

Der Einfluss von meteorologischen Faktoren auf die Schallübertragung durch Flugzeuge

Eine Analyse mehrere Schallpegel am Beispiel des Flughafen München

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
B.Sc. Umweltingenieurwesen

an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.

Betreut von Prof. Dr. Rolf Moeckel
Professur für Verkehrsverhalten

Eingereicht von Laura Tosch

Eingereicht am 11.10.2024 in München

Abstract

The study of the influence of meteorological factors on the transmission of aircraft noise is more relevant today than ever, particularly in the context of increasing air traffic and the associated noise pollution. This research examines the impact of various weather parameters on aircraft noise, using Munich Airport as a case study. Based on noise level measurements provided by Flughafen München GmbH, statistical methods such as correlation and multiple linear regression analysis are applied to explore the relationship between variables such as temperature, dew point, precipitation, air pressure, wind speed and direction, as well as sunshine duration, and the maximum sound pressure level. The results indicate that weather factors have only a minor but measurable influence on aircraft noise, with the location of the measuring station and whether it is a takeoff or landing having a significantly greater impact on noise transmission. The analysis highlights that temperature, wind speed and air pressure, among meteorological conditions, play a role, but overall, the effects of weather are outweighed by other factors such as aircraft type.

Zusammenfassung

Die Untersuchung des Einflusses meteorologischer Faktoren auf die Schallübertragung von Flugzeugen ist heute relevanter denn je, insbesondere im Kontext des steigenden Luftverkehrsaufkommens und der damit verbundenen Lärmbelastung. Diese Arbeit untersucht den Einfluss verschiedener Wetterparameter auf den Fluglärm am Beispiel des Flughafens Münchens. Anhand von vom Flughafen München GmbH zur Verfügung gestellten Schallpegelmessungen wird mithilfe statistischer Methoden, wie der Korrelation und der multiplen linearen Regressionsanalyse, der Zusammenhang zwischen den Variablen Temperatur, Taupunkt, Niederschlag, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und -richtung sowie der Sonnenscheindauer und dem maximalen Schalldruckpegel analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Wetterfaktoren einen lediglich geringen, aber messbaren Einfluss auf den Fluglärm haben, wobei der Standort der Messtation sowie die Tatsache, ob es sich um Start oder Landung handelt einen wesentlich größeren Einfluss auf die Schallübertragung haben. Die Analyse verdeutlicht, dass insbesondere Temperatur, Windgeschwindigkeit und Luftdruck unter den meteorologischen Bedingungen zwar eine Rolle spielen, aber insgesamt die Auswirkungen des Wetters durch andere Faktoren, wie beispielsweise Flugzeugtyp, überlagert werden.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1 EINZELSCHALLPEGEL [7]	4
ABBILDUNG 2 LÄRMQUELLEN AM FLUGZEUG [5]	4
ABBILDUNG 3 WIRKUNG VON WINGLETS [4].....	5
ABBILDUNG 4 AUFBAU EINES TRIEBWERK [3].....	6
ABBILDUNG 5 REFLEXION AN EINER GLATTEN, FLACHEN OBERFLÄCHE [10]	8
ABBILDUNG 6 BRECHUNG VON SCHALL MIT TEMPERATURGRADIENT [9].....	13
ABBILDUNG 7 SCHALLBRECHUNG UNTER KOMPLEXEN BEDINGUNGEN [8]	13
ABBILDUNG 8 EINFLUSS VON WOLKEN [2]	14
ABBILDUNG 9 UMFELD DES FLUGHAFENS MÜNCHEN [6]	19
ABBILDUNG 10 BESTANDSPAN DES FLUGHAFENS MÜNCHEN [6]	19
ABBILDUNG 11 LÄRMKARTE L_{DEN} FÜR DEN GROßFLUGHAFEN MÜNCHEN [EINHEIT: DB(A)] [6]	21
ABBILDUNG 12 MESSSTELLEN IN DER UMGEBUNG DES FLUGHAFENS MÜNCHEN, NACH [1]	23
ABBILDUNG 13 BOXPLOT FÜR DEN 24.04.2023	26
ABBILDUNG 14 STREUDIAGRAMM FÜR ACHERING AM 03.10.2023.....	27
ABBILDUNG 15 ZUSAMMENHANG TEMPERATUR UND MAXIMALER SCHALLDRUCKPEGEL FÜR DIE STARTS DES 03.10.2023	32
ABBILDUNG 16 BALKENDIAGRAMM DES KOEFFIZIENTEN RUNWAY NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A)	34
ABBILDUNG 17 BALKENDIAGRAMM DES KOEFFIZIENTEN TEMPERATUR NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A)	34
ABBILDUNG 18 BALKENDIAGRAMM DES KOEFFIZIENTEN RELATIVE LUFTFEUCHTE NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A)	34
ABBILDUNG 19 BALKENDIAGRAMM DES KOEFFIZIENTEN WINDGESCHWINDIGKEIT NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A)	35
ABBILDUNG 20 BALKENDIAGRAMM DES KOEFFIZIENTEN LUFTDRUCK NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A)	35
ABBILDUNG 21 BALKENDIAGRAMM DES KOEFFIZIENTEN SONNENSCHINDAUER NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A)	35
ABBILDUNG 22 BALKENDIAGRAMM DES KOEFFIZIENTEN FEIERTAG NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A)	36
ABBILDUNG 23 BOXPLOT FÜR DEN 03.10.2023	40
ABBILDUNG 24 BOXPLOT FÜR DEN 04.10.2023	40
ABBILDUNG 25 BOXPLOT FÜR DEN 05.07.2023	41
ABBILDUNG 26 BOXPLOT FÜR DEN 17.10.2023	41
ABBILDUNG 27 BOXPLOT FÜR DEN 25.04.2023	41
ABBILDUNG 28 BOXPLOT 26.04.2023	42
ABBILDUNG 29 STREUDIAGRAMM FÜR DIE MESSSTATION ATTACHING AM 03.10.2023	42
ABBILDUNG 30 STREUDIAGRAMM FÜR DIE MESSSTATION EITING AM 03.10.2023	42
ABBILDUNG 31 STREUDIAGRAMM FÜR DIE MESSSTATION HALLBERGMOOS AM 03.10.2023	43
ABBILDUNG 32 STREUDIAGRAMM FÜR DIE MESSSTATION PULLING AM 03.10.2023.....	43
ABBILDUNG 33 STREUDIAGRAMM FÜR DIE MESSTATION SCHWAIG AM 03.10.2023	43
ABBILDUNG 34 STREUDIAGRAMM DES MAXIMALEN SCHALLDRUCKPEGELS IN ABHÄNGIGKEIT DES TAUPUNKTS FÜR DIE STARTS DES 03.10.2023	46
ABBILDUNG 35 STREUDIAGRAMM DES MAXIMALEN SCHALLDRUCKPEGELS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DIE STARTS DES 03.10.2023.....	48
ABBILDUNG 36 STREUDIAGRAMM DES MAXIMALEN SCHALLDRUCKPEGELS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER WINDGESCHWINDIGKEIT FÜR DIE STARTS DES 03.10.2023	48
ABBILDUNG 37 STREUDIAGRAMM DES MAXIMALEN SCHALLDRUCKPEGELS IN ABHÄNGIGKEIT VON DEM LUFTDRUCK FÜR DIE STARTS DES 03.10.2023	49
ABBILDUNG 38 STREUDIAGRAMM DES MAXIMALEN SCHALLDRUCKPEGELS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SONNENSCHINDAUER FÜR DIE STARTS DES 03.10.2023	49

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1 MITTELWERTE UND STANDARDABWEICHUNG DES MAXIMALEN SCHALLDRUCKPEGELS.....	24
TABELLE 2 MITTELWERTE DES MAXIMALEN SCHALLDRUCKPEGELS DIFFERENZIERT NACH START UND LANDUNG	25
TABELLE 3 STANDARDABWEICHUNGEN DES MAXIMALEN SCHALLDRUCKPEGELS DIFFERENZIERT NACH START UND LANDUNG	25
TABELLE 4 IDENTIFIZIERTE AUSREIßER.....	26
TABELLE 5 ANZAHL DER MESSUNGEN NACH STATION UND START (D)/ LANDUNG (A)	28
TABELLE 6 LINEARER KORRELATIONSKOEFFIZIENT NACH STATION UND START (D)/ LANDUNG (A)	29
TABELLE 7 BESTIMMTHEITSMAB NACH STATION UND START (D)/ LANDUNG (A)	29
TABELLE 8 ZUSAMMENHANG DER WINDRICHTUNG UND MAXIMALEN SCHALLDRUCKPEGEL	30
TABELLE 9 KORRELATIONSMATRIX FÜR DIE STARTENDEN FLUGZEUGE (D) DER MESSSTATION ACHERING ..	31
TABELLE 10 BESTIMMTHEITSMAB IN PROZENT FÜR DIE STARTENDEN FLUGZEUGE (D) DER MESSSTATION ACHERING	31
TABELLE 11 KOEFFIZIENTEN NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A) DER DRITTEN ITERATION	33
TABELLE 12 P-WERTE NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A) DER DRITTEN ITERATION	36
TABELLE 13 ADJUSTIERTES BESTIMMTHEITSMAB NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A) DER DRITTEN ITERATION	36
TABELLE 14 KORRELATIONSMATRIX FÜR DIE STARTENDEN FLUGZEUGE (D) DER MESSSTATION ATTACHING	44
TABELLE 15 KORRELATIONSMATRIX FÜR DIE LANDENDEN FLUGZEUGE (A) DER MESSSTATION EITTING	44
TABELLE 16 KORRELATIONSMATRIX FÜR DIE STARTENDEN FLUGZEUGE (D) DER MESSSTATION HALLBERGMOOS.....	45
TABELLE 17 KORRELATIONSMATRIX FÜR DIE STARTENDEN FLUGZEUGE (D) DER MESSSTATION PULLING ...	45
TABELLE 18 KORRELATIONSMATRIX FÜR DIE LANDENDEN FLUGZEUGE (A) DER MESSSTATION SCHWAIG ..	46
TABELLE 19 P-WERTE NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A) DER ERSTEN ITERATION	50
TABELLE 20 ADJUSTIERTES BESTIMMTHEITSMAB NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A) DER ERSTEN ITERATION	50
TABELLE 21 KOEFFIZIENTEN NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A) DER ERSTEN ITERATION	50
TABELLE 22 P-WERTE NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A) DER ZWEITEN ITERATION	51
TABELLE 23 ADJUSTIERTES BESTIMMTHEITSMAB NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A) DER ZWEITEN ITERATION	51
TABELLE 24 KOEFFIZIENTEN NACH STATION UND START (D)/LANDUNG (A) DER ZWEITEN ITERATION	51

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A	Landung
APU	Auxiliary Power Unit
AzB	Anleitung zur Berechnung von Fluglärm
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
D	Start
dB(A)	Dezibel (A-bewertet)
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
dwpt	Taupunkt [°C]
EASA	Europäische Agentur für Flugsicherheit
EMPA	Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
FluLärmG	Fluglärmgesetz
FMG	Flughafen München GmbH
ICAO	Internationale Zivilluftfahrtorganisation
$L_{AS,max}$	Maximaler Schalldruckpegel (A-Filter bewertet) [dB(A)]
L_{eq}	äquivalenter Dauerschallpegel [dB]
$L_{eq,A}$	äquivalenter Dauerschallpegel (A-Filter bewertet) [dB(A)]
L_{max}	Maximaler Schalldruckpegel [dB]
L_{night}	äquivalenter Dauerschallpegel während der Nacht (A-Filter bewertet) [dB(A)]
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
MP	Messpunkt
Neq	Lärmvolumen, äquivalente Häufigkeit (mit Gewichtungsfaktor versehene lärmäquivalente Anzahl der Flugbewegungen als kennzeichnende Größe für das Lärmvolumen)
PCA	Pre-Conditioned Air-Anlagen
prcp	Niederschlag [mm]
pres	Luftdruck [hPa]
rhum	relative Luftfeuchte [%]
SENEL	Singel Event Noise Exposure Level [dB(A)]
temp	Temperatur [°C]
T_{LASmax}	Uhrzeit, zu der $L_{AS,max}$ gemessen wurde
tsun	Sonnenscheindauer [min]
wdir	Windrichtung [°]
wspd	Windgeschwindigkeit [km/h]

ERKLÄRUNG

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Tosar

Ort, Datum, Unterschrift

ABSTRACT	III
ZUSAMMENFASSUNG.....	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
TABELLENVERZEICHNIS	VI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VII
ERKLÄRUNG.....	VIII
INHALTSVERZEICHNIS	IX
1. EINLEITUNG	1
1.1. Problemstellung.....	1
1.2. Zielsetzung	1
2. LITERATURRECHERCHE	2
2.1. Definition Schall.....	2
2.2. Definition Lärm	2
2.3. Kumulative Messgrößen - Dauerschallpegel.....	3
2.4. Einzelereignismessgrößen	3
2.5. Schallentstehung am Flugzeug.....	4
2.5.1. Aerodynamische Komponente	4
2.5.2. Triebwerkslärm	5
2.5.3. Fahrwerk	7
2.6. Einflussfaktoren auf die Schallausbreitung	7
2.6.1. Reflexion	8
2.6.2. Streuung.....	9
2.6.3. Brechung.....	9
2.6.4. Oberflächenbeschaffenheit und Vegetation	10
2.6.5. Witterungseinflüsse	10
2.6.5.1. Atmosphärische Absorption	10
2.6.5.2. Wind	11
2.6.5.3. Temperatur.....	12
2.6.5.4. Relative Luftfeuchte	14
2.6.5.5. Luftdruck.....	15
2.6.5.6. Turbulenzen	15
2.7. Schall messen oder berechnen?.....	16

2.8.	Rechtliche Rahmenbedingungen	17
2.8.1.	Bundesimmissionsschutzgesetz.....	17
2.8.2.	Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm (FluLärmG).....	17
2.8.3.	Richtlinie 2002/49/EG – Umgebungslärmrichtlinie	17
2.8.4.	Luftverkehrsgesetz (LuftVG)	18
3.	FLUGHAFEN MÜNCHEN	18
3.1.	Örtliche Situation	18
3.2.	Verkehrszahlen des Flughafens	20
3.3.	Lärmaktionsplan	20
3.4.	Ergebnisse der Lärmkartierung	20
3.5.	Lärminderungsmaßnahmen	21
3.5.1.	Nachtflugregelung.....	21
3.5.2.	Entgeltsystem: lärmabhängige Landeentgelte, Nachtzuschläge.....	22
3.5.3.	Fluglärmüberwachung und -messungen.....	22
4.	DATENANALYSE	23
4.1.	Datenquelle.....	23
4.2.	Datenvorbereitung und -auswertung	24
5.	Schlussfolgerung (Aha aus Arbeit, Ausblick (FRA))	38
6.	LIMITATION	39
7.	ANHANG	40
	LITERATURVERZEICHNIS	52

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Der Luftverkehr spielt eine zentrale Rolle in unserer modernen Gesellschaft, indem er internationalen Handel, Arbeitsteilung, Mobilität und kulturellen Austausch ermöglicht. Neben den unbestreitbaren wirtschaftlichen Vorteilen, die Flughäfen für ihre Umgebung bringen, darf nicht vergessen werden, dass der damit verbundene Fluglärm erhebliche negative Auswirkungen auf die Region und die dort lebende Bevölkerung hat. Auch wenn Fluglärm nicht die größte Quelle von Verkehrslärm darstellt, dringt er meist tief in den Alltag der Betroffenen ein [1]. Eine besondere Herausforderung des Fluglärms ist seine Ausbreitung von einer hochgelegenen Schallquelle aus. Im Gegensatz zu wirksamen Maßnahmen zur Reduzierung von Straßen- oder Eisenbahnlärm gibt es nur wenige Strategien, die effektiv vor den Belastungen durch Fluglärm schützen [11].

Am Flughafen München sind täglich etwa 13.700 Personen von Fluglärm mit einer Lautstärke von über 55 dB(A) betroffen [1]. Nach Angaben des Umweltbundesamts führt ein regelmäßiger Lärmpegel von 55 dB(A) tagsüber und 45 dB(A) nachts zu einer erheblichen Belästigung. Bereits ab einer regelmäßigen Belastung von 60 dB(A) tagsüber und 50 dB(A) nachts sind zudem Gesundheitsbeeinträchtigungen zu erwarten [12].

Fluglärm hat nachweislich eine Reihe von negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit [13]. Wie Niemann und Wothge formulieren, ist die chronische Exposition gegenüber Fluglärm mit einer erhöhten Inzidenz von Schlafstörungen verbunden, die sich negativ auf die Schlafqualität und -dauer auswirken können. Dieser Schlafmangel kann wiederum zu einem erhöhten Stressniveau führen, das mit einer gesteigerten Aktivität des sympathischen Nervensystems und einer erhöhten Ausschüttung von Stresshormonen wie Cortisol verbunden ist. Langfristig kann dies zu einem erhöhten Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen wie Hypertonie, koronare Herzkrankheit und Schlaganfall führen. Darüber hinaus wurde eine Assoziation zwischen dauerhafter Fluglärmexposition und einer erhöhten Prävalenz von psychischen Erkrankungen wie Angststörungen und Depressionen festgestellt [13]. Auch Tiere können durch Fluglärm negativ beeinträchtigt werden. Viele Tierarten sind empfindlich gegenüber Lärm und können dadurch gestört werden. Dies kann sich auf ihr Verhalten, ihre Fortpflanzungsmuster und ihre Lebensräume auswirken [14].

Angesichts dieser potenziellen Gesundheitsrisiken ist es von entscheidender Bedeutung, die Faktoren zu identifizieren, die den Fluglärm beeinflussen, um effektive Maßnahmen zur Lärminderung zu entwickeln und die Lebensqualität der betroffenen Gemeinden zu verbessern. Die Lärmbelastung durch Flugverkehr wird durch verschiedene Einflussfaktoren wie Flughöhe, Größe, Gewicht und Triebwerkszahl der Flugzeuge bestimmt [15]. Die Schallausbreitung wird von Wetterfaktoren wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck oder Windgeschwindigkeit beeinflusst, sowie von Hindernissen beeinträchtigt [16]. Diese sollen im Weiteren näher betrachtet werden.

1.2. Zielsetzung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, den Einfluss verschiedener meteorologischer Faktoren auf die Ausbreitung und Wahrnehmung von Fluglärm am Flughafen München zu untersuchen. Dabei sollen hier insbesondere die Auswirkungen von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Luftdruck und Wind auf den Fluglärm analysiert werden. Um den Zusammenhang zwischen den Wetterfaktoren und dem Fluglärm aufzuzeigen, wird mithilfe von Excel eine Regressionsanalyse durchgeführt werden. Diese Untersuchung zielt darauf ab, ein detailliertes Verständnis dafür zu entwickeln, wie sich Wetterbedingungen auf die Lärmbelastung in den umliegenden Gemeinden auswirken können. Auf Basis des Zusammenhangs zwischen meteorologischen Parametern und Fluglärm könnten damit weitere Schritte in Richtung der Entwicklung von Lärmschutzmaßnahmen unternommen werden.

2. Literaturrecherche

2.1. Definition Schall

Das Bayerische Landesamt für Umwelt definiert Schall als eine Form von mechanischer Energie, die sich als Wellen durch ein Medium wie Luft, Wasser oder Feststoffe ausbreitet und vom menschlichen Gehör wahrgenommen werden kann [17]. Luftschall bezieht sich auf Druckschwankungen in der Luft, die über dem atmosphärischen Druck liegen. Diese Schwankungen entstehen durch mechanische Schwingungen von verschiedenen Quellen. Die erzeugten Über- und Unterdrücke breiten sich als Schallwellen aus. Die Lautstärke eines Geräusches hängt von der Größe dieser Luftdruckschwankungen ab, wobei größere Schwankungen zu einer höheren Schallintensität und somit zu einem lauterem Geräusch führen. Schall wird durch verschiedene physikalisch messbare Merkmale charakterisiert; insbesondere im Hinblick auf die quantitative Beschreibung von Fluglärm sind der Schalldruck und der Schalldruckpegel von Relevanz. Unter dem Schalldruck werden die bei der Schallübertragung auftretenden Druckschwankungen in der Luft verstanden, die beim Menschen das Trommelfell in Bewegung versetzen, wodurch hörbarer Schall vom Innenohr wahrgenommen wird. Der Schalldruckpegel leitet sich mathematisch aus dem Schalldruck ab und gibt an, wie stark der Schalldruck eines Tons im Vergleich zum minimal hörbaren Schalldruck ist, den das menschliche Ohr wahrnehmen kann und der bei rund 20 Mikropascal liegt. Je höher der Schalldruckpegel ist, desto lauter wird der Ton wahrgenommen. Der Schalldruckpegel verwendet eine logarithmische Maßeinheit und wird üblicherweise in Dezibel (dB) angegeben [17].

Die Autoren des Fluglärmportals erklären, dass die menschliche Wahrnehmung der Lautstärke eines Geräusches durch eine Kombination aus Schalldruck und Tonhöhe bestimmt wird [18]. Die Tonhöhe wird durch die Frequenz, also die Anzahl der Luftdruckschwankungen pro Sekunde (Hertz, Hz), angegeben. Die Komplexität des menschlichen Gehörs führt dazu, dass tiefe und sehr hohe Töne weniger laut empfunden werden als Töne mittlerer Frequenz. Daher kann es vorkommen, dass Töne unterschiedlicher Frequenzen trotz verschiedener Schalldruckpegel als ähnlich laut wahrgenommen werden [18].

Weiterhin wird erläutert, dass die menschliche Wahrnehmung von Schall logarithmisch ist, was bedeutet, dass eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 10 dB als Verdoppelung der Lautstärke empfunden wird. Um die unterschiedliche Wahrnehmung von hohen und tiefen Frequenzen des menschlichen Gehörs mit Messgeräten zu berücksichtigen, wird der sogenannte A-Filter verwendet. Dieser Filter selektiert spezifische Frequenzen entsprechend und berücksichtigt die variierende Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs. Um eine vergleichbare Bewertung des Lautstärkeempfindens zu gewährleisten, wird der resultierende Schallpegel in dB(A) ausgedrückt [18].

2.2. Definition Lärm

Im Gegensatz zu Schall ist Lärm eine subjektive Wahrnehmung, die weder gemessen noch quantifiziert werden kann [19]. Jeder Mensch empfindet Geräusche unterschiedlich. Wie das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz erklärt, wird die Wahrnehmung eines Schallereignisses als Lärm von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, darunter Lautstärke, Dauer, Häufigkeit, Zeitpunkt des Auftretens und persönliche Empfindlichkeit. Erst wenn ein Mensch den auf ihn wirkenden Schall als Beeinträchtigung empfindet, wird dieser als Lärm bezeichnet [19].

Laut dem Flughafen München werden Geräuschemissionen von Flugzeugen als Fluglärm klassifiziert, sobald er von Menschen als störend empfunden wird. Fluglärm unterscheidet sich von anderen Lärmquellen wie Verkehrslärm auf Straßen oder Schienen dadurch, dass er normalerweise nicht gleichmäßig über die gesamte Reisestrecke verteilt ist. Stattdessen

konzentriert sich Fluglärm hauptsächlich auf die direkte Umgebung des Flughafens, insbesondere entlang der An- und Abflugrouten [1].

2.3. Kumulative Messgrößen - Dauerschallpegel

Es gibt verschiedene kumulative Messgrößen zur Bewertung von Lärmbelastungen, wobei der Dauerschallpegel, oft als äquivalenter Dauerschallpegel (L_{eq}) bezeichnet, von besonderer Bedeutung ist. Er beschreibt den durchschnittlichen Schallpegel über einen bestimmten Zeitraum. Am gängigsten ist der auf dem A-Filter bewertete äquivalente Dauerschallpegel ($L_{A,eq}$) [20].

Ein wichtiger Faktor zur Bewertung der Belästigung ist die Dauer eines Lärmereignisses oder eines Flugzeugüberflugs. Laut dem San Diego International Airport beginnt die effektive Dauer eines Schalls, wenn ein Geräusch den Hintergrundgeräuschpegel übersteigt, und endet, wenn es wieder unter diesen Pegel fällt [7].

L_{eq} kann für jeden Zeitraum gemessen werden, wird aber typischerweise während der Nacht (L_{Night}) für die Bewertung der nächtlichen Lärmbelastung oder über den gesamten 24-Stunden-Tag (L_{DEN}) gemessen. Bei der 24-Stunden-Messung werden zusätzliche Lärmzuschläge für nächtliche Lärmereignisse berücksichtigt [20].

2.4. Einzelereignismessgrößen

Der maximale Schalldruckpegel (L_{max}) ist der höchste Schallpegel, der während eines einzelnen Lärmereignisses erreicht wird [7]. Ein einzelnes Lärmereignis ist beispielsweise ein Flugzeugüberflug. Je näher das Flugzeug kommt, desto lauter wird es, bis das Flugzeug seinen nächsten Punkt direkt über dem Beobachter erreicht hat. Während des Überflugs nimmt der Lärmpegel ab, bis er sich wieder auf das Umgebungsgeräuschniveau einpendelt. Diese einfache Messgröße wird häufig von Menschen wahrgenommen, wenn ein Flugzeugüberflug stattfindet [7].

Der Vorteil des maximalen Schalldruckpegels liegt in seiner einfachen Messbarkeit und der leichten Verständlichkeit für die Öffentlichkeit. Der Nachteil liegt jedoch darin, dass die Dauer eines Schallereignisses nicht in die Bewertung einfließt, was für die subjektive Beurteilung des Ereignisses von Bedeutung sein kann [20].

Die Dauer eines Lärmereignisses, wie beispielsweise eines Überflugs, ist ein bedeutender Faktor bei der Bewertung von Belästigungen und wird typischerweise durch den SENEL (Single Event Noise Exposure Level) gemessen [7]. Wie zuvor erwähnt definiert der internationale Flughafen in San Diego die effektive Dauer eines Geräuschs als die Zeit, während der der Geräuschpegel über den Hintergrundgeräuschpegel ansteigt und endet, sobald er wieder unter diesen Pegel fällt. Der SENEL wird berechnet, indem die Schallenergie über die gesamte Dauer des Ereignisses integriert wird. Diese Messgröße berücksichtigt sowohl den maximalen Geräuschpegel als auch die Dauer des Ereignisses. Einzelereignis-Messgrößen bieten eine praktische Methode, um den Lärm zwischen verschiedenen Flugzeugereignissen mit unterschiedlichen Dauern zu vergleichen. Flughafenlärmmodelle verwenden Flugzeuglärmkurvendaten, die auf der SENEL-Messgröße basieren. Zusätzlich können kumulative Lärmessgrößen wie der äquivalente Dauerschallpegel aus SENEL-Daten berechnet werden [7].

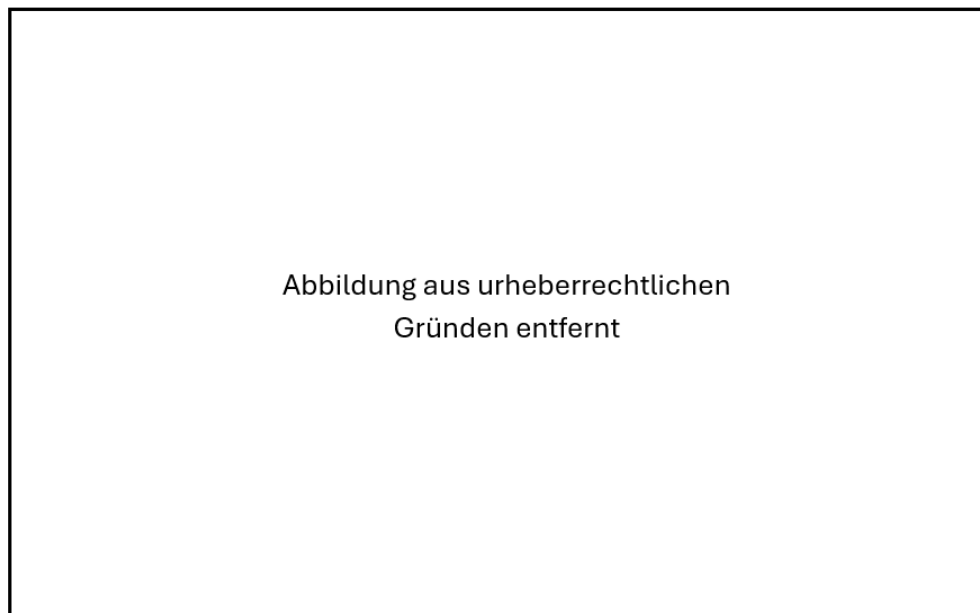


Abbildung 1 Einzelschallpegel [7]

2.5. Schallentstehung am Flugzeug

Den Autoren des Fluglärmportals zufolge sind die Hauptverursacher des Fluglärms Geräusche, die von den Triebwerken erzeugt werden, sowie aerodynamische Effekte [5]. Die Lärmemissionen an anderen Flugzeugkomponenten wie dem Rumpf, Fahrwerk, Tragflächen, Leitwerk und den Landeklappen machen einen vergleichsweise geringeren Anteil des Gesamtlärms aus, spielen jedoch eine Rolle im Kontext der Aerodynamik und können relevante Auswirkungen auf die Lärmbelastung am Flughafen haben [5].

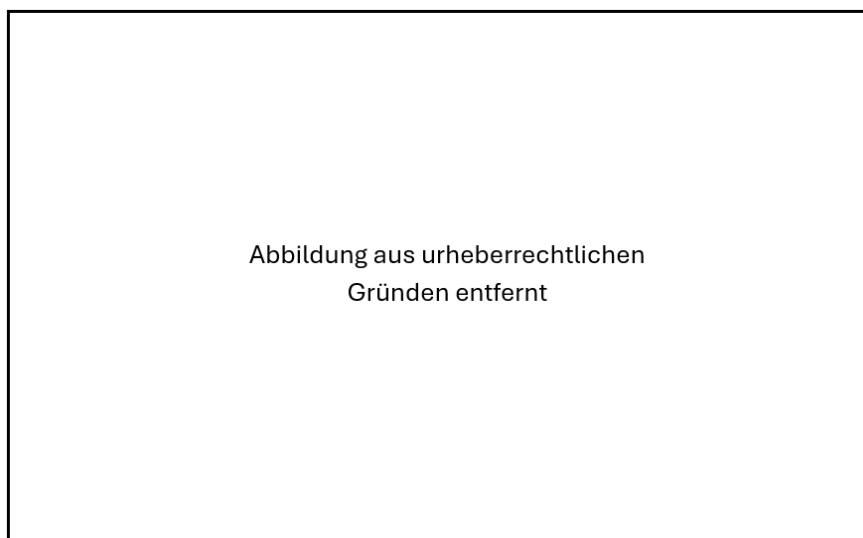


Abbildung 2 Lärmquellen am Flugzeug [5]

2.5.1. Aerodynamische Komponente

Aerodynamischer Lärm bezeichnet den Anteil des Fluglärms, der durch die Wechselwirkung der Luft mit spezifischen Flugzeugbauteilen entsteht [1]. Dem Flughafen München zufolge verursachen während des Fluges Veränderungen in den Luftströmungen um den Flugzeugkörper herum Druckwellen, die als Lärm wahrgenommen werden. Dies führt zu Verwirbelungen und Turbulenzen an den Oberflächen des Flugzeugs, was ein charakteristisches Geräusch erzeugt. Historisch gesehen war die aerodynamische Komponente des Fluglärms weniger signifikant, aber aufgrund der Fortschritte bei der Reduzierung des Triebwerkslärms hat sie an Bedeutung gewonnen [1].

Zusätzlich wird durch Maßnahmen wie Winglets und weitere Technologien versucht, die aerodynamischen Eigenschaften von Flugzeugen zu verbessern und damit auch den aerodynamischen Lärm zu reduzieren [21]. Winglets sind an den Enden der Flugzeugtragflächen angebrachte Strukturen, die entweder nach oben oder nach oben und unten gebogen sind, um den Luftwiderstand zu verringern und die Effizienz zu steigern. Laut MTU Aero Engines werden Winglets speziell verwendet, um die Wirbelbildung an den Flügelenden zu minimieren, die durch die Luftströmung um die Tragfläche herum verursacht wird. Diese Wirbel werden durch die Winglets in kleinere Verwirbelungen zerlegt, die sich teilweise gegenseitig aufheben [21].

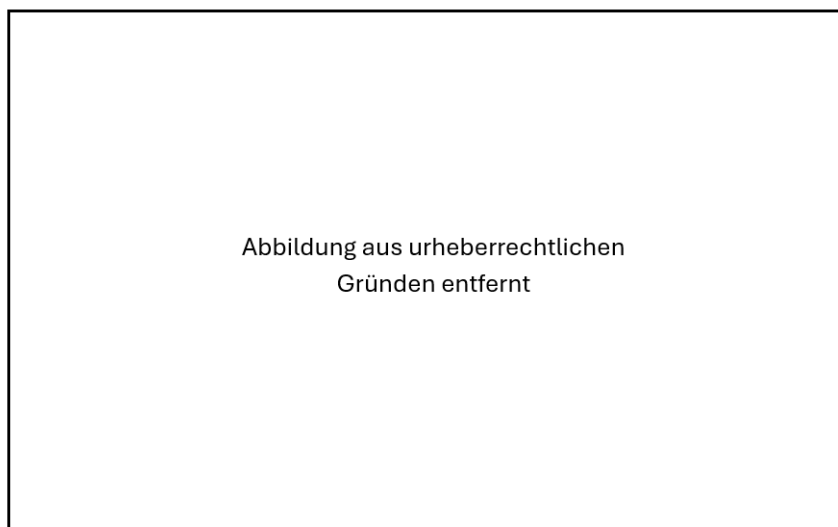


Abbildung 3 Wirkung von Winglets [4]

2.5.2. Triebwerkslärm

Die Triebwerke von Flugzeugen sind ein signifikanter Ausgangspunkt von Fluglärm, nicht nur während des Flugs [22]. Die Lärmerzeugung hat verschiedene Ursachen, darunter den Fanlärm, Verdichterlärm und die Verbrennung von Kerosin innerhalb des Triebwerks. Laut Scholz unterscheiden sich die Lärmergebnisse je nach Standort, da die unterschiedlichen Lärmquellen in verschiedene Richtungen abstrahlen. Die Geräusche stammen vor allem vom heißen Gasstrahl, der mit nahezu Überschallgeschwindigkeit aus dem Triebwerk in die ruhende, kalte Umgebungsluft austritt. Die entstandenen Temperatur- und Druckunterschiede sowie Verwirbelungen erzeugen den Lärm [22].

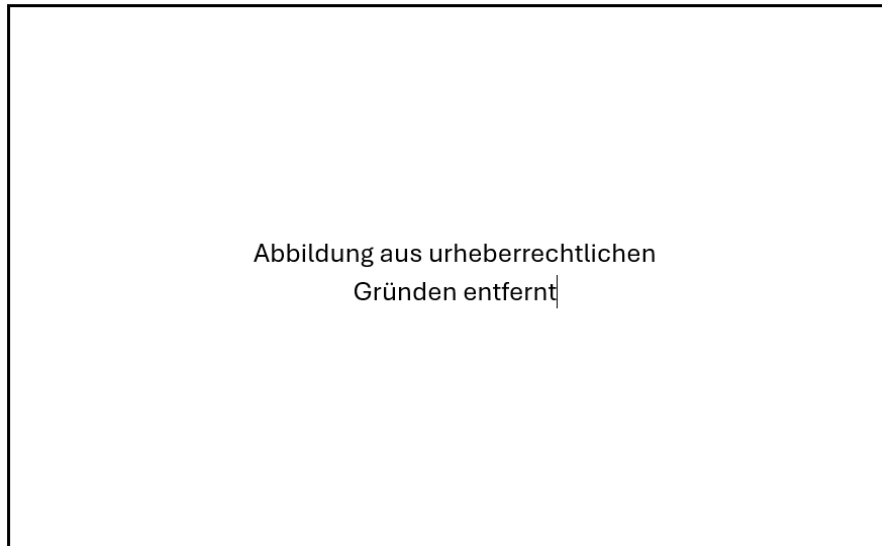


Abbildung 4 Aufbau eines Triebwerk [3]

Insbesondere während des Starts sind die Triebwerke die Hauptquelle von Lärm. Bei dem Start sind die Triebwerke auf maximale Leistung eingestellt, um das Flugzeug auf Geschwindigkeit zu bringen und den Start zu ermöglichen, was zu einem erhöhten Lärmpegel führt [5].

Obwohl die Landung im Vergleich zur Startphase in der Regel leiser ist, da die Triebwerke während des Landeanflugs und während des Abrollens auf der Landebahn mit niedrigerer Drehzahl betrieben werden, tragen die Triebwerke hier dennoch maßgeblich zur Lärmerzeugung bei. Während des Landeanflugs reduzieren die Piloten typischerweise die Triebwerksleistung, um das Flugzeug für die Landung vorzubereiten. Außerdem gewinnen die sogenannten Umströmungslärmquellen an Bedeutung. Indem die turbulenten Luftströmungen auf stehende Bauteile und Hohlräume des Flugzeugs stoßen, können Geräusche entstehen [22]. Dem Flughafen München zufolge sind die Hauptquellen der Lärmerzeugung bei einer Landung die Vorflügelklappen, Landeklappen und das Fahrwerk [1].

Nach der Landung erzeugt das Flugzeug auch auf dem Rollfeld nicht unerhebliche Geräusche. Die Triebwerke bleiben während des Rollens zur Bereitstellung von Schub und zur Unterstützung der Bremsung aktiv. Um die Flugzeugkabine auf der Parkposition mit vorklimatisierter Frischluft zu versorgen, werden zunehmend Pre-Conditioned Air-Anlagen (PCA) eingesetzt, auch am Flughafen München [23]. Dadurch müssen die parkenden Flugzeuge nicht mehr ihre Hilfsturbine, das sogenannte Auxiliary Power Unit (APU), für die Klimatisierung laufen lassen, was zu einer deutlichen Reduzierung der Lärmbelastung führt. Wenn jedoch keine PCA-Anlagen verfügbar sind, muss das APU weiter betrieben werden, was zu zusätzlichem Lärm führt. Des Weiteren sind die PCA-Anlagen im Betrieb deutlich leiser. Auch tragen die PCA-Anlagen zur Senkung des Kerosinverbrauchs sowie des damit verbundenen CO₂-Ausstoßes bei. An allen Abstellpositionen in der Nähe der Terminals und des Satelliten am Flughafen München wurden solche Anlagen installiert [23].

Der Flugzeugtyp hat einen großen Einfluss auf die Entstehung von Fluglärm, da verschiedene technische Aspekte wie die Größe, das Gewicht, und vor allem die Triebwerksart eine entscheidende Rolle spielen. Ältere Flugzeugmodelle wie etwa die Boeing 727 oder Boeing 747-200 erzeugen lautere Geräusche als modernere Modelle wie die Airbus A320neo oder Boeing 737 MAX. Aus diesem Grund sind diese alten Flugzeugtypen in Europa nicht mehr zugelassen und Flugzeuge mit modernen Triebwerken durch fortschrittliche Technologien bevorzugt [24, 25].

Neben der reinen Schallintensität spielen auch andere Faktoren eine Rolle. Flugzeuge mit Turboprop sind in der Regel leiser als solche mit Turbofan-Triebwerken, da ihre Propeller mit einer geringeren Geschwindigkeit rotieren als die Fans eines Jet-Triebwerks, was zu weniger Lärm führt. Beispielsweise erzeugen ältere Flugzeuge wie der Airbus A320-200 Lärmpegel von bis zu 120 dB in der Nähe der Landebahn, während der modernere A320neo, aufgrund effizienterer und leiserer Triebwerke, diese auf etwa 110 dB reduziert [26]. Auch das Start- und Landeprofil beeinflusst den wahrgenommenen Lärm erheblich. Langstreckenflugzeuge wie der Airbus A380 oder Boeing 747 steigen langsamer, was sie länger in niedrigeren Höhen fliegen lässt und somit auch den Lärm länger hörbar macht. Neuere Generationen von Flugzeugen sind nicht nur leiser, sondern auch umweltfreundlicher und effizienter [27].

Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) hat zur Klassifizierung von Fluglärm die sogenannte "Balanced Approach"-Methode entwickelt, die Flugzeuge in verschiedene Lärmkategorien einteilt, je nach Erfüllung der Lärmgrenzwerte [28].

2.5.3. Fahrwerk

Das Fahrwerk spielt eine entscheidende Rolle während der Landeanflugphase [29]. Als primäres System zur Unterstützung der Landelast des Flugzeugs zählt es zu den sicherheitskritischsten Komponenten der Flugzeugstruktur. Laut Zhao et al. ist das Fahrwerk typischerweise in einer konventionellen Dreiradkonfiguration angeordnet, bestehend aus einem Bugfahrwerk und zwei Hauptfahrwerken. Dadurch stehen bei ausgefahrenem Fahrwerk zahlreiche stumpfe Körperkomponenten direkt im Hochgeschwindigkeitsluftstrom und fungieren als Quellen für strömungsinduzierten Lärm. Das Aufsetzen der Räder auf der Landebahn erzeugt Geräusche durch Reibung und Stoßdämpfung [29].

Während des Startvorgangs wird das Geräusch des Fahrwerks üblicherweise vom Lärm der Triebwerke überlagert. Dadurch, dass das Fahrwerk kurz nach dem Start eingefahren und so vor Wind geschützt wird, ist es weniger einer direkten Einwirkung des Luftstroms ausgesetzt, folglich entsteht weniger Lärm [29].

2.6. Einflussfaktoren auf die Schallausbreitung

Die Ausbreitung von Schall ist ein hochkomplexes Phänomen, das von einer Vielzahl Umweltfaktoren beeinflusst wird. Innerhalb großer Entfernungen ist Luft kein gleichmäßiges, ruhendes Medium, sondern durch verschiedene meteorologische Variablen wie Windstärke, -richtung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck beeinflusst [30].

Dem Flughafen Graz zufolge wird dieses Phänomen durch die ständige Bewegung der Atmosphäre zusätzlich verkompliziert [30]. Diese Veränderungen können dazu führen, dass Schallereignisse aufgrund der sich ständig verändernden Wetterbedingungen unterschiedlich stark wahrgenommen werden. Bestimmte meteorologische Bedingungen können die Lärmpegel erhöhen, indem sie die Ausbreitungspfade von Schallwellen auf einen einzelnen Punkt fokussieren. Weiterhin spielt die Geländetopologie eine bedeutende Rolle bei der Ausbreitung von Flugzeuglärm, da sie die Schallwellen reflektiert, absorbiert oder streut. Insbesondere Wind- und Temperatur beeinflussen die Ausbreitung von Lärm über längere Strecken [31].

Bei kurzen Entfernungen zwischen Quelle und Empfänger sind atmosphärische Effekte minimal. Jedoch ist eine Analyse der einzelnen Einflussfaktoren über größere Entfernungen entscheidend,

um ein Verständnis für die Auswirkungen von Wetterbedingungen auf die Lärmbelastung zu entwickeln [9].

Im Folgenden werden daher diese Faktoren im Kontext der Ausbreitung von Fluglärm näher beleuchtet.

2.6.1. Reflexion

Die Reflexion von Schallwellen tritt auf, wenn Schallwellen an einer Oberfläche abprallen und dabei unter dem gleichen Winkel reflektiert werden wie der Einfallswinkel, bezogen auf eine Senkrechte zur Oberfläche. Dieses Prinzip wird anhand einer glatten, flachen Oberfläche in Abbildung 5 veranschaulicht [10].

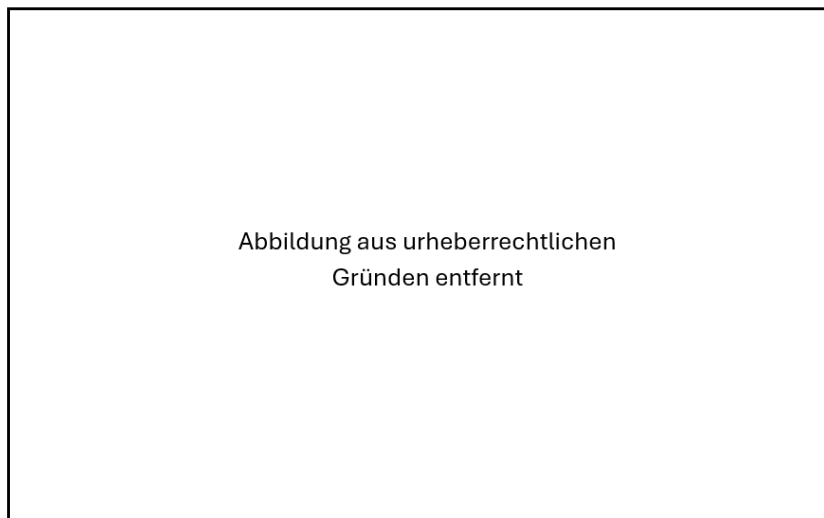


Abbildung 5 Reflexion an einer glatten, flachen Oberfläche [10]

Wenn Schallwellen auf die Oberfläche eines Hindernisses wie Boden, Gebäude oder Lärmschutzwand treffen, werden sie reflektiert, wobei ein Teil der Schallenergie absorbiert wird [10]. Laut Hannah überlagern sich die Schallwellen, die direkt auf einen Empfänger treffen, mit den Schallwellen, die von Oberflächen reflektiert wurden. Je nachdem, wie diese Wellen miteinander interagieren, kann der Schall an der Position des Empfängers lauter oder leiser werden. Dies hängt davon ab, wie weit der Empfänger von der Schallquelle entfernt ist und wie genau die Schallwellen zusammentreffen [10].

Die Art des Materials der reflektierenden Oberfläche kann den Reflexionsgrad beeinflussen. Glatte und harte Oberflächen wie Beton oder Metall reflektieren Schallwellen stärker, während weiche und poröse Materialien mehr Schallenergie absorbieren [32]. Im Freien werden spezielle Lärmschutzwände verwendet, um Schall zu dämpfen und zu reflektieren. Diese Wände bestehen oft aus porösen Materialien wie Holz, recyceltem Gummi oder speziellen schallabsorbierenden Betonarten. Laut Everest und Pohlmann wird direkter Schall, der ohne Hindernisse den Empfänger erreicht, oft als klarer und lauter wahrgenommen, während reflektierter Schall, der an Hindernissen abprallt, zu einem diffusen Klangbild beitragen kann. Diese Prinzipien sind wichtig bei der Gestaltung von Lärmschutzmaßnahmen [32].

2.6.2. Streuung und Beugung

Wenn sich Schallwellen durch die Atmosphäre bewegen und auf eine Region mit Unregelmäßigkeiten treffen, kommt es zu Streuung und ein Teil ihrer Energie wird in viele andere Richtungen abgelenkt [8]. Unregelmäßigkeiten entstehen in der Umgebung beispielsweise durch Luftturbulenzen, raue Oberflächen und Hindernisse wie Bäume. Laut Hannah kann die Streuung von Schall auch durch Wetterphänomene wie Regen, Schnee oder Nebel verursacht werden, jedoch ist sie in der Regel unbedeutend. Diese Streuungseffekte führen zu einer Diffusion des Schalls, was zu einer Abschwächung des direkten Schallwegs und einer Verteilung des Schalls in verschiedene Richtungen führt [8].

Die Effekte der Schallstreuung sind besonders in urbanen Gebieten relevant, wo zahlreiche Hindernisse und unregelmäßige Oberflächen vorhanden sind. In solchen Szenarien wird der Schall oft mehrfach gestreut, was zu einer komplexen Schallverteilung führt. Diese Phänomene sind bei der Planung von Schallschutzmaßnahmen und der Gestaltung von akustisch optimierten Umgebungen zu berücksichtigten [33].

Die Beugung von Schallwellen beschreibt das Phänomen, bei dem Schallwellen um Hindernisse herum oder über Barrieren hinweg gebogen werden. Beugung tritt auf, wenn die Wellenlänge des auftreffenden Schalls etwa die gleiche Größe wie das Hindernis hat. Durch die Barriere entsteht eine Schattenzone zwischen der Quelle und dem Empfänger. Eine Schattenzone ist ein Bereich, der vom direkten Schall abgeschirmt ist [10].

Ob es dabei zu einer Reduktion des Schallpegels kommt, hängt von der Ursprungsfrequenz ab. Bei hohen Frequenzen ist der Abschirmeffekt der Barriere am stärksten. Strukturen wie Gebäude, Häuser und Schallschutzwände blockieren die geradlinige Ausbreitung von Schall und können daher den Lärmpegel signifikant beeinflussen [6].

Streuung und Beugung können für das Eindringen von Schallenergie in Schattenzonen hinter größeren Hindernissen oder in Situationen mit aufwärts gerichteter Brechung verantwortlich sein. Daher ist es in Schattenzonen nicht vollständig ruhig [8].

Gelände oder Hügel haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Lärmbelastung, abhängig von der Position des Beobachters in Bezug auf den Hügel. Ein Hügel zwischen einer Schallquelle und einem Empfänger kann als Barriere wirken und die Lärmenergie abschirmen. Befindet sich der Empfänger zwischen der Schallquelle und dem Hügel, kann der Hügel den Lärm reflektieren und somit den wahrgenommenen Lärmpegel erhöhen, abhängig von den Winkeln der Lärmenergie wellen und der Beschaffenheit der Hügeloberfläche. Auch hier zeigt sich, dass Vegetation dämpfend und harte Oberflächen verstärkend wirken können [1].

2.6.3. Brechung

Die Brechung von Schall beschreibt die Ablenkung von Schallwellen, die entsteht, wenn sie sich durch kontinuierlich verändernde Medien oder unter wechselnden Bedingungen ausbreiten [10]. Hannah schreibt, dass die akustische Brechung sich sehr ähnlich zur optischen Brechung verhält, was durch das Snelliussche Brechungsgesetz beschrieben wird. Das Snelliussche Gesetz erklärt die Richtungsänderung von Schallwellen beim Übergang in ein Medium mit unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit. Dies gilt sowohl beim Wechsel in ein anderes Medium als auch bei Veränderungen innerhalb desselben Mediums. Schallwellen breiten sich nur dann geradlinig aus, wenn die Schallgeschwindigkeit konstant ist und kein Wind weht. In einem Medium mit variabler Schallgeschwindigkeit verbreiten sich die Wellen jedoch nicht mehr geradlinig, sondern werden stark gebrochen und folgen gekrümmten Bahnen. Dieses Phänomen tritt auch in der Atmosphäre auf. Die Brechung wird oft mit Hilfe von Schallstrahlen veranschaulicht, die die

Ausbreitungsrichtung der Wellen ähnlich wie Lichtstrahlen darstellen. Eine Brechung der Schallstrahlen erfolgt, wenn sich die Schallgeschwindigkeit und/oder die Windgeschwindigkeit entlang des Strahlenwegs ändern, d.h. wenn einen Wind oder Temperaturgradienten gibt. Diese Brechung beeinflusst den Schalldruckpegel erheblich. Der Einfallswinkel des Schalls auf den Boden ändert sich, was zu unterschiedlichen Abschwächungen durch den Boden führt [10].

2.6.4. Oberflächenbeschaffenheit und Vegetation

Die Materialeigenschaften des reflektierenden Mediums sind entscheidend für das Ausmaß der Schallreflexion und -absorption [6].

Weiche Bodenoberflächen wie Rasen oder mit Erde bedeckte Flächen absorbieren einen Teil der einfallenden Schallenergie und reflektieren einen weiteren Teil in andere Richtungen. Dichte Vegetation trägt zur Schallabsorption bei, wodurch weniger Lärm wahrgenommen wird. Beispielsweise kann ein überfliegendes Flugzeug in einem Wald deutlich leiser erscheinen als auf einem offenen Platz wie einem Parkplatz, wo der Schall hauptsächlich reflektiert und nicht absorbiert wird [1, 6].

Die Reflexion von Schall an harten Oberflächen, wie Beton oder offenen Wasserflächen, verstärkt den Lärm. Dennoch ist keine Oberfläche vollständig reflektierend, selbst harte Oberflächen können einen Teil der Schallenergie absorbieren. Offene Wasserflächen hingegen werfen den Schall nahezu vollständig zurück, was zu einer höheren Lärmbelastung führen kann [6, 29].

Bodenbedingungen können eine zusätzliche Dämpfung des Schallpegels bewirken, die mit der Entfernung variiert. Hochfrequenzen werden im Allgemeinen stärker gedämpft als Niederfrequenzen. Die komplexe Wechselwirkung zwischen Schallwellen und der Bodenoberfläche beeinflusst die Schallausbreitung erheblich, was zu zusätzlichen Verlusten neben geometrischer Ausbreitung und atmosphärischer Absorption führen kann [1, 6, 9].

2.6.5. Witterungseinflüsse

Die Ausbreitung von Schallwellen im Freien wird maßgeblich von drei Hauptfaktoren beeinflusst: atmosphärische Absorption, turbulenzbedingte Diffusion und Brechung aufgrund von Veränderungen in Wind und Temperatur [34]. Diese Faktoren sollen im Folgenden näher betrachtet werden.

2.6.5.1. Atmosphärische Absorption

Atmosphärische Absorption ist ein allgegenwärtiges Phänomen, das auftritt, wenn sich Schallwellen durch die Luft bewegen und dabei mit Luftmolekülen interagieren. Ein Teil der Schallenergie wird von den Molekülen absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die Intensität dieser Absorption hängt stark von der Frequenz der Schallwellen sowie von Temperatur und Luftfeuchtigkeit ab und in geringerem Maße vom Luftdruck [8].

Wie Schreiber in ihrem Artikel formuliert, tritt eine spürbare Reduktion der akustischen Energie durch atmosphärische Absorption erst bei hohen Frequenzen und über große Entfernungen auf. Bei Frequenzen unter 100 Hz ist sie praktisch vernachlässigbar [35]. Dem "Oakland International Airport Master Plan Update" zufolge werden niedrigeren Frequenzen zum dominierenden Klang, da die höheren Frequenzen abgeschwächt werden [9]. Diese Variabilität führt dazu, dass

Schallwellen je nach den vorherrschenden Bedingungen unterschiedlich stark gedämpft werden, wodurch der Schalldruck in der Umgebung abnimmt, und die Lärmbelastung reduziert wird.

Die Absorption wird hauptsächlich durch viskose Verluste und Relaxationsprozesse verursacht. Viskose Verluste entstehen durch die Reibung zwischen den Luftmolekülen, wodurch Wärme erzeugt wird. Relaxationsprozesse beziehen sich darauf, wie Moleküle Schallenergie absorbieren und wieder freisetzen, was zu Interferenzen führen kann [16].

Die Lautstärke nimmt im Freien mit zunehmendem Abstand von der Quelle ab, infolge von Wellenausbreitung, atmosphärischer Absorption und Bodendämpfung [9]. Wenn die Schallwelle sich von der Quelle entfernt, wird die Schallenergie über eine größere Fläche verteilt, was die Schallleistung der Welle verringert. Die sphärische Ausbreitung der Schallwelle reduziert den Lärmpegel um 6 dB pro Verdopplung der Entfernung. Je weiter die Strecke ist, desto größer ist der Einfluss der Atmosphäre und die resultierenden Schwankungen. Atmosphärische Absorption wird ab Entfernungen von mehr als 300 m bedeutsam [9].

2.6.5.2. Wind

Die Schallausbreitung wird wesentlich vom Wind beeinflusst, welcher den natürlichen Luftstrom von Luftmolekülen darstellt und durch seine Geschwindigkeit und Richtung definiert ist [30].

Die Windgeschwindigkeit steigt in der Regel bis zu einer Höhe von 100 Metern an, sofern keine Turbulenzen auftreten. Danach sind die Veränderungen meist geringfügig. Der Wind ist auch nicht auf derselben Höhe konstant – er variiert von Ort zu Ort [35].

Unter verschiedenen Windverhältnissen variiert die Schallausbreitung. Bei kurzen Entfernungen bis zu 50 m hat der Wind einen geringen Einfluss auf den gemessenen Schallpegel. Bei längeren Entfernungen werden die Windeffekte deutlich größer [31]. Windgeschwindigkeitsprofile sind stark abhängig von der Tageszeit aufgrund der Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche, den Wetterbedingungen und der Beschaffenheit der Oberfläche [31].

Über offenem Gelände existieren oft erhebliche vertikale Windgeschwindigkeitsgradienten aufgrund der Reibung zwischen der bewegten Luft und dem Boden. In Bodennähe, wo die Reibung mit der Oberfläche die Luftbewegung hemmt, ist der Wind gewöhnlich langsamer. In größeren Höhen, wo diese Reibung minimal ist, nimmt die Windgeschwindigkeit zu. Diese Unterschiede erzeugen vertikale Windgradienten. Aufwind, bei dem Luft vom Boden wegströmt, bewirkt eine Krümmung der Schallwellen nach oben. Diese Bereiche werden als Schattenzonen bezeichnet. Dadurch wird der Lärm in Bodennähe weniger deutlich wahrgenommen, da der Schall in höhere Luftschichten abgelenkt wird und sich weniger stark auf den Boden ausbreitet. Durch Aufwind kann die Lautstärke um 20 dB oder mehr abnehmen, abhängig von der Windgeschwindigkeit und der Entfernung [31].

Im Fall von Abwind werden die Schallwellen zur Erdoberfläche hin gebrochen, was zu einer Erhöhung des Lärmpegels an entfernten Punkten führt. Dies verschärft die Lärmbelastung und führt zu einer gesteigerten Lärmwahrnehmung über größere Entfernungen. Die Intensität dieses Effekts nimmt mit zunehmender Windstärke, bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit, zu [36].

Die Schallgeschwindigkeit ist relativ zu der des Mediums, durch das sie sich bewegen, und daher ist die relative Geschwindigkeit eine Summe aus Schallgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit [16].

Unter windabgewandten Bedingungen, das heißt, wenn der Wind relativ zur Schallquelle von hinten oder von der Seite weht, ist die Schallgeschwindigkeit höher, während sie unter Gegenwindbedingungen, also auf der Luvseite, langsamer ist. Dies führt dazu, dass Schall unter windabgewandten Bedingungen über größere Entfernungen wahrgenommen werden kann [29].

Schallwellen, die sich gegen den Wind ausbreiten, werden nach oben weg vom Boden gebrochen, was zu einem Absinken des Immissionspegels führt [35]. Schallwellen, die sich in die gleiche Richtung wie der Wind ausbreiten, werden hingegen zur Erde gebogen. Als Folge wird der Fluglärm in der Nähe des Bodens verstärkt und somit über weitere Distanzen besser wahrgenommen [37].

Um maximalen Auftrieb zu erreichen, starten und landen Flugzeuge grundsätzlich gegen den Wind [1]. Dies dient nicht nur der Flugsicherheit, sondern trägt auch zur Lärminderung bei. Beim Starten gegen den Wind kann das Flugzeug steiler und früher aufsteigen, was zu einer schnelleren Reduzierung des Fluglärms am Boden führt. Der Gegenwind ermöglicht es dem Flugzeug, rascher an Höhe zu gewinnen und den Abstand zum Erdboden zu vergrößern, was eine deutliche Verringerung des am Boden wahrgenommenen Fluglärms bewirkt [1].

Auch bei Landungen wird der Wind genutzt, um die Lärmentwicklung zu minimieren [38]. Durch die Nutzung des Windes kann die Verzögerungsstrecke verkürzt werden, und die Flugzeuge können im Gleitflug einschweben, ohne vorzeitig Landeklappen und Fahrwerke ausfahren zu müssen. Dadurch wird der Fluglärm, der am Boden wahrgenommen wird, weiter reduziert und trägt so zu einer verbesserten Lebensqualität für Anwohner bei [4].

2.6.5.3. Temperatur

Die Temperatur der Luft spielt eine entscheidende Rolle bei der Ausbreitung von Fluglärm. Ihre Auswirkungen auf den Schall sind vielfältig und sollen im Folgenden genauer erläutert werden.

Dem Flughafen Graz zufolge ist die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur abhängig [30]. Bei höheren Temperaturen verfügen die Luftmoleküle über mehr Energie und schwingen lebhafter, wodurch sich die Schallwellen schneller bewegen können. Daher steigt die Schallgeschwindigkeit mit höheren Temperaturen und sinkt bei niedrigeren Temperaturen. Diese Variationen haben direkte Auswirkungen auf die Ausbreitung von Schallwellen in der Luft. Höhere Schallgeschwindigkeiten können zu einer größeren Reichweite des Schalls und somit zu einer erhöhten Lärmbelastung in der Umgebung führen [30]. Grundsätzlich ist die Schallgeschwindigkeit in Luft proportional zur Quadratwurzel der absoluten Temperatur [35]. Da die Temperatur insbesondere mit der Höhe variiert, ist die Schallgeschwindigkeit im Raum fast nie konstant [10].

Während des Tages empfängt die Erde Strahlung von der Sonne und gibt während der Nacht Wärme in Form von Strahlung ab. Eine konstante Temperatur mit der Höhe hat keinen direkten Einfluss auf die Schallübertragung [31]. Die Schallwellen breiten sich von der Quelle in alle Richtungen aus. Jedoch können Temperaturgradienten, ähnlich wie Windgradienten, zu Brechungsphänomenen führen. Ein negativer Temperaturgradient tritt häufig an sonnenreichen Tagen auf, wenn die intensive Sonneneinstrahlung zu erhöhten Oberflächentemperaturen führt. Nimmt die Temperatur mit der Höhe ab, nimmt auch die Schallgeschwindigkeit nach oben hin ab und die Schallwellen werden von der Quelle aus in alle Richtungen nach oben gebrochen. Dies kann zur Bildung einer kreisförmigen Schattenzone führen, was die Hörbarkeit verringern kann [31].

Das umgekehrte Szenario tritt oft nachts auf, wenn ein positiver Gradient üblich ist [31]. Unter bestimmten Bedingungen, wie zum Beispiel an klaren Nächten mit starker Abkühlung der Erdoberfläche, werden Schallstrahlen nach unten gebrochen. Dies geschieht, wenn die Temperatur in höheren Luftschichten wärmer ist als die Temperatur in Bodennähe. Inversionen können in den frühen Morgenstunden vor Sonnenaufgang besonders ausgeprägt sein, wenn der Boden am kältesten ist und minimal oder kein Wind vorhanden ist, um Turbulenzen zu verursachen und die kalte Oberflächenluft mit der wärmeren Luft darüber zu vermischen. Aber auch nach starken Regenfällen und über Schneedecken steigt die Temperatur oft mit der Höhe. Erwärmt sich der Boden durch Sonneneinstrahlung, verschwindet die Inversion allmählich.

Inversionseffekte sind auf kurzen Strecken vernachlässigbar, können aber bei Entfernungen über einen Kilometer mehrere Dezibel betragen [31]. Dies begünstigt eine gesteigerte Wahrnehmung von Lärm während der Nacht, da dieser tendenziell entlang der Bodenebene konzentriert wird, anstatt nach oben zu strahlen [16].

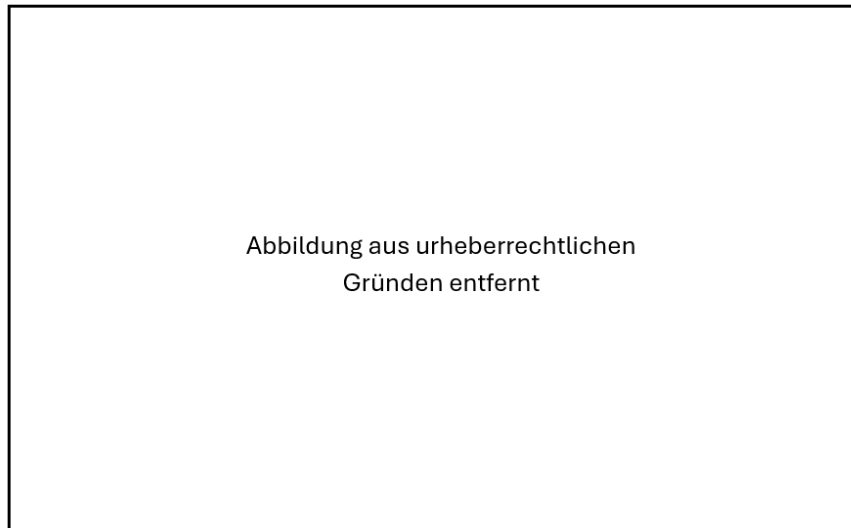


Abbildung aus urheberrechtlichen
Gründen entfernt

Abbildung 6 Brechung von Schall mit Temperaturgradient [9]

Die eben erklärten Effekte können auch parallel auftreten und komplexe Muster erzeugen. Es kann zu einer Schallfokussierung in lokalen Bereichen kommen, wie in Abbildung 7 dargestellt. Beispielsweise, wenn die Temperaturänderung mit der Höhe zunächst negativ ist und dann in größeren Höhen wieder zunimmt. Abhängig vom Ausmaß der Fokussierung könnten die Schallpegel unter dieser Bedingung 15 bis 20 dB höher sein als bei gleichmäßiger geometrischer Ausbreitung ohne zusätzliche Dämpfung oder Verstärkung durch Brechungseffekte und mehr als 20 dB höher als bei Aufwärtsbrechung [8].

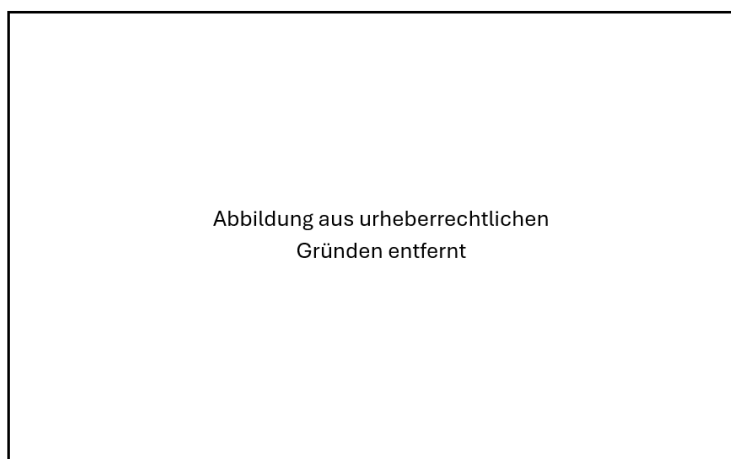


Abbildung aus urheberrechtlichen
Gründen entfernt

Abbildung 7 Schallbrechung unter komplexen Bedingungen [8]

Die Auswirkungen von Temperaturgradienten auf die Lärmbelastung können variieren und hängen von verschiedenen Faktoren ab. Beispielsweise können Temperaturgradienten in städtischen Gebieten aufgrund von Gebäuden, Straßen und anderen Strukturen verstärkt werden, was zu einer intensiveren Brechung und Reflexion von Schallwellen führen kann. In offenen, ländlichen Gebieten sind Temperaturgradienten aufgrund des Fehlens solcher Strukturen weniger ausgeprägt, wodurch der Einfluss auf die Schallausbreitung geringer ist. Die

spezifischen Auswirkungen variieren je nach den lokalen Gegebenheiten und können daher in jedem Fall unterschiedlich ausfallen [36].

Laut Angaben des Flughafens Graz beeinflusst die Umgebungstemperatur auch die Steigleistung und somit die Flugbahn von Flugzeugen [30]. Verschiedene Temperaturbedingungen können die Flugleistung verändern, was zu unterschiedlichen Flugbahnen und somit zu variierenden Lärmbelastungen in verschiedenen Gebieten führen kann [30].

2.6.5.4. Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchtigkeit ist das Verhältnis des aktuellen Wasserdampfgehalts in der Luft zum maximal möglichen Wasserdampfgehalt bei einer bestimmten Temperatur. Mit steigender Temperatur nimmt die Menge an Wasserdampf, die in der Luft aufgenommen werden kann, zu.

Laut dem San Diego International Airport absorbieren Wasserpartikel in der Luft Schallenergie, was dazu führt, dass die Schallintensität mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle abnimmt. Dies führt zu einer Erhöhung der Dämpfung bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit. Die Dämpfung des Schalls variiert je nach Frequenz. Höhere Frequenzen werden stärker gedämpft als niedrigere Frequenzen [7].

Wolken entstehen durch Kondensation von Wasserdampf in der Atmosphäre und sind ein sichtbares Zeichen für hohe relative Luftfeuchtigkeit. Wie Toronto Person Airport erklärt, können Wolken Schallwellen auf verschiedene Weisen beeinflussen. Je nach Dicke und Höhe einer Wolke kann Flugzeuglärm vom Boden aus nach oben in den Himmel und dann von der Wolke zurück zum Boden reflektiert werden, was einen Echoeffekt erzeugt. Obwohl das Geräusch beim zweiten Mal möglicherweise nicht so intensiv ist, kann es den ursprünglichen Klang verstärken [2].

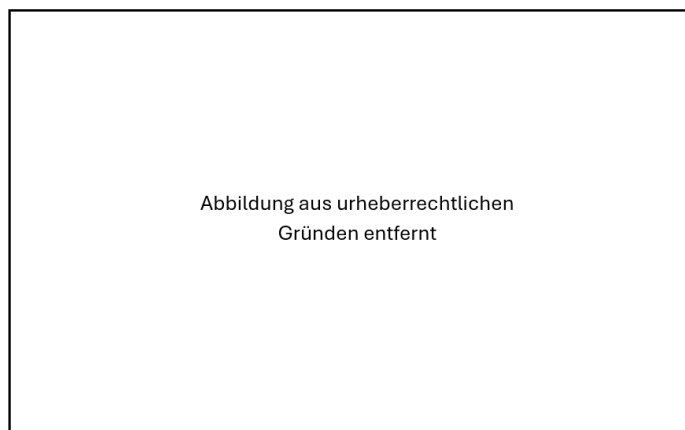


Abbildung 8 Einfluss von Wolken [2]

Weiterhin beeinflusst Luftfeuchtigkeit die Fähigkeit eines Flugzeugs, an Höhe zu gewinnen. Wie das Australian Government - Department of Infrastructure, Transport, Regional Development and Communications beschreibt, kann die Luftfeuchtigkeit unter bestimmten Bedingungen zu einem bedeutenden Faktor für die Flugzeugleistung werden [39]. Unter bestimmten Bedingungen kann sie jedoch zu einem bedeutenden Faktor für dessen Leistung werden [40]. Da Wasserdampf leichter als Luft ist, führt ein höherer Wassergehalt zu einer geringeren Luftdichte, was wiederum die Steigleistung beeinträchtigen kann. Dies könnte zu längeren Start- und Landestrecken führen, insbesondere in Flughafennähe, und somit möglicherweise zu einer Zunahme des Fluglärms beitragen [40].

2.6.5.5. Luftdruck

Der Luftdruck ist ein wesentlicher meteorologischer Faktor, der das Wettergeschehen beeinflusst und damit Auswirkung auf die Ausbreitung von Schallwellen hat. Luftdruck ist definiert als das Gewicht der Luftsäule pro Flächeneinheit, das von der Erdoberfläche bis zur Obergrenze der Atmosphäre reicht [41]. Kraus und Ebel beschreiben, dass hoher Luftdruck in der Regel zu einer stabilen und klaren Atmosphäre führt, was eine effizientere Schallausbreitung ermöglicht. Unter diesen Bedingungen können Schallwellen über größere Distanzen ohne signifikante Abschwächung übertragen werden, was bedeutet, dass Flugzeuglärm in Hochdruckgebieten weiter und deutlicher wahrgenommen wird [41].

Niedriger Luftdruck hingegen ist oft mit turbulenteren Wetterbedingungen und höherer Luftfeuchtigkeit verbunden. Diese Bedingungen können die Ausbreitung von Schallwellen stören und zu einer stärkeren Dämpfung führen. Laut Kraus und Ebel streuen Turbulenzen und variierende Luftdichten die Schallwellen, wodurch die Intensität des Flugzeuglärms schneller abnimmt [41].

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Brechung von Schallwellen. Wie Attenborough in seinem Werk „Sound Propagation in the Atmosphere“ erklärt, wird die Schallgeschwindigkeit durch die Dichte und Temperatur der Luft beeinflusst, welche wiederum stark vom Luftdruck abhängen [36]. Schallwellen neigen dazu, sich in der Richtung von niedrigerem zu höherem Luftdruck zu biegen. Dies bedeutet, dass unter Hochdruckbedingungen Schallwellen nach unten zur Erdoberfläche gebogen werden, was zu einer erhöhten Schallintensität am Boden führt. Im Gegensatz dazu werden Schallwellen bei niedrigem Luftdruck nach oben gebrochen, was die Lärmbelastung am Boden reduziert [36].

Zusätzlich beeinflusst der Luftdruck die physikalischen Eigenschaften der Luft und somit die Leistung der Flugzeuge. Hoher Luftdruck erhöht die Luftdichte, was den Auftrieb und die Effizienz der Flugzeugtriebwerke verbessert. Dies führt zu kürzeren Start- und Landestrecken und kann somit die Lärmbelastung in der Nähe von Flughäfen verringern, da Flugzeuge schneller an Höhe gewinnen und den Lärmpegel am Boden reduziert [40].

2.6.5.6. Turbulenzen

Turbulenzen in der Atmosphäre sind ein allgegenwärtiger Zustand. Sie entstehen um ein vorhandenes dynamisch oder thermisch Ungleichgewicht durch Wirbelbildung oder -zerfall auszugleichen [42].

Über rauen Bodenoberflächen ist die Atmosphäre größtenteils turbulent, was zu Schwankungen in den Windströmungen führt und somit zufällige Störungen des Luftdrucks und der Dichte verursacht. Laut Hannah entstehen Turbulenzen in der Atmosphäre, die Schallwellen beeinflussen, indem sie einen Teil der Schallenergie streuen und von der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung ablenken [10].

Diese turbulenten Bewegungen in der Luft führen dazu, dass der Schallstrahl Energie verliert und sich ausbreitet. Die Dämpfung des Schalls variiert dabei je nach Höhe der Schallquelle. Untersuchungen zeigen, dass die Streuungsabschwächung abnimmt, wenn sich die Höhe der Schallquelle zunimmt [8].

Ein weiterer bedeutender Effekt turbulenter Bewegungen in der Atmosphäre betrifft die Bildung von sogenannten Schattenzonen, in denen der Schall stark gedämpft wird [8]. Theoretisch sollten diese Zonen klare Grenzen haben, innerhalb derer der Schall deutlich schwächer ist. In der Praxis wird jedoch ein Teil des Schalls durch die Turbulenzen über diese Grenzen hinaus gestreut, was

zu einer Begrenzung der maximalen Dämpfung führt. Saurenman et al. erläutert weiter, dass Turbulenzen zwar Schwankungen des Schallpegels verursachen, jedoch nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Schallpegel im Vergleich zu nicht-turbulenten Bedingungen führen [8].

2.7. Schall messen oder berechnen?

Die Frage, ob Schall gemessen oder berechnet werden soll, lässt sich nicht eindeutig beantworten. Messungen bieten eine komplexe und empirische Methode zur Erfassung von Schallpegeln in einer realen Umgebung. Dies ermöglicht eine genaue Bestimmung des tatsächlichen Schallpegels an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit und berücksichtigt verschiedene Quellen und Einflussfaktoren wie Geländemerkmale, Wetterbedingungen und Flugzeugtypen. Trotz des Einsatzes neuester Technologien gibt es jedoch Grenzen der Genauigkeit. Eine Messung auf das Komma genau ist derzeit nicht möglich. Laut einem Gutachten der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) ist unter normgerechten Messbedingungen für Fluglärm eine Unsicherheit in der Größenordnung von rund 2 dB unvermeidbar [43]. Zudem sind Messungen kostspielig, da sie technisch und logistisch aufwendige Verfahren erfordern [43].

Auf der anderen Seite bieten Berechnungen eine Möglichkeit, Schallpegel vorherzusagen, ohne tatsächliche Messungen durchführen zu müssen. Dies ist besonders nützlich für die Bewertung von Lärmbelastungen in verschiedenen Szenarien, wie bei der Planung von Flughafeninfrastruktur oder der Entwicklung von Lärmschutzmaßnahmen [44]. Berechnungen basieren auf Modellen und Annahmen über Schallquellen, Ausbreitungswege und Umgebungsfaktoren und bieten eine effiziente Möglichkeit, verschiedene Szenarien zu analysieren und potenzielle Auswirkungen zu bewerten. Allerdings erfordern sie detaillierte Informationen zu den startenden und landenden Maschinen, einschließlich Anzahl, Größe, Gewicht und technischer Ausstattung der Flugzeuge sowie zur Art des Betriebs, wie Flughöhe und Flugrouten [44]. Diese Daten werden in mathematische Modelle eingespeist und führen zu sogenannten Isophonen, graphischen Darstellungen der Lärmbelastung als Linien. In Deutschland ist hierfür die „Anleitung zur Berechnung von Fluglärm“ (AzB) nach dem Fluglärmgesetz anzuwenden, die aus einer Berechnungsvorschrift und den Daten zur Lärmentwicklung bei bestimmten Flugzeugtypen besteht. Das Datenerfassungssystem, das die Grundlage der AzB bildet, umfasst Informationen zum Flughafen, den Start- und Landebahnen sowie den Flugbewegungen und wird gemäß der „Anleitung zur Datenerfassung“ zusammengestellt [44].

Oft ist es sinnvoll, Messungen und Berechnungen zu kombinieren, um ein umfassendes Verständnis zu erlangen. Messungen liefern konkrete Daten zur Bestätigung von Berechnungsmodellen und zur Überprüfung von Prognosen. Berechnungen kommen besonders dann zum Einsatz, wenn Messungen schwierig oder kostspielig sind oder um zukünftige Lärmszenarien zu modellieren und vorherzusagen. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass Berechnungen auf Modellannahmen basieren und nur ein annäherndes Bild der Realität liefern können. Die Berechnungen mit der AzB sind generell konservativ ausgelegt, was bedeutet, dass der Fluglärm eher über- als unterschätzt wird. Die Qualität der Ergebnisse hängt jedoch entscheidend von der Qualität und Aktualität der verwendeten Eingangsdaten ab [44].

Die Wahl zwischen Messungen und Berechnungen hängt von den spezifischen Anforderungen einer Studie oder Bewertung sowie von den verfügbaren Ressourcen und der erforderlichen Genauigkeit ab. Oft ergänzen sich Messungen und Berechnungen gegenseitig und werden gemeinsam verwendet, um ein umfassendes Bild des Fluglärms zu erhalten [43, 44].

2.8. Rechtliche Rahmenbedingungen

Es gibt eine Vielzahl von rechtlichen Regelungen auf EU-, nationaler und Landesebene, die den Umgang mit Fluglärm regeln. Im Folgenden soll auf einige ausgewählte rechtliche Rahmenbedingungen eingegangen werden.

2.8.1. Bundesimmissionsschutzgesetz

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) ist ein grundlegendes Umweltschutzgesetz in Deutschland, das den Schutz von Menschen, Tieren und der Umwelt vor schädlichen Umweltbelastungen gewährleistet. Es regelt eine Vielzahl von Aspekten des Immissionsschutzes, einschließlich Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzung sowie Lärm. Unternehmen und Anlagenbetreiber müssen Genehmigungen beantragen, um sicherzustellen, dass ihre Aktivitäten den Umweltstandards entsprechen. Das BImSchG legt Grenzwerte für Lärmemissionen fest und fordert Maßnahmen zur Lärminderung und -vermeidung. Zudem umfasst das Gesetz Mechanismen zur Überwachung und Durchsetzung der Immissionsschutzbestimmungen, um sicherzustellen, dass die Umweltauflagen eingehalten werden [45].

2.8.2. Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm (FluLärmG)

Das Fluglärmgesetz (FluLärmG) ist eine bedeutende rechtliche Maßnahme in Deutschland, die darauf abzielt, die Bevölkerung in der Nähe von Flughäfen vor den Belastungen durch Fluglärm zu schützen. Seit seiner Einführung am 31. Oktober 2007 hat es den Fluglärmschutz grundlegend modernisiert und die legitimen Lärmschutzinteressen der Anwohner besser beachtet. Das Gesetz berücksichtigt aktuelle Erkenntnisse aus der Lärmwirkungsforschung sowie betriebliche Aspekte der Luftfahrtindustrie.

Wie man weiter im Lärmaktionsplan der Regierung von Oberbayern für den Großflughafen München nachlesen kann ist sein Hauptziel, durch bauliche Nutzungsbeschränkungen und baulichen Schallschutz in der Umgebung von Flughäfen die Allgemeinheit und die Nachbarschaft vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen durch Fluglärm zu schützen. Zu den Kernpunkten des FluLärmG gehören die Ausweisung von Schutzzonen, die Erstattung von baulichen Schallschutzmaßnahmen, Entschädigung für Beeinträchtigungen des Außenwohnbereichs, Bauverbote und bauliche Nutzungsbeschränkungen.

In Anbetracht seiner Rolle als bedeutendes Luftverkehrsdrehkreuz unterliegt der Flughafen München den gesetzlichen Bestimmungen des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm, das nicht nur die Betriebsabläufe und die bauliche Entwicklung des Flughafens regelt, sondern auch den Schutz der umliegenden Gemeinden vor den Auswirkungen von Fluglärm gewährleistet [6].

2.8.3. Richtlinie 2002/49/EG – Umgebungslärmrichtlinie

Die Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 legt ein EU-weites Rahmenkonzept zur Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm fest. Sie definiert Anforderungen an die Erstellung von Lärmkarten und Aktionsplänen zur Lärminderung. Gemäß dieser Richtlinie sind die Mitgliedsstaaten verpflichtet, Lärmkarten zu erstellen, die Ergebnisse öffentlich zugänglich zu machen, Aktionspläne für problematische Lärmsituationen zu entwickeln und die EU-Kommission über die Ergebnisse zu informieren. Die Richtlinie betrifft städtische Gebiete mit mehr als 100.000 Einwohnern sowie Hauptverkehrsstraßen, Hauptbahnen und Hauptflughäfen. Ihr Ziel ist es, die Bevölkerung vor den gesundheitlichen Folgen von Umgebungslärm zu schützen und die Lebensqualität in städtischen Gebieten zu verbessern. Die Kartierung des Flughafens München fällt in den Zuständigkeitsbereich des Bayerischen

Landesamts für Umwelt, wie man im Lärmaktionsplan der Flughafen München GmbH nachlesen kann [1].

2.8.4. Luftverkehrsgesetz (LuftVG)

Das Luftverkehrsgesetz bildet die Grundlage für den rechtlichen Schutz vor Fluglärm und die Regulierung des Luftverkehrs. Es legt fest, dass vor der Genehmigung eines Flugplatzes angemessene Maßnahmen zum Schutz vor Fluglärm geprüft werden müssen. Zudem müssen bei der Planung von Flughäfen die geltenden Lärmschutzstandards des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm berücksichtigt werden. Des Weiteren sieht das LuftVG vor, dass Entgelte an Verkehrsflughäfen nach Lärm- und Emissionsgesichtspunkten differenziert werden müssen, um finanzielle Anreize für eine Reduzierung von Fluglärm zu schaffen. Darüber hinaus wird eine Kommission gebildet, die Maßnahmen zum Schutz vor Fluglärm und Luftverunreinigungen vorschlagen kann und die zuständigen Behörden berät. Wie man im Lärmaktionsplan der Regierung von Oberbayern für den Großflughafen München nachlesen kann, sind diese Bestimmungen von großer Bedeutung für die praktische Umsetzung der Lärmschutzmaßnahmen [6].

3. Flughafen München

3.1. Örtliche Situation

Die geografische Umgebung des Flughafens München vereint sowohl städtische als auch ländliche Gebiete. Wohnsiedlungen und landwirtschaftliche Flächen liegen unmittelbar neben dem Flughafengelände, das von kleinen Gemeinden sowie Hügeln und Wäldern umgeben ist. Als Deutschlands zweitgrößter Flughafen und ein bedeutendes Luftverkehrsdrehkreuz von internationalem Rang verfügt der Flughafen München über zwei parallele Start- und Landebahnen von jeweils 4.000 Metern Länge und zwei Terminals sowie seit 2016 ein Satellitengebäude zur Passagierabfertigung [6].

Der Flughafen München liegt ungefähr 28,5 Kilometer vom Stadtzentrum Münchens entfernt. Er befindet sich in der Nähe der beiden Städte Erding und Freising und wurde 1992 eröffnet. Im Vergleich zu anderen großen Flughäfen in Deutschland ist die Lärmbelastung für die Anwohner in München vergleichsweise gering. Die Gesamtfläche des Flughafens beträgt derzeit etwa 1.600 Hektar, wovon zwei Drittel als Grünfläche ausgewiesen sind [6].

Die Start- und Landebahnen des Flughafens sind so angelegt, dass sie unabhängig voneinander betrieben werden können. Die Gesamtkapazität beider Bahnen liegt bei 90 planbaren Bewegungen pro Stunde. Die Flugrouten werden durch Standardanflug- und -abflugstrecken bestimmt, wobei abfliegende Luftfahrzeuge grundsätzlich einer Standardabflugstrecke folgen. Anflüge erfolgen üblicherweise im Transitionsverfahren, bei dem ankommende Luftfahrzeuge zunächst einen Gegenanflug absolvieren, bevor sie den Endanflugkurs zur Landung einschlagen. Die vorhandenen Start- und Landebahnen werden durch ihre Bezeichnungen 08R/26L und 08L/26R identifiziert. Diese Zahlen stehen für die geografische Ausrichtung der Bahnen in Grad, wobei 08R/26L für eine Bahn steht, die in Richtung 080 Grad beim Starten und in Richtung 260 Grad beim Landen genutzt wird, während 08L/26R das Gegenteil darstellt [6].

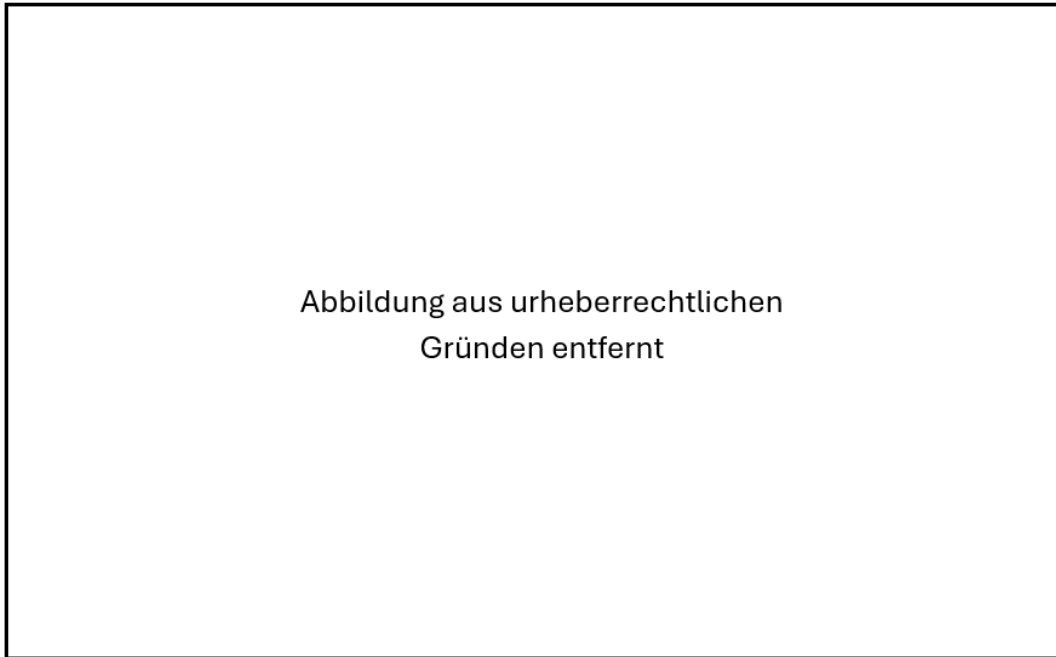


Abbildung 9 Umfeld des Flughafens München [6]

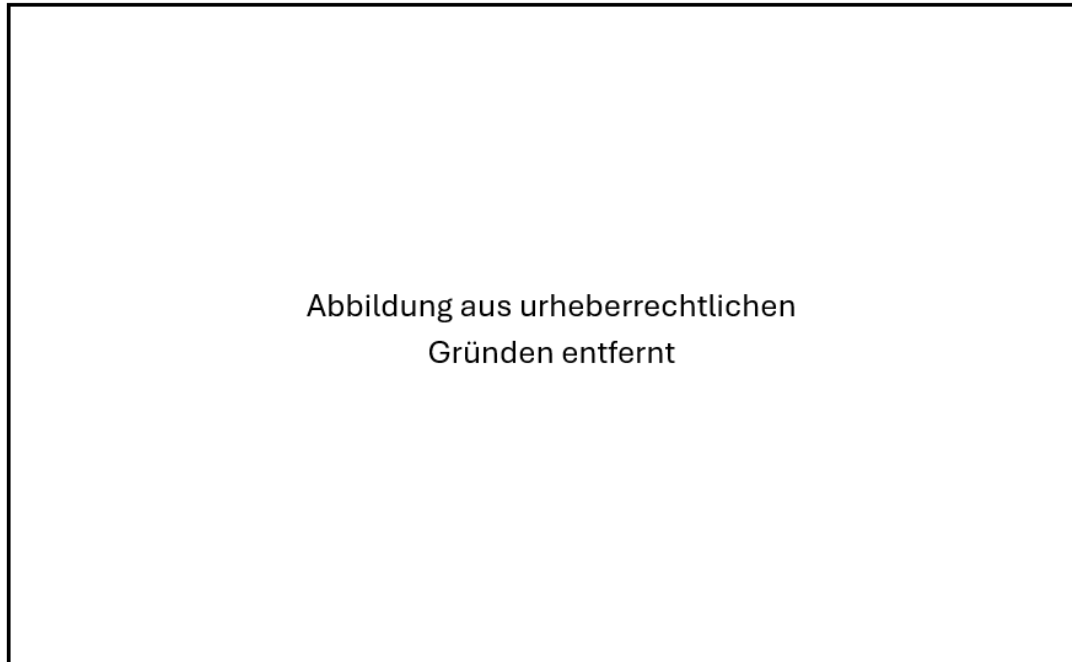


Abbildung 10 Bestandsplan des Flughafens München [6]

3.2. Verkehrszahlen des Flughafens

Seit seiner Gründung im Jahr 1992 hat sich das Verkehrsaufkommen exponentiell entwickelt, wobei in etwa eine Steigerung, um das Vierfache zu verzeichnen ist. Den Verkehrszahlen, die der Flughafen München auf seiner Website veröffentlicht zufolge, wurde der Höhepunkt dieser Entwicklung im Jahr 2019 mit einer Beförderung von 47,9 Millionen gewerblichen Passagieren erreicht. Die Auswirkungen der globalen COVID-Pandemie führten in den darauffolgenden Jahren zu einem deutlichen Rückgang dieser Zahlen. Jedoch ist seit 2020 eine erneute Zunahme zu verzeichnen, bei der die Anzahl der Passagiere wieder ansteigt und im Jahr 2023 37 Millionen und etwa 302.000 Flugbewegungen erreicht hat. [46]

Bei der Analyse der Zahlen für Januar und Februar 2024 zeigt sich eine fortgesetzte positive Entwicklungstendenz. Dennoch liegen die monatlichen Zahlen im Durchschnitt um 19,5% unter den Werten von 2019. [47]

3.3. Lärmaktionsplan

Gemäß den rechtlichen Vorgaben des § 47d Bundes-Immissionsschutzgesetz sind für Großflughäfen mit einem Verkehrsaufkommen von über 50.000 Bewegungen pro Jahr Lärmaktionspläne aufzustellen, um Lärmprobleme und -auswirkungen zu regulieren. Wesentliche Element eines Lärmaktionsplans sind neben der Darstellung der aktuellen Lärmbelastung auch die Identifizierung von Maßnahmen zur Reduzierung des Lärms.

Die Beteiligung und Information der Öffentlichkeit sind integraler Bestandteil bei der Erstellung von Lärmaktionsplänen [6].

Am Flughafen München resultiert der Hauptteil des Lärms aus dem Starten und Landen von Flugzeugen. Zusätzlich entstehen auf dem Flughafengelände Geräusche durch den Bodenbetrieb wie Roll- und Schleppvorgänge. Außerhalb des Luftverkehrs tragen auch flughafenbedingter Straßenverkehrslärm zur Gesamtlärmbelastung bei. Die Erstellung von Lärmkarten erfolgt jedoch separat für jede Lärmquelle [6].

Für die Erstellung des Lärmaktionsplan für den Flughafen ist die Regierung von Oberbayern verantwortlich. Zuständig für die Ausarbeitung dieser Karten ist das Bayerische Landesamt für Umwelt. Die Umsetzung von Maßnahmen obliegt unterschiedlichen für den Flughafen zuständigen Behörden und Institutionen. [6]

3.4. Ergebnisse der Lärmkartierung

In Deutschland war die vorläufige Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Flugplätzen, bekannt als VBUF, für die Ermittlung des Umgebungslärms, der von Großflughäfen ausgeht verbindlich vorgeschrieben [6]. Weiterhin wird im Lärmaktionsplan der Regierung von Oberbayern für den Großflughafen München erläutert, dass ein Fluglärmerechnungsmodell gemäß VBUF eine umfassende Beschreibung des Flugbetriebs sowie eine Klassifizierung der Flugzeugtypen mit den entsprechenden akustischen und flugtechnischen Daten umfasst. Dabei werden die Lärmemissionen in der Umgebung eines Flughafens unter Berücksichtigung verschiedener Parameter wie Geräuschkdauer und Entfernung rechnerisch ermittelt. Die Ergebnisse sind Lärmkarten, die flächenhafte Isophonen verwenden, um den Lärmpegel für 24 Stunden (L_{DEN}) und für die Nacht (L_{Night}) sowie statistische Informationen zur Lärmbetroffenheit anzuzeigen. Isophonen sind Linien gleichen Schalldrucks. Die Isophonen werden auf den Karten durch farbige Flächen dargestellt, die 5-dB-Klassen repräsentieren [6].

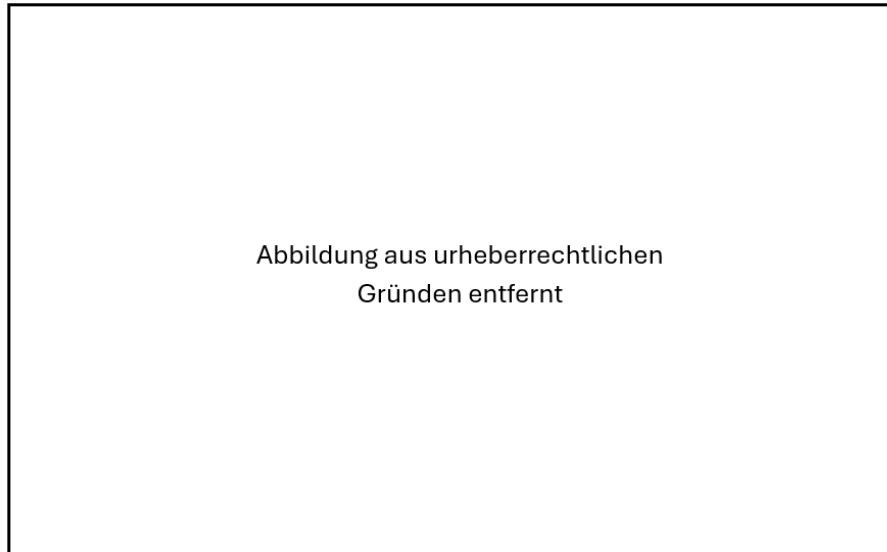


Abbildung 11 Lärmkarte L_{DEN} für den Großflughafen München [Einheit: dB(A)] [6]

3.5. Lärminderungsmaßnahmen

Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) verfolgt eine strategische und systematische Herangehensweise zum Management von Fluglärm, die in vier Hauptziele unterteilt ist:

1. Verminderung von Lärm direkt an der Quelle
2. Planung und Verwaltung von Flächennutzung
3. Implementierung lärmreduzierender Betriebsverfahren
4. Anwendung von Betriebsbeschränkungen [6]

Am Flughafen München wurden bereits zahlreiche Maßnahmen zum Schutz vor Fluglärm umgesetzt. Einige sollen im Folgenden näher beschrieben werden.

3.5.1. Nachtflugregelung

Die Nachtflugregelung für den Flughafen München wurde am 23. März 2001 neu verabschiedet, um den nächtlichen Flugverkehr, insbesondere innerhalb der Kernzeit von 00:00 bis 05:00 Uhr, zu begrenzen [6]. Wie im Lärmaktionsplan der Regierung von Oberbayern für den Großflughafen München nachzulesen ist, gelten folgende Bestimmungen:

In der Zeit von 22:00 bis 23:30 Uhr sowie von 05:00 bis 06:00 Uhr sind jeweils maximal 28 planmäßige Starts und Landungen gestattet. Darüber hinaus sind unter bestimmten Voraussetzungen verspätete Starts und Landungen bis 24:00 Uhr sowie vorgezogene Landungen zwischen 05:00 und 06:00 Uhr erlaubt.

Flüge von Luftfahrtunternehmen mit Wartungsschwerpunkt am Flughafen München sind zu festgelegten Zeiten zulässig. Planmäßige Flüge, deren mittlerer Schallpegel an bestimmten Messstellen unter 75 dB(A) liegt, dürfen ebenfalls zu festgelegten Zeiten durchgeführt werden. Post- und Vermessungsflüge sind während der gesamten Nacht gestattet.

Für Not- oder Katastrophenflüge sowie Flüge von besonderem öffentlichem Interesse, die vom zuständigen Staatsministerium genehmigt wurden, bestehen Ausnahmen.

Zusätzlich müssen während der Nacht Lärm- und Flächenkontingente eingehalten werden, um die Lärmauswirkungen zu minimieren. Das maximale durchschnittliche Lärmvolumen von $N_{eq}=105$ dB(A) darf pro Nacht nicht überschritten werden. Daneben bestehen weitere Kontingentgrenzen, deren Ziel es ist, die nächtlichen Lärmimmissionen im Umfeld des Flughafens auf ein festgelegtes Maximum zu begrenzen [6].

3.5.2. Entgeltsystem: lärmabhängige Landeentgelte, Nachtzuschläge

Eine weitere Maßnahme des Flughafens München zur Reduzierung des Fluglärms ist die Einführung eines Entgeltsystems, das lärmabhängige Start- und Landeentgelte und Nachtzuschläge umfasst [6]. Die Entgeltordnung sieht für alle Flugzeuge, die am Flughafen starten oder landen, lärmabhängige Start- und Landeentgelte vor. Dabei richtet sich die Höhe des Entgelts nach der eingesetzten Flugzeugflotte. Ziel ist es, den Einsatz moderner, leiserer Flugzeuge attraktiver zu machen. Wie im Lärmaktionsplan der Regierung Oberbayern beschrieben, basiert diese Maßnahme auf der Entgeltordnung des Flughafens München in Verbindung mit dem Luftverkehrsgesetz (LuftVG) [6].

Früher wurden die Entgelte auf Basis von 11 Lärmklassen erhoben. Seit dem 1. Juni 2021 wurde die Entgeltordnung weiterentwickelt und die Anzahl der Lärmklassen auf 13 erhöht. Dies ermöglicht eine präzisere Unterscheidung zwischen modernen, leiseren Flugzeugtypen und lärmintensiveren Modellen. Jedes Luftfahrzeug wird einer bestimmten Lärmklasse zugeordnet, basierend auf den durchschnittlichen Lärmpegeln bei Starts und Landungen. Weiterhin variieren die Lärmgebühren je nach Tageszeit. In der Nacht werden höhere Zuschläge erhoben, um die Anzahl der Flüge zu dieser Zeit zu verringern und die Lärmbelastung zu minimieren [6].

3.5.3. Fluglärmüberwachung und -messungen

Die Fluglärmüberwachung am Flughafen zielt darauf ab, die aktuelle Fluglärmumgebung zu erfassen, transparent zu machen und Lösungsansätze zur Lärmreduzierung zu entwickeln. Gemäß den Vorschriften des Luftrechts und behördlicher Auflagen ist jeder Verkehrsflughafen verpflichtet, Fluglärm zu messen [6].

Wie weiter im Lärmaktionsplan der Regierung von Niederbayern für den Großflughafen München beschrieben betreibt die Flughafen München GmbH 16 feste Messstationen entlang der Start- und Landebahnen. Deren Standorte wurden in Zusammenarbeit mit den Genehmigungsbehörden und der Fluglärmkommission festgelegt. Diese Stationen liefern vorwiegend Daten zur aktuellen Fluglärmexposition in der Nähe von veröffentlichten Flugrouten oder betroffenen Gemeinden. Sie dienen als Grundlage für veröffentlichte Lärmberichte und ermöglichen eine Dokumentation der Fluglärmentwicklung für die Fluglärmkommission. Zusätzlich können sie dazu verwendet werden, die Wirksamkeit neuer Flugverfahren zu überprüfen.

Die FMG führt auf Anfrage der Gemeinden auch Messungen mit mobilen Stationen in spezifischen Gebieten durch, um dortige Lärmsituationen zu erfassen. Die Ergebnisse werden den betreffenden Gemeinden und der Fluglärmkommission zur Verfügung gestellt.

Die Einrichtung und der Betrieb der Messstationen erfolgen gemäß den Vorgaben des luftrechtlichen Genehmigungsbescheids und des Luftverkehrsgesetzes. Die Fluglärmüberwachung läuft seit der Eröffnung des Flughafens gemäß den Anforderungen der behördlichen Genehmigung vom 09.05.1974 [6].

Die Messstellen erfassen kontinuierlich Lärmpegelwerte im Sekundentakt, die zur Erstellung von Pegelzeitverläufen genutzt werden. Zur Identifizierung von Fluglärmereignissen werden Parameter zur Fluglärmernennung verwendet. Zugleich ermöglicht dieses Verfahren eine Filterung potenzieller Fremdgeräusche.

Die erfassten Messwerte und Fluglärmereignisse werden den entsprechenden Flugbewegungen zugeordnet. Seit April 2002 werden dazu die Radardaten der DFS verwendet, um eine präzise Zuordnung und eine hohe automatische Korrelationsrate zu gewährleisten. Um eine Verfälschung der Ergebnisse zu verhindern, werden Extrembedingungen wie starke Windgeschwindigkeiten während der Messungen berücksichtigt. Hierfür werden zeitgleich meteorologische Daten herangezogen. Fluglärmereignisse, die unter solchen Bedingungen auftreten, fließen nicht in die statistischen Auswertungen des Flughafens ein [6].

Nach einer abschließenden manuellen Prüfung jedes Ereignisses werden die akustischen Eigenschaften wie der Dauerschallpegel berechnet. Diese Daten werden zusammen mit allen akustischen und meteorologischen Mess- und Kennwerten für weitere Analysen gespeichert. Diese qualitätsgesicherten Daten bilden die Grundlage für die Berichterstattung an die Fluglärmkommission sowie für die regelmäßige Veröffentlichung von Immissionsberichten. Zudem werden sie zur Festlegung lärmabhängiger Start- und Landeentgelte verwendet und dienen zur Bearbeitung von Beschwerden über Fluglärm. [1]

4. Datenanalyse

4.1. Datenquelle

Die primäre Datenquelle sind die von der Flughafen München GmbH bereitgestellten Messdaten zu Fluglärm, welche von den Messstationen Achering, Attaching, Eitting, Hallbergmoos, Pulling und Schwaig rund um den Flughafen erfasst werden.

Bei der Auswahl der Pegel für die Analyse in Zusammenhang mit Wetterbedingungen rund um den Flughafen München wurde versucht, eine geographisch vielfältige Verteilung der Messstationen zu gewährleisten. Die Pegel liegen in verschiedenen Himmelsrichtungen um den Flughafen verteilt sein, um die Schallausbreitung in alle Richtungen untersuchen zu können. Abbildung 12 zeigt die ortsfesten Messstellen in der Umgebung des Flughafens München sowie die Hauptflugrouten. In der Folgenden Analyse werden die Messstationen Achering, Attaching, Eitting, Hallbergmoos, Pulling und Schwaig näher betrachtet.

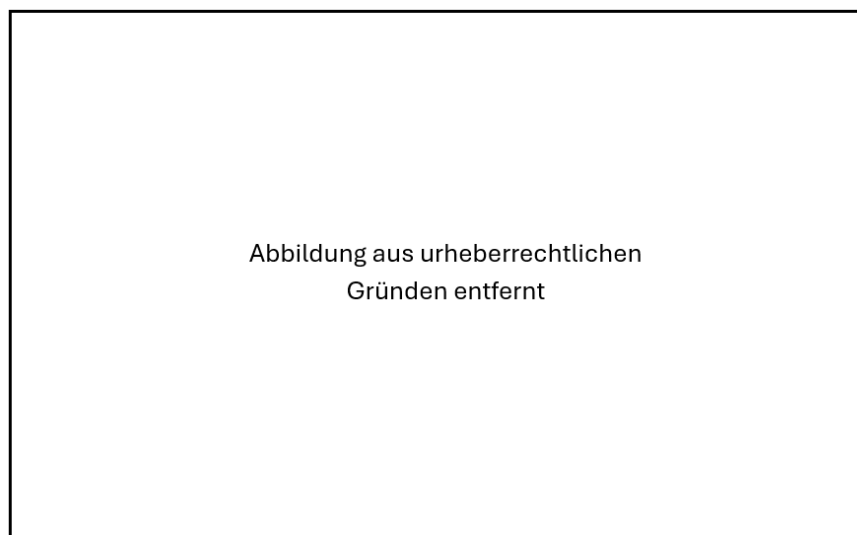


Abbildung 12 Messstellen in der Umgebung des Flughafens München, nach [1]

Die Fluglärmdata liegen in tabellarischer Form vor und umfassen den Zeitstempel sowie maximalen Schalldruckpegel (L_{ASmax}) (dB(A)) für jeden einzelnen Flug sowie den Standort der

Messstation. Einige der Daten verfügen zusätzlich über die Information, ob es sich um einen Start (D) oder eine Landung (A) handelt sowie die Start-/Landebahn. Diese Daten stammen aus sieben ausgewählten Tagen: 24.-26.04.2023, 17.07.2023 und 03.-05.10.2023. Alle betrachteten Tage weisen die gleiche Start-Landrichtung auf. Dabei wurde versucht, die gleichen Wochentage im Sommerflugplan zu wählen, um eine ähnliche Anzahl und Art von startenden und landenden Flugzeugen zu gewährleisten. Bei allen gewählten Tagen handelt es sich um Wochentage. Der 03.10.2023 ist ein Feiertag. Die Daten werden über den Zeitraum von 6 bis 22 Uhr betrachtet.

Darüber hinaus werden für die Tage zusätzlich Wetterdaten hinzugezogen. Diese Wetterdaten, die von der Internetseite des Dienstes METEOSTAT abgerufen werden, enthalten umfassende Informationen zu den meteorologischen Faktoren Temperatur (°C), Taupunkt (°C), Niederschlag (mm), Sonnenscheindauer (min), Luftdruck (hPa), Windgeschwindigkeit (km/h), Windrichtung (°) und relative Luftfeuchte (%). Die Wetterdaten sind ebenfalls tabellarisch strukturiert und beinhalten Zeitstempel sowie gemessene Wetterparameter, die über eine Stunde gemittelt sind [48].

4.2. Datenvorbereitung und -auswertung

Die von der FMG erhaltenen Lärmdaten sowie die meteorologischen Werte wurden zunächst in Microsoft Excel importiert. Die Zeitstempel in beiden Datensätzen waren unterschiedlich und mussten synchronisiert werden, um eine korrekte Zuordnung der Wetterbedingungen zu den entsprechenden Lärmdaten zu gewährleisten. Beide Datenquellen wurden in Excel so formatiert, dass die Zeitstempel exakt übereinstimmen.

Da die Wetterdaten stündlich vorlagen und angenommen wurde, dass das Wetter innerhalb einer Stunde konstant ist, konnten die Wetterdaten direkt mit den entsprechenden Zeitstempeln der Lärmdaten abgeglichen werden.

Im Rahmen der Datenbereinigung wurden alle Datensätze mit fehlenden Werten entfernt. Diese Entscheidung wurde getroffen, um sicherzustellen, dass die Analysen auf vollständigen und zuverlässigen Daten basieren, da fehlende Werte die Ergebnisse verfälschen und zu ungenauen Schlussfolgerungen führen könnten. Besonders kritisch ist hierbei, dass nicht alle Lärmdaten Informationen über Start oder Landung und die verwendete Bahn enthalten. Diese Informationen wären jedoch wichtig, da sie eine differenzierte Analyse der Lärmbelastung ermöglichen würden. Start- und Landebahnen sowie der Flugvorgang selbst können erheblichen Einfluss auf den gemessenen Lärmpegel haben.

Um eine Grundlage für die Identifikation von Ausreißern zu schaffen, wurden der Mittelwert und die Standardabweichung der Fluglärmdaten berechnet. Die Ergebnisse finden sich in folgender Tabelle.

	Mittelwert (dB(A))	Standardabweichung (dB(A))
03.10.2023	69,60	4,34
04.10.2023	69,31	4,64
05.10.2023	69,33	4,43
17.07.2023	69,19	4,61
24.04.2023	70,22	4,65
25.04.2023	70,33	4,78
06.04.2023	69,80	4,78

Tabelle 1 Mittelwerte und Standardabweichung des maximalen Schalldruckpegels

Die Mittelwerte des Lärmpegels liegen dicht beieinander. Dies deutet darauf hin, dass der durchschnittliche Lärmpegel an den untersuchten Tagen konstant ist. Da die Standardabweichungen sich nur geringfügig unterscheiden, bedeutet dies, dass die Variabilität des Lärmpegels an den einzelnen Tagen ähnlich ist.

	Mittelwert Start dB(A)	Mittelwert Landung dB(A)
03.10.2023	70,51	67,36
04.10.2023	70,46	66,98
05.10.2023	70,31	67,42
17.07.2023	69,82	67,66
24.04.2023	71,87	67,40
25.04.2023	72,10	67,12
26.04.2023	70,67	67,63

Tabelle 2 Mittelwerte des maximalen Schalldruckpegels differenziert nach Start und Landung

	Standardabweichung Start dB(A)	Standardabweichung Landung dB(A)
03.10.2023	3,20	5,21
04.10.2023	3,91	5,14
05.10.2023	3,86	4,95
17.07.2023	4,27	4,96
24.04.2023	4,60	5,10
25.04.2023	3,44	5,08
26.04.2023	4,26	4,73

Tabelle 3 Standardabweichungen des maximalen Schalldruckpegels differenziert nach Start und Landung

Im Weiteren wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen der Fluglärmmessungen für verschiedene Tage berechnet, getrennt nach Start- und Landemanövern. Die Ergebnisse zeigen, dass die durchschnittlichen Lärmpegel bei Starts durchweg höher sind als bei Landungen. So betrug der durchschnittliche Lärmpegel bei Starts an den untersuchten Tagen im Mittel etwa 70 dB(A), während die Landungen im Schnitt etwa 67 dB(A) erreichten. Die Differenz deutet darauf hin, dass Starts tendenziell mit einer höheren Lärmbelastung verbunden sind.

Zusätzlich wurde festgestellt, dass die Standardabweichungen der Lärmpegel bei Landungen höher sind als bei Starts. Dies zeigt, dass die Lärmpegel während der Landungen stärker variieren.

Um einen ersten visuellen Überblick über die Verteilung der Fluglärmdata in Bezug auf die erhaltenen, wurden Boxplots erstellt. Boxplots bieten eine geeignete Methode, um zentrale Tendenzen, Spannweiten und Ausreißer der Daten visuell darzustellen. Der Median zeigt den zentralen Wert der Lärmmessungen, während der Interquartilsabstand den Bereich abbildet, in dem sich 50 % der Werte befinden. Die Whiskers geben die minimale und maximale Spannweite der Daten an, während darüber hinausliegende Punkte als Ausreißer markiert sind.

Exemplarisch wurde ein Boxplot im Text dargestellt, während die übrigen im Anhang zu finden sind.

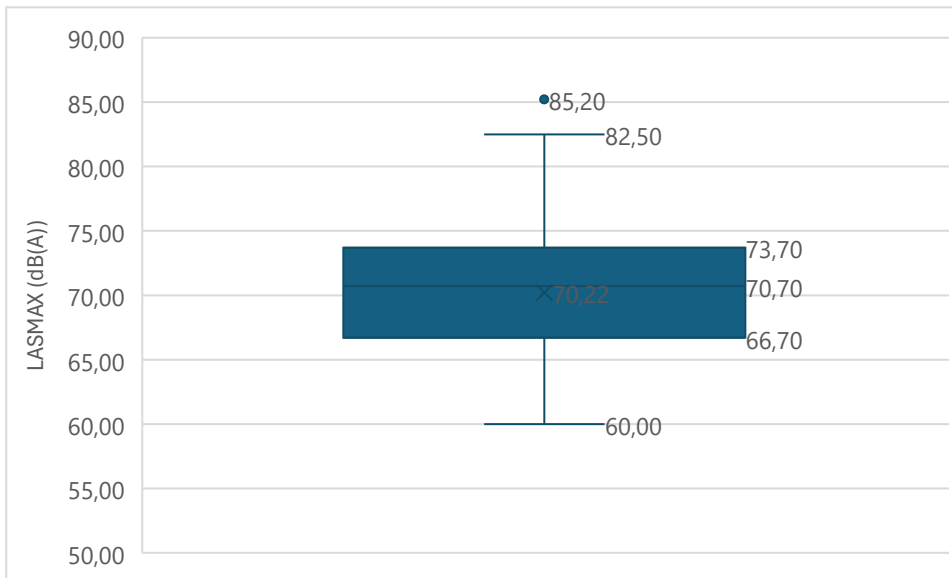


Abbildung 13 Boxplot für den 24.04.2023

Aus diesen Boxplots wurden die ermittelten Ausreißer identifiziert und in den nachfolgenden Tabellen aufgelistet.

MP	T _{LASmax}	L _{ASmax}	A/D	Runway
ATT	26.04.2023 07:04:58	86,20		
ATT	26.04.2023 09:05:54	85,70		
ATT	26.04.2023 09:45:07	84,80		
ATT	26.04.2023 10:15:47	83,50		
ATT	26.04.2023 10:19:09	83,70		
PLG	26.04.2023 18:41:43	83,80		
ATT	25.04.2023 10:01:51	86,70		
ATT	25.04.2023 09:35:10	85,10		
ATT	25.04.2023 09:35:32	85,20		
ATT	24.04.2023 07:59:24	85,20		
PLG	17.07.2023 12:59:53	82,90	Start	26R
ACI	05.10.2023 12:18:07	82,90	Start	26L
PLG	04.10.2023 12:52:59	82,60	Start	26R
PLG	03.10.2023 12:56:15	82,70	Start	26R
PLG	03.10.2023 16:03:05	86,20		

Tabelle 4 Identifizierte Ausreißer

Diese Ausreißer sind für die Analyse von besonderem Interesse. Da das Wetter zu diesen Zeitpunkten keine außergewöhnlichen Werte aufweist, ist anzunehmen, dass die Ursache in größeren Flugzeugtypen, außergewöhnlichen Flugbewegungen oder mögliche Messfehler sein und sollten genauer überprüft werden.

Im nächsten Schritt wurde der maximale Schalldruckpegel im Verlauf des Tages, aufgeteilt nach verschiedenen Start- und Landebahnen, visualisiert. Diese Streudiagramme zeigen die zeitliche Verteilung der Lärmbelastung und machen Unterschiede zwischen den Bahnen 26L und 26R deutlich. Der Fluglärm konzentriert sich hauptsächlich in einem Bereich zwischen 65 und 75 dB(A), was auf eine gleichmäßige Lärmbelastung durch die meisten Flugbewegungen hinweist.

Die Datenlücken in bestimmten Zeiträumen des Diagramms resultieren aus unvollständigen Informationen darüber, ob es sich um einen Start oder eine Landung handelte und welche Bahn genutzt wurde.

Im Folgenden wird das Streudiagramm für die Messstation Achering am 03.10.2023 aufteilt auf die Bahnen 26L und 26R dargestellt.

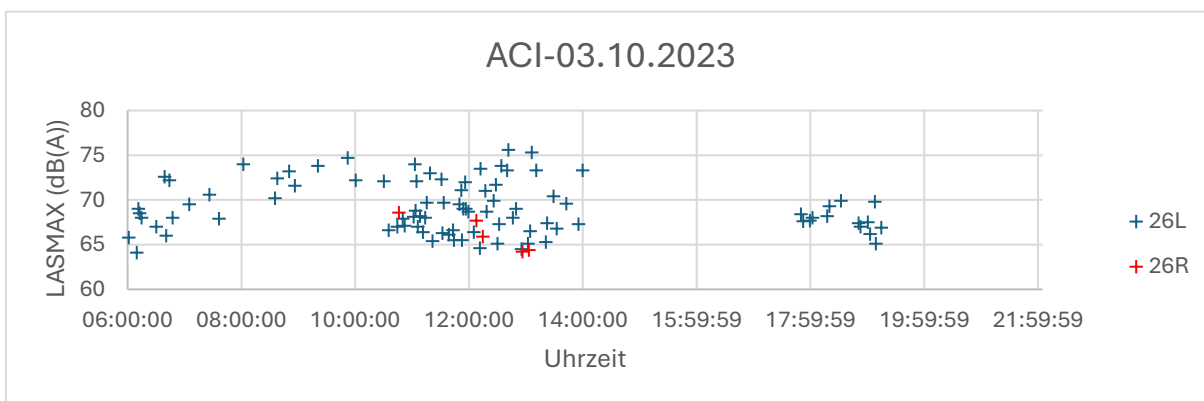


Abbildung 14 Streudiagramm für Achering am 03.10.2023

Zusätzlich wurde Diagramme für weiteren Messstationen am gleichen Tag sowie für verschiedene Tage erstellt. Dabei zeigte sich, dass die Ergebnisse konsistent blieben und sich die Verteilung des Fluglärms über die Zeit hinweg nicht signifikant voneinander unterschied. Unabhängig von der Station oder dem betrachteten Tag wiesen die Streudiagramme ähnliche Muster auf, was auf eine gleichmäßige Lärmbelastung durch Flugbewegungen in den untersuchten Zeiträumen hindeutet. Aus diesem Grund wurde entschieden, im Hauptteil der Arbeit nur ein exemplarisches Diagramm darzustellen. Dieses Diagramm repräsentiert die allgemeinen Tendenzen und Muster der Fluglärmbelastung. Weitere Streudiagramme, die dieselben Muster für den gleichen Tag an verschiedenen Stationen zeigen, sind im Anhang zu finden.

Die Prüfung der Fluglärmdaten für die verschiedene Tage hat ergeben, welche Start- und Landebahnen die lautesten Werte bei einzelnen Flugereignissen verursacht haben. Die Lage der Messstationen in Bezug auf die Flugrouten und Bahnen ist dabei entscheidend.

Achering und Eitting befinden sich zwischen den beiden Landebahnen und sind daher in der Lage, die maximalen Lärmereignisse beider Bahnen zu erfassen. Achering liegt nördlich der Bahn 26R, wodurch hauptsächlich die Lärmereignisse dieser Bahn erfasst werden. Aufgrund der Position am Ende der Bahn 26R, werden dabei vornehmlich Startvorgänge erfasst, während Landungen weniger dominierend sind. Hallbergmoos liegt südlich am Ende der Bahn 26L und erfasst demnach überwiegend die Lärmereignisse, die mit den Starts von dieser Bahn verbunden sind. Die geographische Lage am Ende der Bahn 26L begünstigt die Erfassung von Startvorgängen im Vergleich zu Landungen. Pulling befindet sich in der Abflugschneise der Bahn 26R, westlich der Bahn, und ist daher bei Starts und Landungen in Richtung 26, primär auf die

Erfassung von Startvorgängen ausgerichtet. Diese Position sorgt dafür, dass nahezu ausschließlich die Lärmereignisse im Zusammenhang mit den Starts der Bahn 26R erfasst werden. Schwaig liegt in der Anflugschneise der Bahn 26L und erfasst daher vorwiegend die Lärmereignisse, die mit den Landungen dieser Bahn assoziiert sind. Die Position in der Nähe der Anflugschneise führt dazu, dass die maximalen Lärmereignisse insbesondere während der Landungen auftreten.

Diese Beobachtungen gelten ausschließlich, wenn in Richtung 260 Grad gestartet oder gelandet wird.

Im nächsten Schritt wurde die =KORREL-Funktion in Excel verwendet. Diese Funktion berechnet den Korrelationskoeffizienten zwischen zwei Variablen, in diesem Fall zwischen den maximalen Schalldruckpegel (abhängige Variable) und den Wetterdaten (unabhängige Variablen). Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Ein Wert von 1 bedeutet eine perfekte positive lineare Beziehung, -1 eine perfekte negative lineare Beziehung, und 0 keinen linearen Zusammenhang. Die nachfolgende Analyse wurde sowohl für Start- als auch für Landephase separat durchgeführt, um die möglichen Unterschiede in den Auswirkungen der Wetterbedingungen in diesen Phasen zu berücksichtigen. Diese Trennung erfolgte, da anzunehmen ist, dass der Unterschied zwischen Start- und Landephase einen möglicherweise größeren Einfluss auf den Fluglärm hat als die Wetterbedingungen allein.

Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten zwischen dem maximalen Schalldruckpegel und verschiedenen Wettervariablen (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Luftdruck und Sonnenscheindauer) ergab differenzierte Ergebnisse, die nach Messtation und Flugphasen (Start und Landung) getrennt betrachtet wurden. An den Tagen ohne Niederschlag konnte keine Korrelation berechnet werden, sodass diese Zellen leer sind.

	ACI-D	ATT-D	ATT-A	EIT-A	HALL-D	HALL-A	PLG-D	SCH-A
Anzahl Messungen	1473	946	4	1119	1369	4	1208	1122

Table 5 Anzahl der Messungen nach Station und Start (D)/ Landung (A)

Die Anzahl der Messungen beeinflusst das Ergebnis der Berechnungen erheblich, da größere Stichproben die Wahrscheinlichkeit erhöhen, tatsächliche Effekte zu erkennen. Bei der Analyse zeigt sich eine leichte Variation in der Anzahl der Messungen für die verschiedenen Stationen. Die Ausnahme stellen die Landungen, die von der Messtation in Attaching erfasst wurden, sowie die der Station Hallbergmoos da, die jeweils nur vier Messungen aufweisen. Da diese zu keinem verlässlichen Ergebnis führen, wurden bei der weiteren Analyse auf diese Werte verzichtet.

Insgesamt sind die berechneten Korrelationskoeffizienten tendenziell klein, was auf einen eher schwachen Zusammenhang zwischen dem Fluglärm und den untersuchten Wettervariablen hinweist. Die meisten Werte liegen im Bereich von -0,1 bis 0,1, was darauf hindeutet, dass die Wetterbedingungen kein bis sehr schwachen Zusammenhang mit dem Fluglärm haben.

Es gibt jedoch Ausnahmen, bei denen einzelne Wetterparameter leicht stärkere Korrelationen und zwischen +/- 0,1 bis +/-0,3 liegen und somit eine schwache Korrelation aufweisen. Die Korrelationen zwischen maximalen Schalldruckpegel und Wetterbedingungen kann sich je nach spezifischem Kontext, beispielsweise die Tageszeit, unterschiedlich verhalten, dies wird durch die unterschiedlichen Vorzeichen in den Tabellen innerhalb einer Spalte sichtbar. Ein Anstieg der Temperatur sowie des Luftdruck und überwiegend der Sonnenscheindauer führen zu einer leichten Reduktion im Fluglärm.

Eine Zunahme des Niederschlags sowie Windgeschwindigkeit und überwiegend der relativen Luftfeuchte führt zu einer Erhöhung des maximalen Schalldruckpegels.

linearer Korrelationskoeffizient	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Niederschlag	Windrichtung	Luftdruck	Sonnenscheindauer
ACI-D	-0,26206367	0,30275057	0,08336709	- 0,08514994	-0,1433354	-0,13212679
ATT-D	-0,08157943	0,06801861	0,11495887	- 0,07804676	- 0,17609298	0,03264536
EIT-A	-0,1398138	0,04580322	0,09247442	- 0,01421878	- 0,25872249	-0,06183195
HALL-D	-0,15889689	0,08013458	0,12969492	0,01056032	- 0,23671015	-0,06097269
PLG-D	-0,02871561	-0,0289379	0,02575969	0,02230354	- 0,01196558	0,01926329
SCH-A	-0,09794353	0,0958019	0,15300407	- 0,03400082	-0,1757725	-0,06793041

Tabelle 6 linearer Korrelationskoeffizient nach Station und Start (D)/ Landung (A)

Bestimmtheitsmaß	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Niederschlag	Windgeschwindigkeit	Luftdruck	Sonnenscheindauer
ACI-D	0,06867737	0,09165791	0,00695007	0,01974398	0,02054504	0,01745749
ATT-D	0,0066552	0,00462653	0,01321554	0,02631248	0,03100874	0,00106572
EIT-A	0,01954791	0,00209793	0,00855152	0,03357623	0,06693733	0,00382319
HALL-D	0,02524822	0,00642155	0,01682077	0,0608132	0,0560317	0,00371767
PLG-D	0,00082459	0,0008374	0,00066356	0,00048922	0,00014318	0,00037107
SCH-A	0,00959294	0,009178	0,02341024	0,03557646	0,03089597	0,00461454

Tabelle 7 Bestimmtheitsmaß nach Station und Start (D)/ Landung (A)

Aus dem Korrelationskoeffizienten zwischen dem Fluglärm und den verschiedenen Wetterparametern wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet, das angibt, wie viel Prozent der Variabilität des Fluglärms durch die jeweilige Wettervariable erklärt werden kann. Das Bestimmtheitsmaß zeigt, dass nur ein kleiner Teil der Schwankungen im Fluglärm durch die Wetterdaten erklärbar ist. Im Durchschnitt über alle betrachteten Tage und Stationen lassen sich die im Folgenden aufgeführten Werte ermitteln:

- 2,18 % des Fluglärms lassen sich durch die Temperatur erklären
- 1,91% des Fluglärms lassen sich durch die relative Feuchte erklären
- 1,16% des Fluglärms lassen sich durch den Niederschlag erklären
- 0,26% des Fluglärms lassen sich durch die Windrichtung erklären
- 2,94 % des Fluglärms lassen sich durch die Windgeschwindigkeit erklären
- 3,43 % des Fluglärms lassen sich durch den Luftdruck erklären
- 0,52 % des Fluglärms lassen sich durch die Sonnenscheindauer erklären

Diese Werte deuten darauf hin, dass die Wettervariablen nur einen sehr geringen Einfluss auf den Fluglärm haben. Es ist anzunehmen, dass ein Großteil der Variabilität des Fluglärms wird durch andere Faktoren beeinflusst wird, die hier nicht berücksichtigt wurden, wie z. B. Flugzeugtyp, Flugroute oder Flughafennähe.

Die Analyse des Zusammenhangs zwischen Windrichtung und Fluglärm an verschiedenen Messstationen über alle Tage ergab, dass der Einfluss der Windrichtung minimal ist. An allen Stationen ist der Zusammenhang zwischen dem maximalen Schalldruckpegel und Windrichtung sehr schwach. Die Korrelationskoeffizienten liegen nahe 0, so dass keine nennenswerte lineare Beziehung zwischen diesen beiden Variablen besteht.

Das Bestimmtheitsmaß zeigt, dass die Windrichtung nur einen sehr geringen Teil der Varianz des Fluglärms erklärt, in keinem Fall mehr als 0,7 %.

	linearer Korrelationskoeffizient	Bestimmtheitsmaß
ACI-D	-0,085149938	0,00725051
ATT-D	-0,078046761	0,0060913
EIT-A	-0,01421878	0,00020217
HALL-D	0,010560315	0,00011152
PLG-D	0,022303537	0,00049745
SCH-A	-0,034000821	0,00115606

Tabelle 8 Zusammenhang der Windrichtung und maximalen Schalldruckpegel

Um sicherzustellen, dass die in der Regressionsanalyse verwendeten meteorologischen Parameter keine starke Multikollinearität aufweisen, wurde eine systematische Prüfung der linearen Korrelation zwischen den unabhängigen Variablen durchgeführt. Multikollinearität liegt vor, wenn zwei oder mehr Variablen stark miteinander korrelieren, was die Zuverlässigkeit und Interpretierbarkeit der Regressionsanalyse beeinträchtigen kann.

Im Rahmen der Analyse wurde der lineare Korrelationskoeffizient zwischen den verschiedenen meteorologischen Parametern (Temperatur, Taupunkt, relative Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Luftdruck und Sonnenscheindauer) für die Stichprobentage berechnet. Die Prüfung der Multikollinearität ergab, dass die meisten Korrelationen zwischen den unabhängigen Variablen unter 30% lagen. Einige Zusammenhänge, über alle Stationen betrachtet, lagen jedoch im Bereich von 30-50%, diese werden im Folgenden genannt.

- Temperatur und relative Luftfeuchte
- Sonnenscheindauer und Temperatur
- Sonnenscheindauer und relative Luftfeuchte
- Windgeschwindigkeit und Luftdruck

Da das Bestimmtheitsmaß in keinem Fall 0,5 überschritt, was bedeuten würde, dass eine Variable zur Hälfte durch eine andere erklärt werden könnte, wird weiterhin mit allen Variablen gearbeitet. Die Ausnahme stellt der Taupunkt da. Die Berechnung für den Taupunkt ergab eine starke Korrelation mit der relativen Luftfeuchtigkeit sowie mit der Temperatur, was ihn im Modell redundant macht. In den meisten Fällen sind die linearen Korrelationskoeffizienten zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und dem Taupunkt positiv, was bedeutet, dass eine Zunahme der relativen Luftfeuchte typischerweise zu einer Erhöhung des Taupunkts führt. Eine Erhöhung der Temperatur führt zu einer Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit.

Da die relative Luftfeuchtigkeit als wichtiger eingestuft wurde, wurde entschieden, auf die Einbeziehung des Taupunkts zu verzichten. Die weiteren detaillierten Berechnungen und Korrelationstabellen können im Anhang eingesehen werden.

Im Folgenden ist die Korrelationsmatrix für die startenden Flugzeuge der Messstation Achering dargestellt.

ACI-D	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Niederschlag	Windrichtung	Windgeschwindigkeit	Luftdruck	Sonnenscheindauer
Temperatur	1	-0,5799046	-0,1752473	-0,03092913	-0,10618913	0,18112232	0,47589848
Relative Luftfeuchte	-0,5799046	1	0,2380167	-0,17343861	-0,05102388	-0,0609252	-0,60742096
Niederschlag	-0,1752473	0,2380167	1	-0,01593618	0,28436043	-0,2260357	-0,2043236
Windrichtung	-0,0309291	-0,1734386	-0,0159362	1	0,04726531	-0,0604224	0,0345909
Windgeschwindigkeit	-0,1061891	-0,0510239	0,28436043	0,04726531	1	-0,6329536	-0,0357463
Luftdruck	0,1811223	-0,0609252	-0,22603569	-0,06042235	-0,63295363	1	0,27382513
Sonnenscheindauer	0,4758985	-0,607421	-0,2043236	0,0345909	-0,0357463	0,27382513	1

Tabelle 9 Korrelationsmatrix für die startenden Flugzeuge (D) der Messstation Achering

ACI-D	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Niederschlag	Windrichtung	Windgeschwindigkeit	Luftdruck	Sonnenscheindauer
Temperatur	100	33,6289329	3,07116096	0,09566111	1,12761305	3,28052949	22,6479366
Relative Luftfeuchte	33,6289329	100	5,66519708	3,00809513	0,26034359	0,37118815	36,8960219
Niederschlag	3,07116096	5,66519708	100	0,02539618	8,08608532	5,10921354	4,17481323
Windrichtung	0,09566111	3,00809513	0,02539618	100	0,22340096	0,36508601	0,11965306
Windgeschwindigkeit	1,12761305	0,26034359	8,08608532	0,22340096	100	40,0630299	0,12777979
Luftdruck	3,28052949	0,37118815	5,10921354	0,36508601	40,0630299	100	7,49802029
Sonnenscheindauer	22,6479366	36,8960219	4,17481323	0,11965306	0,12777979	7,49802029	100

Tabelle 10 Bestimmtheitsmaß in Prozent für die startenden Flugzeuge (D) der Messstation Achering

Im nächsten Schritt wurden die Lärmpegel als abhängige Variable gegen die verschiedenen meteorologischen Parameter geplottet, um visuell zu untersuchen, ob es Muster oder Trends gibt. Zur weiteren Quantifizierung dieser Beobachtungen wurde eine Trendlinien eingefügt, deren Gleichungen sowie das Bestimmtheitsmaß (R^2) angezeigt. Die Ergebnisse dieser Analysen dienen als Grundlage für die weiterführende Regressionsanalyse, die genaue Aussagen über die Stärke und Art der Einflüsse ermöglichen soll. Die Steigung der Trendlinie entspricht dem Vorzeichen des Korrelationskoeffizienten, sodass ein positiver Korrelationskoeffizient eine positive Steigung und ein negativer Korrelationskoeffizient eine negative Steigung der Linie anzeigt. In Abbildung 15 ist ein Streudiagramm des maximalen Schalldruckpegels in Abhängigkeit von der Temperatur zu sehen.

Die positive Steigung der Trendlinie spiegelt den positiven Korrelationskoeffizienten wider, der für den Zusammenhang zwischen maximalem Schalldruckpegel und Temperatur bei den Starts am 03.10.2023 berechnet wurde.

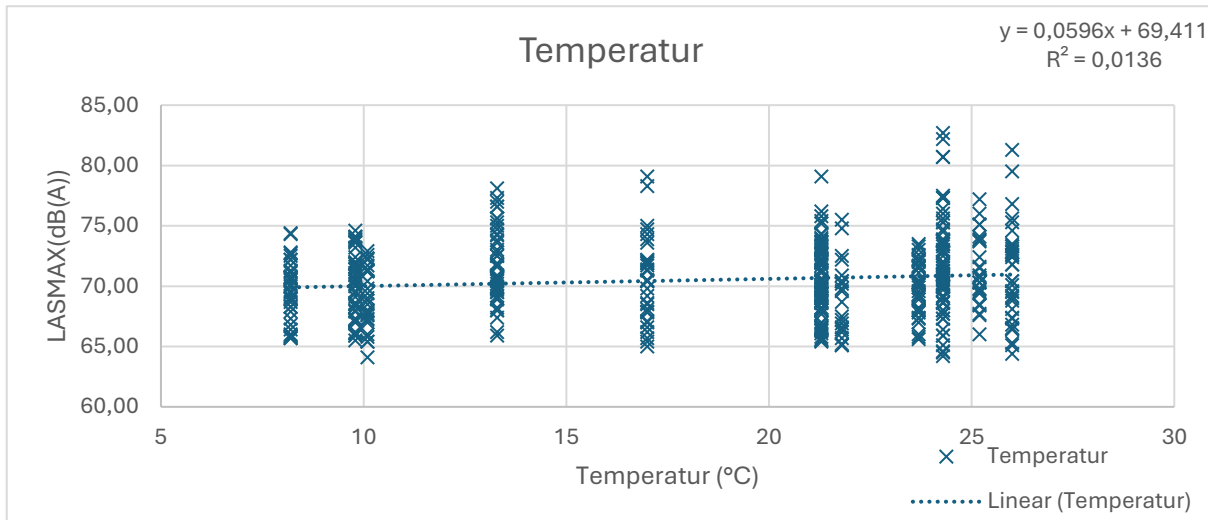


Abbildung 15 Zusammenhang Temperatur und maximaler Schalldruckpegel für die Starts des 03.10.2023

Die Diagramme für die weiteren meteorologischen Parameter für die Starts am selben Tag sind im Anhang zu finden.

Im nächsten Schritt wurde eine multiple lineare Regressionsanalyse durchgeführt, um die Koeffizienten für jede Variable zu bestimmen und deren Einfluss auf den Fluglärm zu quantifizieren. Die Analyse wurde erneut getrennt für startende und landende Flugzeuge durchgeführt.

Die Daten wurden entsprechend den einzelnen Messstationen segmentiert. Die unabhängigen Variablen umfassten: Landebahn (Runway: 26L oder 26R), Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Sonnenscheindauer sowie Feiertage. Dummy-Variablen wurden für die Landebahn und den Feiertag verwendet. Der Landebahn 26L wurde der Wert 0, der Landebahn 26R der Wert 1 zugewiesen. Der 3. Oktober 2023 (Tag der Deutschen Einheit) erhielt als Feiertag den Wert 1, während für alle anderen Tage der Wert 0 galt, da sie als reguläre Wochentage betrachtet wurden. Durch die Verwendung von Dummy-Variablen konnten kategoriale Variablen in das quantitative Modell integriert werden, wodurch der Einfluss von diskreten Faktoren wie Feiertagen oder spezifischen Landebahnen auf den Schalldruckpegel detailliert analysiert werden konnte.

Die Stationen Achering, Eitting, Pulling und Schwaig wurden umfassend analysiert. Für die Stationen Attaching und Hallbergmoos, die sowohl landende als auch startende Flugzeuge erfassen, wurde jedoch nur die Analyse der startenden Flugzeuge durchgeführt. Da für ankommende Flüge nur jeweils vier Datenpunkte vorlagen, überstieg die Anzahl der unabhängigen Variablen die der Datenpunkte, was zu einer unzureichenden Datenbasis führte und deshalb keine belastbaren Ergebnisse ermöglichte.

Es wurden drei Iterationen einer Regressionsanalyse ausgeführt. In der ersten Iteration wurden die unabhängigen Variablen Runway, Temperatur, relative Luftfeuchte, Niederschlag, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Sonnenscheindauer und Feiertag berücksichtigt. Da die p-Werte für Windrichtung und Niederschlag konstant über dem Wert von 0,05 lagen und

somit als nicht signifikant erachtet wurden, wurde in der zweiten Iteration auf die Variable Windrichtung verzichtet. Diese Anpassung führte zu keiner Verbesserung der p-Werte für den Niederschlag, weshalb in einem dritten Schritt die Regressionsanalyse erneut auch ohne diese Variable gemacht wurde.

Die Ergebnisse der dritten Regressionsanalyse sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst. Alle weiteren Ergebnisse sind im Anhang zu finden.

KOEFFIZIENTEN	ACI-D	ATT-D	EIT-A	HALL-D	PLG-D	SCH-A
Schnittpunkt	119,421209	134,613743	147,822284	137,594545	81,5422014	89,8731409
Runway	-5,6386949		-1,4676427	-2,4936421	6,36204075	
Temperatur	-0,108393	-0,0016513	-0,0409361	-0,0452689	-0,0240243	0,01407596
Relative Luftfeuchte	0,04537688	0,03629279	0,01261715	0,02196779	-0,0035721	-0,0002210
Windgeschwindigkeit	0,04758568	0,04080705	0,0156389	0,05876895	0,0143217	0,05190934
Luftdruck	-0,0511604	-0,0671293	-0,0840385	-0,0673562	-0,0130375	- 0,01885524
Sonnenscheindauer	0,01303462	0,02381943	0,01178241	0,01570889	0,00884023	0,00125093
Feiertag	-0,0854481	-0,8184728	-0,3612397	-1,0146314	-1,3053881	0,25852696

Tabelle 11 Koeffizienten nach Station und Start (D)/Landung (A) der dritten Iteration

Tabelle 11 zeigt die Regressionskoeffizienten für die verschiedenen unabhängigen Variablen. Der Schnittpunkt repräsentiert den Wert der abhängigen Variablen, wenn alle unabhängigen Variablen den Wert Null annehmen, während die Koeffizienten den Einfluss jeder Variable auf den Schalldruckpegel quantifizieren.

Die Mehrheit der geschätzten Koeffizienten liegt zwischen -0,05 und +0,05, was auf einen geringen Einfluss der meisten Wettervariablen auf den Fluglärm hinweist. Die Ausnahme bilden die Variablen „Runway“, Luftdruck und Feiertag. Vor allem die Start- und Landebahn spielt eine entscheidende Rolle.

Allgemein lässt sich feststellen, dass eine Erhöhung der Temperatur in allen Stationen zu einer leichten Abnahme des Fluglärms führt. Der Effekt der relativen Luftfeuchte ist uneinheitlich. Überwiegend korreliert eine Zunahme der relativen Luftfeuchtigkeit mit einem Anstieg des Fluglärms. Auch führt eine höhere Windgeschwindigkeit zu einem Anstieg des Schalldruckpegels. Ein höherer Luftdruck steht tendenziell mit einem niedrigeren maximalen Schalldruckpegel in Verbindung, während eine längere Sonnenscheindauer zu einer Erhöhung des Schalldruckpegels beiträgt. An Feiertagen wurde, mit einer Ausnahme, ein niedrigerer Schalldruckpegel beobachtet. An Feiertagen ist der Flugplan ausgedünnt. Es wird außerdem vermutet, dass die niedrigen Fluggastzahlen zu leichteren Flugzeugen führen, was eine höhere Steigrate und letztendlich kleinere Lärmwerte an den Messstationen zur Folge hat.

Um die Übersichtlichkeit zu verbessern, wurden die Koeffizienten zusätzlich in Form von Balkendiagrammen dargestellt, wie die Abbildungen 16-22 zeigen.

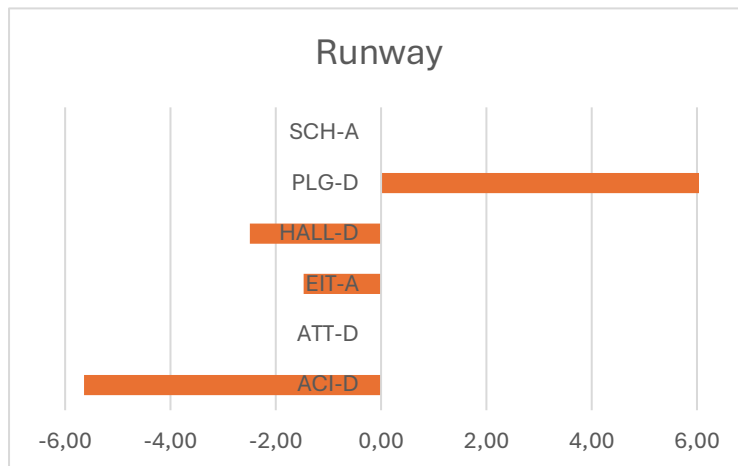


Abbildung 16 Balkendiagramm des Koeffizienten Runway nach Station und Start (D)/Landung (A)

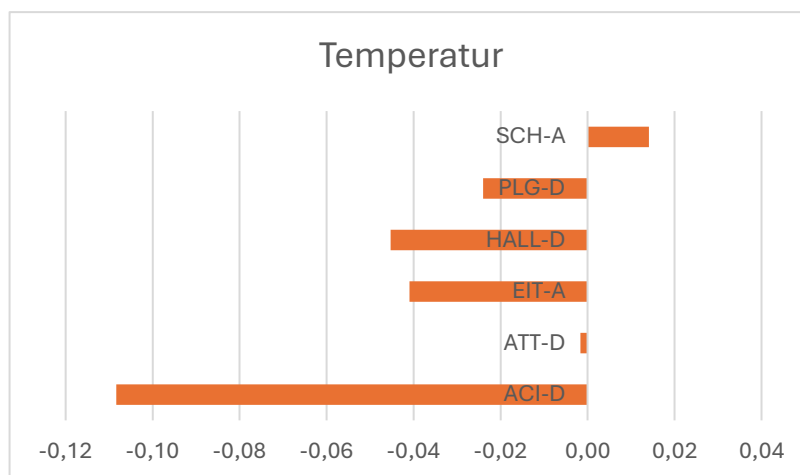


Abbildung 17 Balkendiagramm des Koeffizienten Temperatur nach Station und Start (D)/Landung (A)

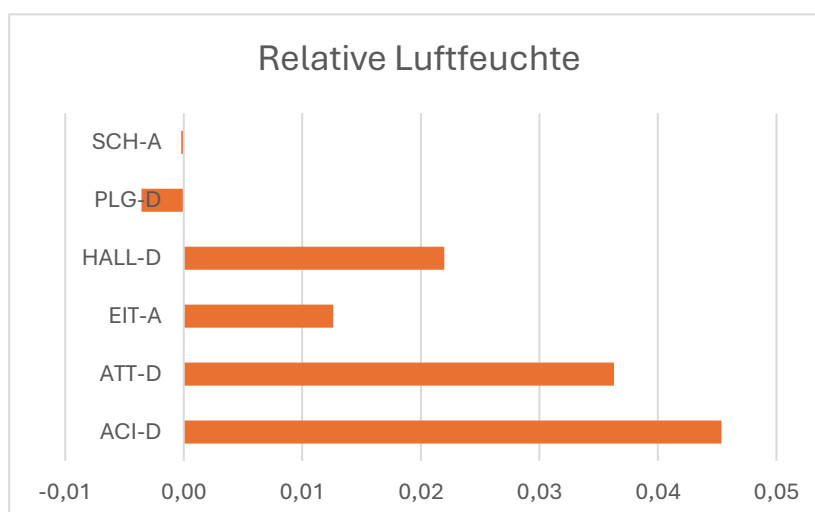


Abbildung 18 Balkendiagramm des Koeffizienten relative Luftfeuchte nach Station und Start (D)/Landung (A)

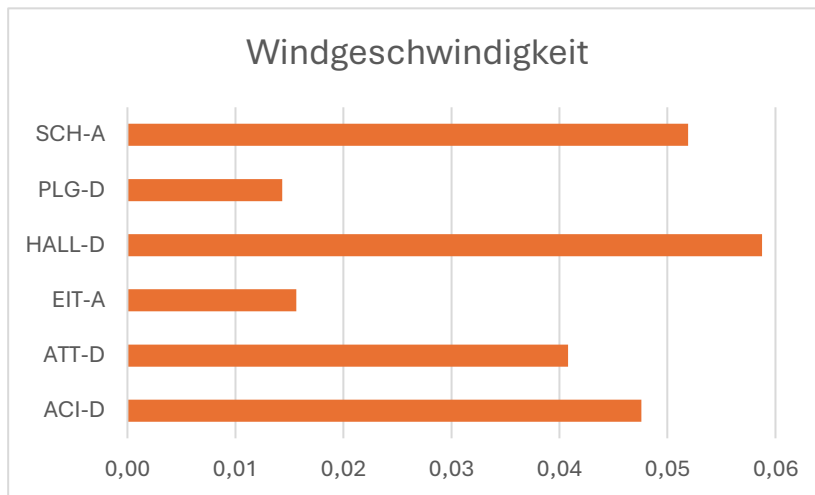


Abbildung 19 Balkendiagramm des Koeffizienten Windgeschwindigkeit nach Station und Start (D)/Landung (A)

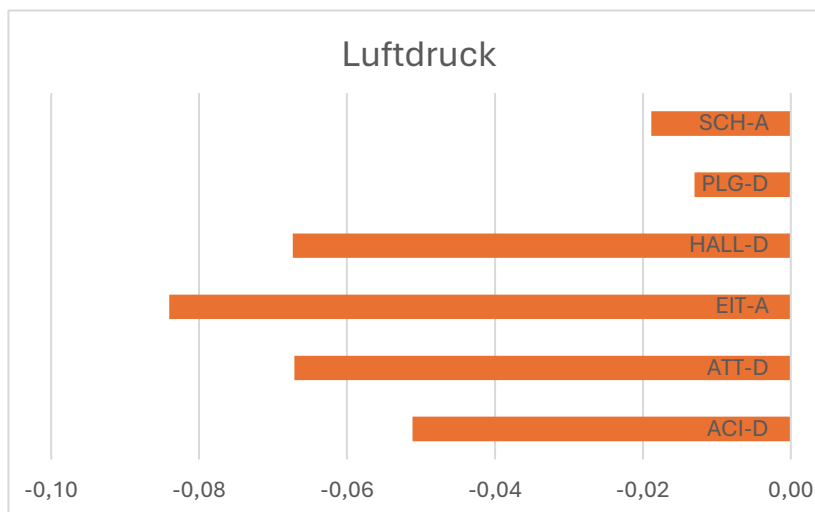


Abbildung 20 Balkendiagramm des Koeffizienten Luftdruck nach Station und Start (D)/Landung (A)

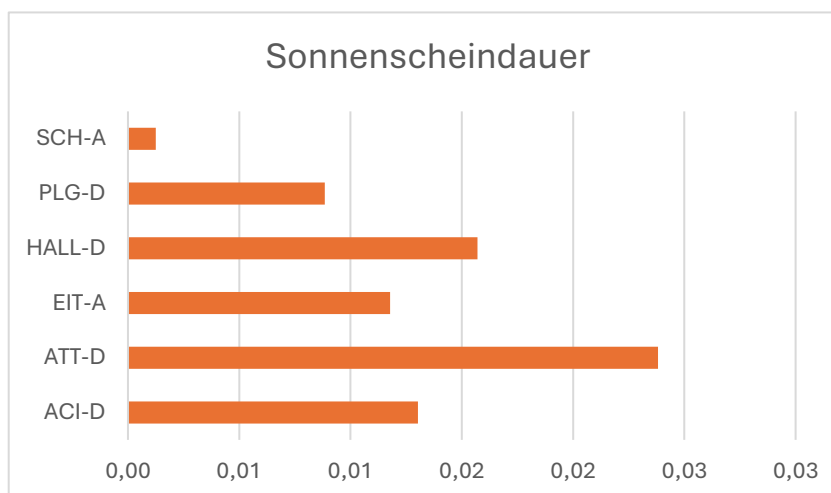


Abbildung 21 Balkendiagramm des Koeffizienten Sonnenscheindauer nach Station und Start (D)/Landung (A)

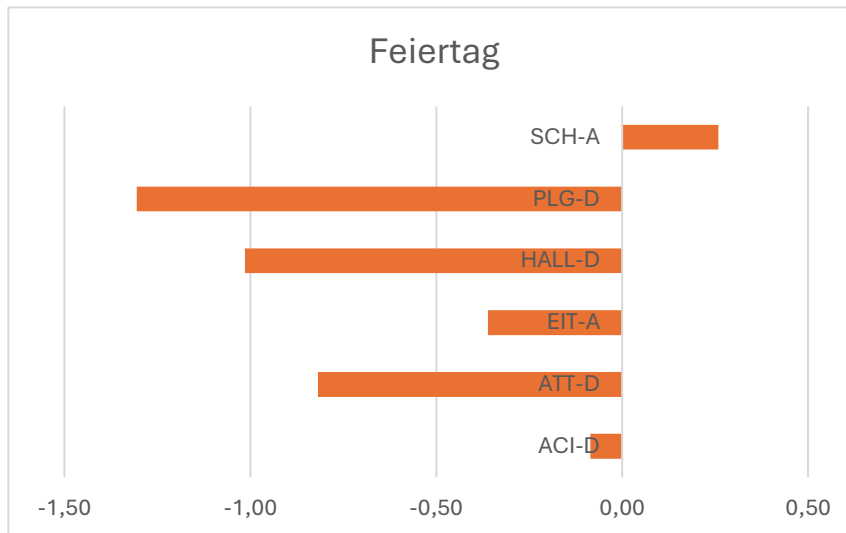


Abbildung 22 Balkendiagramm des Koeffizienten Feiertag nach Station und Start (D)/Landung (A)

P-Wert	ACI-D	ATT-D	EIT-A	HALL-D	PLG-D	SCH-A
Schnittpunkt	4,7122E-10	1,215E-13	1,9964E-37	1,6112E-19	3,8518E-06	1,6113E-12
Runway	3,521E-123		9,3307E-26	0,16087685	3,4701E-16	0,24441266
Temperatur	3,9427E-09	0,93499268	0,00116855	0,00468101	0,20295107	0,00968974
Relative Luftfeuchte	1,1436E-07	1,7351E-05	0,01145644	0,00147398	0,65737291	0,84738976
Windgeschwindigkeit	0,0062093	0,00979113	0,10773298	1,4052E-05	0,34583563	4,4736E-06
Luftdruck	0,00619593	0,00014031	3,2327E-14	4,9218E-06	0,44911707	0,1244356
Sonnenscheindauer	0,00588053	1,9964E-07	5,215E-05	4,1055E-05	0,04607191	0,68234644
Feiertag	0,8191133	0,00570265	0,04976483	3,035E-05	1,4084E-05	0,20020426

Tabelle 12 P-Werte nach Station und Start (D)/Landung (A) der dritten Iteration

Die P-Werte in Tabelle 12 zeigen die statistische Signifikanz der einzelnen Variablen an. Ein kleiner P-Wert wird allgemein, als Hinweis darauf betrachtet, dass der Effekt der jeweiligen Variablen signifikant ist. Die zahlreichen statistisch signifikanten P-Werte deuten darauf hin, dass die Beziehungen zwischen den Wettervariablen und dem Fluglärm in den einzelnen Messstationen deutlich und statistisch robust erkennbar sind. Abgesehen von einigen wenigen Ausnahmen sind die meisten p-Wert unter 0,05 und damit signifikant. Ein p-Wert von 0,05 bedeutet, dass es eine fünfprozentige Wahrscheinlichkeit gibt, dass das Ergebnis zufällig zu zustande gekommen ist.

	ACI-D	ATT-D	EIT-A	HALL-D	PLG-D	SCH-A
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,40688335	0,06697781	0,16792129	0,10614801	0,0652285	0,05698562

Tabelle 13 Adjustiertes Bestimmtheitsmaß nach Station und Start (D)/Landung (A) der dritten Iteration

Die Analyse zeigt stark unterschiedliche Werte für das adjustierte Bestimmtheitsmaß. Der höchste Wert wurde für die startenden Flugzeuge der Station Achering mit 0,41 ermittelt, was darauf hinweist, dass 41 % der Variation des Fluglärms durch die unabhängigen Variablen in dieser spezifischen Konstellation erklärt werden können.

Im Vergleich dazu weisen andere Stationen deutlich geringere adjustierte Bestimmtheitsmaße auf, was darauf hindeutet, dass die Modelle in diesen Fällen nur einen kleinen Teil der Variabilität des Fluglärms erklären. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Wettervariablen und der Abstand zwischen den Lärmereignissen für diese Stationen einen geringeren Einfluss auf den Fluglärm haben oder dass zusätzliche, nicht erfasste Variablen, wie etwa die Flugzeugtypen, eine bedeutendere Rolle spielen.

Besonders bei den Stationen Atterring, Pulling und Schwaig, jeweils unter 0,07, ist der Einfluss der berücksichtigten unabhängigen Variablen minimal.

Insgesamt legen die Ergebnisse nahe, dass Wetterbedingungen zwar einen gewissen Einfluss auf den Fluglärm haben, dieser jedoch begrenzt ist und möglicherweise von anderen Faktoren überlagert wird.

5. Schlussfolgerung

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass meteorologische Bedingungen, insbesondere Temperatur, Windgeschwindigkeit und Luftdruck, zwar einen geringen, aber dennoch messbaren Einfluss auf die Schallausbreitung haben. Dieser Einfluss ist jedoch im Vergleich zu anderen Faktoren, wie der Wahl der Start- und Landebahn sowie der Unterscheidung zwischen Start und Landung, relativ gering.

Die berechneten Ergebnisse für den Flughafen München weichen teilweise von den in der Literatur beschriebenen Erkenntnissen ab. Die verfügbaren Studien beziehen sich oft auf andere Flughäfen und damit auch auf unterschiedliche Voraussetzungen, was zu abweichenden Ergebnissen führen kann. Es ist anzunehmen, dass diese Unterschiede sich auf die stark variierenden lokalen und regionalen Wetterbedingungen sowie auf das komplexe Zusammenspiel meteorologischer Parameter zurückführen lassen, das ortsspezifische Effekte erzeugt und mitunter gegensätzliche Auswirkungen auf den Fluglärm hervorruft.

Zukünftige Forschungen sollten daher eine umfassendere Analyse meteorologischer und betrieblicher Einflussfaktoren anstreben. Besonders relevant wäre eine detailliertere Untersuchung der Lärmemissionen spezifischer Flugzeugtypen sowie eine Erhöhung der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Wetterdaten. Eine längere Untersuchungsperiode am Flughafen München könnte zudem klären, ob die hier gewonnenen Erkenntnisse langfristig stabil bleiben. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, die Analyse auf weitere Flughäfen auszuweiten, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu prüfen.

Wetter ist ein äußerst komplexes Phänomen, das die Planung spezifischer Lärmschutzmaßnahmen erschwert. Daher sollten bei der Entwicklung solcher Maßnahmen in erster Linie andere, stärker beeinflussbare Faktoren berücksichtigt werden. So besteht etwa die Möglichkeit den am Boden entstehenden Lärm durch den Einsatz von Flugzeugschleppern zu minimieren, indem die Flugzeuge ohne den Triebwerkslärm zu den Parkpositionen bzw. zur Startbahn geschleppt werden. Die Firma SAS (Smart Airport Systems) bietet bereits mit dem sogenannten TaxiBot ein halbautomatisches hybrides Fahrzeug an, das an verschiedenen internationalen Flughäfen im Einsatz ist [49].

Ein Beispiel dafür, wie Informationen über die Schallausbreitung von fliegenden Luftfahrzeugen gezielt genutzt werden können, zeigt der Flughafen Frankfurt, der 2014 in Zusammenarbeit mit der Deutschen Flugsicherung das satellitengestützte Anflugsystem GBAS (Ground Based Augmentation System) eingeführt hat. Dieses System erlaubt es Flugzeugen, mit einem steileren Anflugwinkel von 3,2 Grad statt der herkömmlichen 3 Grad zu landen. Durch diesen steileren Anflug können Flugzeuge präziser und in größerer Höhe über Wohngebiete fliegen, was zu einer spürbaren Reduktion des wahrgenommenen Fluglärms in diesen Gebieten führt [38].

Solche technologischen Maßnahmen zur Lärmreduktion verdeutlichen, dass auf bestehenden Flughäfen betriebliche Anpassungen einen erheblichen Einfluss auf die Schallausbreitung haben können. Insbesondere der meteorologische Faktoren Windrichtung fließt beim Bau neuer Start- und Landebahnen sowie Terminals in die Planung mit ein. Bei Bau des Flughafen Münchens wurde bewusst auf eine versetzte Anordnung der beiden Start- und Landebahnen geachtet, um ein direktes Überfliegen der landenden und startenden Flugzeuge über besiedeltes Gebiet zu vermeiden. Insbesondere die Ortschaften Achering, Eiting und Pulling profitieren von dieser Lärmschutzplanung [50]. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, bei der Planung von Lärmschutzmaßnahmen sowohl meteorologische Bedingungen als auch innovative technologische Ansätze zu berücksichtigen. Zukünftige Forschungen könnten daher auch untersuchen, ob ähnliche Anflugverfahren, wie das in Frankfurt eingesetzte GBAS-System, auch am Flughafen München oder anderen Flughäfen eingeführt werden könnten, um den Fluglärm weiter zu reduzieren. Ebenso sollte eine Kosten-Nutzenanalyse hinsichtlich der Schleppfahrzeug gemacht werden.

6. Limitation

Die vorliegende Arbeit unterliegt einigen Limitationen, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Erstens basiert die Analyse auf einer begrenzten Anzahl von Messtagen und bezieht sich ausschließlich auf den Flughafen München. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Flughäfen oder geografische Regionen ist daher eingeschränkt. Zweitens wurde in der vorliegenden Analyse angenommen, dass die Wetterbedingungen über eine Stunde hinweg konstant bleiben. Diese Vereinfachung könnte zu Ungenauigkeiten führen, da sich Wetterbedingungen innerhalb einer Stunde ändern können. Eine höhere zeitliche Auflösung der Wetterdaten wäre erforderlich, um präzisere Ergebnisse zu erzielen. Drittens stammen die Wetterdaten nur von einer Wetterstation am Flughafen, wobei angenommen wurde, dass die Wetterbedingungen räumlich konstant sind und somit auch für die anderen Messstationen, die den Fluglärm erfasst haben, gelten. Diese Annahme könnte zu Abweichungen führen, da lokale Wetterunterschiede an den Messpunkten unberücksichtigt bleiben. Viertens ist diese Arbeit in ihrer Aussagekraft durch die unzureichende Verfügbarkeit von Informationen über die Flugzeugtypen, die eingesetzt wurde, limitiert. Es ist anzunehmen, dass der Flugzeugtyp einen signifikanteren Einfluss auf die Lautstärke des Fluglärms hat als meteorologische Faktoren. Schließlich sind die verwendeten Modelle zur Schallausbreitung idealisiert und können die komplexe Realität nicht vollständig abbilden. Zukünftige Studien könnten diese Limitationen durch umfangreichere Datensätze und die Verwendung detaillierterer Modelle intensiver betrachten.

7. Anhang

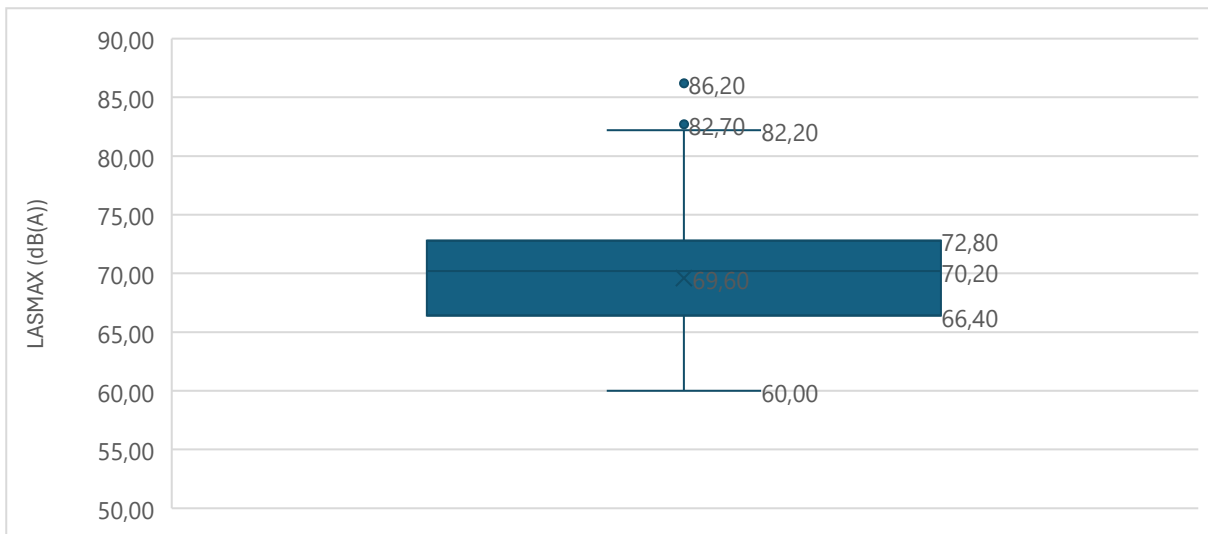


Abbildung 23 Boxplot für den 03.10.2023

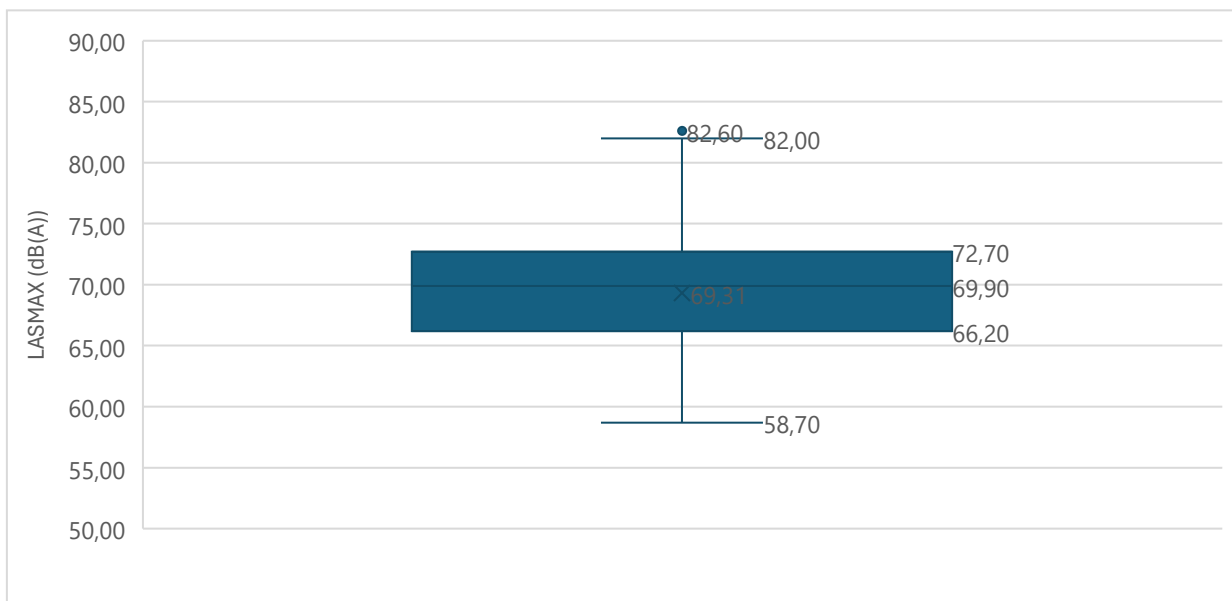


Abbildung 24 Boxplot für den 04.10.2023

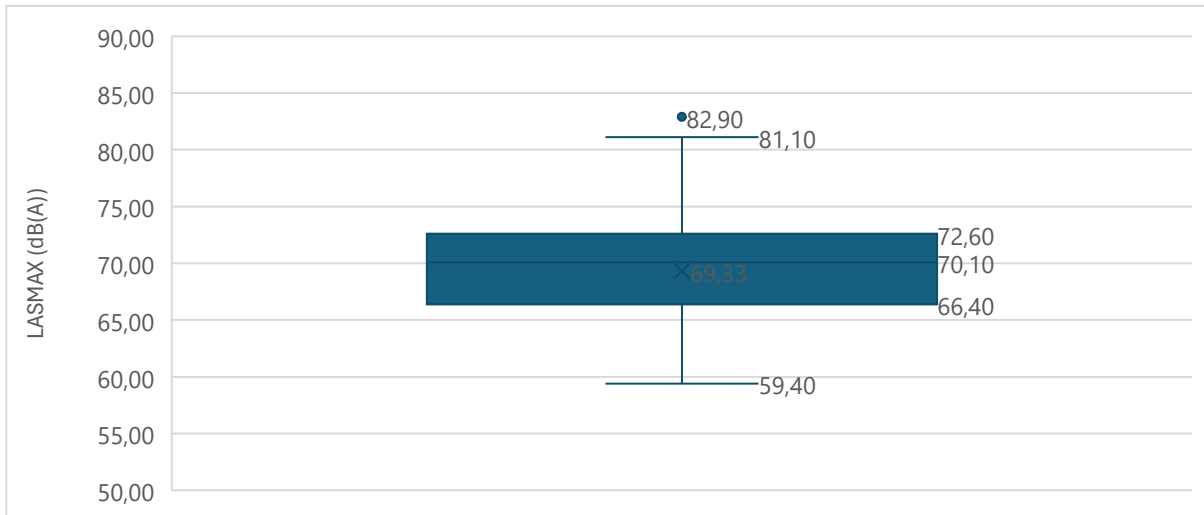


Abbildung 265 Boxplot für den 05.10.2023

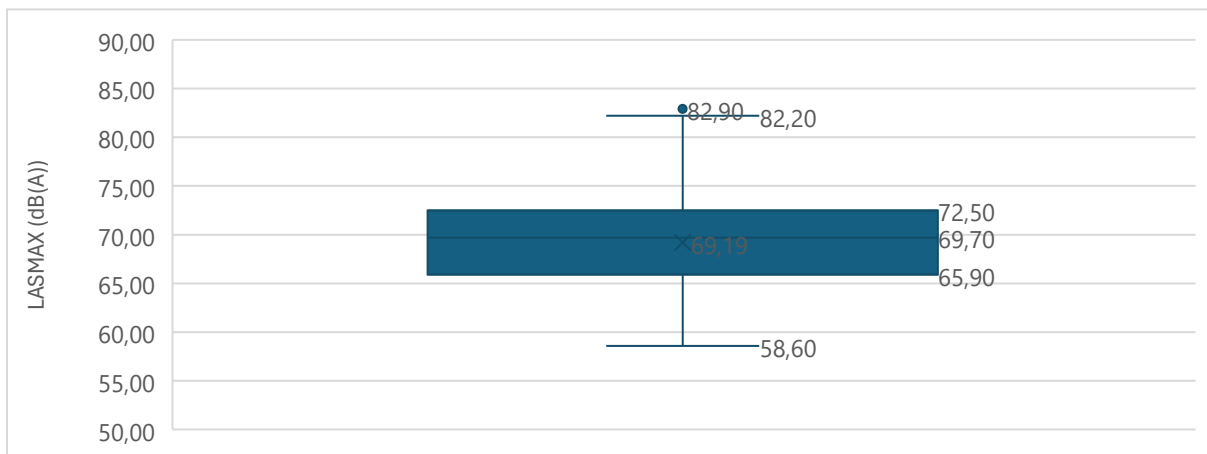


Abbildung 256 Boxplot für den 17.07.2023

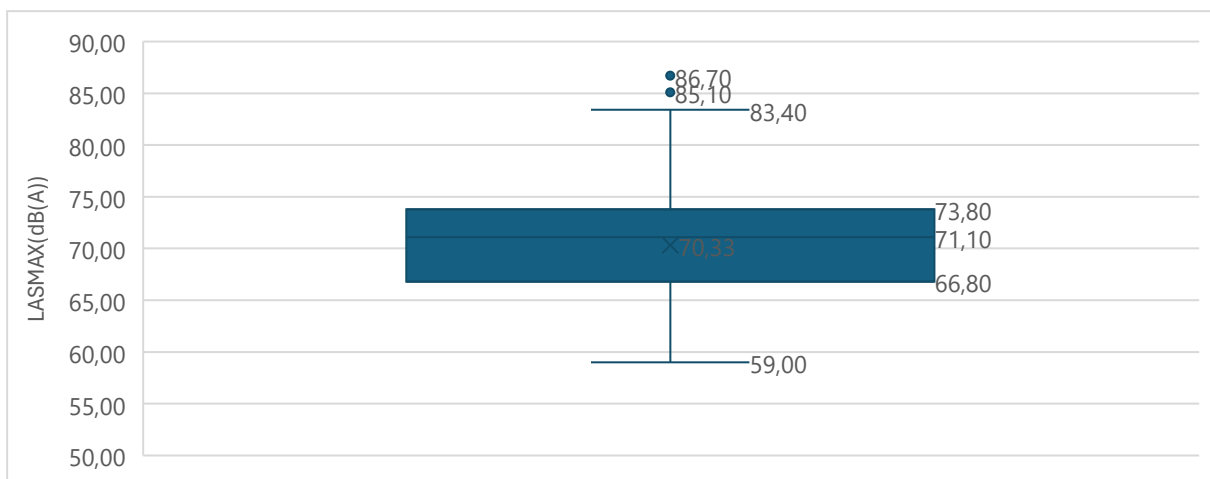


Abbildung 27 Boxplot für den 25.04.2023

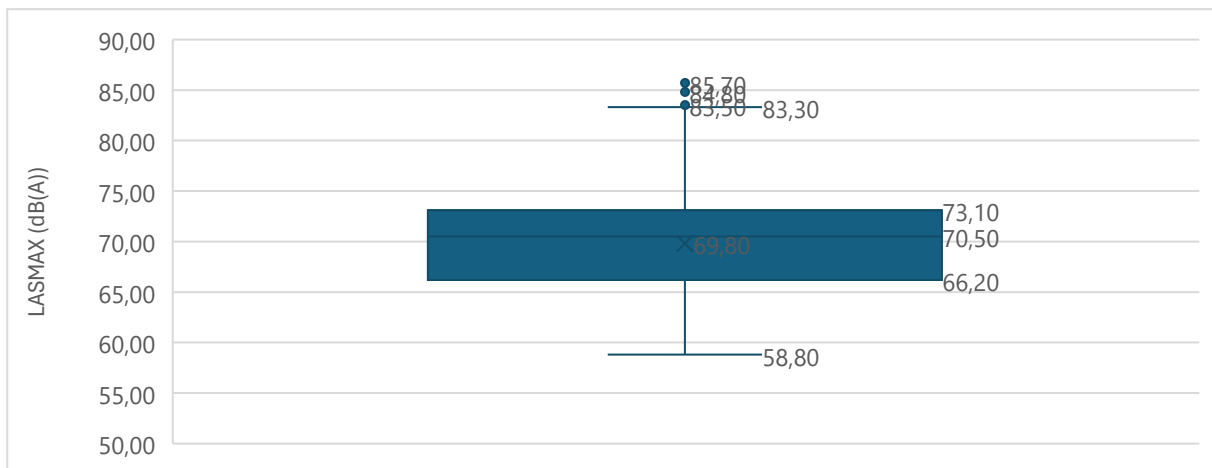


Abbildung 28 Boxplot 26.04.2023

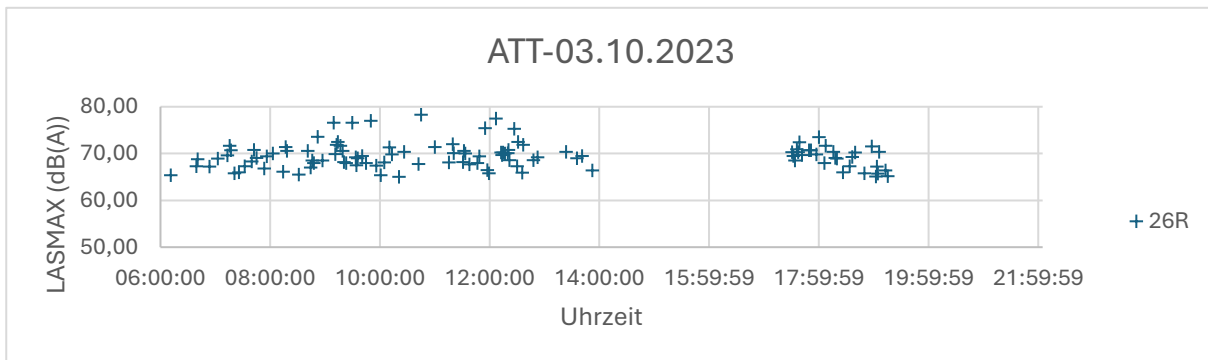


Abbildung 29 Streudiagramm für die Messstation Attaching am 03.10.2023

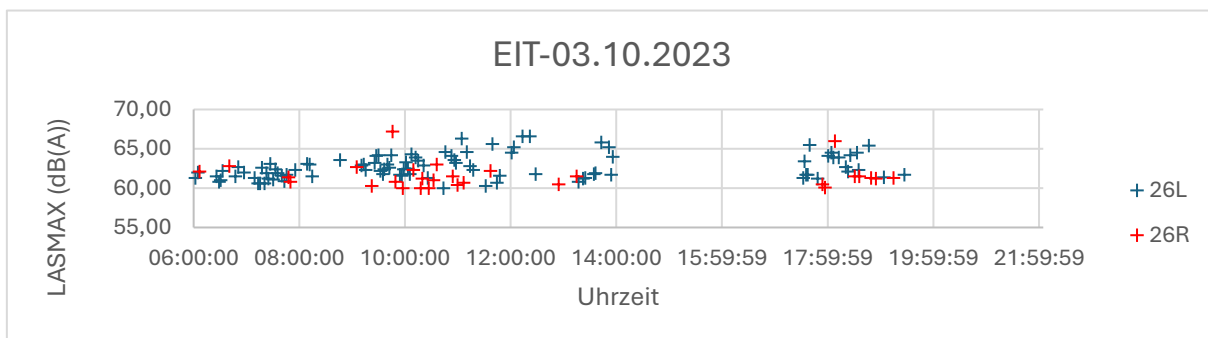


Abbildung 30 Streudiagramm für die Messstation Eiting am 03.10.2023

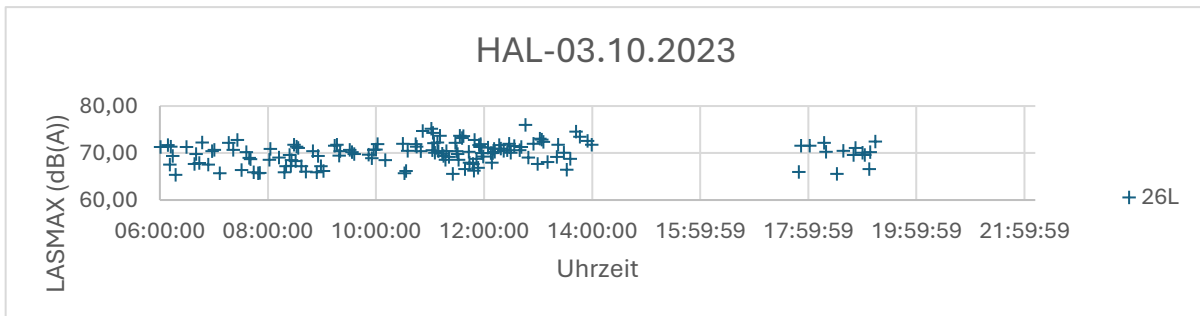


Abbildung 31 Streudiagramm für die Messstation Hallbergmoos am 03.10.2023

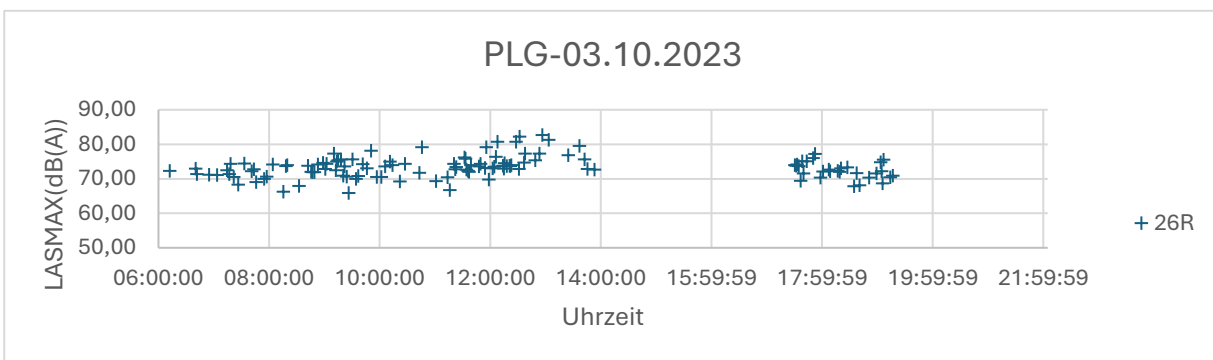


Abbildung 32 Streudiagramm für die Messstation Pulling am 03.10.2023

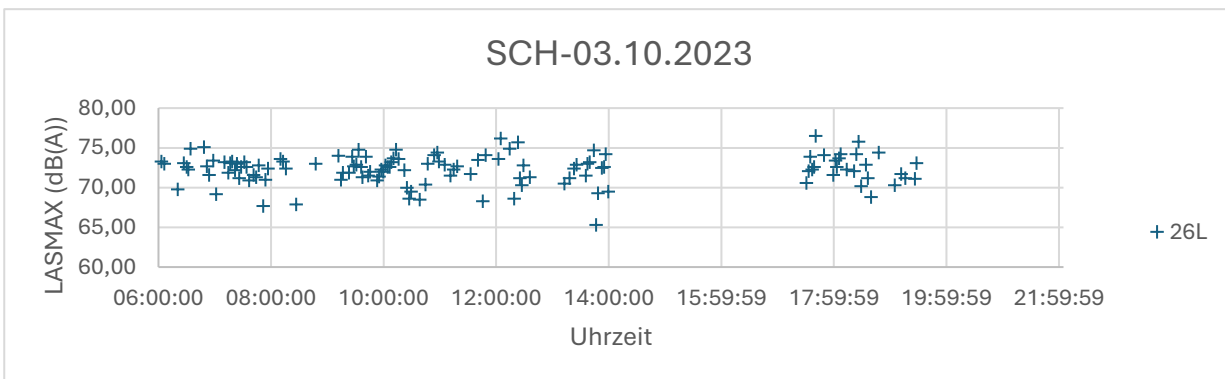


Abbildung 33 Streudiagramm für die Messstation Schwaig am 03.10.2023

ATT-D	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Niederschlag	Windrichtung	Windgeschwindigkeit	Luftdruck	Sonnenscheindauer
Temperatur	1	-0,68336623	-0,20162201	0,03090913	0,07338162	0,14362267	0,52621974
Relative Luftfeuchte	-0,68336623	1	0,22562244	-0,19729748	-0,22060187	-0,00285279	-0,6165966
Niederschlag	-0,20162201	0,22562244	1	-0,06089261	0,37301491	-0,28810051	-0,24154401
Windrichtung	0,03090913	-0,19729748	-0,06089261	1	-0,11577945	0,06018976	0,07225329
Windgeschwindigkeit	0,07338162	-0,22060187	0,37301491	-0,11577945	1	-0,62615721	0,04156315
Luftdruck	0,14362267	-0,00285279	-0,28810051	0,06018976	-0,62615721	1	0,21967084
Sonnenscheindauer	0,52621974	-0,6165966	-0,24154401	0,07225329	0,04156315	0,21967084	1

Tabelle 14 Korrelationsmatrix für die startenden Flugzeuge (D) der Messstation Attaching

EIT-A	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Niederschlag	Windrichtung	Windgeschwindigkeit	Luftdruck	Sonnenscheindauer
Temperatur	1	-0,66012953	-0,20569072	0,15175824	0,02430151	0,17560511	0,565527
Relative Luftfeuchte	-0,66012953	1	0,23185167	-0,29208149	-0,20064442	-0,038878	-0,61093602
Niederschlag	-0,20569072	0,23185167	1	-0,04437974	0,4083955	-0,32186144	-0,26161984
Windrichtung	0,15175824	-0,29208149	-0,04437974	1	-0,02050023	-0,01052031	0,14146596
Windgeschwindigkeit	0,02430151	-0,20064442	0,4083955	-0,02050023	1	-0,64594778	-0,02674127
Luftdruck	0,17560511	-0,038878	-0,32186144	-0,01052031	-0,64594778	1	0,30092001
Sonnenscheindauer	0,565527	-0,61093602	-0,26161984	0,14146596	-0,02674127	0,30092001	1

Tabelle 15 Korrelationsmatrix für die landenden Flugzeuge (A) der Messstation Eitting

HAL-D	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Niederschlag	Windrichtung	Windgeschwindigkeit	Luftdruck	Sonnenscheindauer
Temperatur	1,00	- 0,67718745	-0,16085986	0,04018217	-0,00791494	0,10870061	0,55896206
Relative Luftfeuchte	- 0,67718745	1,00	0,19335607	-0,16152431	-0,18200480	0,01350927	-0,62654945
Niederschlag	- 0,16085986	0,19335607	1,00	-0,00685350	0,28142612	- 0,24082894	-0,20365584
Windrichtung	0,04018217	- 0,16152431	-0,00685350	1,00	0,05678381	- 0,06741792	0,09433229
Windgeschwindigkeit	- 0,00791494	- 0,18200480	0,28142612	0,05678381	1,00	- 0,67093164	-0,02707454
Luftdruck	0,10870061	0,01350927	-0,24082894	-0,06741792	-0,67093164	1,00	0,25301262
Sonnenscheindauer	0,55896206	- 0,62654945	-0,20365584	0,09433229	-0,02707454	0,25301262	1,00

Tabelle 16 Korrelationsmatrix für die startenden Flugzeuge (D) der Messstation Hallbergmoos

PLG-D	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Niederschlag	Windrichtung	Windgeschwindigkeit	Luftdruck	Sonnenscheindauer
Temperatur	1,00	- 0,67016972	-0,19321801	0,01092950	0,01726010	0,13415632	0,51089146
Relative Luftfeuchte	- 0,67016972	1,00	0,22412984	-0,17940019	-0,16986055	- 0,01380763	-0,60839449
Niederschlag	- 0,19321801	0,22412984	1,00	-0,04765282	0,31272262	- 0,25407733	-0,22163025
Windrichtung	0,01092950	- 0,17940019	-0,04765282	1,00	-0,08574099	0,03345991	0,06443865
Windgeschwindigkeit	0,01726010	- 0,16986055	0,31272262	-0,08574099	1,00	- 0,65324609	0,00673652
Luftdruck	0,13415632	- 0,01380763	-0,25407733	0,03345991	-0,65324609	1,00	0,22803788
Sonnenscheindauer	0,51089146	- 0,60839449	-0,22163025	0,06443865	0,00673652	0,22803788	1,00

Tabelle 17 Korrelationsmatrix für die startenden Flugzeuge (D) der Messstation Pulling

SCH-A	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Niederschlag	Windrichtung	Windgeschwindigkeit	Luftdruck	Sonnenscheindauer
Temperatur	1,00	-0,67312509	-0,19405738	0,12797208	0,10460383	0,06612133	0,52647760
Relative Luftfeuchte	-0,67312509	1,00	0,22305235	-0,23518629	-0,25786613	0,03803816	-0,59583105
Niederschlag	-0,19405738	0,22305235	1,00	-0,03537918	0,38891255	-0,31851139	-0,23490951
Windrichtung	0,12797208	-0,23518629	-0,03537918	1,00	0,02199702	-0,05668745	0,13284246
Windgeschwindigkeit	0,10460383	-0,25786613	0,38891255	0,02199702	1,00	-0,62456767	0,08929904
Luftdruck	0,06612133	0,03803816	-0,31851139	-0,05668745	-0,62456767	1,00	0,18300507
Sonnenscheindauer	0,52647760	-0,59583105	-0,23490951	0,13284246	0,08929904	0,18300507	1,00

Tabelle 18 Korrelationsmatrix für die landenden Flugzeuge (A) der Messstation Schwaig

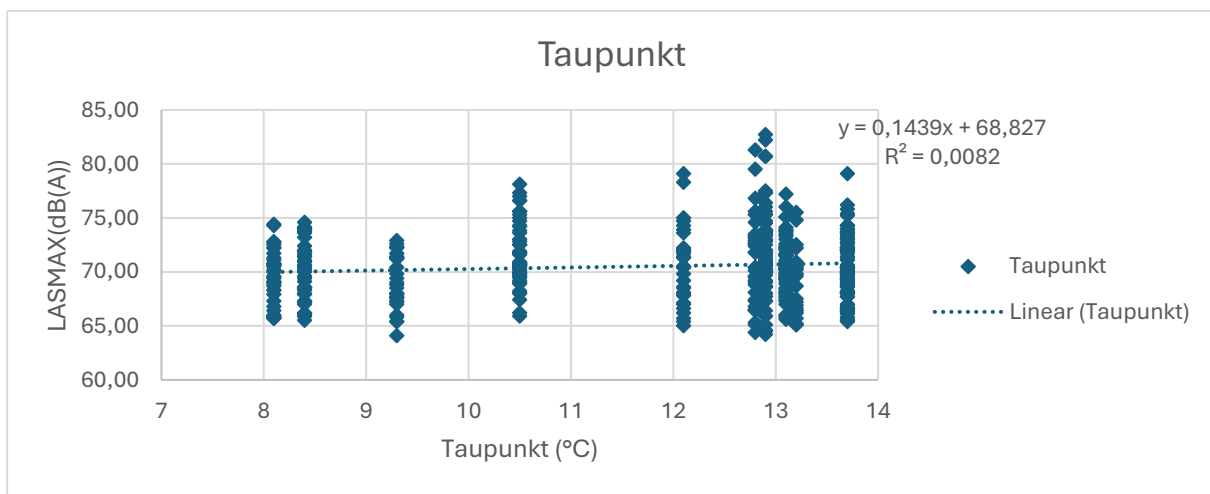


Abbildung 34 Streudiagramm des maximalen Schalldruckpegels in Abhängigkeit des Taupunkts für die Starts des 03.10.2023

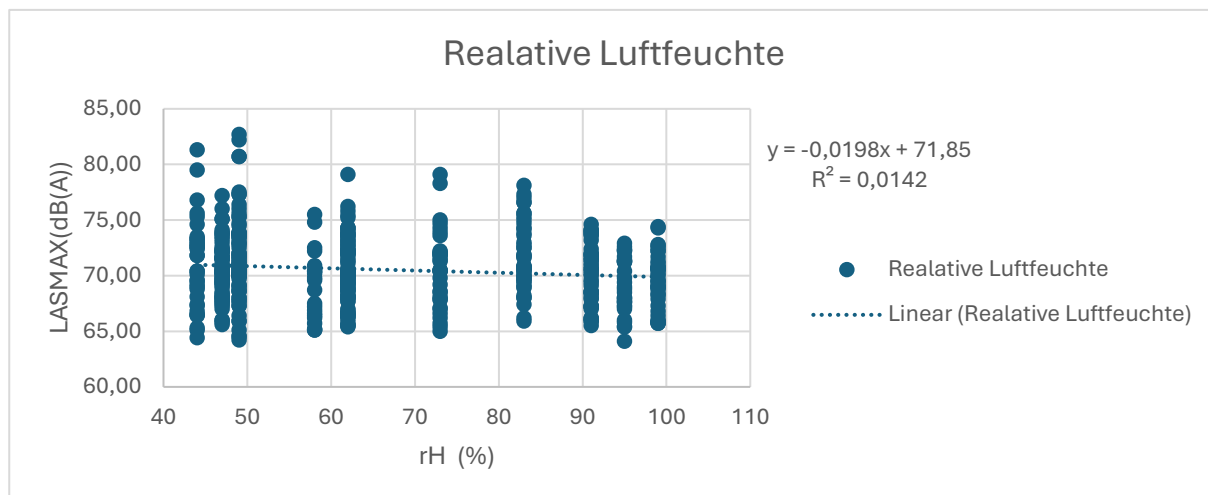


Abbildung 35 Streudiagramm des maximalen Schalldruckpegels in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte für die Starts des 03.10.2023

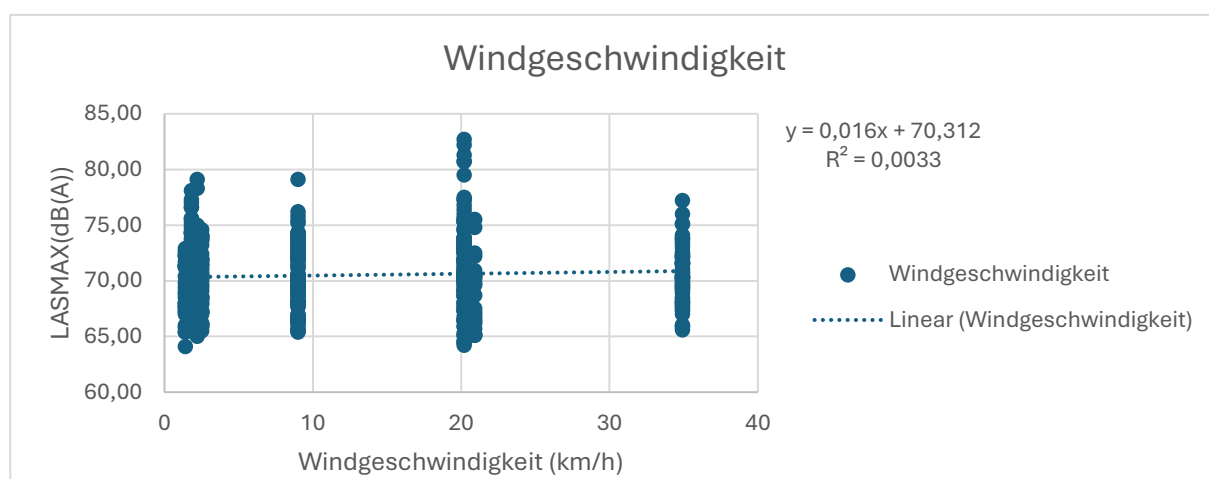


Abbildung 36 Streudiagramm des maximalen Schalldruckpegels in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für die Starts des 03.10.2023

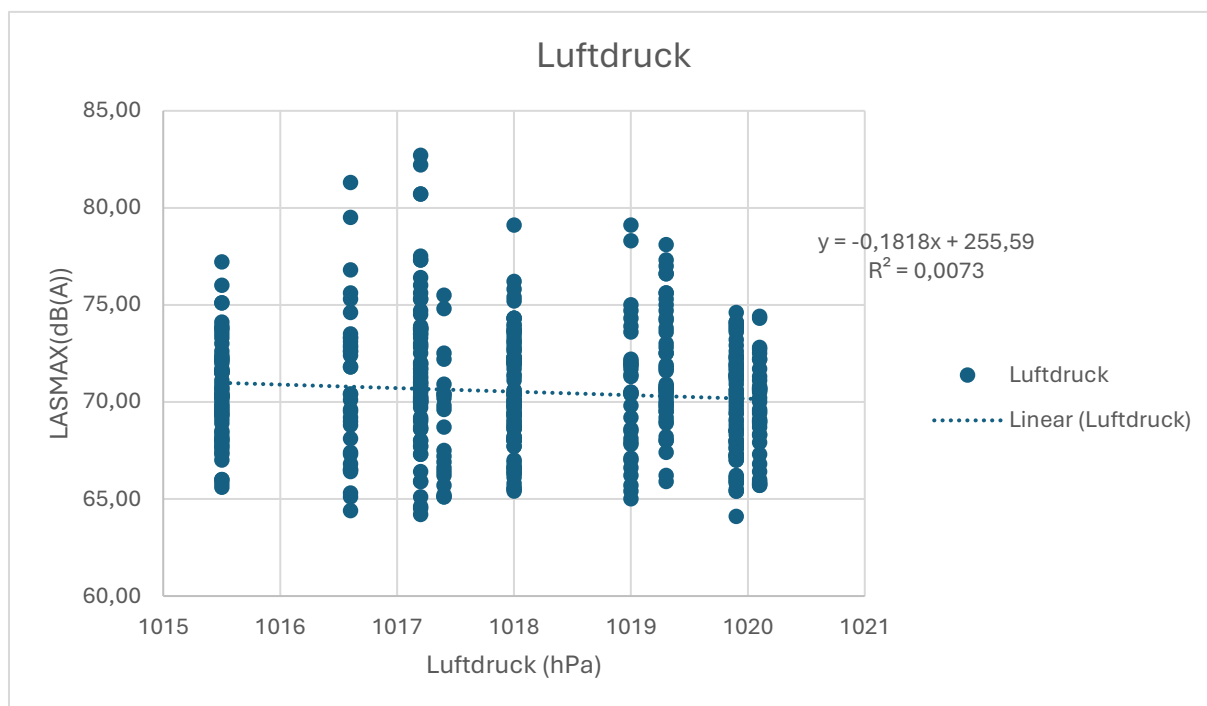


Abbildung 37 Streudiagramm des maximalen Schalldruckpegels in Abhängigkeit von dem Luftdruck für die Starts des 03.10.2023

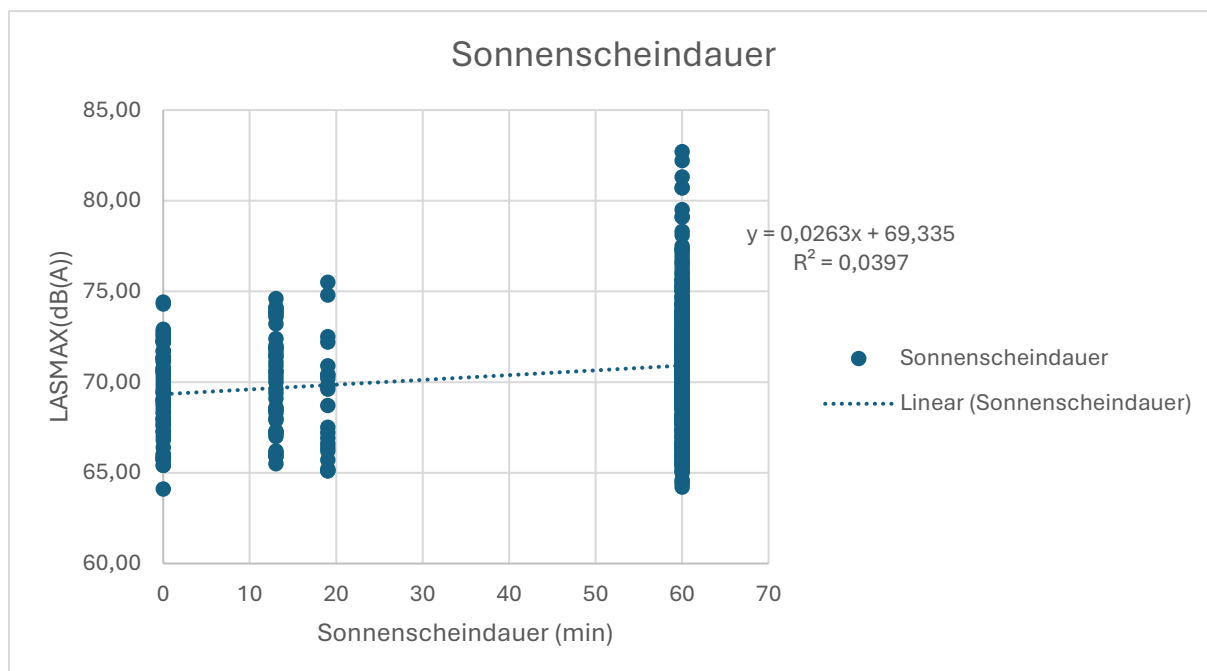


Abbildung 38 Streudiagramm des maximalen Schalldruckpegels in Abhängigkeit von der Sonnenscheindauer für die Starts des 03.10.2023

<i>P-Wert</i>	ACI-D	ATT-D	EIT-A	HALL-D	PLG-D	SCH-A
Schnittpunkt	4,8582E-10	8,0385E-14	4,72E-37	2,6603E-19	4,9998E-06	2,2806E-12
Runway	4,045E-122		5,6892E-26	0,17044386	4,1295E-16	
Temperatur	5,6819E-09	0,77653484	0,00137201	0,00385497	0,2326371	0,22222751
Relative Luftfeuchte	1,3365E-07	0,00036188	0,01048254	0,00384221	0,724139	0,02924399
Niederschlag	0,37878831	0,39321243	0,26382722	0,31896312	0,81661439	0,17327374
Windrichtung	0,96081631	0,2371502	0,70945299	0,72381702	0,63419271	0,81731877
Windgeschwindigkeit	0,00418981	0,05805164	0,06585256	6,3716E-05	0,37157748	0,00015779
Luftdruck	0,0058603	0,00013356	2,9657E-14	5,673E-06	0,46287567	0,14092152
Sonnenscheindauer	0,0065219	2,3776E-07	6,3917E-05	3,4743E-05	0,04380433	0,62851381
Feiertag	0,7728559	0,00864645	0,03756666	4,0468E-05	1,7372E-05	0,14861402

Tabelle 19 P-Werte nach Station und Start (D)/Landung (A) der ersten Iteration

	ACI-D	ATT-D	EIT-A	HALL-D	PLG-D	SCH-A
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,41	0,07	0,17	0,11	0,06	0,06

Tabelle 20 Adjustiertes Bestimmtheitsmaß nach Station und Start (D)/Landung (A) der ersten Iteration

Koeffizienten	ACI-D	ATT-D	EIT-A	HALL-D	PLG-D	SCH-A
Schnittpunkt	119,77615	135,89534	148,44133	137,72349	80,86751	89,26618
Runway	-5,63307		-1,47814	-2,44056	6,35878	
Temperatur	-0,10796	-0,00581	-0,04042	-0,04644	-0,02280	-0,01582
Relative Luftfeuchte	0,04668	0,03199	0,01357	0,02044	-0,00298	0,01222
Niederschlag	-0,72956	0,55083	-0,41930	0,64821	0,15674	0,65154
Windrichtung	-0,00009	-0,00236	-0,00044	-0,00050	0,00089	-0,00027
Windgeschwindigkeit	0,05119	0,03255	0,01952	0,05552	0,01429	0,04586
Luftdruck	-0,05160	-0,06736	-0,08463	-0,06722	-0,01266	-0,01808
Sonnenscheindauer	0,01289	0,02373	0,01165	0,01589	0,00895	0,00148
Feiertag	-0,10901	-0,78351	-0,38543	-1,00445	-1,29858	0,29383

Tabelle 21 Koeffizienten nach Station und Start (D)/Landung (A) der ersten Iteration

<i>P-Wert</i>	ACI-D	ATT-D	EIT-A	HALL-D	PLG-D	SCH-A
Schnittpunkt	4,3351E-10	1,2419E-13	1,879E-37	2,2098E-19	3,9282E-06	2,2806E-12
Runway	6,421E-123		5,5181E-26	0,17207629	4,2704E-16	0,22222751
Temperatur	4,7793E-09	0,91115946	0,00141234	0,00406213	0,20088723	0,02924399
Relative Luftfeuchte	7,775E-08	5,5933E-05	0,00633456	0,00311864	0,62958323	0,17327374
Niederschlag	0,37858749	0,43226726	0,25209483	0,32085123	0,80345367	0,81731877
Windgeschwindigkeit	0,00417335	0,03324354	0,05493059	5,8234E-05	0,40347709	0,00015779
Luftdruck	0,00583075	0,0001461	2,864E-14	6,0051E-06	0,45214921	0,14092152
Sonnenscheindauer	0,00647865	1,6892E-07	6,3565E-05	3,6532E-05	0,04534764	0,62851381
Feiertag	0,7757971	0,00818113	0,03919262	4,2925E-05	1,7403E-05	0,14861402

Tabelle 22 P-Werte nach Station und Start (D)/Landung (A) der zweiten Iteration

	ACI-D	ATT-D	EIT-A	HALL-D	PLG-D	SCH-A
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,40679255	0,0665973	0,16815567	0,10613894	0,06449722	0,05771033

Tabelle 23 Adjustiertes Bestimmtheitsmaß nach Station und Start (D)/Landung (A) der zweiten Iteration

KOEFFIZIENTEN	ACI-D	ATT-D	EIT-A	HALL-D	PLG-D	SCH-A
Schnittpunkt	119,70136 2	134,58926	147,86592	137,12268	81,504716	89,266184
Runway	-5,633955		-1,4779484	- 2,4301493	6,3524335	
Temperatur	-0,107865	-0,002261	-0,040284	-0,046049	- 0,0241531	0,0122209 2
Relative Luftfeuchte	0,0467546	0,0348383	0,0140420	0,0207407	-0,003957	0,6515445
Niederschlag	-0,729618	0,5058571	-0,428641	0,6454326	0,1680594	-0,000265
Windgeschwindigkeit	0,051191	0,0360329	0,0201202	0,0557415	0,0132222	0,0458641
Luftdruck	-0,051552	-0,066961	-0,084214	-0,066786	- 0,0129578	-0,018081
Sonnenscheindauer	0,012892	0,0239986	0,0116529	0,0158195	0,0088788	0,001480
Feiertag	-0,106645	-0,789199	-0,381391	-0,997617	-1,2980280	0,2938335

Tabelle 24 Koeffizienten nach Station und Start (D)/Landung (A) der zweiten Iteration

Literaturverzeichnis

- [1] Flughafen München GmbH, "Fluglärm und Fluglärmschutz," 2019.
- [2] Toronto Pearson Airport. "Environmental and perception factors "
<https://www.torontopearson.com/en/community/noise-management/understanding-airport-noise/environmental-perception-factors>
 (accessed 18.07.2024).
- [3] W. J. G. Bräunling, "Klassifizierung der Flugzeugtriebwerke," *Flugzeugtriebwerke* 2015. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-34539-5_2
- [4] FACC AG. "Besser Fliegen: Winglets machen Flugzeuge leiser und effizienter."
<https://www.facc.com/BEyond-Blog/Besser-Fliegen-Winglets-machen-Flugzeuge-leiser-und-effizienter> (accessed 02.09.2024, 2024).
- [5] Das Fluglärmportal, "Lärmquellen An der Wurzel des Problems. ," 05/15/2024. [Online]. Available: <https://www.fluglaerm-portal.de/fluglaerm-debatte/laermquellen/>. Das Fluglärmportal des Bundesverbands der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e. V. .
- [6] Regierung von Oberbayern, "Lärmaktionsplan der Regierung von Oberbayern für den Großflughafen München," 2021. [Online]. Available: https://www.regierung.oberbayern.bayern.de/service/planfeststellung/oeffentlichkeit/umwelt_gesundheit_verbraucherschutz/lap/lap_flughafen_mue/index.html.
- [7] San Diego International Airport, "BACKGROUND INFORMATION ON NOISE AND ITS MEASUREMENTS," *14 Code of Federal Regulations (CFR) Part 150 Noise Exposure Maps (NEMs) and Noise Compatibility Program (NCP) for San Diego International Airport*, 2022. [Online]. Available: <https://www.san.org/Aircraft-Noise/FAR-Part-150>
- [8] J. C. Hugh Saurenman, Louis C. Sutherland, Robert L. Bronsdon, Hans Forschner, "ATMOSPHERIC EFFECTS ASSOCIATED WITH HIGHWAY NOISE PROPAGATION," Arizona Department of Transportation, 2005. [Online]. Available: https://www.google.de/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40318/dot_40318_DS1.pdf&ved=2ahUKEwiarbiZqrKGAXhSPEDHXk3BjUQFnoECBYQAQ&usg=AOvVaw3xlAR6qkq6advCo0sRTWr1
- [9] Oakland International Airport. "Aircraft Noise." Oakland International Airport Master Plan Update.
https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://flquietoak.com/wp-content/uploads/2022/04/aircraft_noise_fundamentals.pdf&ved=2ahUKEwjh7o3Ly4-GAXW9hv0HHTBhCtkQFnoECBYQAQ&usg=AOvVaw1P5gk6y9mLZIFl8mk33EjK
 (accessed 05/15, 2024).
- [10] L. Hannah, "The Effect of Environment on Sound Propagation," *New Zealand Acoustics*, vol. 20, 2006. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.acoustics.org.nz/sites/www.acoustics.org.nz/files/journal/pdfs/Hannah_L_NZ_A2007_b.pdf&ved=2ahUKEwiOiMjRtLeGAXUowQIHV5YMGQQFnoECBAQAQ&usg=AOvVaw3CZA3Bp6sXlkuMV1IEM0YT.
- [11] E. K. Murphy, E.A., "Transportation Noise-Aircraft Noise," *Environmental Noise Pollution*, 2022, pp. 160-166. [Online]. Available: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/munchentech/reader.action?docID=6950380&ppg=2&pq-origsite=primo>

- [12] J. W. Ortscheid, H, "Fluglärmwirkungen," *Umweltbundesamt für Mensch und Umwelt*, 2000.
- [13] J. Wothge and H. Niemann, "Gesundheitliche Auswirkungen von Umgebungslärm im urbanen Raum," *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*, vol. 63, no. 8, pp. 987-996, 2020, doi: 10.1007/s00103-020-03178-9. Gesundheitliche Auswirkungen von Umgebungslärm im urbanen Raum.
- [14] K. N. H. Ommo, "Auswirkungen von Fluglärm auf Wildtiere: Ein kommentierter Überblick," *Journal für Ornithologie*, vol. 137, 1997. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.davvl.de/sites/default/files/2018-06/1997_1_auswirkungen_fluglaerm_wildtiere.pdf&ved=2ahUKEwjon8LpyKOHAXu_rslHZ4LDFwQFnoECBUQAQ&usg=AOvVaw2T7UaE23yj6DtvZ6U7FAD8.
- [15] Gemeinnützige Umwelthaus GmbH. "Was ist Fluglärm?" Gemeinnützige Umwelthaus GmbH <https://www.umwelthaus.org/fluglaerm/basiswissen/was-ist-fluglaerm/> (accessed 15.05.2024).
- [16] P. B. Liptai, M; Lukáčová; K. "Influence of Atmospheric Conditions on Sound Propagation-Mathematical Modeling." Óbuda University e-Bulletin. (accessed 05.05.2024).
- [17] B. L. für and Umwelt, "Lärm – Hören, messen und bewerten," 2017.
- [18] Das Fluglärmportal. "Was ist eigentlich Lärm? - Physikalische Grundlagen." <https://www.fluglaerm-portal.de/fluglaerm-debatte/was-ist-laerm/> (accessed 04.09.2024).
- [19] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. "Was ist Lärm?" BMUV <https://www.bmuv.de/themen/laerm/laermschutz-im-ueberblick/was-ist-laerm> (accessed 05/15, 2024).
- [20] F. Will, "A Novel Approach for Modelling Future Airport Noise Exposure," Doktor-Ingenieurs, Technische Universität München, 2019. [Online]. Available: <https://mediatum.ub.tum.de/1483148>
- [21] MTU Aero Engines. "So funktionieren Winglets." MTU Aero Engines. <https://aeroreport.de/de/good-to-know/so-funktionieren-winglets> (accessed 05/15, 2024).
- [22] T. Scholz, "Lärm," in *Flugzeugtechnik-Ein Nachschlagewerk*: Flughafen München GmbH, 1999, pp. 261-264.
- [23] Flughafen München GmbH, "Frischer Wind durch PCA." [Online]. Available: <https://www.munich-airport.de/frischer-wind-durch-pca-226065>. FMG.
- [24] EASA. "European Aviation Environmental Report-Aircraft noise." <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/technology-and-design/aircraft-noise> (accessed 26.09.2024).
- [25] Das Fluglärmportal. "ICAO regelt den internationalen Luftverkehr." <https://www.fluglaerm-portal.de/regeln-gesetze/wer-regelt-was/international/> (accessed).
- [26] C. Lomas. "Turboprops vs. Jets – What's the difference?" <https://www.flightradar24.com/blog/turboprops-vs-jets/> (accessed 26.09.2024).
- [27] aircservices australia. "Noise and sound." <https://www.airservicesaustralia.com/community/environment/aircraft-noise/monitoring-aircraft-noise/understanding-aircraft-noise/> (accessed 26.09.2024).

- [28] M. Durgut. "Noise Pollution Levels by Aircraft Types." <https://www.aviationfile.com/noise-pollution-levels-by-aircraft-types/> (accessed 26.09.2024).
- [29] K. O. Zhao, P; Neri, E; Chen, P; Kennedy, J; Bennett, G, "Noise reduction technologies for aircraft landing gear-A bibliographic review," *Research Gate*, 2019.
- [30] Steiermärkischen Landesregierung. "Wie wirkt sich Wetter auf das Lärmempfinden aus?" Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 15. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://g-raz-airport.at/media/2024/06/wettereinfluss-fluglaerm-landstmk.pdf&ved=2ahUKEwjAo6-g16iHAXWn9LslHfpBBc4QFnoECBIQAQ&usg=AOvVaw3Q-tx4nFS2VMAIBEgkOhdu> (accessed 15.07.2024).
- [31] L. Hannah, "Wind and Temperature Effects on Sound Propagation," *New Zealand Acoustics*, 2006. [Online]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.acoustics.org.nz/sites/www.acoustics.org.nz/files/journal/pdfs/Hannah,_L_NZA2007_\(a\).pdf&ved=2ahUKEwjfw46InsaFAxX5SfEDHSr4D-oQFnoECA0QAw&usg=AOvVaw1Ub8-iLg6uELDCrnHBfPkd](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.acoustics.org.nz/sites/www.acoustics.org.nz/files/journal/pdfs/Hannah,_L_NZA2007_(a).pdf&ved=2ahUKEwjfw46InsaFAxX5SfEDHSr4D-oQFnoECA0QAw&usg=AOvVaw1Ub8-iLg6uELDCrnHBfPkd).
- [32] F. A. P. Everest, K., "Reflection," in *Master Handbook of Acoustics*, vol. 6, 2015.
- [33] M. D. Q. Egan, J. D. ; Rousseau, M. Z. , "Architectural Acoustics," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 86, 1989.
- [34] E. K. Murphy, E.A., "Principles of environmental noise - Outdoor sound propagation," *Environmental Noise Pollution*, 2022, pp. 39-49. [Online]. Available: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/munchentech/reader.action?docID=6950380&ppg=2&pq-origsite=primo>
- [35] L. B. Schreiber, T, "Sound Propagation Outdoors," *Handbook of Engineering Acoustics* Springer, 2012. [Online]. Available: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-69460-1?wt_mc=ThirdParty.SpringerLink.3.EPR653.About_eBook
- [36] K. Attenborough, "Sound Propagation in the Atmosphere," *Springer Handbook of Acoustics* Springer Link, 2014. [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-0755-7>
- [37] C. Hartmann, "Flugverkehr und Umwelt aus meteorologischer Sicht," *Deutscher Wetterdienst*, 2018. [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2018/3/30.html.
- [38] Das Fluglärmportal. "Innovative Flugverfahren." <https://www.fluglaermportal.de/laerm-vermeiden/innovative-flugverfahren/> (accessed).
- [39] Australian Government, "Understanding aircraft noise," Department of Infrastructure, Transport, Regional Development and Communications,. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.westernsydneyairport.gov.au/sites/default/files/documents/2020-factsheet-understanding-aircraft-noise.pdf&ved=2ahUKEwil_u-HtK2GAXVNgv0HHZajAio4ChAWegQIFRAB&usg=AOvVaw1NcteMBs2EAQLZ0DfYtBFR
- [40] Federal Aviation Administration, "Aircraft Performance," *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*, 2023. [Online]. Available:

- <https://www.faa.gov/regulationspolicies/handbooksmanuals/aviation/phak/chapter-11-aircraft-performance>
- [41] H. E. Kraus, Ulrich; , "Der Luftdruck," *Risiko Wetter - Die Entstehung von Stürmen und anderen atmosphärischen Gefahren*, 2023. [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-55547-3>
- [42] Deutscher Wetterdienst. "Wetter- und Klimalexikon-Turbulenzen." <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=102824&lv2=102672> (accessed 03.09.2024).
- [43] Gemeinnützige Umwelthaus GmbH. "Was ist Lärm?" <https://www.umwelthaus.org/fluglaerm/basiswissen/was-ist-laerm/> (accessed 19.07.2024, 2024).
- [44] Gemeinnützige Umwelthaus GmbH. "Wie wird Fluglärm berechnet?" <https://www.umwelthaus.org/fluglaerm/basiswissen/was-ist-laerm/wie-wird-fluglaerm-berechnet/> (accessed 19.07.2024).
- [45] *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge.* [Online] Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/index.html>
- [46] Flughafen München GmbH. "Verkehrszahlen." <https://www.munich-airport.de/verkehrszahlen-88506> (accessed 17.07.2024).
- [47] Flughafen München GmbH, "Verkehrsbericht," 2024. [Online]. Available: <https://www.munich-airport.de/verkehrszahlen-88506>
- [48] Meteostat. *Wetterrückblick und Klimadaten*, 11.07.2024. [Online]. Available: <https://meteostat.net/de/>
- [49] SAS. "TaxiBot." <https://www.smart-airport-systems.com/solutions/taxibot/#:~:text=The%20TaxiBot%C2%AE%20is%20a%20semi-robotic%20hybrid%20towing%20system> (accessed 03.10.2024).
- [50] V. Gronefeld, "The airport and aircraft noise," in *Munich Airport a work of the century*, 1992.