

# Spulen-Optimierung mit Ersatzmodellen

Marie Krause, Mandy Domke

**Zusammenfassung**—Es werden Geometrien für Zylinder- und Ringspulen gesucht, welche die Verlustleistung minimieren. Dazu werden verschiedene Verfahren verwendet, welche neben einer Feldsimulation meist auch ein vereinfachtes Ersatzmodell benötigen. Diese Modelle hängen von den Geometrie- und Materialparametern ab. Zur Optimierung werden einige Parameter variiert, während die übrigen festgehalten werden. Beim Vergleichen der Verfahren stellt man fest, dass sie alle gute Resultate liefern, sich jedoch z.T. stark bei der Laufzeit unterscheiden. Zur weiteren Überprüfung der Ergebnisse wird der Multifidelity Monte Carlo betrachtet.

Krause

**Index Terms**—Verlustleistung, Space-Mapping, Manifold-Mapping, Multifidelity Monte Carlo, Ersatzmodell

## I. EINLEITUNG

Im Zuge der Verkleinerung der elektrischen Baugruppen müssen sich auch die einzelnen Bauteile verkleinern, jedoch ohne dass sie dabei ihre spezifischen Eigenschaften verlieren. Daher geht es im Folgenden um die Optimierung der Geometrien von Spulen. Als Optimierungsfunktion wird die Verlustleistung  $P_V$  minimiert. Denn diese wird in der Regel in Wärme umgewandelt und belastet somit die gesamte Baugruppe. Die Induktivität wurde nicht in die Randbedingungen integriert, da dies für die zur Verfügung stehenden Zeit zu aufwendig war. Dennoch wird sie beobachtet, um die Ergebnisse besser vergleichen zu können.

Krause

## II. VERFAHREN

Für die Optimierung einer Spule ist eine funktionale Abhängigkeit zu den ausgewählten Parametern erforderlich. Da die Verlustleistung von den Feldern der Spule abhängt, kann diese über eine Feldsimulation (feines Modell) und/oder mit Hilfe einer Approximation (grobes Modell) bestimmt werden. In den folgenden Abschnitten werden das grobe Modell und die Verfahren vorgestellt.

Domke

### A. Grobes Modell

Für die Verlustleistung wird der ohm'sche Verlust  $P_V = RI^2$  der Statik, mit

$$R = \frac{\ell}{\kappa A(\delta)}, \quad (1)$$

betrachtet. Dabei müssen sowohl der Proximity- als auch Skin-Effekt berücksichtigt werden. Letzterer ist definiert durch

$$\delta := \sqrt{\frac{2}{\omega \kappa \mu}} \quad (2)$$

Danke an Prof. Dr.-Ing. Schuhmann und unseren wiss. Betreuer Mirsad Hadžiefendić (wiss. Mitarbeiter) von der TU Berlin, Fakultät IV: Elektrotechnik und Informatik, Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik, für die gute Zusammenarbeit.

und geht in die Fläche  $A(\delta)$  des Widerstandes ein. Dies gilt sowohl für die Verlustleistung  $P_{V,Coil}$  im Leiter, als auch für  $P_{V,Kern}$  im Kern. Es wird im folgenden angenommen, dass  $P_{V,g} = P_{V,Coil} + P_{V,Kern}$ . Als Vereinfachung wird auch in der Quasistatik mit den gleichen Gleichungen gerechnet.

Der Strom im Leiter wird mit  $I = 1 A$  im Gleichstromfall und  $I_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} A$  im Wechselstromfall eingespeist. Für den in den Kern induzierten Strom, werden Simulationen einer Spule, bei Frequenzschritten von 0 bis 1 MHz, verwendet. Indem die induzierten Ströme in einer Strommatrix gespeichert werden und im groben Modell für die entsprechenden Punkte interpoliert wird.

Krause

### B. Space- und Manifold-Mapping

Ziel ist es, ausgewählte Parameter so einzustellen, dass sie die mit der Feldsimulation ermittelte Verlustleistung  $P_{V,f} : X \rightarrow Y$  mit  $X \subseteq \mathbb{R}^n$ ,  $Y \subseteq \mathbb{R}$  minimieren. Beim Space- und Manifold-Mapping-Verfahren wird um den Simulationsaufwand zu reduzieren der Definitionsraum  $X$  mit  $\hat{X}$  durch das im Idealfall eindeutige Space-Mapping

$$\mathcal{P} : X \rightarrow \hat{X}, x \mapsto \operatorname{argmin}(\Delta P_V) \text{ mit} \\ \Delta P_V := \left\{ \frac{1}{2} [P_{V,g}(\hat{x}) - P_{V,f}(x)]^2 + \frac{\alpha}{2} \|\hat{x} - x\|_2^2 : \hat{x} \in \hat{X} \right\}$$

angenähert, wobei die Funktion  $P_{V,g} : \hat{X} \rightarrow \hat{Y}$  mit  $\hat{X} \subseteq \mathbb{R}^n$ ,  $\hat{Y} \subseteq \mathbb{R}$  das in Abschnitt II-A vorgestellte grobe Modell ist, welches dann verwendet wird, um die Parameter in  $\hat{X}$  einzustellen. Betrachtet man  $P_{V,g} \circ \mathcal{P}$ , so liegt der Wert im Raum  $\hat{Y}$ , welcher eine Approximation von  $Y$  darstellt, also des realen Modells. Im Falle des Space-Mapping-Verfahrens wird angenommen, dass die Abweichung zwischen  $Y$  und  $\hat{Y}$  vernachlässigbar klein ist und somit die verbindende Funktion  $S : \hat{Y} \rightarrow Y$  auf  $S \equiv id_Y$  gesetzt werden kann. Varianten des Space-Mapping-Verfahrens stellen das Trust-Region-Space-Mapping (TRASM) und das Genetic-Space-Mapping (GSM) aus [3] dar.

Beim Manifold-Mapping-Verfahren nach [8] wird mit einer affin linearen Abbildung  $S : \hat{Y} \rightarrow Y$  eine Korrektur zwischen den Räumen vorgenommen, sodass  $S(P_{V,g}(\hat{x})) = P_{V,f}(x^*)$  gilt, wobei  $\hat{x} \in \hat{X}$  sei und  $x^* \in X$  die optimale Lösung des feinen Modells beschreibt. Somit wird beim Manifold-Mapping zusätzlich folgende Optimierungsaufgabe für  $y \in Y$  betrachtet

$$\operatorname{argmin} \left\{ \|SP_{V,g}(\hat{x}) - y\|_2 : \hat{x} \in \hat{X} \right\}.$$

Die Ideen der beiden Optimierungsverfahren können mit folgendem Diagramm beschrieben werden. Weitere Details sind u.A. in [3] und [8] zu finden.

Domke

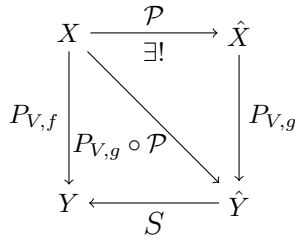


Abbildung 1. Diagramm zum Space- und Manifold-Mapping

### C. Multifidelity Monte Carlo

Der Multifidelity Monte Carlo (MFMC) berechnet einen angenäherten Erwartungswert verschiedener Funktionen. Dies bedeutet, es werden zunächst die Erwartungswerte von  $P_V$  der einzelnen Verfahren über Mittelungen bestimmt. Anschließend wird das Verfahren mit der höchsten Varianz ermittelt und die Ergebnisse der übrigen Verfahren mit diesem verglichen, so dass am Ende nur die Verfahren mit der größten Übereinstimmung für das Ergebnis, der zweiten Mittelung, verwendet werden. Der Algorithmus kann [4, p. 17] entnommen werden.

Das Verfahren wird hier zur Überprüfung möglicher Optima genutzt, denn das analytische und das numerische Optimum müssen nicht übereinstimmen. Dazu wird der MFMC mit einer kleinen Umgebung, um das vermutete Optimum, gestartet. Wenn das Ergebnis unter dem Optimum liegt, so war dieses höchstens lokal und es muss weiter gesucht werden. Die Bestimmung einer geeigneten Umgebung, stellt dabei ebenfalls ein ernst zu nehmendes Problem dar und werden durch Testen verschiedener Werte betrachtet.

Krause

## III. SPULEN

Um die Ergebnisse der Optimierung mit dem Ersatzmodell bewerten zu können, werden die Parameter der jeweiligen Spule auch mit dem SQP-Verfahren der `fmincon`-Funktion aus Matlab [1] und der Simulationssoftware [2] simuliert, wobei 30 933 Knoten und 61 504 Elemente verwendet werden. In den folgenden Abschnitten werden zwei Spulen-Typen vorgestellt, welche dann in der Magnetostatik und Magnetoquasistatik optimiert werden. Das MFMC-Verfahren dient dann zur zweiten Kontrolle der Optima.

Domke

### A. Zylinderspule

Die wohl bekannteste Bauform für Spulen ist die Zylinderspule. Sie wird oft in Bauteilen mit hoher Frequenz oder Spannung wie z. B. im „Compact Muon Solenoid“ im CERN, siehe [5], benutzt.

1) *Darstellung:* Zunächst ist wichtig zu wissen, dass FEMM in der Lage ist eine achsen-symmetrische Geometrien zu erstellen, so dass nur ein kleiner Ausschnitt im CAD aufgebaut werden muss. Für den Aufbau des Simulationsmodells der Spule werden zwei Schritten benötigt. Im ersten Schritt wird die Wicklung erstellt. Dafür werden der Radius der Spule bis zum Mittelpunkt der Leiterwindungen  $r_C$ , der Radius des Leiters  $r_L$  und der Abstand zwischen den Windungen des Leiters  $d_L$  benötigt. Die Anzahl der Windungen  $N$  wird

konstant bei 10 belassen und für das Material wird Kupfer angenommen.

Für den Kern werden dessen Radius  $r_K$ , die Höhe  $h_K$  und dessen relative Permeabilität  $\mu_{r,K}$  und elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa_K$  genutzt. Dabei muss beachtet werden, dass der Radius des Kerns immer um mindestens  $10^{-3}$  kleiner ist als der innerste Punkt des Leiters, da ansonsten die von FEMM 4.2 genutzte Triangulierung Probleme bereiten kann. Als Kernmaterial ist Weicheisen typisch. Die entsprechenden Materialwerte können [7] entnommen werden.

### 2) Simulation:

a) *Simulation - Magnetostatik:* Im Fall der Statik wird kein Strom in den Kern induziert und somit ist nur  $P_{V,Coil}$  relevant. Die Ergebnisse der Magnetostatik für Spulen ohne Kern aus [3] konnten bestätigt werden.

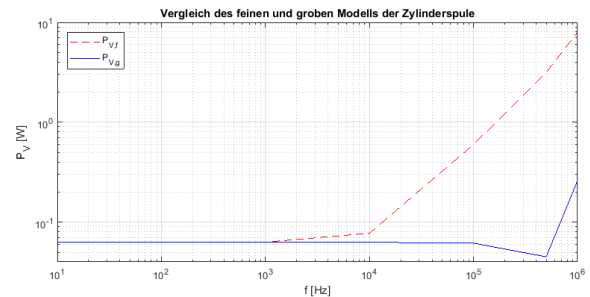


Abbildung 2. Vergleich feines und grobes Modell der Zylinderspule

b) *Simulation - Magneto-Quasistatik:* Wie Abb. 2 zu entnehmen ist, liefern die Modelle von 0 bis 1 kHz die gleichen Werte. Um dieses Verhalten auszunutzen, wird im Folgenden 1 kHz als Frequenz gewählt. Des Weiteren werden für die nachfolgenden Rechnungen die Definitionsbereiche der einzelnen Parameter eingegrenzt. Für die Spule gelten  $r_C \in [30, 60]$  mm und  $r_L \in [0.1, 0.4]$  mm. Der Kern bewegt sich in  $r_K \in [0.1, 29]$  mm und  $h_K \in [0.1, 10]$  mm, durch das Kernmaterial Weicheisen gelten  $\mu_{r,K} \in [3500, 12000]$  und  $\kappa_m = 1/51 \frac{S}{m}$ .

Die Optimierung in der Quasi-Statik wird in drei Teilschritten durchgeführt, einer der Gründe dafür sind die unterschiedlichen Zahlenbereiche der Definitionsbereiche. Im ersten Schritt wird über die Spulen Parameter optimiert, während dessen werden die räumlichen und die Material Parameter des Kerns festgehalten.

Damit erhält man für das SQP im ersten Schritt Werte wie in folgender Tabelle. Was den Ergebnissen aus [3] entspricht.

Tabelle I  
ERGEBNISSE DES SQP IM ERSTEN SCHRITT UND  $\#P_{V,f} = 225$

	$r_C$	$r_L$	$r_K$	$h_K$	$\kappa_K$	$\mu_{r,K}$	$P_V [W]$	$L [\mu H]$
Start	35	0.1	0.1	0.1	0.0196	3500	1.1760	17.4
Opt	30	0.4	0.1	0.1	0.0196	3500	0.0631	10.2

Aus dem zweiten Schritt resultiert die nächste Tabelle. Hier ist der Kern so weit verkleinert, dass seine Verlustleistung vernachlässigbar ist.

Im letzten Schritt wird  $\mu_{r,K}$  optimiert und es ergibt sich die folgende Tabelle. Auch mit verschiedenen Startwerten für

Tabelle II  
 ERGEBNISSE DES SQP IM ZWEITEN SCHRITT UND  $\#P_{V,f} = 125$

	$r_C$	$r_L$	$r_K$	$h_K$	$\kappa_K$	$\mu_{r,K}$	$P_V [W]$	$L [\mu H]$
Start	30	0.4	20	9	0.0196	3500	0.0734	11.2
Opt	30	0.4	14.5	6.5	0.0196	3500	0.0631	10.5

Tabelle III  
 ERGEBNISSE DES SQP IM LETZTEN SCHRITT UND  $\#P_{V,f} = 2$

	$r_C$	$r_L$	$r_K$	$h_K$	$\kappa_K$	$\mu_{r,K}$	$P_V [W]$	$L [\mu H]$
Start	30	0.4	14.5	6.5	0.0196	3500	0.0631	10.5
Opt	30	0.4	14.5	6.5	0.0196	3501	0.0630	10.5

$\mu_{r,K}$  ergeben sich keine größeren Unterschiede, so dass an dieser Stelle das Material keine Rolle mehr spielt.

Die drei Schritte wurden für die anderen Verfahren ebenfalls durchgeführt. Die Endergebnisse lassen sich Tabelle IV entnehmen. Alle Verfahren konnten  $P_V$  deutlich reduzieren.

Tabelle IV  
 OPTIMIERUNGSERGEBNISSE DER ZYLINDERSPULE

	Start	SQP	TRASM	GSM	Manifold
$r_C [mm]$	35	30	30	60	30
$r_L [mm]$	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4
$h_K [mm]$	20	14.5	28	0.1	20
$r_K [mm]$	9	6.5	9	0.1	9
$\mu_{r,K}$	3500	3500	3500	3500	3500
$P_V [mW]$	1176	63.1	73.4	63.1	63
$L [\mu H]$	17.4	10.5	14.7	25.5	11.2
$\#P_{V,f}$	-	352	58	400	22

Dennoch unterschieden sich die Ergebnisse zum Teil, so ist die Verlustleistung beim TRASM nicht so niedrig, wie bei den anderen Verfahren. Auffällig ist auch, dass, unter Einbeziehung der Induktivität, nur die Resultate vom SQP und dem Manifold-Mapping vergleichbar sind.

Tabelle V  
 VERGLEICH DER OPTIMA MIT DEN ERGEBNISSEN DES MFMC

	SQP	TRASM	GSM	Manifold
gefundenes Optimum [mW]	63.1	73.4	63.1	63
MFMC [mW]	67.2	67.3	126	67.2

c) *Multifidelity Monte Carlo*: Der Tabelle V lässt sich entnehmen, dass die Ergebnisse des MFMC für das SQP, das GSM und dem Manifold-Mapping unter den ermittelten Optima liegen. Dies bedeutet, dass in diesen Punkten zumindest ein lokales Minimum vorliegen muss. Bei dem TRASM sieht es ganz anders aus, der geschätzte Mittelwert liegt deutlich unter dem Ergebnis, so dass an dieser Stelle das Verfahren höchstens ein lokales Optimum liefert. Möglicherweise würde ein anderer Startwert ein besseres Ergebnis erzielen. Eine andere Ursache kann auch die Verletzung einer Voraussetzung der Verfahren an den Definitionsbereich oder die Funktion sein. Krause

### B. Ringspule

Eine weitere Bauform für Spulen ist die Ring- bzw. Toroidspule. Sie wird laut [6] vor allem in Filtern verwendet. Im Folgenden wird sie analog zur Zylinderspule betrachtet.

1) *Darstellung*: Zur Beschreibung der Ringspule werden die gleichen Material-Parameter,  $\mu_{r_C}, \kappa_C, \mu_{r_K}$  und  $\kappa_K$ , verwendet wie bei der Zylinderspule. Auch der Abstand zwischen den Leitern  $d_L$  und der Leiterradius  $r_L$  bleiben als Geometrie-Parameter erhalten. Einige Parameter werden jedoch geändert, so werden nun  $N = 5$  Windungen betrachtet und der Spulenradius wird zum inneren Spulenradius  $r_{i_C}$  und dem Äußeren  $r_{o_C}$ . Ferner wird die Geometrie des Kerns durch einen Innenradius  $r_K$ , die Breite  $b_K$  und die Tiefe  $t_K$  des Kerns beschrieben.

2) *Simulation*: Für die Optimierung ist es nötig den Definitionsbereich der Parameter sinnvoll einzugrenzen, damit etwa der Kern innerhalb der Leiter liegt. Bei der Ringspule bedeutet das, entweder variable Grenzen zu nutzen oder wie im Folgenden, die zu optimierenden Parameter geeignet zu wählen. Ferner zeigte sich, dass sich die Definitionsbereiche nicht zu stark unterscheiden sollten. Somit werden lediglich die Parameter  $d_L \in [0.1, 0.3]$  mm,  $r_L \in [0.1, 0.4]$  mm,  $r_K \in [r_{i_C} + 1, r_{o_C} - b_K - 1]$  mm und  $t_K \in [0.1, 20]$  mm optimiert, wobei  $r_{i_C} = 4$  mm und  $r_{o_C} = 60$  mm. Die Material-Werte sind analog zur Zylinderspule festgelegt und die Breite des Kerns liegt bei  $b_K = 5$  mm. Im Vergleich zur Zylinderspule wird allerdings planar-symmetrisch simuliert.

a) *Magnetostatik*: Das grobe und feine Modell unterscheiden sich um eine Größenordnung von etwa  $10^{-9}$ , sodass gute Optimierungsergebnisse zu erwarten sind. Um ein vorzeitiges Stagnieren des SQP-Verfahrens zu vermeiden, wird dies zweimal hintereinander ausgeführt, wobei das Ergebnis aus dem ersten Durchlauf als Startwert des zweiten fungiert. Die angegebene Anzahl an Funktionsaufrufen der Feldsimulation ( $\#P_{V,f}$ ) ist die Summe der beiden. Wie Tabelle VI zu entnehmen, wird bei allen Verfahren entsprechend Formel (1)  $r_L$  maximiert, während  $t_K$  minimiert wird. Die beiden anderen Parameter bleiben fast unverändert außer beim GSM. Dort werden die Werte zufällig verändert, wodurch auch die anderen Parameter variieren können.

Beim Manifold-Mapping-Verfahren wird die Verlustleistung am stärksten und mit den wenigsten Funktionsaufrufen minimiert. Ebenfalls gute Ergebnisse liefern das SQP- und das TRASM-Verfahren, wobei insbesondere das SQP-Verfahren deutlich mehr Funktionsaufrufe benötigt. Am meisten Funktionsaufrufe verwendet das GSM-Verfahren. Hierbei wird zwar eine starke Reduktion der Verlustleistung erreicht, aber im Vergleich zum SQP-Verfahren ist sie um ca. 43% größer. Die Induktivitäten liegen nach Tabelle VI in einem ähnlichen Bereich, sodass die Spulen vergleichbar sind.

b) *Magnetoquasistatik*: Wie Abb. 3 zu entnehmen ist, ähneln sich die Modelle bei einer Frequenz zwischen 1 kHz und 10 kHz am meisten. Um eine kleine Fehlertoleranz zuzulassen, wird im Folgenden 1 kHz als Frequenz gewählt. Analog zur Magnetostatik wird das SQP-Verfahren auch hier zweimal ausgeführt. Insgesamt ergibt sich, wie in Tabelle VII zu sehen, ein ähnliches Verhalten zur Statik, wobei der Radius des Kerns  $r_K$  zusätzlich bei allen Verfahren variiert, allerdings

Tabelle VI  
MAGNETOSTATIK: OPTIMIERUNGSERGEBNISSE

	Start	SQP	TRASM	GSM	Manifold
$d_L$ [mm]	0.2	0.2	0.2001	0.101	0.2
$r_L$ [mm]	0.2	0.3981	0.3977	0.375	0.4
$r_K$ [mm]	30	29.9949	29.9482	36.494	30
$t_k$ [mm]	5	0.1009	0.1012	0.128	0.1
$P_V$ [ $\mu W$ ]	6700	34.01	34.18	48.82	33.39
$L$ [ $\mu H$ ]	54.32	1.1	1.1	1.16	1.09
$\#P_{V,f}$	-	173	23	200	10

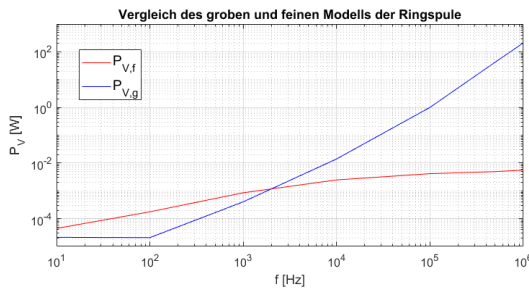


Abbildung 3. Vergleich des feinen und groben Modells der Ringspule

unterschiedlich. An den Ergebnissen der Verlustleistung aus Tabelle VII wird deutlich, dass eine geringe Änderung von  $r_K$  scheinbar zu niedrigeren Verlustleistungen führt. Der Abstand zwischen den Leitern  $d_L$  scheint auch kaum Einfluss auf die Verlustleistung zu haben.

Die stärkste Reduktion der Verlustleistung erreichen das SQP- und GSM-Verfahren. Beide benötigen dafür allerdings viele Funktionsaufrufe. Im Gegensatz dazu liefern das TRASM- und Manifold-Verfahren zwar um 138% bzw. 344% größere Verlustleistungen, brauchen dafür aber deutlich weniger Funktionsaufrufe.

Die Induktivitäten unterscheiden sich nach Tabelle VII um z.T. das Fünffache im Vergleich zum SQP, was die Vergleichbarkeit in Frage stellt.

*c) Multifidelity Monte Carlo:* Wie bereits beschrieben wird dieses Verfahren nur mit dem feinen und dem groben Modell in einer kleinen Umgebung um das Optimum ausgeführt. D.h. im Falle der Statik für  $d_L \in [0.15, 0.25]$ ,  $r_L \in [0.3, 0.4]$ ,  $r_K \in [29.5, 30.5]$  und  $t_k \in [0.1, 0.15]$ . Als angenäherten Erwartungswert erhält man  $50.08 \mu W$ . Dieser Wert ist größer als die Verlustleistung der gefundenen Optima. Somit kann man sagen, dass alle Verfahren zumindest ein gutes lokales

Tabelle VII  
MAGNETOQUASISTATIK: OPTIMIERUNGSERGEBNISSE

	Start	SQP	TRASM	GSM	Manifold
$d_L$ [mm]	0.2	0.1985	0.2007	0.101	0.2
$r_L$ [mm]	0.2	0.2791	0.3991	0.375	0.4
$r_K$ [mm]	30	34.0882	12.8239	36.494	5
$t_k$ [mm]	5	0.1147	0.1195	0.128	0.1
$P_V$ [ $mW$ ]	82.8	1.6	3.8	1.6	7.1
$L$ [ $\mu H$ ]	11.27	0.23	0.62	0.24	1.3
$\#P_{V,f}$	-	292	41	200	10

Minimum gefunden haben.

Bei einer Frequenz von 1 kHz ändert sich nur der Bereich um  $r_K$  und wird zu  $[33.5, 34.5]$ . Als angenäherten Erwartungswert erhält man 1.9 mW. Dieser Wert ist größer als die Verlustleistung der Optima vom SQP- und GSM-Verfahren, was bedeutet, dass hier zumindest lokale Optima gefunden wurden. Bei den beiden anderen Methoden ist dieser Wert kleiner, daraus lässt sich schließen, dass hier  $r_K$  zu stark verkleinert wurde. Domke

#### IV. FAZIT

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wurden die Geometrien zwei verschiedener Spulentypen mit unterschiedlichen Verfahren bzgl. der Verlustleistung in der Magnetostatik und -quasistatik optimiert. Dabei stellte sich heraus, dass bereits mit wenigen Funktionsaufrufen des feinen Modells der Manifold-Mapping-Ansatz gute Ergebnisse erzielt.

Beim GSM-Verfahren werden viele Funktionsaufrufe benötigt, was jedoch nicht garantiert, dass auch ein Optimum gefunden wird, da dieses Verfahren stark von Zufallswerten abhängt. Hier wäre eine gezieltere Suche mit einem verbesserten genetischen Algorithmus eventuell sinnvoll, siehe z.B. [9]. Doch auch so ließen sich gute Ergebnisse erreichen, was ebenfalls für das TRASM gilt, das vermutlich ebenfalls verbessert werden kann.

Das SQP-Verfahren diente als Referenz. Es ließ sich allerdings feststellen, dass dieses Verfahren bei beiden Spulentypen Schwierigkeiten hat ein gutes Optimum zu finden. Aus diesem Grund wurde es mehrfach hintereinander ausgeführt.

Mit dem MFMC-Ansatz können Aussagen über ein gefundenes Optimum in einem kleinen Bereich getroffen werden, etwa ob dies auch wirklich (zumindest ein lokales) Optimum ist. Es ist vorstellbar, dass dieses Wissen zur Verbesserung von Optimierungsverfahren verwendet werden kann, z.B. bei Abbruchkriterien.

Eine weitere mögliche Erweiterung stellt die Betrachtung der Induktivität als Randbedingung der Optimierungsfunktion dar, um sicherzustellen, dass die Spulen vergleichbar bleiben.

Insgesamt konnten mit allen Optimierungsverfahren gute Ergebnisse erzielt werden, wobei der Manifold-Mapping-Ansatz wegen seiner geringen Anzahl an Funktionsaufrufen besonders hervorzuheben ist. Domke

#### LITERATUR

- [1] MATLAB 2017a, The MathWorks® Inc. Natick, Massachusetts, USA.
- [2] FEMM 4.2, David Meeker; open source.
- [3] Albert Piwonski. *Numerische Optimierung in der Magnetoquasistatik mit dem Space Mapping Ansatz*. Bachelor-Arbeit, TU Berlin, 2017.
- [4] B. Peherstorfer, K. Willeox, M. Gunzberger. *Optimal model management for multifidelity Monte Carlo estimation*. SIAM Journal on Scientific Computing, 38(5):A3163-A3194, 2016.
- [5] unbekannt: *Zylinderspule*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Zylinderspule>. Zugriff: 20.02.2018.
- [6] unbekannt: *Toroidspule*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Toroidspule>. Zugriff: 23.01.2018.
- [7] unbekannt: *Magnetkern*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetkern>. Zugriff: 21.02.2018.
- [8] P.W. Hemker, D. Echeverría. *A trust-region strategy for manifold-mapping optimization*. Journal of Computational Physics, 224(1):464-475, 2007.
- [9] Schöneburg; [u.A.]. *Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien - eine Einführung in die Theorie und Praxis der simulierten Evolution*. 1. Auflage. Bonn [u.a.], Addison-Wesley, 1994. ISBN: 3-89319-493-2.