

---

---

## Kurzfassung

---

Name: Sebastian Gleiß  
Thema: Modellierung einer Flugzeugabfertigung mit elektrisch angetriebenen  
Vorfeldfahrzeugen  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze  
M.Sc. Danny Wauri

---

Die Mitverantwortlichkeit der wachsenden Luftverkehrsbranche am Klimawandel führt zu einem Umdenken hinsichtlich der genutzten Energieträger und der Zielsetzung handelnder Akteure, die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken. Neben der technischen Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung von Flugzeugen stellt die Elektrifizierung des Fuhrparks von Flughäfen eine aussichtsreiche Maßnahme zur Zielerreichung dar. Ein Großteil der zur Flugzeugabfertigung eingesetzten Geräte wird aktuell mit Diesel angetrieben. Aufgrund von vorherrschendem Kurzstreckenverkehr bieten sie ein großes Potenzial für die Nutzung von Elektromobilität. Abgesehen von einem klimaneutralen Betrieb ist mit der Umstellung auch eine Reduktion von Luftschadstoff- und Lärmemissionen verbunden, die eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen für das Bodenpersonal erwarten lässt. Zusätzlich besteht ein bedeutender Vorteil in einer verbesserten Energieeffizienz und der damit verbundenen Senkung des Energieverbrauchs gegenüber konventionellen Antrieben. Durch die Einsparungen von Betriebskosten und einem niedrigeren Wartungsaufwand ergeben sich auch wirtschaftliche Chancen, welche der Implementierung von elektrischen Antrieben an Flughäfen zum Erfolg verhelfen können. Aus diesem Grund wird auch am Flughafen Frankfurt am Main, dem Fallbeispiel dieser Arbeit, die sukzessive Umrüstung der Abfertigungsgeräte auf elektrische Antriebe vorangetrieben.

Den ökologischen und wirtschaftlichen Vorteilen stehen die infrastrukturellen Unsicherheiten im großflächigen Einsatz von Elektromobilität in der Flugzeugabfertigung gegenüber. Die langen Ladezeiten der Traktionsbatterie im Vergleich zu den schnellen Betankungsvorgängen mit Diesel oder Benzin müssen kompensiert werden, um die Pünktlichkeit während zeitkritischen Prozessen einer Flugzeugabfertigung aufrechtzuerhalten. In diesem Zusammenhang ist unklar, ob und in welchem Ausmaß der Fuhrpark für einen vollständig elektrischen Betrieb erweitert werden muss. Erfahrungswerte, die bei der Ermittlung der optimalen Anzahl an bereitzustellenden Ladestationen hinzugezogen werden können und die Aufschluss darüber geben, inwiefern das Stromnetz die gesteigerte Ladeleistung zur Verfügung stellen kann, sind derzeit am Flughafen Frankfurt nicht vorhanden. Infolgedessen verfolgt diese Arbeit das Ziel mit der Software *AnyLogic* ein Modell zu entwickeln, anhand dessen Erkenntnisse für die beschriebenen Unsicherheiten gewonnen werden sollen. Durch die Simulation relevanter Prozesse einer Flugzeugabfertigung mit elektrischen Fahrzeugen werden hierzu die erforderlichen Infrastrukturkomponenten quantitativ bestimmt.

Bei einer Flugzeugabfertigung ist eine Vielzahl an Fahrzeugen beteiligt, die in Lade- und Transportgeräte zu differenzieren sind. Es wurde festgestellt, dass angesichts der verschiedenen Abläufe von Lade- und Transportfahrzeugen auch unterschiedliche Anforderungsprofile an die Elektromobilität bestehen. Ladefahrzeuge zur Be- und Entladung von Flugzeugen stehen im

---

Allgemeinen an der Flugzeugposition bereit und können über eine installierte Ladeeinheit dezentral an Steckdosen geladen werden. Erste Erfahrungen am Flughafen Frankfurt am Main zeigen, dass die zur Verfügung stehenden, nächtlichen Standzeiten der Fahrzeuge sowie die Zeiten zwischen den Abfertigungen ausreichen, um Fahrzeuge hinreichend mit Energie zu versorgen. Im Gegensatz dazu bieten sich im Schichtbetrieb von Transportfahrzeugen, insbesondere im Gepäck- und Frachttransport, lediglich kurze Zeiträume für Batterieladungen an, die in Anbetracht einer fehlenden Ladeeinheit im Fahrzeug nur an zentralen Ladestationen genutzt werden können. In Bezug auf die wechselseitige Abhängigkeit von Verladung und Transport des Gepäcks und den geringen Pufferzeiten im Betrieb besteht für die Elektrifizierung von Gepäckschleppern eine besondere Herausforderung darin, ohne eine Vergrößerung des Fahrzeugbedarfs die Pünktlichkeit der Abfertigungen zu gewährleisten. Folglich ist diese Fahrzeuggattung Gegenstand des entwickelten Modells.

Für den Einsatz von Elektromobilität können sowohl zum Antrieb von Fahrzeugen als auch zur Aufladung der Antriebseinheit verschiedene technologische Möglichkeiten angewandt werden. Nach aktuellem Stand bedürfen der Antrieb mittels Wasserstoff und die Verwendung von Induktionsladung weiterer Forschungen, um sich zu einer leistungsfähigen Alternative zu entwickeln. Stattdessen werden elektrische Fahrzeuge an Flughäfen vorwiegend mit Blei-Säure- oder Lithium-Ionen-Batterien angetrieben. Durch die spezifischen Energiedichten und Ladegeschwindigkeiten der Batterien werden beim Einsatz abweichende infrastrukturelle Ausbaumaßnahmen erwartet. Aus diesem Grund bilden diese Batterietypen gesonderte Varianten, die in Kombination mit Normladestationen anhand des Modells untersucht werden. Um die Auswirkungen der Elektrifizierung zu beurteilen, wird ergänzend der Status Quo abgebildet.

Das Modell ist als Planungswerkzeug zu verstehen, das die Disposition und die betrieblichen Abläufe von Gepäckschleppern nachbildet. Die Basis dafür ist die Simulation von flugbezogenen Fahrten, die sich abhängig von einem Flugzeugtyp und dem auftretenden Flugereignis in Anzahl und Zeitdauer unterscheiden. In diesem Zusammenhang werden die Flugereignisse eines Flugplans mit den durchzuführenden Fahrten des jeweiligen Flugzeugtyps kombiniert und die daraus resultierende Eingangstabelle aller Fahrten in das Modell eingespeist. Für ankommende und abfliegende Flugzeuge weichen dabei die Arbeitsschritte einer Fahrt, beispielsweise in der Anzahl zu koppelnder Anhänger, ab. Durch die wechselnden Zuglasten ändern sich die Fahrtzustände und damit auch der Energieverbrauch sowie der Ladezustand der installierten Batterie.

Sobald die Startzeit einer Fahrt der Simulationszeit entspricht, wird sie einem verfügbaren Gepäckschlepper zugeordnet. Die Verfügbarkeit hängt davon ab, ob die Kapazität der Batterie und die Schichtzeit des Fahrers ausreichen, um eine Fahrt durchzuführen. Falls kein Fahrzeug diese Bedingungen erfüllt, wird ein neuer Gepäckschlepper erstellt. Auf diese Weise wird die Anzahl an notwendigen Fahrzeugen für den Untersuchungszeitraum festgestellt. Ladestationen werden zentral an einem Parkplatz errichtet. Folglich können Ladevorgänge nur stattfinden, wenn sich das Fahrzeug auf diesem befindet. In der bestehenden Schichtplanung ergeben sich diese Möglichkeiten während der Pause eines Fahrers, der Schichtübergabe des Fahrzeuges oder dem Abstellen am Tagesende. Abhängig von den gleichzeitig notwendigen Ladevorgängen bestimmt sich die Anzahl an

---

erforderlichen Ladestationen sowie die maximale Anschlussleistung, anhand welcher sich der Ausbau des Stromnetzes orientiert. Um Rückschlüsse auf das Ausmaß des Infrastrukturausbaus zu ziehen, wird der stärkste Tag der Planungswoche mitsamt den Zeiträumen für nächtliche Vollladungen simuliert.

Die Ergebnisse der Simulationsläufe verdeutlichen eine sinnvolle Integration von Ladevorgängen in die bestehenden Abläufe des Gepäcktransports. Der Einsatz von Blei-Säure-Batterien erfordert 91, der von Lithium-Ionen-Batterien 42 Normalladestation, die den flugbezogenen Betrieb ohne Änderung des Fahrzeugbedarfs von 106 Gepäckschleppern aufrechterhalten. Auf wirtschaftlich ungünstige Ladeinfrastruktursysteme, wie Schnelllade- oder Batteriewechselstationen, muss demzufolge nicht zurückgegriffen werden. Zur Stromspeisung der Ladestationen empfiehlt sich für beide Varianten der Zubau einer Blocktrafostation mit Kosten in Höhe von etwa 110.000 € bzw. 120.000 €. Obwohl der Einsatz von Blei-Säure-Batterien mehr Ladestationen erfordert, sind die gesamten Investitionskosten aufgrund der kostenintensiven Lithium-Ionen-Batterie niedriger. Wesentliche Unterschiede bestehen in den voneinander abhängigen Parametern Energieverbrauch, Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Nutzung von Blei-Säure-Batterien ermöglicht eine Reduktion des Verbrauchs um etwa 73 % und eine Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 60 %. Mit dem Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien reduziert sich die notwendige Energiemenge sogar um 86 % gegenüber dem aktuellen Zustand. Daraus resultiert eine jährliche Einsparung der Energiekosten von über 600.000 €. Zusätzlich wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 2.200 t pro Jahr reduziert. Dies entspricht einer Senkung um 80 % gegenüber den im Status Quo ermittelten Emissionen.

Die Varianten wurden mithilfe eines Scoring-Modells bewertet. Die Grundlage dafür bildet ein Zielsystem, das die hohen betrieblichen und infrastrukturellen Ansprüche an eine Flugzeugabfertigung nach Kriterien der vier Oberziele Effizienz, Wirtschaftlichkeit, Umweltschutz und Sicherheit kategorisiert. Dabei wurde bei der Modellentwicklung eine umfassende Ermittlung von Kennwerten für definierte Zielkriterien beachtet, um eine Vergleichbarkeit der Varianten zu ermöglichen. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungen an eine Abfertigung wurden die Oberziele von beteiligten Akteuren gewichtet. Das Ergebnis ist eine übergreifende Empfehlung Lithium-Ionen-Batterien im Gepäcktransport zu nutzen.

Die erfolgreiche Realisierung einer elektrifizierten Gepäckschlepperflotte erfordert weitere Maßnahmen. Von großer Bedeutung ist der Aufbau eines intelligenten Lademanagementsystems, das die Disposition der Gepäckschlepper flexibel gestaltet und die Ladevorgänge am Parkplatz effizient steuert. Dadurch lassen sich der Einsatz von Ressourcen und die Auslastung des Stromnetzes weiter optimieren. Zur Analyse des Stör- und Ausfallrisikos ermöglicht das Modell die Simulation weiterer Szenarien, wie der temperaturabhängigen Veränderung der Batterieeffizienz. Darüber hinaus besteht das Potenzial, weitere Fahrzeuggattungen, insbesondere im Transportbereich, hinsichtlich einer Elektrifizierung zu untersuchen.