

NACHHALTIGKEITSBEWERTUNG DES FLUGBETRIEBS FÜR DEN FLUGZEUGVORENTWURF

M. Kreimeier, K. Franz

Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme (ILR), RWTH Aachen, 52062 Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird ein Modell zur Bewertung des Flugbetriebs bezüglich der Nachhaltigkeit im Flugzeugvorentwurf entwickelt. Dabei wird zunächst ein allgemeines, operationalisierbares Nachhaltigkeitskonzept auf Basis externer Effekte bzw. Kosten definiert, sodass als einheitliches Bewertungsmaß eine finanzielle Bewertung herangezogen wird. Weiterhin werden aus bestehenden Ansätzen zur Nachhaltigkeitsbewertung von Luftverkehrssystemen und allgemeinen Transportsystemen mögliche Dimensionen, Stakeholder und Nachhaltigkeitsaspekte identifiziert und daraus die relevanten Elemente für die Nachhaltigkeitsbewertung des Flugbetriebs im Flugzeugvorentwurf abgeleitet. Unter Nachhaltigkeitsaspekten werden neben den klassischen, ökonomischen Themen die nicht internalisierten, externen Effekte verstanden. Im weiteren Verlauf werden diese Nachhaltigkeitsaspekte monetarisiert. Anschließend werden mögliche Bewertungsaufgaben klassifiziert und daraus sowohl Anforderungen als auch Betrachtungsgrenzen des Bewertungsmodells bestimmt. Abschließend folgt eine Beispielbewertung der A320neo im Vergleich zur A320.

SYMBOLVERZEICHNIS

del	Verspätung
fb	Flächenbedarf
fh	Flughafen
flzg	Flugzeug
noi	Lärm
opk	Opportunitätskosten
sb	Siedlungsbeschränkung
ss	Schadstoffe
str	Strom
tb	Treibstoffbereitstellung
thg	Treibhausgase
ur	Unfallrisiko
vw	Verlust von Waldfläche
ILR	Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme der RWTH Aachen
WLU	Work-load unit
α	Anzahl Startvorgänge auf betrachteter Startbahn
β	Schadenskostenfaktor
η	Gewichtungsfaktor
κ	Passagierkapazität
ΔL	Lärmpegelerhöhung durch den zusätzlichen Start des betrachteten Flugzeugs im Stadium des Flugzeugvorentwurfs, dB(A)
σ_s	Emission des Schadstoffs s während des LTO-Zyklus, t/LTO-Zyklus
A	Flächenbedarf, m ² /(Fbw/Jahr)
C_{betr}	Betriebskosten, €
D	Routendistanz, nm
f_{noi}	Vielfaches der externen Lärmkosten für Sensitivitätsbetrachtung
f_{sl}	Sitzladefaktor
K	Externe Kosten, €
L_{den}	Gewichteter, energieäquivalenter Dauerschallpegel, dB(A)
L_{eq}	Ungewichteter, energieäquivalenter Dauerschallpegel, dB(A)
L^*	Durchschnittlicher Lärmemissionspegel der star-

	tenden Flugzeuge auf der betrachteten Startbahn in 450 m Entfernung, dB(A)
L_{vew}	Lärmemissionspegel des betrachteten Flugzeugs im Vorentwurfsstadium in 450 m Entfernung, dB(A)
n	Anzahl betroffener Anwohner, Anw
p	Relative Häufigkeit
r_{thg}	Strahlungsantriebsfaktor
T_{del}	Erwartete, durchschnittliche Verspätung, min
v	Treibstoffverbrauch, l
x	Verbrauch

1. EINLEITUNG

In den vergangenen Jahren ist das Luftverkehrsaufkommen stark angestiegen. Auch für die Zukunft wird dieser Trend aller Voraussicht nach anhalten. Mit wachsendem Luftverkehrsaufkommen nehmen ebenfalls die luftverkehrsbedingten Emissionen zu, was zu steigenden, negativen Auswirkungen auf das Ökosystem und die darin lebenden Menschen führt. Es wird daher immer wichtiger, diese negativen Auswirkungen bereits bei der Flugzeugentwicklung zu berücksichtigen. Klassische Bewertungsansätze in der Flugzeugentwicklung beschränken sich im Wesentlichen auf ökonomische Betrachtungsweisen und berücksichtigen daher nicht alle relevanten Auswirkungen des Luftverkehrs, wie z.B. Treibhausgas- oder Lärmemissionen. Folglich ist ein ganzheitlicher Bewertungsansatz notwendig, welcher unter dem Begriff Nachhaltigkeitsbewertung verstanden wird und Gegenstand dieser Arbeit ist. Da die Betriebsphase eines Flugzeugs die übrigen Lebenszyklusphasen dominiert, wird das Bewertungsmodell auf diese Phase beschränkt, obwohl eine Nachhaltigkeitsanalyse generell alle Phasen des Lebenszyklus umfasst [1]. Im Flugzeugvorentwurf werden bereits wesentliche Entwurfsparameter festgelegt, sodass das Bewertungsmodell bereits im Vorentwurf eingesetzt werden kann. Mithilfe des Bewertungsmodells können sowohl Einzelbewertungen als auch Relativbewertungen durchgeführt werden. Letztere Kategorie von Bewertungsaufgaben bildet die Grundlage für Flugzeugvorentwürfe mit einem optimierten Nachhaltigkeitsergebnis.

2. KONZEPT DER NACHHALTIGKEIT

In der Literatur existiert kein Konsens über eine genaue Bedeutung oder Definition des Begriffs Nachhaltigkeit. Eine der in der Literatur vorherrschenden Definitionen geht auf die UN Konferenz 1992 in Rio de Janeiro zurück und wird als anthropozentrischer Ansatz bezeichnet [2]. In den Beiwerken zu dieser Konferenz, der Rio Deklaration [3] und der Agenda 21 [4], ist Nachhaltigkeit als Leitidee zu verstehen. Problematisch ist die Bestimmung der besten Handlungsalternative verschiedener Maßnahmen, sofern diese zu einem Zielkonflikt verschiedener Nachhaltigkeitsziele führen, da diese Leitidee zu umfassend und begrifflich unpräzise formuliert ist [5]. Darüber hinaus fehlt nach diesem Ansatz die Definition eines einheitlichen Bewertungsmaßes.

Aus diesem Grund wird im Folgenden zunächst thematisiert, welche Emissionsquantitäten prinzipiell als nachhaltig angesehen werden können. Darauf aufbauend wird das Konzept der externen Effekte bzw. Kosten vorgestellt, in welchem die zu berücksichtigenden, nicht ökonomischen Aspekte für eine Nachhaltigkeitsbetrachtung monetär bewertet werden. Dies bedeutet, dass als einheitliches Bewertungsmaß eine finanzielle Betrachtung der zu bewertenden Nachhaltigkeitsaspekte dient. Die systemischen Auswirkungen externer Effekte auf das Konzept der Marktwirtschaft werden im Anschluss diskutiert.

2.1. Die schwache und starke Formulierung der Nachhaltigkeit

Generell wird in der Literatur zwischen einer schwachen und starken Formulierung der Nachhaltigkeit unterschieden [6]. Bei der schwachen Formulierung kann eine erhöhte Umweltbelastung gerechtfertigt sein, falls es für eine stärkere ökonomische oder gesellschaftliche Entwicklung notwendig ist oder diese durch Umweltentlastungen in anderen Bereichen kompensiert werden kann. Bei der starken Formulierung wird ein Überschreiten der natürlichen Grenzen unter keinen Umständen als zulässig angesehen.

Da Flugzeuge nahezu ausnahmslos mit fossilen Brennstoffen fliegen und ein hohes Maß an Treibhausgasen und Schadstoffen produzieren, betrachtet Upham das Luftverkehrssystem als nicht nachhaltig [7], was der starken Formulierung der Nachhaltigkeit entspricht. Andererseits sieht Caves den hohen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Beitrag als Rechtfertigung für die zusätzliche Umweltbelastung [8]. Letztere Ansicht entspricht der schwachen Formulierung der Nachhaltigkeit, welche im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird. Aufgrund der Tatsache, dass erhöhte Umweltbelastung durch eine höhere gesellschaftliche Wohlfahrt rechtfertigbar ist, ist die Definition eines einheitlichen Bewertungsmaßes notwendig, um die Vielzahl der unterschiedlichen Nachhaltigkeitsziele als Bewertungsaspekte objektiv gewichten zu können.

2.2. Externe Effekte und Kosten

Unter einem *externen Effekt* werden nicht kompensierte Auswirkungen wirtschaftlicher Aktivitäten eines oder mehrerer Akteure auf an diesen Aktivitäten nicht beteiligte Dritte verstanden. Falls diese Auswirkungen monetär bewertet werden und Schäden verursachen, wird von

externen Kosten gesprochen [5]. Zum Beispiel verursacht die globale Klimaerwärmung, hervorgerufen u.a. durch die Emissionen von CO₂, volkswirtschaftliche Schäden. Diese Schäden werden i.d.R. nicht vom CO₂-Emittenten bezahlt. Sofern externe Effekte positiv zu bewerten sind, wie bspw. bei freizugänglichem Wissen, wird von externen Nutzen gesprochen.

2.3. Betrachtungshorizont der Nachhaltigkeitsbewertung

Es ist das Ziel, die weltweit vorherrschenden, marktwirtschaftlichen Rahmenordnungen so zu gestalten, dass durch das Streben nach individuellem Erfolg jedes Einzelnen auch das Gemeinwohl maximiert wird [5]. Weil externe Effekte i.A. nicht im Entscheidungskalkül des handelnden Individuums berücksichtigt werden, kann das Streben nach individuellem Maximalwohl im Gegensatz zum gesellschaftlichen Maximalwohl stehen. Externe Effekte stellen daher eine Form von Marktversagen dar. Bspw. wird durch die Produktion bestimmter Waren in einer Fabrik ein nahegelegener Fluss stark verschmutzt. Für den Unternehmer mag die Produktion gewinnmaximierend sein. Allerdings führt die starke Verschmutzung des Flusses stromab zu erheblichen Beeinträchtigungen sowohl der Natur als auch der dort lebenden Menschen, sodass die Produktion in dieser Fabrik das Gemeinwohl verringert.

Mit der Bestimmung der externen Kosten und der dadurch möglichen Internalisierung kann bzw. muss ein wirtschaftlicher Akteur die negativen Auswirkungen in seinem Entscheidungskalkül berücksichtigen. Für das Beispiel bedeutet dies, dass der Unternehmer für die ökologischen und gesellschaftlichen Schäden aufkommen muss. Dieser wird die Produktion einstellen, sofern die zusätzlichen externen Kosten den Gewinn durch die Produktion der Waren übersteigen.

Sofern also alle externen Kosten (und Nutzen) betrachtet und korrekt quantifiziert werden, kann unter reinen marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten entschieden werden. Dies bedeutet, dass neben der klassischen, wirtschaftlichen Analyse zur ganzheitlichen Betrachtungsweise einer Nachhaltigkeitsanalyse ausschließlich die Bestimmung und Quantifizierung der externen Effekte notwendig ist. Gleichzeitig kann die finanzielle Beurteilung als einheitliches Bewertungsmaß angesehen werden, um verschiedene Nachhaltigkeitsaspekte unterschiedlich gewichten zu können.

2.4. Marginale und durchschnittliche externe Kosten

Nach der mikroökonomischen Theorie ist die optimale Produktionsmenge dadurch gekennzeichnet, „dass die Grenzkosten (oder Marginalkosten) gleich dem Grenzerlös sind. Der Grenzerlös entspricht (...) dem Marktpreis und somit der marginalen Zahlungsbereitschaft des letzten Nachfragers“ [9]. Für eine Nachhaltigkeitsbewertung müssen in den Marginalkosten nicht nur die internen (d.h. die tatsächlich anfallenden) sondern auch die externen Kosten berücksichtigt werden. Daher sind die marginalen, externen Kosten die relevanten Größen, die bei der Internalisierung zu berücksichtigen sind [9].

3. BETRACHTUNGSGEGENSTAND

Im vorangegangenen Kapitel wurde erläutert, dass zur

Nachhaltigkeitsanalyse zum einen die Bestimmung relevanter externer Effekte und zum anderen deren Quantifizierung notwendig ist. Da zur ganzheitlichen Analyse neben externen Effekten weiterhin ökonomische Aspekte zu betrachten sind, werden beide Elemente im Folgenden als (Nachhaltigkeits-)Aspekte bezeichnet, welche den Betrachtungsgegenstand der Bewertung darstellen. In diesem Kapitel werden die Aspekte bestimmt, welche für eine Nachhaltigkeitsbewertung des Flugbetriebs für den Flugzeugvorentwurf relevant sind. Dazu zählt zunächst die Bestimmung relevanter Nachhaltigkeitsdimensionen, welche Oberkategorien von Nachhaltigkeitsaspekten darstellen. Darüber hinaus werden die zu betrachtenden Stakeholder bestimmt, welche einerseits unmittelbar im wirtschaftlichen Entscheidungskalkül zu berücksichtigen sind und andererseits entweder externe Effekte verursachen oder von diesen betroffen sind. Schließlich werden die für diese Arbeit relevanten Nachhaltigkeitsaspekte bestimmt.

Weil bereits in unzähligen Quellen mögliche Dimensionen, Stakeholder und Aspekte für eine Nachhaltigkeitsbewertung der Betriebsphase von Luft- oder allgemeinen Transportsystemen bestimmt wurden, kann auf Basis dieser Quellen eine umfassende Auswahl potentieller Dimensionen, Stakeholder und Aspekte bestimmt werden. Da zum einen das Nachhaltigkeitsverständnis der betrachteten Quellen mitunter verschieden ist oder eine genaue Definition ausbleibt und zum anderen der Betrachtungsgegenstand zur Nachhaltigkeitsbewertung der Betriebsphase eines Transportsystems und insbesondere des Luftverkehrssystems umfassender als eine Nachhaltigkeitsbewertung der Betriebsphase eines Flugzeugs ist, müssen in einem zweiten Schritt die für die Zielsetzung dieser Arbeit relevanten Dimensionen, Stakeholder und Nachhaltigkeitsaspekte selektiert werden. Darüber hinaus kann durch dieses Vorgehen gewährleistet werden, dass nach dem aktuellen Konsens in der Literatur alle relevanten Nachhaltigkeitsthemen berücksichtigt werden.

Im Folgenden liegt der Fokus auf die für diese Arbeit als relevant identifizierten Dimensionen, Stakeholder und Nachhaltigkeitsaspekte. Für die ausführliche Dokumentation des Identifikations- und Selektionsprozesses sei auf Kreimeier verwiesen [10].

3.1. Dimensionen

Als relevante Dimensionen wurden die drei klassischen Nachhaltigkeitsdimensionen Ökonomie, Soziales und Ökologie ausgewählt [11][12][13][14]. Nach dem hier verwendeten Konzept der Nachhaltigkeit müssen externe Effekte quantifiziert und internalisiert werden, damit anschließend unter marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten entschieden werden kann (vgl. Abschnitt 2.3). Dies erfordert zwangsläufig die Berücksichtigung der ökonomischen Dimension. Externe Effekte können sowohl durch soziale als auch ökologische Aspekte verursacht werden, weshalb die beiden Dimensionen ebenfalls zu berücksichtigen sind.

Nicht berücksichtigt wurden hingegen die Dimensionen Betrieb, Technik/Technologie und Institution [2][15][16][17][18]. Die ersten beiden Dimensionen umfassen ausschließlich Ursachen, welche Auswirkungen auf die Aspekte der drei selektierten Dimensionen besitzen. Bspw. stellt der spezifische Treibstoffverbrauch eines Flugzeugs

eine Ursache dar und kann nicht unmittelbar monetär bewertet werden. Erst über die damit zusammenhängenden Auswirkungen – wie die Kosten für den benötigten Treibstoff und die externen Kosten für die emittierten Schadstoffe und Treibhausgase bei der Verbrennung und der Treibstoffbereitstellung – kann die Bewertung erfolgen. Da diese Auswirkungen bereits in den selektierten Dimensionen berücksichtigt werden, würde eine Berücksichtigung dieser beiden Dimensionen zu einer unzulässigen Doppelzählung führen. Weiterhin wurde die institutionelle Dimension vernachlässigt, da einerseits etwaige Auswirkungen der Betriebsphase eines Flugzeugs auf Aspekte der institutionellen Dimension kaum systematisierbar sind und andererseits andere, dominantere Einflussfaktoren, wie z.B. politische Strömungen, existieren.

3.2. Stakeholder

Die relevanten Stakeholder wurden in die beiden Kategorien aktive und passive Stakeholder unterteilt. Die Gruppe der aktiven Stakeholder gewährleistet den Betrieb des Luftverkehrssystems und ist Verursacher externer Effekte. Zu dieser Gruppe zählen die Fluggesellschaft, zu welcher alle Auswirkungen der Flugzeuge gezählt werden, der Flughafen und die ATC. Die Gruppe der passiven Stakeholder stellt die Betroffenen der externen Effekte dar. Zu dieser Gruppe zählen Anwohner, (je nach betrachtetem Aspekt auch) die gesamte Bevölkerung und die Passagiere [2][11][12].

3.3. Nachhaltigkeitsaspekte

In TAB 1 sind alle mithilfe der Literaturrecherche identifizierten, potentiellen Nachhaltigkeitsaspekte der drei relevanten Dimensionen zusammengefasst [2][11][12][16][17]. Die Zuordnung der Aspekte zu den entsprechenden Dimensionen stellt die vorherrschende Meinung in der Literatur dar.

Ökonomie	Soziales	Ökologie
Wirtschaftlichkeit	Soziale Gerechtigkeit	Schadstoffe / Lärm
Beitrag zum BIP	Gesundheit / Sicherheit	Treibhausgase
Effizienz	Bezahlbarkeit	Ressourcenerhalt
Kompensation	Gesellschaftl. Entwicklung	Abfall, Abwasser
Opportunitätskosten	Kulturerbe	Flächenbedarf
	Beschäftigung	Artenvielfalt
		Risiken von Umweltkatastrophen
		Energieeffizienz

TAB 1. Potentielle Nachhaltigkeitsaspekte

Im Folgenden wird keine umfassende Erläuterung des gesamten Selektionsprozesses wiedergegeben (vgl. [10]), sondern zunächst die allgemeinen Auswahlkriterien zusammengefasst und anschließend exemplarisch der Auswahlprozess für den Aspekt Gesundheit / Sicherheit durchgeführt. Abschließend wird das Ergebnis des Selektionsprozesses erläutert.

Es lassen sich im Wesentlichen vier Auswahlkriterien bestimmen. Zunächst ist die Frage zu beantworten, ob der betrachtete Aspekt bereits in der vorherrschenden, marktwirtschaftlichen Rahmenordnung abgedeckt wird und daher nicht weiter als eigenständiger Aspekt neben

den ökonomischen Auswirkungen zu betrachten ist. Bspw. wird der Aspekt Beschäftigung als eigenständiger Nachhaltigkeitsaspekt aus diesem Grunde nicht weiter berücksichtigt. Zweitens ist zu klären, ob eine Berücksichtigung des betrachteten Aspekts zu unzulässigen Doppelzählungen führt. Da nach dem Nachhaltigkeitsverständnis in dieser Arbeit neben ökonomischen Aspekten ausschließlich externe Effekte zu quantifizieren sind, würde bspw. eine weitere Berücksichtigung des Aspekts Effizienz – wie bereits anhand des Beispiels spezifischer Treibstoffverbrauch erläutert – zu unzulässigen Doppelzählungen führen. Das dritte Auswahlkriterium stellt die Frage dar, ob für den betrachteten Aspekt belastbare Ursache-Wirkungsbeziehungen vorliegen. Bspw. weisen Studien zum Thema Reisetrombose als Teilaspekt von Gesundheit / Sicherheit für eine Quantifizierung des Ist-Zustands eine sehr große Unsicherheit auf. Von einer fehlenden Assoziation von Langstreckenreisen und thromboembolischen Ereignissen bis hin zu 10 % asymptomatischer Thrombose kann eine große Spannweite verschiedener Werte identifiziert werden [19]. Dementsprechend liegen keine ausreichend belastbaren Ergebnisse vor, wie sich z.B. eine geringere Reisedauer aufgrund eines schnelleren Flugzeugs oder ein größerer Sitzabstand auf die Anzahl der thromboembolischen Ereignisse auswirkt. Als letztes Auswahlkriterium ist zu analysieren, ob andere, weitaus dominantere Einflussquellen, welche außerhalb des Betrachtungsraums dieser Analyse liegen, für den betrachteten Aspekt existieren. Bspw. ist davon auszugehen, dass Aspekte der sozialen Gerechtigkeit erheblich stärker durch politische Maßnahmen beeinflusst werden, als durch den Flugbetrieb des betrachteten Flugzeugvorentwurfs.

Bei dem Aspekt Gesundheit / Sicherheit wird zwischen Gesundheit und Sicherheit unterschieden. Unter Sicherheit wird das Unfallrisiko im Luftverkehrssystem verstanden und als zu bewertender Nachhaltigkeitsaspekt ins Bewertungsmodell aufgenommen. Der Aspekt Gesundheit wird hingegen als eigenständiger Aspekt im Bewertungsmodell nicht berücksichtigt, was bei näherer Betrachtung deutlich wird. Bei den übrigen Aspekten werden Auswirkungen thematisiert, sodass für eine konsistente Formulierung unter Gesundheit folglich die Auswirkungen auf die Gesundheit zu verstehen sind. Die beiden wesentlichen Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen stellen Lärm und Schadstoffe dar. Diese beiden Aspekte werden jedoch ihrerseits bereits in der Nachhaltigkeitsbewertung berücksichtigt, sodass aus Gründen der Doppelzählung eine weitere Berücksichtigung der gesundheitlichen Auswirkungen von Lärm und Schadstoffen nicht zulässig ist. Darüber hinaus können weitere Auswirkungen auf die Gesundheit der Insassen des Flugzeugs identifiziert werden. Darunter fallen zum einen eine erhöhte Strahlenbelastung während des Flugs und zum anderen Reisekrankheiten der Passagiere, von denen die Reisetrombose die dominanteste Reisekrankheit darstellt. Laut dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) konnte bisher keine der durchgeführten Studien „mit hinreichender statistischer Signifikanz einen Anstieg schädlicher gesundheitlicher Effekte aufgrund von Strahlenexpositionen beim untersuchten Flugpersonal zeigen“ [20]. Die Gründe, weshalb die Reisetrombose nicht berücksichtigt wird bzw. werden kann, wurden bereits erläutert.

Nach Abschluss des Selektionsprozess wurden neun relevante Aspekte identifiziert, welche in TAB 2 zusammengefasst sind.

Relevante Aspekte	
Schadstoffe	Unfallrisiko
Treibhausgase	Abfall
Lärm	Abwasser
Flächenbedarf	Gewinn (Wirtschaftlichkeit)
Opportunitätskosten	

TAB 2. Relevante Aspekte zur Nachhaltigkeitsbewertung des Flugbetriebs für den Flugzeugvorentwurf

Eine genaue Erläuterung und Analyse der einzelnen Aspekte wird im folgenden Kapitel durchgeführt.

4. QUANTIFIZIERUNG DER NACHHALTIGKEITSASPEKTE

Mit Ausnahme des Aspekts Gewinn handelt es sich bei den übrigen Aspekten um externe Effekte. Zur Bestimmung der externen Kosten dieser Aspekte werden jeweils vier Schritte durchgeführt, wobei je nach Aspekt Schritte entfallen können, sofern das Ergebnis des Schritts offensichtlich ist. In BILD 1 ist die Vorgehensweise skizziert.

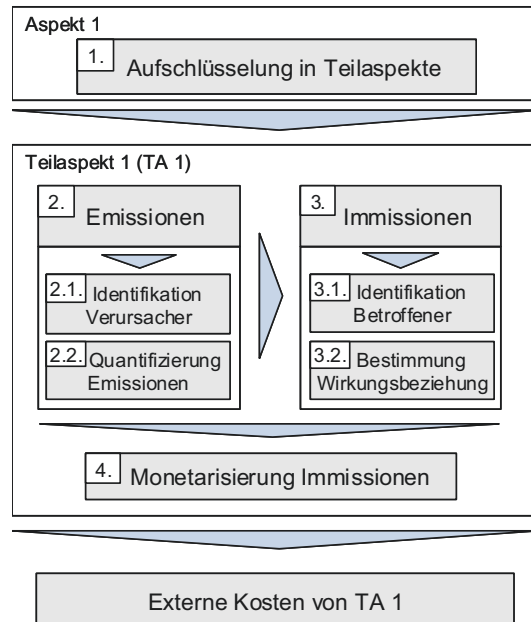


BILD 1. Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Bestimmung der externen Kosten einzelner Aspekte

Im ersten Schritt wird der betrachtete Aspekt – sofern nötig – in Teilaspekte aufgeschlüsselt. Bspw. zählt zum gesamten Flächenbedarf eines Flughafens einerseits der physische Flächenbedarf für Gebäude, Vorfeld, Landebahnen etc. und andererseits die Fläche der Siedlungsbeschränkungen durch Lärmschutzverordnungen. Die nachfolgenden Schritte werden für jeden Teilaspekt durchgeführt. Im zweiten Schritt werden die Emissionen analysiert. Dazu werden zunächst die Verursacher, d.h. die aktiven Stakeholder, identifiziert (2.1.) und anschließend die verursachten Emissionen quantifiziert (2.2.). Im dritten Schritt werden analog zum zweiten Schritt die Immissionen untersucht, indem zuerst die Betroffenen, d.h. die passiven Stakeholder, identifiziert werden (3.1.) und darauf folgend die Wirkungsbeziehung von den Emissionen zu den Immissionen der betroffenen Stakeholder

bestimmt wird (3.2.). Zu den betroffenen Stakeholdern wird in diesem Zusammenhang ebenfalls die Natur gezählt. Dadurch ist es möglich, je nach identifiziertem, passivem Stakeholder die Zuordnung zur Dimension zu bestimmen. Im letzten Schritt werden die Immissionen monetär bewertet (4.). Durch diese Analyse ist es schließlich möglich, die externen Kosten des betrachteten Teilaspekts zu bestimmen.

Im Quantifizierungsprozess ist es notwendig, diverse Annahmen zu treffen und Parameter abzuschätzen, da ein Großteil der Informationen im Stadium des Flugzeugvorentwurfs noch nicht bekannt ist oder in der Literatur verschiedene Werte angegeben werden. Das Vorhandensein uneindeutiger Kostenfaktoren von externen Effekten führt zu subjektiven Einflüssen im Bewertungsmodell. Für diese Parameter werden neben den Minimal- und Maximalwerten auch die wahrscheinlichsten Werte bestimmt. Sofern Parameter vom jeweiligen Flughafen abhängig sind, wird – falls nicht explizit anderweitig beschrieben – der Flughafen Frankfurt als Beispielflughafen betrachtet. Das Bezugsjahr der Geldwerte stellt das Jahr 2012 dar. Zur Auf- oder Abzinsung wird eine durchschnittliche Inflationsrate von 3 % unterstellt.

4.1. Schadstoffe

Der Aspekt Schadstoffe kann in zwei Kategorien unterteilt werden. Die erste Kategorie umfasst Teilaspekte der direkten Schadstoffemissionen durch Verbrennung von Kerosin und anderen Brennstoffen durch aktive Stakeholder des Luftverkehrssystems. Zu dieser Kategorie zählen die Schadstoffemissionen des Flugzeugs und des Flughafens. Die zweite Kategorie beinhaltet Teilaspekte der indirekten Schadstoffemissionen durch Stromverbrauch und Treibstoffbereitstellung. Etwaige Emissionen durch Fernwärme und Kälteversorgung können hingegen vernachlässigt werden [9].

4.1.1. Direkte Schadstoffemissionen des Flugzeugs

Als Schadstoffe werden Feinstaubpartikel mit einem Durchmesser kleiner als 10 µm (PM₁₀), Stickoxide (NO_x), flüchtige organische Verbindungen mit Ausnahme von Methan (NMVOC), Schwefeldioxid (SO₂) und Kohlenmonoxid (CO) betrachtet [9][21]. Für die Schadstoffemissionen des Flugzeugs wird nur der LTO-Zyklus betrachtet, da unter diesem Aspekt ausschließlich lokale Auswirkungen berücksichtigt werden. Die Emissionsquantitäten σ_s des Schadstoffs s während des LTO-Zyklus des zu bewertenden Flugzeugs werden für das Bewertungsmodell als bekannt vorausgesetzt. Da diese Schadstoffe Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen, die Ertragsfähigkeit von Feldpflanzen und (Bau-)Materialien besitzen [9][21], werden als betroffene Stakeholder die lokale Gesellschaft bzw. Anwohner identifiziert, sodass Schadstoffe ein soziales Problem darstellen. Weil eine hinreichend genaue Berechnung der Ausbreitung und der Verweilzeit der emittierten Schadstoffe aufwendige Simulationen benötigt, werden Schadenskostenfaktoren für den Flughafen Frankfurt aus der Literatur übernommen [9]. Unter Berücksichtigung der etwa 1,1 Millionen Menschen, welche in einer den Flughafen umgebenden Fläche von 40 x 40 km² leben, können spezifische Schadenskostenfaktoren je Anwohner (Anw) bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in TAB 3. dargestellt.

s	PM ₁₀	NO _x	NMVOC	SO ₂	CO
$\beta_{ss,s}$ [$\frac{\text{€}}{\text{t} \times \text{Anw}}$]	0,265	3,4e-3	2,4e-3	8,4e-3	4,15e-7

TAB 3. Schadenskostenfaktoren von Schadstoffen pro Person in [€ / (t · Anw)] [9]

Zwecks Sensibilitätsbetrachtung wird ein Wert von n_{ss,b} = 1,1 [0,5; 3] Mio Betroffenen angenommen. Schließlich können die externen Kosten der Schadstoffemissionen des Flugzeugs K_{ss,flzg} in Abhängigkeit der Schadstoffemissionen σ_s für einen LTO-Zyklus bestimmt werden:

$$(1) \quad K_{ss,flzg}(\sigma_s) = n_{ss,b} \times \sum_{s \in S} \beta_{ss,s} \times \sigma_s$$

4.1.2. Direkte Schadstoffemissionen des Flughafens

Direkte Schadstoffemissionen des Flughafens werden vor allem durch fossile Brennstoffe verursacht. Im Jahr 2011 verbrauchte der Flughafen Frankfurt umgerechnet 13,569 Mio Liter Diesel [22]. Weiterhin wird ein linearer Zusammenhang der Schadstoffemissionen des Flughafens zu den abgefertigten Work-Load Units (WLUs) angenommen. Unter Berücksichtigung der 78,9 Mio abgefertigten WLUs im Jahr 2011, den Grenzwerten der Euro IV-Norm für LKWs und Busse, einem Motorwirkungsgrad von 40 % [23], einer Dichte von 0,85 kg/l und einem Heizwert von 42 MJ/kg [24] ergeben sich Schadstoffemissionen von 0,0134 g PM₁₀ und 2,36 g NO_x pro WLU. Unter Berücksichtigung der Schadenskostenfaktoren β_{ss,s} nach TAB 3 und der Anzahl Betroffener n_{ss,b} können in Abhängigkeit der Anzahl an Passagieren (WLUs), welche sich durch die Passagierkapazität κ multipliziert mit dem Sitzladefaktor f_{sl} ergibt, die externen Kosten der Schadstoffemissionen des Flughafens K_{ss,fh} je Flug folgendermaßen berechnet werden:

$$(2) \quad K_{ss,fh}(\kappa, f_{sl}) = 2,32e-8 \times n_{ss,b} \times \kappa \times f_{sl} \times \frac{\text{€}}{\text{Pax} \times \text{Anw} \times \text{Flug}}$$

4.1.3. Indirekte Schadstoffemissionen durch Stromverbrauch

(Externer) Strom wird in nennenswertem Maße nur vom Flughafen verbraucht. Im Jahr 2011 wurden 331,5 GWh vom Flughafenbetreiber des Flughafen Frankfurts verbraucht [22], sodass sich ein durchschnittlicher Verbrauch von x_{str} = 5,87 kWh/WLU ergibt. Im Gegensatz zu den direkten Emissionen sind in diesem Fall die betroffenen Stakeholder die Anwohner in der Nähe der Kraftwerke. Die Schadenskostenfaktoren nach TAB 3 können daher nicht benutzt werden. Aus der Literatur können Kostenfaktoren für Schadstoffemissionen bei der Stromerzeugung von β_{ss,str} = 0,0145 €/kWh in Deutschland bestimmt werden [9]. Die externen Kosten der indirekten Schadstoffemissionen durch Stromverbrauch K_{ss,str} können somit je Flug, welcher zwei 2 Flugbewegungen (Fbw) umfasst, in Abhängigkeit der abgefertigten WLUs bestimmt werden:

$$(3) \quad K_{ss,str}(\kappa, f_{sl}) = \frac{2Fbw}{\text{Flug}} \times \beta_{ss,str} \times x_{str} \times \kappa \times f_{sl}$$

4.1.4. Indirekte Schadstoffemissionen durch Treibstoffbereitstellung

Beim Herstellungsprozess von Kerosin werden ebenfalls Schadstoffe emittiert. Die Hauptverbraucher von Treibstoffen im Luftverkehrssystem stellen die Flugzeuge dar [25]. Der Treibstoffverbrauch v wird in Liter pro Flug mit einem Missionsanalyseprogramm des Instituts für Luft- und Raumfahrtsysteme (ILR) der RWTH Aachen berechnet und kann daher für das Bewertungsmodell als bekannt vorausgesetzt werden [26]. In TAB 4 sind die Emissionsquantitäten für die Extraktion und den Transport von Erdöl, die Raffinierung und die Verteilung des Kerosins aufgelistet [27]. Es handelt sich dabei um Emissionsfaktoren für Deutschland.

s	PM ₁₀	NO _x	NM VOC	SO ₂	CO
$\left[\frac{g}{GJ} \right]$	1,1	36,3	80	50,9	4,5

TAB 4. Emissionsquantitäten von Schadstoffen für die Herstellung von Kerosin [27]

Es können die Schadenskostenfaktoren nach TAB 3 nicht verwendet werden, da unklar ist, wie viele Menschen von den Schadstoffemissionen der einzelnen Prozessschritte betroffen sind. Die externen Schadstoffkosten verursacht durch die Treibstoffbereitstellung einer Treibstoffmenge von 6900 TJ Kerosin werden in der Literatur zu 2,826 Mio €₂₀₀₀ bestimmt [9]. Bei einer Dichte von 0,8 kg/l und einem Heizwert von 43,2 MJ/kg [28] für Jet-A1 ergeben sich externe Schadstoffkosten von $\beta_{ss, tb} = 0,0202$ €/l. Somit lassen sich die externen Schadstoffkosten $K_{ss, tb}$ für einen Flug in Abhängigkeit des Treibstoffverbrauchs v folgendermaßen bestimmen:

$$(4) \quad K_{ss, tb}(v) = \beta_{ss, tb} \cdot v$$

4.2. Treibhausgase

Die Unterteilung von Treibhausgasen in Teilaspekte erfolgt analog zum Aspekt Schadstoffe, da sowohl Schadstoff- als auch Treibhausgasemissionen bei denselben Prozessen verursacht werden. Die Treibhausgasemissionen durch Fernwärme und Kälteversorgung können ebenfalls vernachlässigt werden [9]. Obwohl letztlich die gesamte Gesellschaft von den Auswirkungen der Klimaerwärmung betroffen ist, wird dies in erster Linie als ökologisches Problem verstanden.

4.2.1. Direkte Treibhausgasemissionen des Flugzeugs

Bei der Verbrennung eines Kilogramms Kerosins (Jet-A1) entstehen 3,154 kg CO₂ [9]. Unter Berücksichtigung des Treibstoffverbrauchs v des betrachteten Flugs können die CO₂-Emissionswerte unmittelbar berechnet werden. Neben den CO₂-Emissionen werden im Luftverkehr weitere Treibhausgase emittiert, wie z.B. Stickoxide, Wasserdampf, Kondensstreifen und Zirren [29]. Der durch die weiteren Treibhausgase verursachte zusätzliche Treibhauseffekt wird über den sog. Strahlungsantriebsfaktor r_{thg} berücksichtigt. Er ist definiert als „das Verhältnis des gesamten (luftverkehrsbedingten) Strahlungsantriebs zum (luftverkehrsbedingten) Strahlungsantrieb von Kohlendioxidemissionen allein“ [30]. Als Schadenskostenfaktoren der Emission einer Tonne CO₂ werden in der Literatur

eine ganze Bandbreite unterschiedlicher Werte angegeben [2][9][21][31]. Für das Bewertungsmodell werden die Schadenskostenfaktoren des Umweltbundesamts mit $\beta_{CO_2} = 70$ [20; 280] €/t übernommen. Unter Berücksichtigung der Dichte von 0,8 kg/l ergeben sich die externen Kosten durch direkte Treibhausgasemissionen des Flugzeugs $K_{thg, flzg}$ in Abhängigkeit des Treibstoffverbrauchs v je Flug zu:

$$(5) \quad K_{thg, flzg}(v) = 2,523 \frac{kg \ CO_2}{l \ JetA1} \cdot r_{thg} \cdot \beta_{CO_2} \cdot v$$

4.2.2. Direkte Treibhausgasemissionen des Flughafens

Im Jahr 2011 wurden am Flughafen Frankfurt 35.631,5 t-CO₂ emittiert [22][32][33], woraus sich eine durchschnittliche Emissionsmenge von $x_{thg, fh} = 0,4516$ kg-CO₂/WLU berechnen lässt. Entsprechend der Schadstoffemissionen des Flugzeugs (Kap 4.1.2) wird ein linearer Zusammenhang der Treibhausgasemissionen zu den abgefertigten WLUs angenommen. Die externen Kosten durch direkte Treibhausgasemissionen des Flughafens $K_{thg, fh}$ ergeben sich in Abhängigkeit der abgefertigten WLUs je Flug zu:

$$(6) \quad K_{thg, fh}(k, f_{sl}) = \frac{2 \ Fbw}{Flug} \cdot x_{thg, fh} \cdot \beta_{CO_2} \cdot k \cdot f_{sl}$$

4.2.3. Indirekte Treibhausgasemissionen durch Stromverbrauch

Nach Abschnitt 4.1.3. beträgt der durchschnittliche Stromverbrauch am Flughafen Frankfurt $x_{str} = 5,87$ kWh/WLU. Bei dem in Deutschland vorherrschenden Kraftwerksmix betragen die CO₂-Emissionen $x_{thg, str} = 0,579$ kg-CO₂/kWh [9]. Die externen Kosten durch Treibhausgasemissionen verursacht durch Stromverbrauch $K_{thg, str}$ ergeben sich in Abhängigkeit der abgefertigten WLUs je Flug zu:

$$(7) \quad K_{thg, str}(k, f_{sl}) = \frac{2 \ Fbw}{Flug} \cdot \beta_{CO_2} \cdot x_{thg, str} \cdot x_{str} \cdot k \cdot f_{sl}$$

4.2.4. Indirekte Treibhausgasemissionen durch Treibstoffbereitstellung

Bei der Bereitstellung von einem GJ-Kerosin fallen 6,668 kg CO₂-Äquivalente an [27]. Bei einem Heizwert von 43 MJ/kg und einer Dichte von 0,8 kg/l ergeben sich spezifische CO₂-Emissionen von $x_{thg, tb} = 0,229$ kg CO₂/l. Damit können die externen Kosten durch Treibhausgasemissionen verursacht durch Treibstoffbereitstellung $K_{thg, tb}$ in Abhängigkeit des Treibstoffverbrauchs v je Flug folgendermaßen berechnet werden:

$$(8) \quad K_{thg, tb}(v) = x_{thg, tb} \cdot \beta_{CO_2} \cdot v$$

4.3. Lärm

Der Aspekt Lärm beinhaltet im Wesentlichen zwei unterschiedliche Auswirkungen. Zum einen besitzt Lärm eine unmittelbare Wirkung auf die Physiologie des Menschen und zum anderen gibt es indirekte Auswirkungen auf die Gesellschaft durch Siedlungsbeschränkungen aufgrund von Lärmschutzverordnungen. Letzterer Teilaspekt wird zum Aspekt Flächenbedarf gezählt und daher im Aspekt Lärm nicht weiter berücksichtigt.

Die Auswirkungen durch Lärm auf den Menschen werden mithilfe des gewichteten, energieäquivalenten Dauerschallpegels L_{den} bewertet [9][21][34]. Zur Bestimmung dieses Dauerschallpegels wird die emittierte Schallenergie aller Lärmereignisse innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden bestimmt und derjenige energieäquivalente Dauerschallpegel berechnet, bei dem eine fiktive Quelle konstanter Schalleistung über denselben Zeitraum dieselbe Schallenergie emittiert. Weil Menschen abends und nachts empfindlicher auf Fluglärm reagieren [35], werden Lärmereignisse abends (18-22 Uhr) mit einem Malus von 5 dB(A) und nachts (22-06 Uhr) mit 10 dB(A) beaufschlagt [36]. Der energieäquivalente Dauerschallpegel weist ein nichtlineares Verhalten zu der durch Flugzeuge emittierten Schallenergie innerhalb des betrachteten Zeitraums auf. Dies führt dazu, dass – im Gegensatz zu Schadstoffen – die marginalen Lärmkosten durch eine zusätzliche Flugbewegung von den bereits vorhandenen Lärmemissionen, d.h. vom Bezugszustand, abhängig sind. Daher kann nicht auf konstante Lärmkostenfaktoren zurückgegriffen werden. Um die marginalen, externen Lärmkosten in Abhängigkeit der Flugzeuglärmemissionen und des Bezugszustands ohne aufwendige Simulationen bestimmen zu können, wurde eine Berechnungsmethodik zur Abschätzung dieser Kosten entwickelt. Als dominanteste Emissionsquelle wird in dieser Methodik ausschließlich Lärm von Flugzeugen berücksichtigt. Der Schallemissionspegel L_{veW} des zu betrachtenden Flugzeugvorentwurfs wird für dieses Modell als bekannt vorausgesetzt.

Zur Aufstellung der vereinfachten Berechnungsmethodik findet zunächst eine elementare Betrachtung eines gleichmäßig beschleunigten Flugzeugstarts statt, um den resultierenden, ungewichteten Dauerschallpegel L_{eq} zu berechnen. In dieser Betrachtung wird von einer kugelförmigen Schallausbreitung ohne Dämpfung ausgegangen. Der Startvorgang wird vereinfachend als zweidimensionales Problem betrachtet. Anschließend wird eine Beziehung zwischen dem ungewichteten und gewichteten Dauerschallpegel hergeleitet. Diese elementare Betrachtung wird mit realen Lärmkartierungen der reinen Startbahn des Flughafens Frankfurt verglichen [37]. Weil der Flughafen Frankfurt zwei weitere Start- und Landebahnen besitzt, wird davon ausgegangen, dass rund ein Drittel der Flugbewegungen $\alpha = 445$ auf der betrachteten Startbahn stattfinden [22]. Für die durchschnittliche Schallemissionsleistung der Flugzeuge wird auf Lärmzertifizierungswerte zurückgegriffen. Es wird von einem Schallpegel von $L_* = 82$ dB(A) in 450 m Entfernung ausgegangen [38]. Nach Berechnung des resultierenden Dauerschallpegels bei $\alpha = 445$ Startvorgängen mithilfe der elementaren Betrachtung werden anschließend die Modellparameter zur hinreichend genauen Übereinstimmung angepasst. Bei Berechnung der Dauerschallpegelerhöhung ist es unerheblich, ob der gewichtete oder ungewichtete Dauerschallpegel betrachtet wird, sofern davon ausgegangen wird, dass der betrachtete Flugzeugstart mit den Wahrscheinlichkeiten der relativen Häufigkeit der übrigen Flugbewegungen zur entsprechenden Tageszeit stattfindet. Um die marginale Dauerschallpegelerhöhung durch einen weiteren Flugzeugstart zu bestimmen, wird neben dem bereits berechneten Bezugszustand ein weiterer Zustand bestimmt. In diesem Zustand wird zu den Startvorgängen des Bezugszustands ein weiterer Startvorgang des betrachteten Flugzeugs mit dem Schallemissionspegel L_{veW} in 450 m Entfernung modelliert. Es wird vereinfachend angenommen, dass alle Startvorgänge mit der gleichen, konstanten Beschleunigung durchgeführt

werden. Die Differenzbildung beider Lärmpegel ergibt die gesuchte Dauerschallpegelerhöhung ΔL :

$$(9) \quad \Delta L(\alpha, L_*, L_{veW}) = -10 \lg(\alpha) + 10 \lg \left(\alpha \times 10^{\frac{L_*}{10}} + 10^{\frac{L_{veW}}{10}} \right) - L_*$$

Es zeigt sich, dass unter den gegebenen Annahmen die Lärmpegelerhöhung im entsprechenden Lärmgebiet konstant ist. Weiterhin handelt es sich bei Vernachlässigung von Dämpfungseigenschaften und einer kugelförmigen Schallausbreitung um systematische Abweichungen, welche sowohl bei Berechnung des Bezugszustands als auch bei Berechnung des zusätzlichen Flugzeugstarts auftreten. Aufgrund der Differenzbildung sind diese systematischen Abweichungen für die Bestimmung der Lärmpegeldifferenz unerheblich. Vereinfachend wird nicht zwischen Start- und Landevorgängen unterschieden, da diese – verglichen mit Unsicherheiten in der Monetarisierung – zu relativ ähnlichen externen Lärmkosten führen [9].

Zur Monetarisierung von Fluglärm wurde eine Reihe von Studien untersucht [9][21][39][40][41]. In all diesen Studien werden Auswirkungen auf die Natur vernachlässigt, da hauptsächlich Anwohner von Fluglärm betroffen sind und dieser Aspekt folglich als soziales Problem verstanden wird. Nach der hedonischen Methode auf Basis der Wirkung von Fluglärm auf Immobilien kann ein Wert von $\beta_{noi} = 38,37$ € pro Betroffener, Jahr und dB(A) ab einem Schwellwert von 55 dB(A) bestimmt werden [9]. Allerdings weisen Schipper et al. darauf hin, dass mittels direkter Zahlungsbereitschaftsstudien, sog. kontingente Methoden, etwa 4 bis 20 Mal so große Werte bestimmt werden können [41]. Am Flughafen Frankfurt sind insgesamt 240.000 Menschen einem Dauerschallpegel von über 55 dB(A) ausgesetzt [36]. Da eine Flugbewegung nur auf einer der drei Start- und Landebahnen stattfindet, wird von $n_{noi,b} = 80.000$ Betroffenen bei einem Start- oder Landevorgang ausgegangen. Am Flughafen London Heathrow sind in etwa die fünffache Anzahl an Anwohner je Flugbewegung betroffen [42]. Zur Bestimmung des Sensitivitätsintervalls der externen Lärmkosten wird der Faktor f_{noi} eingeführt, welcher unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Monetarisierung und der unterschiedlichen Anzahl Betroffener je nach Flughafen auf das Zwanzigfache begrenzt wird. Von einem Minimalwert wird abgesehen, sodass sich $f_{noi} \in [1; 20]$ ergibt. Schließlich können die externen Lärmkosten eines Flugs unter Berücksichtigung von Gleichung (9) in Abhängigkeit des Lärmemissionswerts L_{veW} bestimmt werden:

$$(10) \quad K_{noi}(L_{veW}) = \frac{2Fbw}{Flug} \times f_{noi} \times n_{noi,b} \times \beta_{noi} \times \frac{1 \text{ Jahr}}{365 \text{ Tage}} \times \Delta L(L_{veW}) \times \frac{Tag}{Fbw}$$

4.4. Flächenbedarf

Dieser Aspekt lässt sich in den Verlust von Waldfläche aufgrund des großen Flächenbedarfs von Flughäfen und in Siedlungsbeschränkungen aufgrund von Lärmschutzverordnungen unterteilen. Sonstige Auswirkungen aufgrund versiegelter Flächen, Verbrauch von Enteisungsmitteln oder Reifenabrieb können vernachlässigt werden [9].

4.4.1. Verlust von Waldfläche

Für diesen Teilaspekt ist die Bestimmung des tatsächlichen, marginalen Flächenbedarfs für eine zusätzliche Flugbewegung problematisch, da davon auszugehen ist, dass der Flächenbedarf des Flughafens eine sprunghafte Funktion in Abhängigkeit der Anzahl der Flugbewegungen darstellt. Es wird jedoch auf eine Grenzwertbetrachtung verzichtet und ein durchschnittlicher Flächenbedarf pro Flugbewegung bestimmt. Nach heutigem Stand wird der Flughafen Frankfurt um eine weitere Landebahn ausgebaut. Durch diesen Schritt sollen die Flugbetriebsflächen von aktuell 1.087 ha auf 1.475 ha ansteigen, während die Flugbewegungen von 485.000 auf planmäßig 700.000 im Jahr 2020 zunehmen sollen [22][43]. Dies entspricht einem durchschnittlichen Flächenbedarf von $A_{fb,vw} = 18,22 \text{ m}^2$ pro Flugbewegung pro Jahr.

Der Einfluss der Größe eines Flugzeugs auf den Flächenbedarf des Flughafens wird anhand der Verwendungsdauer der Flugbetriebsflächen bestimmt. Da die Kapazität der Luftseite des Flughafens i.A. von der Kapazität der Start- und Landebahnen abhängt [11], werden Flugzeuggewichte auf Basis der geforderten Mindeststartabstände bestimmt. Nach der FAA werden Flugzeuge in Abhängigkeit des Maximum Take-off Weight (MTOW) den drei Kategorien small, large oder heavy zugeordnet [44]. Dabei sind für den Flughafen Frankfurt 20 % der entsprechenden Flugzeuge der Kategorie small ($MTOW \leq 18,6 \text{ t}$), 60 % large ($18,6 \text{ t} < MTOW \leq 116 \text{ t}$) und 20 % heavy ($MTOW > 116 \text{ t}$) zuzuordnen [11]. Unter Berücksichtigung der Mindeststartabstände der Flugzeugkategorien [11] und der Annahme stochastischer Unabhängigkeit des führenden und folgenden Flugzeugs ergeben sich die Gewichtungsfaktoren in TAB 5.

Kategorie g	Small	Large	Heavy
$\eta_{fb,vw}^g$	0,503	1,074	1,275

TAB 5. Gewichtungsfaktoren für den Flächenbedarf in Abhängigkeit der Flugzeugkategorien

In erster Linie besitzen lokale Wälder Erholungsfunktionen für den Menschen, sodass dieser Teilaspekt der sozialen Dimension zugeordnet werden kann. Nach Zahlungsbereitschaftsstudien von Elsasser [45] und der Infraconsult AG [46] können für Wälder in der Nähe von Ballungsgebieten Kostenfaktoren von $\beta = 25.000 \text{ €/ha/Jahr}$ ermittelt werden. Zusammenfassend ergeben sich die externen Kosten durch den Verlust von Waldfläche $K_{fb,vw}$ in Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors $\eta_{fb,vw}^g$ je Flug damit zu:

$$(11) \quad K_{fb,vw}(\eta_{fb,vw}^g) = 2 \frac{Fbw}{Flug} \times \eta_{fb,vw}^g \times \beta_{fb,vw} \times A_{fb,vw}$$

4.4.2. Siedlungsbeschränkung

Eine Siedlungsbeschränkung wird ab einer Belastung des ungewichteten Dauerschallpegels L_{eq} von über 60 dB(A) verordnet [9]. Am Flughafen Frankfurt wird eine Siedlungsbeschränkung in Höhe von 233 ha ausgewiesen [9]. Die in Abschnitt 4.3. entwickelte Berechnungsvorschrift zur Bestimmung des absoluten Dauerschallpegels ist in großer Entfernung u.a. aufgrund der Vernachlässigung von Dämpfungseigenschaften zu ungenau. Weiterhin ist

unklar, welcher Anteil der zusätzlichen Fläche in einer Siedlungsbeschränkung resultiert. Es wird daher ein linearer Zusammenhang zwischen der Fläche der Siedlungsbeschränkung und den anhand von Lärmemissionswerten gewichteten Flugbewegungen angenommen. Für den Flughafen Frankfurt ergibt sich bei 485.000 Flugbewegungen ein Durchschnittswert von $4,8 \text{ m}^2$ Siedlungsbeschränkung pro Flugbewegung und Jahr. Unter Berücksichtigung des Verhältnisses der emittierten Schalleistung des betrachteten Flugzeugs L_{vev} zu den durchschnittlichen Emissionswerten L^* kann die zusätzliche Fläche der Siedlungsbeschränkung durch eine Flugbewegung folgendermaßen bestimmt werden:

$$(12) \quad A_{fb, sb}(L_{vev}) = 10^{\frac{L_{vev} - L^*}{10}} \times 4,8 \frac{\text{m}^2 \times \text{Jahr}}{Fbw}$$

Durch die Siedlungsbeschränkung folgt eine Umwandlung von Bauerwartungs- (Wert: 77,42 €/m²) zu Ackerland (Wert: 3,71 €/m²) [9]. Da die entsprechenden Eigentümer der Landflächen von Siedlungsbeschränkungen betroffen sind, stellt dieser Teilaspekt ein soziales Problem dar. Unter den Annahmen, dass ein Flughafen nach 100 Jahren total erneuert werden muss und einer Inflationsrate von 3 % ergibt sich mithilfe des Rentenbarwertfaktors eine Annuität von $\beta_{fb, sb} = 2,33 \text{ €/}(m^2 \times \text{Jahr})$. Janic bestimmt einen Wert von 60 - 100 €/m² für den Flughafen Amsterdam Schiphol [11]. Für 100 €/m² entspricht dies einer Annuität von $\beta_{fb, sb} = 3,05 \text{ €/m}^2$. Dieser Wert soll als Obergrenze für diesen Parameter verwendet werden. Zusammenfassend ergeben sich die externen Kosten aufgrund von Siedlungsbeschränkungen $K_{fb, sb}$ in Abhängigkeit des Lärmemissionswerts L_{vev} je Flug zu:

$$(13) \quad K_{fb, sb}(L_{vev}) = 2 \frac{Fbw}{Flug} \times \beta_{fb, sb} \times A_{fb, sb}(L_{vev})$$

4.5. Opportunitätskosten

Für den Aspekt Opportunitätskosten können die zwei Teilaspekte Kosten der planmäßigen Transferdauer und Kosten für Verspätungen, identifiziert werden. Generell ist zu erwarten, dass die Opportunitätskosten der planmäßigen Transferdauer durch die Bezahlung der Ticketpreise bereits internalisiert sind und es sich daher um keine externen Kosten handelt. Eine vergleichsweise kürzere Reisezeit geht mit einer höheren Zahlungsbereitschaft der Passagiere einher, wodurch reale Zahlungsströme verursacht werden. Dieser Einfluss ist daher unter den ökonomischen Aspekten zu berücksichtigen. Unter den externen Opportunitätskosten werden daher nur die nicht internalisierten Kosten für Verspätungen berücksichtigt.

Für das Jahr 2010 gibt das American Aviation Institute für 6.450.118 Flüge in den USA eine Verspätung von 63.257.793 Minuten an [47]. Dies entspricht einer durchschnittlichen Verspätung von 9,81 Minuten pro Flug. Darüber hinaus wird der Anteil pünktlicher Flüge in Abhängigkeit der Routendistanz D angegeben. Es wird vereinfacht angenommen, dass Flüge jeder Distanz gleich oft auftreten und die Verspätungsdauer der verspäteten Flugzeuge keine Abhängigkeit zur Routenlänge aufweist. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Verspätung eines Flugzeugs und dem Anteil verspäteter Flüge ergibt sich folgender linearer Zusammenhang zur Bestimmung der erwarteten, durchschnittlichen Verspätung T_{del} eines Flugs in Abhängigkeit der Routendistanz D, wobei diese die Einheit nautische Meile (nm) besitzt:

$$(14) \quad T_{del}(D) = \left(7,35 + 1,792 \times 10^{-3} \times D \times \frac{1}{nm} \right) \times \frac{min}{Flug}$$

Die Opportunitätskostensätze werden auf Basis des Bruttoverdienstes der Passagiere quantifiziert [11][48][49]. Dieser Aspekt wird daher der sozialen Dimension zugeordnet. Als Wirtschaftsraum werden die USA und Europa betrachtet. Passagiere können privat oder beruflich reisen. Für Privatreisende ist der einfache Bruttolohn relevant, während für Geschäftsreisende neben Lohn- auch Overhead- und sonstige Kosten berücksichtigt werden müssen. Der Anteil an Geschäftsreisenden beträgt in etwa 35 % [50][51]. Für die höher anzusetzenden Opportunitätskosten kann ein Faktor von 2-3 verwendet werden [11]. Der durchschnittliche Bruttoverdienst in der EU-27 und den USA beträgt 16,82 €/h [52][53][54], sodass sich bei einem 2,5-fachen Opportunitätskostensatz für Geschäftsreisende ein durchschnittlicher Opportunitätskostensatz von $\beta_{opk} = 25,65$ €/h ergibt. Für den Sensitivitätsbereich lässt sich ein Intervall von $\beta_{opk} \in [15,87; 39,98]$ €/h identifizieren. Damit können die externen Kosten durch Verspätungen K_{del} in Abhängigkeit der Passagiere und der Routendistanz D je Flug bestimmt werden:

$$(15) \quad K_{del}(\kappa, f_{sl}, D) = \kappa \times f_{sl} \times \beta_{opk} \times T_{del}(D)$$

4.6. Unfallrisiko

In der Literatur besteht kein Konsens, ob das Unfallrisiko der Insassen des Flugzeugs bereits internalisiert ist [9][11]. Da es zweifelhaft ist, dass Passagiere und Crew bei Berufswahl bzw. Ticketbuchung das Unfallrisiko – wenn überhaupt – korrekt einschätzen, werden die Unfallkosten aller Beteiligten als externe Kosten der sozialen Dimension berücksichtigt. Im Gegensatz zu den übrigen externen Kosten, handelt es sich bei der Monetarisierung des Unfallrisikos um erwartete, externe Kosten.

Das Unfallrisiko wird auf Basis empirischer Daten bestimmt. In der Zeit von 2002 bis 2011 traten 79 Unfälle mit Todesfolge auf [55]. Bei insgesamt 204,9 Mio Abflüge entspricht dies einer relativen Unfallhäufigkeit von $p_{ur,h} = 0,39 \times 10^{-6}$ Unfälle mit Todesfolge pro Abflug [55]. Bei den 79 Unfällen starben insgesamt 4.763 Menschen, d.h. durchschnittlich 60,27 Menschen je Unfall mit Todesfolge. Die durchschnittliche Passagierkapazität der 16.250 zugelassenen Passagierflugzeuge beträgt ca. 172,7 Plätze [56]. Unter Berücksichtigung eines durchschnittlichen Sitzladefaktors von 75 % [57] starben durchschnittlich $p_{ur,t} = 46,5$ % der Insassen bei einem Unfall mit Todesfolge. Weil 79 % der Todesopfer während des LTO-Zyklus auftreten [55], wird eine Abhängigkeit der Unfallwahrscheinlichkeit von der Routendistanz vernachlässigt. Sofern ein besonders zuverlässiges Flugzeug bewertet werden soll, werden die Unfallwahrscheinlichkeiten als gegeben betrachtet. Das Verhältnis der geringeren (theoretischen) Unfallwahrscheinlichkeiten gegenüber den durchschnittlichen (theoretischen) Unfallwahrscheinlichkeiten wird mit dem Gewichtungsfaktor η_{ur} berücksichtigt. Sofern die Safety Requirements den üblichen Anforderungen entsprechen (z.B. $10^{-9}/h$ für einen Fehler der Klasse catastrophic) wird der Faktor zu eins gesetzt.

In der Literatur kann eine ganze Bandbreite von monetären Werten eines Todesfalls identifiziert werden [9][58][59]. Als Schadenskostenfaktor wird für das Modell ein Wert von $\beta_{ur} = 4,85$ [2,0; 6,3] Mio € je Todesfall ver-

wendet. Damit können die erwarteten, externen Kosten des Unfallrisikos in Abhängigkeit der transportierten Passagiere $\kappa \cdot f_{sl}$ berechnet werden:

$$(16) \quad K_{ur}(\eta_{ur}, \kappa, f_{sl}) = p_{ur,h} \times p_{ur,t} \times \beta_{ur} \times \eta_{ur} \times \kappa \times f_{sl}$$

4.7. Abfall

Im Jahr 2011 wurden am Flughafen Frankfurt 23.996 t Abfall produziert. Von dem verursachten Abfall wurden 19.936 t (83,1 %) wiederverwertet oder -verwendet und die restlichen 4.060 t (16,9 %) beseitigt [60]. Bei 78,9 Millionen WLUs entspricht dies 0,051 kg/WLU beseitigten Abfall und 0,253 kg/WLU wiederverwertet- oder verwendeten Abfall. In der Literatur finden sich nur wenige Quellen, die externe Kosten für Abfall angeben. In einem Projekt der Firmen Puma SE, PPR Home und Trucost werden durchschnittliche Werte für Deponieabfälle von 73 €/t und für die Müllverbrennung von 51 €/t angegeben [61]. Für wiederverwertete- oder verwendete fallen keine externen Kosten an. Mit diesen Werten ergeben sich vernachlässigbare externe Kosten von 0,00371 €/WLU. Der Aspekt Abfall wird daher nicht weiter betrachtet.

4.8. Abwasser

Am Flughafen Frankfurt wurden 0,884 Mio m³ Trinkwasser und 0,29 Mio m³ Brauchwasser im Jahr 2011 verwendet [22]. Zur Abschätzung der externen Kosten wird ausschließlich die Trinkwassermenge von 11,2 l/WLU betrachtet, da bei Brauchwasser der notwendige Aufbereitungsschritt entfällt. Weil keine besondere Kontamination des Grundwassers in Flughafennähe auftritt, wird ebenfalls davon ausgegangen, dass das verbrauchte Trinkwasser in keinem besonderen Maße verunreinigt wird. Im Jahr 2007 wurden in Deutschland für die Aufbereitung von 10,1 Mrd m³ Abwasser 4.400 GWh Strom verbraucht [62], wodurch sich ein durchschnittlicher Stromverbrauch von 0,436 kWh/m³ errechnen lässt. Unter Berücksichtigung der externen Kosten für indirekte Treibhausgas- und Schadstoffemissionen durch Stromverbrauch (Abschnitt 4.1.3. und 4.2.3) ergeben sich externe Kosten von $2,689 \cdot 10^{-4}$ €/WLU. Dieser Wert ist sogar um eine Größenordnung geringer als der abgeschätzte Wert für den Aspekt Abfall und wird somit nicht weiter berücksichtigt.

4.9. Gewinn

Grundlegend ist unter dem Gewinn eine klassische Wirtschaftlichkeitsanalyse der Flugbetriebsphase zu verstehen. Daher wird dieser Aspekt der ökonomischen Dimension zugeordnet. Der Gewinn der Fluggesellschaft als Betreiber des Flugzeugs stellt dabei die Zielgröße der Analyse dar und wird aus Kosten und Umsatz bestimmt.

Da ausschließlich die Betriebsphase bewertet wird, bleiben Entwicklungs-, Entsorgungskosten usw. unberücksichtigt. Die Betriebskosten C_{betr} werden mithilfe des Betriebskostenprogramms des ILR abgeschätzt [63]. In den Betriebskosten sind neben den Direct Operating Costs (DOCs) auch die anteiligen Fixkosten während der Betriebsphase, d.h. Indirect Operating Costs (IOCs), enthalten. Insbesondere zur Identifizierung der nachhaltigsten Flugzeugvorentwurfsalternative ist nicht die absolute Höhe des Umsatzes von Interesse, sondern der Unterschied des Umsatzes je nach Entwurfsalternative, welcher durch differierende Qualitätsmerkmale verursacht werden

kann. Vor allem die Reisezeit wird zum einen durch die Reisegeschwindigkeit und zum anderen durch die Anzahl der notwendigen Umstiege beeinflusst und wird daher in erster Linie für die Umsatzdifferenz berücksichtigt. Die erhöhte Zahlungsbereitschaft wird auf Basis der Opportunitätskosten der Passagiere abgeleitet. Dazu müssen zunächst für die betrachtete Transportaufgabe für alle verschiedenen Flugzeugvorentwürfe jeweils die gesamten Opportunitätskosten der planmäßigen Reisezeit aller Passagiere bestimmt werden. Anschließend wird für alle Alternativen eine Umsatzkorrektur bezogen auf die Alternative mit den höchsten Opportunitätskosten der planmäßigen Reisezeit durchgeführt.

5. ANFORDERUNGEN AN DAS BEWERTUNGSMODELL

Für die Bewertungsaufgaben des Modells sind sowohl nahezu identische als auch grundlegend verschiedene Konzeptalternativen denkbar. Bei der Gruppe nahezu identischer Konzepte soll die Frage beantwortet werden, ob ein Flugzeug mit der einen oder anderen Technologie eine Transportaufgabe nachhaltiger erfüllen kann. Es ist jedoch ebenfalls möglich, dass generell unterschiedliche Konzepte zur Erfüllung derselben Transportaufgabe entwickelt werden. Bspw. erfordert der Einsatz sehr großer Langstreckenflugzeuge die Bündelung von einzelnen Passagierströmen an sog. Hubs, da andernfalls die Auslastung der sehr großen Flugzeuge in vielen Fällen zu gering wäre. Im Gegensatz dazu können mehrere kleine Langstreckenflugzeuge die einzelnen Passagiergruppen direkt vom Start zum Ziel befördern. Damit die Vorteilhaftigkeit einer Flugzeugvorentwurfsalternative überhaupt aussagekräftig ist, muss je nach Kategorie der Bewertungsaufgabe eine unterschiedlich umfangreiche Transportaufgabe betrachtet werden.

Bei nahezu identischen Konzepten sind die Anforderungen hinsichtlich des Transportnetzwerks oder sonstiger Infrastruktur ähnlich. Es ist daher ausreichend, als Transportaufgabe nur die Durchführung eines Flugs für eine bestimmte Anzahl an Passagieren zu betrachten. Anders ist die Situation, sofern grundlegend verschiedene Konzepte zur Lösung einer übergeordneten Transportaufgabe bewertet werden sollen. Die übergeordnete Transportaufgabe kann dabei so verstanden werden, dass viele Passagiere von verschiedenen Start- zu verschiedenen Zielorten transportiert werden sollen. In diesem Fall müssen für eine sinnvolle Bewertung die Auswirkungen auf das übrige Transportnetzwerk mitberücksichtigt werden. Grundsätzlich muss also für jedes Konzept das optimale, d.h. nachhaltigste, Netzwerk zur Durchführung der übergeordneten Transportaufgabe berechnet werden. Dieses optimale Netzwerk muss mit dem optimalen Netzwerk eines anderen Konzepts verglichen werden und auf Basis dieser Daten kann die nachhaltigste Alternative identifiziert werden. Die Umsetzung dieser Optimierungsaufgabe zur Bestimmung der optimalen Netzwerkstruktur ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit und wird daher als Eingangsobjekt verstanden. Das Bewertungsmodell wurde daher so entwickelt, dass beliebige Netzwerke bewertet werden können. Dazu gehört ebenfalls die Berücksichtigung mehrerer Flugzeugtypen.

6. BEISPIELBEWERTUNG

In diesem Kapitel wird die A320 mit der A320neo auf der Strecke von Frankfurt (FRA) nach London (LHR) mit 150 Passagieren verglichen. Weil noch nicht alle Daten der A320neo verfügbar sind, wird im Folgenden erläutert, welche Parameter gegenüber dem Vorgängermodell für die Beispielbewertung geändert wurden. Im Vergleich zur A320 wird bei der A320neo eine Halbierung der Lärmemissionen (-3 dB(A)), eine Reduktion der NO_x-Emissionen um -50 %, sowie eine Treibstoffreduktion um -15 % angenommen [64]. Für die übrigen Schadstoffemissionen wird eine Reduktion entsprechend des Treibstoffverbrauchs von -15 % angenommen. Der Listenpreis der A320neo liegt 9,51 % über dem Preis der A320 [65], sodass sich höhere Abschreibungskosten ergeben. Zusammen mit den Ersparnissen im Treibstoffverbrauch führen diese unter Verwendung des Betriebskostenprogramms des ILR [63] zu einer Kostenreduktion von -1,8 % bei Einsatz der A320neo. Weil beide Flugzeuge dieselbe Reisezeit benötigen, entfallen etwaige Umsatzkorrekturen.

Für die identifizierten Nachhaltigkeitsparameter mit einer großen Unsicherheit werden die drei Parametervarianten Min, Std und Max definiert. Bei den Varianten Min und Max werden entsprechend die minimalen bzw. maximalen Parameterwerte verwendet. In der Parametervariante Std werden die jeweils wahrscheinlichsten Werte verwendet. Für das Beispiel wird ein Treibstoffpreis von 1 \$/kg und ein Wechselkurs von 1,3 \$/€ angenommen.

6.1. Einzelbewertung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse einer Absolutbewertung bei Einsatz der A320 beschrieben. In BILD 2 sind je nach Parametervariante die Ergebnisse in den drei Nachhaltigkeitsdimensionen dargestellt.

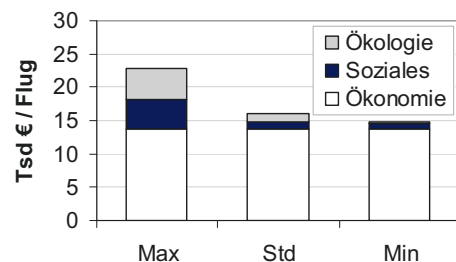


BILD 2. Gesamtkosten für die Transportaufgabe FRA-LHR mit der A320

Es zeigt sich, dass bei allen Parametervarianten die (konstanten) ökonomischen Kosten, d.h. Betriebskosten, dominieren, obwohl bei der Parametervariante Max die externen Kosten rund 40 % der Gesamtkosten ausmachen. Bei den beiden übrigen Parametervarianten beträgt der Anteil 14,1 % (Std) und 7,4 % (Min). Die prozentuale Zusammensetzung der gesamten externen Kosten, d.h. soziale und ökologische Kosten, durch die bewerteten (Teil-)Aspekte ist für die drei Parametervarianten in BILD 3 dargestellt.

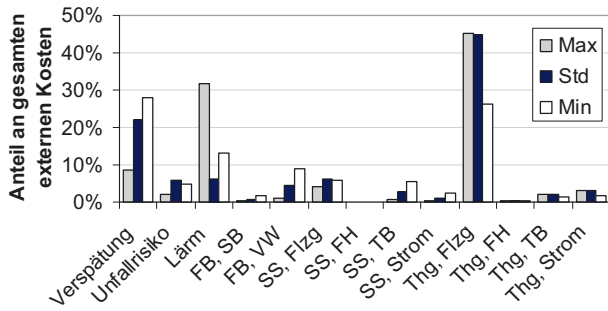


BILD 3. Ergebnisse der bewerteten (Teil-)Aspekte für die Transportaufgabe FRA-LHR mit der A320

Die Treibhausgas- und Lärmemissionen des Flugzeugs sowie Verspätungen verursachen die größten externen Kosten und betragen zusammen je nach Parametervariante 67,3 % - 85,6 % der externen Kosten. Von den verbleibenden (Teil-)Aspekten verursachen die Schadstoffemissionen des Flugzeugs (4,2 % - 6,1 %), der Verlust von Waldfläche (1,1 % - 8,9 %) und das Unfallrisiko (1,9 % - 5,8 %) den noch größten verbleibenden Anteil. Weiterhin ist zu bemerken, dass diese drei (Teil-)Aspekte für die Parametervariante mit den wahrscheinlichsten Modellwerten (Std) zu externen Kosten in vergleichbarer Höhe wie die Kosten verursacht durch Lärm führen. Die sechs genannten Teilaspekte verursachen je nach Modellparametervariante 86,9 % - 92,9 % der gesamten externen Kosten.

6.2. Relativbewertung

In BILD 4 wird die Ersparnis bei der Verwendung der A320neo im Gegensatz zur A320 angegeben, d.h. ein positiver Wert bedeutet, dass die A320neo in der entsprechenden Dimension Kosten einspart.

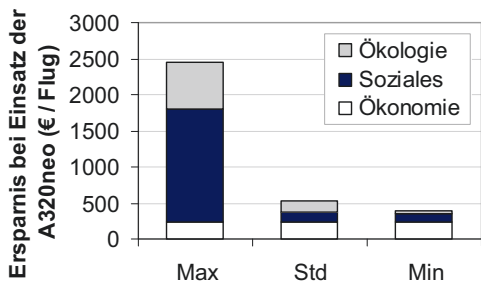


BILD 4. Ersparnis für die Transportaufgabe FRA-LHR bei Einsatz der A320neo im Vergleich zur A320

Die absolute Einsparung in der ökonomischen Dimension ist aufgrund der konstanten Betriebskosteneinsparnis unabhängig von der gewählten Parametervariante. Im Gegensatz zur Absolutbewertung spielen bei der Relativbewertung die externen Kosten eine große Rolle. Je nach Parametervariante ergibt sich eine relative Gesamtkostenersparnis von 2,7 % bis 10,8 % bei Einsatz der A320neo, obwohl die Betriebskosten nur um 1,8 % reduziert werden. In BILD 5 sind die Ergebnisse der bewerteten (Teil-)Aspekte dargestellt.

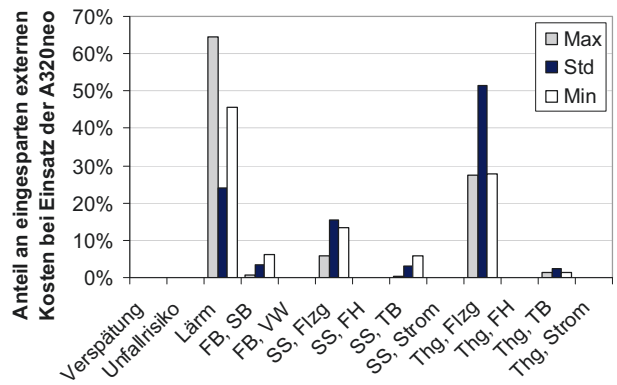


BILD 5. Ersparnis in den (Teil-)Aspekten für die Transportaufgabe FRA-LHR bei Einsatz der A320neo im Vergleich zur A320

Es zeigen sich vor allem drei (Teil-)Aspekte als die dominanten Faktoren, welche je nach Parametervariante 88 % - 97 % der eingesparten externen Kosten ausmachen. Dies sind neben Lärm- und Treibhausgasemissionen des Flugzeugs, die Schadstoffemissionen des Flugzeugs, wobei diese einen geringeren Einfluss als die beiden erstgenannten (Teil-)Aspekte haben. Alle (Teil-)Aspekte, welche in der Differenzbetrachtung keinen Unterschied aufweisen, können mit Ausnahme des Unfallrisikos bei allen Bewertungsaufgaben von nahezu identischen Konzepten für eine Relativbewertung vernachlässigt werden.

6.3. Interpretation

Nach dem Konzept der Nachhaltigkeit werden alle negativen sozialen und ökologischen Folgen berücksichtigt. Sofern diese externen Kosten einen nur geringen Anteil ausmachen, ist dies gleichbedeutend damit, dass diese sozialen und ökologischen Folgen sehr gering sind. Bei der Parametervariante Min und Std verursachen externe Kosten nur 7,4 % bzw. 14,1 % der gesamten Kosten. Sofern die wahren Parameter tatsächlich den Werten von Min oder Std entsprechen, können die sozialen und ökologischen Folgen durch das Wirtschaftswachstum relativ leicht überkompensiert werden und die teils dramatischen Warnungen vor ökologischen Katastrophen wären unbegründet. Angesichts der zunehmenden Wetterextremen und den Gefahren durch den Klimawandel ist eine weit aus wahrscheinlichere Interpretation dieser Ergebnisse, dass soziale und vor allem ökologische Folgen quantitativ unterschätzt werden, sodass die Parametervariante Max realistischer erscheint. Dies hätte zur Folge, dass bei Einsatz der A320 ca. 40 % der Gesamtkosten durch externe Kosten verursacht werden. Bei der Alternativenwahl zeigt sich für jede Parametervariante eine große Bedeutung des Konzepts der Nachhaltigkeit im vorgestellten Beispiel. Bei der Parametervariante Max würde ein Einsatz der A320neo verglichen mit den ökonomischen Einsparungen sogar zehnmals höhere externe Kosten einsparen und damit die Gesamtkosten um ca. 10,8 % reduzieren – im Gegensatz zu einer Betriebskosteneinsparnis von 1,8 %. Eine Berücksichtigung des Nachhaltigkeitskonzepts würde somit die Investition in umweltentlastende, technische Innovationen erheblich begünstigen und dadurch gleichzeitig die Umweltbelastung reduzieren.

7. FAZIT

Durch die Entwicklung eines Modells zur Quantifizierung der Nachhaltigkeit des Flugbetriebs kann der Flugzeughersteller nicht-ökonomische Aspekte bereits im Vorentwurfsprozess berücksichtigen. Dies ermöglicht eine effiziente Allokation ökonomischer Ressourcen zum Umweltschutz, da dadurch die Optionen identifiziert werden können, die das beste Verhältnis von eingesparten externen Kosten zu ökonomischen Kosten besitzen. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass in mittelfristiger Zukunft mehr und mehr Nachhaltigkeitsaspekte internalisiert werden, wie z.B. durch den Emissionshandel mit CO₂-Zertifikaten. Da Entwicklungszeiten von Flugzeugen Jahrzehnte betragen, kann eine frühzeitige Berücksichtigung und Optimierung des Nachhaltigkeitsergebnisses von heutigen Flugzeugvorentwürfen zu zukünftigen Wettbewerbsvorteilen führen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] UNEP/SETAC Life Cycle Initiative: Towards a Life Cycle Sustainability Assessment. 2011
- [2] P.M. Grimley: Indicators of sustainable development in civil aviation, Loughborough University, Dissertation, Loughborough, 2006
- [3] United Nations Department of Economic and Social Affairs: Rio Declaration on Environment and Development. Rio de Janeiro, 1992
- [4] United Nations Department of Economic and Social Affairs: Agenda 21: Earth Summit – The United Nations Programme of Action from Rio. Rio de Janeiro, 1992
- [5] R. Dyckhoff: Nachhaltige Unternehmensführung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2008
- [6] T. Littmann: Sustainable Transportation Indicators: A Recommended Research Program For Developing Sustainable Transportation Indicators and Data. Victoria Transport Policy Institute, Victoria, BC, Canada, 2008
- [7] P. Upham: Introduction: Perspectives on sustainability and aviation. In: P. Upham, D. Maughan, D. Raper, C. Thomas (Hrsg.): Towards Sustainable Aviation. S. 3-18. London: Earthscan, 2003
- [8] R.E. Caves: The social and economic benefits of aviation. In: P. Upham, D. Maughan, D. Raper, C. Thomas (Hrsg.): Towards Sustainable Aviation. S.36-47. London: Earthscan, 2003
- [9] S.A. Schmid, P. Preiss, A. Gressmann, R. Friedrich: Ermittlung externer Kosten des Flugverkehrs am Flughafen Frankfurt/Main. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2003
- [10] M. Kreimeier: Nachhaltigkeitsbewertung des Flugbetriebs für den Flugzeugvorentwurf. Institut für Luft- und Raumfahrtssysteme, RWTH Aachen, Aachen, 2012
- [11] M. Janic: The Sustainability of Air Transportation: A Quantitative Analysis and Assessment. Hampshire, Burlington: Ashgate, 2007
- [12] T. Elliff, N. Pilon, P. Smith: Indicators for the Management of Sustainable Growth in the Air Transport System. Eurocontrol, 2004
- [13] T. Littmann, D. Burwell: Issues in Sustainable Transportation. In: Int. J. Global Environmental Issues, Vol. 6, No. 4, S.331-347 Victoria Transport Policy Institute, 2006
- [14] Council of the European Union: Review of the EU Sustainable Development Strategy – Renewed Strategy, Brussels, 2006
- [15] J.H. Spangenberg, S. Pfahl, K. Deller: Towards indicators for institutional sustainability: lessons from an analysis of Agenda 21. In: Ecological Indicators, Vol. 2, No. 1-2, S. 61-77. 2002
- [16] T. Littmann: Well Measured: Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute, Victoria, BC, Canada, 2012
- [17] A. Dobranskyte-Niskota, A. Perujo, M. Pregl: Indicators to Assess Sustainability of Transport Activities: Part 1: Review of the Existing Transport Sustainability Indicators Initiatives and Development of an Indicator Set to Assess Transport Sustainability Performance. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy, 2007
- [18] A. Dobranskyte-Niskota, A. Perujo, J. Jesinghaus, P. Jensen: Indicators to Assess Sustainability of Transport Activities: Part 2: Measurement and Evaluation of Transport Sustainability Performance in the EU27. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy, 2009
- [19] W. Schobersberger: Die Reisetrombose: Mediales Horrorszenerario oder medizinisches Faktum? In: Wiener Klinische Wochenschrift, 115/10 S.313-317. 2003
- [20] M. Meier: Strahlenschutz in der Luftfahrt. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, 2012.
- [21] J.M.W. Dings, R.C.N. Wit, B.A. Leurs, S.M. De Bruyn, M.D. Davidson, W. Fransen: External costs of aviation: Background report / CE, Solutions for environment, economy, and technology. Delft, 2002
- [22] Fraport AG: Kennzahlen und Fakten. Frankfurt, 2012
- [23] K.L. Haken: Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [24] Hochschule Offenburg: Kraftstoffeigenschaften verschiedener Pflanzenöle. Offenburg, 2007
- [25] C.J. Eyers, P. Norman, J. Middel, M. Plohr, S. Michot, K. Atkinson, R.A. Christou: Aero2k Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025. Centre for Air Transport and the Environment, Manchester Metropolitan University, Manchester, 2004
- [26] E. Anton, T. Lammering, R. Henke: A comparative analysis of operations towards fuel efficiency in civil aviation. Applied Aerodynamics: Capabilities and Future Requirements, Bristol, UK, 2010
- [27] J. Hickman, D. Hassel, R. Jourmard, Z. Samaras, S. Sorenson: Methodology for calculating transport emissions and energy consumption: Deliverable 22 for the project MEET, Transport Research Laboratory, 1999
- [28] Shell Deutschland Oil GmbH: Sicherheitsdatenblatt: Jet A-1. 2005
- [29] R. Sausen, I. Isaksen, V. Grewe, D. Hauglustaine, D.S. Lee, G. Myhre, M.O. Köhler, G. Pitari, U. Schumann, F. Stordal, C. Zerefos: Aviation Radiative Forcing in 2000: An Update on IPCC 1999. In: Meteorologische Zeitschrift, Vol. 14, No. 4, S. 555-561. Berlin, Stuttgart 2005
- [30] M. Cames, O. Deuber: Emissionshandel im internationalen zivilen Luftverkehr. Öko-Institut e.V., Berlin, 2004
- [31] Umweltbundesamt: Externe Kosten kennen – Umwelt besser schützen: Die Methodenkonvention zur Schät-

- zung externer Kosten am Beispiel Energie und Verkehr. Berlin, 2007
- [32] Umweltbundesamt: Sprit sparen und mobil sein. 2009
- [33] S. Triebe, A. Spiller, L. Theuvsen: Reduktion von Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft. Köln: Josef EUL Verlag GmbH, 2007
- [34] R. Müller-Wenk, P. Hofstetter: Monetarisierung verkehrslärmbedingter Gesundheitsschäden. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 2003
- [35] K. Wirth: Lärmstudie 2000 – Die Belästigungssituation im Umfeld des Flughafens Zürich. Aachen, ETH Zürich, 2004
- [36] R. Kempiak, M. Petz: Lärmkartierung Hessen 2007: Abschlussbericht. ACCON, 2007
- [37] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Lärmkartierung Hessen 2007 Flughafen Frankfurt. 2007
- [38] M. Bunkowski, R. Wagner; Arbeitsgemeinschaft Deutscher V. (Hrsg): Luftfahrt und Umwelt: Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen, 2007
- [39] A. Hunt: Monetary valuation of noise effects. Prepared for the EC UNITE Project (subcontracted to IER-University of Stuttgart). Metroeconomica Ltd., 2001
- [40] N.M. Lehnert: Externe Kosten des Luftverkehrs – Ein Überblick über den aktuellen Stand der Diskussion. Institut für Volkswirtschaftslehre, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau 2008
- [41] Y. Schipper, P. Nijkamp, P. Rietveld: Why do aircraft noise value estimates differ? A meta-analysis. In: Journal of Air Transport Management, Vol. 4, No. 2, S. 117-124, 1998
- [42] UK Civil Aviation Authority: Noise Mapping – Aircraft Traffic Noise: A research study on aircraft noise mapping at Heathrow Airport conducted on behalf of Defra. 2004
- [43] Fraport AG: Ausbau Flughafen Frankfurt Main: Unterlagen zum Planfeststellungsverfahren. 2006
- [44] R.J. Hansman, A. Odoni: Air Traffic Control. In: P. Belobaba, A. Odoni, C. Barnhart (Hrsg): The Global Airline Industry. S. 377-405. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2009
- [45] P. Elsasser: Der ökonomische Wert der Wälder in Deutschland für die Naherholung: Eine „Benefit Function Transfer“-Schätzung. In: Zeitschrift für Umweltökonomie, No. 3, S.417-442. 2001
- [46] Infraconsult AG: Kosten und Nutzen im Natur- und Landschaftsschutz: Monetarisierungs- und Beurteilungsmodell für Schutzmaßnahmen im Verkehr. Bern, 2012
- [47] D. Jenkins, J.M. Marks, M. Miller: The State of U.S. Aviation: Comprehensive Analysis of Airline Schedules and Airport Delays. American Aviation Institute, 2012
- [48] A. Dill: Studie Opportunitätskosten Münchner Nahverkehr. Basel Institute of Commons and Economics, Basel, 2010
- [49] A. König, K.W. Axhausen, G. Abay: Zeitkostenansätze im Personenverkehr. IVT, Rapp Trans AG, Zürich, 2004
- [50] Umweltbundesamt: Entwicklung des Flugverkehrs. 2012
- [51] UK Civil Aviation Authority: Flying on Business: a study of the UK business air travel market. First Edition. The Stationery Office, 2011.
- [52] Statistisches Bundesamt: EU-Vergleich der Arbeitskosten. 2011
- [53] Statistisches Bundesamt: Eu-Vergleich der Lohnnebenkosten. 2011
- [54] Bureau of Labor Statistics: Employer Costs for Employee Compensation – March 2012. U.S. Department of Labor, 2012
- [55] Boeing Commercial Airplane: Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents: Worldwide Operations 1959 – 2011. 2011
- [56] Boeing Commercial Airplane: Current Market Outlook 2007: How will you travel through life? 2007
- [57] F. Himpel, R. Lipp; K. Bellmann, R. Bronner, D. Schmidt-Gallas, K.J. Srnka (Hrsg.): Luftverkehrsallianzen: Ein gestaltungsorientierter Bezugsrahmen für Netzwerk-Carrier. Deutscher Universitäts-Verlag, 2006
- [58] R. Friedrich, P. Bickel: Environmental External Costs of Transport. Springer, 2001
- [59] M. Vianio, S. White: Value of Statistical Life in Europe. In: National Centre for Environmental Economics and National Centre for Environmental Research, US Environmental Protection Agency (Veranst.), 2001
- [60] Fraport AG: Abfalldaten 2011. Frankfurt, 2012
- [61] Puma SE, PPR Home, Trucost: Abfall Bewertungsmethode. 2012
- [62] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Introducing a Kerosene Tax: Attitudes of European Countries and New Legal Possibilities of the EU Energy Tax Directive. 2005
- [63] K. Franz, T. Lammering, K. Risse, E. Anton, R. Hoeneschemeyer: Economics of Laminar Aircraft Considering Off-Design Performance. 8th AIAA Multidisciplinary Design Optimization Specialist Conference, AIAA, Honolulu, HI, 2012
- [64] Airbus S.A.S.: A350 & A320neo Update. 18th Flight Safety Conference, 2012
- [65] Airbus S.A.S.: Airbus Price List 2012. 2012