

Automatische Optimierung von Kühler-Lüfter Modulen

Stefan Becker¹, Marcus Becher¹, Matthias Westermeier¹, Nils Springer², Michael Mauß²

¹ FAU Erlangen-Nürnberg, 91058 Erlangen, Deutschland, Email: sb@ipat.uni-erlangen.de

² Brose Fahrzeugteile GmbH, 26135 Oldenburg, Deutschland, Email: michael.mauss@brose.com

Einleitung

In den letzten Jahren werden verstärkt Optimierungsverfahren in der Entwicklung von effizienten und leisen Turbomaschinen eingesetzt. Diese Verfahren ermöglichen einen automatischen rechnergestützten Entwurfsprozess der Laufradschaufel, der basierend auf einer Mehrparameteroptimierung sowohl zur einer Wirkungsgradverbesserung aber auch zu einer Geräuschreduktion des Lüfters führen kann.

Hierbei gibt es eine Vielzahl von Lösungsansätzen, um das Optimum in der Auslegung der Laufradschaufelgeometrie in Abhängigkeit von den Betriebsparametern zu finden. Verwendet werden u.a die Response-Surface-Methode [1], der Nelder-Mead-Algorithmus [2], der Einsatz von Meta-Modellen [3] aber auch Adjungiertenverfahren [4].

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeiten ist die Entwicklung eines Nelder-Mead-Algorithmus zur Optimierung eines KFZ-Niederdruckventilators im Motorsystem. Dabei werden in der Simulation die Randbedingungen des Kühler-Lüfter-Motor Moduls in der Optimierung berücksichtigt.

Optimierungsverfahren

In bisherigen Untersuchungen zur Akustik von Kühler-Lüfter-Modulen wurde ein Programmpaket erarbeitet, das ermöglicht, in einem hybriden Verfahren mit Hilfe der Perturbed Convective Wave Equation die Schallabstrahlung zu analysieren. Die Ergebnisse sind in [5] dokumentiert. Die Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Verteilung des akustischen Potentials im Strömungsfeld des Lüfters. Ziel im folgenden Schritt war es, basierend auf diesen Untersuchungen, die bestehende Lüftergeometrie hinsichtlich der hydrodynamischen Kennwerte, aber auch in der Schallabstrahlung zu verbessern.

Im Optimierungsalgorithmus wurde das gesamte Lüftermodul abgebildet. Die Randbedingungen des Kühlers (K) und des Motorblockes (PP) wurde durch ein poröses Medium sowie eine Prallplatte abgebildet. Zwischen den beiden Randelementen befindet sich das Lüfterlaufrad (KL) (siehe Abb. 2).

Für die Optimierung wurde der Nelder-Mead-Algorithmus (NMA) in einem MATLAB Code angewandt, da sich die Implementierung in verschiedenen Programmiersprachen als besonders einfach und kompakt erweist. Ein weiterer Grund war die Tatsache, dass mit Hilfe des NMA keine Funktionsvorschrift benötigt wird, sondern diskrete Werte betrachtet wer-

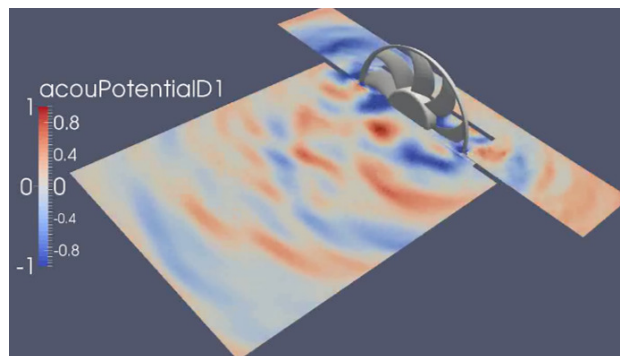


Abbildung 1: Schallausbreitung des akustischen Potentials um das Lüftermodul zum Zeitschritt t

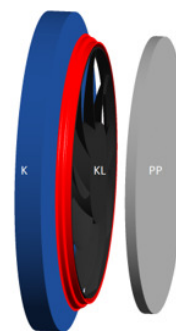


Abbildung 2: Aufbau des Lüftermoduls

den, wie es bei den Eingangs- und Zielparametern der Lüfteroptimierung gegeben ist.

Der NMA stellt ein Simplex-Verfahren dar. Als Simplex wird allgemein ein $(n+1)$ -Eck in einem n -dimensionalen Parameterraum bezeichnet. Um die Vorgehensweise des Optimierungsalgorithmus zu veranschaulichen, wird zunächst das Simplex-Verfahren im zweidimensionalen Raum betrachtet. Hierbei entspricht der Simplex einem Dreieck im Raum mit jeweils linear unabhängigen Eckpunkten. Die Funktionswerte an den drei Punkten, welche Werte der Zielfunktion der Optimierung darstellen, werden jeweils verglichen und sortiert, wobei der Punkt mit dem schlechtesten Funktionswert ersetzt und ein neues Dreieck gebildet wird. Dadurch entstehen fortlaufend neue Dreiecke, welche sich dem gesuchten Funktionsoptimum annähern. Die Abb. 3 veranschaulicht die Vorschriften des Algorithmus, welche die Konstruktion der Simplexe definiert.

Durch diese Vorschriften passt sich der Simplex die Werte der Zielfunktion an und zieht sich am Optimum zusammen, sodass die Funktionswerte der Eckpunkte immer mehr zusammenfallen. Aus diesem Grund bietet es sich

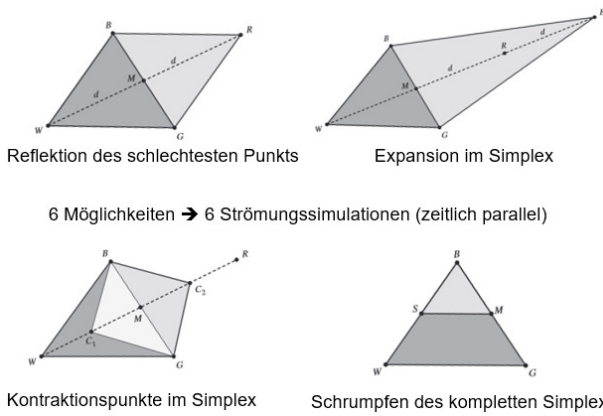


Abbildung 3: Nelder-Mead-Algorithmus

an, als Abbruchkriterium die Standardabweichung dieser Werte zu wählen oder eine gewisse Anzahl an Iterationen zu betrachten. Auch wenn dieser Algorithmus robuste Konvergenzeigenschaften aufweist, hängt die Geschwindigkeit dieser Methode von zwei Faktoren ab. Zum Einen von der Beschaffenheit der Funktion und zum Anderen vom Startsimplex. Weist das Problem am Optimum eine flache Topologie auf, so werden zusätzliche Iterationen bis zum Erreichen des Konvergenzkriteriums benötigt. Besitzt die Funktion mehrere Maxima oder Minima, so ist die Wahl des Startsimplexes von großer Bedeutung, da die Nelder-Mead Methode im Allgemeinen nur zu einem lokalen Optima konvergiert.

Um Laufradschaufeln anforderungsgerecht auszulegen werden diese in Teilfluträder aufgeteilt. Somit können die Profilschnitte in den selektierten Querschnitten je nach Zu- und Abströmbedingung sowie übertragener Leistung gezielt ausgelegt werden. Zur Optimierung wurde das Laufrad hier in fünf Teilfluträder unterteilt. An diesen fünf Profilschnitten wurden die Parameter bestimmt, welche zur Definition der Schaufelgeometrie notwendig waren. Dies war neben der Sehnenlänge des Profils, der Staffelungswinkel, sowie Pfeilung und V-Stellung. Die V-Stellung eines Tragflügels bezeichnet die Neigung der Schaufel, wohingegen die Pfeilung die Position der Krümmungslinie angibt, auf welchem die einzelnen Profilschnitte aufgewickelt wurden. Ist eine Neigung dieser in Drehrichtung des Laufrades vorhanden, so wird dieses als vorwärtsgepfeilt bezeichnet, wohingegen eine Neigung gegen die Drehrichtung zu einer Rückwärtsgepfeilung führt. Liegen Pfeilung und V-Stellung vor, wird dies als Sicherung bezeichnet, wie in Abb. 4 skizziert.

Die Abb. 5 verdeutlicht den gesamten Optimierungszyklus. Das Optimierungsprogramm besteht im wesentlichen aus vier gekoppelten Programmteilen. Zunächst erfolgte die CAD-Modellierung des Start-Designs des Laufrades im Auslegungsprogramm. Anschließend wurde die automatische Generierung strukturierter Gitter mittels ANSYS-Turbogrid durchgeführt, welches den Bereich um das Lüfterblatt vernetzt. Der nächste Schritt bestand darin, das erhaltene Gittersegment in Ansys-CFX zu importieren und die Randbedingungen der Simulation zu definieren. In ANSYS-CFX ist dabei das

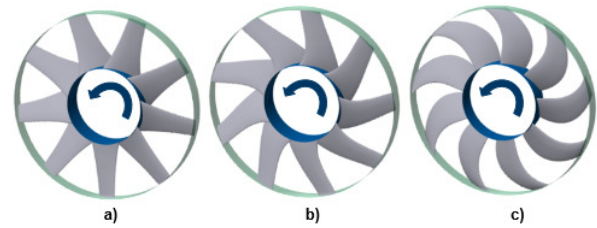


Abbildung 4: Geometrie des Schaufelblattes a) ohne Pfeilung und V-Stellung b) konstante Pfeilung 30 Grad c) variable Pfeilung und V-Stellung

Rechenetz des Gesamtsystems bereits hinterlegt, sowie die Randbedingungen definiert. Das importierte Gittersegment ersetzte hierbei nur den rotierenden Bereich des Lüfterblatts, welches von Turbogrid erstellt wurde. Das Strömungsfeld wird mittels RANS unter Verwendung des SST-Turbulenzmodells berechnet. Sobald die für eine Iterationsschleife nötigen Simulationen abgeschlossen sind, werden die Zielgrößen ausgewertet. Diese bilden Eingangsgrößen zur Optimierung der Laufradgeometrie durch den Optimierungsalgorithmus. Dieser Zyklus wird iterativ, bis zu einem anfänglich definierten Abbruchkriterium wiederholt.

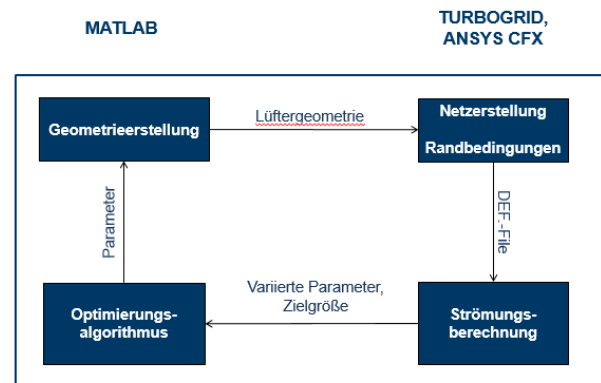


Abbildung 5: Algorithmus des Optimierungsverfahrens

Als Zielgröße für die Optimierung wurde der Volumenstrom des Lüfterlaufrades gewählt.

Optimierte Laufradgeometrie

Der Verlauf der Zielgröße über die getätigten Iterationsschritte kann in Abb. 6 betrachtet werden. Es ist zu erkennen, dass zu Beginn ein steiler Anstieg des Volumenstroms stattfindet. Nach der 15. Iteration werden nur noch geringfügige Verbesserungen erzielt, weshalb der Optimierungsprozess nach der insgesamt 40. Iteration beendet wurde.

Prozentual betrachtet wurde eine Steigerung des Volumenstroms um 6.3 Prozent erzielt. In Abb. 7 werden beide Lüftermodelle direkt gegenübergestellt. In Bezug auf den Staffelungswinkel wurde vor allem der zweite Schaufelschnitt stark verändert, wohingegen die übrigen Schnitte nur um einen moderaten Betrag erhöht wurden. Die V-Stellung des Lüfters weist überwiegend im unteren

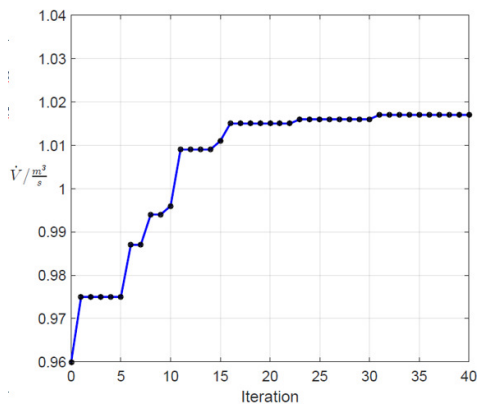


Abbildung 6: Iterationszyklus der Optimierung

Bereich starke Veränderungen auf. Die V-Stellung an der Schaufelspitze wurde sogar geringfügig verringert. Da der Nelder-Mead-Algorithmus die Eigenschaft besitzt auf lokale Optima zu konvergieren, wurden im Laufe des Optimierungsprozesses mehrere Startsimplexe verwendet um das Konvergieren auf Zwischenlösungen zu vermeiden.

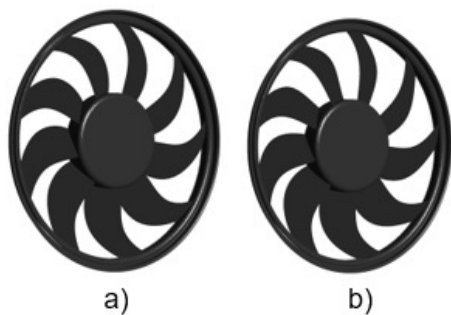


Abbildung 7: Laufrad a) Ursprungsgeometrie b) optimierte Geometrie

Neben der optimierten Zielgröße sind auch die resultierenden strömungsmechanischen und akustischen Eigenschaften des verbesserten Modells von Bedeutung. Ein wichtiges Kriterium ist die Druckverteilung an der Saug- und Druckseite. In den Abbn. 8 und 9 sind beide Lüfter mit ihrer lokalen Druckverteilung an der Saugseite dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Saugwirkung des optimierten Modells höher als die des Ausgangslüfters ist. Vor allem an der Blattspitze sind deutliche Verbesserungen zu erkennen. Im Vergleich dazu wurden auf der Druckseite der Lüfterblätter nur geringere Unterschiede festgestellt. Zwar kann auch hier ein verbesserter Druckaufbau im Blattspitzenbereich des optimierten Lüfters festgestellt werden, jedoch ist der Unterschied nicht so signifikant wie auf der Saugseite.

Um die Optimierung unter realen Bedingungen auch im Experiment nachzuweisen wurde das optimierte Laufrad ebenfalls gefertigt (siehe 10). Die Messungen erfolgten im Gesamtsystem, bestehend aus Ersatzkühler, Lüfter und Prallplatte. Es ergab sich hier ein erhöhter Volumenstrom von 0.7 Prozent bei einer geringeren Leistungsaufnahme des optimierten Lüfters. Damit konnte ein höherer Wir-



Abbildung 8: Druckverteilung an der Saugseite der Laufradschaufel für Ursprungsgeometrie

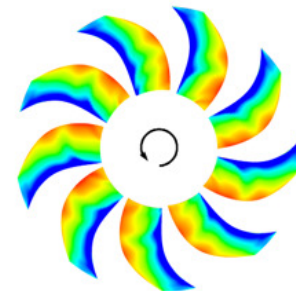


Abbildung 9: Druckverteilung an der Saugseite der Laufradschaufel für optimierte Geometrie

kungsgrad um 4,1 Prozent erzielt werden. Die Reduktion des Schalldruckpegels, in Abb. 11 im Terzspektrum dargestellt, lag bei 1.9 dB für gleiche vereinfachte Randbedingungen. Sie lässt sich auf eine geringere Interaktion der Laufradflügel mit der Spalt- und Zuströmung erklären, da die einzelnen Profilschnitte in Richtung Prallplatte verschoben wurden.



Abbildung 10: Ansicht des optimierten Laufrades

Zusammenfassung

Als Schlussfolgerung der bisherigen Untersuchungen kann festgestellt werden, dass es gelungen ist, in einem ersten Ansatz über einen Nelder-Mead-Optimierungsalgorithmus eine Verbesserung der hydrodynamischen Kennwerte aber auch damit verbunden eine Schallreduktion eines Laufrades in einem Kühler-Lüfter-Modul zu erzielen. Die Simulationsergebnisse konnten experimentell in einem generischen Versuchsaufbau bestätigt werden. Weitere Arbeiten sind notwendig, diese Verfahren auf praxisnahe Lüftergeometrien an-

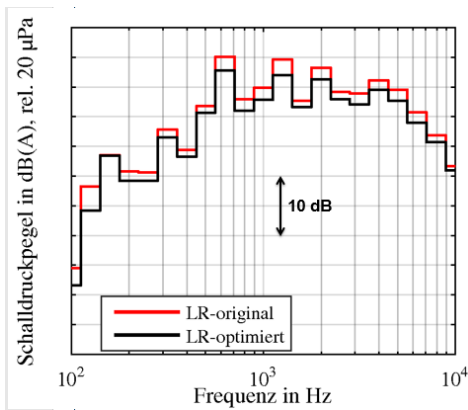


Abbildung 11: Schalldruckpegel im Terzspektrum für Ursprungslaufrad (rot) und optimiertes Laufrad (schwarz)

zuwenden und effizient zu verbessern. Ein weiteres Potential bildet die direkte Einbindung der Akustik in den Optimierungszyklus. Eine Möglichkeit ergibt sich hierbei durch den Einsatz von diskreten adjungierte Optimierungsverfahren.

Literatur

- [1] Müller, D. ; Stöber, M. ; Thümmler, A.: Einsatz der Response Surface Methode zur Optimierung komplexer Simulationsmodelle, ISSN 1612-1376, Universität Dortmund (2005)
- [2] Bamberger, K.; Carolus, T.: Optimization of Axial Fans with Highly Swept Blades with Respect to Losses and Noise Reduction. In: Fan - International Conference on Fan Noise, Technology and Numerical Methods (2012)
- [3] Bamberger, K.; Belz, J.; Carolus T.; Nelles, O.: Aerodynamic Optimization of Centrifugal Fans Using CFD-Trained Meta-Models, Proc. ISROMAC, International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Hawaii, Honolulu (2016)
- [4] Gauger, N.: Das Adjungiertenverfahren in der aerodynamischen Formoptimierung, Dissertation DLR, Braunschweig (2003)
- [5] Becher, M.; Zenger, F.; Tautz M.; Scheit, Ch.; Becker, S.: Numerical investigation of the influence of skewness and gap geometry on sound radiation of axial vehicle cooling fans, Proc. International Conference on Fan Noise, Technology and Numerical Methods, Lyon, France (2015)