungsalgorithmen auswirkt. Deshalb sollte der Wert 0,1 nicht unter- bzw. der Wert 10 nicht überschritten werden.

Die **Expansionsrate** kennzeichnet die Volumenänderung von einem Kontrollvolumen zu einem benachbarten. Die Expansionsrate beeinflusst den Abbruchfehler eines Diskretisierungsverfahrens und wirkt sich somit unmittelbar auf die Qualität der Rechenergebnisse aus. Es ist darauf zu achten, daß ein Verhältnis von 0,5 bzw. 10 eingehalten wird.

Neben den oben genannten Kriterien, die zur Beurteilung eines numerischen Rechennetzes geeignet sind, lassen sich weitere Kriterien aus der Numerik, den Turbulenzmodellen und der Art des Strömungsproblem es ableiten, die das Rechennetz erfüllen muß. Die wichtigsten Punkte bei der Berechnung einer einstufigen Turbine sind:

- Abstand der wandnächsten Gitterzelle zur Wand
- Abstand des Rechengebietrandes vor dem 1. Gitter bzw. nach dem 2. Gitter
- Lage und Netzgestaltung am Interface zwischen zwei benachbarten Rechennetzen einer instationären Rechnung

Der Abstand der wandnächsten Gitterzelle von einer die Strömung begrenzenden Wand muß im Hinblick auf die Wandbehandlung durch die Turbulenzmodellierung gewählt werden. Es lassen sich y^+ -Werte (Definition siehe Kapitel 2.3.1) als Maß für den Wandabstand angeben. Bei der Verwendung der low-Re Erweiterung des Eingleichungsmodelles nach SPALART und ALLMARAS sowie für das Eingleichungsmodell nach WOLFSHTEIN sollte gelten:

$$y^+ \approx 1 \quad (4.1)$$

Bei der Wandbehandlung durch die Standard-Wandfunktion muß sichergestellt sein, daß die wandnächste Gitterzelle im logarithmischen Bereich liegt. Deshalb muß sichergestellt sein, daß die Beziehung (4.2) erfüllt ist.

$$y^+ \geq 11,225 \quad (4.2)$$

Der Abstand der wandnächsten Gitterzelle kann a priori nicht exakt bestimmt werden, da in die Berechnung von y^+ die Wandschubspannung mit eingeht. Dies stellt somit einen iterativen Prozeß dar.

Da bei den beiden weiter oben genannten Punkten numerische Aspekte berücksichtigt werden müssen, werden diese jeweils in einem separaten Kapitel betrachtet.

4.3 Lage des Ein- und Ausströmrandes

Aufgrund der Eigenschaften des zu lösenden Gleichungssystems kann die Lage des Ein- bzw. Austrittsrandes nicht beliebig gewählt werden.

Gleichungssysteme partieller Differentialgleichungen können allgemein in drei Klassen unterteilt werden. Dies sind elliptische, parabolische und hyperbolische Gleichungssysteme. Die 3 verschiedenen Typen der partiellen Dgln beschreiben verschiedene physikalische Phänomene:

- elliptisch → Gleichgewichtszustand
- parabolisch → Diffusionsvorgänge
- hyperbolisch → gerichtete Ausbreitungszustände (Schwingungen, Wellen, ...)

Je nach dem, welchen Charakter ein Gleichungssystem besitzt, müssen die Randbedingungen formuliert werden. Dies hat Rückwirkungen auf die Lage eben dieser.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden stationäre und instationäre, aber immer inkompressible Strömungsprobleme untersucht. Ein stationäres, inkompressibles Problem zeichnet sich durch seinen elliptischen Charakter aus, das instationäre, inkompressible dagegen weist eine Mischung aus elliptischem und parabolischem Verhalten auf. Der elliptische Charakter hierbei ist darauf zurückzuführen, daß sich Information im Raum sowohl in als auch gegen die Strömungsrichtung ausbreitet. Der parabolische Einfluß ergibt sich aus der Tatsache, daß in der Zeit die Information nur in eine Richtung, die der Zukunft, gelangt.

Das elliptische Verhalten muß bei der Wahl der Lage des Rechengebietsrandes stromauf von einem Profil beachtet werden. Da sich die Information über das Profil, bzw. jede Änderung, auch gegen die Strömungsrichtung ausbreiten kann, muß diese Informationsausbreitung entweder am Einströmrand kompensiert werden oder dieser soweit von der Änderungs-/Störquelle der Profilverdickung stromauf liegen, daß dissipative Effekte die Störung ausgeglichen haben. Hierbei wurde von der Annahme ausgegangen, daß die Randbedingung am Einströmrand konstant gehalten wird. Wird eine aus dem Strömungsgebiet kommende Störung am Rechenrand nicht reflektiert, sondern kompensiert, spricht man von einer nichtreflektierenden Randbedingung. Der mathematische Grundgedanke, der bei einer solchen Randbedingung umgesetzt

ist, basiert auf einem Charakteristikenverfahren. Dies setzt allerdings einen hyperbolischen Gleichungscharakter voraus.

Aus diesem Grund wurde bei der Berechnung der im folgenden dargestellten Probleme die zweite Möglichkeit, den Einströmrand weit genug vor die Profilvorderkante zu legen, gewählt. Die gleiche Überlegung gilt auch für den Ausströmrand.

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde am Beispiel eines Axialpumpenlaufrades die Lage des Einströmrandes bestimmt. Hierbei wurde der Abstand a von der Profilvorderkante zum Einströmrand variiert (vgl. Abb. 4.3). Es wurde a entlang dem Winkel δ gemessen, der den Winkel zwischen der Horizontalen und der Profildsehne l bildet.

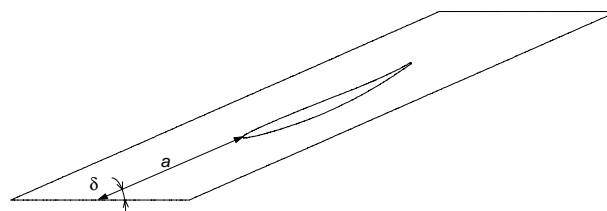


Abb. 4.3: Schematische Darstellung des Problemgebietes

Bei der Betrachtung des stationären Strömungsfeldes in Abhängigkeit des Abstandes a zeigen sich sehr deutliche Unterschiede, die auf die oben angesprochenen Rückwirkungen und Restriktionen der Eintrittsrandbedingung zurückgeführt werden können. Im Falle $a/l=1,0$ sind sehr deutlich Verzerrungen und Deformationen der in Abbildung 4.4 exemplarisch spezifizierten Iso-Linie der Geschwindigkeit zu erkennen.

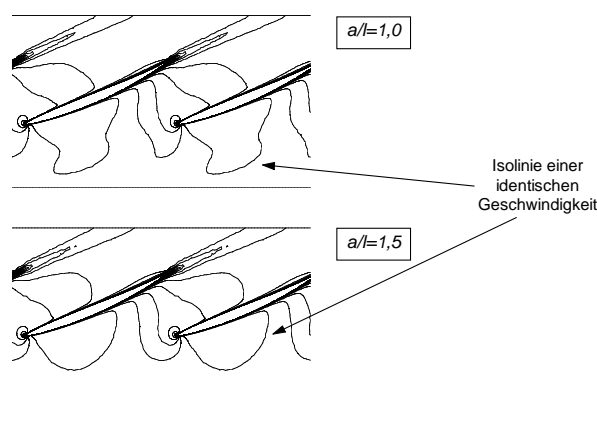


Abb. 4.4: Konturen der Geschwindigkeit für $a/l=1,0$ und $a/l=1,5$

Für Werte im Bereich $a/l \geq 1,5$ können die oben beschriebenen Effekte nicht beobachtet

werden, so daß für alle weiteren Rechnungen der Einströmrand mindestens 1,5 Sehnenlängen in Strömungsrichtung vor der Profilverderrkante zu liegen kommt.

4.4 Interface

Bei der instationären Berechnung einer Turbinenstufe werden zwei separate Rechennetze erforderlich. Eines, das den stationären Stator diskretisiert, und eines, das die Bewegung des Rotors ermöglicht. Es kommt somit im Rahmen einer instationären Berechnung einer solchen Problemstellung zu einer Relativbewegung zweier Rechennetze, deren Berührebene als Interface bezeichnet wird.

Im Rahmen der Finite-Volumen-Verfahren gibt es verschiedene numerische Methoden, die jeweiligen Flüsse über das Interface hinweg zu berechnen. Von FLUENT werden hierfür drei unterschiedliche Möglichkeiten angeboten, die das Interfaceproblem verdeutlichen:

- Rotierendes Bezugssystem
- Mischungsebenenmodell
- Sliding Mesh Modell

Die Berechnung einer instationären Stator-Rotor Interaktion mit einem **rotierenden Bezugssystem** ist die einfachste der drei genannten Möglichkeiten. Es handelt sich hierbei um eine stationäre Näherung (d.h. die beiden Rechengitter haben keine Relativbewegung), in der sich die einzelnen Kontrollvolumina aufgrund verschiedener Bezugssysteme mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen. Diese Vereinfachung ist zulässig, wenn die Stator-Rotor Interaktion sehr gering ist und die Strömung am Interface gleichförmig ist.

Das **Mischungsebenenmodell** bildet die Physik besser ab. Die grundsätzliche Idee hierbei ist es, zunächst für beide Rechennetze für sich eine stationäre Lösung zu berechnen. In einem nächsten Schritt werden dann die stationär erhaltenen Größen am Interface, d.h. Statoraustritt und Rotoreintritt, über den Umfang gemittelt, um dann als Randbedingung für eine weitere stationäre Rechnung der beiden Fluidzonen zu dienen. Dies ist ein iterativer Prozeß, bis eine Konvergenz erreicht ist. Um dieses Modell anwenden zu können, muß ebenfalls eine schwache Interaktion vorausgesetzt werden. Es bietet jedoch die Möglichkeit, mit einem erheblich geringeren Aufwand als das Sliding Mesh Modell einen ersten Überblick des Strömungsfeldes zu erhalten.

Das **Sliding Mesh Modell** ist das hochwertigste Modell der drei genannten. Es ermöglicht eine voll instationäre Simulation. Es werden bei diesem Modell die Flüsse über das Interface hinweg von einem Kontrollvolumen zum anderen berechnet, so daß die Interaktion der beiden benachbarten Fluidzonen voll berücksichtigt wird. Hierfür ist es nicht notwendig, daß die

Gitterpunkte der beiden Interfaceseiten für jeden Zeitschritt aufeinander zu liegen kommen, da ein Interpolationsverfahren verwendet wird.

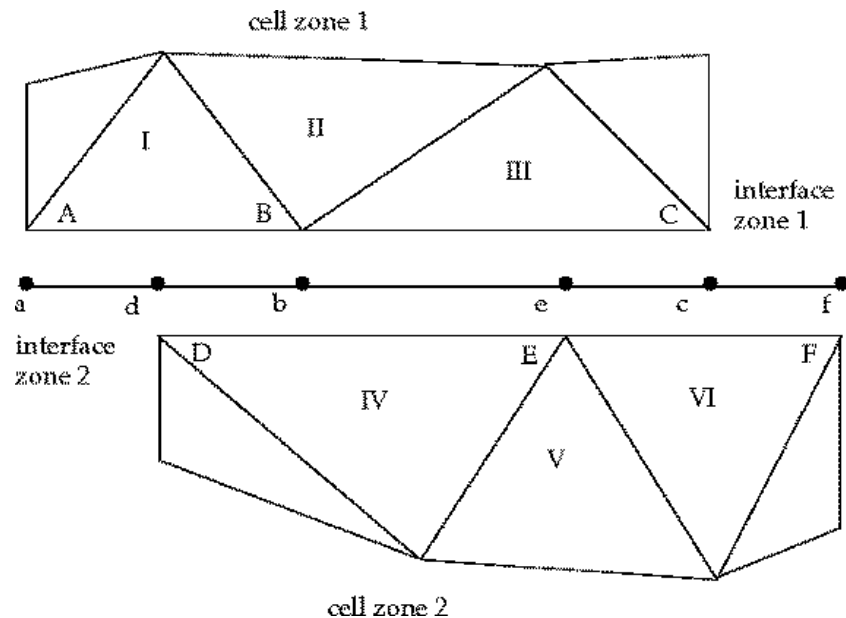


Abb. 4.5: Sliding Mesh Interface aus FLUENT [15]

In Abbildung 4.5 ist ein Interfaceausschnitt zweier benachbarter Gitter, bestehend aus Tetraedern, dargestellt. Die Interface-Zonen bestehen zum einen aus den Kontrollvolumenrändern (Faces) A-B und B-C und zum anderen aus D-E und E-F. Die Überschneidungen dieser Zonen rufen die Faces a-d, d-b, b-e, etc. hervor. Die Faces, die in dem Gebiet liegen, wo sich die beiden Gitterzonen überschneiden, werden zu einem netzinneren Gebiet zusammengefaßt, während die anderen (a-d und c-f) als periodische Zone aufgefaßt werden. Um z.B. den Fluß über das Interface in das Kontrollvolumen (KV) IV zu berechnen, wird das Face D-E vernachlässigt. Dafür werden die Faces d-b und b-e verwendet, um die notwendigen Informationen von den KV I und III in das KV IV zu übertragen. Hierbei werden Interpolationsverfahren angewendet. Um die Fehlerquelle eines Interfaces möglichst gering zu halten, sollten bei der Netzgenerierung drei Punkte beachtet werden:

- gleiche Knotenverteilung auf beiden Interfaceseiten
- äquidistante Knotenverteilung entlang des Interfaces
- Verwendung von rechtwinkligen Netzelementen

Da das Sliding Mesh Modell das einzige Modell ist, das die Stator-Rotor Interaktion in Bezug auf die Nachlaufuntersuchung in ausreichendem Maße beschreibt, wurde es für alle durchgeführten instationären Rechnungen eingesetzt.