

1. Einleitung

Die kontinuierliche Absenkung der Schadstoff- und Kohlenstoffdioxidgrenzwerte für Kraftfahrzeuge hat dazu geführt, dass nahezu alle großen Automobilhersteller Modelle mit elektrifiziertem Antriebsstrang im Portfolio haben. Im Fokus sind dabei lokal emissionsfreie Hybridfahrzeuge mit Lademöglichkeit (engl. Plugin Hybrid Electric Vehicle, PHEV) sowie rein batterieelektrische Fahrzeuge (engl. Battery Electric Vehicle, BEV). Aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte und hohen Effizienz werden meist permanenterregte Synchronmaschinen in den Antriebssträngen dieser Fahrzeuge verwendet. Nur eine kleine Anzahl an Modellen verwendet Asynchronmaschinen als Traktionsantrieb [51]. Dazu gehören beispielsweise die BEV-Modelle *Tesla Model S* und *Audi e-tron*.

Ein Hauptvorteil der Asynchronmaschine liegt in der Unabhängigkeit vom Markt für Seltene Erden, da kein Magnetmaterial verwendet wird [46]. Die Einzelkosten pro Maschine sind dadurch geringer als bei der permanenterregten Synchronmaschine. Außerdem hat die Asynchronmaschine im Gegensatz zur permanenterregten Synchronmaschine nur sehr geringe Schleppverluste im Leerlauf. Dies ist vor allem bei Fahrzeugen mit Allradantrieb von Vorteil, wenn eine Achse von der Betriebsstrategie in den Leerlauf geschaltet wird [46]. Die Rotoren der Asynchronmaschinen im Automobilbereich sind als Käfigläufer ohne Schleifringe mit verschleißenden Bürsten ausgeführt.

1.1. Motivation

Der Auslegungsprozess elektrischer Antriebsstränge benötigt möglichst genaue Simulationsmodelle der einzelnen Komponenten, um frühzeitig die Effizienz und Leistungsfähigkeit einer Antriebsstrangkonfiguration bewerten zu können. Zu den Komponenten eines rein elektrischen Antriebsstrangs gehören die Batterie, der Inverter, die elektrische Maschine und das Getriebe. Hinsichtlich der Auslegung der elektrischen Maschine ist vor allem die Interaktion mit dem Inverter zu beachten. Die Taktfrequenz, das Modulationsverfahren und die Ansteuerparameter je Betriebspunkt haben zusammen mit der Regelung einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz der elektrischen Maschine. In Abb. 1.1 ist der gemessene Strom $i_{a,mess}$ des ersten Statorstrangs der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Beispiel-Asynchronmaschine dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Strom stark von einem sinusförmigen Signalverlauf abweicht. Während die niederfrequenten Stromharmonischen durch das Maschinendesign zustande kommen, werden die hochfrequenten Stromrippel durch den Inverterbetrieb verursacht.

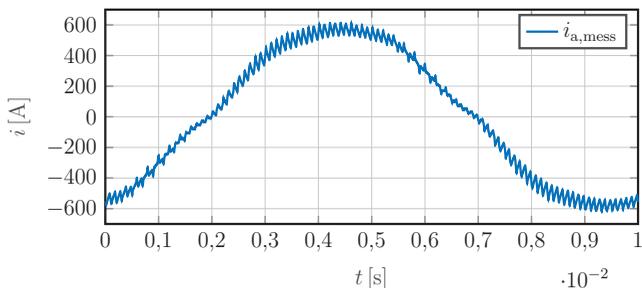


Abb. 1.1. – Gemessener Statorstrom $i_{a,mess}$ der Beispielmachine (Statorfrequenz $f_s = 100$ Hz, Drehzahl $n = 2880 \text{ min}^{-1}$, Invertertaktfrequenz $f_T = 5 \text{ kHz}$)

Im klassischen elektromagnetischen Entwurfsprozess elektrischer Maschinen werden zunächst die Hauptabmessungen, die Wicklung und der magnetische Kreis analytisch ausgelegt [41]. Anschließend werden numerische Methoden zur Nachrechnung und Optimierung eines Maschinendesigns verwendet. In den meisten Fällen kommt die Finite-Elemente-Methode (FE-Methode) zum Einsatz [48, 10]. Die Nichtlinearität des magnetischen Kreises kann damit gut berücksichtigt werden. Häufig wird aber die vereinfachende Annahme getroffen, dass die Ströme der Maschine sinusförmig sind.

Mithilfe einer transienten spannungsgetriebenen FE-Simulation ist es möglich, das Verhalten einer Asynchronmaschine unter realistischer Bestromung, d. h. mit Stromharmonischen wie in Abb. 1.1, untersuchen zu können. Die Struktur einer solchen FE-Simulation ist in Abb. 1.2 dargestellt. Unter sinusförmiger Spannungsanregung werden die Ströme, das Drehmoment und die Verluste unter Berücksichtigung der maschineneigenen Stromharmonischen berechnet. Bei Verwendung eines Invertermodells wird das FE-Modell mit Spannungspulsmustern angeregt und der Einfluss des Inverters auf das Drehmoment und die Verluste berücksichtigt. Die Ströme beinhalten dann sowohl maschineneigene als auch inverterspezifische Harmonische.

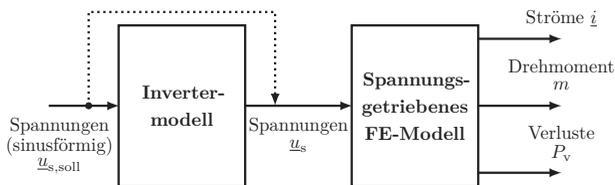


Abb. 1.2. – Transiente spannungsgetriebene FE-Simulation mit Anregung durch ein Invertermodell oder mit sinusförmiger Spannung

Die spannungsgetriebene FE-Simulation ist somit ein sehr genaues Werkzeug, um das elektromagnetische Verhalten einer Asynchronmaschine untersuchen zu können. Allerdings sind die Simulationen mit einem hohen Rechenaufwand verbunden. Da die Stator- und Rotorströme zu Beginn einer spannungsgetriebenen FE-Simulation in der Regel mit null initialisiert werden, müssen sich diese erst einstellen. Erst nach diesem Einschwingvorgang können die Ergebnisse des zu untersuchenden stationären Betriebspunkts verwendet werden. In Abb. 1.3 sind drei Einschwingvorgänge anhand des Drehmoments für unterschiedliche Spannungsamplituden \hat{U} bei der gleichen Drehzahl $n = 2880 \text{ min}^{-1}$ und der gleichen Statorfrequenz $f_s = 100 \text{ Hz}$ dargestellt. Es sind bei diesen Beispielen circa 25 elektrische Statorperioden bis $t = 0,25 \text{ s}$ notwendig bis die Einschwingvorgänge abgeklungen sind. In der Regel liegt die Rechenzeit für eine FE-Simulation mit sinusförmiger Spannungsanregung in Abhängigkeit der Genauigkeit und des Betriebspunkts im Bereich von mehreren Stunden. Bei Verwendung eines Invertermodells muss die Zeitschrittweite aufgrund der Pulsmuster deutlich verkleinert werden, was zu Rechenzeiten im Bereich von mehreren Tagen führt.

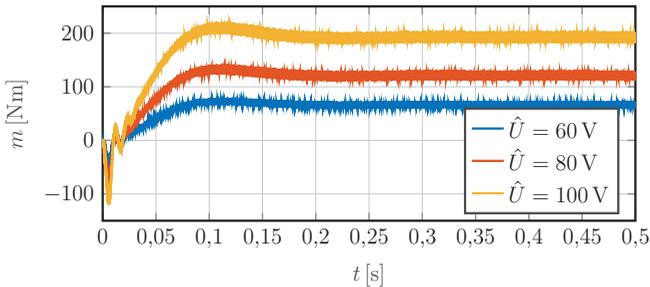


Abb. 1.3. – Einschwingvorgänge transienter spannungsgetriebener FE-Simulationen am Beispiel des Drehmoments m bei sinusförmiger Spannungsanregung mit verschiedenen Amplituden \hat{U} (Statorfrequenz $f_s = 100 \text{ Hz}$, Drehzahl $n = 2880 \text{ min}^{-1}$)

Aufgrund der hohen Rechenzeit der transienten spannungsgetriebenen FE-Simulation ist es im Auslegungsprozess von Asynchronmaschinen schwierig, Ergebnisse im Inverterbetrieb berücksichtigen zu können. Deshalb liegt die Motivation für die vorliegende Arbeit darin, den Einfluss des Inverterbetriebs mit einer alternativen, genauen und rechenzeiteffizienten Simulationstechnik untersuchen zu können.

1.2. Anforderungen an die Simulationstechnik

Aus der Motivation der vorliegenden Arbeit können die folgenden Anforderungen an eine zur transienten spannungsgetriebenen FE-Simulation alternativen Simulationstechnik für Asynchronmaschinen abgeleitet und formuliert werden:

- 1) **Drehmoment und Verluste:** Die Simulationsmethodik muss zur Effizienzbewertung einer Asynchronmaschine das Drehmoment und die Verluste für eine gegebene Drehzahl und eine Anregung mit sinusförmiger Spannung oder einem Invertermodell berechnen können. Zu den zu berechnenden Verlusten gehören die Stromwärmeverluste in der Statorwicklung und im Rotorkäfig sowie die Eisenverluste von Stator- und Rotorblechpaket.
 - a) **Stromberechnung:** Eine genaue Stromberechnung ist die Basis für die Bestimmung von Drehmoment und Verlusten. Deshalb soll die Simulationsmethodik die Ströme aller Statorstränge und Rotorstäbe bestimmen können. Die Stromverläufe sollen sowohl die maschineneigenen als auch die inverter-spezifischen Harmonischen enthalten.
 - b) **B-Feld:** Eine genaue Berechnung der Eisenverluste basiert auf der sich zeitlich verändernden und örtlich verteilten magnetischen Flussdichte (B-Feld). Deshalb muss die Simulationsmethodik den zeitlichen Verlauf des B-Felds an definierten Orten in den Blechpaketen berechnen können.
- 2) **Parametrierungsprozess:** Die Simulationsmethodik soll sich mit einem systematischen Parametrierungsprozess für den kompletten motorischen und generatorischen Betriebsbereich einer Asynchronmaschine bedaten lassen.
- 3) **Rechengenauigkeit:** Die Genauigkeit der berechneten Ströme, des Drehmoments und der Verluste soll bei sinusförmiger Spannungsanregung und bei Anregung mit einem Invertermodell auf dem Niveau einer transienten spannungsgetriebenen FE-Simulation liegen.
- 4) **Rechenzeiteffizienz:** Die Rechenzeiten der Simulationsmethodik sollen je untersuchtem Betriebspunkt, vor allem bei Anregung mit einem Invertermodell, deutlich geringer ausfallen als bei der spannungsgetriebenen FE-Simulation.

Die transiente spannungsgetriebene FE-Simulation erfüllt bis auf die Rechenzeiteffizienz alle Anforderungen und wird deshalb bei der Bewertung von alternativen Simulationsmethodiken als Referenz verwendet.

1.3. Stand der Wissenschaft

Für die Beschreibung des Verhaltens von Asynchronmaschinen sind sehr unterschiedliche Modellierungsmethoden Stand der Wissenschaft. Die am häufigsten verwendeten Methoden werden im Folgenden zusammengefasst und entsprechend den Anforderungen aus Abschnitt 1.2 eingeordnet.

- **Ersatzschaltbilder:** Die einfachste Art zur Modellierung von Asynchronmaschinen mit der geringsten Rechenzeit ist die Verwendung von Ersatzschaltbildern. Das klassische T-Ersatzschaltbild zur Beschreibung des stationären Verhaltens

kann in verschiedenen Ausprägungen der Literatur [11, 12, 21] entnommen werden. Es wird dabei eine reine Grundwellenbetrachtung unter Verwendung der komplexen Wechselstromrechnung durchgeführt [21]. Zur Steigerung der Genauigkeit können Ersatzschaltbildparameter sättigungs- bzw. frequenzabhängig als Kennlinien angegeben werden. In [10] wird ein Verfahren zur Bestimmung dieser Kennlinien mittels 2D Finite-Elemente-Simulationen erläutert. In [69] werden 3D FE-Simulationen verwendet, um den Einfluss des Wickelkopfes und der Endringe einer Käfigläufer-Asynchronmaschine berücksichtigen zu können.

Transiente Vorgänge können mithilfe der Raumzeigertheorie [32] und den entsprechenden Ersatzschaltbildern [58] abgebildet werden. Im Gegensatz zu den Zeigern der komplexen Wechselstromrechnung gibt es bei den Raumzeigern keine Einschränkungen für die Zeitverläufe der Ströme [21]. Untersuchungen zur Berücksichtigung der Sättigung sind bereits in [31] zu finden. Verschiedene Methoden zur Identifikation von Asynchronmaschinen am Prüfstand zur Parametrierung von transienten Ersatzschaltbildern werden in [30] diskutiert.

Hinsichtlich der Anforderungen im vorherigen Abschnitt bieten Ersatzschaltbilder sehr geringe Rechenzeiten aber eine deutlich reduzierte Genauigkeit im Vergleich zur spannungsgetriebenen FE-Simulation. In der Regel werden nur die Grundschwingungen der Ströme ohne höhere Harmonische bestimmt. Die harmonischen Anteile im Drehmoment werden meistens ebenfalls vernachlässigt. Außerdem ist keine Berechnung der Eisenverluste auf Basis des B-Felds möglich.

- **Reluktanznetzwerke:** Eine Methode zur Modellierung elektrischer Maschinen auf Basis des Feldverlaufs sind Reluktanznetzwerke. Der magnetische Kreis wird durch magnetische Widerstände auf vorab definierten Flusspfaden diskretisiert. Die Komplexität der entstehenden Netzwerke ist deutlich geringer als die eines FE-Modells und die Rechenzeiten sind entsprechend geringer. Eine Literaturübersicht zum Vergleich von Reluktanznetzwerken und der FE-Simulation bietet [71]. Die Umsetzung einer Geometrie eines Magnetkreises in ein Reluktanznetzwerk und die Verwendung als schnelles Modell zur Optimierung wird in [52] gezeigt. Hinsichtlich der Genauigkeit wird aber eine Nachrechnung mit FE-Simulationen oder experimentelle Untersuchungen der optimierten Geometrie empfohlen. In [38] werden Reluktanznetzwerke als Berechnungsgrundlage eines automatisierten Entwurfsvorgangs für elektrische Maschinen verwendet.

Die Modellierung einer Asynchronmaschine mit einem Reluktanznetzwerk mit guter Übereinstimmung zur FE-Simulation findet sich bereits in [16]. In [1] wird die Verwendung eines 3D Reluktanznetzwerks für eine Asynchronmaschine vorgestellt und die geringe Rechenzeit gegenüber einer transienten 2D FE-Simulation hervorgehoben. Neben den geringen Rechenzeiten werden in [23] die einfache Implementierbarkeit und die Möglichkeit zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten als Vorteile von Reluktanznetzwerken genannt. Die notwendige Vorkenntnis über die Lage der Flusspfade zum Modellaufbau und die aufwendige Kraft- bzw. Drehmomentberechnung mittels virtueller Arbeit wird als nachteilig angesehen.

Durch die geringen Rechenzeiten wird einzig die Anforderung Rechenzeiteffizienz aus Abschnitt 1.2 von den Reluktanznetzwerken voll erfüllt. Die Genauigkeit der Ströme und des Drehmoments ist geringer als die einer FE-Simulation und stark von der gewählten Diskretisierung abhängig. Die gröbere örtliche Diskretisierung führt im Vergleich zur FE-Simulation auch zu einer ungenaueren Berechnung des B-Felds, das für eine Eisenverlustberechnung benötigt wird. Für einen systematischen Parametrierungsprozess über den kompletten Betriebsbereich müssen alle auftretenden Flusspfade für alle Betriebspunkte vorgesehen werden.

- **Harmonische FE-Simulation:** Bei der harmonischen FE-Simulation wird im Vergleich zur transienten FE-Simulation vereinfachend angenommen, dass die Zeitabhängigkeit des Feldes sinusförmig ist [2]. Dies führt zu einer enormen Reduktion der Rechenzeit im Vergleich zur transienten FE-Simulation. Durch die Vereinfachung werden aber höhere harmonische Anteile im Feld vernachlässigt, die auch zur Sättigung beitragen. Die Nichtlinearität des Elektroblechs wird deshalb häufig mit effektiven Magnetisierungskennlinien berücksichtigt, die auf Mittelungsregeln basieren [35, 43, 63] und unterschiedlich gute Ergebnisse im Vergleich zur transienten FE-Simulation liefern. In [50] wird dieser Ansatz auf anisotrope Materialien erweitert.

Als Anwendungsbeispiel für die harmonische FE-Simulation dient in [2] eine Käfigläufer-Asynchronmaschine. Dabei wird auch die Modellierung der Schaltkreise von Statorwicklung und Rotorkäfig sowie die Kopplung der Schaltkreise mit der FE-Simulation gezeigt. In [55] werden Ergebnisse der harmonischen und der transienten FE-Simulation für eine Käfigläufer-Asynchronmaschine gegenübergestellt. Die harmonische und die transiente FE-Simulation zeigen für niedrige Sättigungslevel eine gute Übereinstimmung, jedoch Abweichungen bei steigender Sättigung. Die transiente FE-Simulation zeigt die beste Übereinstimmung mit Messungen. Ein weiterer typischer Anwendungsfall der harmonischen FE-Simulation ist neben der schnellen Berechnung von Asynchronmaschinen die Initialisierung einer transienten FE-Simulation [49, 70]. Es wird gezeigt, dass der Einschwingvorgang einer transienten FE-Simulationen durch den Start mit den Felddaten einer harmonischen FE-Simulation verkürzt werden kann.

Durch die sinusförmigen Feldverläufe sind auch die Ströme der harmonischen FE-Simulation sinusförmig. Die Anforderung zur Abbildung von maschineneigenen und inverterspezifischen Stromharmonischen aus Abschnitt 1.2 wird von der harmonischen FE-Simulation dadurch nicht erfüllt. Eine genaue Bestimmung der Eisenverluste ist mit dem sinusförmigen B-Feld ebenfalls nicht möglich. Aufgrund der systematischen Parametrierbarkeit und der hohen Rechenzeiteffizienz ist die harmonische FE-Simulation aber für andere Anwendungen ohne eine Untersuchung von Stromharmonischen sehr gut geeignet.

- **Transiente FE-Simulation:** Erste Ansätze zur Lösung nichtlinearer magnetischer Feldprobleme mittels finiter Elemente gibt es bereits in [57]. Eine der ersten Untersuchungen von Käfigläufer-Asynchronmaschinen mit transienten FE-Simulationen ist in [47] zu finden, wobei auch Harmonische im Rotorstabsstrom diskutiert werden. Die theoretischen Grundlagen zur transienten FE-Simulation von Asynchronmaschinen können in [48] nachgeschlagen werden. In der Regel werden zur Berechnung von Asynchronmaschinen transiente FE-Simulationen in 2D durchgeführt. Geschrägte Rotorkäfige können durch mehrere 2D Querschnitte an verschiedenen axialen Positionen berücksichtigt werden [37]. Für noch genauere Untersuchungen können auch 3D FE-Simulationen durchgeführt werden [68].

Aufgrund des in Abschnitt 1.1 beschriebenen Einschwingvorgangs bei der Untersuchung von Asynchronmaschinen und die notwendige kleine Zeitschrittweite bei der Anregung mit einem Invertermodell ergeben sich sehr hohe Rechenzeiten. Wie bereits erwähnt, erfüllt die transiente spannungsgetriebene FE-Simulation alle Anforderungen aus Abschnitt 1.2 bis auf die Rechenzeiteffizienz.

- **Semi-analytische Modelle:** Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung elektrischer Maschinen sind semi-analytische Modelle. Im Rahmen dieser Arbeit werden semi-analytische Modelle als eine Kombination des Differentialgleichungssystems des entsprechenden Maschinentyps mit einer zusätzlichen Beschreibung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Strömen und Flussverkettungen definiert. Die Parametrierung kann mittels einmalig vorab durchgeführten FE-Simulationen oder Messungen erfolgen.

Im Sinne dieser Definition sind semi-analytische Modelle vorwiegend für permanent-erregte Synchronmaschinen im Stand der Wissenschaft zu finden. In [61, 28, 25, 15] werden semi-analytische Modelle für permanent-erregte Synchronmaschinen vorgestellt, deren Parametrierung auf nichtlinearen Induktivitäten basiert. Der direkte Zusammenhang zwischen Strömen und Flussverkettungen wird in [14, 65, 3] zur Parametrierung verwendet. Alle genannten Modelle beschreiben das Verhalten permanent-erregter Synchronmaschinen im rotorfesten d-q-Koordinatensystem mit den aus [44] bekannten Transformationsvorschriften.

Semi-analytische Modelle für Asynchronmaschinen sind deutlich seltener. In [4] ist ein auf Flussverkettungen basierendes semi-analytisches Modell zur Beschreibung des Grundschwingungsverhaltens der Stator- und Rotorströme einer Asynchronmaschine veröffentlicht. Eine andere Herangehensweise mittels iterativer Kopplung von Zustandsraummodell und FE-Modell ist in den aufeinander aufbauenden Veröffentlichungen [17, 7, 19, 8] zu finden. Mithilfe eines Zustandsraummodells mit Spannungsanregung werden iterativ Stromverläufe unter Verwendung von nichtlinearen Induktivitäten berechnet. Die FE-Simulation berechnet aus den Stromverläufen die nichtlinearen Induktivitäten für die nächste Iteration. Der Vorgang wird bis zur Erfüllung des Konvergenzkriteriums fortgeführt. Aufgrund der zur Laufzeit durchgeführten FE-Simulationen entspricht dieser Ansatz aber nicht der oben eingeführten Definition eines semi-analytischen Modells.

1.4. Eigener Ansatz

Im Folgenden wird der eigene Ansatz einer Simulationsmethodik für Asynchronmaschinen vorgestellt, der alle Anforderungen aus Abschnitt 1.2 erfüllt. Der Kern dieses Ansatzes ist ein semi-analytisches Modell, das der Definition in Abschnitt 1.3 entspricht. Die Modellstruktur des semi-analytischen Modells ist in Abb. 1.4 dargestellt. Die Hauptbestandteile sind die analytischen Schaltkreismodelle und der elektromagnetische Fingerabdruck. Die analytischen Schaltkreismodelle beschreiben die Statorwicklung und den Rotorkäfig der Asynchronmaschine. Im elektromagnetischen Fingerabdruck der Asynchronmaschine ist der nichtlineare Zusammenhang zwischen allen Strömen \underline{i} und allen Flussverkettungen $\underline{\psi}$ mit einer zusätzlichen Abhängigkeit vom Drehwinkel θ_m abgebildet. Die Parametrierung des elektromagnetischen Fingerabdrucks erfolgt durch einmalig vorab durchgeführte FE-Simulationen. Der Begriff „Fingerabdruck“ für diesen nichtlinearen Zusammenhang stammt aus [53] und wird darin für maschinencharakteristische Fluss-Strom-Kennlinien einer Reluktanzmaschine verwendet.

Die Zustandsgrößen des Differentialgleichungssystems der analytischen Schaltkreismodelle in Abb. 1.4 sind die Stator- und Rotorflussverkettungen $\underline{\psi}$. Die Schaltkreismodelle berücksichtigen außerdem alle Elemente, die nicht im elektromagnetischen Fingerabdruck abgebildet sind. Dazu gehören die Widerstände und Wickelkopfinduktivitäten der Statorwicklung sowie die Widerstände und Induktivitäten der Dringröße des Rotorkäfigs. Der Statorkreis wird von den Statorspannungen \underline{u}_s angeregt und gibt die Flussverkettungen zusammen mit den Rotorgrößen als gemeinsamen Vektor $\underline{\psi}$ aus. Der mit FE-Ergebnissen parametrierte elektromagnetische Fingerabdruck berechnet die Stator- und Rotorströme \underline{i} und gibt diese an die Schaltkreismodelle zurück.

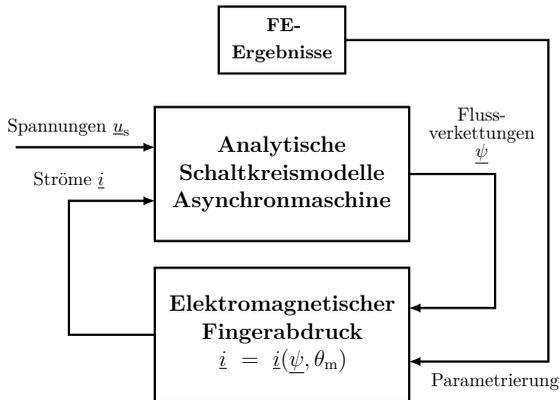


Abb. 1.4. – Modellstruktur des semi-analytischen Modells des eigenen Ansatzes

Der Berechnungsablauf mit eingebundenem semi-analytischen Modell ist in Abb. 1.5 dargestellt. Das semi-analytische Modell wird analog zur spannungsgetriebenen FE-Simulation in Abb. 1.2 mit sinusförmigen Spannungen oder einem Invertermodell angeregt. Die berechneten Stator- und Rotorströme \hat{i} können anschließend für die folgenden beiden alternativen Postprocessing-Pfade verwendet werden:

- **Stromgetriebene FE-Simulation:** Im oberen Pfad werden die Ströme in die stromgetriebene Version des FE-Modells der untersuchten Maschine eingespeist. Das Drehmoment und die Verluste werden von der stromgetriebenen FE-Simulation mit den gleichen Methoden wie bei der spannungsgetriebenen FE-Simulation ausgewertet. Der Einschwingvorgang der stromgetriebenen FE-Simulation ist vernachlässigbar klein, da das Rotorfeld durch die eingespeisten Rotorströme sofort aufgebaut ist. Es muss sich lediglich die Stromdichteverteilung in den Rotorstäben einstellen. Dadurch lässt sich vor allem bei Inverteranregung Rechenzeit im Vergleich zur spannungsgetriebenen FE-Simulation einsparen.
- **Postprocessing semi-analytisches Modell:** Im unteren Pfad werden eigene Postprocessing-Verfahren zur Berechnung des Drehmoments und der Verluste auf Basis der Ströme verwendet. Das Drehmoment kann in Abhängigkeit der Ströme und des Drehwinkels interpoliert werden. Die Stromwärmeverluste in der Statorwicklung und im Rotorkäfig können mithilfe von analytischen Gleichungen berechnet werden. Das Postprocessing für Drehmoment und Eisenverluste basiert auf einmalig vorab durchgeführten FE-Simulationen mit sinusförmiger Spannungsanregung und Ausgabe der benötigten Größen Drehmoment und B-Feld. Das B-Feld kann im Postprocessing an jedem Ort in Abhängigkeit der Ströme und des Drehwinkels interpoliert werden. Es können verschiedene Eisenverlustmodelle genutzt werden, um die Verluste auf Basis der B-Feld-Verläufe zu berechnen.

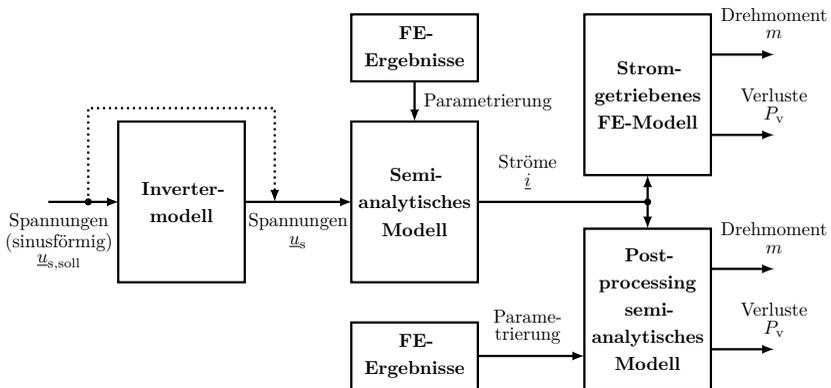


Abb. 1.5. – Berechnungsablauf mit eingebundenem semi-analytischen Modell

1.5. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut: In Kapitel 2 sind die für die Folgekapitel notwendigen Grundlagen der Käfigläufer-Asynchronmaschine zusammengefasst. Der Aufbau und die Validierung des FE-Modells der Beispielmaschine wird in Kapitel 3 beschrieben. Dabei wird auch die Verwendung des FE-Modells zur Parametrierung semi-analytischer Modelle erläutert. Außerdem wird eine entwickelte Methode zur Auswahl von Frequenzkombinationen für FE-Simulationen und eine Methode zur Berechnung von Wirkungsgradkennfeldern vorgestellt. Kapitel 4 beschäftigt sich ausschließlich mit den semi-analytischen Modellen. Neben den für alle semi-analytischen Modelle entwickelten Methoden werden die vier implementierten Modellvarianten vorgestellt. Die Anwendungsfälle und die Validierung der semi-analytischen Modelle werden in Kapitel 5 aufgezeigt. Als Referenz für die Validierung dienen Ergebnisse der spannungsgetriebenen FE-Simulation. Zuletzt werden die Ergebnisse in Kapitel 6 zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten gegeben.

2. Grundlagen der Käfigläufer-Asynchronmaschine

In diesem Kapitel sind die für diese Arbeit notwendigen theoretischen Grundlagen der Käfigläufer-Asynchronmaschine zusammengefasst. Zunächst wird in Abschnitt 2.1 auf den grundsätzlichen Aufbau einer Käfigläufer-Asynchronmaschine eingegangen. In Abb. 2.1 sind dazu die Hauptbestandteile einer Käfigläufer-Asynchronmaschine dargestellt. Anschließend werden in Abschnitt 2.2 die grundlegenden mathematischen Zusammenhänge und das Wirkprinzip der Käfigläufer-Asynchronmaschine erläutert. Zuletzt wird in Abschnitt 2.3 auf die Stromharmonischen der Käfigläufer-Asynchronmaschine eingegangen. Die Theorie der auftretenden maschineneigenen und inverterspezifischen Frequenzordnungen im Stator- und Rotorstrom ist notwendig, um die Spektren berechneter Stromverläufe plausibilisieren zu können.

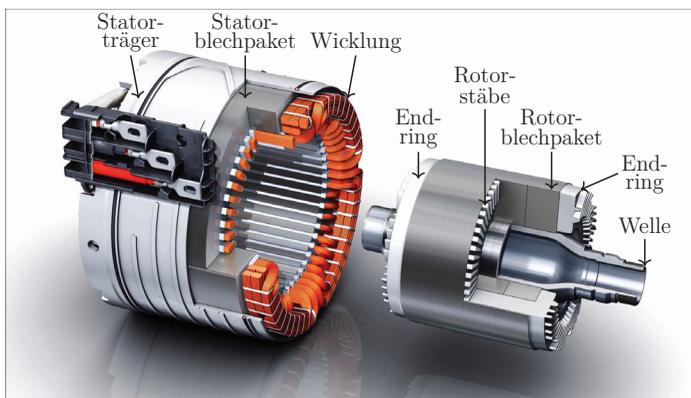


Abb. 2.1. – Bestandteile einer Käfigläufer-Asynchronmaschine aus [46]

2.1. Aufbau der Käfigläufer-Asynchronmaschine

Einer der Hauptvorteile von Käfigläufer-Asynchronmaschinen ist ihr robuster Aufbau. Durch den Rotorkäfig ist, im Gegensatz zur Schleifringläufer-Asynchronmaschine, keine aufwendige Bewicklung des Rotors notwendig. Außerdem benötigt die Käfigläufer-Asynchronmaschine keine verschleißenden Schleifringe zum Kurzschließen der Rotorwicklung [11]. Die Hauptbestandteile einer Käfigläufer-Asynchronmaschine sind anhand eines Beispiels aus dem Automobilbereich in Abb. 2.1 dargestellt. Analog zu anderen Typen elektrischer Maschinen kann zwischen aktiven und inaktiven Bauteilen unterschieden werden [39].

Aktive Bauteile tragen aus elektromagnetischer Sicht zur Energiewandlung bei. Dazu gehören der magnetische Kreis sowie die Wicklung [39]. Der magnetische Kreis einer Käfigläufer-Asynchronmaschine besteht aus einem Stator- und einem Rotorblechpaket, die in Abb. 2.1 dargestellt sind. Die Nuten dienen zur Aufnahme der Statorwicklung bzw. zur Einbettung der Rotorstäbe. Die dreisträngige Statorwicklung ist über den Umfang der Beispielmachine verteilt ausgeführt und über die Wickelköpfe an den Stirnseiten des Statorblechpakets verschaltet. Der Rotorkäfig der Beispielmachine in Abb. 2.1 wird mittels Aluminium-Druckguss in das Rotorblechpaket eingebracht [46]. Er besteht aus axial verlaufenden Rotorstäben, die an den Stirnseiten des Rotorblechpakets mit Endringen kurzgeschlossen sind. Zur besseren Entwärmung verfügen die Endringe im Fall der Beispielmachine über angegossene Lüfterschaukeln [46].

Inaktive Bauteile sind nicht direkt am Energiewandlungsprozess beteiligt, sondern dienen im Betrieb hauptsächlich zur Aufnahme bzw. Übertragung von entstehenden Kräften und Drehmomenten [39]. Die in Abb. 2.1 eingezeichnete Welle führt das Rotorblechpaket und überträgt das Drehmoment an das Getriebe. Der eingezeichnete Statorträger hält das Statorblechpaket und führt das Kühlmedium zwischen ihm und dem Maschinengehäuse in Kühlkanälen [46]. Weitere notwendige inaktive Bauteile, wie z. B. das Lager oder das Maschinengehäuse, sind in Abb. 2.1 nicht dargestellt.

2.2. Grundlegende Zusammenhänge und Wirkprinzip

Zur Erklärung des Wirkprinzips einer Käfigläufer-Asynchronmaschine wird von einer Anregung der Statorwicklung durch ein symmetrisches Drehspannungssystem mit Spannungseffektivwert U je Strang und Statorfrequenz f_s ausgegangen. Die dadurch entstehenden Strangströme erzeugen ein Stator-Luftspaltfeld, dessen Grundwelle mit der synchronen Drehzahl

$$n_{\text{syn}} = \frac{f_s}{p} \quad (2.1)$$