

LÄRMBEDINGTE AUSWIRKUNGEN DES ON-DEMAND-LUFTTAXIBETRIEBS MIT KONVENTIONELLEN KLEINFLUGZEUGEN AN DEUTSCHEN FLUGPLÄTZEN

M. Çakir, Verkehrswissenschaftliches Institut, RWTH Aachen University,
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

Diese Arbeit ermöglicht die Analyse der lärmbedingten Auswirkungen des Lufttaxibetrieb mit Kleinflugzeugen mittels einer iterativen Methodik. Hierzu wurden die aktuellen Fluglärm-Rahmenbedingungen und Vorarbeiten zur Lärmmodellierung des Lufttaxibetriebs berücksichtigt. Das Ziel dieser Untersuchungen war die Ermittlung von Betriebsszenarien für den Lufttaxibetrieb, welche die lärmbedingten Auswirkungen für die Anwohnenden in ein tolerierbares Maß (nach FluLärmG) verringern. Die Ergebnisse zeigen, dass ein dauerhafter Lufttaxibetrieb zu Tageszeiten mit 40-50 Flugbewegungen/h durchgeführt werden kann. Somit ist eine signifikante Grundlage für den Lufttaxibetrieb vorhanden. Um die lärmbedingten Auswirkungen in ein tolerierbares Maß zu bringen, müssen jedoch Nachfrageszenarien und Flugroutennutzungshäufigkeiten verringert und Flugroutendesigns angepasst werden. Die resultierenden Lärmschutzzonen schließen bestehende Wohngebiete ein. Durch die lärmbedingten Auswirkungen des Lufttaxibetriebs entstehen Ansprüche für Wohnungs- und Grundstücksbesitzer auf Erstattungen und Entschädigungen.

1. EINLEITUNG

Die technische Entwicklung von elektrischen und hybriden Vehikeln für den urbanen und regionalen Personentransport in der dritten Raumdimension schreitet kontinuierlich voran. Ein mögliches Betriebsszenario ist die Nutzung von On-Demand Lufttaxidiensten (ODAM) für den regionalen Lufttransport, auch bekannt als Regional Air Mobility (RAM). Hierbei werden Kleinflugzeuge eingesetzt, die auf Abruf schnelle Tür-zu-Tür Reisezeiten auf interregionalen Verbindungen ermöglichen. Eine flächendeckende Einführung des ODA-Betriebsszenarios könnte insbesondere durch Fortschritte in den Bereichen alternativen Antriebe und automatisierte Flugführung ermöglicht werden.

Viele Flugzeugdesignstudien für ODA mit alternativen Antrieben befinden sich in frühen Entwicklungsstadien, sodass der resultierende Fluglärm für diese zukünftigen ODA-Vehikel nicht abschließend bestimmt werden kann. Dementsprechend besteht ein großes Konfliktpotential hinsichtlich der Bevölkerungsakzeptanz und Implementierung des ODA-Betriebs an bestehenden Flugplätzen in Deutschland. Erste Vorarbeiten [1] zeigen, dass die flächendeckende Einführung von ODA mit hohen Verkehrsvolumina die Betriebsbedingungen an kleineren Flugplätzen erheblich verändern wird. Am Beispiel des Flugplatz Augsburg wurde demonstriert, dass zusätzlicher Flugbetrieb die Lärmbelastung im Umfeld der Flugplätze deutlich erhöht. Während ein Nachtflugbetrieb unter aktuellen betrieblichen Rahmenbedingungen nicht als sinnvoll erscheint, ist ein Lufttaxibetrieb in Tageslichtstunden möglich. Die durchgeführten Lärmsimulationen für den Flugplatz Augsburg zeigten, dass das initiale Betriebsszenario frühzeitig von infrastrukturellen Besonderheiten limitiert ist. Somit blieb unbeantwortet, inwieweit lärmbedingte Auswirkungen entstehen, wenn ein Betriebsszenario mit höheren Kapazitäten und an anderen Standorten in Deutschland angewandt wird.

An diesem Punkt setzt diese Arbeit an und entwickelt eine neue, iterative Methodik zur simulativen Ermittlung und Analyse der lärmbedingten Auswirkungen des ODA-Lufttaxibetriebs in Deutschland. Hierfür werden zunächst die relevanten rechtlichen Rahmenbedingungen und Vorarbeiten in einer Literaturrecherche in Kapitel 2 vorgestellt. In Kapitel 3 wird die methodische Vorgehensweise beschrieben, welche für die Lärmsimulationen verwendet wurde. Die Anwendung der Methodik erfolgt in dem folgenden Kapitel 4. In einem abschließenden Kapitel werden die resultierenden, lärmbedingten Auswirkungen erörtert.

2. LITERATURRECHERCHE

Diese Veröffentlichung baut im Kern auf der Vorarbeit zur Lärmmodellierung des Autors auf, welche im Rahmen von Wortmann et al. veröffentlicht wurde. [1]

2.1. Fluglärm Rahmenbedingungen

In Wortmann et al. [1] wurden bereits nationale und lokale Fluglärm-Rahmenbedingungen zusammenfassend dargestellt wie z.B. Luftverkehrsgesetz (LuftVG), Landeplatz-Lärmschutz-Verordnung (LandeplatzLärmschutzV), Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm (FluLärmG) und lokale Bestimmungen des Luftfahrthandbuchs (AIP [2]). Diese Rahmenbedingungen behalten weiterhin ihre Gültigkeit.

Ergänzend hierzu erfolgt eine Einordnung internationaler Fluglärm-Rahmenbedingungen. Im europäischen Raum wurde mit der EU-Umgebungslärmrichtlinie [3] ein gemeinsamer Ansatz zur Minderung der Lärmbelastung der europäischen Bevölkerung geschaffen. Ziel ist die Gewährleistung hoher Gesundheits- und Umweltschutzniveaus und damit die Vorbeugung oder

Verminderung von schädlichen Auswirkungen (inkl. Belästigungen) durch den Umgebungslärm.

Die Europäische Zivilluftfahrt-Konferenz (European Civil Aviation Conference 2016, Doc. 29) [4] definierte L_{den} (den: day, evening, night) und L_{night} als maßgebliche Lärmmetriken, die zur standardisierten Bewertung des Fluglärms genutzt werden sollen. L_{den} und L_{night} sind hierbei gewichtete Mittelwerte der Lärmpegel über den Tag (12 Stunden), den Abend (4 Stunden) und der Nacht (8 Stunden). Lärmereignisse am Abend und in der Nacht werden mit Lärmaufschlägen versehen (Nacht: +10 dB(A), Abend: +5 dB(A)) und für die gewichtete Berechnung der Lärmmetriken L_{den} und L_{night} berücksichtigt. Die ECAC definierte hierfür keine konkreten Lärmgrenzwerte, sondern zielt auf die Vereinheitlichung der Mess- und Berechnungsmethoden in den Mitgliedstaaten ab.

Insbesondere in Flugplatznähe, hat der Fluglärm großen Einfluss auf den Umgebungslärm und somit negative Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesundheit der betroffenen Anwohnenden. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) [5] hat in diesem Zuge Empfehlungen in Bezug auf Lärmgrenzwerte spezifisch für den europäischen Raum ausgesprochen. Nach diesen Empfehlungen sind Lärmpegel von L_{den} größer als 45 dB(A) zu vermeiden, da bei Überschreitungen mit erheblichen Gesundheitsauswirkungen zu rechnen ist. Zusätzlich soll L_{night} 40 dB(A) nicht überschreiten, da hohe Schallpegel bei Nacht Einfluss auf die Schlafqualität und damit auf die Gesundheit der Betroffenen haben.

Die WHO [5] rät auch dazu, geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um die betroffene Bevölkerung vor Fluglärm zu schützen, mit dem Ziel negative Gesundheitsauswirkungen zu vermeiden. Maßnahmen beinhalten z. B. Änderung der Infrastruktur (Öffnung und/oder Schließung von Start- und Landebahnen oder Verlegung von Flugrouten). Diese sollen zu einer Verringerung der Fluglärmbelastung sowie zu einem Rückgang der kognitiven Beeinträchtigung bei Kindern führen. Zusätzlich wird angemerkt, dass die Einhaltung der Lärmempfehlungen L_{den} und L_{night} womöglich nicht ausreicht, um den Fluglärm hinreichend zu bewerten, da nicht alle Auswirkungen auf den Schlaf betrachtet werden. Es fehlt beispielsweise die Berücksichtigung von Effekten des Aufwachens durch Fluglärm, welches maßgeblich durch laute Einzelereignisse entsteht. Daher wird empfohlen, zusätzlich den Maximalpegel $L_{A,max}$ von Lärmereignissen zu berücksichtigen, so dass die tatsächliche Anzahl der lauten Einzelereignisse direkt in die Fluglärmbeurteilung miteinfließt.

Die EU-Drohnenverordnung regelt die Anpassung nationaler Regelungen an die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 [6] über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen (z.B. bei autonomen Lufttaxibetrieb). In dieser Durchführungsverordnung wird u.a. explizit geregelt, dass im Flugbetrieb stets ein angemessener Natur- und Lärmschutz berücksichtigt werden sollte, um

Belästigungen für Mensch und Tier so gering wie möglich zu halten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die maßgebliche Fluglärm-Rahmenbedingung für zukünftige lärmbedingte Auswirkungen des Lufttaxibetriebs in Deutschland weiterhin das FluLärmG bleibt. Letzteres ist gültig für Verkehrsflughäfen oder Verkehrslandeplätzen (>25.000 Flugbewegungen) mit Fluglinien- oder Pauschalreiseverkehr und beschreibt für diese die Notwendigkeit von baulichen Nutzungsbeschränkungen und der Anwendung von Schallschutzmaßnahmen. Für bestehende zivile Flugplätze gelten folgende Grenzwerte nach FluLärmG:

- Tag-Schutzzone I: $L_{A,eq} > 65$ dB(A)
- Tag-Schutzzone II: $L_{A,eq} > 60$ dB(A)
- Nacht-Schutzzone: $L_{A,eq} > 55$ dB(A) oder mehr als 6 Lärmereignisse > 57 dB(A) $L_{A,max}$

Im Vergleich zu den internationalen Fluglärm-Rahmenbedingungen ist somit eine Abweichung in den verwendeten Lärmmetriken zu erkennen. Nach FluLärmG sind in Deutschland der äquivalente Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ ohne zusätzliche Zuschläge für bestimmte Tageszeiten zu verwenden (vgl. L_{den} , L_{night}). Positiv zu erwähnen ist die zusätzliche Berücksichtigung möglicher Aufwachreaktionen, welche sich für die Nacht-Schutzzone in der Lärmmetrik $L_{A,max}$ wiederfindet.

Nach §5 FluLärmG bestehen in Lärmschutzbereichen grundsätzlich Bauverbote für schutzbedürftige Einrichtungen (z.B. Krankenhäuser, Altenheime, Erholungsheime, ...). Weitere Bauverbote in den Tag-Schutzzonen sind für Schulen, Kindergärten und weitere ähnliche in gleichem Maße schutzbedürftige Einrichtungen gültig. In der Tag-Schutzzone I und der Nacht-Schutzzone dürfen keine Wohnungen errichtet werden. Nach §6 dürfen neue Wohnungen in der Tag-Schutzzone II nur errichtet werden, wenn Sie den Schallschutzanforderungen genügen. Letztere beinhalten u.a. bauliche Schallschutztechnik und Belüftungseinrichtungen. Nach §7-§9 des FluLärmG sind Erstattungen für bauliche Schallschutzmaßnahmen und Entschädigungen in Außenbereichen an Eigentümer von bestehenden Wohnungen und Grundstücken in Tag-Schutzzone I und Nacht-Schutzzone zu leisten. Zahlungspflichtig ist hierbei der Flugplatzhalter (§12 FluLärmG).

2.2. Lärmemissionen von (hybrid-) elektrischen Kleinflugzeugen

Wie bereits in Wortmann et al. [1] beschrieben, müssen propellerbetriebene Kleinflugzeuge mit einem MTOM bis 816 kg nach Kapitel 10 des ICAO-Anhang 16 hinsichtlich der Lärmkategorie eingeordnet werden. Das Flugzeugmodell Pipistrel Velis Electro ist weiterhin das erste und einzige vollelektrischbetriebene Propellerflugzeug, welches von der EASA zertifiziert wurde. Ihr Lärmwert für die Zertifizierung liegt 10 dB(A) geringer als für das konventionellbetriebene

Schwestermodell Velis Club. Eine weitere Untersuchung von Riboldi et al. [10] im Jahre 2020 zeigte bereits, dass ein seriell-hybrid angetriebens Kleinflugzeug im Vergleich zum konventionellen Antrieb deutliche Lärmreduktionspotentiale in Flugplatznähe vorweist.

Botti [7] stellte in seinen Untersuchungen zu den Umwelteinflüssen bei der Nutzung von hybrid-elektrischen Flugzeugen im allgemeinen Luftverkehr fest, dass diese neuen Antriebe eine zielführende Möglichkeit zur Reduzierung von Lärm- und Schadstoffemissionen bieten können. Ein möglicher Anwendungsfall ist die Nutzung dieser neuen Flugzeuge im Pilotentraining, welche eine hohe Anzahl an Starts und Landungen erfordert. Um dieses Reduktionspotential zu nutzen sind jedoch laut Botti verschiedene Herausforderungen zu überwinden, wie z.B. in der Batterietechnik (Erhöhung der Energiedichte, Ladevorgang) und die Einhaltung der hohen betrieblichen Sicherheitsstandards im Luftverkehr.

In der Veröffentlichung zu den Herausforderungen und Chancen für lärmverminderte, elektrische Flugzeuge stellte Greenwood et al. [11] zunächst die Wichtigkeit der gesellschaftlichen Akzeptanz dar, um neuartige Betriebsszenarien im urbanen und regionalen Umfeld mit zukünftigen elektrifizierten Flugzeugen zu ermöglichen. Obwohl die Arbeit auf elektrische Vertikalstarter (eVTOLs) fokussiert ist, sind viele lärmtechnischen Erkenntnisse ebenso auf Starrflügelflugzeuge übertragbar. Greenwood et al. beschreibt, dass, aufgrund der neuen technischen Konstruktionsmöglichkeiten mit der Einführung von elektrischen Antrieben, zurzeit eine Vielzahl von Flugzeugkonfigurationen entwickelt werden. Obwohl elektrische Antriebe grundsätzlich leiser als konventionelle Antriebe sind, könnte dies potenziell keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamtlärmemission neuer Flugzeugdesigns nehmen. Letzteres folgt aus der Dominanz des aerodynamisch erzeugten Lärms, welches durch die Rotation der Rotorblätter des Propellers entsteht. Der Hauptlärmeinfluss bei neuen Flugzeugdesigns entsteht somit vorrangig durch die Nutzung von verteilten elektrischen Antrieben (DEP). Diese erzeugen eine komplexe Aerodynamik, bedingt durch neuartige Interaktionen der Systemelemente. Rotorblätter- und Propellerlärm zeigen eine hohe Sensitivität zu Veränderungen in den aerodynamisch-operativen Rahmenbedingungen auf, wodurch eine Veränderung in der Lärmerzeugung resultiert.

Des Weiteren weisen die Autoren explizit darauf hin, dass die erfolgreiche Lärmzertifizierung von Flugzeugen nicht automatisch eine gesellschaftliche Akzeptanz sicherstellen. Am Beispiel der Lärmemissionen durch den konventionellen Helikopterbetrieb wird auf die Vielschichtigkeit der Lärmwahrnehmung der betroffenen Personen hingewiesen, welche u.a. das subjektive Sicherheitsempfinden, die eigene Privatsphäre und den Flugzweck beinhalten.

2.3. Lärmmodellierung des Lufttaxibetriebs

Im Rahmen der Veröffentlichungen von Wortmann et al. [1] wurden bereits Lärmmodellierungen für den Lufttaxibetrieb durchgeführt, welche hier zusammenfassend dargestellt werden.

Zunächst erfolgte anhand einer Clusteranalyse von 11 Flugplätzen in Deutschland die Vorauswahl eines relevanten Flugplatzes für die detailliertere Untersuchung. Hierbei wurde der Flugplatz Augsburg als Repräsentant der Flugplätze aus dem Cluster der Ein-Bahn-Systeme ausgewählt. Zur Vordimensionierung des Lufttaxi-Betriebsszenarios wurde eine analytische Kapazitätsbetrachtung durchgeführt, um die luftseitige, theoretische Kapazität am Flugplatz Augsburg zu ermitteln. Hierbei wurde ausschließlich der reine Lufttaxibetrieb unter Sichtflugbedingungen (VFR) betrachtet. Das Ergebnis der Kapazitätsanalyse zeigte, dass die Gesamtkapazität von 40 Flugbewegungen pro Stunde für den Lufttaxibetrieb auf die begrenzten Vorfeldkapazitäten zurückzuführen sind. Letztere folgt durch die Verfügbarkeit von acht kompatiblen Standplätzen und einer Umkehrzeit von 24 Minuten für Kleinflugzeuge im Lufttaxibetrieb.

Für die Kapazitätsanalyse wurde eine Vordesignstudie eines Kleinflugzeugs mit seriell-hybridem Antriebsstrang verwendet, welches auf dem einmotorigen Propellerflugzeug Cirrus SR22T basiert. Die Designstudie wurde am Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme (ILR) der RWTH Aachen University mittels der Software Multidisciplinary Integrated Conceptual Aircraft Design and Optimization (MICADO) für Kleinflugzeuge entwickelt [1], [15]. Weitere Informationen zu der verwendeten Vordesignstudie des Kleinflugzeugs ist in weiteren Veröffentlichungen [13], [12], [14] verfügbar.

Für die Lärmsimulationen wurde die Software Aviation Environmental Design Tool (AEDT) verwendet. Zur Erstellung einer möglichst realistischen Modellumgebung wurden lokale, standardisierte VFR-Flugrouten von der Start- und Landebahn zu den Pflichtmeldepunkten definiert. Dies erfolgte anhand der im AIP enthaltenen Informationen (z.B. Höhenrestriktion von 3000 ft über N.N.) beziehungsweise der Verwendung der Standard-Platzrunde. Außerdem wurde ein Lärmrezeptorgitter für den Flugplatz Augsburg erstellt. Für den Lufttaxibetrieb wurde das konventionelle Referenzflugzeug Cirrus SR22T ausgewählt, da keine Lärmquellmodelle der Vordesignstudie vorlagen. Dies ist eine konservative Vorgehensweise, da angenommen wird, dass neue Flugzeuge mit elektrischen Antrieben Lärmreduktionspotentiale in Flugplatznähe aufweisen können. AEDT enthält Standardabflugprofile und Noise-Power-Distance Tabellen („COMSEP“) für das Referenzflugzeug, welche für die Lärmsimulationen genutzt wurden.

Das Ziel bei der Definition der Betriebsszenarien war es eine erste Aussage zu den Umweltbelastungen zu ermöglichen, die durch den Lufttaxibetrieb entstehen. Hierzu wurden die folgenden vier Betriebsszenarien entwickelt, welche die Lärmgrenzwerte nach FluLärmG als maßgebliche Rahmenbedingung berücksichtigen (siehe Kapitel 2.1):

- Anflüge über alle vier Anflugrouten ($L_{A,max}$)
- Abflüge über alle fünf Abflugrouten ($L_{A,max}$)
- Dauerbetrieb in Betriebsrichtung RWY07, Nutzung von je zwei Anflug- und Abflugrouten ($L_{A,eq}$)
- Dauerbetrieb in Betriebsrichtung RWY25, Nutzung

von zwei Anflugrouten und drei Abflugrouten ($L_{A,eq}$)

Anschließend wurden AEDT-Lärmsimulationen für diese Betriebsszenarien durchgeführt und die Lärmschutzzonen anhand des ECAC Doc.29 ausgewertet, um eine erste Einschätzung des erwarteten Umgebungslärms zu ermöglichen.

Für den Flugplatz Augsburg lieferten die Lärmsimulationen das Ergebnis, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen keine lärmbedingten Kapazitätsbeschränkungen zu Tageszeiten (6-22 Uhr) ersichtlich sind. Aus Lärmschutzgründen ist während der Nachtzeiten (22-6 Uhr) kein durchgängiger Flugbetrieb möglich. Letzteres folgt daraus, dass jeder Überflug des Lufttaxi einen signifikanten Lärmabdruck erzeugt ($L_{A,max} > 57 \text{ dB(A)}$). Hierdurch enthält die Nacht-Schutzzone eine erhebliche Anzahl an Anwohnenden und schutzbedürftige Einrichtungen, was jedoch sinngemäß nicht den Einschränkungen zum Schutz der Bevölkerung nach FlulärmG entsprechen. Des Weiteren wäre der Flugplatzhalter verpflichtet erhebliche Aufwendungen für Erstattung und Entschädigungen zu leisten.

Die Tag-Schutzzone für die Betriebsszenarien im durchgängigen Betrieb erzeugen $L_{A,eq}$ -Isochronen, die nur geringfügig über das Flugplatzgelände hinausgehen. Die Tag-Schutzzone II enthält keine schutzbedürftigen Einrichtungen, aber vereinzelt Wohnhäuser. Letztere befinden sich nah an der Start- und Landebahn des Flugplatzes, sodass auch bei weiterer Verringerung der Nachfrageszenarien keine deutliche Verbesserung der Lärmauswirkungen für die Wohnhäuser ersichtlich ist. Aus diesem Grund ist die Nutzung des Flugplatzes Augsburg mit dem gegebenen Betriebsszenario von 40 Flugbewegungen pro Stunde möglich, wenn in den eingeschlossenen Wohngebieten der Tag-Schutzzone II passive Schallschutzmaßnahmen eingeführt werden. Hierdurch ist mit 40 Flugbewegungen pro Stunde eine signifikante Basis für zukünftige Lufttaxianwendung am Flugplatz Augsburg gegeben.

Die Untersuchungen zeigten auch, dass der Flugplatz Augsburg frühzeitig von infrastrukturellen Kapazitätsrestriktionen eingeschränkt wird. Es bleibt ungeklärt, inwieweit lärmbedingte Auswirkungen durch den Lufttaxibetrieb entstehen, wenn ein Nachfrageszenario mit höheren Kapazitäten simuliert wird. Zusätzlich ist die Betrachtung von Flugplätzen mit dichter Besiedlung in unmittelbarer Flugplatznähe sinnvoll, wodurch lärmbedingte Auswirkungen durch den Lufttaxibetrieb verschärft werden könnten. An dieser Stelle setzt diese Arbeit an und soll eine tiefergehende Analyse der lärmbedingten Auswirkungen des Lufttaxibetriebs an weiteren deutschen Flugplätzen ermöglichen.

3. METHODIK

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine iterative Methodik entwickelt, um die lärmbedingten Auswirkungen des On-Demand-Lufttaxibetriebs mit konventionellen Kleinflugzeugen an deutschen Flugplätzen zu bestimmen. Die Methodik besteht aus insgesamt fünf Teilschritten, wobei der Zusammenhang dieser Schritte im BILD 13 im Anhang A dargestellt ist. Das Ziel bei der Verwendung

dieser Methodik ist die Ermittlung eines Betriebsszenarios für den Lufttaxibetrieb, welches die lärmbedingten Auswirkungen für die Anwohnenden in ein tolerierbares Maß verringert. Hierbei wird angenommen, dass das tolerierbare Maß den Lärmschutzzonen des FlulärmG entspricht.

Die AEDT-Modellerstellung basiert auf der bereits in Kapitel 2.3 beschriebenen Vorgehensweise [1] und wird auf die Flugplätze Sylt und Egelsbach übertragen. Eine Begründung zur Auswahl dieser beiden Flugplätze für die weiteren Untersuchungen ist in den Unterkapiteln zu den Lärmsimulationen enthalten (siehe Kapitel 4.2 und 4.3). Letztere enthalten ebenfalls die Anwendung der Vorgehensweise der Kapazitätsanalyse aus Kapitel 2.3, welche als Basis für die Definition der initialen Nachfrageszenarien der beiden Flugplätze genutzt werden. Für die AEDT-Modelle der Flugplätze wurden ebenfalls standardisierte VFR-Flugrouten und individuelle Lärmrezeptorgittern definiert.

Die AEDT-Lärmsimulationen erfolgen anhand der initialen Betriebsszenarien. Die Vorgehensweise entspricht im Kern der Beschreibungen aus Kapitel 2.3. Dementsprechend werden Betriebsszenarien für die Ermittlung der Lärmschutzbereiche nach FlulärmG entwickelt. Abweichend aus den Vorarbeiten erfolgt die Verwendung nur eines Betriebsszenarios zur Ermittlung der $L_{A,max}$ -Bereiche. Dies ist begründet damit, dass in der Abflugphase ein größerer und somit kritischerer Lärmabdruck entsteht als in der Landephase. Zwei weitere Betriebsszenarien werden für die Auswertung der äquivalenten Dauerschallpegel definiert. Für jede Betriebsrichtung wird der Dauerbetrieb des Lufttaxi mit gleichmäßiger Verteilung aller Starts und Landung auf die vorhandenen Flugrouten definiert.

Die Auswertung der Lärmbelastungen erfolgt anhand der im FlulärmG definierten Grenzwerte für die Lärmschutzbereiche. Die Ermittlung letzterer erfolgt anhand des ECAC Doc. 29. Zur Überprüfung, ob das Eingangs definierte Ziel eingehalten wird, erfolgt die Detailauswertung mittels der Geoinformationssoftware QGIS, womit die finalen Lärmkartierungen mittels aktueller Einwohnerdaten (Zensus 2022 [8]) und schutzbedürftigen Einrichtungen (OpenStreetMaps.org [9]; siehe TAB 1, TAB 2, TAB 3 im Anhang A) erstellt werden.

Die Lärmsimulationen erfolgen als iterativer Prozess. Falls aus den Auswertungen der initialen Lärmsimulation resultiert, dass die ermittelten Schutzzone nicht sinngemäß den aktuellen Regularien entsprechen, dann werden die Lärmauswirkungen durch den Lufttaxibetrieb iterativ verringert. Folgende Maßnahmen zur Verringerung der Lärmauswirkungen auf die Umwelt werden hierbei berücksichtigt:

- Verringerung des Nachfrageszenarios
- Anpassung der Flugrouthenutzung
- Anpassungen des Flugrouthendesigns

Es folgen so viele Iterationen, bis eine finale Lärmsimulation für jeden Flugplatz erstellt wird, welche die lärmbedingten Auswirkungen für die Bevölkerung in ein tolerierbares Maß nach FlulärmG verringern und somit das definierte Ziel erreicht wird.

4. LÄRMSIMULATION LUFTTAXIBETRIEB

Die in Kapitel 3 beschriebene iterative Methodik wird in diesem Kapitel anhand von drei deutschen Flugplätzen angewendet, um die lärmbedingten Auswirkungen des Lufttaxibetriebs zu ermitteln. Die Begründung zur Flugplatzauswahl erfolgt in den jeweiligen Unterkapiteln.

4.1. Flugplatz Augsburg

Der Flugplatz Augsburg wurde bereits in den Vorarbeiten siehe [1] untersucht und die Ergebnisse in Kapitel 2.3 zusammenfassend dargestellt. Trotzdem erfolgt die Anwendung der neuen Methodik für diesen Flugplatz, da die Auswertungsmethodik aktualisierte Daten zur Einwohnerstruktur und schutzbedürftiger Einrichtungen nutzt (siehe Kapitel 3). Das initiale Nachfrageszenario beträgt 40 Flugbewegungen pro Stunde im Mischbetrieb. Die initialen Lärmsimulation zeigen, dass keine Iteration notwendig ist, da die lärmbedingten Auswirkungen für die Anwohnenden durch den Lufttaxibetrieb als tolerierbar eingeschätzt werden. Somit entsprechen die initialen Lärmsimulationen bereits den finalen Lärmsimulationen (siehe BILD 1, BILD 2 und BILD 3).

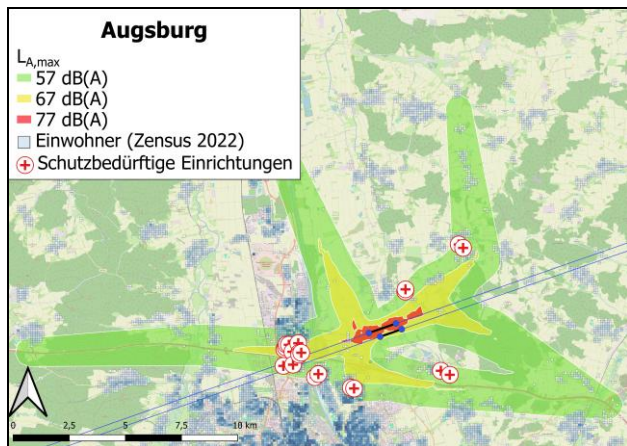


BILD 1. Finale Lärmsimulation, $L_{A,max}$ – Flugplatz Augsburg Abflüge RWY07/25

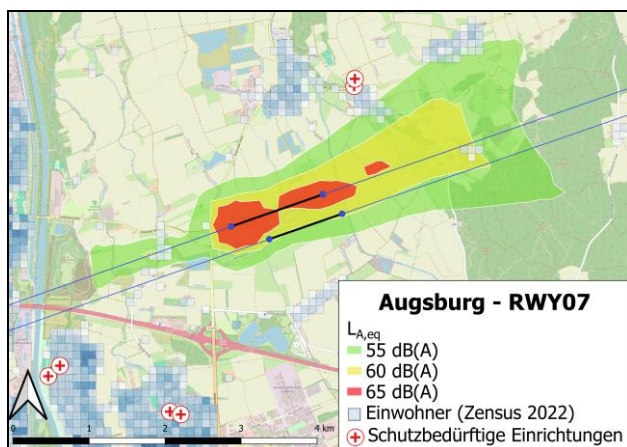


BILD 2. Finale Lärmsimulation, $L_{A,eq}$ – Flugplatz Augsburg RWY07

Die Ergebnisse des $L_{A,max}$ -Betriebsszenarios (BILD 1) zeigen, dass die 57 dB(A) Isochrone, welche maßgeblich für die Nacht-Schutzzone ist, immense Ausmaße hat. Diese grünmarkierte Zone enthält zahlreiche schutzbedürftige Einrichtungen sowie Wohnhäuser. Somit ist aus Lärmschutzgründen weiterhin kein durchgängiger Lufttaxibetrieb während der Nachtzeiten (22-6 Uhr) möglich.

Die Ergebnisse der $L_{A,eq}$ -Betriebsszenarien zeigen, dass weiterhin keine schutzbedürftigen Einrichtungen und nur eine geringe Anzahl an Anwohnenden in den Lärmschutzbereichen enthalten sind (siehe BILD 2 und BILD 3). Anhand der Verwendung aktualisierter Einwohnerdaten ist nun die Quantifizierung der betroffenen Einwohner möglich. Die Tag-Schutzzone II schließt nur einige wenige Wohnhäuser in jeweils beiden Betriebsrichtungen ein. Letztere befinden sich östlich der Startbahn RWY07 in der Gemeinde Miederig-Affing (29 Einwohnende, siehe BILD 2), sowie westlich des Flugplatzes zwischen der Startbahn RWY25 und dem Augsburger Müllberg (41 Einwohnende, siehe BILD 3).

Im Vergleich zu den in Kapitel 2.3 beschriebenen Vorarbeiten ist erkennbar, dass sich insgesamt 5 Einwohnende in der Tag-Schutzzone I befinden. Diese befinden sich in unmittelbarer Nähe zur Start- und Landebahn, wodurch auch bei Anwendung der in Kapitel 3 beschriebenen weiteren Maßnahmen zur Verringerung der Lärmauswirkungen keine deutliche Verbesserung der Lärmauswirkungen ersichtlich ist. Somit wird die Nutzung des Flugplatzes Augsburg mit dem gegebenen Lufttaxi Nachfrageszenario von 40 Flugbewegungen pro Stunde hinsichtlich der Lärmauswirkungen als tolerierbar eingeschätzt, wenn folgende Lärmschutzmaßnahmen nach FluLärmG angewendet werden:

- Erstattung von passiven Schallschutzmaßnahmen für Einwohnende in der Tag-Schutzzone I
- Freiwillige Erstattung von passiven Schallschutzmaßnahmen für Einwohnende in der Tag-Schutzzone II
- Entschädigungen für Grundstücksbesitzer in den Tag-Schutzzonen I & II

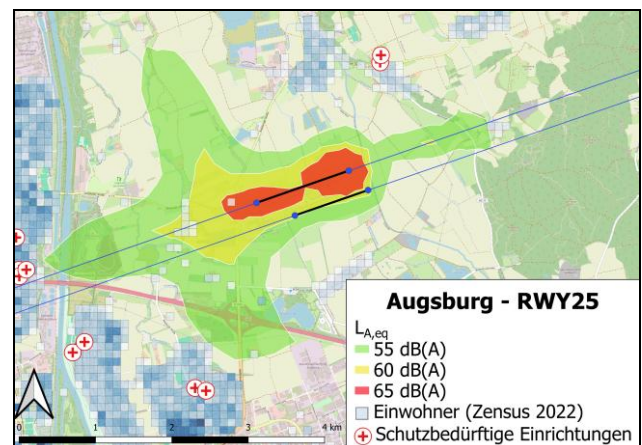


BILD 3. Finale Lärmsimulation, $L_{A,eq}$ – Flugplatz Augsburg RWY25

4.2. Flugplatz Sylt

Der Flugplatz Sylt wurde ausgewählt, da dieser dem Repräsentanten der Flugplätze aus der Clusteranalyse der Mehr-Bahn-Systeme entspricht [1]. Das initiale Nachfrageszenario für den Lufttaxibetrieb mit 82 Flugbewegungen pro Stunde ergibt sich aus der vorab durchgeführten analytischen Kapazitätsbetrachtung. Der Flugplatz Sylt bietet eine hohe Anzahl von ca. 60 nutzbaren Stellplätzen für den Lufttaxibetrieb („Vorfeld 2“, siehe AIP [2]). Durch eine konfliktfreie Rollbahnkonfiguration ist ebenfalls eine hohe Kapazität für dieses Teilsystem gegeben. Die Gesamtkapazität des Flugplatzes ist dementsprechend durch die Start- und Landebahnpkapazität begrenzt. Das Betriebskonzept des Kreuzbahnsystems mit der höchsten Kapazität für den Lufttaxibetrieb wird bei Nutzung der Betriebsrichtung RWY32 mit verkürzter Landestrecke erreicht (siehe AIP [2]). Hierbei wird die Querwindbahn RWY24 für den Rollvorgang zum Vorfeld genutzt. Die Bahnbelegungszeit für einen Start- und Landevorgang beläuft sich auf insgesamt 85,8 s (34,1s Start, 51,7s Landung), wodurch sich die für das initiale Nachfrageszenario verwendete Kapazität von 82 Flugbewegungen pro Stunde ergibt. Weitere Informationen zur Kapazitätsanalyse ist in Wortmann et al. enthalten [1].

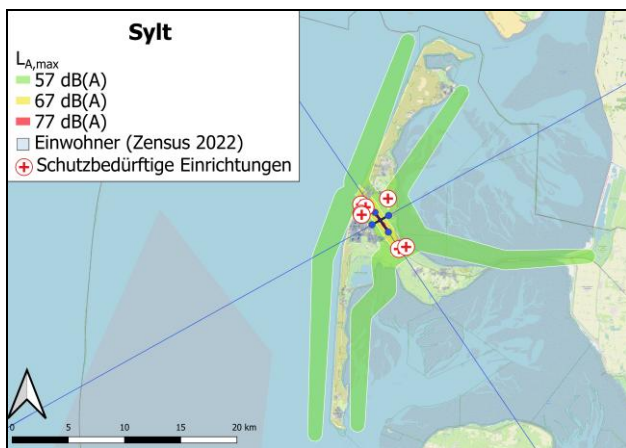


BILD 4. Initiale Lärmsimulation, $L_{A,max}$ – Flugplatz Sylt Abflüge RWY14/32

Ähnlich wie für den Flugplatz Augsburg, zeigt auch die Auswertung der initialen Lärmsimulationen am Flugplatz Sylt, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen kein durchgängiger Nachtflugbetrieb (22-6 Uhr) möglich ist, da zahlreiche schutzbedürftige Einrichtungen sowie Wohnhäuser in der Nacht-Schutzzone enthalten sind (siehe BILD 4). Die Ergebnisse der initialen Lärmsimulation zu den $L_{A,eq}$ -Betriebszenarien sind in BILD 5 und BILD 6 dargestellt. Es ist erkennbar, dass bei einem durchgängigen Lufttaxibetrieb ein signifikanter Lärmabdruck erzeugt wird. Die Tag-Schutzzone I (rotmarkierte Flächen) schließt in beide Betriebsrichtungen die unmittelbare Verlängerung der Start- und Landebahn ein, wobei keine Wohnhäuser oder schutzbedürftige Einrichtungen enthalten sind. Die Tag-Schutzzone II enthält hingegen große Teile bewohnter Gebiete der Insel Sylt. Durch den RWY14/32 Betrieb werden 60 dB(A) $L_{A,eq}$ -Isochronen erzeugt (gelbmarkierte Flächen), welches die Ortschaften Keitum im Süden und

Wenningstedt im Norden sowie teilweise den Ortsteil Westerland einschließen. Nicht akzeptabel ist zusätzlich, dass sich besonders schutzbedürftige Einrichtungen in der Tag-Schutzzone II in beide Betriebsrichtungen befinden (siehe BILD 5 und BILD 6). Aus diesen Gründen genügt das initiale Betriebsszenario nicht sinngemäß den Einschränkungen zum Schutz der Bevölkerung nach FluLärmG. Des Weiteren wäre der Flugplatzhalter nach FluLärmG verpflichtet erhebliche Aufwendungen für Erstattung und Entschädigungen zu leisten.

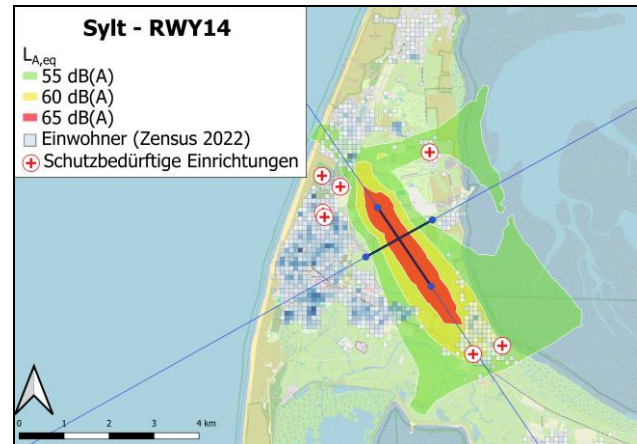


BILD 5. Initiale Lärmsimulation, $L_{A,eq}$ – Flugplatz Sylt RWY14

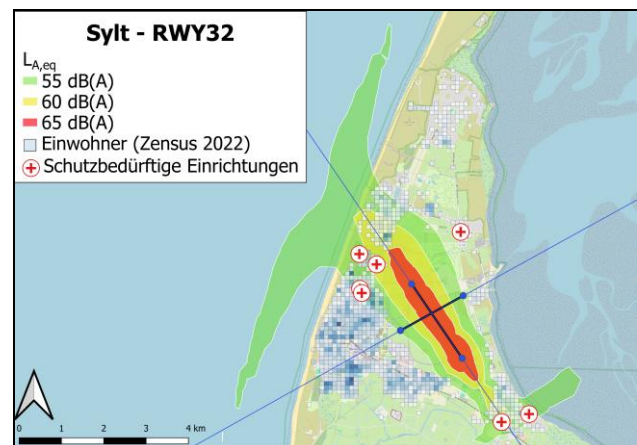


BILD 6. Initiale Lärmsimulation, $L_{A,eq}$ – Flugplatz Sylt RWY32

Aus diesen Gründen folgt in einem nächsten Schritt die Iteration der Lärmsimulation, wobei folgende Veränderungen in den Betriebsszenarien durchgeführt werden:

- Anpassung Häufigkeit der Flugroutennutzung:
 - RWY14 Landung nur über drei Routen (Sierra, Echo und Lima)
- Anpassung Flugroutendesign:
 - RWY14 alle Starts um 15° Richtung Westen versetzt
 - RWY32 alle Starts um 15° Richtung Osten versetzt
- Verringerung der Nachfrageszenarien:
 - 48 Flugbewegungen pro Stunde in beide Betriebsrichtungen

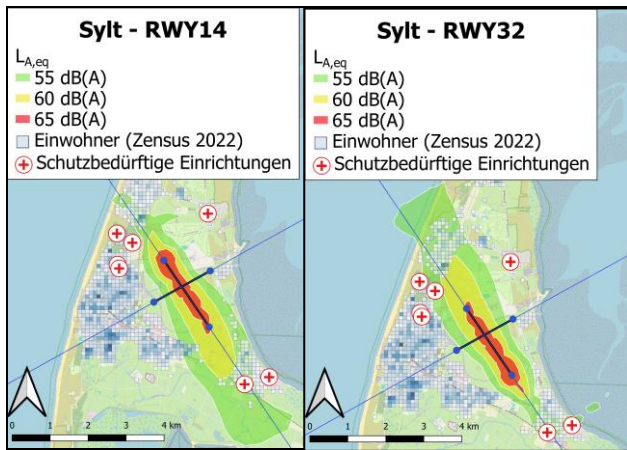


BILD 7. Finale Lärmsimulationen, $L_{A,eq}$ – Flugplatz Sylt RWY14 (links), RWY32 (rechts)

Die Ergebnisse der finalen Lärmsimulation zu den $L_{A,eq}$ -Betriebsszenarien sind in BILD 7 dargestellt. Durch die Anpassungen konnten die resultierenden Lärmschutzzonen drastisch verringert werden. Die Tag-Schutzzone I ($L_{A,eq} > 65 \text{ dB(A)}$) konnte fast vollständig auf das Flugplatzgelände reduziert werden, sodass weiterhin keine schutzbedürftigen Einrichtungen oder Wohnhäuser in dieser Schutzzone enthalten sind. Die Tag-Schutzzone II enthält keine schutzbedürftigen Einrichtungen mehr und die Anzahl an Wohnhäusern innerhalb dieser Schutzzone konnte stark reduziert werden. Letztere enthalten insgesamt 269 Einwohnende, wovon sich der Großteil im südlichen Bereich von Wenningstedt befinden. Aufgrund der Nähe dieser Wohnhäuser zur Start- und Landebahn am Flugplatz Sylt, ist auch bei Anwendung weiterer Lärmschutzmaßnahmen keine deutliche Verbesserung der Lärmauswirkungen ersichtlich. Im Vergleich zur initialen Lärmsimulation sind jedoch keine Wohnhäuser in Westerland in der Tag-Schutzzone II enthalten.

Die angepassten Flugrouten verändern auch geringfügig die 57 dB(A) $L_{A,max}$ -Isochrone, wobei weiterhin eine hohe Anzahl an Wohngebieten mit einem signifikanten Lärmabdruck überflogen werden (siehe BILD 14 im Anhang A). Dementsprechend verbleibt die Einschätzung, dass am Flugplatz Sylt kein Betriebsszenario für den Nachtflug ersichtlich ist. Alles in allem kann mit den angepassten Rahmenbedingungen der Flugplatz Sylt für den Lufttaxibetrieb an Tagesstunden mit 48 Flugbewegungen pro Stunde genutzt werden. Der Betrieb wird hinsichtlich der Lärmauswirkungen als tolerierbar eingeschätzt, wenn folgende Lärmschutzmaßnahmen nach FlulärmG angewendet werden:

- Freiwillige Erstattung von passiven Schallschutzmaßnahmen für Einwohnende in der Tag-Schutzzone II
- Entschädigungen für Grundstücksbesitzer in den Tag-Schutzzonen I & II

4.3. Flugplatz Egelsbach

Der Flugplatz Egelsbach ist der verkehrsreichste Flugplatz der allgemeinen Luftfahrt Deutschlands. Aufgrund dieser besonderen Wichtigkeit für die allgemeine Luftfahrt und der zahlreichen Luftraumbeschränkungen (siehe AIP [2])

bei dichter Bebauung wurde der Flugplatz Egelsbach für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit ausgewählt.

Für den Flugplatz Egelsbach wurde eine analytische Kapazitätsbetrachtung durchgeführt, welche ein initiales Nachfrageszenario von 70 Flugbewegungen pro Stunde ergab. Der Flugplatz bietet mit insgesamt 28 Standplätzen für den Lufttaxiverkehr eine hohe Vorfeldkapazität. Die Start- und Landebahnpkapazität für RWY26 bei einem reinen Lufttaxibetrieb beträgt ca. 103 Flugbewegungen pro Stunde, welche aus der Bahnbelegungszeit von insgesamt 67,1 s (30,8 s Start, 36,3 s Landung) für einen Start- und Landevorgang folgt. Eine qualitative Bewertung der Zu- und Abrollwege am Flugplatz Egelsbach zeigt, dass diese der limitierenden Kapazitätsfaktor für das Gesamtsystem sind. Die zu nutzenden Vorfeldflächen 1 und 2 befinden sich mittig des Flugplatzes und nördlich des parallelen Rollwegs A. In den geplanten Betriebsszenarien soll eine Nutzung der Vorfelder mit einer möglichst hohen Kapazität in eine Betriebsrichtung erfolgen. Am Flugplatz Egelsbach folgt daraus, dass sehr viel Flugbetrieb punktuell im Abschnitt auf dem parallelen Rollweg A, zwischen den Rollwegen D und C erfolgen muss. Bei großen Nachfrageszenarien wird angenommen, dass Rollwegkonflikte, lange Warteschlangen und folglich Verspätungen entstehen können.

Aus diesen Gründen wird eine reduzierte Start- und Landebahnpkapazität von 70 Flugzeugbewegungen pro Stunde als realistischeres, initiales Nachfrageszenario festgelegt. Eine Abschätzung in dieser Höhe ist methodisch möglich, da das Ziel dieser Arbeit ist, ein angemessenes Nachfrageszenario als Eingangsparameter für die Lärmsimulationen zu ermitteln. Falls sich in der Auswertung der Lärmbelastungen herausstellt, dass dieses Nachfrageszenario zu konservativ abgeschätzt wurde und keine lärmbedingten Kapazitätseinschränkungen verursacht werden, soll das Nachfrageszenario iterativ erhöht werden.

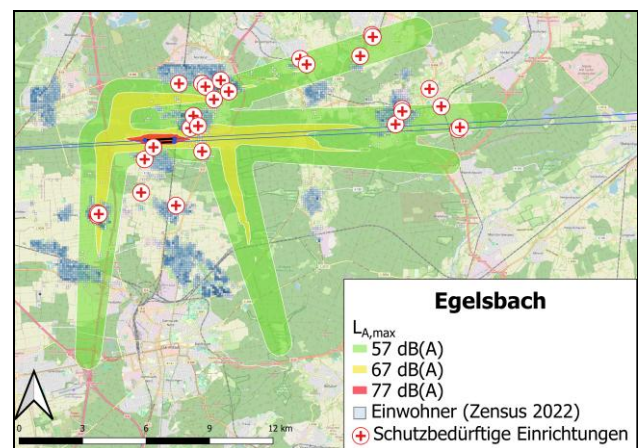


BILD 8. Initiale Lärmsimulation, $L_{A,max}$ – Flugplatz Egelsbach Abflüge RWY08/26

Die Ergebnisse der initialen Lärmsimulation zeigen auch am Flugplatz Egelsbach, dass kein Betriebsszenario für den Lufttaxiverkehr zu Nachtstunden (22-6 Uhr) ersichtlich ist. Wie auch in den Lärmsimulationen in Kapitel 4.1 und 4.2 beschrieben, ist dies am Flugplatz Egelsbach bedingt durch den signifikanten Lärmabdruck, welcher bei jedem Überflug am Boden erzeugt wird (siehe BILD 8). Somit

enthält die Nacht-Schutzzone zahlreiche schutzbedürftige Einrichtungen und Wohnhäuser.

Die Ergebnisse der initialen Lärmsimulation zu den $L_{A,eq}$ -Betriebsszenarien sind in BILD 9 und BILD 10 dargestellt. Ein signifikanter Lärmabdruck hinsichtlich des äquivalenten Dauerschallpegels $L_{A,eq}$ in Flugplatznähe wird erzeugt. Auffällig ist, dass in Betriebsrichtung RWY08 die Tag-Schutzzone I ($L_{A,eq} > 65 \text{ dB(A)}$) am Flugplatz Egelsbach bereits zahlreiche Wohnhäuser im Egelsbacher Industriegelände eingeschlossen werden (siehe BILD 9). Des Weiteren enthält auch die Tag-Schutzzone II ($L_{A,eq} > 60 \text{ dB(A)}$) einen großen Teil des südlichen Egelsbachs, inkl. besonders schutzbedürftigen Einrichtungen und zusätzlich vereinzelt Wohnhäuser in Erzhausen (siehe BILD 9 und BILD 10).

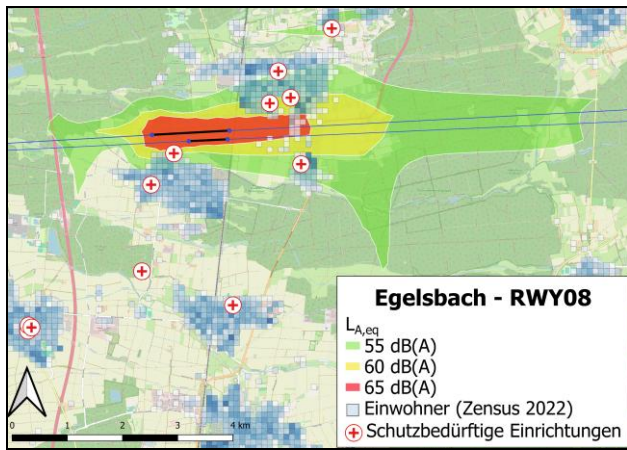


BILD 9. Initiale Lärmsimulation, $L_{A,eq}$ – Flugplatz Egelsbach RWY08

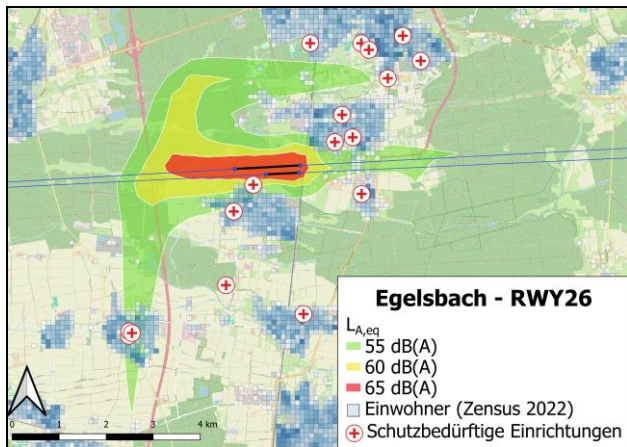


BILD 10. Initiale Lärmsimulation, $L_{A,eq}$ – Flugplatz Egelsbach RWY26

Aus diesen Gründen genügt das initiale Betriebsszenario nicht sinngemäß den Einschränkungen zum Schutz der Bevölkerung nach FluLärmG. Des Weiteren wäre der Flugplatzhalter verpflichtet erhebliche Aufwendungen für Erstattung und Entschädigungen zu leisten. Somit wird in einem nächsten Schritt die Lärmsimulation iteriert, um die Lärmauswirkungen des Flugbetriebs zu verringern. Hierbei wurden folgende Veränderungen durchgeführt:

- Anpassung Häufigkeit der Flugroutennutzung:
 - RWY 26 Start (Kilo, Echo, Yankee)
- Anpassung Flugroutendesign:
 - RWY08 alle Starts um 10° Richtung Süden versetzt
- Verringerung der Nachfrageszenarien:
 - 50 Flugbewegungen pro Stunde in beide Betriebsrichtungen

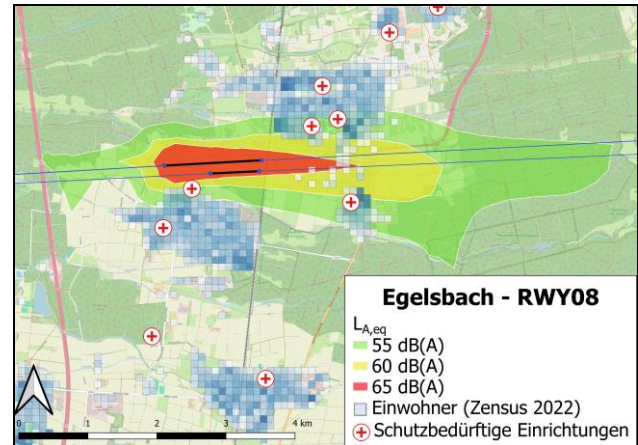


BILD 11. Finale Lärmsimulation, $L_{A,eq}$ – Flugplatz Egelsbach RWY08

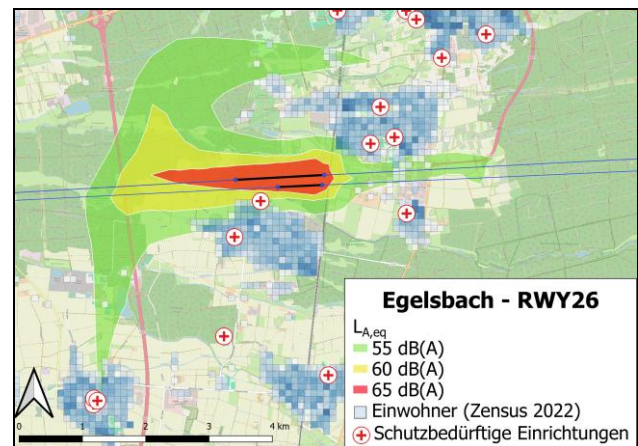


BILD 12. Finale Lärmsimulation, $L_{A,eq}$ – Flugplatz Egelsbach RWY26

Für das $L_{A,max}$ -Betriebsszenario sind nur geringfügige Veränderungen erkennbar (siehe BILD 15 im Anhang A), womit weiterhin kein Betriebsszenario für den Nachtflug am Flugplatz Egelsbach ersichtlich ist. Die Ergebnisse der finalen Lärmsimulation zu den $L_{A,eq}$ -Betriebsszenarien sind in BILD 11 und BILD 12 dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Lärmabdruck in Flugplatznähe deutlich reduziert wird. Die Tag-Schutzzone I ($L_{A,eq} > 65 \text{ dB(A)}$) wurden so weit verkleinert, dass diese sich nur noch entlang den Startrichtungen erstrecken. In Betriebsrichtung RWY08 ist erkennbar, dass nur noch vereinzelt Wohnhäuser in der Tag-Schutzzone I enthalten sind (insgesamt 25 Einwohnende). Die Tag-Schutzzone II ($L_{A,eq} > 60 \text{ dB(A)}$) enthält keine schutzbedürftigen Einrichtungen mehr und die Anzahl an Wohnhäusern innerhalb dieser Schutzzone konnte auf insgesamt 1138 Einwohnende reduziert werden. Letztere sind wohnhaft im südlichen Egelsbach

und im nördlichsten Bereich von Bayerseich. Aufgrund der Besiedlungsstruktur im Nahbereich des Flugplatzes befinden sich diese Einwohner in unmittelbarer Nähe zur Start- und Landebahn, wodurch auch bei Anwendung der in Kapitel 3 beschriebenen Maßnahmen zur Verringerung der Lärmauswirkungen keine deutliche Verbesserung der Lärmauswirkungen ersichtlich ist. Positiv hervorzuheben ist, dass in der finalen Lärmsimulation keine besonders schutzbedürftige Einrichtung in den Tag-Schutzzonen II mehr enthalten sind.

Mit den angepassten Rahmenbedingungen kann am Flugplatz Egelsbach der Lufttaxibetrieb an Tagesstunden mit 50 Flugbewegungen pro Stunde durchgeführt werden. Der Betrieb wird hinsichtlich der Lärmauswirkungen als tolerierbar eingeschätzt, wenn folgende Lärmschutzmaßnahmen nach FluLärmG angewendet werden:

- Erstattung von passiven Schallschutzmaßnahmen für Einwohnende in der Tag-Schutzzone I
- Freiwillige Erstattung von passiven Schallschutzmaßnahmen für Einwohnende in der Tag-Schutzzone II
- Entschädigungen für Grundstücksbesitzer in den Tag-Schutzzonen I & II

5. FAZIT UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die lärmbedingten Auswirkungen des On-Demand-Lufttaxibetriebs mit konventionellen Kleinflugzeugen an deutschen Flugplätzen untersucht. Ziel war es an bestehenden Vorarbeiten anzuknüpfen und tiefergehende Lärmanalysen durchzuführen. Hierfür wurden gezielt neue Flugplätze ausgewählt, welche initial hohe luftseitige Kapazitäten für den Lufttaxibetrieb vorweisen. Zusätzlich sollen diese Flugplätze eine dichtere Besiedlungsstruktur in Flugplatznähe aufweisen, um eine Verschärfung der lärmbedingten Auswirkungen durch den Lufttaxibetrieb zu erzeugen und neue Erkenntnisse zu gewinnen.

Es wurde eine iterative Methodik entwickelt, um Betriebsszenarios für den Lufttaxibetrieb zu ermitteln, welche die lärmbedingten Auswirkungen für die Anwohnenden in ein tolerierbares Maß verringern. Das tolerierbare Maß wurde entsprechend der Lärmschutzzonen des FluLärmG festgelegt.

Das Ergebnis der Untersuchungen an den Flugplätzen Augsburg, Sylt und Egelsbach zeigt, dass der Dauerbetrieb mit Lufttaxi einen erhöhten äquivalenten Dauerschallpegel erzeugt. Im Sinne der anzuwendenden Lärmrichtlinien (FluLärmG) resultieren vergrößerte Lärmschutzzonen. Aufgrund der signifikanten lärmbedingten Auswirkungen ist ein Lufttaxibetrieb zu Tageszeiten nur mittels Anwendung individuell angepasster Lärmschutzmaßnahmen für die jeweiligen Flugplätze möglich. Ein dauerhafter Nachtflugbetrieb ist nicht erstrebenswert, da sehr große Nacht-Schutzzonen entstehen, welche eine Vielzahl von Wohngebieten und schutzbedürftige Einrichtungen enthalten. Die Größe der Nacht-Schutzzonen ist bedingt durch den signifikanten $L_{A,max}$ -Lärmabdruck, welcher bei jedem Überflug eines Lufttaxis entsteht.

Die finalen Lärmsimulationen der Betriebsszenarios für den reinen Lufttaxibetrieb ergaben folgende Ergebnisse für die lärmbedingte Dauerkapazität der untersuchten Flugplätze zu Tagesstunden:

- Flugplatz Augsburg: 40 Flugbewegungen pro Stunde
- Flugplatz Sylt: 48 Flugbewegungen pro Stunde
- Flugplatz Egelsbach: 50 Flugbewegungen pro Stunde

Eine Übersicht der Ergebnisse ist in TAB 4 des Anhangs A enthalten. Für die Flugplätze Sylt und Egelsbach sind lärmbedingte Kapazitätsrestriktionen erforderlich, um die Auswirkungen des dauerhaften Lufttaxibetriebs auf das Flugplatzumfeld zu minimieren. In diesen beiden Fällen erfolgte für die Iteration der Lärmsimulation die Verringerung der Nachfrageszenarios, die Anpassung des Flugroutendesigns und der Flugroutennutzungshäufigkeiten zur Vermeidung des Überflugs bewohnter Gebiete. Während der Tagesstunden konnte das initiale Betriebsszenario ohne Einschränkungen in Augsburg umgesetzt werden. Dies zeigt, dass der kapazitätslimitierende Faktor in Augsburg infrastrukturell bedingt ist.

Die Flugplätze Augsburg und Egelsbach zeigen Gemeinsamkeiten in der Besiedlungsstruktur der direkten Nachbarschaften des Flugplatzgeländes. Wohnhäuser sind teilweise so nah an den Start- und Landebahnen positioniert, dass für den angestrebten Dauerbetrieb mit Lufttaxi stets ein hoher äquivalenter Dauerschallpegel in diesen Gebieten erzeugt wird. Hierdurch kann nicht vermieden werden, dass vereinzelt Einwohnende in den Tag-Schutzzonen I enthalten sind. An allen drei Flugplätzen gehen die Tag-Schutzzonen II deutlich über die Flugplatzgelände hinaus und beinhalten somit zahlreiche Einwohnende. In den Iterationen der Betriebsszenarios wurden jedoch explizit darauf geachtet, dass in den Tag-Schutzzonen I&II keine besonders schutzbedürftigen Einrichtungen enthalten sind.

Nichtsdestotrotz bleiben die Anwohnerreaktionen aufgrund der neuen lärmbedingten Auswirkungen des Lufttaxibetriebs schwer einschätzbar. Ein frühzeitiger Nachbarschaftsdialog könnte hierbei unterstützen, individuelle Problemstellen der Flugplätze zu identifizieren und Lösungsvorschläge gemeinsam zu erarbeiten. Des Weiteren sind nach FluLärmG folgende Maßnahmen zu treffen:

- Erstattung von passiven Schallschutzmaßnahmen für Einwohnende in der Tag-Schutzzone I
- Freiwillige Erstattung von passiven Schallschutzmaßnahmen für Einwohnende in der Tag-Schutzzone II
- Entschädigungen für Grundstücksbesitzer in den Tag-Schutzzonen I & II

Zahlungspflichtig für die Erstattungen und Entschädigungen ist der Flugplatzhalter, wobei auszugehen ist, dass die Kosten durch Nutzungsgebühren an die Lufttaxi-Verkehrsgesellschaften weitergegeben werden. Diese höhere Kostenbasis für den Lufttaxibetrieb führt zu höheren Ticketpreisen für die Reisenden.

Alles in allem zeigt diese Arbeit in konservativen Betriebsszenarios, dass trotz lärmbedingter Auswirkungen ein dauerhafter Lufttaxibetrieb zu Tageszeiten mit 40-50 Flugbewegungen pro Stunde durchgeführt werden kann.

Folglich ist eine signifikante Basis vorhanden, um mögliche kommerzielle Anwendungsfälle, wie z.B. einen Lufttaxisdienst, durchführen zu können.

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere in der Entwicklung von Lärmquellmodellen für (hybrid-) elektrische Kleinflugzeuge. Die iterative Methodik dieser Arbeit kann genutzt werden, um diese neuen Lärmquellmodelle in den Simulationen zu verwenden. Hierdurch kann die Aussagefähigkeit der Lärmsimulationsergebnisse deutlich erhöht werden. Falls die Lärmemissionen von (hybrid-) elektrischen Flugzeugen geringer sind, wie in aktueller Literatur angenommen, resultieren geringere lärmbedingte Auswirkungen für die Betriebsszenarien in dieser Arbeit. Dies würde potenziell die Erhöhung der Nachfrageszenarien ermöglichen.

Die angewandten Betriebsszenarien in dieser Arbeit bieten hinsichtlich der Verkehrsverteilung auf die Betriebsrichtungen der Start- und Landebahnen eine konservative Vorgehensweise, um den Simulationsaufwand zu verringern. Es erfolgte eine vollständige Nutzung nur einer Betriebsrichtung je Szenario. Anhand der vorherrschenden Windrichtungen an den Flugplätzen, könnten weitere Betriebsszenarien erstellt werden, welche die Verwendung von einem realistischeren Betriebsnutzungsgrad der Start- und Landebahnen ermöglichen. Es wird angenommen, dass diese veränderten Betriebsszenarien zu signifikanten Änderungen der Lärmschutzzonen führen können, wodurch Änderungen der Lärmschutzmaßnahmen neu bewertet werden müssen. Eine weitere Möglichkeit der aktiven Schallschutzmaßnahmen bietet die vertikale Optimierung der Flugprofile, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht genutzt wurde.

Zur Erhöhung des Realismus der Lärmsimulationen sollte in einer aktualisierten Methodik die Betrachtung des aktuellen Flugverkehrs an den Flugplätzen erfolgen. Insbesondere der Betrieb von mehrmotorigen Flugzeugen und Schmalrumpfflugzeugen mit Strahltriebwerken könnten den Fluglärm des Lufttaxibetriebs dominieren.

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie durch das Projekt VENTUS unter dem Förderkennzeichen 20E1912A gefördert.

Literaturverzeichnis

- [1] L. Wortmann, J. M. Rösing, M. Cakir und E. Stumpf, „Grundlagen zur Verfügbarkeitsanalyse regionaler Lufttransportsysteme bei realen Witterungs- und Betriebsbedingungen,“ *Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. (Hg.)* 2022, 2023.
- [2] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH, „Luftfahrthandbuch Deutschland (AIP, AIP VFR),“ Langen, 2025.
- [3] Europäisches Parlament und Rat, „Richtlinie 2002/49/EG - Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm,“ Brüssel, 2002.
- [4] European Civil Aviation Conference, „ECAC.CEAC Doc 29: Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports: Volume 1: Applications Guide,“ Neuilly-sur-Seine, 2016.
- [5] World Health Organization (WHO), „Environmental Noise Guidelines for the European Region,“ Kopenhagen, 2018.
- [6] Europäische Kommission, „Durchführungsverordnung (EU) 2019/947: Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge,“ Brüssel, 2019.
- [7] J. J. Botti, „Hybrid Electric Aircraft to Improve Environmental Impacts of General Aviation,“ The Bridgem Bridge - Nationak Academy of Engineering, Washington, DC, 2020.
- [8] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, „Zensusdatenbank,“ Wiesbaden, 2022.
- [9] Openstreetmap.org, „OpenStreetMap (OSM),“ 2025.
- [10] C. E. Riboldi, L. Trainelli, L. Mariani, A. Rolando und F. Salucci, „Predicting the effect of electric and hybrid-electric aviation on acoustic pollution,“ *Noise Mapping* 2020, 2020.
- [11] E. Greenwood, K. S. Brentner, R. F. Rau II und Z. F. T. Gan, „Challenges and opportunities for low noise electric aircraft,“ *aeroacoustics - International Journal of Aeroacoustics*, University Park, 2022.
- [12] L. Wortmann, M. Cakir, D. Bodmer und E. Stumpf, „Analysis and Optimization of the Availability of Regional Air Taxi Services Considering Real Weather and Operational Conditions,“ *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA 2024-3887)*, Las Vegas, 2024.
- [13] L. Wortmann, S. Hagemann und E. Stumpf, „A method to determine the availability and performance of fixed-wing air taxis in real weather conditions for regional air mobility within Germany,“ *CEAS Aeronautical Journal*, London, 2025.
- [14] M. Cakir, J. M. Rösing und L. Wortmann, „Infrastructural and operational availability for air taxi operations at German aerodromes,“ *Journal of Air Transport Research Society*, Kobe, 2024.
- [15] K. Risse, A. Eckhard, T. Lammering, K. Franz und R. Hoernschemeyer, „An Integrated Environment for Preliminary Aircraft Design and Optimization,“ *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference SciTech* 2012, Honolulu, 2012.

A. ANHANG ABBILDUNGEN

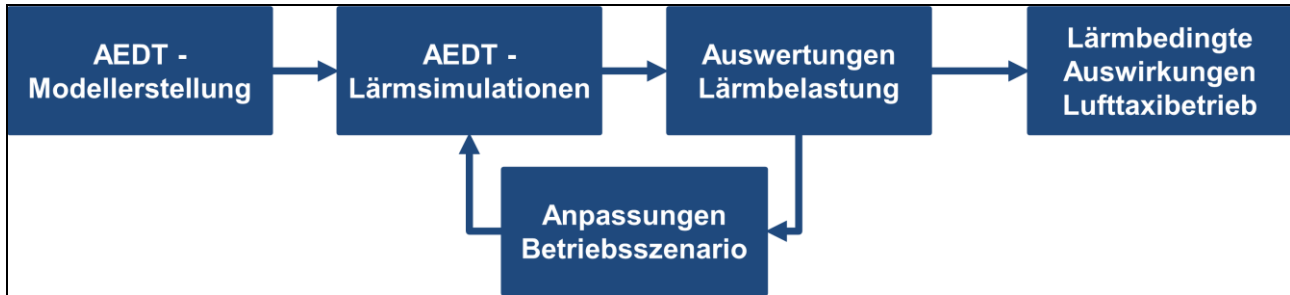


BILD 13. Übersicht der iterativen Methodik zur Ermittlung der lärmbedingten Auswirkungen des Lufttaxibetriebs

Schutzbedürftige Einrichtung	Breitengrad	Längengrad	Flugplatznähe	Schutzbedürftige Einrichtung	Breitengrad	Längengrad	Flugplatznähe
A1	48,4191311	10,8738683	Augsburg	A12	48,4190485	10,8752553	Augsburg
A2	48,4173161	10,8724663	Augsburg	A13	48,4196242	10,8809267	Augsburg
A3	48,415797	10,8826781	Augsburg	A14	48,4162152	10,8773558	Augsburg
A4	48,4150313	10,8814106	Augsburg	A15	48,4106256	10,871813	Augsburg
A5	48,4110508	10,8776688	Augsburg	A16	48,4071641	10,8928168	Augsburg
A6	48,4059398	10,8907084	Augsburg	A17	48,4012129	10,9142024	Augsburg
A7	48,401563	10,9122745	Augsburg	A18	48,4062119	10,9718956	Augsburg
A8	48,4078819	10,9665543	Augsburg	A19	48,4398095	10,9457315	Augsburg
A9	48,4406674	10,9458911	Augsburg	A20	48,4583845	10,978283	Augsburg
A10	48,4569768	10,9809091	Augsburg	A21	48,4157894	10,8813791	Augsburg
A11	48,4180131	10,8733741	Augsburg				

TAB 1. Liste der schutzbedürftigen Einrichtungen in der Nähe des Flugplatz Augsburg [9]

Schutzbedürftige Einrichtung	Breitengrad	Längengrad	Flugplatznähe	Schutzbedürftige Einrichtung	Breitengrad	Längengrad	Flugplatznähe
S1	54,923322	8,31980757	Sylt	S5	54,8904887	8,36718155	Sylt
S2	54,9254353	8,3133345	Sylt	S6	54,892316	8,37722054	Sylt
S3	54,9180647	8,31390947	Sylt	S7	54,9306275	8,35049006	Sylt
S4	54,9171845	8,31459003	Sylt				

TAB 2. Liste der schutzbedürftigen Einrichtungen in der Nähe des Flugplatz Sylt [9]

Schutzbedürftige Einrichtung	Breitengrad	Längengrad	Flugplatznähe	Schutzbedürftige Einrichtung	Breitengrad	Längengrad	Flugplatznähe
E1	49,9681539	8,83901904	Egelsbach	E15	49,9816493	8,68632512	Egelsbach
E2	49,9755579	8,80069211	Egelsbach	E16	49,9937265	8,73735302	Egelsbach
E3	49,9977051	8,77254923	Egelsbach	E17	50,0058888	8,78063148	Egelsbach
E4	49,9689476	8,79659065	Egelsbach	E18	49,9658329	8,66130682	Egelsbach
E5	49,9768648	8,82650492	Egelsbach	E19	49,9668087	8,66655085	Egelsbach
E6	49,9673011	8,83786093	Egelsbach	E20	49,9573968	8,63733122	Egelsbach
E7	49,9842441	8,81855552	Egelsbach	E21	49,9522261	8,6317193	Egelsbach
E8	50,0067137	8,77997202	Egelsbach	E22	49,9381081	8,62981719	Egelsbach
E9	49,9960641	8,73300822	Egelsbach	E23	49,9328688	8,6529238	Egelsbach
E10	49,9863818	8,68087708	Egelsbach	E24	49,9286261	8,60220747	Egelsbach
E11	49,9560206	8,66950175	Egelsbach	E25	49,928094	8,60135084	Egelsbach
E12	49,9710744	8,6633143	Egelsbach	E26	49,9846513	8,65345374	Egelsbach
E13	49,9781971	8,67665424	Egelsbach	E27	49,9848097	8,66861768	Egelsbach
E14	49,9835695	8,67088268	Egelsbach	E28	49,9289469	8,60144648	Egelsbach

TAB 3. Liste der schutzbedürftigen Einrichtungen in der Nähe des Flugplatz Egelsbach [9]

Flugplatz	Augsburg		Sylt		Egelsbach	
Nachfrageszenario [mov/h]	40		48		50	
Betriebsrichtung	RWY07	RWY25	RWY14	RWY32	RWY08	RWY26
Tag-Schutzzone 1 – Fläche [km²]	0,73	0,73	0,91	0,94	1,01	1,01
Tag-Schutzzone 1 – Einwohner	0	5	0	0	25	0
Tag-Schutzzone 2 – Fläche [km²]	2,88	2,21	3,15	3,17	3,30	3,25
Tag-Schutzzone 2 – Einwohner	29	41	7	262	1106	32

TAB 4. Übersicht Ergebnisse finale Lärmsimulationen Lufttaxibetrieb

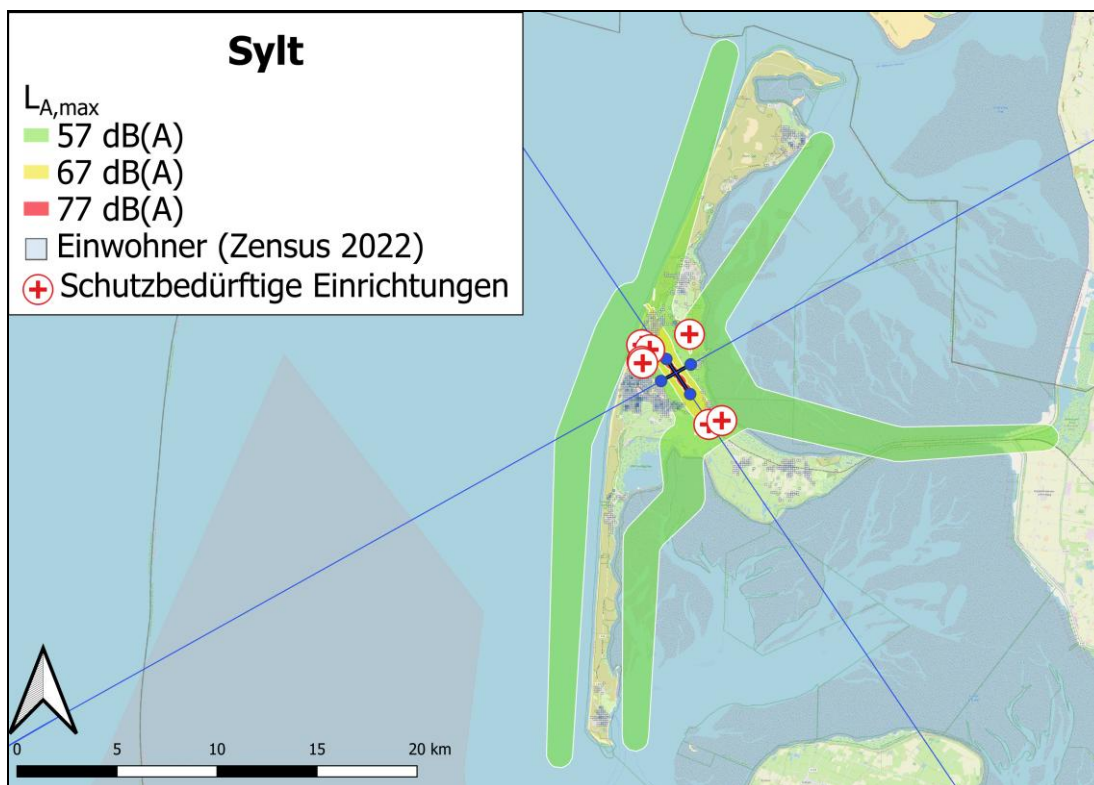


BILD 14. Finale Lärmsimulation, $L_{A,max}$ – Flugplatz Sylt Abflüge RWY14/32

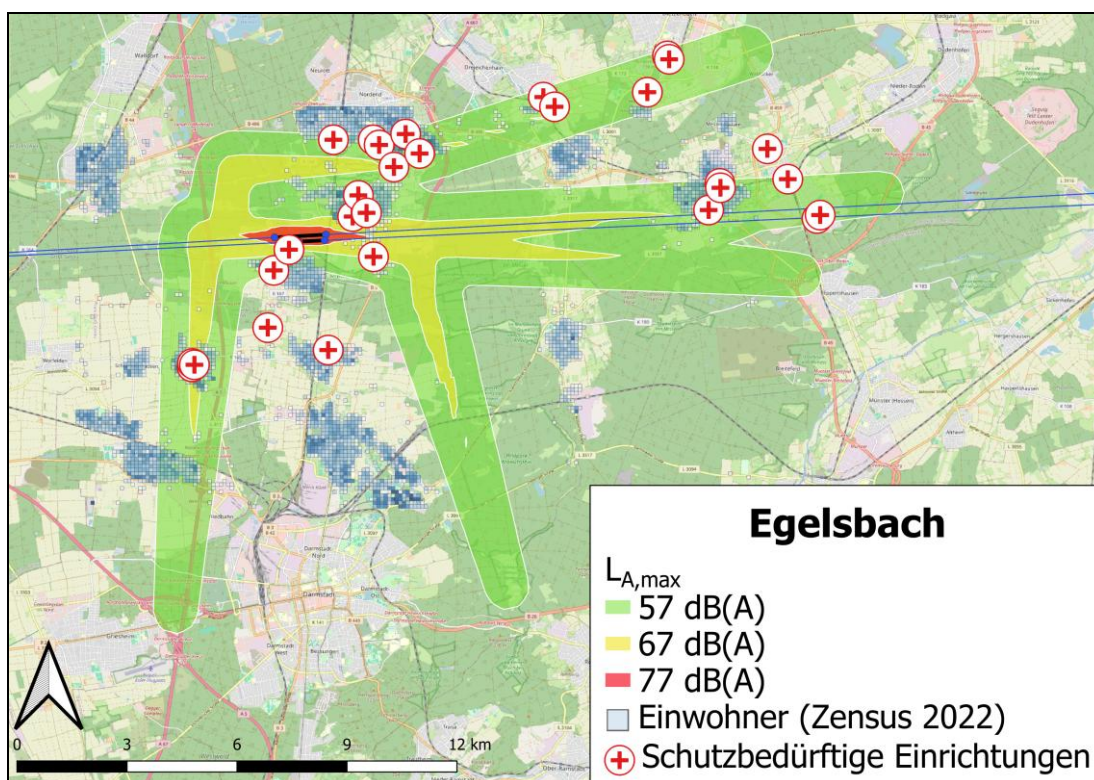


BILD 15. Finale Lärmsimulation, $L_{A,max}$ – Flugplatz Egelsbach Abflüge RWY08/26