

Akustische Evaluierung elektromobiler Schlepptechnologien für Flugzeuge - Der Beitrag von TaxiBot und eSchlepper zur Reduktion von Bodenlärm am Flughafen Frankfurt

Katja Hein¹, Sebastian Baumann²

¹ *Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, TU Darmstadt, E-Mail: hein@fsr.tu-darmstadt.de*

² *Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, TU Darmstadt, E-Mail: baumann@fsr.tu-darmstadt.de*

Einleitung

Neuartige diesel-elektrisch angetriebene Schlepptechnologien, wie der TaxiBot [12] (siehe Abbildung 1) oder der eSchlepper [6] (siehe Abbildung 2), befinden sich momentan am Flughafen Frankfurt im operationellen Testbetrieb und werden hinsichtlich ihrer Einsatztauglichkeit und Wirtschaftlichkeit evaluiert. Diese Konzepte versprechen, Flugzeugbewegungen am Boden effizienter, leiser und schadstoffärmer zu gestalten.

Beim TaxiBot handelt es sich um einen vom Piloten gesteuerten Flugzeugschlepper, der das vollbesetzte und beladene Flugzeug von seiner Abstellposition in die Nähe der Startbahn befördert, ohne dass die Flugzeugtriebwerke zum Antrieb eingesetzt werden müssen. Erst in Startbahnnähe wird der TaxiBot vom Flugzeug abgekoppelt und die Triebwerke angelassen, um diese vor dem Start ausreichend warmlaufen zu lassen. Während des Schleppvorgangs läuft das Hilfstriebwerk (Auxiliary Power Unit, kurz APU) des Flugzeugs, um elektrische und pneumatische Energie an Bord zu gewährleisten [1]. Derzeit ist der TaxiBot für Flugzeuge des Typs Boeing B737 zertifiziert.

Im Gegensatz zum TaxiBot handelt es sich bei dem eSchlepper um ein Fahrzeug für konventionelle Schleppvorgänge. Der eSchlepper kann Langstreckenflugzeuge mit einem Maximum Take Off Weight (MTOW) von bis zu 600 Tonnen über Strecken von bis zu sieben Kilometern bewegen. Sein Einsatzspektrum erstreckt sich vor allem auf Pushbacks, Werftschlepps und Umpositionierungen. Die Energieversorgung des Fahrzeugs erfolgt mittels Lithium-Ionen-Batterien, die bei Bedarf auch während des Betriebs mit Hilfe eines Dieselmotors, des sogenannten Range Extenders, aufgeladen werden können.

Um den akustischen Vorteil der innovativen Technologien gegenüber sich heute im Einsatz befindlichen Dieselschleppern sowie Flugzeugen, die mit Hilfe des Triebwerksschubs rollen, ermitteln zu können, wurden Schallpegelmessungen durchgeführt. Dafür wurden sowohl für den TaxiBot als auch für den eSchlepper repräsentative Einsatzszenarien identifiziert und gegenübergestellt. Da für diese Anwendungsfälle bis jetzt keine standardisierte Vorgehensweise existiert, wurde eine Messmethode auf Basis vergleichbarer Normen (z.B. für Straßenverkehrsgeräusche) entwickelt und an gegebene Rahmenbedingungen und Sicherheitsanforderungen des Flughafens Frankfurt angepasst. Die Messmethode ermöglicht die Ermittlung von Schallimmissionen bei

Vorbeifahrten von konventionell rollenden Flugzeugen und Flugzeugen, die von TaxiBot oder eSchlepper gezogen werden. Erste Messergebnisse zeigen, dass der Einsatz dieser elektromobilen Konzepte einen signifikanten Beitrag dazu leisten kann den Bodenlärm am Flughafen zu reduzieren. In Bezug auf den TaxiBot wird dies insbesondere dadurch erreicht, dass die Triebwerke beim Rollen zur Startbahn ausgeschaltet bleiben.



Abbildung 1: Hybrid-Flugzeugschlepper „TaxiBot“ mit angekoppelter Boeing B737-500. [Quelle: Lufthansa LEOS]

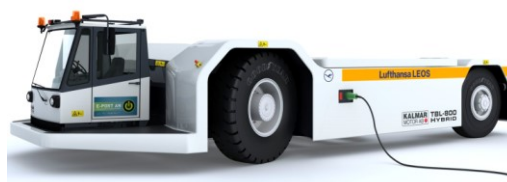


Abbildung 2: Elektro-Flugzeugschlepper "eSchlepper". [Quelle: Lufthansa LEOS]

Rahmenbedingungen der durchgeführten Schallpegelmessungen

Für die Konzeptionierung der Messmethode für Vorbeifahrten wurden Normen zur Messung und Beurteilung von Flug- und Verkehrsgeräuschen [2] - [4] herangezogen und daraus Anforderungen hinsichtlich der Messumgebung, des Hintergrundgeräuschpegels sowie der meteorologischen Bedingungen an die Vergleichsmessungen abgeleitet. Dabei mussten Sicherheitsabstände zu den vorbeifliegenden Flugzeugen berücksichtigt werden.

Die Norm DIN ISO 362-1 [4] schreibt vor, dass keine schallreflektierenden Objekte in der Nähe der Prüfstrecke vorhanden sein dürfen, um weitestgehend Freifeldbedingungen sicherzustellen. Dies wurde in der vorliegenden Messmethode berücksichtigt, indem sich der Messbereich in etwa vier Kilometern Entfernung von allen größeren Terminalgebäuden, am südlichen Ende der Startbahn 18 befand. Die Lage der Prüfstrecke ist in Abbildung 3 zu sehen. Da die Startbahn aus Beton besteht, wurde die Forderung nach einer schallharten Oberfläche eingehalten. Die Messkampagnen fanden während des

Nachtflugverbots statt. Dadurch wurde sichergestellt, dass ein ausreichender Abstand zwischen Nutz- und Störsignal (bzw. Hintergrundgeräuschpegel) von mindestens 15 dB(A) während der Messungen jederzeit eingehalten wurde [2] - [4]. Die meteorologischen Einflüsse, wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit wurden während der Messungen überwacht. Dabei wurden die in den Normen definierten Grenzwerte der Umgebungstemperatur im Bereich von 5 °C bis 25 °C, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30 % bis 80 % sowie Windgeschwindigkeiten kleiner gleich 5 m/s nicht verletzt [3]. Die Normen für Messungen von Vorbeifahrtspegeln [2; 4] setzen zudem einen horizontalen Messabstand von 7,5 m zur Fahrzeuglängsachse fest. Dieser Abstand konnte jedoch nicht realisiert werden, da von Flugzeug- und Triebwerksherstellern Sicherheitsabstände zu den Triebwerken und Flügelspitzen vorgegeben werden, die im Betrieb eingehalten werden müssen. Je nach Flugzeugtyp muss die Messmethode entsprechend angepasst werden.

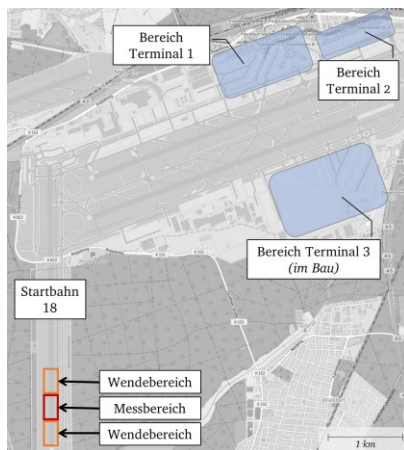


Abbildung 3: Karte des Flughafens Frankfurt am Main und Position des Messbereichs. [Karte: openstreetmap.org]

Messmethode für Vorbeifahrten und Aufbau der Messkette

Die Messmethode für Vorbeifahrten von Flugzeugen des Typs B737-500 bzw. des entsprechenden Flugzeug-TaxiBot-Gespans ist in Abbildung 4 dargestellt. Das Messfenster hat eine Länge von 100 m und eine Breite von 45 m. Dabei entspricht das Längenmaß der dreifachen Länge einer vom TaxiBot geschleppten B737-500. Die Breite des Messfensters ergibt sich aus dem erforderlichen Sicherheitsabstand für die Mikrofonposition. Das Mikrofon befindet sich mittig auf der langen Seite des Messfensters sowie in einer Entfernung von 22,5 m von der Startbahnmittellinie. Es ist in einer Höhe von 1,2 m über der Fahrbahnoberfläche montiert und seine Bezugsachse ist horizontal zur vermessenden Schallquelle und senkrecht zur Startbahnmittellinie ausgerichtet. Die sich bewegende Schallquelle kann durch eine rechteckige Referenzkontur abstrahiert werden. Solange sich die Referenzkontur im definierten Messfenster befindet, erfolgt eine automatisierte Aufzeichnung der Messdaten durch die Verwendung von Infrarot-Lichtschraken, die am Anfang und Ende des Messfensters aufgestellt sind. Darüber hinaus wird vor und hinter dem Messfenster ausreichend Platz zum Wenden, Beschleunigen und Bremsen zur Verfügung gestellt. Dies

ermöglicht es Vorbeifahrten von links nach rechts und umgekehrt zu vermessen.

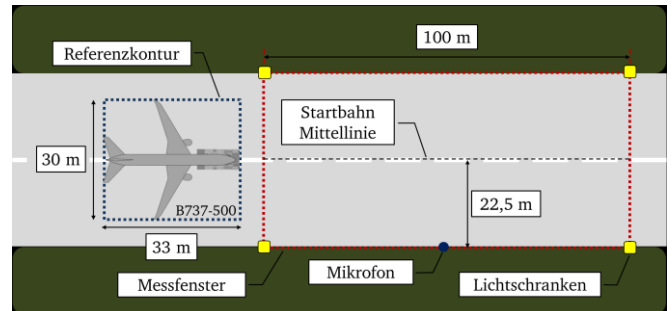


Abbildung 4: Messmethode für die Ermittlung von Vorbeifahrtspegeln für den Vergleich einer mittels Triebwerksschub rollenden B737-500 und einer vom TaxiBot geschleppten B737-500.

Der Pilot wurde instruiert das Messfenster auf der Mittellinie und mit einer konstanten Geschwindigkeit zu durchfahren. Die Geschwindigkeit sollte hierbei typische Rollgeschwindigkeiten von Flugzeugen repräsentieren, die am Flughafen Frankfurt zwischen 17 und 22 Knoten liegen.

Die Messungen zur Bewertung des eSchleppers erfolgten in gleicher Weise. Die Abmessungen des Messfensters sowie der Referenzkontur und der Mikrofonabstand zur Startbahnmittellinie wurden jedoch an die Maße des hierfür verwendeten Flugzeugs (Airbus A380) angepasst. In diesem Fall war es Aufgabe des Schlepperfahrers dafür zu sorgen, dass eine typische Schleppgeschwindigkeit eingehalten wurde.

Als Messsystem wurde das Soundbook der Firma SINUS Messtechnik [11] verwendet. Es handelt sich hierbei um eine in ein Panasonic Toughbook CF-19 integrierte Messkarte. Weiterhin wurde ein Kondensatormikrofon der Genauigkeitsklasse 1 von Microtech Gefell [8] mit einem Durchmesser von 1/2-inch verwendet. Für das Auslösen der Datenaufzeichnungen wurden Infrarot-Lichtschraken verwendet, die jeweils aus einer Sender- (LSS 96M-1350-26) und einer Empfängereinheit (LSE 96M/R-3310-25) von Leuze electronic [7] bestehen. Die Energieversorgung der Messanlage erfolgte mit Hilfe von Lithium-Polymer-Akkus. Die meteorologischen Parameter wurden während der gesamten Messungen mit der Wetterstation Kestrel 4500 von Nielsen-Kellerman [10] überwacht und aufgezeichnet.

Messergebnisse

Um den Einsatz des TaxiBots hinsichtlich seiner akustischen Vorteile bewerten zu können, wurden Vorbeifahrten folgender vier Vergleichskonfigurationen vermessen und einander gegenübergestellt:

- 1) Konventionelles Rollen einer Boeing B737-500 angetrieben vom Triebwerksschub.
- 2) TaxiBot – B737-500 Gespann mit ausgeschalteten Triebwerken und eingeschalteter APU (TaxiBotting), als komplementärer Betriebsfall zur Konfiguration 1.
- 3) TaxiBot – B737-500 Gespann mit eingeschalteten Triebwerken und eingeschalteter APU, um ein Warmlaufen der Triebwerke mit angekoppeltem TaxiBot zu simulieren.

- 4) TaxiBot ohne Flugzeug, um die An- und Abfahrt des TaxiBots abzubilden.

Es erfolgten jeweils vier Durchfahrten der Konfigurationen 1 bis 3 und sechs Durchfahrten mit der Konfiguration 4. Dabei wurden der A- und F-bewertete Maximalschallpegel $L_{AF,max}$, der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ und der A-bewertete Schallleistungspegel L_{AE} ermittelt. Der L_{AE} bezieht sich auf eine Referenzdauer von einer Sekunde und wurde erfasst, um den Einfluss leicht variierender Geschwindigkeiten und Messdauern bei den Vorbeifahrten zu kompensieren.

Die Messergebnisse für die Vorbeifahrten der vier Konfigurationen sind in Abbildung 5 dargestellt. Das Diagramm zeigt den Schalldruckmittelungspegel der drei Bewertungsgrößen und das jeweils zugehörige 90-prozentige Konfidenzintervall (berechnet nach VDI 3723 [13]). Ein unmittelbarer Vergleich der beiden Betriebsfälle „Rollen mit Triebwerksschub“ und „TaxiBotting“, also der Konfigurationen 1 und 2, zeigt, dass das Ausschalten der Triebwerke beim TaxiBotting eine Reduzierung des L_{AE} um 12,7 dB(A), des $L_{AF,max}$ um 16,6 dB(A) und des $L_{A,eq}$ um 13,2 dB(A) bewirkt, obwohl die APU in Betrieb ist. Diese Größenordnungen lassen auf eine signifikante Reduktion der subjektiv empfundenen Lautstärke schließen [9]. Die ermittelten Schalldruckpegel für das TaxiBotting mit laufenden Triebwerken und laufender APU (Konfiguration 3) weisen nur sehr geringe Unterschiede im Vergleich zu den Werten beim Rollen mit Triebwerksschub (Konfiguration 1) auf und bewegen sich im Rahmen der Messunsicherheit. Daraus lässt sich ableiten, dass die Flugzeugtriebwerke als Primärschallquelle maßgeblich zum gemessenen Schalldruckpegel beitragen und die Schallemissionen des TaxiBots unwesentlich sind. Die gemittelten Messwerte der Einzeldurchfahrten des TaxiBots (Konfiguration 4) bestätigen dies. Der Wert für den Schallleistungspegel liegt hier bei 77,7 dB(A) und somit 27,4 dB(A) unter dem des konventionell rollenden Flugzeugs (Konfiguration 1).

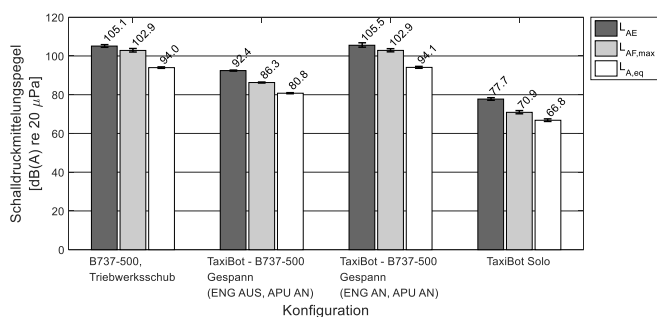


Abbildung 5: Akustische Bewertung des TaxiBots. Messergebnisse für die Vorbeifahrten der vier untersuchten Konfigurationen. Darstellung des Schalldruckmittelungspegels für L_{AE} , $L_{AF,max}$ und $L_{A,eq}$ für alle Durchläufe einer Konfiguration mit 90-prozentigem Konfidenzintervall.

Die akustische Bewertung des eSchleppers erfolgte anhand von Vorbeifahrten der folgenden fünf Vergleichskonfigurationen:

- 1) Gespann aus konventionellem Dieselschlepper (Goldhofer AST 1X [5]) und einer Airbus A380.

- 2) eSchlepper – A380 Gespann (Betrieb im Elektromodus), als komplementärer Betriebsfall zur Konfiguration 1.
3) eSchlepper – A380 Gespann (Betrieb im Dieselmodes), um das Laden der Batterien während eines Schleppvorgangs zu simulieren.
4) AST 1X Schlepper ohne Flugzeug, um die An- und Abfahrt des Dieselschleppers abzubilden.
5) eSchlepper ohne Flugzeug (Betrieb im Elektromodus), um die An- und Abfahrt des Elektroschleppers abzubilden.

Da das Einsatzspektrum des eSchleppers dem eines konventionellen Dieselschleppers entspricht, waren sowohl die Triebwerke als auch die APU der A380 bei allen Vorbeifahrten ausgeschaltet. Die Konfigurationen 1 bis 3 wurden jeweils in drei Durchläufen vermessen, wohingegen Konfigurationen 4 und 5 jeweils vier Mal an dem Mikrofon vorbeifahren. Auch hier wurde bei jedem Durchlauf L_{AE} , $L_{AF,max}$ und $L_{A,eq}$ bestimmt.

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Vorbeifahrtsmessungen. Hierbei spiegelt Konfiguration 1 ein gegenwärtiges Einsatzszenario und Konfiguration 2 ein zukünftiges Einsatzszenario wider. Durch den Einsatz des eSchleppers im Elektromodus beim Schleppen einer A380 (Konfiguration 2) lässt sich eine Reduzierung des L_{AE} um 14,6 dB(A), des $L_{AF,max}$ um 13 dB(A) und des $L_{A,eq}$ um 14,2 dB(A) im Vergleich zum Schleppen mit einem konventionellen Dieselschlepper (Konfiguration 1) erzielen. Wie schon beim TaxiBot entsprechen auch hier die Größenordnungen einer signifikanten Reduktion der subjektiv empfundenen Lautstärke [9]. Springt beim eSchlepper der Diesel-Range Extender an, um die Batterien während des Schleppvorgangs zu laden (Konfiguration 3), so erhöhen sich die Pegel um 1 dB(A) bis 1,8 dB(A) im Vergleich zum Betrieb im Elektromodus (Konfiguration 2). Die beiden Schlepper weisen bei ihren Einzelvorbeifahrten (Konfiguration 4 und 5) durchschnittlich um 6 dB(A) bis 7,5 dB(A) geringere Pegel auf als beim Schleppvorgang (Konfiguration 1 und 2). Dies lässt sich durch den höheren Motorleistungsbedarf beim Schleppen des Flugzeugs erklären.

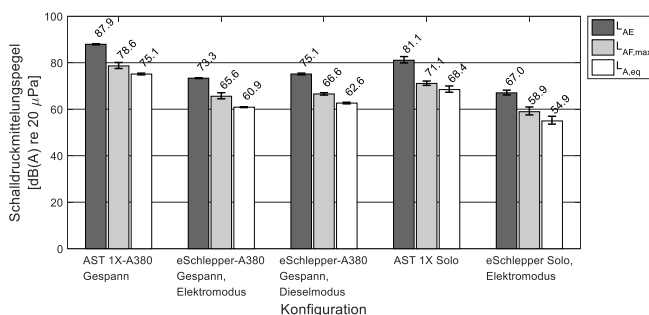


Abbildung 6: Akustische Bewertung des eSchleppers. Messergebnisse für die Vorbeifahrten der fünf untersuchten Konfigurationen. Darstellung des Schalldruckmittelungspegels für L_{AE} , $L_{AF,max}$ und $L_{A,eq}$ für alle Durchläufe einer Konfiguration mit 90-prozentigem Konfidenzintervall.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Manuskript wurden zwei elektromobile Schlepptechnologien für Flugzeuge, der sogenannte TaxiBot und eSchlepper, vorgestellt. Diese Konzepte können einen Beitrag zur Reduktion des Bodenlärms an Flughäfen leisten und befinden sich zurzeit im Testbetrieb am Flughafen Frankfurt. Zur Quantifizierung des Lärmreduzierungspotentials beim operationellen Einsatz dieser neuartigen Technologien gibt es derzeit noch keine standardisierte Vorgehensweise. In den vorliegenden Ausführungen des Manuskripts wurde eine Methode für Messungen von Vorbeifahrten am Flughafen Frankfurt vorgestellt. Diesbezüglich wurden einzuhaltende Rahmenbedingungen zusammengetragen, die verwendete Messkette beschrieben und die entwickelte Messmethode erläutert. Außerdem wurden akustische Vergleichsmessungen von verschiedenen Konfigurationen durchgeführt und die Messergebnisse vorgestellt und diskutiert. Grundsätzlich zeigen sich bei allen Messungen mit elektromobiler Schlepptechnologie Reduzierungen der gemessenen Schallimmissionspegel im Vergleich zu konventionellen Verfahren. Der maßgebliche akustische Vorteil der neuartigen Schlepptechnologien zeigt sich vor allem bei einer Extrapolation auf alle Flugzeughodenbewegungen eines Flughafens. Die aufgenommenen Daten dienen zum Aufbau einer Datenbank und als Basis für die Durchführung von Simulationen zur Schallausbreitung, um Vorhersagen für zukünftige Verkehrsmixe der Flugzeughodenbewegungen an Flughäfen treffen zu können.

Literatur

- [1] Bräunling, W.: Flugzeugtriebwerke. Springer Vieweg, Berlin, 2015
- [2] DIN 45642:2004-06, Messung von Verkehrsgeräuschen
- [3] DIN 45643:2011-02, Messung und Beurteilung von Fluggeräuschen
- [4] DIN ISO 362-1:2009-07, Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch - Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 - Teil 1: Fahrzeuge der Klassen M und N
- [5] Goldhofer AG. Airport Technology. Line of Products 2015, URL: http://www.goldhofer.de/fileadmin/downloads/prospekte/2015-09_PP_Airport_Line_of_Products_en.pdf. [Zuletzt geprüft am 10.03.2016]
- [6] Kalmar Motor AB Homepage, URL: <http://www.kalmarmotor.com/products/tbl-hybrids/>. [Zuletzt geprüft am 10.03.2016]
- [7] Leuze electronic GmbH + Co. KG. LS 96 Throughbeam photoelectric sensors [Online-Ressource]. URL: http://www.leuze.de/selector/ci_pages/downloads.php?supplier_aid=50031651&key=db5d7ad32c7c3f0dc41ba870386a26f929b37dd937770

b274e1da60b349c07b8. [Zuletzt geprüft am 31.03.2016]

- [8] Microtech Gefell GmbH. Kondensator-Messmikrofonkapsel MK 255 mit Dauerpolarisation, URL: http://www.microtechgefell.de/dmdocuments/MK%20255_deu.pdf. [Zuletzt geprüft am 31.03.2016]
- [9] Mommertz, E.: Akustik und Schallschutz. Müller-BBM, München, 2008
- [10] Nielsen-Kellerman Co. Kestrel 4500 Pocket Weather Tracker with Backlight, URL: http://cdn.shopify.com/s/files/1/0084/9012/t/1/assets/K4500_Instruction_Manual_English.pdf. [Zuletzt geprüft am 31.03.2016]
- [11] Sinus Messtechnik GmbH. The 2nd generation of our Soundbook acoustics analyzer - now based on the new 24-bit Apollo™ hardware platform, URL: http://www.soundbook.de/download/Soundbook_MK2E_6xA4.pdf. [Zuletzt geprüft am 31.03.2016]
- [12] TaxiBot. Green. Quiet. Efficient. URL: <http://www.taxibot-international.com/>. [Zuletzt geprüft am 31.03.2016]
- [13] VDI 3723:1993-05. Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschimmissionen