1 Einleitung

Bereits seit vielen Jahren gibt es seitens der nationalen und internationalen Politik Bestrebungen den Ausstoß von Schadstoffen im Mobilitätsbereich zu reduzieren. Die jüngste bekannte Maßnahme für den Individualverkehr sind die im Februar 2018 durch das Bundesverwaltungsgericht ermöglichten Fahrverbote für Dieselfahrzeuge in deutschen Städten. Rein elektrisch betriebene Personenkraftwagen können dabei helfen diese angestrebten Reduzierungen nachhaltig zu erreichen.

Nach wie vor existiert allerdings ein großes Reichweitenproblem bei rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen. Die Beantwortung der Frage, wie hoch der zu erwartende Energieverbrauch eines in der Entwicklung befindlichen Fahrzeugs ist, nimmt dabei eine zentrale Rolle ein.

Aus diesem Grund ist eine wirkungsgradoptimale Auslegung des Antriebsstrangs wichtig. Dazu zählen auch die Auslegung und die Wahl der elektrischen Maschine besonders im Hinblick auf die Effizienz des gesamten Antriebssystems.

Eine auf Effizienzoptimierung ausgerichtete Auslegung trägt dazu bei, dass die verfügbare und begrenzte elektrische Energie optimal genutzt werden kann.

Die überwiegende Mehrheit der zu erwerbenden rein elektrischen Personenkraftwagen werden von permanentmagneterregten Synchronmaschinen angetrieben. Lediglich der US-amerikanische Fahrzeugbauer *Tesla* setzt in seinen Modellen eine Asynchronmaschine ein. Vorteile wie eine höhere Leistungsdichte und ein hoher Wirkungsgrad stehen diversen Nachteilen, wie beispielsweise der Verwendung von seltenen Erden, einer begrenzten Feldschwächung und einer komplizierten Produktion gegenüber.

Die Asynchronmaschine charakterisiert sich durch einen einfachen mechanischen Aufbau, der Unabhängigkeit von seltenen Erden, geringen Wartungskosten, einer guten Feldschwächbarkeit und industriell bekannten Herstellverfahren. Nachteilig an diesem Maschinenkonzept sind im Vergleich mit einer permanent erregten Synchronmaschine die geringere Kraftdichte und

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ein geringerer Wirkungsgrad. Die genannten Vor- und Nachteile der Maschinenkonzepte zeigen, dass, bei der Auswahl eines Antriebskonzeptes, die Gewichtung der Auswahlkriterien eine große Rolle spielt. Ein möglicher Einsatz einer Asynchronmaschine als Fahrzeugantrieb ist detailliert zu prüfen. Elektrische Fahrzeugantriebe müssen anderen Anforderungen genügen als herkömmliche Industrieantriebe. Hierzu gehören ein reduzierter Bauraum, eine hohe Drehmomentdichte, niedriges Gewicht, geringe Kosten und Wartungsarmut.

Somit ist es notwendig moderne Fahrzeugantriebe anhand einer speziellen Auslegungsmethodik zu entwerfen. Des Weiteren sollte ebenfalls die Möglichkeit einer modularen Auslegung in Hinblick auf Kostenersparnis im späteren Produktionsprozess gegeben sein.

Die Eingliederung einer realitätsnahen Reichweitenprädiktion in solch eine Auslegungsmethodik charakterisiert sich dadurch, dass bereits in einem frühen Entwurfsstadium Aussagen zur Beteiligung der elektrischen Maschine an der Reichweite des Fahrzeugs getroffen werden können.

Sie liefert einen Beitrag zur Bestimmung eines geeigneten vollelektrischen Antriebsstrangsystems, da sie die Berücksichtigung von Antriebsstrangkomponenten, wie Getriebe, Leistungselektronik und Batterie gewährleistet.

Abbildung 1-1 zeigt das in der Fahrzeugentwicklung vielfach verwendete V-Entwicklungsmodell. Der linke Pfad beschreibt von oben startend den Entwicklungsfortschritt, der mit der Realisierung einer Fahrzeugentwicklung endet. Die Entwicklung wird dabei meist durch Simulationen unterstützt und teilt sich in eine System- und eine Komponentenentwicklung auf.

Sind die Entwicklung und die Realisierung abgeschlossen, schließt sich eine Test- und Validierungsphase mit den entwickelten Prototypen an. Die Ergebnisse dieser Erprobungen werden dann an den Entwicklungspfad rückgekoppelt und führen unter Umständen zu notwendigen und kostenintensiven Änderungen an den entwickelten Bauteilen.

Besonders betrifft das Ergebnisse aus Bereichen, die durch reine Simulation nicht abbildbar sind. Beispiele für diese Bereiche sind neben der in dieser Arbeit fokussierte Reichweitenoptimierung, die elektromagnetische Verträglichkeit oder das Geräuschverhalten. Durch die Integration einer im Straßenverkehr nutzbaren Erprobungsumgebung lassen sich zukünftige Antriebe auf ihre Eignung als Teil eines Antriebsystems testen, bevor die detaillierte Komponen-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

tenentwicklung abgeschlossen ist. Die generierten Testergebnisse können so nützliche Hinweise für die weitergehende Entwicklung geben.
Die im Folgenden vorgestellte Methodik erreicht auf dem Entwicklungspfad die Entwicklungstiefe bis hinein in das Komponentendesign, berücksichtigt dabei aber nur die Grobauslegung der Asynchronmaschine. In dieser Arbeit wird keine Realisierung eines Systems oder einer Komponente vorgenommen.
Auf dem Erprobungspfad wird dennoch der Bereich Testen von Teilsystemen berücksichtigt. Im Speziellen handelt es sich an dieser Stelle um Effizienztests des Antriebsstrangs. Ermöglicht wird diese Durchführbarkeit des Testens ohne die Verwendung einer realisierten Hardware (Prototypenbau) durch eine spezielle Testumgebung, dem realitätsnahen Reichweitenprädiktor. Dieser Prädiktor ist im öffentlichen Straßenverkehr nutzbar und integriert einen zukünftigen elektrischen Antrieb durch eine Adaption der Längsdynamik. Diese Adaption erfolgt rein simulativ, der Prädiktor bewegt sich allerdings auf öffentlichen Straßen und nutzt somit zur Reichweitenprädiktion reale Streckendaten.
Die Ergebnisse dieser Tests können dann wieder an den Entwicklungspfad rückgespiegelt werden. Die Auslegung der elektrischen Maschine kann anschließend in Hinblick auf ihren Beitrag zur Reichweitenerhöhung des Elektrofahrzeugs angepasst werden.
Die Anpassung der Maschinenauslegung stellt dabei nur einen Teil der möglichen Reichweitenerhöhung dar und definiert nicht die maximal mögliche Reichweitenerhöhung des Fahrzeugs. Um die maximal mögliche Reichweitenerhöhung zu berechnen, müssten die Anteile der übrigen Komponenten, Getriebe, Batterie, Leistungselektronik und Fahrwerk mitberücksichtigt werden.

Im folgenden Kapitel 2 wird detailliert das Konzept der Auslegungsmethodik für Asynchronmaschinen erläutert. In den nachfolgenden Kapiteln 3,4 und 7 werden die einzelnen Bausteine der Methodik vorgestellt. Die Anwendungsergebnisse finden sich in den Kapiteln 5 und 6.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abbildung 1-1: Eingliederung der Auslegungsmethodik in ein V-Modell in der Automobilentwicklung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2 Konzept der Auslegungsmethodik

Durch die Anwendung einer speziellen Auslegungsmethodik sollen frühzeitig Aussagen über den Einfluss der elektrischen Antriebseinheit an der späteren Reichweite eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs getroffen werden können. Die Auslegungsmethodik besteht aus zwei Bausteinen, dem elektromagnetischen Auslegungsprozess und der anschließenden Reichweitenprädiktion. Die Voraussetzung, um die Methodik anwenden zu können, ist die Kenntnis über die geforderten Randbedingungen an die zukünftige Antriebseinheit.

Ausgehend von einem zur Verfügung stehenden Bauraum, der Kenntnis der elektrischen Daten der zu verwendenden Peripherie (Wechselrichter und Batterie) und einer geforderten Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie, wird anhand des elektromagnetischen Auslegungsprozesses ein Maschinenentwurf erzeugt. Die Generierung eines solchen Entwurfs mittels einer elektromagnetischen Auslegung für den Fahrzeugeinsatz kann hierbei nicht isoliert erfolgen. Von Beginn an müssen Eigenschaften der übrigen Komponenten des späteren Antriebsstrangs (Leistungselektronik, Getriebe, Fahrwerk und Reifen, Energiespeicher) bekannt sein und mitberücksichtigt werden.

Dieser Entwurf ist durch den berechneten Blechschnitt, die Wicklungskonfiguration, die Beschreibung der Elektromagnetik und eine Leistungskennlinie beschrieben und stellt das Ergebnis des ersten Bausteins, des Auslegungsprozesses, dar.

Der Baustein „elektromagnetischer Auslegungsprozess“ ist iterativ ausgeführt. Der errechnete Maschinenentwurf muss die an ihn gestellten Anforderungen erfüllen können, beispielsweise die Leistungsanforderungen. Andernfalls muss der Baustein Auslegungsprozess erneut durchlaufen werden. Erst wenn alle Anforderungen erfüllt sind, entsteht ein Maschinenentwurf, der als Berechnungsgrundlage für die Reichweitenprädiktion genutzt werden kann. In Abbildung 2-1 wird dies durch den Revisionspfad R0 gekennzeichnet.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

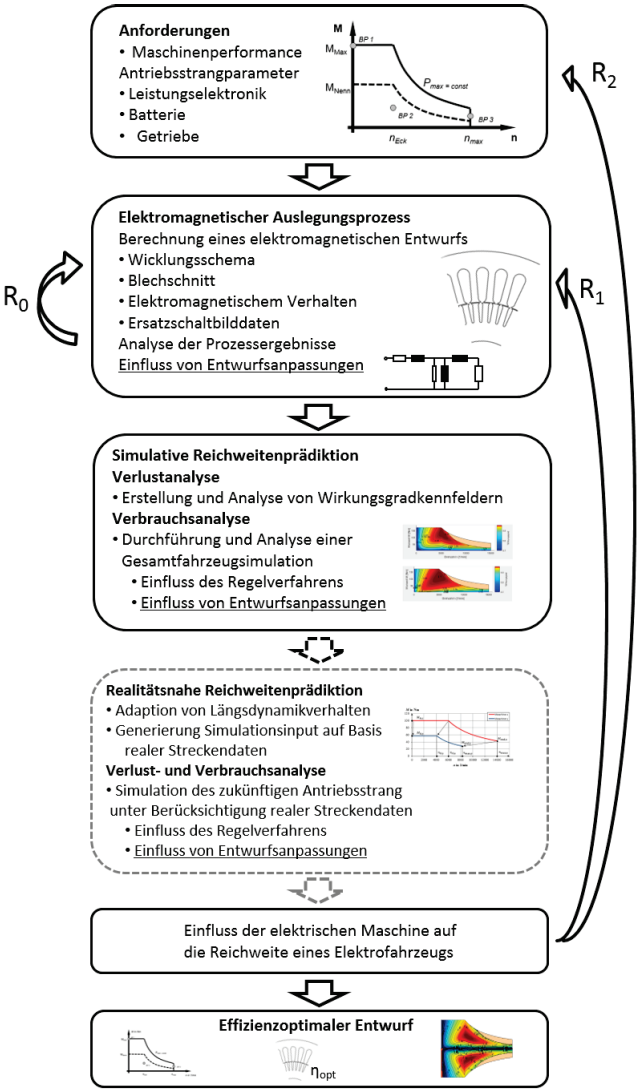

Abbildung 2-1: Konzept der Auslegungsmethodik

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Der im ersten Baustein generierte Maschinenentwurf bildet die Berechnungsgrundlage für den nächsten Baustein der Methodik, der Reichweitenprädiktion und wird an diesen übergeben.
Der Baustein Reichweitenprädiktion teilt sich in zwei Bereiche auf, zuerst erfolgt die simulative Reichweitenprädiktion und anschließend die realitätsnahe Reichweitenprädiktion. Beide Prädiktionsformen enthalten sowohl eine Verlust- und eine Verbrauchsanalyse, die Einzelverlustanalyse des Maschinenentwurfs und auch eine Energieverbrauchsanalyse des Gesamtfahrzeugs. Als Antrieb des Fahrzeugs wird hierbei immer der Maschinenentwurf, das Ergebnis aus dem ersten Baustein der Methodik, eingesetzt.
Die beiden Prädiktionsarten bauen aber bezogen auf die generierten Ergebnisse nicht aufeinander auf. Es ist nicht erforderlich Ergebnisse der simulativen Prädiktion an die realitätsnahe Prädiktion zu übergeben. Beide Prädiktionen basieren auf den Ergebnissen des ersten Bausteins und generieren beide Aussagen über den Einfluss einer elektrischen Maschine an der Reichweite eines Elektrofahrzeugs, sie könnten somit unabhängig voneinander durchgeführt werden. Die gewählte Reihenfolge ist allein der unterschiedlichen Komplexität der Ergebnisgenerierung geschuldet. Die simulative Prädiktion basiert auf rein simulativ erstellten Rechnungen in einem PC, wohingegen die realitätsnahe Reichweitenprädiktion einen umfangreichen Hardwareaufbau verlangt. Im Sinne der Methodik sollten allerdings die Ergebnisse der simulativen Reichweitenprädiktion durch die realitätsnahe Prädiktion verifiziert werden. Die Ergebnisse beider Prädiktionsarten fließen dann gleichermaßen in die Diskussion über den Einfluss des aktuell zu untersuchendem Entwurf auf die Reichweite eines Elektrofahrzeugs mit ein.
Bei der simulativen Reichweitenprädiktion werden für Verlust- und Verbrauchsanalyse zwei unterschiedliche Entwicklungsinstrumente benutzt. Im Rahmen der Verlustanalyse wird mittels Wirkungsgradkennfeldern die stationäre Effizienz des Maschinenentwurfs in ihrem Betriebsbereich untersucht. Hierfür muss zuerst eine Berechnung aller Verluste und des Wirkungsgrades erfolgen, um anschließend ein Wirkungsgradkennfeld erstellen zu können Die Verbrauchsanalyse analysiert mit Hilfe einer Gesamtfahrzeugsimulation den Energieverbrauch eines Fahrzeugs.
Anschließend erfolgt die realitätsnahe Reichweitenprädiktion auf Basis realer Streckendaten. Hierfür wird eine im öffentlichen Straßenverkehr fahrtüchtige Entwicklungsumgebung in

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Form eines handelsüblichen Elektrofahrzeugs, das Trägerfahrzeug, genutzt. Diese Entwicklungsumgebung zeichnet sich dahingehend aus, dass sie in der Lage ist als Antriebsstrangsimulator zu fungieren. Um die realitätsnahe Reichweitenprädiktion durchführen zu können, sind zwei Maßnahmen erforderlich: Das Abbilden des längsdynamischen Verhaltens des zukünftigen Antriebssystems auf das des Trägerfahrzeugs und die Integration eines Simulationsmodells des zukünftigen Antriebsstrangs. Durch die Adaption der Längsdynamik ist sichergestellt, dass sich der Antrieb des Trägerfahrzeugs in dem gültigen Leistungskennlinienbereich des zukünftigen Antriebs bewegt.

Hierfür ist eine Übertragung der Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien der beiden Antriebe aufeinander notwendig. Diese Übertragung wird im Vorfeld der geplanten Versuchsfahrten durchgeführt und auf dem Steuergerät hinterlegt.

Das Simulationsmodell bildet den zukünftigen Antriebsstrang mit den dazugehörigen zukünftigen Komponenten Batterie, Getriebe, Leistungselektronik und dem elektrischen Antrieb ab und wird im Trägerfahrzeug auf einem Steuergerät mitgeführt. Beide Maßnahmen werden alleinig durch Software durchgeführt. An der Hardware des Antriebsstrangs des Trägerfahrzeugs kommt es dabei zu keinen Änderungen.

Nach erfolgreicher Adaption der Längsdynamik können dann durch Fahrten mit dem Fahrzeug auf realen Straßen Eingangsparameter für ein Simulationsmodell generiert werden. Bei diesen Eingangsgrößen handelt es sich um die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit und das geforderte Raddrehmoment. Und während der Fahrt erfolgt eine Simulation des Modells. Die Ausgangsgrößen dieses Modells sind die Einzelverlustverläufe des Maschinenentwurfs über die gefahrene Strecke sowie der Energieverbrauchswert des zukünftigen Antriebsstrangs. Mit diesen Ausgangsgrößen kann nun wie bei der simulativen Reichweitenprädiktion ebenfalls eine Verlust - und Verbrauchsanalyse durchgeführt werden.

Abweichend zur simulativen Reichweitenprädiktion werden reale Streckendaten und ein gemeinsames Entwicklungsinstrument für die beiden Analysearten genutzt.

Die Verlustanalyse wird hierbei über eine Darstellung der Einzelverlustverläufe der elektrischen Maschine über den gefahrenen Zyklus realisiert. Die Verbrauchsanalyse generiert wie bei der simulativen Reichweitenprädiktion einen Energieverbrauchswert eines Fahrzeugs.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Nach Beendigung eines Durchlaufs der Methodik ist somit eine Aussage über den Einfluss eines Maschinenentwurfs auf die Reichweite eines Elektrofahrzeugs möglich.
Dieser Einfluss kann über zwei Möglichkeiten besonders gesteuert werden. Die eine Möglichkeit ist im ersten Baustein der Methodik verankert. Es handelt sich um die Berücksichtigung von spezifischen Auslegungskriterien während des Auslegungsprozesses. Diese Kriterien berücksichtigen während der Entwurfsberechnung den Einfluss der wirkungsgradoptimalen Auslegung. Diese Berücksichtigung wird direkt in den Ablauf des Auslegungsprozesses integriert und es werden dem Ausleger Empfehlungen für die Auswahl bestimmter Entwurfsparameter in Hinblick auf eine wirkungsgradoptimale Auslegung gegeben.
Die andere Möglichkeit wird in den zweiten Baustein, der Reichweitenprädiktion, eingegliedert und sieht den Einsatz einer wirkungsgradoptimalen Regelung des zukünftigen Antriebs vor. Diese Regelung wird in beiden Prädiktionsformen berücksichtigt.

Wie in Kapitel 1 bereits erwähnt, ist die Durchführung der oben vorgestellten Methodik im Rahmen der Konzeptentwicklung eines Antriebsstrangs einzuordnen und sieht den Einsatz einer zeiteffizienten analytischen Berechnung im Rahmen der Grobauslegung eines Maschinenentwurfs vor.
Mit der hier vorgestellten Auslegungsmethodik soll nun mehr gezeigt werden, wie solch ein Entwurf entsteht und wie dieser die Reichweite des Fahrzeugs beeinflussen kann. Zu diesen Beeinflussungsgrößen gehören beispielsweise geometrische Größen oder die Anwendung von unterschiedlichen Regelkonzepten.
Sollte ein Entwurf nach dem Durchlauf der Methodik für die Realisierung eines Antriebsstrangs (vgl. Abbildung 1-1) ausgewählt werden, ist eine anschließende Feinauslegung mit Hilfe eines numerischen Berechnungsverfahren durchzuführen, in diesem müssen die Ergebnisse der analytischen Berechnung verifiziert werden. Weiterhin ist eine detaillierte thermische Auslegung zur Dimensionierung des erforderlichen Kühlsystems durchzuführen.
Sollte es in der Realisierungsphase zu einem Prototypenbau kommen, sind auch die mechanische Berechnung, wie die Fliehkraftbeanspruchung des Rotors bei maximaler Maschinendrehzahl und die einwirkenden Kräfte auf die Kurzschlussringe und eine detaillierte Konstruktion des Elektromotors, inklusive der Motorlagerung und dem Gehäuse, durchzuführen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Methodik kann auch dazu verwendet werden einen modularen Baukasten zu entwerfen und durch die Reichweitenprädiktion zu bewerten. Hierbei ergeben sich besondere Anforderungen an den ersten Baustein. Bei gleichbleibendem Blechschnitt sollen über eine Variation der Eisenlänge verschiedene Entwürfe mit unterschiedlichen Leistungen zur späteren Verwendung der Entwürfe in unterschiedlichen Fahrzeugklassen dargestellt werden können.

In Kapitel 1 wurde ebenfalls beschrieben, dass die Ergebnisse aus der realitätsnahen Reichweitenprädiktion an den Entwicklungspfad zurückgespiegelt werden, um die Auslegung der elektrischen Maschine effizienzoptimierter zu gestalten.
Der Umfang dieser Arbeit berücksichtigt allerdings den vollen Umfang der realitätsnahen Reichweitenprädiktion nur als Konzept, es wurde kein Trägerfahrzeug aufgebaut und es wurden keine Erprobungsfahrten – und messungen mit solch einem Trägerfahrzeug durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Laborversion des realitätsnahen Reichweitenprädiktors erstellt, anhand derer die notwendigen Schritte zur Adaption der Längsdynamik zweier elektrischer Antriebseinheiten nachvollzogen werden können. In Abbildung 2-1 ist die realitätsnahe Reichweitenprädiktion aus diesem Grund grau hinterlegt.
Da die realitätsnahe Reichweitenprädiktion im Rahmen dieser Arbeit keine verwertbaren Ergebnisse liefert, wird dieses Vorgehen der Rückspiegelung anhand der Ergebnisse der simulativen Reichweitenprädiktion vorgestellt. Dies ist im Sinne der Methodik auch durchführbar, da beide Prädiktionsarten unabhängig voneinander den Reichweiteneinfluss bewerten können.

Diese Rückspiegelung bedingt, dass die Methodik erneut durchlaufen werden muss und dass weitere Entwürfe, im Folgenden „angepasste Entwürfe“ genannt, mit der Methodik generiert werden und die Reichweitenprädiktion durchlaufen, um deren Einfluss auf die Reichweite eines Elektrofahrzeugs zu untersuchen.
Diese Untersuchungen basieren dabei immer auf einem Grundentwurf, der vorher ebenfalls mit der gleichen Methodik erzeugt und hinsichtlich seiner Effizienz untersucht wurde.
Die Generierung dieser angepassten Entwürfe ist auf zwei unterschiedlichen Pfaden möglich. Der eine Pfad R1 verfolgt die Umsetzung von Änderungen im Auslegungsprozess, beispielsweise ein Materialtausch. Die Anforderungen bleiben dabei konstant.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.