

Parameteroptimierung elektrischer Maschinen mit Genetischen Algorithmen

O.Askour, S.Ruzbehi

Lehrstuhl für elektrische Antriebe und Maschinen
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

In dieser Arbeit handelt es sich um die Parameteroptimierung elektrischer Maschinen basierend auf die Methoden der genetischen Algorithmen, es werden die Parameter von einem Permanentmagnet-Synchronmotor (PMSM) mit zwei Polpaaren von der Firma Bosch analysiert. Das Ziel es ist einen möglichen optimalen Leistungszustand zu finden, der aus der besten Kombination des analysierten Parameters erreicht werden kann. Drehmoment, Gewicht und Geräusche sind wichtigen Aspekten als Qualitätskriterium in die gezielten Ergebnisse zu berücksichtigen. Die Implementierung dieser Analyse wird anhand einer Software-Anwendung aus FEMM und MATLAB Kombination als mathematisches Modell unter der Verwendung von "optimization Toolbox" durchgeführt. Am Ende sollten die Simulationsergebnisse mit Hilfe des GA-Verfahrens eine bessere Leistung nachweisen.

Index— Parameter Optimierung, Permanentmagnet-Synchronmotor (PMSM), genetische Algorithmen, Multi-objektive.

I. EINLEITUNG

Die elektrischen Motoren spielen eine zentrale Rolle bei jedem elektrischen Antrieb. Das Einsatzgebiet eines Elektromotors kann sich unterscheiden je nach angeforderte Leistungsfunktion [7]. Bei der Entwicklung der elektrischen Maschinen es ist sehr wichtig eine bessere Einstellung bezüglich der Geometrie, Einflussgrößen und die Leistungsfähigkeiten zu finden. In die Welt der Forschung sind unterschiedliche Optimierungsmethoden vorhanden und in dieser Arbeit handelt es sich um die Anwendung eine dieser Methoden für die Optimierung bestimmter elektrischen Maschinen, besonders hier steht den Fokus auf die Optimierung der Parameter permanentmagnetischer erregten Synchronmaschine. Basierend auf die wichtigsten fundamentalen grundlegenden Prinzipien der EM [6][8][2] ist mathematische Beschreibung der Parameter zu definieren. Einerseits bei der Parameteroptimierung ist die Festlegung und Variieren der Einflussgrößen (strukturell Parameter) [10] sehr wichtig, um eine optimale Lösung zu finden, andererseits ist die Anwendung der genetischen Algorithmen [1] als ein Verfahren zur Unterstützung der Optimierungsvorgang nötig, daher wird in dieser Arbeit die Multi-objektive Methode durch das Pareto Konzept verwendet [3][4], um die Optimierungslösungen von der Simulationsergebnisse zu beweisen.

Die Anforderungen der Optimierung in dieser Arbeit befassen sich mit der Minimierung des Volumens und Drehmomentwelligkeit, um ein leichter und stabiler Motor zu entwickeln, bzw. muss das durchschnittliche Drehmoment maximiert sein, damit ein schnelles Drehfeld realisiert werden kann.

II. PRINZIP DER PERMANENTERREGTEN SYNCHRONMASCHINE

Das magnetische Feld rotierender elektrischer Maschinen wird entweder mit Stromdurchflossenen Erregerwicklungen elektrisch oder mit Hilfe von Dauermagneten permanentmagnetisch erregt. Bei Permanentmagnet

Synchronmaschinen werden die magnetischen Vorzugsrichtungen durch die Gestaltung des Rotors festgelegt. Allgemeinen können der PSM in zwei unterschiedliche grundsätzliche Bauformen eingeteilt werden. Maschinen, bei denen auf der Oberfläche des Rotors häufig eine im entmagnetisierten Zustand Magnete aufgebaut sind, da sich das Magnetmaterial bezüglich seiner Permeabilität ähnlich wie Luft verhält, im Vergleich dazu sind andere Bauform mit einem vergrabenen Magneten im Rotor und sie ist aufwändiger als die erste Variante.

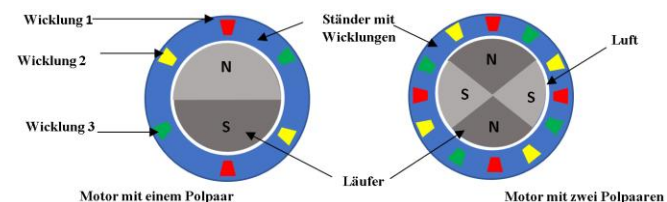


Fig. 1. Darstellung Struktur einer PMSM

Der Synchronmotor verfügt über eine ähnliche Konstruktion wie der bürstenlose Gleichstrommotor, dabei liegt der Unterschied in der Art der eingepprägten Ströme in die Ständerwicklungen. General sind die Wicklungen im Ständer (Stator) angeordnet und der Läufer (Rotator) ist mit Permanentmagnet versehen.

Zur Erklärung des Funktionsprinzips einer PSM ist ein Ständer mit einem 3-phasigen Wicklungssystem zu betrachten (Fig. 1).

Durch die fließenden Wechselströme in den Wicklungen wird eine Phasenverschiebung (120°) zwischen die Ströme aufgetreten und damit wird es ein rotierendes Magnetfeld mit einem Nord- und Südpol im Ständer des Motors erzeugt. So entsteht ein Drehmoment auf den Läufer und dadurch folgt der Rotation des Magnetfeldes. Bedingungsweise müssen sich der Läufer immer mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Drehfeld des Ständers drehen, um das synchrone Verhalten zu erzielen [7].

III. KONZEPT GENETISCHER ALGORITHMEN

Die genetischen Algorithmen gehören zu der Evolutionären Algorithmen, die in der Forschung bei der Optimierungsprobleme als ein beliebtes Verfahren beachtet wird. Genetische Algorithmen können parallel mit mehreren Lösungen (Kombinatorische Optimierung) arbeiten [9]. Dabei ist der Begriff Individuum ein wichtiger Aspekt bei der Lösung eines Problems, indem eine Menge davon als Population genannt wird. Die einzelnen Individuen werden innerhalb einer Population jeweils durch ein Chromosom (Einzelne Lösung) abgebildet, die sich in mehrere Gene unterteilt ist [9]. Basierend auf Grundkonzepten der Selektion, Kombination und Modifikation wird die Zielfunktionswerte verbessert.

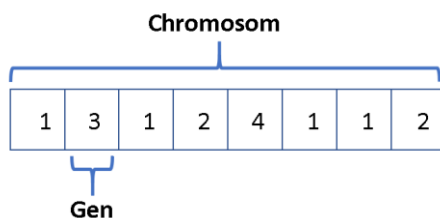


Fig. 2. Darstellung ein Chromosom

A. Ablauf genetischer Algorithmen

Der Zweck der genetischen Algorithmen ist die Verbesserung der Chromosomen bei den Generationen durch eine sukzessive Reihenfolge von Wiederholungen der Selektion und Kombination. Dabei wird es bei der Lösungssuche sowohl zufallsgesteuerte als auch zielgerichtete Elemente kombiniert [9].

Der Vorgang des genetischen Algorithmus kann in verschiedenen Schritten unterteilt sein werden, beispielsweise bei der Optimierung der PMSM [1] [2]:

- Durchführung der Einflussgrößen.
- Bestimmung der Parameter werten (Ausgangspopulation).
- Berechnung der Fitnesswerte für jede Einflussgröße.
- Durchführung der Elternselektion.
- Durchführung der Crossover-Operationen.
- Durchführung der Mutations-Operationen.
- Auswahl des passenden Lösungsbereichs.

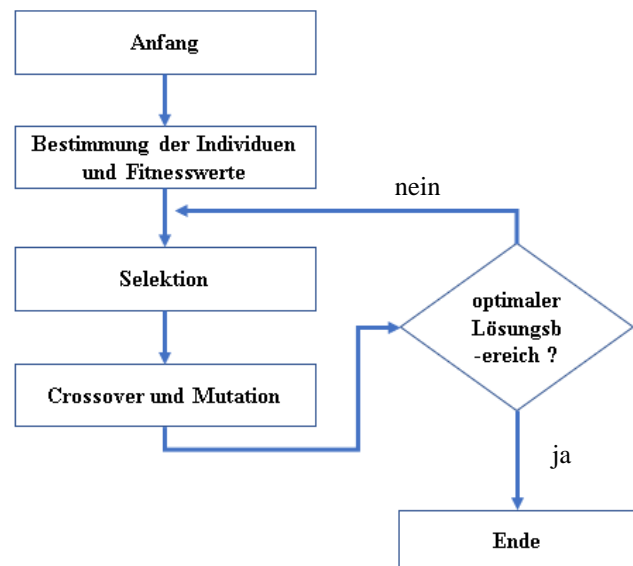


Fig. 3. Darstellung Ablaufgenetischer Algorithmen

B. Crossover-operationen Beispiel

Im Allgemeinen werden die Crossover-Operationen in drei Gruppen unterteilt:

- Kombinierende Operatoren.
- Interpolierende Operatoren.
- Extrapolierende Operatoren.

Als Beispiel ist One-Point Crossover eine am meisten verwendeter Operator, bei dem alle Gene die gleichen Chancen haben, ausgewählt zu werden.

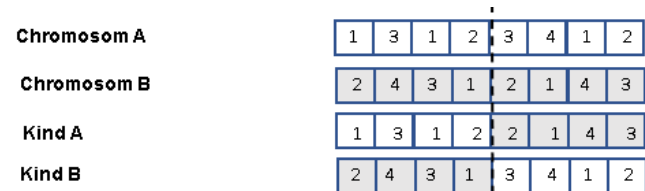


Fig.4. Darstellung der Methode One-Point Crossover

C. Mutations-Operationen Beispiele

Im Vergleich der Crossover-Operatoren üben die Mutationen nur geringfügige Änderungen auf die Chromosomen d.h. nur auf eine bestimmte einzelne Gene fokussiert wird. Allgemeinen unter der Mutation es sind zwei bekannten Gruppen zu sehen:

- Uniform Mutation
- Non-Uniform Mutation

Die Point-Mutation funktioniert so, dass das ursprüngliche Gen gelöscht, und ein neues zufällig bestimmt wird.

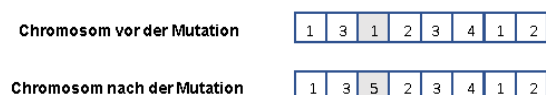


Fig. 5. Darstellung der Methode Point Mutation

IV. DER OPTIMIERUNGSVORGANG UND ANWENDUNG VON GENETISCHEN ALGORITHMEN

In diesem Abschnitt werden den Verlauf und die Ergebnisse der einzelnen optimierten Parameter und Einflussgrößen ausführlich vorgestellt. Im Allgemeinen handelt es sich um drei Parameter, das mittlere Drehmoment, Drehmomentwelligkeit und das Volumen, das mit Hilfe der MATLAB und FEMM Software simuliert werden und basierend auf die Lösungen des genetischen Algorithmus kann die ausgewählten simulierten Lösungen verglichen werden, um eine einzelne finale Lösung zu validieren.

Der Optimierungsvorgang läuft so, dass die Einflussgrößen einzeln in einem bestimmten Größenbereich variieren und die Veränderung der gezielten Parameter betrachtet wird. Diese Methode wiederholt sich für jede Einflussgröße und daraus soll sich für jeden Schritt einen optimalen Wert ergeben werden bzw. eine Ausgangspopulation für den genetischen Algorithmus erstellt werden, die danach in MATLAB GA Toolbox generiert werden muss, um eine allgemeine Vorhersage der Lösungen zu beweisen. Als nächster Schritt wird die besten Einflussgrößen zusammen in einem neuen Bauteil konstruiert und alle einzelne Lösungspunkte der vorherigen Schritte wieder in dem GA Toolbox laufen lassen, um eine finale Lösungsvorschlag mit den optimierten Parametern der neuen Maschinenform zu vergleichen. Einerseits ist der Ausgangspunkt der Einflussgröße in vier Teile aufgelistet:

- **Das innere Kreissegment vom Rotator = 12,5 mm.**
- **Die Magnetbreite = 40 °.**
- **Die Magnetdicke = 2,4 mm.**
- **Das äußere Kreissegment des Stators = 22 mm.**

Andererseits ist der Ausgangspunkt der Parameter der Synchronmaschine wichtig für den Optimierungsvorgang, da die neuen Haupt-optimierten Parameter damit verglichen werden müssen:

- **Mittleres Drehmoment = 1,823847 N.m.**
- **Drehmomentwelligkeit = 0,4261973 N.m.**
- **Volume = 5,407273 · 10⁻⁵ mm³.**

A. Das innere Kreissegment vom Rotator Optimierung.

Bei der ersten Optimierungsphase soll die Position des Kreissegments vom Rotator in einem Wertbereich in den X, Y Koordinatensystem von 5,5 mm bis 25 mm variiert wird (Fig.6) und bei jeder Position muss das entsprechende Drehmoment und das Volumen ermittelt werden (Fig.7& Fig.8)

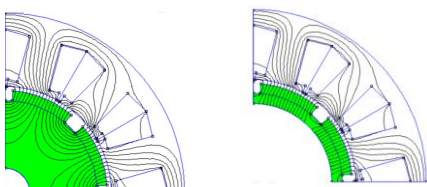


Fig. 6. Darstellung des maximalen Rotators dicke [12,5 mm] und minimalen dicke [3,5 mm]

Das Volumen verhält sich abnehmend bei zunehmenden Positionen des Kreissegments, das heißt, dass die dicke vom Rotator kleiner wird und dadurch ist das Volumen entsprechend auch.

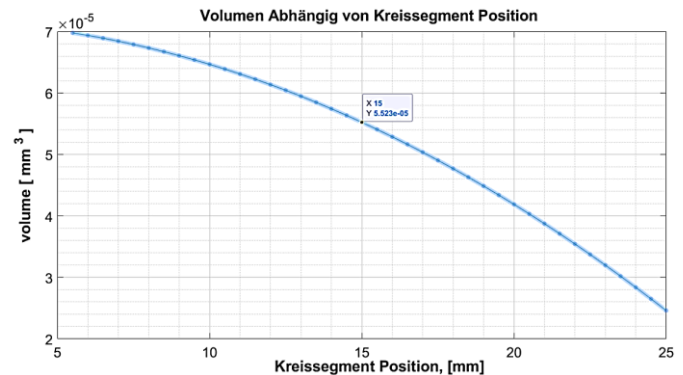


Fig. 7. Das Verhalten des Volumens bezüglich der Kreissegment Position

Das Drehmoment verändert sich abhängig von dem Kreissegment mit unterschiedlichen Werten zwischen 1,628 N.m und 1,636 N.m. In diesem Schritt muss den möglichen besten Wert des Drehmoments bezüglich des Volumens ausgewählt werden, die die Optimierungsanforderungen erfüllen kann.

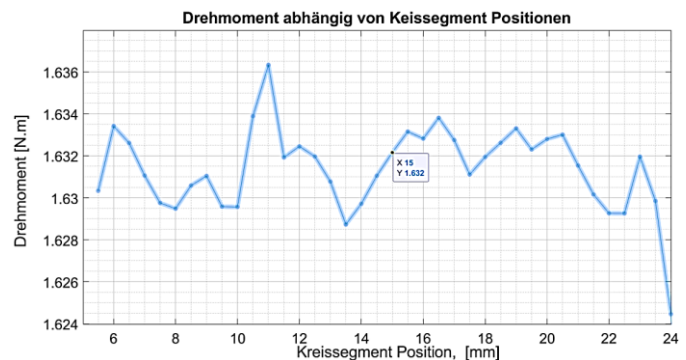
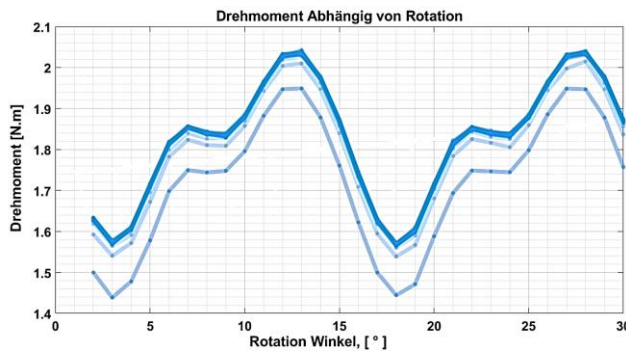


Fig. 8 Darstellung des Verhaltens von Drehmoment.

Nachdem der Ermittlung von dem Allgemeinen Drehmoment und Volumen soll das durchschnittliche Drehmoment und die Drehmomentwelligkeit festgestellt werden. Nun muss eine Rotation von 0° bis 30° auf den Rotator mit unterschiedlichen Kreissegmenten angewendet (Fig. 9), die aus dem vorherigen Schritt ermittelt wurde und daraus wird das durchschnittliche Drehmoment und Drehmomentwelligkeit berechnet und graphisch dargestellt (Fig. 10 & Fig. 11).



9. Rotation von allen Kreissegment-Änderungen

Fig.

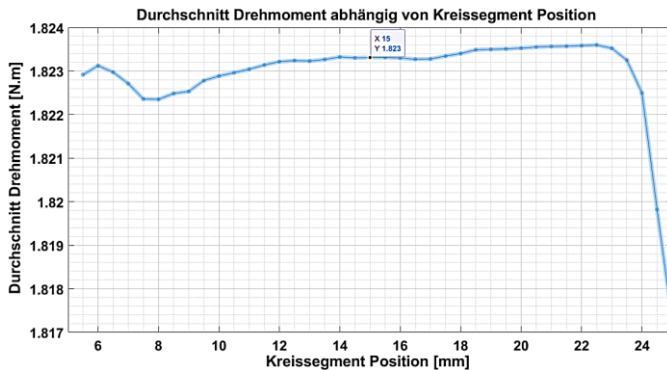


Fig. 10. Durchschnitt Drehmoment bei jeder Kreissegment Position

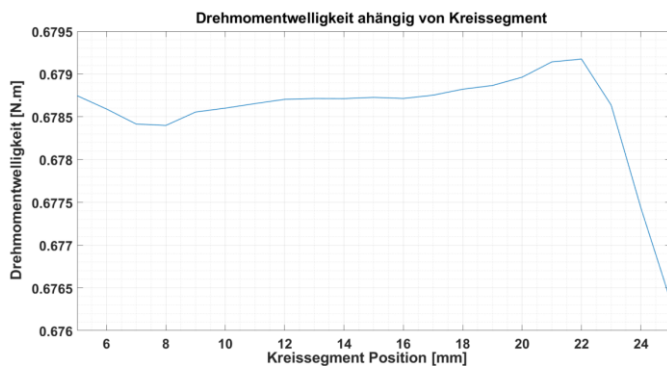


Fig. 11. Drehmomentwelligkeit bei jeder Kreissegment Position.

Die Drehmomentwelligkeit kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$\frac{\max(\text{Drehmoment}) - \min(\text{Drehmoment})}{2 * \text{mittleres Drehmoment}}$$

Die Simulation liefert verschiedenen Werte und draus ist die dargestellten Ergebnisse in der Abbildung (Fig. 13) ein besserer Optimierungsbereich und damit ist der erste Teil der Optimierung erreicht

TABELLE I
OPTIMALER PARAMETER DARSTELLUNG

	initial Größe (Ist)
rotator kreissegment Position	Arc position = 15 mm
Optimierung	
Volumen [mm ³]	6,3085100E-05
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	1,8233110E+00
Drehmomentwelligkeit [N.m]	5,5130960E-01

	Optimum	Prozent
rotator kreissegment Position	Arc Position = 20,5 mm	(Gewin/Verlust) %
Optimierung		
Volumen [mm ³]	4,0328360E-05	36%
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	1,8235520E+00	0%
Drehmomentwelligkeit [N.m]	5,5138260E-01	0%

Der optimale Zustand in diesem Fall liegt bei der Position 20,5 mm, das heißt eine 7 mm Dicke von dem Rotator. Einerseits mit diesem Größenwert wird 36 % des Volumens reduziert, andererseits ist das durchschnittliche Drehmoment und die Drehmomentwelligkeit unverändertlich geblieben (TABELLE I). Die finale Bauform des Stators ist in der Abbildung (Fig. 12) gezeigt.

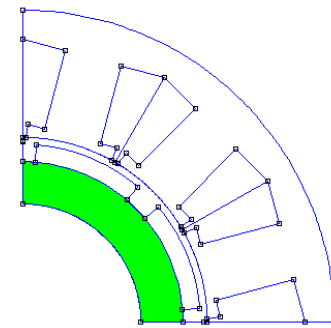


Fig. 12. Die finale optimierte Größe des Rotators

Durch den genetischen Algorithmus kann die Lösung aus der Simulation als Valid bestätigt werden, da in dem markierten Bereich (Volume= 4,698.10⁻⁵ mm³; D. Drehmoment = 1,823 N.m) in der Abbildung (Fig. 13) einen passenden optimalen Pareto Punkt gibt, der den ermittelten optimalen Wert der Simulation entspricht.

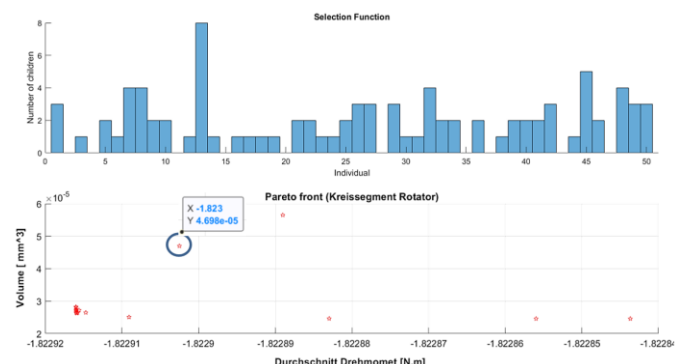


Fig. 13. Pareto Darstellung von mögliche GA Lösung.

B. Die Magnetbreite Optimierung

Um ein optimaler Punkt bei der Magnetbreite Skalierung zu erreichen, soll in dieser Optimierungsphase einen Winkelbereich zwischen 24° und 43° durchgeführt werden. Mit Hilfe der geometrischen Formeln (1) (2) kann es verschiedenen Magnetbreiten auf die XY-Achsen erzielt werden und durch die Verbindung zwischen MATLAB und FEMM Software die gewünschte Struktur (Fig.15) implementiert und dann wird alle resultierende Magnetbreiten simuliert genau wie der vorherige Schritt.

$$X = \cos(\alpha(i)) * (\text{Radius} + \text{Dicke}). \quad (1)$$

$$Y = \sin(\alpha(i)) * (\text{Radius} + \text{Dicke}). \quad (2)$$

$$\text{mit } \alpha(i) = 24 \dots n=43$$

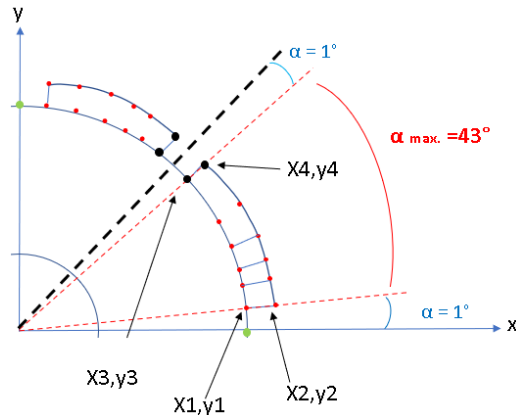


Fig. 14 geometrische Darstellung der Magnetbreite

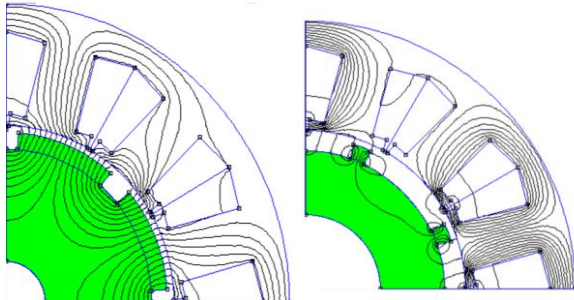


Fig. 15. Darstellung der maximalen Magnetbreite [43°] und minimalen Magnetbreite [24°]

Die Magnetbreite ist eine wichtige strukturelle Größe, da die Magnetflussdichte stark beeinflusst werden kann und dadurch auch das Drehmoment. Ob die Struktur des Magnets breiter oder schmaler ist, das soll ebenfalls das Verhalten des Volumens bzw. Dreh-Geschwindigkeit einigermaßen orientieren und das ist genau, was aus der Simulation interpretiert werden darf. Daher das Volumen der Rotor und Magnetstück verhalten sich einerseits pauschal ansteigend bei breiterer Magnetform (Fig. 16) andererseits benimmt sich das Drehmoment proportional mit dem Volumen, das heißt, dass ein zunehmendes Volumen des Magnets sich auf ein starkes Magnetfeld unabhängig von Stromdurchflossen bezieht und damit ein höheres Drehmoment (Fig. 17) resultiert wird.

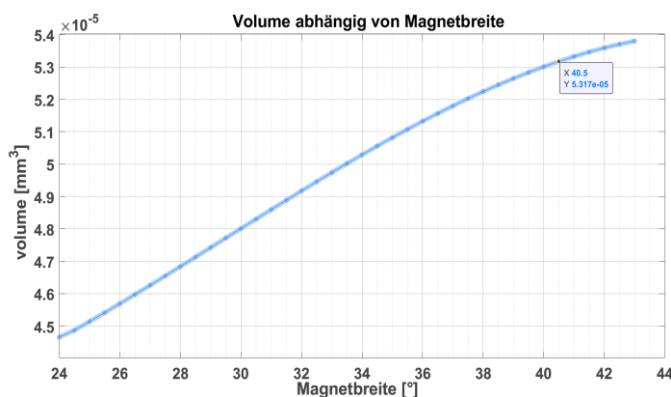


Fig. 16. Das Verhalten des Volumens bezüglich der Magnetbreite

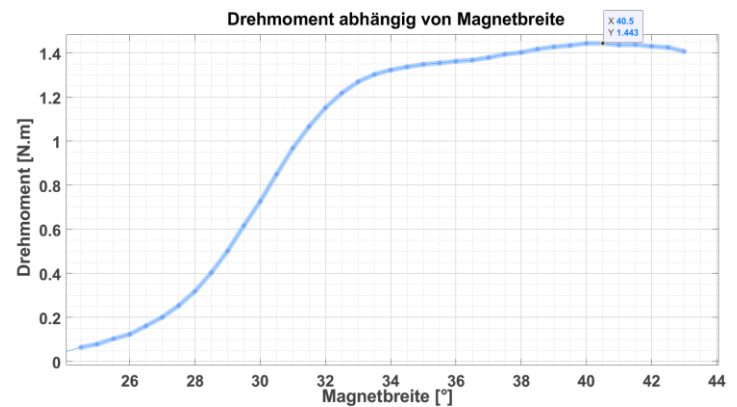


Fig. 17. Darstellung des Verhaltens von Drehmoment.

Nun wird ein fließender Wechselstrom in den Wicklungen angewendet, um eine Phasenverschiebung zwischen die Ströme aufzutreten, dadurch wird ein Drehmoment entstehen. Wegen der Symmetrie wird eine Phasenverschiebung von 30° erzielt und damit 120° bei einer vollen Struktur. Dies Verfahren wird sukzessiv für alle Magnetbreiten implementiert, D.h. jeweils eine Rotation von 30° (Fig. 18).

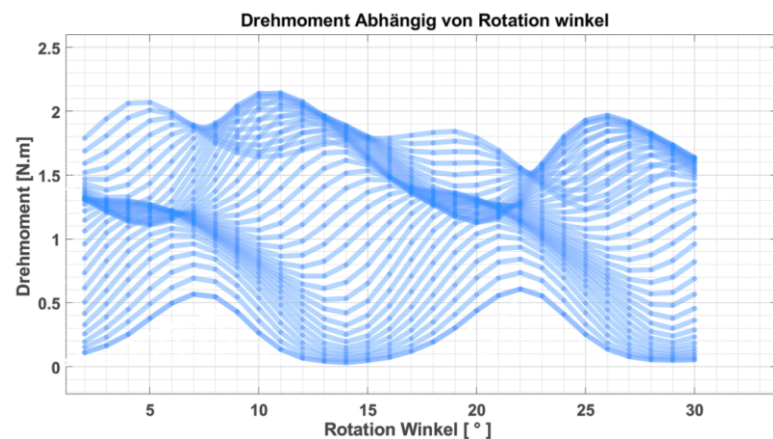


Fig. 18. Rotation von allen Magnetbreite-Änderungen

Aus der Resultierenden Rotationen wird ein durchschnittliches Drehmoment für jede Einflussgröße Änderung berechnet und dargestellt. Ein zunehmender Wertebereich zwischen 1,9 N.m und 1,64 N.m bei steigender Magnetbreite ist in der Abbildung erfasst (Fig. 19).

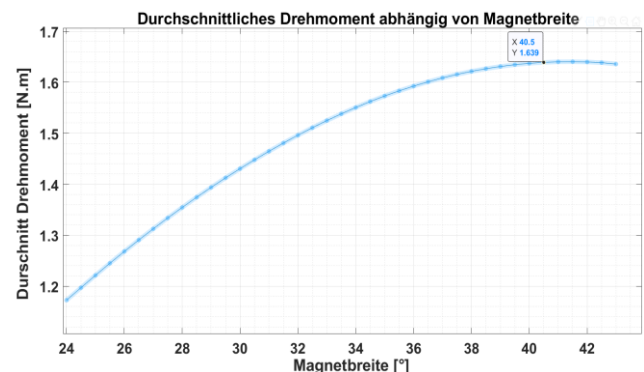


Fig. 19. Durchschnitt Drehmoment bei jeder Magnetbreite

Im Gegensatz zu dem mittleren Drehmoment hat das Drehmomentwelligkeit einen Wertbereich zwischen 1,23 N.m und 1,75 N.m erreicht (Fig. 20), was der starke Einfluss des Magnetteils im Vergleich zu dem Kreissegment der Rotator beweisen kann. Ein optimaler Punkt festzustellen, wird in diesem Fall ziemlich kritisch, wenn man die Anforderungsbedingungen halten will. Daher kann man entweder keine erhebliche Veränderung der Magnetbreite durchführen oder nur auf die Reduzierung des Volumens fokussieren und damit gleichzeitig auch eine Reduzierung der Drehmomentwelligkeit erzielen, weil hier ein besseres Durchtritt-Drehmoment mit einer höheren Drehmomentwelligkeit abhängig ist, dadurch ein schlechtes Verhalten des Motors zu erhalten.

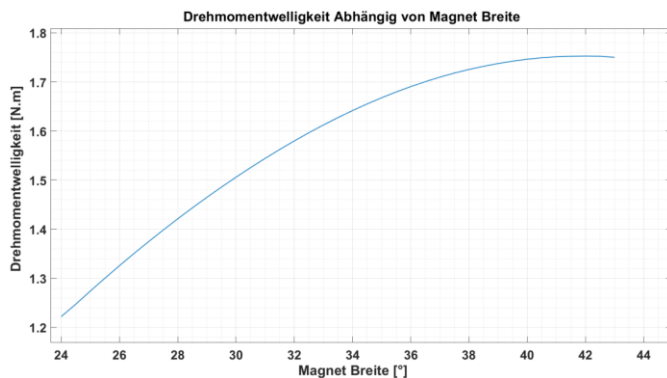


Fig. 20. Drehmomentwelligkeit bei jeder Magnetbreite

In diesem Sinne ist die Möglichkeit auf das Volumen und Drehmomentwelligkeit zu fokussieren, ziemlich ein befriedigender Weg, damit das Volumen um 2 % bzw. das Drehmomentwelligkeit um 1 % reduziert wird, aber 1% Verlust von dem durchschnittlichen Drehmoment erzielt werden (TABELLE II).

TABELLE II
OPTIMALER PARAMETER DARSTELLUNG

	initial Größe (Ist)
Magnet Breite (Rotator) Optimierung	Magnetbreite = 40.4°
Volumen [mm³]	5,3202330E-05
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	1,6389400E+00
Drehmomentwelligkeit [N.m]	1,7592990E+00

	Optimum	Prozent
Magnet Breite (Rotator) Optimierung	Magnetbreite = 38°	(Gewin/Verlust) %
Volumen [mm³]	5,2282930E-05	2%
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	1,6214000E+00	-1%
Drehmomentwelligkeit [N.m]	1,7404700E+00	1%

Der optimale Parameter für das Magnetstück liegt bei der breite 38°, damit eine finale Bauform der Magnetbreite ist in der Abbildung (Fig. 21) gezeigt.

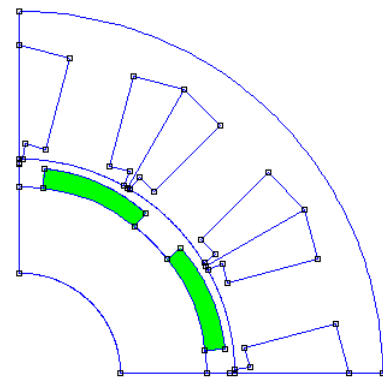


Fig. 21. Die finale optimierte Größe der Magnetbreite

Der genetische Algorithmus liefert einen optimalen Punkt, der bei einem Volumen = $5,382 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3$ und ein durchschnitt Drehmoment = 1,61 N.m liegt (Fig. 22), und das entspricht einigermaßen den ermittelten optimalen Wert der Simulation.

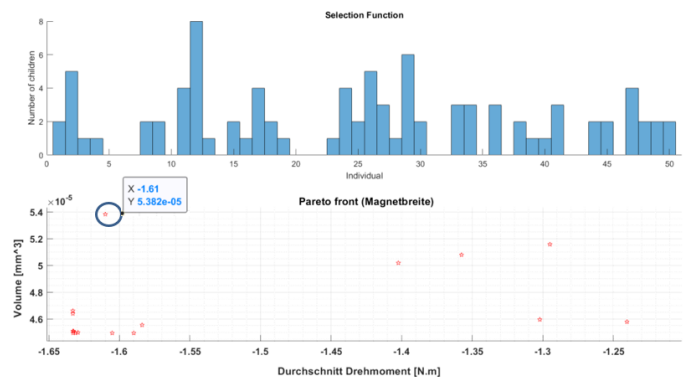


Fig. 22. Pareto Darstellung von mögliche GA Lösung

C. Die Magnetdicke Optimierung

Die Position der Magnetdicke wird in einem Wertbereich auf die XY-Achsen von 0,5 mm bis 2,9 mm betrachtet (Fig.23). Das Drehmoment und das Volumen werden gleichmäßig zunehmend verhalten d.h. bei einem dickeren Magneten ist das Drehfeld intensiv (Fig.23), wobei das Drehmoment höheren Werte erreichen kann.

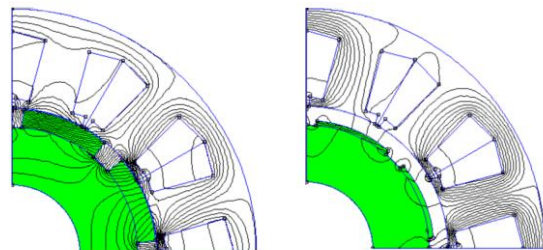


Fig. 23. Darstellung der maximalen Magnetdicke [2,9 mm] und minimalen Magnetdicke [0,5 mm]

Die Abweichung von der ursprünglichen Magnetdicke (2,4 mm) ist in dieser Phase sehr entscheidend, da eine Dicke mehr als 2,9 mm bei der Rotation sehr kritisch sein kann und ein

optimiertes Model aus der Magnetbreite kann sehr gute bzw. sehr schlechte Ergebnisse liefern und das wegen des linearen Verhaltens von Volumen und Drehmoment (Fig.24 & Fig.25)

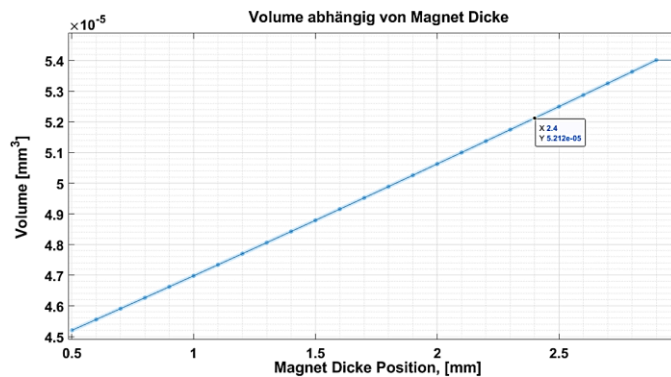


Fig. 24. Das Verhalten des Volumens bezüglich der Magnetdicke Position.

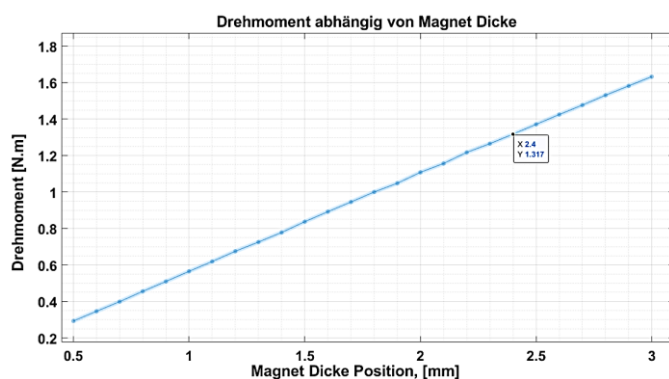


Fig. 25. Darstellung des Verhaltens von Drehmoment.

Bei der Rotation ist im Allgemeinen die Veränderung des Drehmoments kleiner im Vergleich zu der Veränderung bei der Optimierung von Magnetbreite, der Grund dafür kann bei der Skalierung der Wertbereiche liegen, da die Magnetdicke nur kleine Werte annehmen bzw. kleinere Flächen abdecken kann.

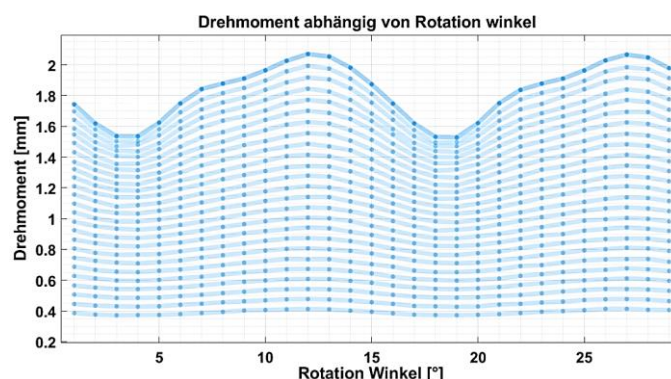


Fig. 26. Rotation von allen Magnetdicke-Änderungen

Aus der Simulation Ergebnisse kann man feststellen, dass das durchschnittliche Drehmoment und das Drehmoment sich linear verhalten und draus eine bessere Reduzierung der Drehmomentwelligkeit schaffen aber schlechtes Durchschnitt Drehmoment (Fig.27 & Fig.28).

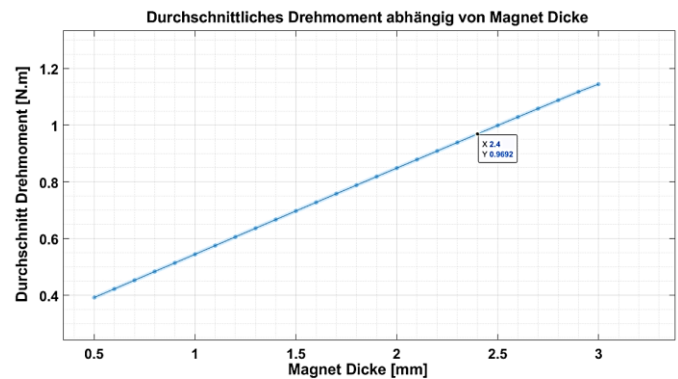


Fig. 27. Durchschnitt Drehmoment bei jeder Magnetdicke

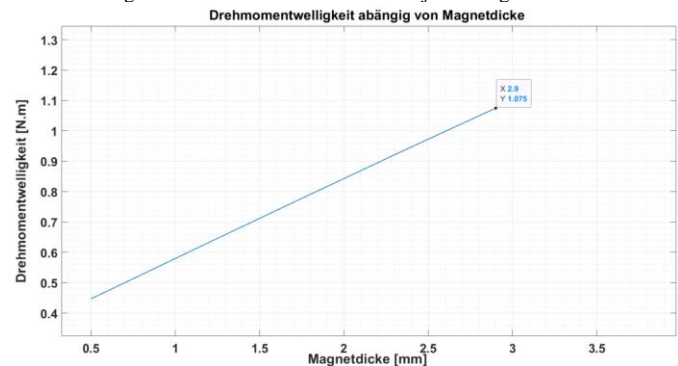


Fig. 28. Drehmomentwelligkeit bei jeder Magnetdicke

Die günstige optimale Lösung wäre vielleicht in diesem Fall bevorzugt, wenn die Magnetdicke nicht verändert wird, um die möglichen Verluste zu vermeiden, aber das heißt nicht, dass man keine besseren Lösungen erzielen kann, Bedingungsweise muss eine der Anforderungen aufgegeben wird.

TABELLE II
OPTIMALER PARAMETER DARSTELLUNG

	initial Größe (Ist)	
Magnet Dicke (Rotator) Optimierung	Magnetdicke = 2.4 mm	
Volumen [mm³]	5,1746330E-05	
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	9,6917650E-01	
Drehmomentwelligkeit [N.m]	8,2267390E-01	
	Optimum	Prozent (Gewin/Verlust) %
Magnet Dicke (Rotator) Optimierung	Magnetdicke = 2.2 mm	
Volumen [mm³]	5,0999830E-05	1%
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	9,0900630E-01	-6%
Drehmomentwelligkeit [N.m]	7,7159920E-01	6%

Entschieden ist für die Magnetdicke von 2,2 mm, damit soll mit einem Verlust von 6% das durchschnittliche Drehmoment rechnen, gegenseitig ist eine Reduzierung des Volumens um 1% bzw. Drehmomentwelligkeit um 6 % erreicht und die finale Magnetdicke ist in der Abbildung (Fig. 29) vorgestellt.

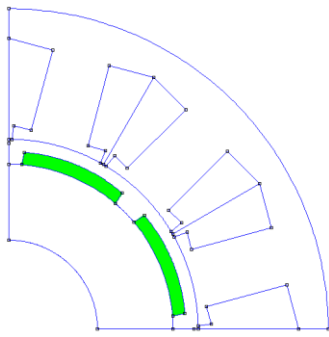


Fig. 29. Die finale optimierte Größe der Magnetdicke

Der genetische Algorithmus liefert einen optimalen Punkt, der bei einem Volumen = $4,488 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3$ und ein durchschnitt Drehmoment = $0,9796 \text{ N.m}$ liegt (Fig. 30).

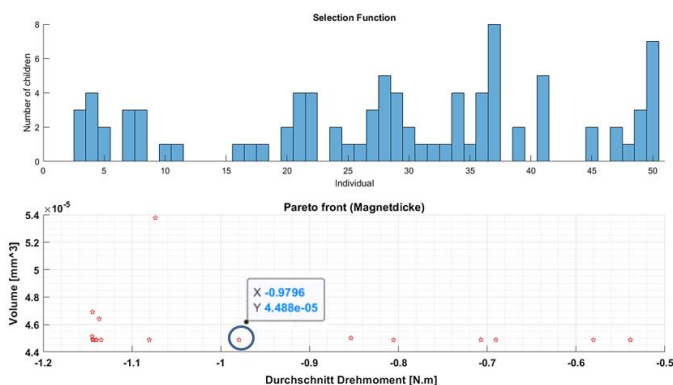


Fig. 30. Pareto Darstellung von mögliche GA Lösung

D. Das äußere Kreissegment des Stators Optimierung

Bei dieser letzten Optimierungsphase soll die Position des äußeren Kreissegments vom Stator in einem Wertebereich basierend auf die XY-achsen von 50 mm bis 70 mm variieren, was eine Stator-dicke von 18 mm bis 38 mm entspricht (Fig.31). Diese Positionen werden unterschiedliche Drehmoment und Volumen Werte liefern (Fig. 32 & Fig. 33).

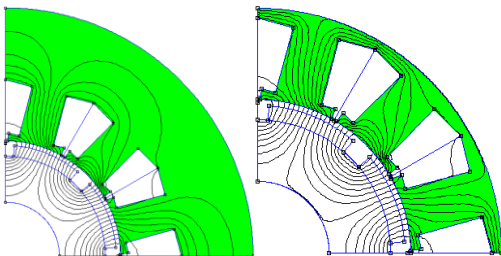


Fig. 31. Darstellung des maximalen Stators dicke [38 mm] und minimalen dicke [18 mm]

Das Drehmoment verhält sich abweichend auf einen kleinen Wertebereich, während des Volumens linear abhängig von den Positionen des Kreissegments zunimmt, was eine Auswahl der optimale Punkt erleichtert, das heißt, dass bei kleinen Volumen kann sich ein passendes Optimum ergeben, ohne die Optimierungsanforderungen zu verletzen.

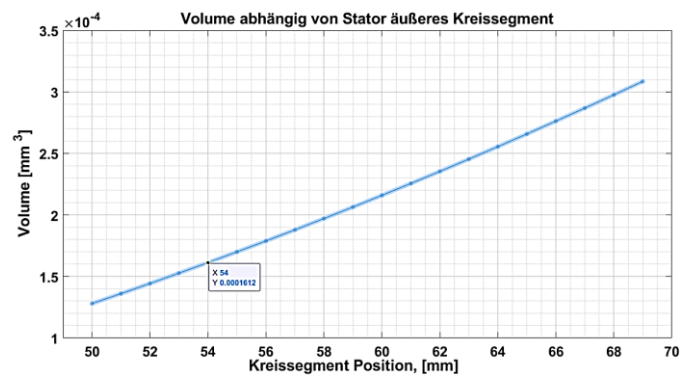


Fig. 32. Das Verhalten des Volumens bezüglich der Kreissegment Position.

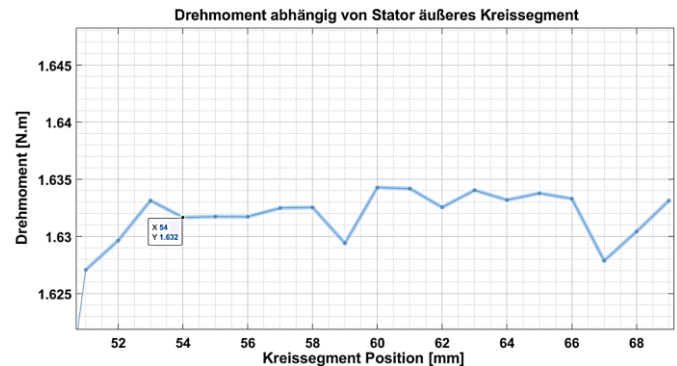


Fig. 33. Darstellung des Verhaltens von Drehmoment.

Es muss dann eine passende Position bestimmt werden, wo den Bestwert vom Drehmoment und Volumen steht, danach soll das durchschnittliche Drehmoment und die Drehmomentwelligkeit festgestellt werden. Eine Rotation um 30° auf den Rotator wird geübt, indem den Kreissegmenten des Stators in einem veränderlichen Wertebereich bewertet wird. Das Drehmoment ändert sich bei der Rotation bezüglich aller Positionen überlappend, was der dargestellten dicken blauen Linien in der Abbildung (Fig. 34) erklären kann.

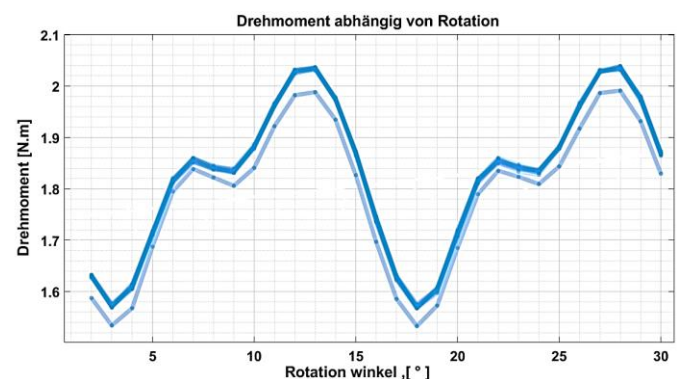


Fig. 34. Rotation von allen Kreissegment-Änderungen

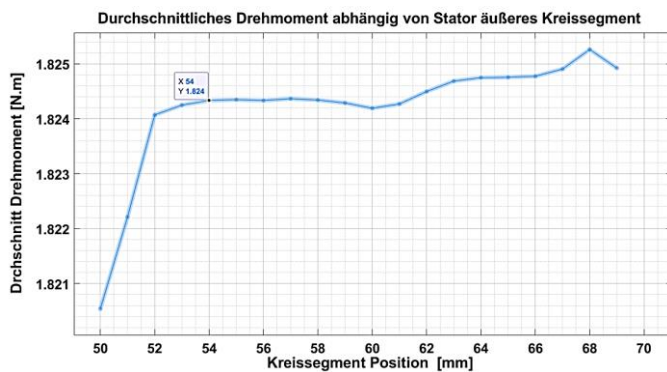


Fig. 35. Durchschnitt Drehmoment bei jeder Kreissegment Position

Die Entscheidung für das optimale durchschnittliche Drehmoment und das Drehmomentwelligkeit ist hier problemlos zu treffen, da das Verhältnis der beiden Parameter ist fast konstant bei dem minimalen Bereich. Das heißt, dass ein verlustloses Ergebnis zu erzielen möglich, indem man ein niedriges Volumen mit besserem Drehmoment Eigenschaften resultieren kann.

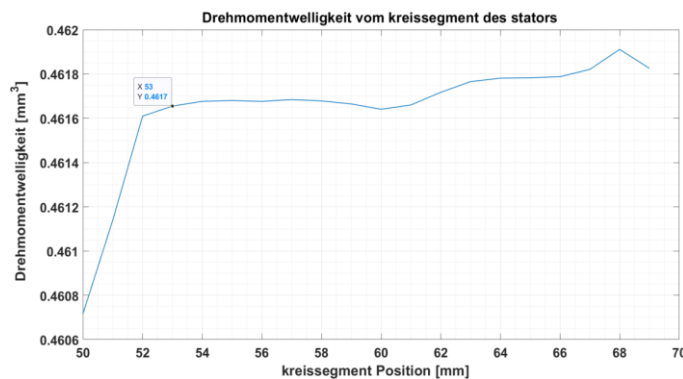


Fig. 36. Drehmomentwelligkeit bei jeder Kreissegment Position

TABELLE IV
OPTIMALER PARAMETER DARSTELLUNG

	initial Größe (Ist)	
Stator äußeres Kreissegment Optimierung	Arc position = 54 mm	
Volumen [mm³]	1,6124960E-04	
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	1,8243340E+00	
Drehmomentwelligkeit [N.m]	4,6167660E-01	
	Optimum	Prozent
Stator äußeres Kreissegment Optimierung	Arc position = 52 mm	
Volumen [mm³]	1,4428510E-04	11%
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	1,8240700E+00	0%
Drehmomentwelligkeit [N.m]	4,6160990E-01	0%

Der optimale Zustand in diesem Fall liegt bei der Kreissegmentposition 52 mm, das deckt eine 20 mm Dicke von dem Stator ab. Das Volumen wird um 11% reduziert und das durchschnittliche Drehmoment und die Drehmomentwelligkeit sind unveränderlich geblieben (TABELLE IV). Die finale Bauform des Stators ist in der Abbildung (Fig. 37) gezeigt.

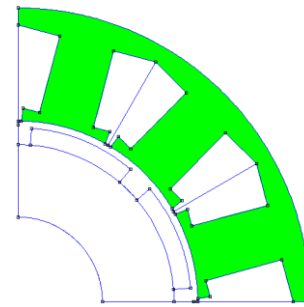


Fig. 37. Die finale optimierte Größe der Magnetdicke

In dem markierten Bereich in der Abbildung (Fig. 38) ist ein Optimum Bereich von einem Volumen = $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3$ und ein mittleres Drehmoment = 1,825 N.m aus den genetischen Algorithmen vorgeschlagen, was den ermittelten optimalen Wert der Simulation entspricht.

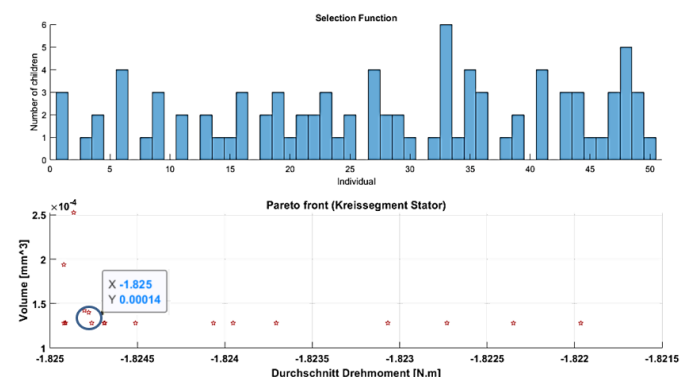


Fig. 38. Pareto Darstellung von mögliche GA Lösung

V. FINALE ERGEBNISSE DISKUSSION UND VERGLEICHEN

A. Diskussion der resultierenden optimierten Parameter

In der letzten Phase sollten alle optimalen Einflussgrößen zusammen kombiniert und das Verhalten das gesamte System betrachtet werden und mit dem ursprünglichen Teil verglichen. Die Kombination aus der Tabelle (TABELLE V) es ist mehr auf die Reduzierung des Gewichtes und der Drehmomentwelligkeit fokussiert. Ein Maximales durchschnittliches Drehmoment in diesem Fall ist erfolglos zu erreichen, da mit hohem Drehmoment zu steigenden Volumen und höheres Drehmomentwelligkeit führen kann, was für die festgestellten Anforderungen nicht günstig ist, deswegen in diesem Fall versucht wird einen Bestfall aus dem oben genannten besten Parameter ein Optimum zu erzielen.

TABELLE V
GESAMT OPTIMALER PARAMETER DARSTELLUNG

	initial Größe (Ist)	Optimum	Prozent
rotator kreissegment Position	Arc position = 15 mm	Arc Position = 20,5 mm	(Gewin/Verlust) %
Optimierung			
Volumen [mm ³]	6,3085100E-05	4,0328360E-05	36%
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	1,8233110E+00	1,8235520E+00	0%
Drehmomentwelligkeit [N.m]	5,5130960E-01	5,5138260E-01	0%
Magnet Breite (Rotator)	Magnetbreite = 40,4°	Magnetbreite = 38°	(Gewin/Verlust) %
Optimierung			
Volumen [mm ³]	5,3202330E-05	5,2282930E-05	2%
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	1,6389400E+00	1,6214000E+00	-1%
Drehmomentwelligkeit [N.m]	1,7592990E+00	1,7404700E+00	1%
Magnet Dicke (Rotator)	Magnetdicke = 2.4 mm	Magnetdicke = 2.2 mm	(Gewin/Verlust) %
Optimierung			
Volumen [mm ³]	5,1746330E-05	5,099830E-05	1%
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	9,6917650E-01	9,0900630E-01	-6%
Drehmomentwelligkeit [N.m]	8,2267390E-01	7,7159920E-01	6%
Stator äußeres Kreissegment	Arc position = 54 mm	Arc position = 52 mm	(Gewin/Verlust) %
Optimierung			
Volumen [mm ³]	1,6124960E-04	1,4428510E-04	11%
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	1,8243340E+00	1,8240700E+00	0%
Drehmomentwelligkeit [N.m]	4,6167660E-01	4,6160990E-01	0%

Die vorgeschlagenen Optimierungsmöglichkeiten liefern bei einer Rotation eine sinusförmige Welle mit einer gedämpften Welligkeit und niedrigen Wert des Drehmoments (Fig. 39) aber noch ein besseres Gewicht, da ein niedriges Volumen als der ursprünglichen Form festgestellt wurde (TABELLE VI).

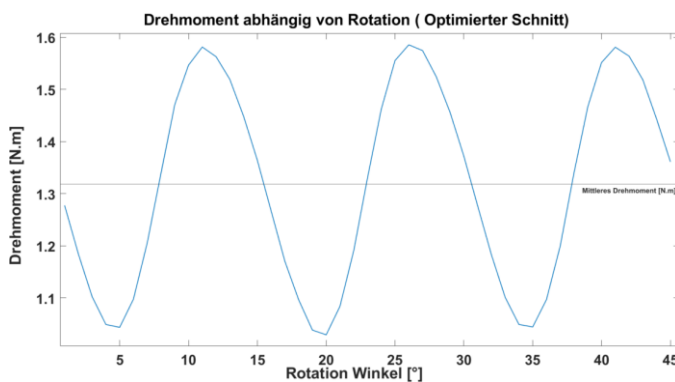


Fig. 39. Das Verhalten des Drehmoments in Rotation bei Optimierte Fall

Im Vergleich dazu hat der Motor mit nicht optimierten Parametern (Fig. 40) ein besseres mittleres Drehmoment aber höheres Gewicht und hohe Drehmomentwelligkeit, diese Eigenschaften machen von dieser Version trotzdem keine bessere Variante, deswegen soll es noch eine Verbesserung aus dem optimierten Parameter realisiert werden.

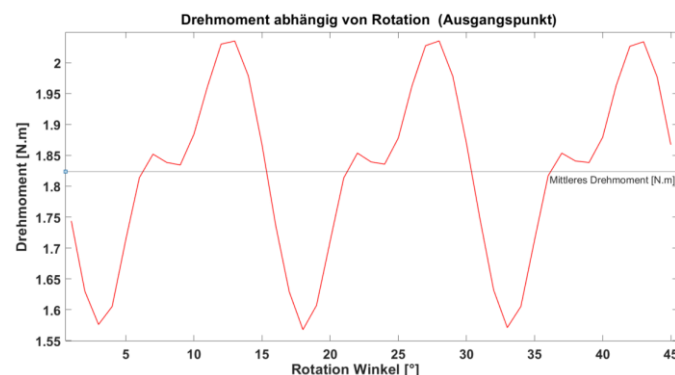


Fig. 40. Das Verhalten des Drehmoments in Rotation beim Ausgangspunkt

TABELLE VI
PARAMETER VERGLEICH

	Basis Teil	Optimierter Teil
Volumen [mm ³]	5,4072730E-05	3,485667 E-5
Durchschnitt Drehmoment [N.m]	1,8238470E+00	1,3179250E+00
Drehmomentwelligkeit [N.m]	4,2619730E-01	3,6653600E-01

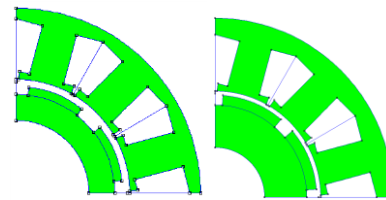


Fig. 41. Vergleichen der Optimierte Form mit der nicht optimiert

B. Finale Konzept feststellen

Wie schon vorher erwähnt wurde, dass die Optimierung durch die Einflussgröße des Magnets sehr kritisch ist, da man keinerlei bessere Lösungen finden kann, wenn es spezifisch ein maximales durchschnittliches Drehmoment angefordert wird und gleichzeitig ein niedriges Gewicht bzw. ein minimales Drehmomentwelligkeit festzustellen. Bewusst ist bei höherem mittlerem Drehmoment auch mit einem steigenden Drehmomentwelligkeit zurechnen und das gilt auch gegenfallend bei niedrigen Wertebereichen, was eine harmonische Optimierung zwischen alle Parameter kompliziert bzw. ein ungünstiges Ergebnis bei solchen Fällen liefert.

TABELLE VII
BEST PARAMETER VERGLEICH

	Volumen [mm ³]	Durchschnitt Drehmoment [N.m]	Drehmomentwelligkeit [N.m]
Basis Teil	5,4072730E-05	1,8238470E+00	4,2619730E-01
Optimum 1	3,4856670E-05	1,3179250E+00	3,6653600E-01
Optimum 2	3,7535390E-05	1,7471440E+00	9,3915160E-01
Optimum 3	3,8737920E-05	1,8217490E+00	4,3246610E-01
prozentuale veränderung %			
Basis Teil	100%	100%	100%
Optimum 1	64%	72%	86%
Optimum 2	69%	96%	220%
Optimum 3	72%	100%	101%

Dieses kritische Benehmen der Optimierung ist bloß in der Tabelle (TABELLE VII) vorgestellt. Ausgehend von der Basis Eigenschaften einerseits ist die erste Optimum-Variante mit allen Optimierungsmöglichkeiten der Einflussgröße durchgeführt, daher sind das Volumen um 36 % und das Drehmomentwelligkeit um 14% reduziert, das als ein Vorteil natürlich für die spezifischen Bedingungen betrachtet wird aber der Nachteil ist Verschlechterung das Durchtritt-Drehmoment um 28 %, was ziemlich nicht tolerierbar sein kann. Andererseits wird in dem zweiten Optimum auf die Optimierung durch die Magnetdicke verzichtet, daraus ergibt sich eine Reduzierung des Gewichtes um 31 %, wobei das Durchschnitt-Drehmoment einen Verlust von 4 % hat und das Drehmomentwelligkeit ist doppelt so hoch (220%) als die ursprüngliche werte gestiegen.

Im Vergleich zu den vorherigen Optimierungsmöglichkeiten scheint die letzte Variante eine bessere Lösung zu sein, die nur wenige Verluste und günstige Kombination an Parametern verwirklichen kann, daher ist eine Reduzierung des Volumens um 28 % geschafft und das mittlere Drehmoment ist in diesem Fall unveränderlich, es ist dann auf 100 % geblieben während der Drehmomentwelligkeit ist nur um 1 % zugenommen, in diesem Fall 1% Verlust ist nicht so kritisch wie die andere Möglichkeiten, deswegen eine Entscheidung für diese Variante mehr sinnvoll ist.

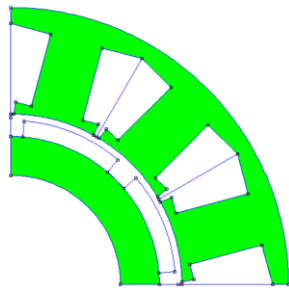


Fig. 41. Gesamte finale optimierte Form

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Im Allgemeinen kann die Ergebnisse der Parameteroptimierung von einer elektrischen Maschine sehr unterschiedlich sein, je nachdem, welche Methoden der Optimierung verwendet wird und wie sich die einzelnen strukturellen Parameter in einem bestimmten Größenbereich verhalten bzw. wie sind miteinander kombiniert, um ein passendes Optimum zu finden. Es kann sowohl Verluste als auch Gewinn bei der Optimierung auftreten, wenn man eine Kombination von Minimierung und Maximierung unterschiedliche Parameter gleichzeitig realisieren möchte, aber tatsächlich es soll bei der Auswahl einer Optimierungslösung wenige wie möglich Verluste auftreten, ob damit ein Minimum oder Maximum erzielt wird, das soll dann aus der Optimierungsanforderungen entschieden werden.

REFERENCES

- [1] S.Ruzbehi, "Structural Optimization of an Electromagnetic Actuator Based on Genetic Algorithm, Greedy Search and Their Combination", International Symposium on Industrial Electronics, Canada, June 2019
- [2] X.Zhang, Z. Li, "Sliding Mode Observer-Based Mechanical Parameter Estimation for Permanent-Magnet Synchronous Motor", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 31, Pp 5732 – 5745, Aug. 2016
- [3] Y. Chun, P. Han, J. Choi, D. Koo, "Multiobjective Optimization of Three-Phase Induction Motor Design Based on Genetic Algorithm", International Conference on Electrical Machines, Portugal, Sept. 2008
- [4] S. Lianshuan; L. Zengyan, "An Improved Pareto Genetic Algorithm for Multi-Objective TSP", International Conference on Natural Computation, China, Aug. 2009
- [5] G. Demir, R. A. Vural, "Speed Control Method Using Genetic Algorithm for Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE CEIT, 6th, N° 18797048, Oct. 2018.
- [6] A. Binder, "Elektrische Maschinen und Antriebe", Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, ISBN 978-3-540-71850-5 (eBook).
- [7] J.Teigelkötter, "Energieeffiziente elektrische Antriebe", Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden 2013, ISBN 978-3-8348-2330-4 (eBook)

- [8] G.Babiel, "Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik", Springer Fachmedien Wiesbaden 2007, 2009, 2014, 3. Auflage, ISBN 978-3-658-03334-7 (eBook)
- [9] S.Koch, "Genetische Algorithmen für das Order Batching Problem in manuellen Kommissioniersystemen", Springer Fachmedien Wiesbaden 2014, ISBN 978-3-658-05346-8 (eBook).
- [10] Y.Xia, H.Jiang, X. Yi, Z. Wen, Y. Chen, "Parameter Optimization of Hybrid Excitation Permanent Magnet Synchronous Motor", International Conference on Electrical Machines and Systems, South Korea, Oct. 2018.