

Optimierung der Topologie einer Aktorplatte mit genetischen Algorithmen auf Basis physiknaher Simulationsmodelle

A. Quinte, W. Jakob, H. Eggert und K.P. Scherer
quinte@iai.fzk.de

Institut für Angewandte Informatik / Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe

Kurzfassung

Im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens OMID (1999-2002) wird in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Bartels Mikrotechnik GmbH und SIMEC GmbH an der Entwicklung einer universellen fluidisch betriebenen Aktorplatte gearbeitet, die als integrierte Komponente eines Mikrosystems für die Umwandlung fluidischer Energie in mechanische Energie eingesetzt werden soll. Taktile Arrays für hochauflösende Braille-Displays oder hochpolige Mikrorelais gehören zu den vielfältigen Anwendungsfeldern für den Mikroaktor. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Topologieoptimierung mit evolutionären Algorithmen unter Verwendung eines parametrisierbaren FEM-Simulationsmodells. Der Einsatz von evolutionären Algorithmen erfordert für die Evaluierung kurze Simulationszeiten, so dass bislang physiknahe Simulationsmodelle auf Basis diskreter Elemente Methoden aufgrund ihrer üblicherweise hohen Rechenzeiten (im Vergleich zu höheren Modellen) hierfür nicht eingesetzt werden konnten. Die an unserem Institut entwickelte Parallelversion des Optimierungswerkzeuges GADO (Genetischer Algorithmus zur Design Optimierung) ermöglicht die Verwendung von physiknahen Simulationsmodellen bei der Optimierung mit einer globalen Suchstrategie.

1 Einleitung

Der fluidisch betriebene Mikroaktor (Abb. 1) besteht aus zwei übereinander geschichteten dünnen Kunststofffolien, in denen mit einem Excimerlaser für die Aktorplatte, Aktorkammer und fluidischen Anschlüssen die entsprechenden Mikrostrukturen eingebracht wurden. Die Strukturierung der ca. 100 μm dünnen Kunststofffolie für die Aktorplatte erfolgt in Form von ringförmigen und konzentrisch angeordneten Kerben.

Durch eine entsprechende Anzahl, Anordnung und Dimensionierung der Kerben kann das mechanische Verhalten der Aktorplatte gezielt beeinflusst werden. Ein wichtiges Optimierungsziel besteht darin, bei einem gegebenen Arbeitsdruck eine möglichst große Auslenkung der Aktorplatte zu erreichen. Gleichzeitig soll die Aktorplatte eine lange Lebensdauer besitzen, d.h. sie muß widerstandsfähig gegenüber häufigen Lastwechseln und äußeren mechanischen Einflüssen sein. Dazu trägt sowohl die Verwendung eines geeigneten

Materials als auch eine entsprechend gewählte Geometrie bei.

Die vorliegende Optimierungsaufgabe beschränkt sich somit nicht auf eine reine Dimensionierungsoptimierung, bei der eine fest vorgegebene Anzahl von Geometrieparametern optimiert werden muß, sondern sie umfaßt zusätzlich auch die Optimierung der Topologie in Form der Anzahl und Anordnung der Kerben. Die Optimierungsaufgabe führt damit zu einem Parametervektor mit dynamischer Länge in Verbindung mit einer hohen Parameterzahl. Durch die diskrete Anzahl der Kerben ist der Lösungsraum zudem multimodal. Aufgrund der Genauigkeitsanforderungen und der Topologievariabilität ist der Einsatz von FEM-Modellen bei der Lösung der Optimierungsaufgabe unumgänglich. Lokale Suchverfahren sind bei dieser Problemstellung in der Regel überfordert. Bereits die Multimodalität und die hohe Parameterzahl bilden für viele herkömmliche Suchverfahren eine große Hürde. Unter diesen Voraussetzungen sind globale Suchverfahren, wie die hier eingesetzten evolutionären Suchstrategien, besser geeignet.

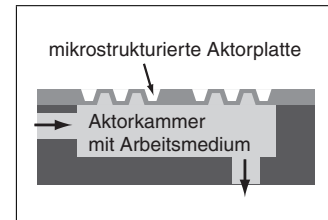


Abbildung 1: Mikroaktor mit Aktorplatte

2 GADO

GADO [1] ist die auf Designoptimierung zugeschnittene Variante des GLEAM-Verfahrens [2, 3], einem eigenständigen Evolutionären Algorithmus, der Elemente der Evolutionsstrategie [4] und der Genetischen Algorithmen [5] mit Konzepten der Informatik verbindet. Obwohl Evolutionäre Verfahren generell dazu geeignet sind, mit Parametervektoren dynamischer Länge umgehen zu können, erlauben dies die meisten Implementierungen im Gegensatz zu GLEAM nicht, so dass GADO ohne Modifikationen für die vorliegende Aufgabe eingesetzt werden konnte. Die benutzte Parallelversion basiert auf PVM und ist auf heterogene Rechnernetze zugeschnitten [6]. Auf eine weitergehende Beschreibung von GADO und GLEAM muß hier aus Platzgründen verzichtet werden.

3 Strukturmechanisches Modell der Aktorplatte

Für die Aktorplatte wurde ein in seiner Geometrie frei parametrisierbares FEM-Modell für das kommerzielle FEM-Tool ANSYS erstellt, mit dem das statische strukturmechanische Verhalten bei einer vorgegebenen homogenen Drucklast berechnet werden kann. Wegen seiner Rotationssymmetrie ist das FEM-Modell zweidimensional aufgebaut. Das FEM-Modell ist „Batch-Job“-fähig, d.h. unter Vorgabe eines Parametervektors kann der komplette Ablauf einer FEM-Simulation einschließlich der Geometriemodellerstellung, Gittergenerierung und Auswertung der Analyseergebnisse vollautomatisch durchgeführt werden. Dies ist eine notwendige Voraussetzung für die automatisierte Durchführung umfangreicher Parameterstudien oder rechnergestützter Optimierungen. Der Parametervektor enthält neben den Basisparametern, wie z.B. Radius und Dicke der Aktorplatte zusätzlich für jede Kerbe einen eigenen Parametersatz, welcher die Lage, Position, Weite, Höhe und Wandwinkel der

jeweiligen Kerbe beschreibt. Die Anzahl der Kerben ist im FEM-Modell nicht fest vorgegeben, sie wird von dem Parametervektor bestimmt. Die nichtlineare statische Strukturanalyse liefert als Ergebnis unter anderem die Auslenkung der Aktorplatte und den Spitzenwert für die Von-Mises-Spannung, die lokal in der Struktur unter Last auftritt. Die maximale Von-Mises-Spannung liefert eine Aussage über die mechanische Belastung der Aktorplatte. Insgesamt werden für die Simulation einer Aktorplatte ca. drei bis zehn Minuten auf einer Sun-Workstation benötigt.

4 Erster Entwurf der Aktorplatte

Ein erster manueller Entwurf für eine strukturierte Aktorplatte wurde von der Firma Bartels Mikrotechnik geliefert (siehe Abb. 2), der vier obenliegende sowie drei untenliegende Kerben enthält, die so angeordnet sind, dass die Aktorplatte im Querschnitt betrachtet eine Mäanderform aufweist. Von der Mäanderform werden vom Entwickler, ähnlich wie bei einem Faltenbalg, gute Eigenschaften hinsichtlich der erzielbaren Auslenkung bei gegebenem Arbeitsdruck erwartet. Der Druck wird von unten auf die gesamte Fläche der Aktorplatte beaufschlagt.

Die manuell entworfene Aktorplatte erreicht bei einem Arbeitsdruck von 100 hPa und einem E-Modul von 1000 MPa eine Auslenkung von 104,1 μm . Eine Modifizierung des manuellen Entwurfs, bei dem die Kerbenhöhe auf 60 μm erhöht wurde, bringt bereits eine Verbesserung der Auslenkung auf 160,3 μm . Im Vergleich dazu erreicht eine unstrukturierte Aktorplatte mit einer Dicke von 20 μm eine Auslenkung von 95,5 μm .

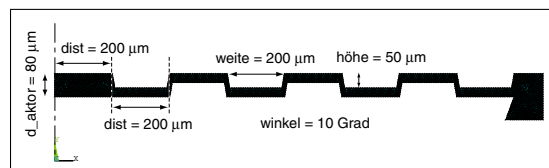


Abbildung 2: Manueller Entwurf der Aktorplatte

5 Strukturoptimierung der Aktorplatte

Das Ziel im Einsatz der FEM besteht wie bereits erwähnt unter anderem darin, eine geeignete Strukturierung für die Aktorplatte zu finden, mit der sich bei vorgegebenem Arbeitsdruck eine möglichst hohe Auslenkung erzielen lässt. Das zur Fertigung der Aktorplatte eingesetzte Herstellungsverfahren lässt trotz fertigungs- und materialbedingter Restriktionen eine sehr große Gestaltungsfreiheit für die Aktorplattenstrukturierung zu, so dass der Suchraum für eine Optimierung sehr umfangreich werden kann. Auf der einen Seite ist eine gezielte Suche nach einer optimalen Strukturierung ohne eine fundierte Kenntnis in der Strukturmechanik in Verbindung mit einer gehörigen Portion Erfahrung kaum noch erreichbar und auf der anderen Seite ist eine systematische Suche wegen der Größe des Suchraumes, wenn überhaupt, nur unter großem Zeitaufwand durchführbar.

Zur Lösung der vorliegenden Optimierungsaufgabe wird eine auf Parallel-GLEAM basierende Version von GADO eingesetzt. Durch die auf mehreren Netzwerkrechnern verteilte

Durchführung der Optimierung lässt sich die durchschnittliche Dauer der Gesamtoptimierung deutlich senken. Die Parallelversion von GADO besteht aus zwei Komponenten. Die eine Komponente läuft als Masterprozess auf dem lokalen Rechner des Anwenders. Die andere Komponente bildet die Slaveprozesse, die vom Masterprozess auf jeden der beteiligten Netzwerkrechnern gestartet werden. Der Masterprozess bildet die Schnittstelle zum Anwender, und er initiiert und koordiniert die Abläufe für die Durchführung einer Optimierung. Die eigentliche Optimierung wird von den Slaveprozessen durchgeführt, wobei jeder Slaveprozess für einen definierten Teil der Gesamtpopulation zuständig ist. Die Kopplung

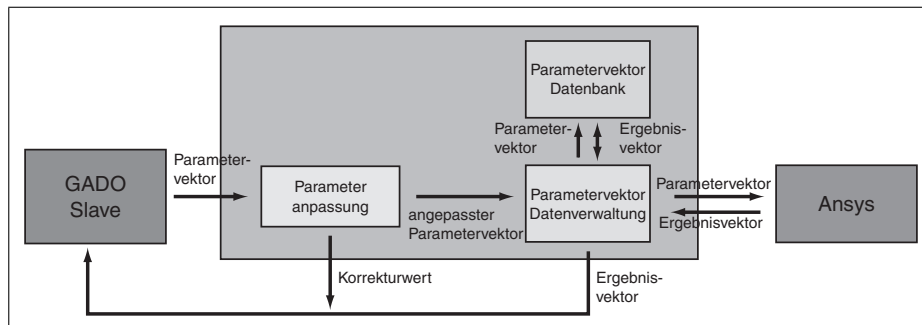


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Kopplung zwischen der Parallelversion von GADO und dem Simulator ANSYS

zwischen GADO Slaveprozess und ANSYS erfolgt über ein spezielles Interfaceprogramm (siehe Abb. 3), das die Ablaufsteuerung einer FEM-Simulation und die Aufbereitung der ausgetauschten Daten übernimmt. Bei der Aufbereitung werden die Kerben in der Reihenfolge, wie sie von GADO geliefert werden, auf Einhaltung der geometrischen Randbedingungen (Bereichsüberschreitung bzw. Überdeckung mit bereits platzierten Kerben) überprüft. Bei Überdeckung oder Bereichsüberschreitung wird die Kerbe nach vorgegebenen Regeln entsprechend in ihrer Position verschoben und gegebenenfalls wird ihre Weite reduziert. Wenn dennoch kein Platz mehr vorhanden sein sollte, wird eine Kerbe auch ganz aus dem Parametervektor entfernt. Zusätzlich liefert die Anpassungsroutine als Ergebnis einen Korrekturwert, der eine Aussage über den Umfang der vorgenommenen Anpassungen des Parametervektors macht und zur Verbesserung der evolutionär erzeugten Parametervektoren benutzt wird. Allerdings kann die Parameteranpassung auch dazu führen, dass aus unterschiedlichen Parametervektoren, die von GADO geliefert werden, identische Parametervektoren entstehen. Daher wurde, um unnötige Mehrfachsimulationen zu vermeiden, im Schnittstellenprogramm zusätzlich eine Parametervektordatenbank implementiert, in der bei einem Optimierungslauf alle bereits simulierten Parametervektoren zusammen mit den Ergebnissen abgelegt werden. Die Auswirkung der Parameteranpassung auf den Lösungsraum verdeutlicht das Beispiel in Abb. 4, bei dem bei zwei fest vorgegebenen Kerben die Position und die Weite der dritten Kerbe variiert wurde. Deutlich ist die Zerklüftung des Lösungsraumes durch die Überdeckung der Kerbe 3 mit den anderen beiden Kerben ohne die Parameteranpassung zu erkennen. Mit der Parameteranpassung bildet der Lösungsraum dagegen eine deutlich bessere Ausgangslage für die Optimierung. Mit dieser Konfigura-

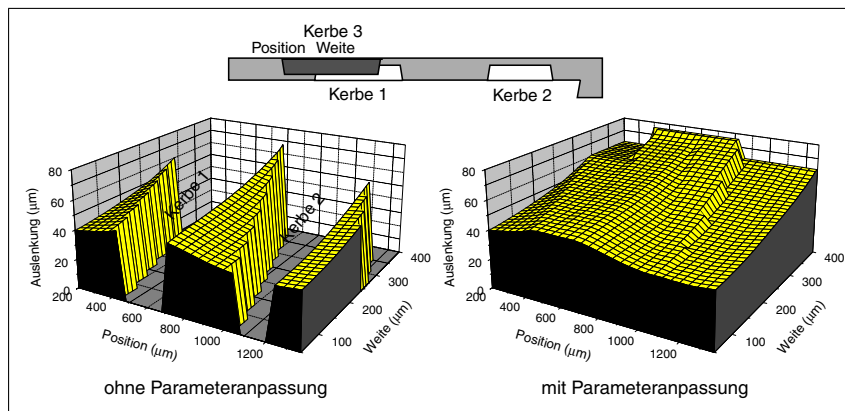


Abbildung 4: Der Lösungsraum im Vergleich mit bzw. ohne Parameteranpassung

tion wurden auf Basis des strukturellen FEM-Modells Optimierungsläufe durchgeführt, bei denen auch verschiedene fertigungs- und materialbedingte Randbedingungen mit berücksichtigt wurden. Im folgenden wird das Ergebnis eines dieser Optimierungsläufe vorgestellt.

6 Ergebnisse der ersten Strukturoptimierungsläufe

Der hier vorgestellte Optimierungslauf lief über ein Wochenende und dauerte insgesamt 2 Tage und 15 Stunden. Dabei waren zusätzlich zum lokalen Rechner insgesamt acht Netzwerkrechner an der Optimierung beteiligt.

Die Evolution lief über 61 Generationen bei denen von GADO insgesamt 28978 Parametervektoren generiert wurden. Von denen wurden wegen der Parameteranpassung letztlich mit 11302 weniger als die Hälfte dann auch tatsächlich simuliert. Als Bewertungskriterien wurden die Auslenkung der Aktorplatte, die maximale Von-Mises-Spannung und der Korrekturwert herangezogen. Randbedingungen für die Optimierung bildeten unter anderem die Einhaltung eines maximal zulässigen Aspektverhältnisses von 4:1 für die Strukturen, die Einhaltung einer minimalen Wandstärke von $20 \mu\text{m}$ und ein kerbenfreier Innenbereich. Weitere feste Vorgaben waren der E-Modul, der Arbeitsdruck (100 hPa), der Aktorplattenradius ($1600 \mu\text{m}$), der Wandwinkel und eine maximale Kerbenweite. Die Optimierungsparameter bildeten die Aktorplattendicke, jeweils die Weite, Position und Lage der Kerben und gemeinsam für alle Kerben die Kerbenhöhe. Die Optimierung lieferte unter den zuvor genannten Rahmenbedingungen eine Aktorplatte mit drei Kerben und der Aktorplat-

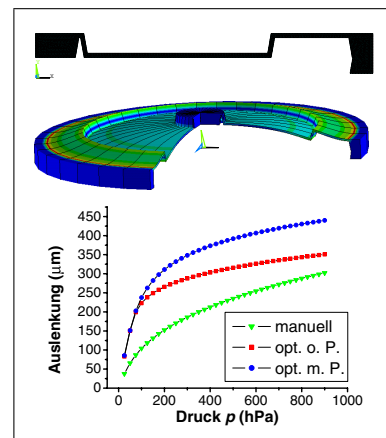


Abbildung 5: Mit GADO optimierte Aktorplatte

tendicke von 120 μm als Ergebnis (siehe Abb. 5).

Gegenüber dem ersten manuellen Entwurf erreicht die mit GADO optimierte Aktorplatte mit 238,3 μm eine mehr als doppelt so große Auslenkung. Bei näherer Betrachtung der optimierten Aktorplatte wird deutlich, dass bei der Optimierung die vorgegebenen Restriktionen sehr gut ausgereizt wurden. In Abb. 5 unten sind die Kennlinien der optimierten und der manuell entworfenen Aktorplatte dargestellt. Zum Vergleich dazu ist die Kennlinie einer optimierten Aktorplatte dargestellt, bei dessen Optimierung keine Parameteranpassung verwendet wurde (mittlere Linie).

7 Ausblick

Die Evaluierung des Aktorplattenmodells steht noch aus. Es wurden zwar mittlerweile bei dem Projektpartnern Bartels Mikrotechnik GmbH einige Prototypen der Aktorplatten hergestellt, allerdings lagen noch nicht alle für eine Evaluierung erforderlichen Daten vor. Durch das eingesetzte Simulationsverfahren erwarten wir kaum Genauigkeitsprobleme. Anpassungsbedarf dürfte dann vielmehr durch die Ermittlung der korrekten Materialparameter und Geometriedaten auftreten.

Literatur

- [1] *Jakob, W., Meinzer, S., Quinte, A., Süß, W., Gorges-Schleuter, M., Eggert, H.*: Partial Automated Design Optimization Based on Adaptive Search Techniques. In: I. C. Parmee (ed.): Adaptive Computing in Engineering Design and Control '96, PEDC, University of Plymouth, (1996), S.236-241.
- [2] *Blume, C.*: GLEAM - A System for Simulated „Intuitive Learning“. In: H.-P. Schwefel, R. Männer (eds.): Proc. of PPSN I, LNCS 496, Springer-Verlag, (1991), S.48-54.
- [3] *Blume, C.*: Optimized Collision Free Robot Move Statement Generation by the Evolutionary Software GLEAM. In: S. Cagnoni et al. (eds.): Real-World Applications of Evolutionary Computing, Proc. of EvoWorkshops 2000: EvoIASP, EvoSCONDI, EvoTel, EvoSTIM, EvoRob and EvoFlight, Springer-Verlag, (2000), S.327-338.
- [4] *Rechenberg, I.*: Evolutionsstrategie - Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Frommann-Holzboog, Stuttgart-Bad Cannstatt. 1973.
- [5] *Holland, H. J.*: Adaptation in Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor. 1975.
- [6] *Biegler, P.*: Entwurf und Realisierung einer flexiblen verteilten Kommunikation für einen parallelen evolutionären Algorithmus. Diplomarbeit, IAI, FZK, 1997.