

Simulation niederfrequenter Schwingungen zwischen Bahnenergieversorgungsanlagen und Triebfahrzeugen

Alexej Halank, Erlangen; Arnd Stephan, Dresden

Während der Interaktion von geregelten Synchron-Synchron-Umformern und modernen elektrischen Fahrzeugen in Drehstromantriebstechnik können Leistungsschwingungen im niederfrequenten Bereich auftreten, wenn beide Teilsysteme ähnliche Eigenfrequenzen besitzen und unzureichend gedämpft sind. Für die Untersuchung dieser Leistungsschwingungen werden geregelte Modelle eines Umformers und eines Triebfahrzeugs im subtransienten Zeitbereich zusammengeführt, die in einer elektrischen Netzwerksimulation eingebettet und frei skalierbar sind.

Simulation of low-frequency oscillations between rail power supply systems and traction units
During the interaction of controlled synchronous-synchronous converters and modern electric traction units in three-phase drive technology, power oscillations in the low-frequency range can occur if both subsystems have similar natural frequencies and are insufficiently damped. For the investigation of these power oscillations, controlled models of a converter and a traction unit in the subtransient time range are brought together, which are embedded in an electrical network simulation and freely scalable.

Simulation des oscillations basse fréquence entre le système d'alimentation et les engins moteurs
Pendant l'interaction des convertisseurs synchrones-synchrones avec les engins moteurs avec technologie de convertisseurs triphasés, des oscillations de puissance dans le domaine basse fréquence peuvent apparaître si les deux sous-systèmes possèdent des fréquences propres similaires et si elles ne sont pas suffisamment amorties. Afin d'étudier ces oscillations de puissance, les modèles du contrôle d'un convertisseur et d'un engin moteur dans la fenêtre temporelle subtransitoire sont utilisés ensemble, qui sont introduits dans la simulation du réseau électrique et librement évolutifs.

1 Einführung

Zwischen ungenügend gedämpften Synchron-Synchron-Umformern (SSU) der Bahnenergieversorgung und modernen elektrischen Triebfahrzeugen in Drehstromantriebstechnik können signifikante niederfrequente Leistungsschwingungen auftreten. Grund hierfür ist die auf diesen Fahrzeugen installierte elektronische Leistungsregelung, die je nach Parametrierung dem Betriebsstrom eine charakteristische tiefe Eigenfrequenz verleiht. Auch der Umformer besitzt als geregelter Energieerzeuger eine Eigenfrequenz, mit welcher die Spannung an den Klemmen des Generators schwingt. Beide Teilsysteme beeinflussen sich durch die Fahrleitung über die Generatorspannung beziehungsweise den Fahrzeugstrom. Bei einem ungünstigen Verhältnis dieser beiden Frequenzen kann es zu einem Aufschaukeln der Leistung kommen, was zum Abschalten der beiden Teilsysteme führen kann. Es ist für das Auftreten dieser Schwingungen unerheblich, ob sich das Gesamtsystem momentan in Volllastbereich oder in kleineren Leistungsbereichen befindet.

Ziel ist es, eine Simulationsumgebung zu schaffen, in welcher die Leistungsschwingungen nachgebildet und nachfolgend technische Lösungsansätze untersucht werden können. Dafür wird ein valides Modell eines geregelten SSU benötigt, des Weiteren ist die Leistungsregelung eines Fahrzeugs in Drehstromantriebstechnik in der notwendigen Detailtiefe zu integrieren. Einen erheblichen Einfluss auf niederfrequente Schwingungen besitzen Leiterimpedanzen, deshalb ist die Integration von Maschinenmodellen für den Umformer und das Fahrzeug in einer Netzsimulationsumgebung vorzunehmen. Hierfür wird unter *Matlab/Simulink* die Toolbox *SimPower-Systems* gewählt. Da als eine weitere Anforderung die Skalierbarkeit der Modelle gewünscht ist, muss ein Parallelbetrieb zwischen mehreren Umformern beim Einsatz von mindestens zwei Fahrzeugen darstellbar sein.

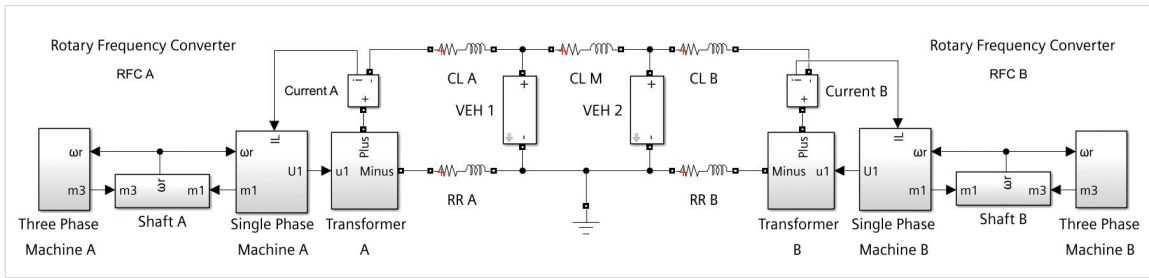


Bild 1: Gesamtmodell, Beispiel zweiseitige Speisung, Versorgung von zwei Fahrzeugen (alle Grafiken: Alexej Halank).

2 Wirkungsweisen des Umformer- und Fahrzeugmodells

2.1 Beschreibung der Modelle

2.1.1 Gesamtmodell

Durch den SSU wird eine energetische Kopplung zwischen einem übergeordneten Drehstromnetz und der einphasigen Fahrleitungsanlage hergestellt. Dadurch ist ein Leistungsaustausch zwischen beiden Energieversorgungssystemen möglich. Der SSU besteht aus einer 50-Hz-Drehstrommaschine, die über einen Transformator an das Drehstromnetz angeschlossen ist. Über eine gemeinsame Welle wird eine Kopplung mit einer 16,7-Hz-Einphasensynchronmaschine realisiert, die ebenfalls über einen Hochsetztransformator direkt in die Fahrleitungsanlage einspeist.

Die Fahrleitung und die Schiene werden über einen ohmschen Widerstand und eine Spule abgebildet, deren Werte als Impedanzbeläge hinterlegt sind. Zwar ist diese Vorgehensweise für AC-Bahnen eine vereinfachte Darstellung der Realität. Es soll dadurch zunächst eine variable Entfernung der einzelnen Betriebsmittel voneinander und untereinander für zu untersuchende Szenarien definiert werden können. Die Untersuchung einer konkreten Fahrleitungsanlage ist nicht Gegenstand dieses Beitrags.

Die Fahrzeuge selbst sind als geregelte Spannungsquellen modelliert, die sowohl die Lastanforderungen erfüllen als auch die Blindleistung am Stromabnehmer minimieren. Wesentliche Aufgabe ist dabei, die Spannungsamplitude und Phasenlage gegenüber der Einspeisespannung am Stromabnehmer auszuregulieren. Bei der Energieflussrichtung in das Fahrzeug muss für einen Stromfluss die „interne“ Spannung des Fahrzeugs geringer sein, beim Rückspeisen höher als die der Fahrleitung.

Bild 1 zeigt in der Modellübersicht einen Parallelbetrieb von zwei SSU, die einen Abschnitt versorgen, in dem zwei Fahrzeuge operieren. Die Drehstrommaschinen der Umformer sind über die drei Motorphasen an ideale Spannungsquellen angeschlossen.

Die Fahrzeuge bewegen sich trotz Lastaufnahme nicht, da dies für die Nachbildung elektrischer Wechselwirkungen im niederfrequenten Zeitbereich nicht relevant erscheint.

Es ist zu beachten, dass im Modell die elektrische Netzsimulation mit Spannungsquellen, Widerständen und Spulen arbeitet (zum Beispiel CLA in Bild 1 für Fahrleitungsabschnitt A), die Maschinenmodelle und die Fahrzeugregelung einschließlich Transformator und Zwischenkreis allerdings als Differentialgleichungen abgebildet werden. Das bedeutet, dass zum Beispiel die Generatorspannung U_1 keine „reale Spannung“ im Sinne eines elektrischen Modells ist, sondern zunächst ein reines Signal. Dieses Signal muss erst in eine Spannungsquelle mit Plus- und Minuspol übersetzt werden, damit es in der elektrischen Netzsimulation verwendet werden kann.

2.1.2 Umformermodell

Das Modell eines geregelten Synchron-Synchron-Umformers unter Verwendung absoluter Parameter wurde vom Autor in [1] unter *Simulink* erstellt. Die theoretischen Grundlagen hierzu wurden durch Arbeiten in [2] und [3] geschaffen. Für den vorliegenden Beitrag wird das Modell unter Verwendung bezogener Maschinenparameter genutzt, welches für die Einphasenmaschine in [4] ausführlich beschrieben wurde.

Bild 2 zeigt exemplarisch den Aufbau des Einphasengenerators in der grafischen Modellierungsansicht in *Simulink*. Innerhalb der einzelnen Subsysteme sind die konkreten Gleichungen der Maschine implementiert. Es ist zu erkennen, dass der Strom I_L und die Winkelgeschwindigkeit der Welle Eingangsgrößen in das Generatormodell sind, welches daraufhin die Klemmenspannung U_1 und das Drehmoment kalkuliert. Dies entspricht der „natürlichen“ Energieflussrichtung eines Generators, gleichwohl kann das Modell auch motorisch arbeiten, wenn etwa das Fahrzeug zurückspeist.

Beide Maschinen wirken auf die Drehzahl (n_{MECH}) über ihre Drehmomente (m_3 – Drehmoment Dreiphasenmaschine, m_1 – Drehmoment Einphasenma-

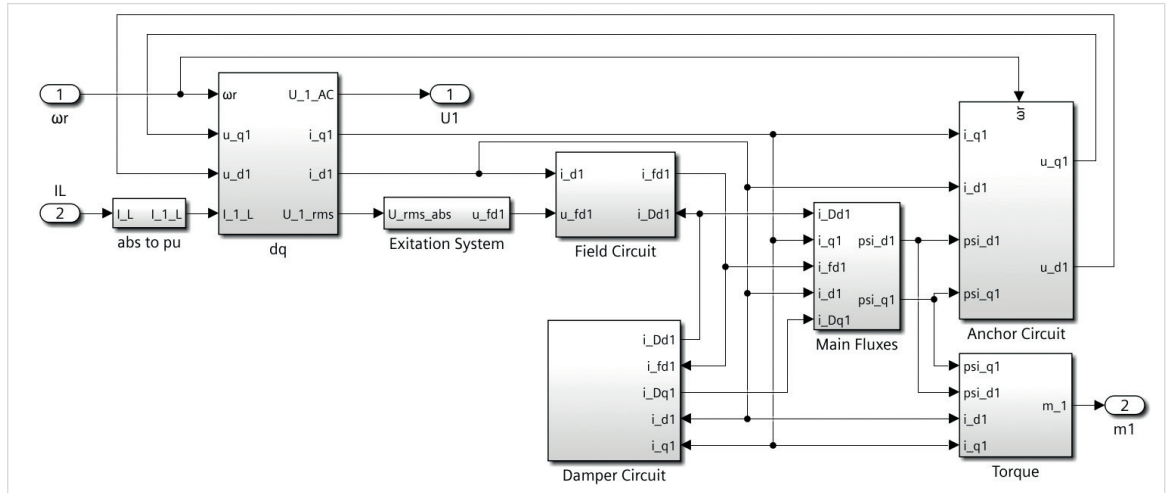


Bild 2:
Signalflussplan Einphasensynchronmaschine.

schine, J_{uf} – Trägheitsmoment Umformer, ω_r = Winkelgeschwindigkeit).

$$\omega_r = \int \left(\frac{m_3 + m_1}{J_{uf}} \right) dt \quad (1)$$

$$n_{MECH} = \omega_r \cdot 2\pi \quad (2)$$

Bei dem im weiteren Verlauf untersuchten SSU handelt es sich um einen realen, fahrbaren 10-MVA-Maschinensatz, für den ein vollständiger Parametersatz verfügbar ist.

2.1.3 Fahrzeugmodell

Der Aufbau der Regelung des Fahrzeugs wurde in [5] beschrieben und hergeleitet. Für die Einbettung der Fahrzeugregelung in ein elektrisches Modell sind Erweiterungen und Anpassungen notwendig geworden.

Das Fahrzeug agiert im Modell als geregelte Spannungsquelle, Bild 3. Je nach Lastanforderungen (*pref*) muss die Spannungsquelle eine Spannungsamplitude mit einer entsprechenden Phasenlage gegenüber der Fahrleitungsspannung bereitstellen. Die Spannung am Pantographen wird über den Hauptschalter (*Main Switch*) auf das Fahrzeug zugeschaltet. Je nach definiertem Lastprofil beginnt der „Vehicle Controller“, eine AC-Referenzspannung *uacref* im subtransienten Zeitbereich zu berechnen, die als Eingangssignal für eine ideale Spannungsquelle (*PWM Ideal Controlled Voltage Source*) dient. In der Realität wäre dies die Referenzspannung, anhand welcher der Vier-Quadranten-Steller (4-QS) als Netzstromrichter seine Zündimpulse erhält.

Die modelltechnische Taktung des Netzstromrichters ist für die Untersuchung von niederfrequenten

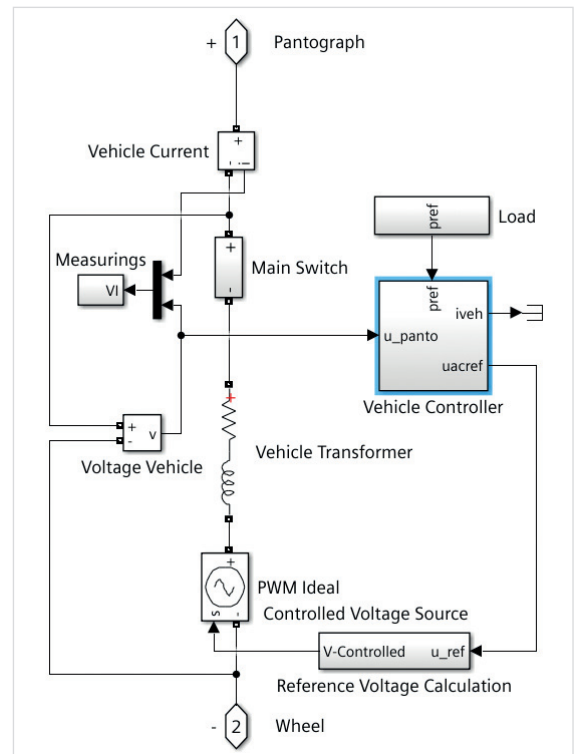


Bild 3:
Blockschaltbild Fahrzeugmodell in *Simulink* (einschließlich *Vehicle Controller* nach [5]).

Leistungsschwingungen zunächst nicht von übergeordneter Bedeutung, weshalb sie an dieser Stelle vernachlässigt wird. Des Weiteren wird *uacref* in der Realität nicht sofort erreicht, sondern durch die erst durchzuführende Taktung nach etwa einer Schaltperiode [5]. Außerdem muss der Fahrzeugtransformator über eine Ersatzimpedanz berücksichtigt werden.

Die entworfene Fahrzeugregelung (*Vehicle Controller*) in [5] mit seinen per-Unit-Parametern ent-

spricht keiner in der Realität anzutreffenden Baureihe, da die benötigten Parameter aus vielen Quellen und teils realen Lokomotiven zusammengetragen wurden. Mögliche parallelgeschaltete 4-QS zur Reduktion von Oberschwingungen werden zu einem zusammengefasst, die Hilfsbetriebeumrichter vernachlässigt. Die Nennspannung des Zwischenkreises beträgt 2800V. Eine Leistung von 6,4MW dient gleichzeitig als absoluter Bezugswert für die per-Unit-Größen im Fahrzeugmodell. Verluste werden nicht berücksichtigt.

In [1] wurde bereits die Umsetzung des Fahrzeugmodells in *Matlab/Simulink* durchgeführt.

Das Fahrzeugmodell wurde hinsichtlich folgender Punkte ertüchtigt:

- Anpassungen zur Verwendung in einem elektrischen Netzmodell, indem Transformator und Spannungsquelle eingesetzt werden.
- Der Zwischenkreiskondensator kann als Modelläquivalent über Schütz und Widerstand geladen werden ohne wirksame Strom- und Spannungsregelung, indem der 4-QS als ungesteuerter Diodengleichrichter behandelt wird. Dadurch können in der Zukunft real gemessene Verläufe während des Einschaltvorgangs eines Fahrzeugs nachempfunden werden.
- Implementierung einer spannungsabhängigen Stromkennlinie (U - I -Kennlinie) zur Nachbildung weit entfernter Einspeiser und der verfügbaren Leistung.

Bild 4 zeigt die umgesetzte Fahrzeugregelung als Blockschaltbild in *Simulink*, wie sie in ihren Grundzügen von [5] hergeleitet wurde und erweitert um die oben genannten Merkmale. An dieser Stelle erfolgt ein Überblick über das Modell. Für eine nähergehen-

de Erläuterung und Angaben zur Wirkungsweise wird auf die Literatur verwiesen.

Als Eingangsgröße dient die gemessene Spannung am Stromabnehmer, welche umgerechnet wird in eine auf 1 normierte per-Unit-Größe. Diese Spannung wird zunächst in das α/β - und dann weiter in das d/q-Koordinatensystem transformiert. Über eine PLL (*Phased Locked Loop*) wird die aktuelle Frequenz der Eingangsspannung ermittelt, der dabei ermittelte Drehwinkel relativ zur verstrichenen Zeit wird direkt der Koordinatentransformation zugeführt. Das hat zur Folge, dass sich die Strom- und Spannungsregler synchron mit der Eingangsspannung „mitdrehen“ und somit für die Fahrzeugregelung Gleichgrößen verfügbar sind. Der Spannungsregler hat die Aufgabe, die Zwischenkreisspannung u_{dc} konstant bei 1 pu zu halten. Der Stromregler berechnet die Referenzspannungen der d/q-Achse derart, dass zusätzlich der Strom i_q als „Blindkomponente“ zu 0 wird. Dann existiert reiner Wirkleistungsaustausch zwischen Fahrleitung und Fahrzeug.

Aus den Referenzspannung der d/q-Achse und dem Drehwinkel aus der PLL wird die Referenzspannung für den 4-QS ermittelt. Anhand der Leistungsbilanz (*Power balance*) aus aktuellem Strom am Stromabnehmer und der Referenzspannung am Eingang des 4-QS, die vereinbarungsgemäß sofort wirkt, sowie der Zwischenkreisspannung errechnet sich der Strom im Zwischenkreis. Dieser muss durch den Strom aufgrund der Motorlast beaufschlagt werden. Der resultierende Strom wirkt schlussendlich auf den Zwischenkreiskondensator und damit auf Schwingungen in der Zwischenkreisspannung. Der Motorstrom wird relativ einfach über die Leistungsanforderung und die Zwischenkreisspannung errechnet. Einflüsse aus dem Motorstromrichter werden vernachlässigt.

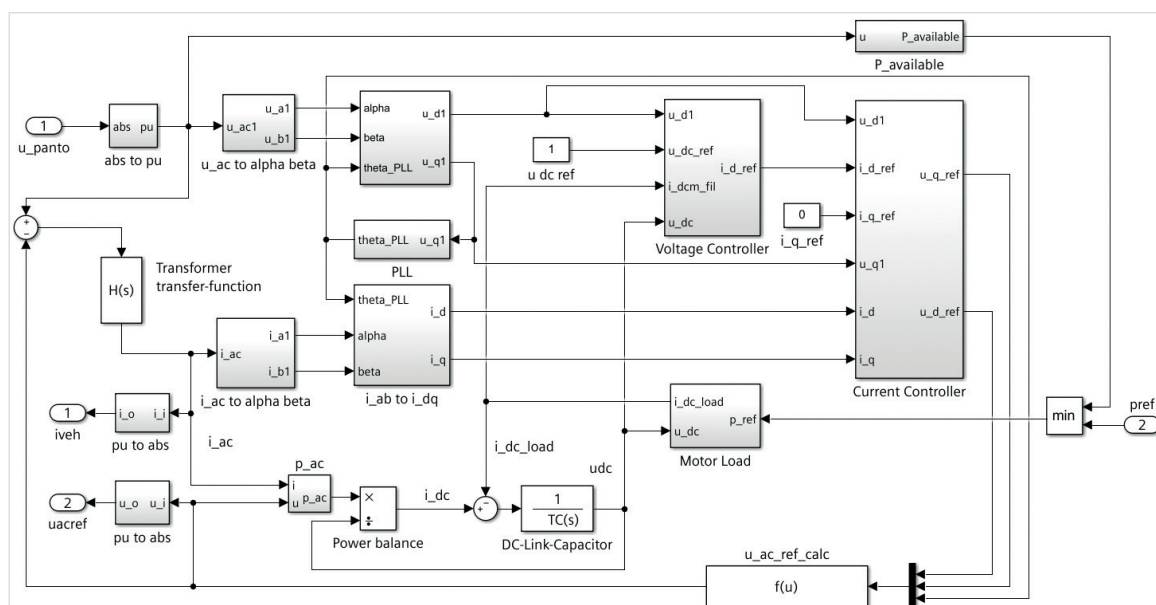


Bild 4:
Aufbau Fahrzeugregelung in *Simulink*.

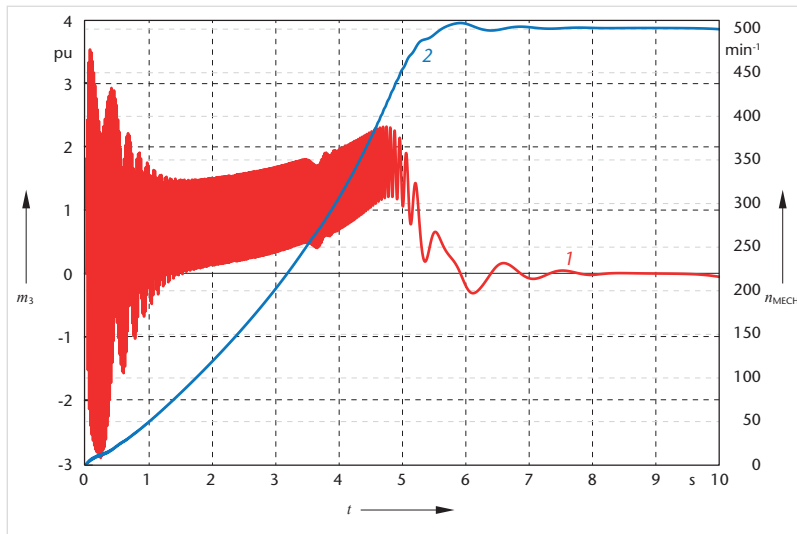


Bild 5:
Asynchroner Hochlauf der Drehstrommaschine.
1 – Drehmoment m_3 , 2 – Drehzahl des Umformers n_{MECH}

2.2 Asynchroner Hochlauf des Umformers

Dem Drehstromsynchronmotor wird eine konstante, ideale dreiphasige Statorspannung im Zeitbereich vorgegeben. Der Modellumformer fällt daraufhin nach etwa 6s infolge des Reluktanzmoments der Drehstrommaschine in Tritt bei nahezu synchroner Drehzahl n_{MECH} . Das hohe Anlaufmoment m_3 beträgt kurzzeitig bis zum 3,5-fachen des Nennmoments (Bild 5). Nach Erreichen der Nenndrehzahl geht der Motor in den Leerlauf über.

Bild 6 zeigt exemplarisch das Verhalten mechanischer Größen des Umformers bei Lastwechsel. Zunächst wird der Umformer motorisch mit 0,3 pu belastet. Die Einphasenmaschine nimmt Leistung aus dem Netz auf. Das Drehmoment m_1 (grün) schwingt typischerweise für 16,7-Hz-Einphasenmaschinen mit 33,4 Hz. Neben unwesentlich ausgeprägten Einschwingvorgängen werden augenscheinlich die kräftigen Drehmomentpendelungen der Drehstrommaschine (rot) kaum übertragen. Nach 1s findet ein Lastabwurf statt, beide Drehmomente versuchen sich bei 0 einzupendeln, bevor der Umformer bei Sekunde 2 mit -0,6 pu generatorisch unter Stoßlast gesetzt wird. Bei Sekunde 3 findet wieder ein Lastabwurf statt.

Während der dynamischen Vorgänge ist die charakteristische Eigenfrequenz des Umformers erkennbar. Sie wird hauptsächlich vom Motor dominiert, was auch gut an den Pendelungen des Drehmoments zu sehen ist, während der Generator diese kaum übernimmt. Die Pendelungen der Drehzahl folgen in etwa 90° Versatz dem Drehmoment der Drehstrommaschine. Auch ist wieder unter Last eine Komponente mit doppelter Netzfrequenz zu erkennen.

In Bild 7 ist zu sehen, dass die Klemmenspannung am Einphasengenerator mit der Frequenz der Drehzahl schwingt, auch wenn diese in der Stärke nicht komplett übertragen wird. Bei Sekunde 0, Sekunde 1, Sekunde 2 und Sekunde 3 sind ausgeprägte Übergangsvorgänge aufgrund der Lastspiele zu erkennen – insbesondere bei Sekunde 3 ist erkennbar an den beiden Spitzen in der Spannung, dass dies nicht mit der Drehzahl zusammenhängt. Um später diese Einflüsse bei den Untersuchungen auf die Leis-

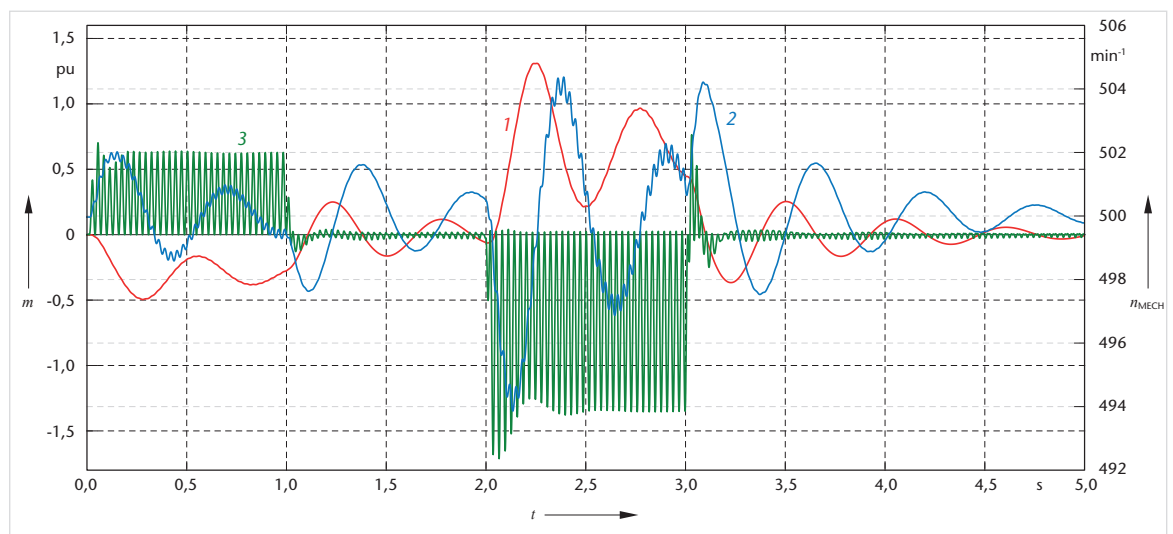


Bild 6:
Mechanische Größen des Umformersatzes bei Lastspiel, Wirkrichtung bezogen auf die Einphasenmaschine. Sekunde 0 bis 1: Motorbetrieb 0,3 pu, Sekunde 1 bis 2: Leerlauf, Sekunde 2 bis 3: Generatorbetrieb -0,6 pu, ab Sekunde 3: Leerlauf
1 – Drehmoment Drehstrommaschine (linke Achse), 2 – Drehzahl Umformersatz (rechte Achse), 3 – Drehmoment Einphasenmaschine (linke Achse)

tungsschwingungen zu minimieren, werden Lasten mit 0,5 s aufgerampelt.

2.3 Wirkungsweise Fahrzeugmodell

Das einzelne Fahrzeug befindet sich 50 km von einem Umformer entfernt. Die wirksame Impedanz ergibt sich aus den einschlägigen Impedanzbelägen für eine Fahrleitung der Bauart Re200. Zunächst speist das Fahrzeug 6,4 MW zurück ins Netz (Bild 8). Zu Beginn nimmt das Fahrzeug für einen kurzen Zeitraum etwas Blindleistung auf, was durch die Fahrzeugregelung jedoch rasch gegen 0 ausgeregelt wird. Bei Sekunde 2 kommt es zu einem Lastwechsel, das Fahrzeug geht in den Motorbetrieb über, ebenfalls mit 6,4 MW. Es sind stärkere Einschwingvorgänge sowohl bei der Wirkleistung als auch beim rekuperierenden Laststoß zu sehen. Aber auch hier wird die Blindleistung der Vorgabe nach schnell auf 0 gebracht, während der Umformer die Blindleistung für die Fahrleitung liefert.

Den Wechsel vom Rückspeisen zur Leistungsaufnahme am Fahrzeug hinsichtlich der Spannungen zeigt Bild 9. Die Spannung an der Fahrleitung entspricht während der Rekuperation natürlich der Ausgangsspannung des Fahrzeugtransformators. Bei Sekunde 2 findet der Lastwechsel statt. Der 4-QS beginnt eine Spannung (bereits umgerechnet auf die Transformator-Primärwicklung) bereitzustellen, die zum einen leicht kleiner als die Fahrleitungsspannung ist und zum anderen voreilt. Dadurch kann die Blindleistungsaufnahme des Fahrzeugs minimiert werden, gleichzeitig erfolgt aufgrund der Spannungsdifferenz ein Lastfluss in das Fahrzeug.

Bild 8:

Leistungen Fahrzeug und Umformer, 50 km voneinander entfernt.
Sekunde 0 bis 2: Rückspeisung mit -6,4 MW, ab Sekunde 2: Umschaltung auf Leistungsaufnahme 6,4 MW;
1 – Blindleistung am Stromabnehmer,
2 – Blindleistungsabgabe des Umformers,
3 – Wirkleistung Fahrzeug

Bild 9:

Spannungen bei Wechsel von Rückspeisen zu Lastaufnahme.
1 – Einspeisespannung am Stromabnehmer,
2 – Ausgangsspannung 4-QS (umgerechnet auf Transformator-Primärwicklung)

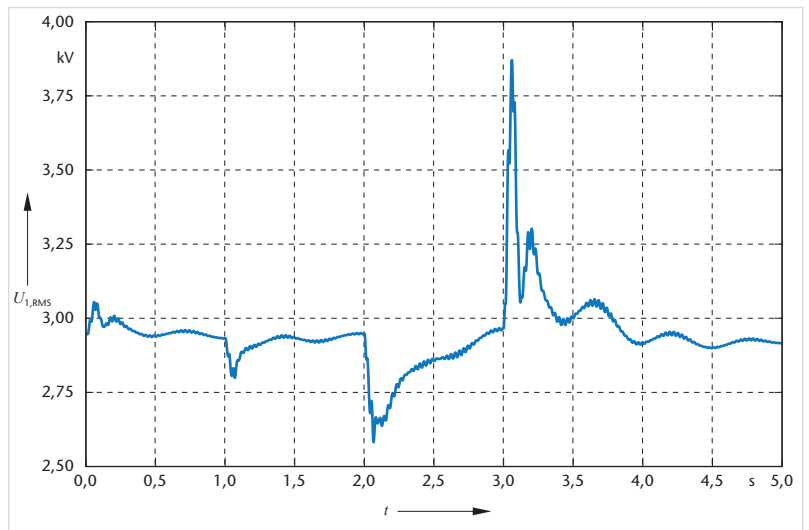
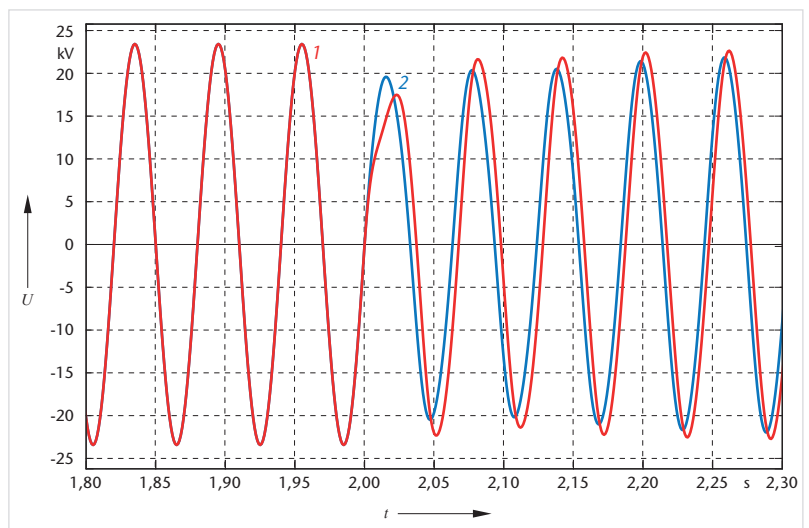
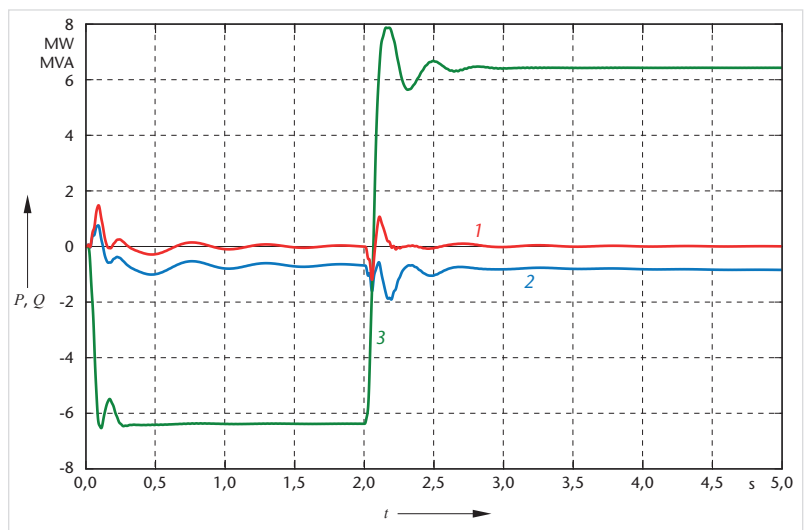


Bild 7:

Verlauf der Klemmenspannung am Einphasengenerator bei Laststoß zu Sekunde 0 (Motorbetrieb 0,3 pu) und Sekunde 2 (Generatorbetrieb -0,6 pu), Lastabwurf bei Sekunde 1 und 3.



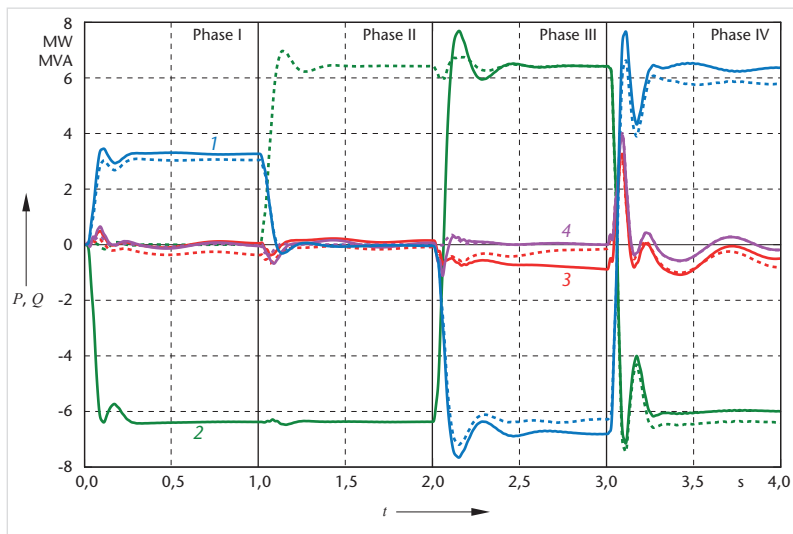


Bild 10:

Leistungsverteilungen, verschiedene Szenarien mit zwei Fahrzeugen und zwei Umformern.

1 – Wirkleistungen der beiden Umformer (durchgehende Linie: RFC A, gestrichelt: RFC B), 2 – Wirkleistungen der beiden Fahrzeuge (durchgehende Linie: VEH 1, gestrichelt: VEH 2), 3 – Blindleistungen der beiden Umformer (durchgehende Linie: RFC A, gestrichelt: RFC B), 4 – Blindleistungen der beiden Fahrzeuge (durchgehende Linie: VEH 1, gestrichelt: VEH 2)

2.4 Interaktion zwischen zwei Umformern und zwei Fahrzeugen im Modell

Es wird das Szenario aus Bild 1 simuliert. Die Entfernung zwischen den Fahrzeugen beträgt 0,01 km. Umformer A (RFC A) speist 10 km vor Fahrzeug 1 (VEH1) ein, Umformer B (RFCB) 30 km vor Fahrzeug 2 (VEH2). Die Fahrzeuge sind identisch. Bezüglich der Reglerparameter für Umformer und Fahrzeug werden die in [1] gefundenen Werte für einen stabilen Betrieb verwendet, sodass keine signifikanten Leistungsschwingungen auftreten. Ziel dieses Kapitels ist der Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Modelle hinsichtlich Wechselwirkungen und realistischer elektrischer Ergebnisse.

Es werden vier Simulationsphasen durchgeführt, die Simulationsergebnisse sind parallel in Bild 10 veranschaulicht.

- Phase I: VEH 1 operiert allein im Rückspeisemodus mit -6,4 MW, VEH 2 ist nicht aktiv. Es ist zu sehen, dass sich die beiden Umformer die Wirkleistung nahezu aufteilen, lediglich durch die kurze Entfernung zu den Fahrzeugen speist RFC A etwas mehr Wirkleistung ein als RFC B – dieser muss auch mehr Blindleistung für die längere Fahrleitung zur Verfügung stellen.
- Phase II: VEH 1 speist weiterhin zurück mit -6,4 MW, VEH 2 beginnt mit 6,4 MW Lastaufnahme. Da sich beide Fahrzeuge unmittelbar nebeneinander befinden, schieben sie sich die Last zu.

Die beiden Umformer gehen nahezu komplett in den Leerlauf.

- Phase III: VEH 1 beginnt jetzt, mit 6,4 MW Leistung aufzunehmen. Beide Fahrzeuge rufen die gleiche Leistung aus der Fahrleitung ab. Die Umformer teilen sich wie in Phase I die Wirkleistungsabgabe nahezu identisch auf, RFC B liefert geringfügig weniger aufgrund der größeren Entfernung zu den Fahrzeugen.
- Phase IV: Beide Fahrzeuge gehen gleichzeitig in den Bremsbetrieb. Für VEH 1 wird eine Leistung von -6,0 MW gewählt – statt -6,4 MW wie bei VEH 2 – da sonst nur eine Kurve erkennbar wäre. Beide Umformer gehen in den Motorbetrieb über und sind in der Lage, hochdynamisch mehr als 12 MW Lastsprung aufzunehmen – bei 10 MW Nennleistung. Auffällig ist, dass die Wirkleistungen der Fahrzeuge sich schnell einschwingen, während in der Wirkleistung und noch stärker in der Blindleistung der beiden Umformer Pendelungen zu erkennen sind.

Mit den bis hier gezeigten Ergebnissen aus den Simulationen ist nachgewiesen, dass das Gesamtmodell schlüssige und nachvollziehbare Leistungsverteilungen erzeugt. Das Umformermodell und das Fahrzeugmodell laufen stabil und performant in einer elektrischen Netzberechnungssimulation und zeigen trotz unterschiedlicher Modellierungsansätze in der Interaktion keine numerischen Auffälligkeiten.

3 Untersuchung der Leistungsschwingungen

3.1 Untersuchungsgegenstände

Im Rahmen der DIN EN 50388-2 existieren aktuell Vorüberlegungen, inwieweit die Stabilität zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und elektrischer Fahrzeuge durch Simulationsmodelle nachgewiesen werden soll, damit eine aufwändige messtechnische Nachweisführung umgangen werden kann. Bisher existieren diese Modelle nicht.

Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, ein einzelnes Fahrzeug mit einer bestimmten Leistungsaufnahme im Modell mit einer idealen Spannungsquelle zu versorgen und dann zu bestimmen, ob das Fahrzeug stabil ist. Die konkreten Anlagen der Bahnenergieversorgung werden dabei nicht betrachtet. Auch mehrere Fahrzeuge können zu einem Fahrzeug mit einer Summenleistung im Modell zusammengefasst werden. Beide Szenarien können mit geregelten Einrichtungen zur Energiebereitstellung (Umformer, Umrichter) erweitert werden, wie dies im vorhergehenden Abschnitt mit einem Umformermodell bereits durchgeführt wurde.

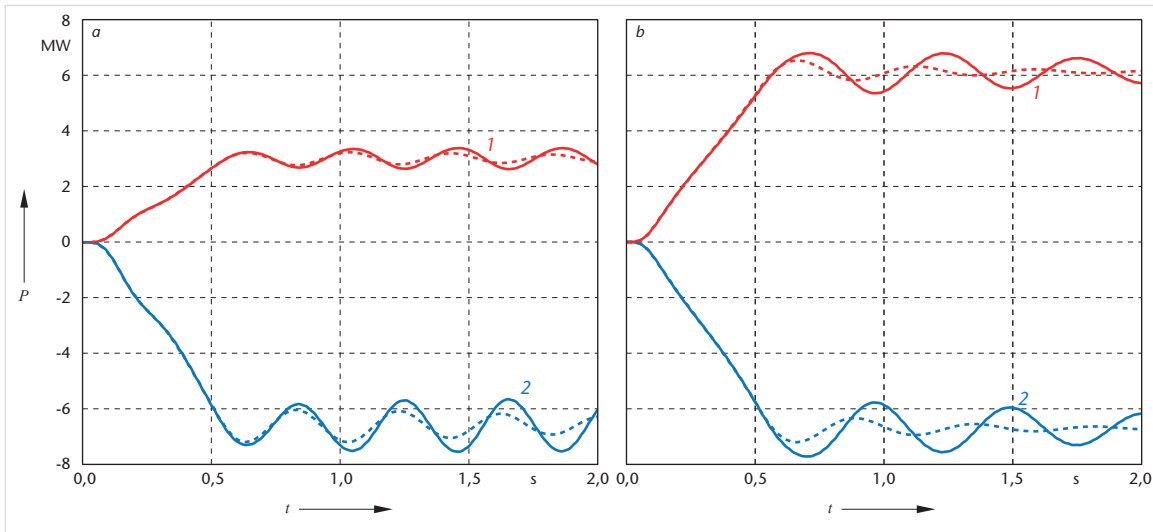


Bild 11:

Wirkleistungsschwingungen zwischen Umformer und Fahrzeug, exemplarisch bei 80 km Entfernung.

a – Szenario mit zwei Fahrzeugen (je 3 MW Leistungsaufnahme) und einem Umformer; dargestellt wird nur die Leistung eines Fahrzeugs;

1 – Wirkleistung Fahrzeug bei Berücksichtigung Polstreureaktanz im Umformer (durchgehende Linie), 1 – Wirkleistung Fahrzeug ohne Berücksichtigung Polstreureaktanz im Umformer (gestrichelte Linie), 2 – Wirkleistung Umformer mit Berücksichtigung Polstreureaktanz (durchgehende Linie), 2 – Wirkleistung Umformer ohne Berücksichtigung Polstreureaktanz (gestrichelte Linie);

b – Szenario mit einem Fahrzeug (6 MW Leistungsaufnahme) und einer variablen Spannungsquelle;

1 – Wirkleistung Fahrzeug bei Spannungsquelle Umformer (durchgehende Linie), 1 – Wirkleistung Fahrzeug bei idealer AC-Spannungsquelle (gestrichelte Linie), 2 – Wirkleistung Umformer (durchgehende Linie), 2 – Wirkleistung ideale AC-Spannungsquelle (gestrichelte Linie)

In [4] wurde beschrieben, dass die gemeinsame Streureaktanz des Polsystems der Einphasensynchronmaschine einen bedeutenden Einfluss auf die dynamischen Vorgänge in der Maschine hat. Dieser soll auch in Bezug auf die Leistungsschwingungen untersucht werden.

Insgesamt werden die folgenden Punkte in der Simulation überprüft:

1. Einfluss der Polstreureaktanz des Umformers
2. Einfluss Art der Spannungsquelle (Ideal oder Umformer)
3. Anzahl der Fahrzeuge mit Summenleistung (zum Beispiel zwei Fahrzeuge mit zusammen 2 x 3 MW oder ein Fahrzeug mit 6 MW Leistung)
4. Fahrleitungslänge

Die im vorhergehenden Abschnitt gezeigten Leistungsverteilungen zeigen, wenn überhaupt, nur geringe Schwingungen, die allesamt gedämpft werden. Die Regler der Fahrzeuge und Umformer sind gut aufeinander abgestimmt. In [1] wurden Reglerparameter für das Fahrzeug identifiziert, die in Verbindung mit einem schwingungsfähigen Umformermodell Leistungsspendelungen erzeugen, die ab einer bestimmten Leitungslänge nicht mehr gedämpft werden können. Diese Reglerparameter werden nun verwendet, um die Leistungsschwingungen zu erzeugen und zu untersuchen.

3.2 Exemplarische Untersuchungen

Exemplarisch werden an dieser Stelle die Leistungsschwingungen für Punkt 1 und Punkt 2 näher erläutert.

Einfluss der Polstreureaktanz des Umformers (Ergebnisse in Bild 11a): Im Einsatz ist ein Umformer, welcher zwei Fahrzeuge mit einer Leistungsaufnahme von jeweils 3 MW versorgt. Beide Fahrzeuge sind 80 km vom Umformer entfernt an gleicher Stelle. Auch wenn diese Entfernung zunächst unrealistisch erscheinen mag, wird sie aufgrund ihrer grenzstabilen Auswirkungen auf die Umformer-Fahrzeug-Interaktion ausgewählt. Grundsätzlich sind große Speisentfernungen geeignet, um die Stabilität der Modelle unabhängig vom Leistungsaustausch zwischen den Betriebsmitteln zu testen. In [5] wurden dazu im Modell Speiselängen bis über 200 km untersucht.

Die Leistungen der Fahrzeuge werden über 0,5 s aufgerammt, um starke Überschwingvorgänge zu vermeiden. Es werden zwei Szenarien gefahren: *blau* (gestrichelte Linie) zeigt die Wirkleistungsabgabe des alleinigen Umformers, wenn die Polstreureaktanz nicht berücksichtigt wird. Es ist zu sehen, dass die Leistungsschwingungen auftreten, aber gedämpft werden. Die *blaue* durchgehende Linie zeigt dabei die Leistung des Umformers mit Berücksichtigung der Polstreureaktanz, die sich aufschauelt und

nicht gedämpft ist. Analog hierzu ist in *rot* jeweils die Leistung nur eines Fahrzeugs dargestellt – das zweite Fahrzeug hätte die gleiche Kurve. Es sind weiterhin leicht unterschiedliche Eigenfrequenzen sichtbar.

Einfluss Art der Spannungsquelle (Ideal oder Umformer): Der zweite Versuch (Ergebnisse in Bild 11b) zeigt die Versorgung eines einzelnen Fahrzeugs mit 6 MW. Zunächst wird ein Umformer für die Energieversorgung verwendet, wodurch sich nahezu ein grenzstabiler Arbeitsbereich mit deutlichen Leistungspendelungen ergibt (*durchgehende Linien, rot: Fahrzeug, blau: Umformer*). Wird statt einem Umfor-

mer eine ideale Spannungsquelle verwendet, ist eine besser gedämpfte Leistungspendelung des Fahrzeugs und der Spannungsquelle zu erkennen (*gestrichelte Linien, rot: Fahrzeug, blau: Spannungsquelle*). Augenscheinlich verändern sich die Eigenfrequenzen der Schwingungen bei Verwendung von Umformer und idealer AC-Spannungsquelle. Die beiden Versuche zeigen, dass die Vereinfachungen in der Modell-ebene nicht zulässig sind.

3.3 Untersuchung der Leistungspendelungen

3.3.1 Einleitung

Durch eine Analyse der Leistungsschwingungen können die Eigenwerte der Fahrzeuge (und Umformer) berechnet werden. Die Eigenwerte enthalten eine Dämpfungskonstante und die Eigenfrequenz nach der Form

$$\lambda_{1/2} = -D_s \pm j f_s \quad (3)$$

Der Realteil $\text{Re}(\lambda)$ beschreibt demnach die Dämpfung des jeweiligen Systems (Fahrzeug oder Umformer) in s^{-1} , der Imaginärteil $\text{Im}(\lambda)$ die Eigenfrequenz der Leistungspendelungen in Hz. Ist die Dämpfung negativ, ist das System stabil. Bei positiver Dämpfung D kommt es zu einem Aufschaukeln der Leistungsschwingungen, das System ist instabil.

Im folgenden Abschnitt werden die Leistungspendelungen unter verschiedenen Szenarien immer exemplarisch für ein Fahrzeug dargestellt, auch wenn zwei Fahrzeuge involviert sind. Als Energieversorger kommt immer ein einzelner Umformer oder eine einzelne Spannungsquelle zum Einsatz. Die Leistungsaufnahme der Fahrzeuge wird in Summe von 1 MW bis zu 6 MW iteriert. Sind zwei Fahrzeuge beteiligt, ziehen die Fahrzeuge jeweils die halbe Leistung. Die Leitungslänge wird ebenfalls variiert, für 6 MW von 10 km bis 80 km in 5-km-Schritten. Für kleinere Leistungen wird die Entfernung vergrößert, da sonst die Leistungspendelungen kaum noch detektierbar wären.

3.3.2 Vergleich Umformer mit und ohne Polstreureaktanz und zwei Fahrzeugen

Bild 12 zeigt die Dämpfung und die Frequenzen der Leistungspendelungen für ein Fahrzeug bei Einsatz eines einzelnen Umformers unter Berücksichtigung der Polstreureaktanz ($x_{\sigma\text{Dfd}} < 0$) und unter Verwendung von zwei Fahrzeugen. Es ist auffällig, dass die Eigenfrequenzen mit größerer Leistungsaufnahme zunehmen. Die Dämpfung verbessert sich mit zunehmend kürzerer Speiseentfernung. Bei einer Leis-

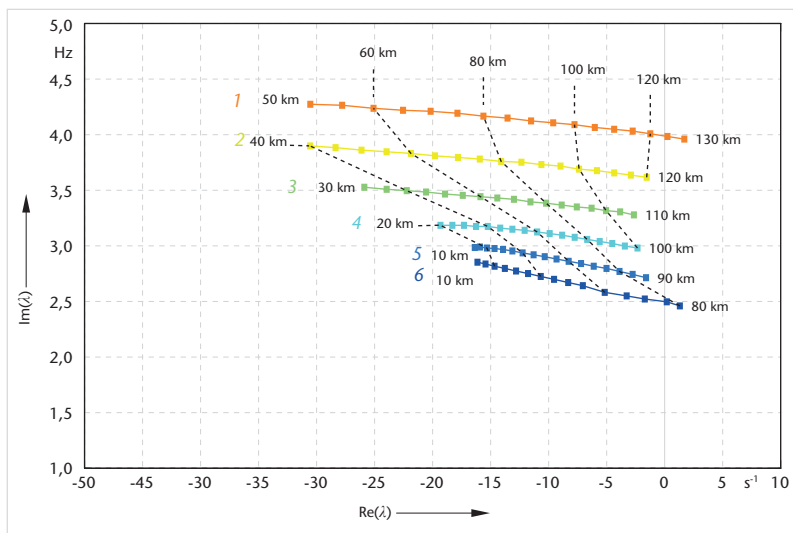


Bild 12: Eigenwerte eines Fahrzeugs für verschiedene Leitungslängen und Leistungen mit speisendem Umformer und Polstreureaktanz – zwei operierende Fahrzeuge. 1 – 2x0,5 MW, 2 – 2x1,0 MW, 3 – 2x1,5 MW, 4 – 2x2,0 MW, 5 – 2x2,5 MW, 6 – 2x3,0 MW

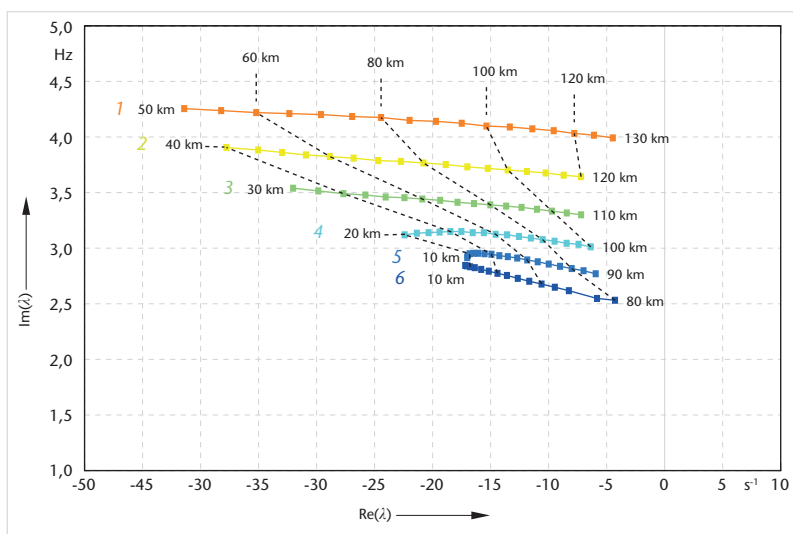


Bild 13: Eigenwerte eines Fahrzeugs für verschiedene Leitungslängen und Leistungen mit speisendem Umformer und ohne Polstreureaktanz – zwei operierende Fahrzeuge. 1 – 2x0,5 MW, 2 – 2x1,0 MW, 3 – 2x1,5 MW, 4 – 2x2,0 MW, 5 – 2x2,5 MW, 6 – 2x3,0 MW

tungsaufnahme von je 3 MW pro Fahrzeug sind die Fahrzeuge ab einer Entfernung von 75 km instabil. Die Leistungsschwingungen für 80 km sind jene in Bild 11a. Mit kleiner werdender Leistung wird die Speiselänge erhöht, um die grenzstabilen Zustände zu erreichen. So wäre für 2 x 0,5 MW erst bei 125 km Speiselänge ein instabiles System vorhanden. Grundsätzlich erfüllen die Ergebnisse die Erwartungshaltung.

Wenn die Polstreureaktanz nicht berücksichtigt wird, dann hat dies kaum einen Einfluss auf die Eigenfrequenz, dafür einen erheblichen auf die Dämpfung. Diese wird stark verbessert, wie in Bild 13 zu sehen ist. Es existiert kein einziges Szenario mehr, in dem das System Umformer-Fahrzeug instabil wäre. Die Vereinfachung der Maschinenparameter mit $x_{\sigma Dfd}=0$ führt demnach nicht zu einem *fail safe*-Verhalten und ist nicht zulässig.

3.3.3 Vergleich Umformer und ideale Spannungsquelle mit einem Fahrzeug

Zur Vereinfachung der Modellierungsaufgabe bei der Stabilitätsuntersuchung existiert die Idee, zwei Fahrzeuge zu einer Summenleistung zusammenzufassen. In der Theorie wird davon ausgegangen, dass die Leistungsschwingungen sich hinsichtlich ihrer Eigenwerte so ähnlich verhalten wie bei der Nachbildung von zwei Fahrzeugen. Bild 14 zeigt, dass dem nicht so ist. Die Frequenzen sind im Vergleich zu zwei Fahrzeugen halber Leistung deutlich reduziert. Die Dämpfung ist viel stärker ausgeprägt. Während das „Dämpfungsfenster“ im letzten Versuch bei kleineren Leistungen größer wurde, wird es nun kleiner. Auffällig ist der scharfe Knick beim Übergang von 3 MW auf 4 MW, wenn die Dämpfung für kleinere Leistungen stark ansteigt und die Frequenz überproportional steigt. Dieser Effekt sollte weiter untersucht werden.

Das gleiche grundlegende Verhalten ist auch zu beobachten, wenn statt eines Umformers eine ideale Spannungsquelle verwendet wird (Bild 15). Allerdings verbessert sich auch hier die Dämpfung noch ein mal sehr stark, während die Frequenz nahezu unverändert bleibt. Auch hier bedeutet das, dass vereinfachte Modelle die Realität tendenziell nicht abbilden können.

4 Ausblick

Die erfolgreiche Zusammenführung eines elektrischen Fahrzeugs und eines Umformermodells in pu-Darstellung in einer elektrischen Netzberechnung ermöglicht unzählige weiterführende Untersuchungsmöglichkeiten. Durch die Skalierbarkeit des

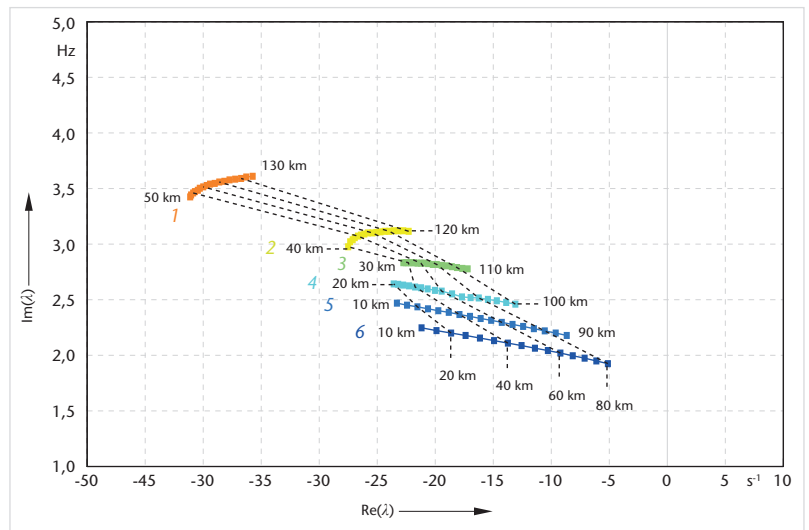


Bild 14: Eigenwerte eines Fahrzeugs für verschiedene Leitungslängen und Leistungen mit speisendem Umformer und Polstreureaktanz – ein operierendes Fahrzeug. 1 – 1 x 1,0 MW, 2 – 1 x 2,0 MW, 3 – 1 x 3,0 MW, 4 – 1 x 4,0 MW, 5 – 1 x 5,0 MW, 6 – 1 x 6,0 MW

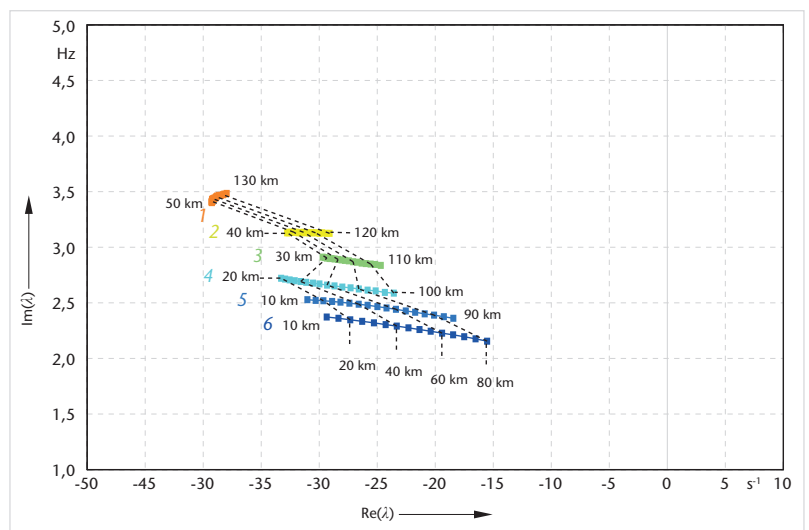


Bild 15: Eigenwerte eines Fahrzeugs für verschiedene Leitungslängen und Leistungen mit idealer AC-Spannungsquelle – ein operierendes Fahrzeug. 1 – 1 x 1,0 MW, 2 – 1 x 2,0 MW, 3 – 1 x 3,0 MW, 4 – 1 x 4,0 MW, 5 – 1 x 5,0 MW, 6 – 1 x 6,0 MW

Gesamtmodells und der umfangreichen Parametrierungsmöglichkeiten sind hochkomplexe Betriebsszenarien nachbildbar. Exemplarisch wurden in diesem Beitrag relativ hohe Speisentfernungen zugrunde gelegt, aber auch für kürzere Abstände können bei entsprechender Umformer- und Fahrzeugparametrierung Leistungspendelungen erzeugt werden.

Eine Vereinfachung der Betriebsszenarien führt zu einem völlig veränderten Betriebsverhalten der beteiligten Teilsysteme. Es ist herausgearbeitet worden, dass die Maschinenmodelle und ihre Parametrierung einen großen Einfluss auf die Leistungspendelungen

besitzen. Ebenso sind die korrekten Reglerparameter der Fahrzeuge wichtig, da erst durch deren Variation die Schwingungen erzeugt werden können. Die Konfiguration der Modelle bezüglich Fahrzeuganzahl und Spannungsquellen kann nicht beliebig vereinfacht werden.

Literatur

- [1] *Halank, A.*: Bedämpfung von Leistungsschwingungen einer Umformeranlage durch Power System Stabilizer. Technische Universität Dresden, Professur für elektrische Bahnen, Studienarbeit 2013.
- [2] *Biesenack, H.*: Betriebsverhalten von Synchron-Synchron-Umformern. Technische Universität Dresden, Professur für Elektrische Bahnen, Dissertation 1972.
- [3] *Stoltze, T.*: Dynamisches Betriebsverhalten von Synchron-Synchron-Umformern. Technische Universität Dresden, Professur für Elektrische Bahnen, Dissertation 1992.
- [4] *Halank, A.; Stephan, A.*: Subtransientes Maschinenmodell mit bezogenen Parametern für Einphasenschenkelpolmaschinen. In: Elektrische Bahnen 118 (2020), H. 12, S. 486–495.
- [5] *Danielsen, S.*: Electric Traction Power System Stability. Low-frequency interaction between advanced rail vehicles and a rotary frequency converter NTNU, Oslo, PhD-Thesis 2010.

Autoren



Dipl.-Ing. Alexej Halank (35), Studium Elektrische Verkehrssysteme an der Technischen Universität Dresden; 2014 bis 2019 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand an der Professur für Elektrische Bahnen, Technische Universität Dresden; seit 2019 Entwicklungsingenieur im System Engineering der Rail Infrastructure, Siemens Mobility GmbH.

Adresse: Siemens Mobility GmbH, Mozartstraße 33 B, 91052 Erlangen, Deutschland;
Fon +49 152 264382-36;
E-Mail: alexej.halank@siemens.com



Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan (56), seit 2008 ordentlicher Professor und Inhaber des Lehrstuhls für Elektrische Bahnen an der TU Dresden; 1993 bis 2008 Projektleiter, Niederlassungsleiter (1995) und Prokurist (2003) im Institut für Bahntechnik (IfB), Niederlassung Dresden; seit 2012 Geschäftsführer des Instituts für Bahntechnik GmbH.

Adresse: Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Professur für Elektrische Bahnen, Hettnerstraße 3, 01069 Dresden, Deutschland;
Fon: +49 351 463 36730;
E-Mail: arnd.stephan@tu-dresden.de

dcrps

d.c. rail power supply
Internationale Konferenz
²⁴⁴
International Conference

Call for Papers www.dcrps.info

