

7. Verkehrspolitische Lärminderungskonzepte

Hauptarbeitspaket 4: Volker Warlitzer, E-Mail: volker.warlitzer@dlr.de

DLR Institut für Verkehrsforschung

Verkehrsforschung, Köln

7.1. Forschungsziel

Im Hauptarbeitspaket 4 sollten die folgenden Ziele erreicht werden:

- Erstellung einer Dokumentation und Synopse an deutschen und internationalen Verkehrsflughäfen bereits angewandter verkehrspolitischer Lärminderungsverfahren.
- Analyse und Bewertung aller – auch theoretisch entwickelter und noch nicht angewandter – Maßnahmengruppen hinsichtlich ihrer Verkehrswirkungen, ihres Lärminderungspotentials und ihrer wirtschaftlichen Folgewirkungen. Bewertungskriterium ist ein hohes Lärminderungspotential mit möglichst geringen Restriktionen für die Verkehrs- und Wirtschaftsentwicklung.
- Erstellung eines Maßnahmenkatalogs zur Auswahl verkehrspolitischer Lärminderungskonzepte für eine flughafenspezifische Anwendung durch Flughäfen und Gesetzgeber.
- Modellrechnungen zu Lärmierungsstrategien für einen fiktiven Referenzflughafen. Quantifizierung der Lärmreduzierungen mit rechnerischen Lärmprognoseverfahren (AP 5A).

7.2. Dokumentation und Synopse in Deutschland und im internationalen Umfeld angewandter Maßnahmen

7.2.1. Maßnahmenarten und ihre internationale Verbreitung

Die Dokumentation und Synopse der internationalen Verbreitung flughafenspezifischer Lärmierungsmaßnahmen basiert auf einer von der Boeing Company dokumentierten weltweiten Auswahl von derzeit 590 Verkehrsflughäfen (siehe Tabelle 7-1).

	Afrika	Amerika	Asien	Australien	Ozeanien	Europa	Welt
Anzahl	15	344	41	9	11	170	590
Anteil	2.5 %	58.3 %	6.9 %	1.5 %	1.9 %	28.9 %	100 %
	Kanada	USA	Mittelam.	Südam.	EU ohne D	D	übr. Eur.
Anzahl	16	298	19	11	113	27	30
Anteil	2.7 %	50.5 %	3.2 %	1.9 %	19.2%	4.6 %	5.1 %

Tabelle 7-1: Regionale Verteilung weltweiter Verkehrsflughäfen (Auswahl Boeing Datenbasis)

Nach geographischer Zuordnung sind über 50% US-Flughäfen, knapp 24% liegen in der EU; weitere 5% befinden sich im übrigen Europa und der Rest von 11% verteilt sich auf alle anderen Teile der Welt. Neben allen Großflughäfen, die z.B. in Deutschland unter der Bezeichnung „Internationale Verkehrsflughäfen“ ausgewiesen sind, enthält die Dokumentation auch kleinere, jedoch nicht alle, Verkehrsflughäfen der Welt.

Soweit diese Flughäfen verkehrspolitische Maßnahmen anwenden, lassen sich diese inhaltlich zehn Gruppen zuordnen. Ein Überblick über den Anwendungsstatus der Maßnahmen wird erst durch die Einbeziehung der Ausgestaltungsbandbreite aussagekräftig. Im Folgenden werden die Maßnahmengruppen daher zunächst mit entsprechenden Hinweisen dargestellt (siehe auch Tabelle 7-2).

Art der Maßnahmen	Anwendungshäufigkeit in % jeweils nach Region											
	Welt insg.	Afrika	Asien	Kanada	USA	Mittelam.	Südam.	Australien	Ozeanien	EU	Übr. Eur.	D
Betriebszeitenbeschränkungen (Sperrstunden)	39	33	34	38	24	32	27	56	55	68	50	85
Bewegungskontingentierungen	15	0	5	6	4	0	0	11	9	16	0	7
Lärmkontingentierungen	2	0	0	6	2	0	0	0	9	3	0	0
Lärmabhängige Start- und Landegebühren	19	7	27	0	1	16	9	33	27	59	37	93
Fluglärmüberwachung (*)	30	7	27	31	25	5	0	78	18	46	27	74
Lärmpegelbegrenzungen (Grenzwerte) (*)	15	0	24	13	11	0	9	0	9	26	27	15
Lärmschutzprogramme (*)	30	0	12	0	53	0	0	0	9	7	0	4
Verkehrsbeschränkungen für Chap. 2 Flugzeuge (1)	23	7	7	19	11	0	9	33	9	46	17	63
Ausschluss von Chap. 2 Flugzeugen	9	0	5	6	5	0	9	0	9	13	17	7
Verkehrsbeschränkungen für Chap. 3 Flugzeuge	8	0	0	13	2	0	0	0	0	20	7	44
Durchschnittliche Anwendung insgesamt in %	23	10	19	20	18	11	11	28	20	34	22	42
Durchschnittliche Anwendung in %	19	5	14	13	14	5	6	21	15	30	18	39
Durchschnittliche Anwendung in % ohne (*)	16	7	11	13	7	7	8	19	17	32	18	43
Absolutzahl Flughäfen	590	15	41	16	298	19	11	9	11	140	30	27

(1) Für Chap. 2 Flugzeuge bestehen in der EU generelle Verkehrsbeschränkungen, die von EU-Flughäfen teilweise nicht ausdrücklich angegeben wurden. Für EU / D gilt somit von einer durchgängigen Anwendung dieser Maßnahme

Quelle: Eigene Auswertung "Airport Noise Regulations" Datenbasis Boeing Company 10.03

Tabelle 7-2: Internationale Anwendung verkehrspolitischer Lärminderungsmaßnahmen (Basis 590 Verkehrsflughäfen weltweit)

Die weltweit am häufigsten angewandten verkehrspolitischen Lärminderungsmaßnahmen sind mit 228 Anwendungen (39%) **Betriebszeitenbeschränkungen oder Sperrstundenregelungen** für Flughäfen während der Nachtstunden. Sperrstunden weisen 85% der deutschen und 68% der EU-Flughäfen aus. Hoch sind auch die Anwendungsraten in Australien mit 56% und im ozeanischen Raum mit 55%. Eine geringe Regelungshäufigkeit weisen die USA mit 24% und Südamerika mit 27% aus. Die Sperrstundenzeiträume liegen überwiegend zwischen 22:00 und 6:00 Uhr, mehr oder weniger starke Abweichungen von diesem Zeitraum sind jedoch üblich. Nur in wenigen Fällen bedeuten die Sperrzeiten eine absolute Betriebseinstellung oder sogar Schließung des Flughafens in dieser Zeit. Oft sind verspätete Flüge, Postflüge, hoheitliche Flüge und Notfall- oder Rettungsflüge in der Sperrzeit zugelassen. Schon Start- und Landeverbote für z.B. Kapitel 2- Flugzeuge während der Nachtstunden werden von Flughäfen als Betriebszeitenbeschränkungen deklariert. Sperrstundenregelungen oder Betriebszeitenbeschränkungen sind grundsätzlich den „harten“ indirekten oder

flugbewegungsbezogenen Lärminderungsmaßnahmen zuzuordnen, wenn dadurch Flugbewegungen ganz entfallen oder mit leiserem Fluggerät durchgeführt und somit wirksam werden, wobei das Ausmaß der Wirkung sehr von der Rigidität der Beschränkungen abhängt. Darüber hinaus ist die Wirksamkeit noch davon abhängig, inwieweit und auf welche an die Sperrstundenzeiten angrenzende Zeiträume ggf. Flugbewegungen verlagert werden.

Eine ebenfalls sehr häufig ausgewiesene Maßnahme ist mit 175 Nennungen (30%) die **Fluglärmüberwachung**. Sie wird besonders häufig in Australien von 78%, in Deutschland 74% und in der EU von 46% der Flughäfen angewandt. Fluglärmüberwachung bedeutet hier zunächst nichts anderes als eine Dokumentation des Fluglärms mit Messgeräten. Die Fluglärmüberwachung kann dabei auf gelegentliche oder regelmäßige Messkampagnen beschränkt sein oder aber als ständige und lückenlose Fluglärmfassung mit entsprechender Berichterstattung durchgeführt werden. Die Fluglärmüberwachung ist zunächst nur ein Kontrollinstrument und keine Lärminderungsmaßnahme. Dies wird sie erst in Verbindung mit Planungs- und Sanktionsmaßnahmen, die die Dokumentationsergebnisse als notwendige Bestimmungsgröße benutzen. Solche Maßnahmen werden jedoch von vielen Flughäfen mit Fluglärmüberwachung nicht angewandt. Gleichfalls 175 Nennungen weisen die so genannten **Lärmschutzprogramme** auf, Maßnahmen, die hauptsächlich in den USA von 53% der Flughäfen angegeben werden. Die Inhalte dieser Programme sind in den überwiegenden Fällen wenig konkret und effektiv. Dies gilt abgeschwächt auch für **Vorgabe von Grenzwerten für Lärmpegel**, die von 89 oder 15% der Flughäfen angegeben werden, die aber in der Regel für einen realen Lärmschutz nicht relevant sind.

Häufige und gleichsam sehr wirksame verkehrspolitische Lärminderungsmaßnahmen sind **Verkehrsbeschränkungen für Kapitel 2-Flugzeuge** nach ICAO Annex 16, die gemäß den Angaben weltweit für 133 Flughäfen (23%) gelten. Dabei geben die dokumentierten Angaben nicht den Gesamtumfang ihres Einsatzes wieder. Tatsächlich ist der Einsatz von Kapitel 2-Flugzeugen seit April 2002 in der EU verboten und wird entsprechend zu 100% durchgeführt. Dies wird aber teilweise von Flughäfen in der EU nicht mehr angegeben. Gleiches gilt entsprechend in der EU für den **Ausschluss von Kapitel 2-Flugzeugen**. Auch ein Drittel der australischen Flughäfen hat Verkehrsbeschränkungen für Kapitel 2-Flugzeuge eingeführt.

Typisch ökonomische verkehrspolitische Lärminderungsmaßnahmen sind **Lärmabhängige Start- und Landegebühren** die weltweit an 112 Flughäfen (19%) in sehr unterschiedlicher Ausgestaltung eingesetzt werden; in Deutschland an 93% aller Flughäfen, davon an allen Internationalen Deutschen Verkehrsflughäfen. Für die Flughäfen in der gesamten EU beträgt der Anteil 59%, gefolgt von denen im übrigen Europa mit 37% und in Australien mit 33%. In den USA und Kanada wird diese Maßnahme fast nicht angewandt.

46 Flughäfen (8%) haben **Verkehrsbeschränkungen für Kapitel 3-Flugzeuge** (im Nachtflugbetrieb) eingeführt, dies gilt insbesondere für 44% der Flughäfen in Deutschland und 20% in der EU. Zu nennen ist hier auch Kanada mit 13% der Flughäfen.

Weiteren international eingesetzten Maßnahmen kommt keine besondere quantitative Bedeutung zu. Es sind dies **Bewegungskontingentierungen**, bei denen die Zahl der Flugbewegungen für einen Flughafen bezogen auf bestimmte (sehr unterschiedliche) Zeiträume limitiert wird. Sie werden weltweit an 86 Flughäfen angewandt. Sie gelten für 16% der Flughäfen in der EU, 11% in Australien, 9% in Ozeanien und 7% respektive zwei Flughäfen in Deutschland, wobei es sich in einem Fall lediglich um eine Begrenzung der Zahl der Flugbewegungen in bestimmten Nachtstunden handelt. **Lärmkontingentierungen**, bei denen eine Lärmmenge (z.B. als Summe der Produkte aus Flugbewegungen und der nach Lärmkategorie oder gemessenem Lärm bewerteten Flugzeuge) bezogen auf einen Zeitraum (z.B. Flugplanperiode oder Jahr) festgelegt wird, die insgesamt von Flugzeugen, die einen Flughafen anfliegen, nicht überschritten werden darf, gelten nur für 14 Flughäfen (2%), davon an fünf Flughäfen in den USA und vier in der EU.

Der Einsatz verkehrspolitischer Lärminderungsmaßnahmen hat sich über einen sehr langen Zeitraum entwickelt. 1970 hatten nur ca. 30 Flughäfen Betriebszeitenbeschränkungen

und ca. 15 Flughäfen eine Lärmpegelbegrenzung. Lärmabhängige Landegebühren werden erst ab 1970 und andere Maßnahmen international erst ab 1980 eingeführt. Die Verbreitung nimmt dann insgesamt nur sehr geringfügig zu. Eine deutlich höhere Steigerungsrate setzt relativ parallel für alle Maßnahmen etwa 1996/97 ein. Diese flacht ab 1998 jedoch wieder ab auf den Stand von vor 1996. Lediglich die Beschränkungen für Kapitel 2-Flugzeuge (aufgrund Verordnungsregelung) und Beschränkungen für Kapitel 3-Flugzeuge weisen ab 2001/02 nochmals etwas höhere Steigerungsraten auf.

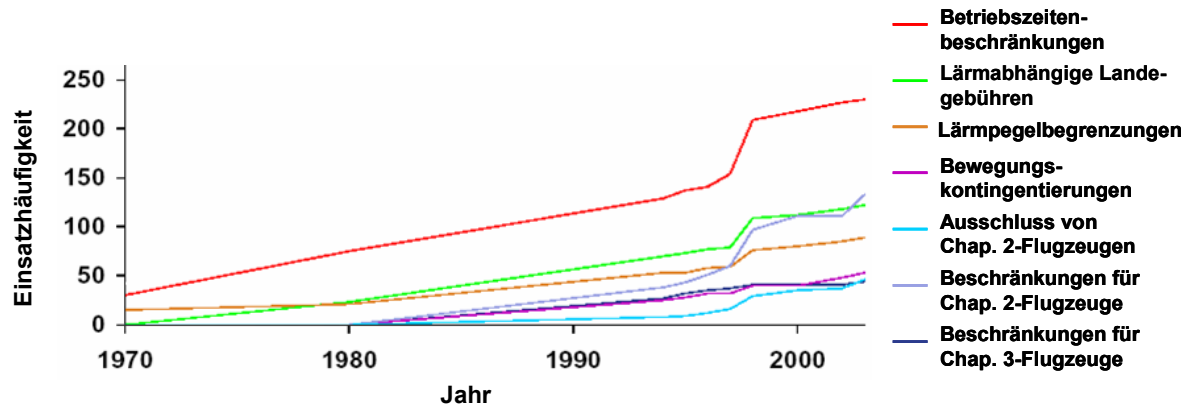


Abbildung 7-1: Entwicklung der internationalen Anwendung verkehrspolitischer Maßnahmen

7.2.2. Verbreitung untersuchter – meist international nicht dokumentierter – Maßnahmen

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden neben den international angewandten und dokumentierten Maßnahmengruppen weitere verkehrspolitische Lärminderungsmaßnahmen untersucht, die teilweise noch nicht oder nur in Deutschland und angrenzenden Staaten angewandt werden. Daraus resultiert eine Gesamtzahl von 17 Maßnahmengruppen, die soweit nicht oben bereits geschehen, hier mit ihren Inhalten und Ausgestaltungen in Kurzform und nach inhaltlich abgegrenzten Gruppen dargestellt werden.

Direkt lärmbezogene Maßnahmen

- **Lärmabhängige Start- und Landegebühren:** Grundsätzliche Differenzierung des MTOW-abhängigen Anteils der Start- und Landeentgelte mit teilweise ergänzender Beaufschlagung nach Lärmkategorie (ICAO oder auch nach gemessenem Lärm), durch zeitlich gestaffelte Nachtzuschläge; auch z.B. durch weitere Lärmzuschläge zur zweckgebundenen Finanzierung von Schallschutzmaßnahmen (s. Maßnahmengruppe Incentives für Lärmbetroffene/ Lärmschutzprogramme) sowie mit nach Lärmkategorie und Tages- oder Nachtzeit gestaffelten Lärmzuschlägen und Zuschlägen für Passagiere, Fracht und Post.
- **Lärmkontingent:** (Beschreibung s.o.) Wird in Deutschland an bisher zwei Flughäfen nur partiell angewandt.
- **Flugzeugbezogene Lärmpegelbegrenzung:** Im Grundsatz eine Verschärfung der ICAO-Lärmzertifizierungen, die erst durch die damit verbundene Änderungen der Zulassungsbedingungen wirksam werden. Eine Variante wäre eine Begrenzung auf x dB(A) je Flugzeug. Die Angaben zur Anwendung der oben angeführten Maßnahme „Vorgabe von Grenzwerten für Lärmpegel“ bedeuten meist nichts anderes, als dass diese Flughäfen nur von aufgrund von ICAO-Zertifizierung zugelassenen Flugzeugen

angeflogen werden dürfen. Als aktive Lärminderungsmaßnahme kann sie erst nach Inkrafttreten verschärfter ICAO-Zertifizierungen angewendet werden.

Indirekte oder flugbewegungsbezogene Maßnahmen

- **Betriebszeitenbeschränkung:** (Beschreibung s.o.)
- **Bewegungskontingent:** (Beschreibung s.o.)
- **Frequenzbegrenzung:** Begrenzung der Zahl der Flüge pro Zeiteinheit z.B. auf einer bestimmten Relation administrativ oder auch im Wege der Mediation (s.u.) durch Absprache oder Verpflichtung. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland von drei Flughäfen bereits angewandt.
- **Flugzeuggrößenbeeinflussung:** Sowohl genereller Ausschluss bestimmter Flugzeugtypen oder –klassen, als auch administrativer Eingriff hinsichtlich der auf bestimmten Relationen einzusetzenden Flugzeuge (nach Mindest-Sitzplatzkapazität) mit dem Ziel einer Bewegungsreduzierung. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland von vier Flughäfen bereits angewandt.
- **Flughafenkooperation zwecks Fluglärminderung:** Vereinbarung zur Bedienungsaufteilung von Relationen unter in der Regel nahe zusammen liegenden Flughäfen mit dem Ziel, ohne wesentliche Angebotsverschlechterung die Zahl der Flugbewegungen zumindest an einem der kooperierenden Flughäfen zu reduzieren. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland bisher nur von einem Flughafen geplant.
- **Administrative Verkehrsverlagerung:** Vereinbarung zur Bedienungsaufteilung unter benachbarten Flughäfen als staatlich-administrative Maßnahme und nicht im Kooperationswege getroffene Regelung sowie auch eine administrative Verkehrsverlagerung auf einen anderen Verkehrsträger (z.B. die Bahn) durch Verbot von Kurzstreckenflügen. Die Maßnahme ist weder international noch in Deutschland dokumentiert.
- **Modal Split Beeinflussung:** Maßnahmen wie teilweise bei administrativen Verkehrsverlagerungen auf andere Verkehrsträger, die jedoch durch Wettbewerb ausgelöst werden. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland von zwei Flughäfen angewandt und einem geplant.

Sowohl lärm- als auch flugbewegungsbezogene Maßnahmen

- **Betriebsbeschränkung:** (Inhalt s.o. unter Verkehrsbeschränkungen für Kapitel 2- und 3-Flugzeuge und Ausschluss von Kapitel 2-Flugzeugen) In der Regel Ausschluss von nicht zertifizierten und Kapitel 2-Flugzeugen, bis hin zu Kapitel 3-Flugzeugen in den Nachtstunden, auch mit differenzierter zeitlicher Staffelung oder Bewegungskontingentierung.
- **Bewegungs-/Lärmkontingentierung:** Kombination aus Bewegungskontingent und Lärmkontingent mit ggf. unterschiedlich definierten Zeiträumen (z.B. Bewegungskontingentierungen pro Nacht bis hin zu Sperrstunden und Kontingentierungen des Gesamtlärms für eine Flugplanperiode). Die Maßnahme ist weder international noch in Deutschland dokumentiert.

Vorgelagerte Verfahren und Maßnahmen zur Abstimmung, Einführung und Durchsetzung von Lärminderungsmaßnahmen

- **Mediation:** Verfahren u.a. zur Durchsetzung von Lärminderungsmaßnahmen unterschiedlicher Art mittels moderierter und von Experten unterstützter Verhandlungen mit im Konsens zu beschließenden Ergebnissen. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland von drei Flughäfen angewandt und einem geplant. Das Verfahren wurde dabei nur in einem Fall gemäß seiner komplizierten formalen Definition durchgeführt. Die sonstige Anwendung entspricht eher einem „Runden Tisch“ mit wenigen Teilnehmern.

- **Incentives für Leistungsanbieter:** Z.B. Fluggesellschaften oder Reiseveranstalter einseitig gewährte Vergünstigungen oder Anreize zur im Gegenzug freiwilligen Einführung von Lärminderungsmaßnahmen. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; wurde in Deutschland von einem Flughafen angewandt und einem geplant. Die Anwendung solcher Maßnahmen ist wettbewerbsrechtlich wegen möglicher Verletzungen des Gleichbehandlungsgrundsatzes sehr problematisch.
- **Individuelle Verfolgung von Lärmverstößen:** (Beschreibung im Grundsatz s.o. unter Fluglärmüberwachung, die jedoch nicht - wie bei dieser Maßnahme - unbedingt zu individuellen Sanktionen führt) Ermahnung, Abmahnung und Verhängung von Bußgeldern an Piloten oder Fluggesellschaften wegen lärmverstärkender fliegerischer Regelverstöße bei Start- und Landung – z.B. durch Abweichen von der Minimum Noise Route oder den Einsatz nicht angemeldeten Fluggeräts.

Maßnahmen zur Erhöhung der Lärmakzeptanz und zur Verminderung der Lärmexposition lärm betroffener Bevölkerung

- **Incentives für Lärmbetroffene:** Passive Schallschutzmaßnahmen im Flughafenumfeld und Umsiedlungshilfen. Aktivitäten und Maßnahmen der Flughäfen, z.B. ständige aktive und prospektive Information der Bevölkerung über Planungen, Entwicklungen und Betriebsabläufe zur Akzeptanzverbesserung. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; ist aber teilweise unter Lärmschutzmaßnahmen subsumiert; wird in Deutschland von 11 Flughäfen angewandt und einem geplant.
- **Immobilien- und Flächennutzungspolitik:** Grundstückskäufe zur Erhaltung oder Schaffung von Bebauungs-/Siedlungsfreiräumen im Flughafenumfeld oder z.B. Organisation und Finanzierung von Immobiliertausch (z.B. Umsiedlung lärmsensibler Anlieger in weniger belastete Räume ggf. im Austausch mit weniger lärmsensiblen gewerblichen Nutzern). Aktive Wahrnehmung der Einflussmöglichkeiten der Flughäfen als Träger öffentlicher Belange auf die Flächennutzungs- und Bebauungsplanung der Gebietskörperschaften. Die Maßnahme ist international nicht dokumentiert; ist aber auch teilweise unter Lärmschutzmaßnahmen subsumiert; wird in Deutschland von sieben Flughäfen angewandt, jedoch mit sehr begrenzten Maßnahmen, da die Zuständigkeiten und der rechtliche Rahmen die Handlungsmöglichkeiten bisher sehr einschränken.

7.3. Bewertende Analyse der Maßnahmen

Ein Forschungsziel war, zunächst die flughafenspezifischen Verkehrswirkungen aller Maßnahmen festzustellen und daraus als Hauptergebnis ihre Lärminderungspotentiale abzuleiten. Weil die Maßnahmen im Ansatz zunächst den Luftverkehr belasten, und im Falle ihrer Wirksamkeit daraus sowohl quantitative als auch qualitative Änderungen des Verkehrs resultieren, sind von diesen Wirkungen grundsätzlich zunächst Fluggesellschaften, Flughäfen und die Luftfahrtindustrie betroffen. Die Bewertungen der mit den Maßnahmen erzielbaren Lärminderungen waren daher mit ihren direkten wirtschaftlichen Wirkungen abzuwägen. In einer zweiten Bewertungsstufe sollten zusätzlich die indirekten oder Folgewirkungen zu erwartender Verkehrsrestriktionen und Kosten- oder Preissteigerungen des Luftverkehrs auf die jeweils betroffene regionale Wirtschaft und den Wirtschaftsstandort Deutschland mit besonderem Blick auf den Arbeitsmarkt geschätzt werden. Die Bewertung stützte sich einerseits auf die fachtheoretische Literatur und sonstige Fachpublikationen. In erster Linie folgten die Bewertungen jedoch den Ergebnissen einer von uns bei den 18 internationalen deutschen Flughäfen und zwei Flughäfen aus Nachbarländern durchgeführten Erhebung.

Als Schwachstelle erwies sich im Untersuchungsverlauf bei den Flughafenerhebungen, dass die Wirkungen der von Flughäfen angewendeten Maßnahmen auf den Verkehr faktisch weder quantitativ noch qualitativ bestimmt oder dokumentiert werden konnten. Gleiches galt für

die Literaturlauswertung. Die Gründe dafür liegen einmal darin, dass die Flughäfen trotz wachsenden Verkehrsaufkommens in der Vergangenheit über lange Zeiträume erhebliche Lärminderungen hauptsächlich und regelmäßig durch technische Verbesserungen an Flugzeugen verzeichnen konnten, so dass keine besondere Dringlichkeit zum forcierten Einsatz anderer Lärminderungsmaßnahmen oder einer Überprüfung deren Wirksamkeit bestand. Dies bedeutete nicht, wie die Dokumentation des Einsatzes verkehrspolitischer Lärminderungsmaßnahmen zeigt, dass z.B. keine verkehrspolitischen Lärminderungsmaßnahmen eingesetzt wurden. Aber es unterblieben methodische Überprüfungen der selbst angewandten Maßnahmen, und es wurden auch keine Verfahren zur Dokumentation von Maßnahmewirkungen von Anbeginn ihrer Einführung entwickelt. Ein eindeutiges Ergebnis der Untersuchung ist auch, dass bei den Gegebenheiten des in der Vergangenheit stark wachsenden Luftverkehrsmarktes die Ausgestaltungen der Einzelmaßnahmen (wie Landegebührenspreizung) fast immer unterhalb ihrer Wirksamkeitsschwelle blieben. Als Grundlage zur Bewertung der Maßnahmen mussten daher Schätzungen verwendet werden, die sich in erster Linie auf Angaben der bei den Flughäfen durchgeführten Erhebungen und die Literatur- und Einzelstudienanalyse stützen. Fluggesellschaften stellten hierzu leider nur in geringem Umfang verwertbare Stellungnahmen oder Daten zu ihren möglichen Reaktionen auf bestimmte Maßnahmen oder deren weitere Ausgestaltung zur Verfügung. Dies war einerseits zunächst nicht absehbar, jedoch aufgrund der im Untersuchungszeitraum aufgetretenen externen Ereignisse, wie Terrorismus, Kriege, Epidemien und wirtschaftlicher Krisen mit zunächst besonders dramatischen Folgen für den Luftverkehr z.T. verständlich.

7.3.1. Generelle Tauglichkeitseinstufung in einen Maßnahmenkatalog für Anwender

Alle Maßnahmen, bis auf die Betriebszeitenbeschränkungen, deren Wirkung in jedem Fall gegeben sind, die aber einerseits weitgehend eingeführt sind und die andererseits wegen ihrer restriktiven Wirkungen wenig Handlungsmöglichkeiten bieten sowie die Betriebsbeschränkungen (Verkehrsbeschränkung oder Ausschluss für nicht ausreichend lärmzertifizierte Flugzeuge), die in Deutschland bereits weitestgehend angewandt werden, wurden qualitativ auf ihre generelle Tauglichkeit zur Erreichung signifikanter **Lärminderungswirkungen** untersucht. Ausdrücklich darauf hinzuweisen ist, dass generelle Tauglichkeit hier pragmatisch bereits Realitätsbezogenheit mit einschließt; d.h., dass für jede dieser Maßnahmen die theoretische Lärminderungsfähigkeit, als Vorbedingung der Untersuchungen zur Tauglichkeit geprüft und als gesichert eingestuft worden war.

In der bei den Flughäfen durchgeführten Erhebung wurden von den Flughäfen für alle Maßnahmen ihre möglichen Auswirkungen auf den **Luftverkehr**, die **Wirtschaft**, die **Akzeptanz bei den Lärmbetroffenen** und ihre **Praktikabilität** bewertet. In die Tauglichkeitsbewertung ging vorrangig die Einschätzung der Lärminderung ein. Die zweitgrößte Gewichtung erhielt die Praktikabilität, gefolgt von der Bewertung möglicher negativer direkter Folgen für den Luftverkehr und möglicher negativer indirekter Folgen für die Wirtschaft. Die auch von den Flughäfen durchgeführten Einschätzungen der Maßnahmenakzeptanz bei den Lärmbetroffenen, für die hohe Korrelationen mit der Bewertung der Lärminderungspotentiale erwartet wurden, erbrachten insofern nur teilweise parallele Ergebnisse, als die Akzeptanz fast aller Maßnahmen – also auch der als wenig geeignet oder untauglich bewerteten – positiv eingeschätzt wurde, wenn auch in sehr unterschiedlichem Grade. Nur die Akzeptanz der Maßnahme „Incentives für Leistungsanbieter“ wurde insgesamt indifferent bewertet.

Zusammengefasst ergaben sich folgende Bewertungen der untersuchten Maßnahmen, die im Ergebnis Gegenstand des Maßnahmenkatalogs für Anwender sind. Die Reihenfolge der Darstellung kann dabei als Rangfolge für gute bis weniger gute Tauglichkeit für eine Anwendung unter derzeitigen generellen Rahmenbedingungen gelten. Dies schließt nicht aus, dass die Bewertung der Tauglichkeit im Einzelfall aufgrund spezieller Gegebenheiten, die sich z.B. auch aus der Funktion und den Betriebsabläufen bestimmter Flughäfen ergeben, davon abweichen kann:

- 1. Start- und Landengebührenspreizung nach ICAO-Lärmzertifizierung**
Bewertungen positiv für alle Kategorien; indifferent nur für Kategorie Wirtschaft
- 2. Individuelle Verfolgung von Lärmverstößen**
Bewertungen positiv für Kategorien Lärminderung, Praktikabilität und Akzeptanz; indifferent für Kategorien Luftverkehr und Wirtschaft
- 3. Start- und Landengebührenspreizung nach gemessenem Lärm**
Bewertungen positiv für Kategorien Lärminderung, Praktikabilität und Akzeptanz; indifferent für Kategorie Wirtschaft und leicht negativ für Kategorie Luftverkehr
- 4. Incentives für Lärmbetroffene**
Bewertungen positiv für Kategorien Lärminderung, Praktikabilität und Akzeptanz; indifferent für Kategorie Luftverkehr und negativ für Wirtschaft
- 5. Modal Split Beeinflussung**
Bewertungen positiv für Kategorien Lärminderung, Luftverkehr und Akzeptanz; negativ für Kategorien Praktikabilität und Wirtschaft
- 6. Incentives für Leistungsanbieter**
Bewertung positiv für Kategorie Lärminderung; indifferent für alle anderen Kategorien
- 7. Mediation**
Bewertung positiv für Kategorie Lärminderung und Akzeptanz; indifferent für Kategorien Luftverkehr und Wirtschaft; negativ für Kategorie Praktikabilität. Die negative Bewertung der Praktikabilität erfolgte hauptsächlich wegen der Erfahrungen mit dem Frankfurter Mediationsverfahren in seiner komplizierten und formal vorgegebenen Form. Im Verlauf des Vorhabens wurden auch formal weniger strukturierte Verfahren bis hin zum „Runden Tisch“ als Mediationsverfahren eingestuft (S. Maßnahmenbeschreibung unter 7.2.2). Diese wurden hinsichtlich ihrer Praktikabilität im Zeitverlauf zunehmend positiver beurteilt.
- 8. Immobilien- und Flächennutzungspolitik**
Bewertungen positiv für Kategorien Praktikabilität und Akzeptanz; indifferent für Kategorien Lärminderung und Luftverkehr; negativ für Kategorie Wirtschaft

Für die verbleibenden untersuchten Maßnahmengruppen – Bewegungskontingent, Lärmkontingent, Bewegungs-/Lärmkontingent, Frequenzbegrenzung Flugzeuggrößenbeeinflussung, Flughafenkooperation mit Fluglärminderungsziel und administrative Verkehrsverlagerung – wurden jeweils mindestens drei Kategorien, vor allem fast immer die Praktikabilität, negativ bewertet. Dies bedeutet, dass die Tauglichkeit dieser Maßnahmen für den Praxiseinsatz derzeit so gering einzuschätzen ist, dass sie zumindest nicht generell im Rahmen eines Maßnahmenkatalogs zu empfehlen sind.

Abweichend von den Maßnahmengruppen, die vorrangig den Bewertungen der Flughäfen folgend, als eher untauglich eingestuft wurden, halten wir jedoch **Lärmkontingente** als für zukünftig geeignete Maßnahmen. Dies, weil sie als transparent, gut überprüfbar, zielgenau und ergebnissicher einzustufen sind. Obwohl insgesamt restriktiv, bieten sie den Fluggesellschaften andererseits noch Handlungs- oder Reaktionsmöglichkeiten. Zur Zeit sind allerdings noch ungelöste Probleme, wie die Vereinbarung konsensfähiger Mess- bzw. Berechnungsverfahren, rechtliche Probleme, hoher organisatorischer Aufwand und operative Schwierigkeiten zu lösen.

7.3.2. Rahmenbedingungen des Einsatzes von Maßnahmen und spezielle Eignung

Start- und Landegebührenspreizungen auf der Grundlage der ICAO-Lärmzertifizierungen eignen sich für alle Flughäfen zur Erzielung von Lärminderungen. Sie ermöglichen variantenreiche Gestaltungsmöglichkeiten auch im Rahmen der gültigen Zertifizierungen, da auch das Kapitel 3 und die Bonusklasse grundsätzlich weitere Gebührenspreizungen durch Zuordnung unterschiedlich lauter Flugzeugtypen zu mehreren flughafenspezifisch zu bestimmenden Lärmkategorien mit zielgerichteten Lärmzuschlägen ermöglicht. Diese Maßnahmen sind auch in besonderer Weise zur Verringerung des Nachtfluglärms geeignet, da die Nachtzuschläge in Kombination mit den Spreizungen nach Lärmkategorien weitere Gestaltungsmöglichkeiten bieten. Zusätzlich können weitere tageszeitliche Differenzierungen etwa stundenweise innerhalb der Nachtstunden, statt lediglich eine Unterscheidung nach Tag und Nacht, eingeführt werden.

Die sachgerechteste Anwendung der **Start- und Landegebührenspreizung** ist im Grundsatz die **nach gemessenem Lärm**. Voraussetzung für die Einführung dieses Verfahrens ist die Installation und der lückenlose Betrieb eines Fluglärmmesssystems, dessen Vorhaltung sich erst für große Flughäfen mit entsprechendem Verkehrsaufkommen eignet.

Diese technischen Voraussetzungen müssen im übrigen auch für die Anwendung einer **individuellen Verfolgung von Lärmverstößen** vorliegen. Die regelmäßige und routinemäßige Anwendung dieser Maßnahme bedarf auch noch einer rechtlich vereinfachten Kooperationsregelung bezüglich der Regelungen des Datenaustausches zwischen Flugsicherung und Flughäfen.

Bei der Anwendung von **Incentives für Lärmbetroffene** sind „weiche“ Maßnahmen, die lediglich zu einer erhöhten Akzeptanz oder Lärmtoleranz der Betroffenen beitragen können, von solchen zu unterscheiden, die die Lärmexposition von Betroffenen vermindern. Zu ersteren gehören regelmäßige aktive und prospektive Informationen der Bevölkerung über Planungen, Entwicklungen und besondere Betriebsabläufe eines Flughafens mit Einflüssen auf die Lärmbelastung. Sie sollten von Flughäfen vor allem bei temporären Lärmbelastungen (außergewöhnliche Verkehrsaufkommen in der Nacht, Einsatz anderer Flugzeuge, zeitweilige Änderungen der Start- und Landebahnnutzungen etc.) eingesetzt werden. Eine Verminderung der Lärmexposition der Betroffenen kann durch passive Schallschutzmaßnahmen im Flughafenumfeld und Umsiedlungshilfen für Lärmbetroffene erreicht werden. Diese Maßnahmen eignen sich wegen hoher Kosten für Flughäfen mit einer relativ geringen Zahl stark lärm betroffener Bevölkerung im Umfeld. Da die Maßnahmen nicht lärm mindernd wirken, sind vor Anwendung unbedingt Bevölkerungsprognosen für das Flughafenumfeld zu berücksichtigen, um das Risiko künftig hoher Folgekosten auszuschließen.

Eine **Modal Split Beeinflussung**, also eine Verlagerung von Verkehr auf einen anderen Verkehrsträger mit Wettbewerbsmitteln, ist für Flughäfen sehr schwierig. Das Verkehrsangebot wird zunächst von den Fluggesellschaften und Reiseveranstaltern bestimmt. Möglichkeiten einer Verlagerung auf einen anderen Verkehrsträger, z.B. Bahn, hängen von der Lage des jeweiligen Flughafens und der Verkehrsinfrastruktur seines Umfelds ab, wie direkter oder im Einzugsbereich vorhandener (Fern-)Bahnhof mit leistungsfähiger Direktverbindung zu einem (HUB-)Flughafen. Hierauf und das Wettbewerbsverhalten anderer Verkehrsträger hat ein Flughafen keinen direkten Einfluss. Liegen entsprechende Rahmenbedingungen vor, kann eine Modal Split Beeinflussung z.B. durch Incentives für Leistungsanbieter erzielt werden. Das bedeutet, dass eine Fluggesellschaft vom Flughafen z.B. Vergünstigungen erhält, für die sie im Gegenzug Flüge auf einer bestimmten Relation einschränkt oder einstellt. Eine Veränderung des Modal Split kann sich dann in der Folge ergeben, wenn dieses Luftverkehrsaufkommen ganz oder teilweise auf einen anderen Verkehrsträger übergeht.

Incentives für Leistungsanbieter zur Minderung nächtlichen Fluglärms wären Vergünstigungen, die Flughäfen Fluggesellschaften dafür gewähren, dass gezielt bestimmte Flüge mit leiserem Gerät durchgeführt werden oder von der Nacht auf den Tag verschoben werden. Letzteres setzt jedoch eine entsprechende Kapazitätssituation des Flughafens und des je-

weiligen Zielflughafens voraus. Anwendungen dieser Maßnahmen sind jedoch mit dem Risiko von Verstößen gegen den wettbewerbsrechtlichen Gleichbehandlungsgrundsatz belastet (S.7.2.2).

Wie oben angedeutet, wurde der Begriff **Mediation**, der ursprünglich nur für ein mit formal festgelegten Abläufen und Teilnehmern präzise vorgegebenes Verfahren verwendet wurde, im Projektverlauf auch für variabelere und einfachere Verfahren bis hin zum „Runden Tisch“ verwendet. Kernbestandteil blieb, dass die Beteiligten über Informationsaustausch, Diskussion und Verhandlungen im Konsens beschlossene Ergebnisse vereinbaren. Dieses Verständnis von Mediation wurde in Stellungnahmen von Flughäfen und Fluggesellschaften im Zeitverlauf an uns herangetragen und wegen verbesserter Praktikabilität erkennbar stärker als sinnvolles Vorgehen zur Abstimmung und Einführung unterschiedlicher Maßnahmen akzeptiert. Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg solchen Vorgehens ist, dass möglichst bereits operationalisierte Zielsetzungen vor Beginn allen zu Beteiligten bekannt sind und von diesen geteilt werden. Unscharfe oder grundsätzlich kontroverse Zielsetzungen sollten nicht Gegenstand von Mediationsverfahren sein. Ebenso sollten Mediationsverfahren nur eingesetzt werden, wenn die Zahl der zu Beteiligten klein ist.

Wie der passive Schallschutz (S. Incentives für Lärmbetroffene) mindern Maßnahmen der **Immobilien- und Flächennutzungspolitik** oder der Landnutzung nicht den Fluglärm, verringern aber die Lärmbelastung der Bevölkerung im Flughafenumfeld. Das Ziel ist dabei nicht, Lärmbetroffene durch bauliche Maßnahmen, sondern durch ausreichende Distanz zum Flughafen vor Lärm zu schützen. Die Flächennutzung könnte prinzipiell so gestaltet werden, dass unter Berücksichtigung zunehmender Lärmimmissionen durch stark wachsenden Luftverkehr und auch zunehmendem Betriebsflächenbedarf von Flughäfen, ein nachhaltiger Schutz der Bevölkerung im Flughafenumfeld erreicht wird. Die zu erhaltenden oder erst zu schaffenden Distanzflächen können baulich teilweise durchaus durch weniger lärmsensibles Gewerbe genutzt werden. Bisher werden solche Maßnahmen wegen rechtlicher Probleme und fehlender Kompetenzen der Flughäfen kaum angewandt. Ebenso erschweren konkurrierende Planungshoheiten und ein starker Wettbewerb unter den Gebietskörperschaften eine wirksame Anwendung. Hier wird künftig verstärkter Handlungsbedarf zur Schaffung praktikabler Verfahren und sogar Anpassung des Planungsrechts liegen müssen, wegen der zu erwartenden besonders nachhaltigen Wirkungen solcher Maßnahmen.

7.3.3. Ausgestaltungsanforderungen und Anwendungsdefizite

Die bewertende Analyse der Maßnahmen zeigte, dass die Ausgestaltungsanforderungen für einzelne Maßnahmen nur schwer zu erfüllen sind. Dies ist einerseits eine Folge der Maßgabe, dass bei der Anwendung immer auf ein ausgewogenes Verhältnis von Ökologie, sprich Verkehrs-/Lärminderungswirkung und Ökonomie, also der finanziellen Belastung des Luftverkehrs etc., zu achten ist. Andererseits konnten auch deutliche Anwendungsdefizite festgestellt werden, wie das folgende Beispiel der Anwendung lärmdifferenzierter Start- und Landeentgelte am Flughafen Frankfurt zeigt.

Das Bild gibt die Landegebührenentwicklung für ein definiertes Flugzeugbeispiel in Frankfurt ab 1990 bis zur Gegenwart wieder. Die Landegebühren setzten sich zunächst aus der gewichtsabhängigen Gebühr nach maximalem Abfluggewicht des Flugzeugs – hier einer B 747-400 mit 395 t MTOW –und einer pro Passagier erhobenen Passagiergebühr – hier für 280 Passagiere im Interkontinentalverkehr – zusammen. Wegen der bestehenden Korrelationen zwischen Flugzeuggröße, Gewicht und Lärm kann die Gewichtskomponente auch als lärmabhängige Komponente bezeichnet werden, zu der noch Lärm- und Schallschutzzuschläge – wie hier ab 2001 – hinzukommen können. Diese wurden hier sämtlich unter der grün dargestellten gewichtsabhängigen Gebühr subsumiert.

Das Beispiel zeigt, dass sich ab 1998 das Verhältnis der lärmabhängigen Komponente zur Passagiergebühr insgesamt umgekehrt hat. Trotz weiterer aktuell bis zu sechs unterschiedli-

cher Zuschläge für Lärm- und Schallschutz, die hier immer in den grünen Säulen enthalten sind, hat sich das bis zur Gegenwart nicht geändert.

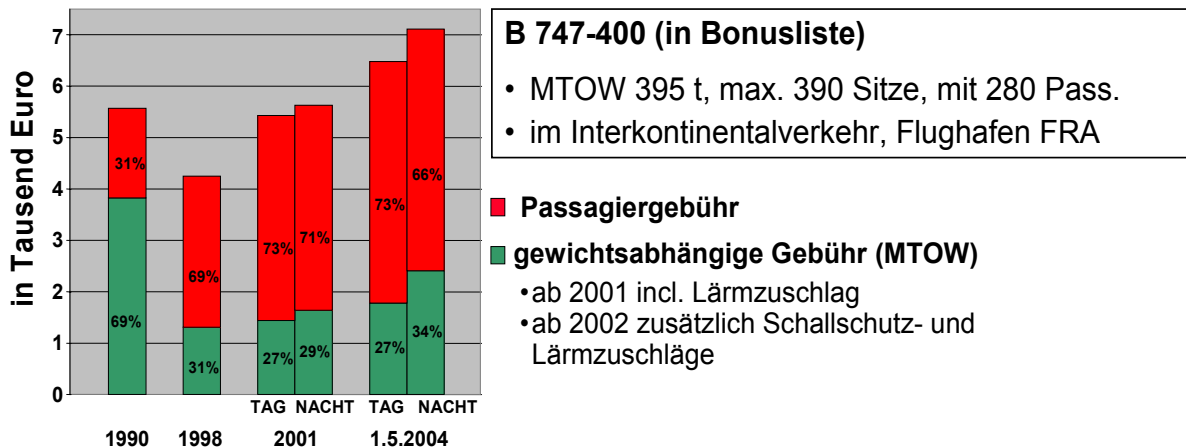


Abbildung 7-2: Landegebührentwicklung – Beispiel Flughafen Frankfurt

Wegen der Absenkung dieser Komponente und der überproportionalen Anhebung der Passagiergebühr (im Beispiel über 170 %) wird die Wirksamkeitsschwelle lärmabhängiger Landegebühren möglicherweise nicht erreicht. Von keinem Flughafen wurden im übrigen empirische Belege für lärmindernde Wirkungen der Landegebühren in Abhängigkeit von ihrer Ausgestaltung erbracht.

Die Folgen sind, dass unter diesen Umständen für Fluggesellschaften auch nicht ausgelastete Flüge attraktiv sein können, was sich tendenziell kontraproduktiv auf Lärmreduzierungsziele auswirkt. Bezogen auf das Beispiel sei auch erwähnt, dass über den Betrachtungszeitraum die Wachstumsrate der Gesamtlandegebühr, mit durchschnittlich 1,76% pro Jahr, nur in etwa die Inflationsrate ausglich und somit keine reale Erhöhung stattfand.

7.3.4. Theorieorientierte Ansätze zur Wirkung von Maßnahmen

In Punkt 7.3.1 konnte die Tauglichkeit der unterschiedlichen Instrumente mehr unter einem generellen Blickwinkel festgestellt werden. Es stellt sich nun die Frage, warum trotzdem die Akzeptanz der Instrumente, insbesondere der mehr marktwirtschaftlich orientierten, seitens der betroffenen Bevölkerung vielfach eingeschränkt ist. Die Behauptung ist, dass diese Instrumente in der Regel von geringer Wirksamkeit seien. Seitens der Flughäfen erhält man dazu jedoch kaum Informationen, sie führen so gut wie keine Wirksamkeitsanalysen zum Einsatz ihrer Maßnahmen oder auch zur Kombination von Maßnahmen durch. Sie verweisen vielmehr auf die in den letzten Jahren erreichten Lärmreduktionen, die jedoch anerkanntermaßen in erster Linie durch die Ausmusterung des nach ICAO Kapitel-2 zertifizierten Fluggeräts erreicht wurden. Da diese nun an den meisten Flughäfen abgeschlossen ist, sind auf diesem Weg keine weiteren Reduktionen zu erwarten, bei steigendem Verkehrsaufkommen dagegen eher ein Lärmanstieg. Im Folgenden soll versucht werden, Ansätze aus der ökonomischen, speziell der mikroökonomischen Theorie zu nutzen, um Erklärungen für die Reaktionen der Flughäfen zu finden.

7.3.4.1. Konsequenzen der Marktstruktur für Gebührentwicklung und –politik

Während sich die Makroökonomische Theorie mit der Entwicklung der Gesamtwirtschaft und ihren Beeinflussungsdeterminanten beschäftigt, stehen bei der mikroökonomischen Theorie Branchen im Vordergrund und das Verhalten einzelner Unternehmen innerhalb einer Branche auf den für sie relevanten Märkten. Im konkreten Fall geht es darum, Erklärungsansätze

für das Verhalten von Flughäfen und Fluggesellschaften auf Märkten für Start- und Landerechte (Slots) zu finden. Anbieter sind die Flughäfen, Nachfrager die Fluggesellschaften, das Gut ist der Slot. Das Problem in diesem Zusammenhang ist, dass die Nutzung des Gutes Slot mit externen Effekten in der Form von externen Kosten verbunden ist und das „öffentliche Gut Ruhe“ beeinträchtigt ist.

Zuerst soll der Zusammenhang zwischen Marktstruktur und Preisfestsetzung dargestellt werden. Zu betonen ist dabei, dass die Nachfrager der Leistungen des Flughafens nicht die Quell- und Zielpassagiere der betroffenen Region sind, sondern die Fluggesellschaften. Die Passagiere als auch die Fracht stellen dagegen das wichtigste „Guthaben“ des Flughafens dar, das Pfund, mit dem er wuchern kann. Die Fluggesellschaften, die dieses Potential für sich nutzen möchten, sind darauf angewiesen, den jeweiligen Flughafen dieser Region zu bedienen. Damit stellen die meisten Flughäfen für das Einzugsgebiet ihrer Region den einzigen Zugang dar; als Anbieter der Slots repräsentieren sie demnach ein regionales Monopol.¹ Mit dieser Monopolsituation ist in der Regel auch die staatliche Einflussnahme auf die Gebührenpolitik begründet, um „Monopolgewinne“ zu vermeiden.

Auf „normalen“ Märkten bestimmt allein die Preishöhe die Menge der Nachfrage, die „unsichtbare Hand des Marktes“ reguliert die Preis-Mengen-Kombination, so dass in der Regel alle Marktteilnehmer ihr zufrieden stellendes Auskommen haben. Grundsätzlich gilt dabei: je höher der Preis, desto geringer die Nachfrage. Dies gilt jedoch nur, wenn eine größere Anzahl Anbieter und Nachfragender – eine polypolistische Marktstruktur – vorhanden ist. Die Wettbewerbsintensität auf solchen Märkten ist jedoch aufgrund mangelnden Preis- und Produktwettbewerbs denkbar gering. Die höchste Wettbewerbsintensität liegt dagegen im weiten Oligopol vor, d.h. die Zahl der Anbieter ist abzählbar gering.² Je enger das Oligopol wird, desto größer ist die Gefahr von unerlaubten Absprachen, desto geringer ist in der Regel auch die Wettbewerbsintensität, bis sie im Monopol auf Null sinkt. Monopolgewinne (Monopolrenten) sollen mittels Regulierung verhindert werden.

Auf den ersten Blick scheint im Fall der Nachfrage nach Slots eine polypolistische Marktstruktur gegeben zu sein, werden die meisten Flughäfen doch in der Regel von mehr als einer Fluggesellschaft angeflogen. Tatsächlich lassen sich auch auf der Nachfragerseite monopolistische Tendenzen erkennen, insbesondere auf den Flughäfen, auf welchen eine Gesellschaft eine dominante Position hält. Berücksichtigt man ferner die jüngste Entwicklung der Allianzenbildung im internationalen Luftverkehr, erkennt man auf den meisten Flughäfen eine weitere Verstärkung des Monopolisierungsgrads. In der Regel ist dies die Allianz der ehemals nationalen Fluggesellschaft, in Deutschland also in der Regel die Lufthansa mit ihren Star Alliance-Partnern. Die Nachfrage entspricht somit in der Regel einem Teilmonopol.

Die Theorie beschäftigt sich sehr viel seltener mit Marktmachtgegebenheiten auf Nachfrager- als auf der Angebotsseite, noch weniger, wenn beide Marktseiten vergleichbar starke Positionen innehaben. In einem zweiseitigen (Teil-)Monopol ist nun zu fragen, ob beide Seiten in gleicher Weise ihre Marktmacht ausnutzen können. So ist eine Liniengesellschaft, will sie die Nachfrage einer bestimmten Region bedienen, auf den Flughafen der Region angewiesen; dagegen kann sie Umsteigeverbindungen sehr viel leichter von einem Flughafen zu einem anderen transferieren. Die Menge der versunkenen Kosten, die bei einem Wechsel „verloren“ sind, ist geringer als bei einem Flughafen, der die Immobilie weder transferieren noch anderweitig nutzen kann. Bei vergleichbarer Marktmacht geht nun die Theorie von einer Verhandlungslösung aus, um die optimale Preis – Mengen – Relation für das Produkt zu finden. Eine Regulierung muss in einem solchen Fall nicht notwendigerweise als „Marktsurrogat“ eingesetzt werden.

Sieht man jüngere Entwicklungen einiger Flughäfen in ihrem Bestreben, Alternativen zur Regulierung zu finden, findet man genau die von der Theorie zu erwartende Verhaltensweise

¹ Die Monopolsituation des Flughafens beschränkt sich auf seine Funktion als Infrastrukturlieferant.

² Dieser Fall trifft beispielsweise zu, wenn ein Low-Cost-Carrier einen neuen Flughafen in Deutschland anfliegen möchte und sich nicht auf eine Region festlegen lässt.

einer Verhandlungslösung zwischen Angebot und Nachfrage, wie das Beispiel Frankfurt zeigt. Durch diese Verhandlungslösung ist es den Fluggesellschaften gelungen, die Flughäfen an ihrem Risiko zu beteiligen. Ursprünglich war die Landegebühr vorrangig gewichtsabhängig und wurde nur um einen geringen Aufschlag als Passagierentgelt ergänzt. Diese Entwicklung hat sich umgekehrt, so dass heute der passagierabhängige Anteil der Landegebühr deutlich größer ist als der gewichtsabhängige (S. 7.3.3). Dies hatte jedoch die Nebenwirkung, dass der lärmbezogene Anteil – auch wenn er prozentual an der gewichtsabhängigen Landegebühr stieg – absolut sank oder stagnierte, bedingt durch den Rückgang der gewichtsabhängigen Gebühren.

Diese zweiseitige Verhandlungslösung über das Gut des Slots hat jedoch die Nebenwirkung des Lärms. Dies wiederum hat zur Folge, dass zwei „Vertragsparteien“ über ein Gut entscheiden, während ein Teil der direkt Betroffenen dieses Gutes von der Verhandlungslösung ausgeschlossen ist. Es ist auch nicht zu erwarten, dass die beiden Verhandlungspartner die Interessen des „Ausgeschlossenen“ mit berücksichtigen, im Gegenteil werden dessen Interessen eher als hinderlich für die eigene Entwicklung angesehen. Lärmreduktion ist für sie höchstens ein sekundäres Ziel, wenn nicht sogar ein negativ belastetes Ziel. Daher ist davon auszugehen, dass bei einer Fortsetzung dieser Politik der zweiseitigen Verhandlungslösung mit einer weiteren Verschlechterung der Beziehung zwischen der Luftfahrtbranche, bestehend aus Flughafen und Fluggesellschaft, und der betroffenen Bevölkerung zu rechnen ist.

Muss eine Behörde als Vertreter der öffentlichen Hand das Ergebnis einer solchen Verhandlungslösung noch genehmigen, ist dieses Dilemma im Regelfall nicht gelöst. Selbstverständlich hat die öffentliche Hand das öffentliche Interesse und somit auch die Interessen der Anwohner zu vertreten. Aber die Erfahrung der Regulierung hat über die Jahre hin gezeigt, dass die Verbindung zwischen Regulierer und Reguliertem in der Regel intensiver ist als das zwischen Regulierer und den zu Schützenden. Soweit der Flughafen nicht privatisiert ist, ist die öffentliche Hand in einem Zielkonflikt: Als Eigner des Flughafens hat sie ein Interesse an seinem finanziellen Wohlergehen. Daneben hat sie selten definierte „öffentliche Interessen“ zu verfolgen, die einerseits Sicherstellung von Arbeitsplätzen und andererseits Schutz der Bevölkerung vor Fluglärm sind.

Um aus diesem Dilemma herauszukommen, ist eine Privatisierung sinnvoll, ergänzt um eine Verhandlungslösung, an der alle Betroffenen beteiligt sein sollten. Dabei wäre jedoch sicherzustellen, dass tatsächlich einvernehmliche Lösungen gefunden werden, um nicht im Sinn einer demokratischen Lösungsfindung Mehrheitsentscheidungen zu Lasten einer Minderheit durchzusetzen. Das Misslingen des Mediationsverfahrens in Frankfurt zeigt, dass es an einer ausreichend ausgeprägten „Streitkultur“ fehlte, um tatsächlich einvernehmliche Lösungen zu finden. Unter Umständen könnte auch eine Trennung der Verhandlung zwischen der allgemeinen Landegebühr und der ökologischen Komponente überlegt werden, um die dreiseitige Verhandlung auf einen kleineren Teilbereich zu konzentrieren. Eine weitere Lösungsmöglichkeit könnte in der Einführung eines „Lärmtalers“ liegen, sofern er bei der betroffenen Bevölkerung auf Akzeptanz stößt. In Zürich wurde eine solche Lösung überlegt.

7.3.4.2. Preisgestaltungsgrundsätze / Preisreagibilität

Zur Anwendung der mikroökonomischen Theorie über die Zusammenhänge zwischen Marktstruktur und Marktverhalten muss berücksichtigt werden, dass dies nur bei einer zumindest teilweisen Aufhebung der bisherigen Regulierung gilt, wie es am Beispiel von Frankfurt der Fall ist. Im Normalfall der deutschen Flughäfen gilt immer noch eine „cost-plus-Regulierung“, nach der die Flughäfen der Genehmigungsbehörde ihre Kosten vorlegen und entsprechend die Gebühren genehmigt bekommen. In Frankfurt muss dagegen der ausgehandelte Preis nur noch von der Genehmigungsbehörde, die schon an den Verhandlungen teilgenommen hat, akzeptiert werden.

Die Ausgangsbasis der mehr theoretischen Diskussion war die mangelnde Wirksamkeit bzw. Wirksamkeitskontrolle seitens derjenigen, die für den Einsatz der Instrumente verantwortlich sind. Das zweiseitige Monopol, das sicher nicht an allen Flughäfen in gleicher Weise Gültigkeit besitzt, kann Ursache dafür sein, muss es aber nicht. Für die Maßnahme der lärmorientierten Gebührenpolitik als der wohl am häufigsten eingesetzten Maßnahme lässt sich auch fragen, ob die Reagibilität der Betroffenen in irgend einer Weise eingeschränkt ist. Ein erster Schritt dazu ist die Feststellung, dass nach ICAO-Norm eine Gebühr nicht der Gewinnmaximierung dienen darf, sondern allein der Kostendeckung. Dies hat zur Folge, dass dem Preis nicht die gleiche Markträumungsfunktion zukommt wie auf Märkten, die Gewinnmaximierung zulassen. In diesem Zusammenhang ist bisher noch nicht entschieden, ob der Lärmzuschlag eine Gebühr oder einen Preis darstellt.

Ein staatlich-administrierter Preis kann in der Regel nicht die Funktion eines Knappheitspreises übernehmen, wie es normalerweise bei knappen Gütern ist. Da für das knappe Gut „Ruhe“ kein Markt besteht, ist es nicht ohne weiteres möglich, einen an Kosten orientierten Preis festzulegen. Die Internalisierung solcher externer Kosten wird in der Regel mittels eines Preisaufschlags gemacht, der die Knappheit widerspiegeln soll, jedoch kaum objektiv festgelegt werden kann. Ideal wäre es, sämtliche Betroffenen an der Preisfindung zu beteiligen.

Wenn derzeit der Lärmausstoß als zu hoch angesehen wird, ist der aktuelle lärmbezogene Preisaufschlag zu gering. Geht man von einem rationalen Marktverhalten bei einer nicht gegen Null tendierenden Preiselastizität aus, dann müsste bei steigendem Preis entsprechend die Ausstoßmenge an Lärm zurückgehen. Dies bedeutet in erster Linie nicht eine Reduktion von Flugbewegungen, sondern kann auch durch eine Änderung des Flottenmixes oder anderer technischer Maßnahmen erreicht werden. In diesem Bereich ist die Reagibilität der Fluggesellschaften jedoch eingeschränkt, da die Entscheidung, Änderungen an der Flotte oder auch technische Änderungen an einzelnen Fluggeräten vorzunehmen, in der Regel längerfristiger Natur ist und von daher keine kurzfristigen Reaktionen erwartbar sind. Letztlich ist auch zu berücksichtigen, wie hoch die Preiselastizität der Endkunden ist, da die Fluggesellschaften versucht sein werden, die für sie höheren Kosten an ihre Kunden weiterzuleiten. Dabei ist davon auszugehen, dass die Elastizität der Flugpassagiere höher sein dürfte als die der Frachtkunden, insbesondere der Kunden von Express- und Paketdiensten. Diese wiederum stellen jedoch das größte Aufkommen an Flügen in der Nacht.

Diese kurzen Überlegungen über die Reagibilität der einzelnen Marktpartner sollen die Schwierigkeiten andeuten, die mit einer Wirksamkeitsanalyse von Maßnahmen verbunden sind. Andererseits geben sie auch die Richtung vor, wo weiterer Forschungsbedarf besteht, um auf diesem Gebiet einer Lösung näher zu kommen.

7.4. Strategiebeispiel zur Minderung des Nachtfluglärms für einen generischen Flughafen

Die Ansatzpunkte für Maßnahmen sollten sich an den Potentialen orientieren, mit denen bestimmte Flugzeuggruppen durch ihre Einsatzhäufigkeit zur Entstehung lärmbelasteter Flächen, also der Lärmkonturen, beitragen. Die Ergebnisse von Modellrechnungen haben gezeigt, dass z.B. die lärmbelasteten Flächen an einem Flughafen mit ca. 200.000 Bewegungen im Jahr und wenig Langstreckenverkehr in erster Linie von den kleineren zweistrahligen Flugzeugen (B737, B757 und A320) herrühren. So dass diese Flugzeuggruppe für wirkungsvolle Lärminderungsmaßnahmen zu fokussieren wäre. An einem Flughafen mit ca. 500.000 Bewegungen im Jahr und viel Langstreckenverkehr wird der größte Beitrag dagegen von vierstrahligen Großflugzeugen verursacht, für die exemplarisch die B747 steht. Aber auch hier trägt die Gruppe der zweistrahligen Flugzeuge in bedeutendem Umfang zur gesamten lärmbelasteten Fläche bei. In solch einem Fall sollten demnach Lärminderungsmaßnahmen gezielt bei beiden Gruppen ansetzen.

Wie eine Strategie für den letzteren Fall grundsätzlich aussehen könnte, und welche Ergebnisse damit zu erzielen wären, soll abschließend folgendes Rechenbeispiel zeigen. Dazu wurde das eigens für dieses Projekt entwickelte DLR-Analyseprogramm CEAR verwendet, das eine schnelle Analyse der Effizienz lärmindernder Maßnahmen ermöglicht. Das Programm bietet folgende Möglichkeiten:

- Es kann Änderungen der Verkehrszusammensetzungen, der Betriebszeitenaufteilung, und der Bezugszeit (z.B. einen 24-Stunden-Tag, nur den Tag oder nur die Nacht) berücksichtigen.
- Es kann generische Flughäfen mit 1- und 2-Bahnssystem unterscheiden. Vorgegeben werden können zwei unterschiedliche, charakteristische Flugstreckengeometrien.
- Unabhängig von der Verkehrszusammensetzung können spezifische Pegelabsenkungen für einzelne Flugzeugkategorien modelliert werden. So können z.B. die Einflüsse technischer Lärminderungsmaßnahmen simuliert werden.
- Für jeweils zwei Szenarien können Vergleichsrechnungen erstellt werden, um die Wirksamkeit untersuchter Maßnahmen darzustellen.

Das Rechenbeispiel geht von einem fiktiven Flughafen mit Einbahnbetrieb aus, dessen Verkehrszusammensetzung an einen typischen Nachtflugbetrieb angelehnt ist. Das Lärminderungspotential wird abgeschätzt für die Ersetzung aller B747 mit einem Verkehrsanteil von 1% durch jeweils zwei B767. Ebenso soll der Startpegel der kleineren 2-motorigen Typen wie A320 mit einem Verkehrsanteil von 50% durch technische Modifikationen an den Flugzeugen um 1dB abgesenkt werden.

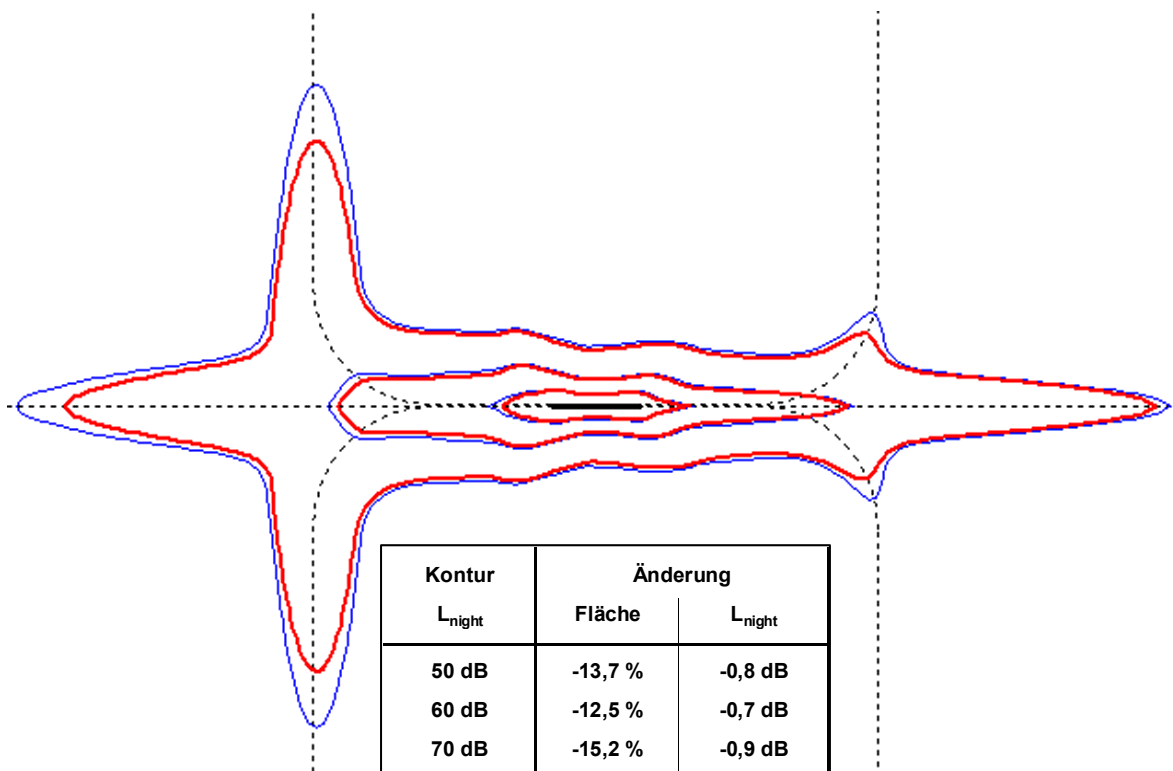


Abbildung 7-3: Strategiebeispiel zur Minderung des Nachtfluglärms: Konturen L_{night} (nach EU Umgebungsärmrichtlinie)

Das in Abbildung 7-3 dargestellte Ergebnis dieser Maßnahmen zeigt zunächst die Ausgangssituation mit den äußeren blauen Lärmkonturen. Ausgewiesen ist der energieäquivalente Dauerschallpegel L_{night} , der als harmonisierter Deskriptor für die nächtliche Lärmbelastung in der EU-Umgebungsärmrichtlinie definiert ist.

Die inneren roten Lärmkonturen repräsentieren den Effekt der angewandten Maßnahmen. Sie zeigen deutliche Verkleinerungen der lärmbelasteten Flächen. Die Flächen der dargestellten Konturen verringern sich zwischen 12,5 und 15,2%. Was einer durchschnittlichen Minderung des L_{night} zwischen 0,7 und 0,9 dB entspricht.

7.5. Zusammenfassung

Im Hauptarbeitspaket 4 wurde zunächst ein Vergleich von 590 Verkehrsflughäfen weltweit in Bezug auf die Anwendung von Lärminderungsmaßnahmen untersucht. Es konnten zehn Maßnahmengruppen identifiziert werden, die von den Flughäfen zum Teil in sehr unterschiedlicher Ausprägung angewendet werden.

Neben diesen international dokumentierten Maßnahmen wurden solche untersucht, die teilweise noch nicht oder nur in Deutschland und angrenzenden Staaten angewendet werden. Es lassen sich folgende Maßnahmengruppen unterscheiden: direkt lärmbezogene Maßnahmen (lärmabhängige Start-/Landegebühren, Lärmkontingente, Lärmpegelbegrenzungen), indirekte oder flugbewegungsbezogene Maßnahmen (Betriebszeitenbeschränkungen, Bewegungskontingent, Frequenzbegrenzung, Flugzeuggrößenbeeinflussung, Flughafenkooperation, administrative Verkehrsverlagerung, Modal Split Beeinflussung), Lärm- und Flugbewegungsbezogene Maßnahmen (Betriebszeitenbeschränkung, Bewegungs-/Lärmkontingentierung), vorgelagerte Verfahren zur Einführung von Maßnahmen (Mediation, Incentives für Leistungsanbieter, Verfolgung von Lärmverstößen); Maßnahmen zur Erhöhung der Lärmakzeptanz und zur Verminderung der Lärmexposition der betroffenen Bevölkerung (Incentives für Lärmbetroffene, Flächennutzungs politik).

Die einzelnen Maßnahmen wurden mit Hilfe einer Literaturanalyse und einer Befragung der Umweltreferenten der 18 internationalen Flughäfen in Deutschland in Hinblick auf ihre Tauglichkeit für eine signifikante Lärminderungswirkung überprüft. In der Erhebung wurden von den Flughäfen für alle Maßnahmen die möglichen Auswirkungen auf den Luftverkehr, die Wirtschaft, die Akzeptanz bei den Lärmbetroffenen und ihre Praktikabilität bewertet. Ergebnis ist eine Rangfolge von als besonders tauglich angesehenen Maßnahmen:

1. Start- und Landegebührenspreizung nach ICAO-Lärmzertifizierung
2. Individuelle Verfolgung von Lärmverstößen
3. Start- und Landegebührenspreizung nach gemessenem Lärm
4. Incentives für Lärmbetroffene
5. Modal Split Beeinflussung
6. Incentives für Leistungsanbieter
7. Mediation
8. Immobilien- und Flächennutzungs politik

Die bewertende Analyse der Maßnahmen zeigte, dass die Ausgestaltungsanforderungen für einzelne Maßnahmen nur schwer zu erfüllen sind. Dies ist einerseits eine Folge der Maßgabe, dass bei der Anwendung immer auf ein ausgewogenes Verhältnis von Ökologie, sprich Lärminderungswirkung und Ökonomie, also den wirtschaftlichen Auswirkungen auf die Akteure im Luftverkehr, zu achten ist. Andererseits konnten auch deutliche Anwendungsdefizite festgestellt werden.

Im weiteren Verlauf der Studie standen theorieorientierte Ansätze zur Wirkung von Maßnahmen im Vordergrund. Sie beinhaltet die Folgen der Marktstruktur im Luftverkehr für Ge-

bührenentwicklung und –politik. Hinzu kommt eine Darstellung der Preisgestaltungsgrundsätze und der Preisreagibilität.

Abschließend wurde ein Strategiebeispiel zur Minderung des Nachtfluglärms für einen generischen Flughafen entwickelt. Grundlage für die Berechnung war das DLR-Analyseprogramm CEAR. Das Rechenbeispiel geht von einem fiktiven Flughafen mit Einbahnbetrieb aus, dessen Verkehrszusammensetzung an einen typischen Nachtflugbetrieb angelehnt ist. Das Lärminderungspotenzial wird abgeschätzt für die Ersetzung aller viermotorigen Boeing 747 durch jeweils zwei zweimotorige Boeing 767. Ebenso wurde der Startpegel der kleineren zweimotorigen Flugzeuge wie dem Airbus A320 durch eine hypothetische technische Modifikationen an den Flugzeugen um 1dB abgesenkt. Ergebnis ist eine Reduktion der Flächen der dargestellten Lärmkonturen (50, 60, 70 dB-Kontur) zwischen 12,5 und 15,2 %, was einer durchschnittlichen Minderung des L_{night} zwischen 0,7 und 0,9 dB entspricht.

7.6. Literatur

- [7-1] Stefan Beyhoff et.al., Verkehrspolitische Optionen zur Lärmreduktion an Flughäfen, dargestellt am Beispiel des Flughafens Hamburg, DLR-FB 92-40, Köln 1992
- [7-2] Frank Fichert, Umweltschutz im zivilen Luftverkehr – Ökonomische Analyse von Zielen und Instrumenten, Berlin 1999
- [7-3] Umweltbundesamt (Hrsg.), Maßnahmen zur verursacherbezogenen Schadstoffreduzierung des zivilen Luftverkehrs, Köln 2000
- [7-4] A.N. Bleijenberg, R.C.N. Wit, A European environmental aviation charge, Feasibility study, Delft 1998
- [7-5] R.C.N. Wit, A.N. Bleijenberg, Potential economic distortions of a European environmental aviation charge – Background study, Delft 1997
- [7-6] Stephan Zaß, Der Flughafen in seiner Region – Beschäftigungswirkungen von Flughäfen und Bevölkerungsentwicklungen im Flughafenumland; DLR, Köln 2000
- [7-7] FAA Airport Division Southern Region (Hrsg.), Land Use Compatibility – A Guide for effective Land Use Planning, Atlanta 1999
- [7-8] Geoffrey D. Gosling, Economics of Airport Noise Management, Institute of Transportation Studies Technology Transfer Program, 2004 Airport Noise Symposium, Berkeley, 2004

8. Fluglärmrechnungsverfahren

Arbeitspaket 5A: **Dr. Ullrich Isermann, E-Mail: ullrich.isermann@dlr.de**
DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik,
Abteilung Technische Strömungen, Göttingen

8.1. Forschungsziel und -ansatz

Ziel des Arbeitspakets 5A war die Entwicklung eines Simulationsverfahrens, bei dem die Modellierung der Schallabstrahlung des Flugzeugs durch ein Teilschallquellenmodell erfolgt (wobei die im HAP 2 gewonnenen Erkenntnisse über die Schallentstehungsmechanismen mit herangezogen werden sollten). Als Grundlage wurde das am Max-Planck-Institut für Strömungsforschung entwickelte *SIMUL-Verfahren* [8-1] herangezogen, das vor allem um ein verbessertes Quellmodell erweitert werden sollte. Außerdem sollte in dieses Prognoseverfahren das im AP 5B zu entwickelnde fortschrittliche Schallausbreitungsmodell integriert werden. So sollte gewährleistet werden, dass die Effekte von Topographie und Meteorologie in geeigneter Weise durch das Rechenverfahren berücksichtigt werden können.

Das Ergebnis sollte ein Rechenprogramm sein, das keinen maßgeblichen Beschränkungen hinsichtlich der Berechenbarkeit verschiedener Fluglärmdeskriptoren unterliegt und das vor allem als Entwicklungswerkzeug und zur Untersuchung problematischer Immissionsszenarien herangezogen werden kann.

Schließlich sollte eine Beschreibung für ein vereinfachtes Berechnungsverfahren erarbeitet werden, das den Anforderungen an ein praktikables, gesetzlich festschreibbares Modell genügt. Dieser Arbeitsschritt schien zunächst im Hinblick auf eine geplante Novellierung des Fluglärmgesetzes notwendig. Letztendlich führte diese Zielsetzung aber zu einer intensiven internationalen Zusammenarbeit im Rahmen der Arbeitsgruppe *AIRMOD* der European Civil Aviation Conference ECAC, bei der ein Fluglärmrechnungsverfahren erarbeitet werden sollte, das den Anforderungen an eine harmonisierte europäischen Lärmschutzpolitik [8-2,-3] Rechnung trägt.

8.2. Hintergrund

Die meisten derzeit national und international in der praktischen Anwendung befindlichen Fluglärmprognoseverfahren basieren auf einem relativ einfachen Berechnungsprinzip [8-4]: Die 3-dimensionale Flugbahn eines Flugzeugs wird durch ihre Projektion in die Horizontalebene (Verlauf der flughafenspezifischen *Flugstrecke*) und ein flugzeugspezifisches *Flughöhenprofil* bestimmt. Dieses Flughöhenprofil setzt sich in der Regel aus einzelnen Segmenten zusammen, längs derer die die Berechnung der Immissionswerte beeinflussenden Parameter (Schallabstrahlungseigenschaften, Triebwerksleistung und Fluggeschwindigkeit) in der Regel als konstant oder sich linear ändernd angenommen werden.

Die Schallabstrahlungseigenschaften eines Flugzeugs (Schallspektrum und Richtcharakteristik) werden bei derartigen *konventionellen Verfahren* meist nur grob berücksichtigt. In der Regel liegen für einen definierten Flugzeugtyp (oder eine Gruppe von vergleichbaren Typen) nur sog. *Noise-Power-Distance(NPD)-Kurven* vor, in denen Maximalschallpegel oder zeitintegrierte Schallpegel als Funktion von Ausbreitungsentfernung und Triebwerksleistung für einen idealisierten Horizontalflug mit konstanter Triebwerksleistung definiert sind.

Die verschiedenen konventionellen Verfahren unterscheiden vor allem hinsichtlich der Modellierung von gekrümmten Flugstrecken. Bei den einfachsten konventionellen Modellen wird der Beitrag eines Vorbeiflugs zur Schallimmission an einem vorgegebenen Ort für den

kleinsten Vorbeiflugabstand (*Distance of Closest Approach DCA*) und der für diese Geometrie gerade auftretenden Triebwerksleistung ermittelt. Ein Beispiel für ein derartiges DCA-Verfahren ist das deutsche *AzB-Verfahren* [8-5].

Standard sind mittlerweile sog. *Segmentierungsmodelle*, bei denen gekrümmte Flugstreckensegmente in lineare Teilstücke zerlegt werden. Der bekannteste Vertreter dieser Kategorie ist das *Integrated Noise Model INM* [8-6] der amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA. Auch das auf europäischer Ebene durch die AIRMOD-Gruppe überarbeitete *ECAC Doc.29* ist ein Segmentierungsverfahren [8-8].

Am DLR-Institut für Strömungsmechanik im Rahmen von ICAO-Aktivitäten durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass die meisten konventionellen Verfahren bei vergleichbaren Randbedingungen (insbesondere identischen Eingabedaten) ähnliche Resultate erzielen [8-9]. Konventionelle Verfahren haben folgende Schwachstellen:

- Die Einflüsse von Richtcharakteristik und Schallspektrum werden in der Regel nur pauschal oder gar nicht berücksichtigt.
- Die Einflüsse der Fluggeschwindigkeit auf die Schallerzeugungsmechanismen (insbesondere den Umströmungslärm) gehen nicht ein.
- Topographische und meteorologische Effekte werden nicht oder vergleichsweise einfach modelliert.

Diese Defizite rühren u.a. vom Anwendungsziel (Berechnung/Prognose von Langzeitmittelwerten), von der Qualität der verfügbaren Eingabedaten sowie (aus historischen Gründen) von der benötigten Rechenkapazität her.

Eine Alternative zu den konventionellen Rechenverfahren bieten *Simulationsverfahren*. In der Vergangenheit war der mit derartigen Modellen verbundene Rechenaufwand noch ein wesentlicher Hinderungsgrund für ihren Einsatz. Beim derzeitigen Stand der Rechner-technik ist diese Einschränkung mittlerweile jedoch aufgehoben. Bei Simulationsverfahren wird die Flugbahn eines Flugzeuges in diskrete Einzelpunkte zerlegt, an denen Fluggeschwindigkeit und Triebwerksleistung (also implizit die Schallabstrahlungseigenschaften) des Flugzeuges bekannt sein müssen. Unter Berücksichtigung der Schallausbreitungsgesetze und der Geometrie zwischen Flugzeug und Immissionsort kann dann an letzterem ein zeitlicher Schallpegelverlauf ermittelt werden, der im Idealfall einem gemessenen Verlauf entspricht.

Simulationsverfahren werden in der Regel eher im wissenschaftlichen Bereich eingesetzt (Optimierung von Flugverfahren, Weiterentwicklung von konventionellen Modellen). Ein umfassender praktischer Einsatz wurde bisher vor allem dadurch verhindert, dass die für eine vollständige Simulation notwendigen akustischen Eingabedaten in vollem Umfang nicht verfügbar sind. Die Qualität der Datengrundlage bestimmt aber primär die Qualität einer Immissionsberechnung. Außerdem sollte bei einem praktischen Einsatz das gewählte Prognoseverfahren immer dem Anwendungszweck angepasst sein - so wird für prognostizierte Flugbetriebsfälle die Genauigkeit der Verkehrsprognose das Resultat stärker bestimmen als die Qualität des Berechnungsverfahrens.

Nur in der Schweiz ist ein Simulationsverfahren auch im praktischen Gebrauch [8-10]. Bei diesem Modell (*FLULA2*) werden die Abstrahlungseigenschaften des Flugzeuges halbempirisch auf der Basis umfangreicher Messungen insbesondere am Flughafen Zürich modelliert. Die entsprechende Datengrundlage ist also teilweise an dem dort auftretenden Typenmix orientiert. Auch werden durch das Modell einige physikalische Effekte (insbesondere der Geschwindigkeitseinfluss auf die Schallabstrahlungseigenschaften) nicht berücksichtigt.

Bei der Modellierung von Ausbreitungseffekten wird sich bei den gebräuchlichen Verfahren in der Regel auf die Einflüsse der atmosphärischen molekularen Dämpfung und der Dämpfung bei bodennaher Schallausbreitung beschränkt. Brechungs- und Beugungseffekte sowie Einflüsse der Topographie (die insbesondere bei bodennahen Operationen im direkten Flughafenbereich wichtig sind) werden in der Regel nicht berücksichtigt.

8.3. Das SIMUL-Verfahren

8.3.1. Prinzip eines Simulationsverfahrens

Das Prinzip des SIMUL-Verfahrens kann der Abb. 8-1 entnommen werden. Wie bei jedem Simulationsverfahren wird zunächst die Flugbahn als eine Folge von Punkten generiert, die im SIMUL-Verfahren in konstanten zeitlichen Abständen (typischerweise von 1 sec) vom Flugzeug passiert werden. Damit sind Emissionsort und –zeit festgelegt. Außerdem sind die räumliche Orientierung des Flugzeugs, seine Geschwindigkeit und die Triebwerksleistung bekannt. Die Flugbahn kann dabei entweder direkt aus dem Rechenprogramm unter Vorgabe eines bestimmten Flugverfahrens ermittelt werden, oder es kann über eine Schnittstelle auf externe Daten (z.B. Flugsimulatordaten) zugegriffen werden.

An jedem Punkt der Flugbahn sind somit die Schallabstrahlungseigenschaften des Flugzeugs (beschrieben durch spektrale Informationen sowie Informationen zur Abstrahleigenschaft) bekannt. Sie werden durch die Triebwerksleistung und die Fluggeschwindigkeit bestimmt.

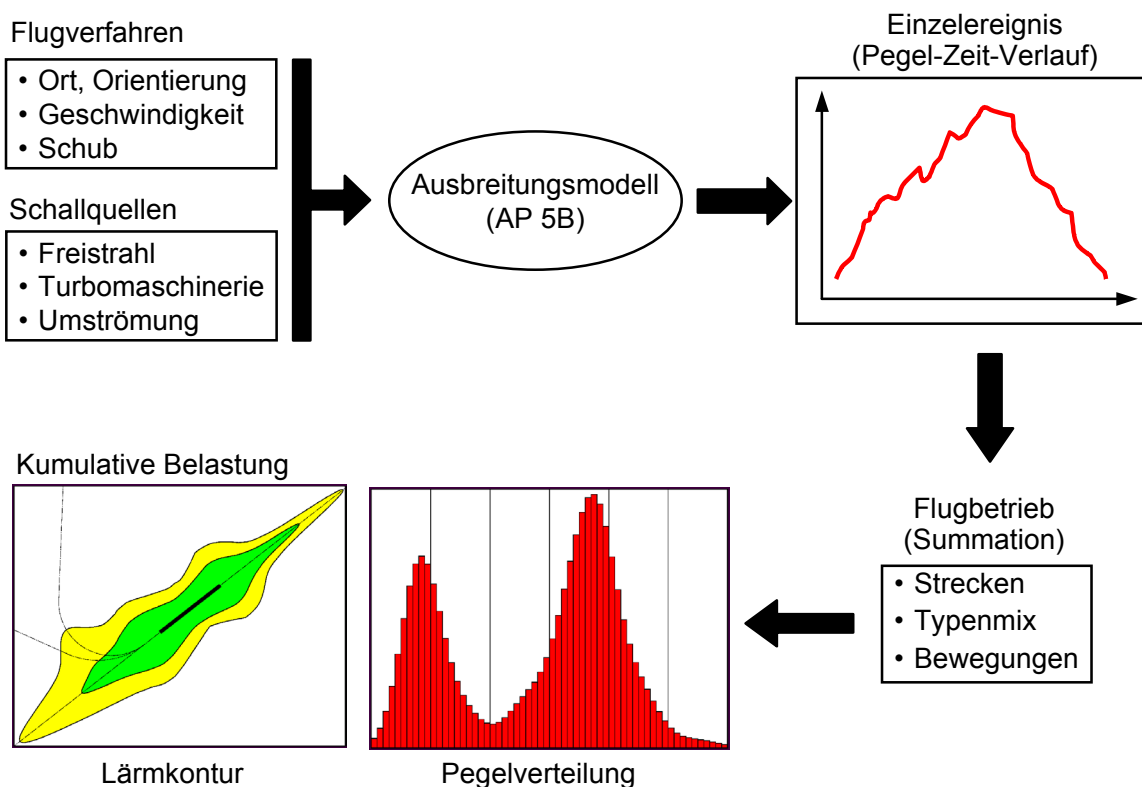


Abbildung 8-1: Schematischer Ablauf einer Fluglärmrechnung mit SIMUL

Der nächste Schritt ist die Transmissionsrechnung, bei der die auf dem Weg zwischen Flugzeug und Immissionsort auftretenden Ausbreitungs- und Laufzeiteffekte berücksichtigt werden. Hier werden – neben den „klassischen“ Effekten wie Dämpfung durch geometrische Ausbreitung und Dissipation – insbesondere die im Arbeitspaket 5B entwickelten Modelle zum Einfluss der Meteorologie mit berücksichtigt. Resultat ist letztendlich ein zeitlicher Schallpegelverlauf für jedes am Immissionsort zu erwartende Einzelschallereignis.

Wird ein komplexer Flugbetrieb zu Grunde gelegt, so werden diese Schritte für jede Kombination von Flugzeugtyp und Flugstrecke wiederholt und die am Immissionsort auftretenden Intensitäten aufsummiert. Letztendlich erhält man so eine Pegel-Häufigkeitsverteilung bzw. einen kumulativen Pegel (z.B. in Form eines Mittelungspegels). Durch ein nachgeschaltetes

Post-Processing können dann auch sog. Lärmkonturen (d.h. Kurven eines konstanten Fluglärmbewertungsmaßes) ermittelt werden.

8.3.2. Die Beschreibung der Quelle

Eine vollständige Beschreibung der Abstrahleigenschaften des Flugzeugs ist prinzipiell zwar machbar, erfordert eine entsprechende akustische Vermessung (eine rein analytische Beschreibung der Abstrahleigenschaften auf der Basis von z.B. von Triebwerksparametern und aerodynamischer Konfiguration ist nach derzeitigem Kenntnisstand noch nicht möglich). Eine Vermessung, die die wesentlichen physikalischen Mechanismen mit berücksichtigt, würde eine Variation von Triebwerksleistung, Fluggeschwindigkeit und aerodynamischer Konfiguration über einen weiten Parameterbereich erfordern. Da derartige Messungen sehr personal- und kostenintensiv sind, sind entsprechende Daten in der Regel nicht verfügbar.

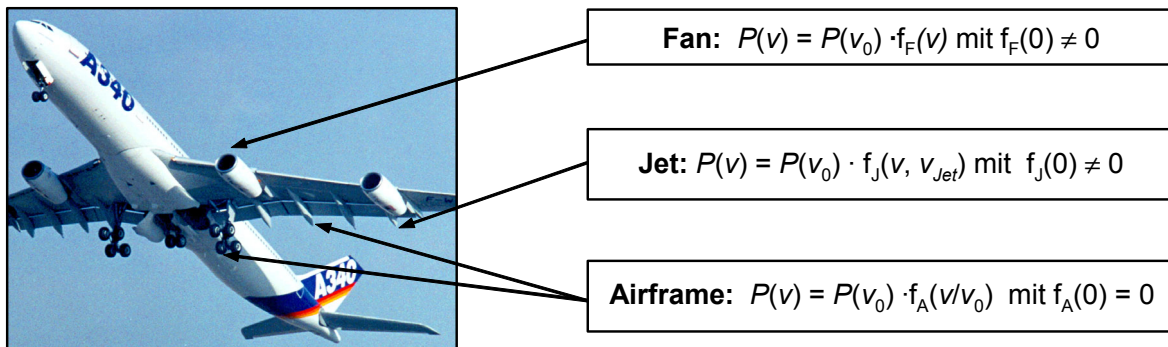


Abbildung 8-2: Prinzip des Teilschallquellenmodells. P ist die Schalleistung, v_0 eine Referenzgeschwindigkeit, v die Fluggeschwindigkeit und v_{Jet} die Geschwindigkeit des Triebwerksstrahls. Die Funktionen f_F , f_J und f_A beschreiben die Geschwindigkeitsabhängigkeit der jeweiligen Teilschallquelle.

Der im SIMUL-Verfahren verwendete Ansatz [8-11] basiert nun darauf, dass die verschiedenen Schallabstrahlungsmechanismen in unterschiedlicher Weise von der Fluggeschwindigkeit beeinflusst werden (*Teilschallquellenmodell*, s. Abb. 8-2):

- Der durch den Triebwerksstrahl erzeugte Schall (*Jet-Noise*) wird sowohl durch die Fluggeschwindigkeit als auch durch die Geschwindigkeit des Freistrahls beeinflusst. Je höher die Relativgeschwindigkeit zwischen Freistrahls und umgebender Luft ist, um so höher ist die Leistung des abgestrahlten Schalls.
- Für die übrigen im Triebwerk auftretenden Schallentstehungsmechanismen (im folgenden als *Fan-Noise* bezeichnet, da der Triebwerksfan die dominante Quelle ist), äußert sich der Geschwindigkeitseinfluss im wesentlichen als kinematischer Effekt in Form einer Änderung der Abstrahlcharakteristik.
- Der durch Umströmung von Tragflügeln, Zelle und Fahrwerk erzeugte Schall (*Airframe Noise*) hängt ebenfalls nur von der Fluggeschwindigkeit ab. Allerdings ist die Bewegung hier die Ursache der Schallentstehung – im Gegensatz zu den beiden übrigen Komponenten verschwindet der Umströmungslärm im statischen Fall.

Durch diesen Ansatz erfolgt eine Gruppierung von Quellmechanismen auf der Basis einer vergleichbaren Abhängigkeit von der Fluggeschwindigkeit. Diese Vorgabe erfordert u.a. die Separierung des Umströmungslärms, da die Geschwindigkeitsabhängigkeit des vom Fahrwerk erzeugten Schalls sich von der des durch die Hochauftriebshilfen erzeugten Schalls unterscheidet.

Allen Teilschallquellen wird jeweils ein charakteristisches Spektrum und eine Richtcharakteristik zugeordnet. Sofern die entsprechenden Beiträge einer Teilschallquelle allerdings akustisch nicht signifikant sind, werden sie nicht ins Modell mit einbezogen. So kann beim Abflug mit hohen Triebwerksleistungen der Umströmungslärm vernachlässigt werden.

Quellseitig erhält man so für eine gegebene Triebwerksleistung F eine Beschreibung der Jet- und Fan-Komponente in Form von Oktav- oder Terzspektren L_n als

$$L_n^{Jet,Fan}(s_0, F, v, \vartheta, \varphi) = L_{0,n}^{Jet,Fan}(F) + \Delta D_n^{Jet,Fan}(\vartheta, \varphi) + \Delta V^{Jet,Fan}(v) .$$

Dabei ist s_0 eine Bezugsentfernung von 1 m. Die Korrektur ΔD_n beschreibt die Abstrahlcharakteristik als Funktion der beiden Winkel ϑ (zwischen Ausbreitungsrichtung und Flugzeuglängsachse) und φ (um die Längsachse). Die Korrektur ΔD_n kann auch in Form einer frequenzunabhängigen Korrektur ΔD realisiert werden. ΔV ist eine Geschwindigkeitskorrektur. Sie ergibt sich für die Jet-Komponente als

$$\Delta V^{Jet} = 10 \cdot m(\vartheta) \cdot \lg\left(\frac{v_{Jet} - v}{v_{Jet}}\right) - 10 \cdot \lg(1 - M \cdot \cos \vartheta)$$

mit der Flugmachzahl M , der Freistrahlgeschwindigkeit v_{Jet} und dem sog. *Forward Velocity Index* $m(\vartheta)$. Letzterer hängt von der Bauart des Triebwerks ab. Für die Fan-Komponente ergibt sich die Geschwindigkeitskorrektur als

$$\Delta V^{Fan} = -40 \cdot \lg(1 - M \cdot \cos \vartheta) .$$

Für den Umströmungslärm ergeben sich die normierten Spektren als

$$L_n^{Airframe}(s_0, v, \vartheta, \varphi) = L_{0,n}^{Airframe}(v_0) + 10 \cdot a \cdot \lg\left(\frac{v}{v_0}\right) + \Delta D_n(\vartheta, \varphi)$$

aus einem Referenzspektrum für die Bezugsgeschwindigkeit v_0 . Der 2. Term beschreibt eine exponentielle Abhängigkeit der Schalleistung des Umströmungslärms von der Flugeschwindigkeit. Geht diese gegen Null, so verschwindet der Umströmungslärm (der Pegel geht also gegen $-\infty$). Der Koeffizient a ist dabei abhängig von der Art der Umströmungslärmkomponente (also z.B. Fahrwerk oder Hochauftriebssysteme).

Die Umströmungslärmkomponente ist natürlich unabhängig von der Triebwerksleistung. Sie muss statt dessen für unterschiedliche aerodynamische Konfigurationen (Klappen- und Fahrwerkstellungen) definiert werden.

8.3.3. Modellierung von Ausbreitungseffekten

Aus den im vorangegangenen Abschnitt definierten auf 1 m normierten Spektren ergeben sich dann die entsprechenden Pegel am Immissionsort durch eine spektrale Ausbreitungsrechnung, der folgende Gleichung zu Grunde liegt:

$$L_n(s) = L_n(s_0) - 20 \cdot \lg\left(\frac{s}{s_0}\right) - \alpha_n(s - s_0) - \Delta_n^{AMB}$$

Die einzelnen Korrekturterme haben folgende Bedeutung:

- Der erste frequenzunabhängige Term beschreibt die *geometrische Dämpfung* für die Ausbreitung von Kugelwellen.

- Der zweite Korrekturterm bezieht sich auf die sog. *atmosphärische Dämpfung*. Diese beschreibt Dämpfungseffekte, die durch die Wechselwirkung der Schallwelle mit den Molekülen der Luft hervorgerufen werden. Der frequenzabhängige Dämpfungskoeffizient α_n ist dabei eine Funktion der Lufttemperatur und der relativen Feuchte.
- Der Korrekturterm Δ^{AMB} beschreibt die kumulativen Effekte von Meteorologie (also Wind- und Temperatureinfluss) sowie die Effekte der Wechselwirkung der Schallwelle mit der Erdoberfläche. Diese Korrektur basiert auf dem im Arbeitspaket 5B am Institut für Physik der Atmosphäre erarbeiteten Schallausbreitungsmodell.

Nähere Informationen zur Modellierung dieser Ausbreitungseffekte (physikalische Grundlagen, Umsetzung im Rechenverfahren) können [8-11] entnommen werden.

8.4. Realisierung des Modells als Rechenprogramm

Das SIMUL-Verfahren wurde als Computerprogramm in der Programmiersprache FORTRAN77 umgesetzt [8-12]. Dabei wurde der Schwerpunkt der Anwendung des Programms zunächst auf den Einsatz im wissenschaftlichen Bereich ausgelegt. Spezielle Anwendungen für das Programm sind z.B.:

- Optimierung von lärmarmen An- und Abflugverfahren
- Immissionsberechnungen für spezielle Ausbreitungssituationen
- Untersuchungen zur Optimierung konventioneller Prognoseverfahren

Wesentlicher Hinderungsgrund für einen Einsatz bei der Untersuchung umfangreicher Flugbetriebsfälle ist zunächst noch der Umfang der akustischen Datengrundlage in einem den Möglichkeiten des Programms entsprechenden Umfang. Die Erfassung von akustischen Daten - insbesondere auch im Hinblick auf eine Optimierung des Teilschallquellenmodells - erfolgt im laufenden BMBF-Vorhaben „Lärmarme An- und Abflugverfahren (LANAB)“.

Das Programm SIMUL besteht aus einer Reihe von separaten Modulen, die für die Aufbereitung der Eingabedaten (*Pre-Processing*), die eigentliche Immissionsberechnung und die nachgeschaltete Weiterverarbeitung (*Post-Processing*) verantwortlich sind. Abbildung 8-3 zeigt den schematischen Ablauf einer Immissionsberechnung mit dem SIMUL-Verfahren:

- Im ersten Schritt erfolgt die Aufbereitung der Eingabedaten (in Abb.8-3 nicht dargestellt). Dies umfasst die Erfassung der rechenfallspezifischen Daten (Flughafen- und Flugstreckengeometrie, Flugbetrieb, topografische und meteorologische Daten). Neben diesen Daten werden für die Berechnung noch die flugzeugtypspezifischen akustischen und Flugleistungsdaten bereitgestellt. Diese müssen dabei an die meteorologischen Parameter (insbesondere Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind) angepasst werden.
- Der nächste Schritt ist die Generierung der Flugbahnen aller am Verkehr teilnehmenden Flugzeugmuster. Dazu werden die Flugleistungsdaten, die Flugstreckenstrukturen sowie die Anzahl der am Verkehr teilnehmenden Flugzeugmuster herangezogen. Hier besteht die Möglichkeit, über definierte Schnittstellen auf externe Flugbahndaten zuzugreifen. Diese Schnittstellen wurden insbesondere im Hinblick auf die im HAP 3 durchgeführten Untersuchungen zu lärmarmen Flugverfahren geschaffen, bei denen Flugtrajektorien aus dem Simulator in das Rechenprogramm eingekoppelt wurden.
- Basierend auf den Flugtrajektorien, den akustischen Basisdaten sowie den topografischen und meteorologischen Daten erfolgt dann eine detaillierte Immissionsberechnung für Einzelpunkte (einschließlich der Ausweisung von zeitlichen Schallpegelverläufen) oder aber eine Berechnung von kumulierten Immissionswerten in einem rechtwinkligen Immissionsgitter.

- Durch nachgeschaltete Post-Prozessoren werden die so erhaltenen Immissionsdaten in Form von Grafiken oder Druckausgabe weiterverarbeitet. Hier existieren insbesondere Schnittstellen zu externen Programmen, die auf standardisierte Dateiformaten (DXF, NMGF) zugreifen.

Das Programm ist primär auf den Einsatz im wissenschaftlichen Bereich ausgelegt. Es verfügt daher über eine Reihe von Schaltern und Optionen, die im praktischen Einsatz nicht benötigt werden. Hierunter fallen u.a. verschiedene Modelle zur Berücksichtigung der Effekte bodennaher Schallausbreitung. Außerdem lassen sich einzelne physikalische Mechanismen (von Ausbreitungseffekten bis hin zu flugmechanischen Effekten) gezielt ein- bzw. abschalten. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn eine Abschätzung der akustischen Signifikanz einzelner Mechanismen im Hinblick auf eine Optimierung konventioneller Rechenmodelle notwendig wird.

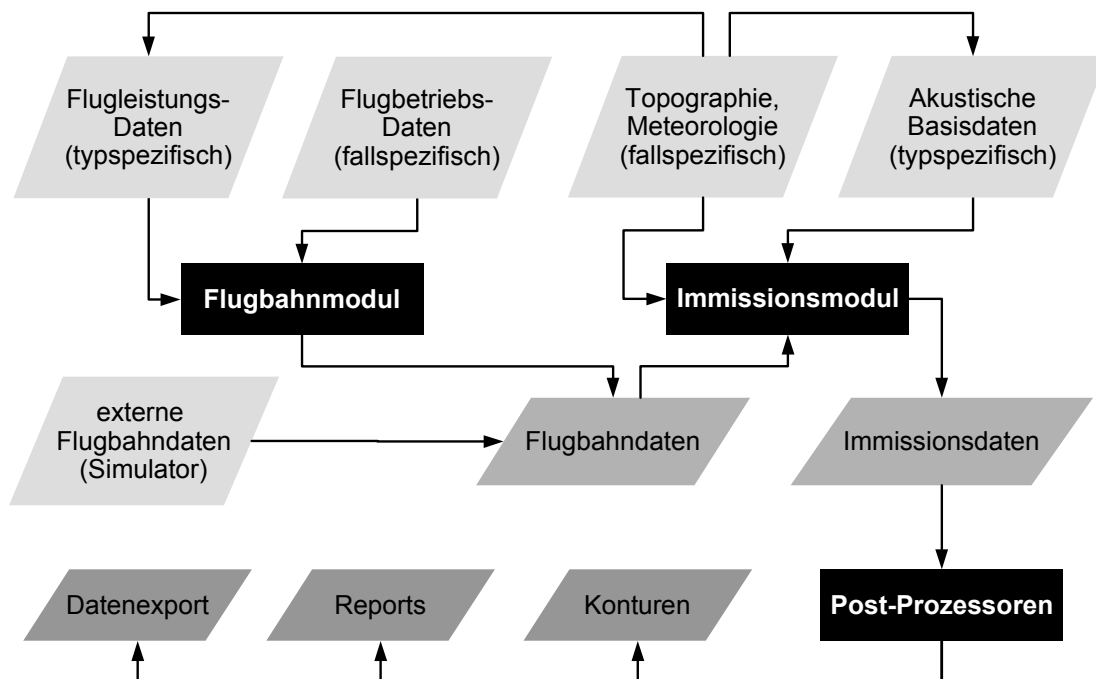


Abbildung 8-3: Schematischer Ablauf einer Immissionsberechnung mit dem SIMUL-Rechenprogramm. Die zur Wartung der Datenbanken und zur Erstellung der Eingabeinformationen notwendigen Prä-Prozessoren sind in dem Schema nicht eingetragen.

Die modulare Struktur und die bestehenden Schnittstellen ermöglichen es, das Kernprogramm zur Immissionsberechnung auch als Stand-Alone-Applikation auszukoppeln. Außerdem bietet sie den Vorteil, zur gezielten Untersuchung von zusätzlichen Mechanismen neue Module schnell einzubinden.

8.5. Erste Modellanwendungen

8.5.1. Meteorologische Effekte

Abbildung 8-4 zeigt ein Beispiel für den Einsatz des SIMUL-Programms bei der Untersuchung der Einflüsse meteorologischer Effekte. Die Berechnung wurde für den Abflug eines typischen 2-motorigen Strahlflugzeugs mit einer Abflugmasse von etwa 65 Tonnen durchgeführt.

Zugrunde lag eine in 10 m Höhe gemessene Westwindkomponente von 2 m/s sowie unterschiedliche Temperaturschichtungen:

Stabile Schichtung: Stabile Schichtungen treten in der Regel nachts und bei wenig Wind auf. Darunter fallen insbesondere auch Inversionswetterlagen.

Neutrale Schichtung: Dieser Typ ist der Standardfall. Er tritt in der Regel tagsüber bei bedecktem Himmel auf und ist durch mittlere bis höhere Windgeschwindigkeiten charakterisiert.

Instabile Schichtung: Instabile oder labile Schichtungen ergeben sich tagsüber im Fall von windschwachen Situationen mit wenig Bedeckung (Extremfall: Mittagszeit in den Sommermonaten).

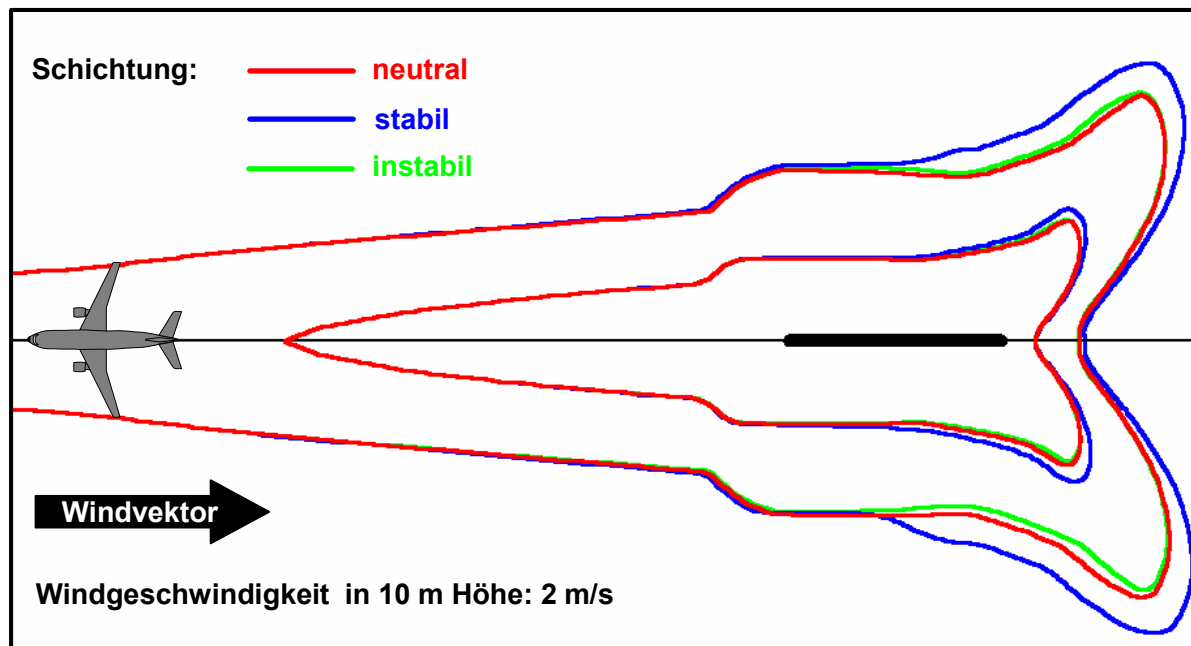


Abbildung 8-4: Einfluss der Temperaturschichtung auf den Maximalschallpegel beim Abflug eines typischen Strahlflugzeugs mit MTOW von ca. 65 t. Dargestellt sind Konturen des A-bewerteten Maximalschallpegels $L_{A,max} = 65, 75$ dB.

Zunächst einmal erkennt man, dass die Effekte der atmosphärischen Schichtung sich im wesentlichen seitlich und hinter der Startbahn auswirken – in einem Bereich also, in dem das Flugzeug am Boden oder in sehr geringen Höhen operiert. Den stärksten Effekt zeigt die stabile Schichtung. Sie ist charakterisiert durch einen positiven Temperaturgradienten in niedrigen Höhen. Damit verbunden sind Effekte wie Abwärtsbrechung der Schallstrahlung und das Auftreten von Mehrfachreflexionen. Man erkennt, dass die Konturen für die unterschiedlichen Schichtungsvarianten nicht symmetrisch verlaufen. Dies rührt u.a. von der in der Rechnung mit berücksichtigten Winddrehung her.

Abbildung 8-5 zeigt die Ergebnisse einer entsprechenden Modellrechnung zum Einfluss der Windgeschwindigkeit. Bei neutraler Schichtung wurde hier einmal Windstille und einmal eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s (gemessen in 10 m Höhe) zu Grunde gelegt. Bei der Interpretation dieser Darstellung sind zwei Effekte zu unterscheiden:

- Die Unterschiede im Bereich hinter und seitlich der Startbahn resultieren aus dem direkten Einfluss des Windes auf die Schallausbreitung.

- Die sich im Bereich der Spitzen der Konturen unter der Abfluggrundlinie ergebenden Differenzen ergeben sich demgegenüber aus dem Einfluss des Windes auf die Flugbahn: Mit zunehmender Gegenwindkomponente erhöht sich der Auftrieb und damit auch der Steiggradient. Aus der resultierenden Abstandsänderung ergeben sich Verkleinerungen der Konturen im Bereich direkt unter der Flugbahn.

Insgesamt kann man also davon ausgehen, dass die wesentlichen Effekte der Meteorologie sich in den Bereichen ergeben, in denen die Schallausbreitung bodennah erfolgt. Je mehr das Flugzeug an Höhe gewonnen hat, um so stärker dominiert der Einfluss der Meteorologie auf die Flugleistungen die Schallimmission am Boden.

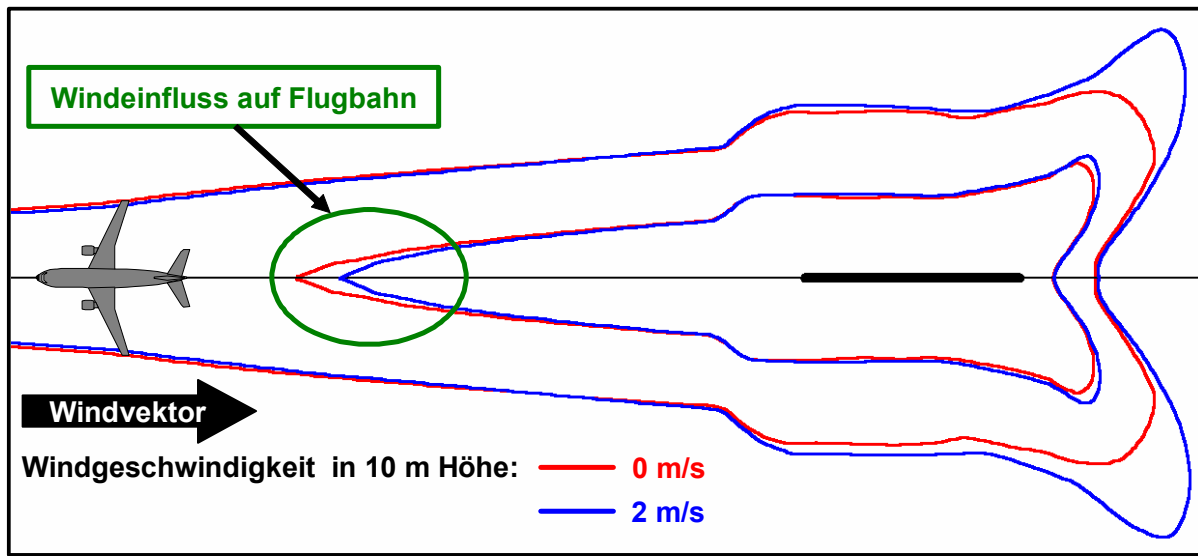


Abbildung 8-5: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den Maximalschallpegel beim Abflug eines typischen Strahlflugzeugs mit MTOW von ca. 65 t. Zugrunde liegt neutrale Schichtung. Dargestellt sind Konturen des A-bewerteten Maximalschallpegels $L_{A,max} = 65, 75$ dB. Im grün markierten Bereich erklärt sich der Unterschied im Kurvenverlauf durch den Windeinfluss auf die Flugbahn.

8.5.2. Modellierung von Anflugverfahren

Im Folgenden sollen einige Beispielrechnungen gezeigt werden, die die Eigenschaften des Teilschallquellenmodells demonstrieren. Hierbei wird ein modellhafter Anflug zu Grunde gelegt, der zwar realitätsnah ist, aber in der Praxis nicht eingesetzt wird. Anmerkungen dazu finden sich am Ende dieses Abschnitts. Als Referenzflugzeug wurde wieder ein typisches 2-motoriges Flugzeug mit einer Landemasse von etwa 60 Tonnen herangezogen.

In den folgenden beiden Abbildungen ist jeweils eine Hälfte einer symmetrischen Lärmkontur dargestellt, die sich für einen Anflug in der Umgebung einer geradlinigen Flugstrecke ergibt. Der Anflug erfolgt von Ost nach West. Dargestellt ist die nördliche Hälfte einer SEL-Kontur. Dabei ist aus Darstellungsgründen die vertikale Koordinate stark (um etwa einen Faktor 10) überhöht.

- Die Anflugprozedur beginnt mit einem Horizontalflugteil, bei dem die Triebwerksleistung vergleichsweise hoch ist und damit den Gesamtlärm dominiert.
- Im anschließenden Sinksegment wird die Triebwerksleistung nahezu auf Leerlaufschub zurückgefahren – hier wirken sich auch die Beträge der Umströmung aus. Mit zunehmender Annäherung an den Aufsetzpunkt verbreitert sich die Kontur aufgrund

der abnehmenden Flughöhe. Aufgrund der abnehmenden Geschwindigkeit nimmt dabei der Beitrag des Umströmungslärms ab.

- In etwa 15 km Abstand werden die Klappen ausgefahren (hier willkürlich als Stellung „A“ bezeichnet). Dadurch erhöht sich der Umströmungslärm.
- Im Bereich von etwa 8 km werden dann die Klappen in die nächsthöhere Stellung „B“ gesetzt und das Fahrwerk wird ausgefahren. Aufgrund der damit verbundenen Widerstandserhöhung wird das Triebwerk bis zu einer Leistung hochgefahren, dass der Triebwerkslärm den Gesamtlärm bestimmt. Würde man die Triebwerkslärmkomponente separat auftragen, so würde der Verlauf der Kontur nahezu identisch mit dem Verlauf der Kontur für den kombinierten Triebwerks- und Fahrwerkslärm sein.

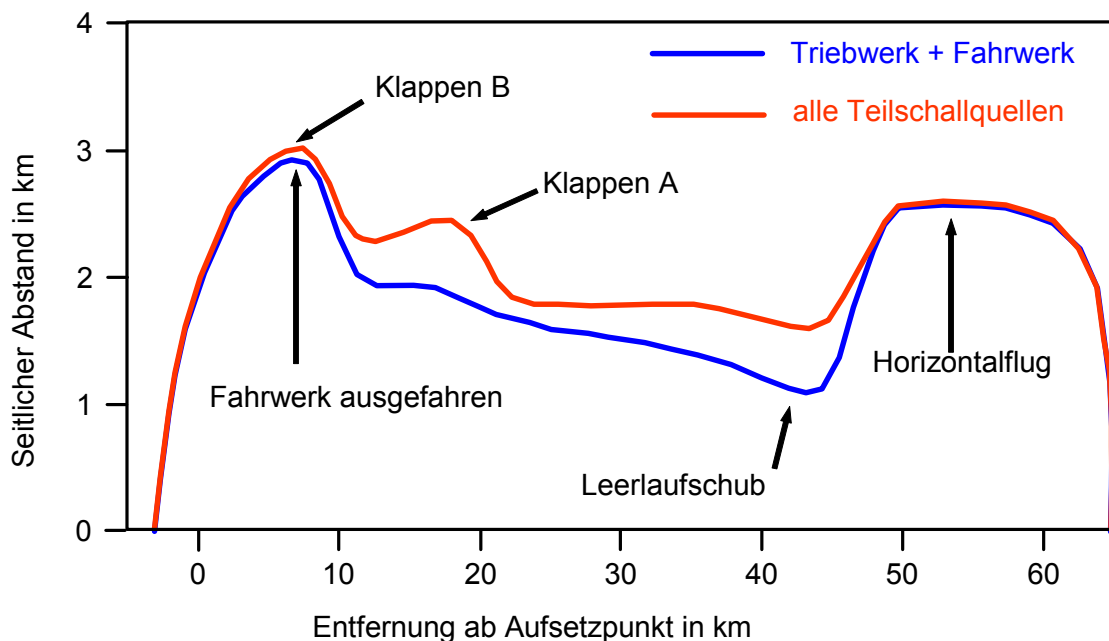


Abbildung 8-6: SEL-Kontur für einen modellhaften Anflug (nur obere Hälfte der Kontur in stark überhöhter Darstellung). Eingetragen sind die Beiträge aller Teilschallquellen sowie nur diejenigen von Triebwerk und Fahrwerk.

Dieses Rechenbeispiel zeigt, dass bei dem untersuchten Flugzeugmuster und dem gewählten Anflugverfahren Umströmungslärm im Flughafennahbereich noch keine Rolle spielt, da hier der Triebwerkslärm weitestgehend dominiert. Dies kann sich aber ändern, wenn durch neuere Technologien leisere Triebwerke entwickelt werden. In diesem Fall sollte bekannt sein, welche Beiträge vom Umströmungslärm zu erwarten sind – d.h. wann dieser Effekt beginnt, eine maßgebliche Rolle zu spielen.

Aus diesem Grund wurde die gleiche Anflugprozedur noch einmal durchgerechnet, wobei allerdings die Triebwerksleistung konstant gehalten wurde (und zwar nahezu bei Leerlaufschub). Eine derartige Prozedur ist in Realität zwar nicht fliegbar, kann aber im Rechner ohne weiteres simuliert werden. Ziel dieser Rechnung war es, die Beiträge der einzelnen Teilschallquellen besser identifizieren zu können. Das Ergebnis ist in Abbildung 8-7 dargestellt.

- Die Kontur für die Triebwerkskomponente verläuft im Horizontalflugteil parallel zur Anfluggrundlinie (die durch die horizontale Achse repräsentiert wird). Anschließend verbreitert sich diese Kontur aufgrund der abnehmenden Flughöhe.

- Die Kontur für alle Teilschallquellen nimmt bis zum Ausfahren der Klappen weniger stark zu als diejenige für die Triebwerkskomponente, da aufgrund der Verzögerung der Umströmungslärm abnimmt.
- Das Ausfahren der Klappen ist deutlich erkennbar. Allerdings ist der Effekt des Ausfahrens in die höhere Klappenstellung nicht mit einer deutlichen Erhöhung des Umströmungslärms verbunden, weil hier die Geschwindigkeit durch das Ausfahren der Klappen in Stellung „A“ schon reduziert wurde.
- Das Ausfahren des Fahrwerks ist hier deutlich zu erkennen. Allerdings ist der Effekt im dargestellten Fall noch vergleichsweise gering.

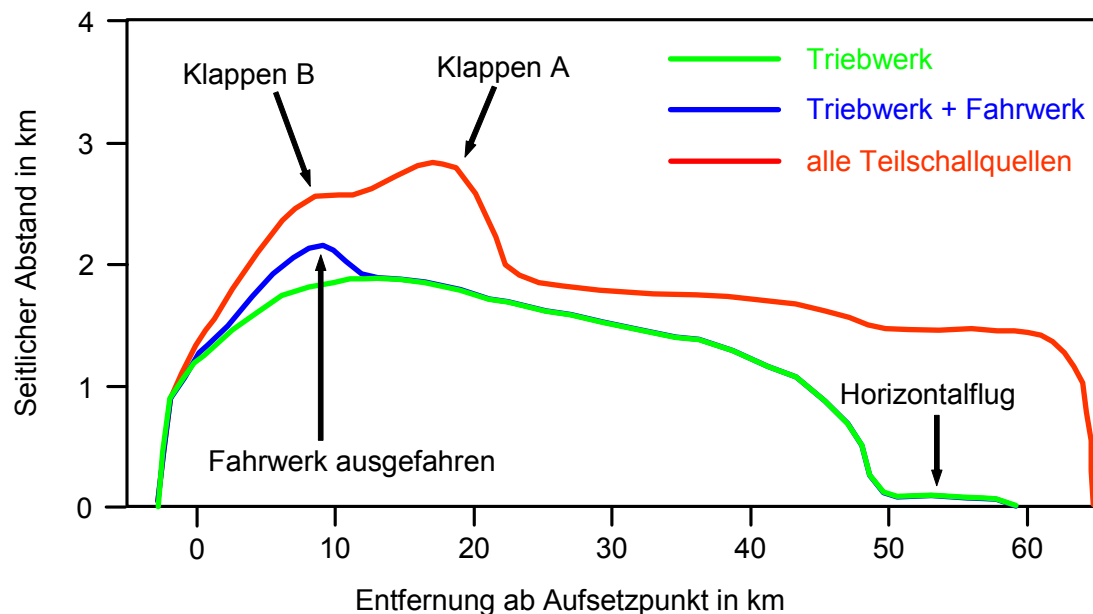


Abbildung 8-7: SEL-Kontur für einen modellhaften Anflug mit konstanter Triebwerksleistung (nur obere Hälfte der Kontur in stark überhöhter Darstellung). Eingetragen sind die Beiträge verschiedener Teilschallquellen. Geschwindigkeits- und Konfigurationsänderungen wie bei der Anflugprozedur in Abbildung 8-6.

Anmerkungen zum vorgestellten Beispiel:

Das dargestellte Beispiel ist rein exemplarischer Natur und soll nur die *Möglichkeiten des Rechenverfahrens* aufzeigen. Grund dafür ist, dass die zu Grunde gelegten Quelldaten für den Umströmungslärm noch nicht ausreichend belastbar sind: Im Rahmen der im Projekt durchgeführten Überflugversuche ergab sich versuchsbedingt nur eine vergleichbar geringe Datenmenge die zur Modellbildung für den Umströmungslärm herangezogen werden konnte. Insofern sind die Darstellungen 8-6 und 8-7 primär qualitativer Natur – sie dienen also eher zur Verdeutlichung von Effekten.

Das Beispiel zeigt aber, dass mit Hilfe eines Simulationsverfahrens auf Teilschallquellenbasis gezielt einzelne Effekte analysiert werden können, was letztendlich zu einer Optimierung von Flugverfahren herangezogen werden kann. Hier sind vor allem Anflugverfahren von Interesse – bei Abflügen dominiert weiterhin der Triebwerkslärm, so dass eine Optimierung der Verfahren hier auch mit einfacheren Rechenmodellen erfolgen kann.

In diese Richtung zielt auch das vom BMBF geförderten Vorhaben „Lärmarme An- und Abflugverfahren (LANAB)“. Hier wird das SIMUL-Verfahren eingesetzt und auch hinsichtlich einer Verbesserung der Quellmodelle weiterentwickelt. Insbesondere sollen hier weiterge-

hende Daten zum Umströmungslärm im Rahmen von umfangreichen Überflugversuchen ermittelt werden, so dass eine belastbare Validierung des Rechenverfahrens möglich wird.

8.6. Die Überarbeitung von ECAC Doc.29

Schon bei der Definition des Projekts war abzusehen, dass ein Fluglärmberechnungsverfahren auf der Basis einer Einzelflugsimulation zur Zeit aufgrund der Verfügbarkeit der Eingabedaten noch kein weitestgehend in die Praxis umsetzbares Konzept ist. Der Einsatz eines derartigen Verfahrens ist zunächst auf die im Abschnitt 8.4 aufgezeigten Anwendungsbereiche fokussiert.

Eine erweiterte Zielsetzung des Projekts war es daher, Anforderungen und Spezifikationen an ein gesetzlich festschreibbares Verfahren zu definieren. Dieses Ziel wurde insbesondere in Anbetracht der anstehenden Novellierung des Fluglärmgesetzes anvisiert.

Die Aktivitäten der EU zu einer harmonisierten Lärmschutzpolitik in Europa [8-2,-3] und die damit verbundene Notwendigkeit von vereinheitlichten Berechnungsverfahren legten es aber dann nahe, sich mit dieser Zielsetzung an den europäischen und internationalen Aktivitäten zu orientieren. Aus diesem Grunde wurden die Aktivitäten zur Definition eines festschreibbaren Verfahrens in die Arbeiten der ECAC-Arbeitsgruppe AIRMOD mit einbezogen, die sich mit der Überarbeitung des ECAC-Dokuments Doc.29 aus dem Jahr 1997 [8-7] als ein mögliches harmonisiertes Berechnungsverfahren befasst.

Diese Überarbeitung wird im Jahr 2004 abgeschlossen sein. Das überarbeitete Dokument Doc.29R wird den derzeitigen, in der Praxis bewährten Kenntnisstand (*Current Best Practice*) widerspiegeln. Das war auch die Zielsetzung von AIRMOD – es sollten nur in der Praxis bewährte Ansätze und Modelle einfließen.

Wesentliche Änderungen gegenüber der 2. Auflage des Dokuments aus dem Jahr 1997 sind:

- Einführung eines separaten „*Applications Guide*“, der sowohl dem Anwender als auch dem Endnutzer eines Berechnungsverfahrens Unterstützung bei der Durchführung von Fluglärmuntersuchungen bietet.
- Implementierung eines Segmentierungsalgorithmus der sich am aktuellen Stand dieser Modellierungstechnik orientiert.
- Überarbeitung der Algorithmen zur Zusatzdämpfung bei bodennaher Schallausbreitung in enger Kooperation mit den internationalen Aktivitäten zu diesem Thema.
- Verbesserte Verfahren zur Flugprofilmodellierung
- Bereitstellung einer harmonisierten Datengrundlage auf internationaler Ebene, die durch Eurocontrol und die amerikanische Luftfahrtbehörde FAA gewartet wird. Diese Datengrundlage wird im WWW verfügbar sein.

Außerdem erfolgte eine Anpassung und Erweiterung der bereits im ursprünglichen Doc.29 beschriebenen Formalismen entsprechend dem aktuellen Kenntnisstand. Dadurch bietet Doc.29R eine weitestgehende Flexibilität und deckt die Anforderungen an die typischen Anwendungsgebiete eines Fluglärmberechnungsverfahrens ab.

8.7. Zusammenfassung

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die anvisierten Zielsetzungen mit einer Ausnahme vollständig erfüllt wurden. Was im Rahmen des Projekts nicht durchführbar war, war eine ausreichende Bereitstellung und Validierung von Daten zur Quellmodellierung. Dies wird allerdings im laufenden BMBF-Projekt LANAB erfolgen.

Im einzelnen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Es wurde ein Simulationsmodell auf Teilschallquellenbasis erarbeitet, dass zur Berechnung der Belastung durch Fluglärm herangezogen werden kann. Der Anwendungsbereich dieses Modells ist primär an speziellen Problemstellungen (Optimierung von Flugverfahren, Einzelfalluntersuchungen) orientiert.
- In dieses Rechenverfahren wurde das im Arbeitspaket 5B entwickelte fortschrittliche Schallausbreitungsmodell integriert. Die Realisierung dieses Modells erfolgte im übrigen in einer Form, die auch eine Integration in konventionelle Rechenmodelle ermöglicht.
- Im Rahmen der Aktivitäten der ECAC-Arbeitsgruppe AIRMOD wurde sich an der Entwicklung eines festschreibbaren Fluglärmrechnungsverfahrens beteiligt, dass den aktuellen praktikablen Kenntnisstand repräsentiert und einen potentiellen Kandidaten für ein harmonisiertes europäisches Berechnungsverfahren darstellt.

8.8. Schrifttum

- [8-1] Isermann U.: *Berechnung der Fluglärmimmission in der Umgebung von Verkehrsflughäfen mit Hilfe eines Simulationsverfahrens*. MPI für Strömungsforschung, Bericht 7/1988, Feb. 1988 (Dissertation).
- [8-2] Kommission der europäischen Gemeinschaften: *Richtlinie 2002/49/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm*. Luxemburg, 25. Juni 2002. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L189/12 vom 18.7.2002.
- [8-3] Kommission der europäischen Gemeinschaften: *Empfehlung der Kommission vom 6. August 2003 über Leitlinien für die geänderten vorläufigen Berechnungsmethoden für Industrie-, Flug-, Straßenverkehrs- und Eisenbahnlärm und diesbezügliche Emissionsdaten*. Brüssel, 6. August 2003. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L212/49 vom 22.8.2003.
- [8-4] Isermann, U., Schmid, R.: *Bewertung und Berechnung von Fluglärm*. Untersuchung im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, FB L-2/96-50144/96, Göttingen, Juli 1997.
- [8-5] Der Bundesminister des Innern: *Bekanntmachung der Datenerfassungssysteme für die Ermittlung von Lärmschutzbereichen an zivilen (DES) und militärischen Flugplätzen (DES-MIL) sowie einer Anleitung zur Berechnung (AzB)*. Gem. Ministerialblatt 26, Ausgabe A, Nr. 8,126-227, Bonn, 10. März 1975.
- [8-6] Gulding., J.M.; Olmstead, J.R; Fleming, G.C: *Integrated Noise Model (INM) Version 6.0 User's Guide*. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Report No. FAA-AEE-99-03, September 1999.
- [8-7] European Civil Aviation Conference (ECAC): *Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports*. ECAC.CEAC Doc.29, 1st Edition, 1986 (2nd Edition 1997).
- [8-8] European Civil Aviation Conference (ECAC): *Methodology for Computing Noise Contours around Civil Airports*. ECAC.CEAC Doc.29R, Vol.1: „Applications Guide“, Vol.2 „Technical Guide“. Proposal by AIRMOD Technical Subgroup, Draft Version (wird 2004 veröffentlicht).
- [8-9] Isermann, U., Schmid, R.: *Untersuchungen mit dem Integrated Noise Model*. Im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, FB L-1/95-50135/95, Göttingen, Oktober 1996.

- [8-10] Thomann, G.; Bütikofer, R.; Krebs, W.: *FLULA2 – Ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. Technische Programm-Dokumentation*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Bericht EMPA 840'143/513.1933, Dübendorf, Oktober 2001.
- [8-11] Boguhn, O., Henkel, C. Isermann, U.: *Rechenprogramm SIMUL - Technisches Handbuch*. Version 1., DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Göttingen (in Vorbereitung).
- [8-12] Henkel, C. Isermann, U.: *Rechenprogramm SIMUL - Benutzerhandbuch und Befehlsreferenz*. Version 1., DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Göttingen Februar 2004.

9. Schallausbreitungsmodelle

Arbeitspaket 5B: *Dr. Dietrich Heimann, E-Mail: d.heimann@dlr.de
DLR-Institut für Physik der Atmosphäre,
Abteilung Dynamik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen*

9.1. Forschungsziel

Ziel des Arbeitspakets ist die Entwicklung und Erstellung eines Modellsystems zur konsistenten Simulation der meteorologischen und topografischen Einflüsse auf die Schallausbreitung.

Das Modellsystem, das aus der Kopplung eines existenten meteorologischen Modells und eines hier zu entwickelnden akustischen Modells besteht, soll schließlich in ein Lärmprognoseverfahren einfließen. Dieses kann für Planungszwecke, Sonderfalluntersuchungen (z.B. „worst case“ Betrachtungen) und zur Ermittlung lärmarmer Flugrouten verwendet werden.

Das akustische Modell muss zwei Ansprüchen genügen:

- Es muss die Physik der Schallausbreitung möglichst richtig beschreiben und
- es muss so ökonomisch sein, dass es praxistauglich ist.

Zur Erreichung des Ziels wird die Modellentwicklung in abgestufter Komplexität durchgeführt. Dabei werden mit einem physikalisch umfangreichen Modell akustische Einzelprozesse (Reflexion, Refraktion, Diffraktion, Streuung, Absorption) simuliert und Parametrisierungsansätze getestet, die in ein vereinfachtes Modell einfließen, das in ein praxistaugliches Prognosemodell (geeignet für Langzeitprognosen auf der Basis von komplexen Flugbetriebsszenarien) eingearbeitet werden kann.

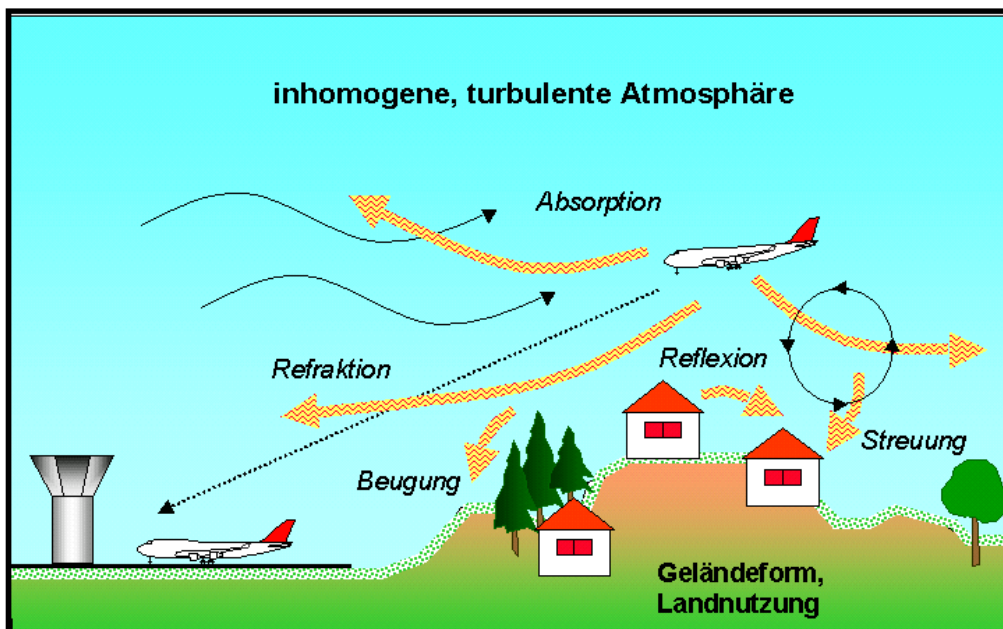


Abbildung 9-1: Schematische Darstellung der für die Schallausbreitung in der Atmosphäre maßgeblichen Prozesse.

9.2. Arbeitskonzept

Die Berechnung der Ausbreitung von Schallwellen in einer inhomogenen, von der Topografie beeinflussten Atmosphäre ist immer noch eine große Herausforderung. Die Leistungsfähigkeit moderner Computer stellt dabei den begrenzenden Faktor dar. Im Bereich der ingenieurmäßigen Lärmprognose werden Verfahren verwendet, die die meteorologischen und topografischen Einflüssen oft nur pauschal und in stark vereinfachter Form beschreiben. Im Bereich der akustischen Forschung werden verschiedene Ansätze verfolgt, die zumeist auf Approximationen der Helmholtz-Gleichung beruhen. Aber auch diese Modelle unterliegen in Hinblick auf die Berücksichtigung relevanter Prozesse oder bezüglich der Geometrie (z.B. Radialsymmetrie) z.T. erheblichen Einschränkungen.

Ein viel versprechendes Verfahren besteht dagegen in der Zeitintegration der Eulergleichungen, die eine prognostische Bestimmung des Schalldrucks und der Schallschnelle ermöglichen. Die Eulergleichungen lassen sich bezüglich eines beliebigen meteorologischen Zustands linearisieren, sodass die Ausbreitung von Schallwellen entsprechend der linearen Wellentheorie ohne weitere Einschränkungen dreidimensional simuliert werden kann. Allerdings benötigen Modelle, die auf der linearisierten Eulergleichung beruhen, heutzutage noch sehr viel Rechenzeit und Speicherplatz, sodass ihre Anwendungen weniger bezüglich der Prozesse und der Geometrie, sondern eher durch die Anzahl der maximalen Gitterpunkte und damit bezüglich Wellenlänge und Ausbreitungsentfernung beschränkt sind.

Im Rahmen des Projekts Leiser Flugverkehr wurde daher von Beginn an zweigleisig gefahren. Einerseits sollte ein physikalisch umfassendes Schallausbreitungsmodell entwickelt werden, das den Komplex „Topografie-Meteorologie-Akustik“ in konsistenter Weise simulieren kann, andererseits sollte aber auch den Anforderungen der Praxis dadurch Rechnung getragen werden, dass ein vereinfachtes Verfahren entwickelt wird, das gegenüber den heute üblichen ingenieurmäßigen Verfahren einen Fortschritt aufweist, gleichzeitig aber handhabbar bleibt und auf alle fluglärmrelevanten Situationen angewandt werden kann.

9.3. Das linearisierte Eulermodell AKU3D

Das linearisierte Eulermodell basiert auf den prognostischen Gleichungen für den Schallschnellevektor \mathbf{U}'' und den Schalldruck p'' , die gegenüber einem vorgegebenen inhomogenen meteorologischen Grundzustand (Windvektor \mathbf{U}_{met} , Druck p_{met} und spezifisches Volumen α_{met}) linearisiert sind:

$$\frac{\partial \mathbf{U}''}{\partial t} = -(\mathbf{U}_{met} \cdot \nabla) \mathbf{U}'' - (\mathbf{U}'' \cdot \nabla) \mathbf{U}_{met} - \alpha_{met} \nabla p'' - \alpha'' \nabla p_{met}$$

$$\frac{\partial p''}{\partial t} = -\mathbf{U}_{met} \cdot \nabla p'' - \mathbf{U}'' \cdot \nabla p_{met} - \kappa p_{met} \nabla \cdot \mathbf{U}'' - \kappa p'' \nabla \cdot \mathbf{U}_{met}$$

Die Gleichungen werden numerisch in der Zeit t integriert. Während einer Simulation werden an der Quelle Druckwellen angeregt, die sich dann in alle Richtungen ausbreiten. Die Zeitintegration erfolgt solange, bis die wesentlichen Wellen das Modellgebiet durchwandert haben. Die örtliche Amplitude dieser Wellen wird registriert und in Schalldruckpegel umgerechnet. Am Boden und an Hindernissen werden die Wellen reflektiert. Die Simulation des Einflusses von schallweichem Boden erfordert die explizite Darstellung einer Bodenschicht mit Dämpfungseigenschaften. An den übrigen Rändern des Modellgebiets verhindern entsprechende Randbedingungen und eine zusätzliche Dämpfungsschicht unerwünschte Reflexionen.

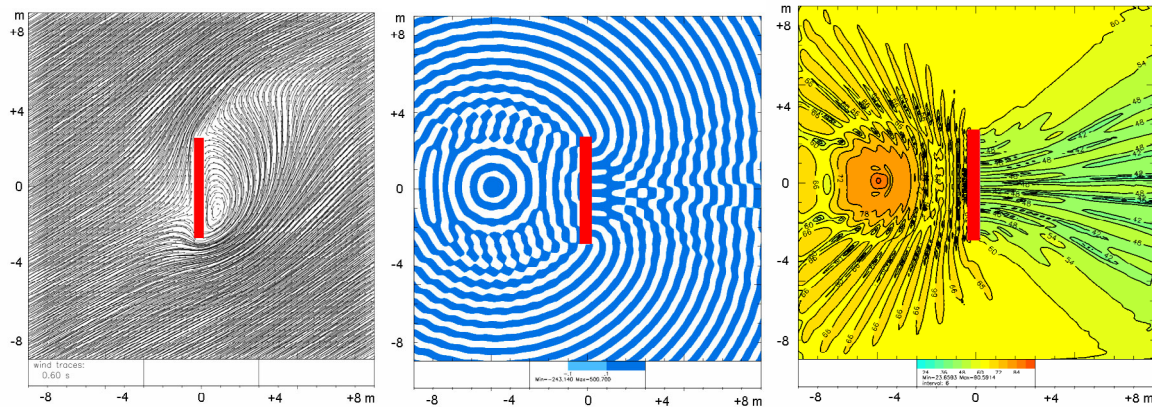


Abbildung 9-2: Horizontalschnitte durch ein berechnetes Windfeld (links), das Momentbild des akustischen Wellenmusters (mittig) und der dazugehörige Schalldruckpegel.

Das Modell AKU3D kann die benötigten meteorologischen Felder von einem vorlaufenden Strömungsmodell übernehmen und eine zu diesen Feldern konsistente Ausbreitung simulieren. Die Abbildung 9-2 zeigt als Beispiel ein durch eine 5 m lange und 2,5 m hohe Wand (rot) gestörtes Windfeld bei Schräganströmung (links). Die Schallwellen (mittig), die von einer 5 m vor der Wand und 0,5 m über dem Boden befindlichen Schallquelle mit einer Frequenz von 500 Hz ausgestrahlt werden, werden an der Wand und am Boden reflektiert. Hinter die Wand gelangen sie durch Beugung (Diffraktion). Der erhöhte Windgradient über und neben der Wand führt zusätzlich zu einer Brechung (Refraktion) in den abgeschatteten Bereich hinter der Wand. Der sich ergebende Schalldruckpegel (rechts) wird durch die Interferenzmuster im tonalen Schallfeld geprägt. Die Asymmetrie ergibt sich aus der Schräganströmung.

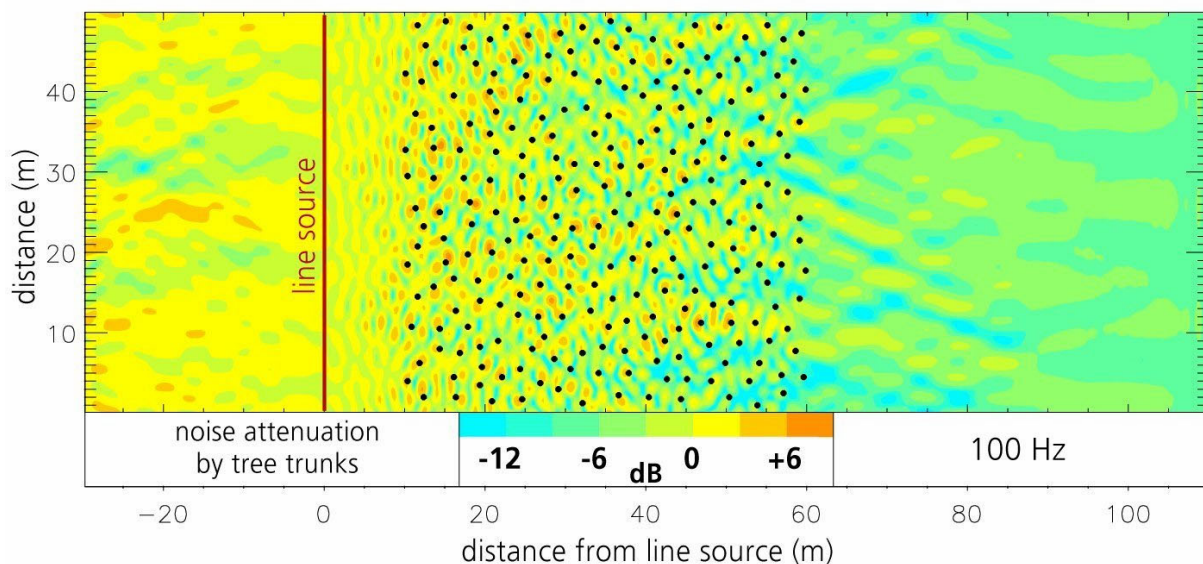


Abbildung 9-3: Berechnete Schalldämpfung (grün/blau=leiser, gelb/rot=lauter) durch einen 50 m breiten Streifen zufällig verteilter 20 m hoher und 50 cm dicker Baumstämme auf die Schallausbreitung ausgehend von einer bodennahen Linienquelle (100 Hz).

Das linearisierte Eulermodell AKU3D wurde bisher vor allem auf Prinzipstudien der Schallausbreitung im Freien angewandt, so zum Beispiel auf den Einfluss von Schallschutzwänden unterschiedlicher Bauart bei Überströmung und bei Turbulenz, den Einfluss unter-

schiedlicher Berücksichtigung der meteorologischen Felder, den Einfluss von Häusern und Dachformen auf den Schalleintrag in die lärmabgewandten Fassaden mit und ohne Überströmung, und den Einfluss eines idealisierten Waldstreifens auf die Schallausbreitung, ebenfalls mit und ohne Überströmung. Das letzte Beispiel ist in der Abb. 9-3 visualisiert.

9.4. Das vereinfachte Schallausbreitungsmodell AKUFIX

9.4.1. Prinzip

Für die Integration in das Lärmprognoseverfahren (Arbeitspaket 5A) wird ein vereinfachtes Modell (AKUFIX) herangezogen, das auf dem Lagrange'schen Schallpartikelmodell AKUMET³ beruht. Mit diesem Ausbreitungsmodell wird die Schalldämpfung durch den Boden und die Meteorologie für eine Vielzahl von Situationen vorausberechnet und in Korrekturtafeln abgelegt.

Es wird davon ausgegangen, dass sich der Oktavband-Schallpegel L in Bodennähe auf Grund der Schallemission eines sich in der Luft befindlichen Flugzeugs wie folgt zusammensetzt:

$$L = L_W + D_C - A_{div} - A_{MB} - A_{atm}$$

Hier ist:

L_W	Schalleistungspegel
D_C	Richtwirkungskorrektur
A_{div}	Schalldämpfung auf Grund der kugelförmigen Schallausbreitung von einer Punktschallquelle im Freifeld (geometrische Ausbreitung)
A_{MB}	Schalldämpfung auf Grund der Meteorologie- und Bodeneinflüsse
A_{atm}	Luftabsorption

Der Beitrag des Arbeitspakets 5B bezieht sich auf die Schalldämpfung auf Grund der Meteorologie- und Bodeneinflüsse, d.h. auf die Bestimmung von A_{MB} .

9.4.2. Berechnung von Δ_{MB}

Die Schalldämpfung auf Grund der Meteorologie- und Bodeneinflüsse fasst folgende Prozesse zusammen:

- Reflektion über schallweichem Boden
- Refraktion auf Grund vertikaler Gradienten von Wind und Temperatur
- Mehrfachreflektion am Boden bei Abwärtsbrechung
- Diffraktion in Schattenzonen bei Aufwärtsbrechung (creeping wave)
- Streuung auf Grund von Turbulenz

Es gelten folgende Voraussetzungen:

- Der Boden ist eben und rau.
- Der Boden hat eine einheitliche Rauigkeit und ist bezüglich seiner aerodynamischen Eigenschaften homogen

³ Heimann D., Groß G., 1999: Coupled simulation of meteorological parameters and sound level in a narrow valley. Applied Acoustics, 56, 73-100.

- c) Der Boden hat einen einheitlichen Strömungswiderstand und ist bezüglich seiner akustischen Eigenschaften (Impedanz) homogen
- d) Die Atmosphäre ist horizontal homogen.
- e) Die Schallquelle ist inkohärent.

Die Schallpartikel („Phonone“) werden ausgehend von der Quellposition (gegeben durch die Höhe h des Flugzeugs über Grund) in den maßgeblichen Teilraum abgestrahlt. Die Anfangsrichtung der Partikel ist gegeben durch den Azimutwinkel α (0° = gegen den Wind; 180° = mit dem Wind) und Elevationswinkel γ (-90° = senkrecht nach unten, 0° = horizontal). Der maßgebliche Teilraum wird so gewählt, dass die Strahlen unter Berücksichtigung ihrer allfälligen Krümmung das maßgebliche Empfängergebiet erreichen. Das maßgebliche Empfängergebiet ist ein kreisförmiges Volumen mit einem Radius R und der vertikalen Mächtigkeit Δz , das auf dem Boden aufliegt. Der Fußpunkt des Flugzeugs definiert den Mittelpunkt des Empfängergebiets. Im weiteren Verlauf folgen die Schallpartikel den Schallstrahlen.

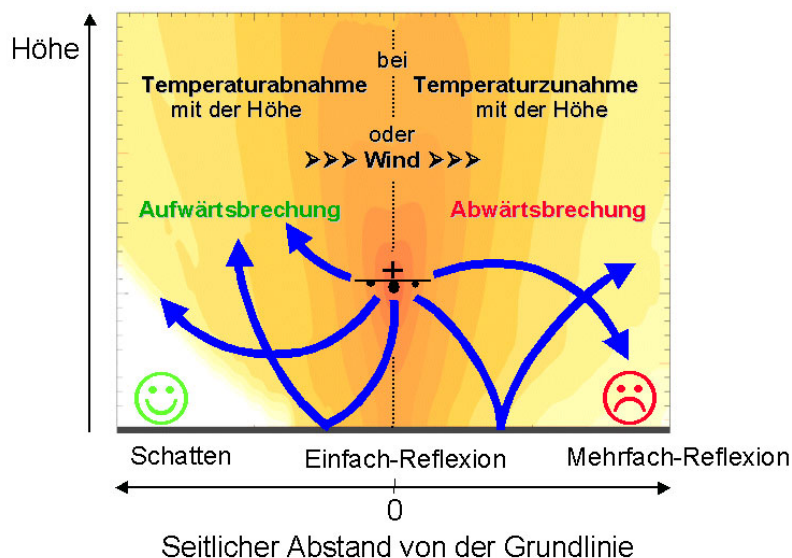


Abbildung 9-4: Schematische Darstellung der Wirkung von vertikalen Wind- und Temperaturgradienten auf die Brechung (Refraktion) von Schallwellen. Aufwärtsbrechung (linke Bildhälfte) führt zur Bildung von akustischen Schatten, Abwärtsbrechung dagegen ggf. zu Mehrfachreflexionen.

9.4.2.1. Refraktion

Die Position eines Schallpartikels entlang eines Schallstrahls wird mittels Zeitintegration der folgenden Gleichungen berechnet (Schallstrahlen nach Pierce):

$$\frac{dx}{dt} = u + c_{met} n_x \quad ; \quad \frac{dy}{dt} = v + c_{met} n_y \quad ; \quad \frac{dz}{dt} = c_{met} n_z$$

$$\frac{dn_x}{dt} = 0 \quad ; \quad \frac{dn_y}{dt} = 0 \quad ; \quad \frac{dn_z}{dt} = -\frac{\partial c_{met}}{\partial z} - n_x \frac{\partial u_{met}}{\partial z} - n_y \frac{\partial v_{met}}{\partial z}$$

Hier ist $c = \sqrt{\kappa R_L T(z)}$ die adiabatische Schallgeschwindigkeit, $u_{met}(z)$, $v_{met}(z)$ die horizontalen Windkomponenten und n_x , n_y , n_z die Komponenten des Wellenvektors. x , y , z sind die Koordinaten, die in ihrer zeitlichen Abfolge die Lage des Schallstrahls im Raum definieren. Die Flugzeugposition entspricht $x = 0$, $y = 0$, $z = h$. Die Krümmung des Schallstrahls be-

schreibt die Refraktion (Brechung) auf Grund der vertikalen Gradienten des Windes und der von der Temperatur abhängigen Schallgeschwindigkeit c_{met} (siehe Abb. 9-4).

9.4.2.2. Reflektion

Trifft ein Schallstrahl auf den Boden, so wird er dort entsprechend dem Gesetz „Ausfallwinkel = Einfallswinkel“ reflektiert. Ist der Boden schallweich, so verliert das Schallpartikel einen Teil seiner Energie. Dabei wird die Schallimpedanz des Bodens und der Einfallswinkel φ berücksichtigt. Die komplexe spezifische Impedanz des Bodens wird nach Delany und Bazley empirisch aus dem Strömungswiderstand σ des Bodens in Abhängigkeit von der Frequenz f bestimmt.

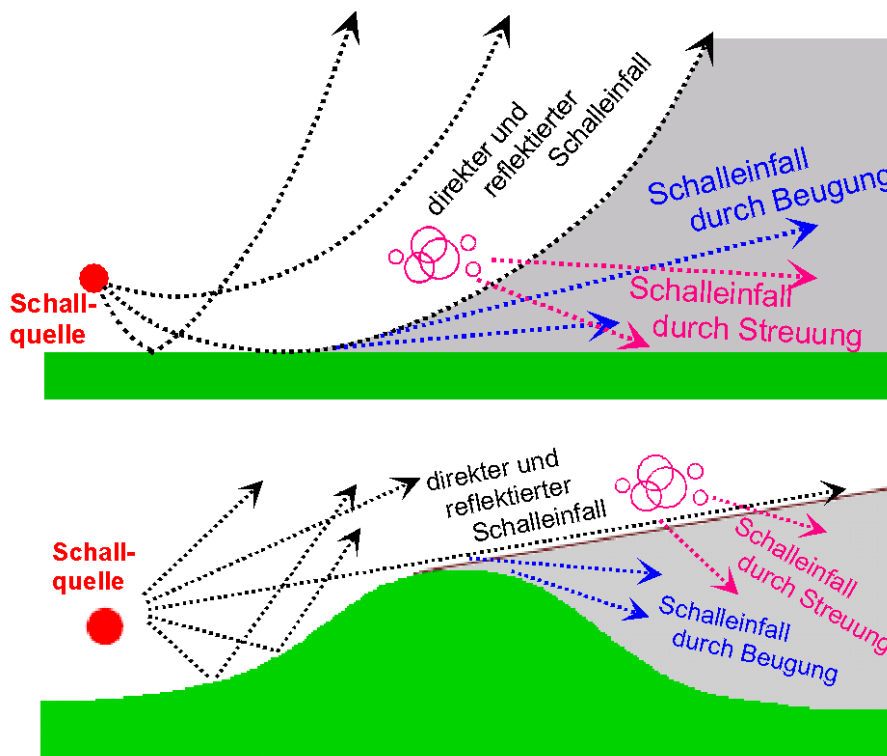


Abbildung 9-5: Schematische Darstellung der Wirkung von Beugung (Diffraktion) und Streuung auf den Schalleintrag in akustische Schatten.

9.4.2.3. Diffraktion

In refraktionsbedingten akustischen Schatten wird das Prinzip der ‚creeping wave‘ verfolgt. Die Schallpartikel bewegen sich entlang des Bodens und verlieren dabei rasch an Energie. Der Energieverlust ergibt sich geometrisch aus dem Zuwachs der Querschnittfläche zwischen zwei gekrümmten Strahlen relativ zum Zuwachs der Querschnittfläche zwischen Boden und gekrümmten Strahl. Bei der Berechnung der Strahlkrümmung wird der numerische Zeitschritt frequenzabhängig gewählt. Dadurch erhält man für kurze Wellen (hohe Frequenz) eine stärkere Krümmung und somit einen höheren Energieverlust als für lange Wellen (niedrige Frequenz). Aus dem Verhältnis der Flächenzuwächse ergibt sich ein Diffraktionskoeffizient, der vom Azimutwinkel und der Frequenz abhängt.

9.4.2.4. Streuung

Es wird angenommen, dass Streuung an Turbulenz den Schallenergieverlust innerhalb von Schattenzonen begrenzt. Die Literaturwerte schwanken dabei zwischen 20 und 40 dB. Als konservativer Wert wird hier eine Deckelung des Energieverlustes bei 20 dB angenommen, d.h. $A_{MB} \leq 20$ dB.

9.4.2.5. Berechnung der Meteo-Boden-Dämpfung

Die Meteo-Boden-Dämpfung A_{MB} wird für jedes Empfängerelement (Teilvolumen) im maßgeblichen Empfängergebiet in Abhängigkeit von der Mitten-Frequenz f des Oktavbands bestimmt. Die Gesamt-Energieverluste aller Schallpartikel mit gleicher Reflektionshäufigkeit, die sich durch ein Empfängerelement bewegen, werden gemittelt. Die mittleren Gesamt-Energieverluste werden über alle Reflektionshäufigkeiten aufaddiert. Da die Quelle als inkohärent angenommen wird, bleiben Phasenbeziehungen unberücksichtigt.

Entfernung von der Schallquelle	L_{max} : -3 dB je Abstandsverdoppelung L_{eq} : -3 dB je Abstandsverdoppelung
	zusätzlich:
Absorption	ca. -1 dB je 100 m bei 1000 Hz ca. -5 dB je 100 m bei 4000 Hz
Bodeneffekte (schallweicher Boden)	ca. -10 dB bei flachem Schalleinfall
Refraktion	bis zu -25 dB bei Aufwärtsbrechung bis zu +9 dB bei Abwärtsbrechung
Streuung, Diffraktion	Limitierung der Dämpfung in Schattenzonen

Tabelle 9-1: Typische Werte der natürlichen Schalldämpfung (negative Werte = leiser)

9.4.3. Bestimmung der Wind-, Temperatur- und Feuchteprofile

Im Prinzip kann für die Ausbreitungsberechnung jedes gemessene oder simulierte Wind- und Temperaturprofil vorgegeben werden. Für die Berechnung von Langzeitpegeln und Überschreitungszonen (Lärmkonturen) ist es jedoch zweckmäßig die Wind- und Temperaturprofile aus wenigen Parametern herzuleiten, für die Häufigkeitsstatistiken verfügbar sind. Ausbreitungsrechnungen sind dann nur für bestimmte Profilklassen durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Rechnungen können anschließend nach Wichtung mit der Klassenhäufigkeit gemittelt werden.

9.4.3.1. Windprofil

Das Windprofil besteht aus drei Abschnitten, nämlich der auf dem Boden aufliegenden Prandtl-Schicht und der darüber befindlichen Ekman-Schicht und der freien Atmosphäre. Das Windprofil wird unter Vorgabe der Windgeschwindigkeit V_a in einer Bezugshöhe⁴ z_a , des

⁴ in der Regel $z_a = 10$ m über Grund

von der thermischen Schichtung abhängigen Winkels Ψ zwischen dem Wind in der Prandtl-Schicht und der freien Atmosphäre (geostrophischer Wind) und der aerodynamischen Rauigkeitslänge z_0 des Bodens bestimmt. In der Prandtl-Schicht wird ein logarithmisches Vertikalprofil angenommen, darüber eine Drehung bis hin zum Oberrand der Ekman-Schicht, wo der Wind dem geostrophischen Wind gleicht. Oberhalb der Ekman-Schicht wird keine Windänderung mit der Höhe berücksichtigt.

9.4.3.2. Temperaturprofil

Das Temperaturprofil besteht ebenfalls aus drei Abschnitten (Prandtl-Schicht, Ekman-Schicht und freie Atmosphäre). Der vertikale Temperaturgradient wird innerhalb der Schichten als konstant angenommen (abschnittsweise lineares Temperaturprofil):

- Prandtl-Schicht (zwischen dem Boden und ca. 10 bis 60 m über Grund)
- Ekman-Schicht (bis in eine Höhe von 100 bis 2000 m über Grund)
- freie Atmosphäre (darüber)

Es werden vier Schichtungstypen vorgesehen:

a) adiabatischer Gradient: $\gamma = -g/c_p \approx -0.01 \text{ K m}^{-1}$

Der adiabatische Gradient ist charakteristisch für die Grenzschicht (Prandtl- und Ekman-Schicht) tagsüber bei wolkenarmen Wetter oder nachts und tags bei starkem Wind.

b) Standard-Atmosphäre: $\gamma = -0.0065 \text{ K m}^{-1}$

Die Standardatmosphäre ist charakteristisch für die Grenzschicht (Prandtl- und Ekman-Schicht) tagsüber bei wolkenreichem Wetter und in der freien Atmosphäre (oberhalb der Grenzschicht).

c) isotherme Atmosphäre: $\gamma = 0$

Die isotherme Atmosphäre ist charakteristisch für die nächtliche Grenzschicht (Prandtl- und Ekman-Schicht) bei wolkenreichem Wetter.

d) Inversion: $\gamma > 0$

Inversionen sind charakteristisch für die nächtliche Grenzschicht (Prandtl- und Ekman-Schicht) bei wolkenarmen Wetter.

9.4.3.3. Feuchteprofile

Die Luftfeuchte findet derzeit keine Berücksichtigung.

9.5. Tabellen der Schalldämpfung auf Grund der Meteorologie- und Bodeneinflüsse

Für die Integration in das Fluglärmrechnungsverfahren (Arbeitspaket 5A) werden Tabellenwerte der Schalldämpfung auf Grund der Meteorologie- und Bodeneinflüsse für eine große Anzahl von Situationen berechnet. Die Situationen charakterisieren meteorologische Zustände, die Entfernung zwischen dem Flugzeugfußpunkt und dem Empfänger, den Winkel zwischen Windrichtung und Ausbreitungsrichtung, die Flughöhe und die Frequenz. Insgesamt ergeben sich ca. 65000 Kombinationen.

9.5.1. Meteorologische Klassen

Es werden meteorologische Klassen eingeführt, die auf den Ausbreitungsklassen, d.h. einer Kombination aus Windgeschwindigkeits- und Stabilitätsklassen nach Klug-Manier, beruhen. Häufigkeitsstatistiken der Ausbreitungsklassen werden vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt.

	Stabilitätsklassen I und II „stabil“	Stabilitätsklassen III/1 und III/2 „neutral“	Stabilitätsklassen IV und V „labil“
$V_{10m} = 0 \text{ m/s}$	X	X	X
$V_{10m} = 1 \text{ m/s}$	X	X	X
$V_{10m} = 2 \text{ m/s}$	X	X	X
$V_{10m} = 5 \text{ m/s}$		X	
$V_{10m} = 10 \text{ m/s}$		X	
$V_{10m} = 20 \text{ m/s}$		X	

Tabelle 9-2: Zwölf Ausbreitungsklassen (grün) als Kombination von Windgeschwindigkeits- und Stabilitätsklassen.

9.5.2. Richtungs- und Entfernungsklassen

Der Winkel zwischen Windrichtung und Ausbreitungsrichtung wird in 12 Klassen mit einem Richtungsinkrement von 30° eingeteilt. Die Entfernung zwischen Flugzeugfußpunkt und dem Empfänger wird in acht Klassen mit den Nennwerten 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, und 6400 m eingeteilt.

9.5.3. Flughöhenklassifizierung

Die Flughöhen über Grund wurden in folgende Klassen mit den Nennwerten 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 m eingeteilt.

9.5.4. Frequenzklassen

Die Frequenzen wurden nach Oktavbändern mit den Nennwerten 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz eingeteilt.

9.5.5. Beispiele

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Visualisierung einer kleinen Auswahl vorausberechneter Korrekturwerte für den Meteorologie- und Bodeneffekt.

9.5.5.1. Beispiel 1

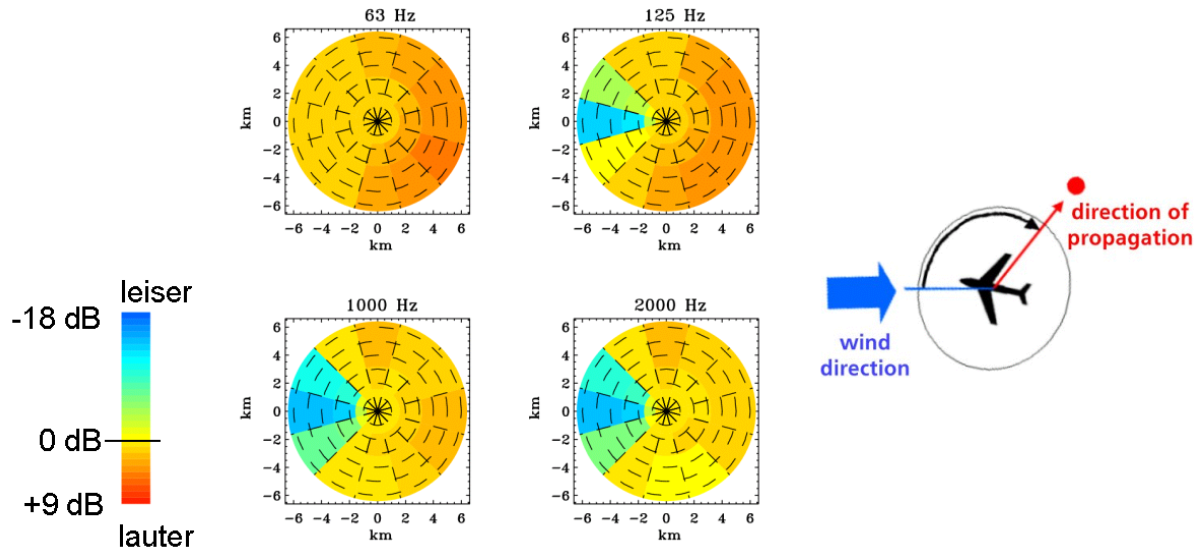


Abbildung 9-6: Korrekturwerte für den Meteorologie- und Bodeneffekt (Beispiel 1)

Die Flughöhe beträgt 1600 m über Grund und es weht am Boden ein starker Wind mit 10 m/s. Bei einer derartigen Windgeschwindigkeit ist die Atmosphäre in der Regel vertikal gut durchmischt, d.h. die Temperaturschichtung ist neutral mit einer Temperaturabnahme von ca. 1 Kelvin je 100 m Höhe. Trotz der großen Flughöhe bildet sich bei Ausbreitung gegen den starken Wind in etwa 3 km Entfernung vom Flugzeugfußpunkt eine akustische Schattenzone (blau).

9.5.5.2. Beispiel 2

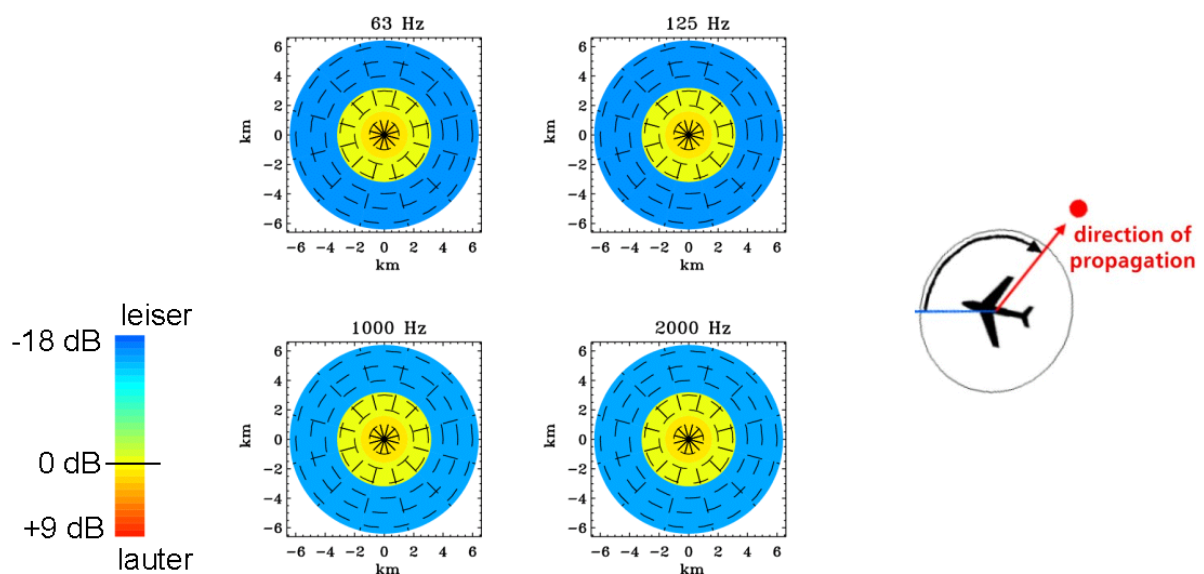


Abbildung 9-7: Korrekturwerte für den Meteorologie- und Bodeneffekt (Beispiel 2)

Die Flughöhe beträgt nun lediglich 50 m über Grund und es ist windstill. Bei Windstille oder schwachem Wind und hoher Sonneneinstrahlung ist die Atmosphäre labil geschichtet und sehr turbulent, wobei die Temperatur in den unteren 500 m um mehr als 1 Kelvin je 100 m Höhe abnimmt. Wegen der Windstille ist die Dämpfung unabhängig von der Ausbreitungsrichtung. Wegen der niedrigen Flughöhe bildet sich nach 2-3 km Entfernung vom Flugzeug-Fußpunkt ein akustischer Schatten.

9.5.5.3. Beispiel 3

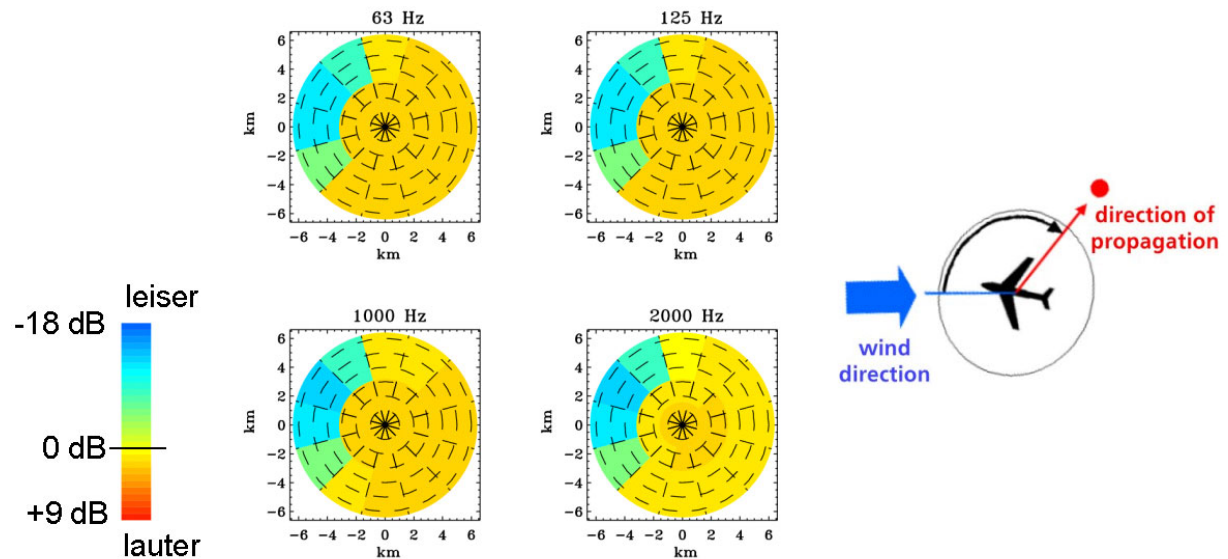


Abbildung 9-8: Korrekturwerte für den Meteorologie- und Bodeneffekt (Beispiel 3)

Die Flughöhe beträgt 100 m über Grund und es weht ein schwacher Wind mit 2 m/s. Bei Windstille oder schwachem Wind und klaren Nächten ist die Atmosphäre stabil geschichtet, wobei die Temperatur häufig mit der Höhe zunimmt (Inversion). In dieser Situation bildet sich ein kaum ein akustischer Schatten. Vor allem die tiefen Frequenzen werden infolge von Mehrfachreflexionen in Windrichtung verstärkt.

10. Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen des von der HGF teilfinanzierten DLR-Projekts „Leiser Flugverkehr“ wurden Technologien, Werkzeuge und Maßnahmen erarbeitet die dazu beitragen, dass ein notwendiger und ausreichender Schutz der Bevölkerung vor unerwünschtem Fluglärm auch in Zukunft gewährleistet werden kann. Steigendes Luftverkehrsaufkommen, das für Deutschland als ein technisch hoch entwickeltes Land eine hinreichende Mobilität von Menschen und Fracht auch in Zukunft sichern soll, macht derartige Maßnahmen immer notwendiger.

Die Untersuchung war interdisziplinärer Art, um vorhandene Synergien ausnutzen zu können. Wissenschaftler aus den Bereichen Medizin, Aeroakustik, Flugmechanik, Flugführung, Lärmphysik, Atmosphärenphysik und Verkehrsforschung haben in koordinierter Weise zusammengearbeitet. Ausgangspunkt war die kausale Wirkungskette „Schallemission – Schallausbreitung - Schallimmission – Schallwirkung“. Innerhalb dieser Wirkungskette wurde an verschiedenen Punkte angesetzt:

- Die naheliegendste Möglichkeit, um die Lärmbelastung in der Nachbarschaft von Flughäfen zu mindern ist die Lärmreduktion an der Quelle selbst. Hier sind in der Vergangenheit beträchtliche Erfolge erzielt worden, allerdings ist mit einem gravierenden Technologiesprung durch die Entwicklung neuer Triebwerkstypen mittelfristig nicht zu rechnen. Zur gezielten Erarbeitung derartiger Technologien wurde aus dem Projekt – in enger Kooperation auf internationaler Ebene – beigetragen.
- Mittelfristig einsetzbare Maßnahmen sind operationeller oder administrativer Art (also z.B. lärmoptimierte Flugverfahren oder Maßnahmen wie Gebührensteuerung). Auch diesen Problemfeldern hat sich das Projekt gewidmet.
- Neben diesen Untersuchungen wurde sich auch mit der Entwicklung von modernen Lärmprognoseverfahren befasst. Derartige Verfahren werden als Planungshilfen in der Praxis regelmäßig eingesetzt. Insbesondere im Rahmen der anstehenden Novellierung des Fluglärmgesetzes und zur laufenden Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinie werden derartige Werkzeuge benötigt.
- Letztendlich können aber lärmindernde Maßnahmen nur dann sinnvoll geplant und eingesetzt werden, wenn die Reaktionen des Individuums Mensch auf den Fluglärm ausreichend bekannt sind. Da z.Z. insbesondere der nächtliche Fluglärm ein drängendes Problem darstellt, bildete eine umfangreiche Studie zu Lärmwirkungen eine der Kernaktivitäten des Projekts.

Lärminderung am Triebwerk

Das technische Reduktionspotential für Triebwerkslärm wird von Fachleuten auf etwa 10 dB eingeschätzt. Es ist allerdings auf Grund der langen Entwicklungszeiten im Flugzeugbau nur langfristig vollständig ausschöpfbar. Gerade wegen der langen Entwicklungszeiten müssen moderne technische Konzeptionen zur Lärminderung am Fluggerät allerdings schon jetzt untersucht und auf ihre praktische Anwendung hin überprüft werden.

Schwerpunkt der triebwerksbezogenen Arbeiten war die des Minderung Lärms, der durch den im Triebwerkseinlauf befindlichen sog. „Fan“ erzeugt wird. Nachdem bei modernen Triebwerken der Lärm des Düsenstrahls stark reduziert werden konnte, tritt der Fan mehr und mehr in den Vordergrund. Mit der geplanten Einführung von Triebwerken der 4. Generation wird dies in zunehmendem Maß eine Rolle spielen.

Eine mögliche Technologie zur Minderung der störender tonalen Komponenten des Fans ist der Einsatz aktiver Lärminderung („Antischall“). Die Wirksamkeit des klassischen Ansatzes (Lautsprecher-Mikrofon-Kombination) konnte mit neu entwickelten Controller-Technologien im Modell demonstriert werden. Eine praktisch besser realisierbare neuartige Umsetzung des Konzepts bietet aber der Einsatz aerodynamischer Antischallquellen (z.B. durch gezieltes

Einblasen von Druckluft). Die im Projektrahmen erarbeiteten Basistechnologien sind Erfolg versprechend.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Entwicklung bzw. Verbesserung von numerischen Verfahren zum lärmoptimierten Design eines Triebwerksfans. Ziel ist ein um 10 dB leiserer Fan. Diese Aktivitäten erfolgten in enger Kooperation mit externen Partnern aus der Triebwerksindustrie (z.B. in EU-Vorhaben). Dadurch ist gewährleistet, dass die entwickelten Verfahren auch in die Praxis umgesetzt werden können.

Neben diesen direkt im Projekt adressierten Themen wurde im Rahmen von Flugversuchen in Kooperation mit der Deutschen Lufthansa auch demonstriert, dass kurzfristig an bestehendem Fluggerät einsetzbare technische Maßnahmen zur Lärminderung existieren. So ergaben sich beim Einsatz einer vom DLR konzipierten und von der Lufthansa gebauten „Chevron-Düse“ bei Testflügen an einer A319 Lärmreduktionen um 1 dB (höhere Pegelminderungen sind an der A321 mit ihrem wesentlich schnelleren Kernstrahl zu erwarten).

Minderung von Umströmungslärm

Zur Zeit ist der Lärm, der durch die Umströmung der Zelle – und hier insbesondere der Fahrwerke und Hochauftriebsklappen – erzeugt wird, nur bei niedrigen Triebwerksleistungen im Anflug von Bedeutung. Mit der zukünftigen Entwicklung leiserer Triebwerke wird sich dieses Problem aber verschärfen, insbesondere da das technologisch erreichbare Lärminderungspotenzial beim Umströmungslärm vergleichsweise geringer ist als beim Triebwerk.

Basis der Untersuchungen waren grundlegende Analysen der verschiedenen Entstehungsmechanismen von Umströmungslärm an Fahrwerken und Hochauftriebssystemen, um Lärminderungsmaßnahmen jeweils gezielt ansetzen zu können. Zur Minderung des Umströmungslärms von komplexen Fahrwerksstrukturen wurden (zusammen mit europäischen Partnern) aerodynamische Verkleidungen entwickelt, die ein Minderungspotenzial von 3 dB ergaben. Im Rahmen von Windkanalversuchen an Model- und Originalflügeln wurde der Vorflügel als maßgebliche Komponente des Hochauftriebslärms identifiziert. Die Wirksamkeit verschiedener Technologien zur Lärminderung konnte dabei nachgewiesen werden. Insbesondere wurden halbempirische Quellmodelle für den Fahrwerks- und Hochauftriebslärm zur Anwendung in Prognoseverfahren entwickelt.

Im Rahmen der Überflugversuche mit der Lufthansa wurde außerdem die Wirksamkeit kurzfristig an bestehendem Fluggerät einsetzbarer Maßnahmen zur Minderung von Umströmungslärm demonstriert. Störende tonale Lärmkomponenten konnten beseitigt werden.

Lärmoptimierte Flugverfahren

Eine kurz- bis mittelfristig umsetzbare Maßnahme bilden lärmarme An- und Abflugverfahren. Sie basieren im wesentlichen auf einer Optimierung von Flughöhe, Triebwerksleistung, Geschwindigkeit und aerodynamischer Konfiguration des Flugzeugs.

Nach grundlegender Analyse wurden mehrere Konzepte lärmarmen Anflugverfahren erarbeitet. Dabei ergab sich im erweiterten Flughafenbereich ein lokales Lärminderungspotential von bis zu 3 dB (durch Simulation in Zusammenarbeit mit dem Arbeitspaket Prognose ermittelt). Die Fliegbarkeit der Verfahren wurde durch Flüge mit dem DLR-Versuchsträger ATTAS demonstriert. Konzepte zur Integration solcher Verfahren in moderne Flugführungssysteme wurden ebenfalls erarbeitet.

Beim Abflug wurde eine neues Verfahren (Modern Noise Abatement Departure Procedure MONA) definiert. Dieses bietet einen Kompromiss zwischen Lärminderung und Zeit- und Treibstoffverbrauch. Es ist mit bestehendem Gerät einsetzbar und durch Einführung einer Zwischenbeschleunigungsphase anpassbar an flughafenspezifische Gegebenheiten.

Lärminderungskonzepte

Eine Analyse des Einsatzes von Lärminderungsmaßnahmen wie z.B. lärmbezogenen Landegebühren ergab, dass derartige Maßnahmen in Deutschland aufgrund der Lage der Flughäfen in dichtbesiedelten Bereichen bezogen auf den weltweiten Durchschnitt vergleichsweise stark eingesetzt werden. Es ist allerdings noch weiteres Potential bei optimaler Einsetzung vorhanden. In weitergehenden Untersuchungen wurden zu präferierende Maßnahmen identifiziert. Allerdings ist in Zukunft das Problem einer optimierten Flächennutzungsplanung, das nicht im Projektumfang definiert war, verstärkt anzugreifen.

Zur Analyse der Auswirkung von Lärminderungsmaßnahmen auf die Gesamtlärmbelastung wurde ein Computerprogramm erarbeitet. Hier können modellhaft einzelne, direkt lärmbezogene Maßnahmen (Typumschichtung oder –ausmusterung, Wirkung von verschärften Grenzwerten) schnell simuliert und ihre Wirkungen abgeschätzt werden.

Modelle zur Schallausbreitung und Lärmprognoseverfahren

Rechnerische Verfahren zur Lärmprognose bilden die Grundlage für Zwecke der Landesplanung, der Lärmschutzgesetzgebung und der Flughafenplanung. So kann ohne belastbare Prognoseverfahren die für zukünftige Flugbetriebe zu erwartende Lärmbelastung nicht ermittelt werden.

Ein wesentlicher Bestandteil von Prognoseverfahren ist die Modellierung von Schallausbreitungsvorgängen. Die zur Zeit in der Praxis benutzten Verfahren weisen hier hinsichtlich der Modellierung der meteorologischen Einflüsse Wind und Temperatur starke Defizite auf. Im Projekt wurde ein physikalisch umfassendes (und daher entsprechende aufwändiges und rechenzeitintensives) Modell zur Beschreibung der gekoppelten Wirkung von Boden und Atmosphäre auf die Schallausbreitung erarbeitet. Dieses stellt einen vollkommen neuartigen, integrierten Ansatz zur Behandlung des Problems dar. Aus dem Modell wurde dann ein praktisch umsetzbares, vereinfachtes Verfahren abgeleitet. Dieses hat den Vorteil, dass es auch in die vorhandenen, konventionellen Fluglärmrechnungsverfahren integriert werden kann.

Das Ausbreitungsmodell wurde dann in ein neu erarbeitetes Simulationsverfahren für Fluglärm integriert. Das Verfahren basiert auf einer Teilschallquellenmodellierung und berücksichtigt separat die Effekte von verschiedenen Triebwerks- und Umströmungslärmkomponenten. Das entsprechende Rechenprogramm wurde zur Auskopplung einzelner Module in Form von Black-Boxes konzipiert und kann auch mit Flugsimulatorendaten gekoppelt werden.

Das Modell ist aufgrund der hohen Anforderungen an die Datengrundlage primär für folgende Anwendungsbereiche geeignet: Optimierung von Flugverfahren (Einsatz erfolgte schon im Projekt), Immissionsberechnungen für exponierte Immissionsorte an denen konventionelle Verfahren versagen) und die Verbesserung bestehender konventioneller Modelle.

Fazit: War der interdisziplinäre Ansatz sinnvoll ?

In Abbildung 2-1 wurde ein Überblick über funktionale Zusammenhänge und mögliche Schnittstellen zwischen den einzelnen Arbeitspaketen gezeigt. Es wirft sich die Frage auf, inwieweit das dort skizzierte Synergiepotential im Rahmen des Projekts auch genutzt wurde. Im Rahmen der Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete in den vorangegangenen Abschnitten ist dieser Aspekt des Projekts nicht ausführlicher thematisiert worden.

Die Antwort lautet, dass die gewählte Form eines interdisziplinären Ansatzes seine Berechtigung hatte. Dies sei an einigen Beispielen demonstriert:

- Die Arbeiten zur Lärmwirkungsforschung basierten natürlich zum großen Teil auf Techniken und Verfahren aus dem Bereich der Medizin und Psychologie. Bei der endgültigen Definition des Nachtfluglärmkriteriums mussten aber auch die Aspekte der Umsetzbarkeit berücksichtigt werden. Hier wurde in enger Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern aus dem Arbeitspaket 5A (Prognose) das Kriterium in einer Form definiert, die in ei-

ner rechnerischen Fluglärmprognose einsetzbar ist, die sich also an den im Rahmen einer solchen Untersuchung verfügbaren bzw. ermittelbaren Daten orientiert.

- Bei der Untersuchung von lärmoptimierten Flugverfahren im HAP 3 wurde z.T. das neu entwickelte Simulationsverfahren aus AP 5A eingesetzt. Dies erforderte zwangsläufig eine enge Kooperation zwischen beiden Arbeitspaketen. Der Erfahrungsaustausch ging hier in beide Richtungen: Für die im Rahmen des HAP 3 notwendigen Berechnungen mit dem INM wurden Erfahrungen seitens der Prognosegruppe bereitgestellt, während diese bei der Implementation flugmechanischer Problemstellungen in das SIMUL-Programm auf das Fachwissen der Arbeitsgruppe aus HAP3 zurückgreifen konnte.
- Auch im Rahmen der Arbeiten an verkehrspolitischen Konzepten im HAP 4 wurde eng mit AP 5A kooperiert – der Grundstein hierzu war schon Mitte der 90er Jahre in einer gemeinsamen Untersuchung für den Flughafen Hamburg gelegt worden. In der Praxis müssen Lärmreduzierungskonzepte ohnehin hinsichtlich ihrer Wirksamkeit durch lärmphysikalische Untersuchungen überprüft werden. Entsprechend den Anforderungen der Arbeiten im HAP 4 wurde hier seitens der Prognosegruppe das Programm CEAR entwickelt, das eine schnelle Analyse der Effizienz lärmreduzierender Maßnahmen erlaubt.
- Innerhalb des Hauptarbeitspakets 5 ergab sich zwangsläufig eine enge Kooperation zwischen den Bereichen Prognose und Schallausbreitungsmodellierung. Die gute Abstimmung in beiden Arbeitsgebieten führte letztendlich dazu, dass das entwickelte Schallausbreitungsmodell nicht nur speziell auf das SIMUL-Verfahren zugeschnitten ist, sondern auch in einfachere, praxisnähere Modelle implementiert werden kann.
- Entsprechendes gilt für die beiden Arbeitspakete zur Lärmreduzierung an der Quelle: Hier ergänzten sich u.a. unterschiedliche Messtechniken in ihrer Wirkungsweise. Innerhalb dieser Arbeitspakete bestand ohnehin schon Kooperation im Rahmen von EU-Projekten, in die z.T. auch die Aktivitäten zu lärmarmen Flugverfahren eingebunden wurden. Außerdem wurden für die Prognosemodelle halbempirische Verfahren zur Modellierung von Umströmungslärm erarbeitet.

Hier wird deutlich, dass die rechnerische Fluglärmprognose ein wesentlicher Verknüpfungspunkt war. Das ergibt sich allerdings auch zwangsläufig aus den Anforderungen, die an diesen Arbeitsbereich gestellt werden: Der Prognostiker muss sowohl Kenntnis über die Mechanismen der Schallentstehung als auch über die Flugmechanik haben – mit verkehrspolitischen Lärmreduzierungskonzepten und Wirkungsfragen wird er im Rahmen seiner Arbeiten ohnehin konfrontiert.

Neben diesen direkten, problemspezifischen Schnittstellen bietet eine interdisziplinäre Projektform natürlich noch den generellen Vorteil, dass die Wissenschaftler aus den unterschiedlichen Arbeitsgebieten sich regelmäßig „an einen Tisch setzen“, über den aktuellen Arbeitsstand und auch über aufgetretene Probleme berichten. Gerade hinsichtlich des letzten Punkts wurde die Erfahrung gemacht, dass im Rahmen einer Diskussion mit fachfremden Kollegen Problemstellungen auch aus anderer Sicht interpretiert werden und somit auch alternative, für den Spezialisten nicht gleich offensichtliche Lösungsmöglichkeiten eingebracht werden.