

Erarbeitung eines Handlungsrahmens für die Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

Christian Piehler

aus Köln

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Peter Wolf
Universitätsprofessor Dr.-Ing. Ekkehard Wendler
Professor Dr. med. Sieglinde Schwarze
Professor Dr.-Ing. Hans-Gustav Nüßer

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Juli 2003

Inhaltsübersicht

1	Einleitung	1
2	Ziel und Abgrenzung der Arbeit	4
3	Determinanten von Fluglärmkontingentierungen	7
3.1	Fluggeräuschemissionen	7
3.2	Fluggeräuschimmissionen	16
3.3	Fluglärmwirkungen	25
4	Handlungsrahmen für die Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen	40
4.1	Maximen	42
4.2	Zielgröße	43
4.3	Zielwert	46
4.4	Zielbezug	48
4.5	Limitierungstyp	52
4.6	Bemessungszeitraum	60
4.7	Bemessungssituation	63
4.8	Bemessungsmethodik	66
4.9	Quantitative Stückelung	68
4.10	Zeitliche Stückelung	72
4.11	Lizenzvergabe	74
4.12	Überwachung	79
4.13	Implementierung	82
4.14	Dynamisierung	85
5	Schlussfolgerungen für die Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen	87
5.1	Ausgestaltungsoptionen	87

5.2	Ausgestaltungsprobleme	90
5.3	Lösungspotenzial	91
6	Zusammenfassung und Ausblick	92
	Literaturverzeichnis	94
	Abbildungsverzeichnis	114
	Tabellenverzeichnis	116
	Abkürzungsverzeichnis	117
	Formelzeichenverzeichnis	119
	Einheitenverzeichnis	122
	Anhang	123
A.1	Programmsystem ANICA	123
A.2	Datenbasis	126

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ziel und Abgrenzung der Arbeit	4
3	Determinanten von Fluglärmkontingentierungen	7
3.1	Fluggeräuschemissionen	7
3.1.1	Strahltriebwerk	7
3.1.1.1	Fan und Verdichter	8
3.1.1.2	Brennkammer und Turbine	10
3.1.1.3	Triebwerksstrahl	10
3.1.2	Propellertriebwerk	11
3.1.3	Umströmung	13
3.1.4	Diskussion	14
3.2	Fluggeräuschimmissionen	16
3.2.1	Fluggeräuschausbreitung	16
3.2.1.1	Sphärische Divergenz	17
3.2.1.2	Atmosphärische Dämpfung	17
3.2.1.3	Bodenzusatzdämpfung	17
3.2.1.4	Topographische Einflüsse	18
3.2.1.5	Meteorologische Einflüsse	19
3.2.2	Fluggeräuschimmissionsmessungen	19
3.2.2.1	Mess- und Kenngrößen	19
3.2.2.2	Einzelmessungen	21
3.2.2.3	Zulassungsmessungen	21
3.2.2.4	Langzeitmessungen	22
3.2.3	Fluggeräuschimmissionsberechnungen	23
3.2.3.1	Prognoseverfahren	23

3.2.3.2	Simulationsverfahren	24
3.2.4	Diskussion	24
3.3	Fluglärmwirkungen	25
3.3.1	Akute physiologische Wirkungen	25
3.3.2	Kommunikationsstörungen	27
3.3.3	Schlafstörungen	28
3.3.4	Belästigung	32
3.3.5	Mentale Leistungsstörungen	35
3.3.6	Chronische Gesundheitsstörungen	36
3.3.6.1	Biochemisch-hormonelle und immunologische Wirkungen	36
3.3.6.2	Kardiovaskuläre Erkrankungen	37
3.3.6.3	Psychiatrische Erkrankungen	38
3.3.6.4	Fetale Entwicklungsstörungen	38
3.3.7	Diskussion	39
4	Handlungsrahmen für die Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen	40
4.1	Maximen	42
4.2	Zielgröße	43
4.2.1	Fluggeräuschemissionen	43
4.2.2	Fluggeräuschimmissionen	44
4.2.3	Fluglärmwirkungen	44
4.2.4	Diskussion	45
4.3	Zielwert	46
4.3.1	Schutzkonzept	46
4.3.2	Präventivkonzept	47
4.3.3	Diskussion	47
4.4	Zielbezug	48
4.4.1	Bezugsjahr	48

4.4.2	Modifiziertes Bezugsjahr	49
4.4.3	Prognosejahr	49
4.4.4	Endausbau	50
4.4.5	Diskussion	51
4.5	Limitierungstyp	52
4.5.1	Punktkontingentierung	52
4.5.2	Konturkontingentierung	54
4.5.3	Flächenkontingentierung	55
4.5.4	Volumenkontingentierung	57
4.5.5	Diskussion	59
4.6	Bemessungszeitraum	60
4.6.1	Kurzfristhorizont	60
4.6.2	Langfristhorizont	61
4.6.3	Diskussion	62
4.7	Bemessungssituation	63
4.7.1	Ist-Verteilung	63
4.7.2	Normierte Verteilung	63
4.7.3	100:100-Verteilung	64
4.7.4	Diskussion	65
4.8	Bemessungsmethodik	66
4.8.1	Ex-ante-Bemessung	66
4.8.2	Ex-post-Bemessung	67
4.8.3	Diskussion	67
4.9	Quantitative Stückelung	68
4.9.1	Punktkontingentierung	68
4.9.2	Konturkontingentierung	70
4.9.3	Flächenkontingentierung	70
4.9.4	Volumenkontingentierung	71

4.9.5	Diskussion	71
4.10	Zeitliche Stückelung	72
4.10.1	Unbefristete Geltungsdauer	72
4.10.2	Befristete Geltungsdauer	72
4.10.3	Diskussion	73
4.11	Lizenzvergabe	74
4.11.1	Administrative Zuteilung	74
4.11.2	Lizenzhandel	75
4.11.3	Laissez-faire-Prinzip	76
4.11.4	Erstvergabe	77
4.11.5	Lizenzübertrag	77
4.11.6	Ausnahmen	78
4.11.7	Diskussion	78
4.12	Überwachung	79
4.12.1	Flughafenunternehmen	79
4.12.2	Fluglärmkommission	80
4.12.3	Flughafenkoordinator	80
4.12.4	Genehmigungs-/Planfeststellungsbehörde	81
4.12.5	Diskussion	81
4.13	Implementierung	82
4.13.1	Luftrechtliche Betriebsregelung	82
4.13.2	Freiwillige Selbstverpflichtung	83
4.13.3	Diskussion	84
4.14	Dynamisierung	85
4.14.1	Zielwertreduktion	85
4.14.2	Lizenzentnahme	85
4.14.3	Lizenzabwertung	86
4.14.4	Diskussion	86

5	Schlussfolgerungen für die Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen	87
5.1	Ausgestaltungsoptionen	87
5.2	Ausgestaltungsprobleme	90
5.3	Lösungspotenzial	91
6	Zusammenfassung und Ausblick	92
	Literaturverzeichnis	94
	Abbildungsverzeichnis	114
	Tabellenverzeichnis	116
	Abkürzungsverzeichnis	117
	Formelzeichenverzeichnis	119
	Einheitenverzeichnis	122
	Anhang	123
A.1	Programmsystem ANICA	123
A.1.1	Einsatzspektrum	123
A.1.2	Umsetzung	124
A.1.3	Anwendung	125
A.2	Datenbasis	126
A.2.1	Fluggeräuschemissionen	126
A.2.2	Flughafeninfrastruktur	131
A.2.3	Besiedlungsstruktur	132
A.2.4	Flugbetriebsszenarien	132

1 Einleitung

Für die gesellschaftliche, kulturelle und ökonomische Entwicklung einer modernen Volkswirtschaft sind schnelle, zuverlässige und sichere Verkehrsverbindungen unerlässlich. Insbesondere erfordern die fortschreitende internationale Verflechtung und der globale Standortwettbewerb in zunehmendem Maß weltweite Mobilität von Personen, Gütern, Dienstleistungen und Informationen. Bei der Deckung dieses Mobilitätsbedarfs kommt dem Luftverkehr eine zentrale Bedeutung zu [5, 28, 29, 149].

Bereits in den vergangenen 20 Jahren hatte kaum ein Wirtschaftsbereich auch nur annähernd solch hohe und langfristig stabile Wachstumsraten aufzuweisen wie der Luftverkehr und die Luftverkehrswirtschaft. Die in den letzten Jahren vorgelegten Langfristprognosen lassen keinen Zweifel daran, dass sich das dynamische Wachstum des jüngsten Massen-Verkehrsträgers in den nächsten 10 bis 20 Jahren fortsetzen wird [1, 2, 25, 26, 29, 89, 97, 213].

Zwar gibt es deutliche Unterschiede hinsichtlich der methodischen Vorgehensweise und des betrachteten Zeithorizonts, doch mit durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten von 4 % bis 5 % im Passagier- und rund 6 % im Frachtbereich stimmen die zentralen Aussagen der Prognosen signifikant überein. Die größten Zuwachsraten werden für Asien und Südamerika erwartet. Für Europa wird eine prozentuale Zunahme gesehen, die knapp den internationalen Durchschnitt erreicht [1, 2, 25, 26, 213].

Von einer nachhaltigen Beeinträchtigung der prosperierenden Entwicklung des nationalen wie des internationalen Luftverkehrs infolge der Attentate in den USA vom 11. September 2001 wird gemeinhin nicht ausgegangen. Vielmehr wird trotz der in 2001 und 2002 teils rückläufigen Verkehrszahlen mit einer Normalisierung der Nachfrage und einer schrittweisen Annäherung an die langfristig prognostizierten Wachstumsraten ab 2003 gerechnet [2, 6, 7, 26, 32, 64, 99, 124, 172].

Diese Einschätzung teilt eine in 2002 veröffentlichte PROGNOSE-Studie, die das jährliche Passagierwachstum für die westeuropäischen Länder zwischen 2005 und 2015 auf 4 % beziffert. In dem vor den Attentaten erstellten Bericht zur Mediation für den Flughafen Frankfurt wird für die deutschen Verkehrsflughäfen bis 2015 eine mittlere Steigerungsrate zwischen 3 % und 4 % genannt. Mit einer erwarteten Zunahme des Lokalaufkommens von durchschnittlich 3,3 % bis 2010 kommt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in 1999 bei einer Prognose der Passagiernachfrage zu einem vergleichbaren Ergebnis [81, 89, 172, 204].

Für das Bewegungsaufkommen in Passagierflügen auf den deutschen Verkehrsflughäfen wird in der detaillierten Betrachtung des DLR eine jährliche Wachs-

tumsrate von 2,6 % bis 3,3 % abgeleitet. Zwischenzeitlich haben jedoch große deutsche Ferienfluggesellschaften ihre Flottenpolitik mit einer deutlichen Trendwende hin zu kleinerem Fluggerät und hochfrequenter Bedienung von Reisezielen geändert, sodass der obere Wert belastbarer erscheint. Entsprechende Festbestellungen und Optionen für weiteres Fluggerät lassen den Rückschluss zu, dass sich dieser Trend mittel- bis langfristig fortsetzen wird [204, 214].

Das Luftfracht- und Luftpostaufkommen in Deutschland wird nach den DLR-Analysen bis 2010 mit jährlich rund 6 % deutlich zulegen. Während der überwiegende Teil der Luftfracht als Beiladung in Passagierflugzeugen transportiert wird, werden drei Viertel der Luftpost in eigenen Flugzeugen befördert. Insgesamt sind fracht- und postspezifische Bewegungen für etwa 4 % des gesamten Flugbewegungsaufkommens verantwortlich [29, 204].

An den Ausfuhren Deutschlands hat die Luftfracht mengenbezogen mit 0,4 % nur einen geringen Anteil. Die Bedeutung des Luftfrachtverkehrs erschließt sich somit erst durch Berücksichtigung ihrer qualitativen Dimension. Denn die transportierten Güter machen 15 % des gesamten Ausfuhrwertes aus, also knapp das Vierzigfache ihres Mengenanteils [29].

Hohe Verkehrsmobilität ist jedoch nicht nur von elementarer Bedeutung für die Leistungs- und Funktionsfähigkeit der exportorientierten deutschen Industriegesellschaft. Vielmehr ist sie auch Ausdruck des menschlichen Grundbedürfnisses nach uneingeschränkter räumlicher Beweglichkeit und damit Voraussetzung für eine freie Entfaltung der Persönlichkeit [8, 180].

Als landgebundener Schnittpunkt der Luftverkehrsströme stellen die Verkehrsflughäfen die infrastrukturellen, betrieblichen und personellen Kapazitäten zur Deckung des nachfrageseitigen Bedarfs an Luftverkehrsleistungen bereit. Sie sind damit nicht nur Anfangs- und Endpunkt einer jeden Flugreise, sondern nehmen auch eine wichtige Funktion in einem integrierten Verkehrssystem wahr. Um dieser Funktion gerecht zu werden, agieren die Flughäfen als Dienstleister und Investoren [29, 82].

Allein die bedarfsgerechte Anpassung der Flughafeninfrastruktur in Deutschland erfordert Investitionen von etwa 1 Mrd. Euro pro Jahr. Ebenso wie die personalintensiven Transportdienstleistungen im Passagier- und Luftfrachtsektor führen diese Investitionstätigkeiten zu erheblichen Einkommens- und Beschäftigungseffekten. So haben die deutschen Verkehrsflughäfen in 1998 mit ihren 145000 direkt Beschäftigten zur Sicherung von mehr als 480000 indirekten und induzierten Arbeitsplätzen in den umgebenden Regionen beigetragen [3, 29].

Dennoch ist das Verhältnis zwischen den Flughäfen und ihrer Umgebung konfliktträchtig und von divergierenden Interessenlagen geprägt. Den positiven gesellschaftlichen, kulturellen und ökonomischen Effekten stehen die von den Flug-

hären ausgehenden Umweltwirkungen entgegen. Dabei stellen die von rollenden, startenden, landenden oder in geringer Höhe fliegenden Flugzeugen verursachten Geräusche für die Anwohner die größte mit dem Flughafen verbundene Belastung dar [29, 89].

Zwar hat sich der deutliche Rückgang der militärischen Flugbewegungen infolge der veränderten sicherheitspolitischen Lage in Mittel- und Osteuropa ebenso wie die fortschreitende Ausmusterung von älteren und lauten Flugzeugen mit Zulassung nach Kapitel 2 bis April 2002 positiv auf das Lärmklima der letzten 10 Jahre ausgewirkt und das stark gestiegene Verkehrsaufkommen überkompensiert. Dieser Trend wird sich zukünftig jedoch nicht gleichermaßen fortsetzen [123, 142].

Nach den Ergebnissen einer 2000 durchgeführten, bundesweiten Repräsentativumfrage wird aber bereits heute knapp ein Drittel der Bevölkerung durch Fluglärm belästigt. Zur nachhaltigen Sicherung der Luftverkehrsmobilität sind deshalb ökonomische Leistungsfähigkeit, ökologische Tragfähigkeit und soziale Verträglichkeit in eine für alle Beteiligten faire Balance zu bringen [89, 149, 202, 212].

Gezielte verkehrspolitische Maßnahmen können hierzu wesentliche Beiträge leisten. Besonders Erfolg versprechend sind auf den verstärkten Einsatz geräuschärmerer Flugzeuge ausgerichtete Maßnahmen, zu denen im Wesentlichen schallpegelabhängige Flugverbote, schallpegelabhängige Gebührendifferenzierungen und Fluglärmkontingentierungen zählen.

Schallpegelabhängige Flugverbote basieren auf einer administrativ festgelegten Immissionsnorm. Diese Norm definiert für den maximalen Geräuschimmissionspegel eines Flugzeugs einen Grenzwert, der nicht überschritten werden darf. Der Grenzwert kann sowohl an absoluten als auch an relativen Maßstäben orientiert sein. Flugbewegungen mit Flugzeugen, die der Norm nicht genügen, sind unzulässig.

Schallpegelabhängige Gebührendifferenzierungen sind ein marktkonformes umweltpolitisches Instrument. Der vom Immissionspegel abhängige Umfang der Zahlungsverpflichtung für die Flugzeughalter ist üblicherweise ein integraler Bestandteil der an die Flughäfen zu entrichtenden Landeentgelte. Analog zu den Überlegungen bei den schallpegelabhängigen Flugverboten kann die Bemessung der Entgelthöhe anhand absoluter oder relativer Kriterien erfolgen.

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten verkehrspolitischen Optionen wirken Fluglärmkontingentierungen nicht unmittelbar auf ein einzelnes Flugereignis. Ihr Ziel ist vielmehr die verbindliche Festschreibung einer über eine Vielzahl von Flugereignissen kumulierten quantitativen Obergrenze, die einzuhalten ist.

Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschließlich mit dem Instrument der Fluglärmkontingentierung.

2 Ziel und Abgrenzung der Arbeit

Die Idee, das Konfliktpotenzial zwischen den wirtschaftlichen Interessen im Umfeld eines expandierenden Flughafens auf der einen und dem Ruhebedürfnis der Flughafenanwohner auf der anderen Seite mit Hilfe von Fluglärmkontingentierungen zu minimieren, ist nicht ganz neu.

Bereits Mitte der siebziger Jahre skizzierte BECKERS rudimentäre Vorstellungen eines Zeitabhängigen Lärm-Kontingents (ZLK) zur spürbaren Verminderung der Fluglärmwirkungen bei geringstmöglicher Verkehrsbehinderung, die allerdings keine weiteren Konkretisierungen erfuhren [18, 19].

Vor dem Hintergrund der steigenden Kosten und der begrenzten Innovationskraft administrativer Maßnahmen setzten sich BEYHOFF ET AL. Anfang der neunziger Jahre erstmals detailliert mit dem umweltökonomischen Potenzial von Fluglärmkontingentierungen auseinander. Trotz erkennbarer Sympathie für dieses mit dem Gesamtwirtschaftssystem und den allgemeinen Liberalisierungsbestrebungen im Luftverkehr konforme Instrument zur Fluglärmbegrenzung warnen die Autoren vor einem Unterschätzen der Probleme bei der Festlegung eines angemessenen Handlungsrahmens und mahnen zusätzliche Untersuchungen an [21].

Nach einer ökonomischen Analyse von Zielen und Instrumenten des Umweltschutzes im zivilen Luftverkehr rät FICHERT 1999 vom Einsatz umweltökonomischer Mengelösungen, zu denen auch Fluglärmkontingentierungen zählen, wegen der großen Ausgestaltungsprobleme ab [56]. Von der wirtschaftstheoretischen Seite nähert sich SCHMIDT 1994 dem Themenkomplex umweltökonomischer Lizenzlösungen und entwirft für die Anwendung bei Fluglärm ein einfaches Lizenzmodell, das einer sachgerechten Übertragung in die Praxis jedoch nicht standhält [190].

Unter juristischen Aspekten befasst sich mit Fluglärmkontingentierungen vor allem BIDINGER, die in ihrer 1996 erschienenen Publikation die Zulässigkeit kapazitätsbeschränkender Maßnahmen bei der Planung und Nutzung von Verkehrsflughäfen kritisch hinterfragt [22]. Auch HERMANN diskutiert 1994 in seiner Dissertation über den Schutz vor Fluglärm bei der Planung von Verkehrsflughäfen kontingentspezifische Fragen [92].

Fundierte Ausarbeitungen, die insbesondere die verkehrs- und ingenieurwissenschaftlichen sowie die interdisziplinären Problemstellungen bei der Ausgestaltung von Fluglärmkontingentierungen behandeln, fehlen bisher.

Dessen ungeachtet sind Fluglärmkontingentierungen unter dem Eindruck stetig sinkender Dauerschallpegel bei erheblich zunehmendem Verkehrsaufkommen seit den neunziger Jahren ein willkommenes Instrument für Flughäfen, um bestehen-

de Bewegungskontingentierungen oder andere Betriebsbeschränkungen aufzubrechen und stattdessen Maßnahmen zu implementieren, die geringere Restriktionen verheißen und einen vermeintlich größeren Entscheidungsspielraum zulassen.

So erleben Fluglärmkontingentierungen seit Jahren einen regelrechten Boom. Ob als Lärmfestschreibungskontur, Lärmgrenzlinie, Lärmdeckel, Lärmpunktekonto, Lärmzone oder Lärmvolumen – Lärmkontingentierungen sind in den verschiedensten Ausprägungen an einer Reihe deutscher Verkehrsflughäfen eingeführt worden oder in der Einführung befindlich.

Im Ausland war es vor allem die als Noise Quota bekannte Fluglärmkontingentierung für die Londoner Flughäfen Heathrow, Gatwick und Stansted, die ab Oktober 1993 als ergänzendes Kontrollelement zu einer Bewegungskontingentierung realisiert wurde und weltweit für Aufsehen sorgte [201].

Die Proteste der Anwohner gegen diese Maßnahme waren jedoch erbittert und mündeten 2001 in eine erfolgreiche Klage vor dem Europäischen Gerichtshof für Menschenrechte [52]. Ähnliche Erfahrungen hat auch die luftrechtliche Genehmigungsbehörde für den Flughafen Düsseldorf machen müssen, die mit ihrem Vorschlag einer Lärmkontingentierung 1999 vor dem Oberverwaltungsgericht für das Land Nordrhein-Westfalen gescheitert ist [153].

Die beiden Beispiele unterstreichen, dass es nach wie vor zahlreiche Schwierigkeiten und Unzulänglichkeiten bei der Ausgestaltung von Fluglärmkontingentierungen gibt [8, 59]. In den kommenden Jahren werden diese verstärkt zutage treten. Denn entgegen der Entwicklung in der zurückliegenden Dekade wird sich das Lärmklima im Umfeld der Verkehrsflughäfen künftig eher verschlechtern, sodass einzelne Kontingente voll ausgelastet sein werden und erstmals ihre Funktionsfähigkeit beweisen müssen.

In den bisherigen wissenschaftlichen Abhandlungen werden zwar einzelne Aspekte der komplexen Kontingentierungsproblematik untersucht und Lösungsansätze für isolierte, ökonomische und juristische Teilbereiche aufgezeigt. Eine ergebnisorientierte Synthese dieser Erkenntnisse und ihre systematische interdisziplinäre Ergänzung zu einem integrierten Handlungsrahmen stehen jedoch aus.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, die aufgezeigten Lücken zu schließen und einen praxisnahen Handlungsrahmen zu erarbeiten, der die Entwicklung von sachgerechten und planungssicheren Fluglärmkontingentierungen für deutsche Verkehrsflughäfen in adäquater Weise unterstützt.

Die Voraussetzungen für die Erreichung dieses Zieles werden nach den beiden einführnden Kapiteln sukzessive in vier weiteren Kapiteln geschaffen. Mit den Fluggeräuschemissionen, den Fluggeräuschimmissionen und den Fluglärmwirkungen werden in Kapitel 3 die maßgeblichen Determinanten von Fluglärmkontingentie-

rungen vorgestellt. Sie bilden die Grundlage für das Verständnis der späteren kontingentspezifischen Ausführungen.

Ausgehend von einer Erläuterung der geräuschproduktiven Komponenten von Verkehrsflugzeugen und geeigneter Gegenmaßnahmen werden in Kapitel 3.1 konkrete Minderungspotenziale für Triebwerks- und Umströmungsgeräusche identifiziert.

Kapitel 3.2 ist den Ausbreitungsmechanismen von Fluggeräuschen durch die Atmosphäre sowie gebräuchlichen Mess- und Kenngrößen zur Fluggeräuscherfassung im Rahmen von Einzel-, Zulassungs- und Langzeitmessungen gewidmet. Darüber hinaus werden Simulations- und Prognoseverfahren zur Berechnung von Fluggeräuschimmissionen thematisiert.

Der Übergang von der rein physikalischen zur wirkungsseitigen Betrachtung wird in Kapitel 3.3 vollzogen. Medizinische und psychologische Erkenntnisse über humanspezifische Fluglärnwirkungen werden auf der Basis umfangreicher Literaturrecherchen und eigener Forschungsarbeiten einer kritischen Würdigung unterzogen. Schwerpunkte werden – ihrer Bedeutung in der Praxis entsprechend – bei den Schlafstörungen und der Belästigung gesetzt.

Kapitel 4 ist das zentrale Kapitel der vorliegenden Arbeit. In allen wesentlichen Handlungsfeldern wird zunächst das theoretische Potenzial von Fluglärmkontingentierungen systematisch herausgearbeitet und auf seine praktische Relevanz überprüft. Darauf aufbauend wird im Folgenden ein konkreter Handlungsrahmen abgeleitet.

Von der Darlegung der Maximen, der Auseinandersetzung mit Zielgröße, Zielwert und Zielbezug über die Klärung von Limitierungstyp, Bemessungszeitraum, Bemessungssituation und Bemessungsmethodik bis zur Diskussion der quantitativen wie zeitlichen Stückelung und der Lizenzvergabe, der Überwachung und Implementierung sowie einer potenziellen Dynamisierung wird das gesamte Ausgestaltungsspektrum von Fluglärmkontingentierungen strukturiert abgehandelt.

Anhand von computergestützten Berechnungen realitätsnaher Flugbetriebsszenarien für einen Hybrid-Flughafen mit abhängigem Parallelbahnsystem werden essenzielle Aussagen, Argumentationsketten und Schlussfolgerungen bei Bedarf in graphischer oder tabellarischer Form veranschaulicht.

Aus dem in Kapitel 4 entworfenen Handlungsrahmen ergeben sich übergeordnete Schlussfolgerungen für die Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen, die in Kapitel 5 erörtert werden. Dabei wird besonderer Wert auf die Berücksichtigung der komplexen Interdependenzen zwischen den einzelnen Handlungsfeldern gelegt.

Die Arbeit schließt in Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung und einem kurzen Ausblick.

3 Determinanten von Fluglärmkontingentierungen

Fluglärmkontingentierungen können nur dann zielgerichtet entwickelt und effizient umgesetzt werden, wenn bereits die maßgeblichen Determinanten unter Berücksichtigung ihrer Interdependenzen integral betrachtet werden. Eine isolierte Behandlung von Einzelaspekten wird den komplexen Anforderungen bei der im weiteren Verlauf der Arbeit zu leistenden Erarbeitung eines Handlungsrahmens nicht gerecht.

Die Kapitel 3.1 bis 3.3 stellen die wesentlichen Determinanten von Fluglärmkontingentierungen vor. Sie sind damit gleichermaßen Einführung in die Thematik und notwendige Basis für die kontingentspezifischen Ausführungen. Der Aufbau folgt der Kausalkette Fluggeräuschemissionen – Fluggeräuschimmissionen – Fluglärmwirkungen.

3.1 Fluggeräuschemissionen

Der Betrieb von Verkehrsflugzeugen bedingt eine Abstrahlung von Geräuschen, die auf den Strahl- oder Propellerantrieb und die Umströmung des Flugzeugs zurückzuführen sind.

Bei der Beschreibung der Geräuschestehungsmechanismen und Minderungspotenziale des Strahltriebwerks wird neben dem Triebwerksstrahl der zunehmenden Bedeutung der Turbomaschinen am Gesamtgeräuscheindruck durch gesonderte Betrachtungen Rechnung getragen.

Darüber hinaus werden Geräuschproduktion und Reduktionsstrategien beim Propellertriebwerk sowie bei der Umströmung eines Flugzeugs behandelt.

Im Rahmen einer kurzen Diskussion werden die für Fluglärmkontingentierungen zentralen Aussagen des Kapitels 3.1 zusammengefasst.

3.1.1 Strahltriebwerk

Die Geräuschemissionen von strahlgetriebenen Verkehrsflugzeugen werden im Wesentlichen durch Strömungs- und Verbrennungsvorgänge im Triebwerk sowie durch turbulente Vermischungsvorgänge im Triebwerksstrahl verursacht. Dabei hat von den ersten kommerziell eingesetzten Strahltriebwerken der fünfziger Jahre bis hin zu den modernen Strahltriebwerken der heutigen Zeit eine rasante technische Entwicklung stattgefunden.

Die ersten Turbinen-Luftstrahltriebwerke waren Einkreis-Triebwerke (Turbojet). Bei dieser Bauart wird die gesamte angesaugte Luft zunächst im Verdichter komprimiert und anschließend in der Brennkammer mit dem eingespritzten Brennstoff gezündet. Ein Teil der in den Verbrennungsgasen enthaltenen Energie wird durch die Turbine entzogen und zum Antrieb des Verdichters genutzt. Die verbleibende Energie geht in den schuberzeugenden Primärstrahl [91, 203].

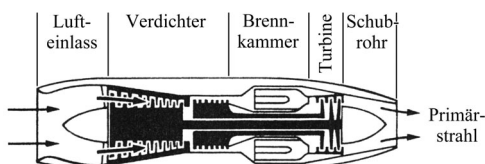


Abb. 3.1: Einkreis-Turbinen-Luftstrahltriebwerk (Turbojet) [42]

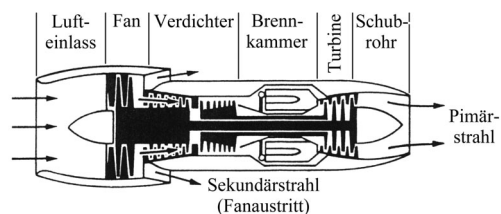


Abb. 3.2: Zweikreis-Turbinen-Luftstrahltriebwerk (Turbofan) [42]

Erst neuartige Werkstoffe und verbesserte Kühlverfahren erlaubten Mitte der sechziger Jahre die Einführung eines treibstoffsparenderen Antriebskonzeptes. Bei Zweikreis-Triebwerken (Turbofan) wird – anders als bei Einkreis-Triebwerken – nur ein Teil der angesaugten Luft zur Verbrennung benötigt und strömt anschließend mit hoher Geschwindigkeit aus der Schubdüse. Ein vergleichsweise langsamer und kalter Luftstrom, der so genannte Nebenstrom, wird in einem äußeren Kreislauf als Sekundärstrahl am Triebwerk vorbeigeführt und verbindet sich anschließend mit dem heißen Primärstrahl zu einem Koaxialstrahl [151, 203, 204].

Das Verhältnis des Luftdurchsatzes im Nebenstrom zum Luftdurchsatz im Hauptstrom betrug anfangs etwa 1:1, bis ein Technologieschub in den siebziger Jahren Nebenstromverhältnisse von 5:1 ermöglichte. Moderne zivile Strahltriebwerke erreichen Nebenstromverhältnisse von 8:1 bis 9:1. Dabei werden rund 80 % des gesamten Schubes vom Nebenstrom beigetragen [195, 204].

3.1.1.1 Fan und Verdichter

Das von Fan und Verdichter emittierte Schallspektrum setzt sich aus einem breitbandigen Rauschen und einzelnen Tönen zusammen, wobei die Töne den Gesamtschallpegel dominierend beeinflussen. Das Breitbandgeräusch wird durch unregelmäßige Auftriebsschwankungen auf den Schaufelblättern infolge der turbulenten, wirbeldurchsetzten Anströmung von Rotor und Stator verursacht [141, 151].

Für die Ausbildung diskreter Töne sind zwei verschiedene Mechanismen verantwortlich. Beim Start mit hoher Triebwerksleistung erreichen die Blattspitzen moderner Fans supersonische Geschwindigkeiten und rufen – bedingt durch die

auftretenden Verdichtungsstöße – ein kreissägenartiges, tonales Geräusch hervor. Unter subsonischen Bedingungen entstehen einzelne Töne durch zyklische Auftriebsschwankungen auf den Schaufelblättern aufgrund des stromabwärts periodisch auftreffenden, aerodynamischen Nachlaufs von Rotoren und Statoren [195].

Um eine wesentliche Verstärkung der Geräuschemissionen beim Fan zu verhindern, muss eine derartige Störung der Zuströmung gänzlich verhindert werden. Bei Strahltriebwerken der 3. Generation werden deshalb nur noch einstufige Fans ohne Eintrittsleitschaufeln verwendet [42, 91].

Eine Geräuschkinderung bei Fan oder Verdichter kann durch eine Vergrößerung der axialen Abstände zwischen Laufschaufeln und Leitschaufelkranz erreicht werden. Denn die Amplituden der Nachlaufdellen bauen sich mit wachsendem Abstand hinter dem sie erzeugenden Blatt durch Impulsaustausch ab. Darüber hinaus kann durch geschickte Wahl der Leitschaufelzahl relativ zur Laufschaufelzahl sowohl die Schallerzeugung selbst als auch die Schallausbreitung in dem den Fan umgebenden Mantel positiv beeinflusst werden [42, 91].

Eine identische Zahl von Leit- und Laufschaufeln führt zu einer pulsierenden, impulshaltigen Schallemission. Bei differierenden Blattzahlen finden die Wechselwirkungen zeitlich versetzt statt. Dadurch entsteht im Mantel eine Vielzahl umlaufender Schallfelder. Unterschreitet die Umfangsgeschwindigkeit einer dieser so genannten Moden einen bestimmten Wert, ist sie in Rohrachsenrichtung nicht mehr ausbreitungsfähig und wird durch Interferenz abgebaut. Diese Cut-off-Bedingung wird für die intensiven Moden des Fans dann wirksam, wenn die Leitschaufelzahl etwas mehr als doppelt so hoch ist wie die Laufschaufelzahl [91, 195].

Mit Möglichkeiten einer weiteren Reduzierung der Tonhaltigkeit des Fangeräuschs durch gezielt phasenversetzt eingebrachten Gegenschall befasst sich das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Erste Messkampagnen an einem Demonstratortriebwerk haben die prinzipielle Machbarkeit dieses Ansatzes bestätigt. Mit einem operationellen Einsatz ist in absehbarer Zeit jedoch nicht zu rechnen.

Ergänzende Strategien zur Reduzierung der Schallabstrahlung von Fan und Verdichter bestehen im geräuschoptimierten Schaufelentwurf mittels geneigter Statoren oder gepfeilter Schaufelvorderkanten sowie in der Auskleidung der Ein- und Auslasskanäle mit schallabsorbierendem Material. Die erzielbare Minderung bleibt allerdings deutlich begrenzt [91, 141].

Um den zunehmenden Wirkungsgradvorteil auszunutzen, werden Triebwerke mit immer größeren Nebenstromverhältnissen gebaut. Damit die Geschwindigkeit der Blattspitzen des Fans nicht weiter ansteigt, muss die Drehzahl entsprechend abgesenkt werden. Diese reicht bei modernen Niederdruckverdichtern dann nicht mehr aus, um genügend große Kompressionsraten zu erzeugen, sodass ein mit zusätzlichem Gewicht verbundenes Getriebe eingebaut werden muss (Geared Fan) [189].

3.1.1.2 Brennkammer und Turbine

Direkte, tieffrequente Brennkammergeräusche entstehen durch Druckschwankungen infolge unterschiedlicher lokaler Kerosin-Konzentrationen oder Verbrennungsinstabilitäten. Als indirekte Brennkammergeräusche machen sich diese Druckschwankungen auch in der Turbine und der Schubdüse negativ bemerkbar [151,181].

Die von der Turbine verursachten Geräusche sind wie Fangeräusche eine Kombination breitbandiger und tonaler Geräuschanteile. Bei einer Turbine ist der Abstand zwischen benachbarten Lauf- und Leitschaufelreihen allerdings deutlich kleiner als bei einem Fan, sodass der tonale Geräuschanteil noch stärker in den Vordergrund tritt [195].

Durch Ausnutzung der Cut-off-Bedingung kann bei der Turbine ebenso wie beim Fan eine Geräuschreduzierung erzielt werden. Die geringeren Blattspitzengeschwindigkeiten und die höhere Schallgeschwindigkeit in den heißen Verbrennungsgasen erleichtern die konstruktive Umsetzung. Die Cut-off-Bedingung wird wirksam, wenn die Leitschaufelzahl etwas weniger als doppelt so hoch ist wie die Laufschaufelzahl [195].

Anders als bei einem Fan kann sich bei einer Turbine das akustische Signal nur stromabwärts ausbreiten. Die Schallenergie wird deshalb primär über die Schubdüse abgestrahlt. Infolge der Interaktion mit den turbulenten Schichten des Triebwerksstrahls werden die ursprünglich klar definierten Töne derart verschmiert, dass sie im Spektrum kaum noch zu identifizieren sind [195].

Die von Brennkammer und Turbine induzierten, inneren Triebwerksgeräusche lassen sich im Gegensatz zu den Geräuschen von Fan und Triebwerksstrahl recht gut durch schalldämmende Auskleidungen nach außen abschirmen [182,183].

3.1.1.3 Triebwerksstrahl

Die vom Triebwerksstrahl verursachten Geräusche entstehen durch turbulente Vermischung der mit hoher Geschwindigkeit und Temperatur austretenden Gase mit der kalten und ruhigen Umgebungsluft. Im Gegensatz zu den übrigen Triebwerkskomponenten ist der Mechanismus der Geräuscherzeugung von der Relativgeschwindigkeit des Triebwerksstrahls zum umgebenden Medium und damit direkt von der Fluggeschwindigkeit abhängig. Kennzeichnend ist das Schallpegelmaximum im niederfrequenten Teil des Spektrums bei etwa 125 Hz bis 250 Hz . Zu hohen Frequenzen hin fallen die Schallpegel schnell ab [104,105,140].

Insbesondere beim Start dominiert diese Geräuschquelle nach wie vor, auch wenn die akustischen Vorteile der modernen Turbofan-Triebwerke gegenüber

den Turbojet-Triebwerken erheblich sind. Denn die emittierte Schalleistung ist näherungsweise proportional der 8. Potenz der Strahlgeschwindigkeit (Lighthill'sches U^8 -Gesetz). Bei einer Abnahme der mittleren Austrittsgeschwindigkeit von ehemals 700 m/s auf heute rund 350 m/s ergibt sich bei identischem Massenfluss eine Geräuschminderung um 24 dB . Bei identischem Schub beträgt diese immer noch 21 dB [105, 195].

Zur Reduzierung der vom Triebwerksstrahl emittierten Schalleistung kann auch eine intensivere Vermischung von Primär- und Sekundärstrahl beitragen, die jedoch prinzipbedingt mit einer Verringerung des Triebwerkswirkungsgrades einhergeht. Bei der inversen Strahlprofilierung wird hierzu durch konstruktive Maßnahmen der Primärstrahl nach außen, der Sekundärstrahl nach innen geführt. Die hohen Geschwindigkeitsgradienten im Vermischungsbereich führen zu einem schnelleren Abbau der Strahlgeschwindigkeiten und zu einer Reduzierung des Schalleistungspegels um bis zu 6 dB [91].

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) beschäftigt sich mit nachrüstbaren Komponenten für den Austrittsbereich, die die Energie des Hochgeschwindigkeitsstrahls bei möglichst geringem Schubverlust durch aggressives Mixen mit dem Sekundärstrahl erheblich verringern sollen. Erste Feldversuche hierzu wurden kürzlich durchgeführt. Auch General Electric (GE) ist in diesem Forschungsbereich aktiv. Im Labor wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem das Strahlgeräusch theoretisch um $3,5\text{ dB}$ vermindert werden kann [63].

3.1.2 Propellertriebwerk

Von den Anfängen der Verkehrsluftfahrt bis heute haben sich Propellertriebwerke aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung ihrer aerodynamischen Leistungsfähigkeit die Einsatzgebiete erhalten, wo angesichts relativ geringer erforderlicher Reiseflug-Machzahlen von $M < 0,5$ der Propellerwirkungsgrad dem Wirkungsgrad der Strahltriebwerke überlegen ist [91]. Für propellergetriebene Verkehrsflugzeuge über $5,7\text{ t}$ höchstzulässiger Abflugmasse werden heute nahezu ausschließlich Propeller-Turbinen-Luftstrahltriebwerke (Turboprop) verwendet.

Bei Turboprop-Triebwerken wird die in den Verbrennungsgasen enthaltene Energie weitgehend durch die Turbine entzogen und in mechanische Energie zum Antrieb eines Propellers umgesetzt. Das Heißgas des Triebwerksstrahls liefert im Gegensatz zu Turbofan-Triebwerken nur noch einen marginalen Beitrag zum Schub. Die triebwerksspezifischen Geräuschquellen entsprechen prinzipiell denen der Turbofan-Triebwerke. Die erzeugten Schallpegel sind allerdings sehr viel geringer, sodass in erster Linie die zyklische Bewegung des Propellerblatts sowie

turbulente Strömungen im Vor- und Nachlauf des Propellers für die Geräuschenstehung verantwortlich sind [203].

Die vom Propeller verursachten Geräusche setzen sich aus einem breitbandigen Grundgeräusch und einem überlagerten tonhaltigen Drehklang zusammen. Das Breitbandgeräusch beruht auf Wechselwirkungen zwischen stochastischen, turbulenten Druckschwankungen in der Strömung und dem Propellerblatt. Es wird vornehmlich in Richtung der Propellerachse abgestrahlt und kann durch runde Blattspitzenformen sowie die Vermeidung stumpfer Blatthinterkanten erfolgreich verringert werden.

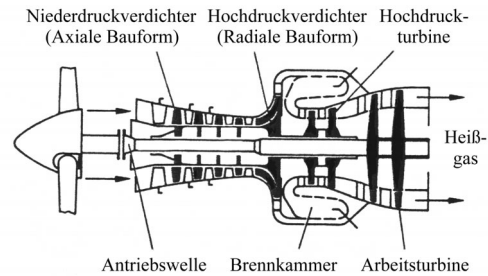


Abb. 3.3: Propeller-Turbinen-Luftstrahltriebwerk (Turboprop) [203]

Der Drehklang ist das Resultat der regulären zyklischen Bewegung des Propellerblatts in der Atmosphäre und der Interaktion des Propellers mit benachbarten Strukturen. Eine Minderung der vom Propeller verursachten, niederfrequenten Drehklanggeräusche lässt sich im Wesentlichen durch eine Erhöhung der Blattzahl oder die Herabsetzung der Propellerblattspitzengeschwindigkeit erreichen. Letzteres kann durch die Senkung der Propellerdrehzahl mittels eines Reduktionsgetriebes bei gleichzeitiger geringfügiger Vergrößerung des Propellerdurchmessers und Veränderung der Blattgeometrie geschehen [91, 195, 203].

Seit Mitte der achtziger Jahre werden von mehreren Herstellern weiterentwickelte Turboprop-Triebwerke (Propfans) mit nochmals gesteigertem effektiven Nebenstromverhältnis erprobt, die im Vergleich zu modernen Turbofan-Triebwerken einen um bis zu 30 % verringerten Treibstoffverbrauch erzielen. Durch geeignet gepfeilte Blattgeometrien kann zudem der Wirkungsgradvorteil des Propellers gegenüber Strahltriebwerken auch auf höhere Reiseflug-Machzahlen bis $M = 0,8$ ausgedehnt werden [91, 203].

Während der Start- und Landephase halten Propfan-Triebwerke die internationalen Zulassungsvorschriften ein, da sich die Blattspitzengeschwindigkeiten im Unterschallbereich befinden. Während des Streckenfluges erreichen sie jedoch Überschallgeschwindigkeit, was zu einer erheblichen Geräuschimmission auf dem Boden führt, die bis zu 20 dB höher ist als bei Flugzeugen mit Strahltriebwerken [203]. Darüber hinaus haben sich auch Probleme mit der Schallabstrahlung in die Passagierkabine ergeben [195], sodass bisher keines dieser Konzepte kommerziell realisiert worden ist. Die intensiven Forschungsarbeiten haben allerdings zu einem vertieften Verständnis der Geräuschenstehungsmechanismen und als Folge daraus zur Entwicklung geräuschärmerer konventioneller Propeller geführt.

3.1.3 Umströmung

Vor allem im Landeanflug gewinnen infolge abnehmender Triebwerksgeräusche aerodynamische Geräusche an Bedeutung. Sie werden durch die Umströmung von Tragflächen und Leitwerken, Hochauftriebshilfen wie Vorflügeln, Klappen und Spoilern, sowie Rumpf, Fahrwerk und Triebwerksverkleidungen hervorgerufen.



Abb. 3.4: Quellen von Umströmungsgeräuschen

In der so genannten Clean Configuration ohne Hochauftriebshilfen und mit eingezogenem Fahrwerk dominiert das Geräusch der Tragflügelumströmung. Es ist überwiegend breitbandig mit einem von der Flugzeuggröße und der Fluggeschwindigkeit abhängigen Peak im Frequenzbereich um 200 Hz . Durch Kavitäten oder Diskontinuitäten werden gelegentlich auch niederfrequente Töne induziert [195].

Gesetzte Hochauftriebshilfen steigern das Breitbandgeräusch beträchtlich und verschieben die Spektralverteilung hin zu tieferen Frequenzen. Als noch bedeutender haben sich allerdings die vom ausgefahrenen Fahrwerk abgestrahlten Geräusche erwiesen. Messungen Ende der siebziger Jahre haben einen Anstieg der Umströmungsgeräusche durch Fahrwerk und Hochauftriebshilfen um rund 10 dB beim Landeanflug aufgezeigt [27, 195].

Nach einer längeren Pause wurden umströmungsspezifische Forschungsaktivitäten erst in den neunziger Jahren wieder aufgenommen. Bis heute gibt es kein geeignetes Modell, um Entstehungsmechanismen oder Richtcharakteristiken der komplexen Strömungsinteraktionen zu prognostizieren. Wesentliche Gestaltungshinweise werden deshalb mittels Windkanal- und Feldversuchen erarbeitet. Aktuelle Studien weisen ein kurzfristiges Reduktionspotenzial von bis zu 3 dB aus [27, 34].

3.1.4 Diskussion

Die Reduktion des Fluggeräuschs an der Quelle ist – wie bereits ausgeführt – die wirksamste Maßnahme zur Lärminderung in der Umgebung von Flughäfen. Bei den die Luftverkehrsflotten dominierenden Flugzeugen mit Strahltriebwerk hat die Einführung der Turbofan-Triebwerke und die damit verbundene Reduktion des Strahlgeräuschs beim Start zu erheblichen Verbesserungen geführt. So wurde die Fläche so genannter Footprints, innerhalb derer ein bestimmter Schallpegel für ein Einzelereignis erreicht oder überschritten wird, selbst innerhalb von Produktserien auf weniger als 15 % des Ausgangswertes gesenkt.

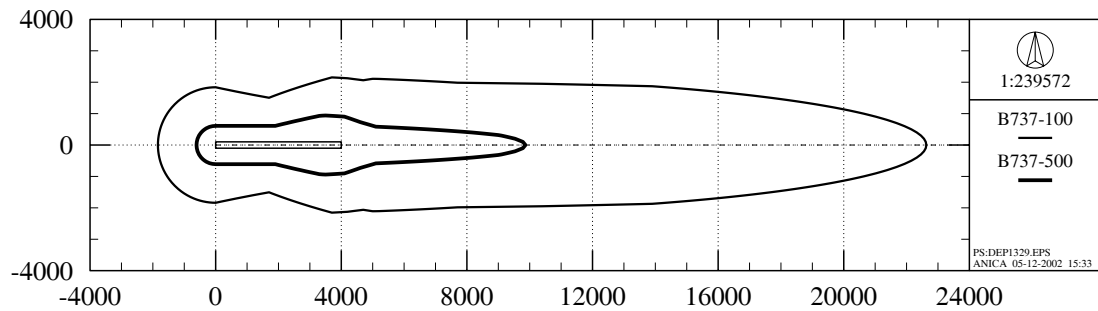


Abb. 3.5: Berechnete Start-Footprints einer B 737-100 und B 737-500, $L_{ASmax} = 75 \text{ dB}$

Bei der Landung hingegen haben sich die einschneidenden konstruktiven Änderungen nur bedingt positiv ausgewirkt. Denn mit abnehmendem Strahlgeräusch haben die Turbomaschinengeräusche an Bedeutung gewonnen. Die daraus resultierenden Unterschiede in der Geräuschemissionscharakteristik zeigen die Abbildungen 3.6 und 3.7 für ein Turbofan-Triebwerk der 2. Generation mit niedrigem Nebenstromverhältnis und der 3. Generation mit hohem Nebenstromverhältnis.

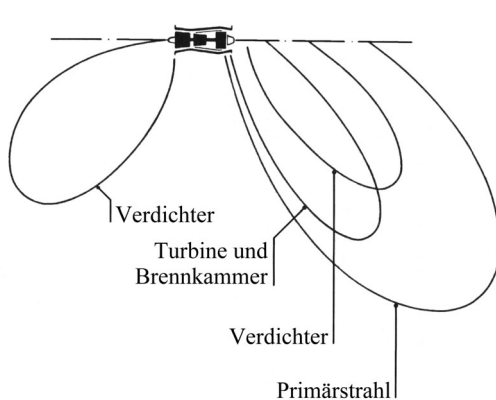


Abb. 3.6: Geräuschemissionscharakteristik eines Luftstrahltriebwerks der 2. Generation [151, 203]

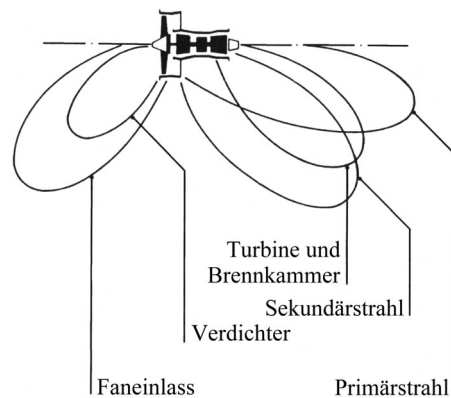


Abb. 3.7: Geräuschemissionscharakteristik eines Luftstrahltriebwerks der 3. Generation [151, 203]

Die in den zurückliegenden Jahrzehnten erzielten Erfolge bei der Fluggeräuschkinderung werden sich zukünftig nicht in gleicher Weise fortsetzen lassen. Das erschließbare Reduktionspotenzial wird heute zwar auf rund 10 dB bis 12 dB beziffert. Dieses Potenzial ist jedoch nur mit erheblichem technischen und finanziellen Aufwand ausschöpfbar und darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass eine wirklich neue Generation geräuschärmerer Triebwerke derzeit nicht absehbar ist [9, 89, 196, 205].

Eine drastische Reduktion der Schallemissionen erfordert insbesondere eine weitere Senkung der geräuschproduktiven Strahlgeschwindigkeiten konventioneller Triebwerke und damit die Einführung von Nebenstromverhältnissen deutlich jenseits von 10:1. Um die Blattspitzengeschwindigkeiten des Fans nicht weiter zu erhöhen, ist die Integration eines Getriebes hierfür unabdingbare Voraussetzung [209]. Derartige Triebwerke mit extrem großem Nebenstromverhältnis und Geared Fan werden aufgrund der beträchtlichen Vorlaufzeiten in der Luftfahrtindustrie allerdings erst langfristig für den kommerziellen Markt verfügbar sein.

Mittelfristig werden Verbesserungen von 4 dB bis 6 dB durch den geräuschoptimalen Entwurf konventioneller Fans, durch die aktive Minderung tonhaltiger Geräusche, durch den Einsatz effizient schalldämpfender Ein- und Austrittsdesigns sowie durch die Reduktion der Umströmungsgeräusche von Hochauftriebshilfen und Fahrwerk im Landeanflug für möglich gehalten [27, 34, 195, 209].

Als mittelbare Folge prognostizierter Leistungseinbußen durch das Mehrgewicht konstruktiver Modifikationen und den verringerten Vortriebswirkungsgrad wird mit einem Anstieg der direkten Betriebskosten und des Treibstoffverbrauchs um bis zu 5 % bei einer Reduktion um 3 dB gerechnet [27, 196].

Im Gegensatz zu den technischen Innovationssprüngen der Vergangenheit, bei denen sich konstruktive Maßnahmen zur Geräuschkinderung mit einer Steigerung der Leistungsfähigkeit und Kostenvorteilen im Betrieb gleichermaßen verbinden ließen, erschwert der Zielkonflikt zwischen der Minimierung von Geräuschemissionen auf der einen sowie ökonomischen und erweiterten ökologischen Entwicklungszielen auf der anderen Seite nun zusätzlich die Auslegung eines Flugzeugs.

Hinsichtlich des zu erarbeitenden Handlungsrahmens für die Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen bleibt insgesamt festzuhalten, dass in absehbarer Zeit keine revolutionären Geräuschkinderungsmaßnahmen für Flugzeuge im operationellen Betrieb zu erwarten sind. Entlastungen im Flughafennahbereich werden daher vor allem durch die konsequente Ausmusterung älterer Bestandteile der Flugzeugflotten, die dem heutigen Stand der Technik nicht entsprechen, erreicht werden.

3.2 Fluggeräuschimmissionen

Die beim Betrieb von Verkehrsflugzeugen abgestrahlte Schallenergie führt zu Geräuschimmissionen am Boden, die insbesondere in der Umgebung von Flughäfen im Hinblick auf potenzielle humanspezifische Wirkungen von Bedeutung sind.

Die Erläuterung der komplexen physikalischen Phänomene bei der Schallausbreitung durch die Atmosphäre konzentriert sich auf fluggeräuschrelevante Einflussgrößen und geeignete Näherungsverfahren.

Gebräuchliche Mess- und Kenngrößen zur Beschreibung von Fluggeräuschimmissionen werden im Folgenden vorgestellt. Dabei wird gezielt auf ihre Eignung für Einzel- und Langzeitmessungen eingegangen. Das international geltende Verfahren der Zulassungsmessung wird wegen seiner übergeordneten Dimension ebenfalls behandelt.

Darüber hinaus werden Simulations- und Prognoseverfahren zur Berechnung von Fluggeräuschimmissionen erörtert. Neben dem weltweit verbreiteten Integrated Noise Model (INM) wird vor allem das in der Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen (AzB) definierte, deutsche Prognoseverfahren betrachtet.

Die für Fluglärmkontingentierungen zentralen Aussagen des Kapitels 3.2 werden abschließend kurz diskutiert.

3.2.1 Fluggeräuschausbreitung

Auf dem Weg vom Flugzeug zum Immissionsort unterliegen die emittierten Geräusche vielfältigen physikalischen Einflüssen, die Abschirmung, Dämpfung, Reflexion, Beugung, Streuung und Krümmung der Schallstrahlen bewirken können.

Für die Fluggeräuschausbreitung relevant sind insbesondere die Einflüsse von sphärischer Divergenz ΔL_{SD_n} , atmosphärischer Dämpfung ΔL_{AD_n} , Bodenzusatzdämpfung ΔL_{BD_n} , Topographie ΔL_{TE_n} und Meteorologie ΔL_{ME_n} . Bei einem für n Terz- oder Oktavmittenfrequenzen bekannten Schallpegel L_{0_n} in der Bezugsentfernung s_0 ergibt sich mit den genannten Einflussgrößen der Schallpegel L am Immissionsort durch energetische Addition.

$$L = 10 \cdot \lg \sum_n 10^{\frac{(L_{0_n} + \Delta L_{SD_n} + \Delta L_{AD_n} + \Delta L_{BD_n} + \Delta L_{TE_n} + \Delta L_{ME_n})}{10}} \quad (3.1)$$

3.2.1.1 Sphärische Divergenz

Die geometrisch bedingte Dämpfung einer sich verlustlos und ungehindert ausbreitenden Schallwelle wird als sphärische Divergenz bezeichnet [206]. Vereinfachend kann ein Flugzeug als Punktschallquelle mit richtungsabhängiger Emissionscharakteristik angesehen werden [181], sodass die sphärische Divergenz ΔL_{SD_n} mit der konstanten Bezugsentfernung s_0 ausschließlich eine Funktion der Ausbreitungsentfernung s ist.

$$\Delta L_{SD_n} = -20 \cdot \lg \left(\frac{s}{s_0} \right) \quad (3.2)$$

Die Verdopplung der Entfernung zwischen Flugzeug und Immissionsort führt zu einer durch die sphärische Divergenz bedingten Schallpegelreduktion von 6 dB .

3.2.1.2 Atmosphärische Dämpfung

Zur atmosphärischen Dämpfung tragen im Wesentlichen zwei Absorptionsmechanismen bei. Während die klassische Dämpfung auf Energieverlusten durch die Wärmeleitfähigkeit und die Viskosität der Luft beruht, sind für die molekulare Dämpfung Relaxationsprozesse der Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle der Luft verantwortlich [105, 197].

Bei der analytischen Modellierung der atmosphärischen Dämpfung haben sich halbempirische Ansätze durchgesetzt, wie sie etwa in der AzB oder in den Richtlinien ISO 3891 und SAE ARP 866A dokumentiert sind [37, 102, 197]. Die ausbreitungsrelevanten Differenzen zwischen den genannten Standards sind ebenso wie die Variabilität von Temperatur und relativer Feuchte bei gemäßigtem mitteleuropäischen Klima vernachlässigbar [91, 105].

Mit der frequenzabhängigen Dämpfungskonstante d_n und der Bezugsentfernung s_0 lässt sich die atmosphärische Dämpfung ΔL_{AD_n} näherungsweise als lineare Funktion der Ausbreitungsentfernung s beschreiben [37].

$$\Delta L_{AD_n} = -d_n \cdot (s - s_0) \quad (3.3)$$

Die Zahlenwerte für die Dämpfungskonstante liegen zwischen $d_1 = 0,03 \text{ dB}/100 \text{ m}$ für die Oktavmittenfrequenz 63 Hz und $d_8 = 4,3 \text{ dB}/100 \text{ m}$ für die Oktavmittenfrequenz 8 kHz .

3.2.1.3 Bodenzusatzdämpfung

Bei der Schallausbreitung in Bodennähe treten zusätzliche Dämpfungsverluste auf, deren wesentliche Einflussgröße die Bodenbeschaffenheit ist [105, 163]. Zur

Berechnung der Bodenzusatzdämpfung hat sich international das in der Richtlinie SAE AIR 1751 definierte Näherungsverfahren etabliert [198], das auf Re-Analysen der umfangreichen empirischen Daten von PARKIN & SCHOLLES basiert [164, 165].

Dieses Datenmaterial ist auch Grundlage der in der AzB empfohlenen Approximation. Unter Berücksichtigung eines grasbewachsenen Bodens [105] wird dort die Bodenzusatzdämpfung ΔL_{BD_n} näherungsweise als Funktion von Ausbreitungsentfernung s , Elevationswinkel α und frequenzabhängiger, asymptotischer Pegelminderung G_n dargestellt. Für Boden-Boden-Schallausbreitung ($\alpha = 0^\circ$) gilt

$$\Delta L_{BD_n} = -G_n \cdot \frac{s/s_1}{\sqrt{1 + (s/s_1)^2}} \quad (3.4)$$

mit der Konstanten $s_1 = 700 \text{ m}$ und Zahlenwerten für die asymptotische Pegelminderung bis zu $G_3 = 10 \text{ dB}$ für die Oktavmittenfrequenz 250 Hz [37].

3.2.1.4 Topographische Einflüsse

Größere Geländeunebenheiten dämpfen ebenso wie Gebäude, gewerbliche Freianlagen oder vergleichbare Hindernisse durch Abschirmung, Reflexion, Streuung und Absorption zusätzlich den Schall [91, 173]. Sind keine Schallnebenwege über reflektierende Flächen vorhanden, bilden sich hinter großen Hindernissen Schallschattenzonen aus, in die der Schall nur durch Beugung um die Kanten des Hindernisses gelangt. Kleine Hindernisse streuen die Schallwellen diffus [91].

In bebautem Gelände nimmt der Schallpegel schnell um 10 dB bis 15 dB ab. Eine weitere Abnahme wird üblicherweise nicht beobachtet. Eine Bebauungsdämpfung tritt nur auf, wenn keine Sichtverbindung zur Schallquelle besteht [91, 206]. Durch einfache oder mehrfache Reflexion an größeren Gebäudeflächen ist auch eine Schallpegelerhöhung möglich, die jedoch in hohem Maß von den konkreten örtlichen Gegebenheiten abhängt [206].

Schallstreuungen an Stämmen, Ästen und Blättern führen zu einer vergleichsweise geringen Zusatzdämpfung durch Bewuchs, deren im Schrifttum angegebenen Werte zudem stark variieren. Für Planungszwecke wird eine dauerhafte Dämpfung durch Bewuchs deshalb in der Regel nicht angesetzt [91, 206].

In der geltenden Version der AzB werden topographische Einflüsse nur in Ausnahmefällen explizit einbezogen. Eine Erweiterung des Berechnungsverfahrens zur generellen Berücksichtigung von großräumigen Geländeunebenheiten wird allerdings gegenwärtig diskutiert [37, 39, 108].

3.2.1.5 Meteorologische Einflüsse

Insbesondere bei großen Ausbreitungsentfernungen und in Bodennähe machen sich Inhomogenitäten der Atmosphäre bemerkbar [10, 206, 210].

Windgeschwindigkeitsgradienten führen zu einer richtungsabhängigen Krümmung der Schallstrahlen. Dadurch können in Gegenwindrichtung Schattenzonen mit Schallpegelminderungen bis zu 30 dB entstehen. Demgegenüber sind in Mitwindrichtung Zonen möglich, in denen Dämpfungseffekte teilweise oder sogar ganz aufgehoben werden [174, 206]. Ähnliche Phänomene können auch durch Temperaturgradienten hervorgerufen werden. Labile Wetterlagen unterstützen die Ausbildung von Schattenzonen, während stabile Luftschichtungen zu einer Reduktion von Dämpfungseffekten beitragen.

Bei wind- oder temperaturinduzierten Turbulenzen in der bodennahen Atmosphäre tritt durch Schallstreuung eine stark fluktuierende, zusätzliche Dämpfung auf [33, 91].

Die Verteilungen von Wind und Temperatur sind erheblichen örtlichen, tages- und jahreszeitlichen sowie höhenabhängigen Veränderungen unterworfen, die nur schwer mit hinreichender Genauigkeit zu erfassen oder zu prognostizieren sind [181]. Die AzB berücksichtigt deshalb die komplexen meteorologischen Einflüsse durch die konservative Annahme einer leichten Mitwindausbreitung.

3.2.2 Fluggeräuschimmissionsmessungen

Die Erfassung von Fluggeräuschimmissionen in der Umgebung von Flughäfen ist in Deutschland im Wesentlichen in DIN 45643 geregelt. In den drei Teilen der Norm werden sowohl fluggeräuschspezifische Mess- und Kenngrößen als auch konkrete Anforderungen an Einrichtungen und Geräte für kontinuierliche Langzeitmessungen definiert [43].

Detaillierte Aussagen über die Struktur eines Fluggeräuschs sind allerdings nur durch erheblich aufwändigere Einzelmessungen zu gewinnen. Eine besondere Form der Einzelmessung ist die Zulassungsmessung von Flugzeugen.

3.2.2.1 Mess- und Kenngrößen

Übliche Messgröße für die Stärke eines Fluggeräuschs ist der zeitabhängige Schallpegel mit der Frequenzbewertung A und der Zeitbewertung Slow $L_{AS}(t)$. Die Geräuschdauer wird durch die Zeitspanne t_{10} bestimmt, während der der Schallpegel $L_{AS}(t)$ um nicht mehr als 10 dB unter dem Schallpegelmaximum L_{ASmax} des

Flugereignisses liegt (10 dB-Down Time). Unmittelbare Kenngrößen eines Fluggeräuschs und dieses maßgeblich charakterisierend sind die Messgrößen L_{ASmax} und t_{10} . Aus ihnen werden die nachstehenden Kenngrößen abgeleitet [43].

Einzelereignispegel L_E repräsentieren den über den Verlauf eines Fluggeräuschs zeitlich gemittelten und auf die Bezugszeit t_{ref} umgerechneten Schallpegel. Im Gegensatz zum Maximalschallpegel L_{ASmax} sind sie aufgrund ihres integralen Charakters sensorisch nicht erfassbar. In guter Näherung ist

$$L_E = L_{ASmax} + k \cdot \lg \left(\frac{t_{10}}{2 t_{ref}} \right) \quad (3.5)$$

Der Äquivalenzparameter k kann als das um den Halbierungsparameter $q = k \cdot \lg(2)$ erforderliche Maß der Maximalschallpegelerhöhung zum Ausgleich einer Halbierung der Geräuschkdauer interpretiert werden. Für den Einzelereignispegel L_{AX} oder Single-Event Exposure Level (SEL) gilt mit $k = 10$ und $t_{ref} = 1$ s

$$L_{AX} = L_{ASmax} + 10 \cdot \lg \left(\frac{t_{10}}{2} \right) \quad (3.6)$$

Analog ergibt sich für den Einzelereignispegel L_{AZ} mit $k = 13,3$ und $t_{ref} = 10$ s

$$L_{AZ} = L_{ASmax} + 13,3 \cdot \lg \left(\frac{t_{10}}{20} \right) \quad (3.7)$$

Zur Kennzeichnung der Geräuschimmissionsbelastung während eines längeren Bezugszeitraums T werden ebenfalls zeitlich gemittelte Kenngrößen verwendet. Weltweit gebräuchlich sind äquivalente Dauerschallpegel L_{eq} , wie sie in allgemeiner Form mit dem Äquivalenzparameter k , den tageszeitbezogenen Wichtungsfaktoren g_i , den Geräuschkauern t_i , den Maximalschallpegeln L_{ASmax_i} und der Konstante C durch Gleichung 3.8 beschrieben werden [108].

$$L_{eq} = k \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \sum_i g_i \cdot t_i \cdot 10^{\frac{L_{ASmax_i}}{k}} \right] + C \quad (3.8)$$

Der auf dem energetischen Mittelungsprinzip beruhende energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{eq(3)}$ wird mit $k = 10$ und $t_i = t_{10_i}/2$ ungewichtet berechnet [43].

$$L_{eq(3)} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \sum_i \frac{t_{10_i}}{2} \cdot 10^{\frac{L_{ASmax_i}}{10}} \right] \quad (3.9)$$

Ausschließlich bei Fluggeräuschimmissionen kommt der äquivalente Dauerschallpegel $L_{eq(4)}$ nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm (FluglärmG) zum Einsatz. Der $L_{eq(4)}$ wird mit $k = 13,3$ und $t_i = t_{10_i}$ gebildet. Relevante Nachtflugbewegungen gehen mit einer Wichtung von $g_i = 5$ ein [157].

$$L_{eq(4)} = 13,3 \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \sum_i g_i \cdot t_{10_i} \cdot 10^{\frac{L_{ASmax_i}}{13,3}} \right] \quad (3.10)$$

3.2.2.2 Einzelmessungen

Die in Kapitel 3.2.2.1 vorgestellten Mess- und Kenngrößen dienen der Erfassung von Fluggeräuschmissionen in der Umgebung von Flughäfen. Sie basieren auf einer Messung des Gesamtschallpegels und erlauben daher keine Aussagen über die Struktur eines Fluggeräuschs. Bei gezielten Einzelmessungen zur Schallquellenidentifikation und -lokalisierung werden deshalb aufwändigere Messverfahren eingesetzt, die eine Analyse des zeitvarianten Frequenzspektrums zulassen. Darauf aufbauend ist auch eine verbesserte Beschreibung der frequenz- und schallpegelabhängigen Hörwahrnehmung des Menschen möglich.

Die nach ISO 532 aus dem Geräuschspektrum berechnete Lautheit nach ZWICKER realisiert am besten den im Laborversuch ermittelten Lautstärkepegel. Bei Messungen von Fluggeräuschmissionen in praxi hat sich der A-bewertete Schallpegel jedoch als nahezu gleichwertig erwiesen [83,101,113]. Eine von KRYTER speziell für die Lautstärkeempfindung einzelner Fluggeräusche abgeleitete Kenngröße ist der Effective Perceived Noise Level (EPNL). Er wird nach dem in ISO 3891 standardisierten Verfahren aus den aufgezeichneten Terzspektren ermittelt [102].

3.2.2.3 Zulassungsmessungen

Anhaltende Proteste von Flughafenwohnern veranlassten Ende 1969 zunächst die amerikanische Federal Aviation Administration (FAA), Vorschriften über geräuschspezifische Grenzwerte für neu zuzulassende Strahlverkehrsflugzeuge zu erlassen. In 1971 zog die International Civil Aviation Organization (ICAO) mit eigenen Richtlinien und Empfehlungen – dem Annex 16 Environmental Protection, Volume I, Aircraft Noise – nach [98,195].

Die geltenden Zulassungsbedingungen für Strahlflugzeuge und größere Propellerflugzeuge sind in Kapitel 3 des Annex 16 definiert. Danach sind an den drei Messpunkten Startüberflug, Seitenlinie und Landeanflug jeweils Grenzwerte einzuhalten, deren absolute Höhe von der Startmasse und beim Startüberflug zusätzlich von der Triebwerkszahl bestimmt wird. Kenngröße ist der Effective Perceived Noise Level (EPNL). Das für Neuzulassungen ab Januar 2006 obligatorische Kapitel 4 schreibt, bezogen auf die

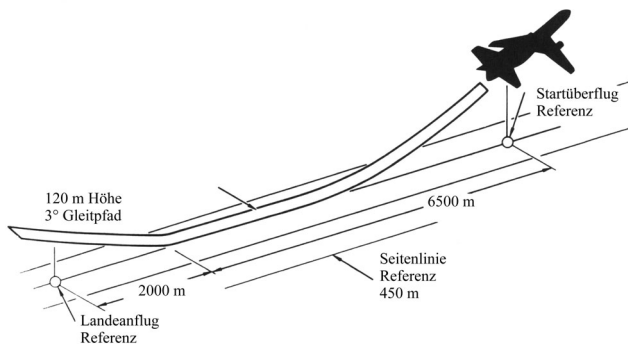


Abb. 3.8: Messpunkte für die Zulassung nach ICAO Annex 16, Kapitel 3 und 4 [195]

Das für Neuzulassungen ab Januar 2006 obligatorische Kapitel 4 schreibt, bezogen auf die

Summe der Kapitel-3-Grenzwerte an den drei Messpunkten, einen kumulativen Abstand von mindestens -10 dB vor. Die bisherige Kompensationsmöglichkeit für Grenzwertüberschreitungen an einzelnen Messpunkten entfällt [98, 100, 124].

Vor diesem Hintergrund können in der Europäischen Union (EU) zukünftig Flugzeuge, die die Kapitel-3-Anforderungen nur grenzwertig erfüllen, von den Flughäfen ausgeschlossen werden. Für ältere, laute Flugzeuge mit Kapitel-2-Zulassung war bereits früher ein Bann ab April 2002 verhängt worden [51, 124, 125].

In Deutschland werden die Bestimmungen des ICAO Annex 16 mit den Lärmschutzforderungen für Luftfahrzeuge (LSL) umgesetzt. Für deutsche Luftfahrzeuge ist ihre Einhaltung als das nach dem jeweiligen Stand der Technik unvermeidbare Maß Voraussetzung für die Erteilung einer Verkehrszulassung [156, 158].

3.2.2.4 Langzeitmessungen

§ 19a Luftverkehrsgesetz (LuftVG) verpflichtet den Unternehmer eines dem Fluglinienverkehr angeschlossenen Verkehrsflughafens, Anlagen zur kontinuierlichen Messung der durch die an- und abfliegenden Luftfahrzeuge entstehenden Geräusche einzurichten und zu betreiben. Die Mess- und Auswertungsergebnisse sind der Genehmigungsbehörde und der Fluglärmmmission mitzuteilen [158].

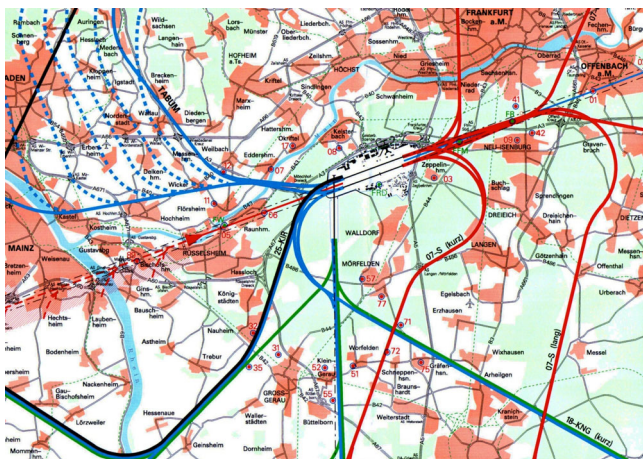


Abb. 3.9: Abflug- und Endanflugrouten sowie Fluggeräuschmessstellen (nummeriert) des Flughafens Frankfurt [40]

Um die Einhaltung von Flugrouten und Flugverfahren sowie die Belastung in Wohngebieten überwachen zu können, ist eine mit der Komplexität der Flughafeninfrastruktur wachsende Zahl von Messeinrichtungen erforderlich. Der in Abbildung 3.9 wiedergegebene Kartenausschnitt zeigt exemplarisch die Lage der Abflug- und Endanflugrouten sowie der 25 Fluggeräuschmessstellen des Flughafens Frankfurt.

Die Anforderungen an die Messeinrichtungen werden ebenso wie die zu erfassenden Mess- und Kenngrößen im zweiten Teil der DIN 45643 konkretisiert. Danach sind zumindest der Schallpegel $L_{AS_i}(t)$, das Schallpegelmaximum L_{ASmax_i} , die Geräuschkdauer t_{10_i} , der Einzelereignispegel L_{AZ_i} und der äquivalente Dauerschallpegel $L_{eq(4)}$ der Flugereignisse automatisch aufzuzeichnen und auszuwerten [43].

3.2.3 Fluggeräuschimmissionsberechnungen

Nicht immer können oder sollen Fluggeräuschimmissionen mit einer Messung erfasst werden. Insbesondere lassen sich prognostische Flugbetriebsszenarien und flächige Betrachtungen nur mit Hilfe von Berechnungen umsetzen. Dabei werden Prognoseverfahren und Simulationsverfahren unterschieden. Mit der im Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm (FluglärmG) verankerten Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen (AzB) existiert in Deutschland ein standardisiertes Prognoseverfahren [37–39].

3.2.3.1 Prognoseverfahren

Konventionelle Prognoseverfahren basieren auf vereinfachenden Annahmen bei der physikalischen Beschreibung sowohl der Geräuschquelle Flugzeug als auch der Fluggeräuschausbreitung. Sie sind deshalb auf die Reproduktion durchschnittlicher Einzelschallereignisse unter Berücksichtigung charakteristischer Ausbreitungsbedingungen beschränkt.

Akustische Datengrundlage von Prognoseverfahren sind Schallpegel, die in Abhängigkeit von Triebwerksleistung und Ausbreitungsentfernung tabelliert werden. Flugtechnische Daten enthalten ein Flughöhenprofil mit zugeordneten Werten für Triebwerksleistung und Fluggeschwindigkeit. Akustisch oder flugtechnisch ähnliche Flugzeugmuster werden üblicherweise zu Flugzeuggruppen zusammengefasst.

Der Maximalschallpegel wird an einem Immissionsort für den geringsten Vorbeiflugabstand anhand der Schallpegeltabellen und einer nachgeschalteten Ausbreitungsrechnung ermittelt. Die zugehörigen Geräuschkauern werden beim AzB-Verfahren explizit berechnet. Andere Verfahren – wie das verbreitete Integrated Noise Model (INM) – greifen hier ebenfalls auf tabellierte Werte zurück.

Vor allem bei Immissionsorten im Einflussbereich gekrümmter Flugstrecken sind die Ergebnisse von Prognoseverfahren allerdings fehlerbehaftet, da die tabellierten Schallpegel einen geradlinigen Horizontalvorbeiflug derselben Schrägentfernung zugrunde legen. Das INM berücksichtigt diesen Effekt durch einen entsprechenden Korrekturalgorithmus. Für das AzB-Verfahren wird eine diesbezügliche Erweiterung derzeit diskutiert. Darüber hinaus wird zur Erhöhung der lokalen Genauigkeit die Einbeziehung größerer Geländeunebenheiten und die Modellierung der Richtwirkung hinter dem Startpunkt erwogen [104, 108].

Trotz dieses Verbesserungspotenzials kann sich die AzB im Vergleich zum INM behaupten. Denn die erzielbaren Genauigkeiten werden nicht allein durch die Güte des physikalisch-mathematischen Modells, sondern auch durch die Aktualität und Qualität der verwendeten akustischen und flugtechnischen Daten bestimmt [107].

3.2.3.2 Simulationsverfahren

Simulationsverfahren zielen auf eine realitätsnahe Nachbildung einzelner Fluggeräuschmissionen. Hierzu werden die Flugbahnen in zeitlich diskrete Punktfolgen zerlegt, für die Flugrichtung, Anstell- und Steigwinkel sowie Querneigungswinkel bekannt sein müssen. Fluggeschwindigkeit und Triebwerksleistung determinieren ebenfalls punktbezogen die Schallabstrahlungseigenschaften einschließlich der Richtwirkung. Über sukzessive Ausbreitungsrechnungen werden daraus die zeitlichen Schallpegelverläufe an den Immissionsorten ermittelt [108].

Prinzipbedingt vermeiden Simulationsverfahren die erwähnten Unzulänglichkeiten konventioneller Prognoseverfahren. Die hohen Anforderungen an den Umfang und die Qualität der Basisdaten haben bisher allerdings eine größere Verbreitung verhindert. Zwar sind flugtechnische Daten mit den für eine exakte Flugbahndefinition erforderlichen Informationen inzwischen verfügbar. Nach wie vor problematisch ist hingegen die Beschaffung adäquater akustischer Emissionsdaten.

3.2.4 Diskussion

Bei der Fluggeräuschausbreitung sind vielfältige physikalische Einflüsse von Bedeutung, die vollständig – insbesondere hinsichtlich topographischer und meteorologischer Effekte – allenfalls für einen Einzelflug beschrieben werden können. Bei längeren Bezugszeiträumen sind Näherungslösungen ausreichend.

Mit dem A-bewerteten Schallpegel liegt eine bei Fluggeräuschmissionen der ZWICKER-Lautheit nahezu gleichwertige Messgröße vor, die aufwändigere Messverfahren entbehrlich macht. Die einzelne Fluggeräusche maßgeblich charakterisierenden Größen L_{ASmax} und t_{10} eignen sich darüber hinaus als Basis weiterer, die Belastungssituation in der Flughafenumgebung kennzeichnender Maße.

Die Ergebnisse der geräuschspezifischen Zulassungsmessungen nach ICAO Annex 16 sind weltweit anerkannt. Die verschärften Zulassungsbedingungen nach Kapitel 4 schreiben allerdings im Wesentlichen den Status quo modernen Fluggeräts fest, sodass in 2007 allein aufgrund natürlicher Evolution bereits mehr als 70 % der Weltflugzeugflotte die Kapitel-4-Kriterien erfüllen würden [73, 100].

Bei der Berechnung von Fluggeräuschmissionen infolge komplexer Flugbetriebsszenarien hat sich das AzB-Verfahren im internationalen Vergleich bewährt, sodass auf den wegen der unvollständigen akustischen Datenbasis nicht unproblematischen Einsatz von Simulationsverfahren verzichtet werden kann.

Im Hinblick auf Fluglärmkontingentierungen sind also potenziell geeignete Verfahren zur Messung wie zur Berechnung von Fluggeräuschmissionen verfügbar.

3.3 Fluglärmwirkungen

Im bisherigen Verlauf der Arbeit standen die ersten beiden Elemente der Kausalkette Fluggeräuschemissionen – Fluggeräuschimmissionen – Fluglärmwirkungen im Mittelpunkt des Interesses. In diesem Kapitel wird erstmals der Übergang von der rein physikalischen Betrachtung hin zu den humanspezifischen Wirkungen der Fluggeräusche vollzogen: Aus Fluggeräusch wird Fluglärm [193], die zentrale Zielgröße bei der Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen.

Aurale Fluglärmwirkungen, also direkte Schädigungen des Gehörs, sind in der Umgebung von Verkehrsflughäfen nicht zu erwarten [35, 77, 161]. Die Ausführungen konzentrieren sich daher auf extraaurale Fluglärmwirkungen. Ihrer zeitlichen Abfolge entsprechend werden zunächst Primär-, anschließend Sekundär- und Tertiärwirkungen erörtert.

Zu den Primärwirkungen zählen akute physiologische Wirkungen, Kommunikationsstörungen und Schlafstörungen, die sich eindeutig auf Fluglärm als Verursacher zurückführen lassen. Schon bei Schlafstörungen kann jedoch ein Teil der Reaktionen nur über Globalreaktionen innerhalb eines bestimmten Zeitraums erfasst werden. Der lärminduzierte Beitrag ist somit nicht mehr direkt quantifizierbar.

Dies gilt in noch stärkerem Maß für Sekundärwirkungen wie Belästigung oder Leistungs- und Lernstörungen, die als Folge primärer Lärmwirkungen erst verzögert einsetzen. Tertiärwirkungen sind chronische Gesundheitsstörungen, bei deren Entstehung ein begünstigender Einfluss langfristig wiederholter Primär- und Sekundärwirkungen vermutet wird [77, 193].

In einer kurzen Diskussion werden die für Fluglärmkontingentierungen wesentlichen Aussagen des Kapitels 3.3 noch einmal kritisch hinterfragt.

3.3.1 Akute physiologische Wirkungen

Fluglärm wirkt nicht nur über den Gehörsinn, sondern beeinflusst über die direkte und indirekte Erregung des autonomen Nervensystems eine Vielzahl vegetativer Funktionen. Diese als sympathikoton oder ergotrop bezeichneten komplexen Reaktionen des Organismus laufen unbewusst ab. Sie sind unspezifisch, identifizieren aber in ihrer Gesamtheit Fluglärm als Stressor [74, 77, 111, 193].

Bei vertrauten, bedeutungsarmen oder bedeutungsarm gewordenen Geräuschen kommt es beim wachen Menschen ab Maximalschallpegeln von $60\text{ dB}(A)$ bis $65\text{ dB}(A)$ zu physiologischen Reaktionen. Wegen der größeren Empfindlichkeit des Vegetativums setzen diese beim schlafenden Menschen bereits ab $50\text{ dB}(A)$

bis $55 \text{ dB}(A)$ ein. Die Auslöseschwelle der autonomen Reaktionen variiert nur in engen Grenzen, eine Adaptation ist kaum möglich [20, 41, 74, 111].

Insbesondere beim Einsetzen eines Geräuschs werden kardiovaskuläre Reaktionen in Form einer Engstellung peripherer Blutgefäße und einer mäßigen Steigerung der Herzschlagfrequenz mit konsekutiv leicht erhöhtem Blutdruck manifest. Darüber hinaus werden unter anderem eine vermehrte Ausschüttung der Stresshormone Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol, eine Vergrößerung der Pupillenfläche, eine Zunahme von Atmungsfrequenz und Muskelspannung, eine Intensivierung von Schweißsekretion und Magensaftproduktion sowie ein Abfall des galvanischen Hautwiderstandes beobachtet [41, 77, 193].

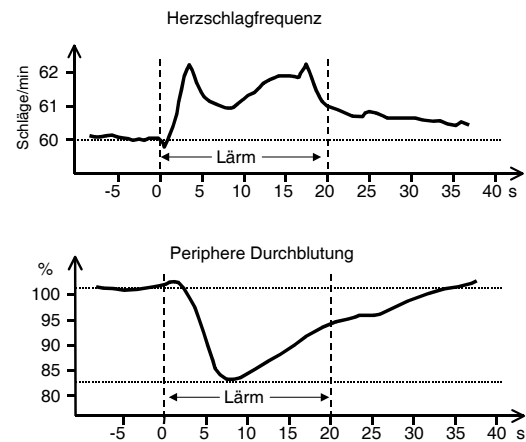


Abb. 3.10: Typischer Verlauf kardiovaskulärer Reaktionen auf Geräusche [77]

Die lärminduzierten Änderungen physiologischer Funktionen fallen in Abhängigkeit vom Maximalschallpegel unterschiedlich stark aus. Nach Untersuchungen von JANSEN besteht bis in den Bereich um $90 \text{ dB}(A)$ eine fast lineare Beziehung zwischen der Schallintensität und der Zunahme der Blutgefäßverengung. Diese flacht zwischen $90 \text{ dB}(A)$ und $99 \text{ dB}(A)$ deutlich ab. Oberhalb von $100 \text{ dB}(A)$ zeigt sich dann wieder eine überproportionale Zunahme der Blutgefäßverengung, die als potenziell pathogene vegetative Übersteuerung interpretiert wird [110, 111, 186].

In der Regel sind die physiologischen Reaktionen nur temporärer Natur und damit Zeichen einer reizadäquaten Verarbeitung, die eine bessere und angepasste Leistung ermöglicht. Erst bei häufiger und zu intensiver Stimulation, die ein hinreichendes Absenken des erhöhten Aktivitätsniveaus nicht mehr zulässt, kann es zu Gesundheitsbeeinträchtigungen kommen [111, 185, 193].

Aus einer Seltenheitsbetrachtung, die 1% des Bezugszeitraums umfasst, leitet JANSEN für den Tageszeitraum von 6 Uhr bis 22 Uhr als kritischen Toleranzwert für Fluglärm eine Kombination aus Häufigkeit und maximalem Schallpegel von höchstens $19 \times 99 \text{ dB}(A)$ ab, die nicht überschritten werden soll [74, 78, 186].

Auf breiter Basis abgesicherte, wissenschaftliche Erkenntnisse zur Schädigungsgrenze existieren allerdings bislang nicht. GRIEFAHN ET AL. schlagen deshalb in einer aktuellen Synopse zusätzlich einen präventiven Richtwert für den Tageszeitraum von maximal $25 \times 90 \text{ dB}(A)$ vor, bei dessen Einhaltung Gesundheitsbeeinträchtigungen weitgehend ausgeschlossen sein sollen [78, 79, 187].

3.3.2 Kommunikationsstörungen

Die Fähigkeit der Kommunikation über Hören und Sprechen ist nicht nur die dynamischste und komplexeste Leistung der menschlichen Informationsverarbeitung, sondern auch ein wichtiges Element der geistig-sozialen Entwicklung eines Menschen. Neben der Übertragung von Informationen ist vor allem der Austausch von Empfindungen, Stimmungen und Einstellungen von Bedeutung, die über den Klang, die Melodie, die Lautstärke und die Wortwahl der Sprache vermittelt werden [20, 77, 193, 199].

Kommunikationsstörungen sind die am häufigsten benannten primären Beeinträchtigungen durch Fluglärm. Sie haben nachgewiesenen Einfluss auf sekundäre und tertiäre Lärmwirkungen wie Belästigung, Leistungs- und Lernstörungen oder Verhaltensänderungen. Störungen der interaktiven wie der unidirektionalen Kommunikation resultieren in erster Linie aus der – zumindest partiellen – Verdeckung eines informationshaltigen Geräuschs durch ein Störgeräusch [72, 85, 179, 199].

Zwar beträgt die Redundanz der deutschen Sprache 73 %, sodass nicht jedes einzelne Wort verstanden werden muss, um einer Kommunikation folgen zu können. Für eine angenehme, unangestregte Kommunikation sind jedoch deutlich mehr als 27 % an Sprachelementen erforderlich. Denn zum einen sind nicht alle Sprachinformationen redundant, zum anderen hängt die individuelle Redundanz von der Vertrautheit des Hörers mit der Sprache und dem Sprachinhalt ab [20, 77, 199].

Zur Beurteilung der Sprachverständlichkeit sind aufwändige Verfahren wie der Artikulationsindex (AI) oder der Sprachübertragungsindex (STI) entwickelt worden. Da die Sprachverständlichkeit aber im Wesentlichen durch die Differenz zwischen Sprachschallpegel L_{SA} und Störgeräuschpegel L_{NA} bestimmt wird, ist eine pragmatische Vorhersage der Sprachverständlichkeit auch durch den A-bewerteten Sprach-Störgeräuschabstand $L_{SNA} = L_{SA} - L_{NA}$ gegeben [20, 77, 132, 216].

Für die Kommunikation in Innenräumen ist eine gute Sprachverständlichkeit anzustreben. Auf der Basis umfangreicher Untersuchungen weist LAZARUS hierfür einen Sprach-Störgeräuschabstand von mindestens $L_{SNA} = 8 \text{ dB}$ aus. Bei normaler Sprechweise mit einem in 1 m Normabstand gemessenen Sprechschallpegel von $L_{SA,1m} = 60 \text{ dB}$ ergibt sich daraus für eine typische Sprecher-Hörer-Distanz von 2 m ein höchstens zulässiger Störgeräuschpegel von $L_{NA} = 46 \text{ dB}$. Bei entspannter Sprechweise liegt dieser bei maximal $L_{NA} = 40 \text{ dB}$ [77, 131, 161, 208].

An die Kommunikation im Außenbereich sind nach allgemeiner Auffassung geringere Anforderungen zu stellen. So wird bereits eine ausreichende Sprachverständlichkeit bei angehobener Sprechweise über eine Entfernung von 1 m bis 2 m für akzeptabel erachtet. Unter Annahme einer mittleren Sprecher-Hörer-Distanz von 1,5 m folgt aus einem Sprach-Störgeräuschabstand von wenigstens $L_{SNA} = 2 \text{ dB}$

und einem Sprechschallpegel von $L_{SA,1m} = 66 \text{ dB}$ ein maximal zumutbarer Störgeräuschpegel von $L_{NA} = 60,5 \text{ dB}$ [31, 77, 131, 208].

Die bisherigen Ausführungen zu Kommunikationsstörungen beschränken sich auf die üblicherweise in einer künstlichen Laborumgebung erfassten akuten Auswirkungen von Maskierungsprozessen auf die Sprachverständlichkeit. Damit ist allerdings noch keine Aussage über die Kommunikationsgüte insgesamt getroffen. Für Alltagssituationen erschließt sich diese erst durch die Befragung von Betroffenen vor Ort mittels sozialpsychologischer Methoden [77, 87].

Als wesentliches Element einer globalen Belästigungsreaktion werden retrospektiv berichtete Kommunikationsstörungen in der Literatur selten gesondert ausgewiesen. Wegen der fehlenden Standardisierung des Erhebungsinstrumentariums sind die vorliegenden Arbeiten zudem nur schwer miteinander zu vergleichen. Empfehlungen zu Grenz- oder Richtwerten orientieren sich deshalb primär am Kriterium der Sprachverständlichkeit [77, 78, 133, 193, 199].

In der bereits erwähnten gemeinsamen Synopse einiger etablierter Forschergruppen schlagen GRIEFAHN ET AL. kritische Toleranzwerte für Störgeräusche von $L_{NA} = 45 \text{ dB}$ für die Kommunikation in Innenräumen und von $L_{NA} = 62 \text{ dB}$ für die Kommunikation im Außenbereich vor. Präventive Richtwerte liegen danach bei $L_{NA} = 40 \text{ dB}$ und $L_{NA} = 59 \text{ dB}$ [78, 79].

Bei Kindern werden insbesondere in der Phase des Spracherwerbs größere Sprach-Störgeräuschabstände für notwendig erachtet, ebenso bei älteren Menschen und bei Schwerhörigen. In Kindergärten, Schulen, Senioren- und Pflegeheimen sowie in Krankenhäusern sollen deshalb Störgeräuschpegel von $L_{NA} = 36 \text{ dB}$ nicht überschritten werden [78, 79].

3.3.3 Schlafstörungen

Schlaf ist ein reversibler, periodisch auftretender Zustand mit qualitativ verändertem Bewusstsein. Er kann jederzeit durch geeignete Reize unterbrochen werden, die über permanent offene, afferente Informationskanäle perzipiert, vom Gehirn ihrer Bedeutung entsprechend eingeordnet und adäquat beantwortet werden [76, 77].

Schlaf ist ein essenzielles Bedürfnis mit einer regenerierenden Funktion. Durch spezifische, im Einzelnen nach wie vor unbekannte Mechanismen und Prozesse trägt er entscheidend zum Wohlbefinden und zur Aufrechterhaltung von psychischer und physischer Leistungsfähigkeit bei [12, 76, 216].

Die physiologischen Funktionen des Menschen folgen unbeeinflusst einem genetisch determinierten Rhythmus mit einer Periode von etwas mehr als 24 Stunden.

Durch externe Zeitgeber werden sie mit dem 24-Stunden-Rhythmus des geophysikalischen Tages synchronisiert. Auffälligstes Zeichen der zirkadianen Rhythmik ist der Schlaf-Wach-Wechsel, der von zahlreichen Körperfunktionsänderungen begleitet wird, ohne deren Ursache zu sein [76, 77].

Der zirkadianen Rhythmik überlagert ist eine ultradiane Schwingung mit einer Periode von rund 90 Minuten, die als Basic-Rest-Activity-Cycle (BRAC) bezeichnet wird. Der Basic-Rest-Activity-Cycle ist zwar nicht auf den Schlaf beschränkt, tritt in dieser Zeit aber wegen des geringeren Einflusses von Störfaktoren deutlicher hervor. Er manifestiert sich in einem zyklischen Schlafablauf, der etwa 4 bis 5 Mal pro Nacht durchlaufen wird [77, 191].

Jeder dieser Zyklen beginnt mit einer kurzen, teilweise mit optischen und akustischen, hypnagogen Halluzinationen verbundenen Übergangsphase zwischen Wachbewusstsein und Schlaf, dem Stadium 1. Bereits nach wenigen Minuten wird mit dem Stadium 2 ein leichter bis mitteltiefer Schlaf erreicht, der allerdings noch relativ viele Körperbewegungen aufweist. Erst in den darauf folgenden Tiefschlafstadien 3 und 4 kehrt weitgehende motorische Ruhe ein [76, 77].

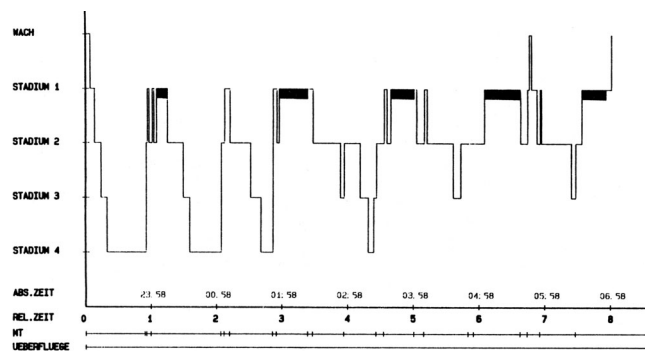


Abb. 3.11: Typisches Schlafprofil unter Ruhe [138]

Eine häufig von Körperbewegungen begleitete Schlafverflachung leitet schließlich zum Stadium REM (Rapid Eye Movement) über, das den Schlafzyklus komplettiert. Die REM-Phase ähnelt dem Stadium 1, ist darüber hinaus aber durch schnelle, einzelne oder in Salven auftretende Augenbewegungen und passagere Muskelkontraktionen charakterisiert [76, 80, 135, 137].

Von Zyklus zu Zyklus erhöht sich die Verweildauer im REM-Schlaf zulasten der übrigen Schlafstadien. Auch Anzahl und Dauer spontaner, nicht erinnerbarer Weckreaktionen und natürlicher Wachphasen nehmen im Verlauf der Nacht zu. Ein gesunder Schläfer mittleren Alters verbringt etwa 40 % bis 50 % der Schlafzeit im Stadium 2, 20 % in den Stadien 3 und 4, 25 % im REM-Schlaf und die restliche Zeit in den Stadien Wach und 1 [76, 80, 191].

Die Gesamtschlafdauer variiert interindividuell mit 2 bis 12 Stunden erheblich, ist intraindividuell jedoch ziemlich stabil. Durchschnittlich liegt sie bei 7 bis 8 Stunden. Mit zunehmendem Alter geht sie auf 5 bis 6 Stunden zurück. Gleichzeitig weiten sich die Anteile der flacheren Schlafstadien 1 und 2 sowie des Stadiums Wach aus. Der Schlaf wird leichter [76, 80].

Schlaf ist kein statischer Zustand, sondern ein dynamischer Erholungsprozess. Dieser wird durch eine trophotrope Stoffwechsellaage des Organismus unterstützt, die alle vegetativ gesteuerten Systeme auf Schonung schaltet. Bei hinreichend starker Stimulierung durch akustische Reize wird jedoch die für den Tag typische ergotrope Stoffwechsellaage aktiviert [41, 185].

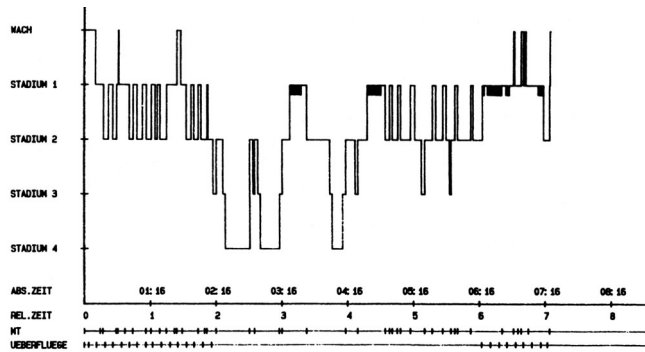


Abb. 3.12: Schlafprofil unter Fluglärm einfluss [138] Dabei kommt es zu partiellen, passageren oder vollständigen Weckreaktionen, die bei wiederholten intermittierenden Geräuschen zu einer Fragmentierung des Schlafverlaufs führen können, wie sie beispielhaft Abbildung 3.12 im Vergleich zu Abbildung 3.11 aufzeigt. Die Verweildauer in den Tiefschlafstadien 3 und 4 sowie im REM-Schlaf ist reduziert. Die Schlafperiodik ist unterbrochen [136, 138].

An Flughäfen mit relevantem Nachtflugbetrieb zählen Schlafstörungen zu den wichtigsten Fluglärmwirkungen. Sie werden von den Betroffenen als besonders gravierend empfunden. Schlafstörungen äußern sich insbesondere durch Veränderungen des Schlafablaufs, der motorischen Aktivität und autonomer Funktionen sowie in deren Folge als Beeinträchtigung von Schlafqualität und Wohlbefinden, Leistungsfähigkeit und psychischer Verfassung [20, 41, 72].

Zur Erfassung und Quantifizierung von Schlafstörungen steht eine Vielzahl von Methoden zur Verfügung, von denen einige wesentlich vorgestellt werden sollen. Die Ableitung der Hirnströme mittels Polysomnographie ist die differenzierteste und aufwändigste Methode. Nur sie gewährleistet jedoch eine valide und reliable Bestimmung der Schlafstadien und damit aller wesentlichen Schlafparameter.

Die Aufzeichnung der Körperbewegungen erfolgt üblicherweise durch einen am Handgelenk getragenen Beschleunigungsmesser, das Aktimeter. Als Indikatoren für autonome Reaktionen werden vor allem die Herzschlagfrequenz und der periphere Volumenpuls herangezogen. Die subjektive Schlafqualität wird ebenso wie das Befinden und die Bewältigungsstrategien über Fragebögen erfasst.

Schlafstörungen werden sowohl in Labor- als auch in Feldstudien untersucht. In Laborstudien fällt neben dem hohen methodischen Aufwand der kleine bis sehr kleine Stichprobenumfang sowie die geringe Zahl von Gewöhnungs- und Lärmnächten auf. Ihre Ergebnisse haben daher nur eine sehr begrenzte Aussagekraft [112, 134, 184]. Es gab in der Vergangenheit jedoch mehrere Meta-Analysen mit dem Ziel, Daten verschiedener Autoren zusammenzufassen. Weit verbreitet

ist die von GRIEFAHN entwickelte Kurve gleichen Aufwachrisikos [75, 76].

Feldstudien basieren in der Regel auf dem kosten- und zeitgünstigen Untersuchungsverfahren der Aktimetrie. Anders als bei der Polysomnographie ist damit zwar nur eine eingeschränkte Analyse der Schlafstruktur möglich. Andererseits können bei vergleichsweise geringem Personal- und Finanzeinsatz große Probandengruppen adäquat betreut werden [95, 160, 168–170].

Nach einer Auswertung von 35 Labor- und Feldstudien bestätigen MASCHKE ET AL. im Wesentlichen die vermuteten Folgen nächtlichen Verkehrslärms. Die Gesamtschlafdauer war verkürzt, die Einschlaf- und Tiefschlaf latenz waren verlängert, die Dauer von Tiefschlaf- und REM-Phasen war reduziert. Die subjektive Schlafqualität war verschlechtert und das erinnerbare Erwachen nahm zu [137].

Laborexperimentell ermittelte Schwellenwerte für Aufwachreaktionen liegen bei Maximalschallpegeln von $53 \text{ dB}(A)$ bis $60 \text{ dB}(A)$. Im Feldversuch setzen sie etwa $2 \text{ dB}(A)$ später ein. Erste Anzeichen eines veränderten Schlafverhaltens unter Fluglärm einfluss sind nach einer Studie am Flughafen Amsterdam bereits ab einem Maximalschallpegel von $32 \text{ dB}(A)$ zu beobachten [57, 58, 77, 168–171].

Bei langfristiger nächtlicher Lärmexposition kommt es zu Gewöhnungseffekten, die zu einer geringeren Aufwachhäufigkeit und vermehrten Null-Reaktionen führen. Dabei bilden sich Kompensationsmechanismen heraus, deren Bedeutung im Lauf der Zeit zunimmt. Es entwickelt sich ein neues Schlafverhalten, bei dem nach lärminduziertem Aufwachen die Wiedereinschlafzeit verkürzt ist und die Tiefschlafstadien schneller erreicht werden. Die über die Gesamtschlafzeit ermittelte Globalreaktion ist deshalb vergleichsweise gering [41, 77, 135].

Vor diesem Hintergrund wird derzeit kontrovers diskutiert, ob Kriterien zum Schutz vor fluglärmbedingten Schlafstörungen neben lärminduziertem Aufwachen nicht auch auf eine signifikante Zerstörung der Schlafstruktur abstellen müssen. Die von GRIEFAHN und JANSEN gemeinsam mit SCHEUCH und SPRENG veröffentlichte Synopse trägt beiden Sichtweisen Rechnung [87, 139].

Als präventiven Richtwert schlagen sie für die Gesamtnacht am Ohr des Schläfers $13 \times 53 \text{ dB}(A)$ vor. Der kritische Toleranzwert soll danach bei $6 \times 60 \text{ dB}(A)$ liegen. Bei älteren Menschen und in Krankenhäusern werden mit $51 \text{ dB}(A)$ und $45 \text{ dB}(A)$ nochmals reduzierte Maximalschallpegel für notwendig erachtet. Für Kinder sind hingegen keine besonderen Werte zu fordern [77–79].

Die Datenbasis zu nächtlichen Fluglärmwirkungen wird durch eine Studienserie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) erheblich erweitert werden. Seit 1998 sind 192 Personen in 2300 Nächten polysomnographisch sowohl im Labor als auch im Feld untersucht worden. Mit den Ergebnissen dieses Projekts, an dem der Autor bis 1999 beteiligt war, ist Ende 2003 zu rechnen [11–13].

3.3.4 Belästigung

Belästigung ist die zentrale psychologische Größe im Bereich der Lärmwirkungsforschung und daher vielfach Gegenstand sozialpsychologischer Untersuchungen. KASTKA definiert Belästigung als eine nicht demonstrierbar pathogene Störung des körperlichen oder seelischen Wohlbefindens, die über einen längeren Expositionszeitraum registriert oder erlebt wird [116, 117].

Demgegenüber meint Störwirkung die einem konkreten Ereignis zugeordnete unmittelbare Verhaltens- oder Erlebnisbeeinträchtigung. Die simultane Expositionserfahrung ist jedoch weder Voraussetzung für das Vorhandensein von Belästigung noch für deren psychometrische Erfassung [116, 117].

Belästigung ist keine einfache Empfindungsgröße, sondern multikausal bedingt. Persönliche und soziale Merkmale determinieren zusätzlich und unabhängig von der Geräuschbelastung die Ausprägung der Belästigungsreaktion verstärkend oder abschwächend. Diese nichtakustischen Einflussgrößen werden als Moderatoren bezeichnet [114, 179].

Zu den wichtigsten Moderatoren zählen Lärmempfindlichkeit und Angst vor Fluglärmwirkungen, persönliche Einstellung zum Flugverkehr, Angst vor Unfällen oder sonstigen nichtakustischen Wirkungen sowie Grad des Vertrauens in Flugzeugbetreiber und Aufsichtsbehörden. Soziodemographische Variablen wie Alter, Geschlecht, sozialer Status, Einkommen, Hausbesitz oder Wohndauer haben keinen oder allenfalls gering moderierenden Einfluss [61, 77, 145].

Lärmbelästigung wird in der Regel in persönlicher, telefonischer oder schriftlicher Form im Rahmen von Bevölkerungsumfragen retrospektiv ermittelt. Dabei kommen zwei unterschiedliche Vorgehensweisen infrage. Zum einen kann der Grad der Belästigung direkt erfragt werden, indem ein zusammenfassendes Belästigungsurteil über einen zurückliegenden Zeitraum erbeten wird. Zum anderen können gezielt einzelne Belästigungskomponenten bewertet und dann zu einem Gesamturteil verdichtet werden.

Fragestellung, Antwortskala, Platzierung innerhalb des Fragebogens und Dokumentation waren in der Vergangenheit höchst uneinheitlich und haben die Vergleichbarkeit von Studien verschiedener Autoren erheblich eingeschränkt. So ist es nicht weiter überraschend, dass gelegentlich Zweifel an der Validität der Belästigungsmessung aufkamen. Inzwischen liegen aber zwei standardisierte Fragen zur allgemeinen Lärmbelästigung vor, die international abgestimmt und validiert wurden [55, 62, 84].

Akustische Belastungsparameter determinieren im günstigsten Fall ein Drittel der individuellen Varianz im Belästigungsurteil. Ein weiteres Drittel kann durch Moderatoren aufgedeckt werden, das restliche Drittel kann nach heutigem Kennt-

nisstand nicht erklärt werden. Erst die Betrachtung von Gruppenmittelwerten auf aggregierter Datenbasis führt zu einer deutlich höheren Korrelation von $r > 0,9$ [77, 87, 188].

Dosis-Wirkungs-Beziehungen zwischen Lärmbelastung und Belästigung werden üblicherweise anhand des prozentualen Anteils hoch belästigter Personen, der Highly Annoyed (HA), angegeben. Die hierfür notwendige Festlegung eines geeigneten Auswahlkriteriums beruht weniger auf einer wissenschaftlichen Analyse als vielmehr auf einer pragmatischen willkürlichen Entscheidung [60].

SCHULTZ hat 1978 für seine Studie die oberen 28 % auf der Antwortskala festgelegt. Dieser Wert hat sich inzwischen weitgehend durchgesetzt. Die Beschränkung auf den Prozentsatz hoch belästigter Personen birgt allerdings die Gefahr, dass die Gesamtheit an Belästigung verzerrt wiedergegeben wird. Insbesondere werden die in Westeuropa steigenden Anteile im mittleren Bereich der Antwortskalen ignoriert [41, 119–121, 192].

International gebräuchlich zur Ableitung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen Lärmbelastung und Belästigung ist neben dem bereits mit Gleichung 3.8 auf Seite 20 eingeführten energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{eq(3)}$

$$L_{eq(3)} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \sum_i \frac{t_{10_i}}{2} \cdot 10^{\frac{L_{ASmax_i}}{10}} \right] \quad (3.11)$$

vor allem der Day Night Level L_{DN} . Für den Tageszeitraum von 7 Uhr bis 22 Uhr beträgt der Wichtungsfaktor $g_i = 1$, für den Nachtzeitraum von 22 Uhr bis 7 Uhr ist $g_i = 10$.

$$L_{DN} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \sum_i g_i \cdot \frac{t_{10_i}}{2} \cdot 10^{\frac{L_{ASmax_i}}{10}} \right] \quad (3.12)$$

In der neuen EU-Richtlinie zur Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm wird darüber hinaus der Day Evening Night Level L_{DEN} verwendet. Er erweitert den L_{DN} um einen Abendzeitraum von 19 Uhr bis 23 Uhr mit dem Wichtungsfaktor $g_i = 3,16$. So plausibel derartige Zuschläge erscheinen, für die Höhe der Korrelation zwischen Fluglärmbelastung und Belästigung ist die Wahl eines bestimmten akustischen Basismaßes nahezu ohne Belang [50, 87, 108, 146, 148].

Dies gilt grundsätzlich auch für den von KASTKA auf Basis seiner aktuellen Studien eingebrachten Vorschlag, statt eines äquivalenten Dauerschallpegels alternativ die Häufigkeit von Ereignissen oberhalb eines Maximalschallpegels von $70 \text{ dB}(A)$ zu verwenden [114–116]. Pegel-Häufigkeitsverteilungen haben gegenüber Dauerschallpegeln aber den Vorteil der einfacheren Handhabung in der Kommunikation zwischen Flughafen, Flughafenwohnern und Politikern. Für eine übertragbare Anwendung sind sie allerdings noch nicht hinreichend abgesichert [79].

Um die begrenzte Aussagekraft lokaler Studien über Belästigungsreaktionen zu erweitern, hat SCHULTZ bereits frühzeitig eine Reihe von europäischen und nordamerikanischen Studien zur Belästigung durch Verkehrslärm in eine Meta-Studie eingebracht, für die er verschiedene Lärmquellen und Antwortreaktionen in einer synthetisch transformierten Form zusammengefasst hat [192].

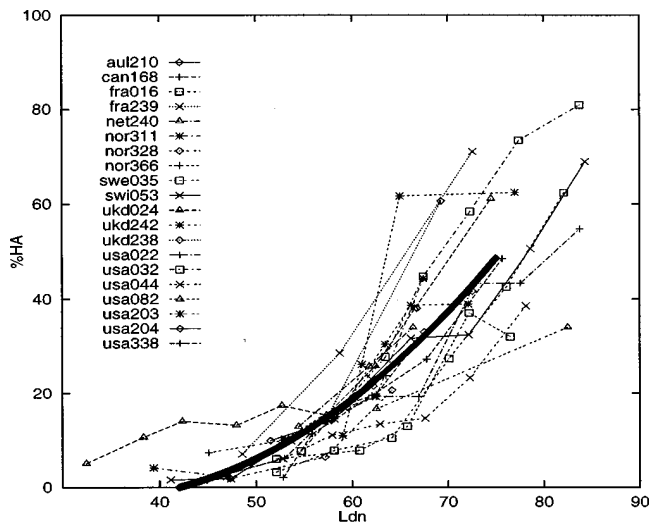


Abb. 3.13: Dosis-Wirkungs-Beziehungen für Belästigung durch Fluglärm [144]

Abbildung 3.13 zeigt die auf 20 Studien beruhende Datenbasis für Belästigung durch Fluglärm sowie die von MIEDEMA ermittelte quadratische Ausgleichsfunktion [127–129, 144].

Trotz großer Sorgfalt bei der Datenaufbereitung kann auch gegen diese Analyse eingewandt werden, dass weder die Fragestellung und die Antwortskala noch das Highly-Annoyed-Kriterium der eingehenden Studien standardisiert waren. Auch die akustischen Belastungsparameter waren teilweise unterschiedlich. Der oben angesprochene standardisierte Fragenkatalog wird jedoch zu Verbesserungen der Aussagekraft führen.

Gleiches gilt für die wünschenswerte Einbindung aktueller Studien. GUSKI hat bei einer Analyse des MIEDEMA-Datenmaterials eine deutliche Zeitabhängigkeit der Höhe der Belästigungsreaktion identifiziert [86]. Ähnliche Beobachtungen hatte KASTKA bei seinen Längsschnittstudien am Flughafen Düsseldorf bereits früher gemacht [119–121].

Bei aller berechtigten Kritik bleibt jedoch festzuhalten, dass erst die Synthese vieler Einzelergebnisse zu einer gemeinsamen Dosis-Wirkungs-Beziehung es erlaubt, unabhängig vom Einzelfall und seinen regionalen Besonderheiten, allgemeine Prinzipien der Belästigung zu erkennen [77].

Nach ihrer Veröffentlichung ist die SCHULTZ-Kurve wegen erheblicher methodischer Mängel, aber insbesondere wegen des Verzichts auf eine quellenspezifische Ausweisung heftig kritisiert worden. Der prinzipielle Ansatz ist jedoch in den Folgejahren von verschiedenen Autoren aufgegriffen und unter Berücksichtigung der kritischen Anmerkungen weiterentwickelt worden. Zuletzt hat MIEDEMA in 1998 überarbeitete Dosis-Wirkungs-Beziehungen für jeden der drei Verkehrsträger Straße, Schiene und Luft vorgelegt.

Bei der Verwendung der Dosis-Wirkungs-Beziehung nach MIEDEMA ist zu beachten, dass sie auf Studien in stabilen Lärmsituationen beruht. Eine sachgerechte Prognose der Reaktion auf eine veränderte Lärmsituation ist folglich nicht möglich. Vielmehr muss in diesem Fall von einer überschießenden Reaktion der betroffenen Bevölkerung ausgegangen werden, über deren Höhe und zeitlichen Verlauf es derzeit keine gesicherte Wissensbasis gibt [87].

Entsprechend der von GRIEFAHN ET AL. praktizierten Vorgehensweise, individuelle Belästigung mit epidemiologischer Belästigung gleichzusetzen, scheint bei der Ableitung eines kritischen Toleranzwertes für Belästigung ein Anteil von 28 % hoch belästigter Personen noch akzeptabel. Dies entspricht nach MIEDEMA einem Day Night Level von $L_{DN} = 65 \text{ dB}$.

Für einen präventiven Richtwert der Belästigung durch Fluglärm wird im Einklang mit GOTTLÖB ET AL. ein Anteil von 22 % hoch belästigter Personen als zumutbar betrachtet. Damit korrespondiert nach MIEDEMA ein Day Night Level von $L_{DN} = 62 \text{ dB}$.

3.3.5 Mentale Leistungsstörungen

Mentale Leistungsstörungen entstehen im Wesentlichen durch Maskierung eines informationshaltigen Geräuschs, durch Überkompensation oder durch Ablenkung der Aufmerksamkeit aufgrund irrelevanter Geräusche, die eine Orientierungsreaktion auslösen. Mentale Leistungsstörungen können aber auch als Nachwirkung lärminduzierter Schlafstörungen auftreten.

Die Wirkung von Fluglärm auf Tätigkeit und Leistung wird nahezu ausschließlich im Rahmen von Studien über Schulkinder untersucht. Dabei verzeichnen Studien an den Flughäfen Heathrow und New York signifikant schlechtere Leseleistungen für Schulkinder, die energieäquivalenten Dauerschallpegeln von mehr als $L_{eq(3)} = 65 \text{ dB}$ ausgesetzt sind [41, 77].

Die Verlegung des Flughafens München in 1992 hat eine Forschergruppe um BULLINGER, EVANS und HYGGE genutzt, um über einen Zeitraum von zwei Jahren die mentale Leistungsfähigkeit von Schulkindern im Umfeld des alten und neuen Flughafens zu untersuchen. Insgesamt ergeben sich keine gravierenden Leistungsdefizite, jedoch geringfügige negative Auswirkungen auf das Lesevermögen, die Sprachwahrnehmung und den Spracherwerb sowie die Langzeiterinnerung [41, 53, 96, 143, 194].

Die vorliegenden Untersuchungen sind allerdings nicht hinreichend abgesichert, um übertragbare Aussagen zuzulassen. Darüber hinaus fehlen Dosis-Wirkungs-Beziehungen, sodass sich derzeit kein Schwellenwert ableiten lässt, ab dem Leis-

tungsminderungen zu erwarten sind. Die genannten Feldstudien legen jedoch nahe, dass ein energieäquivalenter Dauerschallpegel von $L_{eq(3)} = 65 \text{ dB}$ nicht überschritten werden sollte [47, 48, 77, 87].

Die mentale Leistungsfähigkeit von Probanden vor und nach einer verkehrslärmgestörten Nacht wird bei nahezu allen Feld- und Laborstudien untersucht. Üblicherweise werden hierzu computergestützte Tests eingesetzt, die Aussagen zu Konzentrationsfähigkeit, Arbeitsgeschwindigkeit und Fehlerrate ermöglichen [12, 77].

Die Leistungsfähigkeit wird jedoch in erheblichem Umfang durch die aktuelle Situation während des Tests determiniert, sodass eine eindeutige Kausalattribution nicht gegeben ist. Besonders problematisch ist dies bei Feldstudien, da die Lärmbelastung tagsüber – also während der Testphasen – häufig höher ist als nachts [77]. So ist es wenig erstaunlich, dass die Ergebnisse der Leistungstests kontrovers und die beobachteten Effekte in aller Regel gering sind.

3.3.6 Chronische Gesundheitsstörungen

Bei der Entstehung der auch als Tertiärwirkungen bezeichneten chronischen Gesundheitsstörungen wird ein begünstigender Einfluss langfristig wiederholter Primär- und Sekundärwirkungen vermutet. Der Nachweis eines Kausalzusammenhangs gestaltet sich wegen der multifaktoriellen Genese der chronischen Gesundheitsstörungen allerdings ausgesprochen schwierig [161, 193].

3.3.6.1 Biochemisch-hormonelle und immunologische Wirkungen

Änderungen der Stoffwechselreaktionen als Folge von Lärmbelastung waren Untersuchungsgegenstand zahlreicher Studien. Dabei wurden teils widersprüchliche Veränderungen der Werte von Glukose, Enzymen, Elektrolyten und Stresshormonen in Blut und Urin gefunden, die noch keinen schlüssigen Eindruck der Lärmwirkungen vermitteln [41].

Fluglärmspezifische Untersuchungen gab es vor allem hinsichtlich der Ausscheidung der Katecholamine Adrenalin und Noradrenalin sowie des Cortisols. Eine Forschergruppe um MASCHKE und HARDER identifizierte in drei Labor- und Feldstudien zu nächtlichen Fluglärmwirkungen einerseits einen Anstieg der mittleren Katecholamin- und Cortisolkonzentration andererseits aber auch konstante Werte [90, 135, 138].

KASTKA ET AL. ermittelten bei ihren Untersuchungen in der Nähe des Flughafens Düsseldorf keinen Zusammenhang zwischen Lärmbelastung und Cortisolaus-

scheidung, während die Belästigungsreaktion gut abgebildet wurde. Der von EVANS ET AL. im Umfeld des Flughafens München bei Schulkindern beobachtete Anstieg der Katecholaminausscheidung ist aus Sicht der Autoren medizinisch wenig bedeutsam [41, 53, 118].

Sowohl Feld- als auch Laborstudien zu biochemisch-hormonellen Wirkungen von Fluglärm liefern also uneinheitliche Ergebnisse, zeigen indes, dass Fluglärm zu erhöhten Ausscheidungen von Stresshormonen führen kann. Bevor jedoch eindeutige Rückschlüsse gezogen werden können, sind weitere umfangreiche Untersuchungen erforderlich [35, 41].

Dosis-Wirkungs-Beziehungen, in denen sich Hinweise für eine Grenzwertdiskussion finden lassen könnten, fehlen bisher völlig. Die Frage nach den Auswirkungen der teils identifizierten Erhöhungen der Stresshormonausscheidung auf die Gesundheit kann derzeit ebenfalls nicht beantwortet werden [41, 87].

Unterschiedliche Organe sowie zelluläre und humorale Bestandteile bilden gemeinsam das Netzwerk des Immunsystems. Sie interagieren mithilfe von Botenstoffen und unterschiedlichen Rezeptoren. Lärminduzierte Veränderungen innerhalb dieses komplexen Systems können nach dem derzeitigen Wissensstand kaum identifiziert und angemessen beurteilt werden [20, 77].

3.3.6.2 Kardiovaskuläre Erkrankungen

Lärm ist als eine potenzielle Risikogröße in der multifaktoriellen Genese kardiovaskulärer Erkrankungen anzusehen. Wegen ihrer weit reichenden Bedeutung hinsichtlich der Anzahl potenziell Betroffener sind die Wirkungen auf den Blutdruck und die Entwicklung von ischämischen Herzkrankheiten von besonderem Interesse. Spezifische Untersuchungen für Fluglärm sind dennoch höchst selten.

Das mag daran liegen, dass das Risiko, Hypertonie durch Verkehrslärm zu erleiden, aufgrund der mangelhaften Berücksichtigung konfundierender Variablen in der Vergangenheit wohl eher überschätzt wurde. Denn nach aktuellen Untersuchungen zeichnet sich immer mehr ab, dass zur Ausbildung einer lärmbedingten Hypertonie eine so hohe Lärmbelastung erforderlich ist, wie sie im Bereich des Verkehrslärms de facto nicht auftritt. Die epidemiologische Evidenz für verkehrslärmbedingte Blutdruckerhöhungen ist also sehr gering [41, 216].

Folgerichtig konnte in der Umgebung des Flughafens München zwar der Zusammenhang zwischen Übergewicht und Hypertonie abgesichert werden. Für Fluglärm und Hypertonie gelang dies allerdings nicht. Auch der Versuch, kardiovaskulär bedingte Krankenhausaufenthalte am Flughafen Amsterdam auf Fluglärm zurückzuführen, ist fehlgeschlagen. Die Einweisungsraten waren nicht höher als in vergleichbaren Gebieten [4, 200].

Die Hinweise auf ischämische Herzkrankheiten infolge chronischer Verkehrslärmbelastung sind etwas belastbarer als bei der Hypertonie. Die Zahl der Studien, die sich mit den Auswirkungen von Verkehrslärm auf die Entwicklung einer ischämischen Herzkrankheit beschäftigen, ist jedoch sehr begrenzt. Es finden sich nur geringe Risikoerhöhungen, die auf einen möglichen Zusammenhang hinweisen. Insbesondere sind nur wenige Ergebnisse im statistischen Sinn signifikant [41].

Dennoch scheint es angeraten, in diesem extrem gesundheitsrelevanten Bereich auch Tendenzen ernst zu nehmen. Zum Ausschluss kardiovaskulärer Effekte als Folge chronischer Lärmbelastungen sollten deshalb energieäquivalente Dauerschallpegel oberhalb von $L_{eq(3)} = 70 \text{ dB}$ vermieden werden [35, 87].

Bedauerlich ist, dass die Aussagekraft der meisten Studien zum Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und kardiovaskulären Erkrankungen durch eine völlig unzureichende Beschreibung der akustischen Belastungsparameter erheblich gemindert wird. So können selbst die aus epidemiologischer Sicht sorgfältigsten Arbeiten die Hypothese eines Kausalzusammenhangs weder verifizieren noch falsifizieren [77].

3.3.6.3 Psychiatrische Erkrankungen

Die multifaktorielle Genese psychiatrischer Erkrankungen lässt zu Recht vermuten, dass Fluglärm nicht so sehr als direkter Verursacher psychiatrischer Erkrankungen fungiert, sondern vielmehr als potenzieller Auslöser bereits latent vorhandener Erkrankungen. Dementsprechend komplex gestaltet sich der Nachweis von fluglärminduzierten Effekten [216].

Zwar kann bei Studien in hoch belasteten Gebieten gelegentlich ein vermehrter Gebrauch von Schlaf- und Beruhigungsmitteln sowie eine erhöhte Zahl psychiatrischer Symptome und psychiatrisch bedingter Krankenhausaufenthalte beobachtet werden. Entsprechende Studien sind jedoch nicht eindeutig und leiden häufig unter gravierenden methodischen Mängeln [70, 88, 161, 216].

Auf Basis der derzeit vorliegenden Untersuchungen kann also kein kausaler Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und der Ausbildung psychiatrischer Erkrankungen abgeleitet werden [35, 77]. Andere Umwelteinflüsse und soziale Faktoren scheinen hier weitaus stärker zu wirken als die Lärmbelastung [85].

3.3.6.4 Fetale Entwicklungsstörungen

Als mögliche lärmbedingte Entwicklungsstörungen des ungeborenen Kindes kommen vor allem eine Beeinträchtigung des fetalen Wachstums aufgrund verminderter Sauerstoffversorgung der Plazenta sowie eine verkürzte Gestationsdauer

als Folge vermehrt ausgeschütteter Stresshormone in Betracht [177]. Wegen der hohen Dämmwirkung von Bauchdecke, Gebärmutterwand und intrauteriner Flüssigkeit ist von einer direkten Belastung des Fetus durch Fluglärm nicht auszugehen [77].

REHM fand bei einer Untersuchung von Geburtsgewicht und Frühgeborenenrate in der Umgebung des Flughafens Düsseldorf keine Beziehung zwischen zunehmender Lärmbelastung und reduziertem Geburtsgewicht. Der von ihr identifizierte tendenzielle Anstieg der Frühgeborenenrate ist nicht signifikant [177, 178].

Auch internationale Studien und aktuelle Übersichtsarbeiten belegen, dass nach heutigem Wissensstand ein Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und fetalen Entwicklungsstörungen höchst unwahrscheinlich ist. Teilweise anders lautende Ergebnisse älterer Studien liegen, wie Re-Analysen der Daten zeigen, in erheblichen methodischen Mängeln begründet [35, 69, 166, 167].

3.3.7 Diskussion

Die thematische Bandbreite der erörterten Fluglärmwirkungen kann allenfalls im Ansatz einen Eindruck von der Komplexität und Vielschichtigkeit der im Organismus des Menschen als unbewusste Reaktion auf einen akustischen Reiz ablaufenden Wirkmechanismen vermitteln. Denn Fluglärm wirkt nicht nur über den Gehörsinn, sondern beeinflusst über die direkte und indirekte Erregung des autonomen Nervensystems eine Vielzahl vegetativer Funktionen.

Auf dem Gebiet der Fluglärmwirkungsforschung sind vor diesem Hintergrund noch erhebliche Herausforderungen zu bewältigen. Dies betrifft grundsätzlich alle diskutierten Lärmwirkungen. So gibt es validierte Dosis-Wirkungs-Beziehungen bisher nur für Belästigung und mit deutlichen Einschränkungen für Schlafstörungen. Aber auch diese sind um aktuelle Primärdaten und neue wissenschaftliche Erkenntnisse angemessen zu ergänzen.

Die Ergebnisse älterer Studien verlieren häufig infolge fehlender methodischer und statistischer Sorgfalt an Aussagekraft. Aber auch bei neueren Feldstudien fällt gelegentlich auf, dass der Erfassung und Dokumentation der akustischen Stimuli nur geringe Beachtung geschenkt wird, während auf der Wirkungsseite ein ungleich höherer Aufwand betrieben wird.

Dabei wird offensichtlich nicht in Betracht gezogen, dass die exakte Erfassung des Dosismaßes notwendige Voraussetzung für die Ableitung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung ist. Die Verwertbarkeit derart gewonnener Studienergebnisse ist jedenfalls erheblich eingeschränkt.

4 Handlungsrahmen für die Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen

Kapitel 4 ist das zentrale Kapitel der vorliegenden Arbeit. Es zielt auf die Erarbeitung eines bisher fehlenden praxisorientierten Handlungsrahmens, der die Entwicklung von sachgerechten und planungssicheren Fluglärmkontingentierungen für deutsche Verkehrsflughäfen in adäquater Weise unterstützt.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird in allen wesentlichen Handlungsfeldern zunächst das theoretische Potenzial von Fluglärmkontingentierungen systematisch herausgearbeitet und auf seine praktische Relevanz überprüft. Darauf aufbauend wird im Folgenden ein konkreter Handlungsrahmen abgeleitet, der das gesamte Ausgestaltungsspektrum von den Maximen bis zu einer vorstellbaren Dynamisierung umfasst.

Dabei werden in einzelnen, isolierten Teilbereichen bestehende Erkenntnisse und Lösungsansätze ergebnisorientiert integriert und konsequent zu einer interdisziplinären Gesamtsicht der komplexen Problematik von Fluglärmkontingentierungen ergänzt.

Essenzielle Aussagen, Argumentationsketten und Schlussfolgerungen werden ebenso wie komplexe Interdependenzen bei Bedarf anhand von computergestützten Berechnungen für den Hybrid-Flughafen Parport diskutiert und veranschaulicht. Die hierfür gewählte Kombination realer und fiktiver Elemente stellt einerseits eine hinreichende Praxisnähe sicher. Andererseits sind die Betrachtungen und Interpretationen abstrakt genug, um übertragbare Ergebnisse zu erzielen.

Der solcherart generierte Flughafen Parport besitzt ein abhängiges Parallelbahnsystem in Richtung $70^\circ/250^\circ$. Die Start- und Landebahnen sind jeweils 4000 m lang und 60 m breit. Mit insgesamt 20 Abflug- und 4 Anflugstrecken ist das Routensystem komplex ausgelegt. Abmessungen und Anordnung der Start- und Landebahnen orientieren sich ebenso wie der Verlauf der An- und Abflugstrecken an den Gegebenheiten am Flughafen Frankfurt ohne die Startbahn 18 (West).

Auch Lage und Flächenbedarf der Städte, Gemeinden und Ortschaften in der Umgebung des fiktiven Flughafens Parport entsprechen weitgehend der realen Situation im Großraum Frankfurt. Allerdings ist hier die Besiedlungsdichte modifiziert. Die betrachtete Gesamtfläche umfasst rund 1127 km^2 bei einer Einwohnerzahl von etwa 518000.

Einen Überblick über den Hybrid-Flughafen Parport mit dem Parallelbahn- und Routensystem sowie die Besiedlungsstruktur in der Flughafenumgebung gibt Abbildung 4.1.

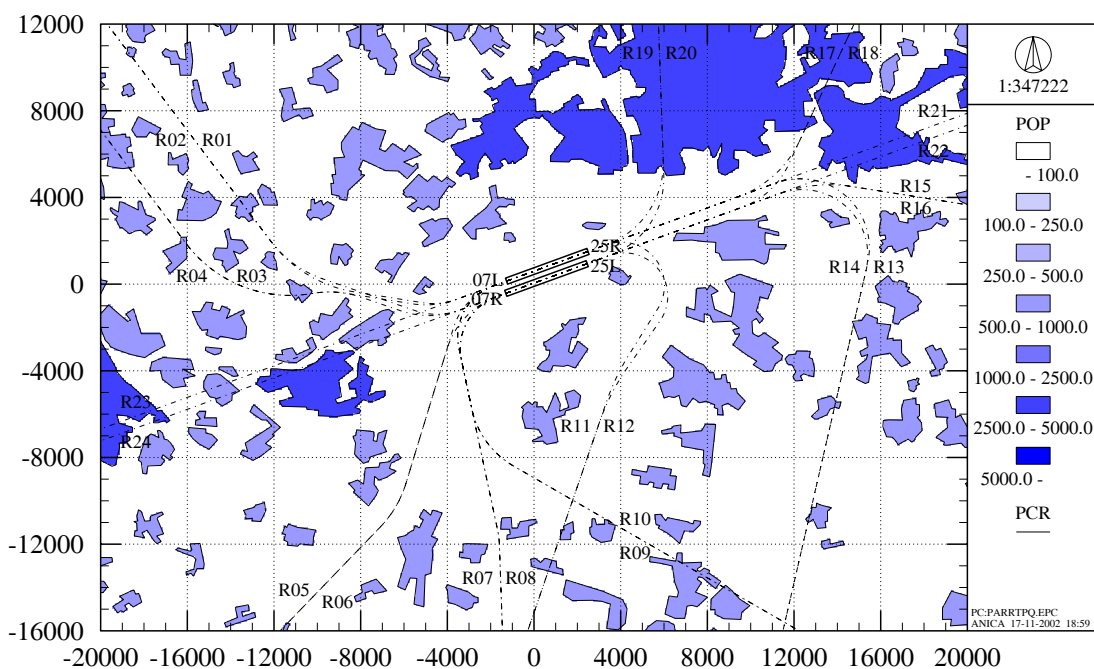


Abb. 4.1: Hybrid-Flughafen Parport mit Parallelbahn- und Routensystem sowie Besiedlungsstruktur im Umfeld

Die exemplarischen Flugbetriebsszenarien für den fiktiven Flughafen Parport werden auf der Basis detaillierter Verkehrsstatistiken und Verkehrsprognosen für die Flughäfen Frankfurt, München und Düsseldorf modelliert. Dabei finden sowohl verkehrliche, betriebliche und flugsicherungstechnische als auch meteorologische Aspekte Berücksichtigung [65–68, 108].

Ausgangspunkt aller Flugbetriebsszenarien ist zunächst ein Alt-Standard, der die Situation Ende der neunziger Jahre unter Einbezug von Kapitel-2-Fluggerät wiedergibt. Aus diesem wird ein Standard abgeleitet, der infolge des ausschließlichen Einsatzes von Kapitel-3-Fluggerät bei nahezu konstanten energieäquivalenten Dauerschallpegeln rund 18 % zusätzlichen Flugverkehr auf dem Parallelbahn- und Routensystem ermöglicht.

Mit der beim Standard zugrunde gelegten Auslastung von jährlich etwa 274000 Flugbewegungen ist der Flughafen hoch belastet. Der Verkehrsanteil der verkehrsreichsten sechs Monate eines Jahres wird deshalb mit 52 % angesetzt, entsprechend rund 142500 Bewegungen. Mit 78,4 % Westwetterlagen und 21,6 % Ostwetterlagen wird eine für Deutschland typische Verteilung angenommen. Die übrigen Szenarien variieren diesen Standard unter spezifischen Randbedingungen.

Eine nähere Beschreibung des vom Autor entwickelten und hier für die computer-gestützten Berechnungen verwendeten Programmsystems ANICA sowie der Datenbasis für Fluggeräuschemissionen, Flughafeninfrastruktur, Besiedlungsstruktur und Flugbetriebsszenarien ist im Anhang ab Seite 123 zu finden.

4.1 Maximen

Bereits einleitend wurde die Notwendigkeit einer nachhaltigen Sicherung der Luftverkehrsmobilität aufgezeigt. Die hierfür unerlässliche Akzeptanz des Luftverkehrs auf breiter Basis kann jedoch nur dann erreicht werden, wenn es gelingt, ökonomische, ökologische und soziale Interessen in eine für alle Beteiligten faire Balance zu bringen.

Vielversprechende Beiträge zu dieser Balance werden vor allem von Fluglärmkontingentierungen erwartet. Ihre ökologische Effektivität, die die schnelle und sichere Einhaltung einer quantitativ festgeschriebenen Lärmbelastung im konfliktierenden Umfeld eines expandierenden Flughafens garantiert, macht sie in Verbindung mit dem marktwirtschaftlich orientierten Ansatz bei geeigneter Ausgestaltung anderen umweltpolitischen Maßnahmen deutlich überlegen.

Fluglärmkontingentierungen sind den umweltökonomischen Mengelösungen zuzurechnen, die die geforderte Umweltqualität nicht indirekt über eine Preissteuerung, sondern vielmehr direkt über eine Mengenkontingentierung erreichen. Zuerst wird deshalb administrativ die Obergrenze der zulässigen Belastung bestimmt. Maximal bis zu dieser Obergrenze werden dann gestückelte Anteile an der Gesamtmenge in Form von lärmabhängigen Lizenzen vergeben.

Die marktwirtschaftlichste Vergabeform, die in der umweltökonomischen Theorie für Fluglärmkontingentierungen diskutiert wird, ist der Handel mit Lizenzen. Das Verhältnis von Angebot und Nachfrage findet hier unmittelbar seinen Niederschlag in der Höhe des Marktpreises. In der Folge prägen die Fluggesellschaften ein ökonomisch effizientes Vermeidungsverhalten aus, das betriebsorientiertes Eigennutzhandeln und volkswirtschaftliche Kostenminimierung zusammenführt.

Der Entscheidungsfreiraum der Fluggesellschaften ist dementsprechend größer als bei administrativen Maßnahmen. Zwar müssen sie ihre eigenen Zielsetzungen den Rahmenbedingungen anpassen, können aber ansonsten ihr Angebot frei gestalten. Lizenzlösungen genügen darüber hinaus dem Verursacherprinzip, sind also auch in dieser Hinsicht marktkonform.

Doch so einfach, schlüssig und überzeugend das theoretische Modell von Fluglärmkontingentierungen zunächst erscheint, so vielschichtig und komplex erweist sich nach genauer Analyse und Bewertung eine angemessene Ausgestaltung, die gleichermaßen sachgerecht, planungssicher und dennoch praktikabel ist.

Im Folgenden gilt es daher, widerstreitende Anforderungen zu identifizieren, gezielt Lösungsmöglichkeiten zu erarbeiten und konkrete Ausgestaltungsoptionen abzuleiten, die das immense Potenzial von Fluglärmkontingentierungen im Interesse eines dauerhaft entwicklungsfähigen und umweltgerechten Luftverkehrs bestmöglich verfügbar machen.

4.2 Zielgröße

Der Auswahl einer sachgerechten Zielgröße kommt im Streben nach einem fairen Ausgleich der divergierenden Interessenlagen eine herausragende Bedeutung zu. Ihre Akzeptanz ist notwendige Voraussetzung für den nachhaltigen Erfolg einer Fluglärmkontingentierung.

Eine ökologisch nicht tragfähige oder sozial unverträgliche Zielgröße wäre daher höchst kontraproduktiv. Vor diesem Hintergrund waren die Fluglärmwirkungen bereits in Kapitel 3.3 vorgehend als zentrale Zielgröße benannt worden. Die erforderliche Konkretisierung steht allerdings noch aus.

Außerdem entziehen sich Fluglärmwirkungen einer kontinuierlichen und flächen-deckenden Erfassung, sodass ihre direkte Kontingentierung ausscheidet. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3 detailliert erörterten Kausalkette Fluggeräuschemissionen – Fluggeräuschmissionen – Fluglärmwirkungen kommen jedoch die beiden verbleibenden Elemente als indirekte Zielgrößen infrage.

In einer kurzen Diskussion werden die wesentlichen Aussagen des Kapitels 4.2 noch einmal zusammengefasst.

4.2.1 Fluggeräuschemissionen

Eine fundierte Implementierung von Fluggeräuschemissionen als indirekte Zielgröße einer Fluglärmkontingentierung bedingt valide Emissionsdaten in einem Detaillierungsgrad, der die nachfolgende Anwendung eines Simulationsverfahrens mit sukzessiven Ausbreitungsrechnungen zulässt.

Hierzu sind umfangreiche Messungen im ruhenden Zustand des Flugzeugs erforderlich. In der Regel beschränken sich diese allerdings auf die Erfassung des zweidimensionalen statischen Abstrahlverhaltens der Triebwerke bei typischen Betriebszuständen. Abschattungseffekte werden damit ebenso wenig berücksichtigt wie das Abstrahlverhalten des gesamten Flugzeugs in verschiedenen Flugzuständen oder die zunehmend bedeutsameren Umströmungsgeräusche.

Aus den auf Referenzbedingungen normierten Standlaufcharakteristiken werden in der Folge Emissionsdaten für den dynamischen Flugzustand generiert. Flugeschwindigkeitseffekte gehen durch Anbringen entsprechender Korrekturfaktoren ein. Für die Integration von Umströmungsgeräuschen gibt es bis heute jedoch kein geeignetes mathematisches Modell.

Adäquate akustische Emissionsdaten sind, wie schon Kapitel 3.2 gezeigt hat, nur schwer zugänglich, sodass die Wahl von Fluggeräuschemissionen als indirekte Zielgröße einer Fluglärmkontingentierung insgesamt nicht empfehlenswert erscheint.

4.2.2 Fluggeräuschmissionen

Fluggeräuschmissionen können, auch über längere Zeiträume, mit den stationären Fluggeräuschmessstellen der Flughäfen nach § 19a Luftverkehrsgesetz (LuftVG) erfasst werden. Die kontinuierliche Messung und nachfolgende Auswertung ermöglicht Aussagen zu akustischen Kenngrößen einzelner Flugzeuge ebenso wie zur ortsbezogenen Fluglärmbelastung [43, 158].

Alternativ kommen geräuschspezifische Zulassungsmessungen nach ICAO Annex 16 als Dosismaß in Betracht. Zwar werden die geforderten Flugverfahren gelegentlich als nicht der operationellen Wirklichkeit entsprechend kritisiert, doch sind die Messwerte unter standardisierten Bedingungen ermittelt und international anerkannt [98, 196].

Für prognostische Flugbetriebsszenarien und flächige Betrachtungen sind Berechnungen unentbehrlich. Konventionelle Prognoseverfahren, wie die in Deutschland gesetzlich verankerte AzB, basieren auf vereinfachenden Annahmen, haben sich aber bei der Berechnung von Fluggeräuschmissionen infolge komplexer Flugbetriebsszenarien dennoch bewährt.

Messungen und Berechnungen erfolgen in der Regel für den Außenbereich. Zur Abschätzung der Geräuschpegel im Innenraum sind nach VDI 2719 für ein Fenster in Spaltlüftungsstellung näherungsweise $15 \text{ dB}(A)$ Dämpfung anzubringen. Dieser Zahlenwert ist nicht unumstritten, inzwischen aber weithin anerkannt. Ergänzende Aussagen zur Zulässigkeit seiner Verwendung in Alltagssituationen sind von der Auswertung der umfangreichen Fluggeräuschmessungen bei den DLR-Nachtfluglärmstudien zu erwarten [12, 17, 89, 154, 207].

Fluggeräuschmissionen bieten sich nach allem als indirekte Zielgröße einer Fluglärmkontingentierung an. Dabei kommen Ergebnisse sowohl von Fluggeräuschmessstellen und Zulassungsmessungen nach ICAO Annex 16 als auch von Berechnungen mit konventionellen Prognoseverfahren infrage. Notwendige Voraussetzung ist jedoch eine existierende Dosis-Wirkungs-Beziehung.

4.2.3 Fluglärmwirkungen

Fluglärmwirkungen sind als zentrale Zielgröße von Fluglärmkontingentierungen schon identifiziert. Im Interesse einer adäquaten Ausgestaltung ist allerdings noch zu entscheiden, welche Wirkungen konkret als limitierende Faktoren in Betracht gezogen werden sollen. Das Bundesverfassungsgericht hat vor gut 20 Jahren klargestellt, dass die Schutzwürdigkeit der Anwohner von Verkehrsflughäfen erheblich über den in Art. 2 Abs. 2 S. 1 Grundgesetz (GG) grundrechtlich verbürgten Schutz der körperlichen Unversehrtheit im engeren Sinne hinausgeht [30].

Eine ausschließliche Orientierung an dieser Zumutbarkeitsgrenze erscheint im Rahmen von Fluglärmkontingentierungen jedoch nicht angebracht. Vielmehr sind neben gesundheitlichen Gefahren auch Belästigungen und Beeinträchtigungen in Betracht zu ziehen. In Kapitel 3.3 wurden im Zusammenhang mit der Vorstellung der wesentlichen Determinanten von Fluglärmkontingentierungen ausführlich somatische und psychosoziale Fluglärmwirkungen erörtert, sodass hier eine ergebnisorientierte Zusammenfassung genügen kann.

Belästigung und Schlafstörungen sind nach dem derzeitigen Stand der wissenschaftlichen Forschung die bedeutendsten Fluglärmwirkungen. Belästigung ist eine Beeinträchtigung des Erlebens und Verhaltens, die weite Teile der Bevölkerung betrifft. Schlaf ist ein essenzieller Erholungsprozess, dessen lärmbedingte Störung von den Betroffenen als besonders gravierend empfunden wird.

Die Fähigkeit der Kommunikation ist ein wichtiges Element der geistig-sozialen Entwicklung eines Menschen. Ihre Störung zählt zu den häufigsten Primärwirkungen, geht aber auch mitentscheidend in die Belästigung ein. Leistungs- und Lernstörungen werden vor allem bei Kindern vermutet. Bei Erwachsenen sind die vorliegenden Ergebnisse widersprüchlich.

Auch nach langjähriger Lärmbelastung ist nicht von monokausal durch Fluglärm verursachten chronischen Gesundheitsstörungen auszugehen. Über einen potenziellen Beitrag einer permanent hohen Lärmbelastung zur multifaktoriellen Genese von kardiovaskulären Erkrankungen wird gegenwärtig diskutiert.

Insgesamt erscheinen sowohl Belästigung als auch Schlafstörungen sehr gut geeignet, um über ihre Integration in eine Fluglärmkontingentierung zur gewünschten Balance beizutragen.

4.2.4 Diskussion

Bei der Festlegung der Zielgröße einer Fluglärmkontingentierung stehen naturgemäß ökologische und soziale Interessen im Vordergrund. Ihre angemessene Abbildung in der Zielgröße ist Basis der weiteren Ausgestaltung. Die ausgewählten Fluglärmwirkungen, Belästigung und Schlafstörungen, werden diesem Anspruch in besonderer Weise gerecht. Welche der beiden Wirkungen für eine Kontingentierung in Betracht kommt, hängt vom konkreten Anwendungsfall ab.

Quantitative Obergrenzen der Zielgrößen werden im nachfolgenden Kapitel 4.3 erörtert. Da sich sowohl Belästigung als auch Schlafstörungen einer kontinuierlichen und flächendeckenden Erfassung entziehen, ist ihre indirekte Kontingentierung über Fluggeräuschmissionen notwendig. Die Zielwerte sind deshalb in geeigneter Form als akustische Kenngröße auszuweisen.

4.3 Zielwert

Der Zielwert einer Fluglärmkontingentierung hängt entscheidend vom Umweltqualitätsniveau ab, das erreicht werden soll. Der umweltökonomischen Theorie zufolge ist der Zielwert so zu wählen, dass die durch Fluglärm hervorgerufenen sozialen Grenzkosten gleich den Grenzkosten der Lärmreduzierung sind. Die hierfür erforderlichen Kosteninformationen sind jedoch kaum verfügbar und lassen die exakte Bestimmung des Optimums äußerst schwierig erscheinen [56, 190].

Eine pragmatische Annäherung an dieses Optimum kann über eine Orientierung an Fluglärmwirkungen erfolgen. Da weitere Handlungsfelder unmittelbar davon beeinflusst werden, ist bereits im Vorfeld zu entscheiden, ob mit einer Fluglärmkontingentierung der Schutz der Flughafenanwohner vor gravierenden gesundheitlichen Beeinträchtigungen sichergestellt werden soll, oder ob ein Belastungsniveau angestrebt wird, das präventiv wirksam wird.

Dosis-Wirkungs-Beziehungen im biologischen Bereich haben häufig einen S-förmigen Verlauf, aus dem ein Zielwert für die genannten Anforderungen nicht unmittelbar ableitbar ist. Seine Festlegung ist mithin ein abwägender politisch-administrativer Akt auf Basis der Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung.

Nach der Erörterung der Zielwerte beschließt eine kurze Diskussion das Kapitel.

4.3.1 Schutzkonzept

Der von GRIEFAHN ET AL. in ihrer Synopse zu Fluglärmwirkungen verfolgte Ansatz, eine Hierarchie von Eckwerten aufzustellen, die entsprechend dem aktuellen Stand der Lärmwirkungsforschung sachgerecht differenziert, erscheint vielversprechend. Demnach ist eine Belastungszunahme ausgehend von Schwellenwerten über präventive Richtwerte bis zu kritischen Toleranzwerten zu verzeichnen [78].

Schwellenwerte stellen ein unter dem Minimierungsgebot langfristig anzustrebendes Ziel dar. Präventive Richtwerte sind Vorsorgewerte, bei denen Gesundheitsgefährdungen noch nicht zu erwarten sind. Mit Beeinträchtigungen und Störungen, insbesondere sensibler Gruppen, ist aber zu rechnen. Bei Überschreiten der kritischen Toleranzwerte sind Gesundheitsgefährdungen oder -beeinträchtigungen nicht mehr auszuschließen [78].

Die garantierte Einhaltung der kritischen Toleranzwerte wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Schutzkonzept verfolgt. Für die beiden identifizierten Zielgrößen werden auf Basis der ausführlichen Analysen und Bewertungen in Kapitel 3.3 nachfolgend orientierende Zielwerte angegeben, die im Wesentlichen den derzeitigen internationalen Wissensstand reflektieren.

Für Belästigung wird unter Berücksichtigung der in der Literatur als Obergrenze diskutierten epidemiologischen Erheblichkeit von 28 % hoch belästigter Personen ein Day Night Level von $L_{DN} = 65 \text{ dB}$ nach MIEDEMA vorgeschlagen. Für Schlafstörungen wird in Übereinstimmung mit GRIEFAHN ET AL. nachtbezogen eine maximale Überschreitungshäufigkeit von $6 \times 60 \text{ dB}(A)$ am Ohr des Schläfers für gerade noch tolerabel erachtet [77, 78, 87, 144].

4.3.2 Präventivkonzept

Im Interesse eines präventiven Gesundheitsschutzes und der nachhaltigen Sicherung der Akzeptanz ist es geboten, auch eine Zielwertfestlegung in Betracht zu ziehen, die bei einem niedrigeren Belastungsniveau als dem Schutz vor gravierenden gesundheitlichen Beeinträchtigungen ansetzt [30, 31, 36].

Die hierfür in Kapitel 3.3 abgeleiteten Richtwerte liegen deutlich unterhalb der oben beschriebenen kritischen Toleranzwerte und genügen auch im internationalen Vergleich den an ein Präventivkonzept zu stellenden Anforderungen.

Als Ziel für die Belästigung wird im Einklang mit GOTTLOB ET AL. bei einem Anteil von 22 % hoch belästigter Personen in der Bevölkerung ein Day Night Level von $L_{DN} = 62 \text{ dB}$ nach MIEDEMA benannt. Für Schlafstörungen wird entsprechend GRIEFAHN ET AL. nachtbezogen eine maximale Überschreitungshäufigkeit von $13 \times 53 \text{ dB}(A)$ am Ohr des Schläfers für akzeptabel gehalten [72, 78].

4.3.3 Diskussion

Die Festlegung einer quantitativen Obergrenze für eine Fluglärmkontingentierung in Form eines Zielwertes ist – insbesondere ohne konkreten Anwendungsbezug – kein triviales Unterfangen. Die vorgeschlagenen Werte können deshalb allenfalls eine erste Orientierungshilfe in einem angemessenen und sachgerechten Abwägungsprozess geben.

Fehlende Standardisierungen, eine Vielzahl akustischer Basisgrößen und eine gelegentlich mangelnde methodische und statistische Qualitätssicherung erschweren die direkte Vergleichbarkeit von Studien unterschiedlicher Autoren. Darüber hinaus kann wegen des S-förmigen Verlaufs aus den Dosis-Wirkungs-Beziehungen ein Zielwert nicht unmittelbar bestimmt werden.

Schließlich bleibt abzuwarten, inwieweit die noch ausstehenden Erkenntnisse aktueller Forschungsarbeiten – beispielsweise der DLR-Studien zu nächtlichen Fluglärmwirkungen – in den nächsten Jahren zur Klärung derzeit noch offener oder wenig fundierter Sachverhalte beitragen.

4.4 Zielbezug

Zielgröße und Zielwert sind zweifelsohne sehr wichtige Ausgestaltungselemente von Fluglärmkontingentierungen. Denn ihre eindeutige Festlegung definiert das einzuhaltende Umweltqualitätsniveau. Ohne konkreten Zielbezug fehlt allerdings der für eine Überwachung der Lärmkontingentierung erforderliche Vergleichsmaßstab.

Im Folgenden werden daher Möglichkeiten erörtert, diesen Vergleichsmaßstab auf retrospektiver oder prospektiver Basis herzustellen. In Betracht kommen ein tatsächliches oder ein modifiziertes Bezugsjahr in der Vergangenheit, ein Bezugsjahr mit einem bestimmten Prognosehorizont oder der Endausbauzustand.

Die vorgestellten Varianten werden abschließend im Hinblick auf ihre Eignung für die Ausgestaltung von Fluglärmkontingentierungen diskutiert.

4.4.1 Bezugsjahr

Der Bezug auf eine tatsächliche Vorbelastung ist der wohl nahe liegendste Vergleichsmaßstab. Ein retrospektives Bezugsjahr eignet sich allerdings nur für einen existierenden und weitgehend unverändert fortbestehenden Flughafen. Bei der Neuanlage eines Flughafens, der Änderung oder der Erweiterung einer bereits vorhandenen Flughafeninfrastruktur sowie der Ausweitung des Flugbetriebs über bestehende Betriebsbeschränkungen hinaus ist ein anderer Zielbezug vorzuziehen.

Für die künftigen Randbedingungen einer Fluglärmkontingentierung ist die Auswahl eines geeigneten Bezugsjahres von hoher Bedeutung. Dementsprechend große Sorgfalt ist bei der Auswahl anzuwenden. Vor allem ist auf eine charakteristische Repräsentativität und die angemessene Kennzeichnung der Belastungssituation in der Flughafenumgebung zu achten [153].

Diese Bedingungen setzen ein möglichst aktuelles Bezugsjahr voraus, für das alle relevanten Daten bezüglich der Aufteilung der Flugbewegungen nach Flugzeugtyp, An- oder Abflugstrecke und Tageszeit umfassend dokumentiert sind. Darüber hinaus ist eine Betriebsrichtungs- und Verkehrsverteilung einzufordern, die frei von wesentlichen Sondereinflüssen weitgehend dem langjährigen Durchschnitt entspricht.

Von Belang sind auch die Auswertungsergebnisse der Fluggeräuschmessstellen. Im Idealfall liegen sie korreliert mit den radargestützten Flugsपुरaufzeichnungen der einzelnen Flugereignisse vor. Besonderes Augenmerk ist ihnen zu widmen, wenn sie aktiv in einer Fluglärmkontingentierung berücksichtigt werden sollen. Kapitel 4.8 geht ausführlich auf dieses Thema ein.

4.4.2 Modifiziertes Bezugsjahr

Gezielt modifizierte Daten eines Bezugsjahres kommen unter bestimmten Voraussetzungen als Alternative zur direkten Verwendung eines tatsächlichen Bezugsjahres infrage. Insbesondere bietet sich ihre Berücksichtigung an, wenn der Vergleichsmaßstab eng an eine reale Belastungssituation angelehnt sein soll, ohne sie jedoch unmittelbar zu übernehmen.

Hier ist vor allem an den unerwünschten Einfluss des Wetters auf die Einhaltung von Zielwerten zu denken. Denn die Betriebsrichtung eines Flughafens ist primär von der Windrichtung abhängig. Am Flughafen Amsterdam werden deshalb seit Februar 2003 die Zielwerte prophylaktisch mit einem Zuschlag versehen, um die überjährigen Schwankungen auszugleichen [45, 147]. Von lärmmedizinischer Seite wird demgegenüber eine mehrjährige Mittelung der Flugbewegungen in der jeweiligen Betriebsrichtung vorgeschlagen [78, 79].

Bei einer geringfügigen Änderung oder Erweiterung der Bahn- oder Routenstruktur an einem bestehenden Flughafen kann die Auswahl eines modifizierten Bezugsjahres ebenfalls angeraten sein. Gleiches trifft auf die beabsichtigte Korrektur nichtpermanenter Sondereinflüsse, wie beispielsweise kurzzeitige Bahnreparaturen, zu. Im Rahmen einer Flugbetriebsprognose ist die veränderte Verkehrsverteilung auf das Start- und Landebahnsystem sowie die An- und Abflugstrecken entsprechend zu berücksichtigen.

Vorstellbar ist die Entscheidung für ein modifiziertes Bezugsjahr aber auch, um auf der Basis eines wirklichkeitsgetreuen Flugbetriebs ein valides abgesenktes Szenario zu entwickeln. So ist etwa bei der Genehmigung der Lärmkontingentierung für den nächtlichen Flugverkehr am Flughafen Frankfurt in 2001 das Vergleichsniveau vom gewählten Bezugsjahr ausgehend proportional um 5 % gekürzt worden [93].

4.4.3 Prognosejahr

Der Bezug auf ein Prognosejahr ist bei der Neuanlage eines Flughafens oder umfangreicheren Erweiterungen einer vorhandenen Flughafeninfrastruktur geboten. Doch auch die beabsichtigte Ausweitung eines bislang, beispielsweise in Form bewegungsbegrenzender Nachtflugbeschränkungen, eingeschränkten Flugbetriebs auf einem existierenden Flughafen kommt in der Regel nicht ohne einen prognostischen Vergleichsmaßstab aus.

Dies bedingt für einen konkreten Zeithorizont zunächst die Ermittlung eines voraussichtlichen Bedarfs an Luftverkehrsleistungen. Dabei stellt sich die Schwierigkeit, aus verfügbaren Vergangenheitsdaten einen langfristigen Trend zu erkennen,

zu erklären und durch die Wahl eines geeigneten Prognoseansatzes für den betreffenden Zeitraum möglichst genau abzuschätzen [215].

Aus der Bedarfsprognose wird dann in einem weiteren Verfahrensschritt die Verkehrs- beziehungsweise Flugbetriebsprognose abgeleitet. Hierzu werden die jeweiligen Bedarfe in einzelne Flugbewegungen überführt und entsprechend ihrer Herkunfts- oder Zielgebiete unter Berücksichtigung betrieblicher, flugsicherungs- technischer und meteorologischer Aspekte auf die An- und Abflugstrecken des Flughafens verteilt.

Für Neubauprojekte gestaltet sich eine Voraussage deutlich problematischer, weil keine Vergangenheitsdaten vorliegen, die Rückschlüsse auf Regelmäßigkeiten erlauben würden. Alle Bedarfsprognosen sind darüber hinaus in hohem Maß von übergeordneten wirtschaftlichen und konjunkturellen Bestimmungsgrößen, wie etwa dem Bruttosozialprodukt, abhängig. Sie sind deshalb nur für einen überschaubaren zeitlichen Rahmen von 3 bis 5 Jahren hinreichend abgesichert. Für längerfristige Entwicklungen werden wegen der zunehmenden Prognoseungenauigkeit nur noch Bandbreiten angegeben [16, 215].

Wie der Flughafen Amsterdam bei dem Ende 2002 abgeschlossenen Genehmigungsverfahren für eine weitere Start- und Landebahn hat auch der Flughafen München in 2001 bei der Bedarfsermittlung im Rahmen der Änderungsgenehmigung für eine neue Nachtflugregelung auf das Prognosejahr 2010 abgestellt. Diese Vorgehensweise ist nach einem Urteil des Bayerischen Verwaltungsgerichtshofs vom Dezember 2002 bei angemessener Würdigung der Umstände nicht zu beanstanden [14, 147, 175].

4.4.4 Endausbau

Als Vergleichsmaßstab kann auch der für den Endausbau erwartete Belastungszustand infrage kommen. Hinsichtlich der hierfür erforderlichen Bedarfs- und Verkehrsprognose gelten die obigen Ausführungen analog. Der üblicherweise nur sehr grob fixierte, langfristige Zeithorizont mindert indes zusätzlich ihren Aussagewert.

Unter Berücksichtigung der stürmischen Entwicklung in der Vergangenheit kann zudem davon ausgegangen werden, dass innovative Technologien und Verfahren in der boden- wie bordseitigen Luftverkehrsführung zukünftig eine höhere Auslastung des Bahn- und Routensystems eines Verkehrsflughafens erlauben werden, als derzeit absehbar ist.

Die verfügbare luftseitige Kapazität eines Flughafens im Endausbauzustand ist also keine statische, sondern vielmehr eine dynamische Größe, die dem techni-

schen Fortschritt entsprechend regelmäßig angepasst werden müsste. Als statische Bezugsgröße im Rahmen einer Fluglärmkontingentierung erscheint der Endausbauzustand deshalb ungeeignet.

Ein weiterer Aspekt spricht ebenfalls gegen einen Zielbezug Endausbau. Die mit diesem Status einhergehende infrastrukturelle Auslastung des Flughafens ist per definitionem maximal. Eine aktiv eingesetzte Fluglärmkontingentierung würde also ins Leere laufen, da die tatsächliche Belastung die festgelegte Limitierung niemals überschreiten könnte.

Allenfalls vorstellbar ist daher eine einmalige Überprüfung der im Endausbau zu erwartenden Lärmbelastung auf ihre Kompatibilität mit dem gewünschten Umweltqualitätsniveau. Dieses Vorgehen mag für Zwecke der Siedlungsplanung angeraten sein, ist hier jedoch nicht zielführend.

4.4.5 Diskussion

Im resümierenden Vergleich erweist sich lediglich der Endausbauzustand als ungeeignet für einen Zielbezug bei der Ausgestaltung von Fluglärmkontingentierungen. Demgegenüber hat das Bezugsjahr sowohl in seiner retrospektiven und modifizierten als auch in seiner prospektiven Variante klar umrissene, komplementäre Verwendungsgebiete.

Allerdings gibt es für die Kompensation des Wittereinflusses und die ausgleichenden Korrekturen nach kleineren oder nichtpermanenten Änderungen in der Verkehrsverteilung auch Alternativen zu einem modifizierten Bezugsjahr. Die Kapitel 4.5 und 4.7, die sich unter anderen Gesichtspunkten ebenfalls mit diesen Themen beschäftigen, zeigen sie auf.

Die Bedeutung des Vergleichsmaßstabs für die künftigen Randbedingungen einer Fluglärmkontingentierung ist eminent. Deshalb ist die Auswahl eines sachgerechten und planungssicheren Zielbezugs mit besonderer Sorgfalt durchzuführen. Dies gilt gleichermaßen für die an ein Bezugsjahr zu stellenden Anforderungen hinsichtlich Repräsentativität und Belastungskennzeichnung wie für die Prüfung der fachlichen Qualität und Schlüssigkeit einer Bedarfs- oder Verkehrsprognose.

Bei der notwendigen Abwägungsentscheidung sind im Wesentlichen der nachgewiesene Bedarf an Luftverkehrsleistungen, der Widmungszweck und die Bedeutung des Flughafens als Wirtschaftsfaktor, die öffentlichen Verkehrsinteressen und die Belange der Bevölkerung zu berücksichtigen. Dem in § 6 Abs. 2 S. 1 LuftVG verankerten angemessenen Schutz vor Fluglärm ist dabei ein hoher Stellenwert beizumessen [92, 153, 175].

4.5 Limitierungstyp

Für das Umweltqualitätsniveau und den Vergleichsmaßstab wurden bereits Handlungsoptionen aufgezeigt. Zu klären ist nun, wie die derart festgelegte Lärmbelastung begrenzt werden soll. Infrage kommt die Kontingentierung an besonders lärmsensitiven oder strategisch relevanten Punkten, der Formgebung oder der Ausdehnung von Belastungsgebieten sowie des integralen Lärmvolumens.

Die in diesem Zusammenhang diskutierten Limitierungstypen Punktkontingentierung, Konturkontingentierung, Flächenkontingentierung und Volumenkontingentierung zeichnen sich jeweils durch spezifische Vor- und Nachteile aus, die in den folgenden Kapiteln 4.5.1 bis 4.5.4 herausgearbeitet werden.

Unter Berücksichtigung der potenziellen Zielgrößen werden die vorgestellten Varianten abschließend einem kritischen Vergleich unterzogen.

4.5.1 Punktkontingentierung

Als Punktkontingentierung wird die Limitierung der Zielgröße auf den gewünschten Zielwert an einem oder mehreren definierten Punkten in der Umgebung eines Flughafens bezeichnet. Abbildung 4.2 zeigt prinzipielle Möglichkeiten einer Punktkontingentierung am Beispiel des Hybrid-Flughafens Parport auf.

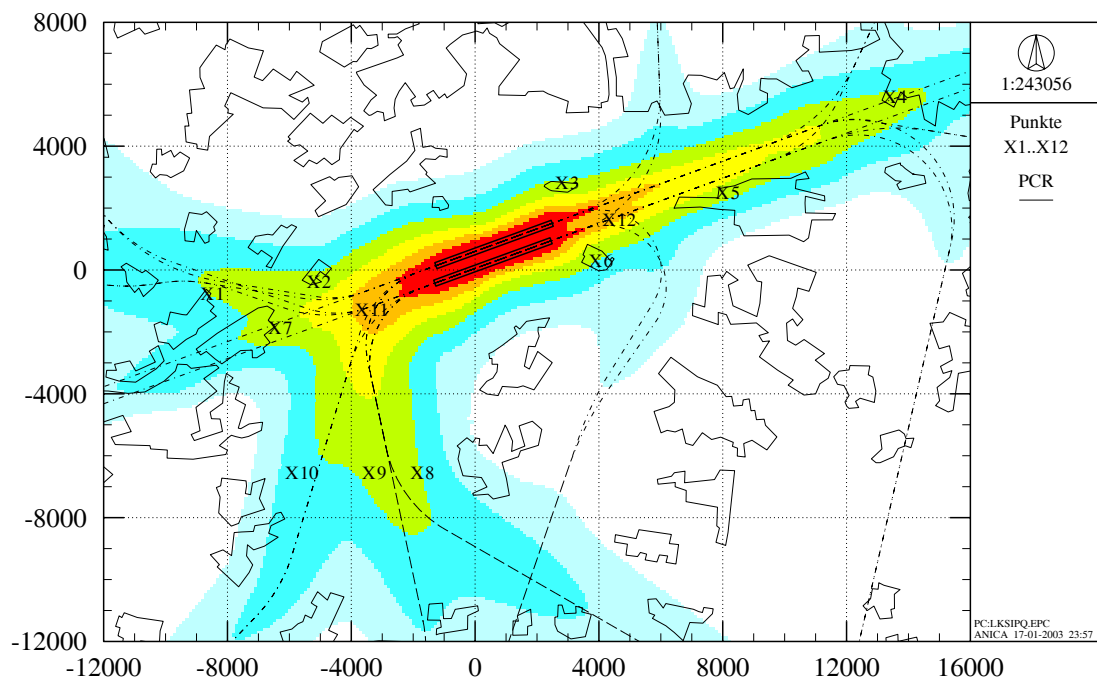


Abb. 4.2: Prinzip einer Punktkontingentierung am Hybrid-Flughafen Parport

In Betracht kommen im Wesentlichen drei unterschiedliche Ansätze. Zunächst ist die direkte Kontingentierung an besonders lärmsensitiven Orten zu erwägen, wie sie hier mit den Punkten 1 bis 7 symbolisiert werden. Durch die Sicherstellung der Einhaltung der Soll-Flugstrecken kann die Lärmbelastung jedoch auch indirekt minimiert werden. Die Punkte 8 bis 10 bilden hierzu akustische Tore für die bei Westbetrieb nach Süden abgehenden Routen.

Schließlich ist eine Kontingentierung an strategisch relevanten Punkten vorstellbar, die nicht notwendigerweise einen unmittelbaren Bezug zur Flughafenumgebung haben. Wegen ihrer herausgehobenen Bedeutung sind insbesondere die Messpunkte für die Zulassung nach ICAO Annex 16 zu nennen. Die Punkte 11 und 12 kennzeichnen exemplarisch den Überflug von Startbahn 25L und den Anflug auf Landebahn 25L.

Darüber hinaus kann bei Einbahn- oder abhängigen Parallelbahnsystemen, wie etwa dem Flughafen Parport, eine Punktkontingentierung realisiert werden, die in ihrer Grundidee der weiter unten diskutierten Volumenkontingentierung nahe kommt. Durch jeweils einen Punkt auf jeder Seite des Bahnsystems können bei geeigneter Anordnung alle Flugbewegungen erfasst werden.

Unter der groben Annahme einer annähernd konstanten prozentualen Verteilung der Flugbewegungen auf die An- und Abflugrouten der Ost- und Westseite eines Flughafens ist auf diese Art und Weise ein relativer Vergleichsmaßstab für das Lärmklima im Umfeld des Flughafens gegeben. Konkrete Aussagen über die absolute Lärmbelastung an bestimmten Punkten sind hiermit jedoch nicht möglich, sodass auf die Integration in ein Schutzkonzept verzichtet werden sollte.

Abgesehen von dieser speziellen Anwendung eignen sich Punktkontingentierungen primär zur unmittelbaren Absicherung einer geringen Anzahl lärmsensibler Gebiete. Für einen umfangreicheren oder gar flächendeckenden Einsatz kommen sie nur unter Verzicht auf die marktwirtschaftlichen Vergabeoptionen infrage, wie die Kapitel 4.9 und 4.11 im weiteren Verlauf der Arbeit zeigen werden.

Bei sachgerechter Auswahl der Punkte entspricht dieser Limitierungstyp der Kontingentierungs-idee des Ausgleichs divergierender Interessen sehr weitgehend. Denn bei gleichzeitiger Absicherung der Bevölkerung wird in den Luftverkehr geringstmöglich eingegriffen, da außerhalb der kontingentierten Gebiete eine nahezu unbeschränkte Entwicklung möglich ist.

Durch entsprechende Planung ist schon im Vorfeld darauf zu achten, dass ein potenzieller Lärmexport in andere sensible Gebiete verhindert wird. Grundsätzlich erschweren ein zunehmender Komplexitätsgrad des Bahn- und Routensystems und eine an vielen deutschen Verkehrsflughäfen bis an den Flughafen heranreichende Wohnbebauung die Ausgestaltung von Punktkontingentierungen.

4.5.2 Konturkontingentierung

Bei einer Konturkontingentierung werden zunächst Punkte in der Flughafenumgebung ermittelt, an denen der Zielwert für eine konkrete Zielgröße erreicht wird. Die Verbindungslinie dieser Punkte umschließt ein Gebiet, innerhalb dessen der Zielwert erreicht oder überschritten wird. Die so definierte Kontur darf als begrenzender Faktor an keiner Stelle durchbrochen werden.

Abbildung 4.3 verdeutlicht das Prinzip einer Konturkontingentierung am Flughafen Parport. Die Ist-Kontur liegt komplett innerhalb der durch die limitierende Kontur gesetzten Grenze. Die Kontingentierungsbedingung wird eingehalten.

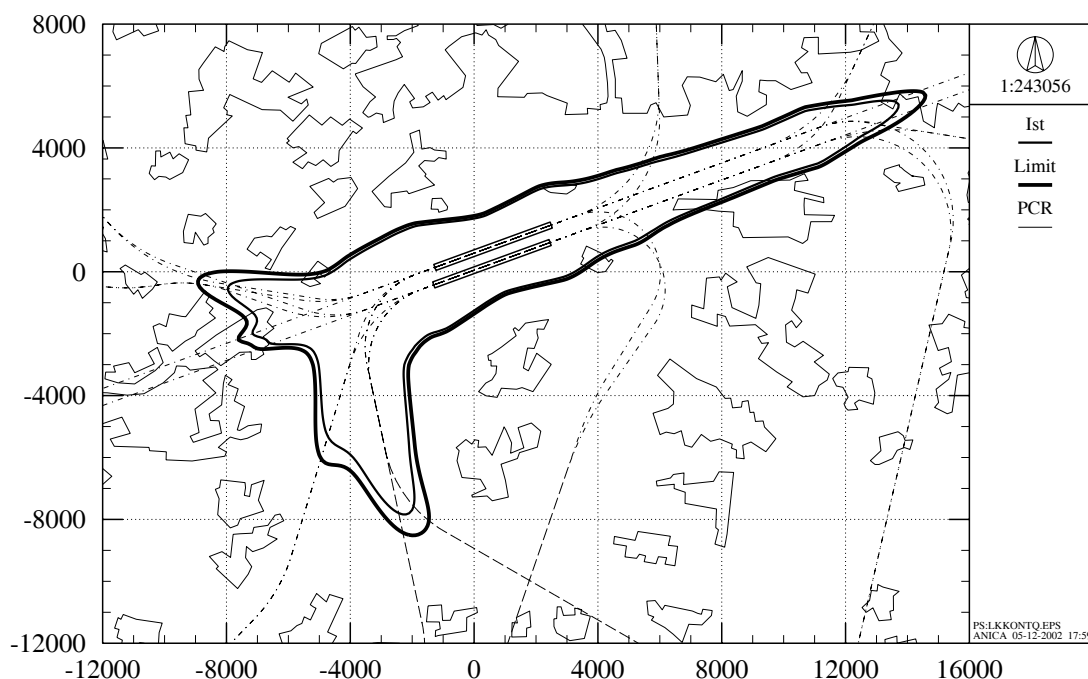


Abb. 4.3: Prinzip einer Konturkontingentierung am Hybrid-Flughafen Parport

Änderungen in der Betriebsrichtungs- und Routenverteilung oder der Verkehrszusammensetzung schlagen sich unmittelbar im Konturverlauf nieder. Dies gilt gleichermaßen für die seitliche Abweichung der Flugzeuge von der Soll-Flugstrecke. Es ist davon auszugehen, dass zukünftige Flight Management Systeme (FMS) unter weiter fortschreitender Integration der Satellitennavigation zu einer erheblichen Reduzierung der Korridorbreiten beitragen werden.

Die Auswirkungen einer solchen Verkehrsbündelung auf die Konturform in größerem Abstand vom Flughafen Parport zeigt Abbildung 4.4 anhand einer vergleichenden Darstellung für das Szenario Standard. Trotz überwiegend positiver Effekte der Flugbewegungskonzentration auf das Lärmklima in der gesamten besiedelten Umgebung scheidet eine Konturkontingentierung.

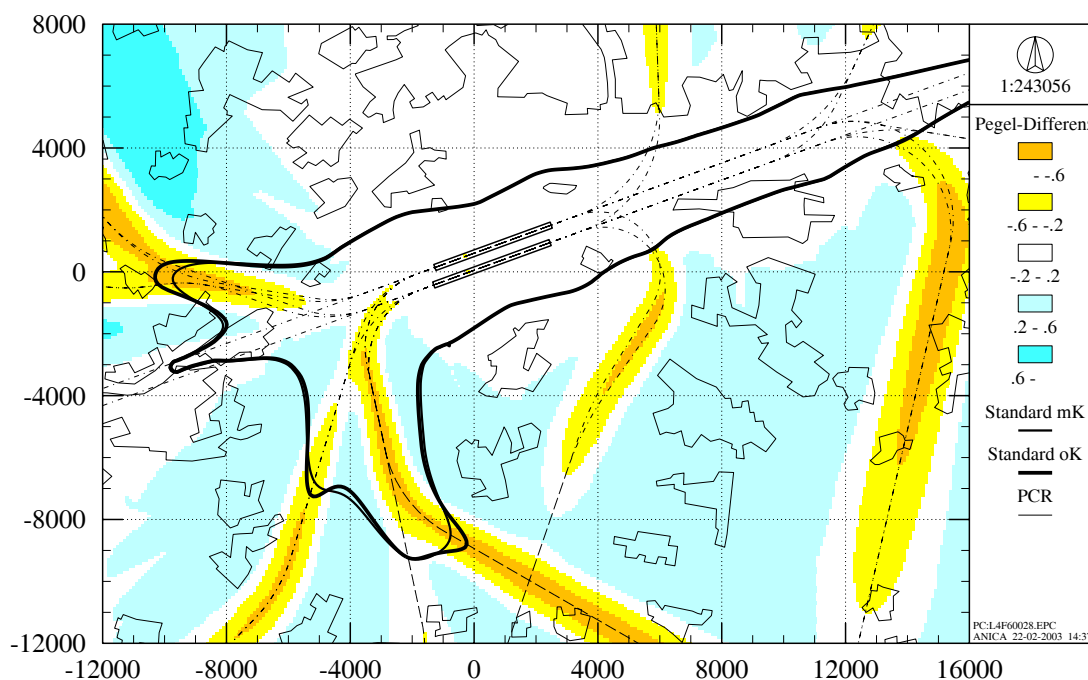


Abb. 4.4: Flugbetriebsszenario Standard mit Korridoren und ohne Korridore, $L_{eq(4)}$ -Pegel-Differenz, $L_{eq(4)} = 55 \text{ dB}$

Die Ausgestaltungsoptionen vor allem im Rahmen des Zielbezugs, der Bemessungssituation und der Bemessungsmethodik bieten hinreichend viele Ansätze, die beschriebene Sensitivität weitgehend auszugleichen. Andererseits ist gerade diese vermeintliche Schwäche von Konturkontingentierungen ihre charakteristische Stärke. Denn nur bei Konturkontingentierungen ist die großräumige Einhaltung des Zielwertes auf der gesamten limitierenden Kontur gesichert.

4.5.3 Flächenkontingentierung

In Analogie zur Konturkontingentierung werden bei der Flächenkontingentierung zunächst Punkte in der Flughafenumgebung ermittelt, an denen der Zielwert für eine gewünschte Zielgröße erreicht wird. Die Verbindungslinie dieser Punkte umschließt eine Fläche, innerhalb derer der Zielwert erreicht oder überschritten wird. Der Inhalt der Fläche stellt als Maß für die Ausdehnung der Lärmbelastung schließlich das Limit dar.

Abbildung 4.5 demonstriert das Prinzip einer Flächenkontingentierung am Flughafen Parport. Die limitierende Kontur wird von der Ist-Kontur in Richtung Südwesten durchdrungen. Eine Konturkontingentierung misslingt also. Die von der Ist-Kontur umschlossene Fläche ist jedoch kleiner als der Flächeninhalt der limitierenden Kontur. Die Flächenkontingentierung wird deshalb eingehalten.

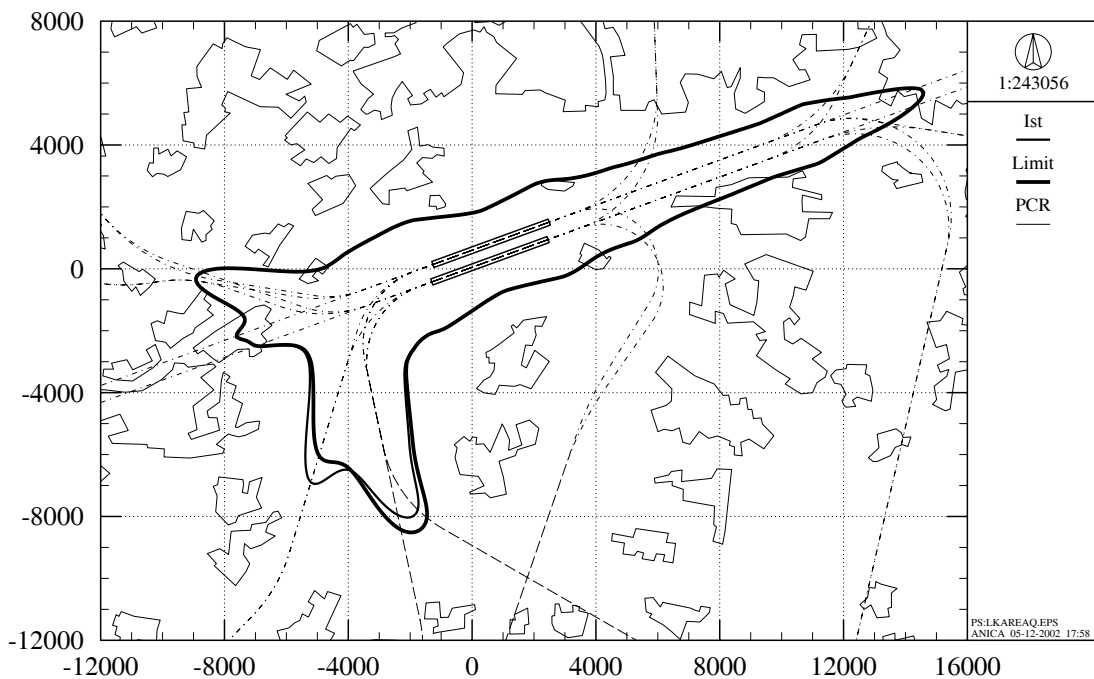


Abb. 4.5: Prinzip einer Flächenkontingentierung am Hybrid-Flughafen Parport

Eine lokale Zunahme der Lärmbelastung kann ebenso wie bei Konturkontingentierungen zu einer Nichteinhaltung der Kontingentierungskriterien für vom Zielwert abweichende Werte führen. Abbildung 4.6 zeigt ein Beispiel für die Einhaltung der Flächenkontingentierung beim inneren Konturenpaar, während sie beim äußeren Konturenpaar verletzt wird. Die Ist-Kontur umschließt hier eine etwa 2 km^2 größere Fläche als die limitierende Kontur.

Flächenkontingentierungen reagieren wie auch Konturkontingentierungen höchst sensibel. So führt die Reduktion des maximalen Schallpegels aller Flugzeuge um $1 \text{ dB}(A)$ nach einer von MÜLLER ET AL. schon in 1975 erkannten Gesetzmäßigkeit zu einer Verkleinerung der umschlossenen Fläche um rund 20%. Die Fläche kann damit als spezielle Form einer neuen Kenngröße angesehen werden, die extrem empfindlich gegenüber Änderungen des Basismaßes ist [150].

Andererseits bietet eine Flächenkontingentierung gewisse Freiheiten bei der Verteilung des Flugverkehrs auf die An- und Abflugrouten. Die oben beschriebenen Probleme von Konturkontingentierungen bei einer exakteren Einhaltung der Soll-Flugstrecken infolge technischer Weiterentwicklungen treten hier nicht auf. Gegenüber dem Einfluss des Wetters auf die Konturausdehnung ist eine Flächenkontingentierung ebenfalls toleranter.

Diesen Vorteilen steht ein gravierender Nachteil gegenüber. Soll ein Schutzkonzept, das passiven Schallschutz durch bauliche Maßnahmen erfordert, mit einer Flächenkontingentierung umgesetzt werden, sind gegebenenfalls neu belastete Ge-

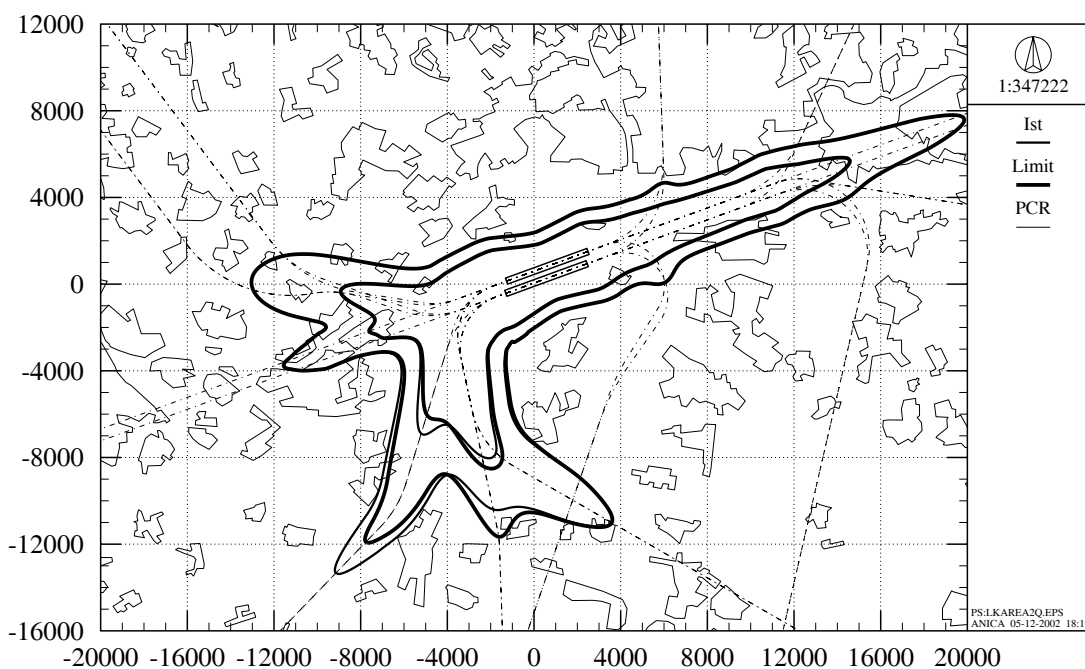


Abb. 4.6: Prinzip der Zielwertorientierung bei einer Flächenkontingentierung am Hybrid-Flughafen Parport

biete jedes Mal zusätzlich mit Schallschutz auszustatten. Bei einem Präventivkonzept stellt sich das Problem wegen des erheblich geringeren Belastungsniveaus in dieser Form nicht. Allerdings kann sich auch hier die fehlende Absicherung des Einzelnen negativ auf die Akzeptanz der Maßnahme auswirken.

4.5.4 Volumenkontingentierung

Weitere Varianten einer Limitierung lassen sich unter der Bezeichnung Volumenkontingentierung zusammenfassen. Dabei handelt es sich um sehr unterschiedliche Ansätze, denen jedoch gemein ist, dass sie versuchen, die Lärmbelastungssituation durch den Luftverkehr in der Umgebung eines Flughafens durch einen einzigen Zahlenwert mit integralem Charakter zu beschreiben.

Der Lärm-Einwohner-Gleichwert erweitert das Prinzip der Flächenkontingentierung. Bei bekannter Dosis-Wirkungs-Beziehung für die relevante Zielgröße kann über Korrelation mit der Besiedlungsstruktur die Personenzahl errechnet werden, die mit einer den Zielwert übersteigenden Lärmbelastung beaufschlagt ist.

So ergibt sich beispielsweise für das in Abbildung 4.7 wiedergegebene Standard-Szenario unter Nutzung der von MIEDEMA vorgeschlagenen Dosis-Wirkungs-Beziehung eine Gesamtanzahl von rund 6000 Einwohnern, die innerhalb der Kontur $L_{DN} = 55 \text{ dB}$ hoch belästigt sind.

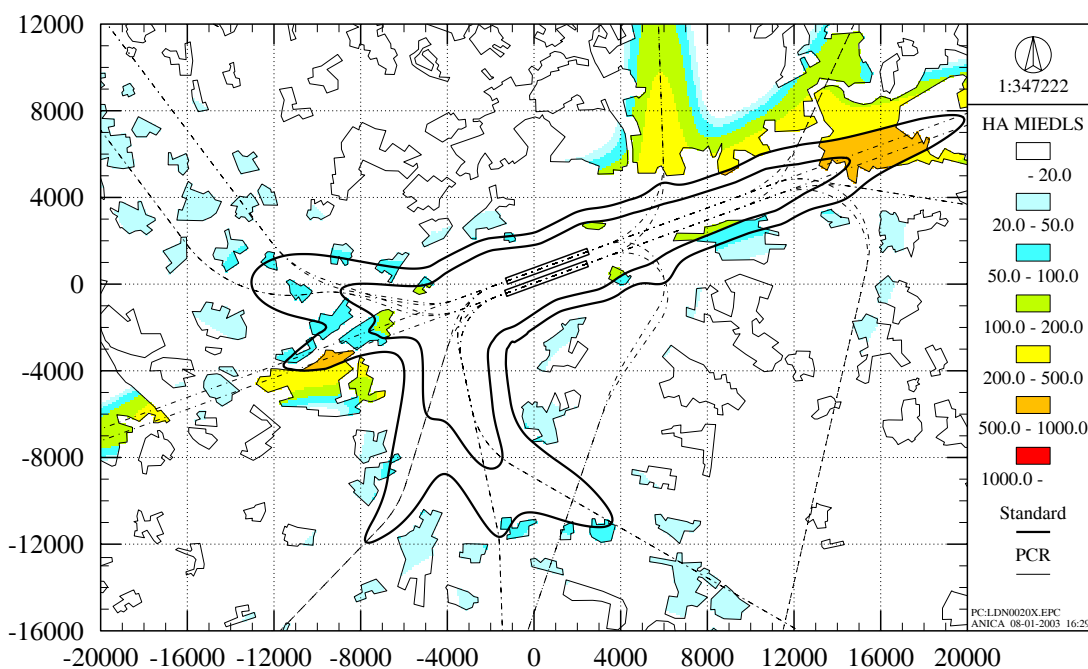


Abb. 4.7: Flugbetriebsszenario Standard, Anzahl hoch belastigter Einwohner pro Quadratkilometer nach MIEDEMA, $L_{DN} = 55 \text{ dB}, 60 \text{ dB}$

Als Modifikation des Lärm-Einwohner-Gleichwerts ist eine Bilanzierung für ein beliebig umrissenes Gebiet denkbar. Bei obigem Szenario sind im dargestellten Bildausschnitt insgesamt etwa 19000 Einwohner hoch belastigt, entsprechend knapp 3,7% der Bevölkerung. Der Großteil der Belästigung entsteht hier bei relativ niedrigen Dauerschallpegeln. Durch geschickte Wahl der eingehenden Gebiete ist das Ergebnis von Bilanzierungen allerdings leicht beeinflussbar.

Eine gänzlich andere Klasse von Volumenkontingentierungen basiert auf realen oder virtuellen Referenzpunkten, an denen akustische Kenngrößen, wie beispielsweise maximale Schallpegel oder Einzelereignispegel, für jede relevante Flugbewegung bestimmt werden. Je nach Modell kommen hierbei Messergebnisse, ICAO-Zulassungswerte oder Prognoseverfahren zum Einsatz. Diese punktbezogenen Kenngrößen werden anschließend mit mehr oder weniger aufwändigen Rechenverfahren zu einem Einzahl-Wert verdichtet.

Abbildung 4.8 zeigt exemplarisch das Prinzip einer Volumenkontingentierung über virtuelle Referenzpunkte am Flughafen Parport. Unabhängig von der Komplexität des realen Bahn- und Routensystems werden über ein Einbahnsystem alle Starts Richtung Osten, alle Landungen Richtung Westen angenommen. Betriebsrichtungsverteilungen und Korridorbreiten werden nicht berücksichtigt.

Nach diesem Modell wird seit Februar 2003 das Lärmvolumen für den Flughafen Amsterdam kontingentiert. Mit einem Prognoseverfahren werden für alle 33 Referenzpunkte auf der Basis der Flugbewegungen eines Kalenderjahres die Werte

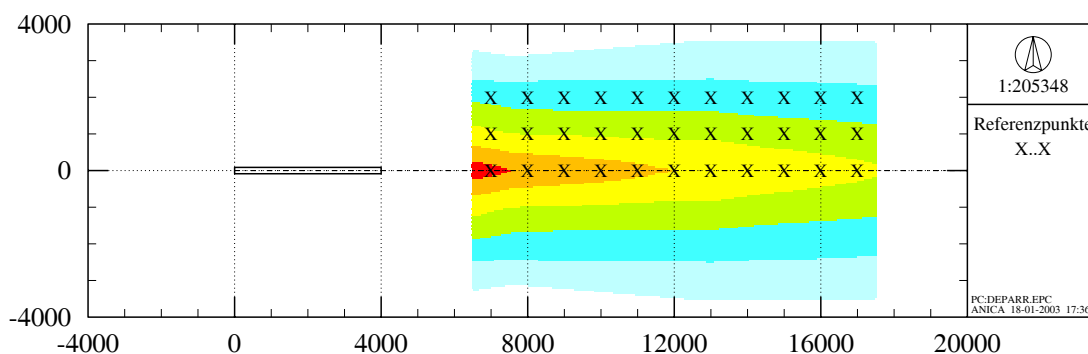


Abb. 4.8: Prinzip einer Volumenkontingentierung über virtuelle Referenzpunkte am Hybrid-Flughafen Parport

des Day Evening Night Level L_{DEN} errechnet und im Folgenden arithmetisch gemittelt. Der resultierende Einzahl-Wert ist das limitierte Kontingentmaß.

Volumenkontingentierungen können zwar keine variierende Auslastung des Bahn- und Routensystems reflektieren. Gleichwohl sind unter Berücksichtigung des Zielbezugs zumindest Aussagen über die globale Lärmentwicklung möglich. Die vergleichsweise leichte Handhabbarkeit der auf Referenzpunkten basierenden Kontingentierungen lässt darüber hinaus erhebliches Potenzial für eine marktkonforme Ausgestaltung der Lizenzvergabe erwarten.

Größter Nachteil von Volumenkontingentierungen ist jedoch der fehlende Lokalbezug. Ein Zielwert kann also nicht wie bei Punkt- oder Konturkontingentierungen konkret in der Flughafenumgebung abgesichert werden, sodass die Verwendung in einem Schutzkonzept ausscheidet. Die Akzeptanz in der Bevölkerung wird deshalb in hohem Maß von der Nachvollziehbarkeit der Rechenverfahren abhängen.

4.5.5 Diskussion

Alle vorgestellten Limitierungstypen haben ihre spezifischen Stärken und Schwächen, die erst in Abhängigkeit von der weiteren Ausgestaltung voll zum Tragen kommen. Neben der Zielgröße sind insbesondere die Komplexität des Bahn- und Routensystems sowie die Besiedlungsstruktur von Bedeutung. Auch der vorgesehene Vergabemodus der Lizenzen spielt – wie in Kapitel 4.11 erörtert werden wird – eine wichtige Rolle bei der Auswahl der optimalen Kontingentierungsart.

Punktkontingentierungen garantieren ebenso wie Konturkontingentierungen die Einhaltung des Zielwertes an definierten Punkten. Flächenkontingentierungen sind flexibler in der Anwendung, lassen aber begrenzten Lärmexport zu. Volumenkontingentierungen haben aufgrund ihres integralen Charakters keinen direkten Bezug mehr zur konkreten Lärmbelastung vor Ort.

4.6 Bemessungszeitraum

Die Analysen und Bewertungen in den Kapiteln 3.3 und 4.2 haben gezeigt, dass für die hier relevanten Zielgrößen ein Bezugszeitraum von einem Kalenderjahr sachgerecht ist. Auch GRIEFAHN ET AL. bestätigen in ihrer Synopse zu Fluglärmkriterien die Angemessenheit eines einjährigen Bezugszeitraums. Gleiches gilt für die EU-Richtlinie zur Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm [50,78].

Eine adäquate Berücksichtigung von Fluglärmwirkungen spricht also nicht gegen einen langen Bemessungszeitraum für Fluglärmkontingentierungen. Gleichwohl kann es im Interesse einer optimalen Ausgestaltung angeraten sein, eine kürzere Laufzeit zu wählen. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden Bemessungen mit kurzfristigem und langfristigem Zeithorizont geprüft.

Eine wertende Diskussion der Sachargumente schließt dieses Kapitel ab.

4.6.1 Kurzfristhorizont

Die Wahl eines kurzen Bemessungszeitraums kann sinnvoll sein, wenn während bestimmter Zeitperioden systematisch besonders hohe oder niedrige Verkehrsaufkommen auftreten. Hoch belastete Verkehrsflughäfen zeichnen sich jedoch gerade durch eine relativ ausgeglichene Aufkommensverteilung aus.

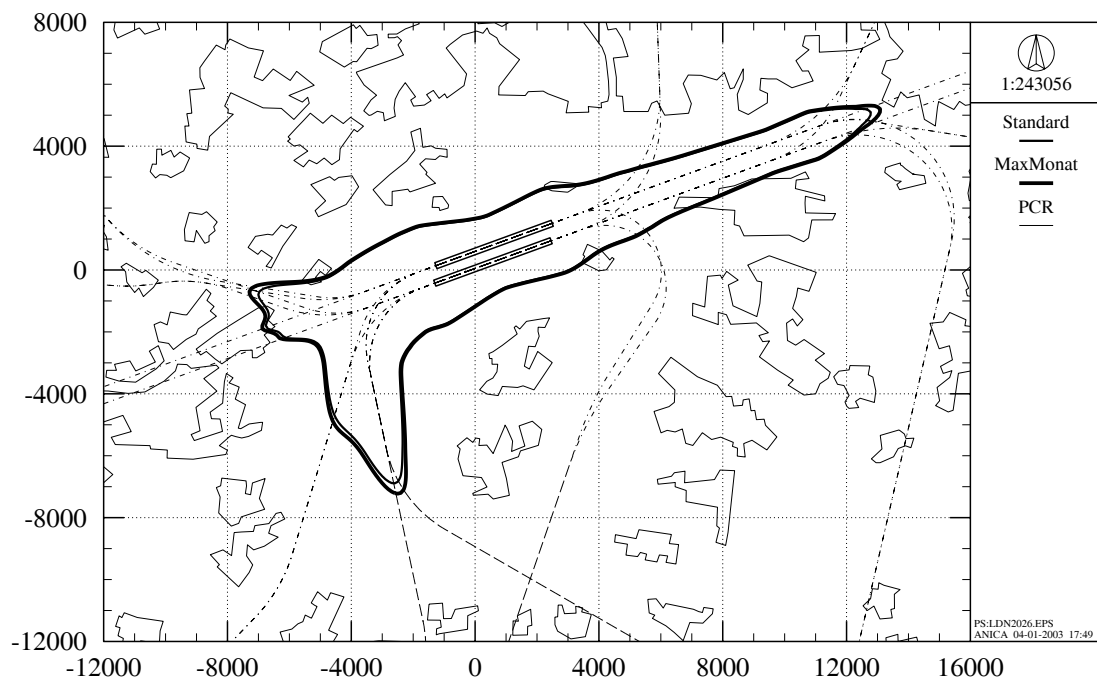


Abb. 4.9: Flugbetriebsszenarien Standard und MaxMonat, $L_{DN} = 62 \text{ dB}$

Abbildung 4.9 unterstützt diese Aussage durch einen Vergleich zwischen den Flugbetriebsszenarien für den verkehrsreichsten Monat und für den Durchschnittsmonat. Das um etwa 8 % erhöhte Verkehrsaufkommen führt lediglich zu einer geringen Belastungszunahme. Die Auswirkungen einer ausgeprägten Ostwetterlage sind demgegenüber als erheblich bedeutsamer einzuschätzen.

In diesem Zusammenhang soll keineswegs verkannt werden, dass es zur Bedarfsermittlung von passivem Schallschutz angemessen sein kann, auf Maximalbelastungen, beispielsweise in Form der Grenze zum seltenen Ereignis, abzustellen. Eine auf Tages- oder Wochenbasis beruhende Bemessung einer Kontingentierung ist allerdings mit einer ordnungsgemäßen Planung und Durchführung des Luftverkehrs unvereinbar und deshalb nicht praktikabel [14, 175, 176].

Der alternativ vorstellbare Vergleich lediglich der Spitzenbelastungen innerhalb des Bemessungszeitraums ist keine echte Handlungsoption. Denn Fluglärmkontingentierungen zielen auf die Berücksichtigung aller relevanten Flugereignisse innerhalb eines Bemessungszeitraums, um über die Vergabe lärmabhängiger Lizenzen die sichere Einhaltung der gesetzten Obergrenze zu garantieren. Das geschilderte Vorgehen wäre demnach kontraproduktiv.

Durch geeignete Wahl der in Kapitel 4.7 zu diskutierenden Bemessungssituation kann im Rahmen einer Fluglärmkontingentierung potenziellen Schutzerfordernissen der Bevölkerung dennoch Rechnung getragen werden.

4.6.2 Langfristhorizont

Bemessungszeiträume mit einem langfristigen, auf zumindest mehrere Monate abhebenden Horizont sind bei den bisher eingeführten Fluglärmkontingentierungen die Regel. In Deutschland verbreitet ist die Bemessung aufgrund der sechs verkehrsreichsten Monate eines Kalenderjahres. Sie hat ihren Ursprung in erster Linie in der Kompatibilität mit den Anforderungen des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm.

Wie jedoch bereits am Beispiel der Spitzenbelastungen skizziert, ist die unvollständige Berücksichtigung von Flugbewegungen innerhalb eines Bemessungszeitraums nicht geeignet, die spezifischen Vorteile von Fluglärmkontingentierungen zur Geltung kommen zu lassen.

Dem Planungsrhythmus von Fluggesellschaften, Flughäfen und Flughafenkoordinator trägt am ehesten ein an den Flugplanperioden orientierter Bemessungszeitraum Rechnung. Der Sommerflugplan umfasst zudem die sechs verkehrsreichsten Monate eines Jahres, sodass auch jahreszeitlich bedingte Auslastungsunterschiede adäquat beachtet werden. Schließlich hat die Auswahl von Flugplanperioden

als Bemessungszeitraum Vorteile bei der Vergabe der Lizenzen, wie Kapitel 4.11 im weiteren Verlauf der Arbeit noch zeigen wird.

Das Kalenderjahr ist der längste in Betracht kommende Zeitraum. Aufgrund der partiellen Überschneidung mit zwei Winterflugplänen sind marktwirtschaftliche Ausgestaltungsformen der Lizenzvergabe im Gegensatz zur Bemessung auf Basis der Flugplanperioden eingeschränkt. Unter juristischen Aspekten spricht bei angemessener Abwägung nichts gegen seine Verwendung.

Der Bayerische Verwaltungsgerichtshof hat in seiner Entscheidung Ende 2002 über die Rechtmäßigkeit der Änderungsgenehmigung zur Nachtflugregelung für den Flughafen München [14] zutreffend angemerkt, dass der Umfang der Nachtflüge sinnvoll nur langfristig gesteuert werden kann.

Zwar habe die neue Nachtflugregelung nicht mehr die gleiche Regelungs- und Kontrollschärfe wie die frühere Regelung, weil nicht mehr auf die einzelne Nacht, sondern nurmehr auf den Jahresdurchschnitt abgestellt werde. Das sei aber letztlich sachgerecht, da sich die bisherige Regelung nicht bewährt habe.

4.6.3 Diskussion

Die hier relevanten Zielgrößen aus dem Bereich der Fluglärmwirkungen stehen einem Bemessungszeitraum von bis zu einem Jahr nicht entgegen. Unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Schwankungen des Verkehrsaufkommens sowie der Planungszyklen von Fluggesellschaften, Flughäfen und Flughafenkoordinator scheint deshalb ein Bemessungszeitraum, der sich mit den Flugplanperioden deckt, am besten geeignet, den Anforderungen im Rahmen von Fluglärmkontingentierungen gerecht zu werden.

Alternativ bietet sich eine Bemessung auf Jahresbasis an. Hierbei sind allerdings Einschränkungen hinsichtlich der marktwirtschaftlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten bei der Vergabe der Lizenzanteile zu erwarten. Die sechs verkehrsreichsten Monate eines Jahres vermögen als Bemessungsbasis nicht zu überzeugen, da sie nur einen Ausschnitt aller relevanten Flugbewegungen eines Bemessungszeitraums repräsentieren und daher die charakteristischen Stärken von Fluglärmkontingentierungen nicht ausnutzen.

Gleiches gilt für Zeiträume mit kurzfristigem Horizont. Eine auf Tages- oder Wochenbasis beschränkte Laufzeit einer Kontingentierung ist mit der ordnungsgemäßen Planung und Durchführung des Luftverkehrs unvereinbar, sodass auch hier nur der Ausweg über den Bezug auf Spitzenbelastungen innerhalb eines Jahres bliebe. Dieses Vorgehen mag bei der Bedarfsermittlung für passiven Schallschutz angeraten sein, geht hier jedoch fehl.

4.7 Bemessungssituation

Die vorangehenden Kapitel haben nahezu alle Ausgestaltungselemente beigebracht, die für die rechnerische oder messtechnische Ermittlung einer kontingierenden Obergrenze erforderlich sind. Offen geblieben ist bislang jedoch, welche Verkehrssituation zugrunde gelegt werden soll.

Bereits in den Kapiteln 4.4 und 4.5 wurde thematisiert, dass über die Bemessungssituation der Wettereinfluss kompensiert werden kann, ausgleichende Korrekturen nach kleineren Änderungen in der Verkehrsverteilung vorgenommen oder Schutzanfordernisse der Bevölkerung realisiert werden können.

Im Folgenden werden drei Möglichkeiten der Verkehrsverteilung erörtert. Je nach der verwendeten Bemessungsmethodik, die in Kapitel 4.8 näher erläutert wird, können die Flugbetriebsszenarien auf den tatsächlich durchgeführten Flugbewegungen oder auf prognostischen Angaben beruhen.

Das Kapitel endet mit einer resümierenden Diskussion von Vor- und Nachteilen der vorgestellten Bemessungssituationen.

4.7.1 Ist-Verteilung

Die Ist-Verteilung berücksichtigt die während des Bemessungszeitraums aufgetretene oder erwartete Verteilung der Flugbewegungen auf das Bahn- und Routensystem. Korrekturen für den Einfluss des Wetters oder sonstige Abweichungen in der Verkehrsverteilung werden nicht vorgenommen.

Die Ist-Verteilung gibt die über den Bemessungszeitraum gemittelte Belastung wieder. Als repräsentativer Mittelwert entspricht sie naturgemäß nicht konkreten West- oder Ostwetterlagen, wie sie typischerweise im realen Flugbetrieb auftreten. Die Verwendung der Ist-Verteilung ist – auch als messtechnisch erfasstes Dosismaß bei Untersuchungen zur Fluglärmwirkung – international üblich.

4.7.2 Normierte Verteilung

Zur Bemessung der Verkehrssituation kommt ferner eine normierte Verteilung der Flugbewegungen in Betracht. Die Ist-Flugbewegungen werden hierzu entweder der prozentualen Betriebsrichtungsverteilung oder der prozentualen Routenverteilung des Zielbezugs entsprechend umgelegt. Bei Volumenkontingentierungen, die auf virtuellen Referenzpunkten basieren, ist eine Normierung per se unnötig.

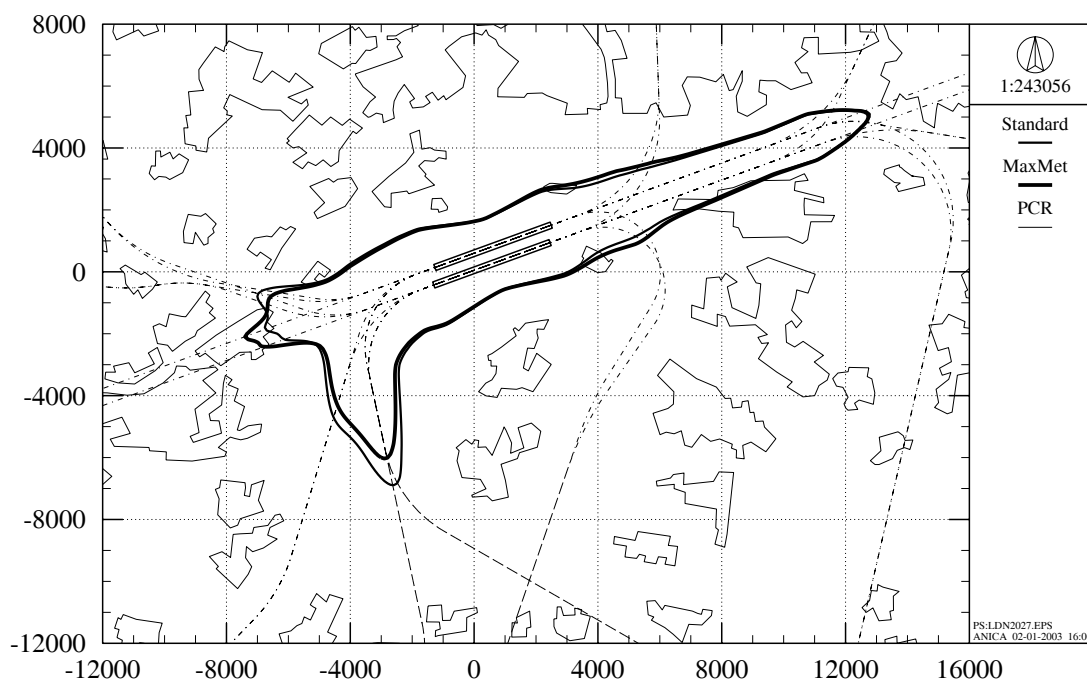


Abb. 4.10: Flugbetriebsszenarien Standard und MaxMet, $L_{DN} = 62 \text{ dB}$

Abbildung 4.10 verdeutlicht potenzielle Auswirkungen einer normierten Bemessungssituation. Sie zeigt einen Vergleich der beiden Flugbetriebsszenarien Standard und MaxMet. Das Szenario MaxMet weist bei identischem Verkehrsaufkommen eine wetterbedingt rund 14% abweichende Betriebsrichtungsverteilung auf. Der dargestellte Konturverlauf differiert entsprechend. Bei Anwendung einer normierten Verteilung wäre demgegenüber kein Unterschied vorhanden.

Die reale Lärmbelastung wird bei einer normierten Verteilung also nur bedingt abgebildet. Ein weiterer Nachteil ist die fehlende messtechnische Kontrollmöglichkeit. Andererseits lassen sich der Einfluss des Wetters und kleinere Änderungen in der Verkehrsverteilung auffangen, die insbesondere bei Punkt- und Konturkontingentierungen problematisch werden können.

4.7.3 100:100-Verteilung

Als dritte Variante einer Bemessungssituation wird die Überlagerung einer gesonderten Betrachtung beider Betriebsrichtungen mit jeweils 100% des Verkehrsaufkommens diskutiert. Sie wird zunehmend bei der Bedarfsermittlung für passiven Schallschutz eingesetzt. Denn bei stabiler Wetterlage kann eine Betriebsrichtung durchaus über einen Zeitraum von Tagen oder Wochen beibehalten werden.

Ob die damit verbundene veränderte Belastungssituation einen Schutzanspruch auslöst, dem die anschließende Entlastung nicht entgegengehalten werden kann,

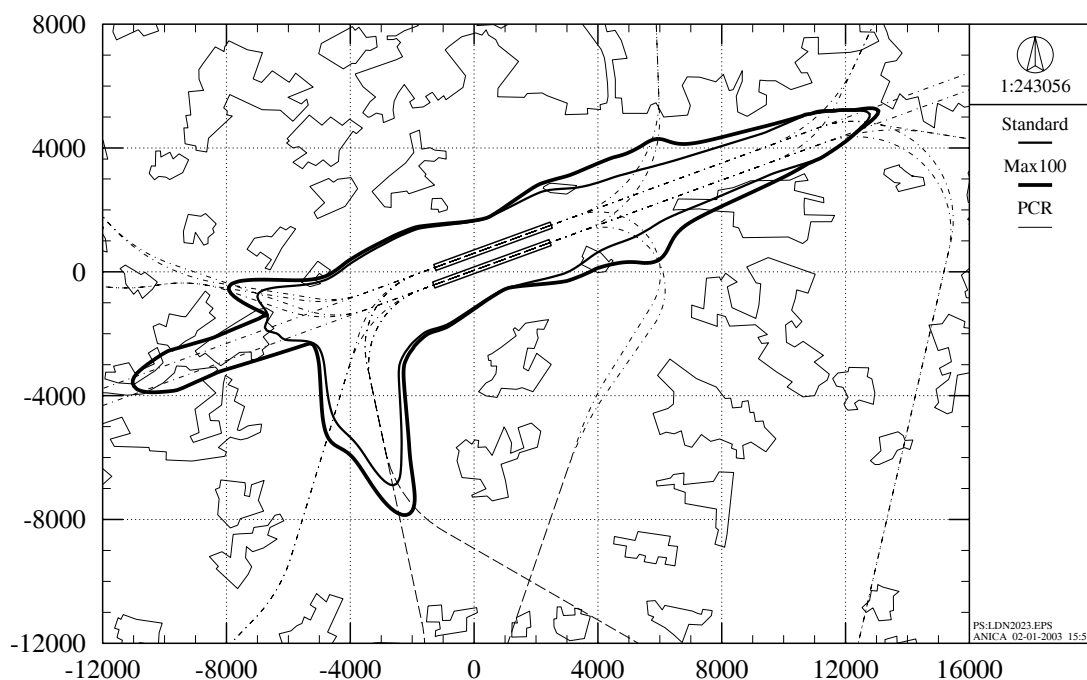


Abb. 4.11: Flugbetriebsszenarien Standard und Max100, $L_{DN} = 62 \text{ dB}$

ist juristisch umstritten. Im Gegensatz zum Oberverwaltungsgericht Rheinland-Pfalz vertritt beispielsweise der Bayerische Verwaltungsgerichtshof die Auffassung, dass eine Bewegungsverteilung von 100:100 angemessen ist [15, 154].

Ungeachtet dieses Meinungsstreits ist für Fluglärmkontingentierungen zu berücksichtigen, dass eine 100:100-Betrachtung wegen ihrer normierenden Komponente Modifikationen in der Betriebsrichtungsverteilung nicht zum Ausdruck bringt. Das grundsätzliche Bedürfnis des Bevölkerungsschutzes konkurriert hier also mit der Abbildung der Realsituation. Eine sorgfältige Abwägung ist daher notwendig.

4.7.4 Diskussion

Die vorgestellten Bemessungssituationen haben spezifische Eigenschaften, die eine abschließende Wertung erst in Verbindung mit konkreten Ausgestaltungserfordernissen zulassen. Die Ist-Verteilung repräsentiert am besten die über den Bemessungszeitraum gemittelte Lärmbelastung. Sie ist als einzige Variante messtechnisch erfassbar und definiert zudem die Dosis in Lärmwirkungsstudien.

Die Vorteile einer normierten Verteilung liegen im Ausgleich von Änderungen in der Verkehrsverteilung. Die reale Lärmbelastung spiegeln sie dabei nur bedingt wider. Eine 100:100-Verteilung kann zwar in Verbindung mit einem Schutzkonzept infrage kommen. Im Rahmen einer Fluglärmkontingentierung verschleiert sie jedoch tatsächliche Belastungsveränderungen.

4.8 Bemessungsmethodik

Im bisherigen Verlauf der Arbeit ist weitgehend offen geblieben, welchen Einfluss auf die Ausgestaltung einer Fluglärmkontingentierung der Zeitpunkt hat, an dem die relevanten Kenngrößen der Fluggeräuschimmissionen zur Verfügung gestellt werden.

Die folgenden Abschnitte thematisieren unter diesem Aspekt sowohl Bemessungsmethoden, die bereits vor der Durchführung einer Flugbewegung prognostisch genutzt werden können, als auch solche, die erst nach einer Flugbewegung eingebracht werden können.

Eine kurze Diskussion fasst spezifische Vor- und Nachteile der Methoden noch einmal zusammen.

4.8.1 Ex-ante-Bemessung

Um das kontingentimmanente Bepreisungspotenzial für marktwirtschaftliche Vergabeverfahren nutzen zu können, müssen die relevanten akustischen Immissionskenngrößen bereits vor der Durchführung eines Fluges vorliegen. Nur so ist der vorzuhaltende Lizenzbedarf, dessen mathematische Herleitung Kapitel 4.9 behandelt, rechtzeitig zu ermitteln.

Messungen der realen Immissionen an den stationären Fluggeräuschmessstellen scheiden hierzu aus. Aufgezeichnete Messwerte früherer Flüge können jedoch eingehen. Zudem kommen auch die Ergebnisse von Zulassungsmessungen nach ICAO Annex 16 oder von Berechnungen mit Prognoseverfahren infrage. Kontur- und Flächenkontingentierungen können ebenso wie Volumenkontingentierungen, die nicht auf realen Referenzpunkten basieren, nur rechnerisch erfasst werden.

Soll bereits vor dem Beginn einer Flugplanperiode eine Aussage über den voraussichtlichen Ausnutzungsgrad einer Kontingentierung gemacht werden, ist eine Flugbetriebsprognose erforderlich. Dabei sind die Erkenntnisse aus den zweimal jährlich stattfindenden Flugplankonferenzen der International Air Transport Association (IATA) eine wichtige Informationsquelle.

Über eine Ex-ante-Bemessung kann zwar die Einhaltung einer Obergrenze gegenüber dem Vergleichsmaßstab abgesichert werden. Das schließt Abweichungen vor Ort indes nicht aus. Denn spätestens mit der für Verkehrsflughäfen obligatorischen Slotzuweisung durch den Flughafenkoordinator sollte im Interesse eines geordneten Flugbetriebs auch eine Lärmlizenz vorliegen. Zu diesem Zeitpunkt ist aber weder die Betriebsrichtung noch die Route bekannt. Prognosen gehen deshalb von einer durchschnittlichen Betriebsrichtungs- und Routenverteilung aus.

4.8.2 Ex-post-Bemessung

Eine Ex-post-Bemessung kann naturgemäß die Einhaltung einer Kontingentierung nicht garantieren. Um eine Überschreitung zu verhindern, sind also geeignete erfahrungsbasierte Maßnahmen im Vorfeld zu ergreifen. Gleichwohl ist sicherzustellen, dass die gewählte Marge zur Obergrenze nicht über Gebühr groß ist und zu einer impliziten Dynamisierung der Kontingentierung führt. Kapitel 4.12 diskutiert adäquate Ansätze zu diesem Thema.

Marktkonforme Vergabeverfahren, die die Identifikation einzelner Lizenzanteile voraussetzen, sind mit einer retrospektiven Betrachtung ebenfalls nicht vereinbar. Mit der Mengensteuerung verlieren Fluglärmkontingentierungen jedoch einen ihrer wesentlichen Vorteile gegenüber anderen umweltökonomischen Instrumenten. Prospektive Methoden sind hier deutlich überlegen.

Hinsichtlich der Erfassung der Fluggeräuschimmissionen sind Ex-post-Bemessungen wiederum nicht zu übertreffen. Messungen der tatsächlichen Immissionen an den stationären Fluggeräuschmessstellen ermöglichen beispielsweise eine Berücksichtigung des Ist-Flugverhaltens von Piloten.

Darüber hinaus können aufgezeichnete Messwerte früherer Flüge ebenso verwendet werden wie die Ergebnisse von Zulassungsmessungen nach ICAO Annex 16 oder von Berechnungen mit Prognoseverfahren. Analog zur Ex-ante-Bemessung können Kontur- und Flächenkontingentierungen sowie Volumenkontingentierungen, die nicht auf realen Referenzpunkten beruhen, jedoch nur berechnet werden.

Flugbetriebsprognosen zur Beschreibung von Verkehrsaufkommen und -verteilung sind nicht erforderlich. Die Berechnungsergebnisse der konventionellen Prognoseverfahren sind deshalb auch nicht mit Abweichungen infolge differierender Betriebsrichtungs- oder Routenverteilungen belastet.

4.8.3 Diskussion

Sollen marktwirtschaftliche Vergabeverfahren eingesetzt werden, ist eine Ex-ante-Bemessung unumgänglich. Auch eine garantierte Einhaltung der Obergrenze setzt die Kenntnis des entsprechenden Lizenzbedarfs vor der Durchführung eines Fluges voraus.

Eine Ex-post-Bemessung ermöglicht demgegenüber eine Orientierung an tatsächlichen Fluggeräuschimmissionen, sofern eine geeignete Bemessungssituation gewählt wird. Ein Überschreiten der Kontingentierung kann allerdings nur ausgeschlossen werden, indem eine zusätzliche Sicherheitsmarge zur Obergrenze eingehalten wird.

4.9 Quantitative Stückelung

Fluglärmkontingentierungen erreichen die geforderte Umweltqualität direkt über eine Mengengrenzung. In den Kapiteln 4.1 bis 4.8 wurde hierzu der für eine exakte Beschreibung der limitierenden Obergrenze wesentliche Handlungsrahmen systematisch herausgearbeitet.

Für die durch diese Obergrenze definierte Gesamtmenge sind nun gestückelte Anteile in Form von lärmabhängigen Lizenzen abzuleiten. Dabei ist ein eindeutiger funktionaler Zusammenhang zu fordern. Insbesondere für die marktwirtschaftlichen Vergabeverfahren ist – wie im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch zu zeigen sein wird – eine lineare Abhängigkeit notwendige Voraussetzung.

Inwieweit die verschiedenen Limitierungstypen dieser Anforderung genügen, wird auf den folgenden Seiten jeweils gesondert für die Punktkontingentierung, die Konturkontingentierung, die Flächenkontingentierung und die Volumenkontingentierung erörtert.

In einer kurzen Zusammenfassung werden die nach der Analyse und Bewertung verbleibenden Handlungsoptionen vorgestellt.

4.9.1 Punktkontingentierung

Die für die Durchführung einer einzelnen Flugbewegung benötigte Lizenzmenge a_i lässt sich für einen beliebigen Ort in der Umgebung eines Flughafens recht anschaulich ableiten. Ausgangspunkt der exemplarischen Betrachtung ist ein zu limitierender äquivalenter Dauerschallpegel $L_{eq, Limit}$. Das dominierende Dosismaß in der Lärmwirkungsforschung wurde in allgemeiner Form schon mit Gleichung 3.8 auf Seite 20 eingeführt.

$$L_{eq, Limit} = k \cdot \lg \left[\frac{1}{T} \sum_i g_i \cdot t_i \cdot 10^{\frac{L_{ASmax_i}}{k}} \right] + C \quad (4.1)$$

Bei einer insgesamt verfügbaren Lizenzmenge A ergibt sich hieraus nach geeigneter Umformung der erforderliche Lizenzanteil a_i zu

$$a_i = A \cdot \frac{t_i}{T} \cdot g_i \cdot 10^{\frac{L_{ASmax_i} - L_{eq, Limit} + C}{k}} \quad (4.2)$$

Für die Einhaltung der Fluglärmkontingentierung darf die Summe aus den Lizenzanteilen der einzelnen Flugbewegungen a_i nicht größer sein als die vorhandene Gesamtmenge an Lizenzen A . Es ist also zu fordern

$$A \geq \sum_i a_i \quad (4.3)$$

Der vergleichsweise komplex zu ermittelnde Anteil einer Flugbewegung an einer durch einen äquivalenten Dauerschallpegel beschriebenen Lärmbelastung lässt sich demnach bei bekannten Randbedingungen in ein einfaches additives Modell überführen, das erheblich eingängiger und leichter handhabbar ist. Um auch geringfügige Lärmunterschiede angemessen in der Zahl der benötigten Lizenzen widerspiegeln zu können, ist eine große Stückelung vorzusehen.

Aus Gleichung 4.2 folgt für eine auf dem energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{eq(3), Limit}$ basierende Begrenzung konkret

$$a_i = A \cdot \frac{t_{10_i}}{2T} \cdot 10^{\frac{L_{ASmax_i} - L_{eq(3), Limit}}{10}} \quad (4.4)$$

Unter der stark vereinfachenden Annahme einer Konstanz der t_{10} -Zeiten lässt sich der Ausdruck weiter reduzieren zu

$$a_i = A' \cdot 10^{\frac{L_{ASmax_i}}{10}} \quad (4.5)$$

mit

$$A' = A \cdot \frac{t_{10}}{2T} \cdot 10^{\frac{-L_{eq(3), Limit}}{10}} \quad (4.6)$$

Die benötigte Lizenzmenge a_i ist nunmehr ausschließlich eine Funktion des maximalen Schallpegels L_{ASmax_i} und der normierten Lizenzmenge A' . Es bietet sich an, A' so zu wählen, dass dem niedrigsten zu erwartenden Schallpegel die Lizenzmenge 1 zugewiesen wird. Bei einer denkbaren Klassifizierung der maximalen Schallpegel im Abstand von 3 dB verdoppelt sich wegen der Energieäquivalenz des Dosismaßes die erforderliche Lizenzmenge von Klasse zu Klasse.

Für eine Obergrenze, die durch die Kombination von maximalem Schallpegel und seiner Überschreitungshäufigkeit definiert ist, ist die Ableitung trivial. Jede Überschreitung des festgelegten Schallpegels erfordert die gleiche Lizenzmenge. Auch hier ist die in Gleichung 4.3 formulierte Bedingung einzuhalten.

Zwei Einschränkungen mindern den praktischen Wert des skizzierten Handlungsansatzes indes erheblich. Zunächst erscheint es unter dem in Art. 3 GG verankerten Aspekt des Gleichbehandlungsgrundsatzes höchst problematisch, Flugbewegungen, die bei ansonsten identischen Randbedingungen aus betrieblichen, flugsicherungstechnischen oder meteorologischen Gründen über unterschiedliche Routen geführt werden, ex post mit einem differierenden Lizenzbedarf zu belegen.

Ex ante kann dem ebenfalls nicht abgeholfen werden. Eine realitätsnahe Flugbetriebsprognose berücksichtigt derartig motivierte Abweichungen bei der Umliegung der Flugbewegungen auf die An- und Abflugstrecken. Auch über die Bemessungssituation ist hier kein Erfolg versprechender Lösungsbeitrag zu erlangen.

Außerdem ist es im Fall einer Kontingentierung mehrerer Orte wahrscheinlich, dass eine Flugbewegung einen Lizenzbedarf an zumindest einem Teil dieser Orte

hervorrufen. Um die Kontingentierungen an allen Orten abzusichern, sind ortsspezifische Lizenzmengen vorzuhalten, an denen jeweils entsprechende Anteile benötigt werden. Eine angemessene Ausgestaltung von transparenten und nicht diskriminierenden Vergabeverfahren ist vor diesem Hintergrund schwer vorstellbar.

Trotz dieser Einschränkungen können Punktkontingentierungen bei entsprechender Ausgestaltung wertvolle Instrumente einer Fluglärmbegrenzung sein. Hierfür ist allerdings der Anspruch auf eine explizite Lizenzvergabe für einzelne Flugbewegungen aufzugeben. Dementsprechend entfällt auch die Möglichkeit der kontingentimmanenten Bepreisung der Anteile.

4.9.2 Konturkontingentierung

Wie schon in Kapitel 4.5.2 beschrieben, werden für eine Konturkontingentierung in der Flughafenumgebung zunächst Punkte ermittelt, an denen der Zielwert für eine konkrete Zielgröße erreicht wird. Hinsichtlich der quantitativen Stückelung ist eine Konturkontingentierung demnach einer Kontingentierung für eine sehr große Zahl von Einzelpunkten vergleichbar.

Die obigen Ausführungen zu Punktkontingentierungen gelten hier also in verschärftem Umfang. Auch wenn theoretisch für jede einzelne Flugbewegung über eine bestimmte An- oder Abflugstrecke an jedem Konturpunkt ein erforderlicher Lizenzanteil identifizierbar ist, bestehen nachdrückliche Zweifel, ob dieses Vorgehen juristisch zulässig, verhältnismäßig und praktikabel ist.

Ein Verzicht auf die Berücksichtigung expliziter Anteile für einzelne Flugbewegungen führt ebenso wie bei Punktkontingentierungen zwar zum Verlust einiger kontingenttypischer Ausgestaltungsoptionen. Die zentrale, Interessen ausgleichende Funktion einer Fluglärmkontingentierung bleibt durch die fortbestehende Absicherung der Obergrenze der Lärmbelastung jedoch erhalten.

4.9.3 Flächenkontingentierung

Flächenkontingentierungen setzen unter dem Gesichtspunkt der quantitativen Stückelung auf Konturkontingentierungen auf. Zusätzlich fehlt jedoch der feste Ortsbezug. Der Versuch einer handhabbaren Ableitung von Lizenzanteilen, die mit der Obergrenze sinnvoll vergleichbar sind, läuft somit vollends ins Leere.

Gleichwohl haben auch Flächenkontingentierungen Vorteile, die eine Aufgabe der individuellen Anteilsidentifikation wettmachen können. Die diesbezüglichen Aussagen zu Konturkontingentierungen gelten hier analog.

4.9.4 Volumenkontingentierung

Für Lärm-Einwohner-Gleichwerte und auf ihnen beruhende Modifikationen gelten die gleichen Einschränkungen wie für Flächenkontingentierungen. Volumenkontingentierungen auf der Basis von realen oder virtuellen Referenzpunkten sind hinsichtlich der quantitativen Stückelung in lärmabhängige Anteile indes wie Punktkontingentierungen zu behandeln.

Allerdings macht sich die bei realen Referenzpunkten erzeugte, bei virtuellen Referenzpunkten immanent vorhandene Unabhängigkeit von der Komplexität des Bahn- und Routensystems jetzt besonders positiv bemerkbar. Die bei Einzelpunkten noch diskutierten Vorbehalte aufgrund des Gleichbehandlungsgrundsatzes bestehen hier nicht mehr. Selbst das in Abbildung 4.8 vorgestellte Prinzip einer Volumenkontingentierung über 33 virtuelle Referenzpunkte ist anteilsbezogen beherrschbar.

Die einfachste vorstellbare Ausgestaltungsvariante ist die Volumenkontingentierung mit einem virtuellen Einbahnsystem an einem einzigen Referenzpunkt. Nach Gleichung 4.4 oder in der vereinfachten Form nach Gleichung 4.5 kann das gesamte Lärmvolumen dann über ein simples lineares Modell kontingentiert werden, das keiner mathematischen Erweiterungen bedarf.

Im Interesse einer optimalen Handhabbarkeit der quantitativen Stückelung und damit der größtmöglichen Flexibilität bei der Ausgestaltung der Vergabeverfahren spricht also alles für eine referenzpunktgestützte Volumenkontingentierung. Wie bereits in Kapitel 4.5.4 erörtert, ist jedoch zu berücksichtigen, dass wegen des fehlenden Lokalbezugs nur Aussagen über die globale Lärmentwicklung in der Flughafenumgebung möglich sind.

4.9.5 Diskussion

Die für marktwirtschaftliche Vergabeverfahren bestehende Notwendigkeit, aus der durch die Obergrenze definierten Gesamtmenge gestückelte Anteile in Form von lärmabhängigen Lizenzen abzuleiten, erweist sich nur für Volumenkontingentierungen auf Referenzpunktbasis und mit deutlichen Einschränkungen für spezielle Punktkontingentierungen als realisierbar.

Für die übrigen Limitierungstypen ist eine Abkehr vom Anspruch auf eine explizite Lizenzvergabe für einzelne Flugbewegungen erforderlich. Der Vorteil der direkten Mengensteuerung geht damit zwar verloren. Das wesentliche Charakteristikum von Fluglärmkontingentierungen, die Absicherung einer Obergrenze der Lärmbelastung, bleibt bei geeigneter Ausgestaltung aber dennoch erhalten.

4.10 Zeitliche Stückelung

Das vorige Kapitel 4.9 hat klare Grenzen einer quantitativen Stückelung von Fluglärmskontingentierungen in explizite Lizenzanteile aufgezeigt, mit den impliziten Lizenzen aber gleichzeitig einen Weg aus dem sich abzeichnenden Dilemma einer faktischen Nichtanwendbarkeit für einige Limitierungstypen gewiesen.

Hier gilt es nun, einen geeigneten zeitlichen Vergabehorizont für die Lizenzen an die Fluggesellschaften zu bestimmen. Dabei kommt eine Geltungsdauer sowohl auf unbefristeter als auch auf befristeter Grundlage in Betracht. Die spezifischen Vor- und Nachteile der beiden Ausgestaltungsoptionen werden nachfolgend thematisiert.

Das Kapitel endet mit einer kurzen Diskussion.

4.10.1 Unbefristete Geltungsdauer

Eine zeitlich unbefristete Lizenzvergabe an die Fluggesellschaften bedingt lediglich einen geringen Verwaltungsaufwand und damit einhergehend niedrige Transaktionskosten. Zudem haben die Fluggesellschaften eine sehr hohe Planungssicherheit. Auch Probleme mit gegebenenfalls vorhandenem Bestandsschutz sind nicht zu erwarten. Diesen Vorteilen stehen indes einige Nachteile gegenüber.

Ähnlich wie bei den Großvaterrechten der Slotvergabe besteht auch bei zeitlich nicht limitierten lärmabhängigen Lizenzen die Gefahr einer Strukturkonservierung, bei der die Fluggesellschaften den technischen Fortschritt nur zum Ausbau des eigenen Angebots nutzen. Freie Lizenzen werden aus strategischen Erwägungen heraus nicht abgestoßen, um die Marktmacht zu festigen. Dieses Vorgehen hat hohe Markteintrittsbarrieren für Neueinsteiger zur Folge, die in letzter Konsequenz zu einer Abschottung des Marktes führen können.

Neben diesen wettbewerblichen Aspekten kann ein Horten und Sammeln von Lizenzen über mehrere Bemessungszeiträume mit anschließender kurzfristiger Nutzung auch massive Probleme bei der Einhaltung von Fluglärmskontingentierungen aufwerfen. Darüber hinaus wird eine Dynamisierung der Obergrenze und eine Flexibilisierung der Kontingentierung erschwert.

4.10.2 Befristete Geltungsdauer

Aufwand und Kosten einer limitierten Geltungsdauer steigen wegen der regelmäßig notwendigen VergabeprozEDUREN naturgemäß mit abnehmender Laufzeit. Fer-

ner ist die langfristige Planungssicherheit der Fluggesellschaften eingeschränkt. Andererseits wird der Markteintritt für Neueinsteiger erleichtert, da Lizenzhor-tung zwar möglich ist, aber nicht mehr strategisch sinnvoll eingesetzt werden kann.

In der Folge wächst der Innovations- und Wettbewerbsdruck auf die Fluggesell-schaften. Änderungen in der Nachfrage nach Luftverkehrsleistungen schlagen sich schneller nieder. Saisonale Schwankungen können so besser berücksichtigt werden. Inkompatibilitäten mit existierendem Bestandsschutz kann durch sach-gerechte VergabeprozEDUREN, die entsprechende Priorisierungen vorsehen, entge-gengewirkt werden.

Ungeachtet dieser Argumente ist eine zeitliche Befristung der Lizenzlaufzeit un-abdingbar, um das festgelegte Lärmbelastungsniveau einer Fluglärmlizenzkontingent-ierung garantiert einhalten zu können. Hierzu ist eine Begrenzung zu wählen, die maximal dem Bemessungszeitraum entspricht. Kürzere Zeiträume sind denkbar, bieten aber keine erkennbaren Vorteile. Unter Kosten-Nutzen-Aspekten erscheint deshalb der Bemessungszeitraum optimal.

Neben dem unmittelbar zeitlich befristenden Ansatz ist auch eine indirekte Lö-sung vorstellbar, die eine regelmäßige Abwertung der Lärmlizenzen nach jedem Bemessungszeitraum vorsieht. Die Abwertung kann auf einem absoluten oder pro-zentualen Maßstab beruhen. Nach einer gewissen Zahl von Bemessungszeiträu-men haben die Lizenzen dann ihren Wert vollständig verloren. Hierdurch freie Lizenzanteile können ganz oder teilweise wieder der Vergabe zugeführt werden.

4.10.3 Diskussion

Eine unbefristete Geltungsdauer von Lärmlizenzen ist in Anbetracht der erhebli-chen negativen Folgewirkungen auf den Wettbewerb und die abzusichernde Ein-haltung von Fluglärmlizenzkontingentierungen nicht angeraten. Die Befristung der Lizenzlaufzeit auf einen Zeitraum, der dem Bemessungszeitraum entspricht, ver-meidet diese gravierenden Nachteile. Der Bestandsschutz kann gegebenenfalls über geeignete Priorisierungsverfahren gewährleistet werden.

Die Rückgewinnung von Lärmlizenzen über ihre regelmäßige Abwertung stellt vor dem Hintergrund der ohnehin schon komplexen Ausgestaltung von Fluglärml-izenzkontingentierungen eher eine theoretisch interessante Variante einer mittelbaren Befristung dar. Bei der Optimierung der Slotnutzung mag dieses ökonomische Steuerungsinstrument seine Berechtigung haben [54], hier führt es jedoch zu weit.

Das folgende Kapitel 4.11 geht vertiefend auf die erforderliche Vereinbarkeit von Slots und Lärmlizenzen ein.

4.11 Lizenzvergabe

Die quantitative und zeitliche Stückelung der durch die Obergrenze einer Fluglärmlärmkontingentierung definierten Gesamtmenge in lärmabhängige Lizenzen wurde ausführlich in den vorangehenden Kapiteln 4.9 und 4.10 thematisiert.

Auf den nächsten Seiten werden nun potenzielle Verfahren einer wettbewerbsneutralen und diskriminierungsfreien Vergabe für explizite und implizite Lärmlizenzen behandelt. Ausgehend von mehreren Varianten einer administrativen Zuteilung über den Handel mit Lizenzen bis hin zum Laissez-faire-Prinzip werden alle vorgestellten Vergabeverfahren einer kritischen Würdigung unterzogen.

Ein weiterer Abschnitt ist dem Procedere der Erstvergabe von Lärmlizenzen gewidmet. Darüber hinaus wird auf Möglichkeiten eines positiven oder negativen Lizenzübertrags in einen nachfolgenden Bemessungszeitraum eingegangen. Schließlich werden Ausnahmeregelungen für bestimmte Verkehrsarten erörtert.

In einer kurzen Diskussion werden die wesentlichen Inhalte noch einmal zusammengefasst.

4.11.1 Administrative Zuteilung

Die Berücksichtigung der international etablierten Slotkoordination ist von erheblicher Bedeutung für die Priorisierung der Vergabeverfahren für Lärmlizenzen. Alle deutschen Verkehrsflughäfen unterliegen diesem Zuweisungsverfahren, das die Start- und Landerechte zu einer bestimmten Zeit an einem konkreten Flughafen festlegt, um Nutzungskonflikte und Kapazitätsengpässe der knappen Flughafeninfrastruktur sowie Wartekosten zu reduzieren [159].

Bei der Kompensationslösung wird jeder Fluggesellschaft mit der Erstvergabe eine an der jeweiligen Vornutzung ausgerichtete Lizenzmenge zugeteilt. Eine Expansion ist nur noch im Rahmen des einmal festgelegten Lizenzumfangs oder durch Lizenzerwerb möglich. Diese Form der Vergabe benachteiligt insbesondere umweltbewusst agierende Fluggesellschaften. Zudem sind Neueinsteiger auf die Verkaufsbereitschaft etablierter Fluggesellschaften angewiesen.

Darüber hinaus ist eine kostenfreie Lizenzvergabe vorstellbar. Mit der Zuweisung eines Slots durch den Flughafenkoordinator werden dabei gleichzeitig die notwendigen Lärmlizenzen für die entsprechende Flugbewegung zur Verfügung gestellt. Ebenso wie die Kompensationslösung widerspricht die Gratisvergabe jedoch dem Verursacherprinzip. Für einzelne Fluggesellschaften besteht folglich keinerlei Anreiz, geräuschärmere Flugzeuge einzusetzen.

Die bisher thematisierten administrativen Zuteilungsverfahren vermögen bereits im Ansatz nicht zu überzeugen. Ungeachtet der genannten weiteren Nachteile bergen sie das Risiko eines inflexiblen Kontingentierungssystems mit erheblichen Markteintrittsbarrieren in sich. Die beiden nachfolgend erörterten administrativen Vergabemodi sind demgegenüber deutlich marktkonformer und daher positiver einzuschätzen.

Die Ergänzung der kostenfreien Lizenzvergabe um die Komponente einer schallpegelabhängigen Gebührendifferenzierung führt zu einer Annäherung an eine verursachergerechte Kostenbelastung der Fluggesellschaften. Für die Bevölkerung hat die zusätzliche Einführung dieses preisstuernden, umweltökonomischen Instruments keine Auswirkungen, da die Obergrenze der Lärmbelastung nach wie vor durch die Fluglärmkontingentierung vorgegeben bleibt.

Des Weiteren kommt eine administrative Slotzuweisung mit Gebührenerhebung auf Basis der erforderlichen Lärmlizenzen in Betracht. Sie entspricht noch weitgehend der Grundidee von Fluglärmkontingentierungen. Hierfür ist allerdings die Möglichkeit einer Stückelung in explizite Lizenzanteile erforderlich, wie sie nach den Ausführungen in Kapitel 4.9 nur für referenzpunktgestützte Volumenkontingentierungen und spezielle Punktkontingentierungen gegeben ist.

Zudem muss ex ante der eingesetzte Flugzeugtyp bekannt sein. Derzeit ist aber umstritten, ob bei der Slotvergabe über Kapazitätserwägungen hinaus der Flugzeugtyp berücksichtigt werden darf [46, 71]. Die in Überarbeitung befindliche europäische Slotverordnung wird hier voraussichtlich Klarheit schaffen. Sie sieht die Festlegung des Flugzeugtyps bereits bei der Slotvergabe vor und könnte die Umwelteigenschaften damit auch zu einem Priorisierungselement machen [49, 126].

4.11.2 Lizenzhandel

Die wirtschaftstheoretisch wohl interessanteste Vergabeform ist der Handel mit Lärmlizenzen. Intendiertes Ziel hierbei ist es, Neueinsteigern einen erleichterten Marktzutritt zu verschaffen und den Wettbewerb der Fluggesellschaften untereinander zu erhöhen. Übertragbare Erfahrungen mit dem Slothandel in den USA belegen allerdings, dass der Handel die Marktmacht der etablierten Fluggesellschaften eher gefestigt hat [122].

Aber auch weitere Gründe stehen einem Einsatz des Lizenzhandels im Rahmen von Fluglärmkontingentierungen entgegen. So sind die notwendigen Voraussetzungen für eine explizite Anteilstückelung, wie in Kapitel 4.9 gezeigt wurde, lediglich bei referenzpunktgestützten Volumenkontingentierungen und mit deutlichen Einschränkungen bei speziellen Punktkontingentierungen gegeben.

Die mitunter vorgeschlagene Ergänzung der Slotkoordination durch einen Lärmlizenzhandel trägt zwar formal der gewünschten Vereinbarkeit beider Verfahren Rechnung. Doch führt die Notwendigkeit von komplementären Slots und entsprechenden Lärmlizenzen zu einem kaum mehr handhabbaren System [211]. Der Handel einer Kombination von Slot und Lärmlizenz erweist sich allein schon wegen der engen zeitlichen Befristung der Lizenzen als nicht sinnvoll umsetzbar.

Der gelegentlich thematisierte Ersatz des Verfahrens der Slotkoordination durch einen Lärmlizenzhandel konterkariert schließlich alle Bemühungen, eine Kapazitätsoptimierung der knappen Flughafeninfrastrukturen zu erreichen. Aber auch Sicherheitsaspekte sprechen gegen ein derartiges Ansinnen. Denn Slots tragen durch die Berücksichtigung des Zeitfaktors und der Flugzeuggröße maßgeblich dazu bei, die akute kapazitive Überlastung eines Flughafens zu vermeiden.

4.11.3 Laissez-faire-Prinzip

Anders als bei den übrigen vorgestellten Alternativen einer Lizenzvergabe wird beim Laissez-faire-Prinzip lediglich die Obergrenze einer Fluglärmlizenzkontingentierung administrativ vorgegeben. Die weitere Vergabeprozedur wird vollständig den Fluggesellschaften überlassen. Das Laissez-faire-Prinzip bildet damit sehr weitgehend eine rein marktwirtschaftliche Vorgehensweise ab.

Die Fluggesellschaften selbst sind demnach gehalten, angemessene und sachgerechte Verteilungsverfahren zu entwickeln, die darüber hinaus das Ausnutzen einer marktbeherrschenden Stellung ebenso verhindern wie Absprachen, die Neueinsteigern den Marktzutritt erschweren oder sogar unmöglich machen. Zudem sind Sanktionsmechanismen für den Fall einer Nichteinhaltung der getroffenen Vereinbarungen vorzuhalten.

In Anbetracht des zunehmenden Konkurrenz- und Kostendrucks der Fluggesellschaften erscheint es aber eher unwahrscheinlich, dass im Zuge der Selbstorganisation eine wirklich faire Vergabe für alle Marktteilnehmer garantiert werden kann. Dem kann auch eine konsequente Anwendung des Wettbewerbs- und Kartellrechts nicht nachhaltig abhelfen.

Die bereits oben erläuterte Notwendigkeit der Vereinbarkeit von Slotkoordination und Lizenzvergabe erweist sich ebenfalls als abträglich. Denn diese kann hier allenfalls dann erreicht werden, wenn beide Prozeduren nach dem Laissez-faire-Prinzip integriert werden. Dem stehen jedoch massive negative Folgen für den internationalen Luftverkehr entgegen. Eine Verwendung des Laissez-faire-Prinzips im Rahmen von Fluglärmlizenzkontingentierungen erscheint daher nicht sinnvoll.

4.11.4 Erstvergabe

Die Vergabe von Lizenzen bei der erstmaligen Einführung einer Fluglärmkontingentierung ist insofern von Bedeutung, als die bereits erörterte Bestandsschutzproblematik hier in besonderer Weise offenkundig wird. Anders als es bei einem Lizenzhandel oder dem Laissez-faire-Prinzip zu erwarten gewesen wäre, treten bei den für eine Vergabe letztlich infrage kommenden administrativen Zuteilungsverfahren eine Reihe von Ausgestaltungshemmnissen nicht auf.

Insbesondere gestaltet sich die Erstvergabe dann unkritisch, wenn die für eine Deckung der Nachfrage erforderlichen Lärmlizenzen die festgelegte Obergrenze nicht überschreiten. Bei Lizenzknappheit ist hingegen mit erheblichen Schwierigkeiten zu rechnen. Durch angemessene Vorlaufzeiten können sich die Fluggesellschaften zwar auf die veränderte Situation einstellen. Doch neben gegebenenfalls vorhandenem Bestandsschutz bleibt das Problem einer wettbewerbsneutralen und diskriminierungsfreien Lizenzvergabe bestehen.

Ein sukzessiver Reduktionsprozess auf das vorgesehene Zielwertniveau, der im Prinzip der in Kapitel 4.14 erläuterten Dynamisierung gleichkommt, kann möglicherweise in Verbindung mit Härtefallregelungen und Entschädigungszahlungen zu einem für die Fluggesellschaften akzeptablen Kompromiss beitragen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein derartiger Lösungsansatz weit reichende juristische und politische Fragen aufwerfen wird.

4.11.5 Lizenzübertrag

Kapitel 4.10 hat gezeigt, dass die Befristung der Lizenzlaufzeit auf den Bemessungszeitraum bestmöglich für Fluglärmkontingentierungen geeignet ist. Ein Übertrag von bereits durch Fluggesellschaften erworbenen expliziten Lizenzen auf die nächste oder übernächste Bemessungsperiode scheidet demnach aus. Bei impliziten Lizenzen stellt sich das Problem in dieser Form naturgemäß nicht.

Zu klären bleibt allerdings, wie im praktischen Flugbetrieb mit einem positiven oder negativen Übertrag von Teilen des Gesamtkontingents umgegangen werden soll. So ist bei einer Ex-ante-Bemessung in Not- und Katastrophenfällen ebenso wie bei einer Ex-post-Bemessung eine geringfügige Überschreitung der Obergrenze nicht definitiv auszuschließen.

Um eine gezielte Fehlnutzung zu unterbinden, sollten die zusätzlich benötigten Lizenzen auf die zur Planung anstehende Bemessungsperiode angerechnet werden. Demgegenüber sollten Kontingenteile, die nicht vollständig ausgeschöpft wurden, in vollem Umfang der Bevölkerung zugute kommen. Ein sachgerecht festgelegter Zielwert steht hier einer Erhöhung der Obergrenze entgegen.

4.11.6 Ausnahmen

Um die Akzeptanz einer Fluglärmkontingentierung in der Bevölkerung nicht zu gefährden, sollten Ausnahmen von der Lizenzvergabe so weit wie möglich vermieden werden. Für schwer planbare Flüge in Not- und Katastrophenfällen sowie für Flüge zur Erfüllung polizeilicher oder militärischer Aufgaben können Lizenzen vorgehalten werden. Um den erforderlichen Lizenzbedarf abzuschätzen, kann in der Regel auf Erfahrungswerte aus der Vergangenheit zurückgegriffen werden.

Lizenzhandel und Laissez-faire-Prinzip sind – wie oben ausgeführt – als Verfahren einer wettbewerblich organisierten Lizenzvergabe ungeeignet. Damit entfallen Ausnahmeregelungen, wie sie aufgrund des Chicagoer Abkommens für den nicht-kommerziellen und den gewerblichen Gelegenheitsluftverkehr erforderlich gewesen wären [23,24]. Gleichwohl sind für Flugbewegungen des Gelegenheitsluftverkehrs im Kontingent entsprechende Reserven einzuplanen.

Anders als bei der EU-weiten Ausmusterung der Kapitel-2-Flugzeuge sollten auch für Fluggesellschaften aus Entwicklungsländern keine Sonderregelungen gelten. Ihre schwierige wirtschaftliche Situation bedingt häufig den Einsatz älterer Flugzeuge, die nicht dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Eine Nichtberücksichtigung innerhalb einer Fluglärmkontingentierung wäre jedoch gerade deshalb höchst kontraproduktiv.

4.11.7 Diskussion

Unter den derzeitigen Rahmenbedingungen kann eine Lizenzvergabe sachgerecht nur durch administrative Zuteilung erfolgen. Neben der wenig zielführenden Gratisvergabe kommt eine Bepreisung anhand schallpegelabhängiger Gebührendifferenzierungen in Betracht. Referenzpunktgestützte Volumenkontingentierungen und spezielle Punktkontingentierungen erlauben darüber hinaus eine marktkonforme Vergabe auf Basis der benötigten Lizenzanteile.

Ein Ersatz oder eine Ergänzung des Verfahrens der Slotkoordination durch einen Lärmlizenzhandel erscheint angesichts der massiven Ausgestaltungsprobleme, der kapazitiven Engpässe der europäischen Flughafeninfrastruktur sowie der weltweiten Verflechtung des Luftverkehrs derzeit ausgeschlossen. Fluglärmkontingentierungen sind insoweit nur als ergänzendes Kontrollinstrument zu betrachten.

Bei der Erstvergabe machen sich erhebliche rechtliche Hemmnisse bemerkbar, sobald ein höherer Lizenzbedarf erforderlich ist, als nach der abzusichernden Obergrenze zur Verfügung steht. Überträge von Lizenzen sollten ebenso wie Ausnahmeregelungen im Interesse des Akzeptanzerhalts einer Fluglärmkontingentierung sehr rigide gehandhabt werden.

4.12 Überwachung

Das Vertrauen in die garantierte Einhaltung der mit einer Fluglärmkontingentierung quantitativ festgelegten Obergrenze der Lärmbelastung ist wesentliche Grundlage ihrer Akzeptanz in der betroffenen Bevölkerung. Der Überwachung einer Fluglärmkontingentierung ist deshalb ein hoher Stellenwert beizumessen.

Insbesondere muss die überwachende Stelle über hinreichende Sanktionsmöglichkeiten und Durchsetzungskompetenz verfügen, um Überschreitungen bei Ex-ante-Bemessungen im Vorfeld verhindern oder im Fall von Ex-post-Bemessungen im Nachhinein ahnden zu können.

Im Folgenden werden Handlungsoptionen erörtert, die sich diesem Themenkomplex aus unterschiedlichen Richtungen nähern. In Betracht gezogen werden neben dem Flughafenunternehmen die Fluglärmkommission, der Flughafenkoordinator sowie die Genehmigungs- oder Planfeststellungsbehörde.

Die Sachargumente werden in einer Diskussion abschließend zusammengefasst.

4.12.1 Flughafenunternehmen

Fluglärmkontingentierungen zielen auf die Begrenzung der von rollenden, startenden, landenden oder in geringer Höhe fliegenden Flugzeugen induzierten Lärmwirkungen im Umfeld eines Flughafens. Von daher liegt es nahe, das betreffende Flughafenunternehmen zur Überwachung ihrer Einhaltung zu verpflichten.

Das Bundesverwaltungsgericht hat 1991 in einer Entscheidung zum Flughafen München allerdings klargestellt, dass dem Flughafenunternehmer nur solche Maßnahmen auferlegt werden dürfen, die er auch in rechtlich zulässiger Weise durchzusetzen vermag [22, 31].

Dazu gehört nach Auffassung des Gerichts jedenfalls keine Fluglärmkontingentierung, die auf unmittelbar kapazitätssteuernden Koordinierungseckwerten oder der Festschreibung eines Dauerschallpegels beruht. Denn es fehlen dem Flughafenunternehmen trotz Bereitstellung der erforderlichen Anlagen rechtliche Möglichkeiten, die Einhaltung der Maßnahmen zu gewährleisten [22, 31, 217].

Die Einflussmöglichkeiten des Flughafenunternehmens auf Stellen, die mit Hilfe seiner Informationen eine Einhaltung des vereinbarten Lärmbelastungsniveaus herbeiführen könnten, sind äußerst gering. Darüber hinaus lässt sich rechtliche Verbindlichkeit mit einem derartigen Vorgehen wohl kaum erzielen. Die alleinige Wahrnehmung einer Überwachungsfunktion durch das Flughafenunternehmen scheidet daher aus.

4.12.2 Fluglärmkommission

Die Kommission nach § 32b LuftVG berät sowohl die Genehmigungsbehörde als auch die für die Flugsicherung zuständige Stelle bei Maßnahmen zum Schutz gegen Fluglärm in der Umgebung von Verkehrsflughäfen. Die Fluglärmkommission ist darüber hinaus berechtigt, geeignete Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor Fluglärm vorzuschlagen. Anträge auf Anlage oder Erweiterung eines Flugplatzes sind ihr vor Erteilung der Genehmigung mit den vorgeschriebenen Unterlagen zuzuleiten [158].

Vor diesem fachspezifischen Hintergrund kann auch die Übertragung einer Überwachungsaufgabe erwogen werden. Gleichwohl sprechen zwei gewichtige Gründe dagegen. Zum einen hat die Fluglärmkommission ausschließlich beratende Funktion, sodass es ihr an faktischer Durchsetzungskompetenz fehlt. Zum anderen ist die Mitgliedschaft in der Kommission ehrenamtlich. Ein Mitarbeiterstab ist nicht vorgesehen. Die Sicherstellung eines geordneten Flugbetriebs im Rahmen einer Fluglärmkontingentierung ist auf dieser Basis nicht zu leisten.

4.12.3 Flughafenkoordinator

Die Übernahme einer Überwachungsfunktion durch den Flughafenkoordinator kommt ebenfalls in Betracht. Schließlich laufen nur dort alle Informationen über koordinierte Flugbewegungen bereits deutlich vor der eigentlichen Flugdurchführung zusammen.

Ex-ante-Bemessungen ohne eine aktive Beteiligung des Flughafenkoordinators sind schon deshalb nicht umsetzbar. Doch auch für Fluglärmkontingentierungen im Allgemeinen ist eine effektive Umsetzung ohne enge Einbindung des Flughafenkoordinators nicht denkbar.

Der Flughafenkoordinator kommt als alleiniger Adressat für eine Überwachung allerdings nicht infrage. Denn er ist nach § 31d Abs. 2 LuftVG ausschließlich an Weisungen des Bundes, im Speziellen des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, gebunden. Entscheidungen der Genehmigungs- oder Planfeststellungsbehörden der Länder können also an den Flughafenkoordinator nur indirekt herangetragen werden. Eine den Bund rechtlich bindende Grundlage für ein entsprechendes Vorgehen gibt es nicht [22, 158].

Werden Fluglärmkontingentierungen dogmatisch als Bestandteil der Zulassungsentscheidung begriffen, tritt die Relevanz derartiger Konstellationen in den Hintergrund. Der Bund als Planbetroffener hat nämlich dann bei seiner Aufgabenwahrnehmung die administrativ vorgegebene Begrenzung zu berücksichtigen und den Flughafenkoordinator entsprechend zu instruieren [22].

4.12.4 Genehmigungs-/Planfeststellungsbehörde

In der bereits zitierten Entscheidung des Bundesverwaltungsgerichts zum Flughafen München ist die Zulässigkeit der Verpflichtung eines Flughafenunternehmers zur Einführung einer Fluglärmkontingentierung verneint worden. Die Genehmigungs- oder Planfeststellungsbehörde selbst kann derartige Betriebsregelungen jedoch in Form allgemeingültiger Auflagen aussprechen [22, 31, 217].

Der Begriff der allgemeingültigen Auflage in inhaltlicher Erweiterung des § 6 Abs. 1 S. 4 LuftVG ist erst mit dieser Gerichtsentscheidung aufgekommen. Im Gegensatz zu Auflagen im üblichen Verständnis, die sich gerade durch die Wirkung auf einen bestimmten Adressaten auszeichnen, entfalten allgemeingültige Auflagen eine Bindungswirkung gegenüber einem größeren Adressatenkreis und werden insoweit Bestandteil der Gesamtentscheidung [22].

Die Genehmigungs- oder Planfeststellungsbehörde hat über diese Form der Betriebsregelung die Möglichkeit, alle für die Überwachung einer Fluglärmkontingentierung erforderlichen Beteiligten koordiniert zusammenzubringen. Denn erst durch die Abstimmung und Bündelung der Einzelkompetenzen wird hinreichende Durchsetzungsfähigkeit und effizientes Umsetzungsvermögen erlangt.

Insbesondere die Beteiligung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und damit vor allem des Flughafenkoordinators, des Flughafenunternehmens sowie der Genehmigungs- oder Planfeststellungsbehörde selbst erscheinen in höchstem Maß sinnvoll.

4.12.5 Diskussion

Die obigen Ausführungen zeigen, dass ein Adressat alleine nicht in der Lage ist, die umfangreichen Überwachungsfunktionen für eine Fluglärmkontingentierung sachgerecht auszuüben. Vielmehr ist zumindest die Abstimmung von Flughafenkoordinator, Flughafenunternehmen sowie Genehmigungs- oder Planfeststellungsbehörde erforderlich.

Das Bundesverwaltungsgericht hat 1991 mit der Einführung der allgemeingültigen Auflage den Weg für ein derartiges Vorgehen geebnet. Diese kann nicht nur einen bestimmten Adressaten, sondern einen ganzen Kreis von relevanten Adressaten einbinden und zur gemeinsamen Überwachung der Einhaltung verpflichten [31].

Voraussetzung für diese koordinierten Aktivitäten sind allerdings konkret formulierte Auflagen, die nicht nur die Beteiligten und ihre Kompetenzen eindeutig identifizieren, sondern auch eine klare Aufgaben- und Rollenverteilung mit hinreichend fixierten Zeithorizonten vornehmen.

4.13 Implementierung

Kapitel 4.12 hat bereits am Rande einige Fragen der Implementierung von Fluglärmlärmkontingentierungen tangiert. Hier geht es nun gezielt um Möglichkeiten, Fluglärmlärmkontingentierungen sachgerecht und planungssicher zu verankern.

Dabei lassen sich im Wesentlichen zwei unterschiedliche Wege beschreiten. Betriebsregelungen entfalten eine weit reichende rechtliche Bindewirkung, während freiwillige Selbstverpflichtungen sich gerade durch den fehlenden Rechtscharakter auszeichnen. Beide Varianten werden auf den folgenden Seiten thematisiert.

Mit einer kurzen Diskussion schließt das Kapitel.

4.13.1 Luftrechtliche Betriebsregelung

Betriebliche Einschränkungen können nach einer Entscheidung des Bundesverfassungsgerichts bei der Anlage oder Erweiterung von Flughäfen im Rahmen der luftverkehrsrechtlichen Genehmigung und der Planfeststellung als Auflagen zur Limitierung der Lärmbelastung in der Flughafenumgebung angeordnet werden [30]. Als rechtliche Grundlage für die Anordnung einer Nutzungsbegrenzung kommen theoretisch vier unterschiedliche Ansätze infrage [22].

Eine Auflage nach § 6 Abs. 1 S. 4 LuftVG wird im Rahmen der Genehmigung an ein Flughafenunternehmen gerichtet. Dieses setzt die Auflage über die Bekanntmachung in der Flughafenbenutzungsordnung gegenüber den Fluggesellschaften und weiteren Flughafenutzern um. Bereits in Kapitel 4.12 war jedoch konstatiert worden, dass es einem Flughafenunternehmen an rechtlichen Möglichkeiten mangelt, die Einhaltung einer Fluglärmlärmkontingentierung zu garantieren.

Echte Schutzaufgaben nach § 9 Abs. 2 LuftVG können dem Flughafenunternehmen im Planfeststellungsbeschluss auch in Form von Betriebsregelungen aufgegeben werden. Das Bundesverwaltungsgericht verneint jedoch die Zulässigkeit der Anordnung von Schutzaufgaben, solange es sich hierbei nicht um die einzig rechtmäßige Möglichkeit planerischer Problembewältigung handelt. Darüber hinaus fehlt es dem Flughafenunternehmen ebenso wie bei den oben diskutierten Auflagen nach § 6 Abs. 1 S. 4 LuftVG an Durchsetzungskompetenz [31, 92].

In der schon mehrfach zitierten Entscheidung zum Flughafen München hat das Bundesverwaltungsgericht 1991 mit der Verankerung einer allgemeingültigen Auflage nach § 8 Abs. 1 LuftVG in Verbindung mit § 6 Abs. 1 S. 4 und Abs. 4 S. 1 LuftVG die Basis für eine neue Form von Auflagen gelegt, die einem größeren Adressatenkreis gegenüber allgemeine Bindungswirkung entfaltet. Erst hierdurch können alle relevanten Beteiligten zu einem

koordinierten Vorgehen bei der Umsetzung einer Fluglärmkontingentierung verpflichtet werden [31].

Schließlich kommt eine modifizierende Auflage oder Teilgewährung in Betracht. Während bei Teilgewährungen dem Antrag nicht in vollem Umfang entsprochen wird, erfolgt bei modifizierenden Auflagen eine inhaltlich abweichende Entscheidung. Beiden Varianten ist gemeinsam, dass ein über diese Beschränkung hinausgehender Betrieb nicht genehmigt beziehungsweise planfestgestellt ist [22].

Nach umfangreichen Analysen kommt BIDINGER zu dem Schluss, dass die Anordnung kapazitätsbeschränkender Maßnahmen über Auflagen gemäß § 6 Abs. 1 S. 4 LuftVG und über Schutzauflagen gemäß § 9 Abs. 2 LuftVG fehlschlägt. Eine effiziente Implementierung sei vielmehr nur über Teilgewährungen zu erreichen. HERMANN hingegen verteidigt die Anordnung von Fluglärmkontingentierungen als echte Schutzaufgabe nach § 9 Abs. 2 LuftVG [22, 92].

Das Bundesverwaltungsgericht folgt mit seiner Rechtsprechung beiden Auffassungen nicht. Betriebliche Einschränkungen in Form von Fluglärmkontingentierungen können demnach nicht als Schutzaufgabe gemäß § 9 Abs. 2 LuftVG, aber sehr wohl im Wege einer allgemeingültigen Auflage nach § 8 Abs. 1 LuftVG in Verbindung mit § 6 Abs. 1 S. 4 und Abs. 4 S. 1 LuftVG als gleichsam dingliche Begrenzung der Anlage verbindlich festgelegt werden [31, 152].

Wird eine Fluglärmkontingentierung über eine Änderung von Betriebsregelungen, die Gegenstand der Planfeststellung sind, eingeführt, bedarf es nach § 8 Abs. 4 S. 2 LuftVG nur einer Änderungsgenehmigung gemäß § 6 Abs. 4 S. 2 LuftVG. Ein Planfeststellungsverfahren ist daher nicht erforderlich.

4.13.2 Freiwillige Selbstverpflichtung

Als Alternative zu Betriebsregelungen mit rechtlicher Bindewirkung kommen auch freiwillige Selbstverpflichtungen in Betracht. Damit diese Selbstverpflichtungen bei der Bevölkerung die gewünschte Akzeptanz finden, müssen sie konsensfähig sein. Dieser Konsens kann beispielsweise im Rahmen von Mediationsverfahren hergestellt werden. Sie bieten den Betroffenen Möglichkeiten der Partizipation und Sachverhaltsklärung, wie sie üblicherweise nicht gegeben sind [155].

Dabei genügt es jedoch nicht, allein mit dem betreffenden Flughafen eine Selbstverpflichtung zu vereinbaren. Vielmehr ist es erforderlich, zumindest alle regelmäßig auf dem Flughafen verkehrenden Fluggesellschaften in ein derartiges Abkommen einzubeziehen und sie verbindlich auf die Einhaltung der verabredeten Prozeduren festzulegen.

Eine Begleitung des Verfahrens durch den Flughafenkoordinator sowie die Genehmigungs- oder Planfeststellungsbehörde bietet sich im Sinne des bereits in Kapitel 4.12 beschriebenen koordinierten Vorgehens an. Selbstverpflichtungen entfalten zwar keine rechtlich bindenden Wirkungen, aber sie können nur dann nachhaltig erfolgreich sein, wenn sie mit der gleichen Ernsthaftigkeit und Konsequenz ausgearbeitet und umgesetzt werden wie Betriebsregelungen.

Freiwilligen Selbstverpflichtungen werden in der allgemeinen öffentlichen Debatte häufig nicht nur effiziente, marktwirtschaftliche Lösungen für festgefahrene umweltpolitische Diskussionen zugeschrieben. Auch nach dem Subsidiaritätsprinzip sollen sie prädestiniert sein, Interessenskonflikte auszugleichen und Umsetzungshemmnisse zu beseitigen.

HOLZHEY & TEGNER kommen in ihrer wissenschaftlichen Ausarbeitung zu vollständig anderen Ergebnissen [94]. Sie halten schon die behauptete Freiwilligkeit von Selbstverpflichtungen für fragwürdig, da die Einwilligung in ein derartiges Vorgehen nur der Befürchtung noch einschneidenderer Alternativen entspringe.

Trotz offensichtlicher Akzeptanzvorteile sehen sie Selbstverpflichtungen in der Regel mit ökologischen Zieleinbußen, Beeinträchtigungen des Wettbewerbs und Gefahren für die marktwirtschaftliche Ordnung verbunden. Nach ihren Analysen sind Selbstverpflichtungen insgesamt weder freiwillig noch marktwirtschaftlich noch a priori effizient. Von ihrem Einsatz raten sie daher dringend ab.

4.13.3 Diskussion

Im Zuge der Anlage oder Erweiterung von Flughäfen können bei der luftverkehrsrechtlichen Genehmigung und der Planfeststellung Auflagen zur Minimierung der Lärmbelastung in der Flughafenumgebung angeordnet werden [30].

Betriebliche Einschränkungen in Form von Fluglärmkontingentierungen können nach der Rechtsprechung des Bundesverwaltungsgerichts allerdings nicht als echte Schutzauflage gemäß § 9 Abs. 2 LuftVG, sondern nur im Wege einer allgemeingültigen Auflage nach § 8 Abs. 1 LuftVG in Verbindung mit § 6 Abs. 1 S. 4 und Abs. 4 S. 1 LuftVG verbindlich festgelegt werden [31, 152].

Freiwillige Selbstverpflichtungen stellen zu den rechtlich bindenden Betriebsregelungen keine echte Alternative dar. Zu dieser Einschätzung führen sowohl Zweifel an der Durchsetzbarkeit der Einhaltung einer Fluglärmkontingentierung auf breiter Basis als auch an der inhaltlichen Tragfähigkeit des Instrumentes selbst.

Mediationsverfahren können dessen ungeachtet im politischen Entscheidungsprozess bei der Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen hilfreich sein. Für die Bevölkerung gibt es kaum umfassendere Möglichkeiten einer direkten Beteiligung.

4.14 Dynamisierung

Eine Verbesserung des allgemeinen Lärmbelastungsniveaus durch die Weitergabe des technischen Fortschritts an die Bevölkerung, wie sie der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen fordert [41], kann grundsätzlich durch die Dynamisierung einer Fluglärmkontingentierung erreicht werden.

In absehbarer Zeit sind allerdings keine revolutionären Geräuschminderungsmaßnahmen im operationellen Betrieb zu erwarten. Aufgrund des weiter zunehmenden Luftverkehrsaufkommens ist deshalb zukünftig wieder mit einer Verschlechterung des Lärmklimas in der Flughafenumgebung zu rechnen, sodass bereits die Einhaltung einer fixen Kontingentierung eine enorme Herausforderung bedeutet.

Die folgenden Abschnitte erläutern die Möglichkeiten einer Dynamisierung mittels Zielwertreduktion, Lizenzentnahme oder Lizenzabwertung. Dabei wird eine im Ausgangszustand funktionierende Kontingentierung vorausgesetzt. Die konkrete Umsetzung ist im Rahmen der Implementierung zu regeln.

Wesentliche Aussagen werden abschließend noch einmal zusammengefasst.

4.14.1 Zielwertreduktion

Eine Reduktion des Zielwertes steht für die direkte Umsetzung der Dynamisierung einer Fluglärmkontingentierung. Sie unterliegt hinsichtlich der übrigen Ausgestaltungselemente keinen nennenswerten Einschränkungen.

4.14.2 Lizenzentnahme

Die partielle Entnahme von Lärmlizenzen aus der Gesamtmenge führt auf indirektem Weg zu einer Zielwertreduktion. Sie kann nur bei Limitierungstypen und quantitativen Stückelungsverfahren in Erwägung gezogen werden, die auf expliziten Lizenzen basieren.

Auch der staatliche oder private Aufkauf einer begrenzten Lizenzmenge mit dem Ziel einer dauerhaften Nichtnutzung, also einer De-facto-Umkehrung des Verursacherprinzips, ist in diesem Zusammenhang grundsätzlich vorstellbar. Indes ist auf die Vereinbarkeit mit dem gewählten Vergabeverfahren zu achten. Die Reinvestition der Verkaufserlöse in passive Lärmschutzmaßnahmen ist anzustreben.

Ein echter Lärmlizenzhandel ist – wie Kapitel 4.11 deutlich gezeigt hat – unter den derzeitigen Rahmenbedingungen nicht sachgerecht durchführbar. Auf die Diskussion spezifischer Besonderheiten kann hier deshalb verzichtet werden.

4.14.3 Lizenzabwertung

Die Rückgewinnung von Lärmlizenzen über ihre regelmäßige Abwertung nach jedem Bemessungszeitraum wurde bereits in Kapitel 4.10 als Alternative zu einem unmittelbar zeitlich befristenden Ansatz erörtert. Werden die freien Lizenzanteile nicht wieder komplett in den Lizenzpool eingestellt, kann hierüber das Lärmbelastungsniveau ebenfalls reduziert werden.

Allerdings hat sich im Verlauf der vorliegenden Arbeit gezeigt, dass eine Befristung der Lizenzlaufzeit auf einen Zeitraum, der dem Bemessungszeitraum entspricht, am ehesten den gestellten Anforderungen gerecht wird. Damit scheidet eine Abwertung von Lizenzen über mehrere Bemessungsperioden aus.

Dennoch ist das Verfahren der Lizenzabwertung eine umweltökonomisch interessante Variante einer mittelbaren zeitlichen Befristung, das bei der Slotvergabe durchaus seine Berechtigung haben mag. Bei Fluglärmkontingentierungen führt es indes zu weit.

4.14.4 Diskussion

Die Dynamisierung einer Fluglärmkontingentierung mit dem Ziel einer Reduktion der Lärmbelastung in der Flughafenumgebung bereitet in der Ausgestaltung keine Probleme, solange die festgelegte Obergrenze der Kontingentierung noch nicht erreicht ist.

In Abhängigkeit vom Limitierungstyp und von den Möglichkeiten einer quantitativen Stückelung kann die gewünschte Absenkung des Lärmniveaus entweder mittels Zielwertreduktion oder Lizenzentnahme erreicht werden. In ihren Auswirkungen sind beide Maßnahmen gleichwertig. Das Verfahren der Lizenzabwertung erscheint vor dem Hintergrund der ohnehin schon komplexen Ausgestaltung von Fluglärmkontingentierungen zu aufwändig.

Im Fall der Knappheit von expliziten oder impliziten Lärmlizenzen ist mit erheblichen Schwierigkeiten bei einer Dynamisierung zu rechnen, die denen einer Erstvergabe unter ähnlichen Voraussetzungen gleichen. Zwar können sich die Fluggesellschaften durch eine frühzeitige Ankündigung auf die veränderte Situation vorbereiten. Doch bleibt das Problem einer wettbewerbsneutralen und diskriminierungsfreien Lizenzvergabe ebenso bestehen wie gegebenenfalls vorhandener Bestandsschutz.

Für Fluglärmkontingentierungen ergeben sich hieraus nicht vernachlässigbare Planungsunsicherheiten infolge rechtlicher Hemmnisse. Die diesbezüglichen Ausführungen in Kapitel 4.11.4 gelten hier analog.

5 Schlussfolgerungen für die Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen

In Kapitel 4 wurde in allen wesentlichen Handlungsfeldern, beginnend bei den Maximen bis hin zu einer denkbaren Dynamisierung, systematisch ein Rahmen für die Entwicklung von Fluglärmkontingentierungen erarbeitet.

Hieraus lassen sich übergeordnete Schlussfolgerungen ableiten, die im Folgenden zu konkreten Ausgestaltungsoptionen verdichtet werden. Dabei wird besonderer Wert auf die Berücksichtigung der komplexen Interdependenzen zwischen den einzelnen Handlungsfeldern gelegt. Auch Ausgestaltungsprobleme und Lösungspotenzial werden thematisiert.

5.1 Ausgestaltungsoptionen

Die angemessene Abbildung ökologischer und sozialer Interessen in der Zielgröße einer Fluglärmkontingentierung ist Basis jeder weiteren Ausgestaltung. Belästigung und Schlafstörungen sind Fluglärmwirkungen, die diesen Anspruch besonders gut erfüllen. Die Entscheidung für eine der beiden Zielgrößen hängt primär von der Verkehrsverteilung und -zusammensetzung sowie den spezifischen örtlichen Gegebenheiten ab.

Fluglärmwirkungen entziehen sich jedoch einer kontinuierlichen und flächendeckenden Erfassung, sodass sie nur indirekt über Fluggeräuschmissionen kontingentiert werden können. Dabei kommt eine Absicherung des Zielwertes auf zwei unterschiedlichen Belastungsniveaus in Betracht. Mit dem Schutzkonzept werden Gesundheitsgefährdungen oder -beeinträchtigungen anvisiert, während das Präventivkonzept auf einen vorbeugenden Gesundheitsschutz und eine nachhaltige Akzeptanzsicherung auf breiter Basis ausgerichtet ist.

Unabhängig vom gewählten Belastungsniveau ist für die künftigen Randbedingungen einer Fluglärmkontingentierung ein sachgerechter und planungssicherer Zielbezug als Vergleichsmaßstab von eminenter Bedeutung. In Abhängigkeit von der konkreten Situation kann auf ein tatsächliches oder modifiziertes Bezugsjahr ebenso zurückgegriffen werden wie auf ein Prognosejahr. Dabei sind repräsentative Aussagekraft und charakteristische Belastungskennzeichnung notwendige Voraussetzungen.

Besonderen Einfluss auf die weiteren Ausgestaltungsmöglichkeiten von Fluglärmkontingentierungen hat der Limitierungstyp. Er ist eng verbunden sowohl mit

der quantitativen Stückelung als auch mit dem Modus der Lizenzvergabe und bestimmt deshalb in wesentlichem Umfang ihren Handlungsrahmen.

In diesem Zusammenhang führt der potenzielle Einsatz marktwirtschaftlicher Vergabeverfahren für lärmabhängige Lizenzen zu erheblichen Restriktionen. Denn er erfordert eine Stückelung der durch die Obergrenze der Fluglärmkontingentierung definierten Gesamtmenge in flugbewegungsspezifische Anteile.

Diese Einschränkung gilt nicht nur für den Handel mit Lärmlizenzen, sondern betrifft auch andere marktnahe Vergabeformen, wie etwa die Bepreisung anhand des Lizenzbedarfs. Sie können angemessen allenfalls in Verbindung mit referenzpunktgestützten Volumenkontingentierungen oder speziellen Punktkontingentierungen eingesetzt werden. Die übrigen Limitierungstypen versagen sich dem Versuch, gestückelte Anteile in geeigneter Form abzuleiten.

Eine Erweiterung des Ausgestaltungsspektrums ist erst nach Abkehr vom Anspruch auf eine Stückelung in explizite Lizenzen für einzelne Flugbewegungen gegeben. Die dann zur Verfügung stehenden Freiheiten in der Ausgestaltung bieten vielfältige Gelegenheit, den Ausgleich konkurrierender Interessenlagen wieder stärker zu berücksichtigen. Auch die Limitierungstypen unterliegen nun keinen Beschränkungen mehr.

Dieser Paradigmenwechsel hat erhebliche Konsequenzen. Unter umweltökonomischen Aspekten verliert eine Fluglärmkontingentierung mit der direkten Mengensteuerung, also der unmittelbaren Begrenzung der Lärmmenge, das wesentliche Charakteristikum. Die Einhaltung der festgelegten Obergrenze kann somit nur noch indirekt abgesichert werden, beispielsweise durch eine Preissteuerung über schallpegelabhängige Gebührendifferenzierungen, Modifikationen des Koordinierungsseckwertes oder andere betriebliche Nutzungseinschränkungen.

Die indirekte Steuerung kann allerdings bei angemessener Ausgestaltung mit konsequenter Überwachung und frühzeitiger Information über den Ausnutzungsgrad der Kontingentierung nahezu gleichwertig mit der Mengensteuerung für die Einhaltung garantieren. Für die Bevölkerung im Flughafenumland, deren primäres Interesse die Begrenzung des Fluglärms auf einem definierten Niveau und erst nachrangig die konkrete Steuerungsmethode ist, sind die Details des modifizierten Ansatzes daher weitgehend irrelevant.

Die ordnungsgemäße Planung und Durchführung des Luftverkehrs erfordert einen langfristigen, auf zumindest mehrere Monate abhebenden Horizont. Dem stehen die hier wesentlichen Zielgrößen aus dem Bereich der Fluglärmwirkungen nicht entgegen. Unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Schwankungen des Verkehrsaufkommens sowie der Planungszyklen der am Luftverkehr Beteiligten scheint ein Bemessungszeitraum, der sich mit den Flugplanperioden deckt, daher am besten geeignet.

Bemessungssituation und Bemessungsmethodik sind in hohem Maß abhängig von den konkreten Ausgestaltungserfordernissen, die sich auch in dem gewählten Belastungsniveau, dem Limitierungstyp und dem Vergabeverfahren niederschlagen.

Für den zeitlichen Vergabehorizont der Lizenzen an die Fluggesellschaften ist eine Befristung angeraten. Sie entspricht im Idealfall dem Bemessungszeitraum. Gegebenenfalls vorhandener Bestandsschutz kann über geeignete Priorisierungsverfahren bei der Lizenzvergabe gewährleistet werden.

Die Vergabe der expliziten oder impliziten Lärmlizenzen kann unter den derzeitigen Rahmenbedingungen nur durch administrative Zuteilung erfolgen. Dabei ist neben der Gratisvergabe auch eine Bepreisung mittels schallpegelabhängiger Gebührendifferenzierungen denkbar. Wie oben bereits erwähnt, erlauben Volumenkontingentierungen auf Referenzpunktbasis und spezielle Punktkontingentierungen darüber hinaus eine marktkonforme Bepreisung der benötigten Lizenzanteile.

Ein Ersatz oder eine Ergänzung des Verfahrens der Slotkoordination durch einen Lärmlizenzhandel erscheint angesichts der massiven Ausgestaltungsprobleme, der kapazitiven Engpässe der europäischen Flughafeninfrastruktur sowie der weltweiten Verflechtung des Luftverkehrs derzeit ausgeschlossen. Fluglärmskontingentierungen sind insoweit nur als ergänzendes Kontrollinstrument zu betrachten.

Das Vertrauen in die Einhaltung einer Fluglärmskontingentierung ist wesentlich für die Akzeptanz in der Bevölkerung. Der Überwachung ist deshalb ein hoher Stellenwert beizumessen. Wie die vorliegende Arbeit gezeigt hat, ist ein Adressat alleine jedoch nicht in der Lage, die umfangreichen Überwachungsfunktionen sachgerecht auszuüben. Vielmehr sind alle relevanten Beteiligten gemeinschaftlich zur Überwachung zu verpflichten. Dies betrifft insbesondere den Flughafenkoordinator, den Flughafenunternehmer sowie die Genehmigungs- oder Planfeststellungsbehörde.

Die hierfür notwendige juristische Grundlage hat das Bundesverwaltungsgericht mit der allgemeingültigen Auflage geschaffen. Diese ist auch bei der rechtlichen Verankerung einer Fluglärmskontingentierung einschlägig. Auflagen und echte Schutzauflagen greifen hier ebenso wenig wie modifizierende Auflagen und Teilgewährungen. Freiwillige Selbstverpflichtungen stellen ebenfalls keine Alternative zur Bindewirkung einer luftrechtlichen Betriebsregelung dar.

Eine Verbesserung des allgemeinen Lärmbelastungsniveaus kann durch eine Dynamisierung der Fluglärmskontingentierung erreicht werden. Je nach Limitierungstyp und Vergabeverfahren kommt hierfür eine Reduktion des Zielwertes oder die partielle Entnahme von Lizenzen infrage. Solange die Obergrenze der Kontingentierung nicht erreicht ist, ist die Ausgestaltung der Dynamisierung problemlos möglich. Andernfalls ergeben sich so große rechtliche Hemmnisse, dass von einer Dynamisierung abgesehen werden sollte.

5.2 Ausgestaltungsprobleme

Die erarbeiteten Ausgestaltungsoptionen haben unterstrichen, dass es bei einer Reihe von Handlungsfeldern Probleme gibt, die das verfügbare Ausgestaltungsspektrum zum Teil erheblich einschränken. Diese Hemmnisse sind primär technischer oder rechtlicher Natur. Doch auch bei den Fluglärmwirkungen macht sich das Fehlen von belastbaren Dosis-Wirkungs-Beziehungen negativ bemerkbar.

Die für Belästigungswirkungen verfügbaren funktionalen Abhängigkeiten sind zwar mit großer Sorgfalt erstellt, basieren aber auf veralteten Daten und sind zudem mit erheblichen methodischen Unsicherheiten versehen. Für Schlafstörungen liegen derartige Funktionen nur ansatzweise vor. Fluglärmkontingentierungen sind jedoch auf valide und repräsentative Dosis-Wirkungs-Beziehungen angewiesen, um nicht ins Leere zu laufen und damit ihren Zweck zu verfehlen.

Probleme grundsätzlicher Art wirft die quantitative Stückelung in explizite Lärmlizenzanteile auf. Für Kontur- und Flächenkontingentierungen sowie den Lärm-Einwohner-Gleichwert scheidet eine sachgerechte Ableitung schon im Ansatz. Bei Punktkontingentierungen sind zumindest theoretisch Konstellationen vorstellbar, die eine Stückelung zulassen. Allerdings sind diese aufgrund ihrer speziellen Lage eher den Volumenkontingentierungen auf Referenzpunktbasis zuzurechnen.

Die Nichtverfügbarkeit expliziter Lizenzanteile beim Gros der Limitierungstypen steht marktkonformen Vergabeformen weitgehend entgegen. Zudem sind die Anforderungen und Randbedingungen der international etablierten Slotkoordination bei der Ausgestaltung von Fluglärmkontingentierungen zu beachten. Ein Handel von Lärmlizenzen scheidet deshalb auch für Volumenkontingentierungen aus.

Beim Übergang von expliziten zu impliziten Lizenzen ist der Garantie der Einhaltung besonderes Augenmerk zu widmen. Hier überlagern sich verschiedene verkehrspolitische Maßnahmen mit zum Teil unterschiedlicher Zielrichtung, deren Einsatz und rechtliche Absicherung sorgfältig überlegt sein müssen.

Komplex gestaltet sich auch die Wahrnehmung der Überwachungsfunktion. Die Länder als Genehmigungs- oder Planfeststellungsbehörden im Rahmen der Bundesauftragsverwaltung sind hier auf die Kooperation des Flughafenkoordinators angewiesen, dem nur der Bund weisungsbefugt ist. Das Flughafenunternehmen als Antragsteller wiederum hat keine rechtliche Durchsetzungskompetenz bezüglich der kapazitiven Auslastung seiner Anlagen.

Schließlich kann auch eine Dynamisierung erhebliches Problempotenzial bergen. Im Fall einer Lizenzknappheit, die in ähnlicher Form auch bei der Erstvergabe der Lizenzen auftreten kann, wird es kaum möglich sein, eine diskriminierungsfreie, wettbewerbsneutrale und transparente Vergabe sicherzustellen. Juristische Auseinandersetzungen sind damit vorprogrammiert.

5.3 Lösungspotenzial

Die aufgeworfenen Ausgestaltungsprobleme bergen – zumindest teilweise – erkennbares Lösungspotenzial, das im Folgenden erörtert wird. Aber auch verbleibende offene Fragen werden thematisiert.

Im Bereich der Fluglärmwirkungsforschung sind noch erhebliche Aufgaben zu bewältigen. Dies betrifft grundsätzlich alle in Kapitel 3.3 diskutierten Lärmwirkungen. Insbesondere für die identifizierten Zielgrößen Belästigung und Schlafstörungen sind die bestehenden Dosis-Wirkungs-Beziehungen um aktuelle Primärdaten und neue wissenschaftliche Erkenntnisse angemessen zu ergänzen.

Dabei ist nach Möglichkeiten zu suchen, wie sinkende Forschungsetats mit der zu fordernden hohen methodischen und statistischen Qualität der Studien in Einklang zu bringen sind. Allein wiederkehrende Meta- oder Re-Analysen von Altdaten und kurzfristig angelegte Drittmittelprojekte scheinen jedenfalls wenig geeignet, entscheidend zur Verbesserung des Wissensstandes beizutragen.

Die mit der quantitativen Stückelung in explizite Lärmlizenzanteile verbundenen Probleme sind grundsätzlicher Natur und lassen sich keiner Lösung zuführen. Die Vergabeverfahren konzentrieren sich dementsprechend auf Varianten der administrativen Zuteilung. Ist der Einsatz marktwirtschaftlicher Vergabeverfahren dennoch gewünscht, beschränkt sich die Auswahl der Limitierungstypen im Wesentlichen auf referenzpunktgestützte Volumenkontingentierungen.

Die Integration von Fluglärmkontingentierungen in das bestehende Verfahren der Slotkoordination wirft keine Probleme auf, solange die Anforderungen und Randbedingungen der Slotvergabe angemessen berücksichtigt werden. Fluglärmkontingentierungen sind hier als entsprechend nachgeordnet anzusehen. Vor diesem Hintergrund ist ein Lärmlizenzhandel derzeit höchst unrealistisch.

Das Bundesverwaltungsgericht hat mit seiner Entscheidung zum Flughafen München 1991 maßgeblich zur juristischen Klärung kontingentspezifischer Fragen beigetragen. Dies betrifft nicht nur die rechtliche Verankerung von Fluglärmkontingentierungen insgesamt, sondern auch die mit der allgemeingültigen Auflage aufgezeigten Optionen zur Ausgestaltung der Überwachungsfunktion. Erst hierdurch kann eine effiziente Umsetzung von Fluglärmkontingentierungen realisiert werden.

Die nicht zuletzt von Betroffenen angemahnte Dynamisierung von Fluglärmkontingentierungen mit dem Ziel einer regelmäßigen Absenkung des Lärmbelastungsniveaus hat unter der Annahme einer Knappheit der verfügbaren Lärmlizenzen kaum Aussichten auf Erfolg. Die juristischen Probleme erscheinen hier, wie auch im Fall der Erstvergabe unter vergleichbaren Rahmenbedingungen, schlichtweg zu umfangreich.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Schnelle, zuverlässige und sichere Verkehrsverbindungen sind für die gesellschaftliche, kulturelle und ökonomische Entwicklung einer modernen Volkswirtschaft unerlässlich. Dem Luftverkehr kommt bei der Deckung des wachsenden Mobilitätsbedarfs eine zentrale Bedeutung zu. Die zur nachhaltigen Sicherung der Luftverkehrsmobilität notwendige Akzeptanz auf breiter Basis kann aber nur dann erreicht werden, wenn es gelingt, die vor allem im Umfeld der Verkehrsflughäfen konfligierenden Interessen in eine für alle Beteiligten faire Balance zu bringen.

Vielversprechende Beiträge zu dieser Balance werden von verkehrspolitischen Maßnahmen erwartet, die an einer gezielten Begrenzung des Fluglärms ansetzen. Denn Fluglärm ist für die Bevölkerung die bedeutendste mit einem Flughafen verbundene Belastung. Große Hoffnungen werden dabei in Fluglärmkontingentierungen gesetzt. Sie können die schnelle und sichere Einhaltung einer quantitativ festgeschriebenen Lärmbelastung garantieren und sind daher bei angemessener Ausgestaltung anderen umweltökonomischen Maßnahmen überlegen.

Vor diesem Hintergrund erleben Fluglärmkontingentierungen seit Jahren einen regelrechten Boom, obwohl es gerade bei der Ausgestaltung immer noch zahlreiche Probleme und Unzulänglichkeiten gibt. Diese werden in den kommenden Jahren verstärkt zutage treten. Denn entgegen der Entwicklung in der zurückliegenden Dekade wird sich das Lärmklima im Umfeld der Verkehrsflughäfen künftig eher verschlechtern, sodass einzelne Kontingente voll ausgelastet sein werden und erstmals ihre Funktionsfähigkeit beweisen müssen.

Wissenschaftliche Abhandlungen haben sich bisher in erster Linie mit isolierten ökonomischen und juristischen Teilbereichen der komplexen Kontingentierungsproblematik beschäftigt. Ziel der vorliegenden Arbeit war deshalb die ergebnisorientierte Synthese dieser Erkenntnisse und ihre systematische Ergänzung zu einem integrierten Handlungsrahmen, der die Entwicklung von sachgerechten und planungssicheren Fluglärmkontingentierungen für deutsche Verkehrsflughäfen in adäquater Weise unterstützt.

Bei der sukzessiven Vorgehensweise zur Erreichung dieses Ziels wurden entlang der Kausalkette Fluggeräuschemissionen – Fluggeräuschimmissionen – Fluglärmwirkungen zunächst die maßgeblichen Determinanten von Fluglärmkontingentierungen eingehend erörtert.

Hierauf aufbauend wurde sodann in allen wesentlichen Handlungsfeldern das theoretische Potenzial von Fluglärmkontingentierungen strukturiert herausgearbeitet und auf seine praktische Relevanz überprüft. Aus den bewerteten Ergebnissen der Analyse wurde im Anschluss ein konkreter Handlungsrahmen abgeleitet, der

das gesamte Ausgestaltungsspektrum von den Maximen bis zu einer potenziellen Dynamisierung umfasst. Essenzielle Aussagen, Argumentationsketten und Schlussfolgerungen wurden bei Bedarf anhand von computergestützten Berechnungen für einen Hybrid-Flughafen diskutiert und veranschaulicht.

Der erarbeitete Handlungsrahmen bildete die Basis übergeordneter Schlussfolgerungen, die anschließend gezielt zu Ausgestaltungsoptionen verdichtet wurden. Dabei wurde besonderer Wert auf die Berücksichtigung der umfangreichen Interdependenzen zwischen den einzelnen Handlungsfeldern gelegt. Ausgestaltungsprobleme und Lösungspotenzial wurden ebenfalls thematisiert.

Im Ergebnis bestätigt die vorliegende Ausarbeitung die erwartete Vielschichtigkeit und Komplexität einer gleichermaßen angemessenen wie praktikablen Ausgestaltung von Fluglärmkontingentierungen. Dies gilt in verschärftem Maß für die beabsichtigte Verwendung von marktwirtschaftlichen Vergabeverfahren für lärmabhängige Lizenzen.

Insbesondere der wirtschaftstheoretisch interessante Modellfall eines Handels mit Lärmlizenzen ist infolge tief greifender Ausgestaltungshemmnisse derzeit nicht sachgerecht realisierbar. Andere marktnahe Vergabeformen, wie etwa die Bepreisung anhand des Lizenzbedarfs, unterliegen erheblichen Einschränkungen und können allenfalls in Verbindung mit referenzpunktgestützten Volumenkontingentierungen oder speziellen Punktkontingentierungen eingesetzt werden.

Erst die Abkehr vom Anspruch auf eine Stückelung in flugbewegungsspezifische Anteile erweitert das reduzierte Ausgestaltungsspektrum. Zwar geht dieser Paradigmenwechsel mit dem unter umweltökonomischen Aspekten bedeutsamen Verlust der direkten Mengensteuerung einher. Auf die Absicherung einer Obergrenze der Lärmbelastung muss deshalb aber nicht verzichtet werden, sodass das für die Bevölkerung wesentliche Charakteristikum von Fluglärmkontingentierungen erhalten bleibt.

Die bei einer impliziten Lizenzvergabe zur Verfügung stehenden Freiheiten in der Ausgestaltung bieten darüber hinaus Gelegenheit, die ursprüngliche Intention von Fluglärmkontingentierungen, den Ausgleich konkurrierender ökonomischer, ökologischer und sozialer Interessen, wieder stärker in den Vordergrund der Überlegungen zu stellen.

Die von BECKERS Mitte der siebziger Jahre angemahnte Suche nach einem praktikablen Kontingentierungsverfahren, das keine unnötigen Beschränkungen auferlegt, ist mit der vorliegenden Arbeit sicherlich nicht abgeschlossen. Gleichwohl können der erarbeitete interdisziplinäre Handlungsrahmen und die daraus abgeleiteten Ausgestaltungsoptionen dazu beitragen, das Potenzial von Fluglärmkontingentierungen für einen dauerhaft entwicklungsfähigen und umweltgerechten Luftverkehr bestmöglich zu nutzen.

Literaturverzeichnis

- [1] AIRBUS INDUSTRIE: *Global Market Forecast 2000 - 2019*. Airbus Industrie. Toulouse. July 2000
- [2] AIRBUS INDUSTRIE: *Global Market Forecast 2001 - 2020*. Airbus Industrie. Toulouse. September 2002
- [3] AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL – EUROPEAN REGION: *Creating Employment and Prosperity in Europe*. Airports Council International – European Region. Brussels. September 1998
- [4] ALLDINGER, I.: *Zusammenhänge zwischen Blutdruck und Fluglärm unter Berücksichtigung psychosozialer Charakteristika*. Universität München. Dissertation. München. 1998
- [5] ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN: *Luftfahrt und Umwelt*. Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen. Stuttgart. Juli 1997
- [6] ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN: *Verkehr auf den internationalen Verkehrsflughäfen erholt sich schrittweise – Luftfracht bereits im Aufwind*. Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen. Pressemitteilung Nr. 3/2002. Stuttgart. 24. Juli 2002
- [7] ARBEITSGEMEINSCHAFT DEUTSCHER VERKEHRSFLUGHÄFEN: *Verkehrsergebnis 2001 der internationalen Verkehrsflughäfen unterbricht den langjährigen Aufwärtstrend*. Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen. Pressemitteilung Nr. 1/2002. Stuttgart. 1. Februar 2002
- [8] ARMBRUSTER, J.: *Flugverkehr und Umwelt – Wieviel Mobilität tut uns gut?* Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York. 1996
- [9] ASSOCIATION OF EUROPEAN AIRLINES: *Yearbook 1997*. Association of European Airlines. Brussels. May 1997
- [10] ATTENBOROUGH, K.: *A Comparison of Engineering Methods for Predicting Ground Effect*. Proceedings Berlin 1999. Berlin. 1999
- [11] BASNER, M. ET AL.: *The Influence of Nocturnal Aircraft Noise on Humans – A New Comprehensive Approach*. Proceedings Inter-Noise 2001. The Hague. 2001

- [12] BASNER, M. ET AL.: *Nachtfluglärmwirkungen – Eine Teilauswertung von 64 Versuchspersonen in 832 Schlaflabornächten*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. DLR Forschungsbericht 2001-26. Köln. 2001
- [13] BASNER, M. ET AL.: *Wirkung von Nachtfluglärm auf den Schlaf – Ein neuer Forschungsansatz*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (2000) 47, 201-205
- [14] BAYERISCHER VERWALTUNGSGERICHTSHOF: *Neue Nachtflugregelung für den Flughafen München hat Bestand*. Bayerischer Verwaltungsgerichtshof. Pressemitteilung. München. 3. Dezember 2002
- [15] BAYERISCHER VERWALTUNGSGERICHTSHOF: *Urteil vom 4.11.1997 – Az.: 20 A 92.40134 und andere*. Bayerischer Verwaltungsgerichtshof. München. November 1997
- [16] BECKER, A. ET AL.: *Flight Unlimited 2015 – Können operationelle Beschränkungen im zukünftigen Luftverkehr vermieden werden?* Internationales Verkehrswesen (2001) 53(5), 203-206
- [17] BECKERS, J. H.: *Anmerkungen zu den Vorschlägen von Prof. Dr. Barbara Griefahn, Prof. Dr. Gerd Jansen, Prof. Dr. Klaus Scheuch und Prof. Dr. Manfred Spreng im Beitrag „Fluglärmkriterien für ein Schutzkonzept bei wesentlichen Änderungen oder Neuanlagen von Flughäfen/Flugplätzen“ in ZfL (2002) 49, 171-175*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (2003) 50, 26-29
- [18] BECKERS, J. H.: *Das ZLK-Verfahren – Ein Vorschlag zur spürbaren Verminderung der Fluglärmwirkungen*. Kampf dem Lärm (1977) 24, 121-126
- [19] BECKERS, J. H. & BÜRCK, W.: *Verminderung von Fluglärm – Vorschlag und Kritik*. Umwelt (1978) 8(1), 49-51
- [20] BERGLUND, B. & LINDVALL, T. (Eds.): *Community Noise*. Archives of the Center for Sensory Research (1995) 2(1), 1-195
- [21] BEYHOFF, S. ET AL.: *Verkehrspolitische Optionen zur Lärmreduktion an Flughäfen – Dargestellt am Beispiel des Flughafens Hamburg*. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt. DLR Forschungsbericht 1992-40. Köln. 1992
- [22] BIDINGER, R.: *Planung und Nutzung von Verkehrsflughäfen unter besonderer Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen*. Nomos Verlagsgesellschaft. Frankfurter Schriften zum Umweltrecht, Band 13. Baden-Baden. 1996

- [23] BÖCKSTIEGEL, K.-H. & KRÄMER, P. M.: *Völkerrechtliche Gestaltungsvorgaben für die Einführung einer wettbewerbsorientierten Allokation von Start- und Landeslots – 1. Teil*. Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht (1995) 44(3), 269-283
- [24] BÖCKSTIEGEL, K.-H. & KRÄMER, P. M.: *Völkerrechtliche Gestaltungsvorgaben für die Einführung einer wettbewerbsorientierten Allokation von Start- und Landeslots – 2. Teil*. Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht (1995) 44(4), 371-386
- [25] BOEING COMMERCIAL AIRPLANES GROUP: *Current Market Outlook 2001*. Boeing Commercial Airplanes Group. Seattle. June 2001
- [26] BOEING COMMERCIAL AIRPLANES GROUP: *Current Market Outlook 2002*. Boeing Commercial Airplanes Group. Seattle. July 2002
- [27] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): *BMBF-Kolloquium – Fliegen ohne Lärm*. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie. Flughafen Köln/Bonn. 26. März 1998
- [28] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): *Luftfahrt 2020 – Die deutsche Luftfahrtforschung, Partner im globalen Wettbewerb*. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Dokumentation Nr. 494. Berlin. Mai 2001
- [29] BUNDESREGIERUNG: *Flughafen-Konzept der Bundesregierung, Entwurf vom 30.08.2000*. Internet: www.fluglaerm.de. September 2000
- [30] BUNDESVERFASSUNGSGERICHT: *Beschluß vom 14.1.1981 – Az.: 1 BvR 612/72*. Neue Juristische Wochenschrift (1981) 31, 1655-1659
- [31] BUNDESVERWALTUNGSGERICHT: *Urteil vom 29.1.1991 – Az.: 4 C 51.89*. Bundesverwaltungsgericht. Berlin. Januar 1991
- [32] CAMPBELL, A.: *Improved US Airline Traffic Hides Underlying Problems*. Flight International (2002) 161(4828), 20
- [33] CHESSELL, C. I.: *Meteorological and Ground Effects on the Propagation of Aircraft Noise close to the Earth's Surface*. Journal of Sound and Vibration (1978) 60(2), 251-266
- [34] CHOI CHOW, L. ET AL.: *Aircraft Airframe Noise and Installation Effects – Research Studies*. Air & Space Europe (1999) 1(3), 72-75

- [35] COMMITTEE ON THE HEALTH IMPACT OF LARGE AIRPORTS: *Public Health Impact of Large Airports*. Health Council of the Netherlands. Report 1999/14E. The Hague. September 1999
- [36] CZYBULKA, D.: *Die rechtliche Bewältigung der Fluglärmproblematik*. Zeitschrift für Umwelt- und Planungsrecht (1999) 19(4), 126-129
- [37] DER BUNDESMINISTER DES INNERN (Hrsg.): *Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm vom 30. März 1971 (BGBl I S 282) – Anleitung zur Berechnung (AzB)*. Gemeinsames Ministerialblatt (1975) 26(8), 162-227
- [38] DER BUNDESMINISTER DES INNERN (Hrsg.): *Datenerfassungssystem für die Ermittlung von Lärmschutzbereichen an zivilen Flugplätzen nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm vom 30. März 1971 (BGBl I S 282) – DES*. Gemeinsames Ministerialblatt (1975) 26(8), 126-161
- [39] DER BUNDESMINISTER DES INNERN (Hrsg.): *Ergänzung der Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen – AzB – vom 27. Febr. 1975 (GMBL S. 126)*. Dokument UII4 – 560 120/43. Bonn. Februar 1984
- [40] DER HESSISCHE MINISTER FÜR WIRTSCHAFT, VERKEHR UND LANDESENTWICKLUNG: *Fraport Abflugrouten und Endanflugrouten*. Der Hessische Minister für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Wiesbaden. April 2001
- [41] DER RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN: *Umwelt und Gesundheit – Risiken richtig einschätzen*. Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen. Sondergutachten. Wiesbaden. August 1999
- [42] DEUTSCHE LUFTHANSA AG: *Die Problematik des Fluglärms*. Deutsche Lufthansa AG. Hamburg. Januar 1981
- [43] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 45643 – Messung und Beurteilung von Flugzeuggeräuschen*. Beuth Verlag. Berlin. Oktober 1984
- [44] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT: *ANICA – Aircraft Noise Impact Calculations and Analyses*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Unveröffentlichtes Benutzerhandbuch. Köln. Januar 2003
- [45] DOLDERMAN, A. B. ET AL.: *Geluidbelastingsberekeningen ten behoeve van MER Schiphol 2003*. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium. NLR Rapport CR-2001-371. Amsterdam. Augustus 2001

- [46] ELBING, G.: *Der Ausschluß von Kapitel-2-Flugzeugen von den Berliner Flughäfen Tegel und Tempelhof*. Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht (1997) 46(1), 46-67
- [47] EMMEN, H. H. ET AL.: *Methodiekontwikkeling en Haalbaarheidsstudie voor Onderzoek naar Effecten van Vliegtuiggeluid op Cognitieve Prestaties en Gedrag van Schoolkinderen – Een Onderzoek in de Regio Schiphol*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. RIVM Rapport 441 520 007. Bilthoven. Augustus 1997
- [48] EMMEN, H. H. ET AL.: *Neurobehavioral Measurements in Children Living around Schiphol Airport – Further Methodological Considerations*. Proceedings *Inter-Noise 2001*. The Hague. 2001
- [49] EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Entwurf eines Berichts über den Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EWG) Nr. 95/93 des Rates vom 18. Januar 1993 über gemeinsame Regeln für die Zuweisung von Zeitnischen auf Flughäfen in der Gemeinschaft*. Europäisches Parlament. Brüssel. 5. Februar 2002
- [50] EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm*. Richtlinie 2002/49/EG vom 25. Juni 2002. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 189/12-25. Luxemburg. 18. Juli 2002
- [51] EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Regeln und Verfahren für lärmbedingte Betriebsbeschränkungen auf Flughäfen der Gemeinschaft*. Richtlinie 2002/30/EG vom 26. März 2002. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 85/40-46. Luxemburg. 28. März 2002
- [52] EUROPEAN COURT OF HUMAN RIGHTS: *Judgment of 02.10.2001 – Ref.: 3 EUHR 36022/97*. European Court of Human Rights. Strasbourg. October 2001
- [53] EVANS ET AL.: *Chronic Noise and Psychological Stress*. Psychological Science (1995) 6(6), 333-338
- [54] EWERS, H.-J. ET AL.: *Möglichkeiten der besseren Nutzung von Zeitnischen auf Flughäfen (Slots) in Deutschland und der EU – Ein praxisorientierter Ansatz*. Technische Universität Berlin. Studie im Auftrag der Hochtief Airport GmbH. Berlin. Januar 2001
- [55] FELSCHER-SUHR, U. ET AL.: *Internationale Standardisierungsbestrebungen zur Erhebung von Lärmbelästigung*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (2000) 47, 68-70

- [56] FICHERT, F.: *Umweltschutz im zivilen Luftverkehr – Ökonomische Analyse von Zielen und Instrumenten*. Duncker & Humblot. Veröffentlichungen des Forschungsinstituts für Wirtschaftspolitik an der Universität Mainz, Band 56. Berlin. 1999
- [57] FIDELL, S. ET AL.: *Field Study of Noise-Induced Sleep Disturbance*. Journal of the Acoustical Society of America (1995) 98(2), 1025-1033
- [58] FIDELL, S. ET AL.: *Noise-Induced Sleep Disturbance in Residences near Two Civil Airports*. National Aeronautics and Space Administration. NASA Contractor Report 198252. Hampton. December 1995
- [59] FIEDLER, D.: *Maßnahmen zur Reduzierung der Fluglärmbelastung am internationalen Verkehrsflughafen Münster/Osnabrück*. Technische Universität Dresden. Diplomarbeit. Dresden. April 2000
- [60] FIELDS, J. M.: *A Review of an Updated Synthesis of Noise/Annoyance Relationships*. National Aeronautics and Space Administration. NASA Contractor Report 194950. Hampton. 1994
- [61] FIELDS, J. M.: *Effect of Personal and Situational Variables on Noise Annoyance in Residential Areas*. The Journal of the Acoustical Society of America (1993) 93(5), 2753-2763
- [62] FIELDS, J. M. ET AL.: *Recommendation for Shared Annoyance Questions in Noise Annoyance Surveys*. Proceedings Noise Effects '98. Sydney. 1998
- [63] FLIGHT INTERNATIONAL: *Environmental Engines: Smart, Green and Powerful*. Flight International (2000) 157(4709), 28-37
- [64] FLIGHT INTERNATIONAL: *Time to Worry*. Flight International (2002) 161(4828), 3
- [65] FLUGHAFEN FRANKFURT/MAIN AG: *Datenerfassungssystem (DES) 1995/2005 und Anleitung zur Berechnung (AzB) zur Ermittlung des Lärmschutzbereichs für den Frankfurter Flughafen nach Maßgabe des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm vom 30. März 1971*. Flughafen Frankfurt/Main AG. Unveröffentlichtes Manuskript. Frankfurt am Main. 1991
- [66] FLUGHAFEN FRANKFURT/MAIN AG: *Streckenaufteilung des Verkehrs in den 6 verkehrsreichsten Monaten 1992, das sind Mai-Oktober, zu Fluglärmzwecken*. Flughafen Frankfurt/Main AG. Unveröffentlichtes Manuskript. Frankfurt am Main. 1995

- [67] FLUGHAFEN FRANKFURT/MAIN AG: *Strecken aufteilung des Verkehrs in den 6 verkehrsreichsten Monaten 1995, das sind Mai-Oktober, zu Fluglärmzwecken*. Flughafen Frankfurt/Main AG. Unveröffentlichtes Manuskript. Frankfurt am Main. 1995
- [68] FLUGHAFEN MÜNCHEN GMBH: *Datenerfassungssystem (DES) Verkehrsflughafen München, Stand: 12/93*. Flughafen München GmbH. Unveröffentlichtes Manuskript. München. Dezember 1993
- [69] FRANSSEN, E. A. M. ET AL.: *Health Impact Assessment Schiphol Airport: An Overview*. Proceedings *Noise Effects '98*. Sydney. 1998
- [70] GATTONI, F. & TARNOPOLSKY, A.: *Aircraft Noise and Psychiatric Morbidity*. *Psychological Medicine* (1973) 3, 516-520
- [71] GIEMULLA, E.: *Kopplung von Slot-Vergabe und Luftfahrzeuggröße aufgrund lokaler Sonderregelungen*. *Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht* (1996) 45(3), 245-259
- [72] GOTTLOB, D. ET AL.: *Ergebnisbericht der Arbeitsgruppe 1: Lärmwirkungen*. Proceedings *Umweltkapazität von Flughäfen: Aspekte der Lärmwirkungsforschung – Schutzziele und Schutzmaßnahmen*. Berlin. 1999
- [73] GREENSLET, E.: *Chapter 3 1/2 – Noise Regulation*. *The Avmark Aviation Economist* (1995) 12(1), 10-11
- [74] GRIEFAHN, B.: *Grenzwerte vegetativer Belastbarkeit – Zum gegenwärtigen Stand der psychophysiologischen Lärmforschung*. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* (1982) 29, 131-136
- [75] GRIEFAHN, B.: *Präventivmedizinische Vorschläge für den nächtlichen Schallschutz*. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* (1990) 37, 7-14
- [76] GRIEFAHN, B.: *Schlafverhalten und Geräusche – Feld- und Laboruntersuchungen über Straßenverkehr – EEG-Analyse – Literatúrauswertung*. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart. 1985
- [77] GRIEFAHN, B. ET AL.: *Erarbeitung von Fluglärmkriterien für ein Schutzkonzept*. Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund. Gutachten im Auftrag der Flughafen Frankfurt Main AG. Dortmund. Juni 2001
- [78] GRIEFAHN, B. ET AL.: *Erarbeitung von Fluglärmkriterien für ein Schutzkonzept bei wesentlichen Änderungen oder Neuanlagen von Flughäfen/Flugplätzen*. Gutachten im Auftrag der Flughafen Frankfurt Main AG. Dortmund, Heiligenhaus, Dresden, Erlangen. Dezember 2001

- [79] GRIEFAHN, B. ET AL.: *Fluglärmkriterien für ein Schutzkonzept bei wesentlichen Änderungen oder Neuanlagen von Flughäfen/Flugplätzen*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (2002) 49, 171-175
- [80] GRIEFAHN, B. ET AL.: *Zur Problematik lärmbedingter Schlafstörungen – Eine Auswertung von Schlaf-Literatur*. Universität Mainz, Universität Essen. Gutachten FB II 3-60424/1 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Mainz, Essen. Februar 1976
- [81] GROTRIAN, J. ET AL.: *European Transport Report 2002*. Prognos AG. Basel. May 2002
- [82] GROUP OF PERSONALITIES: *European Aeronautics: A Vision for 2020 – Meeting Society's Needs and Winning Global Leadership*. European Commission. Brussels. January 2001
- [83] GUMMLICH, H.: *Zur Entwicklung der Geräuschbewertung in Wissenschaft und Administration*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (1989) 36, 105-113
- [84] GUSKI, R.: *About the Validity of Global Annoyance Judgements*. Proceedings *Inter-Noise 2001*. The Hague. 2001
- [85] GUSKI, R.: *Lärm – Wirkungen unerwünschter Geräusche*. Verlag Hans Huber. Bern, Stuttgart, Toronto. 1987
- [86] GUSKI, R.: *Neuer Fluglärm gleich alter Fluglärm?* Zeitschrift für Lärmbekämpfung (2003) 50, 14-25
- [87] GUSKI, R.: *Status, Tendenzen und Desiderate der Lärmwirkungsforschung zu Beginn des 21. Jahrhunderts*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (2002) 49, 219-232
- [88] HAND, D. J. ET AL.: *Relationships between Psychiatric Hospital Admissions and Aircraft Noise: A New Study*. Proceedings *Third International Congress on Noise as a Public Health Problem*. Rockville. April 1980
- [89] HÄNSCH, K. ET AL. (Hrsg.): *Mediation Flughafen Frankfurt/Main – Bericht*. Mediationsgruppe Flughafen Frankfurt/Main. Frankfurt am Main. 2000
- [90] HARDER, J. ET AL.: *Längsschnittstudie zum Verlauf von Streßreaktionen unter Einfluß von nächtlichem Fluglärm*. Umweltbundesamt. WaBoLu-Hefte, Band 4/99. Berlin. Juni 1999
- [91] HECKL, M. & MÜLLER, H. A. (Hrsg.): *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York. 2. Auflage. 1994

- [92] HERMANN, M.: *Schutz vor Fluglärm bei der Planung von Verkehrsflughäfen im Lichte des Verfassungsrechts – Zur Auslegung des § 9 Abs. 2 LuftVG*. Duncker & Humblot. Schriften zum Umweltrecht, Band 40. Berlin. 1994
- [93] HESSISCHES MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, VERKEHR UND LANDESENTWICKLUNG: *Lärmkontingent intelligentes Steuerungselement zur Reduzierung des Fluglärms – Umsetzung des Mediationspakets – Optimierung Flugverkehr bei Entlastung der Bevölkerung*. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Pressemitteilung. Wiesbaden. 24. September 2001
- [94] HOLZHEY, M. & TEGNER, H.: *Selbstverpflichtungen – Ein Ausweg aus der umweltpolitischen Sackgasse?* Wirtschaftsdienst (1996) 76(8), 425-430
- [95] HORNE, J. A. ET AL.: *A Field Study of Sleep Disturbance: Effects of Aircraft Noise and Other Factors on 5,742 Nights of Actimetrically Monitored Sleep in a Large Subject Sample*. Sleep (1994) 17(2), 146-159
- [96] HYGGE, S.: *The Effects of Different Noise Sources and Noise Levels on Long-Term Memory in Children Aged 12-14 Years*. Proceedings Results of the Seventh Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics. Oldenburg. 1997
- [97] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION: *Most Bullish Passenger/Cargo Market Outlook for Three Years*. International Air Transport Association. Press Notice PS/18/00. Geneva. 23rd October 2000
- [98] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: *Environmental Protection – Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation – Volume I, Aircraft Noise*. International Civil Aviation Organization. Montreal. 3rd Edition. July 1993
- [99] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: *One Year after 11 September Events ICAO Forecasts World Air Passenger Traffic Will Exceed 2000 Levels in 2003*. International Civil Aviation Organization. Press Notice 10/2002. Montreal. September 2002
- [100] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION: *Report on Agenda Item 3*. International Civil Aviation Organization, Committee on Aviation Environmental Protection. Fifth Meeting. Montreal. January 2001
- [101] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 532 – Acoustics – Method for Calculating Loudness Level*. International Organization for Standardization. Geneva. 1st Edition. 1975

- [102] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 3891 – Acoustics – Procedure for Describing Aircraft Noise Heard on the Ground*. International Organization for Standardization. Geneva. Corrected and Reprinted Edition. 1981
- [103] ISERMANN, U.: *Aktualisierte Fortschreibung der Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen – AzB (Lärmdaten für zivile Luftfahrzeuge)*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Unveröffentlichtes Datenmaterial. Göttingen. 1996
- [104] ISERMANN, U.: *Berechnung der Fluglärmimmission in der Umgebung von Verkehrsflughäfen mit Hilfe eines Simulationsverfahrens*. Max-Planck-Institut für Strömungsforschung. Bericht 7/1988. Göttingen. Februar 1988
- [105] ISERMANN, U.: *Einfluß der physikalischen und flugbetrieblichen Bedingungen auf die Fluglärmimmission am Boden*. Max-Planck-Institut für Strömungsforschung. Bericht 11/1982. Göttingen. Oktober 1982
- [106] ISERMANN, U.: *Fortschreibung der Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen – AzB (Lärmdaten für zivile Luftfahrzeuge)*. Max-Planck-Institut für Strömungsforschung. Forschungsbericht 93-105 05 999 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Göttingen. Februar 1993
- [107] ISERMANN, U.: *Hearing des Hessischen Landtags betreffend Frankfurter Flughafen vom 10. bis 12. Mai 2000 – Stellungnahme zu Fragen zum Themenkomplex Fluglärmprognose*. Internet: www.landtag.hessen.de. Oktober 2000
- [108] ISERMANN, U. & SCHMID, R.: *Bewertung und Berechnung von Fluglärm*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Forschungsbericht L-2/96-50144/96 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr. Göttingen. Juli 1999
- [109] ISERMANN, U. ET AL.: *Einige Anmerkungen zum Artikel von Beckenbauer & Schreiber in ZfL (1997) 44, 190-194 „Kritische Anmerkungen zu Fluglärmgesetz und AzB“*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (1998) 45, 130-131
- [110] JANSEN, G.: *Zur nervösen Belastung durch Lärm – Experimentelle Untersuchungen zur Frage der vegetativen Belastbarkeit des Menschen durch Schalleinflüsse hoher und mittlerer Intensität*. Dr. Dietrich Steinkopff Verlag. Beihefte zum Zentralblatt für Arbeitsmedizin und Arbeitsschutz, Heft 9. Darmstadt. 1967
- [111] JANSEN, G. ET AL.: *Gesundheitsbegriff und Lärmwirkungen*. Verlag Metzler-Poeschel. Materialien zur Umweltforschung, herausgegeben vom Rat von Sachverständigen für Umweltfragen. Stuttgart. November 1999

- [112] JANSEN, G. ET AL.: *Methodenkritische Überlegungen und Empfehlungen zur Bewertung von Nachtfluglärm*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (1995) 42, 91-106
- [113] KALIVODA, M. T. & STEINER, J. W. (Hrsg.): *Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik*. Springer-Verlag. Wien, New York. 1998
- [114] KASTKA, J.: *Analyse und Bewertung von vorliegenden Beschwerdedateien zu Flugbewegungen am Flughafen Frankfurt im Hinblick auf die Abhängigkeit von Überflugpegel und anderen Bedingungen*. Universität Düsseldorf. Gutachten im Auftrag der Mediationsgruppe Flughafen Frankfurt/Main. Düsseldorf. 1999
- [115] KASTKA, J.: *Untersuchung der Fluglärmbelastungs- und Belästigungssituation der Allgemeinbevölkerung der Umgebung des Flughafens Frankfurt*. Universität Düsseldorf. Gutachten im Auftrag der Mediationsgruppe Flughafen Frankfurt/Main. Düsseldorf. 1999
- [116] KASTKA, J.: *Untersuchung der Fluglärmbelastungs- und Belästigungssituation im Nachtzeitraum in der Umgebung des Verkehrsflughafens München*. Universität Düsseldorf. Gutachten im Auftrag der Regierung von Oberbayern. Düsseldorf. März 2001
- [117] KASTKA, J.: *Untersuchungen zur Belästigung durch Verkehrslärm – Umweltpsychologische Analysen zu einem umwelthygienischen Konzept*. Universität Oldenburg. Dissertation. Oldenburg. 1984
- [118] KASTKA, J. ET AL.: *Cortisolausscheidung als Nachweis einer Stressreaktion von Anwohnern eines Großflughafens*. In: RETTENMEIER, A. W. & FELDHaus, C. (Hrsg.): *Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin*. Rindt. Fulda. 1999
- [119] KASTKA, J. ET AL.: *Interdisziplinäre Längsschnitt-Untersuchungen zur Wirkung von Fluglärm auf die Anwohner am Düsseldorfer Flughafen 1987-1995*. In: MÜNZBERGER, E. (Hrsg.): *Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin*. Rindt. Fulda. 1996
- [120] KASTKA, J. ET AL.: *Longitudinal Study on Aircraft Noise – Effects at Düsseldorf Airport 1981-1993*. Proceedings 15th International Congress on Acoustics. Trondheim. 1995
- [121] KASTKA, J. ET AL.: *Standings and Results of the Research on Aircraft Noise – Longitudinal Study at Düsseldorf Airport 1987-1995*. Proceedings Inter-Noise 1996. Liverpool. 1996

- [122] KILIAN, M.: *Slotallokation und Slothandel*. Internet: www.luftrecht-online.de. Mai 2001
- [123] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: *Künftige Lärm-schutzpolitik – Grünbuch der Europäischen Kommission*. Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften. Dokument KOM(96) 540 endgültig. Brüssel, Luxemburg. 4. November 1996
- [124] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: *Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Regeln und Verfahren für lärmbedingte Betriebsbeschränkungen auf Flughäfen der Gemeinschaft*. Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften. Dokument KOM(2001) 695 endgültig. Brüssel, Luxemburg. 28. November 2001
- [125] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: *Vorschlag für eine Richtlinie des Rates zur Änderung der Richtlinie 92/14/EWG zur Einschränkung des Betriebs von Flugzeugen des Teils II Kapitel 2 Band 1 des Anhangs 16 zum Abkommen über die internationale Zivilluftfahrt, 2. Ausgabe (1998)*. Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften. Dokument KOM(98) 413 endgültig. Brüssel, Luxemburg. 4. September 1998
- [126] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EWG) Nr. 95/93 des Rates vom 18. Januar 1993 über gemeinsame Regeln für die Zuweisung von Zeitnischen auf Flughäfen in der Gemeinschaft*. Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften. Dokument KOM(2001) 335 endgültig. Brüssel, Luxemburg. 25. September 2001
- [127] KRYTER, K. D.: *Community Annoyance from Aircraft and Ground Vehicle Noise*. Journal of the Acoustical Society of America (1982) 72(4), 1222-1242
- [128] KRYTER, K. D.: *Rebuttal by Karl D. Kryter to Comments by T. J. Schultz*. Journal of the Acoustical Society of America (1982) 72(4), 1253-1257
- [129] KRYTER, K. D.: *Response of K. D. Kryter to Modified Comments by T. J. Schultz on K. D. Kryter's Paper, „Community Annoyance from Aircraft and Ground Vehicle Noise“*. Journal of the Acoustical Society of America (1983) 73(3), 1066-1068
- [130] LANG, J.: *Schutz vor Fluglärm in Österreich*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (2001) 48, 125-128

- [131] LAZARUS, H.: *Noise and Communication: The Present State*. Proceedings *Noise Effects '98*. Sydney. 1998
- [132] LAZARUS, H. ET AL.: *Bewertung der Sprachkommunikation*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (2002) 49, 104-106
- [133] LAZARUS-MAINKA, G. ET AL.: *Die Beeinträchtigung der Sprachverständlichkeit als Faktor der Belästigung*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (1985) 32, 65-72
- [134] LINNEMEIER, A. E. B.: *Die Auswirkungen von Lärm auf den natürlichen Nachtschlaf des Menschen*. Universität Düsseldorf. Dissertation. Düsseldorf. 1995
- [135] MASCHKE, C.: *Der Einfluß von Nachtfluglärm auf den Schlafverlauf und die Katecholaminausscheidung*. Technische Universität Berlin. Dissertation. Berlin. 1992
- [136] MASCHKE, C. ET AL.: *Gutachterliche Stellungnahme zu den lärmmedizinischen Gutachten M8 und M9 „Ausbau Flughafen Schönefeld“*. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Arbeit, Soziales, Gesundheit und Frauen des Landes Brandenburg. Berlin. Juni 2000
- [137] MASCHKE, C. ET AL.: *Kriterien für schädliche Umwelteinwirkungen: Beeinträchtigung des Schlafes durch Lärm – Eine Literaturübersicht*. Technische Universität Berlin. Forschungsbericht 97-105 01 213/07 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin. 1997
- [138] MASCHKE, C. ET AL. (Hrsg.): *Nachtfluglärmwirkungen auf Anwohner*. Gustav Fischer Verlag. Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Band 96. Stuttgart, Jena, New York. 1995
- [139] MASCHKE, C. ET AL.: *Nächtliches Erwachen durch Fluglärm – Beginnen Aufwachreaktionen bei Maximalpegeln von 60 Dezibel(A)?* Bundesgesundheitsblatt (2001) 44, 1001-1010
- [140] MATSCHAT, K. & MÜLLER, E.-A.: *Fluglärm – I. Ausmaß und Entstehung*. Naturwissenschaften (1977) 64, 317-325
- [141] MATSCHAT, K. & MÜLLER, E.-A.: *Fluglärm – II. Methoden zur Lärminderung*. Naturwissenschaften (1978) 65, 558-568
- [142] MCLEAN, S.: *World's Airport Operators Face a Variety of Critical Environmental Issues*. ICAO Journal (1995) 50(1), 6-8

- [143] MEIS, M.: *Zur Wirkung von Lärm auf das Gedächtnis – Explizite und implizite Erinnerungsleistungen fluglärmexponierter Kinder im Rahmen einer medizinpsychologischen Längsschnittstudie*. Verlag Dr. Kovač. Studienreihe Psychologische Forschungsergebnisse, Band 23. Hamburg. 1998
- [144] MIEDEMA, H. M. E. & VOS, H.: *Exposure-Response Relationships for Transportation Noise*. Journal of the Acoustical Society of America (1998) 104(6), 3432-3445
- [145] MIEDEMA, H. M. E. & VOS, H.: *Demographic and Attitudinal Factors that Modify Annoyance from Transportation Noise*. Journal of the Acoustical Society of America (1999) 105(6), 3336-3344
- [146] MIEDEMA, H. M. E. ET AL.: *Community Reaction to Aircraft Noise: Time-of-Day Penalty and Tradeoff between Levels of Overflights*. Journal of the Acoustical Society of America (2000) 107(6), 3245-3253
- [147] MINISTERIE VAN VERKEER EN WATERSTAAT: *Besluit van 26 November 2002, tot Veststelling van een Luchthavenverkeerbesluit voor de Luchthaven Schiphol (Luchthavenverkeerbesluit Schiphol)*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Den Haag. December 2002
- [148] MINISTERIE VAN VERKEER EN WATERSTAAT: *Dosis-Responsrelaties Luchtvaartgeluid – Analyses in het Kader van ONL*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Den Haag. Februari 2000
- [149] MINISTERIUM FÜR STADTENTWICKLUNG UND VERKEHR DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN: *Luftverkehr in Nordrhein-Westfalen: Umweltbelastung durch Flugverkehr vermindern – Natur bewahren – Anwohner und Anwohnerinnen besser schützen*. Antwort der Landesregierung auf die Große Anfrage 31 der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen. Landtagsdrucksache 11/7223 und 11/5741. Düsseldorf. Juni 1994
- [150] MÜLLER, E.-A. ET AL.: *Physikalisch-technische Aspekte zum Fluglärmgesetz*. Airport Forum (1975) 5(6), 47-54
- [151] NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION: *Aircraft Noise in a Modern Society – Final Report of the Pilot Study*. North Atlantic Treaty Organization. NATO Report 185. November 1989
- [152] OBERVERWALTUNGSGERICHT FÜR DAS LAND BERLIN: *Urteil vom 2.5.1996 – Az.: 2 A 5.92*. Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht (1997) 46(3), 378-405

- [153] OBERVERWALTUNGSGERICHT FÜR DAS LAND NORDRHEIN-WESTFALEN: *Beschluss vom 17.5.1999, Az.: 20 B 2493/98.AK*. Oberverwaltungsgericht für das Land Nordrhein-Westfalen. Münster. 17. Mai 1999
- [154] OBERVERWALTUNGSGERICHT FÜR DAS LAND RHEINLAND-PFALZ: *Urteil vom 01.07.1997, Az.: 7 C 11843/93.OVG*. Oberverwaltungsgericht für das Land Rheinland-Pfalz. Koblenz. 1. Juli 1997
- [155] OESER, K. & BECKERS, J. H. (Hrsg.): *Fluglärm 2000 – 40 Jahre Fluglärmbekämpfung: Forderungen und Ausblick*. Springer-VDI-Verlag. Düsseldorf. 1999
- [156] OHNE VERFASSER: *Bekanntmachung der Neufassung der Lärmschutzforderungen für Luftfahrzeuge (LSL)*. Luftfahrt-Bundesamt. Braunschweig. Januar 1991
- [157] OHNE VERFASSER: *Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm (FluglärmG) – Vom 30. März 1971 (BGBl I S. 282), zuletzt geändert durch Artikel 46 der Siebenten Zuständigkeitsanpassungs-Verordnung vom 29. Oktober 2001 (BGBl I S. 2785)*. Internet: www.luftrecht-online.de. November 2002
- [158] OHNE VERFASSER: *Luftverkehrsgesetz (LuftVG) – Vom 1. August 1922 (RGBl. I S. 681) in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. März 1999 (BGBl I S. 550), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. August 2002 (BGBl I S. 3355)*. Internet: www.luftrecht-online.de. November 2002
- [159] OHNE VERFASSER: *Verordnung über die Durchführung der Flugplankoordinierung (FPKV) – Vom 13. Juni 1994 (BGBl I S. 1262), geändert durch Artikel 460 der Siebenten Zuständigkeitsanpassungs-Verordnung vom 29. Oktober 2001 (BGBl I S. 2785)*. Internet: www.luftrecht-online.de. November 2002
- [160] OLLERHEAD, J. B. ET AL.: *Report of a Field Study of Aircraft Noise and Sleep Disturbance*. Civil Aviation Authority, Department of Safety, Environment and Engineering. London. December 1992
- [161] ORTSCHIED, J. & WENDE, H.: *Fluglärmwirkungen*. Umweltbundesamt. Berlin. 2000
- [162] ÖSTERREICHISCHER ARBEITSRING FÜR LÄRMBEKÄMPFUNG: *ÖAL 24 – Lärmschutzzonen in der Umgebung von Flugplätzen, Planungs- und Berechnungsgrundlagen*. Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung. Kefermarkt. 2001

- [163] PAO, S. P. ET AL.: *Prediction of Ground Effects on Aircraft Noise*. National Aeronautics and Space Administration. NASA Technical Paper 1104. Hampton. 1978
- [164] PARKIN, P. H. & SCHOLES, W. E.: *The Horizontal Propagation of Sound from a Jet Engine close to the Ground, at Radlett*. Journal of Sound and Vibration (1964) 1(1), 1-13
- [165] PARKIN, P. H. & SCHOLES, W. E.: *The Horizontal Propagation of Sound from a Jet Engine close to the Ground, at Hatfield*. Journal of Sound and Vibration (1965) 2(4), 353-374
- [166] PASSCHIER-VERMEER, W.: *Geluid en Effecten op de Gezondheid*. TNO Preventie en Gezondheid. TNO Rapport 96.004. Leiden. Maart 1996
- [167] PASSCHIER-VERMEER, W.: *Noise and Health of Children*. TNO Prevention and Health. TNO Report 2000.042. Leiden. September 2000
- [168] PASSCHIER-VERMEER, W. ET AL.: *Sleep Disturbance and Aircraft Noise Exposure – Exposure-Effect Relationships*. TNO Prevention and Health. TNO Report 2002.027. Leiden. June 2002
- [169] PASSCHIER-VERMEER, W. ET AL.: *Sleep Disturbance and Aircraft Noise Exposure – Questionnaires, Diaries and Locations*. TNO Prevention and Health. TNO Report 2001.205. Leiden. November 2001
- [170] PASSCHIER-VERMEER, W. ET AL.: *Sleep Disturbance and Aircraft Noise Exposure – Tables, Figures, Pictures*. TNO Prevention and Health. TNO Report 2001.206. Leiden. November 2001
- [171] PEARSONS, K. S. ET AL.: *Predicting Noise-Induced Sleep Disturbance*. Journal of the Acoustical Society of America (1995) 97(1), 331-338
- [172] PROGNOSE AG: *Personen- und Güterverkehrsentwicklung in Europa – Wo geht die Reise hin?* Prognos AG. Pressemitteilung. Basel. 26. April 2002
- [173] RASMUSSEN, K. B.: *The Effect of Terrain Profile on Sound Propagation Outdoors*. Danish Acoustical Institute. DAI Report 111. Lyngby. 1984
- [174] RASMUSSEN, K. B.: *The Effect of Wind and Temperature Gradients on Sound Propagation Outdoors*. Danish Acoustical Institute. DAI Report 124. Lyngby. 1985
- [175] REGIERUNG VON OBERBAYERN: *Änderungsgenehmigung Nachtflugregelung für den Flughafen München*. Regierung von Oberbayern. München. 23. März 2001

- [176] REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART: *Planfeststellungsbeschuß vom 15. September 1987 für den Ausbau des Flughafens Stuttgart und der Autobahn A 8 im Streckenabschnitt Stuttgart-Degerloch – Denkendorf*. Regierungspräsidium Stuttgart. Aktenzeichen 15-XLuftV-82/Flughafen Stuttgart. Stuttgart. 1987
- [177] REHM, S.: *Epidemiologische Untersuchung der Auswirkungen von Fluglärm auf die Frühgeburtenhäufigkeit – Zugleich methodologische Überlegungen zur Durchführung einer prospektiven Studie*. Universität Essen. Dissertation. Essen. 1976
- [178] REHM, S. & JANSEN, G.: *Aircraft Noise and Premature Birth*. Journal of Sound and Vibration (1978) 59(1), 133-135
- [179] ROHRMANN, B. ET AL.: *Fluglärm und seine Wirkung auf den Menschen: Methoden und Ergebnisse der Forschung – Konsequenzen für den Umweltschutz*. Verlag Hans Huber. Bern, Stuttgart, Wien. 1978
- [180] RONELLENFITSCH, M.: „Menschenrecht“ auf Mobilität – Kann, darf gegengesteuert werden? *Juristische Perspektiven*. Zeitschrift für Verkehrswissenschaft (1995) 66(3), 207-213
- [181] ROTTMANN, U.: *Ein Verfahren zur Analyse, Bewertung und Entwicklung flugbetrieblicher Lärminderungsmaßnahmen im zivilen Luftverkehr*. Technische Universität Berlin. Dissertation. Berlin. 1990
- [182] ROTTMANN, U.: *Einfluß des Einsatzes des Mikrowellen-Landesystems auf die Lärmbelastung in der Umgebung von Verkehrsflughäfen*. Technische Universität Berlin. Forschungsbericht 90-105 05 503 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin. 1990
- [183] ROTTMANN, U.: *Minderung des Fluglärms durch Optimierung der Streckenführung sowie der Start- und Landeverfahren im zivilen Luftverkehr*. Technische Universität Berlin. Forschungsbericht 88-105 05 501 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin. 1988
- [184] SAMEL, A. & PIEHLER, C.: *Wirkung von Nachtfluglärm auf den Schlaf: Kritik der Methoden – Neuer Forschungsansatz*. Proceedings *Umweltkapazität von Flughäfen: Aspekte der Lärmwirkungsforschung – Schutzziele und Schutzmaßnahmen*. Berlin. 1999
- [185] SCHEUCH, K. & JANSEN, G.: *Medizinisches Gutachten über die Auswirkungen des Fluglärms im Rahmen der vorgesehenen Änderung der Nachtflugregelung für den Flughafen München*. Gutachten im Auftrag der Flughafen München GmbH. Bannewitz, Essen. September 1999

- [186] SCHEUCH, K. & JANSEN, G.: *Präventivmedizinische Überlegungen zu Fluglärm-Orientierungswerten für Einzelschallereignisse am Tag*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (2002) 49, 7-12
- [187] SCHEUCH, K. & JANSEN, G.: *Stellungnahme der Autoren zum Leserbrief*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung (2002) 49, 110-111
- [188] SCHICK, A.: *Das Konzept der Belästigung in der Lärmforschung*. Pabst Science Publishers. Lengerich, Scottsdale, Wien. 1997
- [189] SCHMID, R.: *Physikalische Modellierung der Richtcharakteristik der Schallabstrahlung von Nebenstromtriebwerken*. Universität Göttingen. Dissertation. Göttingen. 1999
- [190] SCHMIDT, A.: *Die Anwendbarkeit der umweltökonomischen Lizenzlösung auf die Umweltbelastungen durch den zivilen Luftverkehr*. Peter Lang. Europäische Hochschulschriften, Reihe V, Volks- und Betriebswirtschaft, Band 1614. Frankfurt am Main, New York, Paris. 1994
- [191] SCHMIDT, R. F. & THEWS, G. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York. 26., vollständig überarbeitete Auflage. 1995
- [192] SCHULTZ, T. J.: *Synthesis of Social Surveys on Noise Annoyance*. Journal of the Acoustical Society of America (1978) 64(2), 377-405
- [193] SCHWARZE, S.: *Langjährige Lärmbelastung und Gesundheit – Stand der medizinischen Lärmforschung sowie experimenteller und epidemiologischer Beitrag zur Entstehung lärmbedingter Gesundheitsstörungen*. Wirtschaftsverlag NW. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb 636. Dortmund. 1991
- [194] SIGMUND, M. P.: *Auswirkungen von Fluglärm auf die Lesefähigkeit von Schulkindern*. Universität München. Dissertation. München. 1993
- [195] SMITH, M. J. T.: *Aircraft Noise*. Cambridge University Press. Cambridge, New York, Sydney. 1989
- [196] SMITH, M. J. T.: *Where to with Aircraft Noise Control?* World Aerospace Technology International (1995), 32-35
- [197] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS: *ARP 866A – Standard Values of Atmospheric Absorption as a Function of Temperature and Humidity*. SAE Aerospace Recommended Practice. Warrendale. 1975

- [198] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS: *AIR 1751 – Prediction Method for Lateral Attenuation of Airplane Noise during Takeoff and Landing*. SAE Aerospace Information Report. Warrendale. 1981
- [199] SPRENG, M. ET AL.: *Kriterien für schädliche Umwelteinwirkungen durch Lärm – Beeinträchtigung der Kommunikation durch Lärm*. Universität Erlangen-Nürnberg. Forschungsbericht 105 01 213/06 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Erlangen. August 1994
- [200] STAATSEN, B. ET AL.: *Health Impact Assessment Schiphol Airport – Executive Summary*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene. RIVM Report 441 520 003. Bilthoven. July 1994
- [201] THE DEPARTMENT OF TRANSPORT: *MacGregor Announces New Night Flying Restrictions at Heathrow, Gatwick and Stansted Airports*. The Department of Transport. Press Notice No. 265. London. 6th July 1993
- [202] UMWELTBUNDESAMT: *Beeinträchtigung und Belästigung durch Fluglärm*. Umweltbundesamt. Berlin. 2001
- [203] UMWELTBUNDESAMT: *Lärmbekämpfung '88 – Fluglärm*. Erich Schmidt Verlag. Berlin. 1991
- [204] URBATZKA, E. ET AL.: *Szenarien des Luftverkehrs Deutschlands im Jahr 2010 vor dem Hintergrund kapazitätsbeengter Flughafeninfrastruktur*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. DLR Forschungsbericht 1999-43. Köln. November 1999
- [205] UYENO, D. & HAMILTON, S.: *Public Resistance to Airport Expansion Can Be Mitigated through Scientific Analysis of the Negative Impact*. ICAO Journal (1995) 50(1), 9-10
- [206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2714 – Schallausbreitung im Freien*. Beuth Verlag. Berlin. Januar 1988
- [207] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2719 – Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen*. Beuth Verlag. Berlin. August 1987
- [208] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 3722 – Wirkungen von Verkehrsgeräuschen*. Beuth Verlag. Berlin. August 1988
- [209] WEYER, H. B.: *Luftverkehr und Umwelt*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Unveröffentlichtes Manuskript. Köln. Februar 2000
- [210] WIENER, F. M. & KEAST, D. N.: *Experimental Study of the Propagation of Sound over Ground*. Journal of the Acoustical Society of America (1959) 31(6), 724-733

- [211] WOLF, H.: *Möglichkeiten und Grenzen marktwirtschaftlicher Verfahren zur Vergabe von Start-/Landerechten auf Flughäfen – Vorschlag für ein „zweitbestes Auktionsverfahren“*. Institut für Weltwirtschaft an der Universität Kiel. Kieler Arbeitspapiere, Band 671. Kiel. 1995
- [212] WOLF, P.: *Entscheidungshilfen für die Flughafenplanung*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Instituts, Band 34. Aachen. 1981
- [213] WOLF, P.: *Strukturelle Anforderungen an einen Hub München während der Tagesrand- und der Nachtzeit*. Airport Research Center GmbH. Gutachten im Auftrag der Flughafen München GmbH. Aachen. 30. Juni 1999
- [214] WOLF, P.: *Strukturelle Anforderungen an einen Hub München während der Tagesrand- und Nachtzeit unter Berücksichtigung der aktuellen Luftverkehrsentwicklung in München – Nachtrag zur gutachterlichen Stellungnahme vom 30.06.1999 im Auftrag der Flughafen München GmbH*. Airport Research Center GmbH. Gutachten im Auftrag der Flughafen München GmbH. Aachen. 19. Februar 2001
- [215] WOLF, P. & KUHNE, M.: *Wie genau können Verkehrsprognosen sein?* Airport Forum (1976) 6(6), 4-5
- [216] WORLD HEALTH ORGANIZATION (Ed.): *Guidelines for Community Noise*. World Health Organization. Geneva. 1999
- [217] WYSK, P.: *Ausgewählte Probleme zum Rechtsschutz gegen Fluglärm – Teil 3*. Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht (1998) 47(4), 456-489

Abbildungsverzeichnis

3.1	Einkreis-Turbinen-Luftstrahltriebwerk (Turbojet)	8
3.2	Zweikreis-Turbinen-Luftstrahltriebwerk (Turbofan)	8
3.3	Propeller-Turbinen-Luftstrahltriebwerk (Turboprop)	12
3.4	Quellen von Umströmungsgeräuschen	13
3.5	Berechnete Start-Footprints einer B 737-100 und B 737-500, $L_{ASmax} = 75 \text{ dB}$	14
3.6	Geräuschemissionscharakteristik eines Luftstrahltriebwerks der 2. Generation	14
3.7	Geräuschemissionscharakteristik eines Luftstrahltriebwerks der 3. Generation	14
3.8	Messpunkte für die Zulassung nach ICAO Annex 16, Kapitel 3 und 4	21
3.9	Abflug- und Endanflugrouten sowie Fluggeräuschesmessstellen des Flughafens Frankfurt	22
3.10	Typischer Verlauf kardiovaskulärer Reaktionen auf Geräusche . .	26
3.11	Typisches Schlafprofil unter Ruhe	29
3.12	Schlafprofil unter Fluglärmeeinfluss	30
3.13	Dosis-Wirkungs-Beziehungen für Belästigung durch Fluglärm . . .	34
4.1	Hybrid-Flughafen Parport mit Parallelbahn- und Routensystem sowie Besiedlungsstruktur im Umfeld	41
4.2	Prinzip einer Punktkontingierung am Hybrid-Flughafen Parport	52
4.3	Prinzip einer Konturkontingierung am Hybrid-Flughafen Parport	54
4.4	Flugbetriebsszenario Standard mit Korridoren und ohne Korridore, $L_{eq(4)}$ -Pegel-Differenz, $L_{eq(4)} = 55 \text{ dB}$	55
4.5	Prinzip einer Flächenkontingierung am Hybrid-Flughafen Parport	56
4.6	Prinzip der Zielwertorientierung bei einer Flächenkontingierung am Hybrid-Flughafen Parport	57

4.7	Flugbetriebsszenario Standard, Anzahl hoch belastigter Einwohner pro Quadratkilometer nach MIEDEMA, $L_{DN} = 55 \text{ dB}, 60 \text{ dB}$	58
4.8	Prinzip einer Volumenkontingentierung über virtuelle Referenzpunkte am Hybrid-Flughafen Parport	59
4.9	Flugbetriebsszenarien Standard und MaxMonat, $L_{DN} = 62 \text{ dB}$	60
4.10	Flugbetriebsszenarien Standard und MaxMet, $L_{DN} = 62 \text{ dB}$	64
4.11	Flugbetriebsszenarien Standard und Max100, $L_{DN} = 62 \text{ dB}$	65
A.1	Zusatzpegel Z , Fluggeschwindigkeit V und Flughöhe H als Funktion der Bogenlänge σ' für Abflug und Anflug der AzB 95-Flugzeuggruppe S5(H)	129
A.2	Schallpegel L_A bei Luft-Boden-Schallausbreitung, Schallpegel L_B bei Boden-Boden-Schallausbreitung und Pegelminderung E als Funktion der Ausbreitungsentfernung s für Abflug und Anflug der AzB 95-Flugzeuggruppe S5(H)	129
A.3	Zusatzpegel Z , Fluggeschwindigkeit V und Flughöhe H als Funktion der Bogenlänge σ' für Abflug und Anflug der AzB 95-Flugzeuggruppe S7B	130
A.4	Schallpegel L_A bei Luft-Boden-Schallausbreitung, Schallpegel L_B bei Boden-Boden-Schallausbreitung und Pegelminderung E als Funktion der Ausbreitungsentfernung s für Abflug und Anflug der AzB 95-Flugzeuggruppe S7B	130
A.5	Hybrid-Flughafen Parport mit Parallelbahn- und Routensystem	131
A.6	Besiedlungsstruktur im Umfeld des Hybrid-Flughafens Parport	132

Tabellenverzeichnis

A.1	Flugzeugklassen- und Flugzeuggruppeneinteilung nach AzB 95 . . .	127
A.2	Flugbetriebsszenario Alt-Standard, $L_{eq(4)}$, nach Tageszeit	134
A.3	Flugbetriebsszenario Alt-Standard, $L_{eq(4)}$, nach Flugroute	134
A.4	Flugbetriebsszenario Standard, $L_{eq(4)}$, nach Tageszeit	134
A.5	Flugbetriebsszenario Standard, $L_{eq(4)}$, nach Flugroute	135
A.6	Flugbetriebsszenario Standard, L_{DN} , nach Tageszeit	135
A.7	Flugbetriebsszenario Standard, L_{DN} , nach Flugroute	135
A.8	Flugbetriebsszenario Standard, L_{DEN} , nach Tageszeit	136
A.9	Flugbetriebsszenario Standard, L_{DEN} , nach Flugroute	136
A.10	Flugbetriebsszenario MaxMonat, L_{DN} , nach Tageszeit	136
A.11	Flugbetriebsszenario MaxMonat, L_{DN} , nach Flugroute	137
A.12	Flugbetriebsszenario MaxMet, L_{DN} , nach Tageszeit	137
A.13	Flugbetriebsszenario MaxMet, L_{DN} , nach Flugroute	137

Abkürzungsverzeichnis

AI	Artikulationsindex
AIR	Aerospace Information Report
ANICA	Aircraft Noise Impact Calculations and Analyses
ARP	Aerospace Recommended Practice
ARR	Arrival
ATA	Schnellstart-Verfahren
AzB	Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen
BGBI	Bundesgesetzblatt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung, vormals Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
BPR	Bypass Ratio
BRAC	Basic-Rest-Activity-Cycle
CR	Contractor Report
DAI	Danish Acoustical Institute
DEP	Departure
DES	Datenerfassungssystem
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, vormals Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
EG	Europäische Gemeinschaft
EPNL	Effective Perceived Noise Level
EU	Europäische Union
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
FAA	Federal Aviation Administration
FluglärmG	Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm
FMS	Flight Management System
FPKV	Verordnung über die Durchführung der Flugplankoordinierung
GE	General Electric
GG	Grundgesetz
GMBI	Gemeinsames Ministerialblatt
HA	Highly Annoyed
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
INM	Integrated Noise Model
ISO	International Organization for Standardization

KOM	Kommission der Europäischen Gemeinschaften
LSL	Lärmschutzforderungen für Luftfahrzeuge
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
MER	Milieu-effectrapport
MTOW	Maximum Take-off Weight
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAT	Number Above Threshold
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NLR	Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium
ÖAL	Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung
OVG	Oberverwaltungsgericht
REM	Rapid Eye Movement
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
SAE	Society of Automotive Engineers
SEL	Single-Event Exposure Level
STI	Sprachübertragungsindex
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast- Natuurwetenschappelijk Onderzoek
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WaBoLu	Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Umweltbundesamtes
ZfL	Zeitschrift für Lärmbekämpfung
ZLK	Zeitabhängiges Lärm-Kontingent

Formelzeichenverzeichnis

α	Elevationswinkel, Höhenwinkel
ΔL_{AD_n}	Atmosphärische Dämpfung für die Terz- oder Oktavmittenfrequenz n
ΔL_{BD_n}	Bodenzusatzdämpfung für die Terz- oder Oktavmittenfrequenz n
ΔL_{ME_n}	Meteorologieeinfluss für die Terz- oder Oktavmittenfrequenz n
ΔL_{SD_n}	Sphärische Divergenz für die Terz- oder Oktavmittenfrequenz n
ΔL_{TE_n}	Topographieeinfluss für die Terz- oder Oktavmittenfrequenz n
σ'	Bogenlänge
a	Konstante
a_i	Benötigter Lizenzanteil für das Fluggeräusch i
A	Verfügbare Lizenzmenge
A'	Verfügbare Lizenzmenge, normiert
b	Konstante
B_n	Pegelminderung für die Terz- oder Oktavmittenfrequenz n
C	Konstante
d_n	Dämpfungskonstante für die Terz- oder Oktavmittenfrequenz n
E	Pegelminderung
F	Flächeninhalt
g_i	Tageszeitbezogener Wichtungsfaktor für das Fluggeräusch i
G_n	Asymptotische Pegelminderung für die Terz- oder Oktavmittenfrequenz n
H	Flughöhe
i	Laufender Index
k	Äquivalenzparameter
L	Schallpegel
L_{0_n}	Schallpegel in der Bezugsentfernung s_0 für die Terz- oder Oktavmittenfrequenz n
L_A	Schallpegel bei Luft-Boden-Schallausbreitung
L_{AS}	Schallpegel, Frequenzbewertung A, Zeitbewertung Slow
L_{AS_i}	Schallpegel, Frequenzbewertung A,

L_{ASmax}	Zeitbewertung Slow, für das Fluggeräusch i Maximaler Schallpegel, Frequenzbewertung A, Zeitbewertung Slow
L_{ASmax_i}	Maximaler Schallpegel, Frequenzbewertung A, Zeitbewertung Slow, für das Fluggeräusch i
L_{AX}	Einzelereignispegel
L_{AX_i}	Einzelereignispegel für das Fluggeräusch i
L_{AZ}	Einzelereignispegel
L_{AZ_i}	Einzelereignispegel für das Fluggeräusch i
L_B	Schallpegel bei Boden-Boden-Schallausbreitung
L_{DEN}	Day Evening Night Level
L_{DN}	Day Night Level
L_{eq}	Äquivalenter Dauerschallpegel
$L_{eq, Limit}$	Äquivalenter Dauerschallpegel, Limit
$L_{eq(3)}$	Energieäquivalenter Dauerschallpegel
$L_{eq(3), Limit}$	Energieäquivalenter Dauerschallpegel, Limit
$L_{eq(4)}$	Äquivalenter Dauerschallpegel nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm
L_E	Einzelereignispegel
L_{NA}	Störgeräuschpegel, Frequenzbewertung A
L_{Night}	Night Level
L_{SA}	Sprachscharpegel, Frequenzbewertung A
$L_{SA, 1m}$	Sprechscharpegel, Frequenzbewertung A
L_{SNA}	Sprach-Störgeräuschabstand, Frequenzbewertung A
M	Machzahl
n	Laufender Index
O_n	Schallpegel für die Oktavmittenfrequenz n
q	Halbierungsparameter
R_n	Richtungsfaktor für die Oktavmittenfrequenz n
s	Ausbreitungsentfernung
s_0	Bezugsentfernung
s_1	Konstante
s_i	Ausbreitungsentfernung für das Fluggeräusch i
t	Zeit
t_{10}	10 dB-Down Time
t_{10_i}	10 dB-Down Time für das Fluggeräusch i
t_i	Dauer für das Fluggeräusch i
t_{ref}	Bezugszeit
T	Bezugszeitraum, Bemessungszeitraum
U	Strahlgeschwindigkeit
V	Fluggeschwindigkeit

V_i Fluggeschwindigkeit für das Fluggeräusch i
 Z Zusatzpegel

Einheitenverzeichnis

$^{\circ}$	Grad
dB	Dezibel
$dB(A)$	Dezibel, Frequenzbewertung A
EW	Einwohner
ft	Feet
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
km	Kilometer
m	Meter
s	Sekunde
t	Tonne

Anhang

In der vorliegenden Arbeit werden zentrale Aussagen, Argumentationsketten und Schlussfolgerungen ebenso wie komplexe Interdependenzen bei Bedarf anhand von exemplarischen Flugbetriebsszenarien für den aus realen und fiktiven Elementen generierten Hybrid-Flughafen Parport diskutiert und veranschaulicht.

Die Kapitel A.1 und A.2 stellen das für die entsprechenden Berechnungen genutzte Programmsystem ANICA und die zugrunde liegende Datenbasis vor.

A.1 Programmsystem ANICA

Das Programmsystem ANICA (Aircraft Noise Impact Calculations and Analyses) wurde zwischen 1997 und 2001 vom Autor beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln entwickelt und programmiert.

Die folgenden Kapitel geben eine Übersicht über Einsatzspektrum, Umsetzung und Anwendung des seit 1998 operationell verwendeten Computerprogramms.

A.1.1 Einsatzspektrum

Wesentliches Einsatzgebiet des Programmsystems ANICA ist die Berechnung und Analyse der durch Flugzeuge und Hubschrauber verursachten Geräuschemissionen in der Umgebung von Verkehrsflughäfen. Darauf aufbauend ermöglichen integrierte Bewertungsverfahren die Berücksichtigung humanspezifischer Fluglärmwirkungen und eröffnen damit ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld.

Für die im Zusammenhang mit Fluglärmkontingentierungen relevanten Aufgabenstellungen wurde das Programm in einigen Bereichen vom Autor gezielt erweitert. In die Analysen und Bewertungen kann nun unmittelbar die Besiedlungsstruktur eingehen. Auch wurden Methoden implementiert, die eine Betrachtung von Pegel-Häufigkeitsverteilungen zulassen. Schließlich wurden aktuell diskutierte oder international übliche zeitintegrierte Kenngrößen, wie etwa der Day Evening Night Level L_{DEN} oder der Day Night Level L_{DN} , verfügbar gemacht.

Alles in allem steht mit ANICA ein Programmsystem zur Verfügung, das ein umfangreiches Einsatzspektrum von der Planung und Validierung akustischer ebenso wie medizinisch-psychologischer Messkampagnen bis zur Untersuchung von Optionen zur Lärmminimierung in der Flughafenumgebung angemessen abdeckt.

A.1.2 Umsetzung

Das in ANICA implementierte Berechnungsverfahren ist vollständig kompatibel mit der in der AzB niedergelegten Methodik [37], verfügt jedoch über eine deutlich erweiterte Funktionalität im Bereich der Datenanalyse und -bewertung sowie der graphischen und tabellarischen Aufbereitung der Ergebnisse.

ANICA ist als konventionelles Prognoseverfahren ausgelegt und somit auf die Reproduktion durchschnittlicher Einzelschallereignisse unter Berücksichtigung charakteristischer Ausbreitungsbedingungen beschränkt. Wie bereits in Kapitel 3.2.3 ausgeführt, sind die erzielbaren Genauigkeiten jedoch für die Anwendung bei Fluglärmkontingentierungen hinreichend.

Das Programmsystem ist modular strukturiert, sodass Erweiterungen und Modifikationen mit überschaubarem Aufwand möglich sind. Kenngrößen für Fluggeräuschemissionen, Flughafeninfrastruktur, Besiedlungsstruktur und Flugbetriebsszenarien werden über externe Datensätze eingelesen und sichern so höchstmögliche Flexibilität.

Die Berechnungen werden üblicherweise für die Punkte eines regelmäßigen Gitters beliebiger Maschenweite durchgeführt. Aus den Zahlenwerten für diese Gitterpunkte können dann die Konturkoordinaten mit einem Konturverfolgungsalgorithmus ermittelt werden. Als besonders geeignet haben sich – je nach konkretem Anwendungsfall – Maschenweiten zwischen 50 *m* und 250 *m* erwiesen. Bei Bedarf ist die Interpolation zusätzlicher Stützstellen möglich.

Eine gegebenenfalls gewünschte moderate Glättung des Konturverlaufs wird durch Anwendung der folgenden Rechenvorschriften für jeden Konturpunkt erreicht:

$$x_i = \frac{x_{i-1} + 2x_i + x_{i+1}}{4}$$
$$y_i = \frac{y_{i-1} + 2y_i + y_{i+1}}{4}$$

Der von einzelnen Konturen umschlossene Flächeninhalt F wird nach der GAUSS'schen Flächenformel unmittelbar aus den Konturkoordinaten ermittelt.

$$F = \left| \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i)}{2} \right|$$

Darüber hinaus kann der Flächeninhalt auch aus den vorliegenden Rohdaten näherungsweise geschätzt werden. Die in der Praxis beobachteten Abweichungen zur direkten Konturlösung sind bei adäquat gewählter Maschenweite in der Regel gering, sodass hiermit ein geeignetes Kontrollinstrument vorliegt.

Es können sowohl zeitintegrierte Kenngrößen und Pegel-Häufigkeitsverteilungen als auch personenbezogene Werte, wie etwa die Zahl hoch belästigter Personen, ausgewiesen werden. Zudem ist die Überlagerung zweier bereits existierender Datensätze nach verschiedenen Kriterien möglich, sodass beispielsweise für die Bestimmung einer Envelope keine Neuberechnung erforderlich ist.

Gezielte Auswertungen für bestimmte Einzelpunkte liefern bei Bedarf detaillierte Informationen in graphischer oder tabellarischer Form und ergänzen ergebnisorientiert die flächigen Betrachtungen.

Validität und Reliabilität der mit dem erweiterten Programmsystem ANICA durchgeführten Berechnungen von Fluggeräuschmissionen wurden eingehend mittels umfangreicher Vergleichsrechnungen des DLR-Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik in Göttingen überprüft.

Weitergehende Informationen über das Programmsystem ANICA enthält das Benutzerhandbuch [44].

A.1.3 Anwendung

Die Berechnungen für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Flugbetriebsszenarien wurden für die Punkte eines äquidistanten Gitters mit einer Maschenweite von 100 m durchgeführt. Dabei wurde in der Regel ein Bereich von -20000 m bis 20000 m in West-Ost-Richtung und von -16000 m bis 12000 m in Süd-Nord-Richtung relativ zum Bezugspunkt des Flughafens Parport berücksichtigt, sodass der für Fluglärmkontingentierungen relevante Bereich komplett abgedeckt war.

Die gewählte Maschenweite von 100 m stellte einen Kompromiss zwischen Dateigröße und benötigter Rechenzeit auf der einen sowie hinreichendem Auflösungsgrad auf der anderen Seite dar. In den Abbildungen wurde der berücksichtigte Bereich gelegentlich nur ausschnittsweise dargestellt, um eine detailliertere Wiedergabe zu ermöglichen.

Auf die Glättung der berechneten Konturen und die Ermittlung zusätzlicher Stützpunkte mittels Interpolation wurde im Interesse einer verzerrungsfreien Präsentation der Ergebnisse bewusst verzichtet.

Die explizit berücksichtigten Einzelpunkte wurden gezielt aufgrund ihrer herausgehobenen Lage oder anderer spezifischer Eigenschaften ausgewählt, die sie für eine detaillierte Betrachtung in besonderem Maß geeignet erscheinen ließen.

Um Verfälschungen in den niedrigeren Dauerschallpegelbereichen sicher auszuschließen, wurde der Abbruchpegel – anders als in der AzB vorgesehen – auf $L_{ASmax} = 20\text{ dB}$ festgelegt.

A.2 Datenbasis

Kenngrößen für Fluggeräuschemissionen, Flughafeninfrastruktur, Besiedlungsstruktur und Flugbetriebsszenarien werden vom Programmsystem ANICA aus externen Datensätzen eingelesen.

Die den Berechnungen für diese Arbeit zugrunde liegende Datenbasis wird im Folgenden erläutert.

A.2.1 Fluggeräuschemissionen

Auf den deutschen Verkehrsflughäfen werden inzwischen nahezu ausschließlich Flugzeuge eingesetzt, die nach Kapitel 3 des ICAO Annex 16 zugelassen sind. Die derzeit geltenden amtlichen Datensätze der AzB von 1984 geben die aktuelle Zusammensetzung der Luftfahrzeugflotten jedoch nicht im erforderlichen Detaillierungsgrad wieder [39, 98].

Als Basis der Fluggeräuschemissionsmodellierung dienten deshalb aktualisierte Datensätze, die in ihrem Aufbau kompatibel zur AzB sind [37, 39]. Sie wurden von ISERMANN im Auftrag des Umweltbundesamtes erarbeitet, später von ihm ergänzt und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt [103, 106]. Unter der Bezeichnung AzB 95 waren sie auch Diskussionsgrundlage einer vom Umweltbundesamt einberufenen Expertenrunde.

Das Ergebnis der Beratungen liegt als Ergänzungsvorschlag AzB 99 den zuständigen Behörden vor. Die im Vergleich zur AzB 95 empfohlenen geringfügigen Modifikationen betreffen im Wesentlichen eine detailliertere Unterteilung der Propellerkleinflugzeuge bis 5,7 t sowie die Schaffung einer eigenen Gruppe für Strahlverkehrsflugzeuge bis 50 t, wie etwa den Canadair Regional Jet oder die British Aerospace BAe 146. Sie sollen einen adäquaten Einsatz des AzB-Verfahrens auch für Verkehrslandeplätze und kleinere Verkehrsflughäfen sicherstellen.

Mit einer Entscheidung über die Implementierung des Vorschlags ist vorerst nicht zu rechnen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass eine entsprechende Anpassung der AzB-Datenbasis erst im Zusammenhang mit der erneut verschobenen Überarbeitung des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm vorgenommen wird.

Die AzB 95 ist in 18 Flugzeuggruppen unterteilt. In Abhängigkeit von der ICAO-Zulassung und dem Auslastungsgrad (Kurzstrecke, Mittel-/Langstrecke) werden spezifische An- und Abflugverfahren definiert, die schließlich zu einer Differenzierung nach insgesamt 46 Flugzeugklassen führen.

Für jede dieser Flugzeugklassen enthalten die Datensätze der AzB 95 die Schallpegel O_n und die angenäherten Richtcharakteristiken R_n für die acht Oktavmit-

Flugzeugklasse	Flugzeuggruppe	Kapitel	Auslastung	Beschreibung	Beispiele
1	P1 DEP			Propellerflugzeuge, MTOW bis 5,7 t	Propellerkleinflugzeuge
2	P1 ARR			Propellerflugzeuge, MTOW bis 5,7 t	Propellerkleinflugzeuge
3	P2 DEP	–		Propellerflugzeuge, MTOW größer 5,7 t	HS748, Hercules
4	P2 ARR	–		Propellerflugzeuge, MTOW größer 5,7 t	HS748, Hercules
5	P2(N) DEP	3		Propellerflugzeuge, MTOW größer 5,7 t	Dash-7/8, F50
6	P2(N) ARR	3		Propellerflugzeuge, MTOW größer 5,7 t	Dash-7/8, F50
7	S1 DEP	2		Jets, MTOW bis 100 t	DC9, TU134, B737-200
8	S1 ARR	2		Jets, MTOW bis 100 t	DC9, TU134, B737-200
9	S1(2) DEP	2		B737-200 mit JT8D-15 Mixer-Triebwerk	
10	S1(2) ARR	2		B737-200 mit JT8D-15 Mixer-Triebwerk	
11	S1(3/4) DEP	2		3/4-mot. Jets, MTOW bis 100 t	B727, TU154
12	S1(3/4) ARR	2		3/4-mot. Jets, MTOW bis 100 t	B727, TU154
13	S2 DEP	–		Jets, MTOW bis 100 t	B737-100, B727-100
14	S2 ARR	–		Jets, MTOW bis 100 t	B737-100, B727-100
15	S3(2/3)A DEP	2	kurz	2/3-mot. Jets, MTOW größer 100 t	DC10 älterer Bauart
16	S3(2/3)A ARR	2		2/3-mot. Jets, MTOW größer 100 t	DC10 älterer Bauart
17	S3(2/3)B DEP	2	mittel/lang	2/3-mot. Jets, MTOW größer 100 t	DC10 älterer Bauart
18	S3(2/3)B ARR	2		2/3-mot. Jets, MTOW größer 100 t	DC10 älterer Bauart
19	S3(4)A DEP	2	kurz	4-mot. Jets, MTOW größer 100 t	B747 älterer Bauart
20	S3(4)A ARR	2		4-mot. Jets, MTOW größer 100 t	B747 älterer Bauart
21	S3(4)B DEP	2	mittel/lang	4-mot. Jets, MTOW größer 100 t	B747 älterer Bauart
22	S3(4)B ARR	2		4-mot. Jets, MTOW größer 100 t	B747 älterer Bauart
23	S4A DEP	–	kurz	Jets, MTOW größer 100 t	B707, DC8
24	S4A ARR	–		Jets, MTOW größer 100 t	B707, DC8
25	S4B DEP	–	mittel/lang	Jets, MTOW größer 100 t	B707, DC8
26	S4B ARR	–		Jets, MTOW größer 100 t	B707, DC8
27	S5(M) DEP	3		Jets, MTOW bis 120 t und BPR bis 3	MD8X, B727/B737 (Hush Kit)
28	S5(M) ARR	3		Jets, MTOW bis 120 t und BPR bis 3	MD8X, B727/B737 (Hush Kit)
29	S5(H) DEP	3		Jets, MTOW bis 120 t und BPR größer 3	A320, B757, B737-300 ... 500
30	S5(H) ARR	3		Jets, MTOW bis 120 t und BPR größer 3	A320, B757, B737-300 ... 500
31	S6(2) DEP	3		2-mot. Jets, MTOW größer 120 t	A300, A310, B767, B777
32	S6(2) ARR	3		2-mot. Jets, MTOW größer 120 t	A300, A310, B767, B777
33	S6(3/4)A DEP	3	kurz	3/4-mot. Jets, MTOW größer 120 t und kleiner 300 t	DC10, MD11
34	S6(3/4)A ARR	3		3/4-mot. Jets, MTOW größer 120 t und kleiner 300 t	DC10, MD11
35	S6(3/4)B DEP	3	mittel/lang	3/4-mot. Jets, MTOW größer 120 t und kleiner 300 t	DC10, MD11
36	S6(3/4)B ARR	3		3/4-mot. Jets, MTOW größer 120 t und kleiner 300 t	DC10, MD11
37	S7A DEP	3	kurz	3/4-mot. Jets, MTOW größer 300 t	B747
38	S7A ARR	3		3/4-mot. Jets, MTOW größer 300 t	B747
39	S7B DEP	3	mittel/lang	3/4-mot. Jets, MTOW größer 300 t	B747
40	S7B ARR	3		3/4-mot. Jets, MTOW größer 300 t	B747
41	S8A DEP	3	kurz	A340	
42	S8A ARR	3		A340	
43	S8B DEP	3	mittel/lang	A340	
44	S8B ARR	3		A340	
45	H1			Hubschrauber, MTOW bis 2,5 t	
46	H2			Hubschrauber, MTOW größer 2,5 t	

Tab. A.1: Flugzeugklassen- und Flugzeuggruppeneinteilung nach AzB 95 [103]

tenfrequenzen von 63 Hz bis 8 KHz in einer definierten Bezugsentfernung s_0 . Maßgebliche Flugleistungsdaten wie Start-/Landestrecke, Geschwindigkeit und Steig-/Sinkwinkel sind in Abhängigkeit von der zurückgelegten Flugstrecke verfügbar. Änderungen der Triebwerksleistung während der verschiedenen Flugphasen werden durch Pegelzuschläge oder Pegelabschläge Z modelliert.

Die Fluggeräuschkdauer t_i am Immissionsort wird – wie in der AzB 95 vorgeschlagen – aus der aktuellen Fluggeschwindigkeit V_i , der Ausbreitungsentfernung s_i und den empirisch ermittelten Konstanten a, b für die jeweilige Flugzeugklasse berechnet.

Vergleichsberechnungen mit den als Ergänzungsvorschlag vorliegenden Datensätzen für die Werte des äquivalenten Dauerschallpegels $L_{eq(4)}$ an 23 Messstellen des Frankfurter Flughafens für das Jahr 1996 ergaben an 11 Standorten Abweichungen zwischen Rechnung und Messung von $-0,5\text{ dB}$ bis $1,1\text{ dB}$ und an 9 Stellen von $1,0\text{ dB}$ bis $2,2\text{ dB}$. Lediglich an 3 Stellen waren Abweichungen von $3,5\text{ dB}$ bis $4,4\text{ dB}$ zu verzeichnen [109].

Diese größeren Differenzen lassen sich weitgehend erklären, wenn signifikante Höhenunterschiede zwischen dem als Bezugsbasis für die Berechnungen dienenden Erdboden und den Messpositionen oder anderweitig exponierte Lagen der Messpositionen – beispielsweise unmittelbar hinter dem Startpunkt – berücksichtigt werden [109].

Auch in Österreich ist das AzB-Verfahren unter Verwendung der aktualisierten Emissionsdatensätze in der neuen Ausgabe der ÖAL-Richtlinie 24 zur Berechnung von Fluggeräuschimmissionen vorgesehen, nachdem umfangreiche Fluggeräuschmessungen und Radardatenauswertungen eine gute Übereinstimmung nachgewiesen hatten [130, 162].

Die Abbildungen A.1 bis A.4 stellen auf den beiden folgenden Seiten exemplarisch die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Emissionsdatensätze der Flugzeuggruppen S5(H) und S7B für den Abflug und den Anflug in graphischer Form vor.

Für den Abflug wird das in Deutschland für Kapitel-3-Flugzeuge empfohlene, modifizierte ATA-Verfahren (Schnellstart-Verfahren) angenommen. Für den Anflug wird ein Gleitwinkel von 3° bei einer Zwischenanflughöhe von 4000 ft , entsprechend $1219,2\text{ m}$, zugrunde gelegt. Die Bogenlänge σ' ist auf den Startpunkt beziehungsweise die Landeschwelle bezogen.

Die Schallpegel L_A für Luft-Boden-Schallausbreitung und L_B für Boden-Boden-Schallausbreitung sowie die Pegelminderung E werden aus den Oktavpegeln O_n , den Richtungsfaktoren R_n und den Oktavpegelminderungen B_n entsprechend der AzB-Berechnungsvorschrift für die Schallausbreitung ermittelt.

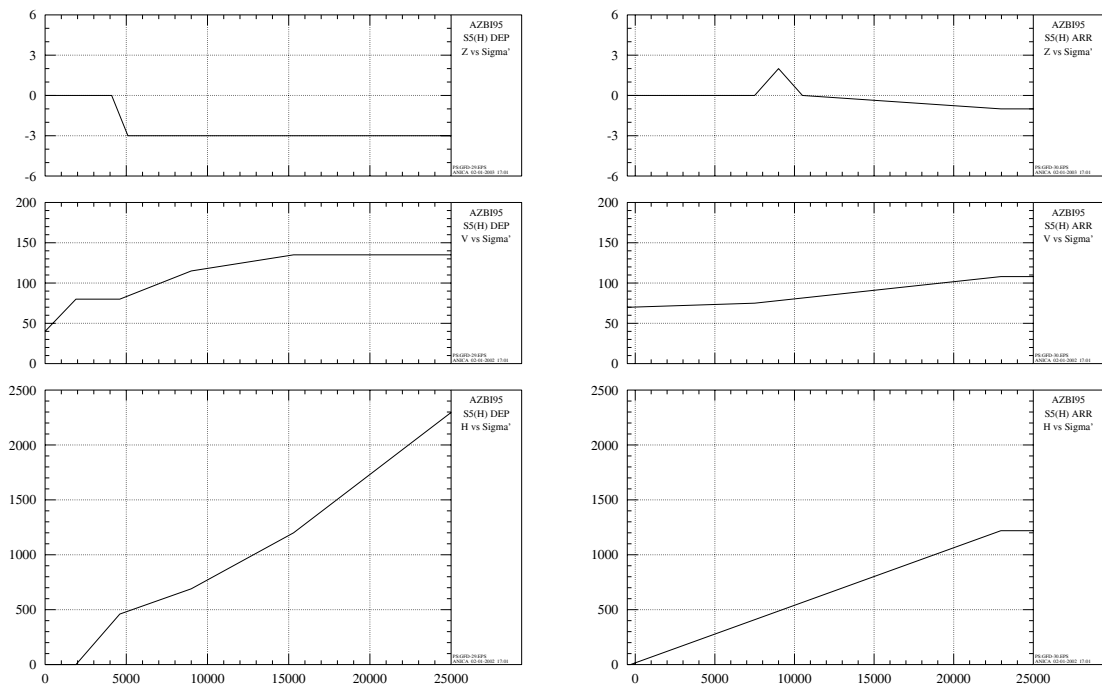


Abb. A.1: Zusatzpegel Z , Fluggeschwindigkeit V und Flughöhe H als Funktion der Bogenlänge σ' für Abflug und Anflug der AzB 95-Flugzeuggruppe S5(H)

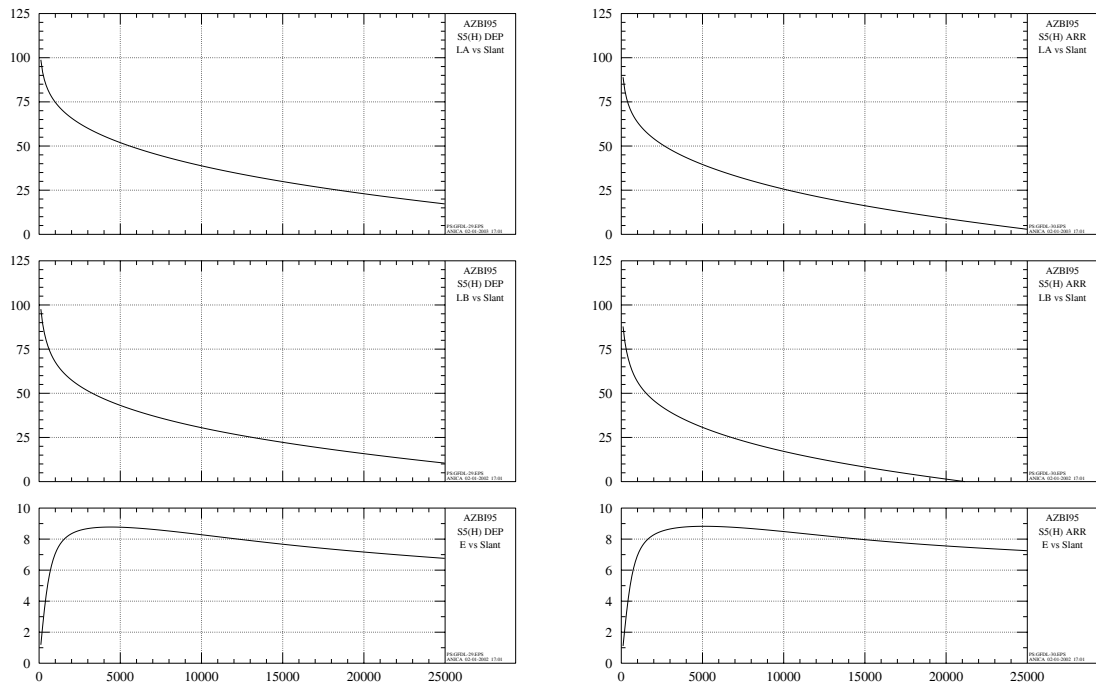


Abb. A.2: Schallpegel L_A bei Luft-Boden-Schallausbreitung, Schallpegel L_B bei Boden-Boden-Schallausbreitung und Pegelminderung E als Funktion der Ausbreitungsentfernung s für Abflug und Anflug der AzB 95-Flugzeuggruppe S5(H)

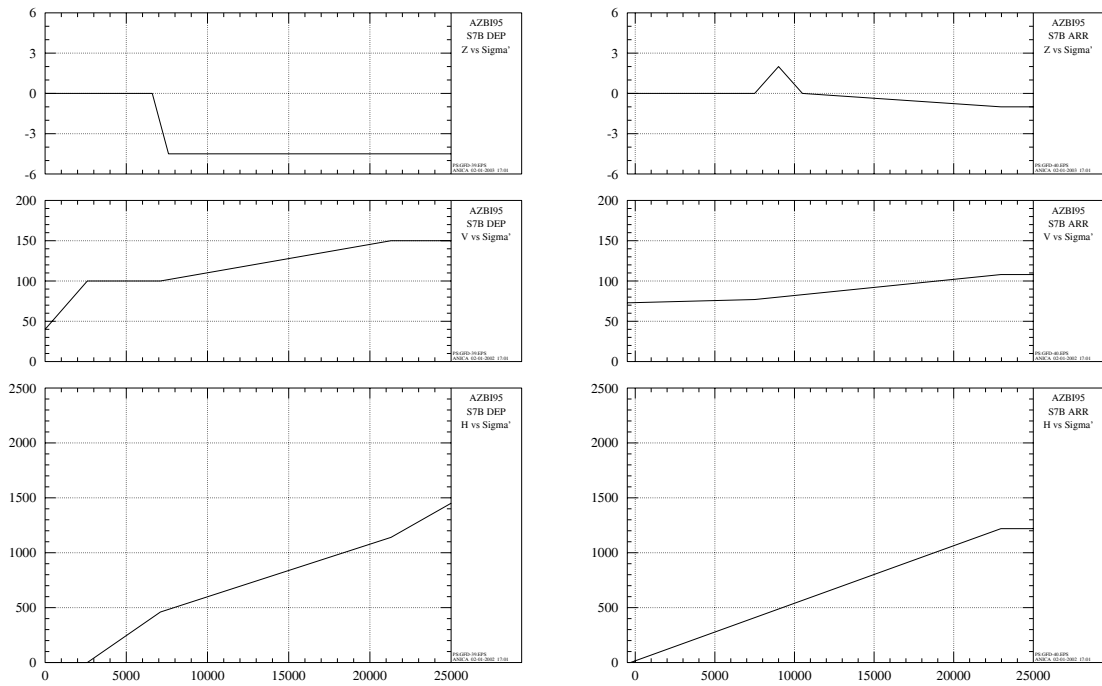


Abb. A.3: Zusatzpegel Z , Fluggeschwindigkeit V und Flughöhe H als Funktion der Bogenlänge σ' für Abflug und Anflug der AzB 95-Flugzeuggruppe S7B

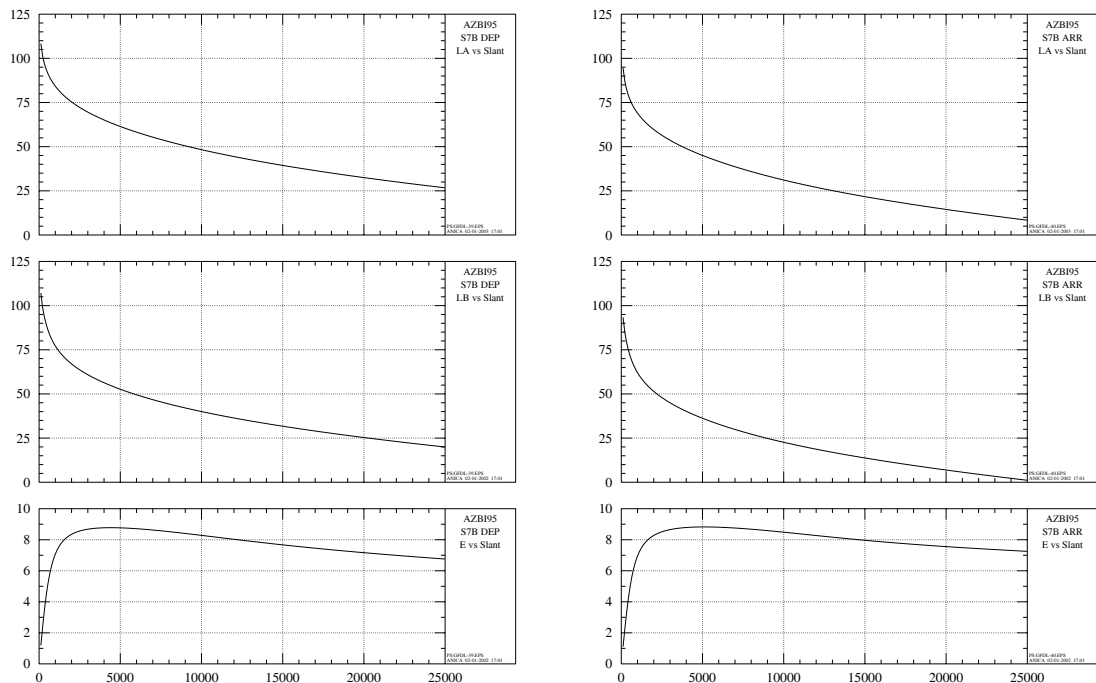


Abb. A.4: Schallpegel L_A bei Luft-Boden-Schallausbreitung, Schallpegel L_B bei Boden-Boden-Schallausbreitung und Pegelminderung E als Funktion der Ausbreitungsentfernung s für Abflug und Anflug der AzB 95-Flugzeuggruppe S7B

A.2.2 Flughafeninfrastruktur

Die exemplarischen Berechnungen wurden für den Hybrid-Flughafen Parport durchgeführt. Die gewählte Kombination realer und fiktiver Elemente stellt einerseits eine hinreichende Praxisnähe sicher. Andererseits sind die Betrachtungen und Interpretationen abstrakt genug, um übertragbare Ergebnisse zu erzielen.

Der generierte Flughafen Parport besitzt ein abhängiges Parallelbahnsystem in Richtung $70^\circ/250^\circ$. Die Start- und Landebahnen sind jeweils 4000 m lang und 60 m breit. Mit insgesamt 20 Abflug- und 4 Anflugstrecken ist das Routensystem bewusst komplex ausgelegt, um allen Fragestellungen im Rahmen dieser Arbeit gerecht werden zu können. Abmessungen und Anordnung der Start- und Landebahnen orientieren sich ebenso wie der Verlauf der An- und Abflugstrecken an den Gegebenheiten am Flughafen Frankfurt ohne die Startbahn 18 (West).

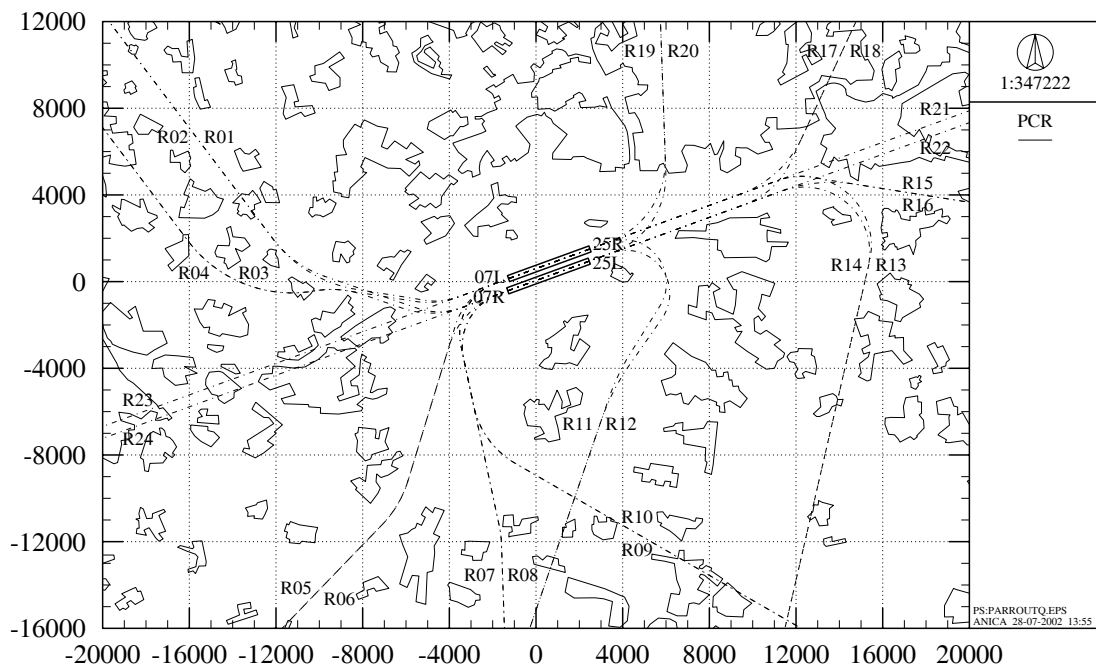


Abb. A.5: Hybrid-Flughafen Parport mit Parallelbahn- und Routensystem

Die Parametrisierung des Bahn- und Routensystems liegt in einer mit dem Datenerfassungssystem (DES) nach AzB kompatiblen Form vor [37,39]. Darin wird eine Flugstrecke durch einzelne Abschnitte, die Kreisbögen oder Geradenstücke sein können, beschrieben. Die maximale seitliche Abweichung der Flugzeuge von der Sollstrecke wird für den Anfang und das Ende eines jeden Abschnitts angegeben.

Der Landegleitwinkel beträgt für alle Betriebsrichtungen 3° . Die Zwischenanflughöhe für Strahlflugzeuge liegt bei 4000 ft , entsprechend $1219,2\text{ m}$. Die Horizontalflughöhe für Propellerkleinflugzeuge der Flugzeuggruppe P1 sowie für an- und abfliegende Hubschrauber der Gruppen H1 und H2 ist jeweils 300 m .

A.2.3 Besiedlungsstruktur

Lage und Flächenbedarf der betrachteten Städte, Gemeinden und Ortschaften in der Umgebung des fiktiven Flughafens Parport entsprechen weitgehend der realen Situation im Großraum Frankfurt. Abweichend wird jedoch die Bevölkerungsdichte im weniger städtischen Raum mit konstant $510 \text{ EW}/\text{km}^2$, im innerstädtischen Ballungsraum mit konstant $4200 \text{ EW}/\text{km}^2$ angenommen.

Aus der Besiedlungsstruktur, wie sie in Abbildung A.6 dargestellt ist, ergibt sich bei einer berücksichtigten Grundfläche von etwa 1127 km^2 eine Gesamtzahl von rund 518000 Einwohnern.

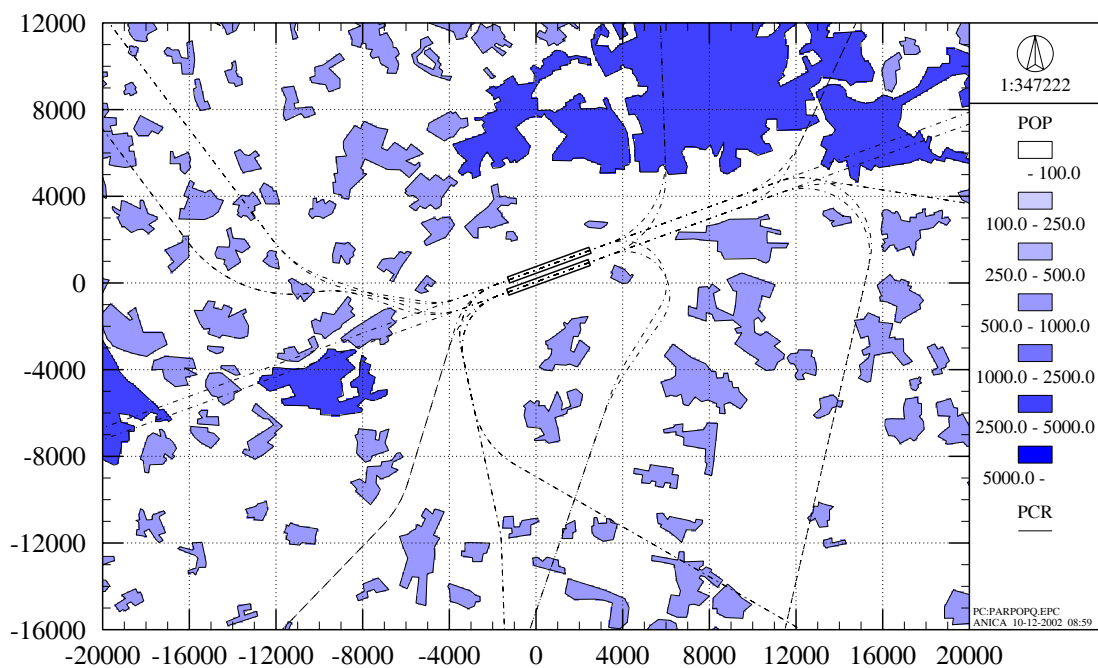


Abb. A.6: Besiedlungsstruktur im Umfeld des Hybrid-Flughafens Parport

A.2.4 Flugbetriebsszenarien

Ausgangsbasis für die Flugbetriebsszenarien waren detaillierte Verkehrsstatistiken des Flughafens Frankfurt für die sechs verkehrsreichsten Monate der Jahre 1991, 1992 und 1995 sowie eine Verkehrsprognose für 1995 aus 1991 [65–67]. Des Weiteren sind die Analyseergebnisse eines Datenerfassungssystems (DES) für den Flughafen München mit einer Verkehrsprognose für das Jahr 2003 aus 1993 sowie zusätzliche Verkehrsinformationen aus 1999 für die Flughäfen Düsseldorf, Frankfurt und München in die Datensätze eingegangen [68, 108].

Die Flugbetriebsszenarien wurden unter Berücksichtigung verkehrlicher, betrieblicher, flugsicherungstechnischer und meteorologischer Aspekte für den Hybrid-Flughafen Parport modelliert. Ausgehend von einem Alt-Standard, der die Situation Ende der neunziger Jahre unter Einbezug von Kapitel-2-Fluggerät wiedergibt, wurde ein Standard abgeleitet, der infolge des ausschließlichen Einsatzes von Kapitel-3-Fluggerät bei weitgehend konstanten energieäquivalenten Dauerschallpegeln rund 18 % zusätzlichen Flugverkehr auf dem Parallelbahn- und Routensystem ermöglicht.

Der Flughafen ist mit den beim Standard zugrunde gelegten knapp 274000 Flugbewegungen pro Jahr hoch belastet. Der Verkehrsanteil der verkehrsreichsten sechs Monate eines Jahres wurde deshalb mit 52 % angesetzt, entsprechend rund 142500 Bewegungen. Mit 78,4 % Westwetterlagen und 21,6 % Ostwetterlagen wurde eine für Deutschland typische Verteilung angenommen.

Die übrigen für die vorliegende Arbeit verwendeten Flugbetriebsszenarien variieren diesen Standard unter spezifischen Randbedingungen. So bildet etwa das Szenario MaxMonat den verkehrsreichsten Monat innerhalb des Standards ab. Die Zahl der Flugbewegungen liegt mit 24640 rund 8 % oberhalb des durchschnittlichen Monats.

Die Auswirkungen einer vom langjährigen Mittel abweichenden Windrichtungsverteilung auf die Fluggeräuschbelastung in der Umgebung des Flughafens Parport wurden mit dem Szenario MaxMet simuliert. Mit 64 % Westwetterlagen und 36 % Ostwetterlagen wurde hierzu eine wichtige meteorologische Randbedingung erheblich modifiziert. Eine vergleichbare reale Situation lag am Flughafen Frankfurt im Jahr 1996 vor.

Die Tabellen A.2 bis A.5 zeigen exemplarisch einen Vergleich der beiden Szenarien Alt-Standard und Standard für den äquivalenten Dauerschallpegel $L_{eq(4)}$. Bezugszeitraum sind die sechs verkehrsreichsten Monate. Der Tag umfasst definitionsgemäß die Zeit zwischen 6 Uhr und 22 Uhr, die Nacht die Zeit zwischen 22 Uhr und 6 Uhr.

Die Tabellen A.6 bis A.9 weisen die Flugbewegungsverteilungen für den Day Night Level L_{DN} und den Day Evening Night Level L_{DEN} für das Standard-Szenario aus. Bezugszeitraum ist hier jeweils ein Kalenderjahr. Beim L_{DN} wird als Tag die Zeit von 7 Uhr bis 22 Uhr berücksichtigt, als Nacht die Zeit von 22 Uhr bis 7 Uhr. Beim L_{DEN} ist der Tag mit 7 Uhr bis 19 Uhr, der Abend mit 19 Uhr bis 23 Uhr und die Nacht mit 23 Uhr bis 7 Uhr vereinbart.

Die Tabellen A.10 bis A.13 fassen die Flugbetriebsszenarien MaxMonat und MaxMet am Beispiel des L_{DN} in einer Übersicht zusammen. Für das Szenario MaxMonat wurden die Monatswerte zur besseren Vergleichbarkeit mit den anderen Szenarien proportional auf ein Jahr hochskaliert.

Flugzeuggruppe	Anzahl			Anteil [%]		
	Tag	Nacht	Gesamt	Tag	Nacht	Gesamt
P2(N)	9976	1184	11160	8,2	1,0	9,2
S3(2/3)B	2816	464	3280	2,3	0,4	2,7
S5(M)	9095	541	9636	7,5	0,4	8,0
S5(H)	57726	5520	63246	47,7	4,6	52,2
S6(2)	14366	2142	16508	11,9	1,8	13,6
S6(3/4)B	4595	563	5158	3,8	0,5	4,3
S7A	4003	301	4304	3,3	0,2	3,6
S7B	6922	874	7796	5,7	0,7	6,4
S8B	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Summe	109499	11589	121088	90,4	9,6	100,0

Tab. A.2: Flugbetriebsszenario Alt-Standard, $L_{eq(4)}$, nach Tageszeit

Flugzeuggruppe	Anzahl				
	Routen 1-10	Routen 21-22	Routen 11-20	Routen 23-24	Routen 1-24
P2(N)	4373	4373	1207	1207	11160
S3(2/3)B	1285	1285	355	355	3280
S5(M)	3776	3776	1042	1042	9636
S5(H)	24784	24784	6839	6839	63246
S6(2)	6469	6469	1785	1785	16508
S6(3/4)B	2021	2021	558	558	5158
S7A	1687	1687	465	465	4304
S7B	3055	3055	843	843	7796
S8B	0	0	0	0	0
Summe	47450	47450	13094	13094	121088

Tab. A.3: Flugbetriebsszenario Alt-Standard, $L_{eq(4)}$, nach Flugroute

Flugzeuggruppe	Anzahl			Anteil [%]		
	Tag	Nacht	Gesamt	Tag	Nacht	Gesamt
P2(N)	11737	1391	13128	8,2	1,0	9,2
S3(2/3)B	0	0	0	0,0	0,0	0,0
S5(M)	4018	4	4022	2,8	0,0	2,8
S5(H)	74600	7122	81722	52,4	5,0	57,4
S6(2)	16902	2522	19424	11,9	1,8	13,6
S6(3/4)B	5402	662	6064	3,8	0,5	4,3
S7A	4710	354	5064	3,3	0,2	3,6
S7B	8145	1029	9174	5,7	0,7	6,4
S8B	3311	547	3858	2,3	0,4	2,7
Summe	128825	13631	142456	90,4	9,6	100,0

Tab. A.4: Flugbetriebsszenario Standard, $L_{eq(4)}$, nach Tageszeit

Flugzeuggruppe	Anzahl				
	Routen 1-10	Routen 21-22	Routen 11-20	Routen 23-24	Routen 1-24
P2(N)	5144	5144	1420	1420	13128
S3(2/3)B	0	0	0	0	0
S5(M)	1576	1576	435	435	4022
S5(H)	32024	32024	8837	8837	81722
S6(2)	7612	7612	2100	2100	19424
S6(3/4)B	2377	2377	655	655	6064
S7A	1984	1984	548	548	5064
S7B	3595	3595	992	992	9174
S8B	1512	1512	417	417	3858
Summe	55824	55824	15404	15404	142456

Tab. A.5: Flugbetriebsszenario Standard, $L_{eq(4)}$, nach Flugroute

Flugzeuggruppe	Anzahl			Anteil [%]		
	Tag	Nacht	Gesamt	Tag	Nacht	Gesamt
P2(N)	21160	4086	25246	7,7	1,5	9,2
S3(2/3)B	0	0	0	0,0	0,0	0,0
S5(M)	7246	490	7736	2,6	0,2	2,8
S5(H)	134496	22660	157156	49,1	8,3	57,4
S6(2)	30469	6885	37354	11,1	2,5	13,6
S6(3/4)B	9739	1923	11662	3,6	0,7	4,3
S7A	8493	1245	9738	3,1	0,5	3,6
S7B	14685	2957	17642	5,4	1,1	6,4
S8B	5971	1449	7420	2,2	0,5	2,7
Summe	232259	41695	273954	84,8	15,2	100,0

Tab. A.6: Flugbetriebsszenario Standard, L_{DN} , nach Tageszeit

Flugzeuggruppe	Anzahl				
	Routen 1-10	Routen 21-22	Routen 11-20	Routen 23-24	Routen 1-24
P2(N)	9892	9892	2731	2731	25246
S3(2/3)B	0	0	0	0	0
S5(M)	3031	3031	837	837	7736
S5(H)	61585	61585	16993	16993	157156
S6(2)	14639	14639	4038	4038	37354
S6(3/4)B	4571	4571	1260	1260	11662
S7A	3815	3815	1054	1054	9738
S7B	6913	6913	1908	1908	17642
S8B	2908	2908	802	802	7420
Summe	107354	107354	29623	29623	273954

Tab. A.7: Flugbetriebsszenario Standard, L_{DN} , nach Flugroute

Flugzeuggruppe	Anzahl				Anteil [%]			
	Tag	Abend	Nacht	Gesamt	Tag	Abend	Nacht	Gesamt
P2(N)	16925	5303	3018	25246	6,2	1,9	1,1	9,2
S3(2/3)B	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
S5(M)	5797	1453	486	7736	2,1	0,5	0,2	2,8
S5(H)	107597	32375	17184	157156	39,3	11,8	6,3	57,4
S6(2)	24379	8035	4940	37354	8,9	2,9	1,8	13,6
S6(3/4)B	7795	2455	1412	11662	2,8	0,9	0,5	4,3
S7A	6792	1970	976	9738	2,5	0,7	0,4	3,6
S7B	11746	3728	2168	17642	4,3	1,4	0,8	6,4
S8B	4776	1614	1030	7420	1,7	0,6	0,4	2,7
Summe	185807	56933	31214	273954	67,8	20,8	11,4	100,0

Tab. A.8: Flugbetriebsszenario Standard, L_{DEN} , nach Tageszeit

Flugzeuggruppe	Anzahl				
	Routen 1-10	Routen 21-22	Routen 11-20	Routen 23-24	Routen 1-24
P2(N)	9892	9892	2731	2731	25246
S3(2/3)B	0	0	0	0	0
S5(M)	3031	3031	837	837	7736
S5(H)	61585	61585	16993	16993	157156
S6(2)	14639	14639	4038	4038	37354
S6(3/4)B	4571	4571	1260	1260	11662
S7A	3815	3815	1054	1054	9738
S7B	6913	6913	1908	1908	17642
S8B	2908	2908	802	802	7420
Summe	107354	107354	29623	29623	273954

Tab. A.9: Flugbetriebsszenario Standard, L_{DEN} , nach Flugroute

Flugzeuggruppe	Anzahl			Anteil [%]		
	Tag	Nacht	Gesamt	Tag	Nacht	Gesamt
P2(N)	22838	4410	27248	7,7	1,5	9,2
S3(2/3)B	0	0	0	0,0	0,0	0,0
S5(M)	7819	529	8348	2,6	0,2	2,8
S5(H)	145163	24457	169620	49,1	8,3	57,4
S6(2)	32886	7430	40316	11,1	2,5	13,6
S6(3/4)B	10514	2074	12588	3,6	0,7	4,3
S7A	9167	1345	10512	3,1	0,5	3,6
S7B	15850	3190	19040	5,4	1,1	6,4
S8B	6445	1565	8010	2,2	0,5	2,7
Summe	250682	45000	295682	84,8	15,2	100,0

Tab. A.10: Flugbetriebsszenario MaxMonat, L_{DN} , nach Tageszeit

Flugzeuggruppe	Anzahl				
	Routen 1-10	Routen 21-22	Routen 11-20	Routen 23-24	Routen 1-24
P2(N)	10676	10676	2948	2948	27248
S3(2/3)B	0	0	0	0	0
S5(M)	3271	3271	903	903	8348
S5(H)	66469	66469	18341	18341	169620
S6(2)	15800	15800	4358	4358	40316
S6(3/4)B	4934	4934	1360	1360	12588
S7A	4118	4118	1138	1138	10512
S7B	7461	7461	2059	2059	19040
S8B	3139	3139	866	866	8010
Summe	115868	115868	31973	31973	295682

Tab. A.11: Flugbetriebsszenario MaxMonat, L_{DN} , nach Flugroute

Flugzeuggruppe	Anzahl			Anteil [%]		
	Tag	Nacht	Gesamt	Tag	Nacht	Gesamt
P2(N)	21160	4086	25246	7,7	1,5	9,2
S3(2/3)B	0	0	0	0,0	0,0	0,0
S5(M)	7246	490	7736	2,6	0,2	2,8
S5(H)	134496	22660	157156	49,1	8,3	57,4
S6(2)	30469	6885	37354	11,1	2,5	13,6
S6(3/4)B	9739	1923	11662	3,6	0,7	4,3
S7A	8493	1245	9738	3,1	0,5	3,6
S7B	14685	2957	17642	5,4	1,1	6,4
S8B	5971	1449	7420	2,2	0,5	2,7
Summe	232259	41695	273954	84,8	15,2	100,0

Tab. A.12: Flugbetriebsszenario MaxMet, L_{DN} , nach Tageszeit

Flugzeuggruppe	Anzahl				
	Routen 1-10	Routen 21-22	Routen 11-20	Routen 23-24	Routen 1-24
P2(N)	8077	8077	4546	4546	25246
S3(2/3)B	0	0	0	0	0
S5(M)	2475	2475	1393	1393	7736
S5(H)	50290	50290	28288	28288	157156
S6(2)	11954	11954	6723	6723	37354
S6(3/4)B	3734	3734	2097	2097	11662
S7A	3114	3114	1755	1755	9738
S7B	5645	5645	3176	3176	17642
S8B	2375	2375	1335	1335	7420
Summe	87664	87664	49313	49313	273954

Tab. A.13: Flugbetriebsszenario MaxMet, L_{DN} , nach Flugroute

Lebenslauf und wissenschaftlicher Werdegang

Persönliche Daten

Name	Christian Piehler
Geburtsdatum	13.02.1965
Geburtsort	Köln
Familienstand	verheiratet

Schulbildung

1971 – 1975	Städtische Grundschule Dormagen-Zons	
1975 – 1985	Städtisches Gymnasium Dormagen	Abitur

Hochschulausbildung

1985 – 1993	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Fakultät für Maschinenwesen Aachen	Maschinenbau-Studium, Fach- richtung Luft- und Raumfahrt Diplom
-------------	--	---

Beruflicher Werdegang

1993 – 1994	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Fachgebiet Flughafenwesen Aachen	Wissenschaftlicher Mitarbeiter
1994 – 2001	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Köln	
1994 – 1998	Hauptabteilung Verkehrsforschung	Wissenschaftlicher Mitarbeiter
1998 – 1999	Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin	Wissenschaftlicher Mitarbeiter
2000 – 2001	Vorstand Luftfahrt und Energie	Vorstandsassistent
seit 2002	Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren Bonn	Forschungsbereichsbeauftragter Verkehr und Weltraum