
Kurzfassung

Die EU-Kommission strebt auf Grundlage der Werte von 1990 bis zum Jahr 2050 die Senkung der Kohlenstoffdioxidemission um insgesamt 80 Prozent an. Diese Entwicklung ist ein Treiber für Diskussionen hinsichtlich effektiver Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen. Ein aktueller Beitrag zu diesem Diskurs ist beispielsweise die Forderung von Fahrverboten für Dieselfahrzeuge in deutschen Großstädten. Nach heutigen Erkenntnissen ist Straßengüterverkehr für einen Drittel der CO₂-Emission im Verkehrssektor verantwortlich. Gegenüber dem Jahr 2005 ist bis zur Jahrhundertmitte sogar mit einem Wachstum des Güterverkehrs um 116 Prozent zu rechnen, was bei gleichbleibenden Emissionswerten bei zugleich wachsenden regulatorischen Anforderungen zu weitreichenden Problemen führen dürfte (vgl. Siemens AG (2012)). Zwar existieren in Form der Binnenschifffahrt und dem Eisenbahnverkehr alternative Verkehrsträger für den Gütertransport, jedoch eignen sich diese Verkehrsträger vornehmlich für den Transport von Massengütern und Schüttgütern bzw. für den Güterfernverkehr. Aufgrund der hohen Flexibilität und der bestehenden Netzdichte erweist sich daher nach wie vor der Straßengüterverkehr als der zweckdienlichste Verkehrsträger. Im Hinblick auf ein wachsendes ökologisches Bewusstsein und den politischen Druck sind allerdings konventionelle Antriebssysteme zu überdenken. Dabei können alternative Antriebssysteme, welche ursprünglich für den Personenverkehr konzipiert worden sind, auch auf Nutzfahrzeuge übertragen werden. Darüber hinaus existieren Antriebsformen, die speziell für Straßengüterverkehr entwickelt worden sind. Diese Konzepte befinden sich noch zum Teil in der Erprobungsphase und kommen bereits in kleinen Stückzahlen zum Einsatz. **Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird sich daher der Frage gewidmet, welche Auswirkungen der Einsatz alternativer Antriebssysteme auf die Tourenplanung eines Großhandelsunternehmens haben kann und in welchem Szenario sich eine Umstellung als lohnenswert erweisen könnte**

Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden in diesem Zusammenhang drei Antriebssysteme näher betrachtet: Das praxisnächste der drei Antriebsformen ist der batterieelektrische Antrieb (BEV). Herbeigeführt wird die Fortbewegung durch einen Elektromotor, welcher durch eine installierte Batterie im Fahrzeug mit Strom versorgt wird. Für diese Technik sprechen die geringen Wartungs- und Instandhaltungskosten und die geringen Energiekosten. Wird der verbrauchte Strom aus regenerativen Energiequellen bezogen, stößt diese Antriebsform keinerlei Stickoxide (NO_x) und Kohlenstoffdioxide (CO₂) aus. Auf Grund der eingeschränkten Reichweite und des hohen Batteriegewichts bzw. -volumens beschränkt sich ihr Einsatz auf den regionalen Güternahverkehr. Zum Einsatz kommt diese Antriebsform bereits heute im „StreetScooter“ der Deutschen Post AG sowie im schweizerischen „E-Force One“-Konzept. In der Erprobungsphase befindet sich das Antriebssystem der Hybrid-Oberleitungs-LKW (HO-LKW). Bei diesem Konzept befindet sich über der Fahrbahn eine stromdurchflossene Oberleitung, die mit Hilfe eines Stromabnehmers, welches auf dem Fahrzeug angebracht ist, das Fahrzeug mit Energie versorgt und dessen Elektromotoren antreibt. Auf unelektrifizierten Abschnitten fährt das System den Stromabnehmer ein und bezieht die Energie aus einer Batterie oder aus einem Dieselmotor. Durch den Verbrauch des günstigen Industriestroms und den Einsatz eines Elektromotors können gegenüber dem konventionellen Antrieb sowohl Kostenvorteile hinsichtlich der Energie als auch der Wartung und Instandhaltung erzielt werden. Auf den elektrischen Streckenabschnitten werden keine Luftschadstoffe ausgestoßen, die aufgrund von Verbrennungsprozessen entstehen könnten. Zudem weist dieses Antriebssystem wesentlich höhere Reichweiten auf. Strecken zu Demonstrationszwecken existieren unter anderem in den USA sowie in Schweden. In Deutschland kommt es in den nächsten Jahren zur Umsetzung zweier Abschnitte in Hessen und Schleswig-Holstein. In diesem Kontext wird auch die Brennstoffzelle näher betrachtet. Jedoch bleibt dieses Konzept im Rahmen der praxisbezogenen Ausführungen dieser Ausarbeitung weitestgehend unberücksichtigt, da es in Deutschland noch in nicht zum Einsatz kommt bzw. sich Entwicklungen für den Güterverkehr in einer noch sehr frühen Phase befinden.

Für die Durchführung des Verteilerverkehrs in Form von Touren bedarf es der Berücksichtigung spezifischer Randbedingungen. Einbezogen werden hierzu die Reichweite sowie die maximale Zuladung der eingesetzten Fahrzeuge. Es wird angenommen, dass die Touren bereits in einer optimierten Form vorliegen. Die Klärung der Forschungsfrage wird mit Hilfe der agentenbasierten Simulationssoftware „AnyLogic“ vorgenommen. Zur Abschätzung der Wirkung der verschiedenen Antriebssysteme wird eine vereinfachte Darstellung der Realität herangezogen. Für die Einschätzung der Wirkung bedarf es einer adäquaten Bewertungsmethode. Zum Einsatz kommt zu diesem Zweck die formalisierte Bewertungsmethode der Nutzen- Kosten-Analyse (NKA). Im Gegensatz zu nicht- bzw. teilformalisierten Ansätzen bietet diese Herangehensweise die Möglichkeit, Wirkungen quantifiziert darzustellen. Gegenüber den ebenfalls formalisierten Bewertungsmethoden der Nutzwertanalyse bzw. der Wirksamkeits-Kosten-Analyse ermöglicht sie eine wesentlich höhere Objektivität bzw. die Möglichkeit, Rangfolgen zu bilden, mittels derer eine Priorisierung der Touren hinsichtlich der Umsetzbarkeit vorgenommen werden kann. Die Verwendung der NKA erfordert eine Monetarisierung der herangezogen Kriterien. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit werden die Bewertungskriterien Anschaffung, Energie sowie Wartung und Instandhaltung berücksichtigt. Untersucht werden die Antriebssysteme auch anhand der ausgestoßenen Emissionen bzw. ökologischer Kriterien. Hierbei werden die ausgestoßenen Mengen an Feinstaub (PM_{2,5} und PM₁₀), Stickoxiden und Kohlenstoffdioxid monetarisiert. Die Angabe der Werte erfolgt in Metern und ist dabei abhängig von der Größenklasse des Fahrzeuges. In diesem Fall wird für HO-LKWs angenommen, dass sie sich auf elektrifizierten Strecken wie BEV verhalten und auf nicht- elektrifizierten Strecken wie konventionelle Dieselfahrzeuge. Für die jeweiligen Antriebssysteme werden fünf unterschiedliche Größenklassen von Fahrzeugen unterschieden. Zusätzlich werden 20 Touren mit einer jeweils spezifischen Zahl an Zielen sowie spezifischen Gesamtlängen und Gesamtgewichten in den Regionen Rhein-Main/Rhein-Neckar generiert. Entwickelt werden im Rahmen der Ausarbeitung vier Simulationsumgebungen. Dabei dient ein Modell als Vergleichsplanfall bzw. Planfall 0. Als Antriebsstrang kommt hier ein konventioneller Dieselmotor zum Einsatz. Die Entwicklung des batterieelektrischen Szenarios erfolgt unter Berücksichtigung der eingeschränkten Reichweite dieses Antriebssystems. Übersteigt die Tourlänge die Reichweite eines Fahrzeugs, werden zwei Fahrzeuge zum Einsatz gebracht und ist die Tour länger als die maximale Reichweite zweier Fahrzeuge, werden innerhalb des Modells drei Fahrzeuge zur Bewältigung der Tour erforderlich. Dementsprechend wird die Tour in zwei oder drei Einzeltouren zerteilt. Anhand des Gesamtgewichts der Tour wird die Größenklasse des Fahrzeugs definiert. Eine weitere Simulationsumgebung bildet das teilelektrifizierte Szenario, welches mit HO-LKWs durchgeführt wird. Für diese Umgebung werden bestimmte Abschnitte auf Bundesautobahnen (BAB) als elektrifiziert definiert. Beim vollelektrifizierten Szenario wird angenommen, dass alle BAB und Bundesstraßen über eine Oberleitung verfügen. Sowohl das Modell für den Vergleichsplanfall als auch für die HO-LKW-Szenarien dienen der Ermittlung der elektrifiziert bzw. nicht elektrifiziert zurückgelegten Distanzwerte.

Diese werden anschließend mit den definierten Werten der Bewertungskriterien multipliziert. Im Gegensatz dazu erfolgt beim batterieelektrischen Simulationsmodell die Bestimmung und Ausgabe aller Werte für die jeweiligen Bewertungskriterien. Die Bewertung erfolgte anhand des Nutzen-Kosten-Verhältnisses (NKV). Dazu wird eine Differenzbildung zwischen den Werten des Vergleichsfalls und den Werten der einzelnen Szenarien vorgenommen. Die hierbei erzielten Nutzen bzw. Kosten werden in ein Verhältnis gesetzt. Wird ein NKV-Wert von größer gleich eins ermittelt, kommt eine Umstellung der Tour auf ein alternatives Antriebssystem in Frage. Die Simulation, die anschließende Analyse der Ergebnisse sowie die Ermittlung des NKV ergeben für alle batterieelektrische Szenarien ein Wert von unter eins. Insbesondere bei Touren mit einer hohen Gesamtlänge führt der Einsatz mehrerer Fahrzeuge zu hohen Kostenwerten hinsichtlich der Anschaffung, der Energie sowie der Wartung und Instandhaltung. Hohe Nutzenwerte werden

hingegen bei den ökologischen Kriterien ermittelt. Vor allem bei sehr langen Touren sind gegenüber dem Vergleichswert hohe Nutzenwerte hinsichtlich der Kohlenstoffdioxidemission zu verzeichnen. Einfluss auf die Resultate nimmt auch das Gesamtgewicht der Tour. Sind für die Durchführung der Tour Fahrzeuge kleinerer Größenklassen erforderlich, werden wesentlich schlechtere Nutzen-Kosten-Verhältnisse erzielt. Zurückzuführen ist dies auf die hohen Anschaffungskosten der batterieelektrischen Fahrzeuge sowie die geringe Jahreslaufleistung und die kurze Nutzungsdauer der Fahrzeuge kleinerer Größenklassen. Ähnliche Ergebnisse werden auch im teilelektrifizierten HO-LKW Szenario ermittelt. In den meisten Fällen liegt die NKV über denen des batterieelektrischen Szenarios. Jedoch liegt auch hier der Wert unter dem Schwellenwert von eins. Im hohen Maße sind die erzielten Ergebnisse eine Folge der hohen Kostenwerte hinsichtlich der Anschaffung. Bei allen anderen Kriterien werden sehr geringe Nutzenwerte festgestellt. Dies kann durch die geringen elektrisch zurückgelegten Distanzen begründet werden. In einigen Fällen werden durch die hohen Nutzenwerte bei der Emission für das batterieelektrische Szenario wesentlich bessere NKV ermittelt als für das teilelektrifizierte Szenario. Bessere Ergebnisse können beim vollelektrifizierten Szenario erzielt werden. Hierbei werden drei Touren ermittelt, deren NKV höher als der Schwellenwert von eins liegen. Verzeichnet werden in diesem Fall dieselben Kostenwerte für die Anschaffung sowie Wartung und Instandhaltung wie beim teilelektrifizierten Szenario. Durch die hohe Zahl der elektrisch zurückgelegten Distanzen können hinsichtlich den Kriterien Energie und Emission bedeutend höhere Nutzenwerte ermittelt werden. Bei drei Touren fallen die Werte so hoch aus, dass die hohen Kostenwerte für die Anschaffung ausgeglichen werden können.

Die erzielten Ergebnisse werden innerhalb einer Rangfolge einander gegenübergestellt, wodurch eine Priorisierung der Touren hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit möglich wird. Fast alle Touren aus dem vollelektrifizierten Szenario verzeichneten bessere NKV als die Touren der batterieelektrischen und teilelektrifizierten Szenarien. Wie bereits dargelegt, eignen sich drei Touren aus dem vollelektrifizierten Szenario auch für eine Umstellung. Insbesondere Touren mit sehr geringem Gesamtgewicht, die den Einsatz von Fahrzeugen der kleinsten Größenklasse erforderlich machen, verzeichnen bei dieser Gegenüberstellung die schlechtesten NKV. Dies beschränkt sich nicht auf eine Antriebsform, sondern kann für alle drei Systeme festgestellt werden. Die Plausibilität der Ergebnisse wird mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse geprüft. Dabei wird eine Variation der Dieselpreise sowie des gewerblichen und des industriellen Strompreises vorgenommen. Für die teilelektrifizierten und batterieelektrischen Szenarien kann anschließend keine wesentliche Veränderung der NKV beobachtet werden: Die Werte überschreiten hierbei nicht die Schwellenwert von eins. Im Vergleich hierzu sind bei einem Anstieg der Dieselpreise um 25 Prozent drei weitere Touren mit einem Wert größer gleich eins feststellbar. Zu Beantwortung der Forschungsfrage kann zusammengefasst angemerkt werden, dass bereits jetzt die Umstellung einiger Touren in ein vollelektrifiziertes Szenario für Großhandelsunternehmen lohnenswert wäre. Jedoch handelt es hierbei um einen hypothetischen Ansatz, da in naher Zukunft nur zwei Streckenabschnitte zu Erprobungszwecken mit Oberleitungen ausgestattet werden sollen. Ein vollelektrifizierter Ausbaustand liegt daher noch in ungewisser Zukunft. Da durch die Verknappung von Erdöl und dessen Nachfrageanstieg mit einem ansteigenden Dieselpreis zu rechnen ist, könnten erfolgreiche Feldversuche den Ausbau dieser Technologie forcieren. Des Weiteren sind in Zukunft durch Skaleneffekte niedrigere Anschaffungskosten für dieses Antriebssystem zu erwarten. In Rahmen dieser Ausarbeitung kritisch zu betrachten sind allerdings die teilweise unzureichenden Werte, die zu den teil- bzw. vollelektrifizierten Szenarien ermittelt worden sind. Hierdurch müssen einige Ergebnisse unberücksichtigt bleiben. Da es sich hierbei um eine vereinfachte Abbildung der realen Bedingungen handelt, ergeben sich Anknüpfungspunkte an diese Arbeit unter anderem hinsichtlich des dynamischen Energieverbrauchs der Fahrzeuge bei einem sich ändernden Gesamtgewicht. Zukünftige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet könnten auch die Investitionskosten für die Infrastruktur einfließen lassen bzw. Emissionen, die durch den Produktionsprozess der unterschiedlichen Antriebssysteme fallen, zusätzlich hinzuziehen.