

Bericht zum Workshop „Aufwachwahrscheinlichkeit“

Bestimmung lärminduzierter Aufwachwahrscheinlichkeiten in der Nachtlärmwirkungsforschung und Anwendung entsprechender Wirkungsmodelle für Prognosezwecke

Autoren: Mark Brink¹
Christoph Schierz¹
Mathias Basner²
Alexander Samel²
Manfred Spreng⁵
Klaus Scheuch⁴
Werner Stahel¹
Hans Bögli³

¹ ETH Zürich, Zürich

² Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt DLR, Köln

³ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

⁴ Technische Universität Dresden, Dresden

⁵ Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg

Der diesem Bericht zugrundeliegende Workshop fand an der ETH Zürich am 21. und 22. April 2006 statt.

Workshop-Teilnehmer: Prof. Dr. Manfred Spreng (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Institut für Physiologie und experimentelle Pathophysiologie)

Prof. Dr. Klaus Scheuch (Technische Universität Dresden, Medizinische Fakultät, Institut und Poliklinik für Arbeits- und Sozialmedizin)

Dr. Mathias Basner, Dr. Alexander Samel (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln)

Dr. Hans Bögli (Bundesamt für Umwelt, Abt. Lärmbekämpfung, Bern)

Prof. Dr. Werner A. Stahel (ETH Zürich, Seminar für Statistik)

Dr. Christoph Schierz, Dr. Mark Brink, (ETH Zürich, Zentrum für Organisations- und Arbeitswissenschaften, Fachbereich Umweltergonomie)

Verhindert: Dr. Christian Maschke (Forschungs- und Beratungsbüro Maschke, Berlin)

© ETH Zürich, Oktober 2006
Zentrum für Organisations- und Arbeitswissenschaften
LEO B 7.2, CH-8092 Zürich
Kontakt: mbrink|cschierz@ethz.ch

Bezug als PDF-File

Dieses Dokument ist im Schweizerischen Bibliothekskatalog NEBIS indiziert und kann über die E-Collection der ETH-Bibliothek kostenlos bezogen werden.

URL: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=bericht&nr=485>

Zitierung dieses Dokuments

Brink, M., Schierz, Ch., Basner, M., Samel, A., Spreng, M., Scheuch, K., Stahel, W., Bögli, H. (2006). Bericht zum Workshop "Aufwachwahrscheinlichkeit". Bestimmung lärminduzierter Aufwachwahrscheinlichkeiten in der Nachtlärmwirkungsforschung und Anwendung entsprechender Wirkungsmodelle für Prognosezwecke. ETH Zürich, Zentrum für Organisations- und Arbeitswissenschaften. [Online: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=bericht&nr=485>]

Inhalt

1. Ausgangslage und Zielsetzung	4
2. Aufwachreaktionen als Indikator langfristiger gesundheitlicher Lärmwirkungen	5
2.1 Einleitung	5
2.2 Indikatoren für primäre Schlafstörungen.....	6
2.3 Kontroversen um die Bedeutung von EEG-Aufwachreaktionen	8
2.4 Bedeutung von EEG-Aufwachreaktionen	9
2.5 Kurze Bilanz	10
3. Berechnung der fluglärminduzierten Aufwachwahrscheinlichkeit	11
3.1 Problemstellung und Definitionen	11
3.2 Herleitung der induzierten und zusätzlichen Aufwach- Wahrscheinlichkeit anhand der Wahrscheinlichkeitsrechnung	13
3.2.1 <i>Diskussion der Unabhängigkeitsannahme</i>	16
3.2.2 <i>Berechnungsansatz von Maschke/Neumüller</i>	19
3.3 Vergleich der Dosis-Wirkungskurven.....	19
3.4 Einfluss der Dauer des Zeitfensters auf die berechneten Wahrscheinlichkeiten.....	20
4. Abhängigkeit/Unabhängigkeit einzelner Aufwachreaktionen untereinander und Konsequenzen für die Anwendung von Dosis-Wirkungsfunktionen in der Praxis	25
4.1 Abhängigkeit/Unabhängigkeit einzelner Aufwachreaktionen untereinander: Neurophysiologische Funktionsprinzipien.....	25
4.2 Einschränkungen der Anwendbarkeit von Dosis-Wirkungsfunktionen für Prognosezwecke	26
4.3 Markov-Modellierung nach einem Vorschlag des DLR.....	29
4.3.1 <i>Markov-Modelle: Einführung</i>	29
4.3.2 <i>Markov-Modell für den Schlaf</i>	30
5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	33
6. Literatur	35

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Die Veröffentlichung der Resultate der zwischen 1999 und 2004 durchgeführten Studie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) über die Wirkung des Nachtfluglärms auf den Menschen [1] hat bisher zu einigen zum Teil heftig geführten wissenschaftlichen und politischen Diskussionen über deren Methodik und prognostische Validität geführt. Obwohl in dieser Studie viele verschiedene Wirkungsdimensionen untersucht wurden, hat insbesondere die Anwendung der vom DLR ermittelten Dosis-Wirkungsbeziehung zwischen Nachtfluglärm und Aufwachwahrscheinlichkeit für ein Nachtschutzkonzept des Flughafens Leipzig diverse Kritiker dazu veranlasst, die Brauchbarkeit der Studie für Prognosezwecke sowie die dazu verwendeten statistischen Auswertemethoden anzuzweifeln. Gleichzeitig stellen sich – durch diese Auseinandersetzung angeregt – grundsätzliche Fragen der Prognostizierbarkeit von unerwünschten bzw. gesundheitsrelevanten Nachtfluglärmwirkungen in Abhängigkeit von primären Schlafstörungsindikatoren, Flugbewegungszahlen und Maximalpegeln. Obwohl die Lärmwirkungsforschung eine Reihe wichtiger Erkenntnisse erbrachte, sind sich die an der aktuellen Diskussion beteiligten Fachleute z.T. uneins über (1) die Bedeutung von im EEG erhobenen Aufwachreaktionen hinsichtlich langfristiger gesundheitlicher Beeinträchtigungen, (2) die mathematisch korrekte Ermittlung der „fluglärminduzierten Aufwachwahrscheinlichkeit“ und (3) der korrekten Anwendung einer Dosis-Wirkungsfunktion für Aufwachwahrscheinlichkeit in der Praxis (z.B. für Prognosezwecke). Da ein Konsens über die „best practice“ der Durchführung und Auswertung solcher Lärmwirkungsstudien offensichtlich nicht besteht, hatte der in Zürich durchgeführte Workshop zum Ziel, die wissenschaftliche Diskussion, insbesondere der drei vorgenannten Punkte, „auf neutralem Boden“ zu fördern.

Lärmwirkungsforscher bewegen sich notgedrungen in einem besonders kontroversen und stark politisch geprägten Spannungsfeld. Umsomehr sollte gegenüber Entscheidungsträgern in Politik und Gesellschaft mit sachlichen und wissenschaftlich soweit wie möglich übereingekommenen Fakten argumentiert werden. Je grösser der von der Allgemeinheit wahrgenommene Dissens unter Lärmwirkungsforschern ist, desto schwächer ist die Akzeptanz von Lärmwirkungsstudien und desto geringer deren gesellschaftliche Nutzen. Die notwendige wissenschaftliche Diskussion über die Bedeutung von Aufwachreaktionen und die Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit wird zurzeit von juristischen Auseinandersetzungen und wirtschaftlichen Interessen überlagert, so dass eine objektive Klärung der strittigen Fragen einerseits schwieriger und gleichzeitig umso dringlicher erscheint. Der Workshop sollte deshalb auch dazu dienen, sich einem wissenschaftlich fundierten Konsens soweit wie möglich anzunähern. Eine Einigung über die „richtige“ Methodik und die „richtige“ Art und Weise der Auswertung solcher Lärmwirkungsstudien würde erlauben, sowohl bereits existierende Daten wie auch evtl. in künftigen Untersuchungen erhobene Daten nach einer übereingekommenen Methode auszuwerten und zu interpretieren.

Am Workshop wurden folgende Themen behandelt:

- Interpretation von Aufwachreaktionen als Indikator langfristiger gesundheitlicher Wirkungen; Diskussion anderer geeigneter Indikatoren
- Berechnung der „fluglärminduzierten Aufwachwahrscheinlichkeit“
- Modellierung der Abhängigkeiten von Aufwachreaktionen untereinander

Wir möchten an dieser Stelle darauf hinweisen, dass es nicht Ziel des Workshops war, Empfehlungen für den Nachtlärmschutz abzugeben oder Kriterien für einen solchen festzulegen. Der Bericht diskutiert lediglich wissenschaftliche Grundlagen und Berechnungsmethoden, auf welche man ein auf Einzelschallereignissen basierendes Schutzkriterium/Schutzkonzept abstützen könnte.

Das Schweizerische Bundesamt für Umwelt BAFU unterstützte diesen Workshop mit einem finanziellen Beitrag.

2. Aufwachreaktionen als Indikator langfristiger gesundheitlicher Lärmwirkungen

2.1 Einleitung

Es ist bisher wissenschaftlich nicht eindeutig erwiesen, ob durch Fluglärm gestörter Nachtschlaf kausal zu langfristigen Gesundheitsstörungen führt und welcher Indikator einer Störung des Nachtschlafs die prognostizierte „Negativität“ der Wirkung am besten oder überhaupt beschreibt.

Meist werden Störungen des Schlafs in einer Experimentalsituation (das kann im Feld oder im Labor geschehen) während einer oder mehrerer Nächte gemessen und daraus Prognosen für einen längeren Zeitraum abgeleitet. Im Fokus der DLR-Labor- und Feldstudie, deren bisherige Publikationen unter anderem Anlass für diesen Workshop waren, standen (bisher) die mittels EEG objektivierbaren *Aufwachreaktionen* (AWR), deren Bedeutsamkeit für die Prognose unerwünschter Lärmwirkungen auf den Schlaf jedoch nicht unumstritten ist. Diskussionen über Berechnungsverfahren sind nur dann sinnvoll, wenn die den Berechnungen zugrunde liegenden Messgrößen als sinnvoll und aussagefähig für die Fragestellung – Erfassung von Schlafstörungen mit prognostisch negativer Bedeutung – angesehen werden. Bevor über die Berechnung eines „Parameters des gestörten Schlafes“ diskutiert werden kann, ist also die Frage nach der zu ermittelnden Wirkung unter dem Gesichtspunkt der Ableitung eines Schutzkonzeptes zu stellen und möglichst zu klären.

Eine solche Diskussion ist unter anderem auch deshalb angebracht, weil in der DLR-Studie zwar eine Auswirkung nächtlichen Fluglärms auf das EEG festgestellt wurde, eine Auswirkung auf einige sekundäre Störungen jedoch nicht gefunden werden konnte [2] (Tertiärstörungen waren nicht Gegenstand der Studie). So wurde zwar eine Zunahme der Belästigung und der objektiv erfassten Schläfrigkeit¹ durch Fluglärm gefunden, nicht hingegen z.B. eine mit Fragebögen erfasste kurzfristig erhöhte Müdigkeit oder eine verminderte Leistung in den computergestützten Leistungstests. Somit bietet die DLR-Studie, aber auch viele andere, ähnlich geartete Untersuchungen, obwohl methodisch einwandfrei durchgeführt, hinsichtlich der Bedeutung ihrer Befunde einen breiten Interpretationsspielraum. Solche Spielräume

¹ Die Schläfrigkeit wurde in den Laborstudien STRAIN III und IV bei einem Teil der Versuchspersonen mit dem sog. Pupillographischen Schläfrigkeitstest (PST) nach dem Aufstehen objektiviert (Publikation in Vorbereitung).

werden erfahrungsgemäss auch politisch gern ausgenutzt. Aus wissenschaftlicher Sicht ist es jedoch nicht erwünscht, die Beurteilung der Bedeutsamkeit empirischer Forschungsergebnisse Laien zu überlassen. Insofern ist es gerechtfertigt, der Diskussion um die „richtige“ Berechnungsmethode der Aufwachwahrscheinlichkeit (in Kap. 3) die Frage voranzustellen, welche Rolle im EEG detektierte AWR im Hinblick auf den Schutz der Bevölkerung vor schädlichen Lärmeinflüssen überhaupt spielen und ob sich nicht allenfalls besser geeignete Indikatoren der Wirkungsquantifizierung finden lassen².

2.2 Indikatoren für primäre Schlafstörungen

Die Mehrzahl der Lärmwirkungsforscher geht von der Hypothese eines kausalen Zusammenhanges zwischen primär gestörtem Schlaf und langfristigen Gesundheitsstörungen aus und fordert konkretes Lärmschutzhandeln, bevor ein anderer Beweis erfolgt. Im Sinne der Prävention ist diese Sicht nachvollziehbar und vernünftig. Sie kann jedoch dazu führen, die nach wie vor notwendige Suche nach dem oder den „richtigen“ bzw. wissenschaftlich fundiertesten Indikatoren für gesundheitlich relevante Nachtlärmwirkungen aus den Augen zu verlieren.

Die Frage nach dem „richtigen“ Indikator primärer Schlafstörungen ist untrennbar mit der nach wie vor nur teilweise beantworteten wissenschaftlichen Frage verknüpft, wozu wir eigentlich schlafen. Die beiden bis heute geläufigsten Hypothesen über die Funktion des Schlafes betreffen zum einen den Hirnstoffwechsel. Insbesondere im NREM-Schlaf werden demnach durch eine deutliche Absenkung des zellulären Energieverbrauchs die entsprechenden Reserven wieder ergänzt [3]. Zum anderen ist die im Zusammenhang mit prozeduralen und deklarativen Lernprozessen vielzitierte *neuronalen Plastizität* [4; 5] und der hierfür funktional notwendige Tief- (SWS) und REM-Schlaf zu nennen³. Des Weiteren wurde bereits vor geraumer Zeit in der Schlafforschung erkannt, dass sich bei weitem nicht alle Sekundärfolgen durch makrostrukturelle Veränderungen des Schlafes⁴ erklären lassen. Es wird vielmehr davon ausgegangen, dass der Schlaf durch viele kurze Weckreaktionen fragmentiert und in seiner Erholungsfunktion auch dann beeinträchtigt werden kann, ohne dass gleichzeitig eine relevante Veränderung der Makrostruktur des Schlafes auftreten muss [7; 8; 9] wobei die Unabhängigkeit beider Prozesse immer noch Gegenstand aktueller Diskussionen ist [10; 11]. Letztlich hat diese Tatsache jedoch 1992 zur Definition von EEG-Arousal, also kurzen Aktivierungsreaktionen im EEG und EMG, durch die American Sleep Disorders Asso-

² Neben die ereigniskorrelierte Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Lärmereignis und physiologischer (Primär-)Reaktion stellen sich epidemiologische Studien, die z.T. mit anderen Methoden arbeiten. Viele Epidemiologen versprechen sich Aufschluss über schädigende Wirkungen von nächtlichem Fluglärm ausschliesslich mit epidemiologischen Studien und sind gegenüber dem Experimentieren im Labor bzw. Untersuchungen im Feld eher skeptisch eingestellt. Eine Diskussion von Vor- und Nachteilen der verschiedenen Ansätze war, obwohl von den eingeladenen Epidemiologen gewünscht, aus Zeitgründen nicht Teil des Workshops.

³ Der Leichtschlaf im Stadium S2 trägt weniger bzw. im Stadium S1 praktisch nichts zur regenerativen Wirkung bei.

⁴ basierend auf der Klassifikation von Rechtschaffen & Kales [6]

ciation (ASDA) geführt [12]. Diese Arousal werden mittlerweile standardmässig in klinischen Schlaflaboren neben den Schlafstadien erfasst.

Es scheint also angezeigt, von einer relevanten Störung des Schlafes insbesondere dann auszugehen, wenn die Verweildauer in den tiefen Schlafstadien und im REM-Schlaf über ein bestimmtes Mass verkürzt wird bzw. wenn die Anzahl Arousal bzw. Weckreaktionen über ein bestimmtes Mass erhöht wird⁵. Subjektiv wird der Schlaf im Allgemeinen dann als schlecht beurteilt, wenn er von erinnerbaren AWR begleitet ist. Auch wenn damit noch keine direkten gesundheitlichen Folgen impliziert werden, ist es denkbar, dass der Indikator „erinnerbares Aufwachen“ über den Umweg der „erlebten Belästigung“ eine psychosomatische Wirkung ausübt. Demgemäss wären langfristige tertiäre negative Wirkungen (im Sinne von Gesundheitsstörungen) oder kurzfristige sekundäre nach gestörtem Nachtschlaf anhand folgender Schlafstörungskriterien zu erwarten:

- Verkürzung der Verweildauer im Tiefschlaf
- Verkürzung der Verweildauer im REM-Schlaf
- Verkürzung der Gesamtschlafzeit
- Zunahme erinnerbarer AWR
- Zunahme von EEG-AWR oder von EEG-Arousal

Es muss jedoch festgehalten werden, dass nur eine nicht-kompensierbare, also chronische Veränderung der Schlafstruktur auf lange Sicht gesundheitlich relevant ist. Schlaf als homöostatischer Prozess ist gerade dadurch gekennzeichnet, dass ein Mangel desselben, sofern der Organismus die Möglichkeit dazu hat, zumindest kurzfristig weitgehend kompensiert werden kann⁶. Dies bedeutet aber auch, dass ohne die Berücksichtigung von Kompensationsmöglichkeiten die isolierte Beurteilung einer Schlafstrukturänderung im Hinblick auf die Prognose langfristiger Beeinträchtigungen nur unvollständig sein kann. Es wäre allenfalls wünschenswert, dass erweiterte Modelle der Schlafstörungsprognose solche Kompensationsmöglichkeiten berücksichtigen. Dies sollte jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass der nach einer gestörten Nacht erhöhte Schlafdruck trotz Möglichkeit der Kompensation in der Folgenacht zu einer erhöhten Tagesmüdigkeit und den damit einhergehenden Folgen (z.B. erhöhte Unfallhäufigkeit etc.) führen kann.

Als weitere Schlafstörungskriterien kommen Indikatoren einer zumeist kurzfristigen Wirkung in Frage. Nebst anderen, die jedoch am Workshop nicht diskutiert wurden sind dies:

- vegetative Arousal (z.B. Herzratenbeschleunigung, Anstieg des Blutdrucks, ohne kortikale Beteiligung direkt über das vegetative retikuläre Aktivierungssystem)
- Körperbewegungen in der Nacht
- Veränderungen der nächtlichen Cortisolsekretion über die HPA-Achse [14]

⁵ Wie weiter unten ausgeführt, werden beide Phänomene (z.B. Tiefschlafreduktion und Zunahme der Anzahl AWR) meist gleichzeitig beobachtet.

⁶ Die Dauer der Schlafdeprivation und die Dauer des nachgeholtten Schlafs sind nicht gleich, eine vollständige zeitliche Kompensation findet also nicht statt. Insbesondere korrelieren Schlafdeprivations-Dauer und darauf folgender Tiefschlaf hoch miteinander [13], d.h. nach schlafgestörten Nächten ist der Tiefschlafanteil in den folgenden ungestörten Nächten erhöht.

Mit Ausnahme des Cortisols ermöglichen diese Indikatoren genauso wie AWR oder EEG-Arousal eine unmittelbare Aussage über die Wirkung eines einzelnen Geräusches mit bestimmter Charakteristik (z.B. einem bestimmten Maximalpegel).

2.3 Kontroversen um die Bedeutung von EEG-Aufwachreaktionen

Zu den in Lärmwirkungsstudien am häufigsten verwendeten Indikatoren primärer Schlafstörungen gehören vor allem die im EEG objektivierbaren *EEG-Arousal*, *EEG-AWR*, und *erinnerbares Aufwachen*, die sich hinsichtlich ihres EEG-Musters gleichen, aber in ihrer Dauer unterscheiden. Die Wahl von (erinnerbaren oder nicht rememberbaren) AWR als Störungsindikator wird allgemein damit begründet, dass eine AWR die stärkste Form der Aktivierung des Organismus im Schlaf darstellt und die Folgen für die regenerative Funktion des Schlafes entsprechend gravierend sind. Mit zunehmender Dauer einer AWR steigt zudem die Wahrscheinlichkeit, dass der Schläfer das Wachbewusstsein wiedererlangt und die Weckreaktion am nächsten Morgen erinnert, wodurch die subjektive Einschätzung von Schlafqualität und –quantität sinkt [15]. Zudem können Fluggeräusche nur wahrgenommen werden und zu Belästigungsreaktionen führen, wenn der Schläfer das Wachbewusstsein wiedererlangt hat. In diesen Phasen bewussten Wachseins ist zudem das Potential, durch Fluggeräusche am Wiedereinschlafen gehindert zu werden, hoch, insbesondere in den frühen Morgenstunden, in denen der Schlafdruck reduziert ist.

Im Rahmen der Ollerhead-Studie [16] wurde eine Expertenkommission nach einem geeigneten Indikator für lärmbedingte Schlafstörungen befragt: Auch wenn unterschiedliche Meinungen existierten, bestand Konsens darüber, dass es sich bei der Aufwachreaktion, definiert nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales [6], eindeutig um eine relevante Änderung der Schlafstruktur handelt.

Demgegenüber steht die Ansicht, dass EEG-AWR, welche z.B. in Koinzidenz mit Fluggeräuschen beobachtet werden, nur Signalcharakter haben und allenfalls ein Indikator für Reizeinwirkungen (Schalleinwirkungen) auf das permanent offene Sinnesorgansystem Gehör darstellen, also nicht unmittelbar gesundheitlich relevant sein müssen. In diesem Fall wären sie zwar notwendige aber nicht hinreichende Voraussetzungen für gesundheitliche Beeinträchtigungen. AWR treten normalerweise ca. 24 mal in einer 8-stündigen Nacht spontan⁷ auf und sind mit grosser Wahrscheinlichkeit der zyklischen „checking activity“ des im Schlaf relativ aktiven Gehirns zuzuordnen. Nach Ansicht verschiedener Fachkollegen sind EEG-Arousal und (nicht erinnerte) EEG-AWR nicht notwendigerweise erholungsabträglich, hingegen ist denkbar dass z. B. reizausgelöste Stresshormonausschüttungen über die vegetative Hypothalamus-Hypophysen-Nebennieren-Achse (HPA-Achse) bei Personen mit hoher Aufwachreaktionsschwelle (Kinder) auch ohne oder nur gering messbare kortikale EEG-Veränderungen auftreten können. Pitson und Mitarbeiter [17] fanden, dass vegetative und EEG-Arousal zwar ziemlich hoch miteinander korrelieren, beide Indikatoren jedoch nicht nennenswert mit der selbst-eingeschätzten Tagesmüdigkeit zusammenhängen. Folgt man z.B. der Argumentation von Raschke [18], so spricht die Befundlage einiger Studien dafür,

⁷ Die Kategorie „spontane AWR“ umfasst in der Regel sämtliche AWR, die nicht auf eine bestimmte, im jeweiligen Forschungskontext eindeutig definierte externe Ursache (z.B. Lärmereignisse) zurückzuführen sind.

dass Indikatoren *vegetativer Arousal* (z.B. Herzfrequenzbeschleunigungen oder ein Anstieg des arteriellen Blutdrucks) die Messung von EEG-Arousal und EEG-AWR zu einem grossen Teil ersetzen können, da EEG-Signale hinsichtlich unerwünschter gesundheitsrelevanter Lärmeinwirkungen (um die es ja letztlich geht) nicht viel mehr oder, je nach Sichtweise, sogar weniger Information enthalten als z.B. eine merkliche Zunahme der Herzrate. Von Davies et al. wurde berichtet, dass auditorische Stimuli insbesondere während des NREM-Schlafs zu kurzzeitigen Erhöhungen des peripheren Blutdrucks führen, ohne dass sich entsprechende Veränderungen im EEG zeigen müssen [19]. Die Autoren der DLR-Laborstudie stellten hingegen fest, dass EEG-AWR stets von einer Beschleunigung der Herzrate begleitet waren, die Herzrate jedoch bei Geräuschen, die zu keiner AWR führten, auch nicht erhöht war [20].

Vegetative Arousal sind mit einer erhöhten Sauerstoffaufnahme und somit einem erhöhten Gesamtstoffwechsel verbunden, der – im Gegensatz zu reinen EEG-Signaländerungen – die Lärmwirkung auf einer energetischen Ebene quantifizierbar macht. Insofern muss die Frage gestellt werden, inwieweit andere Indikatoren, namentlich kardiovaskuläre Arousal, die Ableitung des EEGs ersetzen können (wobei auch hier die Annahme einer langfristig negativen Wirkung bei zusätzlichen lärmbedingten AWR nur eine Hypothese ist). Die Ergebnisse einer neuen Studie beantworten diese Frage zumindest teilweise: Guilleminault et al. [21] zeigten in einem ausgefeilten Experiment an sechs Probanden, dass EKG-Arousal allein nicht zu sekundären Schlafstörungen führen. Letztere wurden in der Studie mit einer Reaktionszeitaufgabe und dem multiplen Schlaflatenztest (MSLT) objektiviert. Nur solche Arousal, die von einer Reaktion im EEG begleitet wurden, gingen mit einer erhöhten Müdigkeit und einer eingeschränkten Leistungsfähigkeit am nächsten Morgen einher. Insofern scheinen EKG-Arousal alleine im EEG objektivierbare Reaktionen nicht ersetzen zu können, zumindest bei der Betrachtung sekundärer Schlafstörungen.

2.4 Bedeutung von EEG-Aufwachreaktionen

Aus den bisherigen Diskussionen folgt, dass AWR im EEG nur eine von vielen möglichen Indikatoren eines gestörten Schlafverlaufs darstellen. Es ist deshalb zu fragen, welche Rolle EEG-AWR für die Prognose sekundärer oder tertiärer Lärmwirkungen spielen.

Das DLR begründet die Wahl von EEG-AWR als grundlegende Wirkungsgrösse für deren Labor- und Feldstudien unter anderem damit, dass AWR die stärkste Ausprägung einer organischen Aktivierung im Schlaf darstellen und vergleichsweise spezifisch sind, d.h. sie treten im Vergleich zu anderen Indikatoren selten spontan auf. Dennoch wird mit dem Indikator AWR natürlich nur ein Teil der Fluglärmwirkungen auf den Schlaf erfasst. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Beschränkung auf ein einziges Schlafmerkmal (EEG-AWR) evtl. nicht ausreichend, um (durch Fluglärm) gestörten Schlaf zu beschreiben.

Es kristallisieren sich im Lichte der bisherigen Diskussion aus präventivmedizinischer Sicht dennoch einige Vorteile der Verwendung von EEG-AWR als Indikator für gestörten Schlaf heraus: Fast alle als „sicher“ apostrophierbare Schlafstörungsindikatoren, z.B. eine verlängerte Wachphase bzw. eine Schlafzeitverkürzung aufgrund einer Lärmeinwirkung, schlagen sich in irgend einer Form in irgend einem nächtlichen Zeitabschnitt als EEG-AWR nieder. Dies gilt auch für erinnertes Aufwachen, denn letzteres wird auf jeden Fall von einer im EEG detektierbaren AWR eingeleitet. Somit beschränkt ein Schutzkriterium, welches auf EEG-

AWR basiert, auch gleichzeitig die Anzahl erinnerbarer AWR, wie vom DLR in [1] ausgeführt wird. In verschiedenen Untersuchungen konnte zudem gezeigt werden, dass, obwohl vegetative Arousal sich nicht notwendigerweise im EEG zeigen müssen, EEG-AWR im Gegenzug fast immer mit Herzfrequenzbeschleunigungen und Blutdruckanstiegen [19] (als weiteres Indiz physiologischer Aktivierung) einhergehen. Carter und Kollegen [22] berichten aus einer Laborstudie mit Schichtarbeiterinnen, in welcher die Zunahme der Herzfrequenz insbesondere beim Aufwachen oder im Wachzustand beobachtet werden konnte. Im EEG objektivierte AWR durch Fluggeräusche waren in der DLR-Studie mit einer unimodalen und prolongierten Beschleunigung der Herzfrequenz verbunden [20], zum selben Resultat kommen Sforza und Mitarbeiter in einer Schlaflaborstudie: AWR die mindestens 15 Sec lange dauern, gehen mit einer deutlichen Herzratenbeschleunigung einher [23]. EEG-AWR sind also zumindest auch für einen Teil der vegetativen Arousal konstituierend. Vegetative Arousal, die auf auditive Stimuli zurückzuführen sind, zeigen sich zudem immer in mehreren physiologischen Funktionssystemen gleichzeitig [24]. EEG-AWR reflektieren somit einen recht grossen Bereich körperlicher Reaktionen und sind ein vergleichsweise „sicherer“ Indikator einer körperlichen Aktivierung – „sicher“ insofern, als dass EEG-AWR als Reaktion auf einen *externen* Reiz in der Regel nicht nur als rein kortikales Phänomen existieren, sondern parallel mit vegetativen Arousal auftreten. Von ereigniskorrelierten EEG-AWR sind also kaum „Fehlalarme“ zu erwarten. Andererseits reflektieren EEG-AWR das autonome physiologische Geschehen nicht vollständig [19]. Das kann im aktuellen Zusammenhang als gewisser Nachteil angesehen werden.

Nebst der physiologischen Begründung haben EEG-AWR den grossen Vorteil, dass Definition und Art der Messung weitgehend standardisiert sind. Somit sind EEG-AWR über verschiedene Studien hinweg eher vergleichbar als dies bei anderen Indikatoren, etwa der Aktigraphie/Aktimetrie der Fall wäre.

2.5 Kurze Bilanz

Angesichts der beschränkten, am Workshop verfügbaren Zeit konnte sowohl die Behandlung der aufgeworfenen Fragen in Kapitel 2 als auch die Bilanzziehung natürlich nur knapp und daher unvollständig ausfallen. Es lässt sich aber festhalten, dass der Indikator EEG-AWR mit vielen anderen primären Schlafstörungsindikatoren, insbesondere dem Auftreten von vegetativen Arousal, akut ausgelöst über das vegetative retikuläre Aktivierungssystem (ARAS), gut korreliert und auch einen Teil der Varianz anderer klassischer Schlafstörungsindikatoren, nicht jedoch alle schlafstrukturellen Aspekte, aufklären kann. Somit rücken neben den EEG-AWR die anderen diskutierten Schlafstörungsindikatoren als zusätzliche Kandidaten der Wirkungsquantifizierung ins Blickfeld, insbesondere der Wachanteil einer (lärmgestörten) Nacht bzw. die im SWS- und REM-Schlaf verbrachte Zeitdauer. Entsprechende Auswertemodelle sind bereits publiziert worden [25] bzw. sind unter anderem Gegenstand von Kap. 4.

Endokrine Biomarker (z.B. Cortisol) als Basisgrössen für die Definition eines Schutzkonzeptes (etwa in [26]) wurden im Workshop kurz diskutiert, das Thema kann aber im Rahmen dieses Berichts nicht behandelt werden.

Die Workshopteilnehmer kommen zum Schluss, dass die detaillierte Untersuchung der Beziehung zwischen EEG-Arousal, EEG-AWR und kardiovaskulären Reaktionen (Herzratenbe-

schleunigung, Blutdruckanstieg) im Hinblick auf eine mögliche Vereinfachung der Datenerhebung in künftigen Studien vorangetrieben werden sollte.

Des Weiteren wird, unter Beibehaltung des Vorsorgeprinzips, auch die Hypothese beibehalten, dass primär gestörter Schlaf gesundheitliche Auswirkungen nach sich zieht. D.h. es wird an durch Fluglärm hervorgerufenen, im EEG objektivierbaren AWR festgehalten, solange die wissenschaftliche Evidenz sich nicht verdichtet, dass eine gesteigerte Anzahl von EEG-AWR gesundheitlich unbedenklich ist. Dabei wird im Grundsatz davon ausgegangen, dass Primärstörungen zu Sekundärstörungen, und solche wiederum zu (gesundheitlichen) Tertiärstörungen führen. Es wird jedoch auch festgehalten, dass andere Indikatoren denkbar sind (z.B. Blutdruckanstiege, Herzratenbeschleunigungen oder andere Formen vegetativer oder hormoneller Arousal), deren Auftretenshäufigkeit eine (tertiäre) gesundheitliche Beeinträchtigung vielleicht ähnlich gut oder sogar besser prognostizieren können als die Anzahl fluglärminduzierter EEG-AWR.

3. Berechnung der fluglärminduzierten Aufwachwahrscheinlichkeit

3.1 Problemstellung und Definitionen

Die Bestimmung der Auftretenswahrscheinlichkeit einer AWR bei einem gegebenen Maximalpegel eines Geräusches ist eine grundlegende Aufgabe der Nachtlärmwirkungsfor-schung. Gesucht wird hierbei die Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen dem Maximalpegel L_{max} (oder einer anderen Lärm-Metrik) eines nächtlichen Schallereignisses (Dosis) und der Wahrscheinlichkeit, in dem zugehörigen Zeitfenster eine auf das Geräusch zurückführbare AWR zu beobachten (Wirkung)⁸. Ein „Zeitfenster“ bezeichnet hierbei den Zeitraum, in welchem Reaktionen des Schlafenden geprüft werden⁹. In jedem Zeitfenster treten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch *spontane* AWR auf. Man sieht einer im Zusammenhang mit einem Fluggeräusch beobachteten AWR grundsätzlich nicht an, ob diese spontan oder durch das Fluggeräusch entstanden ist. Die (beobachtbare) Aufwachwahrscheinlichkeit, die zu einem Zeitfenster mit bestimmtem Maximalpegel gehört, kann durch die relative Häufigkeit des Aufwachens in solchen Fenstern hingegen bestimmt werden.

⁸ Die in diesem Kapitel diskutierten Berechnungsformalismen sind gegenüber der untersuchten Wirkungsgrösse „neutral“, gelten also selbstredend nicht nur für EEG-AWR sondern für alle anderen denkbaren binären Wirkungsparameter (z.B. Motilität über einem bestimmten Schwellenwert etc.).

⁹ In der Literatur ist auch der Begriff „Lärmfenster“ gebräuchlich. Damit werden i.d.R. alle Zeitfenster bezeichnet, in denen ein Fluggeräusch auftritt, welches als Ursache für eine allenfalls in diesem Zeitfenster eintretende AWR in Frage kommt. Für die Kontrollbedingung, d.h. ohne Fluggeräusch wird analog dazu der Begriff „virtuelles Lärmfenster“ verwendet.

Zum klareren Verständnis der verschiedenen Möglichkeiten, lärmbedingte Aufwach-Wahrscheinlichkeiten zu berechnen, sollen Aufwachreaktionen zunächst als *Ereignisse* im Sinne der Wahrscheinlichkeitsrechnung betrachtet werden.

Die im Rahmen der vorliegenden Problemstellung relevanten Ereignisse betreffen das mögliche Aufwachen einer Person in einem betrachteten Zeitfenster von gegebener Dauer (z.B. 90 s), in dem ein Fluggeräusch auftreten kann oder nicht. Solche Ereignisse sind folgende:

A_{beob} Aufwachen im Zeitfenster

A_{spont} Spontanes Aufwachen im Zeitfenster. Es findet statt, unabhängig davon, ob im Zeitfenster ein Fluggeräusch existiert oder nicht.

A_{induz} Aufwachen im Zeitfenster, welches auf ein Lärmereignis zurückzuführen ist.

Für die folgenden Ausführungen soll angenommen werden, dass am Anfang eines Zeitfensters ein Zustand vorliegt, der mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu einer spontanen AWR führt und, falls im Zeitfenster ein Fluggeräusch auftritt, auch zu einer dadurch verursachten (induzierten) AWR führen kann. Es ist also denkbar, dass eine Person wegen beider Ursachen im Zeitfenster aufwachen kann, was dem Durchschnitt (Schnittmenge) der Ereignisse $A_{\text{spont}} \cap A_{\text{induz}}$ entspricht.

Die Idee von zwei verschiedenen Ursachen, die sich gegenseitig nicht ausschliessen, kann durch folgende Überlegung illustriert werden: Hat eine Versuchsperson am Anfang des Zeitfensters einen Alptraum, der in der Mitte des Zeitfensters zu einer AWR führen wird, so wird diese AWR unabhängig davon eintreten, ob im selben Zeitfenster noch ein Fluggeräusch stattfindet oder nicht.

Zur Präzisierung sei angefügt, dass sämtliche Ereignisse A in Sinne von „mindestens einmal aufwachen“ zu verstehen sind, wenn man Zeitfenster betrachtet, in denen auch mehrmaliges Aufwachen und Wiedereinschlafen denkbar ist. Die beiden Ursachen sollen die einzig möglichen sein. Es gilt also:

$$A_{\text{beob}} = A_{\text{spont}} \cup A_{\text{induz}} \quad (1)$$

A_{spont} soll somit alle Ursachen umfassen, die nicht Fluggeräuschen zuzuschreiben sind.

Da in Zeitfenstern ohne Fluggeräusche per Definition nur spontane AWR eintreten können, kann die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit in lärmfreien Zeitabschnitten im Prinzip ermittelt werden. Dazu können entweder Nächte ohne jeglichen Fluglärm oder lärmfreie Zeitabschnitte zwischen einzelnen Lärmereignissen benützt werden. Im zweiten Fall wird (zunächst) vereinfachend davon ausgegangen, dass ein Einfluss von Lärmereignissen auf die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit in lärmfreien Zeitabschnitten nicht stattfindet.

Während sich die Wahrscheinlichkeit für beobachtete AWR ipso facto direkt durch Beobachtung/Messung ermitteln lässt, lässt sich die Wahrscheinlichkeit für Aufwachen durch Fluggeräusche nicht direkt beobachten, sondern muss berechnet werden. Für diese Berechnung schlagen „das DLR“ (hier: Samel/Basner), „die ETH“ (hier: Schierz/Brink) sowie Maschke/Neumüller voneinander (z.T.) abweichende Berechnungen vor. Die Ansätze von DLR und ETH lassen sich aus demselben grundlegenden Gleichungssystem ableiten und werden aus diesem Grund in einer integralen Darstellung besprochen. Der Berechnungsvor-

schlag nach Maschke/Neumüller weist mathematische Mängel auf und wird in Kap. 3.2.2 kurz diskutiert.

Für die in diesem Bericht diskutierten Wahrscheinlichkeiten sollen folgende Definitionen gelten¹⁰:

P_{spont}	Wahrscheinlichkeit für mindestens eine spontane AWR während eines Zeitfensters
P_{induz}	Wahrscheinlichkeit für mindestens eine induzierte AWR während eines Zeitfensters
P_{beob}	Wahrscheinlichkeit für mindestens eine AWR in einem Zeitfenster. Es kann sich um spontane oder um induzierte AWR handeln.
P_{zusatz}	Wahrscheinlichkeit für mindestens eine induzierte AWR während eines Zeitfensters, unter der Voraussetzung, dass gleichzeitig keine spontanen AWR stattfinden.

Aus diesen Definitionen lässt sich die Berechnung von P_{zusatz} unmittelbar ableiten. P_{zusatz} ist die Wahrscheinlichkeit der Differenzmenge von A_{beob} und A_{spont} und ergibt sich somit als

$$P_{\text{zusatz}} = P_{\text{beob}} - P_{\text{spont}} \quad (2)$$

3.2 Herleitung der induzierten und zusätzlichen Aufwachwahrscheinlichkeit anhand der Wahrscheinlichkeitsrechnung

In den folgenden Abschnitten wird die Bedeutung der beiden Größen P_{induz} und P_{zusatz} diskutiert, die beide zur Beurteilung der Wirkung von Fluglärm herangezogen werden können. Während sich die Berechnungsvorschrift für P_{zusatz} aus den in Kap. 3.1 definierten Wahrscheinlichkeiten zwingend ergibt, ist die Berechnung von P_{induz} nicht unmittelbar offensichtlich.

Für die Berechnung von P_{induz} kann man von folgenden 4 denkbaren Ereignissen während eines Zeitfensters ausgehen:

- Mindestens eine AWR durch Fluggeräusch induziert, keine spontane AWR (das Geräuschereignis ist die *alleinige* Ursache der AWR, spontane bzw. endogene Ursachen spielen keine Rolle). Durch die oben eingeführten Bezeichnungen ausgedrückt heisst dies $A_{\text{induz}} \setminus A_{\text{spont}}$
- Mindestens eine AWR spontan, keine durch Fluggeräusch induzierte AWR (das Geräuschereignis hat keine Auswirkung, die beobachteten AWR entstanden spontan bzw. endogen) $[A_{\text{spont}} \setminus A_{\text{induz}}]$

¹⁰ Es handelt sich um die Wahrscheinlichkeiten für mindestens eine spontane, induzierte, zusätzliche oder beobachtete AWR, unter der Voraussetzung, dass sich die Person zu Beginn des zugrundeliegenden Zeitfensters in einem der Schlafstadien REM, S4, S3, S2 oder S1 befindet. Zweite und weitere AWR sind bei grossen Zeitfenstern möglich. Mit den gegebenen Definitionen bleiben die folgenden Ausführungen gültig, unabhängig von der gewählten Dauer des Zeitfensters/Lärmfensters.

- (c) Mindestens eine spontane und mindestens eine durch Fluggeräusch induzierte AWR (beide Ursachen sind während des Zeitfensters „aktiv“ und führen zu mindestens einer AWR) $[A_{\text{spont}} \cap A_{\text{induz}}]$
- (d) Keine AWR wird beobachtet

Die vier Ereignisse summieren sich zum „sicheren Ereignis“ mit Wahrscheinlichkeit 1, d.h. irgend eines der vier Ereignisse muss zwingend eintreten. Es mag der Fall (c) irritieren: Wie vorhin erläutert, kann das Aufwachen in einem Zeitfenster mit Fluggeräusch sowohl spontan als auch induziert verursacht worden sein. Das ist eine logische Konsequenz der hier angenommenen Unabhängigkeit der entsprechenden *Aufwach-Ursachen*¹¹. Welche der beiden Ursachen in einem konkreten Fall nun tatsächlich „zuerst“ zu einem Aufwachen führt, ist im Wahrscheinlichkeitskontext irrelevant, weil es hier um die Berechnung der zu *Beginn* jedes Zeitfensters gültigen *Wahrscheinlichkeit* geht, mit welcher die eine oder andere Ursache eine AWR hervorrufen wird. Für spontane AWR ist diese Wahrscheinlichkeit in jedem Zeitfenster grösser als 0. In jedem Zeitfenster, also auch in solchen mit ausreichend ausgeprägten Lärmereignissen, bei denen folglich P_{induz} ebenfalls grösser als 0 sein muss, kann deshalb eine AWR auch spontan eintreten. Der relativ seltene Fall, in welchem in einem genügend klein gewählten Zeitfenster beide Ursachen für eine oder mehrere AWR in Frage kommen, wird korrekterweise durch die Verbundwahrscheinlichkeit in Fall (c) ausgedrückt.

Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten gehen wir von der Annahme der statistischen Unabhängigkeit der beiden möglichen Ursachen des Aufwachens aus (auf die Plausibilität dieser Annahme kommen wir weiter unten zurück). Dann ergeben sich folgende Beziehungen:

$$P_a = P_{\text{induz}} \cdot (1 - P_{\text{spont}}) \quad (3a)$$

$$P_b = P_{\text{spont}} \cdot (1 - P_{\text{induz}}) \quad (3b)$$

$$P_c = P_{\text{spont}} \cdot P_{\text{induz}} \quad (3c)$$

$$P_d = (1 - P_{\text{induz}}) \cdot (1 - P_{\text{spont}}) \quad (3d)$$

Es ist ersichtlich, dass für den Fall (c) $P_c \neq 0$ gelten muss, da sonst P_{spont} oder P_{induz} gleich Null sein müssten.

Da (a) bis (d) alle Fälle sind, die in einem Zeitfenster vorkommen können, gilt:

$$P_a + P_b + P_c + P_d = 1 \quad (4)$$

Die beobachtete relative Häufigkeit mindestens einer AWR in einem Zeitfenster umfasst alle Fälle (a) bis (c), die ja durch die Beobachtung nicht unterscheidbar sind und es ergibt sich mit (4):

$$P_{\text{beob}} = P_a + P_b + P_c = 1 - P_d \quad (5)$$

¹¹ Die Annahme der Unabhängigkeit der beiden Aufwach-Ursachen lässt sich mit dem Beispiel des gleichzeitigen Werfens von zwei Würfeln (= zwei mögliche Ursachen) illustrieren: Keiner, einer oder beide Würfeln können gleichzeitig die Augenzahl 6 zeigen. Die Wahrscheinlichkeit, mit beiden Würfeln gleichzeitig eine 6 zu würfeln, entspricht der Multiplikation der Einzelwahrscheinlichkeiten, in diesem Fall also $1/6 \cdot 1/6$.

Einsetzen von (3d) in (5) führt zu:

$$P_{\text{beob}} = 1 - (1 - P_{\text{induz}}) \cdot (1 - P_{\text{spont}}) = P_{\text{spont}} + P_{\text{induz}} \cdot (1 - P_{\text{spont}}) \quad (6)$$

Diese Beziehung (6), aufgelöst nach P_{induz} ergibt:

$$P_{\text{induz}} = \frac{P_{\text{beob}} - P_{\text{spont}}}{1 - P_{\text{spont}}} \quad (7)$$

Die Grösse P_{induz} drückt die Wahrscheinlichkeit einer fluglärminduzierten AWR aus, *unabhängig* davon, ob zufälligerweise im selben Zeitfenster auch eine spontane Reaktion stattfindet.

Für die Definition eines Nachtschutzkonzeptes kann man nun berechtigterweise die Meinung vertreten, dass nur diejenigen AWR von Bedeutung sind, welche nur durch Fluggeräusche *allein* zustande gekommen sind. Das heisst, der oben diskutierte Fall (c) wird nicht den lärminduzierten AWR zugerechnet, sondern den spontanen (denn sie wären ja auch ohne Geräuschereignis eingetreten). Die Wahrscheinlichkeit einer AWR ausschliesslich durch Lärm verursacht ist gleich P_a . Für die Wahrscheinlichkeit *zusätzlich*, d.h. ausschliesslich und allein aufgrund des Geräuschereignisses aufzuwachen, ergibt sich:

$$P_{\text{zusatz}} = P_a = P_{\text{induz}} \cdot (1 - P_{\text{spont}}) \quad (8)$$

Einsetzen von (7) in (8) ergibt wiederum Gl. 2.

P_{zusatz} gemäss Gl. 2 ist die vom DLR in deren Nachtschutzkonzept für den Flughafen Leipzig [1; 27] verwendete Grösse. Notabene sind solche zusätzlichen AWR diejenigen, die sich durch Schutzmassnahmen, z.B. ein Nachtflugverbot, verhindern lassen.

Der Unterschied zwischen P_{induz} und P_{zusatz} lässt sich mit überlappenden Mengen illustrieren:

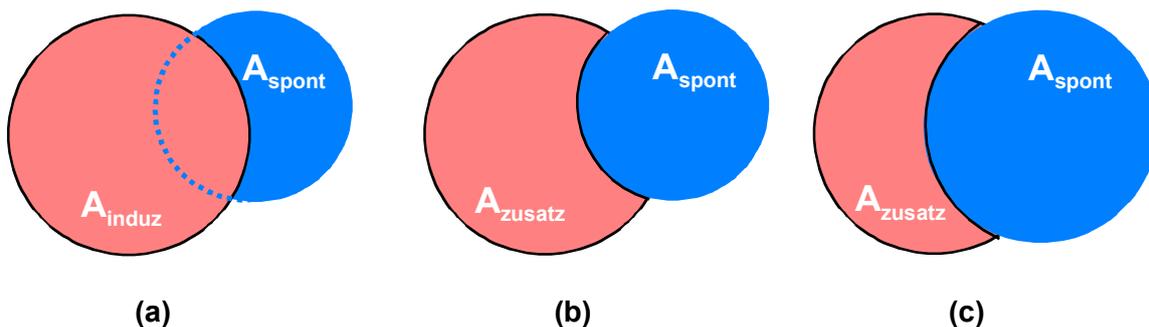


Abb. 1: Veranschaulichung der spontanen, induzierten und zusätzlichen Aufwachwahrscheinlichkeiten als Mengenfunktion (Erläuterung im Text)

Der geschlossene rote Kreis verkörpert das Ereignis einer induzierten AWR, der geschlossene blaue Kreis das Ereignis einer spontanen AWR. Die Schnittmenge der beiden Kreise verkörpert den Fall, dass eine Person wegen beider Ursachen aufwacht, und hat bei Unabhängigkeit der beiden Ursachen die Wahrscheinlichkeit $P_{\text{spont}} \cdot P_{\text{induz}}$. Die Menge A_{zusatz} der zusätzlichen AWR wird durch den angeschnittenen roten Kreis in der mittleren Darstellung (b) verkörpert. Wenn die Grössen der Kreise die Wahrscheinlichkeiten darstellen, wird im

rechten Bild (c) ersichtlich, dass P_{zusatz} von der Grösse P_{spont} abhängig ist, während P_{induz} (das wäre die Fläche des geschlossenen roten Kreises im Bild rechts) auch bei sich ändernder Grösse von P_{spont} konstant bleibt. Je kleiner der Wert für P_{spont} angenommen wird, desto mehr nähern sich P_{induz} und P_{zusatz} an. Als Vorteil dieser verfeinerten Modellierung kann nachvollzogen werden, welche Auswirkungen eine Änderung der Wahrscheinlichkeit spontaner AWR oder die explizite Betrachtung weiterer Ursachen auf P_{beob} und P_{zusatz} hätte, wenn postuliert wird, dass sich P_{induz} dadurch nicht ändert.

Während die Grösse P_{zusatz} anschaulich vor Augen führt, wie viele AWR durch Fluglärm zusätzlich zu den ohnehin auftretenden spontanen AWR stattfinden, bietet die Grösse P_{induz} den Vorteil, AWR, die durch Fluggeräusche hervorgerufen werden können, *unabhängig* von der spontanen Aufwachneigung abzubilden. P_{induz} wäre somit auch unabhängig von einer allenfalls stichprobenspezifischen spontanen Aufwachneigung, was im Zusammenhang mit der Datenerhebung für die Konstruktion einer Dosis-Wirkungsfunktion – wenn man eine eher konservative Strategie verfolgt – als Vorteil gesehen werden kann. Gl. 2 zur Berechnung von P_{zusatz} hingegen setzt Unabhängigkeit nicht voraus; mit dieser Grösse kommt man also im Gegensatz zu P_{induz} ohne Zusatzannahme über die Art der Beziehung zwischen den Aufwach-Ursachen aus, was seinerseits ein grosser Vorteil ist. Auf die Implikationen und Beschränkungen der Unabhängigkeitsannahme wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

3.2.1 Diskussion der Unabhängigkeitsannahme

Die Berechnung von P_{induz} nach Gl. 7 setzt voraus, dass die Ursachen für spontanes Aufwachen und fluglärminduziertes Aufwachen voneinander *unabhängig* wirken. Die Annahme der Unabhängigkeit erscheint zunächst plausibel, denn für beide „Aufwach-Arten“ liesse sich ja jeweils eine eindeutige Ursache angeben, die von der jeweils anderen Ursache offensichtlich nicht beeinflusst wird (z.B. ein Alptraum, ein Fluggeräusch...), und ermöglicht die oben aufgestellten einfachen Wahrscheinlichkeitsrechnungen. Andererseits kann man davon ausgehen, dass Schlafzustände, die zu einer spontanen AWR führen, auch zu einer höheren Wahrscheinlichkeit einer lärminduzierten AWR führen. Dann müsste ein Modell gefunden werden, das die Abhängigkeit der beiden Ereignisse A_{spont} und A_{induz} quantifiziert.

Man kann postulieren, dass das Aufwachen das Resultat eines mehrstufigen Prozesses ist, der verschiedene (neuronale) Verarbeitungsebenen durchläuft. Ein Fluggeräusch kann demnach eine Person in einen Zustand versetzen, der „näher“ beim Aufwachen liegt, also die Aufwachbereitschaft erhöht. Falls diese jedoch vorher bereits genügend hoch war, wird das Geräusch zu einer AWR führen. Diese Annahme kann erklären, warum ein und dieselbe Person beim gleichen Maximalpegel im einen Fall aufwacht, im anderen nicht. Gemäss dieser Sichtweise ist auch die in der Grösse P_{spont} ausgedrückte mittlere Aufwachneigung ohne Lärmereignisse kein statischer Zustand, sondern das Resultat eines dynamischen Prozesses der in jedem diskreten Schlafzeitpunkt eine unterschiedlich ausgeprägte (spontane) Aufwachbereitschaft produziert. In einem solchen Prozess beeinflussen externe und interne Ursachen (extero- und propriozeptive Afferenzen (z.B. Harndrang), schlafregulierende „pace-

maker“ im ZNS, Träume etc.) dauernd und direkt die Aufwachbereitschaft¹². Fluglärm ist hier nur eine von vielen extrinsischen Einflussgrößen. Unter diesem Aspekt kommt das Aufwachen durch ein Fluggeräusch lediglich durch eine durch das Geräusch kurzzeitig erhöhte, dem Wesen nach jedoch endogene und bereits auf einem gewissen Niveau sich befindende Aufwachbereitschaft zustande. Eine ursächliche Unterscheidung in *induziertes* Aufwachen und spontanes Aufwachen wäre damit überflüssig bzw. gar nicht möglich, denn während Fluggeräuschen (oder der Anwesenheit anderer externer Reizquellen) würde die Aufwachwahrscheinlichkeit, die durch den vorhin genannten „fluktuierenden“ Prozess zu Beginn des Zeitfensters bereits eine bestimmte, aber im Einzelfall unbekannte Ausprägung hat, lediglich erhöht. Diese Erhöhung bzw. die Differenz zur Aufwachneigung ohne Lärm wird durch P_{zusatz} ausgedrückt.

Dies entspricht dem Ansatz, den das DLR für die Entwicklung ihres Nachtschutzkonzeptes für den Flughafen Leipzig [27] verwendet hat. Angesichts der obigen Ausführungen darf konstatiert werden, dass sowohl der Entscheid zugunsten der zusätzlichen Aufwachwahrscheinlichkeit P_{zusatz} (gemäß obiger Definition) als Schutzkriterium, als auch deren Berechnung im Rahmen der DLR-Studie, entgegen der von verschiedenen Seiten geäußerten Kritik, korrekt und vor dem Hintergrund schlafphysiologischer Sachverhalte sinnvoll ist. Die Verwendung des Parameters P_{zusatz} kann im übrigen auch anhand der nachfolgenden Ausführungen gut begründet werden.

Verwendung von P_{induz} und P_{zusatz} unter Voraussetzung der Unabhängigkeit

Ausgehend von der angenommenen Unabhängigkeit der beiden Aufwach-Ursachen sind die im grundlegenden Gleichungssystem (Gl. 3a-3d) geschilderten Ereignisse (a) und (b) unstrittig, da hier die im Zeitfenster aufgetretene AWR eindeutig einer Ursache zugeordnet werden kann. Das Ereignis (c) hingegen ist tatsächlich am schwersten zu fassen: Es handelt sich hier um ein Zeitfenster, in dem eine spontane AWR aufgetreten wäre, wenn das Fluggeräusch nicht bereits zu einer AWR geführt hätte, bzw. in dem das Fluggeräusch eine AWR verursacht hätte, wenn die Person nicht bereits spontan aufgewacht wäre. Es stellt sich die Frage, welcher Ursache man die in Abb. 1a dargestellte Schnittmenge zwischen A_{induz} und A_{spont} zuschreiben soll. Hier existieren zwei alternative „Schuldzuweisungen“: Zum einen kann man die im Fall (c) auftretenden AWR dem Fluglärm zuschreiben, da diese ja auch dann durch den Fluglärm verursacht worden wären, wenn nicht gerade zufälligerweise eine spontane AWR aufgetreten wäre (Abb. 1a). Man kann diesen Fall jedoch genauso gut begründet nicht dem Fluglärm sondern den spontanen AWR zuschreiben, da diese sowieso noch innerhalb des Zeitfensters spontan aufgetreten wären und durch Reduktion bzw. Eliminierung des Fluglärms nicht hätten verhindert werden können (Abb. 1b).

Hierbei ist folgendes zu beachten: Zunächst handelt es sich bei Fall (c) um ein seltenes Ereignis, zumindest wenn der gewählte Indikator ausreichend spezifisch, d.h. P_{spont} gering ist. Des weiteren muss berücksichtigt werden, dass Zeitfenster von 60 bzw. 90 s Dauer (die bei ereigniskorrelierten Analysen üblich sind) relativ zur Gesamtnacht sehr kurz sind. In der

¹² Im aufsteigenden retikulären Aktivierungssystem (ARAS) werden ständig intrinsische und extrinsische Stimuli empfangen, verarbeitet und in neuronale Aktivierung, die im Schlaf regelmässig zu einer kortikalen Erregung und letztlich zum Erwachen führt, übersetzt [28].

DLR-Laborstudie (Zeitfenster 60 Sekunden oder 2 Epochen) wäre eine spontane AWR in Fall (c) also spätestens 30 Sekunden später, in der Feldstudie (Zeitfenster 90 Sekunden oder 3 Epochen) spätestens 60 Sekunden später aufgetreten, ganz abgesehen von den Fällen, in denen eine AWR spontan auftritt, noch bevor sie überhaupt durch den Fluglärm hervorgerufen werden kann. Im Fall (c) wäre also vom Homöostaten sowieso in nächster Zukunft eine AWR vorgesehen gewesen, weshalb es sinnvoll erscheint, die AWR im Fall (c) den spontanen AWR zuzuordnen. Ganz anders Fall (a): Hier verursacht der Fluglärm eine AWR, ohne dass diese spontan aufgetreten bzw. vom Homöostaten „geplant“ war. Es ist z.B. denkbar, dass sich die fluglärmexponierte Person am Anfang einer Tiefschlafphase befindet, und ein kurzes Erwachen im Rahmen der „checking activity“ erst eine halbe Stunde später vom Homöostaten vorgesehen ist. Dies verdeutlicht, dass die Fälle (a) und (c) aus schlafphysiologischer Sicht nicht vergleichbar sind, wobei der Fall (a), der vollständig mit P_{zusatz} erfasst wird, als die gravierendere Schlafstörung zu bezeichnen ist.

In 3.2.1 wird es als ein Vorteil von P_{induz} angesehen, AWR, die durch Fluglärm hervorgerufen werden können, unabhängig von der spontanen Aufwachtendenz abzubilden. Theoretisch mag das stimmen, in der Praxis korrelieren P_{spont} und P_{induz} jedoch positiv, d.h. es ist unwahrscheinlich, dass P_{spont} alleine und unabhängig von P_{induz} zunimmt. Das gilt sowohl für unterschiedliche Indikatoren (EEG-Arousal treten z.B. sowohl häufiger spontan als auch häufiger unter Fluglärm auf [29]) als auch innerhalb einer Person (Personen mit niedrigem Schlafdruck wachen sowohl spontan als auch unter Fluglärm mit einer höheren Wahrscheinlichkeit auf). Selbst wenn diese Abhängigkeiten nicht gegeben wären, darf P_{induz} trotzdem nie isoliert, sondern muss immer vor dem Hintergrund von P_{spont} betrachtet werden.

Verwendung von P_{induz} und P_{zusatz} bei Verzicht auf die Unabhängigkeitsvoraussetzung

Die im obigen Abschnitt geführte Diskussion ist nur dann von Bedeutung, wenn die Annahme unabhängiger Ursachen für spontanes und fluglärminduziertes Erwachen gültig ist. Wenn das Aufwachen in einem Zeitfenster nicht auf zwei unabhängige Prozesse, sondern auf einen einzigen Prozess zurückführbar ist, bei dem eine basale Aufwachbereitschaft durch Fluglärm kurzzeitig erhöht wird, ist einzig die Berechnung von P_{zusatz} sinnvoll, womit nur P_{zusatz} unter beiden Annahmen Gültigkeit besitzt. Nach Ansicht des DLR handelt es sich deshalb bei P_{zusatz} um die relevante Grösse der Lärmwirkungsforschung, insbesondere für die Entwicklung von Konzepten zum Schutz vor nächtlichem Fluglärm, denn nur die Aufwachreaktionen, die zusätzlich zu den spontanen Aufwachreaktionen durch den Fluglärm hervorgerufen werden, können durch Massnahmen der Lärmreduktion überhaupt beeinflusst werden [1].

Anhand der obigen Darstellungen wird deutlich, dass insbesondere bei Annahme nur eines einzigen massgeblichen Prozesses, der zum Aufwachen führt, für die Kennzeichnung der durch Fluglärm erhöhten Aufwachwahrscheinlichkeit grundsätzlich das Attribut „zusatz“ bzw. „zusätzlich“ verwendet werden sollte, da bei einem Verzicht auf die Annahme der Unabhängigkeit die durch die Verwendung des Terminus „induziert“ implizierte Differenzierung von AWR nach Ursachenkategorien nicht gerechtfertigt ist. Ebenso ist natürlich unter dieser Annahme auch die durch das Gleichungssystem 3a-3d mögliche Berechnung von P_{induz} bzw. dessen Verwendung in einem Schutzkonzept nicht unbedingt zweckmässig.

3.2.2 Berechnungsansatz von Maschke/Neumüller

Im Ansatz von Maschke und Neumüller¹³ wird die Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis ‚Aufwecken durch ein Fluggeräusch‘ eintritt, gleichzeitig aber das Ereignis ‚spontanes Aufwachen‘ nicht eintritt, mit $P_{\text{fluglärminduziert}}$ bezeichnet. Dies ist nach der Definition in Kap. 3.1 identisch mit der Wahrscheinlichkeit P_{zusatz} , für welche Maschke und Neumüller folgende Formel vorschlagen:

$$P_{\text{zusatz}} = P_{\text{beob}} - (P_{\text{spont}} \cdot P_{\text{beob}}) \quad (9)$$

Wir kommen aufgrund folgender Überlegungen zur Überzeugung, dass diese Formel falsch ist:

- (1) Der Term $(P_{\text{spont}} \cdot P_{\text{beob}})$ in Gl. 9 drückt die Verbundwahrscheinlichkeit des Stattfindens einer spontanen UND einer beobachteten AWR (im selben Zeitfenster) aus. Voraussetzung für die verwendete Berechnung dieser Verbundwahrscheinlichkeit ist, dass die beteiligten Ereignisse „spontanes Aufwachen“ und „beobachtetes Aufwachen“ unabhängig voneinander eintreten können müssen (vgl. Fussnote 11). Da alle spontanen AWR in der Menge der beobachteten AWR enthalten sind ($A_{\text{spont}} \subset A_{\text{beob}}$), ist diese Voraussetzung nicht erfüllt.
- (2) Im Falle der *kompletten Abwesenheit* eines (im aktuellen Kontext relevanten) Lärmereignisses (z.B. in virtuellen Lärmfenstern) muss sowohl die induzierte als auch die zusätzliche Aufwachwahrscheinlichkeit zwingend den Wert 0 annehmen. P_{beob} ist dann identisch mit P_{spont} , weil man in einem solchen Fall ja nur die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit beobachten kann. Mit Gl. 9 wird, wenn P_{beob} und P_{spont} denselben Wert annehmen, dennoch eine „zusätzliche“ Aufwachwahrscheinlichkeit ermittelt, die grösser als 0 ist, was der Logik widerspricht.

3.3 Vergleich der Dosis-Wirkungskurven

Die Dosis-Wirkungskurven der Grössen P_{induz} und P_{zusatz} weichen, abgänglich von der Schalldosis, mehr oder weniger voneinander ab, was in Abb. 2 illustriert wird. Die drei verschiedenen Aufwachwahrscheinlichkeitskurven in Abb. 2 wurden entsprechend Gl. 2, 7 und 9 aufgrund von willkürlich festgelegten Grössen P_{beob} und P_{spont} berechnet. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass eine Reaktion bereits ab einer Dosis von >0 feststellbar sei und dass die Zunahme von P_{beob} linear ist. Unabhängig von der Schalldosis ist nur die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit P_{spont} , die hier mit 0.2 angenommen und über den ganzen Dosis-Bereich natürlich konstant ist. P_{beob} kann nicht kleiner als P_{spont} sein und ist mit P_{spont} identisch, wenn die Dosis = 0 ist.

¹³ Maschke, C. & Neumüller, M. (3. März 2006): Kritik am Schutzniveau des DLR Nachtschutzkonzepts (Anlage K7 in der Stellungnahme mit Bezeichnung 3366/04LE62 der Nickel Rechtsanwälte, Ulanenplatz 12, 63452 Hanau, vom 18.10.2006 ans Bundesverwaltungsgericht Leipzig, in der Verwaltungsstreitsache Bibikow/Felsberg/Felsberg/Schilling/Schilling gegen Freistaat Sachsen, Aktenzeichen BVerwG 4 A 2001.06)

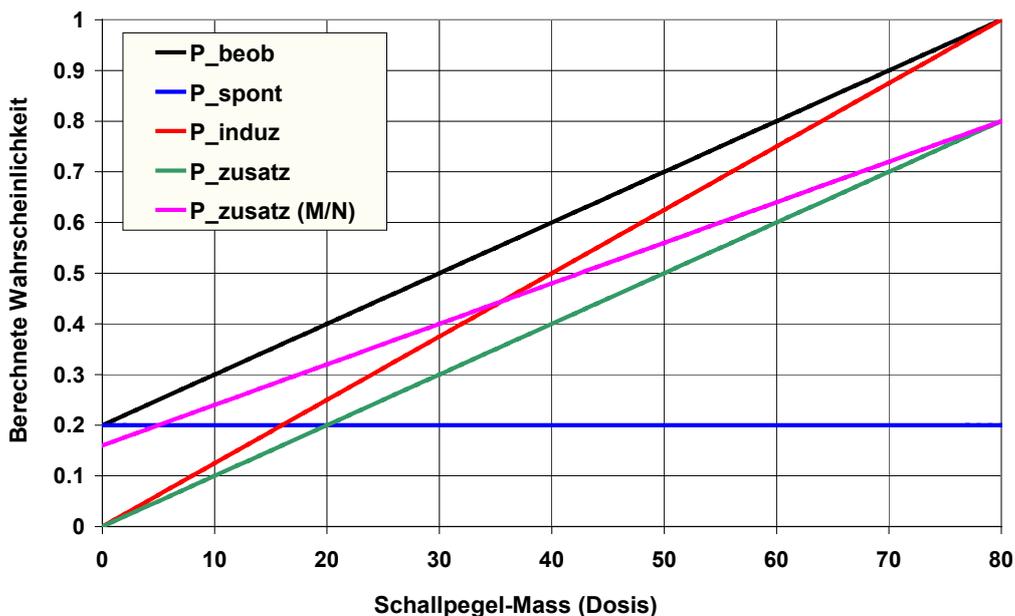


Abb. 2: Schematische Gegenüberstellung der verschiedenen Dosis-Wirkungskurven (Die „Dosis“ ist hier als kontinuierliche Grösse, beginnend mit 0 dargestellt, es handelt sich nicht um eine dB-Skala)

Mit zunehmender Dosis steigt P_{beob} kontinuierlich an. Bei einer Dosis von 0 sind P_{induz} und P_{zusatz} beide 0. P_{zusatz} verläuft danach parallel zu P_{beob} und ist bei jeder Dosis um den Betrag von P_{spont} geringer als P_{beob} . Der Anteil von Reaktionen, bei denen sowohl spontane als auch induzierte Ursachen in Frage kommen („Fall c“ in Gl. 3c) steigt mit zunehmender Dosis an. Weil dieser Anteil von Reaktionen in P_{induz} enthalten ist, ist auch die Steigung von P_{induz} steiler als die Steigung von P_{zusatz} . Bei sehr hohen Pegeln wird P_{beob} irgendwann 1, P_{induz} tendiert dann zwingend ebenfalls gegen 1, aber P_{zusatz} kann die Wahrscheinlichkeit 1 nie erreichen. Im Berechnungsansatz von Maschke/Neumüller gemäss Gl. 9 ($P_{\text{zusatz (M/N)}}$) wird bereits eine Wahrscheinlichkeit für zusätzliches Aufwachen ermittelt, wenn die Dosis 0 ist und nur spontane Ursachen für eine AWR in Frage kommen. Eine Ursache-Wirkungs-Beziehung, die auch bei kompletter Abwesenheit der Ursache eine Wirkung >0 ergibt, scheint hier dem Gegenstand nicht angemessen.

3.4 Einfluss der Dauer des Zeitfensters auf die berechneten Wahrscheinlichkeiten

Eine nicht unwesentliche Eigenschaft der im Kap. 3.2 hergeleiteten bzw. diskutierten Grössen ist es, dass sie hinsichtlich der Voraussage der Aufwachwahrscheinlichkeit – zumindest theoretisch – eine jeweils andere Abhängigkeit von der Länge des zugrundeliegenden Zeitfensters aufweisen. Diese Tatsache rückt auch die Bedeutung von Zeitfenster-Längen im Kontext der Berechnung von Aufwachwahrscheinlichkeiten ins Blickfeld. Deshalb wird dieses Thema hier etwas ausführlicher diskutiert.

Da man zwecks der Vergleichbarkeit mit lärminduzierten AWR die Auftretenswahrscheinlichkeit von spontanen AWR durch Ermittlung der relativen Häufigkeit von *binären* Entscheiden (aufgewacht/nicht aufgewacht) in Zeitfenstern ohne Lärm (also in „virtuellen Lärmfenstern“)

definiert und nicht als relative Häufigkeit von AWR in grösseren Zeitabschnitten (z.B. einer Nacht), ist die ermittelte spontane Aufwachwahrscheinlichkeit wesentlich davon abhängig, wie lange das zugrundeliegende Zeitfenster ist. In langen Zeitfenstern können durchaus mehrere spontane AWR auftreten, zumindest ist dies der Fall, wenn das Zeitfenster so viele Epochen umfasst, dass darin mehrmals spontan aufgewacht werden kann. Die tatsächliche Anzahl diskreter („zählbarer“) AWR wird aber durch eine binäre Entscheidung, ob im Zeitfenster aufgewacht wurde oder nicht, nicht berücksichtigt. Somit drückt die Auftretenswahrscheinlichkeit einer spontanen AWR in einem beliebig langen Zeitfenster grundsätzlich aus, wie gross die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit *mindestens* ist. Dies gilt es bei den folgenden Ausführungen zu berücksichtigen.

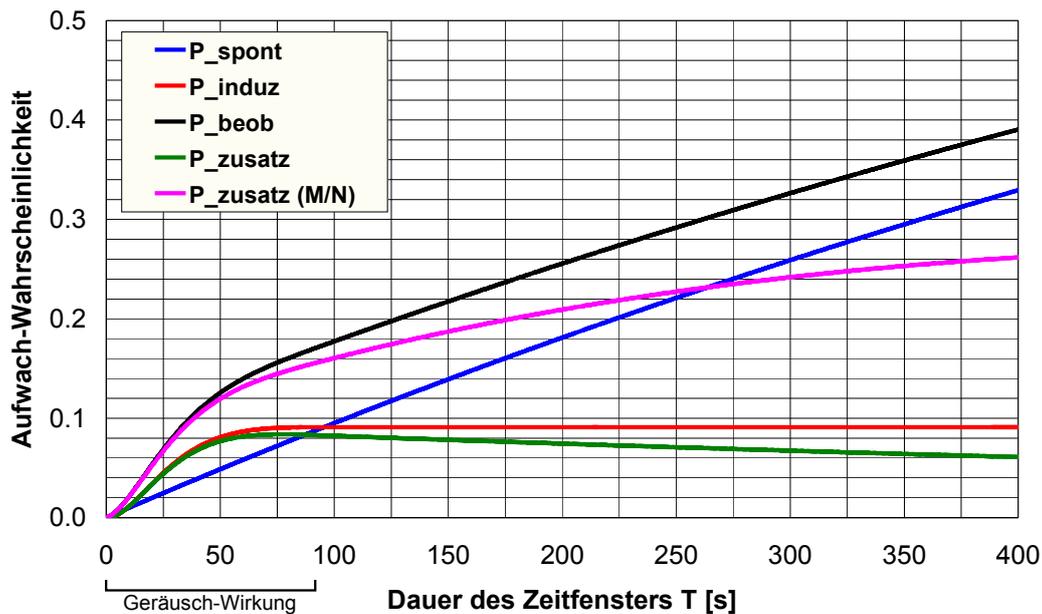


Abb. 3: Abhängigkeit der anhand der verschiedenen Berechnungsansätze ermittelten Wahrscheinlichkeiten für mindestens eine AWR von der Länge des Zeitfensters (weitere Erläuterungen im Text)

Abb. 3 zeigt die aus den diskutierten Berechnungsmethoden resultierende Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der gewählten Länge des zugrundeliegenden Zeitfensters, unter Annahme der Unabhängigkeit der beiden Ursachen. Es wird hier beispielhaft davon ausgegangen, dass zu Beginn des Zeitfensters ein Fluggeräusch stattfindet, welches insgesamt während 90 Sekunden als Ursache für eine AWR in Frage kommt (und danach keine Wirkung mehr zeigt). Die Graphik illustriert den Zusammenhang zwischen Aufwachwahrscheinlichkeit und der Länge des Zeitfensters mit der in der DLR-Feldstudie ermittelten spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit von 0.086 und einer induzierten Aufwachwahrscheinlichkeit von 0.096 bei $L_{\max}=70$ dB(A) in einem 90-sekündigen Zeitfenster. Angaben zu dieser Modellierung folgen im nächsten Abschnitt.

Modellierung der spontanen und induzierten Aufwachwahrscheinlichkeit. Zwecks detaillierter Modellierung der spontanen und induzierten Aufwachwahrscheinlichkeit in einem Zeitfenster beliebiger Länge wurde der Verlauf dieser Wahrscheinlichkeiten in einem Zeitraum von Sekunde zu Sekunde [T] anhand des bereits erwähnten Beispiels aus der DLR-Feldstudie neu berechnet. Dies geschah folgendermassen: Zunächst wurde die Wahrschein-

lichkeit für eine spontane AWR *pro Sekunde* bestimmt. Da in der DLR-Feldstudie in 90-sekündigen virtuellen Zeitfenstern im Mittel 0.086 spontane AWR¹⁴ gezählt werden, beträgt diese Wahrscheinlichkeit für spontane AWR pro Sekunde $1-(1-0.086)^{1/90}$ (Diese Berechnung leitet sich aus der Verbundwahrscheinlichkeit dafür ab, in jeder einzelnen Sekunde T nicht zu erwachen). Da sich diese Zahl auf das spontane Aufwachen aus dem Schlafzustand heraus bezieht, ist zunächst für jede fortlaufende Sekunde im Zeitfenster die Wahrscheinlichkeit, noch nie (im Zeitfenster) spontan aufgewacht zu sein, zu bestimmen. Hierbei wird vorausgesetzt, dass der Proband zum Zeitpunkt T=0 schläft. Die Wahrscheinlichkeit, zum Zeitpunkt T noch nie spontan aufgewacht zu sein ergibt sich als Verbundwahrscheinlichkeit, bis zum Zeitpunkt T-1 noch nie spontan aufgewacht zu sein und auch zum Zeitpunkt T nicht spontan erwacht zu sein. Die Wahrscheinlichkeit, mindestens eine spontane Aufwachreaktion in einem Zeitfenster der Länge T beobachtet zu haben (P_{spont}), ergibt sich dann als 1 minus der Wahrscheinlichkeit, zum Zeitpunkt T noch nie spontan aufgewacht zu sein. Die *Steigung* von P_{spont} nimmt von Sekunde zu Sekunde ab, als Folge der zunehmenden Wahrscheinlichkeit, zum Zeitpunkt T schon einmal erwacht zu sein. Dieser Effekt lässt sich auch folgendermaßen erklären: Die Wahrscheinlichkeit für erstmaliges spontanes Aufwachen in einer Sekunde T ist die Wahrscheinlichkeit, zu erwachen, unter der Bedingung, dass man am Anfang der Sekunde T noch nicht aufgewacht ist. Da die Wahrscheinlichkeit dieser Bedingung abnimmt, nimmt auch die „unbedingte“ Wahrscheinlichkeit des (erstmaligen) Erwachens in Sekunde T ab, und diese bildet die Zunahme der abgebildeten Wahrscheinlichkeit, bis spätestens nach der Sekunde T erwacht zu sein. Mit anderen Worten: Die Zunahme der Wahrscheinlichkeit (Steigung), schon *mindestens eine AWR im Zeitfenster beobachtet zu haben* nimmt von Sekunde zu Sekunde ab, während die Wahrscheinlichkeit selber absolut gesehen natürlich zunimmt (deutlicher sichtbar wird dies in Abb. 4).

P_{induz} wird mit dem gleichen Ansatz modelliert, wie P_{spont} . Der Unterschied besteht darin, dass die Wahrscheinlichkeit für eine induzierte AWR pro Sekunde über die Zeit nicht konstant bleibt, sondern während des Fluggeräusches ansteigt und dann wieder auf Null absinkt. Modelliert wurde ein Fluggeräusch von 90 Sekunden Dauer (bzw. genauer: mit einer 90-sekündigen Wirkung) und einer induzierten Aufwachwahrscheinlichkeit von 0.095. Die Wahrscheinlichkeit in der Sekunde T steigt zunächst recht steil an, erreicht nach 17 Sekunden das Maximum und fällt nach 90 Sekunden wieder auf 0 zurück. Der genaue Verlauf dieser Funktion hat nur minimalen Einfluss auf das Ergebnis, es wird deshalb an dieser Stelle auf eine ausführliche Beschreibung verzichtet [Detailangaben können bei den Autoren angefordert werden].

Diskussion des Wahrscheinlichkeits-Verlaufs. Die Wahrscheinlichkeit in einem Zeitfenster mindestens eine AWR zu beobachten (P_{beob} ; schwarze Kurve) steigt in den ersten 90 Sekunden zunächst steiler an, als die entsprechende Kurve für P_{spont} (blau). Die zusätzliche Steigung in P_{beob} , die durch das Geräusch erzeugt wird, fällt nach 90 Sekunden weg, nachdem das Geräusch keine Wirkung auf die Aufwachwahrscheinlichkeit mehr hat, und P_{beob} steigt nun weniger steil als P_{spont} an. Dies folgt zwingend, weil beide Kurven asymptotisch zur

¹⁴ Die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit wird vom DLR anhand der relativen Häufigkeit des spontanen Erwachens in virtuellen Lärmfenstern ermittelt, bei denen die Probanden zu Beginn des Lärmfensters schlafen (virtuelle Lärmfenster, in denen die Probanden in der Epoche die der ersten Epoche im Lärmfenster vorgeht, im Wachzustand sind, werden nicht berücksichtigt).

Wahrscheinlichkeit 1 gelangen und sich daher annähern müssen. Weil nach 90 Sekunden das Geräusch keine Wirkung mehr hat, muss P_{induz} auch bei grösseren Zeitfenstern konstant bleiben. Für P_{zusatz} ist dies nicht der Fall: P_{zusatz} nimmt mit zunehmender Länge des Zeitfensters wieder ab, weil beobachtete und spontane Aufwachwahrscheinlichkeit einander annähern (und deren Differenz zueinander folglich immer kleiner wird). Das Verhalten der Kurven bei grösseren Zeitfenstern ist in Abb. 4 wiedergegeben.

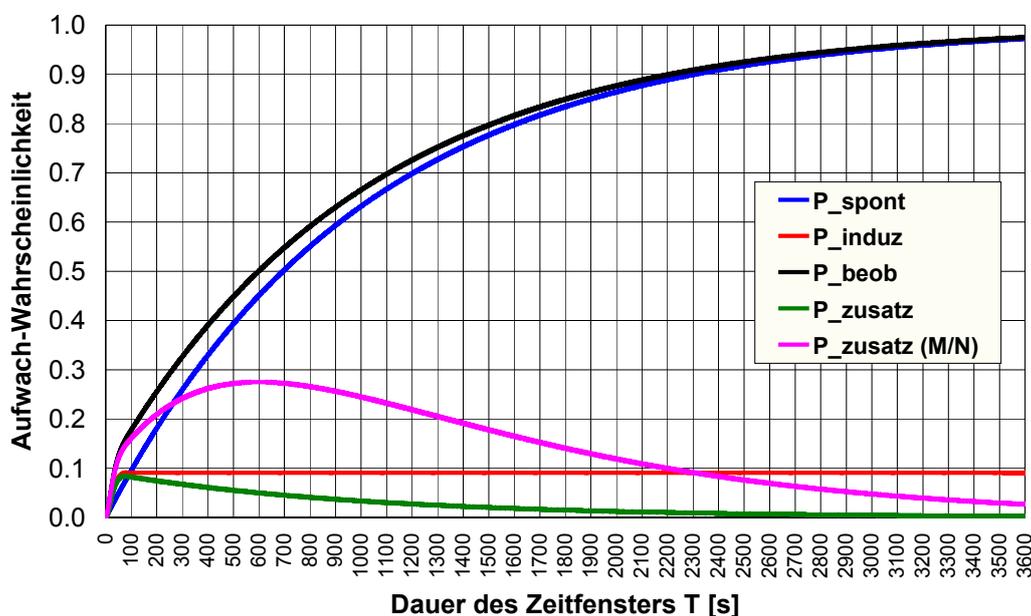


Abb. 4: Abhängigkeit der anhand der verschiedenen Berechnungsansätze ermittelten Wahrscheinlichkeiten für mindestens eine AWR von der Länge des Zeitfensters für Zeitfenster bis zu einer Stunde Dauer (weitere Erläuterungen im Text)

Abb. 3 und 4 zeigen keine empirischen Daten, sondern die anhand der Modellierung von P_{spont} und P_{induz} und der Berechnungsformalismen in Gl. 2, 7 und 9 am Beispiel der DLR-Feldstudienenergebnisse bei einem L_{max} von 70 dB(A) und 0.086 spontanen AWR pro Zeitfenster theoretisch erwarteten Kurvenverläufe. Die grundsätzliche Form dieser Kurven ergibt sich aus der mathematischen Beziehung, die diese zueinander haben, ändert sich also nicht, wenn man für spontane und induzierte Aufwachwahrscheinlichkeit andere Werte annimmt.

Fazit. Es wird deutlich, dass die ermittelten Wahrscheinlichkeiten für mindestens eine AWR grundsätzlich von der Länge des Zeitfensters abhängig sind und demgemäss Zeitfensterlängen nicht arbiträr festgelegt werden können, sondern eine entsprechende Wahl theoretisch begründet bzw. empirisch ermittelt werden muss. In der Praxis wird die Dauer des Zeitfensters (bzw. die Anzahl der EEG-Epochen) sinnvollerweise v.a. dann nicht willkürlich festgelegt, sondern empirisch ermittelt, wenn die zusätzliche Aufwachwahrscheinlichkeit (P_{zusatz}) bestimmt werden soll. Die induzierte Aufwachwahrscheinlichkeit (P_{induz}) ist unabhängig von der Länge des Zeitfensters und bleibt konstant, sobald das Zeitfenster länger ist, als die Zeitdauer, in welcher ein Lärmereignis eine Wirkung ausüben kann. Dieses Verhalten von P_{induz} folgt zwingend und direkt aus dessen Definition (Gl. 7). P_{induz} steht gewissermassen „erschöpfend“ für Fluggeräusche als Aufwachursache ungeachtet der Grösse von P_{spont} (vgl. Abb. 1). Hat ein entsprechendes Lärmereignis keine Wirkung mehr – man könnte auch von einem Wegfallen der „Ursache“ sprechen – (in Abb. 3 und 4 nach 90 Sekunden) muss diese

Aufwachwahrscheinlichkeit einerseits „maximiert“ worden sein und kann andererseits auch nicht mehr abfallen, da P_{induz} gleichzeitig von P_{spont} unabhängig ist. Da mit zunehmender Zeitfenster-Dauer auch die Wahrscheinlichkeit, eine spontane AWR beobachtet zu haben zunimmt, muss hingegen die zusätzliche Wahrscheinlichkeit P_{zusatz} nach Erreichen des Maximums mit grösser werdendem Zeitfenster genauso zwingend geringer werden. Die Aufwachwahrscheinlichkeits-Funktion nach Gl. 9 ($P_{\text{zusatz}(M/N)}$) hat ihr Maximum lange nachdem das Lärmereignis gar keine Wirkung mehr ausüben kann, was zum einen die Folge der falschen Wahrscheinlichkeitsrechnung ist und zum anderen auch der empirischen Erfahrung widerspricht.

P_{zusatz} wird auch bei der Analyse empirischer („echter“) Daten bei einer bestimmten Zeitfenster-Länge maximal, steigt davor an und fällt danach wieder ab. Dieser, in der Realität ange-troffene Verlauf entspricht also demjenigen, der auch theoretisch abgeleitet wurde (P_{zusatz} in Abb. 3 & 4). Soll P_{zusatz} berechnet werden, wird die Zeitfenster-Länge deshalb optimalerweise solange variiert, bis die Aufwachwahrscheinlichkeit unter Lärmeinfluss maximal ist¹⁵. In der DLR-Feldstudie hat sich hierfür die Zahl von 3 Epochen (90 Sekunden) ergeben. Die Be-rechnung von P_{induz} gestaltet sich als weniger kritisch: Solange die Zeitdauer, in welcher ein Geräusch wirken kann innerhalb des Zeitfensters abgedeckt ist, darf das Zeitfenster im Prin-zip beliebig lang sein, jedoch nicht länger als der kürzeste Geräuschabstand.

Die minimale Dauer eines Zeitfensters sollte sich danach bemessen, wie lange ein Lär-merereignis auf die Aufwachrate einwirken kann. Idealerweise sollte es auch höchstens so lange dauern, dass sich in diesem Zeitraum keine oder nur eine spontane AWR ereignen kann. Im Fall von zusätzlichen AWR, definiert nach [6], ergibt sich dieses Problem bei Zeit-fenstern ab einer Länge von drei Epochen (90 Sekunden), denn hier ist es möglich, aufzu-wachen (1. Epoche im Zeitfenster), wieder einzuschlafen (2. Epoche im Zeitfenster) und nochmals aufzuwachen (3. Epoche im Zeitfenster).

Alle diese Überlegungen gehen davon aus, dass AWR unabhängig voneinander erfolgen. Zunächst ist dagegen einzuwenden, dass die Aufwachwahrscheinlichkeit für spontanes oder induziertes Aufwachen kurz nach einer AWR durch diese mit Sicherheit beeinflusst wird: zu-nächst wird, abhängig vom Schlafdruck, der Schläfer nach der AWR „versuchen“, wieder ein tieferes Schlafstadium zu erreichen (was die Aufwachwahrscheinlichkeit vermindert), der Schläfer ist jedoch unmittelbar nach der AWR zunächst vielleicht noch in einem flacheren Stadium (welches mit einer höheren Aufwachwahrscheinlichkeit einhergeht). Mit Hilfe eines Markov-Modells (Kap. 4.2) ist es möglich, solche Abhängigkeiten in die Analyse miteinzube-ziehen. Für die oben berechneten Wahrscheinlichkeiten ist aber nur das erstmalige Aufwa-chen wichtig. Man braucht also nur die Annahme, dass die Wahrscheinlichkeiten, in einer bestimmten Sekunde T aufzuwachen, bedingt darauf, vorher noch nie aufgewacht zu sein, über die Zeit T konstant ist.

¹⁵ Dies entspricht einem konservativen Ansatz im Sinne der zu schützenden Bevölkerung.

4. Abhängigkeit/Unabhängigkeit einzelner Aufwachreaktionen untereinander und Konsequenzen für die Anwendung von Dosis-Wirkungsfunktionen in der Praxis

Praktischerweise wird bei der Ermittlung und der Anwendung einer Dosis-Wirkungsfunktion zwischen L_{\max} (oder einer anderen akustischen Grösse) und Aufwachwahrscheinlichkeit zunächst davon ausgegangen, dass die beobachteten Reaktionen auf Geräusche voneinander unabhängig sind, d.h. dass bei jedem (erneuten) Fluggeräusch bei gegebenem L_{\max} eine AWR grundsätzlich mit gleicher Wahrscheinlichkeit eintritt. Dies entspricht weder der empirischen Erfahrung noch erscheint diese Voraussetzung aus neurophysiologischer Sicht plausibel. Es wäre sowohl von wissenschaftlichem Interesse, die entsprechenden Abhängigkeiten modellieren zu können, als auch überhaupt eine Anforderung an ein universell¹⁶ anwendbares Prognosemodell für fluglärminduzierte Nachtschlafstörungen. Im Folgenden wird zunächst das Problem der gegenseitigen Abhängigkeit von Reaktionen auf Lärmereignisse erörtert und danach eine Möglichkeit aufgezeigt, wie diese Abhängigkeiten im Rahmen einer Störungsprognose berücksichtigt werden können.

4.1 Abhängigkeit/Unabhängigkeit einzelner Aufwachreaktionen untereinander: Neurophysiologische Funktionsprinzipien

Realistischerweise muss davon ausgegangen werden, dass jegliche zentralnervöse Reaktion auf ein nächtliches Lärmereignis nicht unabhängig von vorangehenden Reaktionen vonstatten gehen kann. Die komplexen Vorgänge der zentralnervösen auditorischen Verarbeitung beinhalten neben vielen anderen spezifischen Abläufen beispielsweise das Prinzip der *heterosynaptischen Bahnung*. Darunter ist zu verstehen, dass einzelne neuronale Elemente infolge Konvergenz-Divergenz-Verschaltung in den verschiedenen zentralnervösen Verarbeitungsebenen Aktivierungen durch zusätzliche Eingänge erfahren und so nach einer reizausgelösten Erregung erhöhte Erregbarkeit (Faktor 3-4) aufweisen. Diese kann bis zu 30 Minuten nach einem akustischen Reiz anhand vergrößerter exzitatorischer postsynaptischer Potentiale (EPSP) nachgewiesen werden. Zudem findet sich das Verarbeitungsprinzip der *posttetanischen Potenzierung*. Darunter versteht man eine langandauernde Verstärkung der synaptischen Übertragung. Sie beruht darauf, dass durch eine kurzfristige Mehrfachaktivierung (durch eine dichte Aktionspotentialfolge) eines Neurons an dessen präsynaptischer Endigung ebenfalls eine länger bleibende gesteigerte Erregbarkeit (Faktor 3-4) hervorgerufen wird. Hier sind immerhin noch Nachwirkdauern von ca. 5 Minuten feststellbar [30]. Das EEG, welches als elektrische Aktivität kortikaler Strukturen auch die als verschiedene Schlafstadien definierten Signalzusammensetzungen aufweist, wird durch derartige Funktionsprinzipien im Bereich unterhalb kortikaler Strukturen selbstverständlich entscheidend beeinflusst. Es ist also mit grosser Sicherheit mit einer durch die subkortikale Verarbeitung bedingten Beein-

¹⁶ *Universelle Anwendbarkeit* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein Prognosemodell in der Lage ist, alle denkbaren Eigenschaften eines konkreten nächtlichen Flugbetriebsszenarios zu berücksichtigen und damit am ehesten zu validen Prognosen kommt. Relevante Eigenschaften von Flugbetriebsszenarios sind z.B. die zeitliche Dichte einzelner Überflüge und deren Variabilität sowie die Häufigkeit von Flugbewegungen in Abhängigkeit der Nacht-Zeit.

flussung der durch Lärmereignisse ausgelösten EEG-Signaländerungen (z.B. AWR) untereinander zu rechnen, wenn diese im Zeitbereich bis zu 30 Minuten aufeinander folgen. Vor allem dann, wenn Lärmereignisse mit hohem Maximalpegel und insbesondere ausgeprägter Anstiegsdynamik infolge des peripheren Proportional-Differential-Verhaltens der Sinneszellen hohe Erregungen in Form besonders dichter Aktionspotentialfolgen generieren und breit divergierend die auditorischen Verarbeitungsbereiche aktivieren. Es lässt sich daraus folgern, dass ein Fluggeräusch E_i , auch wenn es nicht zu einer beobachteten AWR führt, die „Vulnerabilität“ für Aufwachen beim nächsten Ereignis E_{i+1} erhöhen kann, z.B. indem von einem tieferen in ein flacheres Schlafstadium gewechselt wird (S4 nach S3, S3 nach S2, S4 nach S2).

Nach diesen Ausführungen ist eine Unabhängigkeit der spontanen AWR von den durch Überflüge ausgelösten induzierten bzw. zusätzlichen AWR ebenfalls nicht zu erwarten. Allerdings kann man für spontane AWR zweierlei postulieren:

- a) Die Erregungssteigerungen durch induzierte AWR bewirken Disinhibitions- bzw. Bahnungsvorgänge, durch welche auch die spontanen AWR in ihrer Häufigkeit zunehmen, so dass P_{spont} gesteigert erscheint.
- b) Falls die spontanen AWR funktionelle, schlafregulatorische Bedeutung haben, dann könnten induzierte AWR bis zu einem gewissen Grad deren nächtlich „nötige“ Anzahl ersetzend reduzieren und so P_{spont} vermindern. Eine wesentliche Frage bei der Ableitung von Nachtschutzkriterien und der Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit besteht also darin, ob durch ein lärmbedingtes Aufwachen das Spontanaufwachen reduziert wird und damit die Gesamtzahl des physiologischen Aufwachens im EEG sich auch unter Lärmeinwirkung nicht wesentlich ändert.

4.2 Einschränkungen der Anwendbarkeit von Dosis-Wirkungsfunktionen für Prognosezwecke

Aus den genannten Punkten ergeben sich die grundsätzlichen Schwierigkeiten der Anwendung einer Dosis-Wirkungsfunktion für Aufwachwahrscheinlichkeit für Prognosezwecke. Stark verallgemeinernd, lassen sich die Unsicherheiten einer Aufwachprognose darauf zurückführen, dass man es sowohl bei der *Erhebung* des fluglärminduzierten bzw. zusätzlichen Erwachens, als auch bei der prognostischen *Anwendung* einer Dosis-Wirkungsfunktion auf Einzelereignisse mit bedingten statt mit – mathematisch wesentlich einfacher handhabbaren – unbedingten Wahrscheinlichkeiten zu tun hat.

Zunächst muss bei der Erhebung von relativen Aufwach-Häufigkeiten in Lärmwirkungsstudien davon ausgegangen werden, dass Reaktionen der Probanden auf Geräusche nicht unabhängig voneinander erfolgen. Die ermittelten Häufigkeiten sind vom zeitlichen Muster der Fluggeräusche in einer Nacht abhängig, d.h. durch den in der Erhebungssituation vorherrschenden Flugbetrieb (ob real oder im Labor simuliert) konfundiert. Wird zudem die Wahrscheinlichkeit spontaner AWR anhand lärmfreier Zeitintervalle in Nächten mit Fluglärm bestimmt, dann kann sie durch Nachwirkungen von Lärmereignissen verfälscht sein.

Auch wenn eine Dosis-Wirkungsfunktion unter „optimalen“ Bedingungen (d.h. die beobachteten AWR waren tatsächlich voneinander unabhängig) erhoben wurde, ergibt sich ein Pro-

blem bei der Übertragung einer so ermittelten Dosis-Wirkungsfunktion auf Situationen, in denen aufgrund des nächtlichen Flugbetriebs (z.B. viele Geräusche in kurzen Intervallen) nicht angenommen werden darf, dass auf jedes Geräusch unabhängig von den vorhergehenden Geräuschen reagiert wird. Die meisten Flughäfen kennen zudem ein mehr oder minder ausgeprägtes Nachtflugverbot, Flugbewegungen sind dort v.a. zu Beginn und am Ende der Nacht potentiell schlafbeeinträchtigend. Auch an Flughäfen mit nächtlichem Frachtverkehr existieren verkehrsreiche (An- und Abflug) und verkehrsarme (Umladen der Fracht) Zeiten. Ein vielseitig einsetzbares Prognosemodell müsste also auch den schlafzeitbezogenen Zeitpunkt sowie die zeitlichen Abstände zwischen Geräuschen berücksichtigen. Damit verbunden ist die Notwendigkeit, die Abhängigkeiten einzelner Reaktionen untereinander zu modellieren.

Für die Bewertung unterschiedlicher bestehender oder geplanter Flugbetriebsszenarien möchte man in der Regel die durch den entsprechenden Flugbetrieb verursachte Störung (i.d.R. einer statistisch „mittleren“ Person¹⁷) bezogen auf ein bestimmtes Zeitintervall (z.B. eine Nacht) prognostizieren. Hierbei bietet sich zunächst an, die mittlere Anzahl fluglärminduzierter AWR (in diesem Zeitintervall) oder alternativ die Wahrscheinlichkeit mindestens einer fluglärminduzierten AWR (in diesem Zeitintervall) zu berechnen. Je nach zeitlicher Struktur bzw. zeitlicher Verteilung der massgeblichen Fluggeräusche innerhalb des interessierenden Zeitintervalls dürfte man aber wegen der anzunehmenden gegenseitigen Abhängigkeit der Reaktionen auf einzelne Geräusche ein jeweils anderes Resultat erhalten. Das Problem lässt sich folgendermassen illustrieren: Gegeben sei ein Ausschnitt aus einer x-beliebigen Nacht an einem x-beliebigen Immissionsort. In diesem Ausschnitt sind Auftretenszeitpunkt und Maximalpegel von Flugzeuggeräuschen bekannt. In Abb. 5 ist beispielhaft das Auftreten von Fluggeräuschen i mit $L_{max,i}$ und $i=1...12$ im Zeitverlauf durch einen vertikalen Balken dargestellt.

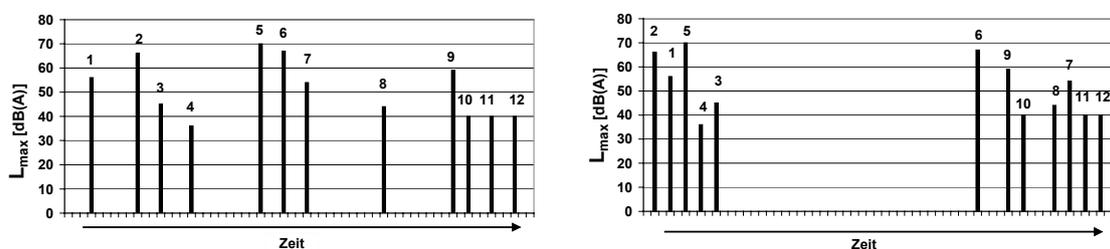


Abb. 5: Mögliche zeitliche Verteilungen von 12 Fluggeräuschen i mit bekanntem L_{max}

Die Aufwachwahrscheinlichkeit bei jedem Fluggeräusch i lässt sich anhand einer Funktion $P_{zusatz}(L_{max,i})$ bzw. $P_{induz}(L_{max,i})$ beschreiben (Dosis-Wirkungsfunktion). Unter der Annahme,

¹⁷ Die in einer bestimmten Population angetroffene mittlere Empfindlichkeit, durch Fluggeräusche geweckt zu werden, kann zum einen variieren, zum anderen ist es natürlich immer möglich, für ein Nachtschutzkonzept die zu schützende Personengruppe je nach „Strenge“ des intendierten Schutzes zu spezifizieren. Für unterschiedlich empfindliche Personen gelten empirisch nachweisbar unterschiedliche Dosis-Wirkungsbeziehungen. Die Implikationen dieser Tatsache sind bei der Erstellung einer Wirkungsprognose natürlich zu berücksichtigen, können aber an dieser Stelle nicht ausführlich diskutiert werden. Die weiteren Ausführungen in diesem Bericht beziehen sich der Einfachheit halber auf Prognosen für eine statistisch „mittlere“ Person zumal die formal massgeblichen Problemstellungen (um die es hier geht) und deren mögliche Lösungen genereller Art sind.

dass die Aufwachwahrscheinlichkeiten nur L_{\max} -spezifisch sind, d.h. die Reaktionen auf die einzelnen Geräusche voneinander unabhängig sind, beträgt die mittlere Anzahl durch Fluggeräusche ausgelöster AWR in diesem Zeitfenster:

$$N_{\text{zusatz}} = \sum_{i=1}^{12} P_{\text{zusatz}}(L_{\max,i}) \quad (10a)$$

bzw.

$$N_{\text{induz}} = \sum_{i=1}^{12} P_{\text{induz}}(L_{\max,i}) \quad (10b)$$

Die Wahrscheinlichkeit mindestens einer durch Fluggeräusche ausgelösten AWR errechnet sich in diesem Fall als:

$$P_{\text{zusatz}} = 1 - \prod_{i=1}^{12} (1 - P_{\text{zusatz}}(L_{\max,i})) \quad (11a)$$

bzw.

$$P_{\text{induz}} = 1 - \prod_{i=1}^{12} (1 - P_{\text{induz}}(L_{\max,i})) \quad (11b)$$

Mittlere Anzahl (N) von und Wahrscheinlichkeit (P) für Ereignisse sind grundsätzlich gleichwertige Beschreibungsgrößen der Lärmwirkung. Je nach zeitlicher Struktur der Geräuschmissionen sind unterschiedliche weitere Einflüsse denkbar, die sich zum einen aus der unterschiedlichen verstrichenen Schlafzeit und zum anderen aus der potentiellen Abhängigkeit der Reaktionen untereinander ergeben. Würde bei jedem Ereignis E_i zum Zeitpunkt t_i neben der Erzeugung einer normalen Aufwachwahrscheinlichkeit $P(A_{\text{zusatz}}(t_i))$ bzw. $P(A_{\text{induz}}(t_i))$ zusätzlich die Wahrscheinlichkeit einer AWR beim nächsten Geräusch (allgemein $P(A_{\text{beob}}(t_{i+1}))$) erhöht, würde sich die Wahrscheinlichkeit für mindestens eine weitere AWR (im zu beschreibenden Zeitintervall) bei jedem Geräusch weiter erhöhen. Somit wäre die Gesamtwahrscheinlichkeit höher als mit Gl. 10 bzw. 11 berechnet würde. Möglich ist auch eine Verminderung der Aufwachwahrscheinlichkeit (z.B. durch Gewöhnung), in diesem Falle würde die Gesamtwahrscheinlichkeit durch Gl. 10 bzw. 11 überschätzt.

Es ist also denkbar, dass:

- (1) ein Geräusch E_i , welches zwar nicht zu einer AWR führt, die („lokale“) Aufwachwahrscheinlichkeit durch die weiter oben beschriebenen neuronalen Prozesse bei Geräusch E_{i+1} erhöht oder vermindert. Als hierfür determinierender Faktor scheint in erster Linie der zeitliche Abstand zwischen E_i und E_{i+1} in Frage zu kommen.
- (2) nach einer AWR durch das Geräusch E_i die Person beim Geräusch E_{i+1} noch wach ist. Hat bei E_{i+1} noch kein Wiedereinschlafen stattgefunden, kann dieses gar nicht zu einer AWR führen. Die Aufwachwahrscheinlichkeit muss in solchen Fällen 0 sein, was – trotz (evtl. gestörten) Wachseins – ungestörten Schlaf suggeriert.

Im letzten Falle wäre nicht die Aufwachwahrscheinlichkeit die relevante Zielgröße, sondern es wäre zu fragen, inwiefern Geräusch $i+1$ das Wiedereinschlafen erschwert und ob das verhinderte Einschlafen im Kontext einer Berechnung der *Aufwach*-wahrscheinlichkeit über-

haupt sinnvoll berücksichtigt werden kann. Hier bietet sich grundsätzlich als Ausweg an, nicht die AWR (die ja aus dem Schlaf heraus erfolgen müssen) zu modellieren, sondern die Dauer des fluglärminduzierten *Wachseins* im interessierenden Zeitintervall. Ein entsprechender Lösungsansatz wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

4.3 Markov-Modellierung nach einem Vorschlag des DLR

Wie bereits näher erläutert, ist es unplausibel, dass Reaktionen auf Fluggeräusche unabhängig voneinander sind. Die Reaktion auf ein Fluggeräusch zum Zeitpunkt t_i beeinflusst den Zustand, in dem sich die untersuchte Person zum Zeitpunkt t_{i+1} befindet, an dem das nächste Fluggeräusch auftritt. Ereignisse in der Vergangenheit und Reaktionen auf diese Ereignisse beeinflussen also indirekt Ereignisse in der Gegenwart. In der Statistik spricht man von voneinander abhängigen Ereignissen, im Gegensatz zu unabhängigen Ereignissen. Je geringer die Geräusche zeitlich voneinander getrennt sind, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit einer Abhängigkeit der Reaktion auf Fluggeräusch $i+1$ von der Reaktion auf Fluggeräusch i .

Für den Flughafen Leipzig/Halle stellte sich die Frage, ob das Wiedereinschlafen trotz der dichten Flugabfolge möglich ist, wenn die vom DLR aufgestellten Kriterien zum Schutz der Bevölkerung vor Nachtfluglärm erfüllt sind. Für die quantitative Analyse dieser Fragestellung wurde ein aus zwei Zuständen bestehendes Markov Modell benutzt, das unten näher beschrieben ist und bereits an anderer Stelle publiziert wurde [15; 27]

Ein ähnliches, allerdings aus sechs Zuständen bestehendes Modell, wurde für die Untersuchung verschiedener Betriebsszenarien am Frankfurter Flughafen benutzt [25]. Hier wurde untersucht, welche Folgen die Einführung eines Flugverbotes von 23 Uhr bis 5 Uhr für die Schlafstruktur der betroffenen Anwohner haben könnte.

4.3.1 Markov-Modelle: Einführung

Bei einem Markov-Modell handelt es sich um ein System mit einer endlichen Anzahl von Zuständen, das im Zeitablauf beschrieben wird. Es wird dazu verwendet, Veränderungen innerhalb eines Individuums oder einer Population über die Zeit zu modellieren.

Ein Markov-Modell besteht aus sich gegenseitig ausschliessenden und gemeinsam erschöpfenden Zuständen, d.h. jede Person aus der modellierten Population muss sich zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem der Zustände befinden und kann nicht in mehreren Zuständen gleichzeitig sein.

Markov-Modelle finden in einem diskreten Zeitrahmen statt. Die Zeit schreitet in festgelegten Intervallen oder Epochen fort. Die Intervalllänge wird vom Urheber des Modells festgelegt. Im Fall eines Schlaf-Modells ergibt sie sich automatisch aus der Epochenlänge von 30 Sekunden. Jedes Intervall innerhalb eines Markov-Prozesses muss die gleiche Länge haben.

In jedem Zeitschritt können Übergänge von einem Zustand in einen anderen stattfinden. Abb. 6 zeigt beispielhaft das Übergangsdiagramm eines einfachen Markov-Modells.

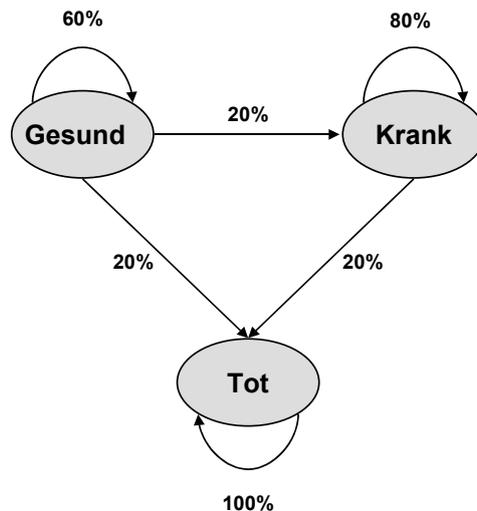


Abb. 6: Beispiel eines einfachen Markov Modells (hier: chronische Erkrankung).

Die Pfeile stellen Übergänge dar. Eine Person im Zustand „krank“ zum Zeitpunkt t kann sich zum Zeitpunkt $t+1$ entweder im Zustand „krank“ oder im Zustand „tot“ befinden. Bei dem abgebildeten Modell handelt es sich demnach um das Modell einer chronischen Erkrankung, da Übergänge vom Zustand „krank“ zum Zustand „gesund“ nicht möglich sind (es weist kein Pfeil von „krank“ nach „gesund“). Pfeile, die von einem Zustand zum selben Zustand deuten (wie „gesund“ \rightarrow „gesund“) stellen die Möglichkeit dar, auch in der nächsten Epoche im gleichen Zustand zu verbleiben.

Die Übergangswahrscheinlichkeiten sind ebenfalls in Abb. 6 angegeben. Die Übergangswahrscheinlichkeit $P(k|j)$ ist die Wahrscheinlichkeit, vom Zustand j in den Zustand k überzugehen. Die Summe der Übergangswahrscheinlichkeiten in andere Zustände (einschliesslich der Wahrscheinlichkeit, im selben Zustand zu verbleiben) muss für jeden Zustand 1 (=100%) betragen. Die Übergangswahrscheinlichkeiten können für die Dauer des Modells konstant bleiben, aber das ist selten der Fall und trifft auch für das unten vorgestellte Schlafmodell nicht zu.

Eine wichtige Annahme für das Markov-Modell besagt zunächst, dass die Übergangswahrscheinlichkeiten nur vom aktuellen Zustand abhängen, nicht jedoch von Zuständen, in denen sich die Person vor dem aktuellen Zustand befand. In diesem Sinne besitzt ein Markov-Modell kein Gedächtnis für in der Vergangenheit liegende Zustände. Es existieren jedoch Möglichkeiten, diese potentielle Limitierung durch Erweiterungen des Modells zu umgehen. So wurden z.B. für das Schlafmodell Regressionsmodelle benutzt, welche die Übergangswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Dauer des aktuellen Zustandes bestimmen, wodurch in der Vergangenheit liegende Zustände implizit Berücksichtigung finden.

4.3.2 Markov-Modell für den Schlaf

Auch der Schlafprozess kann als erweitertes Markov-Modell formuliert werden: Es gibt sechs sich gegenseitig ausschliessende Zustände: die Schlafstadien Wach, S1, S2, S3, S4 und REM. Die Epochenlänge ist, wie bereits erwähnt, mit 30 Sekunden gegeben. Theoretisch

sind Übergänge von allen Schlafstadien in alle Schlafstadien möglich, wobei manche Übergänge selten oder nie (z.B. REM → S4) gesehen werden.

Für die für den Flughafen Leipzig/Halle durchgeführte Analyse waren insbesondere Übergänge vom Wachsein in den Schlaf (Wiedereinschlafen) und vom Schlaf in das Wachsein (Aufwachen) von Bedeutung. Aus diesem Grund wurde das ursprünglich aus sechs Zuständen bestehende Schlafmodell auf ein Modell reduziert, in dem nur zwischen den beiden Zuständen „Wach“ und „Schlaf“ (Schlafstadien S2, S3, S4 und REM) unterschieden wurde (s. Abb. 7). Das Schlafstadium S1 wurde im Anschluss an eine Weckreaktion als „Wach“ klassifiziert, andernfalls als „Schlaf“. Die geringere Komplexität des Modells vereinfachte neben der Analyse auch die Interpretierbarkeit und Kommunizierbarkeit der Ergebnisse erheblich.

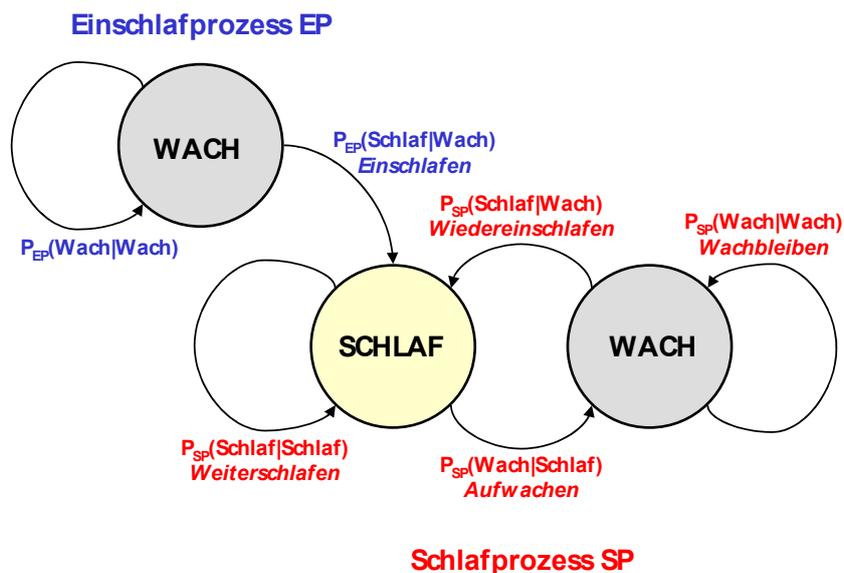


Abb. 7: Darstellung des für die Analysen benutzten Schlafmodells, bestehend aus Einschlaf- (EP) und Schlafprozess (SP). Bei den dargestellten Übergangswahrscheinlichkeiten handelt es sich um bedingte Wahrscheinlichkeiten (z.B. $P_{SP}(\text{Wach}|\text{Schlaf})$ = Wahrscheinlichkeit, in der nächsten Epoche wach zu sein, unter der Bedingung, in der aktuellen Epoche zu schlafen).

Abb. 7 gibt eine Übersicht über das verwendete Schlafmodell. Die möglichen Übergänge sind durch Pfeile dargestellt, die Bezeichnung der Übergangswahrscheinlichkeiten wird neben den Pfeilen gezeigt. Die Übergangswahrscheinlichkeiten wurden mit binär logistischen Regressionsmodellen berechnet, wobei Wach = 1 und Schlaf = 0 gesetzt wurden. Es wurde also immer die Wahrscheinlichkeit modelliert, in der nächsten Epoche wach zu sein, z.B. $P_{SP}(\text{Wach}|\text{Wach})$ ¹⁸. Die Wahrscheinlichkeit, in der nächsten Epoche zu schlafen, ergibt sich dann als $P_{SP}(\text{Schlaf}|\text{Wach}) = 1 - P_{SP}(\text{Wach}|\text{Wach})$, weil es im Modell nur zwei Zustände gibt. Die Wahrscheinlichkeit, aufzuwachen bzw. wachzubleiben wird durch ein Fluggeräusch in Abhängigkeit vom Maximalpegel erhöht.

¹⁸ Hierbei handelt es sich um eine bedingte Wahrscheinlichkeit. Der Ausdruck $P_{SP}(\text{Wach}|\text{Schlaf})$ wird folgendermaßen gelesen: Die Wahrscheinlichkeit, in der nächsten Epoche wach zu sein, unter der Bedingung in dieser Epoche zu schlafen (letztlich handelt es sich in diesem Beispiel um die statistisch korrekte Formulierung der Aufwachwahrscheinlichkeit).

Im Modell wird zunächst zwischen dem Einschlafprozess (EP) und dem eigentlichen Schlafprozess (SP) unterschieden. Der Zeitpunkt, nach dem die modellierte Person zum ersten Mal in das Stadium „Schlaf“ wechselt (erstmaliges Auftreten von S2), bestimmt die Einschlaflatenz. Gleichzeitig verlässt die Person den mit „Einschlafprozess“ bezeichneten Teil des Modells und wechselt in den mit „Schlafprozess“ bezeichneten Hauptteil des Modells. Aus dem Schlaf heraus kann die modellierte Person entweder aufwachen ($P_{SP}(\text{Wach}|\text{Schlaf})$) oder weiterschlafen ($P_{SP}(\text{Schlaf}|\text{Schlaf}) = 1 - P_{SP}(\text{Wach}|\text{Schlaf})$). Hingegen kann die modellierte Person aus dem Wachzustand heraus wach bleiben ($P_{SP}(\text{Wach}|\text{Wach})$) oder wieder einschlafen ($P_{SP}(\text{Schlaf}|\text{Wach}) = 1 - P_{SP}(\text{Wach}|\text{Wach})$). Die hier beschriebenen Übergangswahrscheinlichkeiten sind für die Dauer des Modells nicht konstant. Sie ändern sich unter anderem durch den Einfluss zirkadianer und ultradianer Rhythmen. Die wesentlichen Faktoren mit Einfluss auf die Übergangswahrscheinlichkeiten im Modell wurden berücksichtigt, indem folgende potentielle Einflussgrößen, zusätzlich zu dem Zustand, in dem sich die modellierte Person aktuell befand, in die Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten einbezogen wurden:

- (1) die verstrichene Schlafzeit in Epochen,
- (2) die Dauer des Aufenthaltes im gleichen Zustand in Epochen und
- (3) der Maximalpegel des Fluggeräuschs.

In den Analysen für den Flughafen Leipzig/Halle wurden einzelne Nächte mit sog. individuellen Durchläufen (*individual trials*) simuliert. Hier schreitet ein Mitglied der Kohorte zufällig durch das Modell, basierend auf den berechneten Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Zuständen. Die bis zu einem Zeitpunkt t erreichten einzelnen Zustände des Individuums können in Variablen (*tracker variables*) gespeichert und für die Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten für spätere Zeitpunkte benutzt werden, wodurch ein Gedächtnis für in der Vergangenheit liegende Zustände entsteht. Für das beschriebene Schlafmodell wurden Regressionsmodelle benutzt, welche die Übergangswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der bereits im aktuellen Zustand verbrachten Dauer berechneten. Durch die wiederholte Durchführung individueller Durchläufe wird ein Erwartungswert des Markov-Modells für die evaluierten Zielgrößen erzeugt.

Bei einer errechneten Übergangswahrscheinlichkeit von 10% für $P(\text{Wach}|\text{Schlaf})$ wacht die Person z.B. in 1 von 10 Fällen auf, während sie in neun Fällen weiterschläft. Es ist offensichtlich, dass durch dieses Vorgehen Ereignisse in der Gegenwart Ereignisse in der Zukunft beeinflussen können (bedingte Wahrscheinlichkeiten, „was wäre wenn“), ein wesentlicher Vorteil von Markov Prozessen. So wird der zukünftige Zustand der simulierten Person u.a. davon abhängen, ob sie in der Gegenwart aufwacht oder nicht. Im ersten Fall wird das nächste Fluggeräusch vielleicht wach erlebt, während es im zweiten Fall vielleicht verschlafen würde usw.

Zusammengefasst erlauben Markov-Prozesse im Zusammenhang mit Fluglärmwirkungen auf den Schlaf die flexible Modellierung abhängiger Ereignisse und unterschiedlicher Betriebsszenarien.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Als Hauptergebnis des Workshops bzw. des vorliegenden Berichts können folgende Punkte festgehalten werden:

- ▶ Die Diskussion, ob die Zahl durch Fluglärm hervorgerufener AWR die sinnvollste Grösse zur Operationalisierung der Lärmbeanspruchung während der Nacht bzw. im Schlaf ist, muss weitergeführt werden. Offen ist zum einen, ob AWR die Beanspruchung hinreichend abbilden oder ob andere gesundheitlich unerwünschte Primärstörungen vorkommen, die im EEG nicht zu erkennen sind, bzw. die im EEG zwar zu erkennen sind, aber nicht durch die Schlafstadienklassifikation nach Rechtschaffen & Kales [6] erfasst werden. Zum anderen stellt sich die Frage der Notwendigkeit: Ist jede durch Fluglärm hervorgerufene AWR auch gesundheitlich abträglich?
- ▶ Man könnte im Sinne des Präventionsgedankens berechtigt auch so weit gehen, jede durch Fluglärm hervorgerufene AWR *per Definition* als Gesundheitsstörung aufzufassen bzw. den ungestörten Schlaf *per se* als Schutzziel zu definieren, ungeachtet jeglicher quantifizierbarer primärer Auswirkungen von Lärmereignissen auf langfristige Gesundheitsparameter.
- ▶ Die Häufigkeit von induzierten oder zusätzlichen EEG-AWR kann als Indikator für die Lärmbeeinträchtigung aufgefasst und als Schutzkriterium verwendet werden, ohne dass kausale Zusammenhänge mit gesundheitlich relevanten Grössen bestehen müssen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass jede Reduktion der Anzahl durch Fluglärm hervorgerufener AWR auch eine Entlastung bei (anderen) gesundheitlich relevanten aber unbekanntem Grössen mit sich bringt. In diesem Lichte tritt die Bevorzugung einer bestimmten abgrenzbaren Primärwirkung (bzw. deren Begrenzung im Rahmen eines Schutzkonzeptes) gegenüber allen anderen möglichen Primärwirkungen in den Hintergrund. Allerdings bleibt die Frage offen, ob es nebst den EEG-AWR nicht einfachere zu erfassende und/oder der Bevölkerung anschaulicher zu erklärende Grössen gibt, welche dies auch ermöglichen (z.B. Herzfrequenzbeschleunigungen oder erinnerbare AWR).
- ▶ Wenn von unabhängigen Ursachen für spontanes und fluglärminduziertes Aufwachen ausgegangen wird, bestehen für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit von durch Fluglärm ausgelösten AWR zwei Methoden. Die Wahrscheinlichkeit P_{induz} hat den Vorteil, sowohl von der individuellen Rate spontaner AWR als auch von der (allenfalls arbiträr festgelegten) Länge der zugrundeliegenden Zeitfenster unabhängig zu sein. P_{zusatz} erfüllt diese Anforderungen nicht, ist aber als Schutzkriterium eine gut geeignete Grösse, da diese denjenigen Anteil der AWR repräsentiert, die durch den Lärm allein erzeugt werden und deshalb auch durch Schutzmassnahmen begrenzt werden können. Die Grösse P_{zusatz} ist zudem anschaulicher auch einem Laien zu erklären. Die Verwendung von P_{induz} stellt indes den konservativeren Fall dar, was sie gleichfalls für die Verwendung in einem Schutzkonzept qualifiziert. Unter der (sehr plausiblen) Annahme, dass spontanes und induziertes Erwachen voneinander abhängig sind, ist unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten P_{zusatz} der einzig sinnvolle Indikator. Wichtig ist, dass die Bezeichnungen „induz“ und „zusatz“ nicht verwechselt werden. Relevante Unterschiede zwischen beiden Grössen sind in der Praxis nur bei einer falschen Bestimmung der Zeitfenster-Länge oder bei hohem P_{spontan} zu erwarten. Letzteres sollte bei der Auswahl eines ausreichend spezifischen Indikators jedoch eine untergeordnete Rolle spielen. Die

Berechnung der zusätzlichen Aufwachwahrscheinlichkeit P_{zusatz} bedingt die empirische Ermittlung einer die Aufwachwahrscheinlichkeit maximierenden Zeitfenster-Dauer. Das in der DLR-Feldstudie [1] angewendete Verfahren für die Ermittlung von P_{zusatz} ist korrekt und kann für diesen Wirkungsparameter als modellhaft angesehen werden. Der Berechnungsansatz von Maschke/Neumüller erscheint mathematisch falsch und wird nicht zur weiteren Verwendung empfohlen.

- ▶ Ein wichtiges Problem ist die Berücksichtigung der Abhängigkeiten einzelner AWR untereinander. Zum einen können fluglärminduzierte AWR die Wahrscheinlichkeit für spätere spontane AWR modifizieren. Dadurch wird in Frage gestellt, ob die in lärmfreien virtuellen Lärmfenstern ermittelte Wahrscheinlichkeit P_{spont} auf Zeitfenster mit Lärm übertragen werden kann. Zum anderen sind Reaktionen in rasch aufeinanderfolgenden Zeitfenstern nicht unabhängig voneinander: Die Voraussetzung, zu Beginn des Zeitfensters in einem der Schlafstadien REM, S4, S3, S2 oder S1 zu sein, wird im nachfolgenden Zeitfenster unwahrscheinlicher. Eine Lösung bietet die Möglichkeit, die Abhängigkeiten ebenfalls mathematisch zu modellieren, wie dies in Kap. 4.2 vorgestellt wurde.

6. Literatur

- 1 Basner, M., Isermann, U., & Samel, A. (2005). Die Ergebnisse der DLR-Studie und ihre Umsetzung in einer lärmmedizinischen Beurteilung für ein Nachtschutzkonzept. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 52(4).
- 2 Basner, M., Buess, H., Elmenhorst, D., Gerlich, A., Luks, H., Maass, H., et al. (2004). *Nachtfluglärmwirkungen Band 1 Zusammenfassung (DLR Forschungsbericht 2004-07/D)*. Köln.
- 3 Greene, R., & Siegel, J. (2004). Sleep: a functional enigma. *Neuromolecular Medicine*, 5(1), 59-68.
- 4 Huber, R., Felice Ghilardi, M., Massimini, M., & Tononi, G. (2004). Local sleep and learning. *Nature*, 430(6995), 78-81.
- 5 Smith, C. (1996). Sleep states, memory processes and synaptic plasticity. *Behavioural Brain Research*, 78(1), 49-56.
- 6 Rechtschaffen, A., & Kales, A. (1968). *A manual of standardised terminology, techniques and scoring system of sleep stages in human subjects*. Bethesda: U.S. Department for Health, Education and Welfare. Public Health service.
- 7 Bonnet, M. H. (1985). Effect of sleep disruption on sleep, performance, and mood. *Sleep*, 8(1), 11-19.
- 8 Bonnet, M. H. (1986). Performance and sleepiness as a function of frequency and placement of sleep disruption. *Psychophysiology*, 23(3), 263-271.
- 9 Guilleminault, C., Stoohs, R., Clerk, A., Cetel, M., & Maistros, P. (1993). A cause of excessive daytime sleepiness. The upper airway resistance syndrome. *Chest*, 104(3), 781-787.
- 10 Wesensten, N. J., Balkin, T. J., & Belenky, G. (1999). Does sleep fragmentation impact recuperation? A review and reanalysis. *Journal of Sleep Research*, 8(4), 237-245.
- 11 Bonnet, M. H. (2000). Differentiating sleep continuity effects from sleep stage effects. *Journal of Sleep Research*, 9(4), 403-406.
- 12 American Sleep Disorders Association. (1992). EEG arousals: scoring rules and examples: a preliminary report from the Sleep Disorders Atlas Task Force of the American Sleep Disorders Association. *Sleep*, 15(2), 173-184.
- 13 Borbély, A. A. (1982). A two process model of sleep regulation. *Human Neurobiology*, 1(3), 195-204.
- 14 Spreng, M. (2000). Central nervous system activation by noise. *Noise & Health*, 2(7), 49-58.
- 15 Basner, M., & Siebert, U. (2006). Markov Prozesse zur Vorhersage fluglärmbedingter Schlafstörungen. *Somnologie*, 10(4), 176-191.
- 16 Ollerhead, J. B., Jones, C. J., Cadoux, R. E., Woodley, A., Atkinson, B. J., Horne, J. A., et al. (1992). *Report of a Field Study of Aircraft Noise and Sleep Disturbance*. London: Department of Safety, Environment and Engineering.
- 17 Pitson, D. J., & Stradling, J. R. (1998). Autonomic markers of arousal during sleep in patients undergoing investigation for obstructive sleep apnoea, their relationship to

- EEG arousals, respiratory events and subjective sleepiness. *Journal of Sleep Research*, 7(1), 53-59.
- 18 Raschke, F. (2004). Arousals and aircraft noise - environmental disorders of sleep and health in terms of sleep medicine. *Noise & Health*, 6(22), 15-26.
 - 19 Davies, R. J., Belt, P. J., Roberts, S. J., Ali, N. J., & Stradling, J. R. (1993). Arterial blood pressure responses to graded transient arousal from sleep in normal humans. *Journal of Applied Physiology*, 74(3), 1123-1130.
 - 20 Basner, M., & Samel, A. (2004). Vorstellung der DLR-Studie. In Verkehrsclub Deutschland (Hrsg.), *VCD Tagungsband. Wie schädlich ist Fluglärm? Die DLR-Studie zu akuten Schlafstörungen durch Fluglärm in der Kontroverse* (pp. 11-35).
 - 21 Guilleminault, C., Abad, V. C., Philip, P., & Stoohs, R. (2006). The effect of CNS activation versus EEG arousal during sleep on heart rate response and daytime tests. *Clinical Neurophysiology*, 117(4), 731-739.
 - 22 Carter, N., Henderson, R., Lal, S., Hart, M., Booth, S., & Hunyor, S. (2002). Cardiovascular and autonomic response to environmental noise during sleep in night shift workers. *Sleep*, 25(4), 457-464.
 - 23 Sforza, E., Chapotot, F., Lavoie, S., Roche, F., Pigeau, R., & Buguet, A. (2004). Heart rate activation during spontaneous arousals from sleep: effect of sleep deprivation. *Clinical Neurophysiology*, 115(11), 2442-2451.
 - 24 Morgan, B. J., Crabtree, D. C., Puleo, D. S., Badr, M. S., Toiber, F., & Skatrud, J. B. (1996). Neurocirculatory consequences of abrupt change in sleep state in humans. *Journal of Applied Physiology*, 80(5), 1627-1636.
 - 25 Basner, M. (2006). *Markov state transition models for the prediction of changes in sleep structure induced by aircraft noise (Forschungsbericht 2006-07)*. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
 - 26 Spreng, M. (2002). Cortical Excitations, Cortisol Excretion and Estimation of Tolerable Nightly Over-Flights. *Noise & Health*, 4(16), 39-46.
 - 27 Basner, M., Isermann, U., & Samel, A. (2005). *Lärmmedizinische Stellungnahme zum geplanten Aus- und Neubau des Flughafens Leipzig/Halle*. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
 - 28 Raschke, F., & Fischer, J. (1997). Arousal in der Schlafmedizin. *Somnologie*, 2, 59-64.
 - 29 Glatz, C. (2005). *Vergleich von EEG-Arousals mit anderen klassischen Indikatoren für lärmbedingte Schlafstörungen. Diplomarbeit (Forschungsbericht DLR-IB 316-2005-04)*. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
 - 30 Klinker, R. (1996). Erregungsübertragung in Zellverbänden. In R. Klinker & S. Silber-nagel (Hrsg.), *Lehrbuch der Physiologie*. Stuttgart-New York: Thieme.

Hinweis

Herr Christian Maschke musste seine Teilnahme am Workshop aus familiären Gründen kurzfristig absagen. Da Herr Maschke als Workshop-Teilnehmer eingeladen war und auch ein vorbereitendes Papier zu den im Workshop aufgeworfenen Fragen verfasst hat, jedoch nicht Mitautor dieses Berichts ist, wurde ihm an dieser Stelle die Gelegenheit eingeräumt, den vorliegenden Bericht zu kommentieren. Aufgrund eines Missverständnisses wurde in der ursprünglichen Fassung des Berichts hier ein persönlicher Kommentar von Herrn Maschke publiziert, welcher jedoch nicht als offizieller Beitrag für den Bericht gedacht war. Wir bitten, dieses Missgeschick zu entschuldigen. Die vorliegende Fassung ist die einzige offizielle Fassung dieses Berichts.