

Nichtlineare Berechnung von permanentmagneterregten Gleichstrommotoren mit konzentrierten Wicklungen

CHRISTOPH WOLZ, JOACHIM KEMPKE, ANSGAR ACKVA

Technologie-Transfer-Zentrum der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt

UWE SCHÄFER

Technische Universität Berlin, Institut für Energie- und Automatisierungstechnik, Fachgebiet Elektrische Antriebe

Steigende Anforderungen an Hilfsantriebe im Automotive-Bereich verlangen im Hinblick auf Energie- und Kosteneffizienz innovative Berechnungsmethoden des magnetischen Kreises. Der magnetische Kreis moderner Permanentmagnet-Gleichstrommotoren kleiner Leistung weist ein signifikantes Sättigungsverhalten auf. Er ist derart ausgelegt, dass die von den Permanentmagneten erzeugten magnetischen Feldstärken nicht wie üblich dominieren, sondern die bestromten Ankerspulen vergleichbare Feldstärken erzeugen. Lineare Berechnungen mit konstanten Permeabilitäten bzw. Induktivitäten führen zu nicht mehr akzeptablen Ungenauigkeiten. Mittels transients FEM-Simulationen ist es möglich die jeweiligen Flüsse in den Zahnspulen in Abhängigkeit von der Ankerposition und den Spulenströmen zu bestimmen. Für kurze Motorlängen sind grundsätzlich 3D-FEM-Berechnungen nötig. Es wurde ein Modellansatz gefunden, mit dem der Einsatz von 3D-FEM-Rechnungen stark reduziert und die Überlagerung der Flüsse in jedem Zahn zuverlässig und schnell beschrieben werden können. Dadurch kann die Rechen- und Entwicklungszeit erheblich reduziert werden.

Kategorie und Themenbeschreibung: Electromobility and Energy Engineering

Zusätzliche Schlüsselwörter: nichtlinearer magnetischer Kreis, Überlagerung magnetischer Felder, Modellbildung.

1 EINLEITUNG

In dieser Arbeit werden ausschließlich permanentmagneterregte Kommutator-Gleichstrommotoren mit Einzelzahnwicklungen untersucht. Die Magnete sind im Gehäuse, die Spulen im Anker verbaut.

Für die Auslegung und Optimierung der Motoren wird ein Simulationsmodell gesucht, mit welchem es möglich ist, das dynamische Verhalten der physikalischen Größen zu berechnen. Kommutatormaschinen mit hoher Leistungsdichte und kosteneffizienter Auslegung weisen ein ausgesprochen nichtlineares Verhalten in beinahe allen physikalischen Domänen auf. Für eine anwendernahe Modellierung ist sowohl eine genaue, als auch eine mit überschaubarem Rechenaufwand verbundene Strategie zu verfolgen.

Adressen der Autoren: C. Wolz¹*, J. Kempkes¹, A. Ackva¹, U. Schäfer²

¹Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, D-97421 Schweinfurt, Bundesrepublik Deutschland.

²Technische Universität Berlin, Institut für Energie- und Automatisierungstechnik, Fachgebiet Elektrische Antriebe, Einsteinufer 11, D-10587 Berlin, Bundesrepublik Deutschland.

*christoph.wolz@fhws.de

Die Erlaubnis zur Kopie in digitaler Form oder Papierform eines Teils oder aller dieser Arbeit für persönlichen oder pädagogischen Gebrauch wird ohne Gebühr zur Verfügung gestellt. Voraussetzung ist, dass die Kopien nicht zum Profit oder kommerziellen Vorteil gemacht werden und diese Mitteilung auf der ersten Seite oder dem Einstiegsbild als vollständiges Zitat erscheint. Copyrights für Komponenten dieser Arbeit durch Andere als FHWS müssen beachtet werden. Die Wiederverwendung unter Namensnennung ist gestattet. Es andererseits zu kopieren, zu veröffentlichen, auf anderen Servern zu verteilen oder eine Komponente dieser Arbeit in anderen Werken zu verwenden, bedarf der vorherigen ausdrücklichen Erlaubnis.

Aufgrund der hier betrachteten geometrisch kurzen Motoren, deren Verhältnis von Paketdurchmesser zu –länge ca. den Faktor sechs beträgt, ist eine zweidimensionale FEM-Simulation zu ungenau. Zudem wird bei einer 2D-Simulation der Wickelkopf nicht berücksichtigt. Die mittlere Wicklungslänge wird durch den Wickelkopf maßgeblich bestimmt. Deshalb wird für die Analyse des magnetischen Kreises der Motor dreidimensional berechnet.

Kernthema dieser Arbeit ist die nichtlineare Überlagerung von Erreger- und Ankerfeld. Der im folgenden Kapitel beschriebene Ansatz wurde in ein Motormodell implementiert und experimentell verifiziert.

2 ANSATZ

Die stromabhängige Induktivität einer Spule im magnetischen Kreis wird i.A. durch eine Ψ -I-Kennlinie dargestellt (siehe Bild 1). Für hohe Stromwerte ist die Ankerfeldstärke im Vergleich zur Erregerfeldstärke nicht zu vernachlässigen. Das Superpositionsprinzip für die Überlagerung der durch Anker und Erreger verursachten magnetischen Flussverkettungen ist daher nicht mehr anwendbar.

Der grundsätzliche Ansatz besteht nun darin, den Magneten durch eine Ersatzspule zu beschreiben. Der von den Permanentmagneten erzeugte Fluss ψ_A^{mag} wird mittels der inversen Ψ -I-Kennlinie in einen Ersatzstrom $\tilde{i}_A^{mag}$ transformiert. Dieser würde in einer Spule mit der gleichen Windungszahl wie die Ankerspule den gleichen Fluss erzeugen. Im nächsten Schritt wird der Ersatzstrom zum eigentlichen Spulenstrom i_A^{coil} addiert. Anschließend wird der Ersatzgesamtstrom $\tilde{i}_A$ über die Ψ -I-Kennlinie in den Gesamtfluss ψ_A zurück transformiert. Der Zusammenhang ist in Bild 2 als Blockdiagramm dargestellt und in den Gleichungen (1) – (4) mit Berücksichtigung der Abhängigkeit vom Anker-Drehwinkel α mathematisch ausgedrückt.

$$\psi_A^{mag} = f_1(\alpha) \quad (1)$$

$$\tilde{i}_A^{mag} = f_2^{-1}(\psi_A^{mag}) = f_2^{-1}[f_1(\alpha)] \quad (2)$$

$$\tilde{i}_A = \tilde{i}_A^{mag} + i_A^{coil} \quad (3)$$

$$\psi_A = f_2(\tilde{i}_A) = f_2\{f_2^{-1}[f_1(\alpha)] + i_A^{coil}\} = f(\alpha, i_A^{coil}) \quad (4)$$

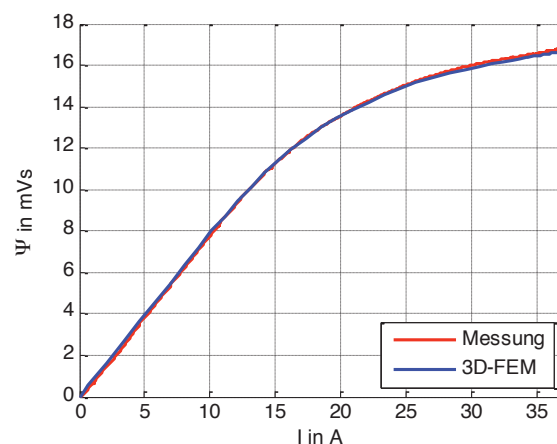


Bild 1: Ψ -I-Kennlinie für eine Spule im magnetischen Kreis mit Luftspalt.

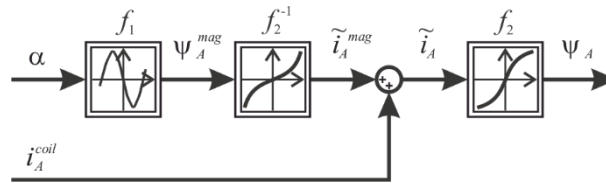


Bild 2: Berechnung der durch Erreger und Anker verursachten magnetischen Flussverketung einer Spule mittels der in Bild 1 gezeigten Ψ -I-Kennlinie. Die mit einer Tilde versehenen Ströme sind virtuelle Größen.

3 MODELLBESCHREIBUNG

Man unterscheidet zwischen verhaltensorientierten Modellen, welche die wesentlichen Funktionen eines Gesamtsystems abbilden, und strukturorientierten Modellen, die durch eine sehr hohe Detailtiefe ausgezeichnet sind (vgl. 0). Letztere haben den Nachteil, dass ein sehr hoher Rechenaufwand in Kauf genommen werden muss.

Für die Berechnung der transienten Verläufe von Strom und Spannung in bzw. an den einzelnen Spulen und der Zuleitung wurde ein modularer Aufbau gewählt. Durch eine geschickte Kombination aus verhaltens- und strukturorientierter Simulation kann trotz einer stark verkürzten Rechenzeit eine hohe Genauigkeit gewährleistet werden.

Eingebettet in ein MATLAB/Simulink®-Modell werden die konservativen Signale mit dem internen Schaltungs-Simulator Simscape® berechnet (siehe Bild 3). Hier werden die Spannungsquellen und die jeweiligen Spulenverschaltungstopologien infolge der aktuellen Bürstenpositionen abgebildet. Die Ansteuerung der Spannungsquelle und die vom Drehwinkel abhängige Kontaktierung der Kommutatorlamellen mit den Bürsten sind die Eingangssignale des physikalischen Modells.

Es verbleibt noch die Ansteuerung der induzierten Spannung in jeder Spule. Sie ergibt sich aus der zeitlichen Änderung der magnetischen Flussverketung. Diese wiederum hängt zum einen von den Durchflutungsquellen aus Permanentmagnet und Spulenstrom ab, zum anderen von der Remanenz des magnetischen Kreises. Die Berechnung der von den beiden magnetischen Durchflutungsquellen erzeugten Gesamtflussverketung stellt das Kernthema dieser Arbeit dar und ist gemäß Bild 2 in Simulink implementiert.

Die Analyse des magnetischen Kreises auf Strukturebene wird in einem eigenen Teilmodul vorgenommen. Mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) wird einmalig die Flussverketung abhängig von Permeabilität und Geometrie der Materialien berechnet.

Die von den Magneten erzeugte Flussverketung in der jeweiligen Spule ist, je nach Stellung des Zahns zum Magneten, vom Drehwinkel abhängig. In Bild 4 ist der aus einer 3D-FEM-Simulation berechnete Verlauf bzgl. des Winkels α aufgetragen. Die Simulation wurde durch eine Messung verifiziert. Hierbei wurde die induzierte Spannung an einem Zahn bei einer konstanten Drehzahl und ohne Eingangsspannung gemessen und anschließend mathematisch integriert. Die etwas kleinere Amplitude der Messung ist dadurch zu begründen, dass u.a. während des Fertigungsprozesses die Magneten nicht ideal radial orientiert wurden. Schwankungen in der Remanenzflussdichte und Koerzitivfeldstärke konnten in Messungen beobachtet werden (siehe 0). Auch Höhenunterschiede der verbauten Dauermagnete wirken sich proportional auf den erzeugten Fluss aus. Lagetoleranzen der Magnete im Gehäuse sind an verschobenen Nulldurchgängen erkennbar. Das gemessene Ergebnis stellt die Funktion f_1 gemäß Gleichung (1) dar und ist in Form einer Lookup-Tabelle hinterlegt.

Des Weiteren ist die Induktivität des magnetischen Kreises zu bestimmen. Allgemein beschreibt sie das Vermögen eines stromführenden Leiters, einen magnetischen Fluss zu erzeugen. Je nach Auslegung geht der magnetische Kreis lokal in Sättigung. D.h. die Permeabilität im Material nimmt an diesen Stellen ab. Eine zusätzliche Stromerhöhung führt nicht mehr im selben Ausmaß

zu einer größeren Flussverkettung. Es ergibt sich eine nichtlineare Charakteristik. Die Ψ -I-Kennlinie (siehe Bild 1) wird aus einer weiteren FEM-Simulation gewonnen und in der Lookup Tabelle f_2 abgespeichert.

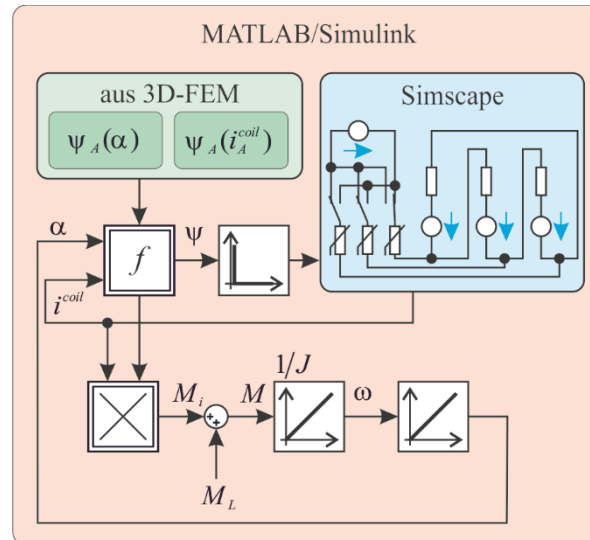


Bild 3: Struktur des Motormodells. Mit Kennlinien aus FEM-Simulationen werden die Flussverkettungen der Spulen berechnet. Das elektrische Netzwerk wird mit einem Schaltungssimulator nachgebildet. Im unteren Bereich ist die Berechnung von Drehmoment, Drehzahl und Drehwinkel aus Strom und Flussverkettung dargestellt.

3.1 Induktive Kopplung

Im Motormodell wird jede Spule als eigenständiges System betrachtet und als Eintor modelliert. Abhängig von der Kommutatorposition wird diese mit der Eingangsspannung beaufschlagt, sodass der Spulenstrom fließt. Das Spulenmodell besteht aus einem temperaturabhängigen ohmschen Widerstand und einer Induktionsspannungsquelle. Durch eine Flussänderung im Zahn bzw. abhängig von Drehzahl und Stromänderung wird in der Spule eine Spannung induziert, die ihrer Ursache entgegenwirkt. In Bild 5 ist die Struktur für eine Spule gezeigt. Gemäß des Wickelschemas und der Verschaltung am Kommutator ergeben mehrere Spulen das elektrische Netzwerk des Motors.

Der mit der Spule umwickelte Zahn ist zusammen mit den benachbarten Zähnen Teil eines Magnetkreises. Die Feldlinien schließen sich über Luftspalt und Gehäusejoch. Die Reluktanz berechnet sich aus der Permeabilität und der Geometrie der verwendeten Materialien nach:

$$R_M = \frac{\Theta}{\Phi} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \quad (5)$$

Die relative Permeabilität des Magnetmaterials entspricht fast der des Vakuums, sodass die Reluktanz des Magnetkreises durch das Einbringen eines Magneten in den Luftspalt nahezu unverändert bleibt.

Die Induktivität verknüpft den elektrischen und den magnetischen Kreis. Die Änderung der Flussverkettung einer Spule induziert eine Spannung, sodass ein Strom fließt. Dieser erzeugt wiederum einen magnetischen Fluss. Die Topologie der Spulenverschaltung von kleinen Gleichstrommaschinen mit konzentrierten Wicklungen ist meist ringförmig. Abhängig von der

Kommutatorstellung fließt durch mehrere Spulen derselbe Strom. Durch diese Bedingung wirkt sich eine Flussänderung in einer Spule auch auf die anderen Spulen aus. Die Variation eines Spulenstroms beeinflusst direkt die Ströme der anderen Spulen und damit auch deren Flussverkettungen. Dieser geschlossene Kreis realisiert die Koppelinduktivität zwischen zwei Spulen.

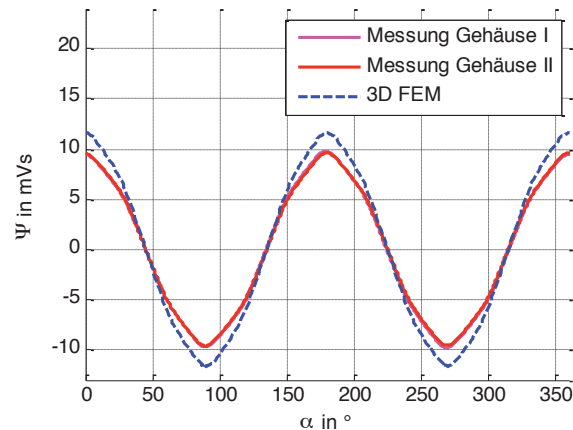


Bild 4: Flussverkettung der Magneten in einer Spule in Abhängigkeit des Drehwinkels.

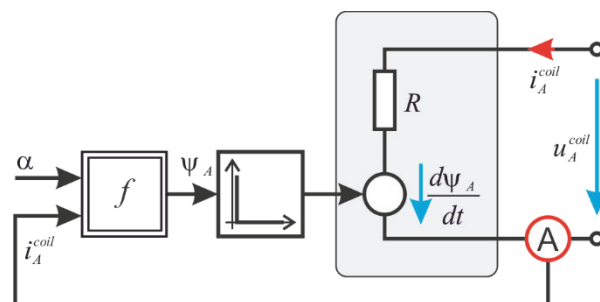


Bild 5: Struktur des Motormodells für eine Spule zur Berechnung der transienten Verläufe von Spulenstrom und -spannung sowie der Flussverkettung. Die Übertragungsfunktion f ist in Bild 2 dargestellt.

3.2 Nichtlineare Überlagerung von magnetischen Durchflutungsquellen

Die Berechnung eines induktiv gekoppelten elektrischen Netzwerkes mittels eines Schaltungssimulators erfordert als Eingangssignale die magnetischen Größen. Für jede Spule ist daher die Induktionsspannung bzw. die transiente Flussverkettung zu ermitteln.

Neben der Kopplung der Spulen sind als weitere Durchflutungsquellen die Permanentmagnete zu untersuchen. Sie erzeugen einen zusätzlichen Fluss im magnetischen Kreis und beeinflussen nichtlinear die Induktivität der Spulen.

Der oben gemachte Ansatz beruht darauf, den Magneten als weitere Spule im magnetischen Kreis zu sehen. Die an der Magnethöhe anliegende magnetische Quellspannung wird in einen äquivalenten Ersatzstrom abgebildet (gekennzeichnet durch eine Tilde).

$$\Theta = \oint_C \vec{H} d\vec{s} = \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (6)$$

$$\Theta^{mag} = H^{mag} \cdot h^{mag} = N \cdot \tilde{I}_A^{mag} \quad (7)$$

Im Gegensatz zum magnetischen Kreis können die Ströme im elektrischen Kreis linear überlagert werden. Der zur Durchflutung des Magneten äquivalente Ersatzstrom wird mit dem Spulenstrom addiert. Der eingebrachte Magnet wirkt folglich wie eine Erhöhung des Spulenstroms.

Aufgrund des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Flussverkettung und Spulenstrom verringert sich folglich die Induktivität. Das Material ist durch den Magneten bereits vorgesättigt. Der Spulenstrom hat nicht mehr das gleiche Vermögen einen Fluss zu generieren wie ohne Magnet.

Der Effekt ist sehr anschaulich an der Ψ -I-Kennlinie zu erklären. Die Ψ -I-Kennlinie wird gemessen, indem man die induzierte Spannung einer eigenen Messspule, welche über den zu messenden Zahn gewickelt wird, misst und anschließend integriert. Dazu wird ein Spannungssprung auf zwei benachbarte Lamellen gegeben. Gleichzeitig wird der Spulenstrom aufgezeichnet. Wenn der Zahn zwischen zwei Magneten in der Pollücke steht erhält man durch Messung bzw. FEM-Simulation die Kennlinien in Bild 1. Es ist kein Einfluss von den Magneten sichtbar. Steht der Zahn unter einem Magnet verschiebt sich die Ordinate nach links. Bei Spulenstrom gleich Null führt die Spule bereits den Fluss des Magnets (siehe

Bild 6). Anschließend wird die Flussverkettung an der Ψ -I-Kennlinie in einen äquivalenten Ersatzstrom abgebildet. Verschiebt man die Kennlinie um diesen Wert nach rechts, liegt sie beinahe deckungsgleich auf der in der Pollücke simulierten Kennlinie. D.h. die Charakteristik des magnetischen Kreises bleibt erhalten, nur der Startwert ändert sich. Das Vorgehen der Transformation f_2 bzw. f_2^{-1} aus Bild 2 wurde somit durch Simulation und Messung verifiziert.

4 VERIFIKATION DES MOTORMODELLS

Für die Verifikation des Motormodells wurde ein Prüfstand aufgebaut, um neben Motorstrom und –spannung auch die Größen an den Spulen des rotierenden Ankers zu messen. Hierbei besteht die Herausforderung darin, durch das Messverfahren das Gesamtsystem möglichst wenig zu beeinflussen. Um keine zusätzlichen Messwiderstände in den niederohmigen Ankerkreis integrieren zu müssen, wurde eine berührungslose Strommessung mittels einer Strommesszange eingesetzt.

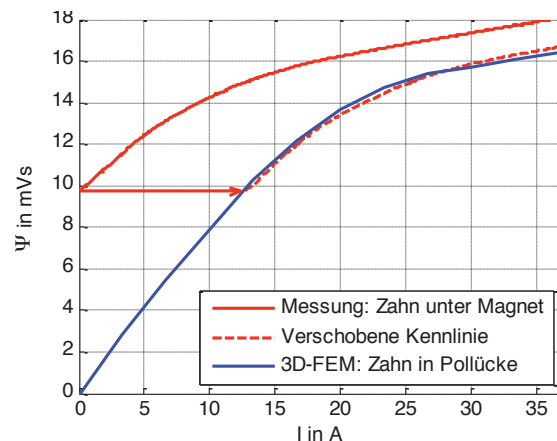


Bild 6: Auswirkung des Flusses eines Permanentmagneten auf die Ψ -I-Kennlinie einer Spule im magnetischen Kreis. Die Kennlinie lässt sich waagrecht auf die in der Pollücke simulierten Kennlinie verschieben.

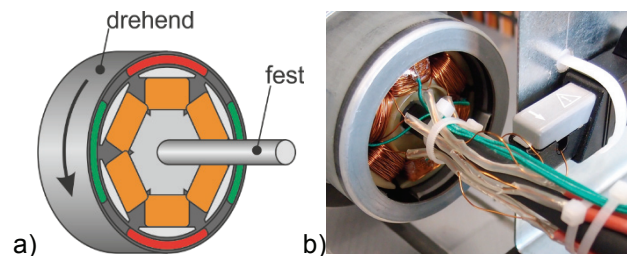


Bild 7: a) Stehendes Bezugssystem für die Messung der Ankersignale. b) Messung der Spulenströme mittels Strommesszange. Die Spulen sind temperaturüberwacht.

Um Spulenstrom und –spannung einfach messen zu können wurden die Bezugssysteme von Anker und Magnetgehäuse getauscht. Das Gehäuse mit Bürstensystem dreht sich um den stillstehenden Anker mit Kommutator (siehe Bild 7). Die Spannungsversorgung des Bürstensystems wird über ein zusätzliches Schleifringsystem bereitgestellt. Ein drehzahl- bzw. drehmoment geregelter Antrieb belastet den Prüfling in definierten Arbeitspunkten.

Über herausgezogene Windungen der Ankerspulen lässt sich nun mit einer Messzange der jeweilige Spulenstrom erfassen. Die Lamellenpotentiale werden an den Windingenden abgegriffen.

In Bild 8 sind die Ergebnisse aus der Simulation des Motormodells im Vergleich zu den Messergebnissen am Motorprüfstand zu sehen. Während des Kommutierungsvorgangs, wenn eine Bürste von einer Lamelle zur nächsten wechselt, treten große Stromänderungen auf. Sie führen ebenfalls zu steilen Gradienten in der Flussverkettung. Deren Differentiation führt schließlich zu der induzierten Spannung U_{cof} im oberen Diagramm. Hier sind große Spannungsüberhöhungen an den Übergängen sichtbar.

Die Verläufe von Messung und Simulation sind nahezu deckungsgleich. Aufgrund der hohen Ströme und der dadurch starken Wärmeentwicklung an den Spulen wurde der Widerstand in der Simulation der Betriebstemperatur angepasst. Ansonsten wurde lediglich der Spannungsabfall an der Zuleitung und dem zusätzliche Schleifringsystem in der Simulation korrigiert.

Im Bild 8 unten ist zum Vergleich die Flussverkettung bei Leerlauf zusätzlich mit eingezeichnet. Der Fluss wird hier ausschließlich von den Magneten erzeugt. Deutlich zu erkennen ist die Verschiebung des Nulldurchgangs bei Belastung (Ankerrückwirkung). Der Fluss wird nun aus der Überlagerung der Durchflutungen von Magneten und Spulen generiert. Mit steigendem Motorstrom wird das Ankerfeld stärker und führt zu einer Drehung der Achse des Luftspaltfeldes. Dadurch kommt es zu einer zunehmenden Verschiebung der neutralen Zone in der Pollücke. Das sich hier nun ausbildende Feld induziert zusätzliche Spannungsanteile in den kommutierenden Spulen, welche die Stromwendung behindern (vgl. 0).

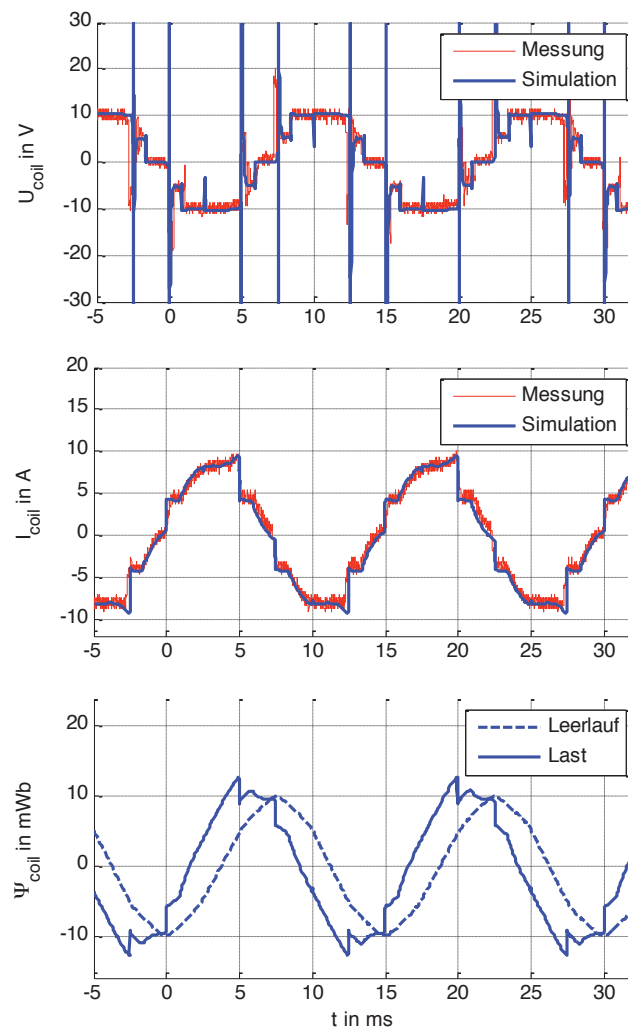


Bild 8: Vergleich zwischen den Ergebnissen aus Simulation des Motormodells und Messung am Motorprüfstand. Die Eingangsspannung beträgt 12 VDC und die Drehzahl konstant 2000 U/min. Im obersten Graph ist die Spannung zwischen zwei Lamellen und im mittleren Graph der Spulenstrom dargestellt. Im unteren Bild ist die simulierte Flussverkettung einmal für Leerlauf und einmal mit der vorgegebenen Drehzahl aufgetragen.

Für Gleichstrommotoren kleiner Leistung ist es üblich die Ankerrückwirkung durch Verschieben der Bürstenbrücke bzgl. der Magneten zu kompensieren, sodass während der Kommutierung die Änderung der Flussverkettung möglichst Null ist.

Mit dem vorgestellten Motormodell ist es jetzt möglich, den Verschaltungswinkel in relativ kurzer Zeit zu optimieren. Wohingegen die 3D-FEM-Simulationen für die Analyse des magnetischen Kreises mehrere Stunden benötigen, dauert ein Simulationsdurchgang beim hier beschriebenen Motormodell wenige Sekunden.

Es sind auch dynamische Simulationen möglich, wie z.B. der Hochlauf eines Motors. In Bild 9 ist der gemessene Motorstrom im Vergleich zum berechneten Verlauf beim Einschalten aufgetragen.

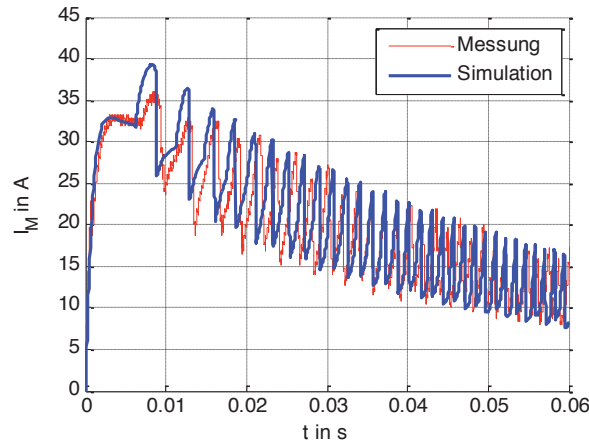


Bild 9: Motorstrom bei Hochlauf des Motors aus dem Stillstand ohne Last bei 12 VDC Eingangsspannung.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Messung am Motorprüfstand zeigt, dass der vorgeschlagene Simulations-Workflow offensichtlich zu richtigen Resultaten führt. Es wurde die Idee verfolgt, die Durchflutung der Magneten als Ströme zu interpretieren und diese dann auf die Spulenströme zu addieren. Durch eine geschlossene Simulations- und Messkette konnte die Vorgehensweise bereits an den Zwischenergebnissen bestätigt werden – das Verschieben der Ψ -I-Kennlinie um den Durchflutungsstrom des Magneten ist bei der untersuchten Motorvariante zulässig.

Der Workflow für die Entwicklung des Motormodells soll an weiteren Motorvarianten mit Einzelzahnwicklungen untersucht werden, um das Vorgehen zusätzlich zu validieren. Bisher wurden Streuflüsse zwischen den Spulen vernachlässigt. Die Auswirkungen werden bereits experimentell analysiert. Ferner ist die Berechnung der Kraft bzw. des Drehmoments zu optimieren. Inwieweit die Einflüsse von Bürstenfeuer und die Bürsten-Kommutator-Übergangswiderstände innerhalb des vorgestellten Modells modellierbar sind muss noch geklärt werden. Evtl. sind bei letztgenannten Themen detailliertere Modelle auf Strukturebene nötig.

REFERENZEN

HEIDRICH, T.: KOMMUTIERUNGSBERECHNUNG VON PERMANENTMAGNETERREGTEN KOMMUTATORMOTOREN KLEINER LEISTUNG. DISSERTATION, TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU, 2011.

KRASSER, B.: OPTIMIERTE AUSLEGUNG EINER MODULAREN DAUERMAGNETMASCHINE FÜR EIN AUTARKES HYBRIDFAHRZEUG. DISSERTATION, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, 2000.

WEBER, C.: ENTWICKLUNG EINES GEKOPPELTEN DYNAMISCHEN SIMULATIONSMODELLS FÜR GLEICHSTROMMOTOREN. MASTERARBEIT, HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN WÜRZBURG-SCHWEINFURT, 2013.