

# Wirkungsgrad- und geräuschoptimiertes Zusammenspiel von Wechselrichter und Asynchronmotor für Traktionsanwendungen

Tissen, Dietmar<sup>1</sup>, Dr. König, Andreas<sup>1</sup>, Dr. Schülting, Ludger<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kiepe Electric GmbH, Düsseldorf

## Zusammenfassung

Um den Systemwirkungsgrad für einen Traktionsantrieb zu ermitteln und zu optimieren sind detaillierte Berechnungen der Einzelverluste aller Komponenten und eine Analyse der Abhängigkeiten nötig. Durch ein optimiertes Zusammenwirken zwischen Traktionsumrichter und Traktionsmotor kann der Energieverbrauch über ein Fahrspiel verringert werden. Insbesondere sollen zum einen die positiven Effekte einer Flussabsenkung im Teillastbetrieb und die Auswirkung verschiedener Pulsmuster auf den Wirkungsgrad aufgezeigt werden. Zum anderen wird eine deutliche Reduktion der Traktionsgeräusche durch eine betriebspunktabhängige Sollflussvorgabe und durch eine Anpassung der Schaltfrequenz des Leistungsteils bei einem realen Fahrzeugeinsatz erreicht.

**Keywords:** Traktionsantrieb; Systemwirkungsgrad; Energieeffizienz; Traktions-Asynchronmaschine; Energieverbrauchsberechnung; Geräuschoptimierung; Traktionsgeräusche; Lärminderung; synchrone Pulsmuster

# 1 Einleitung

An ein modernes Traktionssystem werden unterschiedliche projektspezifische Anforderungen gestellt. Eine immer wichtigere Rolle gewinnt dabei der Energieverbrauch. Eine Auslegung des Gesamttraktionssystems kann die Anforderungen nach geringerem Energieverbrauch oft durch eine vorgegebene Aufteilung der thermischen Verluste zwischen Traktionsmaschine und Stromrichter optimal erfüllen. Es wird dabei eine Minimierung der Gesamtverluste bezweckt, um unter anderem einen kostengünstigeren Betrieb und höhere Lebensdauer der Komponenten zu erreichen. Bei einem bereits hohen Wirkungsgrad eines elektrischen Traktionssystems führt eine Wirkungsgradverbesserung um ein Prozent zu einer deutlichen Reduktion der Betriebskosten.

Die Gesamtverluste im Antrieb setzen sich aus Maschinenverlusten und Verlusten im Leistungsstellglied zusammen. In der Abbildung 1 ist eine strukturierte Aufteilung der wesentlichen Verlustanteile angegeben. Die in der Maschine entstehenden Verluste lassen sich in Stator- und Rotorverluste aufteilen.

Die Verluste im Leistungsstellglied teilen sich in die passiven Komponenten, wie z.B. die Netzfilterdrossel, und die aktiven Komponenten des Stromrichters auf. Unter den Verlusten im Stromrichter unterscheidet man zwischen den Durchlass- und den Schaltverlusten.

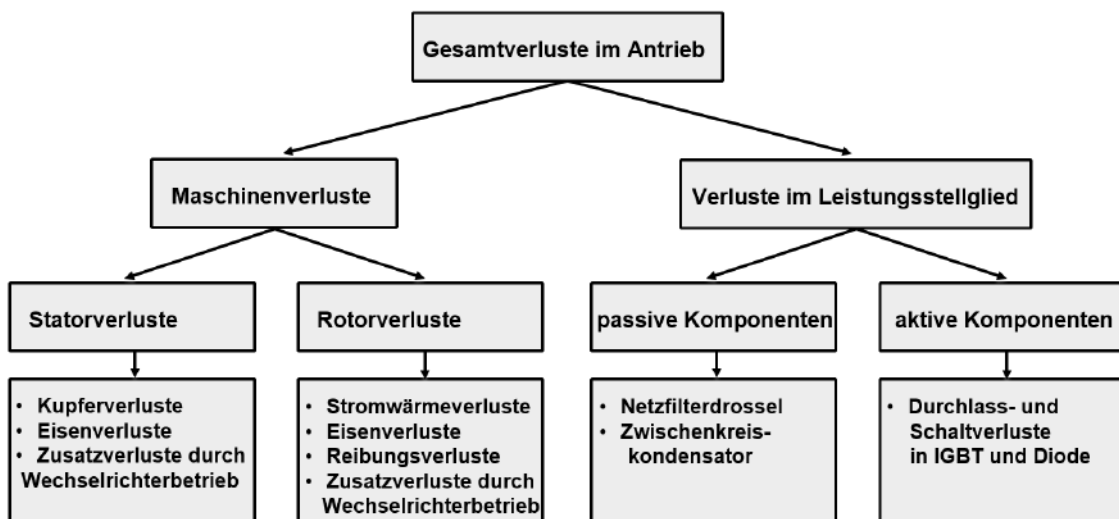


Abbildung 1: Aufteilung der Verluste im Traktionsantrieb

## 2 Ermittlung und Minimierung der Verluste im Antrieb

### 2.1 Berechnung der Verluste aus einer Streckensimulation

Für die Ermittlung der Energieaufnahme und der Verluste im Leistungsteil wird eine Berechnung in Form einer Fahrtsimulation durchgeführt. In der Abbildung 2 ist ein Ergebnis einer Berechnung der Antriebsgrößen als Beispiel dargestellt. Im Hinblick auf Beschreibung einer Methode der Flussabsenkung in Kapitel 2.2 wird im dargestellten Diagramm im Anfahrbereich ca. ein Drittel des Nennmoments der Traktionsmaschine durch Zugkraftvorgabe angefordert.

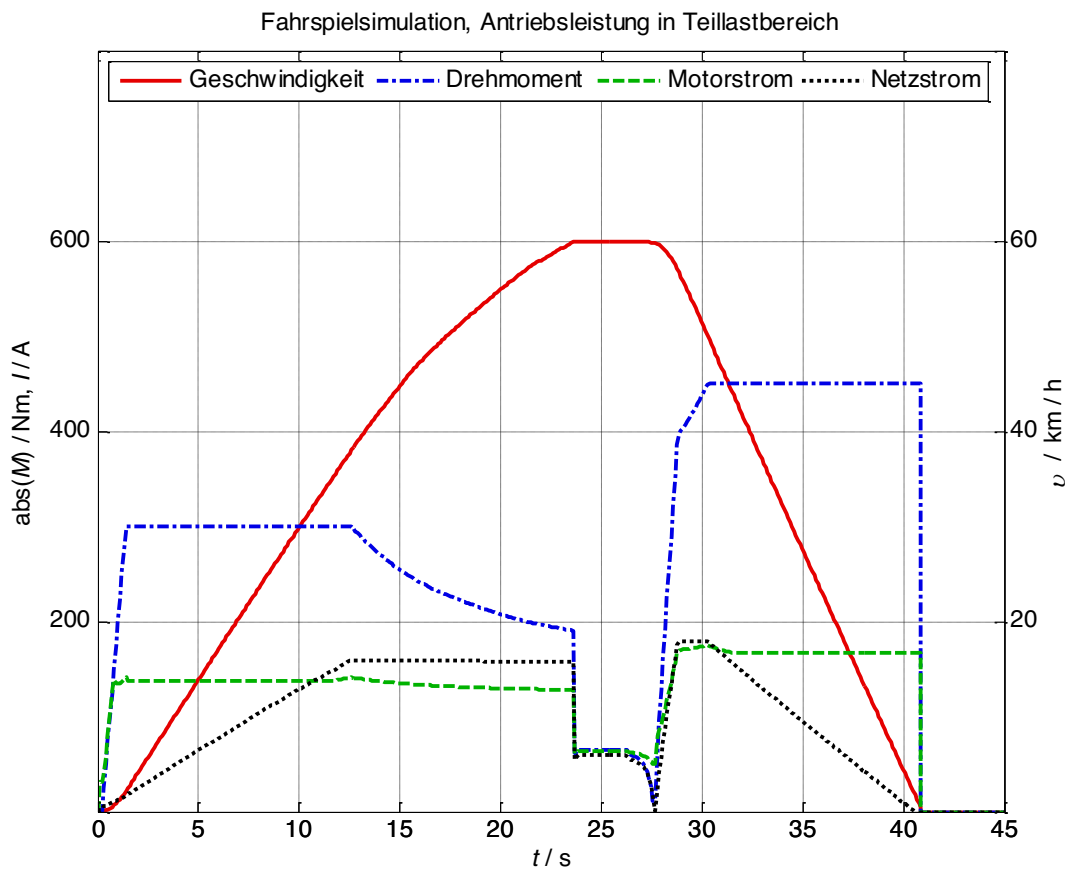


Abbildung 2: Betrag des Drehmoments und des Netzstromes, Motorstrom und die Motordrehzahl bei einem Fahrspiel, Antriebsleistung im Teillastbereich

Das Programm zur fahrdynamischen Auslegung ermittelt aus der angeforderten Drehmomentkennlinie bei gegebener Fahrzeugmasse und mit Berücksichtigung der Streckentopologie die resultierenden Beschleunigungs- und Verzögerungswerte. Mit den

berechneten Daten lässt sich die Verlustleistung in IGBT und Diode, aufgeteilt nach Leit- und Schaltverlusten, sowie Verluste in der Netzfilterdrossel bestimmen und graphisch darstellen (Abb. 3). Mit Kenntnis der Wirkungsgrade des Traktionsmotors, des Getriebes und des Stromrichters lässt sich Energieaufnahme, rückgespeiste Energie und somit der Energieverbrauch ermitteln.

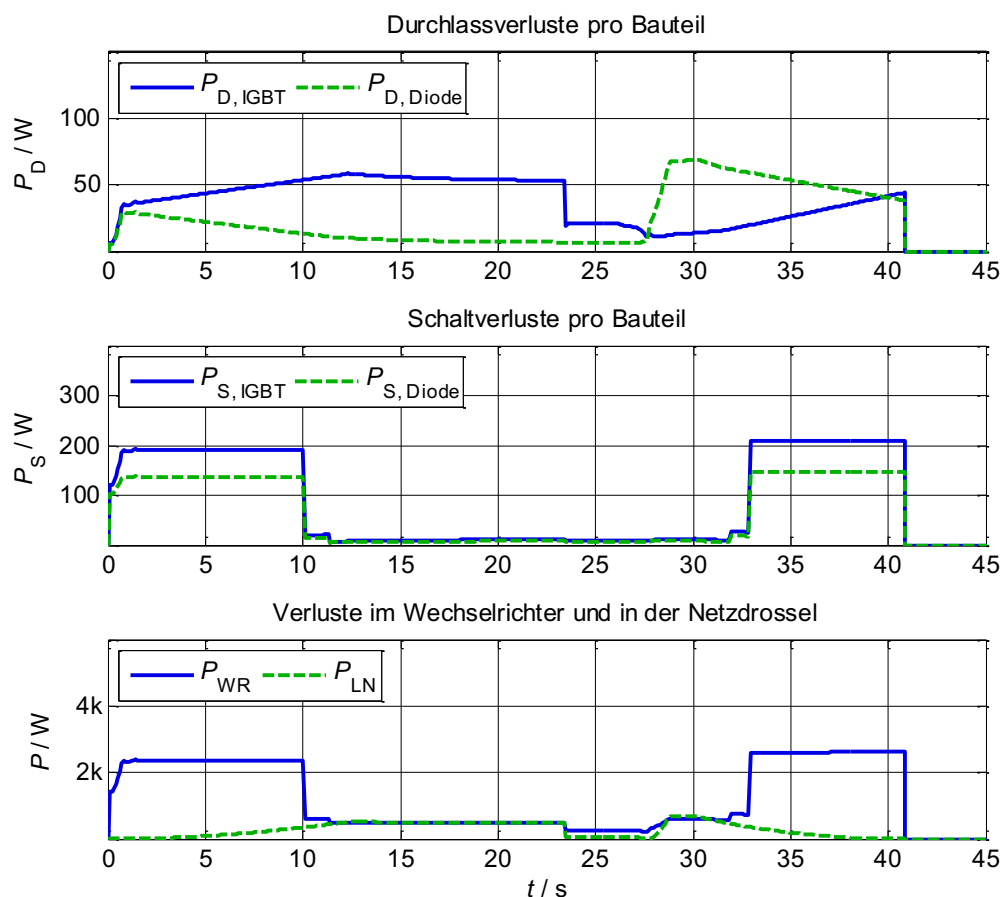


Abbildung 3: Aufteilung der Verluste im Leistungsteil, Antriebsleistung in Teillast

## 2.2 Verringerung der Antriebsverluste durch Absenkung des Maschinenflusses

Bei realen Strecken mit einem komplexen Streckenprofil wird der Traktionsmotor oft im Teillastbereich betrieben. In diesen Betriebspunkten erweist sich eine optimierte Rotorflussvorgabe als energetisch vorteilhaft. In Abbildung 4 sind beispielhaft für einen Antrieb mit Asynchronmaschine die flussbildende Stromkomponente  $I_d$  und die drehmomentbildende Stromkomponente  $I_q$  zusammen mit dem Gesamtmotorstrom und

den berechneten Gesamtverlusten in Abhängigkeit vom Rotorfluss  $\Psi_r$  aufgetragen. Im betrachteten Arbeitspunkt wird ein Minimum der Gesamtverlustleistung bei einem Rotorfluss von ca. 65 % erreicht. Es konnte gezeigt werden, dass bei einem untersuchten Antrieb aus einer optimierten Flussvorgabe über einen realen Fahrzyklus ein um rund 1,5 % geringerer Energiebedarf resultiert.

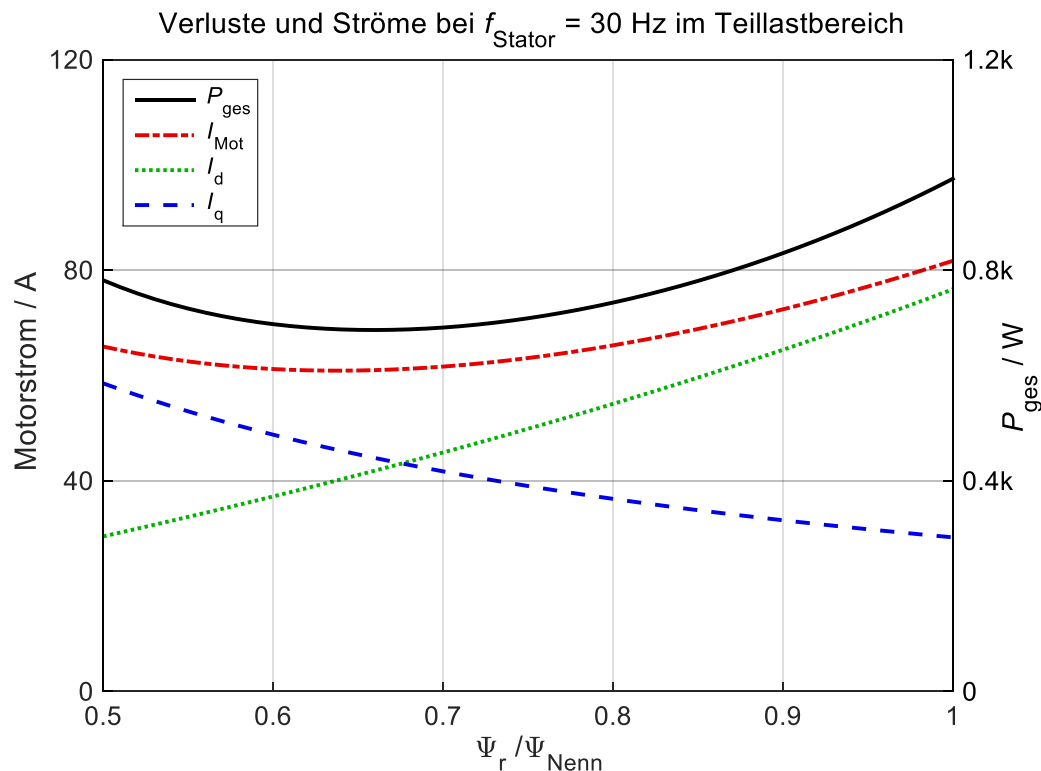


Abbildung 4: Darstellung des Maschinenstroms und der berechneten Gesamtverluste von Motor und Leistungsteil

### 2.3 Einsatz synchroner Pulsmuster bei höheren Drehzahlen

Im oberen Drehzahlbereich wird durch Einsetzen von synchronen Pulsmustern die Grundschnungsspannung erhöht und dadurch der Wirkungsgrad des Motors gesteigert. Zur Erläuterung des energetischen Vorteils beim Betrieb mit synchronen Pulsmustern wird zunächst Verlauf des Maschinenflusses bei einem Fahrspiel, wie in Abbildung 5 dargestellt, betrachtet. Dabei werden zwei Modulationsverfahren gegenübergestellt: zum einen Raumzeigermodulation mit fester PWM-Schaltfrequenz und Modulation mit synchronen Pulsmustern einschließlich Grundfrequenztaktung. Mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit wird die maximal mögliche Aussteuerung der

betrachteten Modulationsarten erreicht und der Statorfluss der Maschine sinkt umgekehrt proportional zur Statorkreisfrequenz:

$$\Psi_s = \frac{a \cdot U_{\text{motor,max}}}{\omega_s} \quad (1)$$

Durch Einsatz der synchronen Pulsmuster wird im Bereich der Grundfrequenztaktung ein deutlicher Spannungsvorteil gegenüber der Raumzeigermodulation erreicht (ca. 15 % höhere Aussteuerung je nach PWM-Schaltfrequenz und eingestellten Totzeiten). Schaltfrequenz des Leistungsteils entspricht im Bereich der Grundfrequenztaktung der Statorfrequenz.

Entsprechend der höheren maximalen Motorspannung stellt sich der Feldschwächpunkt bei einer höheren Geschwindigkeit ein. Über die Feldschwächfrequenz hinaus stellt sich bei Verwendung der Grundfrequenztaktung ein höherer Maschinenfluss ein. Die nachfolgende Formel 2 beschreibt den Zusammenhang zwischen drehmomentbildender Rotorkreisfrequenz  $\omega_r$ , Rotorfluss  $\Psi_r$ , Rotorwiderstand  $R_r$  und Drehmoment  $M$ .

$$M = \frac{3p}{2} \frac{\omega_r \cdot |\Psi_r|^2}{R_r} \quad (2)$$

Im Bereich der Grundfrequenztaktung wird durch einen höheren Motorfluss eine Verringerung der Rotorkreisfrequenz bei gleichem Traktionsmoment erreicht. Die drehmomentbildende Rotorfrequenz hat einen maßgeblichen Anteil an Rotorverlusten im Traktionsmotor, folglich erweist sich die Grundfrequenztaktung vorteilhaft im Energieverbrauch.

Bei Einsatz der synchronen Pulsmuster müssen die wechselrichterbedingten Motorzusatzverluste berücksichtigt werden. Die Motorzusatzverluste sinken mit steigender Grundswingungsfrequenz, so dass ab einer bestimmten Motordrehzahl ein Optimum der Gesamtverluste im Motor erreicht werden kann [1]. In Messungen konnte mit synchronen Pulsmustern ein um bis zu 3 % höherer Systemwirkungsgrad gegenüber asynchroner Taktung im betrachteten Drehzahlbereich realisiert werden.

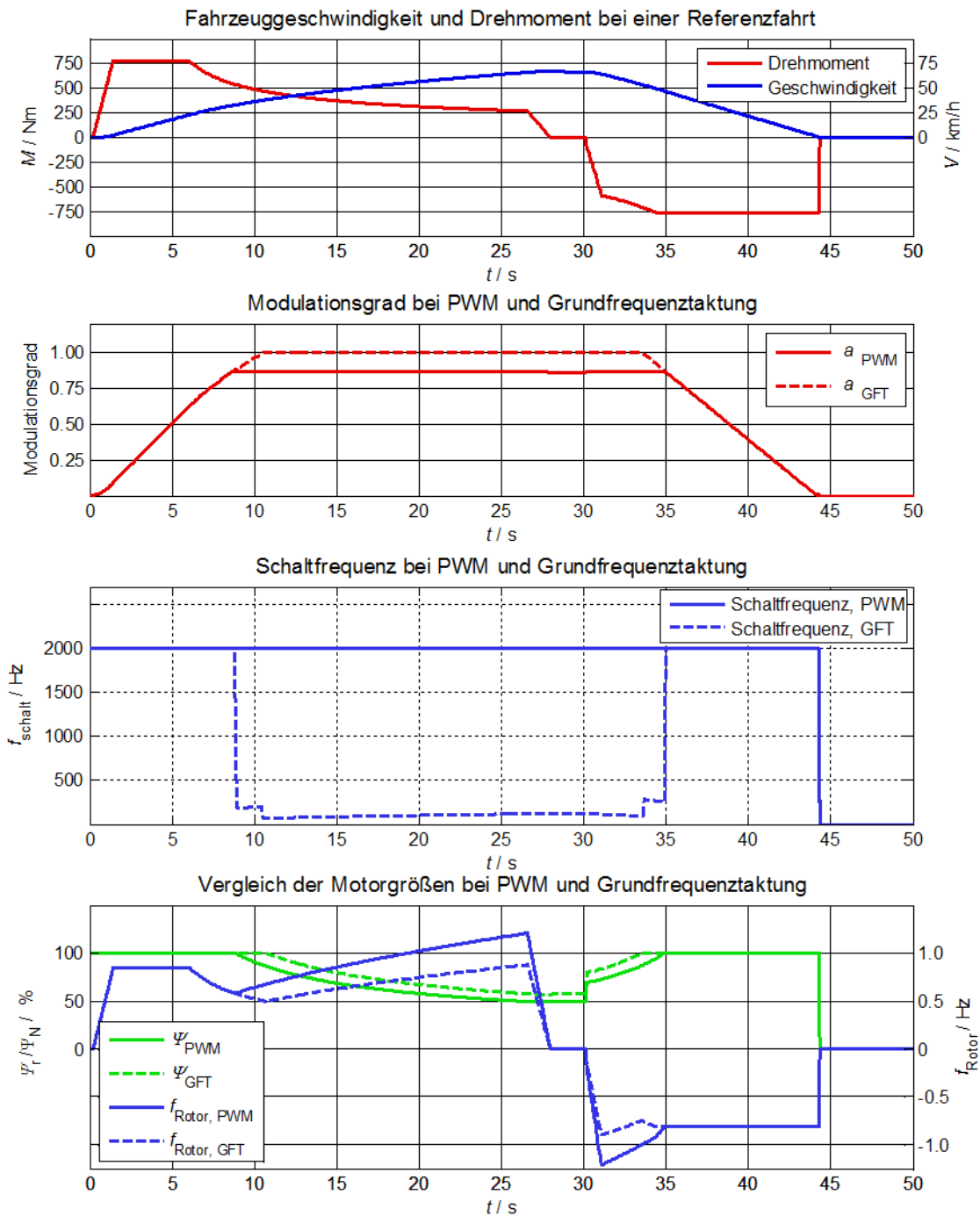


Abbildung 5: Vergleich der Maschinengrößen bei PWM-Raumzeigermodulation und synchronen Pulsmustern mit Grundfrequenztaktung

## 2.4 Ermittlung der optimalen Schaltfrequenz

Durch eine Erhöhung der Wechselrichterschaltfrequenz im Bereich der asynchronen Taktung können die durch Stromrichterspeisung verursachten Verluste in der elektrischen Maschine gesenkt werden, während die Verluste im Wechselrichter aufgrund der steigenden Schaltverluste zunehmen. Hier gilt es, ein Optimum zu finden. Der Zusammenhang zwischen Schaltfrequenz und gemessenen wechselrichterbedingten Zusatzverlusten im Motor ist von den jeweiligen Maschinenparametern abhängig und ist in der Abbildung 6 dargestellt. Mit Kenntnis der Verluste im Leistungsteil kann dann im Spannungsstellbereich ein Optimum der Summe der schaltbedingten Verluste im Antrieb ermittelt werden.

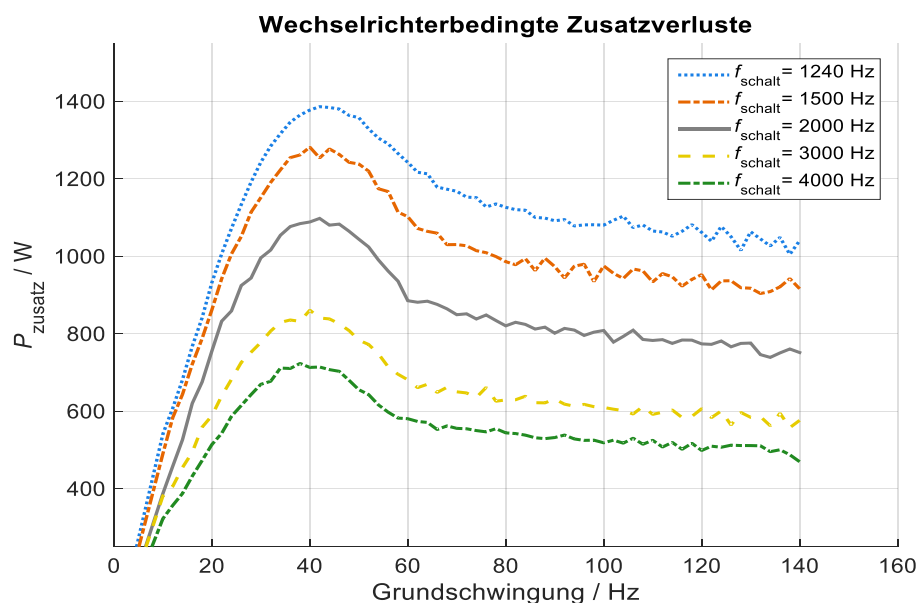


Abbildung 6: Drehrichterbedingte Zusatzverluste bei asynchroner Taktung [1]

## 2.5 Kombination der Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz

Eine Kombination der Methoden zur Energieverbrauchsoptimierung kann nun am Beispiel des im Kapitel 2.1 vorgestellten Fahrspiels erläutert werden. In der Abbildung 7 ist neben der Fahrzeuggeschwindigkeit die Drehrichterschaltfrequenz, sowie Rotorfluss und Aussteuergrad graphisch dargestellt. Im Anfahrbereich wird im betrachteten Fall eine reduzierte Zugkraft angefordert. Der energetisch optimale Fluss für das Fahrersollmoment beträgt ca. 80 % des Nennwertes (unteres Diagramm, Anfahrvorgang). In diesem Bereich



wird PWM mit variabler Schaltfrequenz eingesetzt. Das Verfahren der variablen Schaltfrequenz trägt zur Geräuschminderung bei und wird in Kapitel 3 erläutert. Mit steigendem Aussteuergrad und ab bestimmter Fahrzeuggeschwindigkeit wird auf synchrone Pulsmuster umgeschaltet. Der Umschaltzeitpunkt wird unter Berücksichtigung der Motorzusatzverluste gewählt. Durch höhere Spannungsausnutzung werden die Rotorverluste im Traktionsmotor reduziert. Außerdem sinken deutlich die Drehrichterschaltverluste im Bereich der Grundfrequenztaktung.

Der Gesamtwirkungsgrad des elektrischen Antriebs wird somit im gesamten Geschwindigkeitsbereich erhöht.

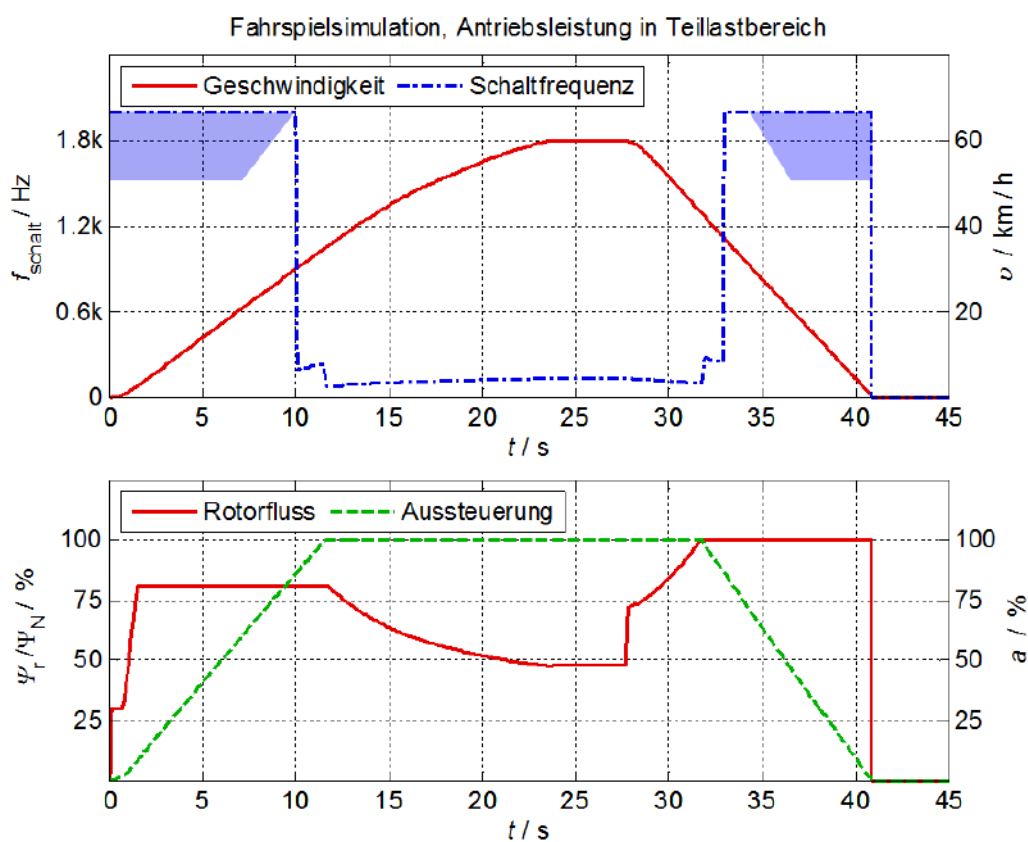


Abbildung 7: Darstellung von Fahrzeuggeschwindigkeit, Drehrichterschaltfrequenz, Rotorfluss und Aussteuergrad für Teillastbereich der Antriebsleistung

### 3 Optimierung des Antriebsgeräuschs

Das akustische Verhalten eines Nahverkehrsfahrzeugs spielt eine große Rolle beim Zulassungsverfahren und bei der Akzeptanz der Fahrzeuge durch die Fahrgäste. Zur Feststellung der Geräusch-Emissionen werden Messungen u.a. nach VDV 154 [2] durchgeführt. Es werden dabei Schalldruckpegelhöchstwerte und Tonhaltigkeiten mit Normwerten verglichen. In einem elektrischen Antrieb sind dabei primär Motorleitungen, Kabelführung, Traktionsmotoren und Getriebe mit mechanischen Komponenten als Schallquelle identifizierbar. Bei Anfahr- und Bremsvorgängen dominieren Geräusche, die durch Schalthandlungen der Leistungshalbleiter hervorgerufen werden. Die Motorleitungen und eine aufmagnetisierte Maschine bilden dann die eigentliche Schallquelle. Die durch die Taktung des Drehrichters bedingte Welligkeit des Drehmoments kann außerdem über die Motorwelle im Getriebe unerwünschte Geräusche verursachen.

Die im Kapitel 2.2 dargestellte Methode der Flussabsenkung im Teillastbereich verringert neben der Energieaufnahme zusätzlich deutlich das Traktionsgeräusch. Beim Anfahren und Bremsen mit hohen Momenten muss dagegen der volle Nennfluss in der Maschine eingestellt werden. In diesem Fall kann eine Verbesserung des akustischen Verhaltens durch Anpassung der Wechselrichterschaltfrequenz erzielt werden. Zum einen wird die Schaltfrequenz in jeder neuen Schaltperiode in einem definierten Bereich z.B. zwischen 1,4 kHz und 2 kHz über eine Zufallsfunktion variiert. Zum anderen werden Bereiche der Schaltfrequenz drehzahlabhängig so festgelegt, dass vorhandene Resonanzen nicht angeregt werden. In der Abbildung 8 ist ein Fall aus der Praxis dargestellt: die akustische Eigenfrequenz des Antriebs befand sich im Spektrum der Anregung durch Schaltfrequenz des Drehrichters. Es wurde eine Optimierung der Drehrichterschaltfrequenz durchgeführt. Ein Ergebnis einer solchen Geräuschoptimierung für Anfahr- und Bremsvorgänge ist in der Abbildung 9 als Vergleich der gemessenen Amplituden der Terzmittenfrequenzen dargestellt.

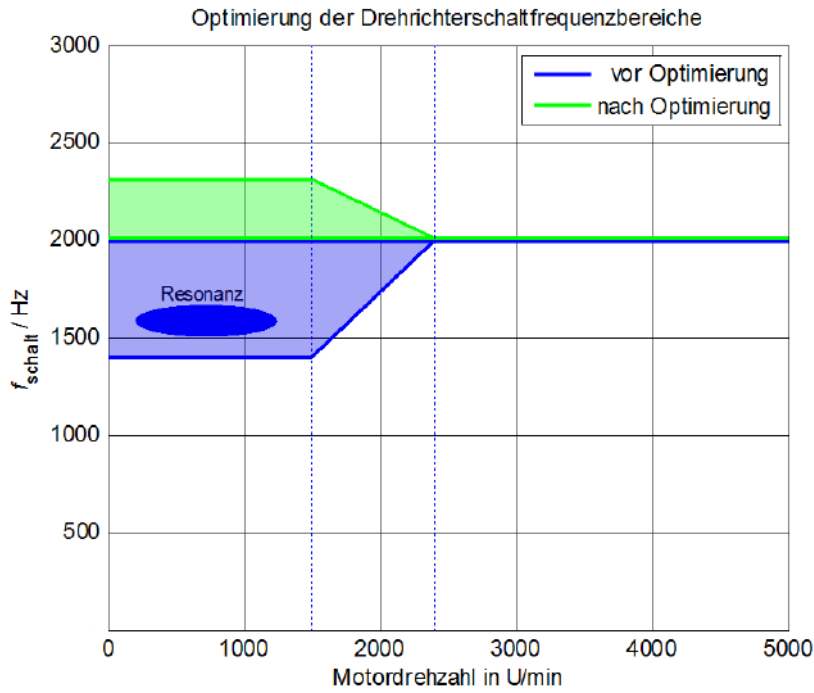


Abbildung 8: Verlauf der Drehrichterschaltfrequenzen in Abhängigkeit von der Motordrehzahl

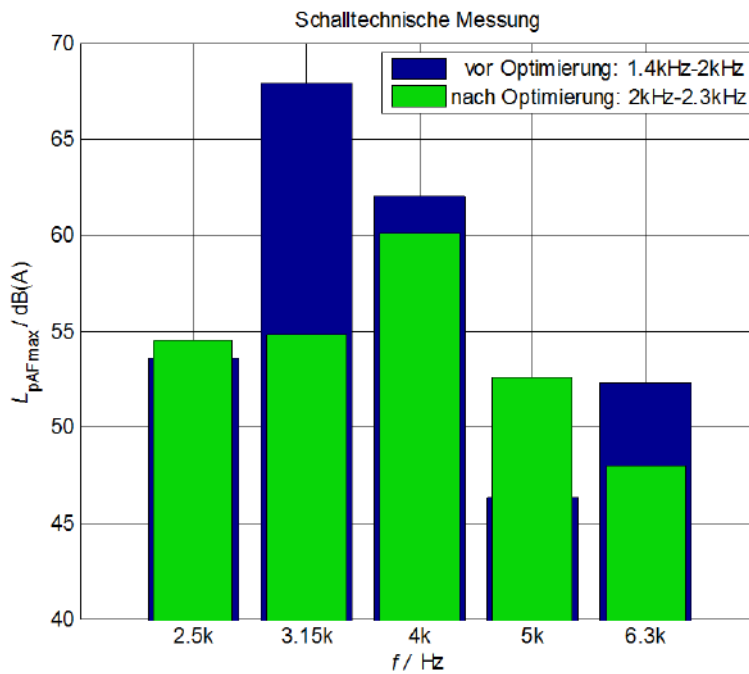


Abbildung 9: Ergebnis einer Geräuschoptimierung im Antrieb

Ein Gesamtsystem des elektrischen Antriebs im Fahrzeug kann auch mehrere akustische Eigenfrequenzen aufweisen. Ein solcher Fall ist in der Abbildung 10 dargestellt. Im unteren Geschwindigkeitsbereich stellt eine voll aufmagnetisierte Maschine eine merkbare Geräuschquelle dar. Bei höheren Drehzahlen nehmen die magnetischen Geräusche mit sinkendem Fluss ab, dafür weisen Getriebekomponenten eine ausgeprägte Eigenfrequenz auf. Die durch mechanische Resonanzen bedingten Geräusche lassen sich oft durch Drehrichterschaltfrequenz positiv beeinflussen. Im Fall, wie in der Abbildung 10 dargestellt, werden vorhandene Resonanzen bei der Einstellung der Schaltfrequenz in der Form berücksichtigt, dass im gesamten Geschwindigkeitsbereich ein optimales Antriebsgeräusch erreicht wird.

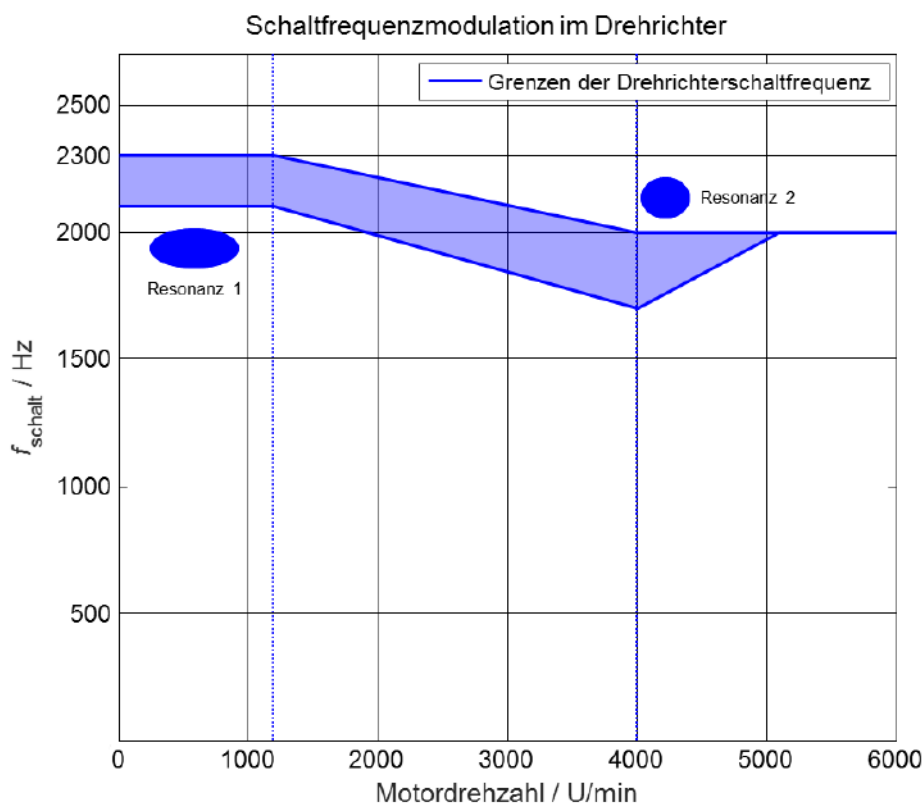


Abbildung 10: Einstellen der Grenzen der Schaltfrequenzmodulation bei einem System mit zwei ausgeprägten Eigenfrequenzen

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Berechnung der Gesamtverluste wurden Durchlass- und Schaltverluste im IGBT-Leistungsteil sowie Verluste in passiven Komponenten berücksichtigt. Im Traktions-Asynchronmotor wurde zum einen der Zusammenhang zwischen den Oberschwingungsverlusten und der Schaltfrequenz und andererseits zwischen den Rotorverlusten und Pulsmusterart betrachtet. Eine Reduktion der Rotor-Stromwärmeverluste durch synchrone Pulsmuster muss durch Motorzusatzverluste im Stator abgewogen werden. Mithilfe der ermittelten Zusammenhänge können der Systemwirkungsgrad beziehungsweise der Energieverbrauch über ein Fahrspiel ausgewertet werden. Um die berechneten Werte messtechnisch zu verifizieren wurden umfangreiche Prüfungen an einem Traktionsantrieb im Prüffeld und im Fahrzeug durchgeführt. Die grundlegenden Zusammenhänge konnten durch Auswertung der Wirkungsgrade von Umrichter und Motor sowie des Systemwirkungsgrads bestätigt werden. Durch Variation verschiedener Betriebsparameter wurden Optimierungsstrategien untersucht. Wesentlichen Einfluss auf die Systemverluste hat eine Flussabsenkung im Teillastbereich, weil dadurch eine deutliche Reduktion des Motorstroms möglich ist. Es konnte gezeigt werden, dass beim untersuchten Antrieb aus einer optimierten Flussvorgabe über einen realen Fahrzyklus ein um rund 1,5 % geringerer Energiebedarf resultiert.

Einen weiteren Faktor zur Optimierung des Energieverbrauchs stellt das eingesetzte Pulsmuster dar. Im Bereich der Feldschwächung kann durch Verwendung eines synchronen Pulsmusters die Grundschwingungsspannung erhöht werden und dadurch der Wirkungsgrad des Motors gesteigert werden. In den Messungen konnte mit synchronen Pulsmustern ein um bis zu 3 % höherer Systemwirkungsgrad gegenüber asynchroner Taktung realisiert werden.

Im Spannungsstellbereich, im Bereich der asynchronen Taktung kann ebenfalls ein Optimum der Schaltfrequenz gefunden werden. Durch Ausnutzung des ermittelten Optimierungspotentials ist eine nennenswerte Verringerung des Energieverbrauchs im realen Fahrzeugeinsatz zu erreichen.

Die Antriebssteuerung kann in einem wesentlichen Maß das Geräuschverhalten des elektrischen Antriebs beeinflussen. Durch angepasste Flussvorgabe im Teillastbereich und optimierte Drehrichterschaltfrequenz können durch Motorleitungen und Traktionsmaschine generierten Geräusche verringert werden. Auch durch die mechanischen Komponenten wie Motorgetriebe verursachten Geräusche können in manchen Fällen beeinflusst werden.

Die durchgeführten Untersuchungen haben das Potential für die Optimierung des Antriebsstrangs durch eine bessere Abstimmung der Komponenten aufgezeigt. Bei bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeugen muss beim Optimieren berücksichtigt werden, dass Änderungen an der Motoransteuerung einen zusätzlichen Zulassungsaufwand hervorrufen können. Für zukünftige Projekte sollte eine Optimierung im Zuge einer Systemprüfung stattfinden. Die messtechnische Untersuchung ist insbesondere aufgrund der durch Pulsmuster und Taktfrequenz beeinflussten parasitären Effekte in der Maschine wie Geräusche, Schwingungen, EMV und Lagerströme ein wichtiger Bestandteil der Systemoptimierung.

## Literatur

- [1] S. Schulz, F. Müllner, H. Neudorfer, L. Schülting und D. Tissen, „Wirkungsgradoptimiertes Zusammenspiel von Wechselrichter und Asynchronmaschine für Straßenbahn-Traktionsanwendungen,“ *e&i elektrotechnik und informationstechnik Heft 2*, p. 126–135, 2016.
- [2] VDV 154, Geräusche von Schienenfahrzeugen des Öffentlichen Personen-Nahverkehrs (ÖPNV), VDV-Schriften, 10/2011.

## Autoren



### **Tissen, Dietmar**

Geboren 1977 in Pawlodar, Studium der Elektro- und Informationstechnik an der RWTH Aachen University mit Diplomabschluss am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe. Seit 2005 Mitarbeiter bei Kiepe Electric GmbH in Düsseldorf mit Arbeitsschwerpunkt in Entwicklung der Antriebssteuerung für elektrische Antriebe.



### **König, Andreas**

Geboren 1977 in Aachen, Studium der Elektro- und Informationstechnik an der RWTH Aachen University mit anschließender Promotion im Jahr 2009 am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe auf dem Gebiet der Leistungselektronik für Hochtemperaturanwendungen. Seit 2009 Mitarbeiter bei Kiepe Electric GmbH im Bereich Systemtechnik. Seit 2017 Leiter der Abteilung Stromrichtersteuerungen.



### **Schülting, Ludger**

Geboren 1961 in Gescher in NRW, Studium der Elektrotechnik an der RWTH Aachen University mit anschließender Promotion im Jahr 1993 am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe auf dem Gebiet der Mittelfrequenz-Umrichter. Seit 1994 Mitarbeiter bei Kiepe Electric GmbH mit unterschiedlichen Aufgabenstellungen: Entwicklungsingenieur Antriebstechnik (1994-2000), Konstruktionsleiter (2000-2003), Leiter der Systementwicklung (2003-2007), Technischer Leiter des Geschäftsfeldes Bahnsysteme (2007-2012) und seit 2012 Leiter Technik und Entwicklung.