

Optimierte Betriebs- und Fahrstrategien für elektrische Schienenfahrzeuge

vorgelegt von: M.Sc. Lukas Pröhl

Die effiziente Nutzung von Rohstoffen und Energien ist eine zentrale Herausforderung der aktuellen Zeit. Damit verbunden ist eine nötige Elektrifizierung im gesamten Verkehrswesen. Diese kann nur gelingen, wenn gleichzeitig technologisch sowie gesellschaftlich Fortschritte erzielt werden können. Obwohl der Schienenverkehr als Vorreiter der elektrischen Mobilität gesehen werden kann, sind auch in diesem Bereich sowohl Forschung als auch Industrie auf der Suche nach potentiellen Energieeinsparungen. Die vorliegende Arbeit liefert Methoden zur Bestimmung von optimierten Betriebs- und Fahrstrategien für elektrisch angetriebene Schienenfahrzeuge. Hierbei steht vor allem die Optimierung des Energieverbrauchs des einzelnen Fahrzeugs im Fokus.

Der Aufbau der Arbeit ergibt sich aus der Betrachtung der drei Strategien: Fahrstrategie, ESS-Betriebsstrategie sowie der Lastpunktverschiebung. Der resultierende Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1 zusammengefasst.

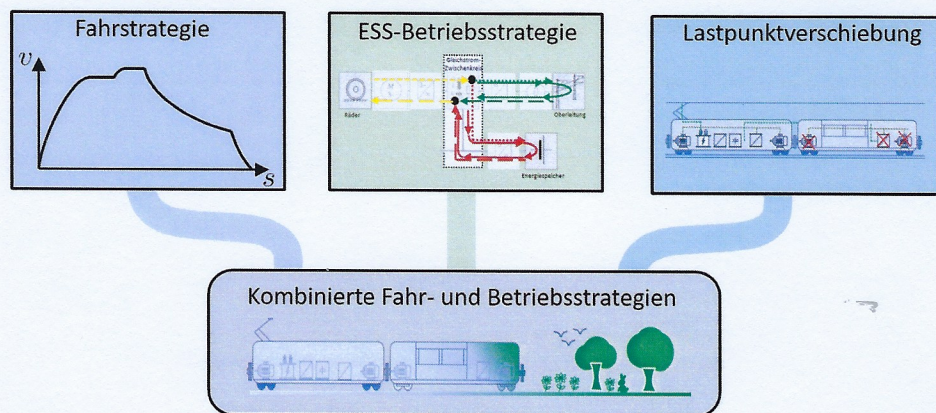


Abbildung 1: Schematische Zusammenfassung der möglichen Optimierungsstrategien.

Neben der Optimierung der Fahrstrategie lässt sich der Energieverbrauch des Fahrzeugs auch durch gezielte Eingriffe in die Betriebsstrategie minimieren. Als Freiheitsgrade für die Optimierung dienen hier zum einen die parallele Struktur der Antriebstopologie der betrachteten Schienenfahrzeuge, zum anderen wird eine zusätzliche Möglichkeit der Energiespeicherung in einem internen Energiespeichersystem (Abkürzung: ESS) betrachtet. Sowohl für die Lastaufteilung zwischen den parallelen Antriebssträngen als auch für die Betriebsstrategie des ESS werden Heuristiken hergeleitet, deren energieoptimale Parametrisierung durch den Einsatz von geeigneten Optimierungsmethoden erzielt wird. Da sich die drei untersuchten Strategien gegenseitig beeinflussen, werden die jeweiligen Korrelationen auf die optimalen Lösungen untersucht und eine energieoptimale Kombination bestimmt.

Als Grundlage für die Untersuchungen dient dabei ein detailliertes Simulationsmodell für den elektrischen Antriebsstrang eines Schienenfahrzeugs. Das Simulationsmodell bildet einen generischen Triebstrang für verschiedene Antriebstopologien ab, sowohl Gleichstrom- als auch Wechselstromtopologien können damit untersucht werden.

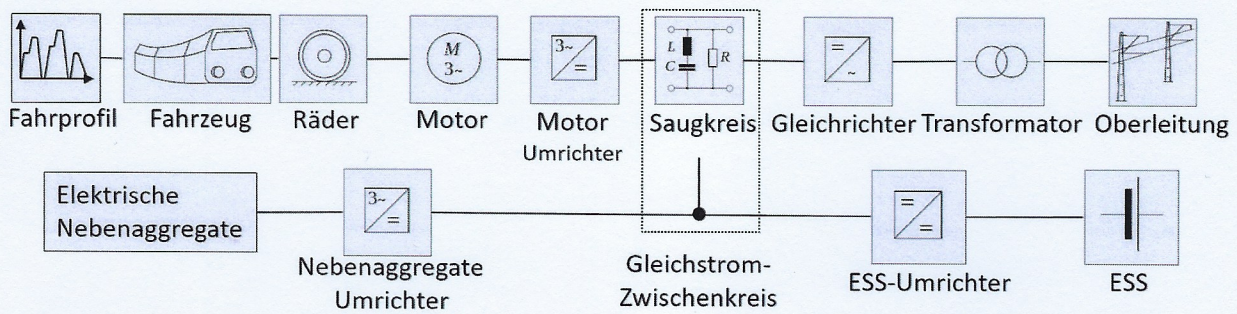


Abbildung 2: Detaillierte Darstellung einer AC-Antriebstopologie.

In Abbildung 2 ist beispielhaft eine AC-Antriebstopologie als Struktur für eine Rückwärts-simulation dargestellt. Die genutzte Invertierung der Antriebsstrangstruktur, um eine Rückwärtssimulation zu ermöglichen, ist dabei typisch für die Bestimmung von Energieverbräuchen und erspart die zusätzliche Implementierung eines Fahrreglers. Stattdessen muss als Eingangsgröße für die Simulationsstruktur ein geeignetes Fahrprofil bestimmt werden.

Auf Grundlage von vorliegenden Fahrplänen werden durch eine energieoptimierte Trajektorienplanung Geschwindigkeitsprofile berechnet, welche einen minimalen Verbrauch für die definierten Fahrzyklen erzielen. Basierend auf diesen Geschwindigkeitsprofilen lassen sich die resultierenden Leistungsverläufe einzelner Komponenten sowie des gesamten Antriebsstranges bestimmen. Durch eine Bilanzierung der Leistungsverläufe an den möglichen Energiequellen kann schließlich ein Gesamtenergieverbrauch für einen speziellen Fahrzyklus bestimmt werden.

Für die Optimierung der Fahrstrategie sowie der ESS-Betriebsstrategie wird ein zweistufiges Optimierungsverfahren eingeführt. Durch die Berücksichtigung der gewählten Rand- und Nebenbedingungen für Fahr- und ESS-Strategien wird der zulässige Lösungsbereich des Optimierungsproblems teilweise stark eingeschränkt. Durch die vorgestellte Modifikation können Gütefunktionen definiert werden, bei denen der zulässige Lösungsbereich durch ein Plateau charakterisiert ist. In einem ersten Optimierungsschritt werden die positiven Eigenschaften von schwarmbasierten Optimierungsverfahren genutzt, die es unter anderem ermöglichen, plateauförmige Minimalstellen vollständig zu erkennen und abzubilden, vgl. Abbildung 3. Auf Basis dieses reduzierten Parameterraums wird anschließend die energieoptimale Lösung in dem zweiten Optimierungsschritt bestimmt.

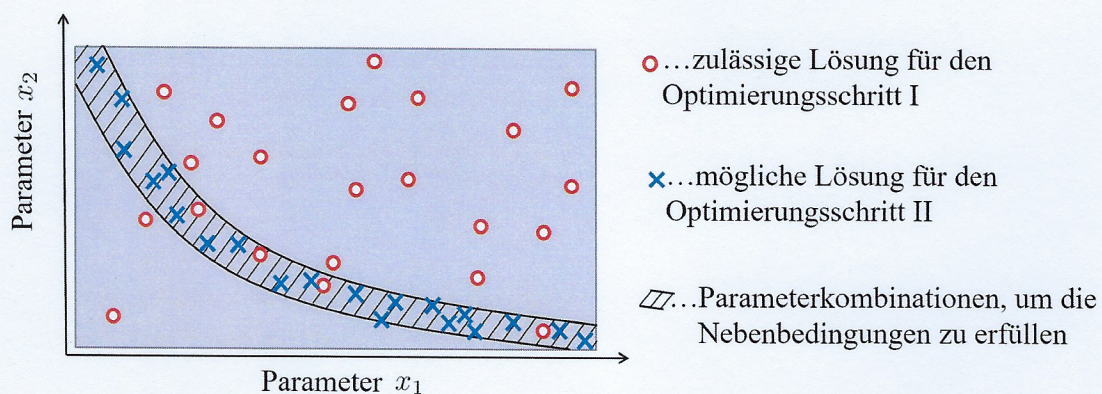


Abbildung 3: Schematische Darstellung des zweistufigen Optimierungsansatzes.

Neben der Betrachtung der einzelnen Fahr- sowie Betriebsstrategien wird in dieser Arbeit auch die Korrelation und Kombination der einzelnen Strategien betrachtet. So ist zum Beispiel in Abbildung 4 der Einfluss einer aktiven Lastpunktverschiebung auf die optimale Fahrstrategie dargestellt.

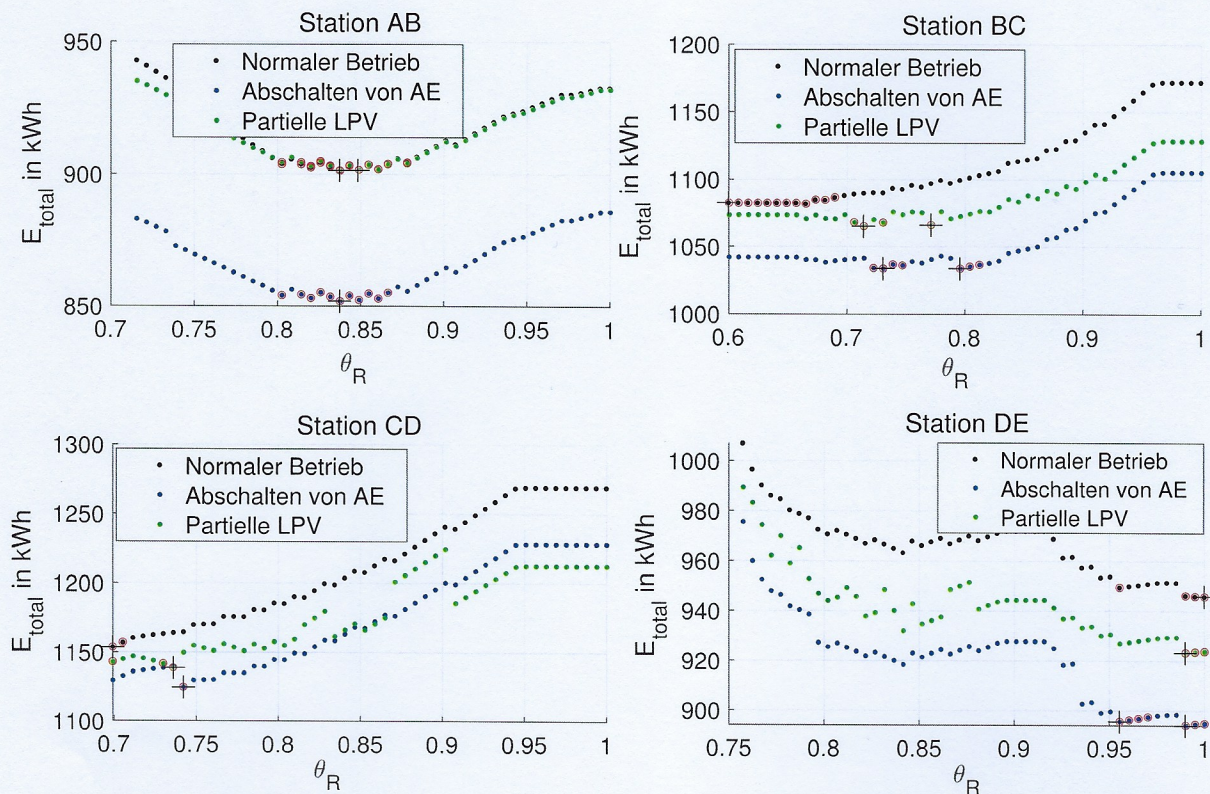


Abbildung 4: Gesamtenergieverbrauch für einzelne Fahrzyklen zwischen zwei Stationen in Abhängigkeit des Rollanteils ($\theta_R = \theta_{R,\min}$: Rollen maximiert, $\theta_R = 1$: kein Rollen). Die roten Kreise "o" markieren den Bereich der energieoptimalen Fahrstrategie.

Zu erkennen ist hier einerseits, dass die resultierenden Energieverbräuche sich in Abhängigkeit der Lastpunktverschiebung ändern. Andererseits verschieben sich zusätzlich die Minimalstellen des Rollparameters θ_R , welcher die Fahrstrategie charakterisiert. Eine Anpassung der Fahrstrategie in Abhängigkeit von der gewählten Lastpunktverschiebung führt demnach zu einer zusätzlichen Energieeinsparung.

Um die Allgemeingültigkeit der vorgestellten Ansätze zu untersuchen, werden die Ergebnisse der Optimierungsstrategien für unterschiedliche Beispiele von Servicekategorien vorgestellt. Eine Einordnung und Analyse der potentiellen Energieeinsparungen ist damit auch für die unterschiedlichen Anforderungen und Charakteristiken der verschiedenen Zug- und Streckencharakteristiken möglich.