

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, leistungsfähige implizite Lösungsverfahren für die numerische Berechnung instationärer Strömungsvorgänge durch Schaufelgitterreihen in thermischen axialen Turbomaschinen zu entwickeln, um die durch die Instationarität der Strömung bedingten physikalischen Phänomene bzw. Effekte in Schaufelkanälen effizient erfassen zu können.

Die Strömung durch Schaufelgitterreihen ist durch eine Reihe komplexer strömungsphysikalischer Phänomene gekennzeichnet. Sie ist voll räumlich, turbulent, instationär und im Trans- und Überschallbereich stoßbehaftet. Insbesondere die aufeinanderfolgende Anordnung von Leit- und Laufradgittern in axialen Turbomaschinen ist durch die Wechselwirkung infolge relativer Bewegung benachbarter Schaufelgitterreihen immer mit instationären Strömungen verbunden. Auch die Nachlauf-, die Kanal- und die Spaltwirbel rufen unabhängig von der Wechselwirkung eine Instationarität der Strömung hervor. Im transsonischen Strömungsbereich kommen noch die Wechselwirkung der aus den vorhergehenden Schaufeln hinauslaufenden Stöße mit den nachfolgenden Schaufeln sowie die Wechselwirkung von Stößen mit den Grenzschichten hinzu.

Die Quellen für die Instationarität der Strömung in axialen Turbomaschinen zeigen sich immer komplex, und die dadurch bedingten instationären Strömungsvorgänge sind sogar bei stationärem Betrieb unvermeidlich. Im Vergleich zu stationären Strömungen rufen instationäre Strömungsgrößen einen höheren aerodynamischen, thermischen sowie strukturellen Einfluß auf die Schaufeln hervor, so daß es notwendig ist, bei der Auslegung von Turbomaschinen auf die instationären Effekte Rücksicht zu nehmen. Jedoch ist eine vollständige Berechnung der räumlichen, turbulenten, instationären Strömung in Turbomaschinen überaus schwierig und als Gesamtheit noch nicht befriedigend möglich. Sie erfordert eine erhebliche Speicherkapazität bzw. Leistung der benötigten Rechner. Daher wurden in dieser Arbeit ausschließlich ebene Strömungen betrachtet.

Um den zeitlich genauen Verlauf der Strömungsgrößen darstellen zu können, muß im Gegensatz zu stationären Strömungsproblemen bei instationären, insbesondere bei turbulenten Wirbelströmungen, ein noch feineres Rechengitternetz eingesetzt werden. Sonst wird die numerische Lösung durch die räumlich und zeitlich gekoppelten Diskretisierungsfehler mit der Zeit allmählich verfälscht. Die Verwendung eines feinen Gitternetzes kann aber bei expliziten Verfahren unter Umständen Stabilitätsprobleme mit sich bringen. Die Stabilitätsprobleme

zwingen also dazu, implizite Verfahren für instationäre Strömungen einzusetzen. Damit jedoch implizite Verfahren noch günstiger sein können als explizite, muß der bei jedem Zeitschritt für die Lösung eines algebraischen nichtlinearen Systems erforderliche Rechenaufwand durch den Einsatz eines hocheffizienten Lösungsverfahrens reduziert werden. Sonst bringen auch implizite Verfahren insgesamt wenig Vorteil im Gegensatz zu expliziten. In dieser Arbeit wurde ein allgemeiner Ansatz für die implizite Zeitintegration vorgestellt.

Einer der Schwerpunkte in dieser Arbeit war es, effiziente Lösungsverfahren zur Lösung einer Reihe algebraischer nichtlinearer Gleichungssysteme in impliziten Verfahren zu entwickeln. Das zur Lösung der Gleichungssysteme verwendete Verfahren ist das *iterative Verfahren der Defektkorrektur*, welches auf einem *approximativen Riemanlöser* erster Ordnung für die reibungsfreie Flußfunktion basiert und bei jedem Zeitschritt eine Reihe approximativer *Jacobi*-Systeme liefert. Die Leistungsfähigkeit des Lösungsverfahrens hängt stark von der Effizienz der zur Lösung der approximativen *Jacobi*-Systeme verwendeten Vorgehensweise ab. Ausgehend davon, daß ein *approximativer Riemanlöser* erster Ordnung für den impliziten Operator in linearisierter Form eine gut konditionierte Koeffizientenmatrix für iterative Vorgehensweisen ergibt, wurden die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Prozeduren für approximative *Jacobi*-Systeme dargestellt und damit deren Leistungsfähigkeit auf dem Ein- und dem Mehrgitter für stationäre und instationäre Strömungsfälle untersucht. Es stellte sich heraus, daß die Mehrgittertechnik für instationäre Strömungen und die Lösungsverfahren unter Verwendung der eingefrorenen *Jacobi*-Matrix für die Rechenleistung sehr effektiv sind.

Ein entscheidender Nachteil impliziter Verfahren liegt in dem hohen Speicherplatzbedarf für die *Jacobi*-Matrix bei großen Strömungsproblemen, z. B. bei räumlichen Stufenströmungen in axialen Turbomaschinen. Dieses Speicherplatzproblem kann einigermaßen dadurch bewältigt werden, daß man auf ein *matrizenfreies* Lösungsverfahren [45] für die *Jacobi*-Systeme in impliziten Verfahren zurückgreift. Verwendet man ein *Krylov*-Verfahren wie z. B. *GMRES* [64] für die *Jacobi*-Systeme, so wird die *Jacobi*-Matrix nur für das Matrix-Vektor-Produkt benutzt. Also wird dabei das Matrix-Vektor-Produkt mit Hilfe einer *Finite-Differenzenformel* approximiert. Dabei muß man aber eine geringere Konvergenzrate infolge dieser Approximation in Kauf nehmen. Es lohnt sich dennoch bei praktischen Strömungsproblemen, durch rechnerisches Experiment die Konvergenzeigenschaft derartiger Lösungsverfahren zu untersuchen.

Vor der Anwendung eines numerischen Verfahrens auf praktische Strömungsprobleme sollte das Verfahren durch Testrechnungen validiert werden. Hier wurden einige Testrechnungen für instationäre laminare und turbulente Strömungen durchgeführt, bei welchen analytische Lösungen oder Meßdaten vorliegen. Dabei wurde festgestellt, daß zwar bei laminaren Strömungen eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung mit Meßdaten erzielt werden kann, aber bei turbulenten Strömungen die Abweichung, insbesondere bei turbulenten Grenzschichtströmungen, relativ groß ist. Die Ursache dafür ist die Dreidimensionalität turbulenter Strömungen und die ungenaue Modellierung turbulenter Effekte in der Grenzschicht.

Als ein Anwendungsbeispiel in Turbomaschinen wurde die Leitradströmung eines Axialverdichters im Einflußbereich der vorhergehenden Laufradströmung anhand einer Modellbildung simuliert, um die Effekte der Nachlaufwirbel auf die Leitradströmung zu untersuchen. Für die Simulation der Stufenströmung in axialen Turbomaschinen wurde ein Konzept zur Behandlung der Grenzfläche zwischen dem mitbewegten Bezugssystem für die Laufradströmung und dem feststehenden Bezugssystem für die Leitradströmung entwickelt. Dabei wurde auch

gezeigt, daß unter Verwendung dieses Konzepts die Flußberechnung auch in der unstetigen Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Bezugssystemen, wie im Inneren eines Rechengebiets, ohne großen Verlust an Genauigkeit möglich ist.

Anschließend wurden einige Testrechnungen bei unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten der Nachläufe durchgeführt und mit vorhandenen Meßdaten verglichen. Mit Hilfe der Testrechnungen konnte man erkennen, daß im Gegensatz zur isolierten Leitradströmung mit zeitlich konstanten Zuströmungen die Nachlaufwirbel des vorhergehenden Laufradgitters einen großen Effekt auf das Verhalten der Strömung im Leitradgitter und auf die Belastung der Leitradschauflern haben, und ein instationäres Strömungsphänomen, der sogenannte *negative jet*, infolge sowohl des Geschwindigkeitseinbruchs des Laufradnachlaufs als auch der relativen Bewegung zwischen dem Laufradnachlauf und dem Leitradgitter auf der Druckseite des Leitradgitters vorkommt, welcher die Druckschwankung am Schaufelprofil verursacht.

Eine Stufe axialer Turbomaschinen ist durch die komplizierte räumliche Geometrie sowie die unterschiedlichen Bezugssysteme gekennzeichnet, was bei der numerischen Simulation zu einem hohen Speicherplatzbedarf und zu einer erheblichen Rechenzeit führt. Somit ist es vom Standpunkt der Kapazität bzw. der Leistung gegenwärtiger Rechenanlagen aus ohne einigen Verlust an Lösungsgenauigkeit, z. B. durch die Verwendung eines nicht genügend verfeinerten Gitternetzes, in der Praxis nicht möglich, alle in einer Stufe axialer Turbomaschinen auftretenden komplexen Strömungsphänomene anhand einer numerischen Simulation quantitativ befriedigend zu erfassen. Eine Möglichkeit zur Bewältigung des Rechenzeitproblems besteht darin, Parallelrechner einzusetzen.

Unter Verwendung des in dieser Arbeit vorgestellten Konzepts können ebene Strömungen in einer Stufe axialer Turbomaschinen quantitativ und effizient berechnet und damit ohne große Schwierigkeiten auf die räumliche Stufenströmungen erweitert werden. Die vorliegende Arbeit hat sich nur mit dem Fall befaßt, daß das Leitradgitter dem Laufradgitter an Teilung gleich ist. In der Praxis werden allerdings axiale Turbomaschinen so ausgelegt, daß die Teilung des Leitradgitters größer als die Teilung des Laufradgitters wird, um erzwungene Schwingungsprobleme zu vermeiden. Somit stehen bei der Stufenströmung übliche periodische Randbedingungen für nur eine isolierte Schaufelreihe nicht mehr zur Verfügung. In der Fachliteratur treten zwei Konzepte für die Abwicklung derartiger Probleme auf, d. h. das *time-inclined-plane*-Verfahren [37] und das *phase-lagged-periodical*-Verfahren [35], welche die Simulation der Stufenströmung innerhalb nur einer Teilung jeder Schaufelreihe ermöglichen. Mit Hilfe eines dieser Verfahren kann das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren auch auf die Stufenströmung mit ungleichen Schaufelzahlen erweitert werden.