



Diplomarbeit

Erarbeitung von CO₂ basierten
Leistungsindikatoren zur Anwendung in
einem Total Airport Management System

IB-Nummer 112-2013/61
Zugänglichkeitsstufe A/I



Institut für Flugführung
Direktor: Prof. Dr. Dirk Kügler

Dokument Information

Zuständiger Projekt- / Abteilungsleiter:	Piekert, Florian; Günther, Yves; Röder, Michael
Zuständiger Autor:	Rösler, Vivian
Weitere Autor(en):	
Projekt / Zielfeld:	Total Airport Management
Zugänglichkeitsstufe:	A/I
Datei:	IB 112-2013-61 Diplomarbeit Rösler - Erarbeitung von CO2 basierten Leistungsindikatoren zur Anwendung in einem Total Airport Management System.docx
Version:	1.00
Speicherdatum:	2013-12-03
Gesamtseitenzahl:	151

Freigabe:

Die Freigabe erfolgt lt. gesondertem Freigabebeformblatt:

© 2013, DLR, Institut für Flugführung:

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung innerhalb und außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des DLR, Institut für Flugführung, unzulässig und wird zivil- und strafrechtlich verfolgt. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Luftfahrt und Logistik
Professur Technologie und Logistik des Luftverkehrs

Diplomarbeit

Erarbeitung von CO₂ basierten Leistungsindikatoren zur Anwendung in einem Total Airport Management System

Eingereicht von: Vivian Rösler
geboren am: 13. Oktober 1988 in Dresden

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Fricke (TU Dresden)
Dipl.-Ing. Franziska Dieke-Meier (TU Dresden)
Dipl.-Inform. Florian Piekert (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.)

Dresden, den 21. November 2013
Ort, Datum

Vivian Rösler

Bibliografischer Nachweis

Vivian Rösler

geboren am: 13. Oktober 1988 in Dresden

Diplomarbeit

Erarbeitung von CO₂ basierten Leistungsindikatoren zur Anwendung in einem Total Airport Management System

135 Seiten, 4 Anlagen, 45 Abbildungen und 22 Tabellen

Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

Institut für Luftfahrt und Logistik

Professur Technologie und Logistik des Luftverkehrs

Dresden, den 21. November 2013

Autorenreferat

Auf Grund des steigenden Interesses seitens der Bevölkerung und der Politik, die Umwelt bei den Verkehrsträgern und vor allem dem Luftverkehr in den Fokus zu rücken, sind alle am Luftverkehr Beteiligten dazu angehalten bzw. aufgefordert die Schadstoffe in den kommenden Jahren zu minimieren. Auf Grundlage dieser Forderung beschäftigt sich die vorliegende Diplomarbeit mit der Erarbeitung von CO₂ basierten Leistungsindikatoren zur Anwendung in einem Total Airport Managementsystem.

Zunächst wird die Thematik in den aktuellen Forschungskontext und Rechtsrahmen eingeordnet, um den Beitrag des Luftverkehrs herauszuarbeiten. Außerdem erfolgt eine Betrachtung des Total Airport Managements im Vergleich zu einem Airport Collaborative Decision Making. Darauf aufbauend werden die Leistungsindikatoren und mögliche Methoden zur Berechnung von Emissionen untersucht. Mit entsprechenden Betriebsszenarien wird abschließend die Nutzbarkeit solcher CO₂ basierter Leistungsindikatoren in einem Total Airport Management erörtert.

Thesen

1. Die Umweltaspekte gelangen seit den letzten Jahren stärker in den Fokus der Öffentlichkeit und der Politik.
2. Es existieren hinsichtlich der CO₂-Emissionen keine rechtlichen Grenzwerte sowohl bei der Zulassung von Triebwerken als auch beim Flughafenbetrieb.
3. Das einzige (marktbasierte) Instrument, welches die CO₂-Emissionen fokussiert, ist der Emissionshandel. Dieser wird allerdings nicht flächendeckend (weltweit) umgesetzt.
4. Das eigentliche Airport Collaborative Decision Making (A-CDM) Konzept wurde nicht vollständig umgesetzt. Mit einem neuen Ansatz, dem Total Airport Management wird das A-CDM integriert und neben der Luftseite auch die Landseite des Flughafens fokussiert.
5. Der Lande- und Start-Zyklus der ICAO kann als Näherungswert für die Berechnung von CO₂-Emissionen im Flughafennahbereich bis zu einer Höhe von 3000 ft angewendet werden.
6. Im Bereich der Flughäfen existieren verschiedene emissionsreduzierende und operative Verfahren, welche allerdings nicht flächendeckend eingesetzt werden.
7. In den Literaturquellen existieren CO₂ basierte Leistungsindikatoren. Oftmals ist der Umweltaspekt nicht das Hauptaugenmerk, sondern vielmehr ein positiver Nebeneffekt durch die Steigerung der Effizienz des Luftverkehrsprozesse.
8. Die Integration in Form eines Monitorings von CO₂-Emissionen in einem Flughafenleitstand wird als sinnvoll erachtet.
9. Solange kein rechtlicher Rahmen zur CO₂-Minimierung existiert, wird ein Handeln seitens der Flughäfen nur begrenzt möglich sein.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	X
Formelverzeichnis	XII
Abbildungsverzeichnis	XIV
Tabellenverzeichnis	XV
1 Motivation und Zielstellung	1
2 Aspekte zur Entstehung und Wirkung von Emissionen im Luftverkehr	5
2.1 Emissionsentstehung	5
2.1.1 Begriffsdefinitionen Emission, Immission und Transmission	5
2.1.2 Funktionsweise des Triebwerks	6
2.1.3 Treibstoffe und Verbrennungsprodukte	8
2.2 Klimawirksamkeit des Luftverkehrs	10
2.2.1 Mögliche Einflüsse der Emissionen auf das Klima	10
2.2.2 Emissionsquellen an Flughäfen	11
2.3 Klimaschutzaktivitäten	13
2.3.1 Gesetzliche Vorschriften zum Umweltschutz	13
2.3.1.1 Internationale Vorschriften	13
2.3.1.2 Europäische Vorschriften	15
2.3.1.3 Nationale Vorschriften	16
2.3.1.4 Marktbasierende Instrumente	17
2.3.2 Forschungs- und entwicklungsseitige Bemühungen	22
2.3.2.1 Umweltprogramme	22
2.3.2.2 Technische und betriebliche Bestrebungen zur Emissionsreduzierung	31
3 Luftverkehrsbetrieb und Flughafenmanagement	34
3.1 Luftverkehrsbetrieb an einem Flughafen	34
3.2 A-CDM	37
3.3 Total Airport Management	42
3.3.1 Ziele des Total Airport Managements	42

3.3.2	Abgrenzung zu A-CDM	43
3.3.3	Planerische Umsetzung	45
3.3.4	Technische Umsetzung	46
3.4	Bewertung der Rolle der Emissionen in A-CDM und TAM	50
4	Erarbeitung von Umweltindikatoren und einer Methode zur Berechnung von CO₂-Emissionen	52
4.1	Key Performance Areas und Indicators	52
4.1.1	Allgemeine Definition	52
4.1.2	Review vorhandener Key Performance Areas	53
4.1.3	Ableitung von CO ₂ basierten KPIs für die Key Performance Area Umwelt	58
4.1.4	Einsatz und Zeithorizont der Key Performance Indicators	65
4.1.5	Untersuchung geeigneter CO ₂ basierter Leistungsindikatoren in einem TAM	66
4.2	Methoden zur Berechnung des Treibstoffverbrauchs und der Schadstoffe	68
4.2.1	Allgemein gültige Parameter zur Schadstoffberechnung	68
4.2.2	ICAO Methode	69
4.2.3	Boeing Fuel Flow Method 2	71
4.2.4	Base of Aircraft Data	71
4.2.5	Enhanced Jet Performance Model	73
4.2.6	Vergleichender Überblick über die betrachteten Methoden	76
4.3	Schadstoffsimulationsmodelle	77
4.3.1	Advanced Emission Model	78
4.3.2	Emissions and Dispersion Modeling System	79
4.3.3	LASPORT	80
4.3.4	Vergleichender Überblick über die betrachteten Schadstoffsimulationsmodelle	80
4.4	Adaption der entwickelten KPIs und deren Berechnung auf einen Modellflughafen	81
4.4.1	Abgrenzung des Untersuchungsraums	81
4.4.2	Eigenschaften des Modellflughafens	82
4.5	Adaptierbarkeit der Methoden auf den Modellflughafen zur Berechnung von CO ₂	86
4.6	Berechnung der CO ₂ -Schadstoffemissionen	89
4.7	Weiterführende Untersuchungen geeigneter CO ₂ basierter Leistungsindikatoren in einem TAM	91
5	Einsparung von CO₂-Emissionen bei Anwendung operativer Verfahren	
	Allgemein und am Modellflughafen	96
5.1	Verfahren zur CO ₂ -Minimierung	96
5.1.1	Anflugverfahren	96
5.1.2	Verfahren am Boden	100
5.1.3	Abflugverfahren	103
5.1.4	Verfahren zur Verlagerung oder Beschränkung von CO ₂ -Emissionen	105

5.2	Prozesssteuerung mittels CO ₂ basierter Leistungsindikatoren am Modellflughafen	110
5.2.1	Darstellungs- und Monitoringmöglichkeiten in einem Flughafenleitstand	110
5.2.2	Szenarien zur Prüfung des Einsatzes operativer Maßnahmen am Modellflughafen und in Bezug auf ein TAM	113
6	Zusammenfassung und Ausblick	122
	Literaturverzeichnis	125
	Eidesstattliche Erklärung	133
	Anhang	134

Abkürzungsverzeichnis

ACA	Airport Carbon Accreditation
ACARE	Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe
A-CDM	Airport Collaborative Decision Making
ACI	Airport Council International
ADV	Arbeitsgemeinschaft deutscher Verkehrsflughäfen
AEDT	Aviation Environmental Design Tool
AEM	Advanced Emission Model
AIBT	Actual In-Block Time
AIRE	Atlantic Interoperability Initiative to reduce Emissions
ALAQS	Airport Local Air Quality Studies
ALDT	Actual Landing Time
AMAN	Arrival Manager
ANS	European Air Navigation Services
AOBT	Actual Off-Block Time
AOP	Airport Operational Plan
APC	Aircraft Parameters Class
APOC	Airport Operations Centre
APU	Auxiliary Power Unit
A-SMGCS	Advanced Surface Movement Guidance and Control System
ASPIRE	Asia and Pacific Initiative to reduce Emissions
ATA	Actual Time of Arrival
ATC	Air Traffic Control
ATFCM	Air Traffic and Capacity Management
ATM	Air Traffic Management
ATMAP	ATM Airport Performance
ATOT	Actual Take-Off Time
AvGas	Aviation Gasoline
BADA	Base of Aircraft Data
BFFM2	Boeing Fuel Flow Method 2
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BPBS	Best Planned - Best Served
CCD	Continuous Climb Departures
CFMU	Central Flow Management Unit
CLEEN	Continuous Lower Emission
CDA	Continuous Descent Approach
C	Kohlenstoff

CH ₄	Methan
C _n H _m	Kohlenwasserstoff
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DMAN	Departure Manager
DPI	Departure Planning Information
EDMS	Emissions and Dispersion Modeling System
EI	Emission Index
EJPM	Enhanced Jet Performance Modell
ELDT	Estimated Landing Time
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme
EOBT	Estimated Off-Block Time
EPC	Environmental Parameters Class
ETA	Estimated Time of Arrival
ETD	Estimated Time of Departure
ETS	Emission Trading System
EU	Europäische Union
FAA	Federal Aviation Administration
FAB	Functional Airspace Blocks
FAF	Final Approach Fix
FCFS	First Come – First Serve
FF	Fuel Flow
FUM	Flight Update Message
GH	Ground Handler
GPS	Global Positioning System
GPU	Ground Power Unit
GS	Ground Speed
GSE	Ground Support Equipment
H-FCKW	teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
H _m	Wasserstoff
HMI	Human-Machine-Interface
H ₂ O	Wasser
HPFFC	High Precision Fuel Flow Calculation
IAF	Initial Approach Fix
ICAO	International Civil Aviation Organization
ILS	Instrumentenlandesystem
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnik
KPA	Key Performance Area
KPI	Key Performance Indicator
LASAT	Lagrange-Simulation von Aerosol-Transport
LASPORT	LASAT for Airports
LFZ	Luftfahrzeug
LTO	Landing and Take-Off
LuftVStG	Luftverkehrssteuergesetz

LVG	Luftverkehrsgesellschaften
MTM	Management of Trajectory and Mission
MTOM	Maximum Take-Off Mass
NextGEN	Next Generation Air Transportation System
N ₂	Stickstoff
NF ₃	Stickstofftrifluorid
NMOC	Network Manager Operations Centre
N ₂ O	Distickstoffoxid
NOP	Network Operations Plan
NO _x	Stickoxid
OLO	Operational Limit Output
OPO	Operational Parameter Output
OPP	Optimized Parameter Prediction
PAX	Passagier
p.a.	pro Jahr
PFC	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
PM	Partikel
PMS	Point Merge System
PPP	Public-Private-Partnership
SES	Single European Sky
SESAR	Single European Sky ATM Research Programme
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SLB	Start- und Landebahn
SO ₂	Schwefeldioxid
SO _x	Schwefeloxid
SPC	State Parameter Class
SRA	Strategic Research Agenda
STA	Scheduled Time of Arrival
STAR	Standard Arrival Routes
STD	Scheduled Time of Departure
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TAM	Total Airport Management
TAMS	Total Airport Management System
TIM	Time in Mode
TMA	Terminal Manoeuvring Area
TOBT	Target Off-Block Time
TSAT	Target Start-Up Approval Time
TTA	Tactical Time of Arrival
TTOT	Target Take-Off Time
TU	Traffic Unit
TW	Triebwerk
UHC	unverbrannter Kohlenwasserstoff
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VALE	Voluntary Airport Low Emissions Program
VE	Verkehrseinheit
VOC	Volatile organic compounds (flüchtige organische Verbindungen)
VTT	Variable Taxi Time

WLU Work Load Unit

Formelverzeichnis

D_p	Masse des emittierten Gases (basierend auf dem LTO-Zyklus)
F_∞	Startschubrate auf Meereshöhe ($v = 0$)
Π_∞	Triebwerksdruckverhältnis zwischen Verdichtereintritt und Verdichteraustritt beim Start (Reference Pressure Ratio) für F_∞
$NO_{x,LFZ}$	Menge an ausgestoßenen Stickoxiden pro Luftfahrzeug [kg]
n_{TW}	Anzahl Triebwerke
t_i	Dauer der einzelnen Phasen i des LTO-Zyklus [s]
F	Treibstoffverbrauch [kg/s]
EI	Emissionsindex [g/kg]
$E_{p,i}$	Emissionen des Schadstoffs (CO_2) p für ein LFZ i und eine bestimmte Anzahl an LTO-Zyklen [g]
k	LTO-Phasen: Anflug, Rollen, Start, Steigflug ($k = 1$ bis 4)
NE_i	Anzahl der Triebwerke des LFZ i
LTO_i	Anzahl an LTO-Zyklen des LFZ
$TIM_{k,i}$	Verweilzeit bei gleicher Triebwerkslast in der Phase k für ein LFZ i [s]
$FF_{k,i}$	Treibstoffmassendurchsatz in der Phase k für ein LFZ i [kg/s]
EI	Emissionsindex des Schadstoffs (CO_2) [g/kg]
KV_{TW}	Treibstoffverbrauch der Triebwerke aller Luftfahrzeuge [kg]
$n_{LTO,h}$	Anzahl der LTO-Zyklen des Luftfahrzeugtyps h
$KV_{LTO,h}$	Treibstoffverbrauch während des LTO-Zyklus des Luftfahrzeugtyps h [kg/LTO-Zyklus bzw. Luftfahrzeugtyp]
η	schubspezifischer Kraftstoffverbrauch [kg/(min·kN)]
f_{nom}	nominaler Treibstoffmassendurchsatz in allen Flugphasen (außer Reiseflug und Sinkflug mit Leerlauf) [kg/min]
f_{min}	minimaler Treibstoffmassendurchsatz im Sinkflug mit Leerlauf [kg/min]
$f_{ap/id}$	Treibstoffmassendurchsatz mit Landekonfiguration [kg/min]
f_{cr}	Treibstoffmassendurchsatz im Reiseflug [kg/min]
c_{f1}	1. schubspezifischer Treibstoffverbrauchsbeiwert [Jet: kg/(min·kN), Turboprop: kg/(min·kN·Kn, Piston: kg/min)]
c_{f2}	2. schubspezifischer Treibstoffverbrauchsbeiwert [kn]
c_{f3}	1. sinkflugbezogener Treibstoffverbrauchsbeiwert [kg/min]
c_{f4}	2. sinkflugbezogener Treibstoffverbrauchsbeiwert [ft]
c_{fcr}	korrigierender Treibstoffverbrauchsbeiwert für den Reiseflug [-]
H_p	aktuelle Höhe [ft]
T_{hr}	Schub [kN]
V_{TAS}	wahre Fluggeschwindigkeit (True Air Speed, TAS) [kn]

$F_{T,want}$	gewünschter Schub [N]
$F_{T,excess}$	Überschussschub [N]
$F_{T,req}$	erforderlicher Schub zur Kompensation des Widerstands [N]
m_{total}	Masse [kg]
a	Beschleunigung [m/s^2]
g	Fallbeschleunigung [m/s^2]
γ_{sel}	Bahnneigungswinkel [$^\circ$]
ρ_h	Dichte [kg/m^3]
v_{TAS}	wahre Fluggeschwindigkeit, True Air Speed [m/s]
S_F	Flügelfläche [m^2]
c_d	Widerstandsbeiwert
η	schubspezifischer Kraftstoffverbrauch [$kg / (min \cdot kN)$]
$c_{FF,1}$	1. Treibstoffverbrauchsbeiwert [$kg / (min \cdot kN)$]
$c_{FF,2}$	2. Treibstoffverbrauchsbeiwert [kn]
$c_{FF,3}$	3. Treibstoffverbrauchsbeiwert
\dot{m}_{fuel}	Treibstoffmassendurchsatz [kg/min]
$F_{k,i}$	Treibstoffverbrauch in der Phase k pro Luftfahrzeug i [kg]
NE_i	Anzahl der Triebwerke des Luftfahrzeugs i
$TIM_{k,i}$	Verweilzeit bei gleicher Triebwerkslast in der Phase k für ein LFZ i [s]
$FF_{k,i}$	Treibstoffmassendurchsatz in der Phase k für ein LFZ i [kg/s]
k	Phase des LTO 1-5 (Taxi-Out, Take-Off, Climb-Out, Approach, Taxi-In)
$E_{k,i}$	Emissionsmasse in der Phase k pro Luftfahrzeug i [g]
$E_{LTO,i}$	Emissionsmasse innerhalb des LTO pro Luftfahrzeug i [g]
$CO_{2,LFZ}$	Menge an ausgestoßenen Kohlenstoffdioxid pro Luftfahrzeug [kg]

Abbildungsverzeichnis

1.1	spezifischer Treibstoffverbrauch der deutschen Flotte [2]	1
1.2	Treibstoffverbrauch der Lufthansa Flotte [3]	2
1.3	CO ₂ -Ausstoß nach Sektoren [4]	2
2.1	Schema zum Aufbau der Triebwerkstypen [12]	7
2.2	Aufbau und Kreise Turbofantriebwerk [12]	8
2.3	Emissionen von Triebwerken (in Volumenprozent) in Anlehnung an [14], [15]	9
2.4	Vergleich der Schadstoffemissionen an einem Modellflughafen [9]	12
2.5	Prognose von CO ₂ -Emissionen im Luftverkehr und Cap [28]	18
2.6	Bereiche bzw. Struktur der Clean Sky Initiative [8]	24
2.7	Functional Airspace Blocks (FAB) [38]	25
2.8	Einflussbereich AIRE und ASPIRE [42], [43]	27
2.9	Politische Ziele für den Luftverkehr bis 2050 [46]	30
2.10	Minderungsziele in der EU und die Anteile entsprechender Maßnahmen [46]	32
3.1	Flughafenbetrieb – Prozessablauf [50]	35
3.2	Prozesse der Luftfahrzeuge am Flughafen [51]	35
3.3	TMA und Kontrollzone [51]	36
3.4	Abflugsegmente [51]	37
3.5	Gemeinsame Plattform zum Informationsaustausch [53]	38
3.6	Milestone Approach [54]	39
3.7	AOBT zu TSAT in Prozent [55]	41
3.8	TAM - zeitlicher und räumlicher Wirkbereich [56]	43
3.9	AOP zeitliche Einteilung [58]	46
3.10	Akteure im APOC in Anlehnung an [58]	47
3.11	Funktionaler Aufbau des TAM [58]	48
4.1	Leistungsmessung [63]	53
4.2	Inventarisierung von CO ₂ -Emissionen am Flughafen Hamburg [45]	57
4.3	Optimierte Rollwegführung [75]	63
4.4	Parameter zur Berechnung der LTO-Emissionen	69
4.5	EJPM Eingangs- und Ausgangsdaten in Anlehnung an [83]	75
4.6	AEM [84]	78
4.7	ICAO Referenz-LTO-Zyklus mit Schub [%] und Dauer [min] [15]	82
4.8	Modellflughafen	83
4.9	Ausschnitt aus der Luftfahrzeugdatenbank der ICAO [87]	87
4.10	Ausschnitt aus der Triebwerksdatenbank der ICAO [88]	87

4.11	Vorgehensweise zur Berechnung der CO ₂ -Emissionen	89
4.12	Ausschnitt der Auswertung für die Arrivals eines Tages	91
5.1	Continuous Descent Approach [93]	97
5.2	Beispiel Point Merge Verfahren [95]	98
5.3	Parallelbahnsystem - Ausgangsszenario [107]	106
5.4	Parallelbahnsystem - Verkehrsverlagerung [107]	107
5.5	Kreuzbahnsystem - Ausgangsszenario [107]	108
5.6	Kreuzbahnsystem - Verkehrsverlagerung [107]	108
5.7	Beteiligte Stakeholder an den Flughafenprozessen	112
5.8	Anteile des Treibstoffverbrauchs/Emissionen innerhalb des LTO-Zyklus . .	115
5.9	Implementierungsschritte für CO ₂ basierte Leistungsindikatoren	120

Tabellenverzeichnis

2.1	Schadstoffmengen [17]	10
2.2	Auswirkungen der Schadstoffe des Luftverkehrs auf die Umwelt [19], [9] . .	11
2.3	Grenzwerte von Schadstoffemissionen gemäß ICAO Annex 16 Volume 2 . .	14
2.4	Überblick ausgewählter Umweltprogramme	22
4.1	KPAs und dazugehörige KPIs [64]	55
4.2	KPIs SESAR Step 3 [71]	60
4.3	Zusammenfassung KPIs CO ₂	64
4.4	SMART Kriterien [77]	67
4.5	Berechnungsmethoden der ICAO [20]	69
4.6	Zapfluftkorrekturfaktor der LTO-Phasen [78]	71
4.7	Vergleich der Berechnungsmethoden von Emissionen	77
4.8	Vergleich von Schadstoffsimulationsmodellen	81
4.9	Einflussfaktoren	88
4.10	Berechnung des TIM	90
4.11	KPIs zur Verwendung in TAM	95
5.1	Einsparpotential von Treibstoff und Emissionen durch die Vermeidung von Holdings, A320 [99]	99
5.2	Einsparpotential von Treibstoff und Emissionen beim Rollen [88], [101] . .	102
5.3	Ineffizienzen bezüglich Treibstoffverbrauch und CO ₂ -Emissionen [1]	104
5.4	Zusammenfassung der Potentiale operativer Verfahren zur CO ₂ -Minderung	110
5.5	Berechnete Ist-Werte mittels Flugplan- und A-SMGCS-Daten	114
5.6	Ist-Werte des Modellflughafens beim Taxi-In der A320-200 Luftfahrzeuge .	116
5.7	Berechnete KPIs mit und ohne Single Engine Taxi	120

Kapitel 1

Motivation und Zielstellung

Mit dem wachsenden Interesse am Luftverkehr und der prognostizierten steigenden Anzahl an Flugbewegungen für die kommenden Jahrzehnte rücken auch die ökologischen Belange seitens der Bevölkerung und der Politik, welche „Klimaschutz“ einfordert, in den Vordergrund. So muss der Luftverkehr – wie auch alle anderen Verkehrsträger – auf Grund des vorhergesagten Wachstums von jährlichen 2-3 % seinen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Für das Jahr 2014 wird ein Luftverkehrswachstum (für Flüge nach Instrumentenflugregeln) innerhalb Europas von 2,8 % [1] prognostiziert. Das Wachstum des Luftverkehrs führt u.a. zum erhöhten Verbrauch von natürlichen Ressourcen, was wiederum nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt hat. Diese nachteiligen Auswirkungen liegen vor allem in der Verursachung von Abgasen (Schadstoffemissionen), im Verbrauch von Rohstoffen und der Beanspruchung von Flächen (Flughafenneubau oder Flughafenausbau) und damit einhergehender Flächenversiegelung [1].

Dennoch muss ein Wachstum des Luftverkehrs nicht unmittelbar zur Zunahme von Umweltbelastungen führen. Durch die stetige Verbesserung des spezifischen Energieverbrauchs und die Verringerung des Schadstoffausstoßes können Belastungen trotz des Verkehrswachstums begrenzt oder im besten Falle verringert werden. Abbildung 1.1 zeigt die Entwicklung des spezifischen Treibstoffverbrauchs pro Passagier. Seit dem Jahr 2010 konnte ein spezifischer Treibstoffverbrauch pro Passagier von weniger als vier Litern erreicht werden. Somit zeigt Abbildung 1.1, dass Anstrengungen zur Senkung des Treibstoffverbrauchs und damit der CO₂-Emissionen unternommen werden, allerdings werden diese von den Wachstumswerten des Luftverkehrs überholt.



Abb. 1.1: spezifischer Treibstoffverbrauch der deutschen Flotte [2]

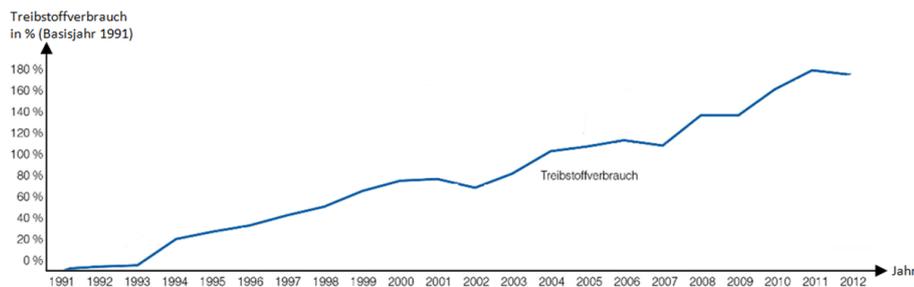
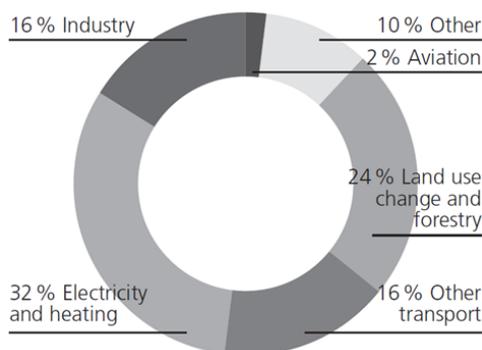


Abb. 1.2: Treibstoffverbrauch der Lufthansa Flotte [3]

Absolut gesehen steigt der Treibstoffverbrauch und damit auch die Umweltbelastungen nach wie vor, wie Abbildung 1.2 zeigt [2],[3].

Wird demnach der Treibstoffverbrauch, siehe Abbildung 1.2, betrachtet, so steigen der Verbrauch und damit die Emissionen im Luftverkehr seit 1991 deutlich an. Während der gesamte Verkehrssektor in Deutschland mit rund 18 % an den Emissionen beteiligt ist, trägt der Luftverkehr im Speziellen derzeit mit 2-3 % zum Emissionsausstoß bei, siehe dazu Abbildung 1.3. In Europa trägt der Luftverkehr mit 3,5 % zum Emissionsausstoß von Kohlenstoffdioxid bei [4].

Abb. 1.3: CO₂-Ausstoß nach Sektoren [4]

Die Verweildauern der Schadstoffe in der Atmosphäre sind auf Grund der Flughöhen größer als bei den restlichen Verkehrsträgern, weil der senkrechte Transport im Bereich der Stratosphäre (eine horizontale Schichtung) sehr langsam erfolgt. Hinzu kommt, dass auf Grund der niedrigen Temperaturen in der Höhe ein Einbringen von zusätzlichen wärme-strahlungsasorbierenden Gasen einen stärkeren Treibhauseffekt hervorruft als vergleichbare Emissionen am Boden bzw. in der Troposphäre. Auch die Bildung von Zirren¹ trägt zur Hemmung der Wärmerückstrahlung in den Weltraum bei (Verstärkung des Treibhauseffekts), in welcher Größenordnung ist bislang noch nicht ausreichend untersucht worden [5]. Umweltparameter wie Lärm und zum Teil auch Schadstoffe (wie beispielsweise CO₂) spielen in der Luftfahrt eine große Rolle. Aus diesem Grund werden zur Vermeidung oder Einschränkung dieser Umweltauswirkungen verschiedene Programme innerhalb Deutschlands, der Europäischen Union (EU) oder weltweit mit dem Ziel initiiert, die Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Umwelt zu verringern. Diese Initiativen und rechtlich

¹hohe, dünne Eiswolken

vorhandene Bestimmungen werden in dieser Arbeit untersucht.

Dabei spielt vor allem die Verwirklichung des einheitlichen Europäischen Luftraums eine wichtige Rolle. Die Realisierung dieses einheitlichen Flugverkehrsmanagements erfolgt durch ein Projekt der Europäischen Kommission und EUROCONTROL namens SESAR (Single European Sky ATM Research Programme). Mit der Umsetzung des SESAR-Konzepts im Jahr 2020 sollen u.a. die CO₂-Emissionen, welche durch das Luftverkehrsmanagement (Air Traffic Management) entstehen, um ca. 10 % pro Flug reduziert werden (auf Basis der Werte von 2005) [6]. Weitere Ziele werden u.a. in der Vision 2020 im Vergleich zum Jahr 2000 gesetzt [7], [8]:

- Reduzierung der CO₂-Emissionen pro Personen-Kilometer um 50 % bis 2020
- Reduzierung der Stickoxid (NO_x)-Emissionen um 80 % bis 2020
- Reduzierung weiterer Emissionen wie z.B. Ruß, Partikel und Kohlenstoffmonoxid
- nachhaltiger Produktionszyklus von Luftfahrzeugen: Entwurf, Herstellung, Wartung und Recycling

Um diese Ziele erreichen zu können ist die Schaffung eines einheitlichen Luftraums ein großer Schritt, aber nicht vollständig ausreichend. An dieser Stelle ist es wichtig, einen integrierten Ansatz zur Emissionsvermeidung zu wählen. Dabei spielen vier Kategorien eine entscheidende Rolle zur Minimierung von Schadstoffen [4]:

- technologischer Fortschritt (Triebwerkstechnik, alternative Treibstoffe)
- verbesserte Infrastruktur (Luftraummanagement, bedarfsgerechte Infrastruktur)
- operative Maßnahmen (optimierte Fluggeschwindigkeiten und Bodenprozesse)
- ökonomische Instrumente (globaler Emissionshandel)

Mit diesen vier Kategorien soll es ermöglicht werden, u.a. die CO₂-Emissionen entsprechend des oben genannten Prozentsatzes von 50 % zu senken.

Als Teil des Luftverkehrsmanagements spielen auch die Flughäfen und der Nahbereich (Terminal Manoeuvring Area, TMA) eine wichtige Rolle. Auf Grund des Wachstums des Luftverkehrs sind speziell die Flughäfen ein Knotenpunkt, welche für mehr als 30 % [1] (Turnaround) der Verspätungen verantwortlich sind. Diese Verspätungen und damit Abweichungen vom geplanten Ablauf sowie ggf. fehlende Informationen über diese Abweichungen führen am Flughafen zu nicht bedarfsgerechtem Anlassen der Triebwerke, zu längeren Hilfsgasturbinen-Laufzeiten bzw. zu Warteschlangen an der Start- und Landebahn [PPR]. Es existieren weitere Emissionsquellen wie z.B. die Energieversorgung der Bodenfahrzeuge innerhalb der Flugzeugabfertigung bzw. des gesamten Flughafenprozesses (landseitiger Zubringerverkehr) [9].

Die durch die Emissionsquellen entstandenen Schadstoffe können durch ein effizientes Verkehrsmanagement und alternative Energiequellen am Flughafen verringert werden. Dabei ist es erforderlich, dass alle am Flughafenprozess beteiligten Stakeholder auch mit Hilfe von Unterstützungssystemen einen reibungslosen Ablauf am Flughafen gewährleisten. Das kann unter anderem mittels eines Total Airport Management Ansatzes realisiert werden. Dieser komplexe Managementansatz, welcher zum Ziel hat alle Stakeholder in einer Art

Flughafenleitstand zu integrieren und eine bessere Zusammenarbeit zu ermöglichen, aber auch Systeme zu integrieren, welche ein frühzeitiges Eingreifen in den Ablauf am Flughafen, sowohl luft- als auch landseitig, ermöglichen, ist an den meisten Verkehrsflughäfen notwendig, weil eine bautechnische Erweiterung zur Vergrößerung der Flughafenkapazität sehr zeit- und kostenintensiv ist und oftmals der Platz nicht zur Verfügung steht. Dies liegt darin begründet, dass die Flughäfen meist dicht an Siedlungsgebieten liegen.

Dieser ganzheitliche Ansatz zur Verbesserung der flugbetrieblichen Prozesse mit dem Fokus auf die effiziente Ausnutzung der vorhandenen Kapazität, berücksichtigt bisher nicht die Umweltaspekte und im Speziellen keine CO₂-Emissionen. An dieser Stelle setzt die Diplomarbeit an, mit dem Ziel die aktuellen Themenbereiche Umweltparameter an Flughäfen und Total Airport Management zu vereinen. Dabei wird in dieser Arbeit der Fokus auf CO₂ basierte Leistungsparameter gelegt. Darüber hinaus wird deren Anwendung in einem Flughafenleitstand untersucht.

Die Arbeit teilt sich in fünf weitere Kapitel auf. Zunächst wird in Kapitel 2 der Fokus auf die grundlegenden Aspekte zur Entstehung und Wirkung von Emissionen des Luftverkehrs gelegt. In diesem Kapitel werden die Emissionsentstehung erläutert und im weiteren Verlauf die Klimawirksamkeit analysiert. Darauf aufbauend wird dargestellt, welche Klimaschutzaktivitäten im Luftverkehr und speziell an Flughäfen existieren. Dabei werden zum einen die rechtlichen Rahmenbedingungen zum Umweltschutz und zum anderen die freiwilligen Umweltaktivitäten herausgearbeitet.

Kapitel 3 ist ein weiteres Grundlagenkapitel und setzt sich mit dem eigentlichen Flughafenbetrieb und -management auseinander. Dabei liegt der Fokus auf den Konzepten des Airport Collaborative Decision Making und auf dem Total Airport Management. Außerdem erfolgt eine Betrachtung der Rolle von Emissionen innerhalb der jeweiligen Konzepte. Kapitel 4 beschreibt die Modellentwicklung zur CO₂-Berechnung. Dieser Modellbetrachtung vorangestellt ist die Untersuchung der Leistungsindikatoren mit Fokus auf die Umwelt. Bei der Modellentwicklung werden bereits existierende Modelle und Methoden auf ihren Einsatz zur Berechnung der CO₂-Emissionen an Hand eines Modellflughafens untersucht und eine entsprechende Methode ausgewählt. Darauf aufbauend werden erneut die Leistungsindikatoren auf Grundlage der ausgewählten Berechnungsmethode auf ihre Eignung hin untersucht. Außerdem erfolgt eine Überlegung, ob die Berücksichtigung von den Umwelt-Leistungsindikatoren für ein Total Airport Management realistisch sowie nutzbar erscheint. Die Überlegungen werden in Kapitel 5 fortgeführt. In Kapitel 5 werden zu dem mögliche operativer Verfahren innerhalb der einzelnen Flugphasen zur CO₂-Minimierung betrachtet. Aufbauend auf diesem und den vorangegangenen Kapiteln erfolgt im weiteren Verlauf dieses Kapitels die Betrachtung von Szenarien zur Minimierung von Emissionen durch operative Maßnahmen an einem Modellflughafen.

Abgeschlossen wird diese Arbeit mit dem Kapitel 6, welches eine Zusammenfassung und einen Ausblick gibt.

Kapitel 2

Aspekte zur Entstehung und Wirkung von Emissionen im Luftverkehr

Dieses Kapitel gibt zunächst einen Überblick über die Entstehung von Emissionen. Im weiteren Verlauf werden die Verbrennungsprodukte des Triebwerks genauer untersucht und die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs genauer betrachtet.

2.1 Emissionsentstehung

2.1.1 Begriffsdefinitionen Emission, Immission und Transmission

Emissionen sind von einer Anlage oder durch menschliche Tätigkeit ausgehende Luftverunreinigungen¹. „Luftverunreinigungen [...] sind die Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere durch Rauch, Ruß, Staub, Gase, Aerosole, Dämpfe oder Geruchsstoffe“ [BImSchG, 2002, §3 Absatz 4] [10].

Der Vorgang bei dem Luftschadstoffe, welche von Anlagen oder durch menschliche Tätigkeiten emittiert werden, sich in der Atmosphäre ausbreiten sowie z.T. chemisch und physikalisch umgewandelt werden, wird als Transmission bezeichnet.

Setzen sich die Luftschadstoffe aus der Atmosphäre wieder auf einer Oberfläche ab, handelt es sich um einen Schadstoffeintrag, die sog. Immission. Immissionen wirken als belastende Luftverunreinigungen auf einen bestimmten Ort, den Menschen oder andere Organismen ein [10].

Im Kontext dieser Arbeit umfasst der bestimmte Ort den Flughafen und dessen Nahbereich. Bei den Emissionen wird der Fokus auf Kohlenstoffdioxid (CO₂) gelegt. CO₂ entsteht u.a. bei der Verbrennung von Kerosin, worauf in Kapitel 2.1.3 näher eingegangen wird. In Bezug auf die Auswirkungen auf den Luftverkehr werden nur die Emissionen betrachtet und die Immissionen und Transmissionen vernachlässigt.

¹und Lärm, welcher allerdings nicht Gegenstand der Arbeit ist und nicht genauer betrachtet wird.

2.1.2 Funktionsweise des Triebwerks

Zum besseren Verständnis ist es erforderlich, Grundlagen für die Entstehung von Schadstoffen zusammenzutragen. Diese können auf zwei unterschiedliche Arten entstehen:

- natürlich
- anthropogen

Quellen für natürliche Emissionen sind Ozeane, die Vegetation sowie die Atmung der Tier- und Pflanzenwelt, aber auch Vulkanausbrüche [11].

Unter anthropogenen Quellen sind menschlich erzeugte Emissionen zu verstehen. Im Zusammenhang mit dieser Arbeit entstehen diese durch die Triebwerke, die Hilfstriebwerke, die Fahrzeuge am Boden und entsprechende Prozesse, wie z.B. das De-Icing.

Die Flugzeugtriebwerke können in zwei verschiedene Kategorien eingeteilt werden: Kolbenmotoren und Gasturbinen. Im kommerziellen Luftverkehr kommen wegen der Effizienz bei hohen Geschwindigkeiten in großen Höhen und der höheren Leistungsdichte vorrangig Gasturbinen zum Einsatz. Die Gasturbinen können in verschiedene Unterklassen eingeteilt werden:

- Turbojet
- Turboprop
- Turbofan
- Turboshaft²

Deren Aufbau kann Abbildung 2.1 auf der nächsten Seite entnommen werden.

Im zivilen Luftverkehr kommen Turbofan- oder Turboproptriebwerke zum Einsatz. Im weiteren Verlauf werden nur die Turbofantriebwerke genauer betrachtet, weil die Turboproptriebwerke vorrangig für geringere Geschwindigkeiten (500-700 km/h) ausgelegt sind, wohingegen die Turbofantriebwerke bei Geschwindigkeiten bis 1000 km/h betrieben werden können und in den Geschwindigkeitsbereichen von Verkehrsflugzeugen (Mach 0,75 – 0,9) einen besseren Wirkungsgrad besitzen [13].

Das Turbofantriebwerk erzeugt den Schub ausschließlich durch die thermodynamische Beschleunigung des sie durchströmenden Gases. Dabei besteht das Triebwerk aus einem Einlauf, einem Fan, einem Verdichter, einer Brennkammer, einer Turbine und einer Schubdüse. Die Energiegewinnung erfolgt über einen thermodynamischen Kreisprozess, der innerhalb des Triebwerks abläuft und aus insgesamt vier Schritten besteht: Verdichtung, Wärmezufuhr, Entspannung und Restwärmeabfuhr [12].

²Der Turboshaft kommt vorrangig bei Helikoptern zum Einsatz und wird an dieser Stelle der Vollständigkeit halber erwähnt.

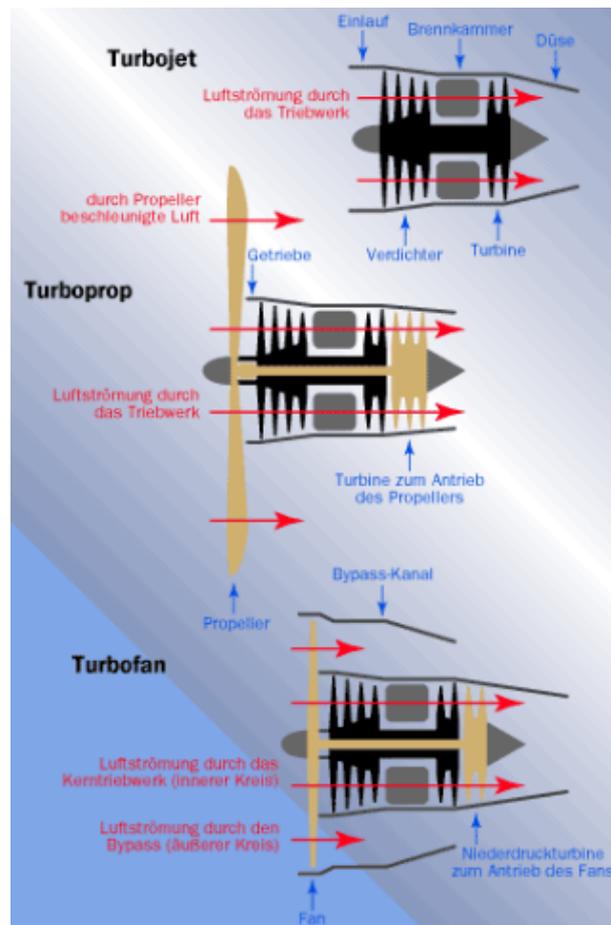


Abb. 2.1: Schema zum Aufbau der Triebwerkstypen [12]

Innerhalb des Turbofantriebwerks resultiert nur ein kleiner Teil der Schubkraft aus dem inneren Kreislauf, welcher aus Verdichter, Brennkammer und Turbine besteht. Der größere Anteil am erzeugten Schub wird durch den äußeren Kreislauf erzeugt, welcher aus Niederdruckturbine und Fan besteht. Dieser Kaltluftstrom umhüllt das Triebwerk und dämpft zugleich den vom Triebwerk verursachten Lärm. Der Warmluftstrom hingegen ist jener, der durch den Ausstoß der Verbrennungsprodukte erzeugt wird. Das Verhältnis zwischen den beiden (Kaltluftstrom zu Warmluftstrom) wird als Nebenstromverhältnis bezeichnet. Je größer dieses ist, desto wirtschaftlicher, umweltfreundlicher und leiser ist das Triebwerk. Der Aufbau und die Kreise werden in der nachfolgenden Abbildung 2.2 noch einmal verdeutlicht [12].

Über den Einlauf (Inlet) wird die vom Triebwerk benötigte Luft dem Verdichter zugeführt. Im Nebenstromtriebwerk wird vor der ersten Kernstrom-Verdichterstufe eine Fanstufe eingesetzt. Die Fanstufe (Duct fan) sorgt für die Beschleunigung der Luft, welche als Sekundärstrom (Secondary air stream) zwischen Kern-Triebwerk und der äußeren Verkleidung (Outer nozzle) hindurchströmt. Der primäre Luftstrom (Primary air stream) gelangt hingegen in den Verdichter (Compressor), welcher sich aus mehreren Verdichterstufen zusammensetzt.

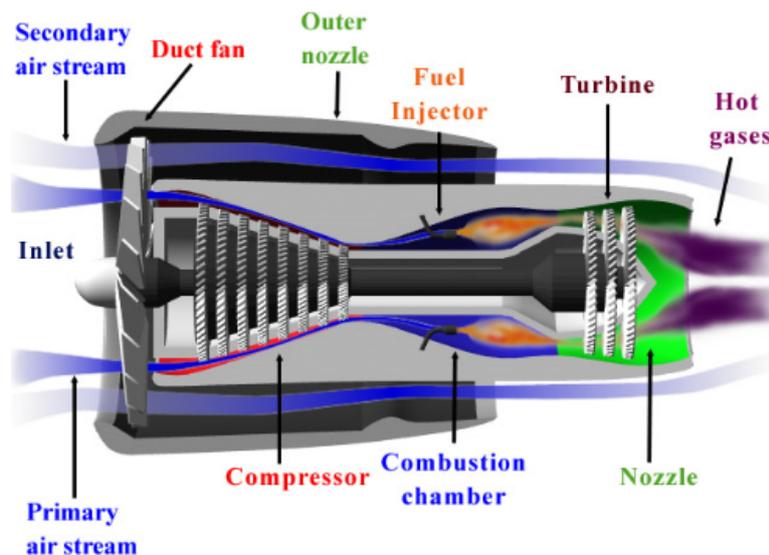


Abb. 2.2: Aufbau und Kreise Turbofantriebwerk [12]

In den einzelnen Verdichterstufen wird mechanische Energie (Wellenarbeit: der Verdichter wird über eine Welle von der Turbine angetrieben) in Strömungsenergie umgewandelt. Die Luft, welche den Verdichter durchströmt, wird komprimiert und verlangsamt und damit steigt der Energiegehalt. In der Brennkammer (Combustion chamber) wird der Luft Energie (Brennstoff) von außen zugeführt (Fuel injector). Das ist nötig, damit die Luftströmung am Triebwerksaustritt eine höhere kinetische Energie aufweist als am Eintritt. Im Anschluss an die Brennkammer folgt die Turbine, welche hauptsächlich für den Antrieb des Fans und Verdichters fungiert (Strömungsenergie wird in mechanische Wellenenergie umgewandelt). Im Anschluss an die Turbine befindet sich die Düse (Nozzle), welche die Aufgabe hat, die in der Strömung enthaltene Energie in Schub umzuwandeln. Dabei wird die potentielle Energie des ausströmenden Gases durch Entspannung in kinetische Energie umgewandelt. Das heiße Gas (Hot gases) strömt mit hoher Geschwindigkeit aus der Düse [12].

2.1.3 Treibstoffe und Verbrennungsprodukte

In der kommerziellen Luftfahrt wird fast ausschließlich Kerosin verwendet, allerdings kommt auch Flugbenzin (Aviation Gasoline, AvGas) zum Einsatz. Da Flugbenzin für Kolbenmotoren verwendet wird, die wiederum vorrangig in der General Aviation vorkommen, wird es an dieser Stelle nicht genauer betrachtet.

Kerosin ist ein Gemisch, welches sich aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen zusammensetzt:



C_n Kohlenstoff
 H_m Wasserstoff

Wie Abbildung 2.3 zeigt, entstehen bei der Verbrennung hauptsächlich die Produkte Wasser ($\approx 28\%$) und Kohlenstoffdioxid (72%), aber auch weitere Verbrennungsprodukte [14].

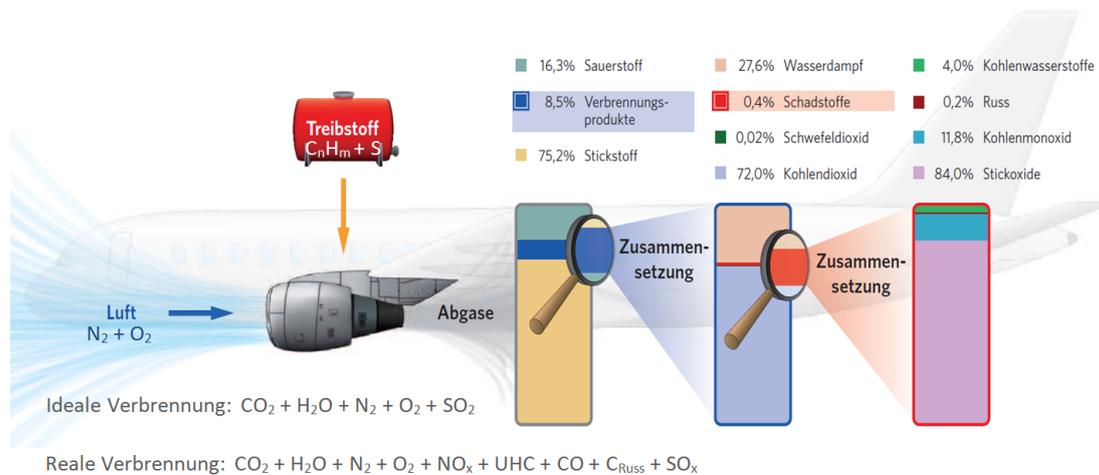


Abb. 2.3: Emissionen von Triebwerken (in Volumenprozent) in Anlehnung an [14], [15]

Eine ideale Verbrennung, wie sie auch in Abbildung 2.3 dargestellt ist, findet in der Realität nicht statt. Vielmehr erfolgt eine unvollständige (reale) Verbrennung auf Grund sich ändernder Umweltparameter (Temperatur, Luftdichte, usw.). Die Verbrennungsprodukte können in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- phasenunabhängige Stoffe
- phasenabhängige Stoffe

Als phasenunabhängige Stoffe werden die Produkte vollständiger Verbrennung bezeichnet, was auf Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf und Schwefeldioxid zutrifft. Diese Verbrennungsprodukte verhalten sich proportional zum Kraftstoffverbrauch, welcher sich wiederum proportional zur Schublast verhält. Die Schwefeloxide entsprechen dem Schwefelgehalt des Treibstoffes [16].

Als phasenabhängige Stoffe werden jene Schadstoffe bezeichnet, die von der Triebwerkslast bzw. Schubeinstellungen (z.B. Climb und IDLE) beeinflusst werden. Zu diesen Stoffen zählen unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonoxid, Ruß und Feinstaubpartikel, sowie Nebenprodukte vollständiger Verbrennung wie Stickoxide [16].

Für beide Stoffe gilt, dass im Flughafennahbereich und am Boden die Triebwerke nicht effizient arbeiten, weil die Triebwerke für den Reiseflug und somit für großen Höhen ausgelegt sind und nicht für den Bodenbetrieb. Das führt dazu, dass die Schadstoffausstöße im Flughafennahbereich größer sind; vor allem beim Starten mit dem größten Gewicht im Gegensatz zu den restlichen Flugphasen und unter entsprechend den Bedingungen angepasstem Schub.

„Die Senkung von Kerosinverbrauch und Emissionen wurde bisher in erster Linie durch die Erhöhung von Verbrennungstemperatur und Druck in der Brennkammer erreicht. Diese Bedingungen begünstigen jedoch die Bildung von Stickoxiden“ [ADV, S.16] [17]. Zur

Reduzierung von NO_x wurden neue Brennkammersysteme (mehrstufige Verbrennungskammern) und variable Treibstoff-Luftgemische entwickelt [17].

In Tabelle 2.1 können abschließend die Schadstoffmengen, welche aus einem Kilogramm verbrannten Kerosin³ entstehen, entnommen werden (in Abbildung 2.3 kann der prozentuale Anteil entnommen werden).

Verbrennungsprodukt	Anteil pro einem Kilogramm Kerosin
Kohlenstoffdioxid (CO_2)	3,155 kg/kg
Wasserdampf (H_2O)	1,237 kg/kg
Stickstoffoxid (NO_x)	6-20 g/kg
Schwefeldioxid (SO_2)	1 g/kg
Kohlenstoffmonoxid (CO)	0,7-2,5 g/kg
Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (UHC)	0,1-0,7 g/kg
Ruß	0,01-0,03 g/kg

Tabelle 2.1: Schadstoffmengen [17]

2.2 Klimawirksamkeit des Luftverkehrs

2.2.1 Mögliche Einflüsse der Emissionen auf das Klima

Die in Kapitel 2.1.3 aufgelisteten Verbrennungsprodukte haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt, sowohl am Boden als auch in der Luft. Die verschiedenen Flugphasen werden dabei aufgeteilt in Taxi-Out, Start, Steigflug, Reiseflug, Sinkflug, Anflug, Landung, Taxi-In. Die lokalen Auswirkungen beziehen sich dabei vorrangig auf den bodennahen Bereich. Dieser Bereich wird als LTO-Zyklus bezeichnet. Dieser Zyklus und die entsprechenden Phasen werden im Kapitel 4.4.1 näher erläutert [14].

Entsprechend den Berechnungen des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change) ist es auf der Erdoberfläche in den letzten Jahren um ca. $0,7^\circ\text{C}$ wärmer geworden. Dabei trägt der Luftverkehr mit ca. $0,03^\circ\text{C}$ bei [18]. Der Schadstoffausstoß des globalen Luftverkehrs scheint mit 2-3 % p.a. gemessen am gesamten Schadstoffausstoß des Verkehrs relativ gering zu sein, dennoch sind die Auswirkungen vor allem in Reiseflughöhen (8-13 km) deutlich größer. In diesen Emissionshöhen stellt der Luftverkehr den einzigen Emittenten dar. Auch die Tatsache, dass der kommerzielle Luftverkehr mit Ausnahme weniger Jahre, welche von politischen Ereignissen und Wirtschaftskrisen geprägt waren, ein stetiges Wachstum aufweist bzw. aufwies, beeinflusst die Schadstoffkonzentration negativ [18].

³ Kerosinverbrennungsprodukte sind abhängig von der Betriebsform. Die Angaben in Tabelle 2.1 beziehen sich auf Werte in Reiseflughöhe.

Die nachfolgende Tabelle 2.2 zeigt, welche klima- und umweltbeeinflussenden Effekte sowohl CO₂ als auch die anderen Schadstoffemissionen des Luftverkehrs aufweisen [19], [9].

Austoß	Effekt	Wirkungszeit	Strahlungsantrieb
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	direkt treibhauswirksam, wetterbeeinflussend	variabel, teilweise über 100 Jahre	stark erwärmend
Stickoxid (NO _x)	Ozonbildung und -abbau, Bildung von Smog und Saurer Deposition	Monate bis Jahre	erwärmend
	Methanabbau	zehn Jahre	kühlend
Wasserdampf (H ₂ O)	direkt treibhauswirksam, Kondensstreifen, Nebel, Wolkenfelder	Wochen (Bildung von Kondensstreifen nach wenigen Minuten)	erwärmend, kühlend (Kondensstreifen)
Wasser (H ₂ O)	Ausbreitung der Kondensstreifen zu Zirren	Stunden	erwärmend
Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (UHC)	in Bodennähe Bildung von Sommersmog	unbekannt	erwärmend
Ruß	Sichtminderung, Giftstoffträger, Kondensationskerne	Wochen	erwärmend
Kohlenstoffmonoxid (CO)	reduziert Sauerstoffkapazität im Blut	variabel	erwärmend
Schwefeldioxid (SO ₂)	vernachlässigbare Konzentration, „Saurer Regen“	unbekannt	neutral

Tabelle 2.2: Auswirkungen der Schadstoffe des Luftverkehrs auf die Umwelt [19], [9]

Tabelle 2.2 verdeutlicht die einzelnen Auswirkungen der Emissionen auf die Umwelt. Diese Effekte werden auf Grund der Zunahme der Transportleistungen im weltweiten Luftverkehr (1990-2004 Wachstum um 5,4 % p.a.) in den kommenden Jahren weiter steigen. Allerdings steht dem enormen Wachstum ein geringerer Treibstoffverbrauch von 2-3 % gegenüber, sodass die Belastungen u.a. von CO₂ geringer angestiegen sind als die Transportleistung selbst. Die absoluten Emissionen hingegen sind deutlich gewachsen und das zum Teil höher als die Zunahme des Treibstoffverbrauches (z.B. NO_x-Anstieg um 4-5 % p.a.) [18].

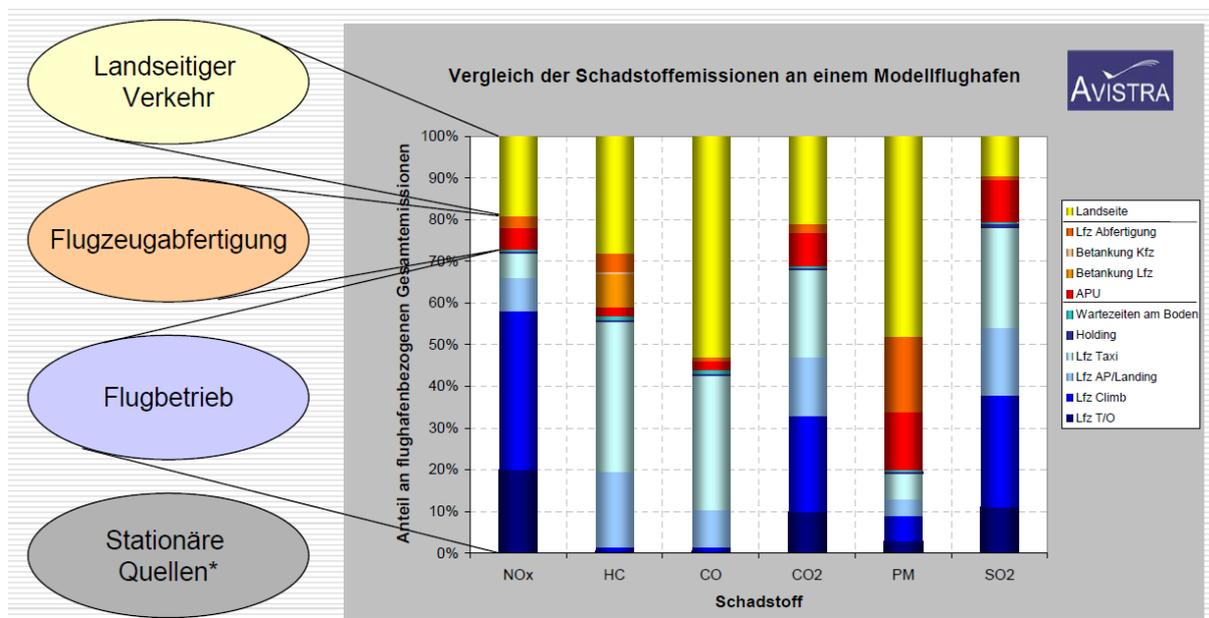
2.2.2 Emissionsquellen an Flughäfen

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Schadstoffe von Triebwerken genauer untersucht. Insbesondere im Bereich von Flughäfen entstehen Schadstoffe nicht ausschließlich durch

die startenden, landenden, rollenden und parkenden Luftfahrzeuge. Vielmehr spielen auch die Aktivitäten am Flughafen beim Ausstoß von Schadstoffen eine entscheidende Rolle. Es existieren nach ICAO Document 9889 vier verschiedene Quellen für Emissionen [20]:

- Emissionen der Luftfahrzeuge (Haupttriebwerk, Hilfsgasturbine (Auxiliary Power Unit, APU))
- Emissionen der Luftfahrzeugabfertigung (Ground Power Unit, Ground Support Equipment, welches sich u.a. aus Tank- und Transportfahrzeugen und Fluggastbrücken zusammensetzt)
- Emissionen der Infrastruktur bzw. der stationären Quellen (Kraftwerke, Instandhaltung, Treibstofflagerung)
- Emissionen des landseitigen Verkehrs (motorisierter Individualverkehr, Taxi)

Die Anteile der Emissionsquellen an den verschiedenen Schadstoffen können für einen beliebigen Modellflughafen exemplarisch folgender Abbildung 2.4 entnommen werden.



* Stationäre Quellen hier nicht berücksichtigt, da die Emissionen nicht zwangsläufig lokal anfallen.

Abb. 2.4: Vergleich der Schadstoffemissionen an einem Modellflughafen [9]

In den nachfolgenden Teilen der Arbeit werden auf Grund der Aufgabenstellung jene Emissionen betrachtet, welche durch die Luftfahrzeuge emittiert werden.

Mit diesem und dem vorangegangenen Kapitel, wurden die Begrifflichkeiten Emissionen, Immissionen, Transmissionen, die Funktionsweise der Triebwerke und die Klimawirksamkeit des Luftverkehrs grundlegend erläutert und das Problemfeld dargestellt. Im weiteren Verlauf werden zunächst die gesetzlichen Bestimmungen, Umweltprogramme und Forschungstätigkeiten analysiert, welche zur Schadstoffminimierung beitragen sollen.

2.3 Klimaschutzaktivitäten

2.3.1 Gesetzliche Vorschriften zum Umweltschutz

Im Folgenden werden bestehende Vorschriften, Gesetze und Mechanismen zur Minimierung der Schadstoffausstöße beschrieben. Diese existieren zum Teil auf internationaler, europäischer und bzw. oder nationaler Ebene. In Bezug auf den Umweltschutz und das Diplomarbeitsthema wird lediglich auf die Vorschriften im Bereich der Luftreinhaltung bzw. auf die Grenzen beim Ausstoß von Luftschadstoffen eingegangen. Umweltaspekte wie Lärm und Flächenversiegelung werden nicht betrachtet.

Auf internationaler Ebene ist der International Civil Aviation Organization (ICAO) Annex 16 Volume 2 für die Begrenzung von Emissionen aus dem Luftverkehr von Bedeutung. Auf europäischer Ebene ist vor allem die Integration des Luftverkehrs in den Emissionshandel ein wichtiges Instrument zur Verringerung von Emissionen. Auch die Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG, welche in diesem Kapitelabschnitt genauer analysiert wird, ist eine wichtige Richtlinie für den Umweltschutz. Auf nationaler Ebene wird der Fokus auf das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) und die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) gelegt.

2.3.1.1 Internationale Vorschriften

Der ICAO Annex 16 Volume 2 (Environmental Protection – Aircraft Engine Emissions) ist eine Durchführungsvorschrift zur Bestimmung von Schadstoffemissionen von Luftfahrzeugtriebwerken. Es werden zudem Schadstoffgrenzwerte festgelegt, welche die Schadstoffausstöße direkt an der Emissionsquelle limitieren. Diese schadstoffregulierenden Standards wurden 1981 verabschiedet und müssen bei der Neuzulassung von Triebwerken eingehalten und durch den Hersteller nachgewiesen werden. Dabei existieren Begrenzungsvorschriften für die folgenden Emissionen:

- Ruß
- gasförmige Emissionen:
 - unverbrannte Kohlenwasserstoffe (UHC)
 - Kohlenstoffmonoxid (CO)
 - Stickoxide (NO_x)

Die Ruß-Emissionen werden dabei als dimensionsloser Wert, der Rauchzahl, angegeben. Dabei darf der Wert von 50^4 bzw. $83,6 (F_\infty)^{-0,274}$ innerhalb des LTO-Zyklus eines Turbojet- und Turbofantriebwerks⁵ nicht überschritten werden, wobei der kleinere Wert von beiden angesetzt wird. Die Rauchzahl ist abhängig von den Phasen des ICAO Start- und Landezyklus (Landing and Take-Off Zyklus, LTO). Dieser Zyklus wird in Kapitel 4.4.1 genauer erläutert.

Die Grenzwerte für unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonoxid und Stickoxide gelten für alle zivilen Turbojet- und Turbofantriebwerke (Schub $\geq 26,7$ kN), welche

⁴dimensionsloser Wert, siehe Annex 16 Volume 2 Kapitel 2.2.2

⁵Zulassung nach dem 01.01.1983 und Schub $\geq 26,7$ kN, F_∞ = Startschubrate auf Meereshöhe

nach dem 01.01.1986 produziert wurden. Bei der Messung der Emissionen wird auf ein Referenzszenario zurückgegriffen, welches zur Vereinheitlichung und damit besseren Vergleichbarkeit genutzt werden soll. Das Szenario enthält u.a. verschiedene Schubstellungen der Triebwerke auf Basis der Phasen des LTO-Zyklus. Außerdem werden die Messwerte auf die Bedingungen der Internationalen Standardatmosphäre (ISA) korrigiert. Der folgenden Tabelle 2.3 können die Grenzwerte der Emissionen entnommen werden [21]:

UHC [g/kN]	$D_p/F_\infty = 19,6$
CO [g/kN]	$D_p/F_\infty = 118$
NO _x [g/kN] (abhängig von dem Zeitpunkt der Triebwerksherstellung)	01.01.1986 bis 31.12.1995: $D_p/F_\infty = 40 + 2\Pi_\infty$ 01.01.1996 bis 31.12.2003 ⁶ : $D_p/F_\infty = 32 + 1,6\Pi_\infty$

Tabelle 2.3: Grenzwerte von Schadstoffemissionen gemäß ICAO Annex 16 Volume 2

- D_p Masse des emittierten Gases (basierend auf dem LTO-Zyklus)
 F_∞ Startschubrate auf Meereshöhe ($v = 0$)
 Π_∞ Triebwerksdruckverhältnis zwischen Verdichtereintritt und Verdichteraustritt beim Start für F_∞

Entsprechend des ICAO Annex 16 Volume 2 existiert im ICAO Document 9646 eine Emissionsdatentabelle für Turbojet- und Turbofantriebwerke aller gemäß des Annexes 16 verifizierten Triebwerke [22].

Der ICAO Annex 16 muss entsprechend den genannten Anforderungen in nationales Gesetz übernommen werden, wobei die Grenzwerte auch verschärft werden können, aber nicht unterhalb der Anforderungen der ICAO liegen dürfen. Der Annex 16 selbst gibt keine Auskünfte über weitere Grenzwerte von Emissionen, welche durch die Verbrennung von Kerosin entstehen. Da die Datentabelle Informationen zum Treibstofffluss in den einzelnen Phasen des LTO-Zyklus enthält, können diese Informationen direkt zur Berechnung der CO₂-Emissionsmengen genutzt werden. Dennoch sei darauf hingewiesen, dass die CO₂-Emissionen derzeit noch keinen Regelungen durch die ICAO unterliegen.

Während der ICAO Annex 16 Volume 2 eine Richtlinie für die Triebwerkszulassung darstellt, gibt das Dokument 9889 - Airport Air Quality Manual - Hinweise zur Umweltschonung speziell an Flughäfen. Hierbei existieren zwei weitere mögliche Verfahren zur Schadstoffminimierung:

- alternative Maßnahmen bei Prozessen am Flughafen
- marktbasierter Emissionsminderung

Das Dokument enthält weiterhin Informationen zu den Grenzwerten von Emissionen in verschiedenen Ländern und zeigt die verschiedenen Emissionsquellen an Flughäfen auf. Außerdem können dem Document 9889 im Anhang Methoden zur Berechnungen von

⁶Insofern das Triebwerk nach dem 31.12.2003 hergestellt wurde, ist die Formel für den zulässigen Grenzwert von NO_x zusätzlich von dem Startschub ($v = 0$) und dem Triebwerksdruckverhältnis abhängig.

Triebwerksemissionen entnommen werden. Diese werden in Kapitel 4.2.2 genauer beschrieben. Dieses Dokument soll den Flughäfen u.a. als Hilfestellung dienen und mögliche Vorschläge zur Minderung von Schadstoffen, deren Analyse und Berechnung liefern.

Anhand dieser existierenden internationalen Richtlinien bezüglich der Begrenzung von Schadstoffemissionen zeigt sich, dass keine verbindlichen Richtlinien zu CO₂-Grenzwerten vorliegen. Das gilt sowohl bei der Triebwerkszulassung als auch während des Flughafenbetriebs. Im Folgenden werden die europäischen Vorschriften, hinsichtlich der Einbeziehung von CO₂, genauer betrachtet.

2.3.1.2 Europäische Vorschriften

Die Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 21.05.2008 über „Luftqualität und saubere Luft für Europa“ legt Luftqualitätsziele zur Vermeidung bzw. Verringerung von gesundheits- und umweltschädlichen Auswirkungen fest. Des Weiteren dient die Richtlinie und die darin enthaltenen Maßnahmen der Gewährleistung repräsentativer und vergleichbarer Daten. Die Gewährleistung erfolgt mittels standardisierter Messtechniken und gemeinsamen Kriterien für die Standorte der Messstationen. Die Messstationen liegen meist direkt auf dem Flughafengelände oder aber im Flughafennahbereich [23].

Die Beurteilung der Luftqualität umfasst in der Richtlinie Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid, Stickstoffoxid, Feinstaubpartikel (PM₁₀ und PM_{2,5}), Blei, Benzol und Kohlenstoffmonoxid. In Bezug auf diese Schadstoffe erfolgt die Beurteilung der Luftqualität der einzelnen Mitgliedsstaaten der EU. Bei der Konzentration dieser Schadstoffe gilt: Werden bestimmte Grenzwerte nicht überschritten, sind diese Werte möglichst aufrechtzuerhalten oder ggf. weiter zu verbessern. Beim Erreichen der Grenzwerte müssen Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Dabei sind die Mitgliedsstaaten verpflichtet, entsprechende Luftqualitätspläne aufzustellen, welche Maßnahmen zur Erreichung der Zielwerte enthalten. Die Luftqualitätspläne sollten bis Anfang 2010 umgesetzt werden. Es bestand allerdings die Möglichkeit, diese Frist um fünf Jahre zu verlängern. Neben der Umsetzung dieser Anforderungen sind die Mitgliedsstaaten zudem aufgefordert, die Öffentlichkeit und sämtliche umweltrelevanten Organisationen über die Luftqualität, die Luftqualitätspläne etc. zu unterrichten. Diese Unterrichtung kann in Form von Jahresberichten erfolgen. Entsprechend der bereits erwähnten Schadstoffe enthält die Richtlinie sowohl obere als auch untere Beurteilungsschwellen. Diese Schwellen beziehen sich in Abhängigkeit des Schadstoffes auf 1-Stunden-Grenzwerte, 8-Stunden-Grenzwerte, 24-Stunden-Grenzwerte und Jahresmittelwerte. Die entsprechenden Immissionsgrenzwerte können dem Anhang II der Richtlinie 2008/50/EG entnommen werden [23].

Diese europäische Richtlinie gibt an dieser Stelle, genauso wie der ICAO Annex 16 Volume 2, keine CO₂-Grenzwerte an. Es existieren aber auf europäischer Ebene Richtlinien zur Einführung von Technologien und Innovationen, welche u.a. darauf abzielen, die CO₂-Emissionen zu verringern. Dazu zählt z.B. die Richtlinie 2007/219/EG „Zur Gründung eines gemeinsamen Unternehmens zur Entwicklung des europäischen Flugverkehrsmanagementsystems der neuen Generation (SESAR)“. Auf dieses Projekt wird im Kapitel 2.3.2.1 näher eingegangen. Hinzu kommt eine Richtlinie zur Umsetzung innovativer und umweltfreundlicher Technologien, die Richtlinie 2008/71/EG „über die Gründung des Gemeinsamen Unternehmens Clean Sky“. Auf das Unternehmen Clean Sky wird ebenfalls im Kapitel 2.3.2.1 eingegangen. Des Weiteren existieren europäische, marktbasierende Instru-

mente, speziell der Emissionshandel, welche genauer in Kapitel 2.3.1.4 betrachtet wird.

2.3.1.3 Nationale Vorschriften

Den rechtlichen Rahmen für den Umweltschutz in Deutschland bildet das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umweltwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Das Ziel, welches mit diesem Gesetz verfolgt wird, ist der Schutz vor den von Menschen, Tieren etc. erzeugten Schadstoffen und das Vorbeugen der Entstehung von Emissionen. Innerhalb dieses Gesetzes wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Vorschriften nicht für Flugplätze gelten, außer es gelten die Anforderungen für Betriebsbereiche oder der sechste Teil des BImSchG. „Ein Betriebsbereich ist der gesamte unter der Aufsicht eines Betreibers stehende Bereich [...]“ [BImSchG, 2002, §3 Absatz 5a] [10]. Demnach wird der Betriebsbereich eines Flughafens auf die Flughafenfläche bis zum Flughafenzaun begrenzt. Der sechste Teil des BImSchG umfasst die Lärminderungsplanung und ist innerhalb dieser Diplomarbeit nicht von Relevanz, weil der Aspekt der Schadstoffemissionen der Luftfahrzeuge untersucht werden soll.

Dennoch existieren allgemeine Anforderungen beim Betrieb von Luftfahrzeugen: „Sie [Luftfahrzeuge] müssen so betrieben werden, dass vermeidbare Emissionen verhindert und unvermeidbare Emissionen auf ein Mindestmaß beschränkt bleiben“ [BImSchG, 2002, §38] [10]. Dieser Abschnitt gibt zunächst keine Auskünfte über spezielle Grenzwerte von Schadstoffen und kann somit nur bedingt auf Flughäfen bzw. Luftfahrzeuge angewendet werden. Im Zusammenhang mit dem Bundes-Immissionsschutzgesetz existieren verschiedene Durchführungsverordnungen u.a. die 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Diese Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen ist die unmittelbare Umsetzung der europäischen Richtlinie (siehe 2008/50/EG) in deutsches Recht. Allerdings wurden auch in dieser Verordnung keine CO₂-Schadstoffe berücksichtigt, sodass an dieser Stelle nicht näher auf die Verordnung eingegangen wird [24]. Neben dieser 39. Verordnung existiert auch die Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft. Diese Verwaltungsvorschrift, welche 2002 in Kraft getreten ist, ist Teil des Genehmigungsverfahrens von Anlagen und konkretisiert die Anforderung derer. Dabei gliedert sich die TA Luft in zwei Teile:

- Immissionsteil: enthält Vorschriften zum Schutz der umliegenden Siedlungsgebiete vor Schadstoffbelastungen
- Emissionsteil: enthält Anforderungen zur Verhütung schädlicher Umwelteinwirkungen und legt Emissionsgrenzwerte für alle relevanten Luftschadstoffe fest

Der Anwendungsbereich dieser Vorschrift beläuft sich auf den Neubau und die Veränderungen von bereits existierenden Anlagen und hat somit keinen direkten Einfluss auf die Emissionen von Flughäfen. Des Weiteren wird der Anwendungsbereich zwar auf Verkehrsträger erweitert, aber der Luftverkehr wird ausgelassen, sodass an dieser Stelle nicht weiter auf die Verordnung eingegangen wird [25].

2.3.1.4 Marktbasierte Instrumente

Die vorangegangenen Betrachtungen der Vorschriften, Gesetze und Richtlinien auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene haben gezeigt, dass es kaum rechtliche Instrumentarien gibt, welche die CO₂-Emissionen im Luftverkehr, sowohl die der Luftfahrzeuge selbst als auch die der Flughäfen, der Flugsicherung etc., begrenzen. Dennoch sollte der Luftverkehr zur Verbesserung des Klimas beitragen und somit auch zur Minimierung der CO₂-Emissionen. Da in der Vergangenheit keine rechtlichen Grenzwerte zum CO₂-Ausstoß im Luftverkehr festgelegt wurden, besteht dennoch die Möglichkeit, den Ausstoß über marktbasierte Mechanismen zu regulieren. Einer dieser Mechanismen ist der Emissionshandel.

Allerdings fand der Luftverkehr im Kyoto Protokoll von 1998 keine Beachtung und auch seitens der ICAO wurde auf der Tagung des ICAO-Ausschusses für Umweltschutz in der Luftfahrt 2004 einvernehmlich festgelegt, dass ein Emissionshandelssystem unter der Schirmherrschaft der ICAO nicht genügend Anreize bietet, um weiter verfolgt zu werden. Daraufhin wurde auch bei der ICAO Vollversammlung 2004 kein neues Rechtsinstrument geschaffen, sondern lediglich ein offenes Emissionshandelssystem befürwortet. Somit ist es den Staaten freigestellt, ob diese einen Emissionshandel einführen oder nicht.

Dennoch hat die Europäische Union (EU), auf Grundlage des beschlossenen offenen Emissionshandels im Luftverkehr und auf Grund der Minderungsziele der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) von 2012 bis 2020 um mindestens 20 % bzw. 30 %⁷ (gegenüber 1990) beschlossen, dass der Luftverkehr in den Emissionshandel integriert wird und somit seinen Beitrag zur Erfüllung dieser Verpflichtungen (Minderung der THG-Emissionen um 20 %) leisten soll. Somit wurde die Richtlinie 2003/87/EG um die Einbeziehung des Luftverkehrs in das System für den Handel mit THG-Emissionszertifikaten in der Gemeinschaft erweitert. Die Änderungen können der Richtlinie 2008/101/EG, welche am 02.02.2009 in Kraft getreten ist, entnommen werden [27].

Diese Richtlinie galt bis zum Ende des Jahres 2012 und wurde von der neuen Regelung (2009/29/EG) zur neuen Handelsperiode 2013-2020 abgelöst.

Da die Luftfahrzeugbetreiber und demnach die Luftverkehrsgesellschaften (LVG) den größten Einfluss auf die Wahl und den Betrieb des Luftfahrzeugmusters haben, sollen sie für die Einhaltung der Verpflichtungen dieser Richtlinie herangezogen werden. Die Verpflichtungen betreffen insgesamt sieben Treibhausgase:

- Kohlenstoffdioxid (CO₂)
- Methan (CH₄)
- Distickstoffoxid/Lachgas (N₂O)
- Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (H-FCKW)
- Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC)
- Schwefelhexafluorid (SF₆)

⁷,, [...] sofern sich andere Industrieländer zu vergleichbaren Emissionsminderungen und wirtschaftlich weiter fortgeschrittene Entwicklungsländer zu einem ihren Verantwortlichkeiten und jeweiligen Fähigkeiten angemessenen Beitrag verpflichten.“ [26]

- Stickstofftrifluorid (NF₃)

Gemäß dieser Richtlinie werden alle von einem Flughafen der EU (sowie Island, Liechtenstein und Norwegen) startenden und landenden Luftfahrzeuge in das Emissionshandelsystem einbezogen. Während bis zum Jahr 2012 lediglich eine Berichterstattungspflicht über die Menge der ausgestoßenen Schadstoffe vorhanden war, trat der eigentliche Emissionshandel erst 2012 in Kraft. Der CO₂-Ausstoß ist durch eine klare Obergrenze (Cap) gekennzeichnet, sodass die Luftverkehrsgesellschaften einen stärkeren Anreiz für technische Verbesserungen erhalten, siehe Abbildung 2.5. Der Abbildung können auch die CO₂-Prognosen bis 2020 für den europäischen Luftverkehr entnommen werden. Die Prognosen gehen von einer CO₂-Erhöhung von 2012 (ca. 280 Mio. t CO₂) bis 2020 (ca. 380 Mio. t CO₂) um 100 Mio. t CO₂ aus [28].

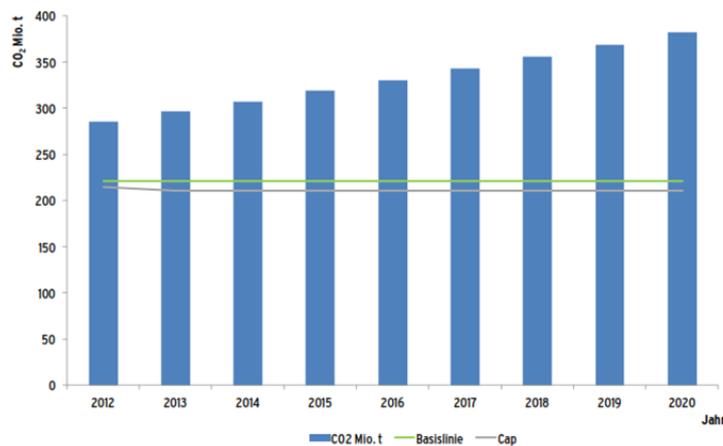


Abb. 2.5: Prognose von CO₂-Emissionen im Luftverkehr und Cap [28]

Der Emissionshandel im Luftverkehr ist sowohl von kostenlosen Zertifikaten als auch von Auktionen zur Ersteigerung von Zertifikaten geprägt. Im Jahr 2012 wurden 84 % der Emissionszertifikate kostenlos zugeteilt. Dieser Prozentsatz verringert sich in den darauffolgenden Jahren und beträgt 2013 nur 82 %. Der Richtwert für die kostenfreie Zuteilung von Zertifikaten im Jahr 2012 von 0,6797 Zertifikaten pro 1.000 Tonnenkilometer⁸ an die Luftverkehrsgesellschaften wird berechnet durch Division der Zahl der Zertifikate, welche kostenfrei vergeben werden, durch die Summe der Tonnenkilometer, die in den übermittelten Anträgen (Berichterstattungen der Luftverkehrsgesellschaften über die erfolgten Tonnenkilometer p.a.) der Kommission angegeben sind [27], [28]:

$$\text{zu vergebende Zertifikate} = \frac{\text{Anzahl an kostenfreien Zertifikaten}}{\sum \text{der geleistete Tonnenkilometer}} \quad (2.1)$$

Die kostenfreie Zuteilung der Zertifikate in Höhe eines bestimmten Prozentsatzes verfolgt das Ziel, dass die Luftverkehrsgesellschaften motiviert werden, nur Emissionen in Höhe

⁸Tonnenkilometer (tkm), ist ein Maß für die Transportleistung von Gütern, Passagieren etc. und ist das Produkt der transportierten Masse in t und der dabei zurückgelegten Wegstrecke in km

der für sie kostenfreien Zertifikate auszustoßen. Außerdem werden die Luftverkehrsgesellschaften bei ihren Bemühungen in Form von neuen Technologien nicht durch zusätzliche Ausgaben (bei Erhebung von Zertifikatspreisen für jede ausgestoßene Tonne CO₂) beeinträchtigt. Des Weiteren führt die Verknappung der zulässigen CO₂-Höchstgrenze zu einem steigenden Anreiz, in klimaschonende Technologien und verbesserte Prozesse zu investieren.

Die Versteigerungsquote liegt derzeit bei 15 %. Es wird zudem eine Reserve in Höhe von 3 % vorgehalten. Diese kann von den Luftverkehrsgesellschaften in Anspruch genommen werden, insofern sie z.B. ihre Tätigkeiten erst im Überprüfungsjahr aufgenommen haben oder die Anzahl an Tonnenkilometern über 18 % im Vergleich zur vorangegangenen Handelsperiode gestiegen ist [28].

Verstöße im Erwerb von Zertifikaten führen zur Auferlegung von Sanktionen. Die Sanktion auf Grund von Emissionsüberschreitung beträgt 100 € pro ausgestoßener Tonne CO₂ oder CO₂-Äquivalent, für die keine Zertifikate erworben wurde [27].

In den europäischen Emissionshandel werden nicht alle Luftfahrzeugbetreiber und Luftfahrzeugtypen einbezogen. Es existieren die folgenden Ausnahmen [27]:

- Luftfahrzeuge mit einem maximalen Abfluggewicht < 5.700 kg
- Flugbewegungen nach Sichtflugregeln
- Rettungs-, Polizei-, Militär- und Forschungsflüge
- Luftfahrzeugbetreiber, welche weniger als zwei Flugbewegungen pro Tag bzw. weniger als 243 Flüge in drei aufeinanderfolgenden Viermonatszeiträumen durchführen
- Luftfahrzeugbetreiber, welche weniger als 10.000 t CO₂ pro Jahr emittieren

Ein derzeit großes Problem des Emissionshandels liegt in der Einbeziehung von Luftverkehrsgesellschaften aus nicht EU-Staaten in das europäische Emissionshandelssystem. „Gegen die Einbeziehung von Fluggesellschaften aus nicht EU-Staaten in das europäische Emissionshandelssystem gibt es erheblichen Widerstand, insbesondere von den USA, Russland, China und Indien“ [BMVBS, o.J.] [29]. Allerdings wurden bei der Tagung des Rats der ICAO Ende November 2012 Fortschritte hinsichtlich des Ziels zur weltweiten Regelung von Emissionen erzielt, sodass die europäische Union eine vorübergehende Aussetzung der Pflichten im Emissionshandel für ankommende und abfliegende Luftfahrzeugbewegungen aus Drittstaaten für das vergangene und das laufende Jahr beschlossen hat. Dennoch bleiben sämtliche Pflichten, Abgaben und Dokumentationen innerhalb des europäischen Wirtschaftsraums von dieser Maßnahme unberührt. Insofern bei der kommenden Vollversammlung der ICAO Ende des Jahres keine Einigung auf einen Zeitplan für die Einführung einer weltweiten marktbasierter Emissionsminderungsmaßnahme für den Luftverkehr erzielt wird, werden die Drittstaaten wieder in das europäische Emissionshandelssystem eingegliedert [28].

Ein weiterer Kritikpunkt bei dem Alleingang der EU ist die Wettbewerbsverzerrung zwischen den einzelnen Luftverkehrsgesellschaften (LVG); speziell zwischen den europäischen und den außereuropäischen LVGs. Mit der Einführung des Emissionshandels werden die Ticketpreise der europäischen LVGs vermutlich stärker ansteigen als jene der außereuropäischen. Eine Konsequenz der Ticketerhöhung könnte eine Verlagerung von Verkehrströmen in den außereuropäischen Raum bedeuten. Dabei existieren drei Szenarien [30]:

1. Direktflüge mit dem Start und Ziel in Europa werden auf Flughäfen außerhalb der EU gelenkt.
2. Transferflüge, bei dem Europa lediglich ein Zwischenstopp darstellt, werden auf Flughäfen außerhalb der EU verschoben.
3. Interkontinentalflüge, welche in der EU starten oder landen, werden bestmöglich umgeleitet, sodass eine Zwischenlandung außerhalb der EU in Bezug auf die Emissionszertifikate lohnenswert wird.

Das Szenario eins ist relativ unrealistisch, da die Umwege für einen Passagier zu hoch wären. Die anderen beiden Szenarios sind deutlich realistischer. Zumal für Direktflüge zwischen Europa und Fernost mehr Zertifikate erworben werden müssen als bei einer Zwischenlandung außerhalb Europas. Es stellt sich heraus, dass die Konkurrenz und Wettbewerbsverzerrung bei europäischen LVGs nicht vorhanden ist bzw. relativ neutral ist. Anders hingegen ist es bei Interkontinentalflügen. Wie gerade erläutert sind Direktflüge vom Emissionshandel stärker betroffen als Flüge mit Zwischenstopps. Besonders betroffen sind dabei europäische Luftverkehrsgesellschaften, welche auf Grund fehlender Verkehrsrechte, Flüge mit Zwischenstopps nicht allein offerieren können [30].

Neben diesen Kritikpunkten stellt allerdings das EU-ETS einen Anreiz für andere Länder dar, ein ähnliches System einzuführen. Diese Länder könnten dann die entsprechenden Einnahmen selbst nutzen und müssten diese nicht an die EU abgeben [30].

Neben der Problematik der Einbeziehung von Drittstaaten und der Wettbewerbsverzerrung sind auch die CO₂-Zertifikatspreise ein wichtiges Thema. Der Emissionshandel hat erst dann positive Auswirkungen, wenn die Schadstoffe minimiert werden. Das kann u.a. durch Verkehrsvermeidung oder verbesserte Technologien erfolgen. Sind die Preise pro Zertifikat allerdings so gering, dass keine Anreize für die Luftverkehrsgesellschaften bestehen, dann hat der Emissionshandel sein Ziel verfehlt. Dies ist derzeit ein großes Problem. Der Preis liegt momentan bei weniger als 5 €. Über eine Anpassung der Zertifikatspreise wird innerhalb der EU noch abgestimmt [31].

Neben dem Emissionshandel existieren weitere marktbasierende Mechanismen, welche aber noch nicht rechtlich (einheitlich) umgesetzt werden [32]:

- Aufhebung der Mehrwertsteuerbefreiung für grenzüberschreitende Luftfahrzeugbewegungen (derzeit werden in Deutschland nur für inländische Flüge Mehrwertsteuern erhoben),
- Auferlegung einer Kerosinsteuer mit dem Ziel u.a. der Gleichbehandlung zu anderen Verkehrsträgern,
- Erhebung von emissionsbezogenen Landegebühren (noch nicht flächendeckend angewandt).

Mit Hilfe dieser marktbasierenden Mechanismen soll der Anreiz für den Einsatz schadstoffärmerer Triebwerke geschaffen werden. Im Jahr 2008 haben sich die Flughäfen Frankfurt und München für eine dreijährige Testphase zu emissionsbezogenen Landegebühren entschieden. Dabei wurden Gebühren für die Schadstoffe Stickoxide (NO_x) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (UHC) während der Start- und Landephase (LTO Zyklus) pro Einzelflug erhoben. Diese Kosten für z.B. NO_x pro Luftfahrzeug betragen 3,00 € pro kg Stickoxidäquivalent. Die Emissionsmenge wird mit folgender Formel berechnet [33]:

$$NO_{x,LFZ} = \frac{n_{TW} \cdot \sum_{i=1}^4 t_i \cdot F \cdot EI}{1000} \quad (2.2)$$

$NO_{x,LFZ}$	Menge an ausgestoßenen Stickoxiden pro Luftfahrzeug [kg]
n_{TW}	Anzahl Triebwerke
t_i	Dauer der einzelnen Phasen i des LTO-Zyklus [s]
F	Treibstoffverbrauch [kg/s]
EI	Emissionsindex [g/kg]

Grundlage für die Ermittlung der Emissionswerte sind die ICAO Datenbank und die Datenbank der FOI Swedish Defence Research Agency. Insofern Triebwerkstypen in diesen Datenbanken nicht aufgezeichnet sind bzw. widersprüchliche Informationen zu den Triebwerken vorliegen, wird der höchste Emissionswert des entsprechenden Luftfahrzeugs angenommen.

Diese dreijährige Testphase der Flughäfen München und Frankfurt wurde beendet und von den Flughäfen wurden diese emissionsbezogenen Landeentgelte in die Flughafenentgeltverordnung übernommen [34], [33].

Der Luftverkehr trägt die Kosten durch die zum Teil noch nicht flächendeckenden emissionsbezogenen Landeentgelte, welche im Luftverkehrsgesetz §19b differenziert zu den Landeentgelten aufgelistet sind und den Einnahmen durch Flughafenentgelte, Flugsicherungsgebühren und Luftsicherheitsgebühren selbst. Ergänzend kommt der Luftverkehr auch für externe Kosten auf, wie beispielsweise lärmbedingte Start- und Landeentgelte. Außerdem wird der Luftverkehr vom Bund zur Abgabe einer Luftverkehrsteuer verpflichtet. Dies erfolgt seit 2011 zusätzlich zu den ohnehin schon existierenden Gebühren. Entsprechend des Gesetzes LuftVStG (Luftverkehrssteuergesetz) werden beim Abflug (gewerbliche Beförderung) eines Passagiers von innerdeutschen Standorten in Abhängigkeit der Flugstrecke folgende Gebühren erhoben [35]:

- 7,50 € für Kurzstrecken (≤ 2500 km) oder innerdeutsche Flüge⁹
- 23,43 € für Mittelstrecken (2501 - 6000 km)
- 42,18 € Langstrecken (> 6000 km)

Mit diesen Beträgen wird der Luftverkehr zu den existierenden Infrastrukturkosten mehrfach zum Bezahlen aufgefordert. Lediglich durch die Einführung des Emissionshandels können die Luftverkehrssteuern gesenkt werden. Seitens des Bundes ist festgelegt, dass die Summe der Einnahmen aus Luftverkehrssteuern und Emissionszertifikaten eine Milliarde Euro nicht überstreiten dürfen. Das heißt, dass je höher die Einnahmen durch die Versteigerung von Emissionszertifikaten sind, die Luftverkehrsteuer tendenziell sinkt. Die Luftverkehrsteuer zielt demnach auf keinen ökologischen Aspekt ab, wie der Emissionshandel, sondern bezieht lediglich den Luftverkehr in die Mobilitätsbesteuerung ein und das, obwohl der Luftverkehr für die eigene Infrastruktur selbst aufkommt [36].

⁹Für innerdeutsche Flüge werden zusätzlich Mehrwertsteuern erhoben, sodass die Abgaben von 7,50 € auf 8,93 € steigen.

2.3.2 Forschungs- und entwicklungsseitige Bemühungen

2.3.2.1 Umweltprogramme

Nachdem im vorangegangenen Kapitelabschnitt die gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Umweltschutz bezogen auf die Schadstoffe betrachtet wurden, werden im Anschluss die Umweltprogramme und -aktivitäten fokussiert. Auf Grund der Vielfalt an Umweltprogrammen kann innerhalb der Diplomarbeit nur exemplarisch auf einzelne Aktivitäten eingegangen werden. Dabei kann zunächst zusammengefasst werden, dass sich die meisten Umweltprogramme mit der Verbesserung der Luftfahrzeugtechnik (Triebwerke, Aerodynamik usw.) als Maßnahme zur Emissionsminderung beschäftigen. Dennoch fokussieren einige Umweltprogramme auch den Bereich des Luftverkehrsmanagements.

Die folgende Tabelle 2.4 gibt einen Überblick über die im weiteren Verlauf genauer betrachteten Aktivitäten hinsichtlich des Einflussbereiches (Luftraum bzw. Flughafen) und über das Optimierungspotential. Hinsichtlich des Optimierungspotentials wird zusätzlich zwischen technischen Verbesserungen der Luftfahrzeuge oder Infrastruktur am Flughafen und Verbesserungen des Betriebsablaufs am Flughafen oder im Luftraum unterschieden.

Umweltprogramme (Ausnahme: ACARE ¹⁰)	Einflussbereich		Optimierungsbedarf	
	Luftraum	Flughafen	technisch	Betriebsablauf
ACARE (Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe), Flight-path 2050	x	x		x
Clean Sky	x	x	x	
SESAR (Single European Sky ATM Research)	x	x		x
CLEEN (Continuous Lower Emissions, Energy and Noise)	x	x	x	
VALE (Voluntary Airport Low Emissions Program)		x	x	
AIRE (Atlantic Interoperability Initiative to reduce Emissions)	x	x		x
ASPIRE (Asia and Pacific Initiative to reduce Emissions)	x	x		x
Airport 2030, Green Airport		x		x

Tabelle 2.4: Überblick ausgewählter Umweltprogramme

¹⁰ACARE formuliert eine europaweite Zielstellung zum Umweltschutz im Bereich der Luftfahrt. Zur Realisierung dieser Zielstellung leiten sich verschiedene Umweltprogramme ab, wie z.B. SESAR und Clean Sky.

ACARE

Der Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE) ist ein europäisches Rahmenprogramm, welches die übergeordneten Ziele zum Umweltschutz aus der Perspektive der Luftfahrt erstellt hat. Zudem stellt ACARE eine Technologieplattform (Informationsaustausch) zur Verbesserung des europäischen und weltweiten Flugtransportsystems dar. Ziele der mitarbeitenden europäischen Staaten, Luftfahrtverbände und Vereine beziehen sich auf die Verminderung von CO₂ und NO_x-Emissionen, Lärm-minderung und der Etablierung eines einheitlichen Luftraummanagements. Diese Ziele wurden innerhalb der Strategic Research Agenda (SRA) präzisiert. Der Zielzeithorizont war auf das Jahr 2020 ausgerichtet und wurde bis zum Jahr 2050 erweitert (Flightpath 2050). Die „High Level“ Ziele bis 2050 umfassen [7]:

- Umweltschutz
 - Reduktion von CO₂ um 75 %, von NO_x um 90 % und von Lärm um 65 % im Vergleich zu 2000
 - nachhaltiger Produktionszyklus von Luftfahrzeugen (Entwurf, Herstellung, Wartung und Recycling)
 - Emissionsfreies Rollen am Boden
- Gesellschaftliche Belange und Marktbelange
 - 90 % der Reisen innerhalb Europas sollen nicht länger als vier Stunden von Tür-zu-Tür in Anspruch nehmen
 - Verspätungen ≤ 1 min, unabhängig von der Wetterlage
- führende Rolle der Industrie
 - stark wettbewerbsorientiert
 - verringerte Entwicklungskosten
- Sicherheit
 - weniger als ein Unfall pro 10 Millionen kommerziellen Flugbewegungen
- Priorisierung der Forschung
 - europäische Forschungs- und Innovationsstrategien werden gemeinsam von allen Beteiligten definiert und implementiert

Dieses Rahmenprogramm stellt die größte Vision Europas dar und setzt somit den Rahmen für die Forschung und Entwicklungsförderung auf politischer Ebene. Während die politischen Ziele und Gesetze weniger auf CO₂ fokussiert sind, außer dem Emissionshandel, wird mit dieser Vision ACARE eine Reduktion von CO₂ um 75 % bis 2050 angestrebt. Mit welchen Mitteln dies zu erfolgen hat, wird in der Vision nicht genauer angeführt. Auf der Grundlage dieser Zielformulierung, wurden verschiedene Umweltprogramme initiiert, um diese Ziele möglichst zeitnah erreichen zu können. Einige der europäischen, nationalen und internationalen Programme werden im Folgenden näher erläutert.

Clean Sky

Das Clean Sky Programm befasst sich mit der Weiterentwicklung der Luftfahrzeugtechnologien. Das Projekt wurde im Rahmen der Aktivitäten des ACARE initiiert und ist eine öffentlich-private Partnerschaft (Public-Private-Partnership, PPP) zwischen der Europäischen Kommission und der Luftfahrtindustrie, so wie Single European Sky (SESAR). Ziel ist die Umsetzung von innovativen und umweltfreundlichen Technologien in allen Segmenten des zivilen Luftverkehrs und in allen technologischen Bereichen wie Motoren, Systemen, Materialien und Lebenszyklen. Es existieren insgesamt sechs Teilbereiche des Projekts Clean Sky, um die Ziele von ACARE umzusetzen [8].

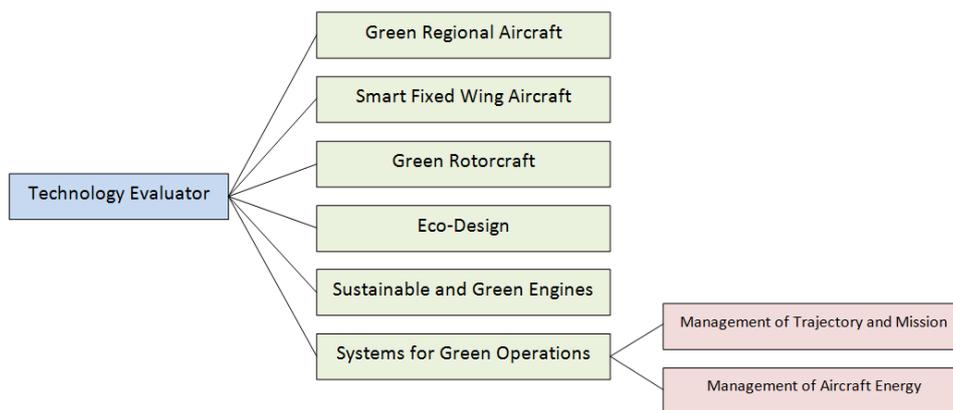


Abb. 2.6: Bereiche bzw. Struktur der Clean Sky Initiative [8]

Der Teilbereich „Systems for Green Operations“ soll zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bei den rollenden Luftfahrzeuge und der fliegenden Luftfahrzeuge im Bereich des Flughafens führen. Neben den Maßnahmen zur Verbesserung der Luftfahrzeuge selbst werden auch innerhalb dieses Umweltprogramms operationelle Verfahren erläutert, welche eine Reduzierung u.a. von CO₂ bewirken. Dazu zählt das Management of Trajectory and Mission (MTM) und das Management of Aircraft Energy. Bezogen auf die Luftfahrzeugenergie wird angestrebt den Fokus auf die elektrischen Energien zu legen. Die Flugtrajektorien sollen optimiert werden, sodass der Einfluss der Luftfahrzeuge auf die Umwelt minimiert wird. Außerdem soll innerhalb des Umweltprogramms ein System entwickelt werden, welches das elektrische Rollen ohne Triebwerke oder APU ermöglicht, für ein ökologisch verbessertes Rollen am Boden. An dieser Stelle wird auch eine Optimierung durch das Schleppen der Luftfahrzeuge bis zur Start- und Landebahn ohne laufendes Triebwerk gesehen. Speziell bei den Trajektorien zielt das Programm auf verbesserte Steig-, Reise- und Sinkprofile ab, welche eine mehrheitliche Optimierung von Lärm, Emissionen, Treibstoffverbrauch, Zeit etc. ermöglicht [8].

SESAR

Das Single European Sky ATM Research Programme ist das europäische Air Traffic Management (ATM) Forschungs- und Modernisierungsprogramm zur Vereinheitlichung, Harmonisierung und Synchronisierung der Dienste im Rahmen des ATM. Die Initiative von

der EUROCONTROL, der Europäischen Kommission und Industrieunternehmen (Public-Private-Partnership, PPP) zielt demnach auf ein effizientes und umweltfreundliches ATM-System für die nächsten Jahrzehnte ab. Das Projekt hat sich konkret eine Reduktion der Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Umwelt bis 2020 um 10 % (Treibstoffverbrauch) pro Flug zum Ziel gesetzt. Außerdem steht die Minimierung im Bereich von Lärm und Kerosinverbrauch im Vordergrund. SESAR ist eine Kombination aus technischen, wirtschaftlichen und regulierenden Aspekten und nutzt die Gesetzgebung des Single European Sky (SES), um die Handlungen der einzelnen Stakeholder im ATM-Prozess zu vereinen. In der SES-Initiative sollen die einzelnen Luftverkehrskontrollbehörden innerhalb Europas zu einem einheitlichen System zusammengeführt werden, um das Luftverkehrsaufkommen auch in Zukunft bewältigen zu können. Während derzeit die Lufträume sowohl zwischen den Staatsgrenzen als auch innerhalb der einzelnen Staaten unterteilt sind, sieht die Initiative einen einheitlichen Luftraum über Europa vor. Dabei wird der europäische Luftraum in neun grenzübergreifende Luftraumblöcke (Functional Airspace Blocks, FAB) eingeteilt, siehe dazu Abbildung 2.7 [37], [38].

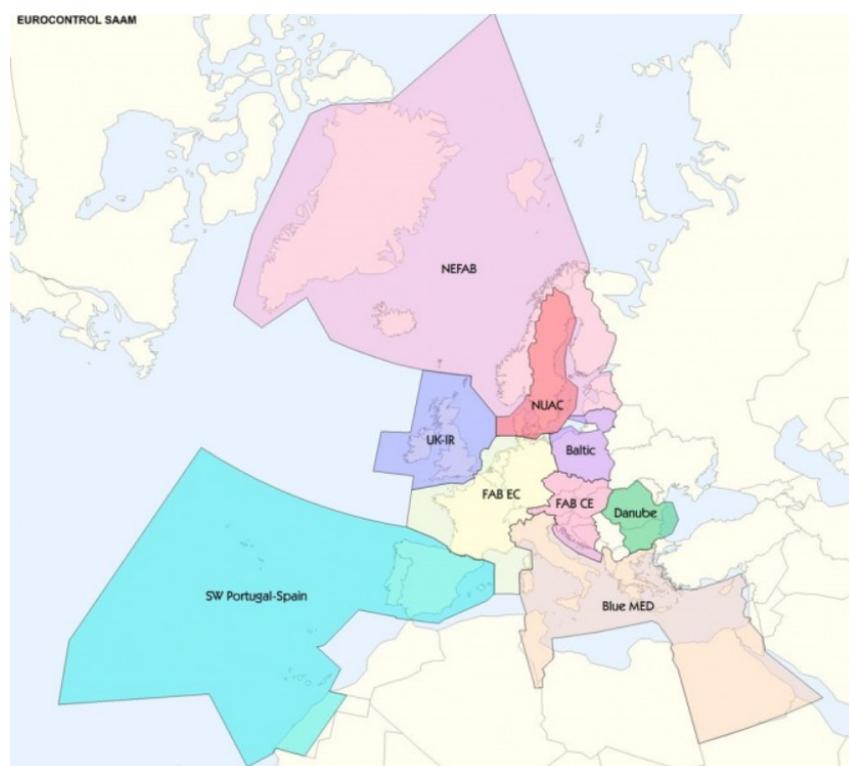


Abb. 2.7: Functional Airspace Blocks (FAB) [38]

Das Projekt SESAR gliedert sich in insgesamt drei Phasen [39]:

- Die Definitionsphase zum europäischen Air Traffic Management (ATM) Masterplan inkl. eines Maßnahmenkatalogs, welcher für die Realisierung eines neuen Luftverkehrsmanagementkonzepts notwendig ist.
- Die Umsetzungsphase, um den Masterplan realisieren zu können. An dieser Stelle werden Aktionspläne und gesetzliche Maßnahmen (Ausrüstung und Normen) erforderlich sein, um die Interoperabilität außereuropäischer Systeme mit den in Bezug

auf einen einheitlichen Luftraum umgerüsteten boden- und bordgestützten Systemen zu gewährleisten.

- In der Errichtungsphase verpflichten sich alle Stakeholder gemeinsam Maßnahmen zu koordinieren und diese umzusetzen, um den Masterplan zu realisieren. Diese Phase wird auch durch die großtechnische Produktion, die Beschaffung und Umsetzung neuer Flughafeninfrastruktur gekennzeichnet sein.

Diese Phasen erstrecken sich im Zeitraum von 2005-2020. Bei der Implementierung des SESAR Konzepts im Jahr 2020 wird ein Verminderungspotential an ATM-bezogenen CO₂-Emissionen von 10 %¹¹ pro Flug angegeben [37]. Zum Erreichen verbesserter Bodenprozesse wurden an vielen Flughäfen schon erste Schritte unternommen, wie z.B. Airport Collaborative Decision Making (A-CDM), welches in Kapitel 3.2 genauer beschrieben wird, aber auch durch Pre-Departure Sequences und verbesserte Wetterinformationen. Außerdem wurden im Rahmen von SESAR verschiedene Versuchsreihen zu den Abläufen am Boden durchgeführt. Dabei wurde der Fokus an den Flughäfen auf die Rollwege und -zeiten gelenkt. Diese Versuchsreihen fanden am Flughafen Roissy Charles de Gaulle statt. Dabei wurde gezeigt, dass mit einer Boeing 747 eine Treibstoffreduzierung von 20 kg/min bei zwei ausgeschalteten Triebwerken und 10 kg/min mit einem ausgeschalteten Triebwerk beim Rollen eingespart werden können. Auf Grund dieser Versuche kann bei einer durchschnittlichen Rollzeit am Versuchsflughafen von einer Einsparung von ca. 300 kg ausgegangen werden. Bei einem Airbus 320 können bis zu 90 kg Treibstoff eingespart werden. Dies führt zu einer starken Reduktion von CO₂. Auch eine verbesserte Rollwegführung und optimierte Standplatzvergabe führen entsprechend der Versuche zu einer Reduktion von CO₂. Diese Versuche werden teilweise auch bei dem Modellflughafen, siehe Kapitel 5, welcher in dieser Diplomarbeit untersucht wird, angewandt. In Nordamerika wird die Flugsicherung ebenfalls modernisiert, dieses Pendant zu SESAR nennt sich Next Generation Air Transportation System (NextGEN) [37].

CLEEN

Das Continuous Lower Emissions, Energy and Noise (CLEEN) Programm - das amerikanische Pendant zum Clean Sky - zielt drauf ab, Luftfahrzeugtechnologien zu verbessern und alternative Treibstoffe zu entwickeln und zu demonstrieren. Dabei fokussieren die neuen Luftfahrzeugtechnologien bzw. die alternativen Treibstoffe auf die Minderung von Lärm, Emissionen und den Treibstoffverbrauch. Die nachfolgend aufgelisteten Ziele sollen bis 2015 (im Vergleich zu 1998) erreicht werden [40]:

- Lärmreduktion um 32 dB (Lärmstufe 4),
- NO_x-Reduzierung innerhalb des LTO um 60 %,
- Minimierung des Treibstoffverbrauchs mittels neuer Technologien um 33 % im Vergleich zu herkömmlichen Technologien,
- Evaluierung der Effekte von alternativen Treibstoffen auf die Luftfahrzeug- bzw. Triebwerksleistung.

¹¹Im Vergleich zu 2005

see abdeckt. Beispielhaft befasst sich AIRE mit Continuous Descent Approach (CDA), einem Anflugverfahren, bei welchem das Luftfahrzeug mit minimaler Triebwerksleistung (optimal: Leerlauf) sinkt und weitestgehend Horizontalflugphasen vermeidet. Dieses Verfahren zielt darauf ab, Treibstoff und somit auch Schadstoffemissionen wie CO₂ zu sparen [42], [43]. Dieser optimierte Anflug spielt vor allem im Flughafennahbereich eine wichtige Rolle und soll genauer in Kapitel 5, als Möglichkeit der Treibstoff- und damit auch CO₂-Einsparung im Anflug, untersucht werden. Alternative Anflüge können demnach auch als Leistungsindikator betrachtet werden, insofern diese an einem Flughafen angewendet werden und mit den herkömmlichen Anflugverfahren verglichen werden.

Airport 2030, Green Airport

Airport 2030 ist ein durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Projekt im Rahmen der Spitzenclusterinitiative Metropolregion Hamburg. Partner dieser Initiative sind u.a. das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), die Siemens AG und der Hamburger Flughafen AG. In diesem Projekt „Effizienter Flughafen 2030“ werden folgende Ziele (global) angestrebt:

- Reduzierung von Emissionen und Lärm am Flughafen
- Reduzierung der Kosten für Luftverkehrsgesellschaften und Flughafenbetreiber
- Prozessbeschleunigung am Boden
- Erhöhung des Passagierkomforts am Boden
- Steigerung der Passagier- und Frachtkapazitäten
- Verbesserung der Pünktlichkeit im Luftverkehr

Green Airport ist ein Teil dieses Projektes. Ziel ist es, modellhaft einen zukünftigen Flughafen darzustellen, welcher möglichst geringe Umweltauswirkungen durch seinen Betrieb aufzeigt. Dabei sollen Planungssysteme umgestaltet bzw. neu entwickelt werden, welche den Operateuren Informationen für ihre Entscheidungen und deren Auswirkungen auf die Umwelt zur Verfügung stellen. Außerdem sollen die Akteure an einem Flughafen physisch in einem Leitstand zusammen arbeiten und Entscheidungen treffen mit Hilfe der verschiedenen Planungs- und Prognosesystemen, entsprechend einem Total Airport Managements (TAM). Dieses Konzept ist Bestandteil der Diplomarbeit und wird gesondert in Kapitel 3.3 vorgestellt. Entsprechende Systeme müssen zum Teil noch entwickelt werden und sollen in einem DEMO-Raum bzw. der Verkehrsleitzentrale des Hamburger Flughafens direkt integriert werden [44].

Zusammenfassung

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Umweltprojekte und -aktivitäten stellen einen Ausschnitt vieler verschiedener Maßnahmen zur Verbesserung der Umweltauswirkungen dar. Oftmals existieren an den jeweiligen Flughäfen selbst Initiativen, um die Klimaauswirkungen des Luftverkehrs zu verringern. Beispielhaft sei an dieser Stelle der Flughafen

Hamburg genannt. Dieser stellt mit seiner Umwelterklärung 2011-2014 verschiedene Maßnahmen zur Verringerung von Emissionen und Lärm vor, welche speziell in Bezug auf Schadstoffe im Folgenden stichpunktartig aufgelistet werden [45]:

- Betrieblicher Umweltschutz und Umweltmanagement (zertifiziert nach dem europäischen Eco-Management and Audit Scheme, EMAS¹² und International Organization for Standardization (ISO) 14.001¹³) zur kontinuierlichen Verbesserung der Umweltleistungen unter Einbeziehung aller am Flughafen Beteiligten und Bewertung dieser. EMAS dient dem Flughafen vorrangig zur Erfassung der Umweltauswirkungen des Flughafenbetriebs.
- Neben der Auditierung durch EMAS sind auch viele Flughäfen bei Airport Carbon Accreditation (ACA) akkreditiert. ACA ist ein ausschließlich für Flughäfen entwickeltes System zur Erfassung von Treibhausgas-Emissionen, zur Festlegung von Reduktionsmaßnahmen und zur unabhängigen Überprüfung und Zertifizierung der errechneten CO₂-Werte und der Maßnahmen. Dieses Zertifizierungssystem ist in vier Anforderungsstufen unterteilt. Die höchste Stufe beinhaltet dabei den klimaneutralen Betrieb des Flughafens und die erste Stufe lediglich die Erfassung von CO₂-Mengen am Flughafen. Derzeit sind 76 Flughäfen in Europa akkreditiert. Mit der Akkreditierung erfolgt auch die Messung der Bemühungen zur Schadstoffminimierung der Flughäfen. Das heißt Maßnahmen, welche zur Schadstoffreduzierung eingeleitet werden, werden durch Gutachter überprüft und mit den Ausgangswerten verglichen, sodass die Effizienz der Maßnahmen gemessen und bewertet werden kann.
- Erfassung der CO₂-Emissionen (Emissionsinventar) und die Verteilung auf die einzelnen Quellen am Flughafen (75 % Luftfahrzeuge, 22 % Energiebedarf der Gebäude, 2 % Fahrzeuge, 1 % Bodenstromgeräte am Flughafen Hamburg und ohne landseitigem Zubringerverkehr)
- Flughafen hat nur begrenzt Möglichkeiten die Entscheidungen von Fluggesellschaften zu beeinflussen, dennoch gab es die Einigung zum Abschalten der APU auf den Vorfeldern
- Emissionsbezogene Landeentgelte
- Emissionsreduzierung des Bodenverkehrs durch Optimierung der notwendigen Fahrten und Einsatz von alternativen Treibstoffen (derzeit Erdgas und Biogas, als Versuchsfahrzeuge auch Elektroautos und Fahrzeuge mit Wasserstoff-Antrieb)
- effiziente Energieversorgung der Gebäude und ggf. Erneuerungen (Photovoltaik und Strom aus klimaneutralen Quellen)

Diese Maßnahmen werden nicht ausschließlich durch den Flughafen Hamburg praktiziert, sondern auch von anderen Flughäfen durchgeführt. Dabei gibt es zum Teil Abweichungen.

¹²Organisationen jeder Art erhalten das Siegel, wenn sie den Anforderungen der EMAS gerecht werden.

EMAS teilt sich in vier Bereiche auf: Einbeziehung der Mitarbeiter, Kommunikation mit der Öffentlichkeit, Einhaltung von Rechtsvorschriften und ständige Verbesserung der Umweltleistung.

¹³EMAS basiert auf den Anforderungen der ISO 14.001

An einigen Flughäfen z.B. Zürich oder Düsseldorf existieren bereits Schaltzentralen, die ein gemeinsames Arbeiten der Stakeholder am Flughafen ermöglichen, sodass ein effizientes Management gewährleistet werden kann, welches im weiteren Verlauf zu höheren Pünktlichkeiten und damit geringeren Treibstoffverbräuchen führt. Auch der Einsatz von verbesserten Planungs- und Prognosesystemen innerhalb der Schaltzentralen unterstützt die Flughafenprozesse.

Hinsichtlich der Technologieentwicklung von Triebwerken existieren auch weitere Programme, wie z.B. Clean Air Engine. Hierbei soll bis zum Jahr 2035 eine CO₂-Reduzierung um 30 % gegenüber dem V2500-Triebwerk (Triebwerk der mittleren Schubklasse, 2500 lbf (111 kN), Zulassung 1989) erreicht werden.

Es kann also festgehalten werden, dass trotz der geringen gesetzlichen Bestimmungen viele freiwillige Bestrebungen getätigt werden, um schädliche Auswirkungen an Flughäfen und in den Flugphasen zu verringern. Die folgende Abbildung 2.9 gibt abschließend einen zusammenfassenden Überblick über die politischen Ziele des Luftverkehrs bis 2020 bzw. Ziele, welche mit Hilfe von Umweltprogrammen realisiert werden sollen [46].



Abb. 2.9: Politische Ziele für den Luftverkehr bis 2050 [46]

Die Umweltprogramme selbst geben keine direkten Methoden zur Messung des Erfolgs hinsichtlich der Schadstoffminimierung an. Es werden zum Teil Testphasen durchgeführt, um z.B. die Einsparungen beim Rollen mit Elektroantrieb zu messen, aber diese Messwerte und Einsparungen unterscheiden sich dann wiederum pro Luftfahrzeugtyp und entsprechend der Flughafeneigenschaften (Reibungswiderstand Rollwege). Somit können die experimentellen Ergebnisse nur als Näherungswert angenommen werden und spiegeln nicht die genauen Schadstoffeinsparungen wieder. Mittels der Airport Carbon Accreditation (ACA) wird jeder Flughafen hinsichtlich seiner durchgeführten Maßnahmen eingeschätzt und bewertet. Hier ist allerdings noch anzuführen, dass derzeit nur sehr wenige deutsche Flughäfen¹⁴ teilnehmen und sich entsprechend prüfen lassen. Eine weitere Möglichkeit, welche an Flughäfen zur Messung der Schadstoffemissionen angewendet wird, sind Mess-

¹⁴Köln-Bonn, Düsseldorf, Hamburg, Frankfurt am Main, München

stationen, welche die Konzentration von verneinzelten Schadstoffen (u.a. Partikel und NO_x) messen, aber oftmals nicht mit dem Fokus auf CO_2 .

2.3.2.2 Technische und betriebliche Bestrebungen zur Emissionsreduzierung

Es wurden bisher verschiedene politische sowie freiwillige Ziele und Möglichkeiten zur Reduzierung von Umwelteinflüssen in Bezug auf Schadstoffemissionen vorgestellt. Innerhalb der einzelnen Emissionsquellen am Flughafen existieren spezielle Möglichkeiten bzw. Verfahren zur Minderung der Emissionen:

- Flugbetrieb
 - schadstoffoptimierte An- und Abflugprofile
 - Verringerung von Warteschlangen in der Luft und am Boden
 - Reduzierung von Rollvorgängen der Luftfahrzeuge
 - schwefelfreies Kerosin
 - emissionsabhängige Landeentgelte
 - technische bzw. konstruktive Maßnahmen (Aerodynamik, Triebwerkstechnik etc.)
- Luftfahrzeugabfertigung
 - Bodenstationen zur Energie- und Klimaversorgung
 - Antriebsänderung der Bodenfahrzeuge (Erdgas, Solar etc.)
 - Optimierung der Routen
 - alternative Enteisungsmethoden
- Stationäre Quellen
 - Blockheizkraftwerke (haben im Gegensatz zu Kraftwerken einen 40 % geringeren Primärenergiebedarf)
- Landseitiger Verkehr
 - Verbesserung des öffentlichen Verkehrsnetzes
 - Car-Sharing, Job-Ticket

Mit diesen Minderungspotentialen sollen die in Kapitel 2.3.2.1 aufgezeigten Ziele der Luftfahrtbranche erreicht werden. Dabei zeigt Abbildung 2.10 die jeweiligen Anteile für das Ziel, die CO_2 -Emissionen bis 2050 um 50 % zu senken, und zeigt auch gleichzeitig, welche Auswirkungen es hätte, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden [46].

Neben den genannten möglichen Maßnahmen zur Schadstoffminderung existieren weitere Strategien, wie z.B. den Verkehr vermeiden oder aber auch die Kompensation der CO_2 -Emissionen des Verkehrs durch CO_2 -Vermeidung in anderen Sektoren.

Entsprechend Abbildung 2.10 sind die Forschungsansätze zur Reduzierung der Emissionen sehr vielfältig. Darunter zählt u.a. der Einsatz von Winglets zur Reduzierung des induzierten Widerstands und einer verbesserten Aerodynamik, was wiederum zu einer Treibstoffeinsparung von bis zu 3 % führen kann [46].

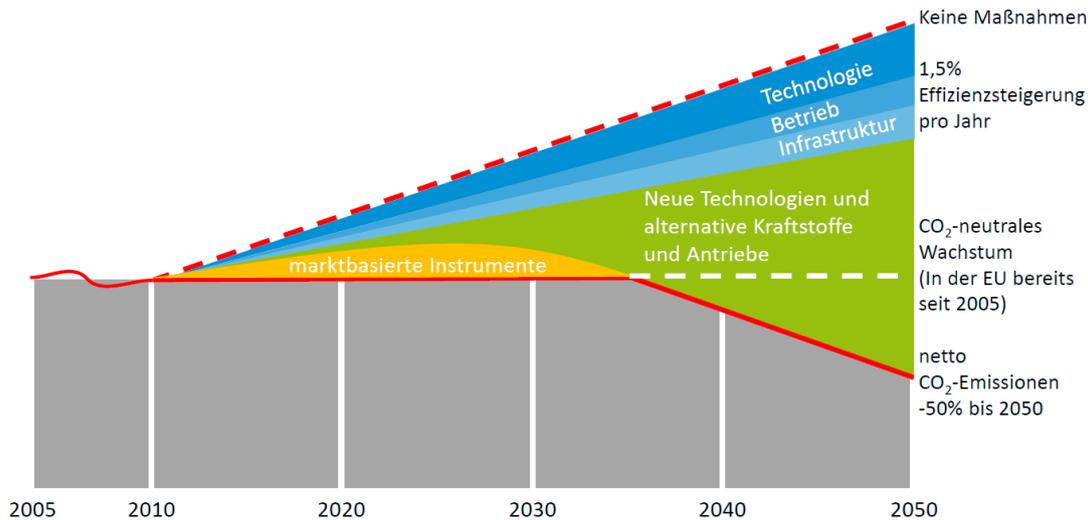


Abb. 2.10: Minderungsziele in der EU und die Anteile entsprechender Maßnahmen [46]

Weitere Forschungsansätze existieren bei Luftfahrzeugkonzepten, allerdings sind an dieser Stelle sehr hohe Investitionskosten und zulassungsintensive Prozesse ein Grund, weshalb diese Technologien nicht kurzfristig umgesetzt werden können [46].

Im Bereich des Luftverkehrsmanagements spielt der Forschungsansatz des Single European Sky eine entscheidende Rolle. An dieser Stelle können bis zu 12 % Treibstoff und damit auch direkt CO_2 auf Grund von direkten Routen und weniger Warteschleifen eingespart werden [46].

Nach [47] ist im Bereich der operativen und strategischen Maßnahmen das Luftverkehrsmanagement das wichtigste operative Werkzeug, um die in Abbildung 2.10 aufgezeigten Verbesserungen im Betrieb umzusetzen. Das kann u.a. mittels optimaler Rollwegführung oder schnellerer Bodenabfertigung realisiert werden. Bevor z.B. eine optimale Rollwegführung umgesetzt werden kann, müssen die einzelnen Flughäfen zunächst nach überdurchschnittlichen Rollzeiten untersucht werden. Die Rollzeit, welche sich aus der Differenz zwischen der Actual Off-Block Time (AOBT) und der Actual Take-Off Time (ATOT) zusammensetzt, wird gemessen. Diese Methode der EUROCONTROL besteht aus insgesamt drei Schritten:

- Bestimmung der optimalen (Referenz) Rollzeit zwischen Standplatz und Abflug für entsprechend gleiche Luftfahrzeugklassen,
- Kalkulation der durchschnittlichen zusätzlichen Rollzeit pro Luftfahrzeugklasse (Vergleich der durchschnittlichen tatsächlichen Rollzeiten mit den Referenzzeiten),
- Berechnung der durchschnittlichen zusätzlichen Rollzeit für den gesamten Flughafen (diese Zeit lässt sich mit Hilfe eines gewichteten Mittelwerts aller Luftfahrzeugklassen berechnen).

Insofern diese durchschnittlichen zusätzlichen Zeiten sehr gering sind, kann von einer Effizienz bei der Rollwegführung ausgegangen werden. Ist die Abweichung hingegen sehr

groß, müssen operative Maßnahmen eingeleitet werden, um die Effizienz, welche sich auf die Zeit und den Treibstoffverbrauch bezieht und damit auch auf die Schadstoffemissionen, zu verbessern, sodass die Bestrebungen, siehe Abbildung 2.10, umgesetzt werden können. Diese Art der Berechnung und Bewertung kann im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Leistungsindikator verwendet werden, um die Schadstoffausstöße beim Rollen betrachten zu können. An dieser Stelle können die Rollzeiten des Inbounds und Outbounds separat betrachtet werden. Bei der Betrachtung der Rollzeiten muss allerdings berücksichtigt werden, insofern möglich, in welcher Konfiguration das Luftfahrzeug rollt. Dabei kann zwischen dem Rollen mit einem Triebwerk oder mehreren, mit APU oder ohne und mit Schleppfahrzeug oder ohne differenziert werden [48].

Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Rollzeiten können die Nutzung von Airport Collaborative Decision Making (A-CDM) oder Departure Manager (DMAN) sein. Somit können mit Hilfe von A-CDM die Rollzeiten vermindert und gleichzeitig durch eine verbesserte Staffelung mit Hilfe des DMAN eine Verringerung der Warteschlangen am Startbahnhof realisiert werden. Bei einer Effizienzsteigerung der Prozesse kann dies zweierlei positive Auswirkungen haben. Zum einen verbesserte Pünktlichkeitswerte und zum anderen geringere Umweltbelastungen. Allerdings kann diese Aussage nicht pauschal auf alle Flughäfen übertragen werden. Bei großen Flughäfen führen verbesserte Pünktlichkeitswerte und damit entstehende freie Kapazitäten oftmals zu einem höheren Verkehrsaufkommen, womit wiederum eine höhere Klimabelastung einhergeht [48].

Mit Hilfe dieser Forschungsansätze können auch die Ineffizienzen im Flughafennahbereich ermittelt werden, siehe dazu [1].

Um zum einen die Verbesserung messen und auswerten zu können und um zunächst Schadstoffemissionen am Flughafen und dessen Nahbereich identifizieren zu können, existieren Emissionsauswertungsprogramme. Somit kann z.B. genau analysiert werden, welche Einsparungen des Treibstoffs und damit der Emissionen bei kürzeren Rollzeiten oder kürzeren Warteschlangen ermöglicht werden [49].

Kapitel 3

Luftverkehrsbetrieb und Flughafenmanagement

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Grundlagen zur Entstehung von Emissionen und existierenden Umweltprogrammen betrachtet. Dieses Kapitel befasst sich mit den operationellen Aspekten des Flugbetriebs speziell an Flughäfen. Dabei wird die ganzheitliche Betrachtung der Flughafenprozesse fokussiert. Untersuchungsgegenstand sind die Ansätze Airport Collaborative Decision Making (A-CDM), welches an vielen Flughäfen bereits umgesetzt wurde, und Total Airport Management (TAM), das wiederum bisher nur vereinzelt realisiert wurde und aus diesem Grund noch eine Zukunftsvision an den meisten Flughäfen darstellt.

3.1 Luftverkehrsbetrieb an einem Flughafen

Bevor auf das Flughafenmanagement eingegangen wird, soll zunächst eine Prozessbeschreibung und Abgrenzung des Flughafenbetriebs für diese Arbeit erfolgen. Der Flughafenbetrieb unterteilt sich in zwei verschiedene Bereiche: den landseitigen und den luftseitigen Bereich, wobei der Flughafen die Schnittstelle bildet. Folgende Abbildung 3.1 stellt die einzelnen Flughafenbereiche dar, wobei die Reihenfolge des Passierens durch den Passagier festgelegt wird [50].

Für die Diplomarbeit sind nur Teile der Prozesskette von Relevanz, welche sich auf die Luftfahrzeuge spezialisieren. Demnach beschränkt sich die Prozesskette auf die Luftseite. Eine weitere Restriktion kommt hinzu, indem lediglich die rollenden bzw. fliegenden Luftfahrzeuge, in einem geeigneten Untersuchungsraum am Flughafen, betrachtet werden (siehe Abbildung 3.2).

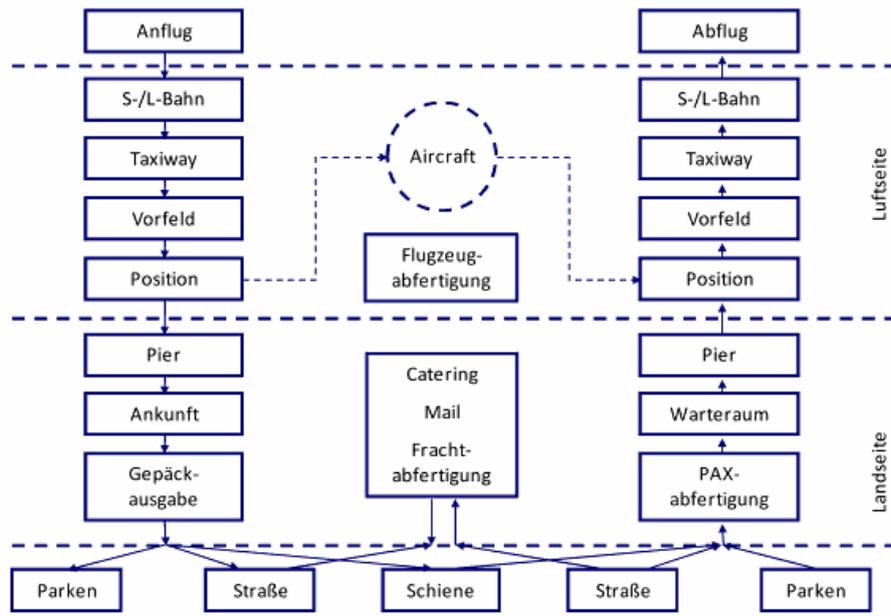


Abb. 3.1: Flughafenbetrieb – Prozessablauf [50]

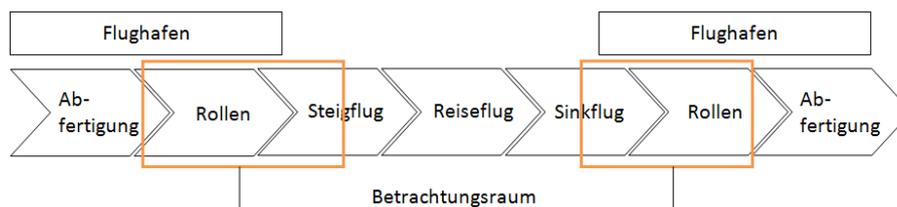


Abb. 3.2: Prozesse der Luftfahrzeuge am Flughafen [51]

Die Abgrenzung des Untersuchungsraums des Flughafenbereichs ist allerdings schwierig. An dieser Stelle gibt es verschiedene Blickwinkel, welche genauer betrachtet werden und im nachfolgenden Kapitel zur Berechnung der Emissionen erneut aufgegriffen werden. Eine Möglichkeit stellt die Begrifflichkeit der Terminal Maneuvering Area (TMA) dar, welche den Bereich um den Flughafen beschreibt und die Flughafenkontrollzone einschließt [51]. Die Flughafenkontrollzone erstreckt sich vertikal mindestens (laut ICAO-Standard) bis 1500 ft ü.G. Diese vertikale Ausdehnung kann bis zu einer Höhe von 4500 ft MSL reichen. Eine laterale Erstreckung ist von dem jeweiligen Flughafen und der entsprechenden Start- und Landebahn-Konfiguration abhängig. Viele Kontrollzonen besitzen eine rechteckige Form mit einer Breite von 10-15 km und einer Länge von 25-35 km. Es existieren auch kreisrunde und gemischte Formen [52].

Der Luftraum der Terminal Maneuvering Area bzw. der Nahverkehrsbereich des Flughafens lässt sich wie folgt abgrenzen: „Als Untergrenze dient ein nach Sektoren gestaffeltes System, wobei der Sektor „A“ 1000 ft, der Sektor „B“ 1700 ft und der Sektor „C“ 2500 ft über Grund beginnt. Die Obergrenzen aller Sektoren liegen bei Flugfläche 245 (FL 245)“ [Heinrich Mensen, 2007, Seite 471] [51]. Die Abbildung 3.3 zeigt exemplarisch die Ausdehnung der Kontrollzone und der TMA.

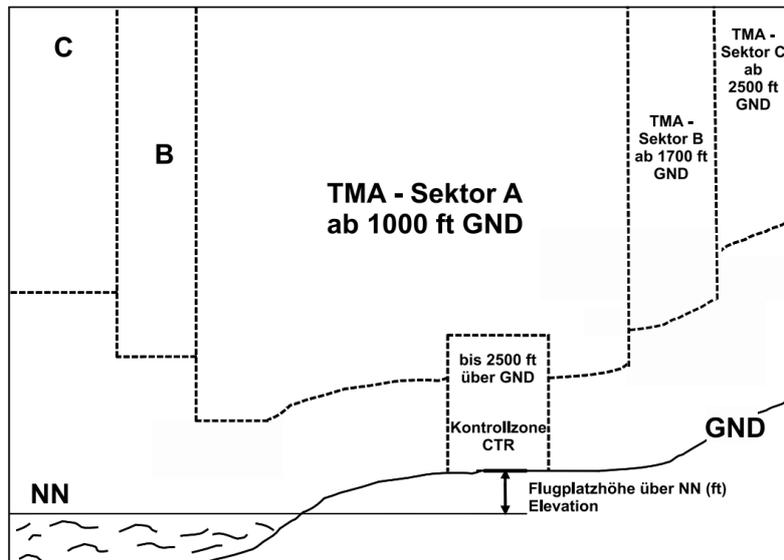


Abb. 3.3: TMA und Kontrollzone [51]

Sowohl die Kontrollzone als auch die TMA schließen die an- und den abfliegenden Luftfahrzeuge ein. Gleiches gilt für die extended TMA, einem erweiterten Nahverkehrsbereich, welcher sich mit einer größeren lateralen Ausdehnung um den Flughafen erstreckt.

Eine weitere Eingrenzung des Flughafenbereichs kann auch mittels der einzelnen Phasen des Instrumentenanflugs und -abflugs erfolgen. Für den Anflug existieren folgende fünf Segmente:

- Einfflugstrecke
- Anfangsanflug
- Zwischenanflug
- Endanflug
- (Fehlanflug)

Die Einfflugstrecke führt das Luftfahrzeug zu einem virtuellen Punkt (Initial Approach Fix, IAF). Ab diesem Wegpunkt, welcher von Flughafen zu Flughafen eine unterschiedliche Lage einnehmen kann, beginnt der Anfangsanflug. Ab diesem IAF erfolgt der Anflug auf die Landebahn und somit auf den Flughafen, sodass dieser Punkt auch als Begrenzung des Flughafennahbereichs gesehen werden kann. Der Anfangsanflug endet am Intermediate Fix (IF) und es beginnt der Zwischenanflug, welcher eine Verlängerung des Endanfluges darstellt. Der eigentliche Endanflug beginnt mit dem Final Approach Fix (FAP). Die Lage der Wegpunkte können den einzelnen Luftfahrkarten der Flughäfen entnommen werden [51].

Analog zu den Anflugverfahren existieren auch Abflugverfahren, welche wiederum den Flughafennahbereich begrenzen können. Ein mögliches Abflugverfahren kann folgender Abbildung 3.4 entnommen werden.

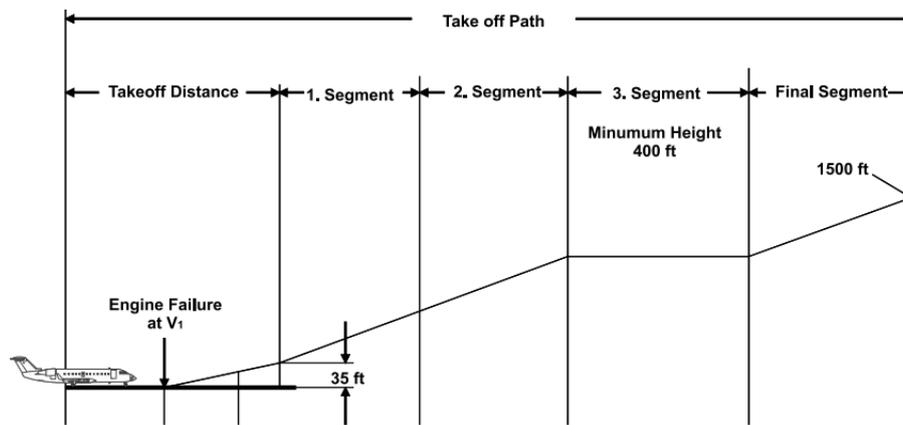


Abb. 3.4: Abflugsegmente [51]

Gemäß Abbildung 3.4 ist die erste Phase die Beschleunigungsphase und erstreckt sich bis zum Erreichen der Rotationsgeschwindigkeit. Im Anschluss an diese Phase schließt sich die Rotationsphase an, welche bis zum Erreichen der sicheren Fluggeschwindigkeit $v_2 + 10$ kt in 35 ft über der SLB vorliegt. Im Anschluss daran folgen die einzelnen Steigsegmente. Das letzte (final) Segment reicht dabei bis zu einem Punkt, an dem die Höhe von 1500 ft ü.G. erreicht ist. Im weiteren Verlauf erfolgt der Steigflug. Beim Erreichen von 3000 ft ü.G. erfolgt u.a. das Einziehen der Auftriebsbeihilfen und der Übergang zum Streckensteigflug. Ab dieser Höhe kann man auch davon ausgehen, dass das LFZ den Nahbereich des Flughafens verlassen hat und auf die Reiseflughöhe steigt. Bei dem Abflug gibt es verschiedene Höhen, bei denen eine Abgrenzung zwischen Flughafen bzw. Flughafennahbereich erfolgen kann. Das Ende der Rotationsphase könnte auch das Verlassen des Flughafens bedeuten und das Verlassen des Flughafennahbereichs kann zum einen durch die 1500 ft oder aber durch die 3000 ft gekennzeichnet sein [51].

Die Einteilung des Betrachtungsraumes eines Flughafens und dessen Nahbereich sind nicht direkt festgelegt und können anhand von Lufträumen, TMAs oder aber bestimmten An- und Abflugsegmenten beschrieben werden. Im nachfolgenden Kapitel wird sich auch herausstellen, dass entsprechend der verschiedenen Modelle zusätzliche Abgrenzungen des Betrachtungsraumes in Frage kommen können.

3.2 A-CDM

Zur Bewältigung der prognostizierten steigenden Nachfrage im Luftverkehr in den kommenden Jahren ist es notwendig, Maßnahmen zur betrieblichen Kapazitäts- und Effizienzsteigerung durchzuführen, um die begrenzten Kapazitäten und verfügbaren Ressourcen vor allem an Flughäfen effizient nutzen zu können. Dabei spielt derzeit das A-CDM in Europa eine wichtige Rolle, weil die Möglichkeit des Flughafenausbaus an vielen Flughäfen auf Grund der Nähe zu den Städten, der langwierigen Genehmigungsprozedur und dem Mangel an Akzeptanz in der Bevölkerung nur in wenigen Fällen gegeben ist.

A-CDM ist ein Konzept, welches von der EUROCONTROL, Airports Council International (ACI) und weiteren Partnern erarbeitet wurde.

Das Ziel, welches mit diesem Konzept verfolgt wird, ist mehr Effizienz und Transparenz bei der Zusammenarbeit von Flughafenbetreibern (Airport Operators), Luftverkehrsge-

sellschaften (Aircraft Operators), Bodenverkehrsdienstleistern (Ground Handlers, GH), Flugsicherung (Air Traffic Control, ATC) und der zentralen Verkehrsflusssteuerung (Central Flow Management Unit, CFMU¹) zu erzeugen. Der Einflussbereich erstreckt von bis zu drei Stunden (drei Stunden vor Estimated On-Block Time bzw. mit der ATC-Flugplan Aktivierung) vor der Landung bis zum Zeitpunkt der Landung am Flughafen mit dem Ziel eines optimalen Umdrehprozesses am Flughafen. Die Grundlage zur Realisierung bildet der Austausch von mit Zeitstempeln versehenen Informationen über eine für alle Stakeholder zugängliche A-CDM Plattform, siehe dazu Abbildung 3.5. Dieser Vorgang erfolgt an Flughäfen ohne A-CDM derzeit nicht, weil eine gemeinsame Datenbasis nicht vorhanden ist, (zeitlich) voneinander abhängige Prozesse, die ohne A-CDM unabhängig voneinander beginnen, d.h. zum Teil zu spät aber auch zu früh und dadurch werden für andere Prozesse benötigte Ressourcen blockiert, mit dem Ergebnis, dass vor allem während des Turnaround-Prozesses oftmals Verspätungen entstehen. Diese Verspätungen beliefen sich 2012 auf rund 37 % und bildeten zusammen mit den Reactionary Delay mit einem Anteil von rund 46 % den größten Anteil an den Abflugverspätungen. Die Reactionary Delays hängen meist mit den Turnaround Delays zusammen. Insofern ein Luftfahrzeug mit einer großen Verspätung landet und Umsteige-Passagiere an Bord sind oder auch Crew-Mitglieder eines anderen Fluges, so wird sich der entsprechende Anschlussflug der Crew und der Passagiere auch verspäten und somit den Turnaround verlängern [1], [53].



Abb. 3.5: Gemeinsame Plattform zum Informationsaustausch [53]

Das Konzept beinhaltet sechs Elemente, sog. Bausteine [54]:

1. Information Sharing:

Eine Plattform, um allen Stakeholdern aktuelle Daten zur Verfügung stellen zu können.

2. Milestone Approach:

Insgesamt existieren 16 Zeitstempel (Meilensteine), entsprechend Abbildung 3.6,

¹CFMU, jetzt Network Manager Operations Centre (NMOC)

welche sich auf die Inbound, Turnaround, und Outbound Prozesse verteilen, um bei möglichen Abweichungen von der geplanten Zeit frühzeitig eingreifen zu können.

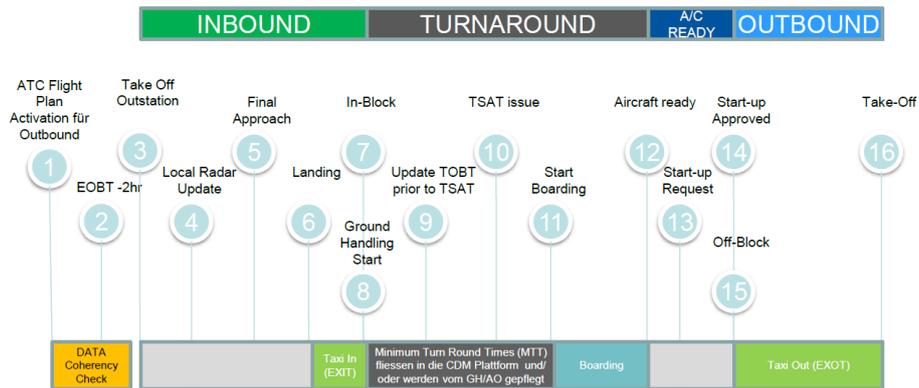


Abb. 3.6: Milestone Approach [54]

3. Variable Taxi Time (VTT):

Im Gegensatz zu einer fixen Rollzeit (Matrix) wird für jedes Luftfahrzeug und dessen Rollweg eine variable Rollzeit für eine präzisere Vorhersage der Startzeit mittels Systemunterstützung generiert.

4. Pre-Departure Sequencing:

Das bisherige Prinzip der Abflugsequenzen basierte auf First Come - First Served (FCFS) und wird mittlerweile ersetzt durch Best Planned - Best Served (BPBS). Bei dem BPBS-Prinzip wird eine optimale Off-Block-Sequenz unter der Berücksichtigung operationeller Auflagen seitens des Flughafens und Restriktionen der Flugsicherung berechnet. Diese Berechnung spiegelt sich in der zu erwartenden Push-back Freigabe, der Target Start-Up Approval Time (TSAT) und der Target Take-Off Time (TTOT) wider. Bei der Berechnung dieser Zeiten wird zunächst die $TTOT^2$ bestimmt und im Anschluss daran die VTT von dieser Zeit abgezogen ($TTOT + Constraints$ seitens ATC - $VTT = TSAT$), sodass dieser Zeitstempel die TSAT ist.

5. A-CDM in Adverse Conditions³:

Innerhalb dieses Bausteins soll ein effizientes Management trotz eingeschränkter Kapazitäten am Flughafen (Winter Operationen, Unfälle, Störungen der Infrastruktur etc.) gewährleistet werden. Diese Gewährleistung erfolgt mittels der zuvor implementierten Schritte, sodass ein bestmöglicher Informationsaustausch zwischen den Stakeholdern durch verschiedene Zeitstempel, Pre-Departure Sequencing etc. realisiert werden kann.

²Die TTOT wird zunächst auf Grundlage der eingegebenen Target Off-Block Time bestimmt, damit es an dieser Stelle nicht zu Unstimmigkeiten kommt, d.h. $TOBT + VTT =$ früheste TTOT.

³sind widrige Bedingungen, welche z.B. die Flughafenkapazität oder die operationelle Effizienz einschränken und die Stakeholder am Flughafen angehalten sind speziell entwickelte Verfahren zur Minimierung von Verspätungen und Betriebskosten anzuwenden, um die Kapazität unter veränderten Bedingungen bestmöglich zu nutzen

6. Collaborative Management of Flight Updates:

Der letzte Baustein gilt als implementiert, wenn ein Informationsaustausch von Ankunfts- und Abflugdaten mit der CFMU erfolgt. Dieses Kernelement kann nur unter der Bedingung umgesetzt werden, dass die vorherigen Kernelemente (eins bis fünf) erfüllt wurden und stellt somit auch den Abschluss des Implementierungsprozesses dar. Ab diesem Zeitpunkt, wobei Baustein fünf nicht zwangsläufig umgesetzt werden muss, um die Anbindung an das NMOC zu ermöglichen, kann sich ein Flughafen als CDM Airport bezeichnen.

Der Informationsaustausch beruht auf zwei Arten von Nachrichten: Der Flight Update Message (FUM) und der Departure Planning Information (DPI). Die FUM beinhaltet die geschätzte Landezeit (Estimated Landing Time, ELDT), welche drei Stunden vor der ELDT aus dem Cockpit gesendet und bei einer Abweichung von mehr als fünf Minuten fortlaufend aktualisiert wird (Input). Die DPI wird vom Flughafen an die CFMU gesendet (Output). Dabei existieren verschiedene DPI-Typen⁴. Die erste Informationsnachricht wird drei Stunden vor der geschätzten Off-Block Zeit und demnach mit der Aktivierung des ATC-Flugplans (Estimated Off-Block Time, EOBT) versendet. Auch dieser Zeitstempel wird bei Abweichungen fortlaufend aktualisiert.

Nachdem seitens des Flughafens die Kernelemente implementiert wurden, profitieren der Flughafen und die Stakeholder von den folgenden Aspekten: Im Allgemeinen von einer verbesserten Planung der Ressourcen und der Infrastruktur, reduzierten Emissionen durch geringere Verspätungen und optimierter Triebwerksanlasszeiten, besserem Service und reduzierten Kosten. Im Speziellen werden nachfolgend die Vorteile der einzelnen Stakeholder genannt [54].

Der Flughafenbetreiber profitiert von einer verbesserten Pünktlichkeit sowohl bei ankommendem (FUM-Nachrichten) als auch bei abfliegendem Luftverkehr. Hinzu kommt eine effizientere Nutzung von Standplätzen, Gates und Terminals.

Für die Luftverkehrsgesellschaften ergibt sich die Möglichkeit der Priorisierung von Flügen durch die selbstständige Generierung der Target Off-Block Time (TOBT). Außerdem erfolgt eine bessere Einhaltung der Planzeiten und für die betroffenen Stakeholder ist die TOBT primär eine verlässliche Prognose für das Ende des Turnarounds.

Die Bodenverkehrsdienste profitieren von einer verbesserten Vorhersage der Turnaround-Prozesse und damit einer effizienteren Nutzung der Ressourcen.

Durch die Einführung neuer Zeitstempel kann seitens der Flugsicherung eine optimierte Nutzung der luftseitigen Flughafeninfrastruktur erfolgen, sodass u.a. die Warteschlangen am Boden und in der Luft minimiert werden können.

Die CFMU profitiert hingegen von einer verbesserten Sloteneinhaltung und einer optimierten Nutzung der Luftraumkapazitäten.

Die vorangegangenen Ausführungen hinsichtlich A-CDM zeigen, dass alle Partner eines Flughafens mit Hilfe der eingeführten Zeitstempel ihre eigenen Prozesse besser planen und gemeinsam Entscheidungen treffen können. Diese Planungsebene basiert auf der taktischen Phase (bis drei Stunden vor dem Ereignis). Das Konzept stellt sicher, dass die jeweiligen Flughafenpartner zum richtigen Zeitpunkt präzise Daten erhalten, sodass die entsprechenden Prozesse rechtzeitig und ohne Verzögerung eingeleitet bzw. durchgeführt

⁴u.a. die Early-DPI, welche die Estimated Take-Off Time beinhaltet, die Target-DPI, welche die Target Take-Off Time beinhaltet und die ATC-DPI, welche die Actual Take-Off Time beinhaltet

werden können.

An dieser Stelle soll das Augenmerk von der Theorie und demnach dem A-CDM Konzept, welches bisher vorgestellt wurde, auf die Praxis und damit die Umsetzung und Zielverwirklichung gelenkt werden. Als Referenz dienen die veröffentlichten Resultate des Flughafens Münchens hinsichtlich der Einführung von A-CDM aus 2011. Die Ergebnisse zeigen, dass viele Verbesserungen im Vergleich zum Vorjahr eingetreten sind. Diese liegen zum einen bei den durchschnittlichen Wartezeiten an der Start- und Landebahn zum anderen auch bei der Verbesserung des Verhältnisses zwischen Ankunfts- und Abflugverspätung. Das liegt u.a. an der optimierten Zuordnung von Ressourcen durch die Kenntnis über verspätete Landungen. Dennoch existieren nicht erreichte Ziele. Zum Beispiel ist die Einhaltung der TSAT für eine optimale Planung der einzelnen Positionen eine wichtige Voraussetzung für die Folgeprozesse. Es zeigt sich aber, dass viele Luftfahrzeuge eine Anlassfreigabe erhalten haben, aber nicht innerhalb von \pm fünf Minuten Off-Block gegangen sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchung können folgender Abbildung 3.7 entnommen werden [55].

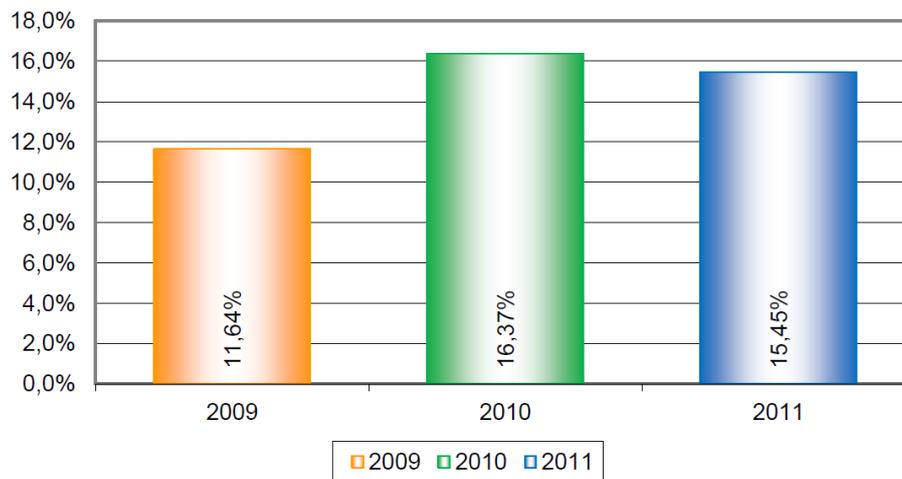


Abb. 3.7: AOBT zu TSAT in Prozent [55]

Im Vergleich zu 2009 ergibt sich ein Unterschied im Jahr 2011 von 4 %. Die 15,45 % bedeuten, dass durchschnittlich fünf Vorgänge pro Stunde das Qualitätsziel (\pm fünf Minuten) nicht erreicht haben. Auch bei anderen Zeitstempeln zeigt sich, dass der Genauigkeitsgrad nicht dem gewünschten entspricht, siehe dazu auch den ausführlichen Bericht Airport CDM München – Resultate 2011 [55].

Die Umsetzung des A-CDM Konzept in den operationellen Betrieb ist nicht vollständig gelungen. Abschließend kann zusammengefasst werden, dass es sich bei A-CDM um die Erweiterung bzw. Verbesserung des Austauschs von zeitstempelbasierten Informationen handelt, aber diese nicht zwangsläufig zu einer Zusammenarbeit der einzelnen Stakeholder am Flughafen führen. Das liegt vor allem darin begründet, dass die individuellen Systeme der einzelnen am Flughafenprozess Beteiligten nicht mit einander verknüpft sind, sodass Einflüsse bzw. Auswirkungen der einzelnen Entscheidungen der Stakeholder lediglich in ihren eigenen System ersichtlich werden, aber nicht bei den anderen. Das zeigt, dass es dringend erforderlich ist, die verschiedenen Systeme miteinander zu verbinden, um die Auswirkungen bei einer Änderung im Flughafenprozess, wie z.B. Änderung der Position

der Luftfahrzeuge, für alle ersichtlich machen zu können. Dieser Schritt einer besseren Zusammenarbeit der Stakeholder und in Form der Kopplung der Systeme soll mit Hilfe des Total Airport Managements (TAM) realisiert werden. Hinzu kommt, dass das A-CDM nur die Luftseite betrachtet und die Landseite vernachlässigt, sodass eine Optimierung des ganzheitlichen Flughafensystems nicht ermöglicht werden kann. Somit ist die eigentliche Umsetzung des A-CDM zunächst ein erster Schritt in Richtung gemeinsames Flughafenmanagement.

3.3 Total Airport Management

3.3.1 Ziele des Total Airport Managements

Wie in Kapitel 1 erwähnt, sind Flughäfen die Knotenpunkte in einem Luftverkehrssystem, sodass ein kooperatives Flughafenmanagement an den Flughäfen, welche schon heute an ihrer Kapazitätsgrenze arbeiten, für ein zukünftiges, leistungsfähiges ATM System notwendig ist. Neben der Nutzung gemeinsamer Daten, entsprechend dem A-CDM, ist ein weiteres wichtiges Ziel ein integriertes Flughafenmanagement in dem alle wichtigen Stakeholder (Luftverkehrsgesellschaften, Flughafenbetreiber, Bodenverkehrsdienste und Flugsicherung) einbezogen werden. Das derzeitige Problem der unzureichenden Absprachen und der ineffizienten Nutzung der Ressourcen am Flughafen liegt darin begründet, dass die Stakeholder oftmals nur ihren eigenen Prozess steuern und koordinieren ohne Abstimmungen mit den anderen Beteiligten, sodass eine Optimierung derzeit nur nach dem eigenen Wunsch und ohne die Berücksichtigung anderer Aspekte erfolgt. Diesen Prozess planen und organisieren die Akteure in ihren eigenen operationellen Zentren. Durch diese meist räumliche Trennung zu den anderen Stakeholdern, welche für vor- oder nachgelagerte Prozesse verantwortlich sind, erfolgen Informationsaustausch, Kommunikation und gegenseitige Absprachen nur rudimentär. Insbesondere bei Verspätungen oder Verfrühungen wäre ein Informationsaustausch zwischen den Stakeholdern eine wichtige Voraussetzung, damit trotz Widrigkeiten die Steuerung und Regelung der Flughafenprozesse optimal verlief. TAM zielt also im Gegensatz zu dem tatsächlich umgesetzten A-CDM, welches in der Planung auf wenige Zeitstempel beschränkt ist, auf einen kooperativen Entscheidungsprozess zwischen den einzelnen Stakeholdern ab, um betriebliche Strategien umzusetzen, welche den Ablauf der Prozesse aller Stakeholder am Flughafen beeinflussen. Des Weiteren wird auch der Fokus auf die Land- und die Luftseite des Flughafens gelegt. Der Einfluss- und zeitliche Wirkungsbereich eines TAM-Systems wird durch Abbildung 3.8 verdeutlicht. Der raumbezogene Bereich im TAM erstreckt sich vom Zugang zum Flughafen (Ground Access) über die Landseite bis zur Luftseite. Die entsprechenden Managementaufgaben (Planung und Einteilung von Ressourcen entsprechend der Nachfrage) und Akteure werden ebenfalls in Abbildung 3.8 dargestellt. Des Weiteren werden in der Pyramide die zeitlichen Planungsphasen ersichtlich, die genauer in Kapitel 3.3.3 beschrieben werden. Außerdem wird aus der Abbildung 3.8 ersichtlich, dass das A-CDM einen Teil des TAM darstellt und somit das A-CDM in den TAM-Kontext integriert wird [56].

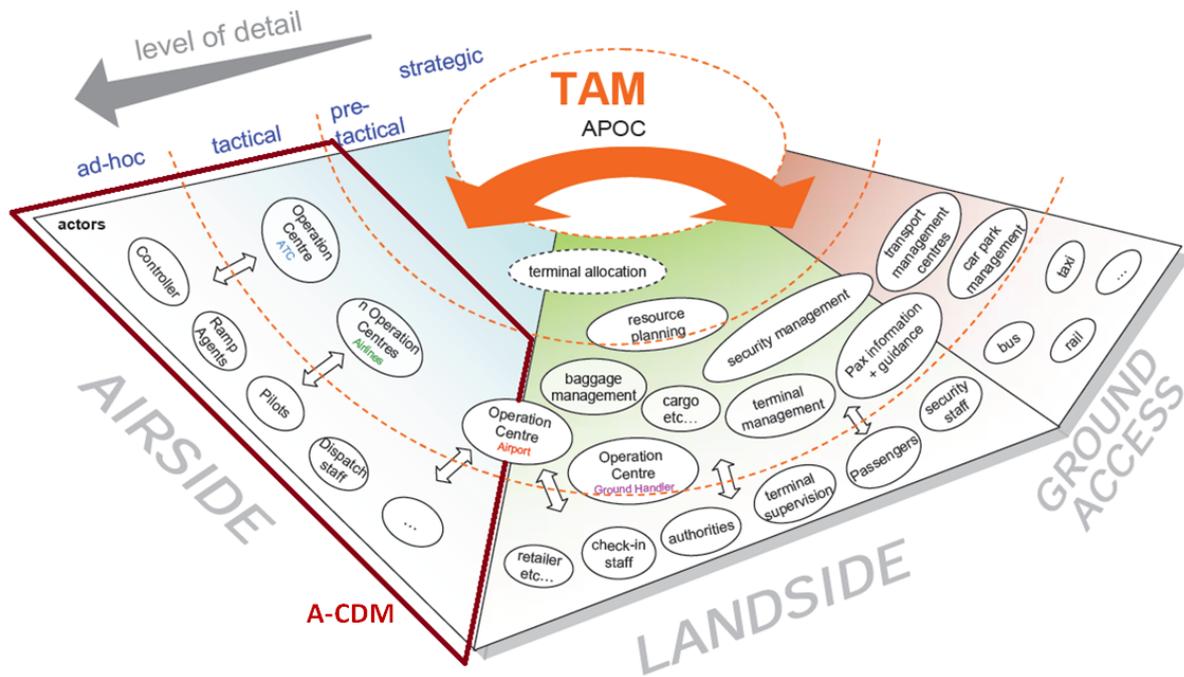


Abb. 3.8: TAM - zeitlicher und räumlicher Wirkungsbereich [56]

3.3.2 Abgrenzung zu A-CDM

In diesem Abschnitt wird das TAM-Konzept dem A-CDM gegenübergestellt, um herauszuarbeiten, welche Vorteile und Ziele ein Total Airport Management gegenüber dem derzeit vorrangig genutzten A-CDM aufweist.

Im Bereich des Informationsaustauschs werden bei A-CDM sämtliche für die Stakeholder interessanten Zeitstempel über eine Plattform verteilt. Eine solche Plattform ist auch Bestandteil in einem TAM-System. Allerdings können an dieser Stelle auch Planungs- und Optimierungsdaten zur Verfügung gestellt werden, um einen Flugbetriebstag entsprechend einer optimierten Nutzung der einzelnen Flughafenressourcen zu gewährleisten. Dabei werden verschiedene Randbedingungen, wie z.B. die Entwicklung des Wetters berücksichtigt, sodass für die jeweiligen Stakeholder eine größere Informationsvielfalt vorhanden ist, um die entsprechenden Aufgaben effizient lösen zu können [57].

Im A-CDM existieren insgesamt 16 Zeitstempel, wie z.B. die Actual In-Block-Time (AIBT) oder Actual Take-Off Time (ATOT), siehe Abbildung 3.6. Auch im Bereich des TAMs werden alle zur Verfügung stehenden Daten publiziert. Auf Grund von größerer Detailtiefe und größerem Informationsgehalt können zusätzliche Meilensteine generiert werden [57]. Variable Rollzeiten werden sowohl im A-CDM als auch im TAM benutzt. Das ist notwendig zur Präzisierung von Pre-Departure-Sequenzen. Diese Sequenzierung dient der Reduzierung von Warteschlangen sowie einer vorgeplanten Staffelnung am Startbahnkopf. Die Staffelnung wird im A-CDM mittels der durch die Luftverkehrsgesellschaften eingegebenen möglichen Off-Block-Zeit (Target Off-Block Time, TOBT), einem angestrebten Triebwerksanlass-Zeitpunkt (Target Start-Up Approval Time, TSAT) und einer entsprechenden möglichen Take-Off Zeit (Target Take-Off Time, TTOT) ermittelt. Eine Abflug-Staffelnung ist ebenfalls Bestandteil im TAM-System, allerdings werden die Optimierungen

nicht nur für den Startbahnkopf vorgenommen, sondern auch für weitere Zeitstempel des Inbound- und Outbound-Verkehrs. Dabei wird ein Ablaufplan der gesamten Prozesskette von Anflug bis Abflug inkl. landseitiger Prozesse erstellt [57].

Bei der Vorhersage der Kapazitäten der Start- und Landebahn und der Ressourcen werden in einem TAM-System die verschiedenen Einflüsse wie z.B. das Wetter berücksichtigt, wohingegen im A-CDM nur durch die TOBT und den abgeleiteten sekundär-Zeiten TTOT und TSAT eine Vorhersage erfolgt, welche allerdings keine Wettereinflüsse etc. berücksichtigt. Durch die Ergänzung des A-CDM mit einem Departure-Manager könnte diese Problematik behoben werden. Ansonsten werden die ohnehin existierenden Estimate-Zeiten verwendet. Auch bei der Planung der An- und Abflüge kann mit A-CDM nur indirekt über die TSAT bzw. TOBT Einfluss genommen werden. Im TAM-Kontext existieren allerdings verschiedene Plan-beeinflussende Parameter und Systeme, welche in Abstimmung zwischen den Stakeholdern verändert werden können, um u.a. Maßnahmen zur Verspätungsvermeidung umsetzen zu können. Ein direktes Beispiel für das Eingreifen im TAM auf Basis von zusätzlichen Informationen, wäre folgendes: Ein Ground Handler kann z.B. auf Grundlage von genauen Informationen zu den Flügen und der genaueren Prognose der Ankunftszeiten seine Personalplanung effizient gestalten und somit zum richtigen Zeitpunkt die entsprechende Anzahl an Personal zur Verfügung stellen, damit das Luftfahrzeug innerhalb der angesetzten Turnaround-Zeit abgefertigt werden und rechtzeitig den Flughafen wieder verlassen kann [57].

Ein weiterer Unterschied zum A-CDM besteht in der gemeinsamen Anzeige von Daten für alle Stakeholder. Im TAM-System stehen ressourcen- und performanceaggregierte Anzeigen für jeden zur Verfügung, sodass zu jedem Zeitpunkt ein aktuelles Bild über die Flughafenprozesse (Anflug, Turnaround, Bodenprozesse, Abflug und Passagierprozesse) vorhanden ist. Im A-CDM-Konzept werden lediglich die neu generierten Meilensteine angezeigt, welche aber kein komplettes Abbild der Lage am Flughafen widerspiegelt [57]. Zusammenfassend existieren im implementierten A-CDM folgende Lücken, welche mit der Einführung eines Total Airport Managements behoben werden sollen. Die Lücken zeigen auch gleichzeitig die Unterschiede zwischen den beiden Konzepten auf:

- keine Systemunterstützung bei der Planung der gesamten Prozesskette am Flughafen
- unzureichendes Situationsbewusstsein der Stakeholder über die verschiedenen Flughafenprozesse
- fehlende Integration der land- und luftseitigen Prozesse
- fehlende Prognose und eingeschränkte Kontrolle bzw. Überwachung der landseitigen Prozesse
- keine gemeinsame Planung der Flughafenprozesse bei operationellen Engpässen oder Problemen
- keine Planung und Maßnahmen der einzelnen Stakeholder auf Grundlage von harmonisierten Leistungsparametern
- A-CDM ist nur eine Teilmenge zur gemeinsamen Flughafenprozess-Planung
- keine prä-taktische Planung

- eingeschränkte Kommunikation zwischen den einzelnen Stakeholdern

Diese dargestellte Abgrenzung zwischen A-CDM und TAM zeigt eindeutig die Vorteile, welche mit einem Total Airport Management erreicht werden können. Zusammenfassend zeigt sich, dass das TAM-Konzept eine starke Erweiterung des A-CDM ist, welches eine erste Verbesserung innerhalb des Informationsaustauschs zwischen den einzelnen Stakeholdern im Luftverkehr darstellt. Zur Integration der luft- und landseitigen Prozesse im TAM wird ein Airport Operations Plan (AOP) eingeführt, welcher im nächsten Kapitel näher erläutert wird. In einer Art Leitstand (Airport Operations Centre, APOC) gilt es die Stakeholder, auf Grundlage gemeinsamer Leistungsziele und Regeln, zu einem effizienten Arbeiten zusammen zu bringen. Dieser Leitstand wird in Kapitel 3.3.4 näher betrachtet.

3.3.3 Planerische Umsetzung

Der Airport Operations Plan (AOP) ist der Luftverkehrsbetriebsplan des TAM-Flughafens. Dieser Plan ist eine Anpassung an den bereits bestehenden Network Operations Plan (NOP) auf eine flughafenbezogene Sichtweise. Der NOP gibt einen Überblick über das Lufttransportnetzwerk in Europa und wie die Planung der Luftverkehrsbewegungen aus Netzwerksicht ist [58].

Der AOP beschreibt die zeitliche und räumliche Aufteilung des Bedarfs vom Luftverkehr auf die zur Verfügung stehende Flughafenkapazität. Diese Aufteilung erfolgt entsprechend des Betriebskonzepts und dessen Zielsetzung. Die Betriebszielsetzung innerhalb eines TAM Flughafens kann den Kapiteln 3.3.1 und 3.3.4 entnommen werden. Zunächst kann festgehalten werden, dass für die Einplanung betrieblicher Prioritäten und einer entsprechenden Variabilität im Flughafenprozess Planungsalgorithmen bzw. Systemunterstützungen genutzt werden müssen [58].

Der AOP sollte gemeinsam mit allen Stakeholdern entwickelt und eingehalten werden. Dieser enthält drei Segmente, welche ineinander übergehen: strategische, prä-taktische und taktische Phase (Abbildung 3.8 und Abbildung 3.9). Die Grenzen zwischen den einzelnen Phasen sind zum Teil fließend und auch die Dauer der einzelnen Phasen kann in Abhängigkeit der Flughafengröße, -struktur und Prognosemöglichkeit der Daten variieren. Der AOP enthält alle geplanten Flugbewegungen des Flughafens, siehe Abbildung 3.9. Die blau eingefärbten Luftfahrzeuge stellen die Abflüge dar, die rot eingefärbten Luftfahrzeuge spiegeln die Ankünfte wider. Die Informationsdichte und die Genauigkeit der einzelnen Luftfahrzeugbewegungen steigen mit dem Erreichen der aktuellen Zeit (visualisiert wird dies in der Abbildung 3.9 durch die steigende Anzahl an Luftfahrzeugen) [58].

Der AOP zielt darauf ab, für die entsprechenden Zeithorizonte eine bestmögliche kooperative Entscheidungsfindung zwischen allen Stakeholdern bei der Planung der Prozesse am Flughafen zu ermöglichen.

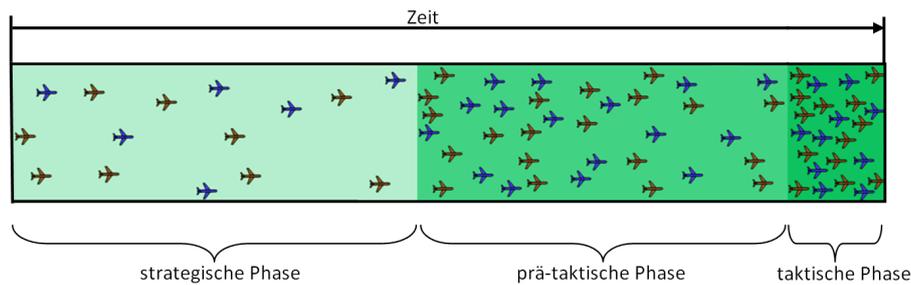


Abb. 3.9: AOP zeitliche Einteilung [58]

Die wichtigen Informationen, welche innerhalb der Phasen und des AOP zu berücksichtigen sind, werden im Folgenden aufgelistet [58]:

- der aktive taktische Plan sollte alle, insofern verfügbar, wichtigen Planungsinformationen für die gegenwärtigen Flughafenprozesse beinhalten
- die Aktualisierungsfrequenzen sollten vom strategischen Level bis hin zum taktischen ansteigen
- die Planung einer vorangegangenen Stufe sollte als Rahmen für die nächstfolgende, präzisere Stufe genutzt werden
- bei Änderungen in den Abläufen der taktischen Prozesse hat dies auch Auswirkungen auf die prä-taktische Phase, sodass ein Feedback von wichtiger Bedeutung ist

Dabei wird der strategische Plan halbjährlich nach der Slot-Konferenz erstellt. Die Weiterführung in den prä-taktischen Plan ist nicht zeitlich festgelegt und unterliegt den Entscheidungsträgern im TAM. Die Aktualisierung des AOPs liegt ebenfalls im Ermessen der Entscheidungsträger oder sollte bei unerwarteten Ereignissen entsprechend angepasst werden. Die taktische Planung wird für jeden Flugbetriebstag auf Grundlage des vorhandenen Plans und der aktuellen Situation am Flughafen erstellt und situativ nachgeführt [58].

3.3.4 Technische Umsetzung

In diesem Abschnitt wird die technische Umsetzung in einem Total Airport Management genauer beschrieben.

Airport Operations Centre

Für das Treffen gemeinsamer Entscheidungen (und keiner, wie heute üblich, isolierten Entscheidung) im TAM-Konzept sind der Austausch von relevanten Daten zwischen den Stakeholdern, eine Diskussionsplattform und die kollaborative Aspekte (wie z.B. Regelwerke) die Kernelemente. Diese Umsetzung der Kernelemente geschieht in einem sog.

Airport Operations Centre (APOC), einer Schaltzentrale, die entsprechend der Flughafengröße unterschiedlich aufgebaut bzw. gestaltet werden kann.

Die relevanten Daten in einem APOC beziehen sich dabei auf jene vom Flughafen, Luftverkehr, Bodenverkehr, Bodenprozessen, Passagierprozessen und Wetter. Diese werden zusammengefasst, beobachtet und analysiert und in der Schaltzentrale über Monitore, Leinwände oder pro Arbeitsplatz visualisiert, sodass die Daten für die ad hoc und taktischen Entscheidungen zur Optimierung der Flughafenprozesse den Stakeholdern zur Verfügung stehen. Neben den aktuellen Daten zum Flughafenprozess werden in einem APOC auch Simulations⁵ - und Planungssysteme für die prä-taktische und strategische Planung eingesetzt [58].

Diese Unterstützungssysteme sollten der Größe des Flughafens angepasst werden. Demnach ist es für einen kleinen Flughafen mit wenig täglichem Verkehr nicht zwangsläufig erforderlich, dass Simulationssysteme installiert werden. Wohingegen große Flughäfen mit Hilfe dieser Unterstützung auf eventuell kommende Engpässe, bei einer ohnehin schon fast ausgeschöpften Start- und Landebahn-Kapazität, besser und vor allem frühzeitig reagieren können.

Ein APOC kann in zentraler, dezentraler Form oder in einer Mischform betrieben werden [58].

- Zentrales APOC: Dieses APOC besteht aus einem Raum, in dem alle Stakeholder (Agenten) physisch arbeiten und alle relevanten Informationen zusammengeführt und angezeigt werden. Jeder Stakeholder am Flughafen nimmt einen Platz in der Schaltzentrale ein, siehe schematische Abbildung 3.10.

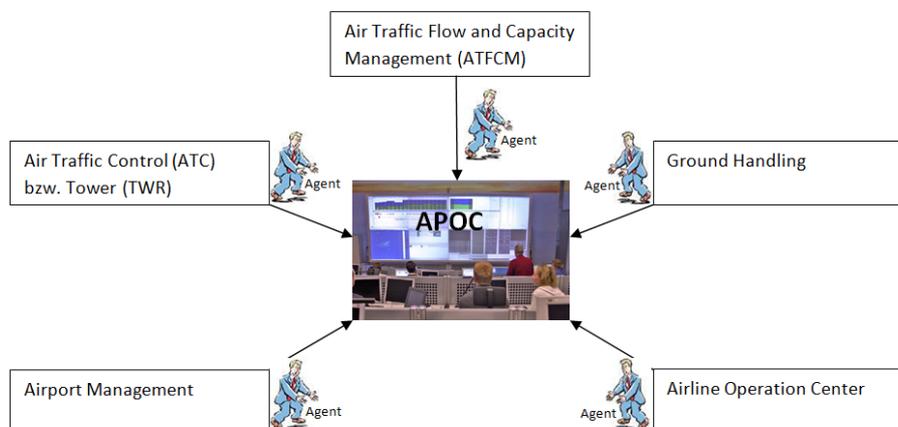


Abb. 3.10: Akteure im APOC in Anlehnung an [58]

Die zentrale Lösung beinhaltet die gesamte technische Ausrüstung für die Echtzeit-, Planungs- und Simulationsanalysen und eignet sich für große internationale Flughäfen.

⁵Systeme, welche eine what-If Möglichkeit bieten. Dabei sollte den Stakeholdern ermöglicht werden, bei widrigen Situationen verschiedene Möglichkeiten (z.B. Nutzungsstrategie der Start- und Landebahn) im Schattenbetrieb durchführen zu können, um die verschiedenen Szenarien auf ihre Umsetzung und Auswirkung hin zu prüfen.

fen. Somit ist sichergestellt, dass alle Stakeholder die gleichen Informationen bekommen und darauf aufbauend auch gemeinsame Entscheidungen treffen können. Diese können auf Grund der räumlichen Nähe zeitnah diskutiert und umgesetzt werden. Die zentrale Lösung erfordert allerdings zusätzliche Räumlichkeiten, ist kostenintensiv auf Grund der Beschaffung neuer IT-Systeme und Arbeitsplatzausstattung und es können eventuelle Folgekosten (z.B. dauerhafte Bereitstellung von Personal) entstehen. Relativiert werden die Kosten hingegen, wenn an einem Flughafen schon ein Airport Operation Center existiert und lediglich TAM integriert werden muss.

- Dezentrales APOC: Die dezentrale Lösung erfordert kein gemeinsames APOC. Stattdessen werden die jeweiligen Schaltzentralen der einzelnen Stakeholder genutzt und über eine gemeinsame Plattform miteinander verknüpft. Für zwingende und vor allem dringliche Entscheidungen kann ein Meeting einberufen werden. Der Vorteil gegenüber der zentralen Lösung liegt im finanziellen und technischen Aufwand, der Nachteil hingegen bei der Kommunikation.

Neben diesen beiden Varianten kann ein APOC auch in einer Mischform errichtet werden. Bei dem z.B. ein APOC eines kleinen Flughafens mit in einem großen integriert wird. Außerdem kann an kleinen bzw. regionalen Flughäfen auch entsprechend der Engpasssituation eine minimalistische Form des APOC errichtet werden [58].

Funktionsarchitektur

Vier Hauptfunktionen beschreiben die funktionelle TAM-Struktur, siehe dazu Abbildung 3.11.

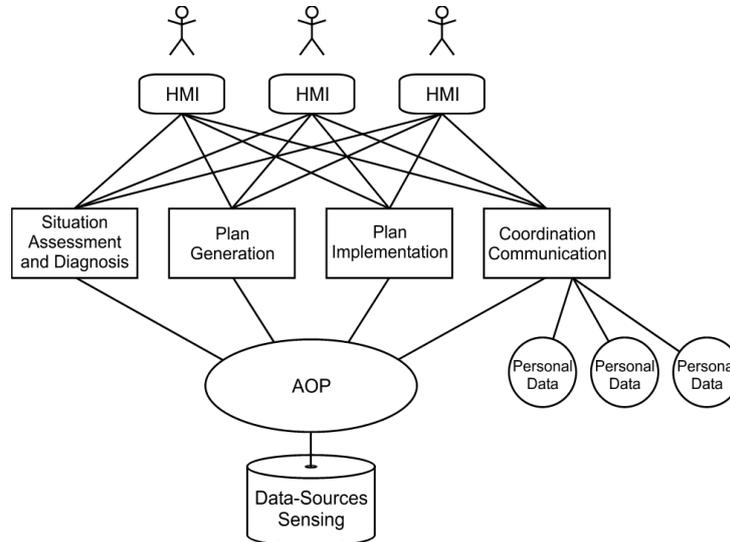


Abb. 3.11: Funktionaler Aufbau des TAM [58]

Anhand der bereits vorhandenen Verkehrsdaten wird darauf aufbauend ein AOP entwickelt. Insofern dem AOP seitens der Stakeholder zugestimmt wurde, wird dieser an das Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM) geschickt. Die Akteure im APOC bzw. jene, welche mit diesem verbunden sind, haben einen direkten Zugang zu Systemen

(Human-Machine-Interface, HMI) zur Einschätzung der Lage und Diagnose, Plangenerierung, Planimplementierung und zu einem Koordinierungs- und Kommunikationsmodul, siehe Abbildung 3.11 [58]:

- Lage und Diagnose kann in drei Unterprozesse gegliedert werden: Datengewinnung, Monitoring und Diagnose. Für die Lageabschätzung am Flughafen müssen zunächst Daten über das Flughafennetzwerk gesammelt werden. Dabei können unterschiedliche Quellen (u.a. Wetterdaten, Flugpläne, Radardaten, Luftraumdaten) genutzt werden, welche dann zu einem kompletten Lagebild zusammengeführt werden müssen. Das Monitoring schließt sich an diesen Prozess an. Dabei werden aktuelle Warteschlangenzeiten, Rollzeiten oder auch die Nachfrage berechnet. Insofern keine Abweichungen zu den Performance-Zielen, sog. Leistungsindikatoren (Key Performance Indicators, KPI, siehe Kapitel 4.1) des Flughafens herrschen, ist auch keine Diagnose oder neue Planung erforderlich. Existieren Abweichungen zu den Zielen, z.B. in Form von großen Verspätungen, erfolgt der Prozess der Diagnose, um Möglichkeiten zur Minimierung der Verspätungen zu analysieren.
- Plangenerierung: Insofern neue Daten in das System eingespeist werden, beginnt der AOP-Plangenerierungsprozess bei dem automatisch die neuen Daten eingespeist werden und ggf. neue Planungsvorschläge generiert werden. Es besteht auch die Möglichkeit manuelle Änderungen in den AOP einzugeben.
- Planimplementierung: Im Anschluss an den automatischen Planungsprozess der Flughafenressourcen muss dieser von den Akteuren freigegeben werden.
- Kommunikation und Koordination: An dieser Stelle sollten sich die einzelnen Akteure im APOC bei möglichen Veränderungen im Flughafenablauf besprechen und eventuell vorgenommene Änderungen an die jeweiligen Operation Centres weitergeben.

Diese Prozesse und Systeme sind mit dem AOP verbunden, und zusätzliche externe Datenschnittstellen (Personal Data, siehe Abbildung 3.11) speisen weitere aktuelle Daten in das System. Sämtliche Daten werden dann den Akteuren im APOC visualisiert und zur Unterstützung und Optimierung bei den Flughafenprozessen dargestellt [58].

Akteure

Um gemeinsame Entscheidungen zur ganzheitlichen Optimierung der Flughafenprozesse auf Grundlage der Systemunterstützung treffen zu können, ist es essentiell wichtig, dass alle Stakeholder, welche an diesen Prozessen beteiligt sind, im APOC versammelt sind, siehe Abbildung 3.10.

Die Akteure sind zum einen die Fluggesellschaften, welche für die Planung und Durchführung ihrer jeweiligen Flüge (u.a. Catering) zuständig sind und zum anderen die Flugsicherung, welche eine sichere Führung und Koordination der Luftfahrzeuge vom Boden aus gewährleistet. Weitere Stakeholder sind der Flughafenbetreiber, welcher u.a. die Infrastruktur zur Verfügung stellt, und die Bodenverkehrsdienstleister, welche während des Turnaround-Prozesses die Abfertigung der Luftfahrzeuge und zum Teil der Passagiere durchführen. Als letzter Akteur kann ein Repräsentant des Luftverkehrs- und Kapazitätsmanagements (Air Traffic and Capacity Management, ATFCM) vertreten sein.

An dieser Stelle lässt sich zunächst zusammenfassen, dass sich das TAM-Konzept aus den folgenden Elementen zusammensetzt:

- Räumlichkeiten z.B. APOC, zentral oder dezentral
- Stakeholder des Flughafens z.B. Luftverkehrsgesellschaft, Flugsicherung und Flughafen
- Unterstützungssysteme z.B. Ressourcenmanager, welcher die automatische Planung von Standplätzen und Gates durchführt und Wetterdaten
- Prognosesysteme z.B. zur Vorhersage von Nachfrage und Kapazität
- Airport Operational Plan inkl. Zeitstempel aus dem A-CDM
- Kommunikation
- Datenaustausch
- Betrachtungsebene: gesamter Flughafenprozess

Diese Elemente sollen dazu beitragen, dass folgende Ziele realisiert werden [58]:

- verbesserte Kommunikation der Stakeholder
- koordinierte Planung
- effektiver und effizienter Ressourceneinsatz
- frühzeitiges Erkennen von Ereignissen und entsprechende Reaktionen auf die Abweichungen

Zur Überprüfung und Messung dieser Ziele ist es erforderlich Leistungsindikatoren (Key Performance Indicators) festzulegen, damit jederzeit die Erwartungshaltung der Nutzer des Luftverkehrs berücksichtigt wird. Mögliche Leistungsparameter werden im Kapitel 4.1 genauer beschrieben.

3.4 Bewertung der Rolle der Emissionen in A-CDM und TAM

Nachdem in diesem und dem vorangegangenen Kapitel die Emissionen, das A-CDM-Konzept und das TAM-Konzept genauer erläutert wurden, gilt es nun zu prüfen, inwiefern der Aspekt der Umwelt und genauer der Emissionen in das Flughafenmanagement integriert wird bzw. wurde.

Die Bewertung der Einbeziehung von Umweltparametern innerhalb des A-CDM erfolgt mittels des Airport CDM Implementation Manual der EUROCONTROL. Dabei zeigt sich, dass lediglich das allgemeine Ziel der Reduzierung von Umwelteinflüssen existiert, aber keine direkten Spezifikation bzw. Angaben in welcher Art und Weise diese durchzuführen

ist. Als Indikator wird lediglich die Reduzierung der Triebwerkslaufzeit in Bezug auf die Emissionen am Boden genannt. Bei der Betrachtung von Lärm gilt es ebenfalls diesen am Boden zu reduzieren. Im Anhang des A-CDM Manuals erfolgt noch die Hinweisgabe, mit welchen Beiträgen diese Reduzierung erfolgen soll [59]:

- Informationsaustausch
- Pre-Departure Sequencing
- variable Rollzeiten

An dieser Stelle ist die Betrachtung der Emissionen innerhalb des A-CDM auch abgeschlossen, sodass eine direkte Einbeziehung der Emissionen und speziell der CO₂-Emissionen nicht erfolgt. Vielmehr kann eine mögliche Reduzierung von Emissionen als positiver Nebeneffekt der verschiedenen Meilensteine des A-CDM gesehen werden.

Auch im TAM-Kontext existiert das allgemeine Ziel die Emissionen zu reduzieren. In welchem Umfang und vor allem welche Emissionen im speziellen wird auch innerhalb des Konzeptes nicht genauer erläutert. Lediglich durch die positive Auswirkung der Reduzierung der Triebwerkslaufzeit kann der Treibstoffverbrauch und im weiteren Verlauf die Emissionen reduziert werden. Entsprechend einer TAM-Validierungskampagne ergab sich eine statistisch signifikante Verkürzung der Gesamttriebwerkslaufzeit um durchschnittlich 32 Sekunden [60].

In beiden Konzepten wird ersichtlich, dass die Emissionen nur eine untergeordnete Rolle spielen und durch die Verbesserung der Effizienz, in Form von Verringerung der Wartezeiten oder der Verbesserung der Pünktlichkeit bei An- und Abflügen, ebenfalls verringert werden. Eine direkte Zielformulierung, wie z.B. ein CO₂-neutraler Flughafenbetrieb oder die Senkung der Emissionen um mindestens 50 % erfolgt nicht mit dem direkten Bezug auf die Flughäfen.

Kapitel 4

Erarbeitung von Umweltindikatoren und einer Methode zur Berechnung von CO₂-Emissionen

4.1 Key Performance Areas und Indicators

4.1.1 Allgemeine Definition

Key Performance Indicators (KPI) dienen in vielen Bereichen von Unternehmen als Messgröße zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Systemen. Diese Leistungsparameter sollen die Abläufe in einem Unternehmen transparent, messbar und vergleichbar machen. Dabei gibt jede Messgröße lediglich Aufschluss über Teilaspekte in einem Unternehmen, sodass bei einer ganzheitlichen Betrachtung verschiedene Indikatoren herangezogen werden müssen, welche zudem in Kategorien eingeteilt werden können (Key Performance Areas, KPA). Für eine mögliche Vergleichbarkeit der Zielerreichung ist es von Bedeutung, dass die zu messenden Größen, Parameter oder Prozesse zunächst genau definiert werden. Nur mit einer Definition lassen sich die einzelnen Bereiche kontrollieren und im weiteren Verlauf auch verbessern [61].

Die Flughäfen haben eine hohe Bedeutung und Komplexität im Verkehrsnetz und müssen verschiedene Anforderungen erfüllen, wie z.B. die Wegesicherung, Abfertigung von Passagieren, Fracht und Luftfahrzeugen sowie weitere Hilfsfunktionen (Gewährleistung der Sicherheit, Marketing, Umweltfreundlichkeit) [62], [51]. Der Flughafenbetrieb besteht demnach aus verschiedenen komplexen Bereichen und Prozessen, welche die Beteiligung vieler Stakeholder erfordern. Die Koordination jener Prozesse stellt eine große Herausforderung dar, gerade vor dem Hintergrund, dass eine effiziente und ständige Zusammenarbeit und ein Informationsaustausch zwischen den Beteiligten am Flughafenprozess nicht durchgängig gewährleistet sind. Zur Vermeidung bzw. Verbesserung dieser Tatsache und zur Prozessoptimierung können Messungen mit Hilfe von Key Performance Indicators bei-

tragen. Mit Hilfe dieses Instruments kann auch eine Informationsbasis aufgebaut werden, welche allen Stakeholdern zur Verfügung gestellt werden kann.

Leistungskennzahlen dienen nicht nur der Beurteilung und Meldung eines Systemzustands. Wie in jedem Regelkreis sind sie zudem ein Mittel zur Steuerung eines Systems und ermöglichen durch den Vergleich zwischen SOLL und IST erst die Regelung und demnach eine gezielte Einflussnahme auf den Prozess, siehe Abbildung 4.1. Durch die Gegenüberstellung der Zielgröße und der entsprechenden Leistungskennzahl ist eine Bewertung entsprechender Flughafenprozesse möglich [63].

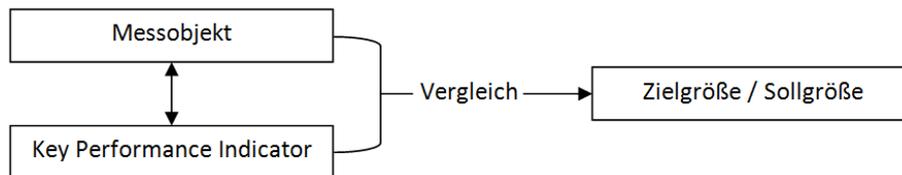


Abb. 4.1: Leistungsmessung [63]

Mit Hilfe der gewonnenen Ergebnisse zu den einzelnen Prozessen können diese zur Steuerung der Prozesse am Flughafen genutzt werden. Im TAM-Kontext sollen die Stakeholder auf dieser Basis den Flughafenprozess (land- und luftseitig) so beeinflussen, dass dieser effizienter wird. Bei den Eingriffen kann es allerdings auch zu unerwünschten Konsequenzen kommen. Dabei kann durch die Verbesserung eines speziellen Prozesses (Verbesserung der Pünktlichkeit durch schnelleres Rollen) ein anderer Prozess (Schadstoffausstoß am Flughafen), welcher z.B. parallel abläuft, verschlechtert werden [56].

Es kann bezüglich der KPIs und deren Einflussbereich im TAM-Kontext festgehalten werden, dass diese eine Interpretationsgröße auf der Managementebene darstellen. Diese verschiedenen KPIs, welche auf die verschiedenen Prozesse und Aspekte des Flughafenbetriebs bezogen werden können, dienen als Entscheidungshilfen für den Gesamtprozess. Bisher konnten auf Grund der geringen Datengrundlage bei den Effizienz- und Umweltaspekten lediglich Einzelflugevents oder Näherungswerte (zur Messung von CO₂-Emissionen werden die Flugbewegungen herangezogen und entsprechende Durchschnittswerte zum Treibstoffverbrauch berechnet) betrachtet werden. Dies geschieht meist ad hoc und nicht frühzeitig, sodass sich die Stakeholder nicht auf die Veränderungen einstellen können. Mit der Umsetzung von TAM wird eine Verbesserung aller am Flughafenprozess Beteiligten auf Grundlage von Prognosedaten, wie z.B. Nachfrage, Bahnkapazität und Wetterdaten, erfolgen, sodass die Performance des Flughafens und der Stakeholder anhand von vorher festgelegten Kriterien in Form von KPIs bestmöglich optimiert werden können. Denn erst mit Hilfe dieser Indikatoren ist es möglich, Abweichungen erkenntlich zu machen und darauf aufbauend gemeinsam handeln zu können.

4.1.2 Review vorhandener Key Performance Areas

Im Folgenden werden nun speziell jene für den TAM-Kontext relevanten Key Performance Areas und die zugehörigen Key Performance Indicators vorgestellt.

Das „Key“ deutet an, dass es sich bei den folgenden Indikatoren um Schlüsselgrößen handelt. „Diese müssen daher einen direkten Bezug zur Zielstellung herstellen, d.h., sie müssen

eine größtmögliche Aussagekraft hinsichtlich der formulierten Zielstellung zulassen“ [MARGER, S. 26ff.], [48]. Diese KPIs können in Kategorien, sogenannten Key Performance Areas (KPA), eingeordnet werden, sodass speziell am Flughafen insgesamt sechs KPAs (Einteilung durch Airports Council International, ACI) existieren mit jeweils diversen Indikatoren, siehe dazu Tabelle 4.1 [64]. Anhand dieser Tabelle wird ersichtlich, dass viele Prozesse und Bereiche am Flughafen mit Hilfe von Indikatoren gemessen und danach zum einen intern und zum anderen auch extern mit anderen Flughäfen verglichen werden können.

Der erste Bereich entsprechend Tabelle 4.1 befasst sich mit der Allgemeinen Messung, um eine Charakterisierung des Flughafens vornehmen zu können, wie z.B. die Messung der Anzahl von Passagieren oder der Anzahl von Starts und Landungen. Oftmals dienen diese Indikatoren als Voraussetzung zur Berechnung weiterer Indikatoren, z.B. der Pünktlichkeit, und eignen sich als Grundstein. Ein wichtiges Kriterium am Flughafen stellt die Sicherheit dar, sowohl die Security (Sicherheitskontrollen) als auch die Safety (Unfallvermeidung). Auf Grund der Wichtigkeit bildet dieses Themengebiet eine eigene KPA und ggf. können diese auch getrennt voneinander untersucht werden. Es stehen in diesem Bereich verschiedene KPIs für eine Messung zur Verfügung, u.a. können für die Start- und Landebahn Unfälle und Störungen betrachtet und in Relation zur Gesamtanzahl an Flugbewegungen gebracht werden. Im Anschluss daran können sie mit anderen Flughäfen verglichen werden. Ein wichtiger Aspekt, welcher zur Messung der Kundenzufriedenheit herangezogen werden kann, ist die Service Qualität. Hier spielt vor allem eine Rolle, welche Verspätungen am Flughafen in den Bereichen Gepäck, Abfertigung, Turnaround oder Taxi entstehen. Diese KPIs werden heute intensiv genutzt und auch flächendeckend ausgewertet. Die Auswertung erfolgt u.a. jährlich im Performance Review Report der Eurocontrol und gibt Aufschluss über den prozentualen Anteil der verschiedenen Verspätungsherkünfte. Dieser KPI kann somit als Vergleich und Ranking unter den einzelnen Flughäfen dienen. Außerdem erfolgt ein Vergleich zu den Vorjahren, sodass eine Tendenz erkennbar wird, ob weitere Maßnahmen eingeleitet werden müssen, um z.B. die Verspätungen im Turnaround zu minimieren, oder Verbesserungen eingetreten sind. Gleichzeitig können diese KPIs auch als Grundlage für die Betrachtung der Umwelt genutzt werden. Entstehen z.B. große Verspätungen beim Taxi und dem Turnaround, ist es naheliegend, dass auch der Treibstoffverbrauch erhöht ist, weil z.B. die Verspätungen im Taxi auf Warteschlangen an der Start- und Landebahn hindeuten können. Die nächsten beiden KPAs betrachten die Produktivität und die Finanzen, werden aber an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da sie nicht direkt Einfluss auf die Umweltaspekte am Flughafen nehmen. Die letzte der sechs KPAs befasst sich mit der Umwelt. Die verschiedenen KPIs, die an dieser Stelle genannt werden, sind die Emissionsbilanz, Wiederverwertung des Abfalls, Abfallreduktion, Verwendung erneuerbarer Energien, Energieverbrauch und Wasserverbrauch [64]. Entsprechend dieser KPIs, welche durch die ACI formuliert wurden, wird ersichtlich, dass hinsichtlich der Emissionen lediglich auf eine Bestandsaufnahme fokussiert wird. Das liegt vor allem daran, dass derzeit kaum Standards zur Messung der verschiedenen Emissionen existieren. Außerdem gibt die Literaturquelle keine Auskünfte über die Einteilung der Emission in Luftseite und Landseite. Es erfolgt auch keine Unterteilung nach Stakeholder. Einen detaillierteren Einblick in die KPA Umwelt und darin, in welcher Form andere Institutionen KPIs formulieren, liefert der nächste Kapitelabschnitt [64].

Allgemein	Safety und Security	Servicequalität
1. Passagiere	1. Unfälle auf der Start- und Landebahn	1. Praktische Stundenkapazität (SLB)
2. Herkunft, Ziel der Passagiere	2. Störungen auf der Start- und Landebahn	2. Verspätung am Gate (Abflug)
3. Luftfahrzeugbewegungen	3. Vogelschlag	3. Verspätung beim Rollen (Abflug)
4. Verladene bzw. entladene Fracht oder Post	4. Allgemeine Unfälle	4. Kundenzufriedenheit
5. Nonstop-Ziele	5. Arbeitsunfälle	5. Gepäckzustellungsdauer
	6. Arbeitszeitverlust durch Krankheit oder Unfälle der Mitarbeiter	6. Dauer der Sicherheitsüberprüfung
		7. Dauer der Grenzkontrollüberprüfung
Produktivität, Kosteneffizienz	Finanzen	Umwelt
1. Passagiere pro Mitarbeiter	1. Luftverkehrseinnahmen pro Passagier	1. Emissions-Bilanz (u.a. CO ₂ , NO _x)
2. Luftfahrzeugbewegungen pro Mitarbeiter	2. Luftverkehrseinnahmen pro Bewegung	2. Abfallrecycling
3. Luftfahrzeugbewegungen pro Gate	3. Nicht-Luftverkehrsbetriebseinnahmen in Prozent der Gesamtbetriebseinnahmen	3. Abfallreduktion (in %)
4. Gesamtkosten pro Passagier	4. Nicht-Luftverkehrseinnahmen pro Passagier	4. Verwendung erneuerbare Energien (in %)
5. Gesamtkosten pro Bewegung		5. Energieverbrauch pro m ² im Terminal
6. Gesamtkosten pro Umschlagleistung (Work Load Unit, WLU)		6. Wasserverbrauch pro Passagier
7. Betriebskosten pro Passagier		
8. Betriebskosten pro Bewegung		
9. Betriebskosten pro WLU		

Tabelle 4.1: KPAs und dazugehörige KPIs [64]

Die Einordnung der KPIs in die verschiedenen Bereiche kann in unterschiedlichem Ausmaß erfolgen. So existieren in der Literatur zum Teil nur drei Bereiche der KPAs. Andere Quellen geben wiederum bis zu 15 unterschiedliche an. Dabei gibt es die Möglichkeit, dass für den Flughafen weitere KPIs entwickelt werden. Die ICAO teilt die verschiedenen KPIs in insgesamt elf Key Performance Areas ein, die zusätzlichen KPAs, die in Tabelle 4.1 nicht aufgeführt wurden, werden im Folgenden aufgelistet (Safety und Security werden einzeln betrachtet), siehe dazu ICAO Document 9883 [65]:

- Kapazität
- Flexibilität
- Interoperabilität
- Vorhersagbarkeit

Auch SESAR formuliert auf Grundlage der ICAO die KPAs [66]. Die EUROCONTROL hingegen beschränkt sich auf fünf KPAs: Traffic Volume and Demand, Capacity, Punctuality, Efficiency und Predictability, siehe dazu ATMAP¹ Framework [67]. Hierbei handelt es sich lediglich um diese fünf Areas, da diese bereits an den jeweiligen Flughäfen messbar und somit direkt umsetzbar sind im Gegensatz zu KPIs, welche die Bereiche Flexibilität und Emissionen abdecken. Diese Einbeziehung soll erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Außerdem wurden diese fünf KPAs bereits entwickelt, getestet und verifiziert [67]. Das Hauptziel, welches im Vordergrund der Performance von Flughäfen und den entsprechenden Stakeholder steht, wurde von der ATMAP wie folgt formuliert: „to maximise the use of the airport airside capacity in line with air traffic demand at an accepted level of service quality (efficiency, predictability, flexibility) in a safe and cost-effective manner while optimising environmental impacts (noise and emissions) and maintaining the awareness of network effects“ [ATMAP, S.12, 2009] [67]. Dieses Zitat spiegelt die wichtigsten Bereiche, welche den Flughafen betreffen, wider und zeigt das Zusammenspiel zwischen den einzelnen KPAs. Außerdem geht hervor, dass die KPA Umwelt künftig berücksichtigt werden soll, aber derzeit noch nicht abgedeckt ist.

Aus diesen Ausführungen wird ersichtlich, dass die Einteilung der KPIs in verschiedene Kategorien (KPAs) auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen kann, aber die eigentlichen Leistungskennzahlen die gleichen bleiben.

Die Priorisierung von KPAs und die Definition zugehöriger KPIs sind prinzipiell abhängig von der Durchführung des Flugbetriebs, der Eigentümerstruktur oder der Flughafengröße. So liegt das Hauptaugenmerk der privaten Flughäfen auf Grund des Wettbewerbs mehr auf dem wirtschaftlichen Aspekt, im Gegensatz zu Flughäfen im Eigentum der öffentlichen Hand. Auch zwischen großen und kleinen Flughäfen wird die Gewichtung der KPIs unterschiedlich sein. Demnach richten sich die Leistungsindikatoren nach dem Flughafen selbst und sind nur bedingt miteinander vergleichbar. Es müssen entsprechende Hintergrundinformationen zu den Flughäfen berücksichtigt werden, sodass auf Grund des Vergleichs keine direkten Rückschlüsse auf eine Verbesserung bzw. Verschlechterung getätigt werden können. Beispielsweise kommen auf einen Flughafen mehr Beschäftigte pro Passagier als an einem anderen, was zunächst einen Personalüberschuss impliziert. Allerdings werden an dem einen Flughafen die Bodenverkehrsdienste eigenständig übernommen, wohingegen

¹ATM Airport Performance

bei dem anderen Flughafen mit der geringeren Anzahl an Mitarbeitern pro Passagier die Bodenverkehrsdienste an eine externe Firma ausgelagert wurden [64]. Auch die Anzahl von integrierten Leistungsindikatoren in den Flughafenprozess ist von Flughafen zu Flughafen unterschiedlich und hängt vom Management des Flughafens ab. Außerdem kann sich mit der Zeit die Einführung von Indikatoren an den einzelnen Flughäfen mit Veränderung der Themengebiete bzw. der Änderung des Fokusses verlagern. Ein Beispiel dafür stellt die KPA Umwelt dar, welche bisher für viele Flughäfen keine Schlüsselgröße war, aber auf Grund der Belange der Politik und Bevölkerung immer mehr in den Fokus rückt, wie dies die verschiedenen Umweltprogramme und Ziele der EU (Weißbuch und ACARE), siehe Kapitel 2.3.2.1, zeigen. Allerdings erfolgt derzeit keine Priorisierung dieses KPAs, da, wie bereits erwähnt, derzeit keine direkte Messung z.B. von CO₂ erfolgt. Lediglich über die Effizienz lassen sich Rückschlüsse auf den zusätzlichen Treibstoffverbrauch und damit verbundene Emissionen ziehen. In Zukunft muss demnach eine Möglichkeit zur Messung der Umweltparameter erarbeitet werden, um den Zielen der EU gerecht zu werden, um das Optimierungspotential hinsichtlich der Treibstoffeinsparungen an den Flughäfen überhaupt identifizieren zu können und um im weiteren Verlauf ggf. Maßnahmen einleiten zu können. Es wird demnach nicht ausreichen ein CO₂-Inventar pro Flughafen zu berechnen, da hieraus zwar eine Gesamtemissionsmenge hervorgeht, aber eine genaue Betrachtung der einzelnen Herkunftsorte (beispielsweise Anflug, Rollen und Abflug) nicht erfolgt. Eine schon heute vorhandene Verbesserung an den meisten Flughäfen stellt die Umwelterklärung dar. Hierbei werden meist die CO₂ Emissionen kategorisiert und entsprechend eingeteilt, als Beispiel dient die Inventarisierung des Flughafens Hamburg, siehe Abbildung 4.2.

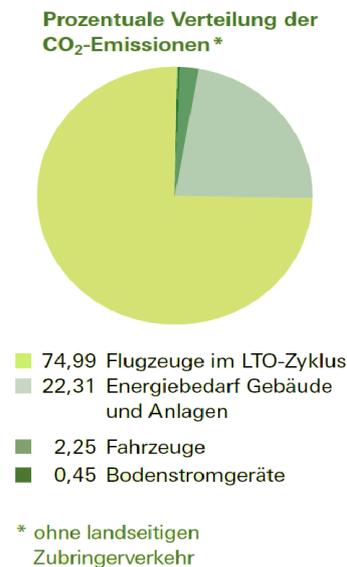


Abb. 4.2: Inventarisierung von CO₂-Emissionen am Flughafen Hamburg [45]

An anderen Flughäfen erfolgt eine genauere Einteilung. Ein Standard für alle Flughäfen ist aber nicht vorgeschrieben, sodass eine Inventarisierung nicht an allen Flughäfen erfolgt und der Umweltparameter demnach nicht flächendeckend umgesetzt wird. Im nachfolgenden Kapitel werden die KPA Umwelt und die KPIs im Bereich CO₂ genauer fokussiert bzw. entsprechende KPIs, welche bisher noch nicht existierten, entwickelt.

4.1.3 Ableitung von CO₂ basierten KPIs für die Key Performance Area Umwelt

Während im vorangegangenen Kapitelabschnitt die verschiedenen KPAs beschrieben und demnach auch die KPA Umwelt näher betrachtet wurde, erfolgt nun die Untersuchung möglicher KPIs zur Integration von CO₂ basierten Leistungsindikatoren am Flughafen und speziell in einem Total Airport Management. Zunächst werden die verschiedenen Quellen genauer betrachtet, welche sich mit dem KPI CO₂ direkt oder indirekt (Effizienz am Flughafen) befassen. Insofern diese Dokumentation lückenhaft ist bzw. weitere KPIs entwickelt werden können, erfolgt dies im Anschluss an die Literaturrecherche. Abschließend werden in einer Tabelle sämtliche KPIs aufgelistet, um einen Überblick zu erhalten. Diese werden dann im weiteren Verlauf dieses Kapitels auf ihre Eignung, sowohl im TAM-Kontext als auch in Bezug auf die Aufgabenstellung, untersucht. Im Folgenden bezieht sich der Begriff Emissionen ausschließlich auf CO₂-Emissionen.

Trotz der bisherigen Fokussierung im Kontext Flughafen auf die KPAs:

- Sicherheit,
- Kapazität,
- Flexibilität und
- Effizienz

existieren bereits einige formulierte KPI mit Bezug zu CO₂ seitens der EUROCONTROL und der ICAO. Außerdem soll eine Berücksichtigung der Security, Umwelt und Wirtschaftlichkeit erfolgen [68].

EUROCONTROL

Die EUROCONTROL hat in den letzten Jahren verschiedene Strategien und Programme entwickelt, welche mehr oder weniger intensiv den Aspekt der Umwelt betrachten. In der ATM 2000+ Strategie wird das primäre Ziel der kontinuierlichen Expansion der Kapazität genannt. Allerdings auch an dieser Stelle mit der strikten Anforderung, die Umwelt zu berücksichtigen. Aus diesem Grund sollen Umweltaktivitäten zur Minimierung von Schadstoffen im Bereich Anflug, Landung, Rollen und Start unterstützt werden. Zwei Indikatoren können aus dieser Strategie abgeleitet werden (die Ableitung erfolgt auf Grundlage der gesteckten Ziele) [68]:

- Energieeffizienz pro Luftfahrzeugbewegung oder Passagier
- Bilanz der Treibhausgasemissionen

Innerhalb dieser Strategie werden aber keine weiteren KPIs bezüglich der Umwelt und speziell der Schadstoffe genannt [68].

Entsprechend des Single European Sky (SES II) der EUROCONTROL und dem entsprechenden Diskussionspapier wird festgehalten, dass die Emissionen mit der Treibstoffeffizienz korrelieren, sodass an dieser Stelle ein weiterer KPI gebildet werden kann, welcher

den Treibstoff für die geplante Trajektorie mit dem tatsächlich verbrauchten Treibstoff vergleicht. Darauf aufbauend kann dies sowohl für einen kompletten Flug als auch für die einzelnen Flugphasen erfolgen, um Ineffizienzen schneller detektieren zu können [69]. In dieser Quelle, welche sich vorrangig auf den Luftraum bezieht und nicht direkt die Flughäfen berücksichtigt, sind die Kommentare der Luftraumnutzer zum Aspekt Umwelt, dass dieser so klein bzw. schmal wie möglich gehalten werden sollte. Vielmehr sollte die operationelle Verbesserung fokussiert werden. Damit ergäbe sich automatisch der Nebeneffekt, dass die Umwelt von den Maßnahmen profitiert. Aus dieser Quelle lassen sich demnach keine weiteren KPIs ableiten [69].

Ein weiteres SES Performance Scheme zur Vorbereitung der zweiten Bezugsperiode (SES Performance Scheme: Preparations for the second reference period (RP2)) befasst sich ebenfalls mit den Umweltaspekten. An dieser Stelle wird als Indikator die Taxi-Out Zeit genannt (geplante Zeit minus tatsächliche Zeit), mit der Bemerkung, dass dieser Indikator meist nur für größere Flughäfen, welche zudem koordiniert werden, von Relevanz ist, weil das Bilden von Warteschlangen an den Startbahnköpfen erhöht ist. Außerdem werden keine Grenzwerte bezüglich dieser Zeit und damit der Schadstoffmenge genannt, weil die Werte flughafenabhängig sind. Außerdem steht die Betrachtung der Taxi-In Zeit als einheitlicher KPI nicht zur Diskussion, da es sich bei dieser Zeit um ein lokales Flughafen-Problem handelt, die abhängig von der jeweiligen Konfiguration (Layout) ist. Von den Stakeholdern selbst, welche innerhalb dieser Arbeit mitgewirkt haben bzw. mitwirken konnten, wurde hingegen die Taxi-In Zeit als KPI vorgeschlagen. Dieser KPI sollte demnach flughafenunabhängig gestaltet werden. An dieser Stelle sei der PRR der EUROCONTROL genannt: Hierbei wird eine engpassfrei Rollzeit als Bezugsgröße verwendet[1].

Außerdem wurde als weiterer KPI die Anzahl an Flughäfen mit Continuous Descent Operations genannt. Das Ergebnis bzw. die Schlussfolgerung hinsichtlich der Umweltindikatoren innerhalb dieser Quelle ist, dass für die Festlegung von Zielen für die Flughäfen weiterer Diskussionsbedarf benötigt wird. Im Vordergrund steht hier vor allem, auf welcher Ebene die Ziele bzw. Grenzwerte gesetzt werden sollen: EU-weit, Functional Airspace-bezogen oder national und wie eine Anpassung auf den individuellen Flughafen erfolgen soll. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass eine komplexe Abwägung bei der Wahl der KPIs zwischen Sicherheit, Lärm, Flugeffizienz und Kosten erfolgen muss. Demnach ist es nicht von Vorteil, wenn ein kleiner Flughafen sämtliche Unterstützungssysteme und neuen Technologien einsetzt, um Treibstoff und Emissionen einsparen zu können, wenn ggf. schon eine optimale Rollwegführung ausreichend gewesen wäre, weil in der Luft keine Verspätungen durch das Fliegen von Holdings entstehen [70].

In SESAR Schritt 3, der Koordination und Konsolidierung eines operationellen Flughafenkonzepts (Airport Detailed Operational Description - STEP3 Initial), werden innerhalb des SESAR Programms die detailliertesten Angaben zu den KPIs gemacht. Insgesamt werden sechs KPIs zu dem Aspekt der lokalen Luftqualität aufgelistet, siehe Tabelle 4.2.

KPI	Darstellung / Erklärung	Einheit
Konzentration der Luftschadstoffe (keine Nennung von CO ₂)	Messungen der Luftschadstoffkonzentration	μg / m ³
Emissionsmenge innerhalb der TMA in Relation zur Verkehrsmenge oder Passagieren	Überwachung bzw. Erfassung mittels geeigneter Kalkulations-Software	Tonnen CO ₂ pro Verkehrseinheit oder Passagier
Emissionsmenge während des Anflugs, Taxi-In, Taxi-Out, Climb-Out in Relation zur Verkehrsmenge oder Passagieren	Überwachung bzw. Erfassung mittels LASPORT (Kapitel 4.3.3)	Tonnen CO ₂ pro Verkehrseinheit oder Passagier
Gesamtemissionsmenge während der Triebwerkstestläufe	Überwachung bzw. Erfassung mittels geeigneter Kalkulations-Software	Tonnen CO ₂
Emissionsmenge der APU während des Turnarounds	Überwachung bzw. Erfassung mittels geeigneter Kalkulations-Software	Tonnen CO ₂ , Tonnen CO ₂ pro Turnaround
Emissionsmenge von Fahrzeugen auf dem Vorfeld	Überwachung bzw. Erfassung mittels geeigneter Kalkulations-Software	Tonnen CO ₂
Verspätungen (Flug, TMA, Start- und Landebahn, Boden)	Indirekte Berechnung der zusätzlichen CO ₂ Ausstoßes auf Grund von Verspätungen	Tonnen CO ₂

Tabelle 4.2: KPIs SESAR Step 3 [71]

Innerhalb von SESAR existiert ein weiteres Dokument, welches sich mit dem Aspekt Umwelt auseinandersetzt. Dieses Dokument bzw. das Projekt Episode 3 (Episode 3 - Sixth Framework Programme Priority 1.4 Aeronautics and Space) schließt die Lücke zwischen der SESAR Definitionsphase und der SESAR Entwicklungsphase. Speziell für den Flughafen wurden KPIs aufgestellt, welche sich auf den LTO-Zyklus und die ISA-Bedingungen beziehen [72]:

- CO₂-Emissionen unter 3000 ft pro Flugbewegung (Durchschnitt)
- Treibstofffluss in Abhängigkeit der Luftfahrzeug-Bewegungen

Eine weitere Initiative der EUROCONTROL ist der Rahmenplan zur Messung der Performance der Luftseite des Flughafens und dessen Nahbereichs (A Framework for Measuring Airport airside and nearby Airspace Performance, ATMAP). Im Zuge des Rahmenplans werden allerdings zwei KPAs noch nicht betrachtet: Emissionen und Flexibilität. Aus diesem Grund können keine direkten KPIs für CO₂ abgeleitet werden, aber es wird die KPA Effizienz genauer betrachtet mit dem Ziel, mögliche Indikatoren zu identifizieren. Eine

Möglichkeit wäre der KPI On-time Ankünfte bzw. Abflüge. Aus diesem KPI kann indirekt geschlossen werden, wie viele Luftfahrzeuge verspätet bzw. verfrüht sind. Daraus lässt sich schlussfolgern, ob zusätzlicher Treibstoff verbraucht wurde. Insofern dieser KPI um die Pünktlichkeit und die Verspätungsminuten ergänzt wird, ist es zudem möglich einen zusätzlichen Treibstoffverbrauch genauer zu ermitteln. Im weiteren Verlauf kann die entsprechende zusätzliche Menge an CO₂ berechnet werden. Dieser KPI lässt sich zusätzlich in die einzelnen Flug- und Rollphasen aufsplitten, sodass entsprechende Überschreitungen identifiziert werden können. Derzeit ein von vielen Flughäfen integrierter KPI ist die zusätzliche Zeit für das Taxi-Out. Dieser KPI findet u.a. Anwendung in Zürich und Wien [67].

Die nächste Quelle, welche sich mit den Indikatoren beschäftigt und genauer hinsichtlich der KPA Umwelt betrachtet wird, ist das A-CDM Manual der EUROCONTROL, IATA und ACI. Im Bereich der KPA Effizienz können auch diesem Dokument die KPIs Arrival und Departure Pünktlichkeit bzw. Verspätung entnommen werden, welche indirekt auf einen höheren Treibstoffverbrauch und damit CO₂-Emissionen schließen lassen können. Diese Verspätungen sollen durch einen Vergleich zwischen AOBT (Actual Off-Block Time) und SOBT (Scheduled Off-Block Time) gemessen werden. Speziell für die Umwelt wird innerhalb des A-CDM Manuals ein KPI genannt:

- Emissionen von den Triebwerken am Boden

Die Messung dieses KPIs erfolgt durch den Vergleich von EXIT (Estimated Taxi-In Time) und AXIT (Actual Taxi-In Time) bzw. EXOT (Estimated Taxi-Out Time) und AXOT (Actual Taxi-Out Time). Dies ist innerhalb des Dokuments der einzige KPI, welcher zur Messung der Schadstoffe betrachtet bzw. an den einzelnen Flughäfen, welche das A-CDM integriert haben, zur Messung der Umwelt-Performance genutzt wird [59].

Im Programm SESAR D2 der EUROCONTROL werden auch die KPA Umwelt untersucht und mögliche KPIs definiert. Diese sollen im Folgenden näher betrachtet werden. Am Boden ist das Ziel, die Warteschlangen der Luftfahrzeuge und die entsprechenden Wege zu minimieren. Auf Grundlage dieser Forderung kann der KPI, welcher schon in A-CDM erwähnt wurde, übertragen werden (KPI der Emissionen von Triebwerken am Boden). Ähnlich verhält es sich mit der Forderung nach ökologischeren An- und Abflügen. Auch an dieser Stelle können die entsprechenden Flugzeiten zwischen herkömmlichen und optimierteren Flugverfahren (CDA, CCD) verglichen werden [37]. Des Weiteren werden innerhalb der Performance Targets D2 weitere KPIs genannt, welche zwar der KPA Effizienz und Vorhersagbarkeit zugeordnet werden, aber dennoch in Bezug auf die Umwelt eingesetzt werden können:

- Treibstoffeffizienz: Messung durch die Abweichung vom Optimum, woraus die Lokale Luftqualität bestimmt werden kann
- On-Time Prozesse: Abweichungen der On-Block, Off-Block, Taxi und Turnaround Zeiten

Anhand des KPIs Treibstoffeffizienz kann verdeutlicht werden, wie viele Aspekte einen einzelnen Leistungsindikator beeinflussen können. So kann dieser Indikator in verschiedene Bereiche unterteilt werden, wie z.B. Airport, TMA und Enroute. Diese Unterteilung

kann weiter verfeinert werden, sodass z.B. im Bereich Airport die Treibstoffeffizienz an der Position sowie beim Rollen zur und von der Position betrachtet werden kann. Demnach wird ersichtlich, dass die KPIs selbst auch in verschiedene Teilbereiche unterteilt werden können und dies vor allem bei der Identifikation von zu hohem Treibstoffverbrauch sehr sinnvoll sein kann. Außerdem wird innerhalb des Dokuments im Bereich der Umwelt darauf eingegangen, dass ein Managementsystem zum Setzen von Standards und Monitoring sowie zur kontinuierlichen Verbesserung der Schadstoffemissionen eingesetzt werden soll. Dieses Managementsystem sollte zwischen den Stakeholdern am Flughafen implementiert und von allen berücksichtigt werden [73].

ICAO

Seitens der ICAO existiert ein Arbeitspapier bezüglich eines Reviews von verschiedenen KPIs. Auch innerhalb dieses Dokuments gibt es keinen direkten Umwelt KPI. Lediglich die Optimierung des ATM wird betrachtet, welche zu Treibstoffeinsparungen führen soll und damit auch unmittelbar der Umwelt zu Gute kommt. Das Problem bei den Schadstoffen liegt in ihrer großen Variabilität bei der Entstehung und Abhängigkeit von z.B. Treibstofffluss, Druck und Temperatur. Das führt dazu, dass kein Schadstoff allein den Umwelteinfluss des gesamten Triebwerks bzw. Luftfahrzeugs abbilden kann. Dennoch sind alle Emissionen in irgendeiner Form vom Treibstoffverbrauch abhängig. Daher ist auf Grund dieser Anmerkung und auch auf Grundlage der restlichen Literaturquellen der Treibstoffverbrauch einer der wichtigsten Indikatoren in Bezug auf CO₂ [74].

Ein weiteres Dokument der ICAO zum Thema Umwelt und entsprechende KPIs stellt der Environmental Report 2010 dar. Hierin enthalten ist zum einen der Aspekt, dass zunächst alle CO₂-Emissionen inventarisiert werden müssen und demnach auch hier der KPI Bilanz Treibhausgasemission (CO₂) aufgeführt wird (siehe auch EUROCONTROL). Zum anderen können entsprechend der Ziele, welche in diesem Dokument genannt werden, weitere KPIs abgeleitet werden [75]:

- Ground Power Unit und Klimatisierung unabhängig von der APU am Boden: Hieraus lässt sich der KPI APU-Laufzeit ableiten. Hierbei kann die Turnaround-Zeit mit der APU-Laufzeit verglichen werden. Ist die APU Zeit deutlich geringer bzw. erfolgt kein Einschalten der APU, kann davon ausgegangen werden, dass entsprechend in dieser Zeit kein Treibstoff verbrannt wird und demnach auch durch das Luftfahrzeug keine Emissionen entstehen.
- Optimierung der Rollwege, Terminal und Start- und Landebahn Konfiguration: An dieser Stelle kann mit Hilfe einer Wege-Zeit-Matrix ein optimales Routing der Luftfahrzeuge erfolgen und somit auch wieder die geplante Taxi-Zeit mit der tatsächlichen Taxi-Zeit verglichen werden entsprechend den Ausführungen beim A-CDM. Die Auswirkungen welche mit einer Verbesserung der Rollwegführung und Nutzung der Start- und Landebahn einhergehen, zeigt exemplarisch folgende Abbildung 4.3.

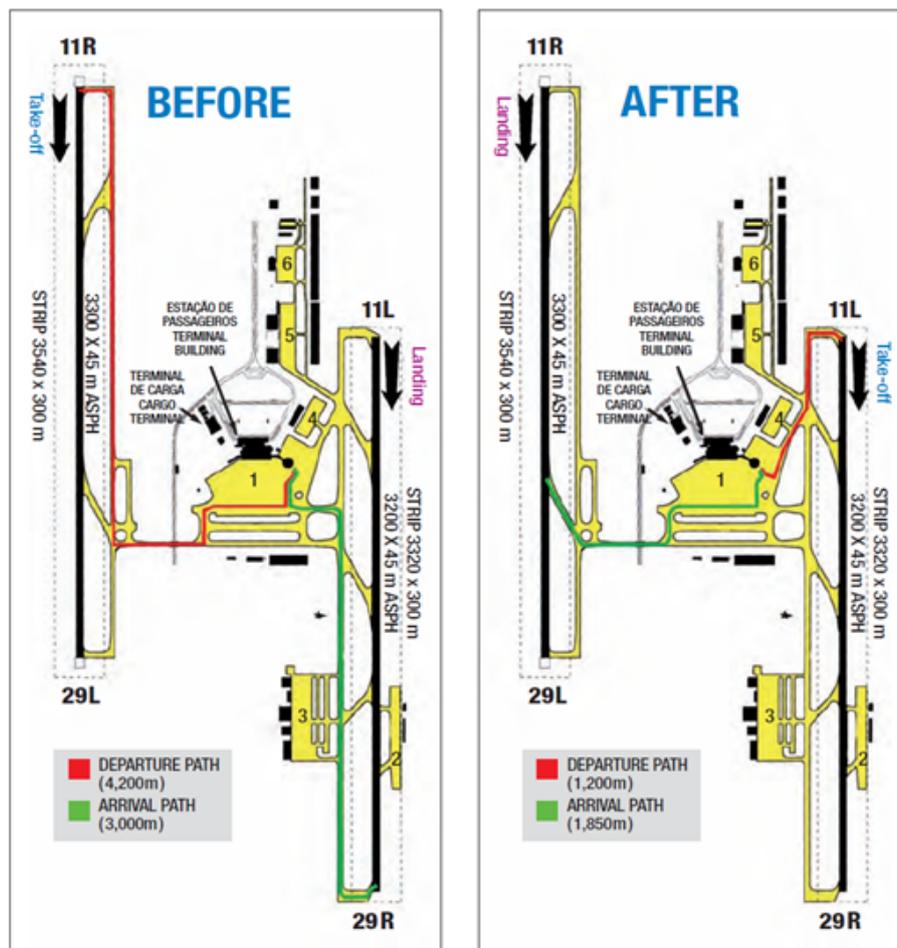


Abb. 4.3: Optimierte Rollwegführung [75]

Es existieren weitere Dokumente wie der Performance Review Report (Berücksichtigung von CO₂-KPIs innerhalb der Taxi-Phase und der Flugphasen) oder die verschiedenen Umweltprogramme, welche schon in Kapitel 2.3.2 erläutert wurden, die sich direkt oder indirekt (Formulierung von Zielstellungen, welche in KPIs umgewandelt werden können) mit den Umwelt KPIs auseinandersetzen, aber keine zusätzlichen zu den oben genannten enthalten.

Die einzelnen Dokumente, welche untersucht wurden, zeigen, dass die Aspekte der Umwelt immer nur vereinzelt betrachtet werden und meist die KPA Effizienz herangezogen wird, hierbei speziell der Treibstoffverbrauch. Außerdem weisen die Quellen keine Grenzwerte auf, welche an den Flughäfen hinsichtlich des Schadstoffausstoßes eingehalten werden sollen. Vielmehr entsteht das Bild, dass es zunächst eine Herausforderung ist, überhaupt die Umwelt KPIs in den Flughafenprozess in Form eines Monitoring einzusetzen. Dabei ist es zunächst wichtig, dass ein genaues Monitoring unter Berücksichtigung der Luftfahrzeuge, der Verweilzeiten etc. erfolgt, um ein möglichst präzises Abbild über die Schadstoffe zu erhalten.

Um einen zusammenfassenden Überblick über die vorhandenen KPIs innerhalb der Literaturquellen, welche zum Teil schon aggregiert wurden, auf Grundlage der darin enthaltenen Zielstellung zu gewinnen, dient nachfolgende Tabelle 4.3.

KPI	KPI Bezeichnung	Einheit bzw. Berechnung
Treibstoffverbrauch	KPI_{FF}	kg/LFZ
Treibstoff- (Energie-)effizienz	KPI_{EFF}	geplanter Treibstoffverbrauch für Trajektorie / tatsächlichen Treibstoffverbrauch
(Bilanz) Emissionsmenge CO ₂	KPI_{CO2}	in t oder kg für Tag/Monat/Jahr
CO ₂ -Emissionen in Relation zu einer Verkehrseinheit (VE) oder Passagier (PAX)	$KPI_{CO2/VE}$ $KPI_{CO2/Pax}$	t/VE, t/Pax
Emissionsmenge innerhalb der TMA in Relation zur Verkehrsmenge oder Passagier	$KPI_{TMA/VE}$ $KPI_{TMA/Pax}$	t/VE, t/Pax
Emissionsmenge in den einzelnen LTO-Phasen in Relation zur Verkehrsmenge oder Passagier	$KPI_{LTO/VE}$ $KPI_{LTO/Pax}$	t/VE, t/Pax
Emissionsmenge unter 3000 ft pro Flugbewegung	$KPI_{3000ft/LFZ}$	t/Luftfahrzeug
Emissionen von Triebwerken am Boden	KPI_{TW}	EXIT-AXIT, EXOT-AXOT
APU-Laufzeit	KPI_{APU}	min
Emissionsmenge APU während des Turnarounds	$KPI_{APU,Turnaround}$	t, t/Turnaround
Emissionsmenge während Triebwerkstestlauf	$KPI_{TW,Test}$	t
Emissionsmenge von Fahrzeugen auf dem Vorfeld	$KPI_{Fahrzeuge}$	t
Verspätungen Gate-to-Gate	$KPI_{Versp.,Gate-Gate}$	AOBT-SOBT
Verspätungen (Flug, TMA) - zusätzlicher Treibstoffverbrauch	$KPI_{Versp.,Flug}$ $KPI_{Versp.,TMA}$	t
Anzahl der Flughäfen mit Continuous Descent Operations	KPI_{CDO}	geeignet für einen Ländervergleich o.ä.
Taxi-Out Zeit	$KPI_{Taxi-Out}$	geplante Taxi-Out Zeit - tatsächliche Taxi-Out Zeit
Anzahl und Dauer der Holdings	$KPI_{Anzahl,Holdings}$ $KPI_{Dauer,Holdings}$	min
Verzögerungsfreie Positionsbelegung (Zeit, die ein LFZ vor Erreichen der Parkposition auf eine Warteposition warten muss)	$KPI_{Positionsbelegung}$	min
Verspätungen (Flug, TMA, Start- und Landebahn, Boden)	KPI_{Delay}	min bzw. t bei indirekter Berechnung von CO ₂

Tabelle 4.3: Zusammenfassung KPIs CO₂

Nachdem eine umfangreiche Auflistung möglicher CO₂ basierter Leistungsindikatoren am Flughafen und speziell in Bezug auf Luftfahrzeuge erfolgte, wird im weiteren Verlauf eine Eingrenzung dieser auf Grund des Einsatzbereiches in einem Total Airport Management und auf Grundlage der Datenverfügbarkeit erfolgen, um die jeweiligen KPIs anwenden zu können.

4.1.4 Einsatz und Zeithorizont der Key Performance Indicators

Für diese Diplomarbeit wird die Perspektive auf den Bereich Umwelt gelenkt. Diese Perspektive kann in verschiedene Bereiche entsprechend nach Prozessen, Flughafenakteuren oder Land-/Luftseite unterteilt werden. Dabei steht in dieser Arbeit der prozessorientierte Ansatz im Vordergrund, um eine Integration in ein TAM System zu ermöglichen, die kritischen Flughafenprozesse erkennen zu können und um entsprechend eine Prozesssteuerung vornehmen zu können. Die Prozesse in dieser Arbeit beschränken sich auf die Luftseite und auf die (an- und abfliegenden und rollenden) Luftfahrzeuge. Eine weitere Einschränkung erfolgt durch die Betrachtung des Schadstoffs CO₂ und des Untersuchungsraums. Die Verwendung von KPIs innerhalb eines TAM-Konzepts hängt speziell von der Datengrundlage ab und demnach, zu welchem Zeitpunkt welche Daten zu den einzelnen Luftfahrzeugen zur Verfügung stehen. Dabei soll es frühzeitig möglich sein, in den Ablauf am Flughafen eingreifen zu können, um mögliche Schadstoffausstöße minimieren zu können. Diese Prozessorientierung ist auch in der Planungsphase des Flugbetriebs von Vorteil, so dass diese bei der Kapazitätsplanung und einer möglichen näherungsweise Berechnung des Treibstoffverbrauchs und damit der CO₂-Mengen zum Einsatz kommen kann. Mit diesem Vorgehen wird darauf abgezielt, die Emissionen schon frühzeitig abschätzen und ggf. eingreifen zu können. Um diese Möglichkeit realisieren zu können, müssen die möglichen KPIs abgeschätzt und Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen können z.B. Mittelwerte aus vergangenen und bereits ausgewerteten Flugbetriebstagen sein. Die Prozesslenkung erfolgt entweder, bevor ein kritischer Zustand, wie die Überschreitung eines Grenzwerts, eintritt oder auf Grundlage von Prognosen und somit, bevor ein Grenzwert erreicht bzw. überschritten wird.

Dabei existieren verschiedene Zeithorizonte bei der Planung der Flughafenprozesse. Diese wurden bereits in Kapitel 3.3 erläutert und werden an dieser Stelle kurz aufgelistet:

- strategische Phase (saisonal)
- prä-taktische Phase (bis eine Woche vorher)
- taktische Phase (bis 2 h vorher)

Die Leistungsindikatoren und deren Messung können sich also an diesen Phasen orientieren. Allerdings gibt es eine Einschränkung durch die Integration dieser Leistungsparameter in den TAM-Kontext. Hierbei spielt vor allem der Anwendungsbereich dieser KPIs in der Flughafenvorausplanung (bis 24 Stunden in die Zukunft) in einem Flughafenleitstand eine wichtige Rolle. Der Vorteil der Planung mit Blick in die Zukunft, liegt in der Verbesserung vorgelagerter Prozesse, um z.B. mögliche und prognostizierte Warteschlangen zu minimieren. Somit kann flexibel auf eventuell kritische Prozesse reagiert werden und das in Zusammenarbeit mit allen Stakeholdern.

Ein Eingriff bzw. der Einsatz der KPIs innerhalb eines Flughafenleitstands ist natürlich

abhängig von der Informationsgüte, welche in den einzelnen Zeithorizonten zur Verfügung steht. Je näher ein Ereignis an den tatsächlichen Prozess heranrückt, umso genauer sind die Informationen und deren Vielfalt. In der strategischen Phase sind lediglich die Flugpläne bekannt, welche auf Grund von fehlenden Wetterinformationen, Betriebsrichtungen, etc. eine hohe Ungenauigkeit beinhalten. Die prä-taktische Phase verbessert die vorausgeplanten Zeiten um mögliche Flugplanstreichungen oder neue hinzugefügte Flüge und kann schon erste Wettertrendprognosen berücksichtigen. Hierbei existieren auch schon geplante (scheduled) und erste Ziel-Zeitstempel (estimate) der einzelnen Luftfahrzeuge. In der eigentlichen, taktischen Phase werden diese Zeitstempel erneut bzw. kontinuierlich aktualisiert, außerdem sind die Wetterdaten deutlich präziser, sodass auch die Start- und Landebahn und die entsprechenden Positionen geplant werden können. Das eigentliche Flugereignis liefert die aktuellen Daten, welche dann die Abweichung zu den geplanten Zeiten aufweisen. Mit diesen aktuellen Zeiten lassen sich demnach am präzisesten die Schadstoffe berechnen, allerdings sollen die KPIs nicht zwangsläufig im Nachhinein auf ihre Einhaltung geprüft werden sondern frühzeitig, sodass bei möglichen Überschreitungen dieser Indikatoren eingegriffen werden kann. Auf Grund des gewählten Zeithorizontes in einem Flughafenleitstand (bis zu 24 Stunden im Voraus) müssen einige Nachteile akzeptiert werden, weil die Berechnungen der Emissionen lediglich auf Grundlage von Trendinformationen erfolgen können. Hierbei müssen sich die Stakeholder am Flughafen frühzeitig festlegen und den Umfang der Prozessüberwachung und demnach die Anzahl und Auswahl der Kennzahlen stark einschränken. Auf Grundlage dieser zeitlichen Betrachtung werden im nachfolgenden Kapitel die bereits herausgearbeiteten CO₂ basierten Leistungsindikatoren hinsichtlich ihres Einsatzes in einem Flughafenleitstand (Airport Operations Centre, APOC) auf deren Eignung untersucht.

4.1.5 Untersuchung geeigneter CO₂ basierter Leistungsindikatoren in einem TAM

Zunächst muss festgehalten werden, dass eine Leistungsbewertung nur dann möglich ist, wenn der Planungszustand mit einer Zielgröße verglichen wird. Es wäre demnach möglich einen spezifischen Zielwert festzulegen und diesen einzuhalten. Allerdings ist diese Herangehensweise nicht flexibel, sodass es in einem komplexen Flughafenbetrieb, bei dem die Prozesse aufeinander aufbauen und zum Teil miteinander verknüpft sind, zu keiner Effizienzsteigerung führen würde. Demnach ist es empfehlenswert, eine Staffelung der Zielwerte zu erarbeiten, um die Einflüsse Wetter, Bahnnutzungsstrategie, Kapazitätsverlust etc. berücksichtigen zu können. Andernfalls würde ein spezifischer Zielwert dazu führen, dass, sobald dieser erreicht wurde, keine Luftfahrzeuge mehr starten oder landen dürfen, da die CO₂-Mengen für den entsprechenden Flugbetriebstag ausgeschöpft wurden. Der Ansatz, welcher für die Bestimmung und Auswahl von Zielgrößen gewählt wird, basiert auf historischen Daten. Somit können entsprechend dem jeweiligen Flughafen und dem tatsächlichen Verkehrsaufkommen Indikatorziele (realistisch) bestimmt werden.

Zur Bestimmung der Umweltperformance am Flughafen existieren verschiedene Kategorien [76]:

- die durch den Flughafenbetreiber selbst erzeugten,

- die bei der Herstellung bezogener Energie von Dritten erzeugt wurde und
- jene, die die mit der Nutzung des Flughafens durch Dritte einhergehen.

Der Fokus liegt dabei auf dem rollenden und an- und abfliegenden Luftverkehr in einem noch zu definierenden Untersuchungsraum, welcher im nachfolgenden Kapitel definiert wird. Die Umweltperformance, mit der Einschränkung auf die rollenden und fliegenden Luftfahrzeuge, bedeutet, dass an den Flughäfen möglichst wenig Holdings geflogen werden, die Taxi-Zeit minimal ist, keine Warteschlangen an den Startbahnköpfen entstehen und eine optimale Positionsbelegung und SLB-Nutzung erfolgt. Diese Umweltperformance muss an die CO₂-Emissionen und die entsprechenden Flughafenprozesse, welche bereits in Kapitel 3.1 erwähnt wurden, gekoppelt werden.

Aus diesem Grund fallen die ersten Leistungsindikatoren aus Tabelle 4.3 heraus, wie z.B. der Leistungsindikator KPI_{APU} , weil dies nicht den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit darstellt. Weitere Indikatoren, welche auf dieser Grundlage nicht weiter untersucht werden, sind:

- $KPI_{APU,Turnaround}$
- $KPI_{Fahrzeuge}$

Die restlichen Leistungsindikatoren entsprechen der Aufgabenstellung und können genauer auf die Eignung im TAM untersucht werden. Dabei ist es wichtig, dass sie bestimmte Kriterien erfüllen. Ein wichtiges Kriterium ist die Messbarkeit der Indikatoren und der Einsatz in einem TAM. Nachstehende Tabelle 4.4 zeigt weitere Anforderungen an ein mögliches Performancesystem durch den Einsatz von KPIs [77].

Kriterium	Beschreibung
Specific - Spezifisch	das Ziel sollte konkret und eindeutig sein, sodass alle Stakeholder wissen, was erreicht werden soll
Measurable - Messbar	die Zielerreichung sollte messbar sein
Attainable - Erreichbar	Ausführbarkeit unter den herrschenden Bedingungen (Total Airport Management System)
Realistic - Realistisch	das Ziel muss auf realistische Weise erreichbar sein
Timley - Rechtzeitig	genauen Zeitpunkt definieren, wann die Zielerreichung gemessen werden soll

Tabelle 4.4: SMART Kriterien [77]

Speziell die Messbarkeit und Datenverfügbarkeit sowie ein sinnvoller Untersuchungsraum zur Bestimmung von Emissionen müssen genauer untersucht werden. Dies erfolgt in den nächsten Kapitelabschnitten. Dabei werden mögliche Methoden und Modelle zur Berechnung von Emissionen betrachtet. Nach diesem Kapitel werden die vorhandenen KPIs auf Grundlage der neu gewonnen Erkenntnisse untersucht. Die daraus resultierenden KPIs werden dann speziell mit Fokus auf den TAM Kontext erneut betrachtet. Zunächst werden Modelle und Methoden zur Berechnung von Schadstoffen aufzeigt sowie die Eigenschaften des Modellflughafens und der entsprechenden, aufgezeichneten Daten genauer reflektiert. Darauf aufbauend (Methode und Untersuchungsraum) können geeignete CO₂-Leistungsindikatoren auf Grundlage von Tabelle 4.3 eingeschränkt werden.

4.2 Methoden zur Berechnung des Treibstoffverbrauchs und der Schadstoffe

Zur Berechnung der Treibstoffverbräuche und Schadstoffausstöße werden im Folgenden allgemein gültige Parameter, welche zur Berechnung notwendig sind, aufgezeigt. Im weiteren Verlauf werden vier Ansätze näher betrachtet:

- das Berechnungsverfahren der ICAO (stützt sich auf den LTO-Zyklus),
- die Boeing Fuel Flow Method 2 (BFFM2)
- das Base of Aircraft Data Modell (BADA)
- und das Enhanced Jet Performance Modell (EJPM)

Die einzelnen Methoden werden in der Diplomarbeit A. Schuppe [78] ausführlich beschrieben und sollen daher hier nur in ihren wesentlichen Inhalten kurz abgehandelt werden. Diese Erkenntnisse werden als Grundlage genutzt und in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Im Anschluss an die Betrachtung der Methoden werden sowohl vorhandene Modelle zur Berechnung von Schadstoffen als auch relevante Kriterien entsprechend der Eigenschaften des Modellflughafens und der Aufgabenstellung mit dem Ziel herausgearbeitet, eine entsprechende Methode (bzw. auch mehrere in Kombination) zur Berechnung der CO₂-Emissionen adaptieren zu können.

4.2.1 Allgemein gültige Parameter zur Schadstoffberechnung

Die Berechnungen fokussieren den Flughafen und dessen Nahbereich. Mit Hilfe der Formel 4.1 können jeweils die CO₂-Emissionen eines entsprechenden Luftfahrzeugtyps berechnet werden. Diese Formel ist auf Grund steigendem Einfluss von Druck, Temperatur etc. auf die Triebwerksleistung und damit dem Treibstoffverbrauch nur bis zu einer Höhe von 3000 ft anwendbar und im weiteren Höhenverlauf nicht mehr sinnvoll [20]:

$$E_{p,i} = NE_i \cdot LTO_i \cdot \sum_{k=1}^4 TIM_{k,i} \cdot FF_{k,i} \cdot EI \quad (4.1)$$

$E_{p,i}$	Emissionen des Schadstoffs (CO ₂) p für ein LFZ i und eine bestimmte Anzahl an LTO-Zyklen [g]
k	LTO-Phasen: Anflug, Rollen, Start, Steigflug (k = 1 bis 4)
NE_i	Anzahl der Triebwerke des LFZ i
LTO_i	Anzahl an LTO-Zyklen des LFZ
$TIM_{k,i}$	Verweilzeit bei gleicher Triebwerkslast in der Phase k für ein LFZ i [s]
$FF_{k,i}$	Treibstoffmassendurchsatz in der Phase k für ein LFZ i [kg/s]
EI	Emissionsindex des Schadstoffs (CO ₂) [g/kg]

Zwischen den einzelnen Parametern existieren zahlreiche Abhängigkeiten. Abbildung 4.4 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die relevanten Daten zur Bestimmung der CO₂-Emissionen an einem Flughafen [79].

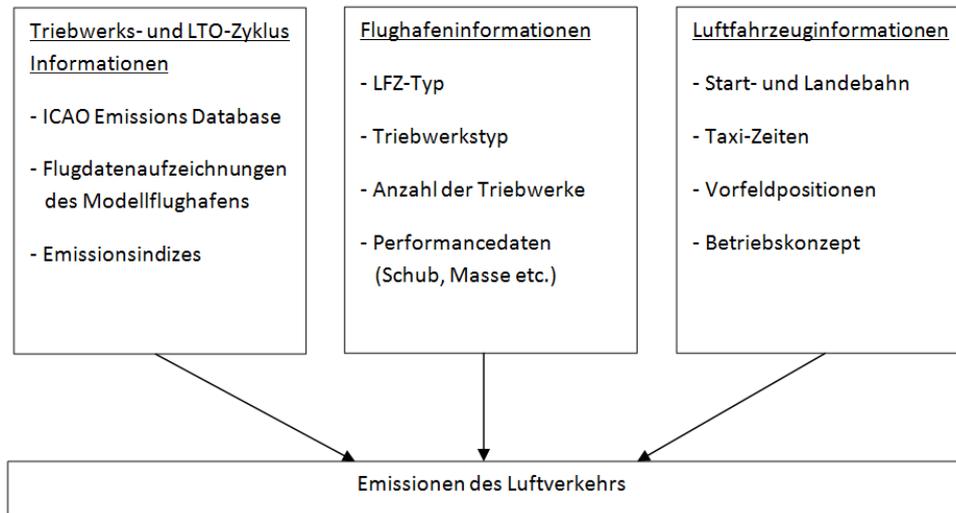


Abb. 4.4: Parameter zur Berechnung der LTO-Emissionen

4.2.2 ICAO Methode

Die ICAO Methode basiert auf drei Berechnungsansätzen, welche sich in ihrer Ergebnisgenauigkeit auf Grund verschiedener Eingangsparameter unterscheiden. Der größte Unterschied zwischen der einfachen, der erweiterten und der fortgeschrittenen Methode sind die Parameter: LFZ-Flotte, Bewegungen, Verweilzeit (Time in Mode, TIM), Emissionsindizes (EI) und Treibstoffverbrauch (Fuel Flow, FF), wie in Tabelle 4.5 ersichtlich ist [20], [78].

Parameter	Einfache Methode	Erweiterte Methode	Fortgeschrittene Methode
Flotte (LFZ / TW)	Identifikation Luftfahrzeugtyp	Identifikation Luftfahrzeugtyp und Triebwerkstyp	Identifikation Luftfahrzeugtyp und Triebwerkstyp
Bewegungen	Anzahl der LTO pro Luftfahrzeugtyp	Anzahl der LTO pro Luftfahrzeug / Triebwerks-Kombination	Anzahl der LTO pro Luftfahrzeug / Triebwerks-Kombination
TIM	keine	ICAO Standard TIM, ggf. flughafenspezifisch	Modifizierte TIM, ggf. Verwendung der aktuellen Leistungsdaten
EI und FF	Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen UNFCCC ² liefert diese Werte pro Luftfahrzeugtyp	Daten pro Triebwerkstyp aus der ICAO Emissionsdatenbank (Doc 9469)	Modifizierte Werte unter Verwendung aktueller Leistungs- und Operationsdaten

Tabelle 4.5: Berechnungsmethoden der ICAO [20]

²UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change

Die einfache Methode dient auf Grund der geringen Eingangsdatenmenge und der Vernachlässigung spezifischer Flughafendaten lediglich der groben Abschätzung der Schadstoffe (hierbei muss beachtet werden, dass die Formeln 4.2 den Treibstoffverbrauch berechnen und im Anschluss daran mit Hilfe der Emissions-Indexe die Schadstoffmenge berechnet werden kann). Die Quantifizierung des Treibstoffverbrauches erfolgt über den gesamten LTO-Zyklus, und eine separate Betrachtung der einzelnen Phasen ist nicht möglich. Der Treibstoffverbrauch wird mit folgender Formel berechnet [20]:

$$KV_{TW} = \sum n_{LTO,h} \cdot KV_{LTO,h} \quad (4.2)$$

KV_{TW}	Treibstoffverbrauch der Triebwerke aller Luftfahrzeuge [kg]
$n_{LTO,h}$	Anzahl der LTO-Zyklen des Luftfahrzeugtyps h
$KV_{LTO,h}$	Treibstoffverbrauch während des LTO-Zyklus des Luftfahrzeugtyps h [kg/LTO-Zyklus bzw. Luftfahrzeugtyp]

Im weiteren Verlauf wird zur Berechnung der Emissionen der Treibstoffverbrauch der Triebwerke aller Luftfahrzeuge (KV_{TW}) mit dem Emissionsfaktor (EI) von CO_2 (3150 g pro Kilogramm Treibstoff) multipliziert, sodass die Emissionsmenge feststeht. Im Anschluss daran wird die Summe über alle operierenden Luftfahrzeugtypen gebildet. Für die Anwendung der einfachen Methode werden nur die Informationen zu den operierenden Luftfahrzeugtypen benötigt und demnach erfolgt keine Betrachtung der tatsächlichen Kombination von Luftfahrzeug und Triebwerk [20].

Die erweiterte Methode bezieht zudem die Triebwerks-Typen und entsprechende TIM (auf Basis der Standard TIM oder flughafenspezifisch) mit ein. Die Berechnung der Emissionsmenge erfolgt über die Formel 4.1, welche in Kapitel 4.2.1 erläutert wurde. Im Gegensatz zur einfachen Methode wird bei der erweiterten Methode die reale Kombination von Luftfahrzeug und Triebwerkstyp ermittelt. Für die jeweiligen Verweilzeiten können sowohl die standardisierten Werte des LTO-Zyklus genommen werden oder die realen Werte, um eine höhere Genauigkeit bei der Emissionsberechnung zu erreichen [20].

Die fortgeschrittene Methode bezieht zusätzlich die aktuellen Performancedaten des Luftfahrzeugs und der Triebwerke mit ein und stellt damit die präziseste Berechnungsmethode (dieser drei Varianten der ICAO-Methode dar). Die Formel zur Berechnung entspricht der für die erweiterte Methode. Allerdings werden die Werte für die Verweilzeiten und den Fuel Flow basierend auf den realen Leistungsdaten der am Flughafen operierenden Luftfahrzeuge und unter den meteorologischen Bedingungen verwendet. Innerhalb des LTO-Zyklus sind die Messungen der Verweilzeiten, der realen Schubeinstellungen und des damit verbundenen Treibstoffverbrauches unter den vorherrschenden meteorologischen Bedingungen und Lastzuständen notwendig [20].

Auf Grund der Kombinationsmöglichkeit dieser drei Methoden kann eine möglichst genaue Berechnung entsprechend der vorhandenen Datengrundlage durchgeführt werden. Außerdem wird an dem Modellflughafen nur der kommerzielle Luftverkehr betrachtet, sodass der größte Anteil an Luftfahrzeugen mit Turbojet- und Turbofantriebwerk (Schub $\geq 26,7$ kN) liegt und somit die öffentlich zugänglichen Datenbanken der ICAO (ICAO Document 9646) herangezogen werden können.

4.2.3 Boeing Fuel Flow Method 2

Die Boeing Fuel Flow Method 2 (BFFM2) ermöglicht die Emissionsberechnung unabhängig von der ISA Standardatmosphäre. Demnach werden Flughafenhöhe, Emissionsindex und Kraftstoffmassendurchsätze entsprechend den tatsächlich vorherrschenden Umgebungsbedingungen (Druck, Dichte, Temperatur etc.) berechnet bzw. korrigiert [80].

Neben diesem Korrekturfaktor wird bei der BFFM2 ein weiterer Faktor für den Treibstoffmassendurchsatz (Fuel Flow) definiert [80], der für die Abnahme zusätzlicher Leistungen am Triebwerk steht. Diese Korrekturen hinsichtlich des Emissionsindex sind bei der Berechnung von CO₂ nicht relevant, da es sich um einen phasenunabhängigen Schadstoff handelt. Diese Methode eignet sich für die Berechnung der NO_x-, CO-, HC-Emissionen. Bezogen auf den Kraftstoffmassendurchsatz kann die Korrekturformel hingegen angenommen werden. Für die Anwendung im Zusammenhang mit dem Modellflughafen und den Berechnungen am Flughafen bzw. dem Nahbereich, ist eine Korrektur der Umgebungsparameter nicht notwendig. Die Höhe des Flughafens weicht nur geringfügig vom Meeresspiegel ab und auch die Berechnungen innerhalb des Flughafensystems (3000 ft) lassen u.a. die Druckveränderungen vernachlässigbar werden. Insofern allerdings Holdings in Höhen über 3000 ft geflogen werden, kann zur genaueren Berechnung die BFFM2 angewendet werden.

Bei der Zulassung von Triebwerken erfolgt die Berechnung des Treibstoffverbrauchs und der Emissionen unter ISA-Bedingungen und ohne zusätzliche Leistungsentnahme am Triebwerk. In der Realität wird die Triebwerksleistung nicht nur für den Schub generiert sondern auch für den operationellen Betrieb, wie z.B. für die Klimaanlage und das Anti-Icing. Zur Berücksichtigung dieser Effekte durch die Entnahme von Zapfluft bei der Emissionsberechnung, wird für jede der LTO-Phasen ein Zapfluftkorrekturfaktor (Bleed Fuel Flow Factor) definiert [78]:

LTO-Phase	Zapfluftkorrekturfaktor
Start (Take-Off)	1,010
Steigflug (Climb)	1,013
Anflug (Approach)	1,020
Rollvorgänge (Taxi-In, Taxi-Out)	1,100

Tabelle 4.6: Zapfluftkorrekturfaktor der LTO-Phasen [78]

Ein weiterer Vorteil, den die BFFM2 bietet, ist ein funktioneller Zusammenhang zwischen den vier ICAO Datenpunkten, welche aus den vier LTO-Phasen bestehen. Ausgehend von diesen vier Betriebspunkten können Kurven durch eine Interpolation entwickelt werden, welche den Zusammenhang zwischen Emissionsindex (EI) und Treibstoffverbrauch (Fuel Flow, FF) darstellen. Die genaue Vorgehensweise wird in [80] erläutert. Somit können neben den vier Betriebspunkten weitere FF- bzw. EI-Punkte bestimmt werden [80].

4.2.4 Base of Aircraft Data

Die Base of Aircraft Data (BADA) ist ein Performancemodell der EUROCONTROL und besteht aus zwei Komponenten:

- Modellspezifikationen
- Datensätze

Insgesamt sind in der BADA Version (3.9) Daten von 117 Luftfahrzeugtypen hinterlegt und 221 nach Ähnlichkeit verlinkte Luftfahrzeuge (in der Summe 338 Luftfahrzeuge). Die BADA Datenbank enthält Leistungs- und Betriebsparameter für alle gelisteten Luftfahrzeuge. Diese Parameter sind in den entsprechenden Dateien hinterlegt [81]:

- Operating Performance Files inklusive der luftfahrzeugspezifischen Leistungsparameter (Masse, Schub, Widerstand, Treibstoffverbrauchscoeffizienten etc.)
- Airline Procedure Files inklusive luftfahrzeugspezifischen Betriebsdaten
- Performance Table Files inklusive einer Zusammenfassung der Luftfahrzeugeleistung (Steig- und Sinkrate, Treibstoffverbrauch in unterschiedlichen Höhen)

Zur Berechnung der in den Files hinterlegten Daten benutzt BADA verschiedene Berechnungsverfahren. Die BADA Daten in Verbindung mit dem hinterlegten Performancemodell können für die Berechnung von Auftrieb, Widerstand und den Treibstofffluss an einem beliebigen Punkt des Flugprofils genutzt werden. Auf Grund der CO₂-Berechnungen ist vor allem der Treibstoffmassendurchsatz von Bedeutung. Die Formeln für diesen Treibstoffverbrauch werden im Folgenden aufgeführt (schubspezifischer Treibstoffverbrauch basierend auf einer Funktion der Geschwindigkeit) [81], [78]:

$$\text{Jet: } \eta = c_{f1} \cdot \left(1 + \frac{v_{TAS}}{c_{f2}} \right) \quad (4.3)$$

$$\text{Turboprop: } \eta = c_{f1} \cdot \left(1 - \frac{v_{TAS}}{c_{f2}} \right) \cdot \left(\frac{v_{TAS}}{1000} \right) \quad (4.4)$$

Der Treibstofffluss berechnet sich für Jet und Turboprop entsprechend unterschiedlich für die Landekonfiguration, den Sinkflug, den Reiseflug etc. [81], [78]:

$$f_{nom} = \eta \cdot T_{hr} \quad (4.5)$$

$$f_{min} = c_{f3} \cdot \left(1 - \frac{H_p}{c_{f4}} \right) \quad (4.6)$$

$$f_{ap/id} = \max(f_{nom}, f_{min}) \quad (4.7)$$

$$f_{cr} = \eta \cdot T_{hr} \cdot c_{fcr} \quad (4.8)$$

η	schubspezifischer Kraftstoffverbrauch [kg/(min·kN)]
f_{nom}	nominaler Treibstoffmassendurchsatz in allen Flugphasen (außer Reiseflug und Sinkflug mit Leerlauf) [kg/min]
f_{min}	minimaler Treibstoffmassendurchsatz im Sinkflug mit Leerlauf [kg/min]
$f_{ap/id}$	Treibstoffmassendurchsatz mit Landekonfiguration [kg/min]
f_{cr}	Treibstoffmassendurchsatz im Reiseflug [kg/min]
c_{f1}	1. schubspezifischer Treibstoffverbrauchsbeiwert [Jet: kg/(min·kN), Turboprop: kg/(min·kN·Kn, Piston: kg/min)]
c_{f2}	2. schubspezifischer Treibstoffverbrauchsbeiwert [kn]
c_{f3}	1. sinkflugbezogener Treibstoffverbrauchsbeiwert [kg/min]
c_{f4}	2. sinkflugbezogener Treibstoffverbrauchsbeiwert [ft]
c_{fcr}	korrigierender Treibstoffverbrauchsbeiwert für den Reiseflug [-]
H_p	aktuelle Höhe [ft]
T_{hr}	Schub [kN]
v_{TAS}	wahre Fluggeschwindigkeit (True Air Speed, TAS) [kn]

Die entsprechenden Berechnungsformeln für Kolbenluftfahrzeuge und die Geschwindigkeitsberechnungen können dem Benutzerhandbuch [82] entnommen werden. Anhand der oben stehenden Formel kann geschlussfolgert werden, dass der Treibstoffmassendurchsatz von den einzelnen Flugphasen abhängig ist. Die Flugphasen eines jeden Fluges gliedern sich in fünf verschiedene Phasen mit entsprechender Konfiguration auf:

- Start
- Anfangssteigflug
- Reiseflug
- Anflug
- Landung

Diese werden anhand von Konfigurationsgrenzhöhen und Überziehgeschwindigkeit (stall speed) unterschieden. Während die Wahl der Start- und Landekonfiguration (bei Standardverfahren) ausschließlich von der Höhe abhängig ist, ist die Wahl der anderen Konfigurationen von der Höhe und der Überziehgeschwindigkeit abhängig [78]. An dieser Stelle sei erwähnt, dass mit Hilfe des Modells der Treibstoffverbrauch in den einzelnen Flugphasen berechnet werden kann, aber nicht direkt die Schadstoffmenge, sodass im weiteren Schritt entsprechend die Emissions Indexe berücksichtigt werden müssen. Dieser Aspekt trifft auch für das Enhanced Jet Performance Model zu, welches im folgenden Abschnitt näher erläutert wird.

Die Systemgrenzen des BADA gehen über die Steigflugphase hinaus. Der LTO-Zyklus betrachtet hingegen keinen Reiseflug, aber dafür die Bodenbewegungen, sodass an dieser Stelle anzumerken ist, dass sich BADA in dieser Rollphase nicht eignet.

4.2.5 Enhanced Jet Performance Model

Als letzte mögliche Berechnungsmethode wird das Enhanced Jet Performance Model (EJPM) vorgestellt. Das analytische Modell berechnet vierdimensionale (neben der dreidimensionalen Flugverlaufsbahn wird bei der vierdimensionalen die zeitliche Dimension

noch hinzugefügt) Flugprofile für Luftfahrzeuge. Das Modell zielt auf die Vorhersage des optimalen Flugpfades bezüglich umwelt- und kostenrelevanter Aspekte ab [78].

Hinsichtlich der Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs stellt das EJPM, durch die Zuhilfenahme der „High Precision Fuel Flow Calculation“ (HPFFC) gegenüber den BADA-Annahmen eine Genauigkeitsverbesserung dar. Entsprechend der Bezeichnung des Modells, fokussiert dieses auf Jet-Luftfahrzeuge, da sie meist für Lang- und Mittelstreckenflüge eingesetzt werden. Die Eingangsdaten des EPJM können in drei Kategorien eingeteilt werden [83]:

- State Parameter Class (SPC)
 - Definition der aktuellen Position, Geschwindigkeit, Höhe, Flugrichtung (Kurs, Flugwinkel) etc.
- Environmental Parameters Class (EPC)
 - Definition der Eigenschaften der Luftfahrzeugumgebung zu einem festgelegten Zeitpunkt und einer definierten Luftfahrzeugposition
 - Informationen über die Atmosphäre (Druck, Temperatur) und das Wetter (Wind, relative Feuchtigkeit)
- Aircraft Parameters Class (APC)
 - Charakterisierung von Triebwerksdaten (Treibstoffverbrauchskoeffizient, Schubparameter) und der Luftfahrzeugdaten (Spannweite, Widerstandskoeffizienten)

Mittels der Eingangsdaten können die Ausgangsdaten des Enhanced Jet Performance Modell generiert werden. Diese erzeugten Ausgangsdaten werden auch in verschiedene Gruppen eingeteilt [83]:

- Operational Parameter Output (OPO)
 - beinhaltet die erforderlichen Flugleistungsparameter für die Vorbereitung der Trajektorie (aktuelle Geschwindigkeit, Auftriebs- und Widerstandskoeffizienten)
- Operational Limit Output (OLO)
 - beschreibt die Operationsgrenzen des Luftfahrzeugs unter den aktuell vorherrschenden Bedingungen (Minimalgeschwindigkeit, maximaler Anstellwinkel) und den erforderlichen Energiebedarf zur Änderung der Höhe und Geschwindigkeit
- Optimized Parameter Prediction (OPP)
 - beinhaltet die Flugparameter zur Optimierung der Flugbewegungen hinsichtlich umweltrelevanter Aspekte (Continuous Descent Approach (CDA), ökonomische Reisefluggeschwindigkeit)

Abbildung 4.5 vermittelt einen Überblick über die Ein- und Ausgangsdaten.

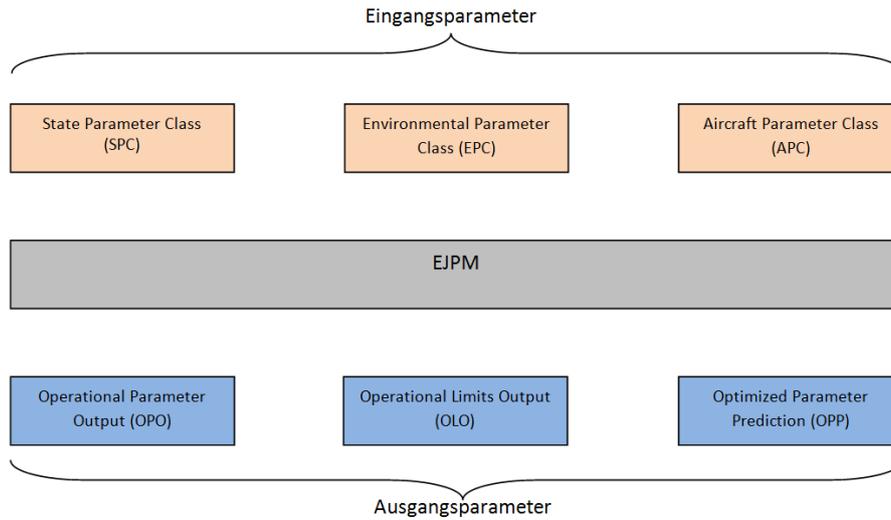


Abb. 4.5: EJPMEingangs- und Ausgangsdaten in Anlehnung an [83]

Die Ausgangsdaten fließen im weiteren Verlauf der Berechnung in die Formel der Schub- und Treibstoffverbrauchsrechnung ein [83]:

$$F_{T,want} = F_{T,excess} + F_{T,req} = m_{total} \cdot (a + g \sin(\gamma_{sel})) + \frac{1}{2} \cdot \rho_h \cdot v_{TAS}^2 \cdot S_f \cdot c_d \quad (4.9)$$

$$\eta = c_{FF,1} \cdot \left(1 + \frac{v_{TAS}}{c_{FF,2}} \right) \cdot c_{FF,3} \quad (4.10)$$

$$\dot{m}_{fuel} = \eta \cdot F_{T,req} \quad (4.11)$$

$F_{T,want}$	gewünschter Schub [N]
$F_{T,excess}$	Überschussschub [N]
$F_{T,req}$	erforderlicher Schub zur Kompensation des Widerstands [N]
m_{total}	Masse [kg]
a	Beschleunigung [m/s ²]
g	Fallbeschleunigung [m/s ²]
γ_{sel}	Bahnneigungswinkel [°]
ρ_h	Dichte [kg/m ³]
v_{TAS}	wahre Fluggeschwindigkeit, True Air Speed [m/s]
S_f	Flügelfläche [m ²]
c_d	Widerstandsbeiwert
η	schubspezifischer Kraftstoffverbrauch [kg / (min·kN)]
$c_{FF,1}$	1. Treibstoffverbrauchsbeiwert [kg / (min·kN)]
$c_{FF,2}$	2. Treibstoffverbrauchsbeiwert [kn]
$c_{FF,3}$	3. Treibstoffverbrauchsbeiwert
\dot{m}_{fuel}	Treibstoffmassendurchsatz [kg/min]

Die Geschwindigkeitsberechnung im EJPM ist identisch in Bezug auf die wahre Fluggeschwindigkeit, die kalibrierte Fluggeschwindigkeit und die Mach-Fluggeschwindigkeit zu den Formeln in BADA. Eine Erweiterung existiert allerdings bei der Betrachtung der Windkomponente und der daraus resultierenden veränderten Geschwindigkeit über Grund (Ground Speed, GS) im EJPM. Die genaue Berechnung kann [83] Seite 41 entnommen werden.

4.2.6 Vergleichender Überblick über die betrachteten Methoden

Nachdem die verschiedenen Methoden zur Berechnung des Treibstoffverbrauchs kurz erläutert wurden, dient nachfolgende Tabelle 4.7 als Vergleich der einzelnen Methoden nach ausgewählten, zur Berechnung von CO₂ und dem Untersuchungsraum relevanten, Kriterien. Die CO₂-Emissionen können mittels des Treibstoffverbrauchs durch die Multiplikation mit dem Emissionsindex (3,15 kg/kg) von CO₂ unkompliziert ermittelt werden.

Anhand von Tabelle 4.7 wird deutlich, dass die verschiedenen Methoden auch auf verschiedene Phasen im Flug fokussiert sind. Während die ICAO-Methode und die BFFM2 jeweils den Rollvorgang der Luftfahrzeuge beachten und direkt die CO₂-Emissionen berechnen, liegt bei den anderen beiden Methoden das Hauptaugenmerk auf dem Reiseflug und bei der Berechnung des Kraftstoffmassendurchsatzes mittels Korrekturfaktoren und unter Einbeziehung der vorherrschenden Wetterbedingungen. Diese beiden Methoden erfordern eine große Bandbreite an Daten.

Um eine möglichst geeignete Methode zum Berechnen der CO₂-Emissionen herauszuarbeiten, sind zunächst weitere Randbedingungen notwendig, wie z.B. der Untersuchungsraum, die Datenqualität der Flugverlaufsdaten, aber auch die operationellen Gegebenheiten am Modellflughafen sind von Bedeutung. Aus diesem Grund werden in Kapitel 4.4.2 die Eigenschaften des Modellflughafens und die Daten näher betrachtet, um danach mit Hilfe dieser Informationen und der oben stehenden Tabelle eine Methode bzw. Methoden in Kombination auszuwählen. Zunächst werden bestehende Schadstoffsimulationsmodelle betrachtet und untersucht, ob diese für die Verwendung am Flughafen in Frage kommen. Diese bestehenden Modelle basieren auf den zuvor beschriebenen Methoden.

Kriterien	ICAO	BFFM2	BADA	EJPM
Berechnung Triebwerks-Emissionen	ja	ja	Treibstoffverbrauch	Treibstoffverbrauch
Berechnung von CO ₂ direkt	direkt	direkt	indirekt	indirekt
Berechnungs-niveau	entsprechend der zur Verfügung stehenden Daten	genau mittels Korrekturfaktoren	sehr genau	verbessert gegenüber BADA
Datenbank	UNFCCC, ICAO Emissionsdatenbank	ICAO Emissionsdatenbank	BADA Datenbank	Luftfahrzeug spezifische Daten
Approach	ja	ja	ja	ja
Taxi	ja	ja	nein	nein
Take-Off	ja	ja	ja	ja
Climb-Out	ja	ja	ja	ja
Cruise	nein	nein	ja	ja
Benötigte Daten	TW-Typ	TW-Typ	TW-Typ	TW-Typ
	Verweilzeit	Verweilzeit	Wetterdaten	Wetterdaten
	Anz. Bewegung	Anz. Bewegung	Einzelflug	Einzelflug
	EI	EI	Treibstoffverbrauchs-koeffizienten	Treibstoffverbrauchs-koeffizienten
	Treibstoffverbrauch	Treibstoffverbrauch	Treibstoffmassen-durchsatz	Treibstoffmassen-durchsatz
	/	Korrekturfaktoren	Fluggeschwindigkeit	Fluggeschwindigkeit
ISA-Standard-atmosphäre	ja	nein	nein	nein

Tabelle 4.7: Vergleich der Berechnungsmethoden von Emissionen

4.3 Schadstoffsimulationsmodelle

Für die Emissionsauswertung existieren verschiedene Programme, welche direkt für die Luftfahrt entwickelt wurden und verschiedene Emissionen hinsichtlich der ausgestoßenen bzw. produzierten Menge bewerten. Zunächst werden diese Programme kurz vorgestellt sowie im Anschluss daran tabellarisch verglichen und auf ihre Anwendbarkeit im TAM-Kontext und in der CO₂-Berechnung genauer analysiert.

4.3.1 Advanced Emission Model

Das Advanced Emission Model (AEM) wurde von der EUROCONTROL speziell für die Luftfahrt entwickelt. Dieses Emissionsberechnungsmodell ist ein eigenständiges Programm, welches im Stande ist, den Treibstoffverbrauch und die Emissionen abzuschätzen. Das Modell basiert auf anerkannten Methoden (ICAO LTO-Zyklus und Boeing Fuel Flow Method 2, siehe Kapitel 4.2.2 bzw. 4.4.1 und 4.2.3) und bezieht seine Daten aus offiziellen Datenbanken (ICAO Aircraft Engine Exhaust Databank, Base of Aircraft Data). Grundsätzlich werden zur Berechnung von Emissionen und im speziellen von CO₂ in den einzelnen Phasen des Fluges und Rollens in einem bestimmten Untersuchungsraum mindestens folgende Parameter benötigt:

- Schubstellung pro Phase
- Verweildauern
- Triebwerksdaten zur Berechnung des Treibstoffverbrauchs
- Berechnungsvorschriften (entsprechend dieser Vorschriften werden weitere Parameter benötigt, wie z.B. Flughöhe, Wetter und Gewicht des Luftfahrzeugs)

Das Modell bezieht sich auf alle Flug- und Rollphasen eines Fluges und nutzt bis 3000 ft den LTO zur Berechnung der Schubstellungen und der Verweilzeiten in den einzelnen Flugphasen. Ab 3000 ft basieren die Berechnungen des Treibstoffverbrauchs auf den BADA-Daten. Über 3000 ft müssen die atmosphärischen Gegebenheiten berücksichtigt werden, sodass an dieser Stelle die Boeing Fuel Flow Method 2 zur Berechnung der Emission Indizes herangezogen wird.

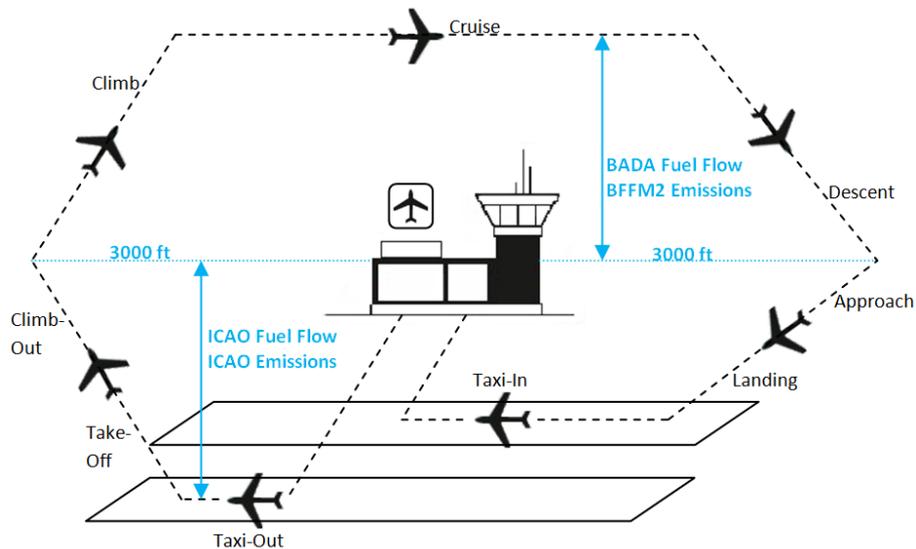


Abb. 4.6: AEM [84]

Die Berechnung der Emissionen erfolgt mit Hilfe definierter Routenpunkte. Dabei werden Informationen wie geografische Längen und Breite, Flugfläche, Zeit und Geschwindigkeit

benötigt. Mit Hilfe dieser Informationen können Die Emissionen von einem Flugroutenpunkt zum nächsten kalkuliert werden. Die Eingangsdaten für das AEM können sowohl simulierte Daten als auch Echtzeitdaten sein, welche über Radartracking (Informationen der Luftfahrzeuge wie z.B. Höhe und Geschwindigkeit durch Radarerfassung) eingespeist werden. Für die Daten zum Treibstoffverbrauch wird bis 3000 ft auf die ICAO Datentabelle zurückgegriffen (ICAO Aircraft Exhaust Emissions Databank) und ab 3000 ft wird zur Berechnung des Treibstoffverbrauchs die Boeing Fuel Flow Method 2 (siehe Kapitel 4.2.3) angewendet. Mit Hilfe des Modells lassen sich die Emissionen von H_2O , CO_2 , SO_x , NO_x , CO und UHC berechnen. Zusätzlich können diese in einem Ausbreitungsmodell visualisiert werden [84].

4.3.2 Emissions and Dispersion Modeling System

Das Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) ist ein Modellierungsprogramm der Amerikanischen Luftfahrtbehörde (Federal Aviation Administration, FAA), welches die lokalen Auswirkungen der Emissionsquellen von Flughäfen, insbesondere die von Luftfahrzeugen, auf die Luftqualität modelliert. Dabei werden Emissionen der Triebwerke, der APU, der Bodengeräte, der Bodenfahrzeuge und der stationären Quellen ermittelt und dargestellt. Zur Berechnung der Schadstoffemissionen muss ein Berechnungsprojekt erstellt werden. Beim Anlegen des Projekts sind verschiedene Eingangsdaten notwendig [85]:

- Eigenschaften des Flughafens (Start- und Landebahnnutzung zum Abbilden von Restriktionen)
- Eigenschaften der LTO-Phasen (Spezielle An- und Abflugverfahren können berücksichtigt werden)
- Flugzeugtypen und Anzahl

Das EDMS verfügt über zwei potentielle Möglichkeiten zur Berechnung der Emissionen. Dies kann zum einen über die standardisierten Werte des LTO-Zyklus erfolgen oder über ein flugleistungsabhängiges (u.a. abhängig von der Abflugmasse und vom Anflugwinkel) Modell. Auch die Rollzeiten können benutzerdefiniert eingegeben oder auf Basis von Modellen berücksichtigt werden. Den entsprechenden Luftfahrzeugtypen können Triebwerke (ICAO Aircraft Engine Emissions Datenbank oder benutzerdefinierte Eingabe) zugeordnet werden, sodass die Ergebnisse der Emissionsberechnungen (für CO_2 , CO , HC , VOC , NO_x , SO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$) pro LTO-Phase, LFZ-Typ oder als Gesamtwert angezeigt werden. Das EDMS ist bereits für US-Flughäfen, aber nicht für europäische Flughäfen, vorkonfiguriert und somit müssen Flughäfen außerhalb der USA sehr aufwendig modelliert werden. Ein Nachfolgemodell zum EDMS wurde seitens der FAA entwickelt, das Aviation Environmental Design Tool (AEDT). Dieses berechnet neben den Emissionen auch den Lärm [85] und gilt als zugelassenes Modell zur Berechnung von Emissionen und Lärm in den USA.

4.3.3 LASPORT

LASAT² for Airports (LASPORT) ist ein weiteres Programm zur Berechnung von Emissionen und Immissionen flughafenbezogener Quellen in der unteren Atmosphäre. Das Programm wurde im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV) entwickelt. Auch bei diesem Modellierungsprogramm müssen u.a. die Flughafenparameter eingestellt werden. Die Berechnung der Emissionen für das Haupttriebwerk, die Hilfsgasturbine und der Bodenenergiestationen erfolgt auf Basis des LTO-Zyklus und demnach bis zu einer Höhe von 3000 ft. Die berechneten Emissionen dienen im weiteren Verlauf als Eingangsdaten für das Ausbreitungsmodell (LASAT). Die Verkehrsinformationen am Flughafen können zum einen über Szenarien ausgewählt werden und zum anderen über benutzerdefinierte Eingaben erfolgen. Als Emissionsdaten dient die ICAO Engine Emissions Data Bank. Innerhalb dieser Datenbank werden nicht den Luftfahrzeugen entsprechende Triebwerke zugeordnet, sondern das Luftfahrzeug wird einer technischen Kategorie zugeordnet (das Luftfahrzeug wird entsprechend des Gewichts und Anzahl der Triebwerke zugeordnet). Es können insgesamt bis zu 20 Schadstoffe dargestellt werden. Innerhalb des Programms sind NO_x , HC, Benzol, CO, CO_2 , SO_x und PM_{10} voreingestellt [86].

4.3.4 Vergleichender Überblick über die betrachteten Schadstoffsimulationsmodelle

Entsprechend der Ausführungen soll Tabelle 4.8 einen Überblick bzw. eine Zusammenfassung über die Eigenschaften und den Anwendungsbereich der drei genannten Schadstoffberechnungsmodelle geben.

Es existiert noch ein weiteres, häufig genutztes Programm zur Berechnung und Darstellung von Emissionen am Flughafen, das sog. Airport Local Air Quality Studies (ALAQs). Dieses Programm berechnet allerdings keine CO_2 -Emissionen, sondern CO etc. und wird deshalb nicht weiter betrachtet.

Die vorgestellten Programme zur Berechnung der Schadstoffemissionen können in einem TAM System eingesetzt werden, allerdings sind die Programme nicht für eine Echtzeitsimulation bzw. -berechnung geeignet, weil keine Datenverbindung zu den aktuellen Flugplänen mit den entsprechenden aktualisierten Zeiten vorgesehen ist. Lediglich die Verwendung dieser Systeme im strategischen Betrieb wäre denkbar. Die Höhe des Aufwands der Implementierung und Verwendung der Systeme ist nicht bekannt und kann derzeit auch nicht abgeschätzt werden. Des Weiteren stehen die kommerziellen Programme auf Grund fehlender Lizenzen im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht zur Verfügung. Das führt dazu, dass die Berechnungen der Schadstoffemissionen auf einem eigenen Modell basieren werden. Entsprechende Vorgehensweisen, wie der Gebrauch von Datenbanken und Methoden, werden dennoch in die Berechnung von CO_2 -Emissionen integriert. Aus der Sicht der Flughäfen kann eine Investition in diese Systeme dennoch als vorteilhaft erachtet werden, da bei der Verwendung dieser Systeme unter Berücksichtigung der Emissionen von CO_2 usw. vor allem der strategische Betrieb effizient geplant werden kann. Außerdem besteht die Möglichkeit, entsprechende vergangene Flugbetriebstage zu modellieren und diese erneut unter anderen Randbedingungen zu simulieren und somit eventuell mögliche verbesserte Betriebsverfahren zu erkennen.

²Lagrange-Simulation von Aerosol-Transport

Kriterien	AEM	EDMS	LASPORT
Flugzeug ID	ja	ja	ja
LTO / BADA / BFFM2	LTO, BADA, BFFM2	LTO, BADA	LTO bis 3000 ft
Ausbreitungsfunktion	nein	ja	ja
Emissionsarten	H ₂ O, CO, CO ₂ , NO _x , SO _x , UHC	CO, CO ₂ , HC, H ₂ O, NO _x , PM _{10;2,5} , SO _x , VOC	Benzol, CO, CO ₂ , HC, NO _x , PM ₁₀ , SO _x
Emissionsbetrachtung	Triebwerk, APU etc.	Triebwerk, APU etc.	Triebwerk, APU etc.
Datenbank EI und Treibstoffverbrauch von LFZ	Engine Exhaust Emissions Data Bank	Engine Exhaust Emissions Data Bank	Engine Exhaust Emissions Data Bank
Darstellung Flughafenlayout und Modellierung (Visualisierung der Ausbreitung von Emissionen)	nein	ja	ja
CO ₂ -Berechnung	ja	ja	ja
Echtzeitberechnung	nein	nein	nein
Szenario-Darstellung (Verkehrsszenarien)	ja	ja	ja
kostenfreier Zugang	nein	nein	nein

Tabelle 4.8: Vergleich von Schadstoffsimulationsmodellen

4.4 Adaption der entwickelten KPIs und deren Berechnung auf einen Modellflughafen

4.4.1 Abgrenzung des Untersuchungsraums

Die Abbildung und Berechnung von Schadstoffemissionen am Flughafen und dessen Nahbereich soll möglichst realitätsgetreu erfolgen. Auf Grund der Komplexität und der begrenzt zur Verfügung stehenden Daten müssen an dieser Stelle gewisse Einflussfaktoren vernachlässigt bzw. vereinfacht dargestellt werden, wie z.B. der Treibstoffverbrauch. Im Folgenden werden die Betrachtungsgrenzen näher erläutert.

Zur Berücksichtigung der lokalen Schadstoffemissionen an einem Flughafen und dessen Nahbereich wird der ICAO LTO-Zyklus als Referenz herangezogen. Dieser, siehe Abbildung 4.7, umfasst den Anflug, die Rollvorgänge, den Start und den Steigflug bis zu einer Höhe von 3000 ft. Diesen vier Phasen des Fluges werden sowohl standardisierte Trieb-

werksschubeinstellungen in [%] als auch entsprechende Verweilzeiten in [min] innerhalb der einzelnen Phasen zugeordnet, was ebenfalls Abbildung 4.7 entnommen werden kann. Die Verweilzeiten z.B. beim Taxi bzw. im Idle wurden durch die ICAO mit 26 min angegeben. Diese Angabe wurde zur besseren Darstellung und Übersichtlichkeit jeweils für die Taxi-In und die Taxi-Out Zeit halbiert [15].

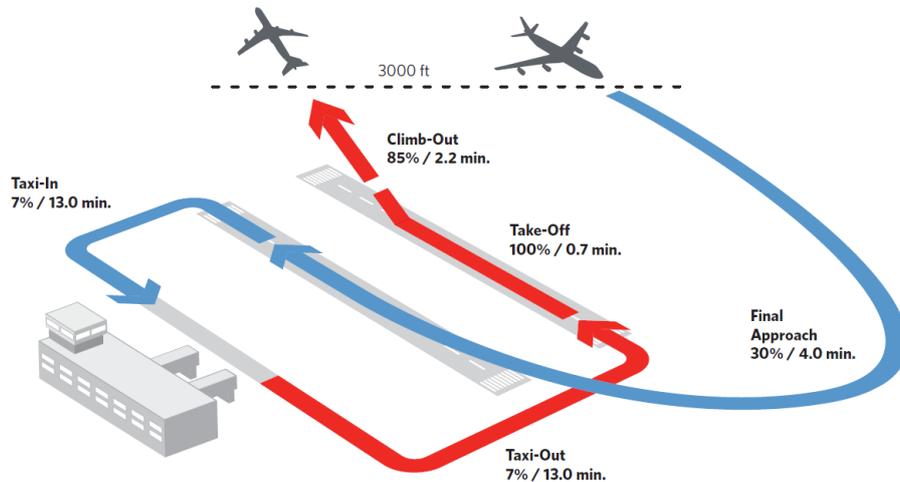


Abb. 4.7: ICAO Referenz-LTO-Zyklus mit Schub [%] und Dauer [min] [15]

Dieser Zyklus stellt eine starke Vereinfachung der Realität dar. Dennoch dient dieser vor allem als Basis, um eventuelle Vergleiche zwischen den Flughäfen durchzuführen. Die Berechnung der Schadstoffmengen von CO₂ stützt sich in dieser Diplomarbeit auf die Werte eines Modellflughafens (siehe Kapitel 4.4.2). Aus diesem Grund werden, insofern möglich, verbesserte Verweilzeiten verwendet. Die Schubangaben des ICAO LTO-Zyklus werden nicht verändert, da keine präziseren Daten zur Verfügung stehen. Außerdem wird in Kapitel 4.4.2 genauer untersucht, in welchen Flughöhen die Luftfahrzeuge Warteschleifen fliegen und ob die Grenze von 3000 ft etwas angehoben werden muss (Verwendung unterschiedlicher Berechnungsmethoden), damit auch die Warteschleifen (Holdings) berücksichtigt werden können.

4.4.2 Eigenschaften des Modellflughafens

Der Modellflughafen ist ein mid-size Flughafen, welcher ein kreuzendes Landebahnsystem aufweist inkl. einer dritten Start- und Landebahn, welche auf Grund der Oberflächenstruktur und der geringen Start- und Landebahn-Länge nicht mehr genutzt werden kann. Das gilt auch für den dazugehörigen Vorfeldbereich, welcher auf Grund des Bodenbelags, welcher den heutigen Anforderungen nicht mehr entspricht, ebenfalls nicht mehr genutzt werden kann. Der grobe Aufbau des Flughafens kann Abbildung 4.8 entnommen werden. Die beiden aktiven Start- und Landebahnen haben folgende Ausrichtung und Länge bzw. Breite:

- 15/33, 3666 m x 46 m
- 05/23, 3250 m x 46 m

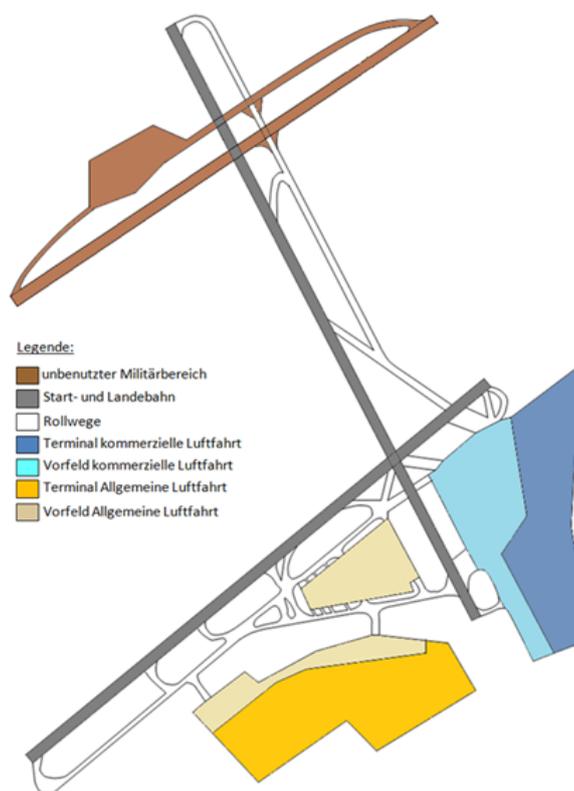


Abb. 4.8: Modellflughafen

Die beige und gelb markierten Flächen sind vorrangig Betriebsflächen³ der Allgemeinen Luftfahrt (General Aviation, GA), wobei die hellen Gebiete das Vorfeld symbolisieren und der gelbe Bereich die Hallen und das Terminal darstellen. Für die kommerzielle Luftfahrt steht der blaue Bereich zur Verfügung (Vorfeld und Terminal). Die braun hervorgehobenen Betriebsflächen sind nicht mehr in Benutzung und stellen die ehemalige Start- und Landebahn und das dazugehörige Vorfeld dar, welches vom Militär genutzt wurde. Außerdem sind auf der Karte die verschiedenen Rollwege sichtbar, welche von den Luftfahrzeugen genutzt werden können. Das Flughafenbetriebsgelände liegt 11m über MSL.

Neben diesen Parametern sind auch die Warteverfahren in der Luft für die Betrachtung der Emissionen von Bedeutung. Dabei ist von Interesse, in welchen Höhen diese geflogen werden, um entsprechende Methoden anwenden zu können. Diese sog. Holdings werden am Modellflughafen in einer Höhe von 4000 ft geflogen. Diese Höhe führt dazu, dass der LTO-Zyklus, welcher lediglich bis zu einer Höhe von 3000 ft angewendet werden soll, nicht mehr geeignet ist und somit die ICAO-Methode und die BFFM2 nicht mehr angewendet werden sollten.

Der Einfluss von Druck, Luftdichte etc. auf den Treibstoffverbrauch nimmt zwar auch bis 3000 ft zu, kann aber für Höhen kleiner 3000 ft vernachlässigt werden [15]. Im nächsten Absatz werden die Genauigkeit und die Verfügbarkeit der Flugverlaufsdaten genauer untersucht, mit dem Ziel, entsprechend der Datenverfügbarkeit die Methoden, welche genutzt werden können, weiter einzuschränken.

³Zum Teil stehen im Vorfeldbereich auch noch Standplätze für die kommerzielle Luftfahrt zu Verfügung.

Folgende Daten des Modellflughafens (reale Flugverlaufsdaten) stehen pro Luftfahrzeugbewegung zur Verfügung, wobei die Allgemeine Luftfahrt nicht betrachtet wird, weil die entsprechenden Daten der General Aviation in diesem Falle nicht vollständig sind und diese gegenüber der kommerziellen Luftfahrt auf Grund von kleineren Luftfahrzeugen nur einen geringen Anteil der CO₂-Emissionen beisteuern.

- LFZ-Typ zur Bestimmung der Triebwerkstypen
- Zeitstempel und Fluginformationen bei ankommenden Flügen
 - Scheduled Time of Arrival (STA)
 - Estimated Time of Arrival (ETA)
 - Actual Time of Arrival (ATA)
 - Actual In-Block Time (AIBT)
 - Slotzeit, falls vorhanden
 - Landebahn
- Zeitstempel und Fluginformationen bei abfliegenden Flügen
 - Scheduled Time of Departure (STD)
 - Estimated Time of Departure (ETD)
 - Actual Off-Block Time (AOBT)
 - Actual Take-Off-Time (ATOT)
 - Slotzeit, falls vorhanden
 - Startbahn

Weitere Zeitstempel können mittels des Advanced Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS⁴) abgerufen werden. Dabei können pro Flug Zeitstempel und Höhen abgefragt werden, um entsprechende Flugzeiten und Holdingzeiten zu erhalten. Sämtliche Daten, welche an dem Modellflughafen bzw. pro Luftfahrzeugbewegung zur Verfügung stehen, spiegeln reale Werte wider, sodass die Anzahl und die Zeitstempel als realistisch betrachtet werden können. Zur genauen Berechnung der CO₂-Emissionen und damit des Treibstoffverbrauchs wären Wetterdaten wie Wind und Temperatur von Bedeutung. Diese können auf Grund der Datenmenge nicht vollständig berücksichtigt werden, weil die Informationen zu umfangreich sind. Dennoch soll exemplarisch für einige Luftfahrzeugbewegungen der Einfluss u.a. von Wind betrachtet werden, um feststellen zu können, welchen Unterschied die Einbeziehung von Wetter auf die CO₂-Emissionen hat.

Detaillierte Informationen zu den Luftfahrzeugen wie:

- Triebwerkstyp,
- Sitzplatzauslastung,

⁴Kontrollsystem für die Überwachung und Lenkung des Rollverkehrs (Luftfahrzeuge und Bodenfahrzeuge bei entsprechender Ausstattung) am Boden des Flughafens

- Maximum Take-Off Mass (MTOM),
- Abfluggewicht,
- Schubstellung,
- TIM
- Anflugwinkel und
- Nutzung der Triebwerke beim Rollen

stehen nicht direkt zur Verfügung bzw. werden nicht erfasst. Viele dieser Daten wären aber für eine präzise Berechnung der Emissionen erforderlich und müssen im Zuge dieser Arbeit z.T. geschätzt oder aber auch vernachlässigt werden, wie z.B. die Luftfahrzeuggewichte, die Geschwindigkeiten etc. Hinzu kommt, dass die Emissionen in einem TAM-Kontext in Form von KPIs berechnet und integriert werden sollen. Somit würden in einem APOC in der prätaktischen Phase diese Daten wie Schubstellung und Anflugwinkel auch nicht zur Verfügung stehen und könnten lediglich zum Vergleich im Nachgang genutzt werden. Im prätaktischen Bereich stehen meteorologische Daten, Luftfahrzeugtypen, Start- und Landebahn, Parkposition und einige Planzeiten zur Verfügung, um die Emissionen frühzeitig berechnen zu können. Auf Basis dieser Daten sollte auch entsprechend ein Modell gewählt werden, welches zum einen mit wenigen Daten die Emissionen berechnen kann, aber auch im weiteren Verlauf genauerer Daten berücksichtigt.

An dieser Stelle wäre es möglich, eine eigene Methode aus den verschiedenen zuvor vorgestellten aufzustellen oder eine Methode entsprechend zu modifizieren. Insofern keine direkten Verweilzeiten vorhanden sind, im Falle einer prätaktischen Berechnung, muss auf die Verweilzeiten des LTO-Zyklus zurückgegriffen werden bzw. können arithmetische Mittelwerte aus vergangenen Flugbetriebstagen herangezogen werden und entsprechend als Datengrundlage dienen.

Auf Grundlage dieser Daten bietet es sich in Anlehnung an die ICAO Methode an, entsprechend der zur Verfügung stehenden Informationen verschiedene Methodenstufen zur Berechnung der CO₂-Emissionen durchzuführen.

Die ICAO Methode beruht auf dem LTO-Zyklus und kann aus diesem Grund potentiell bis zu 3000 ft als Berechnungsgrundlage der Emissionen angewendet werden. Wie eingangs erwähnt, werden die Holdings am Modellflughafen in Höhen von 4000 ft geflogen, sodass die Umgebungsparameter der Luft einen größeren Einfluss haben und nicht mehr vernachlässigbar sind. An dieser Stelle kann schon vorweg genommen werden, dass lediglich ein Holding in dem gewählten Untersuchungszeitraum von einer Woche existierte, sodass die Holdings bei der Berechnung der Emissionen vernachlässigt werden. Das führt im weiteren Verlauf der Berechnungen dazu, dass die Emissionen im Flughafennahbereich bis 3000 ft berechnet werden. An anderen Flughäfen mit geflogenen Holdings muss dieser Aspekt allerdings berücksichtigt werden und somit ein weitere Phase zum LTO-Zyklus ergänzt werden.

An dieser Stelle ist zu betonen, dass in einem TAM-System die Stakeholder nicht daran interessiert sind zu erfahren, wie sich die CO₂-Emissionen im kleinsten Detail ändern, sondern ob es bei verschiedenen Verfahren im Anflug oder bei der Wahl der Rollwege signifikante Unterschiede bei den entsprechenden Verfahren gibt, die es seitens der Stakeholder zu berücksichtigen gilt, um einen möglichst CO₂-armen Flugbetrieb zu gewährleisten.

4.5 Adaptierbarkeit der Methoden auf den Modellflughafen zur Berechnung von CO₂

Wie schon im Kapitel zuvor beschrieben, wird die ICAO-Methode bei der Berechnung der CO₂-Emissionen zur Anwendung kommen. Innerhalb dieser Methode existieren verschiedene Berechnungsstufen, die sich in der Genauigkeit unterscheiden, siehe Tabelle 4.5. Entsprechend dieser Tabelle und der dazugehörigen Datengrundlage wird die Berechnung auf der erweiterten bzw. fortgeschrittenen Methode basieren. Anpassungen erfolgen mittels der Betrachtung von luftfahrzeugspezifischen TIM-Zeiten, insofern diese vorhanden sind. Für die Rollzeiten werden, insofern vorhanden, die aktuellen Zeiten verwendet und ansonsten entsprechende Durchschnittszeiten des Modellflughafens, welche aus dem Mittelwert aller Rollzeiten gebildet werden. Bezüglich der Schubstellungen muss auf die Standardwerte des LTO-Zyklus zurückgegriffen werden, weil keine genaueren Daten zur Verfügung stehen.

Des Weiteren werden bei den Triebwerksdaten hinsichtlich des Treibstoffflusses Mittelwerte berechnet. Das ist notwendig, weil die Luftfahrzeugtypen in den Flugverlaufsdaten zwar ersichtlich werden, diese aber mit unterschiedlichen Triebwerken (Herstellungsdatum und Hersteller) ausgestattet sein können. Diese verschiedenen Triebwerksdaten werden der ICAO Emission Databank entnommen. Eine weitere Möglichkeit wäre jeweils das effizienteste Triebwerk eines Luftfahrzeugtyps zu verwenden, da aber nicht alle LVGs die neusten Triebwerke in Betrieb haben, ist die Berechnung eines arithmetischen Mittelwerts eine bessere Alternative, um alle TW-Kombinationen einbeziehen zu können.

Im Folgenden werden als Übersicht die einzelnen Dateneingaben, die Datenverarbeitung und die Datenausgaben nach dem sog. EVA-Prinzip (Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe-Prinzip) aufgezeigt [49].

- Dateneingabe:
 - Luftfahrzeugtyp
 - Flughafendaten (Start- und Landebahn)
 - Zeitstempel
 - externe Daten: Emissionsindizes
- Datenverarbeitung:
 - Zuordnung der Flugphase
 - Zuordnung des LFZs zu einem Triebwerkstypen
 - Durchführung der Kraftstoff- und Emissionsberechnung auf Grundlage der ICAO-Methode
- Datenausgabe:
 - Ausgabe der Kraftstoff- und Emissionswerte entsprechend der Flugphase und des Luftfahrzeugtyps, ggf. auch Durchschnittswerte usw.
 - Diagramme für die entsprechenden Flugphasen und Luftfahrzeuge

Zur Dateneingabe werden verschiedene Datenquellen herangezogen. Primärquellen stellen dabei die Flugpläne des Modellflughafens dar. An diesem mid-size Modellflughafen werden auf der Grundlage von realen Flugverlaufsdaten ca. 152.000 Flugbewegungen pro Jahr und demnach rund 416 Flugbewegungen am Tag durchgeführt. Diese Flugpläne enthalten den Luftfahrzeugtyp mit denen mittels externen Datenquellen die entsprechenden Triebwerke zugeordnet werden können. Die Flugzeugdatenbank der ICAO beschreibt, welcher Luftfahrzeugtyp welche und wie viele Triebwerke einsetzt. Abbildung 4.9 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt aus dieser Datenbank mit dem Luftfahrzeugtyp und dem entsprechenden Triebwerkstypen [87].

ID	ID	Manufacturer	Commercial Name	Type	Version	Engine
	AIRBUS_15173	AIRBUS		A300	600ST	CF6-80C2A8
	AIRBUS_15174	AIRBUS		A300	600ST	CF6-80C2A8
	AIRBUS_15175	AIRBUS		A300	600ST	CF6-80C2A8
	AIRBUS_15176	AIRBUS		A300	600ST	CF6-80C2A8
	AIRBUS_15177	AIRBUS		A300	B2-1C	CF6-50C
	AIRBUS_15178	AIRBUS		A300	B2-1C	CF6-50C
	AIRBUS_15179	AIRBUS		A300	B2-1C	CF6-50C
	AIRBUS_15180	AIRBUS		A300	B2-1C	CF6-50C
	AIRBUS_15181	AIRBUS		A300	B2-1C	CF6-50C2R
	AIRBUS_15182	AIRBUS		A300	B2-1C	CF6-50C2R
	AIRBUS_15183	AIRBUS		A300	B2-1C	CF6-50C2R
	AIRBUS_15184	AIRBUS		A300	B2-1C	CF6-50C2R

Abb. 4.9: Ausschnitt aus der Luftfahrzeugdatenbank der ICAO [87]

Nach der Bestimmung des Triebwerktyps wird eine weitere externe Datenquelle zur Ermittlung von Emissionsindizes und des Treibstoffflusses genutzt. Hierbei handelt es sich um die ICAO Engine Emissions Database [88]. Die Struktur der Daten kann Abbildung 4.10 entnommen werden. Für die Emissionen HC, NO_x und CO können der Datenbank die Emissionsindizes für die jeweiligen LTO-Phasen entnommen werden, allerdings nicht für CO₂, weil es sich hierbei um einen phasenunabhängigen Schadstoff handelt, wie das schon in Kapitel 2.1.3 beschrieben wurde, und somit kann lediglich der entsprechende Treibstofffluss innerhalb der LTO-Phasen entnommen werden und als Eingangswert in die Berechnung einfließen.

UID No	Engine Identification	-----Fuel-----			-----Fuel Flow-----				Fuel LTO Cycle
		Spec	H/C	Arom	T/O	C/O	App	Idle	
1CM001	CFM56-2A series	Jet A	1,93	16,0	1,114	0,911	0,318	0,130	446
1CM002	CFM56-2B-1	Jet A	1,93	16,0	0,985	0,819	0,311	0,128	424
1CM003	CFM56-2-C5	Jet A	1,93	16,0	0,985	0,819	0,311	0,128	424
1CM004	CFM56-3-B1	Jet A	1,93	16,0	0,946	0,792	0,290	0,114	392
1CM005	CFM56-3B-2	Jet A	1,93	16,0	1,056	0,878	0,314	0,119	421

Abb. 4.10: Ausschnitt aus der Triebwerksdatenbank der ICAO [88]

Diese relevanten Daten aus den verschiedenen Quellen werden innerhalb einer Excel-Tabelle pro Flugbewegung zusammengetragen, sodass alle zur Berechnung notwendigen Informationen dargestellt werden.

Entsprechend der vorangegangenen Ausführungen wird ersichtlich, dass wenige Parameter

in die Berechnungen der CO₂-Emissionen einfließen. Im Folgenden werden verschiedene Einflussgrößen auf ihre Genauigkeit hin untersucht.

- Flugzeugtyp: Es wird jede Flugbewegung separat betrachtet, sodass entsprechend Triebwerke zugeordnet werden können. Im Falle mehrerer zuordenbarer Triebwerke wird aus diesen ein Mittelwert gebildet, um die Integration aller zu gewährleisten. Die Information über den Luftfahrzeugtyp wird aus der Aufzeichnung der Flugverlaufsdaten gewonnen.
- Flugphase: Die Höhe der CO₂-Emissionen hängt unmittelbar mit dem Treibstoffverbrauch zusammen. Dieser Verbrauch hängt wiederum von der Schubstellung ab, welche innerhalb des LTO-Zyklus folgendermaßen deklariert ist [21]:
 - Taxi (Idle): 7 % Triebwerksschub
 - Take-Off: 100 % Triebwerksschub
 - Climb Out: 85 % Triebwerksschub
 - Approach: 30 % Triebwerksschub

Auf Grund dessen, dass keine aktuellen Schubdaten pro Luftfahrzeugtyp vorhanden sind, wird bei der Berechnung auf diese Standardwerte zurückgegriffen.

- Wetter: Diese Daten werden auf Grund des hohen Aufwandes nicht berücksichtigt. Wobei bei der Verwendung von aktuellen Zeitstempeln, die Wittereinflüsse indirekt berücksichtigt werden, z.B. in Form von längeren Steigflugphasen auf Grund von wenig Wind. Zu dem ist der Einfluss von Wetter, siehe Tabelle 4.9, als gering zu betrachten.

Die aufgelisteten Einflussfaktoren haben einen unterschiedlichen Einfluss auf die Berechnung von Emissionen, und die Art der Berücksichtigung jener Faktoren kann Tabelle 4.9 entnommen werden und beruhen auf den Ausführungen von P.Weitz [49]:

Faktoren	Einfluss	Berücksichtigung bei der Berechnung
Luftfahrzeugtyp	mittel (± 25 %)	detailliert
Triebwerkstyp	mittel (± 25 %)	Mittelwert
Zustand des Luftfahrzeugs und Triebwerks	gering (< 5 %)	Mittelwert
spezif. Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit der LTO-Phase	groß (50 %)	detailliert
Warteschleifen	gering (< 5 %)	detailliert
Wetter	gering (< 10 %)	nicht betrachtet

Tabelle 4.9: Einflussfaktoren

4.6 Berechnung der CO₂-Schadstoffemissionen

Die Berechnungen der CO₂-Emissionen pro Luftfahrzeug und LTO-Phase werden in den folgenden Schritten berechnet.

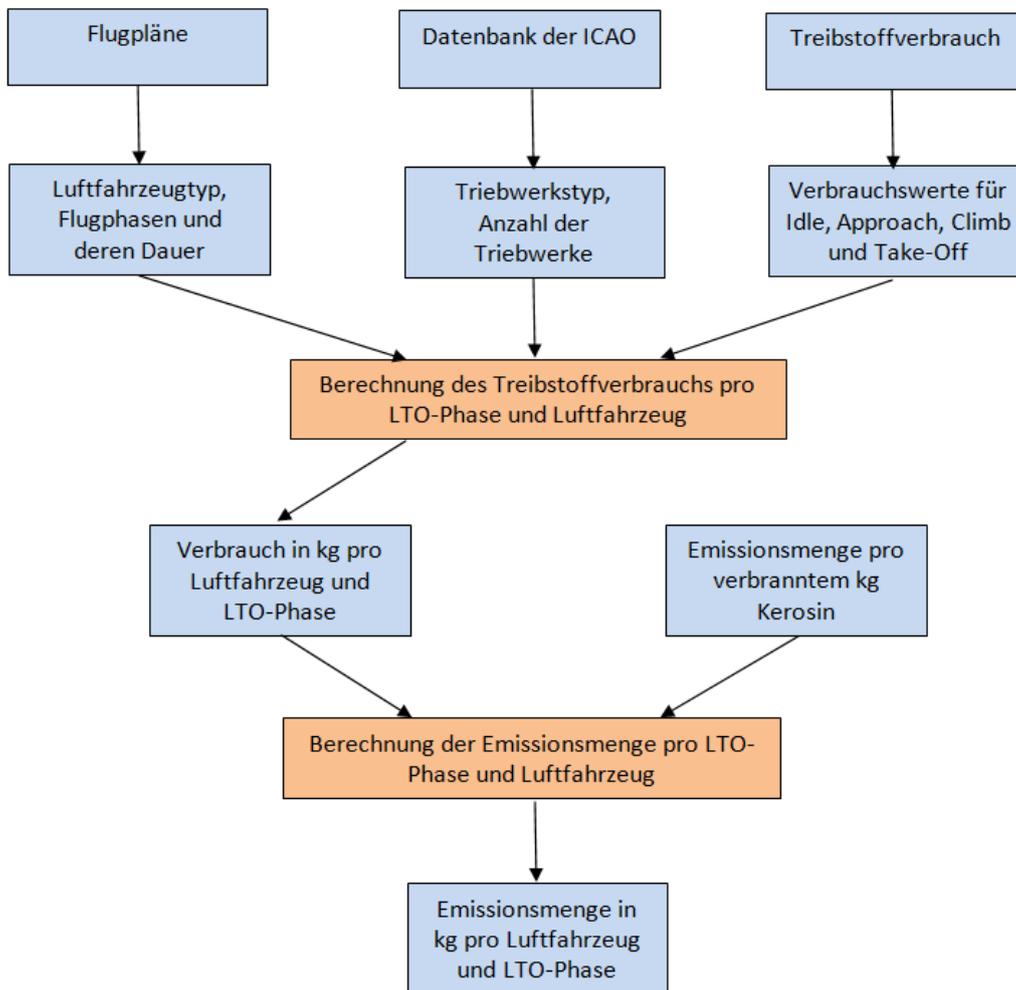


Abb. 4.11: Vorgehensweise zur Berechnung der CO₂-Emissionen

Entsprechend Abbildung 4.11 werden nun die Eingangsdaten (Flugpläne, Luftfahrzeugtyp, Triebwerkstyp und Treibstoffverbrauch) nach der untenstehenden Formel verknüpft mit dem Ziel, dass der Treibstoffverbrauch berechnet werden kann.

$$F_{k,i} = NE_i \cdot TIM_{k,i} \cdot FF_{k,i} \quad (4.12)$$

- $F_{k,i}$ Treibstoffverbrauch in der Phase k pro Luftfahrzeug i [kg]
- NE_i Anzahl der Triebwerke des Luftfahrzeugs i
- $TIM_{k,i}$ Verweilzeit bei gleicher Triebwerkslast in der Phase k für ein LFZ i [s]
- $FF_{k,i}$ Treibstoffmassendurchsatz in der Phase k für ein LFZ i [kg/s]
- k Phase des LTO 1-5 (Taxi-Out, Take-Off, Climb-Out, Approach, Taxi-In)

Der TIM wird im Gegensatz zur Schubstellung nicht immer als Standardwert der ICAO angenommen, sondern entsprechend der vorhandenen Daten präzisiert. Anhand nachfolgender Tabelle 4.10 wird dieser Wert berechnet.

LTO-Phase	Zeitstempel	Quelle
Taxi-In	AIBT – ATA	Flugplandaten
Taxi-Out	ATOT – AOBT	Flugplandaten
Take-Off	$\Delta t_{1500ft} - \Delta t_{0ft}$	A-SMGCS Daten ⁵
Climb-Out (bis 3000ft)	$\Delta t_{3000ft} - \Delta t_{1500ft}$	A-SMGCS Daten
(Holding) (4000 ft - 3000 ft) ⁶	$\Delta t_{3000ft} - \Delta t_{4000ft}$	A-SMGCS Daten
Approach (ab 3000ft)	ALDT - Δt_{3000ft}	Flugplandaten und A-SMGCS Daten

Tabelle 4.10: Berechnung des TIM

Wurde der Treibstoffverbrauch nach der Formel 4.12 für die einzelnen Luftfahrzeuge in den jeweiligen LTO-Phase mit Hilfe der aktuellen Zeitstempel bestimmt, kann im weiteren Verlauf mit Hilfe der Formel 4.13 und 4.14 die Menge an ausgestoßenem CO₂ bestimmt werden. Eine Herausforderung bei dieser Formel und der Berechnungsmethode im Allgemeinen ist die Zuordnung der Triebwerkstypen anhand des Luftfahrzeugtyps. Entsprechend den oben genannten Ausführungen wird der spezifische Kraftstoffverbrauch als Mittelwert der in Frage kommenden Triebwerkstypen eines jeweiligen Luftfahrzeugtyps gebildet. Das Verfahren zielt darauf ab, jedem Luftfahrzeugtyp genau einen Treibstoffverbrauchswert zuzuordnen zu können. Zunächst wird der Kraftstoffverbrauch einzeln für jede LTO-Phase berechnet, im Anschluss daran die einzelnen Emissionen pro Flugphase und am Ende werden diese aufsummiert.

$$E_{k,i} = F_{k,i} \cdot EI \quad (4.13)$$

$$E_{LTO,i} = c_{FF,1} \sum_{k=1}^4 E_{k,i} \quad (4.14)$$

- $E_{k,i}$ Emissionsmasse in der Phase k pro Luftfahrzeug i [g]
- EI Emissionsindex [g/kg]
- $E_{LTO,i}$ Emissionsmasse innerhalb des LTO pro Luftfahrzeug i [g]

⁵Diese Daten bestehen aus Trackdaten, welche aus kooperativen Systemen (Multilateration) und nicht kooperativen Systemen (ASR, MSR) zusammensetzen. Dadurch ist es möglich auch Trackdaten bis zu 5000 ft zu erhalten.

⁶Die Holdings werden nicht berücksichtigt, da nach der Prüfung der einzelnen Flugbewegungen innerhalb der Arrivals lediglich ein Luftfahrzeug eine Warteschleife fliegt, sodass diese Holding-Phase bei der Betrachtung der Emissionen vernachlässigt werden kann.

Die Berechnungen werden separat für Arrivals und Departures in Excel-Tabellen durchgeführt. Dabei dienen die Flugpläne, A-SMGCS-Daten und die Datenbanken als Grundlage für die Treibstoff- und die Emissionsmassen-Berechnung. Die Excel-Tabellen können dem Anhang A und Anhang B auf dem beigefügten Datenträger entnommen werden. Die anschließende Auswertung erfolgt entsprechend den Berechnungen ebenfalls separat für Arrivals und Departures und kann dem Anhang C entnommen werden. Dabei erfolgt die Auswertung sowohl Tageweise als auch komplett für die eine betrachtete Woche. Als Beispiel für die erfolgte Auswertung, dient die nachfolgende Abbildung 4.12, welche einen Ausschnitt der Auswertung für die Arrivals eines Tages zeigt.

Callsign	LFZ	Runway	STA	erste ETA Prognose	Zeitabstand zw. ETA und STA (Anzeige Minus min. wenn erste ETA zeitlich vor STA)	letzte ETA Prognose	Zeitabstand zw. ETA und STA (Anzeige Minus min. wenn letzte ETA zeitlich vor STA)	ATA	AIBT	A-SMGCS-Daten		ICAO Datenbank													
										Holding ($t_{\text{down}} - t_{\text{updown}}$) in min	Approach (ALDT- t_{down}) in min	Taxi-In Zeit (AIBT-ATA) in min	FF APP in kg/s	FF Idle in kg/s	Anzahl der Triebwerke	F _{max} in kg	F _{app} in kg	E _{app} in kg	F _{max} in kg	E _{max} in kg	E _{anfang} in kg				
R11	23	08:55:00	08:55:00	0	08:50:00	08:55:00	-5	08:46:23	08:51:11	4,3	5	0,1083	0,0453	4	52,19	111,77	352,06	164,38	516,45						
A3202	23	08:55:00	08:55:00	0	08:55:00	08:55:00	0	08:50:07	08:56:03	3,3	6	0,3087	0,11	2	78,32	122,25	385,07	246,71	631,78						
B7378	23	09:05:00	08:55:01	-10	08:55:01	08:55:00	-10	08:51:00	08:55:46	4,4	3	0,3314	0,1107	2	36,75	174,98	551,18	115,77	666,95						
A3212	23	09:05:00	09:00:00	-5	08:55:00	09:00:00	-10	08:58:49	09:03:53	3,4	5	0,3602	0,1169	2	71,08	146,96	462,93	239,89	686,82						
A3191	23	09:15:00	09:00:00	-15	09:00:00	09:00:00	-15	08:55:16	08:59:00	3,7	4	0,2926	0,1047	2	46,91	129,91	409,23	147,75	556,98						
A3212	23	08:50:00	09:00:00	10	09:00:00	09:00:00	10	08:51:56	08:57:02	3,2	5	0,3602	0,1169	2	71,54	138,32	435,70	225,36	661,06						
B7378	23	09:20:00	09:05:00	-15	09:05:00	09:05:00	-15	09:00:53	09:04:00	4	3	0,3314	0,1107	2	41,40	159,07	501,08	130,42	631,49						
CRJ	23	09:15:00	09:05:00	-10	09:05:00	09:05:00	-10	09:05:29	09:09:00	3,4	4	0,1811	0,0646	2	27,26	73,89	232,75	45,87	318,62						
CRJ9	23	09:15:00	09:10:00	-5	09:10:00	09:10:00	-5	09:14:07	09:19:07	3,6	5	0,1811	0,0646	2	38,76	78,24	246,44	122,09	368,53						
A3202	23	09:05:00	09:10:00	5	09:00:00	09:10:00	-5	09:03:20	09:07:04	3,7	4	0,3087	0,11	2	49,28	137,06	431,75	155,23	586,98						
A3191	23	09:30:00	09:20:00	-10	09:10:00	09:20:00	-20	09:08:39	09:14:37	4,7	6	0,2926	0,1047	2	74,97	165,03	519,83	236,14	755,97						
E135	23	09:35:00	09:25:00	-10	09:25:00	09:25:00	-10	09:23:47	09:27:00	3,6	3	0,1172	0,0476	2	18,37	50,65	159,49	57,88	217,36						
A3212	23	09:30:00	09:25:00	-5	09:20:00	09:25:00	-10	09:21:34	09:27:26	3,4	6	0,3602	0,1169	2	83,30	146,96	462,93	259,24	722,17						
B7377	23	09:30:00	09:30:00	0	09:30:00	09:30:00	0	09:32:00	09:36:26	3,7	4	0,313	0,1067	2	56,76	138,97	437,76	178,81	616,57						
B7378	23	09:40:00	09:35:00	-5	09:35:00	09:35:00	-5	09:33:13	09:39:05	3,7	6	0,3314	0,1107	2	77,93	147,14	463,50	245,49	708,98						
B7374	23	09:45:00	09:35:00	-10	09:35:00	09:40:00	-10	09:40:21	09:46:04	3,7	6	0,3028	0,1168	2	80,12	134,44	423,50	252,39	675,89						
A3202	23	09:50:00	09:40:00	-10	09:40:00	09:40:00	-10	09:34:52	09:40:48	3,8	6	0,3087	0,11	2	78,32	140,77	443,42	246,71	690,12						
A3191	23	09:45:00	09:40:00	-5	09:30:00	09:40:00	-15	09:28:20	09:34:49	4,8	5	0,2926	0,1047	2	69,89	168,54	530,89	217,01	747,91						
B7377	23	09:40:00	09:40:00	0	09:40:00	09:40:00	0	09:37:01	09:40:49	3,8	4	0,313	0,1067	2	48,66	142,73	449,59	153,26	602,86						
A3191	23	09:45:00	09:45:00	0	09:45:00	09:45:00	0	09:47:19	09:53:32	3,8	6	0,2926	0,1047	2	78,11	133,43	420,29	246,03	666,33						
A3191	23	09:40:00	10:00:00	20	10:00:00	10:00:00	20	09:49:37	09:54:05	4,4	4	0,2926	0,1047	2	56,12	154,49	486,65	176,78	663,43						
A3202	23	10:15:00	10:05:00	-10	10:05:00	10:05:00	-10	09:56:35	10:03:52	3,6	7	0,3587	0,11	2	96,14	133,36	420,08	302,64	722,92						
A3202	23	10:05:00	10:05:00	0	09:55:00	10:05:00	-10	09:54:17	09:58:15	4,1	4	0,3087	0,11	2	52,36	151,88	478,42	164,93	643,36						
A3181	23	10:10:00	10:10:00	0	10:10:00	10:10:00	0	10:06:53	10:13:20	3,9	6	0,2768	0,0974	2	75,39	129,54	408,06	237,47	645,53						

Abb. 4.12: Ausschnitt der Auswertung für die Arrivals eines Tages

4.7 Weiterführende Untersuchungen geeigneter CO₂ basierter Leistungsindikatoren in einem TAM

Zunächst soll darauf hingewiesen werden, dass die folgende Eingrenzung der KPIs auf die Eigenschaften des Modellflughafens zurückzuführen ist und damit auf die vorherrschende Datengrundlage, welche in einem TAM bzw. an diesem Modellflughafen zur Verfügung stehen. An anderen Flughäfen, welche ein größeres Verkehrsaufkommen, umfangreichere Infrastruktur (Rollwege) etc. aufweisen, können andere KPIs bei der Integration in ein TAM von Vorteil sein.

Zunächst kann festgehalten werden, dass zur Berechnung der CO₂-Emissionen der LTO-Zyklus herangezogen wird und somit die Betrachtung möglicher Holdingzeiten, insofern diese deutlich über 3000 ft geflogen werden, was an den meisten Flughäfen üblich ist, nicht berücksichtigt werden können. Für den Modellflughafen sind die Holdings auf Grund von geringem Verkehrsaufkommen ggü. der vorhandenen Kapazität kein zu fokussierender KPI, da z.B. in den Flugverlaufsdaten von einer Woche lediglich ein Holding geflogen wurde, sodass der $KPI_{Anzahl, Holdings}$ und $KPI_{Dauer, Holdings}$ nicht zielführend sind. Für andere Flughäfen kann dieser Leistungsindikator allerdings Aufschlüsse darüber geben, ob möglicherweise neue Verfahren zur Vermeidung von Holdings eine sinnvolle Alternative zum Einsparen von Treibstoff und damit auch Schadstoffen sind.

Ein weiterer KPI zur Messung der verzögerungsfreien Positionsbelegung ist auf Grund

der geringen Datenverfügbarkeit nicht möglich, sodass eine Erfassung am Modellflughafen und auch an anderen Flughäfen wie z.B. Leipzig nicht möglich ist.

Der Leistungsindikator zur Bestimmung der Anzahl an Flughäfen mit Continuous Descent Operations ist nicht von Interesse, da durch das Wissen, dass vielleicht an anderen Flughäfen solche Verfahren angewendet werden, keine direkte Minimierung der Schadstoffe erzielt werden kann. Allerdings können Indikatoren der jeweiligen Flughäfen, welche diese Verfahren durchführen, einen Aufschluss über die Emissionseinsparung geben, sodass die Effizienz dieses Verfahrens deutlich wird.

Die Bestimmung und Messung des Treibstoffverbrauchs ist an allen Flughäfen möglich. Diese erfolgt entsprechend der Berechnungsmethoden, welche diesem Kapitelabschnitt vorangestellt wurde. Diese Berechnungsmethode ist auf Grund der verwendeten Actual-Zeiten für eine Berechnung des Treibstoffverbrauchs am Ende eines Flugbetriebstags oder Fluges ausgelegt. Genauso ist es aber möglich, auf Grundlage von Scheduled- und Estimate-Zeiten eine Berechnung durchzuführen. Entsprechend des LTO-Zyklus ist es sinnvoll, den Treibstoffverbrauch den einzelnen Phasen zuzuordnen und im Anschluss daran mit Hilfe des Emissionsindex von CO₂ (3,15 kg pro kg Treibstoff [17]) die Emissionen zu bestimmen. Entsprechend des LTO-Zyklus werden auch die verschiedenen TIM benötigt. Die einzelnen A-SMGCS Daten und Flugverlaufsdaten sind im Voraus nicht verfügbar, aber können basierend auf historischen Daten (welche zur Verfügung stehen) ermittelt werden. Dabei können Mittelwerte sowohl für die Rollzeiten als auch für die Flugphasen des LTO-Zyklus bestimmt werden. Dazu ist es erforderlich die entsprechenden Daten, welche u.a. durch den Flughafen aufgezeichnet werden können, im Nachgang auszuwerten. Erfolgt die Betrachtung des Treibstoffverbrauchs, können entsprechend des Emissionsindex auch die CO₂- Emissionen frühzeitig berechnet werden. Mit dieser Vorgehensweise können die folgenden KPIs erfasst bzw. gemessen werden:

- KPI_{FF}
- KPI_{CO_2}
- $KPI_{Taxi-Out}$ und demnach auch KPI_{TW}
- $KPI_{3000ft/LFZ}$

Auf Grund der Definition des Untersuchungsraums, welcher sich auf den LTO-Zyklus beschränkt und damit auch auf den Flughafennahbereich, fällt die Betrachtung der Verspätungen der Luftfahrzeuge von Gate-to-Gate weg. Dies trifft auch auf den Leistungsindikator Verspätung im Flug zu, weil eine Betrachtung nur ab und bis 3000 ft erfolgt.

Sämtliche Leistungsindikatoren zur Erfassung der Emissionen im Verhältnis zu den Passagieren oder der Verkehrsmenge sind jene, welche am Ende des Flugbetriebstages zur Verfügung stehen, sobald feststeht, wie viele Luftfahrzeuge bzw. Passagiere abgefertigt wurden. Wird allerdings der Zeitraum betrachtet (bis zu 24h im Voraus), welcher im TAM im Fokus steht, ist es nur sehr rudimentär abschätzbar, welche Größenordnung diese Werte einnehmen. Somit kann dieser KPI im Nachhinein zur Messung und vor allem zum Vergleich zu anderen Flughäfen herangezogen werden, aber ist für einen Einsatz im TAM nicht sinnvoll. Aus dem genannten Grund fallen folgende KPIs aus der Betrachtung heraus:

- $KPI_{CO_2/VE}$, $KPI_{CO_2/Pax}$
- $KPI_{TMA/VE}$, $KPI_{TMA/Pax}$
- $KPI_{LTO/VE}$, $KPI_{LTO/Pax}$

Der Einsatz dieser KPIs ist aber zukünftig vorstellbar, wenn auch in TAM bisher nicht avisiert, sodass zukünftig eine Pflicht zur Übermittlung von Passagier- und Fracht-Zahlen am Abflughafen zum Zielflughafen gibt. Ein letzter KPI, welcher erst im Nachgang bestimmt werden kann, ist der Indikator Treibstoffeffizienz, denn dafür kann zwar zunächst anhand der Estimate- und Scheduled-Zeiten der geplante Treibstoffverbrauch bestimmt, aber innerhalb des Wirkbereichs des TAM vorerst kein tatsächlicher Treibstoffverbrauch zur Berechnung zur Verfügung gestellt werden.

Anhand dieser Erläuterungen existieren auf Grundlage der Daten und in Bezug auf den Einsatz in TAM die folgenden KPIs:

- Treibstoffverbrauch
 - KPI_{FF}
- Emissionen
 - KPI_{TW}
 - $KPI_{3000ft/LFZ}$
 - KPI_{CO_2}
- Verweilzeit
 - $KPI_{Taxi-Out}$

Zur Messung dieser KPIs kann folgende Vorgehensweise angewendet werden. Diese wird allerdings nur dann eingesetzt, wenn der entsprechende Flughafen nicht ohnehin ein Berechnungsmodell einsetzt, wie z.B. LASPORT.

Die Berechnung der tatsächlichen Emissionen anhand von aktuellen Zeitstempeln wurde schon hinreichend in den vorangegangenen Kapiteln bei der Wahl der Berechnungsmethode erläutert. Jetzt soll darauf eingegangen werden, welche Daten genutzt werden können, wenn lediglich Trendinformationen zur Verfügung stehen.

- Triebwerksdaten und Treibstofffluss: Diese Informationen werden entsprechend des Luftfahrzeugmusters mit Hilfe von Datenbanken ermittelt (für den Modellflughafen wurden die Daten bereits zusammengetragen und können dem Anhang XY entnommen werden).
- Verweilzeiten: Diese Zeiten können für die einzelnen Phasen des LTO-Zyklus mittels historisch aufgezeichneter Daten überschlagsmäßig für die einzelnen Luftfahrzeuge ermittelt werden. Dabei kann die Detailtiefe für jeden Flughafen unterschiedlich sein. Zum einen kann aus Daten, welche über einen oder mehrere Monate zusammengetragen wurden, ein Mittelwert für die einzelnen Phasen gebildet werden. Zum anderen kann aber auch pro Luftfahrzeug, mittels entsprechender Wetterdaten und

einer vorhersehbaren Start- und Landebahnnutzung für die nächsten Stunden bereits ein genauere Wert ermittelt werden. Für die Taxi-Zeiten kann z.B. eine Matrix aufgestellt werden, welche entsprechend der Parkposition und der Start- und Landebahn Zeitstempel zuordnet. Insofern im Laufe des Flugbetriebstages und dann mit Erreichen der aktuellen Zeit verbesserte Daten vorliegen, können diese bei der Berechnung einfließen und zu einem besseren Abbild des Treibstoffverbrauchs und damit der Emissionen führen.

- Luftfahrzeugtypen: Auf Grund der Betrachtung des kommerziellen Luftverkehrs und der Vernachlässigung der General Aviation sind die einzelnen Flugpläne bereits bekannt, sodass eine genaue Zuordnung der Triebwerke erfolgen kann und auch die Anzahl der landenden und startenden Luftfahrzeuge, außer der Flughafen wird z.B. kurzfristig als Ausweichflughafen angefliegen, bekannt ist.

Die ausgewählten Leistungsindikatoren werden entsprechend des LTO-Zyklus (Verweilzeiten und Triebwerksdaten) angepasst, sodass sich schlussendlich die folgenden KPIs zur Messung der Performance hinsichtlich Treibstoffverbrauch und Emissionen und unter Einbeziehung des TAM-Aspekts und der Aufgabenstellung ergeben. Hierbei sei noch hinzuzufügen, dass zunächst der Treibstoffverbrauch und darauf aufbauend die Emissionen durch die Multiplikation des Emissionsindexes berechnet werden, da es sich bei CO_2 um einen phasenunabhängigen Schadstoff handelt. Zur besseren Übersicht bauen sich die KPIs auf einem Grund-KPI auf, welcher die entsprechende LTO-Phase widerspiegelt, und den dazugehörigen KPIs, welche sich jeweils in den Treibstoffverbrauch und den CO_2 -Emissionen aufspalten.

LTO-Phase	KPI Treibstoffverbrauch (Fuel Flow, FF)	KPI CO ₂	Einheit	Definition
Approach	$KPI_{FF,Approach}$	$KPI_{CO_2,Approach}$	kg	gibt FF und CO ₂ vom Anflug ab 3000 ft bis zur Landung an
Taxi-In	$KPI_{FF,Taxi-In}$	$KPI_{CO_2,Taxi-In}$	kg	gibt FF und CO ₂ von der Landung bis zum Erreichen der Position an
Taxi-Out	$KPI_{FF,Taxi-Out}$	$KPI_{CO_2,Taxi-Out}$	kg	gibt FF und CO ₂ von der Position zur Start- und Landebahn an
Take-Off	$KPI_{FF,Take-Off}$	$KPI_{CO_2,Take-Off}$	kg	gibt FF und CO ₂ vom Start bis zum Erreichen von 1500 ft an
Climb-Out	$KPI_{FF,Climb-Out}$	$KPI_{CO_2,Climb-Out}$	kg	gibt FF und CO ₂ von 1500 ft bis 3000 ft an
Gesamt	$KPI_{FF,Gesamt}$	$KPI_{CO_2,Gesamt}$	kg	gibt die kumulierte Menge an FF und CO ₂ im LTO-Zyklus an

Tabelle 4.11: KPIs zur Verwendung in TAM

Außerdem können diese Messungen mit denen am Ende des Tages und somit mit den realen Daten mit dem Ziel verglichen werden, noch spezifischere Informationen zu den Ursachen von erhöhten Emissionen zu erhalten.

Nachdem nun die KPIs aufgestellt wurden, werden im nächsten Kapitel verschiedene Potentiale zur Schadstoffminimierung an Flughäfen untersucht. In Kapitel 5 werden die erarbeiteten CO₂ basierten Leistungsindikatoren erneut aufgegriffen und hinsichtlich einer möglichen Umsetzung in einem Flughafenleitstand beurteilt und entsprechend der Daten des Modellflughafens berechnet. Außerdem soll eine detaillierte Untersuchung hinsichtlich der Zweckmäßigkeit dieser gewählten KPIs zur Steuerung von Flughafenprozessen u.a. durch die Zuhilfenahme von Szenarien erfolgen.

Kapitel 5

Einsparung von CO₂-Emissionen bei Anwendung operativer Verfahren Allgemein und am Modellflughafen

5.1 Verfahren zur CO₂-Minimierung

Dieses Kapitel dient der Betrachtung möglicher operativer Verfahren zur Minimierung des Treibstoffverbrauchs der Luftfahrzeuge sowie der damit verbundenen CO₂-Emissionen (phasenunabhängiger Stoff) am Flughafen und im Flughafennahbereich. Dabei erfolgt die Betrachtung des Einsparpotentials entsprechend der einzelnen Flugphasen sowie für den rollenden Luftverkehr, wie es bereits in Kapitel 3.1 dargestellt wurde. Zunächst lässt sich für alle Flugphasen festhalten, dass Ineffizienz im Flugbetrieb in unnötige Lärm- und Schadstoffbelastungen resultieren [89].

5.1.1 Anflugverfahren

Hinsichtlich der Anflugverfahren existieren verschiedene operative Maßnahmen zur Minimierung des Treibstoffverbrauchs, vorausgesetzt, dass diese keine zusätzlichen Ausrüstungen im Luftfahrzeug erfordern und auch z.T. kurzfristig umsetzbar sind. Außerdem muss die Arbeitsbelastung der Piloten in Grenzen gehalten werden, da es bei der Landung häufig zu Unfällen kommt [90]. Eine weitere Randbedingung, welche bei der Betrachtung neu eingeführter Verfahren berücksichtigt werden muss, ist die Vorhersage der Ankunftszeit nicht negativ beeinträchtigt wird. Wird diese ungenauer, so muss die Flugsicherung die ohnehin schon enge Staffelung vergrößern. Somit sinkt die Kapazität [91].

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Treibstoffbilanz ist der Continuous Descent Approach (CDA). Bei dieser Art des Anflugs wird ein stufenartiger Abbau der Höhe vermieden. Mit der Anwendung eines CDA-Verfahrens können bei einem Luftfahrzeug der Größe eines A320 zwischen 50 kg und 150 kg Treibstoff pro Flug eingespart werden, was

einem CO₂-Minderungspotentials von 158 kg bis 473 kg entspricht [92]. Abbildung 5.1 zeigt einen exemplarischen CDA (blaue Linie) im Gegensatz zur herkömmlichen Variante (rote Linie).

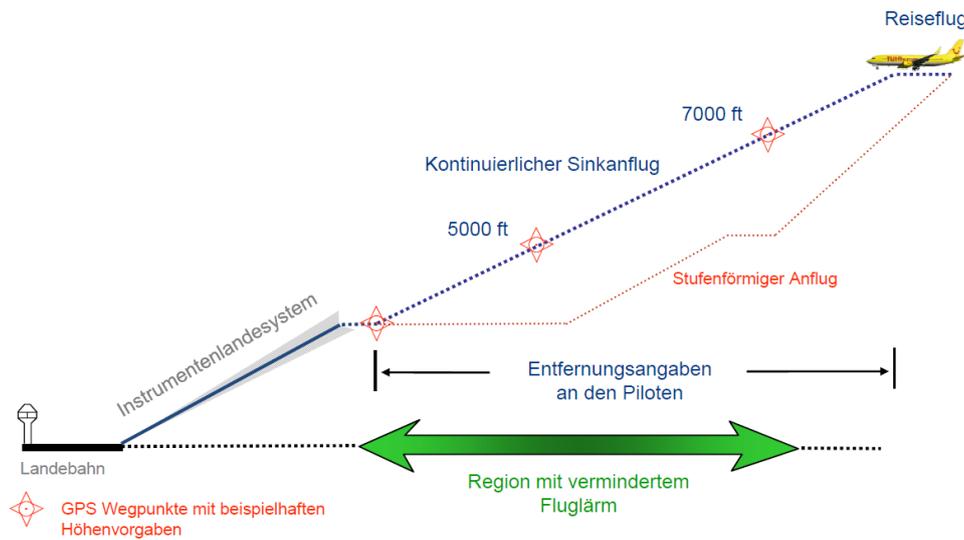


Abb. 5.1: Continuous Descent Approach [93]

Diese Variante kann ohne Probleme von den Piloten geflogen werden. Hierbei wird eine kontinuierliche Sinkrate von 300 ft/NM erflogen, was ca. einem Winkel von 3° entspricht. Das Problem an dieser Stelle ist, dass sich die einzelnen Geschwindigkeiten der Luftfahrzeugtypen unterscheiden und somit auch die Länge der Anflugstrecke unterschiedlich ist. Dieser Aspekt macht das Verfahren für die Fluglotsen sehr aufwändig. Hinzu kommen Anflüge aus verschiedenen Richtungen auf einen gemeinsamen Endanflug und bestimmte Wettererscheinungen (Gewitterzellen, welche umflogen werden müssen), die einen CDA verhindern können.

Das CDA-Verfahren ist geeignet, wenn keine Sicherheitsbedenken (Staffelung) vorliegen und das Wetter keine Einschränkungen erfordert [93]. Ohne zusätzliche Systeme am Boden und an Bord ist das Verfahren bei geringer Verkehrsdichte umsetzbar und kann in der Praxis realisiert werden. Teilweise wird es bereits an einigen Flughäfen realisiert [91]. Zusätzlich zum CDA kann das Low Drag / Low Power Verfahren integriert werden. Dabei wird der Widerstand während des Anfluges reduziert, indem folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Fahrwerk wird erst nach der Anpassung der Klappenkonfiguration bei einer Höhe von ca. 2000 ft ausgefahren
- Anpassung der Landeklappen

Das Luftfahrzeug ist erst ab einer Höhe von 1000 ft auf dem Gleitweg stabilisiert [92]. Ein weiterer operativer Aspekt zur Reduzierung des Treibstoffverbrauchs stellt das Point Merge Verfahren dar. Dieses Verfahren ist eine neue Methode, um den anfliegenden Verkehr an einem definierten Punkt zusammenzuführen. Dies erfolgt mit dem Ziel verbesserte und harmonisiertere Ankunftsvorgänge unter Verwendung der vorhandenen Technologien (Präzisionsflächennavigation) zu erreichen. Das Anflugverfahren liegt zwischen dem Initial

Approach Fix (IAF) und dem Final Approach Fix (FAF). Der Anfangsanflug erfolgt nach dem herkömmlichen Verfahren auf den Anflugrouten (Standard Arrival Routes, STAR). Die STARS im Point Merge System (PMS) bestehen aus zwei Teilen [94]:

- Merge Point: Punkt an dem der Verkehr zusammengeführt wird
- Sequencing Legs: Herstellung der Reihenfolge und der Staffelung der ankommenden Luftfahrzeuge. Die einzelnen Legs sind parallel, lateral und/oder vertikal voneinander getrennt (lateral Abstand 2 NM und vertikal 1000 ft)

Neben diesen Bestandteilen kommen ein Anfangs-, ein Verbindungs- und ein Endsegment hinzu. Das Anfangssegment reicht dabei vom IAF, dem Eintrittspunkt in das PMS bis zu den Sequencing Legs. Das Verbindungssegment umfasst den Merge Point und den letzten Punkt des Sequencing Legs. Das Endsegment hingegen reicht vom Merge Point bis zum Austrittspunkt des PMS, dem FAF. Einen Überblick über den Aufbau eines PMS gibt folgende Abbildung 5.2 [94]:

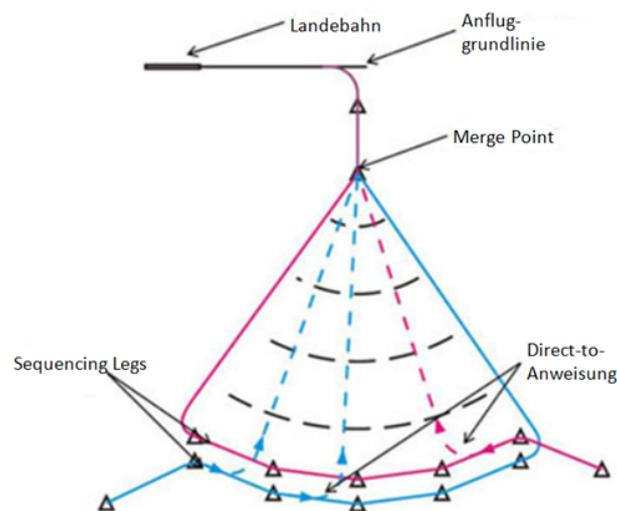


Abb. 5.2: Beispiel Point Merge Verfahren [95]

Abbildung 5.2 verdeutlicht zudem, dass die Staffelung durch das Abfliegen der Sequencing Legs erfolgt (magenta und blaue Linie). Bei einem entsprechenden Abstand zwischen zwei Luftfahrzeugen kann vom Fluglotsen die Anweisung „Direct-to“ erfolgen, damit dieses Luftfahrzeug direkt zum Merge Point fliegt. Sobald die Legs verlassen wurden, erfolgt die Staffelung durch die Kontrolle der Geschwindigkeit. Das Sinkprofil kann zur Optimierung durch ein CDA-Verfahren ersetzt werden [94]. Die Vorteile bezogen auf den Treibstoffverbrauch und die damit verbundenen CO₂-Emissionen sind stark von der Geometrie (vertikale Ausdehnung und Entfernung zwischen dem Merge Point und den Sequencing Legs) des PMS abhängig und ob im Anschluss ein CDA-Verfahren eingeleitet wird. Dennoch haben sich bei der Betrachtung dieses Verfahrens an einem Flughafen deutliche Verbesserungen hinsichtlich der Verweilzeiten ab 3000 ft ergeben. Bei der Anflugphase wurde eine durchschnittliche Verbesserung von 300 s auf 235 s erreicht [78]. Diese Werte beziehen sich auf den Flughafen Leipzig unter Betrachtung eines Flugtages. Dabei wurde ein Referenzszenario mit dem Point Merge-Verfahren verglichen bzw. simuliert. Bei der

Betrachtung bis zu FL 100 ergab sich eine CO₂-Ersparnis von 3 % (ca. 450 t) pro Tag. Diese zwei Verfahren sind treibstoffeffizient. Betrachtet man allerdings den Untersuchungsraum dieser Arbeit, welcher sich bis 3000 ft erstreckt, haben diese Verfahren kaum eine Auswirkung, da ab dieser Höhe der herkömmliche ILS-Anflug (Abbildung 5.1) beginnt. Oberhalb dieser 3000 ft sind diese Verfahren allerdings sehr hilfreich und optimieren den Treibstoffverbrauch. Das gilt auch für den Einsatz eines Arrival Managers, welcher eine optimale Anflugsequenz herstellt und somit den Fluglotsen unterstützt.

In Zürich existiert zudem ein weiteres Verfahren zur Verbesserung des Anflugverkehrs. Das Verfahren wird als „Green Wave“ bezeichnet und stellt die Ablösung des Prinzips First Come - First Serve (FCFS) dar. Dabei erfolgt eine Zuteilung von Zeitfenstern. Damit soll das Fliegen von Holdings verhindert werden und Einsparungen in Höhe von 1800 t CO₂ pro Jahr (am Flughafen) resultieren. Die Luftverkehrsgesellschaft SWISS setzt dieses Verfahren bereits um, bei dem definierte Zeitfenster für die Ankunft beim Einflugpunkt auf den Flughafen Zürich vergeben werden. Der Grund für die Einführung dieses Verfahrens liegt im Nachtflugverbot und der daraus resultierenden morgendlichen Ankunftsstau, welche zu langen Wartezeiten führt, da das Prinzip FCFS bisher angewendet wurde. Neu ist, dass bei der Ankunftsstau zwischen 06:10 Uhr und 06:30 Uhr eine sogenannte Tactical Time of Arrival (TTA) in Form einer dreiminütigen Ankunftszeit im Anflugsektor vergeben wird. Somit kann die Flugsicherung entsprechend des Zeitfensters den Flug effizienter an die Gegebenheiten anpassen. Das kann z.B. durch das Terminieren der Abflugzeit am Herkunftsflughafen erfolgen oder durch das Variieren der Fluggeschwindigkeit [97].

Das Vermeiden von Holdings ist eine weitere operative Möglichkeit, um Treibstoff und Emissionen einzusparen. Dies kann nur durch eine bessere Flugführung oder durch eine bessere Vorplanung und dem Vermeiden des gleichzeitigen Antreffens von mehreren Luftfahrzeugen erfolgen. Welches Potential möglich wäre, zeigt Tabelle 5.1.

Dauer [min]	Ø Treibstoffverbrauch ⁷ [kg]	Ø zusätzl. Treibstoffverbrauch pro Flug [kg]	Ø zusätzl. Treibstoffverbrauch pro Flug [kg]	Ø CO ₂ pro Flug [kg]	Potential [%]
≤ 4/5 (1 Holding)	3535	184	77	244	2,31
≤ 8/10 (2 Holdings)	3707	356	149	471	4,46
≤ 12/15 (3 Holdings)	3878	527	221	697	6,60
≤ 16/20 (4 Holdings)	4049	698	293	923	8,74

Tabelle 5.1: Einsparpotential von Treibstoff und Emissionen durch die Vermeidung von Holdings, A320 [99]

⁷Es ergeben sich Durchschnittswerte, da die Holdings in unterschiedlichen Höhen geflogen werden

Abschließend kann festgehalten werden, dass innerhalb des Untersuchungsraumes (unter 3000 ft) kaum Einsparpotentiale hinsichtlich des Treibstoffverbrauchs existieren. Speziell am Modellflughafen spielen die Holdings auch keine Rolle, da dieses Verfahren kaum eingesetzt wird. An anderen Flughäfen werden Holdings geflogen, sodass hier eine Betrachtung des Untersuchungsraums größer 3000 ft Sinn macht, insofern Daten zur Verfügung stehen. Erst in größeren Höhen, gibt es verschiedene Varianten, die ein Potential aufzeigen. Da die Umsetzung an vielen Flughäfen noch nicht erfolgt ist, existiert hier die Möglichkeit, in der Tat mehr CO₂ einsparen zu können.

5.1.2 Verfahren am Boden

An den meisten großen Flughäfen erfolgt das Rollen kommerzieller Luftfahrzeuge von und zur Start- und Landebahn überwiegend unter Benutzung aller Haupttriebwerke. Dieser Vorgang ist wenig effizient, da die Triebwerke im Leerlauf hinsichtlich des Treibstoffverbrauchs nicht optimal arbeiten. Außerdem wird zusätzlich bei zeitweiligen Stopps bzw. bei Warteschlangen an der Start- und Landebahn Treibstoff verbraucht und somit Emissionen und Lärm erzeugt. Laut Airbus benötigen (europäische) Luftfahrzeuge geschätzte 30 % der gesamten Zeit vom Start- zum Zielflughafen für den Turnaround und verbrauchen 5 % bis 10 % [100] des Treibstoffes eines Fluges für den Prozess inkl. dem Rollen am Boden. Beispielsweise sind die Rollzeiten zur Startbahn amerikanischer Inlandsflüge zwischen 2003 und 2007 um 11 % und die Rollzeiten zum Gate um 9 % [109] gestiegen. Diese Werte zeigen, dass das Rollen von Luftfahrzeugen am Boden ein wachsendes Interesse hervorruft, diese steigenden Rollzeiten, welche wiederum in steigendem Treibstoffverbrauch resultieren, zu vermindern [101].

Folgende mögliche potentielle Verfahren zur Verminderung der Emissionen rollender Luftfahrzeuge existieren und werden genauer erläutert:

- Verbesserung des Verkehrsflusses
- Single Engine Taxi
- Elektrisches Taxi
- Taxi mit Schlepper

Eine Option die Emissionen am Flughafen und speziell am Boden zu verringern sind Maßnahmen die den Verkehrsfluss beeinflussen. Hierzu zählt u.a. die Rollverkehrsführung, bei der davon ausgegangen werden kann, dass das Potential der Treibstoffeinsparungen gering ist, weil die Flugsicherung eine möglichst geeignete Rollführung von der Start- und Landebahn zur Position und anders herum vornimmt und somit im Zusammenhang mit einem TAM keine Veränderungen eintreten. Es besteht dennoch die Möglichkeit, z.B. mit Hilfe von in den Boden eingelassenen Lichtsignalen, eine dynamische Rollführung zu ermöglichen. Zum einen wäre der Vorteil, dass der Sprechverkehr zwischen der Flugsicherung und der Piloten reduziert wird, zum anderen könnte ein wiederholtes Anhalten an Kreuzungspunkten entfallen. Mit Hilfe einer dynamischen und intelligenten Rollführung können ein kontinuierlicher Verkehrsfluss und somit geringere Rollzeiten erreicht werden,

können, und sich dabei die Fluggeschwindigkeiten und die Dauer der Holdings unterscheiden.

sodass schlussendlich Kerosin eingespart und die Emissionen reduziert werden können. Eines dieser Verfahren nennt sich „Follow the Greens“ und wurde bereits am Flughafen Frankfurt am Main getestet. Die Auswertung dieser Versuche steht leider nicht zur Verfügung, sodass die Zeitersparnis und somit der gesenkte Treibstoffverbrauch nicht eingeschätzt werden können. Möglicherweise variieren diese auch von Flughafen zu Flughafen [103].

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung von Emissionen der Luftfahrzeuge am Boden besteht darin, den eigentlichen Prozess des Rollens zu optimieren. An dieser Stelle werden drei Varianten aufgezeigt: Das Rollen des Luftfahrzeugs unter Zuhilfenahme eines von insgesamt zwei Triebwerken (oder von zwei Triebwerken bei LFZ mit vier Triebwerken), das elektrische Rollen und das Schleppen der Luftfahrzeuge und demnach das Rollen ohne laufendes Triebwerk.

Das Single Engine Taxiing wird von einigen Luftverkehrsgesellschaften bereits durchgeführt, allerdings bei weitem noch nicht flächendeckend. Zum Beispiel werden bei der Luftverkehrsgesellschaft SWISS die Piloten angehalten, nach der Landung mit nur einem Triebwerk zu Rollen, was ein Einsparpotential von CO₂-Emissionen in Höhe von 1.500 t pro Jahr und SWISS-Flotte bereithält [98]. Aber auch andere Luftverkehrsgesellschaften, wie z.B. Spanair (seit 2012 Flugbetrieb eingestellt), führen Studien und Versuche zum Rollen mit nur einem Triebwerk durch. Bei diesen Versuchen hat sich herausgestellt, dass ein A320 beim Taxi-In rund 32 % weniger Treibstoff verbraucht, was zu einer durchschnittlichen Ersparnis von bis zu 4,94 kg/min Kerosin führt [104]. Das Single Engine Taxi ist nicht an jedem Flughafen umsetzbar. Vor allem dann nicht, wenn auf Grund der Flughafengröße nur sehr kurze Rollzeiten existieren. Bei diesem Betriebsverfahren, insofern es auch für den Taxi-Out angewendet werden soll, muss berücksichtigt werden, dass die Warmlaufzeit des Triebwerks ca. fünf Minuten beträgt. Das Rollen mit nur einem Triebwerk wird also erst dann effizient, wenn die Rollzeit größer als die Triebwerkswarmlaufzeit ist. Das Rollen mit nur einem Triebwerk stellt auch eine Herausforderung an die Piloten dar. Auf Grund der Asymmetrie wird das Steuern des LFZ bei schmalen Rollwegen und Kurven beeinträchtigt. Hinzu kommt eine eventuelle ungleichmäßige Abnutzung der Triebwerke durch unterschiedliche Laufzeiten, was zu einem erhöhten (zeitlichen) Wartungsaufwand führen kann, da ggf. die Triebwerke einzeln, entsprechend ihrer Laufzeit, gewartet werden [105].

Neben dem Single Engine Taxi gibt es eine weitere Alternative. Dabei findet das Rollen ohne die Schubleistung der Triebwerke statt, sondern mit Hilfe eines elektrischen Antriebs des Fahrwerks. Aber auch an dieser Stelle gilt, dass sich das Verfahren erst tatsächlich lohnt, wenn die Rollzeiten entsprechend höher als die Anlasszeiten des Triebwerks sind. Das System bzw. der Motor treibt die Räder des Hauptfahrwerks an. Die Steuerung des Luftfahrzeugs funktioniert entsprechend dem Vorgang mit laufendem Triebwerk. Diese Integration in das Luftfahrzeug und der damit verbundene bauliche Aufwand stellen allerdings eine große Herausforderung dar. Das liegt zum einen daran, dass sämtliche Teile zunächst für die Luftfahrt zugelassen werden müssen. Zum anderen muss nachgewiesen werden, dass der Anbau den Schwerpunkt nicht negativ beeinträchtigt und das System auch im Falle einer harten Landung o.ä. nicht direkt beschädigt wird oder sogar ein Sicherheitsrisiko darstellt. Eine weitere Möglichkeit ist, das Bugrad mit einem elektrischen Antrieb auszurüsten. Allerdings spielt hier neben dem Gewicht auch eine Rolle, dass ggf.

nicht genug Reibung zwischen Rad und Untergrund existiert (spielt für den Zulassungsprozess des Systems eine wichtige Rolle). Außerdem muss bei einem erhöhten Gewicht des Luftfahrzeugs beachtet werden, und dies bringt ein Einbau eines Motors und der dazugehörigen Geräte mit sich, dass die Bremsleistung ggf. zu gering ist. Ein Umgehen dieser Problematik wäre die Nutzung der APU (Hilfsgasturbine) als Energieversorger, was immer noch eine Treibstoffeinsparung gegenüber der Nutzung eines oder mehrerer Triebwerke darstellt.

Diese Tatsache wird deutlicher, wenn der Treibstoffverbrauch verglichen wird [88], [101].

	Treibstoffverbrauch ⁸	CO ₂ -Emissionen	Einsparpotential an CO ₂ -Emissionen
Rollen mit zwei Triebwerken	0,11 kg/s	0,3465 kg/s	-
Rollen mit einem Triebwerk	0,055 kg/s	0,1733 kg/s	0,1732 kg/s, -50 %
Rollen mit APU (Volllast)	0,036 kg/s	0,1134 kg/s	0,2331 kg/s, -67 %

Tabelle 5.2: Einsparpotential von Treibstoff und Emissionen beim Rollen [88], [101]

Tabelle 5.2 zeigt, dass beim Rollen mit der APU im Gegensatz zur Verwendung von zwei Triebwerken 67 % der Emissionen bzw. des Treibstoffes eingespart werden können und selbst beim Single Engine Taxiing noch 50 % im Vergleich zur herkömmlichen Variante. Beim Rollen mit nur einem Triebwerk müssen zudem keine technische Maßnahmen zur Realisierung umgesetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit, während des Rollvorgangs Treibstoff und Emissionen einzusparen, ist das Schleppen der Luftfahrzeuge von und zur Start- und Landebahn. Auch hier gilt es, die Triebwerkswarmlaufzeit zu berücksichtigen. Die positiven Auswirkungen auf die Umwelt sind abhängig von der Energiequelle, welche der Schlepper benötigt. Bei Elektroschleppern ist die Auswirkung auf die Umwelt vermutlich in der Phase des Schleppens am geringsten. Eine Einschränkung beim Schleppen ist, dass der Rollvorgang deutlich länger dauert als das eigenständige Rollen. Die Zeiten, wie eine Studie zeigt, sind um das 2,5 fache höher [105]. Versuche mit einem A340-400 am Flughafen Heathrow zeigen eine Verdreifachung der Taxi-Zeiten im Gegensatz zur herkömmlichen Verfahrensweise. Ein weiteres Problem beim Rollen mit Hilfe von Schleppern liegt bei der gesetzlichen Vorschrift, dass der Pilot das Flugzeug zu jeder Zeit unter Kontrolle haben muss. Somit muss ein Schlepper im Gegensatz zu den heutigen Push-back Fahrzeugen die Möglichkeit bieten, dass der Pilot das Fahrzeug steuern und auch abbremsen kann. Hierzu gibt es erste Versuche mit entsprechenden Schleppern, die ermöglichen, dass der Pilot den Schlepper lenken kann. Bei dem Schlepper wird das Bugrad des Luftfahrzeugs auf einem Drehteller des Schleppers befestigt, und somit kann der Pilot das Luftfahrzeug wie beim herkömmlichen Rollen steuern. Mit Hilfe der Schlepper werden Treibstoff und Emissionen eingespart sowie vor allem Lärm vermieden. Aber operativ ist das System deutlich zeitintensiver, und sowohl die Rollwege als auch die entsprechenden Abschnitte werden länger blockiert, sodass der Verkehrsfluss eingeschränkt wird und eine neue Berechnung der Rollzeiten erfolgen muss. Hinzu kommt der Einsatz von zusätzlichem Personal, genauso wie der Kauf der Schleppfahrzeuge, was wiederum mit Kosten verbunden ist. Außerdem

⁸Beispielhaft wurden die Werte basierend auf einem A320-200 gewählt

entsteht zusätzlicher Bodenverkehr durch die Schlepper, sodass ggf. ein Ausbau der Infrastruktur in Betracht gezogen werden muss [105], [101].

Entsprechend dieser Ausführungen zum Rollen kann am einfachsten und ohne großen technischen Aufwand in die operative Verfahrensweise durch das Single Engine Taxi eingegriffen werden. Dennoch ergeben sich auch hier wie bei den anderen Möglichkeiten des alternativen Rollens mittels aller Triebwerke folgende Herausforderungen [100]:

- Entlang der Rollwege muss ein idealer Punkt gefunden werden, ab dem es sinnvoll ist die Triebwerke anzulassen, sodass ohne Verzögerung direkt gestartet werden kann. Beim Taxi-In ist das wiederum kein Problem, hier kann nach dem Abrollen einfach ein Triebwerk abgeschaltet werden.
- Hinzu kommt, dass beim Starten der Triebwerke außerhalb des Vorfeldbereiches kein Feuerschutz durch das Bodenpersonal gegeben ist.
- Auch ein möglicher Defekt der Triebwerke würde erst an der Startbahn bemerkbar werden und ein Umkehren sowie einen möglichen Stau und Verspätungen anderer Luftfahrzeuge mit sich bringen.

Dennoch besteht ein großes Potential, beim Rollen der Luftfahrzeuge Emissionen einzusparen. Dabei sind die flughafen- und managementbezogenen Systeme die einfacheren Maßnahmen hinsichtlich der Umsetzung, da an dieser Stelle nicht in die Luftfahrzeugstruktur eingegriffen werden muss. Operativ gesehen kann aber auch ein verbessertes Warteschlangen-Management eine Optimierung der Schadstoffbilanz bewirken. Durch ein optimales Taxiing zur Start- und Landebahn, unter der Berücksichtigung von Luftfahrzeugposition, bereits rollenden Luftfahrzeugen und dem Wetter, kann ein möglicher Stau an der Start- und Landebahn verhindert werden. Dies wird heute schon zum Teil durch das Einsetzen von A-SMGCS und eines Departure Managers erreicht, welcher eine optimale Abflugfrequenz plant. Damit wird auch das Prinzip First Come - First Serve abgelöst. Allerdings ist die Verhinderung der Warteschlangen nicht immer möglich, wenn z.B. ein ankommendes Luftfahrzeug bereits zur Position rollt und das abfliegende Luftfahrzeug die Position freimachen muss [105], [101].

5.1.3 Abflugverfahren

Die Potentiale operativer Verfahren im Abflug ähneln derer im Anflug. Somit existieren zu den vorhandenen Standard Instrument Departure Routes flexible Alternativen. Hinzu kommt die Vermeidung von Steilstartverfahren. Diese sind zwar lärm mindernd, weil das Luftfahrzeug schnell steigt und somit der Abstand zu besiedelten Flächen schnell ansteigt, aber durch die Erhöhung der Fluggeschwindigkeit steigt auch der Treibstoffverbrauch. Analog zum CDA-Verfahren existiert auch ein Continuous Climb Departures (CCD) Verfahren, welches ein stufenweises Steigen verhindern soll. Durch ein konstantes Steigen werden schneller höhere Flughöhen und eine höhere Effizienz hinsichtlich des Treibstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen erreicht [106]. Dieses Verfahren selbst ist nicht neu und wird, insofern es die Kapazität und das Verkehrsaufkommen zulassen, auch schon angewandt, allerdings noch nicht flächendeckend. Das Einsparpotential des Treibstoffs eines A320 liegt beispielsweise bei Anwendung des CCD bis FL240 bei 50 kg Treibstoff (150

kg CO₂-Einsparung) im Gegensatz zu einem herkömmlichen stufenweisen Steigen (eine Stufe bei 6000 ft für 10 NM und anschließendem Weitersteigen bis FL240). Je mehr Stufen beim herkömmlichen Verfahren geflogen werden, desto größer ist die Differenz zum CCD Verfahren [106].

Ein unterstützendes System zur Verbesserung der Abflugsequenzen ist der Departure-Manager. Dieser funktioniert analog zu einem Arrival Manager. Hierbei werden auf Grundlage des Flugplans und der aktuellen Verkehrssituation an der Startbahn eine Startzeit und die dazugehörige Startbahn geplant. Diese Zeit wird allen Beteiligten frühzeitig mitgeteilt, sodass die Off-Block Zeiten entsprechend angepasst werden und ein optimales Taxi durchgeführt werden kann.

Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigt sich, dass in den Bereichen Anflug, Rollprozesse und Abflug ein großes Einsparpotential besteht. Diese Tatsache wird auch durch den Performance Review Report der Eurocontrol aus dem Jahr 2012 ersichtlich. In nachstehender Tabelle 5.3 werden verschiedene Key Performance Indicators (KPI) charakterisiert und ausgewertet. Es handelt sich hierbei um folgende KPIs [1]:

- Taxi-Out Phase
- horizontales Flugprofil
- vertikales Flugprofil
- Flughafennahbereich (Umkreis 40 NM)

Die Effizienz innerhalb der horizontalen Flugphase resultiert aus dem durchschnittlichen Umweg und entspricht demnach der tatsächlich geflogenen Flugstrecke. Das vertikale Flugprofil bezieht sich auf unterbrochene Steig- und Sinkflüge, sowie suboptimal gewählte Flugflächen. Außerdem werden im Flughafennahbereich die Holdings berücksichtigt.

ANS ⁹ -bezogener Einfluss auf den Treibstoffverbrauch und die CO ₂ -Emissionen	Zusätzlicher Treibstoffverbrauch		Zusätzliche CO ₂ -Emissionen	
	2012	% Änderung ¹⁰	2012	% Gesamt
Taxi-Out Phase	0,29 Mio t	-4,5 %	0,9 Mio t	0,7 %
horizontals Flugprofil	1,36 Mio t	-3,3 %	4,3 Mio t	3,1 %
vertikales Flugprofil	0,24 Mio t	-2,5 %	0,8 Mio t	0,5 %
Flughafennahbereich (Umkreis von 40 NM)	0,59 Mio t	-0,8 %	1,9 Mio t	1,3 %
Gesamte Flugeffizienz	2,5 Mio t	-2,8 %	7,8 Mio t	5,7 %

Tabelle 5.3: Ineffizienzen bezüglich Treibstoffverbrauch und CO₂-Emissionen [1]

⁹European Air Navigation Services

¹⁰im Vergleich zum Vorjahr

Es wird also ersichtlich, dass abgesehen von den vertikalen und horizontalen Flugphasen, welche in dieser Arbeit nicht betrachtet werden, ein Einsparpotential an Emissionen in der Taxi-Out Phase und im Flughafennahbereich von 2,8 Mio. t CO₂ vorliegt [1]. Dieser Wert unterstützt die Wichtigkeit, entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, um diese 2,8 Mio. t CO₂ im Jahr zu reduzieren.

Aus den bisherigen Untersuchungen wird ersichtlich, dass jede Flugphase Optimierungsmöglichkeiten bietet. Allerdings bringt die Umsetzung dieser Maßnahmen teilweise einen größeren Aufwand beispielsweise hinsichtlich der Installation neuer Systeme sowie der Modifikation von Luftfahrzeugen mit sich. Die Maßnahmen in den Bereichen Anflug, Taxi und Abflug sind vor allem von der Kapazität des jeweiligen Luftraums sowie des Flughafens und der eingesetzten Technologie abhängig. Kurzfristig umsetzbar ist vor allem die Vermeidung von Holdings in der Luft und von Warteschlangen am Boden vor der Start- und Landebahn. Auch an diesen Stellen muss die Kapazität zur Durchführung vorhanden sein und eine entsprechende Kommunikation zwischen den einzelnen Stakeholdern erfolgen.

Im Anflug und Abflug kann bereits auf die Flächennavigation zurückgegriffen werden, sodass diese flexibler gestaltet werden können. Ein gekurvter Anflug wäre auch eine Möglichkeit zur Treibstoffeinsparung, allerdings ist der technische Aufwand sehr hoch. Ein ebenso großes Potential bietet das CDA Verfahren, welches bis zu 473 kg CO₂ pro Flug bei einem A320 einspart [92]. Dieses Verfahren wird vereinzelt schon angewandt, allerdings nicht flächendeckend und ist auch auf Grund der technischen und sicherheitsspezifischen Anforderungen nur mittelfristig umsetzbar.

Am Boden hingegen ist ein effizientes Rollverkehrsmanagement eine Grundvoraussetzung, welches sich mittels A-CDM, DMAN, A-SMGCS und einer optimalen Zusammenarbeit der Stakeholder realisieren lässt. Außerdem können unterstützend verschiedene Verfahren wie beispielsweise Single Engine Taxiing eingeführt werden.

5.1.4 Verfahren zur Verlagerung oder Beschränkung von CO₂-Emissionen

An dieser Stelle werden Verkehrsflussmanagement-Maßnahmen, welche zu einer Verlagerung bzw. Beschränkung der CO₂-Emissionen führen, erläutert. Diese Maßnahmen spielen vor allem an Flughäfen eine Rolle, welche dicht an Siedlungsgebieten liegen. Bei diesen Maßnahmen muss allerdings das entsprechende Flughafenlayout berücksichtigt werden. Die Verfahren unterscheiden sich entsprechend bei parallelen und kreuzenden Bahnsystemen voneinander und werden im Folgenden untersucht.

Parallelbahnsystem

Durch die Verlagerung des an- und abfliegenden Verkehrs auf den zur Verfügung stehenden Start- und Landebahnen lassen sich die Immissionen in den angrenzenden Siedlungsgebieten verringern. Zur Veranschaulichung dieser Maßnahme dient ein Referenzszenario (Abbildung 5.3), welches einen Flughafen mit zwei parallelen Start- und Landebahnen, einem mittig liegenden Terminal und den Siedlungsgebieten darstellt. Außerdem werden exemplarisch Luftfahrzeuge, Windrichtung und die Schadstoffausbreitung dargestellt.

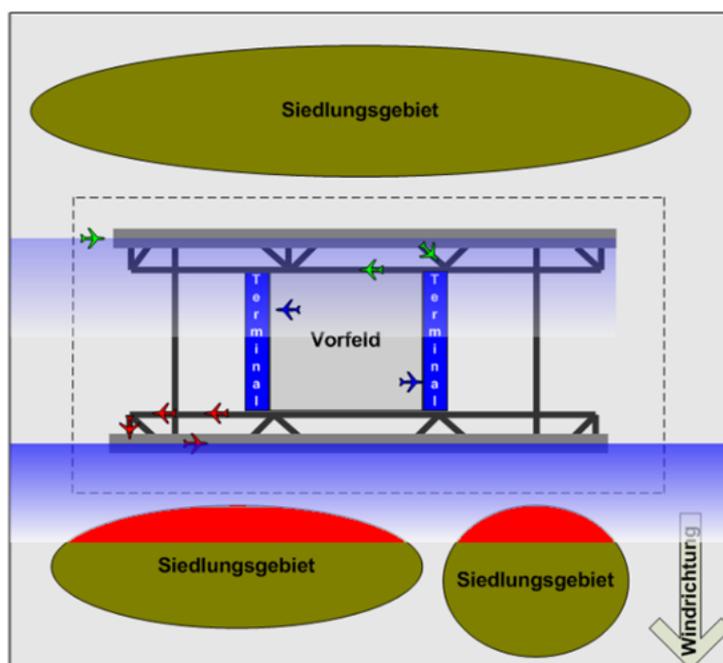


Abb. 5.3: Parallelbahnsystem - Ausgangsszenario [107]

Entsprechend der Windrichtung Nord sind die Siedlungsgebiete im Süden von den Flugbewegungen und den daraus resultierenden Emissionen belastet (roter Bereich), im Gegensatz zu den nördlichen Besiedlungsgebieten. Demnach gilt es Maßnahmen zur Vermeidung dieser erhöhten Immissionen in den südlichen Siedlungsgebieten zu generieren. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten [107]:

- Umlegung des abfliegenden Verkehrs (rot) von der Südbahn auf die Nordbahn und im Umkehrschluss, Verlagerung des anfliegenden Verkehrs (grün) von der Nordbahn auf die Südbahn. Diese Möglichkeit bietet sich an, da der ankommende Luftverkehr weniger Emissionen auf Grund der geringeren Geschwindigkeit und nicht vorhandenen Warteschlangen ausstößt. Außerdem ist in diesem Szenario die Anzahl der ankommenden Luftfahrzeuge geringer als die der abfliegenden. Siehe dazu Abbildung 5.4.
- Eine weitere Möglichkeit wäre, insofern es das Betriebskonzept genehmigt, dass nur ein Teil der Luftfahrzeuge auf die Nordbahn verlagert wird, um den erhöhten Einfluss der Schadstoffe auf das Siedlungsgebiet zu vermeiden. Allerdings muss die Kapazität zur Verfügung stehen, denn ein Verkehrsmix auf einer Bahn bedeutet auch eine Kapazitätseinbuße im Gegensatz zum Single-Mode.

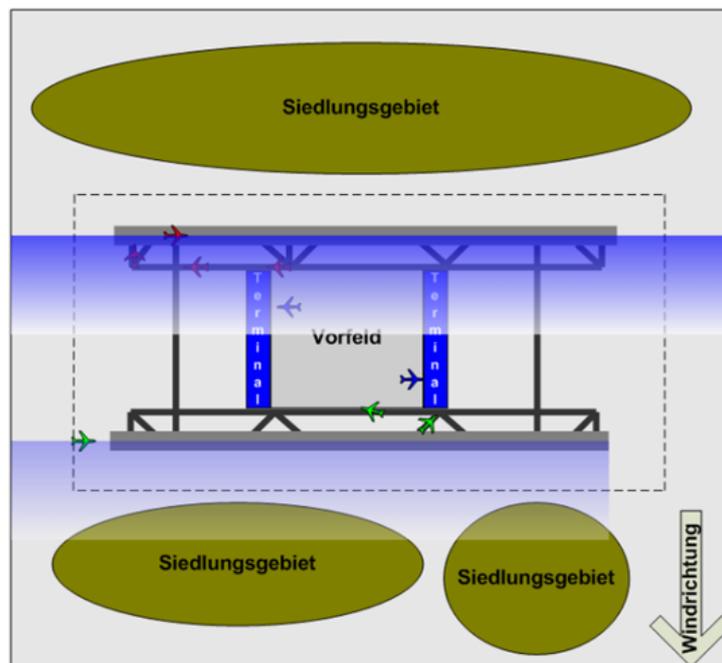


Abb. 5.4: Parallelbahnsystem - Verkehrsverlagerung [107]

Diese Möglichkeit zur Verhinderung von erhöhten Immissionen auf Siedlungsgebiete lässt sich entsprechend auch bei Südwind adaptieren. Die Berechnung der Ausbreitung der Schadstoffe kann mit Hilfe von Schadstoffmodellen wie dem LASAT-Modell (siehe Kapitel 4.3.3) abgebildet werden. Darauf aufbauend können entsprechend der vorherrschenden Windbedingungen und Verkehrsaufkommen Grenzwerte festgelegt werden. Diese Grenzwerte sind von Flughafen zu Flughafen unterschiedlich und richten sich z.B. nach dem Betriebsverfahren und der Lage der Siedlungsgebiete.

Kreuzbahnsystem

Verfügt der Flughafen über ein sich kreuzendes Start- und Landebahnsystem, kann die Verlagerung der Luftfahrzeuge ebenfalls eine Verbesserung der Immissionen auf das besiedelte Gebiet zur Folge haben. Allerdings muss bei einem kreuzenden Bahnsystem im Gegensatz zum Parallelbahnsystem die maximal zulässige Seiten- und Rückenwindkomponente je Luftfahrzeugtyp berücksichtigt werden. Nachfolgende Abbildung 5.5 zeigt ein Referenzszenario inkl. Windrichtung, Verkehr, Terminal und angrenzenden Siedlungsgebieten.

Anhand dieses Ausgangsszenarios wird ersichtlich, dass bei Süd-Ost-Wind die Start- und Landebahn mit der Nord-Süd-Ausrichtung genutzt wird. Das hat zur Folge, dass das nordwestliche Siedlungsgebiet auf Grund der Nähe zum Flughafen im Gegensatz zum südwestlichen Siedlungsgebiet stark von den Schadstoffen der an- und abfliegenden Luftfahrzeuge betroffen ist. Insofern die Seitenwindkomponente es zulässt, wäre es möglich, die Luftfahrzeuge auf die Ost-West-Bahn zu verlagern. Eine Option wäre die Separierung des an- und abfliegenden Verkehrs auf die jeweiligen Start- und Landebahnen.

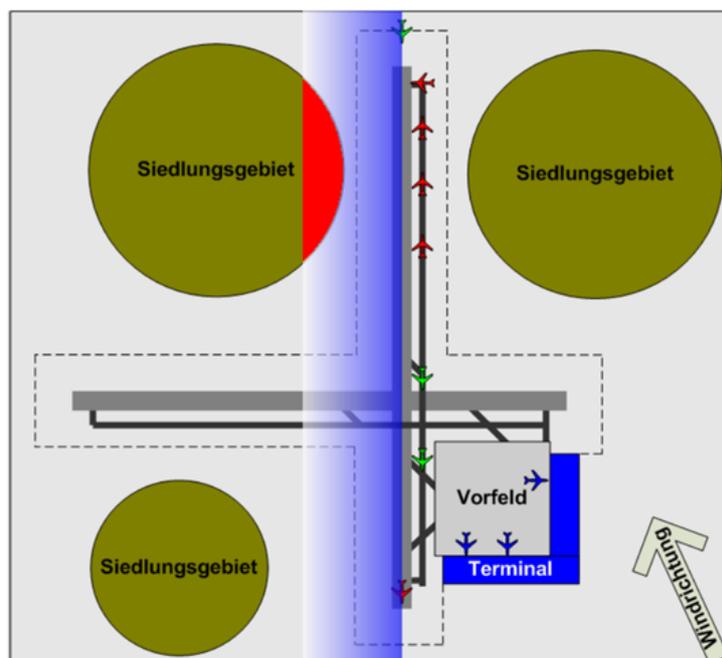


Abb. 5.5: Kreuzbahnsystem - Ausgangsszenario [107]

Aber auch ein Verkehrsmix wäre denkbar, welcher von den entsprechenden Betriebsformen und Richtlinien an den jeweiligen Flughäfen abhängig ist. Beispielhaft wurde in Abbildung 5.6 der anfliegende Verkehr auf die Ost-West-Bahn verlagert und der abfliegende Verkehr startet auf der ursprünglichen Start- und Landebahn [107].

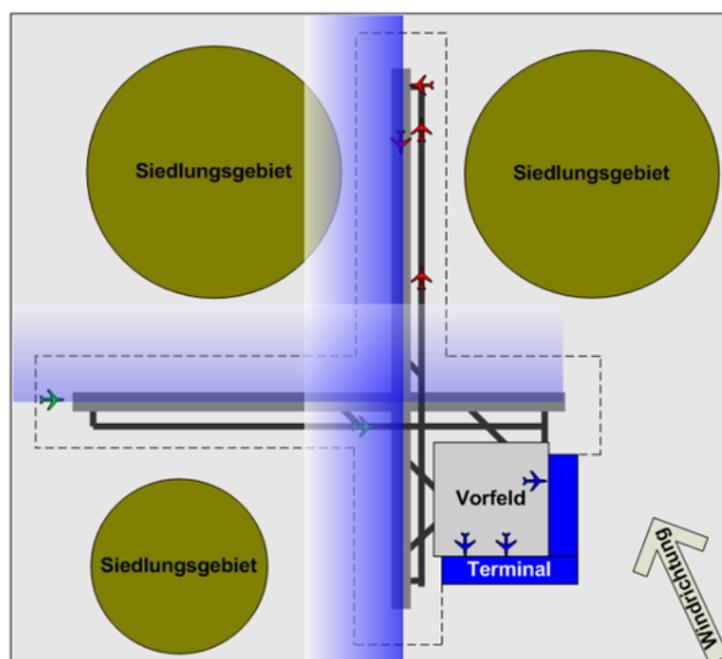


Abb. 5.6: Kreuzbahnsystem - Verkehrsverlagerung [107]

Mit diesem Verfahren der Verlagerung können die Immissionen auf das nordwestlichen

Siedlungsgebiets minimiert werden.

Diese Möglichkeit der Verkehrsverlagerung ist kurzfristig einsetzbar, minimiert aber nicht die eigentlichen Schadstoffmengen, sondern verlagert diese möglichst optimal, sodass die Luftqualität in den Siedlungsgebieten verbessert wird. Außerdem erfordert eine solche Verlagerung eine Flexibilisierung der Start- und Landebahn-Nutzung, welche bisher an den Flughäfen nur selten gegeben ist [107].

Sonstige Potentiale zur Minimierung der Schadstoffe liegen in der Verkehrsvermeidung und -beschränkung. Hierbei gäbe es die Möglichkeit, die Starts und Landungen auf einem Flughafen strikter festzulegen. Demnach wird an allen Flughäfen ein Eckwert definiert, der nicht überschritten werden darf. Wenn eine Überschreitung festgestellt wird, dann muss darauf aufbauend der Flug entweder komplett gestrichen oder in ein anderes Zeitfenster verschoben werden, in dem der Eckwert ggf. noch nicht erreicht wurde. Diese Verlagerung führt, insofern es ein ankommendes Luftfahrzeug betrifft, zu dem negativen Aspekt, dass es entsprechend Warteschlangen fliegen muss, bevor es landen kann. Somit sinkt zwar die direkte Schadstoffbelastung am Flughafen. Diese steigt aber an anderer Stelle, sodass dieses Verfahren nicht zielführend ist. Eine Einschränkung wäre durch die Vergabe von Slots für alle kommerziellen Flugbewegungen an allen Flughäfen zu Beginn einer Flugplan-Periode sinnvoll, bei der sich alle Beteiligten frühzeitig darauf einstellen können. Entstehen dann während des Flugbetriebs zusätzliche freie Slots, können diese wiederum vergeben werden.

Als Abschluss dieses Kapitels dient die Übersicht auf der folgenden Seite (Tabelle 5.4), die noch einmal zusammenfasst, welche Potentiale im operativen Bereich existieren und mit welchen, falls bekannt, Einsparungen hinsichtlich Treibstoff bzw. CO₂ gerechnet werden kann.

Maßnahmen	Einsparpotential
CDA	50 kg -150 kg Treibstoff pro Flug (A320), 158 kg - 473 kg CO ₂ pro Flug (A320)
Low Drag / Low Power	unbekannt
Point Merge	65 s von 3000 ft bis zur Landung bzw. von FL100 bis zur Landung ein CO ₂ -Einsparung von 3%
Green Wave (kein FCFS)	1800 t CO ₂ pro Jahr
Vermeidung von Holdings	244 kg - 923 kg CO ₂ pro Flug
Arrival Manager	unbekannt
Verkehrslage-Display	unbekannt
dynamische Rollführung	unbekannt
Single Engine Taxiing	1.500 t CO ₂ pro Jahr, 4,49 kg/min Treibstoffverminderung
elektrisches Rollen	unbekannt, mit APU Einsparpotential liegt bei 0,2331 kg/s im Vergleich zum Rollen mit zwei Triebwerken
Schlepper für das Rollen	unbekannt und abhängig von Energiezufuhr
CCD	50 kg Treibstoff pro Flug bei A320 bis FL240
Verhinderung Steilstartverfahren	unbekannt
Departure Manager	unbekannt
Verkehrsverlagerung	keine Einsparungen
Verkehrsbeschränkung/-vermeidung	unbekannt

Tabelle 5.4: Zusammenfassung der Potentiale operativer Verfahren zur CO₂-Minderung

5.2 Prozesssteuerung mittels CO₂ basierter Leistungsindikatoren am Modellflughafen

In diesem Kapitelabschnitt werden abschließend Monitoring und Darstellungsmöglichkeiten von CO₂-Emissionen aufgezeigt. Außerdem werden verschiedene Szenarien betrachtet, inwiefern die CO₂ basierten Leistungsindikatoren in ein TAM System bzw. einen Flughafenleitstand integriert werden können und welche Auswirkungen operative Verfahren speziell auf den Modellflughafen haben.

5.2.1 Darstellungs- und Monitoringmöglichkeiten in einem Flughafenleitstand

Um den Erfolg der Durchführung operativer Maßnahmen zur CO₂-Minimierung messen zu können, ist es zunächst erforderlich, dass die Schadstoffmengen kontinuierlich berechnet

werden. Die Methode zur Berechnung wurde bereits in Kapitel 4 vorgestellt. Die notwendigen Informationen und Kennzahlen müssen in komprimierter Form den Anwendern und damit den Stakeholdern des Flughafens im Leitstand zur Verfügung gestellt werden. Dabei existieren verschiedene Möglichkeiten des Monitorings bzw. der Darstellung. Hinzu kommt, dass die Zuständigkeit des Überwachens der Schadstoffe unterschiedlich sein kann:

- Monitoring durch Umweltmanager
- Monitoring der Schadstoffmengen für die einzelnen Flughafenprozesse unterteilt nach Stakeholdern
- Monitoring über die Integration in ein gemeinsames System
- Individuelles Schadstoffsimulationsmodell

Diese vier genannten Möglichkeiten sollen im Folgenden genauer beschrieben werden. Eine Variante wäre es, die Umweltaspekte und das damit verbundene Monitoring einer neuen Instanz im Flughafenleitstand zuzuordnen, sodass gewährleistet werden kann, dass diese Instanz zu jeder Zeit einen komplexen und aktuellen Überblick über die CO₂-Emissionen und ggf. andere umweltrelevanten Aspekte, wie z.B. Lärm, hat. Dies hätte den Vorteil, dass entsprechend diese eine Instanz (Umweltmanager) ausschließlich die Schadstoffmengen überblickt, welche am und um den Flughafen ausgestoßen werden und darauf aufbauend entsprechende Maßnahmen mit den beteiligten Stakeholdern abstimmen kann. Außerdem könnten die am Flughafenprozess Beteiligten ihre Arbeit mehr auf das Tagesgeschäft fokussieren. Ein Nachteil hingegen wäre, dass die anderen Stakeholder keinen genauen Überblick über die Schadstoffsituation haben und somit auch das Bewusstsein für den Aspekt der Umwelt nicht gefördert sowie das Umsetzen von Maßnahmen erschwert wird.

Eine weitere Variante wäre das Monitoring der CO₂-Emissionen am Flughafen getrennt nach Stakeholdern. Das hat zum Vorteil, dass die einzelnen Stakeholder in ihrem Bereich mögliche Optimierungsmaßnahmen durchführen können und zu jeder Zeit einen optimalen Überblick über die in dem jeweiligen Prozess entstandenen Emissionen haben. Zum besseren Verständnis dient nachfolgende Abbildung 5.7¹, welche die Beteiligten an den jeweiligen Flughafenprozessen darstellt.

¹Insofern die Vorfeldkontrolle nicht von der FLugsicherung durchgeführt wird, kann auch der Flughafen an diesem Prozess beteiligt sein

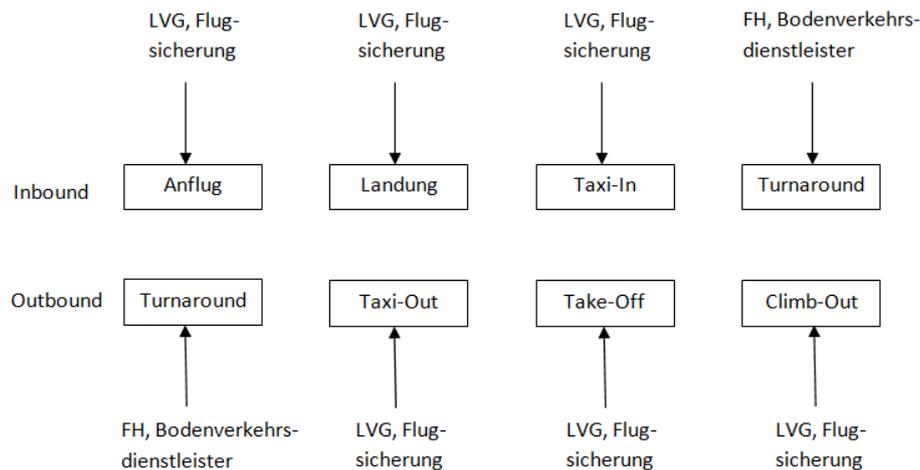


Abb. 5.7: Beteiligte Stakeholder an den Flughafenprozessen

Auf Grund dessen, dass die Emissionen entsprechend des LTO-Zyklus berechnet werden, ist dies eine einfache Möglichkeit, diese Daten aufzubereiten und entsprechend darzustellen. Der negative Aspekt, dass ggf. nur einzelne Personen über die in einem Flughafenprozess entstandenen Emissionen einen Überblick haben, kann durch eine zusätzliche Anzeige der Gesamtmenge an Emissionen vermieden werden. Dieser Überblick kann z.B. in Form eines Balkendiagramms dargestellt werden. Dazu kann auch die Variante der Integration in ein bestehendes System bzw. in jenes, welches im Zuge eines Flughafenleitstands zum Einsatz kommt, erfolgen. Zum Beispiel existieren Systeme, welche die Performance in Form der Pünktlichkeit für jede Stunde darstellen. Hier kann die Anzeige der Emissionsmenge integriert werden, sodass auch eine direkte Korrelation mit der Pünktlichkeit ermöglicht wird. Das Monitoring kann zudem mittels eines eigenständigen Schadstoffsimulationsmodells dargestellt werden, allerdings müssen Nachteile akzeptiert werden. Zwar kann eine gute und übersichtliche Darstellung erfolgen, aber oftmals können mit den Modellen keine Berechnungen auf Basis fortwährend aktualisierter Daten während eines Flugbetriebstages vorgenommen werden. Die Modelle dienen vorrangig dem Simulieren von Maßnahmen, sodass diese eigenständigen Systeme für mögliche Szenarien und deren Auswirkung gut geeignet sind, aber für eine direkte Anwendung in einem Flughafenleitstand wegen der Komplexität und dem Wirkbereich zur Zeit nicht für diesen Einsatzbereich genutzt werden können. Im besten Falle ist es möglich, für die einzelnen Stakeholder die spezifischen Emissionen (wobei der Turnaround vernachlässigt wird) mit der Option anzuzeigen, einen gesamten Überblick über die Schadstoffmenge im Untersuchungsraum zu erhalten. Hierbei sollte der Flughafen in jedem Fall darauf achten, dass die Informationsmenge so gering wie möglich ist, um jeder Zeit einen Überblick über den Stand des Schadstoffausstoßes zu erhalten.

Die Darstellung der Emissionen kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen und sollte nach den persönlichen Belangen der einzelnen Mitarbeiter einstellbar sein. Dabei können die einzelnen Kennzahlen als Tachometer, Thermometer, Ampel oder auch in Form von Balken- und Säulendiagrammen dargestellt werden. Um einen Prozesszustand möglichst schnell identifizieren zu können, kann die Darstellung der Emissionsmengen in verschiedenen Farben (grün, gelb und rot) vorgenommen werden. Hierbei wird dem Nutzer schnell

signalisiert, ob innerhalb eines Zeitfensters sehr viele Emissionen ausgestoßen wurden oder in einem angemessenen Rahmen. Eine genauere Betrachtung einer möglichen Darstellungsform erfolgt an dieser Stelle nicht, da es nicht Gegenstand der Arbeit ist. Zu beachten ist allerdings, insofern eine farbliche Darstellung erfolgt, dass alle Nutzer die Intention der Farbgebung kennen und wissen, zu welchen Zeitpunkten es sinnvoll ist, Maßnahmen einzuleiten. Auf Grundlage der obigen Ausführungen existieren demnach einige Anforderungen an ein Monitoringkonzept von CO₂ basierten Leistungsindikatoren in einem Flughafenlestand:

- klare und schnelle Übersicht
- transparente Strukturen
- differenzierte Sichtweisen pro Stakeholder, Flughafenprozess oder Luftfahrzeug
- Aktualisierung entsprechend der Anforderungen des Flughafens
- Konfigurationsmöglichkeiten (anwenderspezifisch)
- (Möglichkeit der Implementierung in vorhandene Systeme zur Kosteneinsparung)

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist, dass sich die Stakeholder auf eine bestimmte Menge von Kennzahlen festlegen sollten, um einen Informationsüberfluss zu verhindern und um zu gewährleisten, dass die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen KPIs bekannt sind.

5.2.2 Szenarien zur Prüfung des Einsatzes operativer Maßnahmen am Modellflughafen und in Bezug auf ein TAM

Es werden beispielhaft folgende Szenarien bezüglich ihres Einsatzes in einem Total Airport Management genauer untersucht:

- Single Engine Taxiing am Beispiel eines A320-200
- Erhebung von CO₂ bezogenen Gebühren
- Festlegung eines Grenzwertes

Diese Szenarien dienen exemplarisch zur Anschauung, wobei weitere Möglichkeiten zur Steuerung am Flughafen, in Abhängigkeit der Flughafengröße und Struktur, in Frage kommen können. Das Koppeln verschiedener Szenarien wäre ebenfalls eine Variante. Somit könnte z.B. ein Grenzwert pro Luftfahrzeugtyp festgelegt und entsprechend bei Überschreitung ein Emissionsentgelt gezahlt werden.

Bei der Betrachtung der Szenarien ist es zunächst von Vorteil, die einzelnen Zuständigkeitsbereiche im Inbound und Outbound zu kennen, um die entsprechenden Stakeholder, welche für die Maßnahmen verantwortlich sind bzw. diese umsetzen müssen, herauszufiltern, siehe hierzu Abbildung 5.7. Außerdem soll das Ausgangsszenario kurz dargestellt werden. Dabei wurden Flugplandaten einer Woche untersucht. Die Untersuchung erfolgt

entsprechend des LTO-Zyklus, wie bereits in Kapitel 4.4.1 beschrieben. Die beiden nachfolgenden Tabellen stellen dabei die Daten zum einen der Departures und zum anderen der Arrivals dar. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Anzahl der Arrivals (1177) nicht mit denen der Departures (1094) übereinstimmt, was vorrangig sowohl aus der Datenverfügbarkeit des Flugplans und der A-SMGCS Daten als auch aus den Triebwerksdaten resultiert, welche teilweise nicht vorhanden waren.

	Ø-Werte pro LFZ	Gesamt (eine Woche)
Approach Zeit [min] ab 3000 ft	3,94	/
Taxi-In Zeit [min]	4,91	/
Taxi-Out Zeit [min]	8,44	/
Take-Off Zeit [min]	0,58	/
Climb -Out Zeit [min]	0,84	/
KPI _{FF,Approach} [kg]	145,33	171.080,31
KPI _{FF,Taxi-In} [kg]	64,54	75.892,80
KPI _{FF,Taxi-Out} [kg]	110,69	121.182,58
KPI _{FF,Take-Off} [kg]	74,22	81.011,55
KPI _{FF,Climb-Out} [kg]	89,93	98.486,45
KPI _{FF,Gesamt} [kg]	96,94	547.653,69
KPI _{CO2,Approach} [kg]	457,79	538.902,99
KPI _{CO2,Taxi-In} [kg]	203,30	239.062,32
KPI _{CO2,Taxi-Out} [kg]	354,05	387.022,58
KPI _{CO2,Take-Off} [kg]	237,91	259.268,75
KPI _{CO2,Climb-Out} [kg]	287,66	314.516,13
KPI _{CO2,Gesamt} [kg]	308,14	1.738.772,77

Tabelle 5.5: Berechnete Ist-Werte mittels Flugplan- und A-SMGCS-Daten

Diese und weitere Daten können Anhang C entnommen werden. Nachfolgende Abbildung 5.8 stellt diese Daten grafisch dar, wobei die Anteile der Emissionen und Treibstoffverbräuche entsprechend pro Luftfahrzeug normiert wurden, sodass der Anteil an Emissionen und Treibstoffverbrauch pro Luftfahrzeug in den einzelnen Phasen des LTO-Zyklus verdeutlicht werden kann.

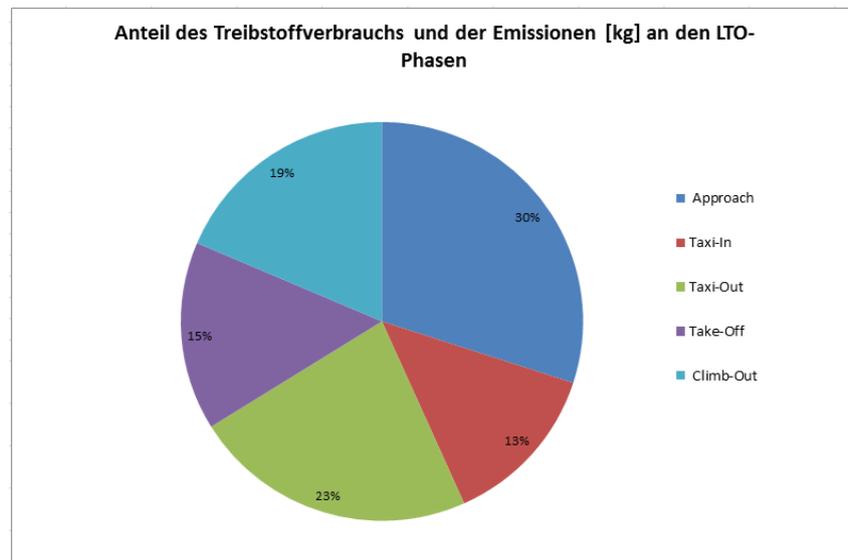


Abb. 5.8: Anteile des Treibstoffverbrauchs/Emissionen innerhalb des LTO-Zyklus

Anhand Abbildung 5.8 wird ersichtlich, dass sich entsprechend der Flugphasen, insofern eine Einteilung von Anflug (Approach), Bodenbewegung und Abflug vorgenommen wird, die Emissionen ungefähr zu gleichen Teilen splitten, das heißt, ca. 30 % entfallen auf diese einzelnen Bereiche. Das zeigt, dass in allen Bereichen der Optimierungsbedarf in gleichem Maße erfüllt werden sollte. Diese Aussage kann sicherlich nicht pauschalisiert werden und trifft somit nur auf den Modellflughafen zu. Anhand Tabelle 5.5 kann festgehalten werden, dass die zuvor aufgestellten KPIs zur Darstellung des Ist-Zustands am Flughafen bezüglich Emissionen und Treibstoffverbrauch berechenbar und somit zur Untersuchung geeignet sind.

Außerdem wird ersichtlich, dass im Vergleich zu den vorgegeben Verweilzeiten in den einzelnen Flugphasen diese beim Modellflughafen stark abweichen (Vergleich siehe Abbildung 4.7). Diese Erkenntnis zeigt, dass es wichtig ist, bei der Erstellung von Leistungskennzahlen, einem entsprechenden Monitoring und einer darauf aufbauenden Prozesssteuerung, die LTO-Zeiten entsprechend dem Flughafen anzupassen, da sonst die Emissionswerte zu ungenau und vor allem im Falle des Modellflughafens zu hoch sind.

Im weiteren Verlauf werden aufbauend auf diesen Werten die Szenarien untersucht und, falls möglich, entsprechende Auswirkungen auf die Emissionen und den Treibstoffverbrauch als Reaktion auf eingeführte Maßnahmen verdeutlicht.

Single Engine Taxiing

Das Potential dieser operativen Maßnahme innerhalb des Flugbetriebs wurde bereits in Kapitel 5.1.2 erläutert. An dieser Stelle wird diese Prozedur erneut aufgegriffen, um am Beispiel des Modellflughafens und im Speziellen der A320-200 Flugbewegungen das Einsparpotential aufzuzeigen. Dieses Verfahren kann nach der Landung zum Einsatz kommen, das heißt, nach dem Verlassen der Start- und Landebahn wird ein Triebwerk ausgeschaltet, sodass bei dem Airbus statt zwei Triebwerken lediglich nur noch ein Triebwerk den Schub zum Rollen liefert. Als Referenz dient das Standardverfahren. Tabelle 5.6 gibt

einen Überblick über die Anzahl an A320-200 Arrivals und die zugehörigen Treibstoff- und Emissionswerte der betrachteten Woche. Die Werte entsprechen den Schubdaten des LTO-Zyklus in Höhe von 7 %.

LFZ- Bewegungen	∅ Taxi-In Zeit [min]	∅ Treibstoffver- brauch Taxi-In [kg]	∅ Emissionen Taxi-In [kg]	Treibstoffver- brauch Taxi-In [kg]	Emissionen Taxi-In [kg]
309	4,98	65,78	207,2	20.325,58	64.025,58

Tabelle 5.6: Ist-Werte des Modellflughafens beim Taxi-In der A320-200 Luftfahrzeuge

Wird nach der Landung direkt ein Triebwerk ausgeschaltet, kann davon ausgegangen werden, dass bei konstanter Taxi-In Zeit und gleichbleibendem Schub ein Einsparpotential von 50 % vorherrscht und demnach der Treibstoffverbrauch für diese Referenzwoche bei 10.162,79 kg bzw. 10,16 t und damit die Emissionen nur noch bei 32.012,79 kg CO₂ (bzw. 32,01 t CO₂) liegen. Diese Werte können aber im alltäglichen Flughafenbetrieb nicht als realistisch angesehen werden, da das Rollen mit nur einem Triebwerk zur Erhöhung der Rollzeiten führt, sodass verschiedene Studien von z.B. Airbus oder Spanair auch unterschiedliche Werte angeben. Es wird von einer Treibstoffeinsparung von 10-40 % ausgegangen [108], [104]. Im Falle des Modellflughafens könnte für die entsprechenden A320-200 Luftfahrzeuge in der betrachteten Woche zwischen 2,03 t und 8,13 t Treibstoff (6,4 t und 25,61 t CO₂) eingespart werden. Würden alle Taxi-In Prozesse aller Luftfahrzeuge dieser einen Woche berücksichtigt, so hätte an dem Modellflughafen bei insgesamt 1177 Flugbewegungen und einem Treibstoffverbrauch von 75.892,80 kg (75,89 t) zwischen 7,59 t (23,9 t CO₂) und 30,36 t (95,63 t CO₂) Treibstoff eingespart werden können. Pro Tag entspräche das, bei der durchgängigen Durchführung des Single Engine Taxiing, einer CO₂-Minimierung zwischen 11,95 t und 47,82 t CO₂.

An dieser Stelle wird deutlich, dass ein merkliches Einsparpotential vorliegt, allerdings mit dem negativen Aspekt, dass längere Rollzeiten in Kauf genommen werden müssen. Aus diesem Grund sollte versucht werden, den Einfluss auf eine längere Rollzeit zu minimieren. Insofern dies nicht gelingt, könnte dieses Verfahren unter folgender Voraussetzung, dass ein abfliegendes Luftfahrzeug länger als geplant den Standplatz eines anfliegenden Luftfahrzeugs belegt, angewendet werden. Hier kann, insofern die Rollwege frei sind, ein Triebwerk ausgeschaltet und entsprechend langsam zur Position gerollt werden, um ein Warten mit zwei laufenden Triebwerken vor der Position zu vermeiden. In einem Flughafenleitstand ist diese Prozedur definitiv denkbar und durch eine direkte und schnelle Kommunikation sowie mit entsprechenden Unterstützungssystemen kurzfristig realisierbar, da die langen Kommunikationswege zwischen den betroffenen Stakeholdern entfallen und mögliche Unterstützungssysteme frühzeitig eine längere Standplatzbelegung signalisieren können.

In diesem Abschnitt wurde lediglich das Single Engine Taxiing nach der Landung betrachtet, es kann aber auch vor dem Start und demnach beim Taxi-Out eingesetzt werden. Hier ist aber zu beachten, dass die durchschnittliche Taxi-Zeit am Modellflughafen bei acht Minuten liegt. Wird berücksichtigt, dass eine Triebwerkswarmlaufzeit in Höhe von fünf Minuten erfolgen muss, dann könnte durchschnittlich drei Minuten lang ein Triebwerk ausgeschaltet bleiben. Zudem muss am Flughafen sichergestellt werden, dass das Anlas-

sen der Triebwerke auf den Rollwegen möglich ist. An dieser Stelle muss allerdings zu stark in die Abläufe und Gegebenheiten des Flughafens eingegriffen werden, sodass dieses Verfahren bei einer Größe entsprechend des Modellflughafens nicht sinnvoll erscheint. Für größere Flughäfen, welche auch längere Rollzeiten aufweisen, kann dieses Verfahren lohnenswert sein.

Erhebung von CO₂ bezogenen Gebühren

Diese Möglichkeit ist erst mit Hilfe der Messungen bzw. Berechnungen von CO₂-Werten möglich und begünstigt demnach die Einführung von CO₂ basierten Leistungsindikatoren, da ggf. erst ab einer gewissen Überschreitung von bestimmten Zielwerten eine Gebühr erhoben werden könnte. Somit kann ein Gebührensystem auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen:

1. Entsprechend einer emissionsbezogenen Landegebühr: Diese Gebühr kann analog zu der ohnehin schon vorhandenen NO_x-Gebühr erhoben und über folgende Formel berechnet werden:

$$CO_{2,LFZ} = \frac{n_{TW} \cdot \sum_{i=1}^4 t_i \cdot F \cdot EI}{1000} \quad (5.1)$$

$CO_{2,LFZ}$	Menge an ausgestoßenen Kohlenstoffdioxiden pro Luftfahrzeug [kg]
n_{TW}	Anzahl Triebwerke
t_i	Dauer der einzelnen Phasen i des LTO-Zyklus [s]
F	Treibstoffverbrauch [kg/s]
EI	Emissionsindex [g/kg]

Ein entsprechender Geldwert muss von den Flughäfen selbst festgelegt werden. An dieser Stelle kann aber festgehalten werden, dass eine weitere Gebühr lediglich zu Lasten der Fluggesellschaften geht und kein verbessertes Verkehrsmanagement durchgeführt wird. Hinzu kommt, dass bei einer Gebührenerhebung die Einnahmen entsprechend dem Umweltschutz zu Gute kommen oder beispielsweise in neue schadstoffarme Bodenfahrzeuge investiert werden sollten. Andernfalls ist der Zweck dieser Gebühr nicht gegeben.

2. Die Erhebung von Gebühren nicht pro Luftfahrzeug und entsprechend der ausgestoßenen Menge an CO₂, wie eingangs beschrieben, sondern erst zu dem Zeitpunkt, bei dem ein Luftfahrzeug einen vom Flughafen festgesetzten Grenzwert überschreitet, stellt eine zweite Möglichkeit zur Gebührenerhebung dar. Das führt dazu, dass alle angehalten sind, die Luftfahrzeuge möglichst schadstoffarm am Boden und im Flughafennahbereich zu lenken. Mit Hilfe der Leistungsindikatoren ist es möglich, verschiedene Kategorien zu erarbeiten, welche es ermöglichen sollen, Grenzwerte festzulegen. Diese Kategorien unterteilen sich beispielsweise nach Luftfahrzeugklassen, sodass ein Luftfahrzeug mit der Gewichtsklasse „Medium“ mehr CO₂ ausstoßen darf als eines der Gewichtsklasse „Light“, wobei für jede Klasse ein Höchstwert existiert. Außerdem ist es sinnvoll, aufbauend auf dem Flughafenlayout, die einzelnen

Rollweglängen entsprechend der Start- und Landebahn mit einzubeziehen, sodass kein Nachteil für die Luftfahrzeuge entsteht, welche einen längeren Weg von und zur Start- und Landebahn haben.

3. Eine weitere Möglichkeit im Zuge eines Total Airport Managements wäre, den Stakeholdern, welche eine Verspätung verursacht haben, welche mit einer Erhöhung des Treibstoffverbrauchs und des Emissionen einhergeht, eine „Verspätungsgebühr“ aufzuerlegen. Das hätte den Vorteil, dass nicht, wie bei der ersten Variante, nur die Luftverkehrsgesellschaften eine Gebühr zahlen müssen, sondern die Verursacher. Eine Möglichkeit zur Erhebung dieser Gebühr liegt in den Delay Codes. Aus diesen geht hervor, welche Stakeholder für eine Verspätung verantwortlich waren. In Zusammenarbeit mit den Beteiligten in einem Flughafenleitstand können diese Delay Codes genauer untersucht und ggf. auch mit Rücksprache mit den Stakeholdern korrigiert werden.
4. Eine weitere Möglichkeit zur Erhebung von Gebühren mittels CO₂ basierten Leistungsindikatoren entspräche der des Emissionshandels. Im TAM-Konzept könnte bei der strategischen Planung beispielsweise festgelegt werden, wie viele Luftfahrzeuge pro Luftfahrzeugkategorie (heavy, medium, light entsprechend der Gewichtsklasse) auf Grund von einem eingangs festgelegten Emissionsgrenzwert, welcher beispielsweise von der EU vorgegeben wird, akzeptiert werden. Demnach kosten zusätzliche Flüge einer Luftfahrzeugkategorie mehr Geld. Es wäre dann möglich, auf Grundlage der Anteile an Flugbewegungen einer LVG an der Gesamtbewegungsanzahl die kostenfreien Flüge zu errechnen. Werden mehr Flüge als (kostenfrei) vorgesehen von der LVG durchgeführt, so müssen Abgaben gezahlt werden.

Diese zusätzlichen Einnahmen, welche durch ein Gebührensystem generiert werden, sollten zweckgebunden sein, damit diese Einnahmen auch der Umwelt zu Gute kommen. In welcher Art und Weise die Einnahmen investiert werden, sollten die Stakeholder gemeinsam entscheiden.

Festlegung eines Grenzwertes

Eine weitere Möglichkeit zur Minimierung der CO₂-Emissionen wäre eine Prozesssteuerung über die Definition von Luftschadstoffgrenzwerten für den Flughafen und dessen Nahbereich. Diese Grenzwerte können auf Grundlage der ermittelten Leistungskennzahlen siehe Tabelle 5.5 bestimmt werden.

Wird ein strikter Grenzwert für den Ausstoß an CO₂-Emissionen bestimmt, bedeutet das unter Umständen, dass bei Erreichen dieses Wertes am Flughafen vor dem eigentlich Ende des Flugbetriebstages, Luftfahrzeuge nicht mehr starten bzw. landen dürfen. Das hätte zur Folge, dass für diese möglichen Ausfälle von einer Instanz, die womöglich der Flughafen sein wird, da dieser den Grenzwert für die Kosten festgelegt hat, welche für so einen Ausfall entstehen, aufkommen muss. Kosten können dabei entstehen, wenn ein geplanter Flug samt Passagieren den Flughafen nicht mehr verlassen darf und somit der Flug auf den Folgetag verschoben werden muss. An dieser Stelle ist es fragwürdig, ob der Flughafen dieses Risiko eingehen wird. Außerdem ist es wahrscheinlich bei der Festlegung eines strikten Grenzwertes, dass an den Flugbetriebstagen immer die Luftverkehrsgesellschaften betroffen sind, welche ihre Flüge am Ende des Tages durchführen. Dies kann wiederum

dazu führen, dass die LVGs zum einen in der kommenden Flugplanperiode keine Flüge mehr am Abend durchführen und zum anderen ggf. diesen Flughafen nicht mehr anfliegen werden. Ein positiver Aspekt hingegen ist, dass alle Stakeholder daran interessiert sind, die Emissionen so gering wie möglich zu halten und sich vermehrt für schadstoffarme Verfahren einsetzen sowie gewillt sind, diese zeitnah umzusetzen. Dennoch wird dieses Szenario derzeit als unrealistisch betrachtet, da die negativen Aspekte überwiegen und mit starken Konsequenzen in Form von Flugstreichungen und hohen Kosten verbunden sind. Dieses Konzept wird dann realistisch, wenn alle Flughäfen auf Grund von rechtlichen Aspekten dazu angehalten werden, eine bestimmte Schadstoffgrenze nicht überschreiten zu dürfen. Bis ein einheitlicher Wert pro Flughafen bindend festgelegt wird, wird es noch Zeit in Anspruch nehmen. Hinzu kommt, dass bei Festlegung eines strikten Grenzwertes der CO₂-Emissionen ein zukünftiges Wachstum des Flughafens und damit des Luftverkehrs behindert werden kann.

Hingegen ist ein Richtwert entsprechend der Ausführungen 2. und 4. bei der Erhebung von CO₂ bezogenen Gebühren denkbar und im Rahmen eines Total Airport Managements auch umsetzbar, sodass mit Hilfe eines Ampelsystems entsprechende Überschreitungen erkennbar gemacht werden, sowohl mit Hilfe von Planzeiten als auch nach einem Flugbetriebstag bzw. nach der Landung oder dem Start. Damit ist es möglich, frühzeitig in den Flugbetrieb eingreifen zu können, beispielsweise mittels Single Engine Taxi, sodass eine Überschreitung verhindert werden kann. Tritt der Fall eines Ausstoßes zu hoher Mengen an CO₂ ein, so können mit Hilfe der Einnahmen Ausgleichsmaßnahmen erfolgen.

An dieser Stelle soll ein Beispiel folgen, siehe dazu auch nachstehende Tabelle 5.7 und Anhang D. Am 28.06.2013 fanden insgesamt 51 A320-200 Anflüge auf die Start- und Landebahn 15 statt. Wird als Grenzwert die durchschnittliche wöchentliche Emissionsmenge dieses Luftfahrzeugtyps von CO₂ in Höhe von 666,14 kg² angesetzt, so wird allen Flugbewegungen oberhalb dieses Ausstoßes eine Gebühr auferlegt. Insgesamt überschritten 15 Luftfahrzeuge mit einer Gesamtschadstoffmenge von 1111,37 kg CO₂ am untersuchten Tag diese Grenze von 666,14 kg CO₂.

Insofern die Maßnahme des Single Engine Taxi Anwendung gefunden hätte (Ersparnis von 25 %³), würde die Anzahl auf acht Luftfahrzeuge fallen und die Emissionsmenge auf 594,33 kg CO₂ sinken. An dieser Stelle wird deutlich, dass mit Hilfe dieser Maßnahme bei den betrachteten Arrivals ein großes Potential besteht, die Emissionen zu minimieren. Würden weitere Möglichkeiten wie das CDA-Verfahren eingesetzt, würde es in diesem Beispiel zu noch weniger Überschreitungen des Grenzwertes oder gar zum Ausbleiben von Überschreitungen kommen.

²Betrachtung der LTO-Phase Approach und Taxi-In

³Mittelwert von Ersparnis zwischen 10 % und 40 %

	KPI _{CO₂,Approach} [kg]	KPI _{CO₂,Taxi-In} [kg]	KPI _{CO₂,Gesamt} [kg]	666,14 kg CO ₂ – KPI _{CO₂,Gesamt} [kg]	KPI _{CO₂,Taxi-In} neu [kg]	KPI _{CO₂,Gesamt} neu [kg]
1	431,75	297,99	729,74	63,60	223,49	655,24
2	606,78	130,28	737,06	70,92	97,71	704,49
3	525,10	169,78	694,88	28,74	127,34	652,44
4	548,44	184,34	732,77	66,63	138,25	686,69
5	618,45	172,56	791,01	124,87	129,42	747,87
6	443,42	224,53	667,95	1,81	168,40	611,82
7	548,44	158,00	706,44	40,30	118,50	666,94
8	606,78	124,05	730,83	64,69	93,04	699,82
9	455,09	234,93	690,01	23,87	176,20	631,28
10	606,78	230,08	836,86	170,72	172,56	779,34
11	548,44	147,61	696,05	29,91	110,71	659,14
12	723,47	132,36	855,83	189,69	99,27	822,74
13	548,44	142,07	690,50	24,36	106,55	654,99
14	676,79	185,03	861,82	195,68	138,77	815,57
15	525,10	156,62	681,72	15,58	117,46	642,56

Tabelle 5.7: Berechnete KPIs mit und ohne Single Engine Taxi

Die Überlegungen zu einer Integration von KPIs in ein Total Airport Management sind denkbar und auch umsetzbar. Zunächst sollte damit begonnen werden, dass alle Stakeholder entsprechend vorher festgelegte KPIs, welche besonders wichtig für den Flughafen erscheinen, in den Flughafenleitstand integriert werden.

Damit soll sichergestellt werden, dass jeder Stakeholder ein Grundverständnis für diese Problematik entwickelt. Im weiteren Verlauf sollten Daten gesammelt und im Nachgang ausgewertet werden, um bei einer Identifizierung von erhöhten Schadstoffmengen mögliche operative Maßnahmen einzuleiten. Diese Maßnahmen müssen nach der Implementierung in den Flugbetrieb hinsichtlich der Auswirkungen, sowohl auf die CO₂-Emissionen als auch auf mögliche negative Einflüsse auf andere KPIs, wie die Pünktlichkeit, untersucht werden. Folgende Abbildung 5.9 gibt noch einmal einen Überblick über eine Einführung von CO₂ basierten Leistungsindikatoren in ein Total Airport Management.

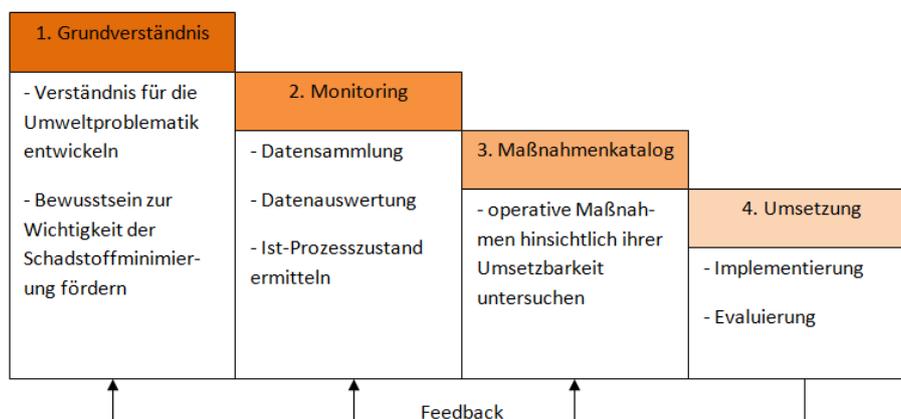


Abb. 5.9: Implementierungsschritte für CO₂ basierte Leistungsindikatoren

Ein Total Airport Management bzw. ein Aufbau eines Flughafenleitstands und der damit verbundenen Integration aller am Flughafenprozess Beteiligten begünstigt eine Einführung von CO₂-Indikatoren, weil nur unter Einbeziehung aller Stakeholder eine Verbesserung der Schadstoffmengen am Flughafen erreicht werden kann. Somit können gemeinsame Absprachen getroffen werden. Das ist vor allem vor dem eigentlichen Flugereignis notwendig, da im Nachgang keine Emissionen mehr eingespart werden können. Hierzu muss der Flughafen aber ausreichend Systeme zur Verfügung stellen, welche die Performance am Flughafen abbilden, sodass der Flughafenbetrieb vorausschauend geplant werden kann und somit auch die CO₂ basierten Leistungsindikatoren zum Einsatz kommen können.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem steigenden politischen Interesse und der Forderung seitens der Bevölkerung nach mehr Umweltschutz im Luftverkehr muss auch dieser Verkehrsträger mehr und mehr umweltschonende Techniken und Verfahren ein- und umsetzen. Dies gilt vor allem auch für Flughäfen, welche auf Grund ihrer Nähe zu Siedlungsgebieten, auf Grund von Schadstoffkonzentrationen und Lärm im Fokus der Öffentlichkeit stehen. Während die gesetzlichen und politischen Bestrebungen eher gering sind oder nur länderspezifisch, wie z.B. der Emissionshandel, werden durch Umweltprogramme wie beispielsweise ACARE, SESAR oder Clean Sky. Ziele für die Zukunft gesteckt, die Schadstoffe zu minimieren. Eine Schwäche ist, dass nur ein geringer Anteil von operativen und technischen Maßnahmen katalogisiert wird, um diese gesetzten Ziele (insofern Maßnahmen ergriffen werden) zu erreichen, welche in den einzelnen Umweltprogrammen genannt werden wie z.B. die CO₂-Minimierung bis zum Jahr 2050 im Vergleich zum Jahr 2000 um 75 % [7]. An dieser Stelle kommt ergänzend hinzu, dass der zu erbringende Anteil an der Minimierung von Schadstoffen durch die Flughäfen nicht genau definiert wird, sodass diese lediglich dazu angehalten sind, einen Beitrag zu leisten - in unbestimmter Größenordnung. Diese Einbeziehung von Emissionen in den alltäglichen Flugbetrieb erfolgt derzeit nur sehr rudimentär, vor allem in Eigenverantwortung der einzelnen Flughäfen und oftmals beschränkt auf den Energieverbrauch der Gebäude und der Vorfeldfahrzeuge.

Auf Grund der Bedeutsamkeit der Thematik Umweltbelastungen müssen die Flughäfen und der Flugbetrieb ihre Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Umweltbelastungen bewerten und kontinuierlich optimieren. Diesbezüglich verfolgte diese Arbeit das Ziel, zweckmäßige CO₂ basierte Leistungsindikatoren für den Luftverkehrsbetrieb an einem Flughafen zu identifizieren und deren Anwendung in einem Total Airport Management System, speziell in einem Flughafenleitstand, zu prüfen.

Im Bereich des Flughafenbetriebs existieren zurzeit verschiedene Kennzahlen, welche beispielsweise die Bereiche Sicherheit, Produktivität und Wirtschaftlichkeit abdecken. Im Bereich der Umwelt existieren hingegen nur vereinzelte Key Performance Indicators. Die einzelnen Literaturquellen verweisen bei der Betrachtung der Umwelt und damit verbunden auch der Schadstoffe meist auf die Leistungskennzahlen der Effizienz, sodass mit Hilfe von Pünktlichkeits- oder Verspätungswerten ein entsprechender zusätzlicher Treib-

stoffverbrauch und damit auch CO₂-Emissionen abgeschätzt werden können. Aus diesem Grund wurden zu den bereits existierenden Leistungsindikatoren entsprechend der Zielstellungen von Umweltprogrammen weitere Leistungsindikatoren abgeleitet. Viele dieser Indikatoren können allerdings im Wirkungsbereich (bis zu 24 Stunden vor einem eigentlichen Flugereignis) des Total Airport Managements und auf Grundlage der Datenverfügbarkeit nicht betrachtet werden, sodass schlussendlich der Fokus auf den Leistungsindikatoren innerhalb des Start- und Landezyklus der Luftfahrzeuge liegt. Bei der Berechnung dieser Emissionswerte wird auf Grund der Datenverfügbarkeit auf die ICAO-Methode zurückgegriffen, welche mit steigender Datengenauigkeit, wie z.B. den Verweilzeiten, angepasst werden kann. Neben der Berechnung der einzelnen Indikatoren ist es erforderlich, diese Leistungskennzahlen entsprechend in einem Leitstand zur Verfügung zu stellen und Möglichkeiten zum Handeln bzw. die Auswirkungen von operativen Maßnahmen aufzuzeigen.

Schlussendlich kann festgehalten werden, dass die Bewertung bzw. Optimierung mit Hilfe von Indikatoren zielführend ist. Allerdings muss beachtet werden, dass verschiedene KPIs voneinander abhängig sind und eine Verbesserung eines Prozesses zur Verschlechterung eines anderen führen kann. Im Bereich der Emissionen ist die Festlegung eines strikten Grenzwertes der Emissionsmenge z.B. pro Tag nicht sinnvoll. Hier spielt vor allem eine Rolle, dass mit Erreichen eines Grenzwertes der die Luftverkehrsgesellschaften bzw. die Flugsicherung zu radikalen Mittel wie der Flugstreichung greifen müssten, und somit Luftfahrzeuge nicht mehr starten oder landen dürften. Dies hat eventuell zur Folge, dass Luftverkehrsgesellschaften ggf. den Flughafen nicht mehr anfliegen und stattdessen auf andere Routen ausweichen und dies zu Einbußen am Flughafen führt. Eine tatsächliche Alternative stellt zum Beispiel die Optimierung des Taxi-Vorgangs dar. Hierbei können zwischen 10-40 % der CO₂-Emissionen (Single Engine Taxi) eingespart werden. Eine weitere Optimierungsmöglichkeit stellt die Nutzung der Start- und Landebahn sowie der Rollwege dar (siehe Kapitel 4.1.3 Abbildung 4.3). Außerdem ist bei der Fokussierung auf die CO₂ basierten Leistungsindikatoren auch immer die Abhängigkeit und Wechselwirkung zu anderen Indikatoren zu berücksichtigen. Ein Beispiel hierfür ist, dass ein pünktliches Starten (nach verspätetem Off-Block) nur durch schnelleres Rollen erreichbar ist, sodass aber an dieser Stelle der Treibstoffverbrauch und somit die CO₂-Emissionen steigen. Dieses Beispiel steht exemplarisch für weitere, sodass der jeweilige Flughafen eine Gesamtstrategie entwickeln muss, um eine entsprechende Hierarchie innerhalb der Flughafenprozesse und der verschiedenen Indikatoren zu erarbeiten. Diese Hierarchie soll die einzelnen Stakeholder bei der Beurteilung der Abhängigkeiten unterstützen und somit ein optimales Gleichgewicht zwischen Pünktlichkeit, Kundenzufriedenheit und Umwelt herstellen.

Zunächst sollte bei der Integration dieser Leistungsindikatoren ein Monitoring Konzept im Vordergrund stehen, welches ein Bewusstsein für diese Thematik bei allen am Flughafenprozess Beteiligten für die Umweltthematik fördern soll. Die Visualisierung und Integration in einen Flughafenleitstand sollte individuell und entsprechend der Belange der einzelnen Stakeholder entwickelt werden.

In Anbetracht eines langfristigen Wachstums des Luftverkehrs und der Bewältigung der Umweltbelange müssen über die Überwachung der Schadstoffe in einem Flughafenleitstand hinaus verschiedene Möglichkeiten zur Verbesserungen in der Schadstoffbilanz unter der Berücksichtigung der anderen Leistungsparameter erfolgen. Zuerst muss aber immer

sichergestellt werden, dass ein Monitoring der Schadstoffe erfolgt, sodass Verbesserungen zielgerichtet umgesetzt werden können, und eine Kontrolle der durchgeführten Maßnahmen (z.B. Single Engine Taxiing) mit dem Ist-Zustand möglich ist. An dieser Stelle ist mit Blick auf die Zukunft empfehlenswert, dass mögliche KPIs, welche derzeit auf Grund der Datenverfügbarkeit nicht berücksichtigt werden können, wie beispielsweise die Verzögerungsfreie Positionsbelegung, in der Zukunft eine Rolle spielen können, wenn diese fehlenden Daten beschafft werden.

Literaturverzeichnis

- [1] EUROCONTROL (2012). *Performance Review Report 2012*. [PDF]. Brüssel. 2013
- [2] Spezifischer Treibstoffverbrauch (2013). *Durchschnittlicher Verbrauch der deutschen Flotte*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.bdl.aero/media/filer_public/2013/01/08/durchschnittlicher_verbrauch_der_deutschen_flotte_4_liter.png. [16.10.2013, 11:03 Uhr]
- [3] Treibstoffverbrauch (2013). *Entkopplung von Transportleistung und Treibstoffverbrauch*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.lufthansagroup.com/de/verantwortung/klima-und-umweltverantwortung/kerosin-und-emissionen.html>. [16.10.2013, 10:34 Uhr]
- [4] Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V. *Öko-effizientes Fliegen*. [PDF]. Berlin. o.J.
- [5] Jürgen Armbruster. *Flugverkehr und Umwelt*. o.O. 1995
- [6] Umweltziele von SESAR (2013). *SESARs environmental objectives*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.sesarju.eu/environment/sesar%E2%80%99s-environmental-objectives-994>. [29.10.2013, 15:37 Uhr]
- [7] ACARE (o.J.). *Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.acare4europe.org/>. [27.05.2013, 15:21 Uhr]
- [8] Clean Sky (o.J.). *Clean Sky*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.cleansky.eu/>. [17.05.2013, 11:16 Uhr]
- [9] AVISTRA. *Luftschadstoffe durch Flugverkehr und Flughafenbetrieb*. [PDF]. Dessau. 2008
- [10] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz BImSchG)*. [PDF]. o.O. 2002
- [11] Emissionen (o.J.). *Natürliche und anthropogene Emissionen*. [Online]. Verfügbar unter: http://bilder.buecher.de/zusatz/23/23027/23027280_lese_1.pdf. [02.07.2013, 12:15 Uhr]

- [12] Strahltriebwerke (o.J.). *Eine revolutionierende Entwicklung*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.exl.at/helicopter/turbinen/turbinen.htm>. [02.07.2013, 13:11 Uhr]
- [13] FIS (2006). *Triebwerksarten*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/186351/>. [02.07.2013, 12:47 Uhr]
- [14] Unique (Flughafen Zürich AG). *Flugzeuge und Lufthygiene*. [PDF]. Zürich. 2007
- [15] Flughafen Zürich AG. *Lokale Luftqualität*. [PDF]. Zürich. 2011
- [16] Emissionen (o.J.). *Emissionen des Flugverkehrs*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.umweltdaten.de/verkehr/downloads/emiflug.pdf>. [02.07.2013, 15:43 Uhr]
- [17] Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (ADV). *Luftfahrt und Umwelt*. Berlin. 2007
- [18] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *Klimawirkungen des Luftverkehrs*. [PDF]. Köln. 2007
- [19] Katja Heinke. *Luftverkehr als Quelle von Luftverunreinigungen*. [PDF]. Freiberg. 2005
- [20] International Civil Aviation Organization. *Doc 9889 – Airport Air Quality Guidance Manual*. [PDF]. o.O. 2007
- [21] International Civil Aviation Organization. *Annex 16 Volume II: Aircraft Engine Emissions, Third Edition*. [PDF]. Quebec. 2008
- [22] International Civil Aviation Organization. *Document 9646: Aircraft Engine Emission Databank*. [Excel-Tabelle]. o.O. 2013
- [23] Europäisches Parlament und Rat. *Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa*. [PDF]. o.O. 2008
- [24] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen)*. [PDF]. o.O. 2010
- [25] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft)*. [PDF]. o.O. 2002
- [26] Europäisches Parlament und Rat. *Richtlinie 2009/29/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung und Ausweitung des Gemeinschaftssystems für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten*. [PDF]. o.O. 2009

- [27] Europäisches Parlament und Rat. *TRichtlinie 2008/101/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Einbeziehung des Luftverkehrs in das System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft*. [PDF]. o.O. 2008
- [28] Deutsche Emissionshandelsstelle. *Emissionshandel im Luftverkehr*. [PDF]. Berlin. 2013
- [29] Emissionshandel (o.J.). *Einbeziehung des Luftverkehrs in das europäische Emissionshandelssystem*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.bmvbs.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrspolitik/VerkehrUndUmwelt/EmissionshandelLuftverkehr/emissionshandel-luftverkehr_node.html. [08.07.2013, 10:29 Uhr]
- [30] Eric Heymann, Joachim Härtel (Deutsche Bank Research). *Emissionshandel im Luftverkehr*. [PDF]. Frankfurt am Main. 2011
- [31] Zertifikatspreise (2013). *Billige Umweltverpestung: EU-Parlament will CO₂-Handel reformieren*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/eu-parlament-will-co2-handel-reformieren-a-909218.html>. [08.07.2013, 12:26 Uhr]
- [32] Umweltbundesamt. *CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland, Sachstandsbericht*. [PDF]. Dessau-Roßlau. 2010
- [33] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehrs und Landesentwicklung. *Flughafenentgelte, Entgelte für Zentrale Bodenverkehrsdienst-Infrastruktureinrichtungen*. [PDF]. Wiesbaden. 2012
- [34] Bundesregierung. *Flughafenkonzept der Bundesregierung*. [PDF]. o.O. 2009
- [35] BUND. *Luftverkehrsteuergesetz (LuftVStG)*. [PDF]. o.O. 2010
- [36] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft. *Stellungnahme des Bundesverbandes der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V. (BDL) zu den Auswirkungen der Luftverkehrsteuer*. [PDF]. Berlin. o.J.
- [37] SESAR (2009). *Single European SKY ATM Research*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.sesarju.eu/environment>. [27.05.2013, 10:45 Uhr]
- [38] Functional Airspace Blocks (2011). *FABs*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.eurocontrol.int/dossiers/fabs>. [19.07.2013, 11:34 Uhr]
- [39] Mobility and Transport (2012). *Air - What is the SESAR project*. [Online]. Verfügbar unter: http://ec.europa.eu/transport/modes/air/sesar/index_en.htm. [02.07.2013, 10:52 Uhr]
- [40] CLEEN (2013). *Continuous Lower Emissions, Energy and Noise*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/aircraft_technology/cleen/. [16.06.2013, 15:59 Uhr]
- [41] VALE (2013). *Voluntary Airport Low Emissions Program*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.faa.gov/airports/environmental/vale/>. [16.05.2013, 15:18 Uhr]

- [42] James McDaniel. *Atlantic Interoperability Initiative to Reduce Emissions (AIRE)*. [PowerPoint]. o.O. 2007
- [43] ASPIRE (o.J.). *Asia and Pacific Initiative to Reduce Emissions*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.aspire-green.com/about/default.asp>. [17.05.2013, 13:50 Uhr]
- [44] Airport2030 (o.J.). *Leuchtturmprojekt – Effizienter Flughafen 2030*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.airport2030.de/>. [16.05.2013, 13:22 Uhr]
- [45] Hamburg Airport. *Umwelterklärung 2011-2014*. [PDF]. Hamburg. o.J.
- [46] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft. *Energieeffizienz und Klimaschutz im Luftverkehr – Was haben wir erreicht, was ist noch zu tun*. [PowerPoint]. Berlin. 2012
- [47] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Aviation and the global Atmosphere*. [PDF]. Cambridge. 1999
- [48] Robert Mager. *Entwicklung einer Methodik zur Definition und Implementierung von Key Performance Indikatoren für Verkehrsflughäfen*. Dresden. 2011
- [49] Paul Weitz. *Fortschrittliche ATM-Konzepte; Raumbezogene Emissionsauswertung und -darstellung für Luftverkehrssimulationen im Rahmen von EWMS*. Braunschweig. 2010
- [50] Nils von Dietman. *Airport Performance Measurement*. Berlin. 2008
- [51] Heinrich Mensen. *Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen*. Heidelberg. 2007
- [52] ICAO Luftfahrtkarte. *Segelflugkarte Berlin*. Berlin. 2013
- [53] A-CDM (2013). *A-CDM implemented in core-area Düsseldorf Airport*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.eurocontrol.int/news/cdm-implemented-core-area-d%C3%BCsseldorf-airport>. [23.07.2013, 10:00 Uhr]
- [54] Fabian Brühwiler. *A-CDM Information Teil 1-3*. [PDF]. Zürich. 2013
- [55] A-CDM. *Airport CDM München Resultate 2011*. [PDF]. Langen. 2012
- [56] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). *TAM – Total Airport Management*. Braunschweig. o.J.
- [57] Yves Günther. *Unterschiede zwischen A-CDM und TAM - DLR internes Projektarbeitspapier*. Braunschweig. 2012
- [58] Yves Günther et al. *Total Airport Management (Operational Concept and Logical Architecture)*. [PDF]. o.O. 2006
- [59] EUROCONTROL. *The Manual - Airport CDM Implementation*. [PDF]. o.O. 2012

- [60] TAMS-Team. *Abschlussbericht - Leuchtturm Projekt TAMS - Total Airport Management Suite*. Braunschweig. 2012
- [61] Thomas Reichmann. *Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten*. München. 1997
- [62] W. Pompl. *Luftverkehr - Eine ökonomische und politische Einführung 4. Auflage*. Berlin. 2006
- [63] Michael Grüning. *Performance-Measurement-Systeme - Messung und Steuerung von Unternehmensleistung*. Dresden. 2002
- [64] Airports Council International (ACI). *Guide to Airport Performance Measures*. [PDF]. Quebec. 2012
- [65] International Civil Aviation Organization. *Doc 9883 – Manual on Global Performance of the Air Navigation System*. [PDF]. o.O. 2009
- [66] SESAR (2007). SESAR High Level Concept Accepted. [Online]. Verfügbar unter: http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/EEC_News_2007_2_SESAR.html. [19.11.2013, 08:05 Uhr]
- [67] EUROCONTROL. *ATMAP Framework (A Framework for Measuring Airport Airside and Nearby Airspace Performance)*. [PDF]. o.O. 2009
- [68] EUROCONTROL. *Approving the ATM Strategy for 2000+ (ATM 200+), as amended in 2003*. [PDF]. Brüssel. 2003
- [69] Performance Review Commission. *Discussion paper on the implementation of the SES II Performance Scheme*. [PDF]. o.O. 2009
- [70] EUROCONTROL. *SES Performance Scheme: Preparations for the second reference period (RP2)*. [PDF]. Brüssel. 2011
- [71] SESAR (EUROCONTROL). *Airport Detailed Operational Description -Step 3 (Initial)*. [PDF]. Brüssel. 2011
- [72] EUROCONTROL. *Episode 3 Single European Sky Implementation support through Validation*. [PDF]. o.O. 2009
- [73] SESAR Consortium Members. *Air Transport Framework - The Performance Target – D2*. [PDF]. Brüssel. 2006
- [74] ICAO. *TENTH SESSION OF THE STATISTICS DIVISION*. [PDF]. Montreal. 2009
- [75] ICAO. *Environmental Report 2010*. [PDF]. o.O. 2011
- [76] Fraport AG. *Nachhaltig verbinden - Nachhaltigkeitsbericht 2012*. Frankfurt am Main. 2013

- [77] Projektmanagement (2011). *Zieldefinition*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.projektmanagementhandbuch.de/projektinitiierung/zieldefinition/>. [31.10.2013, 13:06 Uhr]
- [78] Annabelle Schuppe. *Vergleich von Anflugverfahren an einem deutschen Verkehrsflughafen im Hinblick auf lokale Schadstoffemissionen unter Zuhilfenahme von Daten aus Schnellzeitsimulationen*. Dresden. 2011
- [79] Unique (Flughafen Zürich AG). *Aircraft NO_x-Emissions within the Operational LTO Cycle*. [PDF]. Zürich. 2004
- [80] Brian Kim, Jawad Rachami. *Aircraft Emissions Modeling Under Low Power Conditions*. [Paper]. o.O. o.J.
- [81] Martin Schaefer. *Development of a Forecast Model for Global Air Traffic Emissions*. Bochum. 2012
- [82] EUROCONTROL. *User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.9.* [PDF]. o.O. 2011
- [83] Eduardo Garcia et al. *1st International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems*. [Paper]. Barcelona. 2011
- [84] AEM (o.J.). *Advanced Emission Model*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.eurocontrol.int/services/advanced-emission-model>. [10.07.2013, 15:08 Uhr]
- [85] Federal Aviation Administration (FAA). *Emissions and Dispersions Modeling System (EDMS) User's Manual*. [PDF]. Washington. 2007
- [86] Janicke Consulting. *LASPORT 2.0 – Product Specification*. [PDF]. Überlingen. 2011
- [87] Triebwerkstyp (o.J.). *Noise Certification Database*. [Online]. Verfügbar unter: <http://noisedb.stac.aviation-civile.gouv.fr/find.php>. [15.08.2013, 10:29 Uhr]
- [88] Emissions Databank (2013). *ICAO Aircraft Engine Emissions Databank*. [Online]. Verfügbar unter: <http://easa.europa.eu/environment/edb/aircraft-engine-emissions.php>. [15.08.2013, 11:02 Uhr]
- [89] Destination Green (2013). *Potential Benefits of Operations*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.icao.int/Meetings/Green/Documents/day%201pdf/session%203/3-Clarke.pdf>. [10.10.2013, 12:51 Uhr]
- [90] Aviation Safety (2002). *Why Can't We Land?*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.aviationsafetymagazine.com/airplane/landing-accidents-and-runway.html>. [13.11.2013, 17:03 Uhr]
- [91] Dr. Reinhard König, Raimar Stump. *Abschlussbericht zum Projekt „Leiser Flugverkehr“*. [PDF]. Braunschweig. o.J.
- [92] M. Fritzsche. *Analyse des ökonomischen und ökologischen Nutzens bei Anwendung des Continuous Descent Approaches (CDA) Verfahren*. Dresden. 2009

- [93] CDA (o.J.). *Anflugverfahren - Der kontinuierliche Sinkflug (Continuous Descent Operations CDO)*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Flugsicherung/Umwelt/Umweltfreundliches%20Fliegen/Anflugverfahren/. [21.10.2013, 11:29 Uhr]
- [94] European Organization for Safety of Air Navigation, Eurocontrol Experimental Centre. *Point Merge Integration of Arrival Flows Enabling Extensive RNAV Application and Continuous Descent - Operational Services and Environment Definition*. o.O. 2010
- [95] Point Merge (o.J.). *Simulation zur Validierung neuartiger Verfahren*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Flugsicherung/Forschung%20&%20Entwicklung/Aufgaben%20&%20Ergebnisse/Simulationen%20zur%20Validierung%20neuartiger%20Verfahren/. [21.10.2013, 12:09 Uhr]
- [96] European Organization for the Safety of Air Navigation. „*Point Merge Integration of Arrival Flows Enabling Extensive RNAV Application and Continuous Descent - Operational Services and Environment Definition*“; *CND/COE/AT/AO ATC Operations and Systems; Version 2.0 final*. o.O. 2010
- [97] SWISS. *Innovationen im Anflug*. [PDF]. Zürich. o.J.
- [98] Treibstoffeinsparung (2012). *Fuel Efficiency im Lufthansa Konzern - Kosten sparen und die Umwelt schonen*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.lufthansa-group.com/fileadmin/downloads/de/LH-Fuel-Efficiency-0612.pdf>. [17.10.2013, 14:08 Uhr]
- [99] Jan Böhm. *Quantifizierung des Potenzial von ATM-Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen des Luftverkehrs*. Dresden. 2009
- [100] I. Deonandan, H. Balakrishnan. *Evaluation of Strategies for Reducing Taxi-Out Emissions at Airports*. o.O. 2010
- [101] Fabrizio Re. *Viability and State of the Art of Environmentally Friendly Aircraft Taxiing Systems*. [Paper]. Oberpfaffenhofen. o.J.
- [102] Steffen Loth et al. *Airport 2030 - Lösungen für den effizienten Lufttransport der Zukunft*. [PDF]. Berlin. 2012
- [103] Follow the Greens (2013). *Europäisches Gemeinschaftsprojekt „Follow-the-Greens“ erfolgreich am Flughafen Frankfurt simuliert*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.fraport.de/de/presse/newsroom/pressemitteilungen/europaeisches-gemeinschaftsprojekt-follow-the-greens-erfolgreich.html>. [14.10.2013, 12:56 Uhr]
- [104] Julija Bentley. *Spanair Comparison of Fuel Consumption in: „Single Engine Taxi In“ and „Taxi with 2 Engines“*. o.O. 2008
- [105] Indira Deonandan, Hamsa Balakrishnan. *Evaluation of Strategies for Reducing Taxi-out Emissions at Airports*. Cambridge. 2008

- [106] Continuous Climb Departure (o.J.). *Reducing the Environmental Impacts of Ground Operations and Departing Aircraft*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.heathrowairport.com/static/Heathrow/Downloads/PDF/Departures_code_of_practice-LHR.pdf. [21.10.2013, 15:30 Uhr]
- [107] Holger Feldhaus. *Berücksichtigung von Umweltparametern in einem Total Airport Management System mit Hilfe von Umweltmodellen*. Braunschweig. 2011
- [108] Airbus. *Flight Operations Support and Line Assistance - Getting to grips with fuel economy, Version 3*. Balagnac. 2009
- [109] U.S. Department of Transportation Research and Innovative Technology Administration. *Sitting on the runway: Current aircraft taxi times now exceed pre-9/11 experience*. o.O. 2006

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage eingereichte Studienarbeit mit dem Titel:

Erarbeitung von CO₂ basierten Leistungsindikatoren zur Anwendung in einem Total Airport Management System

selbstständig verfasst und andere als die angegebenen Hilfsmittel nicht benutzt habe.

Dresden, den 21. November 2013
Ort, Datum

Vivian Rösler

Anhang

Anhang A:

Triebwerksdatenbank ICAO und speziell für den Modellflughafen (Inhalt auf CD: Ordner Triebwerksdaten ICAO und Modellflughafen)

Anhang B:

Daten des Modellflughafens u.a. A-SMGCS und Flugplandaten (Inhalt auf CD: Ordner Daten_Flugplan und A-SMGCS)

Anhang C:

Auswertung der Arrivals und Departures (Inhalt auf CD: Ordner Auswertung inkl. Hilfstabellen)

Anhang D:

Beispielrechnung zum Single Engine Taxiing anhand A320-200 am Modellflughafen (Inhalt auf CD: Beispielrechnung_A320-200.xlsx)