

**Eine Methodik zur
Quantifizierung der zeitlichen Güte
von Flugreisen aus Passagiersicht**

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Bernd Liebhardt

aus

Großpold (Siebenbürgen)

2016

Übersicht der Gutachter

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick,
Technische Universität Hamburg

Zweiter Gutachter: Dr. Daniel Aeschbach,
Deutsches Zentrum f. Luft- u. Raumfahrt (DLR)

Dritter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hartmut Fricke,
Technische Universität Dresden

Prüfungsausschussvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Carsten Gertz,
Technische Universität Hamburg

Datum der mündlichen Prüfung: 11. April 2016

Danksagung

Diese Arbeit ist meinen Eltern Christa-Theresia & Dieter Liebhardt gewidmet, die mich von Anfang an selbstlos und bedingungslos unterstützt haben und es wahrscheinlich noch lange tun werden. Ich fühle mich gesegnet, Euer Sohn zu sein, und danke Euch von ganzem Herzen.

Außerdem scheint es in meiner Verwandtschaft die Regel zu sein, dass Hilfe nicht nur gewährt, sondern aktiv und ungefragt angeboten wird. Ohne diesen überaus starken Rückhalt wäre ich kaum so weit gekommen. Deshalb bin ich meinen Angehörigen, die schon so oft für mich da waren, zu tiefem Dank verpflichtet, und zwar zuvorderst meinen lieben Großeltern Theresia, Andreas und Maria, meinen Onkeln Hans (2x), Andreas und Dieter, meinen Tanten Katharina, Tanza, Carola und Crista sowie meinem Bruder Christian und seiner Frau Diana.

Ich danke außerdem meiner Freundin Annika für ihren moralischen Rückhalt sowie für die schönen Momente, die ich seit einem Jahr mit ihr zusammen erleben durfte. Mögen es noch ein viele weitere werden.

Meinem Doktorvater Herrn Professor Gollnick danke ich für die ermutigende, sachkundige und tatkräftige „Geburtshilfe“ meiner Promotion.

Danke an Herrn Dr. Aeschbach für die entscheidende fachliche Idee und auch für seine interessierte Unterstützung eines Laien der Schlafwissenschaft.

Danke auch an Herrn Prof. Fricke für seine wachsame Skepsis und für die Aufdeckung mehrerer Unzulänglichkeiten.

Herrn Prof. Gertz danke ich für die freundliche Leitung des Promotionsverfahrens.

Nicht zuletzt bin ich meinen hoch geschätzten Kollegen zu Dank verpflichtet, derentwegen ich jeden einzelnen Tag gerne ans Institut komme, weil sie durch ihre optimistischen, freundlichen und gebildeten Persönlichkeiten ein durchweg positives Betriebsklima schaffen und mich durch ihre Fach- wie auch Lebenskunde nicht selten inspirieren und korrigieren. Ihr seid eine tolle Truppe!

Hamburg, im April 2016

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt eine Methodik zur quantitativen Bestimmung der zeitlichen Güte von Flugreisen aus Passagiersicht vor. Die ursprünglich motivierende Forschungsfrage ist die nach dem zeitlichen Nutzen von Hochgeschwindigkeitsflug für den einzelnen Passagier. In diesen speziellen Lufttransportsystemen gilt Flugzeitersparnis als der einzige greifbare Vorteil, was dem zeitlichen Aspekt für dessen Sinnhaftigkeit und Anreiz höchste Bedeutung verleiht.

Nun wird jedoch angenommen, dass ein Zeitgewinn auf einer Reise nicht nur durch eine kürzere Dauer entstehen kann, sondern auch durch Bewahrung produktiver (Arbeits-)Zeit sowie durch Sicherstellung von Ausgeruhtheit. Diese drei Zielgrößen zur Bewertung der zeitlichen Güte einer Reise – Dauer; Erhaltung bzw. Verlust potentiell produktiver Zeit; Ausgeruhtheit bzw. Schlafdefizit zu kritischen Zeitpunkten – werden schließlich in einem einzigen Kennwert, den „Zeit-Kosten“ einer Reise, vereinigt.

Weil zeitliche Aspekte vor allem für Geschäftsleute kritisch sind, wird der Fokus auf Geschäftsreisen gelegt. In diesem Sinne wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches die Reise eines Geschäftsmannes anhand zahlreicher Parameter – beispielsweise Arbeitszeiten am Zielort, Flugdauern, Zeitverschiebung – vom Start über den Aufenthalt am Zielort bis hin zur Rückankunft plant, analysiert sowie die resultierenden Zielgrößen ausgibt. Dabei wird der Zustand körperlicher Müdigkeit, welcher für die Leistungsfähigkeit maßgeblich ist, als komplexes Zusammenspiel von Schlaf- und Wachzeiten mitverfolgt. Die Modellierung von Dauern und Zeitpunkten des Schlafs auf der Reise stellt eine Hauptschwierigkeit der Arbeit dar. Die grundsätzliche Validität der Algorithmen wird anhand dokumentierter realer Reiseabläufe nachgewiesen.

Im ersten Anwendungsfall wird eine Reihe vorausgesuchter Hin- und Rückflüge zu einem festen mehrtägigen Geschäftstermin an einem um mehrere Stunden zeitversetzten Zielort hinsichtlich ihrer Zeit-Kosten für den Passagier bewertet.

Der zweite Anwendungsfall untersucht die ursprüngliche Forschungsfrage nach dem Zeitvorteil von Hochgeschwindigkeitsflügen. In einem konkreten Ansatz werden die Zeit-Kosten eines Unterschall- und eines Überschall-Geschäftsreiseflugzeuges auf generischen Reisen zwischen den weltweit wichtigsten Wirtschaftsmetropolen verglichen. Dabei finden technische, regulatorische sowie ökonomische Rahmenbedingungen Berücksichtigung.

Aussichtsreiche Verwertungsmöglichkeiten des Modells bestehen neben der Forschung in kommerziellen Anwendungen zur Reiseplanung für Passagiere.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	17
1.1	Motivation.....	17
1.2	Problemstellung.....	19
1.3	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	21
2	Stand der Forschung.....	23
2.1	Sozio-Ökonomie des individuellen Reisens.....	23
2.1.1	Wert der Reisezeit	23
2.1.2	Charakterisierung von Geschäftsreisenden	24
2.1.3	Planung und Ablauf einer Geschäftsreise.....	27
2.2	Erkenntnisse der Schlafwissenschaft	29
2.2.1	Regulärer Schlaf.....	29
2.2.2	Modelle der Schlafregulierung	30
2.2.3	Schlafverlust und Schlafdefizit	34
2.2.4	Jetlag	35
2.2.5	Schlaf im Flugzeug.....	36
3	Methodischer Ansatz.....	38
3.1	Prinzip der Modellierung	38
3.2	Parameterdefinition	42
3.2.1	Passagierparameter	42
3.2.2	Sonstige Parameter	47
3.2.3	Zusammenfassung	47
3.3	Implementierung.....	50
3.3.1	Hauptalgorithmus <i>JourneyPlanner</i>	50
3.3.2	Hilfsroutinen	60
3.3.3	Weitere Routinen.....	70
3.4	Verifizierung und Validierung.....	71
3.4.1	Plausibilitätsbetrachtungen.....	71
3.4.2	Abgleich mit dokumentierten Reisedaten.....	81
3.4.3	Beschränkungen des Modells.....	90
4	Erster Anwendungsfall: Bewertung von Flugverbindungen.....	92
4.1	Problemstellung.....	92
4.2	Methodischer Ansatz	93
4.3	Ergebnisse.....	94

5	Zweiter Anwendungsfall: Vergleich von Unter- und Überschallflug ...	97
5.1	Problemstellung	97
5.1.1	Einleitung.....	97
5.1.2	Der Schallknall als Rahmenbedingung	97
5.1.3	Flugzeugtechnische Vorgaben.....	99
5.1.4	Marktökonomische Aspekte.....	101
5.2	Methodischer Ansatz.....	102
5.2.1	Einleitung.....	102
5.2.2	Konzeption von Überschall-Flugpfaden	103
5.2.3	Berechnung von Missionsdauern.....	105
5.2.4	Auswahl von Städtepaaren.....	107
5.2.5	Aufbau der Testreihen.....	107
5.3	Ergebnisse	109
5.3.1	Einleitung.....	109
5.3.2	Allgemeine Betrachtungen.....	109
5.3.3	Einzelbetrachtung der Gewichtungssätze	113
5.3.4	Einzelbetrachtung von Städtepaaren.....	120
5.4	Sensibilitätsanalyse	122
5.5	Diskussion	125
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	127
	Literaturverzeichnis	130
	Anhang	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1-1 – Flugpläne von British Airways zw. London und New York, Jahr 2000.....	18
Abb. 2.1-1 – Altersverteilung der Ciobanu-Studie (aus Ciobanu et al. 2012, modif.)	26
Abb. 2.1-2 – Präferierte Flugzeiten (aus Brey und Walker 2011, modif.)	28
Abb. 2.2-1 – Regulärer Schlaf nach Daan et al. (1984)	31
Abb. 2.2-2 – Aufwachen nach verzögertem Schlafbeginn (aus Daan et al. 1984, mod.)...	32
Abb. 3.1-1 – Chronologischer Reiseablauf	39
Abb. 3.1-2 – Generische kürzestmögliche Reise.....	40
Abb. 3.2-1 – Transportzeit zwischen Wohnort/Arbeitsplatz und Flughafen.....	42
Abb. 3.2-2 – Transportzeit zwischen Flughafen und Arbeitsort am Zielort	42
Abb. 3.2-3 – Präferierte Abflugzeit für einen Morgenflug zum Zielort	43
Abb. 3.2-4 – Präferierte Ankunftszeit für einen Morgenflug zum Zielort	43
Abb. 3.2-5 – Präferierte Abflugzeit für einen Abendflug zum Zielort	43
Abb. 3.2-6 – Präferierte Ankunftszeit für einen Abendflug zum Zielort	43
Abb. 3.2-7 – Min. Nachtflug-Dauer für Erholung u. Arbeitsfähigkeit, Business	44
Abb. 3.2-8 – Min. Nachtflug-Dauer für Erholung u. Arbeitsfähigkeit, Economy	44
Abb. 3.2-9 – Max. Tagflug-Dauer für Termine am gleichen Tag, Business.....	44
Abb. 3.2-10 – Max. Tagflug-Dauer für Termine am gleichen Tag, Economy.....	44
Abb. 3.2-11 – Anteil der für Arbeit genutzten Flugdauer	45
Abb. 3.2-12 – Termindauer nach Langstreckenflügen	45
Abb. 3.3-1 – Ausgänge der Routine zur Bestimmung des spätestmöglichen Hinflugs.....	51
Abb. 3.3-2 – Schema der Ansetzung früherer Flüge für Test-Hinreisen	53
Abb. 3.3-3 – Zusammenhang zwischen Nachtschlafdauer u. homöostatischem Zyklus.....	60
Abb. 3.3-4 – Aufwachschwellen nach Ankunft am Zielort	63
Abb. 3.3-5 – Regulärer homöostatischer Zyklus nach Ostflug über 5 Zeitzonen	63
Abb. 3.3-6 – Regulärer homöostatischer Zyklus nach Westflug über 5 Zeitzonen.....	64
Abb. 3.3-7 – Regulierung des homöostatischen Levels durch Mittagschlaf	65
Abb. 3.3-8 – Feste Schlafphase von 0 – 7 Uhr mit variierter Schlafqualität QS	66
Abb. 3.3-9 – Methode A zur Bestimmung des Schlafdefizits <i>SD</i>	67

Abb. 3.3-10 – Methoden B und C zur Bestimmung des Schlafdefizits SD	68
Abb. 3.3-11 – Ergebnisvergleich der Methoden zur Schlafdefizitbestimmung (1)	69
Abb. 3.3-12 – Ergebnisvergleich der Methoden zur Schlafdefizitbestimmung (2)	70
Abb. 3.4-1 – Ausgabe von JourneyPlanner: Reisearten für feste Terminserie	72
Abb. 3.4-2 – Ausgabe von <i>JourneyAnalyzer</i> : Reisearten für feste Terminserie	73
Abb. 3.4-3 – Kürzeste Reise	74
Abb. 3.4-4 – Schonendste Reise	75
Abb. 3.4-5 – Arbeitseffizienteste Reise	75
Abb. 3.4-6 – Ausgeglichenste Reise	76
Abb. 3.4-7 – Ausgabe von JourneyPlanner: Reisearten f. feste Terminserie, $QSFl = 0$...	77
Abb. 3.4-8 – Schonendste Reisen mit schlaflosen Flügen	78
Abb. 3.4-9 – Ausgabe von JourneyPlanner: Reisearten f. feste Terminserie, $QSFl = 1$...	79
Abb. 3.4-10 – Fünftägige Arbeitsreise von London nach New York	80
Abb. 3.4-11 – Fünftägige Arbeitsreise von New York nach London	81
Abb. 3.4-12 – Vergleich von realen und simulierten Homöostasen der Tokio-Reise.....	82
Abb. 3.4-13 – Nachvollzogene Homöostase des Probanden B im Zuge der Rückreise.....	83
Abb. 3.4-14 – Nachvollzogene Homöostase des Probanden W im Zuge der Rückreise.....	84
Abb. 3.4-15 – Simulierter Nachtschlaf nach Westflug.....	86
Abb. 3.4-16 – Simulierter Nachtschlaf nach Ostflug	86
Abb. 3.4-17 – Simulierte Dienstflüge und Aufenthalte zw. Singapur und New York.....	87
Abb. 3.4-18 – Nachvollzogene und simulierte Homöostase von Airline-Crews in Tokio... 89	
Abb. 5.1-1 – Knallteppich bei Mach-2-Flug in 11 km Höhe (aus Mancini et al. 1988)	98
Abb. 5.1-2 – Kabine der Boeing 765-072B (Übersicht; aus Welge et al. 2010, modif.) ..	101
Abb. 5.1-3 – Kabine des HISAC-A-Jets (Schrägsicht; aus Deremaux et al. 2009)	101
Abb. 5.2-1 – Überschall-Flugpfade zw. London und San Francisco [Google Earth].....	105
Abb. 5.2-2 – Generische mit SuperTraC simulierte Überschall-Mission.....	106
Abb. 5.3-1 – Verteilung aller gefundenen ΔTCT	109
Abb. 5.3-2 – ΔTCT -Verteilung für unterschiedliche Gewichtung der Reisedauer	110
Abb. 5.3-3 – ΔTCT -Verteilung für unterschiedliche Gewichtung der Ausgeruhtheit	110
Abb. 5.3-4 – ΔTCT -Verteilung für unterschiedliche Gewichtung der Arbeitszeit	111

Abb. 5.3-5 – Streudiagramme für ΔTCT und Großkreisdistanz bzw. Flugzeitvorteil.....	111
Abb. 5.3-6 – Korrelation von Flugzeitvorteil $\ddot{U}S$ und Großkreisdistanz.....	112
Abb. 5.3-7 – Streudiagramme für ΔTCT bezüglich Bio-effektiver Zeitverschiebung, Schlafqualität im Flugzeug und Termindauer	112
Abb. 5.3-8 – ΔTCT -Verteilung für den 1. Gewichtungssatz (1-0-0)	113
Abb. 5.3-9 – Streudiagramme für den 1. Gewichtungssatz (1-0-0).....	113
Abb. 5.3-10 – ΔTCT -Verteilung für den 2. Gewichtungssatz (0-1-0)	114
Abb. 5.3-11 – Streudiagramme für den 2. Gewichtungssatz (0-1-0).....	114
Abb. 5.3-12 – ΔTCT -Verteilung für den 3. Gewichtungssatz (0-0-1)	115
Abb. 5.3-13 – Streudiagramme für den 3. Gewichtungssatz (0-0-1).....	115
Abb. 5.3-14 – ΔTCT -Verteilung für den 4. Gewichtungssatz (1-1-1)	116
Abb. 5.3-15 – Streudiagramme für den 4. Gewichtungssatz (1-1-1).....	116
Abb. 5.3-16 – ΔTCT -Verteilung für den 5. Gewichtungssatz (0-1-1)	117
Abb. 5.3-17 – Streudiagramme für den 5. Gewichtungssatz (0-1-1).....	117
Abb. 5.3-18 – ΔTCT -Verteilung für den 6. Gewichtungssatz (1-0-1)	118
Abb. 5.3-19 – Streudiagramme für den 6. Gewichtungssatz (1-0-1).....	118
Abb. 5.3-20 – ΔTCT -Verteilung für den 7. Gewichtungssatz (1-1-0)	119
Abb. 5.3-21 – Streudiagramme für den 7. Gewichtungssatz (1-1-0).....	119
Abb. 5.4-1 – Verteilung von $d\Delta TCT$	123

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.2-1 – Steuerparameter.....	49
Tab. 3.4-1 – Reale durchschnittliche Schlafdaten gegenüber jenen aus der Simulation...	85
Tab. 4.1-1 – Flugverbindungen für Aufenthalt in New York.....	92
Tab. 4.1-2 – Flugverbindungen für Aufenthalt in Hamburg.....	93
Tab. 4.3-1 – Zielwerte und Zeit-Kosten der Transfers zw. Hamburg und New York.....	94
Tab. 4.3-2 – Änderung der Zeit-Kosten und Zielwerte im Falle schlafloser Flüge.....	94
Tab. 4.3-3 – Zeit-Kosten für variierte Gewichtungsfaktoren.....	96
Tab. 5.1-1 – Relevante Überschallflugzeug-Entwürfe.....	99
Tab. 5.2-1 – Die 10 umsatzstärksten Städtepaare bzgl. Premium-Flugtickets, 2012.....	103
Tab. 5.2-2 – Untersuchte Sätze der Gewichtungsfaktoren.....	108
Tab. 5.3-1 – ΔTCT -Mittelwerte u. -Standardabweichungen, Top-20-Städtepaare.....	121
Tab. 5.4-1 – In der Sensibilitätsanalyse variierte Parameter.....	122
Tab. 5.4-2 – $d\Delta TCT$ -Statistiken für Gewichtungssätze und Parametervarianten.....	124
Tab. 5.5-1 – ΔTCT -Mittelwerte, -Standardfehler in versch. Gewichtungssätzen.....	125

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen¹

<i>Anp.</i>	Anpassung
<i>AT</i>	Zeitpunkt des Aufstehens (<i>arising time</i>)
<i>at</i>	Aufwachschwelle (<i>awaking threshold</i>)
<i>BT</i>	Zeitpunkt des Zu-Bett-Gehens (<i>bed time</i>)
<i>C</i>	Kalibrierungsparameter der Aufwachkurve
<i>cm</i>	Zentimeter
<i>d</i>	Tag(e)
dT_{Adapt}	Jetlag-Anpassungsrate des Biorhythmus (<i>adaptation</i>)
dT_{FLRscd}	Zeitschritt für Flugzeitvariation (<i>flight rescheduling</i>)
dT_S	Zeitschritt für Fortschreibung des homöostatischen Levels <i>S</i>
<i>dt</i>	Zeitinkrement
$d\Delta TCT$	Unterschied der Zeitkosten-Differenz ΔTCT aus den Simulationen mit regulären bzw. variierten Parametern
<i>ft</i>	Fuß
<i>kg</i>	Kilogramm
<i>km</i>	Kilometer
<i>H</i>	Mittelwert der homöostatischen Einschlafschwelle
<i>h</i>	Stunde(n)
<i>HISAC</i>	<i>environmentally friendly small HIgh-Speed AirCraft</i>
<i>ILT</i>	Institut für Lufttransportsysteme, TU Hamburg-Harburg
<i>L</i>	Mittelwert der homöostatischen Aufwachschwelle
<i>m</i>	Meter
<i>min</i>	Minute(n)
<i>mod./modif.</i>	modifiziert
<i>nm</i>	Nautische Meile(n) / Seemeile(n)
<i>QS</i>	Schlafqualität (<i>quality of sleep</i>)
R^2	Statistisches Bestimmtheitsmaß
<i>RST</i>	Reguläre Schlafdauer (<i>regular sleep time</i>)
<i>RWT</i>	Reguläre Arbeitsdauer (<i>regular working time</i>)
<i>S</i>	Homöostatisches Level, Homöostase
S_0	Homöostatisches Level zum Zeitpunkt des regulären Aufwachens unter Voraussetzung einer 8-Stunden-Nacht

¹ *t* für Zeitpunkte, *T* für Zeiträume bzw. Dauern. Englische Aufschlüsselungen kursiv.

S_{32}	Homöostatisches Level zum Zeitpunkt des regulären Aufwachens unter Voraussetzung einer 8-Stunden-Nacht
S_{init}	Homöostatisches Level zu Beginn
S_{t0}	Homöostatisches Level zu Simulationsbeginn
SD	Schlafdefizit (<i>sleep deficit/debt</i>)
SE	Schlafeffizienz (<i>sleep efficiency</i>)
SE_{Biz}	Schlafeffizienz in der Business-Klasse (<i>sleep efficiency in business</i>)
SE_{Eco}	Schlafeffizienz in der Economy-Klasse (<i>sleep efficiency in economy</i>)
SL	Schlaflatenz (<i>sleep latency</i>)
$SSBJ$	Überschall-Geschäftsreiseflugzeug (<i>supersonic business jet</i>)
ST	Zeitpunkt des Schlafbeginns (<i>sleep onset time</i>)
<i>Std.-Abw.</i>	Standardabweichung
T	Dauer
T_{Wk}	Arbeitsdauer (<i>work</i>)
$T_{ArrToCurb,out}$	Dauer der Flughafenpassage nach Ankunft am Zielort (<i>arrival to curb, outbound</i>)
$T_{ArrToCurb,ret}$	Dauer der Flughafenpassage nach Rückankunft am Heimatort (<i>arrival to curb, return</i>)
$T_{BedToArr}$	Mindest-Wachzeit vor Ankunft (<i>bed to arrival</i>)
T_{BlOut}	Flugdauer auf der Hinreise (<i>outbound block time</i>)
T_{BlRet}	Flugdauer auf der Rückreise (<i>return block time</i>)
$T_{CurbToDep}$	Dauer der Flughafenpassage vor Abflug (<i>curb to departure</i>)
$T_{DepToBed}$	Mindest-Wachzeit nach Abflug (<i>departure to bed</i>)
$T_{FIRscd,max}$	Maximaler Zeitraum für Flugzeitvariation (<i>flight rescheduling</i>)
T_{FlOut}	Dauer der Flugreise auf dem Hinweg (<i>outbound flight</i>)
T_{FlRet}	Dauer der Flugreise auf dem Rückweg (<i>return flight</i>)
T_{LoOut}	Zwischenstopp-Dauer auf der Hinreise (<i>outbound layover</i>)
T_{LoRet}	Zwischenstopp-Dauer auf der Rückreise (<i>return layover</i>)
T_{Prep}	Vorbereitungsdauer (<i>preparation</i>)
T_{Shift}	Echte Zeitverschiebung (<i>time shift</i>)
$T_{ShiftBE}$	Bio-effektive Zeitverschiebung (<i>bio-effective time shift</i>)
T_{ShiftE}	Effektive Zeitverschiebung (<i>effective time shift</i>)
$T_{ShiftPar}$	Zeitverschiebung für paritäre Anpassungsdauer (<i>parity time shift</i>)
$T_{Transfer}$	Lokale Transferdauer zw. Flughafen und Hotel bzw. Arbeitsort
T_{WD}	Dauer des regulären Arbeitstages (<i>working day</i>)
t_0	Simulationsbeginn
t_{ArrOut}	Ankunftszeit des Hinfluges (<i>outbound arrival</i>)
t_{ArrRet}	Ankunftszeit des Rückfluges (<i>return arrival</i>)

$t_{CurfDEnd}$	Ende der Nachtruhe am Zielflughafen (<i>end of curfew at destination</i>)
$t_{CurfDStart}$	Start der Nachtruhe am Zielflughafen (<i>start of curfew at destination</i>)
$t_{CurfOEnd}$	Ende der Nachtruhe am Startflughafen (<i>end of curfew at origin</i>)
$t_{CurfOStart}$	Beginn der Nachtruhe am Startflughafen (<i>start of curfew at origin</i>)
$t_{DepOEnd}$	Ende der vom Passagier präferierten Abflugzeiten am Startort (<i>end of departures at origin</i>)
$t_{DepOStart}$	Beginn der vom Passagier präferierten Abflugzeiten am Startort (<i>start of departures at origin</i>)
t_{DepOut}	Startzeit des Hinfluges (<i>outbound departure</i>)
t_{DepRet}	Startzeit des Rückfluges (<i>return departure</i>)
$t_{NoSIEEnd}$	Ende der abendlichen Zone des Wachbleibens (<i>end of evening no-sleep zone</i>)
$t_{NoSIEStart}$	Beginn der abendlichen Zone des Wachbleibens (<i>start of evening no-sleep zone</i>)
$t_{NoSINEnd}$	Ende der mittäglichen Zone des Wachbleibens (<i>end of noon no-sleep zone</i>)
$t_{NoSINStart}$	Beginn der mittäglichen Zone des Wachbleibens (<i>start of noon no-sleep zone</i>)
tod	Uhrzeit (<i>time of day</i>)
TCT	Zeit-Kosten des Reisens (<i>Time Cost of Travel</i>)
$TCT_{Subsonic}$	Zeit-Kosten des Reisens im Unterschall (<i>subsonic Time Cost of Travel</i>)
$TCT_{Supersonic}$	Zeit-Kosten d. Reisens im Überschall (<i>supersonic Time Cost of Travel</i>)
TIB	Verweildauer im Bett (<i>time in bed</i>)
TST	Gesamt-Schlafdauer (<i>total sleep time</i>)
USD	U.S.-Dollar
UTC	Koordinierte Weltzeit (<i>Universal Time, Coordinated</i>)
vs.	versus/gegenüber
w_{Sleep}	Gewichtungsfaktor des Schlafs bzw. der Ausgeruhtheit
w_{Time}	Gewichtungsfaktor der Reisedauer
w_{Work}	Gewichtungsfaktor der Arbeit bzw. der Arbeitszeiterhaltung
$WASO$	Wachzeit nach Schlafbeginn (<i>wake after sleep onset</i>)
WE_{Fl}	Arbeitseffizienz im Flug/im Flugzeug (<i>work efficiency in flight</i>)
WT	Zeitpunkt des Aufwachens (<i>wake-up time</i>)
WTL	Arbeitszeitverlust (<i>working time loss</i>)
ΔTCT	Differenz der Zeit-Kosten zw. Überschall- und Unterschall-Reisen
\emptyset	Durchschnitt/Mittelwert
σ	Standardabweichung
φ	Phase

Indizes

E	Ostwärts (<i>eastward</i>)
FPEnd	Ende der verfügbaren Zeit im Flugzeug (<i>flight period end</i>)
FPStart	Beginn der verfügbaren Zeit im Flugzeug (<i>flight period start</i>)
HPEnd	Ende der verfügbaren Zeit im Hotel (<i>hotel period end</i>)
HPStart	Beginn der verfügbaren Zeit im Hotel (<i>hotel period start</i>)
i	Index
Jrn	Reise (<i>journey</i>)
JrnEnd	Reiseende (<i>journey end</i>)
JrnOut	Hinreise (<i>outbound journey</i>)
JrnRet	Rückreise (<i>return journey</i>)
o	Obere Parametervariante
reg	regulär
WDEnd	Ende des Arbeitstages (<i>working day end</i>)
WDStart	Beginn des Arbeitstages (<i>working day start</i>)
WkEnd	Arbeitsende (<i>work end</i>)
WkStart	Arbeitsbeginn (<i>work start</i>)
SlEnd	Schlafende (<i>sleep end</i>)
SlStart	Schlafbeginn (<i>sleep start</i>)
Subsonic	Unterschall
Supersonic	Überschall
u	Untere Parametervariante
var	mit variierten Parametern
W	westwärts (<i>westward</i>)

IATA-Flughafencodes

HAM	Hamburg, Deutschland
MUC	München, Deutschland
EWR	Newark, New Jersey, USA
AMS	Amsterdam (Schipol), Niederlande
LHR	London (Heathrow), Vereinigtes Königreich
JFK	New York (John F. Kennedy), New York, USA
CPH	Kopenhagen (Kastrup), Dänemark
ZRH	Zürich (Kloten), Schweiz
ARN	Stockholm (Arlanda), Schweden

1 Einleitung

1.1 Motivation

In der klassischen Wirtschaftslehre des vergangenen Jahrhunderts herrschte die Überzeugung, dass der Reisevorgang an sich keinen Nutzen in sich trage, einen Zeitverlust für den Reisenden darstelle und demzufolge schnelleres Reisen besserem gleichzusetzen sei. Also führte eine kürzere Transportzeit, *ceteris paribus*, stets zu einem überlegenen Nutzwert für den Passagier, umzurechnen in einen monetären Gegenwert nach dem Motto „Zeit ist Geld“². Es kann angenommen werden, dass nicht zuletzt dieses Paradigma die Entwicklung von überschallschnellen zivilen Lufttransportsystemen bedeutend vorantrieb und auch heute noch befördert.

In zitierbarer Literatur dieser Epoche findet sich kaum Widerspruch; folgender jedoch dürfte besonders eindrücklich sein: R.E.G. Davies beschreibt ein konzeptionelles Hyperschall-Passagierflugzeug, welches in den 1980er Jahren diskutiert wurde, um die Strecke New York – Tokio in ungefähr drei Stunden zu absolvieren, wobei es 10 Zeitzonen zu überqueren gehabt hätte. Er kommt – etwas überspitzt – zu dem Schluss, dass es absolut unmöglich sei, eine Flugansetzung zu finden, die auch nur „den geringsten Sinn“ machte. Beispielsweise würde ein Flugzeug, welches in New York an einem Montagabend um 19 Uhr startete, am Dienstagmittag in Tokio ankommen, just zur New Yorker Schlafenszeit und demzufolge zu einem alles andere als günstigen Zeitpunkt, um eine Stunde lang Zoll- und Einreiseformalitäten „zu ertragen“ und danach zwei Stunden im Stau auf der Fahrt in die Tokioter Innenstadt zu verbringen. Wenn man dann, um gefühlt 1 Uhr morgens und mitten im Jetlag, „gerissenen“ japanischen Geschäftsleuten gegenüberstehe, sei das kaum die richtige Art, einen Verhandlungstag zu beginnen. Davies konstatiert, dass das gesamte Konzept hypersonischen Reisens hinfällig sei, wenn jenes fundamentale Problem nur durch eine Ruhepause nach Ankunft gelöst werden könne. (Davies 1998)

Ein weiteres Indiz dafür, dass Hochgeschwindigkeitsflüge nicht pauschal vorzuziehen sind, liefern Berichte über „stark richtungsabhängige“ Verkehrsflüsse in den Concorde-Überschalljets: Ihnen zufolge war bei British Airways der Sitzladefaktor, also die Auslastung der Kabine, auf Flügen gen Osten deutlich geringer als in Westrichtung. Als Grund wurde angeführt, dass letzterer es Geschäftsreisenden erlaubte, einen Arbeitstag zu sparen, während ersterer die Passagiere lediglich schneller nach London brachte. (Flight International 2013)

² Weiter ausgeführt im Abschnitt 2.1.1.

Angesichts historischer Flugpläne von British Airways (Datenquelle: ADI (Sabre Corp. 2015)) können die Gründe für die Richtungsabhängigkeit der Nachfrage nachvollzogen werden (siehe Abb. 1.1-1). So kam die Concorde nach morgendlichem Start in London dank Zeitverschiebung gleichfalls am New Yorker Morgen an; es blieb also reichlich Zeit, um Geschäften nachzugehen. Falls gewünscht, konnte man sogar am gleichen Tag mit dem Abendflug zurückkehren, oder aber noch mehr Aufenthaltszeit gewinnen, indem man zurück den Nachtflug in der Boeing 747 nahm. Im Falle eines Hinfluges in der 747 fand die Landung am späten Nachmittag statt, also am „biologischen Abend“ der Londoner Passagiere. In diesem Fall hatte man weniger Zeit und Energie fürs Arbeiten übrig. Concorde zu buchen, machte also aus Londoner Sicht Sinn, vor allem für den Hinflug.

In umgekehrter Richtung konnten Passagiere aus New York mit der Concorde lediglich am frühen oder späten Londoner Abend ankommen. Sogar bei der früheren Ankunft war der Arbeitstag am Ziel schon vorüber und deshalb produktive Arbeit schwer zu realisieren, trotz ausgeruhten Zustands des Passagiers. Unweigerlich musste zunächst eine Nacht in London verbracht werden, bevor irgendwelche Geschäftstreffen angesetzt werden konnten. Dabei fiel es in der Regel wohl schwer, sich zur Bettruhe zu begeben, weil der Biorhythmus ja noch frühen Abend signalisierte³. Bei einem Flug in einer 747 in Business oder First Class jedoch konnten Passagiere mehrere Stunden in gehobenem Komfort schlafen und ihren Tag in den Londoner Morgenstunden beginnen. In Rückrichtung stand wiederum ein günstig angesetzter Abendflug per Concorde zur Verfügung, was wohl ebenfalls zur größeren Auslastung der Flüge in Westrichtung beitrug. (Vgl. Abb. 1.1-1)

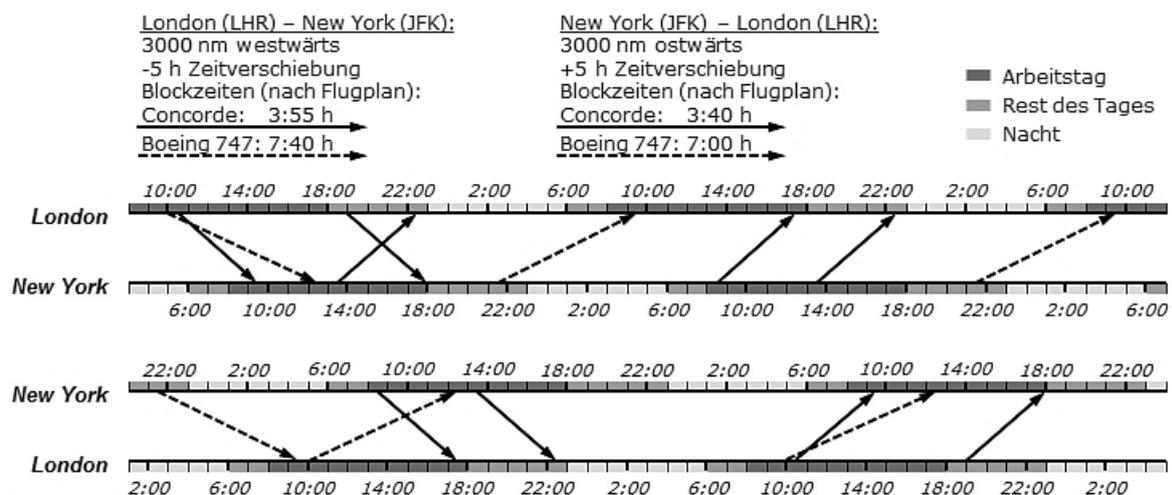


Abb. 1.1-1 – Flugpläne von British Airways zw. London und New York, Jahr 2000

³ Hier sei an Davies' Fazit erinnert.

Zusammengefasst erscheint es also für Reisende nicht pauschal sinnvoll, den schnelleren Flug zu wählen, weil der Nutzwert der Flugreise offensichtlich von mehr Einflüssen abhängt als von der Fluggeschwindigkeit allein. Gleichzeitig stellt sich die Frage, ob sich die „zeitliche Güte“ von Flugverbindungen für Passagiere nicht messen ließe. Dafür müssten die zeitbezogenen Einflussfaktoren mit Hilfe eines Rechenmodells in Zusammenhang gebracht werden, welches schließlich objektive und vergleichbare Kennzahlen liefert.

Durch ein solches Modell könnte die Sinnhaftigkeit zivilen Hochgeschwindigkeitslufttransports, dessen Nutzen (neben seiner kaum quantifizierbaren Anmutung von Prestige) einzig und allein im Zeitgewinn besteht, erstmals in Zahlen ausgedrückt werden. Insofern würde den oftmals von subjektiven Meinungen dominierten Debatten eine wissenschaftliche Perspektive beigefügt.

Eine weitreichende Parametrisierung zum Zwecke allgemeiner Nutzwertanalysen vorausgesetzt, kämen als Endnutzer des Modells (neben der Forschung) auch Fluggesellschaften in Frage. Diese könnten eine „zeitliche Güte“, ausgedrückt in einem „zeitlichen Nutzwert“ oder „Zeit-Kosten“, bei der Erstellung ihrer Flugpläne berücksichtigen. Nicht zuletzt wäre ein derartiges Modell vor allem für Passagiere eine interessante Entscheidungshilfe bei Flugbuchungen und Reiseplanungen.

1.2 Problemstellung

Bei genauerer Betrachtung der Aufgabe, Flugverbindungen im Sinne ihrer zeitbezogenen Güte für den Passagier auszuwerten, eröffnet sich die Komplexität des Problems, da für einen tragfähigen Ansatz zahlreiche Einflüsse in Betracht gezogen werden müssen. Davies antizipierte in seinen Ausführungen (Davies 1998) bereits einige Parameter implizit, welche in der vorliegenden Arbeit zur Diskussion kommen werden: Flugdauer, Zeitverschiebung, Flugansetzung, örtliche Transferzeiten, Biorhythmus.

Auf der anderen Seite müssen Zielwerte gefunden werden, welche den *zeitlichen Nutzwert* oder, negativ betrachtet, die *Zeit-Kosten* einer Flugreise möglichst vollständig erfassen und welche durch die eben genannten und weitere, noch zu bestimmende Einflussfaktoren zustande kommen. So ist sicherlich *die Reisedauer* einer der gesuchten Zielgrößen, welche für sich genommen relativ unkompliziert zu bestimmen ist, jedoch, wie bereits ausgeführt, keineswegs zu einer vollständigen Bewertung hinreicht.

Weiterhin erscheint es plausibel, dass ein Passagier den Aufenthalt an seinem Zielort möglichst ausgeruht verbringen möchte; er dient schließlich einem vorbestimmten Zweck, welcher es überhaupt erst notwendig macht, die Mühen

der Reise auf sich zu nehmen, und welcher sich in ausgeschlafenen Zustand am ehesten erfüllen lässt. Es kann also angenommen werden, dass er – *ceteris paribus* – jene Flugverbindung bevorzugen wird, welche mit seinen Schlafgewohnheiten und -bedürfnissen optimal in Einklang zu bringen ist. Wenn beispielsweise ein Flug nachts stattfindet und der Passagier währenddessen nicht schlafen kann, kommt er zwangsläufig erschöpft an seinem Zielort an. Da sich die Ansetzung beziehungsweise der Zeitpunkt des Fluges offensichtlich auf die Ausgeruhtheit und infolgedessen auch auf die Leistungsfähigkeit des Passagiers am Zielort auswirkt, ist letztere eine Funktion zeitlicher Einflüsse. Gleiches gilt für den Rückflug: Es ist anzunehmen, dass der Wert einer Reise auch von ausreichenden Schlafmöglichkeiten vor der Rückankunft abhängt. So wurde *die Ausgeruhtheit* oder, anders ausgedrückt, *das Schlafdefizit* auf einer Reise als zweite wichtige Zielgröße zur Bestimmung des zeitbezogenen Nutzwerts identifiziert.

Mithin stellt sich die Frage nach Möglichkeiten zur Quantifizierung objektiver Ausgeruhtheit im Sinne von Leistungsfähigkeit. Da letztere stark von ausreichendem Schlaf abhängt⁴, müssen Zeitpunkt und Dauer möglichen Schlafs während der Reise modelliert werden, um daraus Rückschlüsse auf das Schlafdefizit des Passagiers ziehen zu können. Dafür wird außerdem eine plausible Definition von Schlafdefizit benötigt. All dies erfordert einen Einstieg in das Wissenschaftsgebiet der Chronobiologie sowie die Recherche von Erkenntnissen der Schlafforschung. Die Modellierung des Schlafs beziehungsweise des Schlafdefizits auf der Reise ist eine der Hauptschwierigkeiten der vorliegenden Arbeit.

Ferner wird speziell für Geschäftsleute neben der Reisedauer und dem Schlafdefizit relevant sein, ob sie die für die Hin- und Rückreise aufgewendete Zeit produktiv nutzen können, statt sie verloren zu geben. Wenn beispielsweise während des Fluges aufgrund günstiger Ansetzung die Möglichkeit besteht, zu den gewohnten Zeiten Büroarbeit zu verrichten, statt beispielsweise ein durch frühe Abreise entstandenes Schlafdefizit notdürftig abbauen zu müssen, wird dies den Nutzwert der Reise zweifellos steigern. Auch aus der Perspektive von Touristen ist die Möglichkeit zum entspannten und ausgeruhten Fliegen positiv zu sehen; sie könnten sich schließlich einem Buch oder dem In-Flight-Entertainment widmen. So ist *der Verlust potentiell produktiver Zeit* oder, in spezieller Hinsicht, *der Verlust von Arbeitszeit* auf der Reise die letzte der drei identifizierten Zielgrößen.

Zur Bestimmung dieser Werte müssen Reisen in ihrem Verlauf analysiert sowie alle dafür relevanten Einflussparameter identifiziert und berücksichtigt werden. Dabei stellte sich früh heraus, dass es zur zeitlichen Gesamtbewertung einer Flugreise nicht ausreicht, lediglich den Hinflug oder Hin- und Rückflug getrennt

⁴ Siehe Abschnitt 2.2.3.

zu betrachten. Wie oben ausgeführt, hat der Rückflug auch eine Relevanz für die zeitbezogene Qualität einer Reise; seine optimale Ansetzung hängt jedoch vom vorangegangenen Reiseverlauf und den daraus entstandenen Beeinträchtigungen des Biorhythmus ab. Also muss die Reise als Ganzes analysiert werden, inklusive der Transfers zu und von den Flughäfen, der Aufenthaltsdauern an ebenjenen sowie der Flüge selbst und der währenddessen realisierten Schlaf- und Arbeitszeiten.

1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit hat eine Analysemethodik zum Ziel, die es erlaubt, die *zeitliche Güte* oder, umgekehrt betrachtet, die *Zeit-Kosten* spezifischer Reisen differenziert in drei Zielgrößen darzustellen, nämlich *Reisedauer*, *Schlafdefizit* und *Verlust potentiell produktiver Zeit*. Diese drei Zielgrößen sollen schließlich in einer Kennzahl vereinigt werden.

Unter Vorgabe geeigneter Parametersätze würde es dadurch zunächst möglich, die für Passagiere zeitlich bestmöglichen Flugverbindungen zu finden und für die Flugplanung zu verwenden. Ferner könnten bestehende Flugpläne anhand ihres Passagiernutzens bewertet und verglichen werden.

Zudem entstünde eine Möglichkeit, das zeitbezogene Potential von Flugzeugen mit neuen Leistungscharakteristika objektiv zu beleuchten. So ließen sich die genauen Umstände feststellen, unter welchen sich Hochgeschwindigkeitsflug für Passagiere lohnt, und wann der Nutzen minimal oder gar negativ wird.

Ferner sollen sowohl allgemeingültige Erkenntnisse (beispielsweise über den Einfluss der Flugrichtung) gewonnen als auch Fallbeispiele diskutiert werden, um die Komplexität und die Vielschichtigkeit der Problematik zu verdeutlichen.

Diese Studie konzentriert sich letztendlich auf Geschäftsreisen und die entsprechenden Passagiere, weil für jene der zeitliche Aspekt als besonders bedeutsam gilt (vgl. Abschnitt 2.1). Die dazu im Gegensatz stehenden Freizeitreisen werden zunächst anhand Passagierpräferenzen kurz diskutiert, in der Folge jedoch ausgeblendet.

Zuerst wird im Kapitel 2 der Stand der Forschung dargelegt, nämlich in den Themengebieten Sozio-Ökonomie des individuellen Reisens sowie Schlafwissenschaft.

Im Kapitel 3 wird daraufhin das zum vorliegenden Zweck erstellte Rechenprogramm erläutert. Dieses plant und simuliert den gesamten Ablauf der Reise eines einzelnen Passagiers. Schlaf- und Arbeitszeiten werden mitverfolgt

und fließen in die Reisebilanz ein. Um die Validität des Modells zu demonstrieren, werden Plausibilitätsbetrachtungen durchgeführt und dokumentierte Reisen nachsimuliert.

Kapitel 4 beschreibt die Anwendung des Modells zur Bewertung der Flugpläne von Fluggesellschaften aus Sicht eines Passagiers. Dafür wird eine Fallstudie durchgeführt, deren Ergebnisse anschließend durch Empfindlichkeitsanalysen auf Robustheit geprüft werden.

Um den im Vorfeld angesprochenen mutmaßlichen Zeitvorteil von Hochgeschwindigkeitsflügen differenzierter analysieren zu können, werden im Kapitel 5 Reisen in Überschall-Geschäftsreiseflugzeugen mit solchen in ihren existierenden Unterschall-Pendants verglichen.

Zuletzt werden im Kapitel 6 Ergebnisse und Schlüsse der Arbeit zusammengefasst sowie ein Ausblick auf Erweiterungsmöglichkeiten des Modells und weiterführende Forschungsthemen gegeben.

2 Stand der Forschung

2.1 Sozio-Ökonomie des individuellen Reisens

2.1.1 Wert der Reisezeit

Das Reisen wird in der klassischen, angelsächsisch geprägten Wirtschaftslehre als verlorene Zeit betrachtet, die minimiert werden muss, beziehungsweise als ein „Preis“, der zum Erreichen des Reisezwecks erbracht wird (Jain et al. 2008). Insofern erklärt sich auch die ökonomisch getriebene Rechtfertigung immer schnellerer Transportmittel und derer Infrastrukturen trotz zumeist hoher Kosten (Lyons et al. 2005).

Im Zuge dessen existiert eine Vielzahl an Methoden und eine noch größere Anzahl an Studien mit dem Ziel, den besagten Preis beziehungsweise den Gewinn durch eingesparte Reisezeit zu quantifizieren („*value of time*“ bzw. „*value of travel time savings*“) (Senna 1994; Hess et al. 2005; Wardman 1988). Dies geschieht beispielsweise auf Basis empirisch gefundener Passagierpräferenzen für verschieden teure Handlungsalternativen (Hensher 2001) oder durch das Verrechnen des Passagier-Stundenlohns mit der Reisedauer (Mackie et al. 2001).

Eine neuere, parallele Forschungsströmung rührt am althergebrachten Paradigma: Es greife zu kurz, Reisezeit als eine reine Belastung zu sehen, die minimiert werden müsse. Sie werde von Geschäftsreisenden schließlich auch produktiv genutzt, weil die meisten heutzutage Büroarbeiter seien und ihre Aufgaben in Form elektronischer Hilfsmittel wie Laptops oder Mobiltelefone stets mit sich trügen. Zudem könne man während des Reisens entspannen („*anti-activity*“, „*shifting gears*“) und Kraft sammeln. Beides sei schwerlich monetarisierbar, jedoch zweifellos wertvoll und zudem produktivitätssteigernd. (Mokhtarian et al. 2001; Lyons et al. 2005; Jain et al. 2008; Holley et al. 2008)

Tatsächlich bilden jedoch Geschäftsreisende verglichen mit Freizeitreisenden das zeitsensiblere Passagiersegment. So geben Teichert et al. als Ergebnis einer Stated-Preference-Studie mit knapp 6000 Teilnehmern an, dass Passagiere mit Geschäftsauftrag den Kriterien Flugplan bzw. -frequenz, Buchungsflexibilität und Pünktlichkeit signifikant mehr Wert beimessen als Freizeitreisende, ganz gleich, ob sie in der Business- oder der Economy-Klasse fliegen (Teichert et al. 2008). Hess und Adler stellen ebenfalls in Stated-Preference-Studien fest, dass bei Geschäftsreisenden die Zahlungswilligkeit für die Reduktion zeitbezogener Reiseparameter – Flugdauer, Zugangszeit am Flughafen, Anzahl an

Zwischenstopps, Verspätungen – signifikant höher ausfällt als bei anderen Passagieren (Hess et al. 2011; Hess et al. 2007).

In weiteren Studien zu Geschäftsreisen rangieren die Flugansetzung beziehungsweise die Verbindungsgüte in der Regel als wichtigstes Entscheidungskriterium für die Flugbuchung; erst danach folgen beispielsweise Komfort (DRV 2014) oder die Produktivität auf der Reise (DRV 2013). Oft wird der Ticketpreis als nachrangig geführt (Doganis 2010), was wohl auch daher kommt, dass in vielen Fällen der Passagier die Reise nicht selbst bezahlt (Pompl et al. 2007).

Im Falle von Urlaubsreisen ist Passagieren der Flugpreis in der Regel wichtiger als die Reisedauer oder die Flugansetzung (Teichert et al. 2008). Hin- und Rückreise werden vornehmlich zur Entspannung genutzt.

Durch die Herangehensweise dieser Arbeit werden Zielwerte festgestellt, die den zeitlichen Perspektiven aller Passagiere Rechnung tragen können: Die Reisedauer an sich, aber auch die potentiell produktive Zeit sowie Entspannungs- und Erholungszeit für Schlaf und Muße. Im Folgenden liegt der Fokus der Arbeit jedoch ausschließlich auf dem relevantesten Segment für zeitliche Aspekte, nämlich Geschäftsreisen.

2.1.2 Charakterisierung von Geschäftsreisenden

In der traditionellen Perspektive von Fluggesellschaften werden Kunden in zwei Segmente unterteilt (Teichert et al. 2008): *Business- und First-Class-Passagiere* verlangen nach Flexibilität bei der Flugbuchung sowie nach Komfort, und sie sind bereit, dafür teurere Tarife auf sich zu nehmen. *Economy-Class-Passagiere* achten hauptsächlich auf den Ticketpreis und geben sich im Gegenzug mit engen Sitzen und eingeschränkten Umbuchungsoptionen zufrieden.

Verschiedene Ursachen haben dazu geführt, dass diese bipolare Segmentierung immer mehr an Relevanz verloren hat. Die Liberalisierung und Deregulierung des Luftverkehrswesens in der westlichen Welt zum Ende der 1970er Jahre; Open-Sky-Abkommen zwischen Ländern und Weltregionen zur Freigabe von Lufträumen und Flughafennutzung; das Auftauchen und Erstarken von Billigfluggesellschaften; die Anschläge des 11. September 2001 sowie die Weltwirtschaftskrise in den Jahren nach 2007 und die jeweils darauffolgenden Einbrüche der Passagierzahlen; das Internet mit neuartigen Such- bzw. Buchungsmaschinen und Möglichkeiten des Preis- und Service-Vergleichs: Dies alles sorgte schrittweise für eine massive Verschärfung des inzwischen globalen Wettbewerbs zwischen Luftverkehrsgesellschaften, die seither in der Summe immer geringere Gewinne einfuhren und in großer Zahl insolvent gingen.

Folgerichtig sind heutige Airlines üblicherweise bestrebt, ihren Service zu verbessern und ihr Angebot von der Konkurrenz zu differenzieren, um in ebenjenem Wettbewerb bestehen zu können. Damit einher gehen detaillierte Recherchen und Forschungsaktivitäten bezüglich Passagierpräferenzen, also darüber, welche Wünsche und Vorstellungen verschiedene Gruppen von Passagieren für ihre Flugreise haben. Darauf werden dann vielfältige Angebote zugeschnitten, um letztlich die Zahlungsbereitschaft des Kunden zu erhöhen.

In diesem Sinne bestehen zwischen Geschäftsreisenden große individuelle Unterschiede, die verschiedenartig erfasst und kategorisiert werden können. Davon zeugen zahlreiche Studien, die jedoch meist uneinheitlich in Methodik, Perspektive, Teilnehmerkreis sowie wissenschaftlichem Anspruch sind. Als dementsprechend schwierig erweist es sich, den „durchschnittlichen Geschäftsreisenden“ zu erfassen. In diesem Abschnitt wird dennoch der Versuch unternommen, aus dem vorhandenen Datenmaterial Bandbreiten und Durchschnittswerte einzelner relevanter Charakteristika zu destillieren.

Zunächst fällt auf, dass die meisten der Studien demografisch ähnlich zusammengesetzt sind. So ist die große Mehrheit der Teilnehmer männlich (Mason 2002; Mason et al. 2006; Ciobanu et al. 2012), in der beruflichen Hierarchie mindestens mittelhoch angesiedelt (DRV 2013, 2014; Mason et al. 2006; Morris 2012, 2014) und im Mittel 41-44 Jahre alt (Ciobanu et al. 2012; Mason 2002; BTN Group 2012). Aguilera konstatiert in einer Meta-Studie, dass generell die meisten Geschäftsreisenden männlich seien (Aguilera 2008). Gustafsson stellte jedoch keine systematischen Unterschiede zwischen den Geschlechtern bei der Verwendung von bzw. Haltung zur Reisezeit fest (Gustafson 2012).

Ferner existiert ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen der hierarchischen Position eines Geschäftsmannes und der Häufigkeit seiner Reisen (Ciobanu et al. 2012; Aguilera 2008). Dass die große Mehrheit der (freiwilligen) Studienteilnehmer Führungspositionen bekleidet, kann als zusätzliches Indiz dafür gewertet werden, dass für sie das Thema besonders relevant ist.

Des Weiteren weist das Alter der Studienteilnehmer in der Arbeit von Ciobanu et al. (2012) eine linkssteile Normalverteilung mit einem Durchschnittswert von 42 Jahren auf, siehe Abb. 2.1-1. Es ist davon auszugehen, dass dies die reale Altersverteilung von Geschäftsreisenden gut widerspiegelt: Zum einen geht das oben beschriebene hohe Aufkommen an Reisenden in Leitungsfunktion in der Regel mit gewisser Berufserfahrung einher, die in jungen Jahren zunächst aufgebaut werden muss. Zum anderen werden Reisen als strapaziös empfunden (Aguilera 2008), was sowohl mit dem Alter als auch mit der Reisefrequenz zunimmt (Ciobanu et al. 2012); deshalb wird diese Aufgabe oft jüngeren, ambitionierten und familiär weniger gebundenen Managern übertragen (Aguilera 2008).

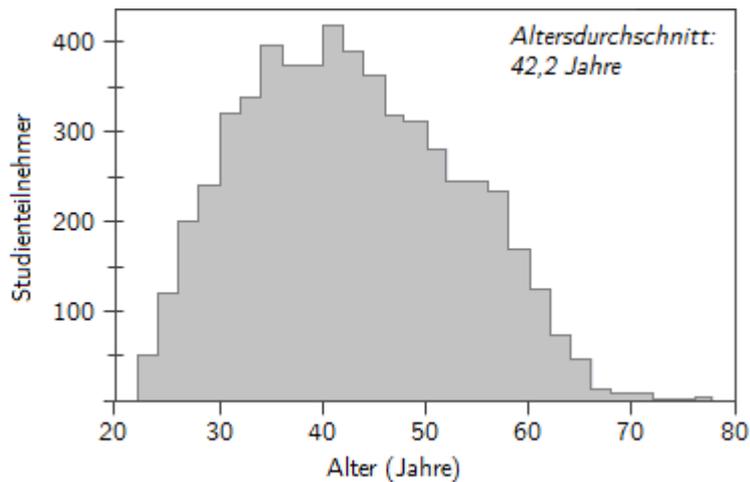


Abb. 2.1-1 – Altersverteilung der Ciobanu-Studie (aus Ciobanu et al. 2012, modif.)

Zuweilen wird der typische Geschäftsreisende als „mobiler Wissensarbeiter“ („mobile knowledge worker“, Lassen 2010) oder „Reisender mit Aktentasche“ („briefcase traveller“, Lyons 2013) beschrieben. Er ist speziell ausgebildet, flexibel, gut vernetzt und mobil arbeitsfähig; übliche Berufe sind beispielsweise Wissenschaftler, Ingenieure, Architekten, Autoren, Künstler (Lassen 2010), Betriebswirte oder Marketing-Experten.

Von den für das vorliegende Thema besonders relevanten Langstreckenflügen bestreitet er in den meisten Fällen 5 bis 7 pro Jahr (Morris 2012, 2014; BTN Group 2012). Um seine Reise möglichst zeiteffizient zu bestreiten, berücksichtigt er Flugzeiten, lokale Transferdauern und Flughafen-Wartezeiten bewusst in seiner Planung (Gustafson 2012).

Der Zweck der Reise sind praktisch immer persönliche Besprechungen, welche trotz vielfältiger elektronischer Kommunikationsmöglichkeiten aus verschiedensten Gründen unerlässlich bleiben (Urry 2002). Dabei trifft man sich meist mit Geschäftspartnern oder Angehörigen des eigenen Unternehmens (DRV 2013, 2014); man besucht jedoch auch Konferenzen, Lehrgänge oder Projekte in Forschung und Entwicklung (Lassen 2010).

Sowohl durch die Seniorität vieler Geschäftsreisenden als auch durch die Strapazen des Reisens lässt sich erklären, weshalb alle diesbezüglichen Quellen die Business-Klasse als bevorzugte Kabinenkategorie auf längeren Flügen ausweisen (Teichert et al. 2008; Ciobanu et al. 2012; Mason 2002; Morris 2012, 2014; BTN Group 2012). Auf kürzeren Flügen wird es Reisenden jedoch immer öfter zugemutet, in der Economy-Klasse zu fliegen (Mason et al. 2006).

Angesichts der fortschreitende Globalisierung und Vernetzung in der Geschäftswelt gehen wir im Rahmen der vorliegenden Arbeit davon aus, dass die

gefundenen Charakteristika von Geschäftsreisenden in allen Weltregionen und vor allem für Reisen von und zu Wirtschaftsmetropolen im Großen und Ganzen Bestand haben.

2.1.3 Planung und Ablauf einer Geschäftsreise

Reisen mit Geschäftszweck können sowohl langfristig – beispielsweise im Falle regelmäßig abgehaltener Konferenzen – oder auch kurzfristig geplant werden – beispielsweise als Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse. Gustafson fand, dass die Planungsstrategie zeitliche Aspekte generell priorisiere, und zwar zumeist mit dem Ziel, die Reisezeit zu minimieren. Folglich würden Transfer- und Wartezeiten möglichst genau berücksichtigt; Termine und Verpflichtungen würden kombiniert, um weitere Reisen zu vermeiden; Übernachtungen am Zielort würden gescheut. Als Gründe für möglichst kurze Reisedauern werden zunächst der Vorrang von Familienleben, sozialen Verpflichtungen und Freizeitaktivitäten aufgeführt; ferner sei die Arbeit am Heimatort effizienter; nicht zuletzt sei das Reisen an sich beschwerlich. Reisekosten hätten nur zweite, die produktive Nutzung von Reisezeit nur dritte Priorität. (Gustafson 2012)

Für eine stringente Zeitplanung spricht zudem, dass zumeist im Ablauf einer Reise lediglich bis zu eine Stunde durch unvorhergesehene Ereignisse oder schlechte Planung verloren geht (DRV 2013).

Oftmals werden Geschäftsreisen mit Freizeitaktivitäten kombiniert. Der Reisende nutzt die Anwesenheit am Arbeitsort dann für Besichtigungen, Erholungsurlaub oder Familientreffen (DRV 2013; Lassen 2010).

Reisende haben heutzutage die Möglichkeit, auch während der Hin- und Rückreisen zu Geschäftsterminen zu arbeiten, weil fast alle mit elektronischen Hilfsmitteln wie Laptop und Smartphone unterwegs sind (DRV 2013).

Eine Minderheit arbeite die meiste Zeit über und berichte von kaum veränderten Bedingungen im Vergleich zum Büro, aber auch über hohe Arbeitsbelastung. Manche arbeiteten wenig oder gar nicht, um sich für die Aufgaben am Zielort auszuruhen. In den meisten Fällen herrsche jedoch eine Mischung aus Arbeit, persönlichen Aktivitäten, Entspannung und Warten vor. Auf der Hinreise sowie während der gewohnten Arbeitszeiten sei die Arbeitsneigung höher, während Rückreise und biologischer Abend eher zur Entspannung genutzt würden. Insgesamt jedoch werde die Arbeitseffizienz außerhalb regulärer Arbeitsplätze als eingeschränkt gesehen, weshalb versucht werde, möglichst viel Arbeitszeit in ebensolchen zu verbringen. (Gustafson 2012)

So fällt es beispielsweise auf Flughäfen in der Regel schwer zu arbeiten, weil die nötigen Einrichtungen wie Stühle, Tische und Steckdosen selten zur Verfügung stehen die Privatsphäre fehlt (Breure et al. 2003). Zudem sorgen Sicherheitschecks und Gepäckabgabe für unwillkommene Unterbrechungen; auch deswegen werden Wartezeiten an Flughäfen als unbrauchbare Zeit gesehen, außer im Falle des Zugangs zu einer Lounge (Gustafson 2012). Flugzeugkabinen bieten auf Kurzstrecken zu wenig Platz für Computerarbeit, was sich für Langstrecken jedoch relativiert (Gustafson 2012)⁵.

Überraschenderweise existieren in der Literatur kaum quantitative Angaben zu tageszeitlichen Präferenzen der Flugansetzung von Passagieren. Brey und Walker stellten eine Stated-Preference-Studie für Hinflüge innerhalb der kontinentalen Vereinigten Staaten an (Brey et al. 2011). Dabei fanden sie für Geschäftsreisende, welchen die Abflugzeit wichtiger war als die Ankunftszeit, zwei bevorzugte Tageszeiten, nämlich den Vormittag mit einem pointierten Maximum bei 10 Uhr sowie den späten Nachmittag mit einem (deutlich niedrigeren) Nachfrage-Plateau zwischen 18 und 21 Uhr (siehe Abb. 2.1-2 links). Für den Fall, dass die Ankunftszeit wichtiger war, fanden sie weniger prägnante Nachfragespitzen, jedoch ein ähnliches vormittägliches Maximum und gehäufte Nachfrage am späteren Nachmittag, welche zur Nacht hin abnimmt (siehe Abb. 2.1-2 rechts). Beide Ergebnisse passen gut zur oben beschriebenen Beobachtung, dass Geschäftsreisende ungerne am Zielort übernachten: Sie fliegen lieber morgens hin und kommen lieber morgens an, um die Nacht vor ihrem Termin zuhause verbringen zu können. Bezüglich quantitativer Zeitpräferenzen für den Rückflug fanden sich keinerlei dokumentierte Daten.

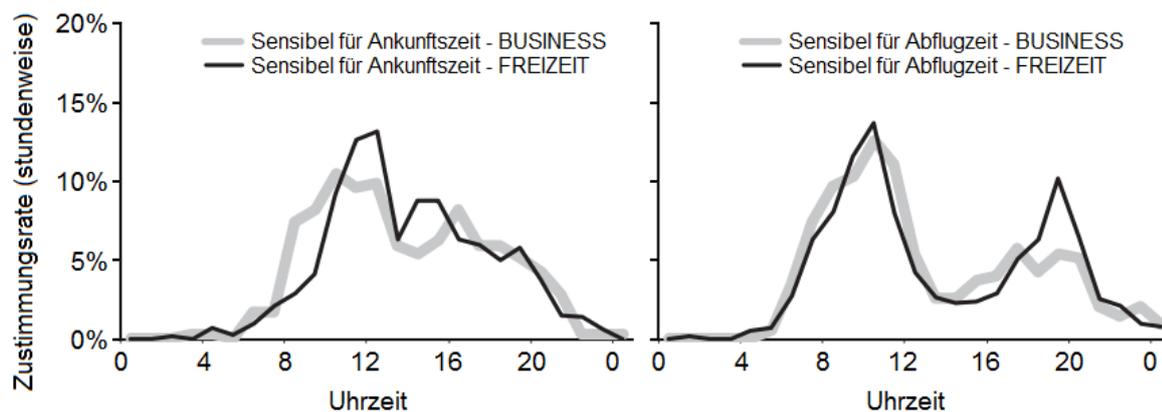


Abb. 2.1-2 – Präferierte Flugzeiten (in den USA, aus Brey und Walker 2011, modif.)

⁵ Gustafson unterscheidet nicht zwischen Kabinenklassen; angesichts der oben besprochenen Buchungspräferenzen interpretieren wir Kurzstrecke als Economy- und Langstrecke als Business-Class-Sitzkomfort.

2.2 Erkenntnisse der Schlafwissenschaft

2.2.1 Regulärer Schlaf

In Literatur der Schlafwissenschaft findet sich eine große Anzahl an Studien, die Dauer und Zeitpunkt normalen Schlafs ausweisen (Burgess et al. 2005, Hume et al. 1998, Taillard et al. 1999, Kryger et al. 2011, Kronholm et al. 2009, Carrier et al. 1997, Horne et al. 2008). Um letzteren für den vorliegenden Zweck zu definieren, wird im Folgenden der Ausgang einer Meta-Studie bezüglich quantitativer Schlafparameter gesunder Menschen wiedergegeben, welche die Ergebnisse 66 vorhergehender Studien zusammenfasst (Ohayon et al. 2004). In dieser Arbeit, welche sich auf Nachtschlaf beschränkt, wurde unter anderem festgestellt:

Die *Gesamt-Schlafdauer* (engl.: *total sleep time, TST*) sinkt stetig mit dem Alter. So ist beispielsweise die durchschnittliche Schlafdauer bei 30-Jährigen noch 430 Minuten, während sie bei 60-Jährigen nur noch 380 Minuten beträgt. Schlaf wird in den gesichteten Studien entweder definiert als der Zeitraum, in welchem die motorische Aktivität minimal ist (festgestellt durch das Verfahren der Aktigraphie (Littner et al. 2003)), oder als der Zeitraum, in welchem bestimmte Gehirnwellen vorherrschen (festgestellt durch Polysomnographie (Bloch 1997)). Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass die Art des Verfahrens das Ergebnis nur unwesentlich beeinflusst.

Ähnliches wurde auch für die *Schlafeffizienz* (engl.: *sleep efficiency, SE*) konstatiert. Während sie in jungen Jahren nahezu makellos ist, sinkt sie im hohen Alter auf 80 % oder weniger. Schlafeffizienz ist, per Definition, das Verhältnis von Schlafdauer zur *Dauer des Bettaufenthalts* (engl.: *time in bed, TIB*) (Rechtschaffen et al. 1968).

Für die *Einschlafverzögerung* oder *Schlaflatenz* (engl.: *sleep latency, SL*), also die Zeit zwischen dem Zu-Bett-Gehen und dem Einschlafen, wurden durchschnittlich 15 Minuten gefunden, wobei sich eine deutliche Varianz zeigte und eine relative Unabhängigkeit vom Alter festgestellt wurde. (Eine andere Studie legt nahe, dass Schlaflatenz hauptsächlich von der Tageszeit und von der Länge der vorhergehenden Wachepisode abhängt, und dass sie bis zu 30 Minuten betragen kann (Åkerstedt et al. 1996).)

Die *Wachzeit nach Schlafbeginn* (engl.: *wake after sleep onset, WASO*), also die gemessene Gesamtzeit des Wachseins zwischen Schlafepisoden, steigt ebenfalls deutlich mit dem Alter. Während sie bei Jugendlichen noch vernachlässigbar ausfällt, kann sie bei älteren Senioren bis hin zu wenige Stunden betragen. Bei 30-

Jährigen wurden durchschnittlich 20 Minuten, bei 60-Jährigen im Mittel 40 Minuten gemessen.

Die eben eingeführten Parameter stehen im folgenden Verhältnis zueinander: Die Zeit im Bett ist sowohl der Quotient aus Gesamt-Schlafdauer zu Schlafeffizienz als auch die Summe aus Schlaflatenz, Gesamt-Schlafdauer und Wachzeit nach Schlafbeginn (Rechtschaffen et al. 1968):

$$TIB = \frac{TST}{SE} = SL + TST + WASO \quad (2-1)$$

Die Zeitpunkte normalen Schlafs werden von Ohayon et al. nicht untersucht. Deshalb werden hier in anderen Studien gefundene Durchschnittswerte zitiert:

- Burgess & Eastman (2005) zum *Zeitpunkt des Schlafbeginns* (engl.: *sleep onset time, ST*) und zum *Zeitpunkt des Aufwachens* (engl.: *wake-up time, WT*): 23:33 und 7:06 Uhr
- Hume et al. (1998) zu Schlafbeginn (*ST*) und Aufwachen (*WT*):
 23:27 und 7:33 Uhr bei 20-34-Jährigen,
 23:38 und 7:04 Uhr bei 35-49-Jährigen,
 23:11 und 6:44 Uhr bei 50-70-Jährigen.
- Taillard et al. (1999) zum *Zeitpunkt des Zu-Bett-Gehens* (engl.: *bedtime, BT*) und zum *Zeitpunkt des Aufstehens* (engl.: *arising time, AT*) während der Arbeitswoche:
 22:42 und 6:33 Uhr bei „Morgen-Typen“ (also „Frühaufstehern“),
 23:03 und 6:56 Uhr bei „Normal-Typen“,
 23:42 und 7:30 Uhr bei „Abend-Typen“ (also „Nachteulen“).
- Carrier et al. (1997) zu den Zeitpunkten des Zu-Bett-Gehens (*BT*) und Aufwachens (*WT*): 23:28 und 7:08 Uhr

2.2.2 Modelle der Schlafregulierung

Es ist heute eine anerkannte Lehrmeinung, dass Zeitpunkt, Dauer, Intensität und Effizienz des Schlafs hauptsächlich von zwei unabhängigen biologischen Prozessen gesteuert werden (Borbély et al. 1999; Winfree 1983; Beersma et al. 2007).

Der erste davon ist die menschliche *Homöostase* (auch *homöostatischer Druck*). Sie ändert sich reziprok für Schlaf- und Wachzustände: Sie steigt an, wenn wir wach sind, und sinkt, wenn wir schlafen. Je länger wir wach sind, umso erschöpfter werden wir, und je länger wir schlafen, umso mehr schwindet die Müdigkeit. Der homöostatische Zustand ändert sich zu Beginn jedes Phasenwechsels am stärksten: Schlaf ist in seinen ersten Stunden am

effizientesten; analog dazu steigt die Müdigkeit immer langsamer an, je länger eine Wachphase andauert. (Borbély et al. 1999)

Der zweite Prozess, der *zirkadiane Rhythmus* (auch bekannt als *Biorhythmus*), ist eine Funktion der Tageszeit. Durch die regelmäßige Ausschüttung des „Schlafhormons“ Melatonin steuert der Körper unseren Schlafdrang, und zwar unabhängig vom homöostatischen Zustand. Dieser Prozess gilt als relativ inert und träge bezüglich seiner Anpassung an veränderte äußere Taktgeber, insbesondere an Tageslicht (Kolla et al. 2011).

Ein in sich geschlossenes mathematisches Formelwerk der Schlafregulierung, welches auch nach längerer Zeit noch zitiert wird und als Grundlage weiterer Modelle gilt (Achermann et al. 2003), wurde im Jahr 1984 von Daan, Beersma und Borbély vorgestellt (Daan et al. 1984). Dabei stützten sie sich auf ein bereits zuvor veröffentlichtes sogenanntes Zwei-Prozess-Modell (Borbély 1982), welches Schlafregulierung durch zwei unabhängige Prozesse postuliert. Dabei soll Schlaf eingeleitet beziehungsweise beendet werden, wenn der homöostatische Zustand (*Prozess S*) einen oberen beziehungsweise unteren Schwellwert erreicht. Daan et al. stellten die These auf, dass diese Schwellwerte durch den zirkadianen Rhythmus moduliert werden (*Prozess C*) (siehe Abb. 2.2-1).

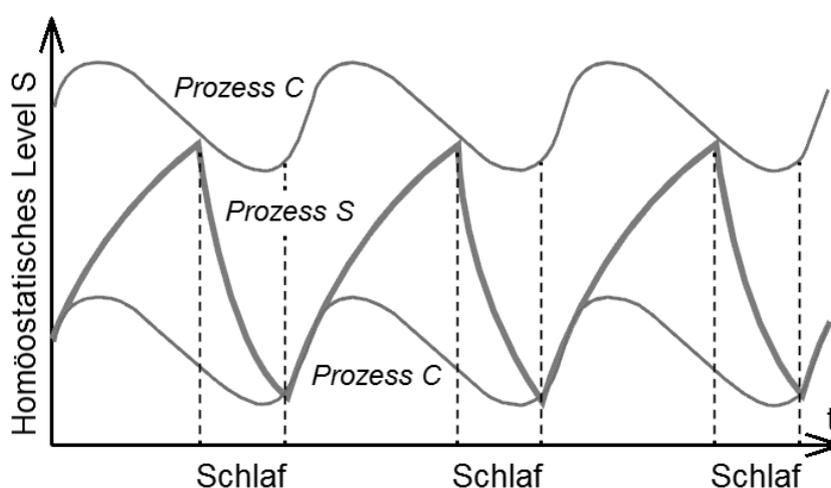


Abb. 2.2-1 – Regulärer Schlaf nach Daan et al. (1984)

Den Prozess S formulierten Daan et al. als zwei Exponentialfunktionen, die sich den Werten 0 (vollkommene Ausgeruhtheit) beziehungsweise 1 (vollkommene Ermüdung) asymptotisch annähern. Die in einem Schlafexperiment mit verzögertem Schlafbeginn festgestellten Zeitpunkte spontanen Aufwachens (Åkerstedt et al. 1981) verbanden sie mit einer schiefen Sinuskurve. Daraufhin definierten sie den Aufwachzeitpunkt als eine Funktion des Einschlafzeitpunkts

und des dabei vorliegenden homöostatischen Niveaus, graphisch ausgedrückt als den Schnittpunkt der homöostatischen Schlafkurve mit der zirkadianen Aufwachsweite. (Siehe Abb. 2.2-2.)

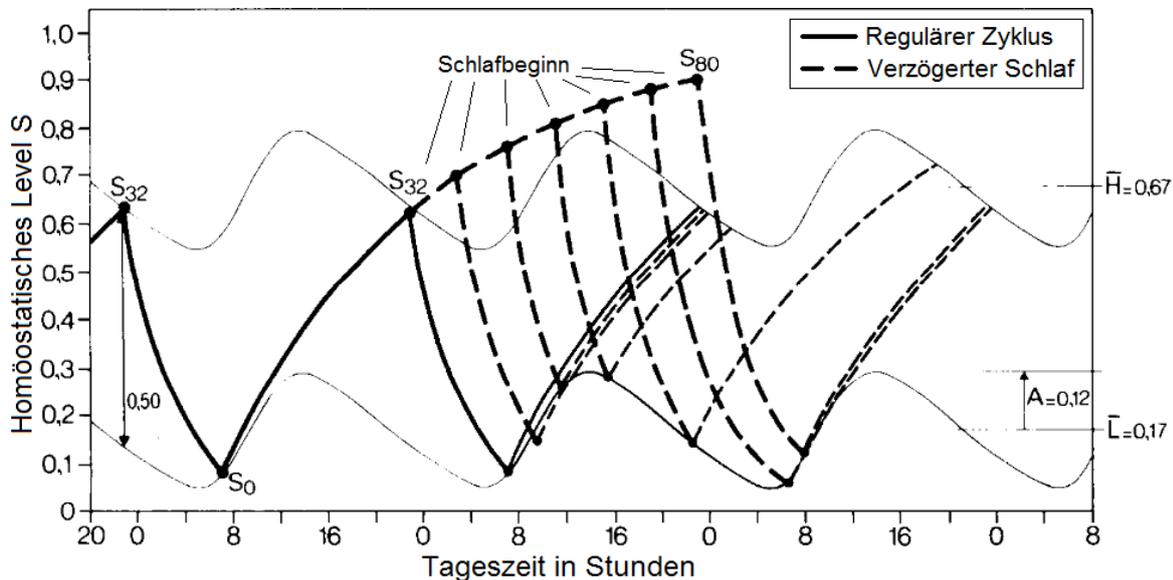


Abb. 2.2-2 – Aufwachen nach verzögertem Schlafbeginn (aus Daan et al. 1984, mod.)

Die mathematische Formulierung der homöostatischen Entwicklung über die Zeit (Prozess S) wurde von Daan et al. (1984) wie folgt ausgedrückt (mit dt [h] als Zeitinkrement und S_{init} als homöostatischem Level beim Zeitpunkt des vorangegangenen Einschlafens beziehungsweise Aufwachens):

$$\text{Schlaf}^6: \quad S(dt, S_{init}) = S_{init} \cdot 0,888^{2 \cdot dt} \quad (2-2)$$

$$\text{Wachsein:} \quad S(dt, S_{init}) = 1 - (1 - S_{init}) \cdot 0,973^{2 \cdot dt} \quad (2-3)$$

Unter der Annahme, dass normaler Schlaf von 23 Uhr bis 7 Uhr stattfindet, wurden der Aufwach- und der Einschlafwert von S zu $S_0 = 0,093$ beziehungsweise $S_{32} = 0,622$ bestimmt.⁷

Die Lösung der ursprünglich verschränkten Formel für die schiefe Sinuskurve wurde mit der Folge

$$S(T, \varphi) = T + 0,97 \cdot \sin \varphi + 0,22 \cdot \sin(2\varphi) + 0,07 \cdot \sin(3\varphi) + 0,03 \cdot \sin(4\varphi) + 0,01 \cdot \sin(5\varphi) \quad (2-4)$$

⁶ NB: dt wird hier als reine (Stunden-)Zahl eingesetzt, S bleibt dimensionslos.

⁷ 32 steht für 2·16 Stunden und bezieht sich auf das 2· dt im Exponenten.

angenähert, wobei $T = H = 0,67$ für den Mittelwert der oberen Schwelle einzusetzen ist, $T = L = 0,17$ für den Mittelwert der unteren Schwelle (vgl. Abb. 2.2-2), und φ für die Phase in einer 24-Stunden-Periode steht.

Durch die vorliegende mathematische Formulierung von Daan et al. (1984) kann der Zeitpunkt spontanen Aufwachens beziehungsweise die Dauer ungestörten Schlafs für jeden beliebigen Einschlafzeitpunkt ermittelt werden.

Eine Beschränkung des Modells besteht darin, dass bezüglich der Einschlafschwelle lediglich angenommen wird, dass sie parallel zur Aufwachschwelle verläuft. Einen Versuch zur besseren Vorhersage unter Einbeziehung der Schlaflatenz bzw. Einschlafneigung wurde später von Borbély et al. (1989) unternommen; dabei wurden jedoch lediglich theoretisch-qualitative Aussagen getroffen.

Åkerstedt und Folkard brachten mit Hilfe experimenteller Daten die Schlaflatenz in direkten Zusammenhang mit dem Grad der Aufmerksamkeit und formulierten sie als Funktion des homöostatischen Levels und der Tageszeit oder, genauer gesagt, der zirkadianen Phase (Åkerstedt et al. 1996, 1997; Åkerstedt et al. 2004). Ihr sogenanntes Drei-Prozess-Modell ist ebenfalls mathematisch hinterlegt, jedoch kaum kompatibel zu jenem von Daan et al. und deutlich komplexer. Trotzdem bestätigt es insbesondere die Vorhersagen des ersteren Modells bezüglich Schlafdauer (Åkerstedt et al. 2004).

Einen weiteren Beitrag zum Verständnis des Einschlafens liefern zwei frühe Studien (Lavie 1986; Strogatz et al. 1987), die auch in neuerer Zeit noch herangezogen werden (Dijk 2005). Beide stießen unabhängig voneinander in Schlafexperimenten auf gewisse Tageszeiten, in welchen es Probanden kaum möglich war einzuschlafen (wobei Weiterschlafen hingegen unproblematisch schien). Diese „Zonen des Wachbleibens“ (engl.: *wake maintenance zones* oder *forbidden zones for sleep*) fanden sich zum einen am späten Morgen und zum anderen vor dem abendlichen Zu-Bett-Gehen. Sie werden getrennt durch nachmittägliche Schläfrigkeit. Die abendliche Zone dauert bis zu 4 Stunden, endet mit dem als „Schlafpforte“ (engl.: *sleep gate*) bezeichneten plötzlichen Anstieg der Einschlafneigung, und wird als besonders effektiv beschrieben (Lavie 1986).

2.2.3 Schlafverlust und Schlafdefizit

Es ist sowohl allgemein bekannt als auch wissenschaftlich belegt, dass ausreichend Schlaf höchste Bedeutung für kognitive Leistungsfähigkeit, Gesundheit und Wohlbefinden besitzt. So wird berichtet von

- tagelang beeinträchtigt psychomotorischer Leistung nach schwerem Schlafentzug (Lamond et al. 2007);
- Minderleistung bei Arbeit in der biologischen Nacht (Samel et al. 1995);
- einer subjektiven Überschätzung der persönlichen Aufmerksamkeit und Leistung während der biologischen Nacht (Zhou et al. 2012);
- exponentiellem Abfall der Leistungsfähigkeit und Verlust höherer kognitiver Funktionen nach verlängerter Wachzeit (Åkerstedt 1995);
- Stimmungsänderungen (Selvi et al. 2007) sowie Änderung des Risikoverhaltens (McKenna et al. 2007) bei Schlafentzug.

Ein einmaliger Schlafverlust von 1-2 Stunden scheint die Leistungsfähigkeit nicht signifikant zu beeinflussen (Wilkinson et al. 1966; Jewett et al. 1999). Bei verkürztem Schlaf über einen längeren Zeitraum stabilisiert sich die Leistung auf niedrigerem Niveau; falls jedoch weniger als 4 Stunden Schlaf pro Nacht erreicht werden, fällt sie stetig weiter (Belenky et al. 2003). Insgesamt scheint es, dass Leistungsabfall auftritt, wenn 7 Stunden Schlaf über einen längeren Zeitraum verfehlt werden, obwohl der subjektive Eindruck meist ein anderer ist (van Dongen et al. 2003a).⁸

In der Schlafwissenschaft wird der Begriff des *Schlafdefizits* (engl.: *sleep deficit/sleep debt*) meist im Kontext mit kumulativem Schlafverlust über eine längere Periode sowie mit der Bewertung und Messung ihrer langfristigen gesundheitsschädlichen Effekte verwendet. Aufgrund von Experimenten, in denen Probanden mehrere Nächte lang nicht genügend Schlaf erhielten und in Aufmerksamkeitstests immer schlechter abschnitten, statt sich zu stabilisieren, definierten van Dongen et al. das Schlafdefizit als die kumulative Differenz zwischen den verlorenen gegenüber den individuell notwendigen Schlafstunden (van Dongen et al. 2003b; Spiegel et al. 1999).

Überaus kontrovers diskutiert wird die Frage, ob große Teile der Bevölkerung in den Industriestaaten an chronischem Schlafdefizit leiden (Horne 2004). Als Indiz hierfür kann gewertet werden, dass am Wochenende in der Regel deutlich länger geschlafen wird als innerhalb der Arbeitswoche, was darauf hindeuten könnte,

⁸ An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, dass es allem Anschein nach resistente Individuen gibt, deren nächtliche Leistungsfähigkeit durch gesteigerten homöostatischen Druck kaum beeinträchtigt wird Gaillaud et al. 2008.

dass dadurch ein unter der Woche angelaufenes Schlafdefizit aufgeholt wird (Burgess et al. 2005; Lazar et al. 2013). Dagegen spricht beispielsweise, dass in Schlafexperimenten Probanden ihren Schlaf willentlich deutlich über die übliche Dauer hinaus verlängern konnten – mutmaßlich des Genusses wegen – (Horne et al. 2008), was womöglich beim „Ausschlafen“ am Wochenende zum Tragen kommt.

2.2.4 Jetlag

Die oben diskutierte Trägheit der zirkadianen (“inneren”) Uhr bewirkt den sogenannten Jetlag: Nach transmeridianen Flügen, also solchen zwischen verschiedenen Zeitzonen, braucht der Organismus eine gewisse Zeit, um sich an den neuen Tag-Nacht-Rhythmus anzupassen (Endo et al. 1975; Haimov et al. 1999). Jetlag manifestiert sich (neben der Beeinträchtigung des emotionalen Gleichgewichts sowie der Verdauung) hauptsächlich in Müdigkeit und Schläfrigkeit sowie in temporären Schlafstörungen, da der zirkadiane Rhythmus nicht mit dem Tag-Nacht-Zyklus der neuen Umgebung synchronisiert ist (Kolla et al. 2011; Haimov et al. 1999).

Die Umstellung auf die neue Zeitzone nach Flügen dauert im Allgemeinen in Ostrichtung länger als in Westrichtung (Kolla et al. 2011; Haimov et al. 1999; Eastman et al. 2005; Eastman et al. 2009). Als wahrscheinlicher Grund wird vermutet, dass die “natürliche” zirkadiane Periode geringfügig länger dauert als einen Tag, nämlich je nach Individuum bis zu 26 Stunden (Shephard 1984), im Mittel jedoch zwischen 24,2 und 24,5 Stunden (Czeisler et al. 1980; Winfree 1983; Dijk et al. 1994; Gundel et al. 1999). Dieses Phänomen kommt Westflügen entgegen, auf denen die Uhr zurückgestellt und der Tag verlängert werden muss, und ist dem verkürzten Tag auf Ostflügen abträglich. Als klassische Anpassungsraten nach einer Zeitumstellung gelten, basierend auf einer Studie von Aschoff et al. (1975), 92 Minuten pro Tag in Westrichtung und 57 Minuten pro Tag in Ostrichtung. Bei besonders großen Zeitverschiebungen nach Flügen in Ostrichtung kann es geschehen, dass eine Resynchronisation durch Verlängerung des zirkadianen Zyklus‘ stattfindet statt, wie sonst, durch eine Verkürzung (Haimov et al. 1999; Flower et al. 2003; Eastman et al. 2009).

Es ist bekannt, dass Menschen unterschiedlich gut mit Jetlag zurechtkommen (Haimov et al. 1999). So gibt es beispielsweise Hinweise darauf, dass beispielsweise das Alter, die Rigidität der Schlafgewohnheit sowie die Persönlichkeitsstruktur einen Einfluss darauf haben, wie schnell Jetlag abgebaut wird; die quantitativen Zusammenhänge gelten jedoch als noch nicht ausreichend belegt (Flower et al. 2003).

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Vorschlägen für vergleichsweise einfache Maßnahmen, um die Auswirkungen des Jetlags abzumildern:

- Sich auf kürzeren Aufenthalten nach der Heimatortszeit richten (Rockwell 1975; Lowden et al. 1998). Dazu gehört beispielsweise, die Arbeitszeiten am Zielort so zu planen, dass zu gewohnten Zeiten geschlafen werden kann (Rockwell 1975).
- Sich vor längeren Reisen frühzeitig an die neue Zeitzone anpassen, indem vor Westreisen progressiv später und vor Ostreisen progressiv früher ins Bett gegangen wird (Rockwell 1975; Eastman et al. 2005).
- Wichtige Treffen zu zirkadian geeigneten Zeiten abhalten oder erst nach einigen Tagen Aufenthalt ansetzen (Rockwell 1975; Haimov et al. 1999).
- Die Schlafzeit täglich nach den bekannten Anpassungsraten verschieben (Kolla et al. 2011).
- Nachtflüge und den oft damit einhergehenden Schlafverlust vermeiden (Haimov et al. 1999).
- In Business- oder First-Class reisen (Haimov et al. 1999).

Ferner soll die Verabreichung beziehungsweise Vermeidung hellen Lichts zu spezifischen Zeitpunkten positive Effekte mit sich bringen (Eastman et al. 2009). Aus pharmazeutischer Sicht wurde vor allem die zeitlich geplante Einnahme von Melatonin vielfach untersucht und oftmals befürwortet (Arendt et al. 1995; Herxheimer et al. 2002; Suhner et al. 1998). Andererseits wurde in einer vergleichenden Meta-Studie der Wirksamkeitsunterschied zwischen Melatonin und einem Placebo als statistisch nicht signifikant eingestuft (Buscemi et al. 2006).⁹

2.2.5 Schlaf im Flugzeug

Allem Anschein nach gibt es keine dedizierten und öffentlich verfügbaren Studien, die die Qualität oder Effizienz des Schlafs von Passagieren in Flugzeugkabinen direkt untersuchen. Dies könnte, neben vermutlich erheblichen Aufwand, an allzu hinderlichen Einflüssen auf die Messmethoden liegen, so beispielsweise an der Invasivität polysomnographischer Aufbauten, an der Verfälschung der Aktigraphie durch Vibrationen sowie an der Ungenauigkeit subjektiver Einschätzungen bei Befragungen (Signal et al. 2005). Grundsätzlich kann jedoch angenommen werden, dass der Schlaf im Flugzeug in der Regel gegenüber demjenigen in normalen Betten minderwertig ausfällt. Hierfür sind vor allem die ungewohnte Umgebung, verringerter Luftdruck und niedrige Luftfeuchtigkeit sowie Störungen durch Mitflieger oder Kabinenpersonal verantwortlich.

⁹ Für eine ausführlichere Zusammenfassung des Phänomens Jetlag siehe Aeschbach (2013).

Gleichwohl existieren einige wenige Untersuchungen zu verwandten Themen, etwa zur Schlafqualität bei aufrechtem Sitzen oder zum Schlaf der Flugmannschaft im Flug.

So untersuchten Signal et al. (2005) den Schlaf von Flugoffizieren im Ruheabteil der Crew auf langen Auslieferungsflügen – also auf solchen mit mutmaßlich besonders geringem Störpotential – mit Hilfe von Polysomnographie, dem „Goldstandard“ der Schlafuntersuchung. Dabei stellten sie während einer geplanten siebenstündigen Ruhephase eine durchschnittliche Schlafeffizienz von 68 % fest, gegenüber 88 % während des nachfolgenden Aufenthalts am Zielort. Die zeitliche Ansetzung der Ruhephase wurde jedoch nicht vermerkt, weshalb sich ein negativer Einfluss der Tageszeit auf die Schlafqualität nicht ausschließen lässt.

Aeschbach et al. (1994) analysierten den Schlaf junger Testpersonen (23-26 Jahre) in zurückgelehnten Economy-Class-Sitzen – wenngleich im Schlaflabor und mit unbegrenzter Beinfreiheit – ebenfalls durch Polysomnographie. Hierbei konstatierten sie eine gegenüber den Vornächten und der Folgenacht deutlich reduzierte Schlafeffizienz (im Mittel 79,2 % gegenüber 91,7 % bzw. 94,1 %).

In einer ähnlichen Laborstudie fanden Nicholson und Stone (1987), dass sich die Schlafeffizienz mit größerer Neigung der Rückenlehne verbessert. Bei einem Winkel von $49,5^\circ$ zur Vertikalen und einer Fußablage etwa auf Höhe der Körpermitte sanken die nächtliche Schlafdauer im Vergleich zum Bett lediglich von 437 auf 425 Minuten und die Schlafeffizienz von 90 % auf 89 %. Bei der mit einem zurückgelehnten Economy-Sitz vergleichbaren Neigung von $17,5^\circ$ und mit fehlender Fußablage verringerten sich die Werte jedoch auf 355 Minuten bzw. 77 %. Der Effekt erhöhter Schlafqualität bei vergrößertem Neigungswinkel der Rückenlehne konnte auch im Kontext von Mittagsschlaf in Autositzen nachgewiesen werden (Hayashi et al. 2008).

3 Methodischer Ansatz

3.1 Prinzip der Modellierung

Ausgangspunkt der Modellierung ist die Annahme, dass eine Reise grundsätzlich einem Zweck dient, welcher eine feste Aufenthalts- beziehungsweise Termindauer erfordert. Dieser Aufenthalt kann entweder zu einem festen oder zu einem veränderlichen Tageszeitpunkt beginnen, je nachdem, ob die Termine nach den Präferenzen des Passagiers ausgerichtet werden können. Die Reise wird um diesen Aufenthalt herum angelegt, angefangen bei jenem Zeitpunkt, an welchem der Passagier am Heimatort aus der Tür tritt, um sich auf den Weg zum Flughafen zu machen, bis hin zu seiner Rückankunft zuhause.

Das Modell orientiert sich implizit an Geschäftsreisenden, da für diese im Gegensatz zu Urlaubern (tages-)zeitliche Aspekte als besonders relevant gelten können. Damit sind sie auch jene Passagiersparte, deren Vorlieben bei der Erstellung von Flugplänen vermutlich am ehesten in Betracht gezogen werden.¹⁰

Das erstellte Rechenmodell plant Reisen eines einzelnen Passagiers sequenziell und schätzt in deren Verlauf seine Schlaf- und Arbeitszeiten ab. Am Ende bilanziert es die drei oben diskutierten Zielgrößen, die den zeitbezogenen Nutzen beziehungsweise die Zeit-Kosten einer Reise maßgeblich bestimmen:

1) *Reisedauer von Tür zu Tür:*

Der Reisende möchte die Dauer von Hin- und Rückreise minimieren.

2) *Ausgeruhtheit beziehungsweise Schlafdefizit zu kritischen Zeitpunkten:*

Der Reisende beabsichtigt, sowohl zum Beginn seiner Termine als auch zum Zeitpunkt seiner Rückankunft maximal ausgeruht zu sein.

3) *Verlust potentiell produktiver Zeit:*

Der Reisende möchte sowohl auf der Hin- als auch auf der Rückreise so wenig Arbeitszeit wie möglich verlieren.

Um letztendlich nicht nur für den Hin-, sondern auch für den Rückflug die optimale Ansetzung bestimmen zu können, wird der gesamte Reiseverlauf inklusive des Aufenthaltszeitraumes betrachtet. Die Wahl des Rückfluges wird nämlich durch die vorherige Reiseplanung mit beeinflusst: Bei abzusehender Erschöpftheit zum Terminende könnte ein Passagier es beispielsweise vorziehen, noch eine Nacht im Hotel am Zielort zu verbringen, statt den Nachtflug zu nehmen, weil er aus Erfahrung weiß, dass er im Flugzeug kaum schlafen kann.

¹⁰ Falls nötig, kann das Modell mit geringfügigen Anpassungen auch auf Urlaubsreisen angewendet werden.

Zudem hat im ursprünglich avisierten Anwendungsfall des Modells, nämlich Hochgeschwindigkeitsflug, die Länge des Aufenthalts vermutlich besondere Relevanz für den Anreiz des Angebots, weil auf längeren Aufenthalten ein „nutzloser“ Reiseanteil, nämlich der Flug, ohnehin relativ kurz ausfällt.

Die zeitliche Abfolge jeder Reise stellt sich wie folgt dar (siehe auch Abb. 3.1-1)¹¹:

- (1) Lokaler Transfer zum Startflughafen
- (2) Durchlaufen des Terminals mit Check-In und Sicherheitskontrolle
- (3) Hinflug (einschließlich der Möglichkeit zu schlafen und zu arbeiten):
 - a) Direktflug; oder b) Flug mit Zwischenstopp(s)
- (4) Durchlaufen des Terminals am Zielflughafen mit Gepäckabholung, Zoll und Einreisekontrolle
- (5) Lokaler Transfer:
 - a) direkt zum Arbeitsort; oder b) zum Hotel, dort evtl. Schlaf und/oder Arbeit, daraufhin Transfer zum Arbeitsort
- (6) Wahrnehmen der Arbeitstermine, inklusive möglicher Übernachtungen und lokaler Transfers
- (7) Lokaler Transfer:
 - a) direkt zum Flughafen; oder b) zum Hotel, dort evtl. Schlaf und/oder Arbeit, daraufhin Transfer zum Flughafen
- (8) Durchlaufen des Terminals mit Check-In und Sicherheitskontrolle
- (9) Rückflug (einschließlich der Möglichkeit zu schlafen und zu arbeiten):
 - a) Direktflug; oder b) Flug mit Zwischenstopp(s)
- (10) Durchlaufen des Terminals mit Gepäckabholung, Zoll und Passkontrolle
- (11) Lokaler Transfer nach Hause/zum Büro.

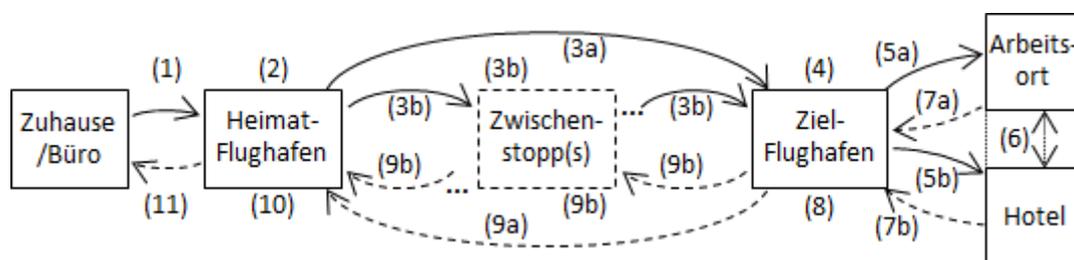


Abb. 3.1-1 – Chronologischer Reiseablauf

¹¹ Vergleiche auch mit dem Fünf-Phasen-Modell des Transports (Gollnick 2004): Die Punkte 1-5 sowie die Punkte 7-11 entsprechen in dieser Reihenfolge den Phasen Zugang, Übergang, Hauptlauf, Übergang und Abgang. Die Übergänge, zu denen auch 3b) und 9b) gehören, bewirken keine Transportleistung, bergen jedoch einen beträchtlichen Reisezeitaufwand.

Zur Planung der Reise sowie zur Modellierung der Schlaf- und Arbeitszeiten des Reisenden werden die folgenden Haupt-Eingabe-Variablen verwendet:

- Tagesspezifische Start- und Endzeiten der Termine am Ziel
- Blockzeiten für Hin- und für Rückflüge (plus mögliche Aufenthaltsdauern auf Zwischenstopps)
- *Echte* Zeitverschiebung zwischen Start und Ziel¹²
- Schlafqualität im Flugzeug
- Gewichtungssätze von Reisezeitersparnis, Ausgeruhtheit, Produktivität

Zudem werden folgende Modellparameter berücksichtigt:

- Beginn und Ende des Arbeitstages
- Betriebszeiten der Flughäfen an Start und Ziel
- Transferdauern zu und von den Flügen
- Nicht nutzbare Zeit im Flugzeug
- Regulärer Schlaf: Latenz, Beginn, Effizienz, Dauer, Zonen des Wachbleibens
- Abbauraten des Jetlags
- Passagierpräferenz der Abflugzeit
- Effizienz der Arbeit im Flugzeug

Um eine vorgegebene, *feste Terminserie* herum plant der Algorithmus unter Einbeziehung aller genannten Parameter verschiedene Reisearten und ihre jeweiligen Flugzeiten unter jeweils eigenen Zielvorgaben (i.e., Gewichtungen).

Zunächst wird stets die kürzestmögliche Reise bestimmt. Dafür werden die Flüge derart gelegt, dass sie so spät wie möglich ankommen und so früh wie möglich wieder abgehen, so dass der Reisende seinen Arbeitsplan exakt einhalten kann. Abb. 3.1-2 zeigt eine generische kürzestmögliche Reise zu einem um +3 h zeitversetzten Zielort. In diesem Beispiel verhindern die Betriebszeiten der Flughäfen spätere An- und frühere Abreisen.

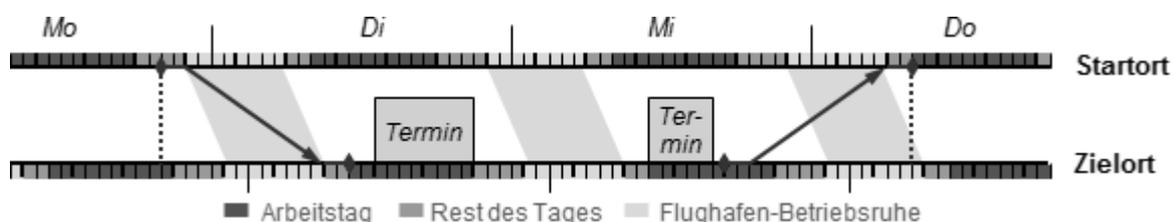


Abb. 3.1-2 – Generische kürzestmögliche Reise

¹² Differenzierung verschiedener Arten der Zeitverschiebung in Kapitel 3.3.2.2.

Ausgehend von der kürzestmöglichen Reise werden anschließend Hin- und Rückflug schrittweise um bis zu 24 Stunden vor- beziehungsweise nachverlegt¹³. Für die so entstehenden Reisen werden jeweils die *Reisedauern* sowie die zu Schlaf- und Arbeitszeiten zugehörigen Zielgrößen *Schlafdefizit* und *Verlust potentiell produktiver Zeit* getrennt für Hin- und Rückreise bestimmt.¹⁴

Die drei Zielgrößen werden schließlich in der Kennzahl *TCT* (*Time Cost of Travel*) vereinigt, welche die *Zeit-Kosten* einer Reise unmittelbar ausdrückt. Die allgemeine Formel zur Berechnung von *TCT* verwendet:

- die Gewichtungsfaktoren für Reisedauer w_{Time} , für Schlaf w_{Sleep} und für Arbeitszeit w_{Work} ($0 \leq w_i \leq 1$);
- die Reisedauer T , das Schlafdefizit SD und den Arbeitszeitverlust WTL (*working time loss*);
- die reguläre Schlafdauer RST (*regular sleep time*) und die reguläre Arbeitszeit RWT (*regular working time*):

$$TCT = w_{Time} \cdot (T - w_{Sleep} \cdot RST - w_{Work} \cdot RWT) + w_{Sleep} \cdot SD + w_{Work} \cdot WTL \quad (3-1)$$

Aus den geringsten *TCT* ergeben sich direkt die bestmöglichen Flugansetzungen sowohl für die Hin- als auch für die Rückreise.

Wird ein einzelner Gewichtungsfaktor gleich 1 und dementsprechend die beiden anderen gleich Null gesetzt, so resultiert als beste Reise wahlweise die schnellste ($w_{Time} = 1$), die schonendste ($w_{Sleep} = 1$) oder die arbeitseffizienteste ($w_{Work} = 1$). Im Ergebnisvergleich wird so beispielsweise einsichtig, wieviel Reisezeit beziehungsweise Arbeitszeit es kostet, maximal ausgeruht zu reisen, oder wieviel Schlafdefizit man auf sich nehmen muss, um möglichst viel Arbeitszeit zu sparen.

¹³ Das Puffer-Maximum von 24 Stunden wurde gewählt, um vor und nach den Terminen einen vollwertigen Ruhetag anzusetzen und gleichzeitig die Gesamtdauer der Reise vernünftig zu begrenzen. Der Wert ist im Modell parametrisiert und variabel.

¹⁴ Im Falle des Schlafdefizits werden für die Hinreise das *Defizit zum Zeitpunkt des Arbeitsbeginns* und für die Rückreise das *Defizit zum Ende der Reise* als Kriterien herangezogen.

¹⁵ Der Tag eines Geschäftsreisenden setzt sich zusammen aus regulärer Arbeitszeit RWT , regulärer Schlafzeit RST sowie Freizeit. Legt er weniger als vollen Wert auf Schlaf oder Arbeit ($w_{Sleep} < 1$ bzw. $w_{Work} < 1$), so geht der dementsprechende Anteil der regulären Schlaf- bzw. Arbeitsdauer in die Gesamtzeit T und damit in den Einfluss der Zeitgewichtung w_{Time} über. Wenn ihm beispielsweise lediglich die Reisedauer wichtig ist ($w_{Time} = 1, w_{Sleep} = w_{Work} = 0$), so ist $TCT = w_{Time} \cdot T$. Legt er vollen Wert auf Schlaf und Arbeit, so bildet der zweite Faktor des ersten Terms ($T - RST - RWT$) seine Freizeit ab.

3.2 Parameterdefinition

3.2.1 Passagierparameter

3.2.1.1 Umfrage am Hamburg Airport

Im Rahmen der Forschungsarbeit des Autors wurde zwischen dem 9. August und dem 19. September 2012 eine systematische Umfrage im Terminal des Flughafens Hamburg durchgeführt. Die Ergebnisse bieten Belege für die Plausibilität späterer Annahmen für Passagierverhalten, weshalb sie im Folgenden aufgeführt werden.

Der Zweck der Umfrage verlangte nach einer Zielgruppe von Geschäftsreisenden, welche mindestens zwei Mal pro Jahr einen Langstreckenflug (hier: mehr als 4000 km Distanz) in der Business- oder First-Kabinenklasse absolvieren. Die Stichprobe bestand aus 100 zufällig im luftseitigen Terminal ausgewählten Personen im Alter zwischen 25 und 59 Jahren (im Mittel 44 Jahre), welche die genannten Vorgaben erfüllten. Zur Vermeidung von Missverständnissen wurden die Antworten auf vorgefertigte Fragen in persönlichen, systematisierten Interviews gesammelt. Der verwendete Fragebogen ist im Anhang A abgelegt.

Es folgt eine Auswahl gefundener Ergebnisse:

- a) An- und Abfahrt zum/vom Flughafen:
- I. Die Befragten benötigen zwischen 5 und 120 Minuten für die Fahrt von ihrem Wohnort bis zum Flughafen am Startort, zumeist jedoch 60 Minuten und im Durchschnitt 55 Minuten (vgl. Abb. 3.2-1).
 - II. Die Fahrt zwischen dem Flughafen und dem Arbeitsort am Ziel dauert tendenziell länger, nämlich durchschnittlich 73 Minuten, jedoch in den meisten Fällen ebenfalls 60 Minuten (vgl. Abb. 3.2-2).

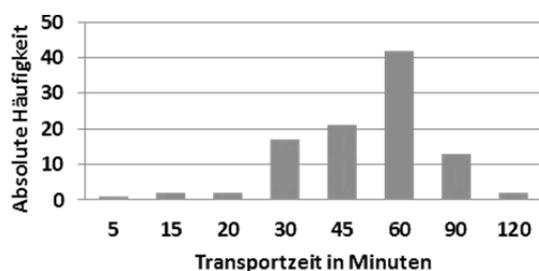


Abb. 3.2-1 – Transportzeit zwischen Wohnort/Arbeitsplatz und Flughafen

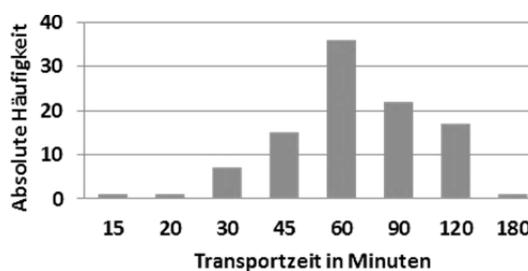


Abb. 3.2-2 – Transportzeit zwischen Flughafen und Arbeitsort am Zielort

- b) Unter Vorgabe eines langen Hinfluges zu einem Geschäftstermin:
- I. Bei *Morgenflügen* ist die bevorzugte Abflugzeit im Durchschnitt 8:35 Uhr (vgl. Abb. 3.2-3). Unter der Annahme günstiger Zeitverschiebungen beziehungsweise Flugdauern ist die bevorzugte Ankunftszeit durchschnittlich 7:44 Uhr (vgl. Abb. 3.2-4). Die Ankunftszeit wird von 76 % der Befragten als die entscheidende bei der Wahl des Fluges genannt, die Abflugzeit nur von 24 %.
 - II. Bei *Abendflügen* bevorzugen die Passagiere im Schnitt einen Abflug um 19:08 Uhr (vgl. Abb. 3.2-5). Die bevorzugte Ankunftszeit, erneut günstige Zeitverschiebungen/Flugdauern vorausgesetzt, ist fast die gleiche, nämlich durchschnittlich 19:11 Uhr (vgl. Abb. 3.2-6). In diesem Fall wird die Abflugzeit von 56 % der Passagiere als die wichtigere gesehen, die Ankunftszeit von 44 %.

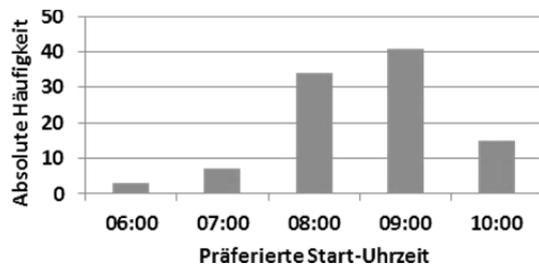


Abb. 3.2-3 – Präferierte Abflugzeit für einen Morgenflug zum Zielort

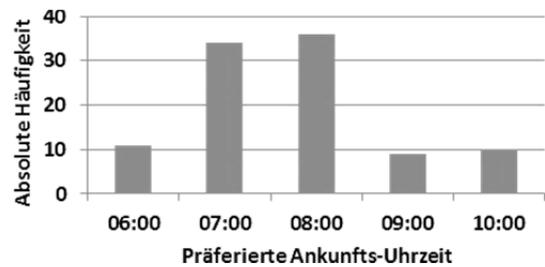


Abb. 3.2-4 – Präferierte Ankunftszeit für einen Morgenflug zum Zielort

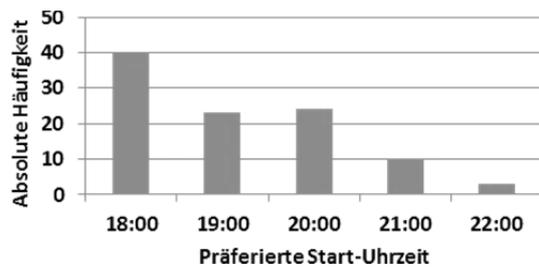


Abb. 3.2-5 – Präferierte Abflugzeit für einen Abendflug zum Zielort

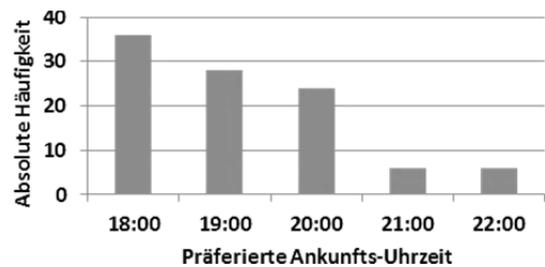


Abb. 3.2-6 – Präferierte Ankunftszeit für einen Abendflug zum Zielort

- c) Unter Vorgabe eines langen Nachtfluges zu einem Geschäftstermin:
- I. Als Mindestdauer für einen Flug in der Business-Klasse, um sich ausreichend erholen und am nächsten Tag arbeiten zu können, wurden zumeist Werte zwischen 5 und 8 Stunden genannt (s. Abb. 3.2-7). 5 % der Befragten gaben an, dass ihnen die Erholung auf solch einem Flug generell nie ausreiche.

- II. Für die Economy-Klasse erklärten sogar 45 % der Passagiere, sich auf keinen Fall ausreichend für den kommenden Arbeitstag erholen zu können. Für die restlichen 55 % beträgt die benötigte Erholungsdauer meist zwischen 8 und 10 Stunden (s. Abb. 3.2-8).

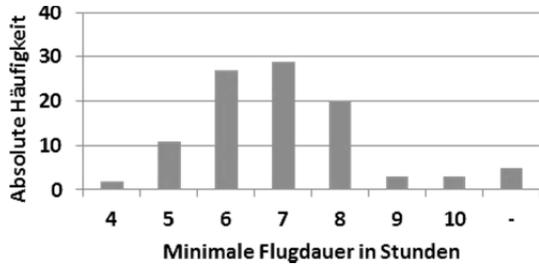


Abb. 3.2-7 – Min. Nachtflug-Dauer für Erholung u. Arbeitsfähigkeit, Business

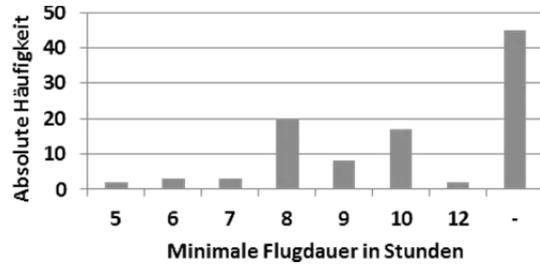


Abb. 3.2-8 – Min. Nachtflug-Dauer für Erholung u. Arbeitsfähigkeit, Economy

- d) Unter Vorgabe eines langen Tagfluges zu einem Geschäftstermin:
- I. Als Höchstdauer für einen Flug in der Business-Klasse, um am gleichen Tag noch Arbeitstermine wahrzunehmen, nannten die Befragten zumeist Werte zwischen 4 und 7 Stunden (s. Abb. 3.2-9).
- II. 10 % der Befragten würden in der Economy-Klasse überhaupt nicht fliegen wollen. Die restlichen antworteten auf die Frage, wie lange ein solcher Flug maximal dauern dürfte, um am gleichen Tag noch zu arbeiten, in den meisten Fällen mit 3, 4, 5 oder 6 Stunden (s. Abb. 3.2-10).

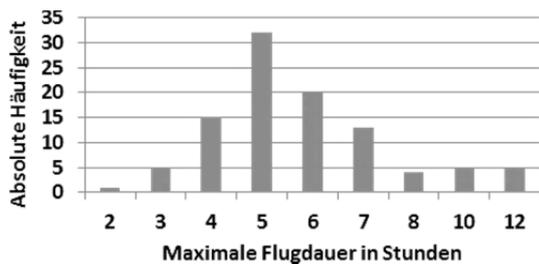


Abb. 3.2-9 – Max. Tagflug-Dauer für Termine am gleichen Tag, Business

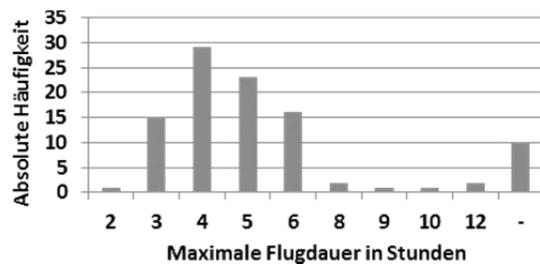


Abb. 3.2-10 – Max. Tagflug-Dauer für Termine am gleichen Tag, Economy

- e) Gefragt, ob sie ihre Arbeitszeiten am Zielort nach der lokalen Zeiten oder der biologischen Uhr ausrichten, gaben 94 % der Teilnehmer die Ortszeit und 6 % die biologische Uhr an.

- f) Auf die Frage hin, welchen Anteil der Dauer eines Tagfluges sie mit Arbeit verbringen, nannten die Befragten Werte zwischen 0 und 50 % (s. Abb. 3.2-11).
- g) 88 % der Befragten gaben als übliche Termindauer nach Langstrecken-Geschäftsreiseflügen Werte zwischen 2 und 5 Tagen an (s. Abb. 3.2-12).

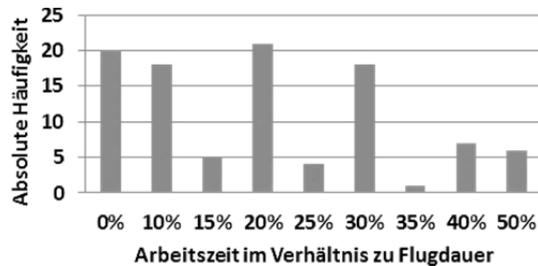


Abb. 3.2-11 – Anteil der für Arbeit genutzten Flugdauer

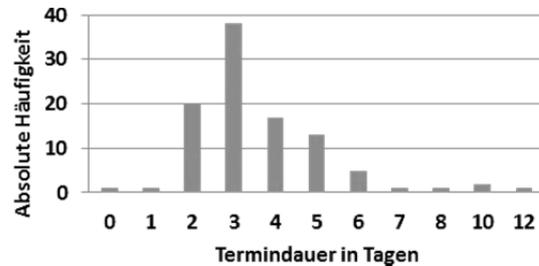


Abb. 3.2-12 – Termindauer nach Langstreckenflügen

3.2.1.2 Der prototypische Passagier

Auf Basis der Erkenntnisse sowohl aus Kapitel 2 als auch aus der oben vorgestellten Umfrage am Hamburg Airport wird ein repräsentativer Passagier definiert, an welchem sich die folgenden Fallstudien orientieren. Dieser soll den typischen Reisenden darstellen, für den zum einen der Faktor Zeit möglichst relevant ist und der zum anderen gewissermaßen den Durchschnitt aller gefundenen Passagierpräferenzen verkörpert. Gleichzeitig wird angenommen, dass durch diese Ausrichtung die später gefundenen Ergebnisse auf eine möglichst große Gruppe von Reisenden übertragen werden können.

Der im Folgenden zitierte Passagier befinde sich mithin auf einer Geschäftsreise, weil hierfür zeitliche Aspekte besondere Wichtigkeit besitzen. „Potentiell produktive Zeit“ sei für ihn Arbeitszeit.

Er sei beliebigen Geschlechts¹⁶ und 45 Jahre alt. Als durchschnittlich gesunder Nachtschläfer gehe er vor Arbeitstagen um 23:15 Uhr zu Bett und wache nach 7:30 Stunden Bettaufenthalt um 6:45 Uhr spontan auf. In der Zwischenzeit widerfahre ihm eine Schlaflatenz von 15 Minuten, eine Schlaffeffizienz von 90 % und infolgedessen eine Wachzeit nach Schlafbeginn von 30 Minuten. Auch bei großer Müdigkeit schlafe er zwischen 11 und 13 Uhr sowie zwischen 20 und 23:15 Uhr niemals ein. Die Anpassungsraten seines Biorhythmus‘ an neue Zeitzonen seien typischerweise (und der Einfachheit halber) 60 Minuten pro Tag in Ost- und 90 Minuten pro Tag in Westrichtung.

¹⁶ In der Folge wird der Passagier der Einfachheit halber mit männlichen Pronomina versehen.

Er sei gebildet, erfahren, aufmerksam und pflichtbewusst. Das bedeutet, er kenne Flugpläne sowie erwartete lokale Transferdauern und Wartezeiten am Flughafen, so dass er seine Reise ohne größere Pufferzeiten planen könne.

Zudem sei er sich der prinzipiellen Zusammenhänge zwischen Schlaf, Jetlag und Leistungsfähigkeit bewusst; deswegen verwende er den Feierabend sowie die Zeit vor, zwischen und nach den Arbeitsterminen vorrangig zur Erholung. Sobald letztere abgeschlossen sei, führe er Büroarbeit aus, jedoch nur innerhalb seines „gefühlten“ Arbeitstages¹⁷. Dafür wird die Annahme getroffen, dass der Reisende nur produktiv sein könne und wolle, wenn zum einen sein homöostatisches Level nicht geringer sei als das am gewohnten Beginn des Arbeitstages („noch nicht wach genug“) und nicht höher als das am gewohnten Ende („zu müde“), und wenn er sich zum anderen in einer regulären zirkadianen Phase – das heißt, innerhalb der Uhrzeiten seines gewohnten Arbeitstages – befinde.

Als leitender Angestellter arbeite er durchschnittlich 45 Stunden pro Woche, Pausen ausgenommen (gemäß Oshagbemi 1995). Unter Annahme einer einstündigen Mittagspause und einer fünftägigen Arbeitswoche dauere sein Arbeitstag somit 10 Stunden; er beginne um 8:30 und ende um 18:30.

Er verreise relativ häufig geschäftlich, deswegen verlängere er den Aufenthalt in der Regel nicht mit Freizeit. Er wolle die Aufenthaltsdauer dementsprechend minimieren und möglichst in seinem eigenen Bett schlafen; deshalb starte er am Heimatflughafen auch ungerne zwischen 23 und 7 Uhr. Die Rückankunft dürfe auch nachts stattfinden, wenn nötig; schließlich könne er danach zuhause ausschlafen. Als nächste Priorität nach der kurzen Reisedauer achte er darauf, seine Termine am Zielort möglichst ausgeruht absolvieren zu können. Erst wenn dann noch Alternativen bestünden, wähle er diejenige mit der größtmöglichen Arbeitszeiterparnis während der Hin- und Rückreisen.

Während der Flughafenaufenthalte und -transfers könne er weder schlafen noch arbeiten. In der Flugzeugkabine schlafe er aufgrund der widrigen Umgebung nicht optimal, in Business-Class-Sitzen (SE = 70 %) noch besser als in der Economy-Class (SE = 50 %). Im Hotel jedoch normalisiere sich sein Schlaf (SE = 90 %). Seine Arbeitseffizienz sei durch geschickte Wahl von Aufgaben und elektronischen Hilfsmitteln im Flugzeug wie im Hotel optimal.

Hier genannte Parameterwerte, welche in die Modellierung eingehen, werden im Abschnitt 3.2.3 tabellarisch aufgeführt.

¹⁷ In der Realität würden nicht wenige Reisende ihre Freizeit wohl eher willkürlich verwenden. Zum einen ist jedoch für die vorliegende Modellierungslogik ein konsistentes Verhalten unabdingbar. Zum anderen erscheint es plausibel, dass für Reisende, die weniger diszipliniert agieren, eine komplexe Berechnung ihrer Reisezeit-Kosten von geringerer Bedeutung ist.

3.2.2 Sonstige Parameter

Flughafen-Betriebszeiten sind ein wichtiger Faktor jeder Flugplanung; sie regulieren, zu welchen Zeiten Flüge unter welchen Voraussetzungen starten oder landen dürfen. Gleichwohl operiert die Mehrzahl der internationalen Flughäfen rund um die Uhr. Zudem werden Start und Ankunft von Linienflügen aus Gründen der Passagierpräferenz – in Realität wie auch erfahrungsgemäß in unserer Simulation – gewöhnlich nicht zu Nachtzeiten angesetzt. Deshalb erscheint es für Studien allgemeiner Art nicht notwendig, die sogenannten Airport Curfews als feste Randbedingungen zu führen. Um nichtsdestotrotz Einzelfallstudien mit restriktiven Flughäfen zu ermöglichen, wurden entsprechende Parameter in die Algorithmen implementiert.

Ferner spielen Pufferzeiten eine nicht unbedeutende Rolle beim Ablauf einer Reise, so beispielsweise Transferzeiten zu, auf und von Flughäfen sowie zwischen Hotel und Arbeitsort. Deshalb werden auch hierfür Parameter vorgesehen; zum Teil müssen sie jedoch im Rahmen dieser Arbeit mangels Daten bestmöglich geschätzt werden.

3.2.3 Zusammenfassung

Die primären Eingabevariablen des Hauptalgorithmus sind: ¹⁸

- $t_{WkStart}$ Tagesspezifische Arbeits-/Terminbeginne (*start of work*)
- t_{WkEnd} Tagesspezifische Arbeits-/Terminenden (*end of work*)
- T_{BlOut} Flugdauer(n) auf der Hinreise (*outbound block times*)
- T_{LoOut} Zwischenstopp-Dauer(n), Hinreise (*outbound layover times*)
- T_{BlRet} Flugdauer(n) auf der Rückreise (*return block times*)
- T_{LoRet} Zwischenstopp-Dauer(n), Rückreise (*return layover times*)
- T_{Shift} Echte Zeitverschiebung zw. Start- und Zielort (*time shift*)¹⁹
- w_{Time} Gewichtung der (Kürze der) Reisedauer
- w_{Sleep} Gewichtung des Schlafs bzw. der Ausgeruhtheit
- w_{Work} Gewichtung d. Erhaltung potentiell produktiver (Arbeits-)Zeit

Die weiteren Modellparameter sind hiernach in Tab. 3.2-1 aufgeführt. Wenn nicht anders erwähnt, werden im Folgenden die in der Tabelle genannten typischen Werte verwendet, welche in den vorangegangenen Ausführungen begründet sind.

¹⁸ Im Computercode sind die Parameter in englischer Sprache hinterlegt. Die Ausdrücke werden in der vorliegenden Ausarbeitung übernommen und aufgeschlüsselt, falls notwendig.

¹⁹ Zur Erklärung „echter“ Zeitverschiebung siehe 3.3.2.2.

Parameter	Typ. Wert	Erklärung
<u>Arbeitstag</u>		
$t_{WDStart}$	08:30 Uhr	Start des regulären Arbeitstages (<i>regular working day</i>)
$T_{WD,reg}$	10 h	Dauer des regulären Arbeitstages (<i>regular working day</i>)
<u>Flughafen-Betriebszeiten</u>		
$t_{CurfOStart}$	-	Beginn der Nachtruhe, bzw. Betriebsende am Startflughafen (<i>start of night curfew at origin airport</i>)
$t_{CurfOEnd}$	-	Ende der Nachtruhe, bzw. Betriebsbeginn am Startflughafen (<i>end of night curfew at origin airport</i>)
$t_{CurfDStart}$	-	Beginn der Nachtruhe, bzw. Betriebsende am Zielflugh. (<i>start of night curfew at destination airport</i>)
$t_{CurfDEnd}$	-	Ende der Nachtruhe, bzw. Betriebsbeginn am Zielflugh. (<i>end of night curfew at destination airport</i>)
<u>Bevorzugte Abflugzeiten zum Reisebeginn</u>		
$t_{DepOStart}$	7:00 Uhr	Beginn des vom Passagier präferierten Abflugfensters (<i>start of preferred departure time at origin</i>)
$t_{DepOEnd}$	23:00 Uhr	Ende des vom Passagier präferierten Abflugfensters (<i>end of preferred departure time at origin</i>)
<u>Transfer- und Pufferzeiten</u>		
$T_{DepToBed}$	15 min	Karenzzeit zwischen Abflug und Zu-Bett-Gehen oder Beginn von Büroarbeit (<i>departure to bed</i>)
$T_{BedToArr}$	45 min	Karenzzeit zwischen Aufwachen oder Ende der Büroarbeit und Ankunft (<i>bed to arrival</i>)
$T_{Transfer}$	60 min	Lokale Transferdauer zwischen Flughafen und Hotel bzw. Arbeitsplatz
$T_{CurbToDep}$	45 min	Dauer der Flughafenpassage vor Abflug (<i>curb to departure</i>) (Annahme: prioritäre Abwicklung)
$T_{ArrToCurb,out}$	60 min	Dauer der Flughafenpassage nach Ankunft am Zielflughafen, inkl. Zoll- und Einreiseformalitäten (<i>arrival to curb, outbound</i>)
$T_{ArrToCurb,ret}$	30 min	Dauer der Flughafenpassage nach Ankunft am Heimatflughafen, inkl. Zoll- und Einreiseformalitäten (<i>arrival to curb, return</i>)
T_{Prep}	60 min	Vorbereitungszeit (zwischen Hotelankunft und Zu-Bett-Gehen oder zwischen Aufstehen und Verlassen des Hotels) (<i>preparation time</i>)

<u>Regulärer Schlaf</u>		
TST	405 min	Gesamt-Schlafdauer (<i>total sleep time</i>)
SL	15 min	Schlaflatenz (<i>sleep latency</i>)
SE_{Bed}	90 %	Normale Schlafeffizienz (<i>sleep efficiency in bed</i>)
$WASO$	30 min	Wachzeit nach Schlafbeginn (<i>wake after sleep onset</i>)
TIB	7:30 h	Dauer des Bettaufenthalts (<i>time in bed</i>)
$t_{BedStart}$	23:15 Uhr	Zeitpunkt des Zu-Bett-Gehens
$t_{s1Onset}$	23:30 Uhr	Zeitpunkt des Einschlafens (<i>sleep onset time</i>)
t_{BedEnd} , t_{WakeUp}	6:45 Uhr	Zeitpunkt des Aufwachens und Aufstehens (<i>end of bed time, end of sleep/wakeup time</i>)
<u>Irregulärer Schlaf</u>		
$t_{NoSINStart}$	11:00 Uhr	Beginn der mittäglichen Zone des Wachbleibens (<i>start of no-sleep zone at noon</i>)
$t_{NoSINEnd}$	13:00 Uhr	Ende der mittäglichen Zone des Wachbleibens (<i>end of no-sleep zone at noon</i>)
$t_{NoSIEStart}$	20:00 Uhr	Beginn der abendlichen Zone des Wachbleibens (<i>start of no-sleep zone in the evening</i>)
$t_{NoSIEEnd}$	23:15 Uhr	Ende der abendlichen Zone des Wachbleibens (<i>end of no-sleep zone in the evening</i>)
$dT_{Adapt,W}$	90 min/d	Anpassungsrate des Biorhythmus an die neue Zeitzone nach Westflügen (<i>westward adaption rate</i>)
$dT_{Adapt,E}$	60 min/d	Anpassungsrate des Biorhythmus an die neue Zeitzone nach Ostflügen (<i>eastward adaption rate</i>)
SE_{Eco}	50 %	Schlafeffizienz in einem Economy-Class-Sitz
SE_{Biz}	70 %	Schlafeffizienz in einem Business-Class-Sitz
<u>Arbeitseffizienz</u>		
WE_{Fl}	1	Arbeitseffizienz im Flugzeug (<i>work efficiency in flight</i>)
<u>Simulationsparameter</u>		
dT_{FlRscd}	10 min	Zeitschritt für Flugzeitvariation (<i>time step between flight re-scheduling</i>)
$T_{FlRscd,max}$	24 h	Maximaler Zeitraum für Flugzeitvariation (<i>maximum flight time variation for re-scheduling</i>)
dT_S	1 min	Zeitschritt zur Fortschreibung des homöostat. Levels S

Tab. 3.2-1 – Steuerparameter

3.3 Implementierung

3.3.1 Hauptalgorithmus *JourneyPlanner*

Der Algorithmus *JourneyPlanner* verwendet die oben erwähnten Hauptvariablen und greift außerdem auf die Steuerparameter und auf Hilfsroutinen zu. Unter Vorgabe einer festen Serie aus Arbeitsterminen gibt er letztlich die bestbewerteten Reisen zurück²⁰. Sein Ablauf ist wie folgt²¹:

3.3.1.1 Pre-Processing

Die Hilfsroutine *SleepWakeThresholds* berechnet die Parameter des regulären homöostatischen Zyklus für den individuellen Passagier. Sie wird in Kapitel 3.3.2.1 ausführlich beschrieben. Ihr Output ist:

- $S_{SlStart}$ Reguläres homöostatisches Level bei Schlafbeginn
- S_{SlEnd} Reguläres homöostatisches Level bei Schlafende
- L Mittleres homöostatisches Level der Aufwachschwelle
- C Kalibrierungsparameter der Aufwachkurve.

3.3.1.2 Hinreisen

a) Bestimmung des spätestmöglichen Hinflugs

Die gesamte *Dauer der Flugreise auf dem Hinweg* beträgt:

$$T_{FLOut} = \sum_j T_{BLOut,j} + \sum_j T_{LOut,j} \quad (3-2)$$

Die Vorgehensweise zur Berechnung der *spätestmöglichen Ankunftszeit des Hinflugs* $t_{ArrOut,1}$ ist folgende (vgl. Abb. 3.3-1)²²:

²⁰ Zum Zwecke der Laufzeitminimierung kann der Algorithmus mehrere Sätze an Gewichtungsfaktoren verarbeiten. Die folgenden Ausführungen beziehen sich jedoch nur auf einen Satz.

²¹ In Teilen Verwendung von Pseudo-Code. Auf Orte bezogene Zeiten sind stets Ortszeiten.

²² Der im Folgenden an Absätzen angebrachte Randstrich weist auf Pseudo-Code hin.

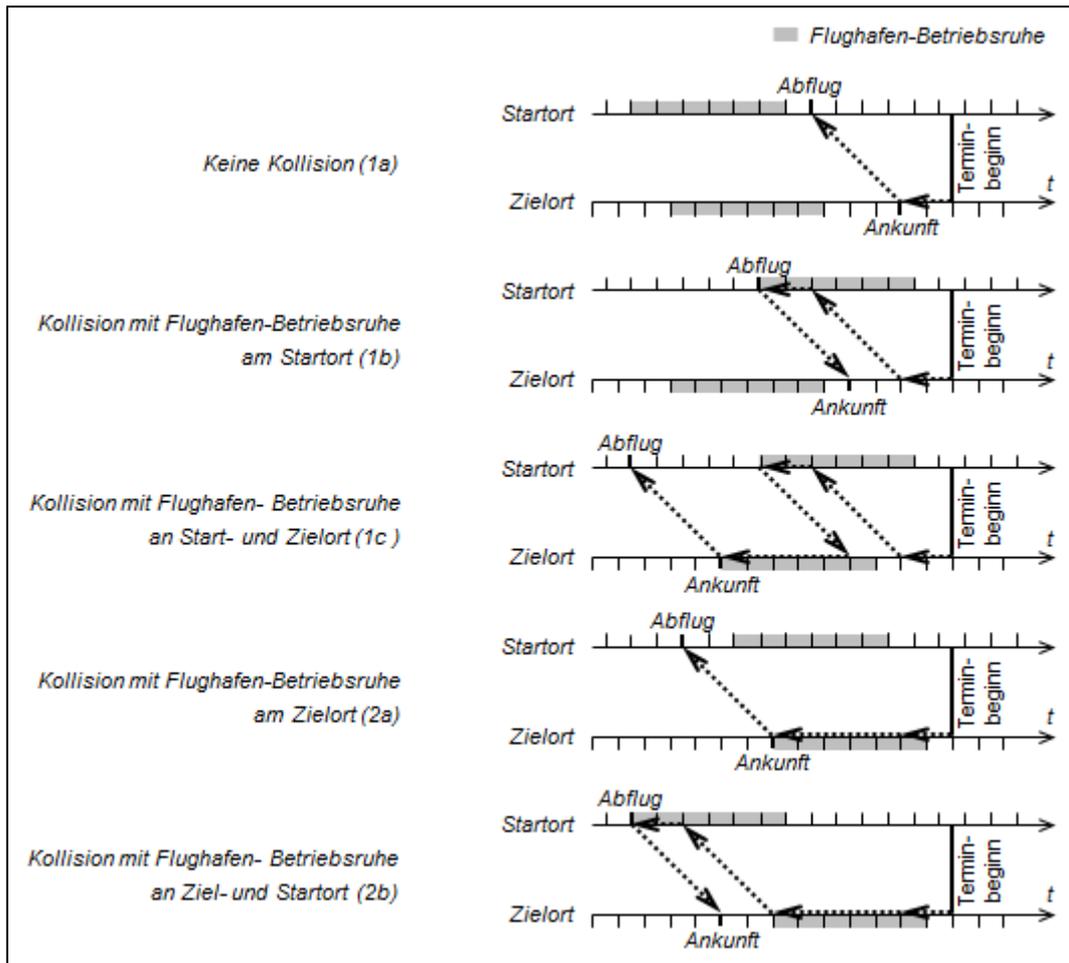


Abb. 3.3-1 – Schema der Routine zur Bestimmung des spätestmöglichen Hinflugs²³

Zurückrechnen vom Zeitpunkt des ersten Terminbeginns: Genug Zeit zwischen Flughafenöffnung und Terminbeginn für Transfer?

$$\begin{aligned}
 & \text{tod}(t_{WkStart,1} - T_{Transfer} - T_{ArrToCurb,out}) \geq t_{CurfDEnd} \quad \text{und} \\
 & \text{tod}(t_{WkStart,1} - T_{Transfer} - T_{ArrToCurb,out}) \leq t_{CurfDStart} \quad ? \quad 24 \quad (3-3)
 \end{aligned}$$

(+) *Pfad 1: Genug Zeit.* Weiteres Zurückrechnen vom Zeitpunkt des Terminbeginns: Abflug innerhalb der Flughafen-Betriebszeiten am Startort bei Ankunft zum unmittelbaren Eintreffen zum Terminbeginn?

$$\begin{aligned}
 & \text{tod}(t_{WkStart,1} - T_{Transfer} - T_{ArrToCurb,out} - T_{FLOut} - T_{Shift}) \geq t_{CurfoEnd} \quad \text{und} \\
 & \text{tod}(t_{WkStart,1} - T_{Transfer} - T_{ArrToCurb,out} - T_{FLOut} - T_{Shift}) \leq t_{CurfoStart} \quad ? \quad (3-4)
 \end{aligned}$$

²³ Die Pfeile beschreiben die Laufrichtung des Algorithmus.

²⁴ „tod“ steht für Uhrzeit (*time of day*).

(+) 1a)²⁵ Ankunft für unmittelbares Eintreffen zum Terminbeginn:

$$t_{ArrOut,1} = t_{WkStart,1} - T_{Transfer} - T_{ArrToCurb,out} \quad (3-5)$$

(-) Verletzung der Flughafen-Nachruhe am Startort. Vorwärtsrechnen vom vorherigen Flugbetriebsende: Ankunft am Morgen möglich?

$$\begin{aligned} tod(t_{CurfOStart} + T_{FLOut} + T_{Shift}) &\geq t_{CurfDEnd} \quad \text{und} \\ tod(t_{CurfOStart} + T_{FLOut} + T_{Shift}) &\leq t_{CurfDStart} \quad ? \end{aligned} \quad (3-6)$$

(+) 1b)²⁵ Ankunft morgens nach Abflug zum Betriebsende:

$$t_{ArrOut,1} = tod(t_{CurfOStart} + T_{FLOut} + T_{Shift}). \quad (3-7)$$

(-) 1c)²⁵ Ankunft zum Betriebsende am Vorabend des Termins:

$$t_{ArrOut,1} = t_{CurfDStart} - 1 \text{ d.} \quad (3-8)$$

(-) Pfad 2: Ankunft am Vortag notwendig. Ankunft zum Betriebsende mit Abflug innerhalb der Betriebszeiten am Startort möglich?

$$\begin{aligned} tod(t_{CurfDStart} - T_{FLOut} - T_{Shift}) &\geq t_{CurfOEnd} \quad \text{und} \\ tod(t_{CurfDStart} - T_{FLOut} - T_{Shift}) &\leq t_{CurfOStart} \quad ? \end{aligned} \quad (3-9)$$

(+) 2a)²⁵ Ankunft zur Betriebsende am Vorabend des Termins:

$$t_{ArrOut,1} = t_{CurfDStart} - 1 \text{ d.} \quad (3-10)$$

(-) 2b)²⁵ Ankunft am Vorabend nach Abflug zum Betriebsende:

$$t_{ArrOut,1} = tod(t_{CurfOStart} + T_{Shift} + T_{FLOut}) - 1 \text{ d.} \quad (3-11)$$

Die zu $t_{ArrOut,1}$ gehörige spätestmögliche Abflugzeit am Heimatort ist:

$$t_{DepOut,1} = t_{ArrOut,1} - T_{Shift} - T_{FLOut} \quad (3-12)$$

²⁵ Die Nummerierungen 1a-1c und 2a-2b beziehen sich auf Abb. 3.3-1.

b) Ansetzung weiterer Hinflüge

Ausgehend vom oben gefundenen spätestmöglichen Hinflug werden im Zeitschritt $-dT_{FT}$ neue Hinflüge angesetzt (außer, sie verletzen Flughafen-Betriebszeiten an Start- oder Zielort oder die präferierten Abflugzeiten des Passagiers), und zwar bis hin zu $T_{FlRscd,max}$ (hier: 24 Stunden) vor dem spätestmöglichen Flug (vgl. Abb. 3.3-2).

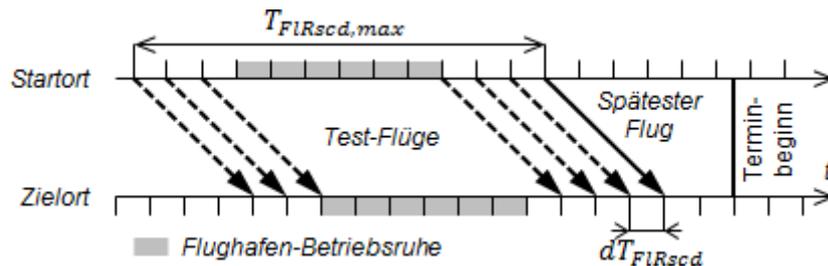


Abb. 3.3-2 – Schema der Ansetzung früherer Flüge für Test-Hinreisen

c) Simulation möglicher Hinreisen sowie des nachfolgenden Terminzeitraums

Jede der so entstandenen Hinreisen (inklusive der spätestmöglichen) wird nun, ausgehend vom Zeitpunkt des Simulationsbeginns t_0 bis zum Zeitpunkt des letzten Terminendes $t_{WkEnd,n}$, auf Schlaf- und Arbeitszeiten hin untersucht.²⁶

$$t_0 = t_{DepOut} - T_{CurbToDep} - T_{Transfer} - T_{Prep} \quad (3-13)$$

Die Vorgehensweise wird im Folgenden vereinfacht wiedergegeben:

- Bestimmung Jetlag-induzierter, angepasster Parameter des Schlafs für den gesamten Reiseverlauf durch die Hilfsroutine *JetlagAdaption* (beschrieben im Kapitel 3.3.2.2), mit der Ankunftszeit $t_{ArrOut,i}$, der Zeitverschiebung T_{Shift} sowie der bio-effektiven Zeitverschiebung $T_{ShiftBE}$ als Haupt-Inputs.
Output: Neue Zonen des Wachbleibens t_{NoSI} , neue reguläre Schlafzeiten $t_{SIStart}$ und t_{SLEnd} , neue reguläre homöostatische Levels bei Schlafbeginn und -ende $S_{SIStart}$ und S_{SLEnd} , neue Aufwachschwelle $AT(t)$ (*awaking threshold*).
- Bestimmung des homöostatischen Levels S_{t_0} zum Zeitpunkt des Simulationsbeginns t_0 (mit Unterscheidung zwischen Nacht- und Tagzeit)²⁷:

$$\text{Wenn } t_{SIStart,i} < t_0 < t_{SLEnd,i} ,$$

²⁶ Auf einen Index für die verschiedenen Test-Hinreisen wird im folgenden Abschnitt verzichtet.

²⁷ Formeln nach Daan et al. 1984; vgl. Kapitel 2.2.2.

$$\begin{aligned}
\text{dann} \quad S_{t_0} &= S_{SlStart,i} \cdot 0,888^{(2 \cdot (t_0 - t_{SlStart,i}))}; \\
\text{sonst} \quad S_{t_0} &= 1 - (1 - S_{SlEnd,i}) \cdot 0,973^{(2 \cdot (t_0 - t_{SlEnd,i}))}.
\end{aligned} \tag{3-14}$$

- Keine Schlafmöglichkeit zwischen Simulationsbeginn und Flug. Fortschreiben des ansteigenden homöostatischen Levels bis zum erstmaligen Beginn verfügbarer Zeit im Flugzeug $t_{FPStart}$ (*flight period*) mit der Wachformel:

$$t_{FPStart} = t_{DepOut,i} + T_{DepToBed} \tag{3-15}$$

$$S_{FPStart} = 1 - (1 - S_{t_0}) \cdot 0,973^{(2 \cdot (t_{FPStart} - t_0))} \tag{3-16}$$

- Bestimmung von Schlaf- und Arbeitszeiten während der verfügbaren Zeit im Flugzeug sowie der am Ende der Zeit vorliegenden Homöostase S_{FPEnd} durch die Hilfsroutine *SleepWorkEstim* (beschrieben in Kapitel 3.3.2.3), mit $S_{FPStart}$, $t_{FPStart}$ und t_{FPEnd} als Haupt-Inputs.

$$t_{FPEnd} = t_{ArrOut,i} - T_{Shift} - T_{BedToArr} \tag{3-17}$$

- Genug Zeit zwischen Ankunft und Terminbeginn für Fahrt zum Hotel?

$$t_{HPStart} = t_{ArrOut,i} - T_{Shift} + T_{ArrToCurb} + T_{Transfer} + T_{Prep}^{28} \tag{3-18}$$

$$t_{HPEnd} = t_{WkStart,1} - T_{Shift} - \frac{T_{Transfer}}{2} - T_{Prep}^{29} \tag{3-19}$$

$$t_{HPStart} < t_{HPEnd} ? \tag{3-20}$$

- (+) Fortschreiben von S bis zum Beginn verfügbarer Zeit im Hotel $t_{HPStart}$:

$$S_{HPStart} = 1 - (1 - S_{FPEnd}) \cdot 0,973^{(2 \cdot (t_{HPStart} - t_{FPEnd}))} \tag{3-21}$$

Bestimmung von Schlaf- und Arbeitszeiten während der Zeit im Hotel sowie von S_{HPEnd} durch *SleepWorkEstim*, mit $S_{HPStart}$, $t_{HPStart}$ und t_{HPEnd} als Haupt-Inputs.

Fortschreiben von S_{HPEnd} bis zum ersten Terminbeginn:

$$S_{WkStart} = 1 - (1 - S_{HPEnd}) \cdot 0,973^{(2 \cdot (t_{WkStart,1} - t_{HPEnd}))} \tag{3-22}$$

²⁸ HP: Hotelperiode (*hotel period*).

²⁹ Annahme: Fahrten zwischen Hotel und Arbeitsort dauern nur halb so lang wie ein Flughafentransfer.

(–) Fortschreiben von S_{FPEnd} bis zum ersten Terminbeginn.

$$S_{WkStart} = 1 - (1 - S_{FPEnd}) \cdot 0,973^{2 \cdot (t_{WkStart,1} - t_{FPEnd})} \quad (3-23)$$

- *Bestimmung des 1. Zielwerts:*

Gesamtdauer der Hinreise T_{JrnOut} (*outgoing journey*)³⁰:

$$T_{JrnOut} = t_{WkStart,1} - T_{Shift} - (t_0 + T_{Prep}) \quad (3-24)$$

- *Bestimmung des 2. Zielwerts:*

- Berechnung der regulären Schlafdauer RST_{JrnOut} zwischen t_0 und $t_{WkStart,1}$ aus den regulären Schlafzeiten.
- Ermittlung des Schlafdefizits zu Arbeitsbeginn $SD_{WkStart,i}$ mit der Routine *StoSleepDeficit* (näher erklärt in Kapitel 3.3.2.4), mit $t_{WkStart,1}$ und $S_{WkStart}$ als Input.

- *Bestimmung des 3. Zielwerts:*

Berechnung des Arbeitszeitverlusts auf der Hinreise WTL_{JrnOut} (*working time loss on outward journey*) durch Subtraktion der geleisteten Arbeit (*working time*) WT_{JrnOut} von der regulären Arbeitszeit RWT_{JrnOut} . Letztere summiert sich aus der Arbeitszeit am Heimatort zwischen t_0 und $t_{WkStart,1}$.

Die Zeit-Kosten $TCT_{JrnOut,i}$ der Hinreise i sind:

$$TCT_{JrnOut,i} = w_{Time} \cdot (T_{JrnOut,i} - w_{Sleep} \cdot RST_{JrnOut,i} - w_{Work} \cdot RWT_{JrnOut,i}) + w_{Sleep} \cdot SD_{WkStart,i} + w_{Work} \cdot WTL_{JrnOut,i} \quad (3-25)$$

Aus allen Hinreisen wird schließlich diejenige mit minimalem TCT_{JrnOut} zur Weiterverarbeitung ausgewählt. Damit steht der Hinflug fest.

3.3.1.3 Dauer des Aufenthalts

Während seines Aufenthalts hält sich der Reisende außerhalb seiner Arbeitszeiten im Hotel auf, um sich auszuruhen. Die homöostatischen Levels werden während der Arbeitszeiten und Transfers mit der Wachformel und während der Hotelzeiten mit *SleepWorkEstim* bis zum Ende des letzten (n -ten) Termins $t_{WkEnd,n}$ fortgeschrieben; die dann vorliegende Homöostase ist S_{WkEnd} .

³⁰ Die Dauer der Hinreise wird definiert als die Zeit zwischen dem Zeitpunkt des Reiseantritts ($t_0 + T_{Prep}$) und dem Beginn des ersten Termins $t_{WkStart,1}$.

3.3.1.4 Rückreisen

a) Ansetzung des frühestmöglichen Rückflugs

Die gesamte Dauer der Flugreise auf dem Rückweg (*return*) beträgt:

$$T_{FLRet} = \sum_j T_{BLRet,j} + \sum_j T_{LoRet,j} \quad (3-26)$$

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der frühestmöglichen Abflugzeit des Rückflugs $t_{DepRet,1}$ verläuft analog zur oben beschriebenen Ansetzung der spätestmöglichen Ankunftszeit, nur mit umgekehrtem Richtungssinn:

Vorwärtsrechnen vom Zeitpunkt des Terminendes: Genug Zeit zwischen Terminende und Flugbetriebsende für Transfer?

$$\begin{aligned} tod(t_{WkEnd,n} + T_{Transfer} + T_{CurbToDep,ret}) &\geq t_{CurfDEnd} \quad \text{und} \\ tod(t_{WkEnd,n} + T_{Transfer} + T_{CurbToDep,ret}) &\leq t_{CurfDStart} \quad ? \end{aligned} \quad (3-27)$$

(+) *Pfad 1: Genug Zeit.* Weiteres Vorwärtsrechnen vom Zeitpunkt des Terminendes: Ankunft innerhalb der Flughafen-Betriebszeiten am Heimatort bei unmittelbarem Abflug nach Terminende?

$$\begin{aligned} tod(t_{WkEnd,n} + T_{Transfer} + T_{CurbToDep,ret} + T_{FLRet} - T_{Shift}) &\geq t_{CurfoEnd} \quad \text{und} \\ tod(t_{WkEnd,n} + T_{Transfer} + T_{CurbToDep,ret} + T_{FLRet} - T_{Shift}) &\leq t_{CurfoStart} \quad ? \end{aligned} \quad (3-28)$$

(+) 1a) Unmittelbarer Abflug nach Terminende:

$$t_{DepRet,1} = t_{WkEnd,n} + T_{Transfer} + T_{CurbToDep,ret} \quad (3-29)$$

(-) Verletzung der Flughafen-Nachtruhe am Heimatort. Rückwärtsrechnen vom Zeitpunkt des nachfolgenden Flugbetriebsbeginns am Heimatort: Abflug am Abend noch möglich?

$$\begin{aligned} tod(t_{CurfoEnd} - T_{FLRet} + T_{Shift}) &\geq t_{CurfDEnd} \quad \text{und} \\ tod(t_{CurfoEnd} - T_{FLRet} + T_{Shift}) &\leq t_{CurfDStart} \quad ? \end{aligned} \quad (3-30)$$

(+) 1b) Abflug am Abend mit Ankunft zum Betriebsbeginn:

$$t_{DepRet,1} = \left\lceil \frac{t_{WkEnd,n}}{1 \text{ d}} \right\rceil \cdot (1 \text{ d}) + tod(t_{CurfOEnd} - T_{FlRet} + T_{Shift}).^{31} \quad (3-31)$$

(-) 1c) Abflug zu Betriebsbeginn am Folgetag des Terminendes:

$$t_{DepRet,1} = \left\lceil \frac{t_{WkEnd,n}}{1 \text{ d}} \right\rceil \cdot (1 \text{ d}) + t_{CurfDEnd}.^{32} \quad (3-32)$$

(-) *Pfad 2: Abflug am Folgetag notwendig.* Abflug zu Betriebsbeginn mit Ankunft innerhalb der Betriebszeiten am Heimatort möglich?

$$\begin{aligned} tod(t_{CurfDEnd} + T_{FlRet} - T_{Shift}) &\geq t_{CurfOEnd} \quad \text{und} \\ tod(t_{CurfDEnd} + T_{FlRet} - T_{Shift}) &\leq t_{CurfOStart} \quad ? \end{aligned} \quad (3-33)$$

(+) 2a) Abflug zu Betriebsbeginn am Folgetag des Terminendes:

$$t_{DepRet,1} = \left\lceil \frac{t_{WkEnd,n}}{1 \text{ d}} \right\rceil \cdot (1 \text{ d}) + t_{CurfDEnd}. \quad (3-34)$$

(-) 2b) Abflug am Folgetag mit Ankunft zu Betriebsbeginn:

$$t_{DepRet,1} = \left\lceil \frac{t_{WkEnd,n}}{1 \text{ d}} \right\rceil \cdot (1 \text{ d}) + tod(t_{CurfOEnd} - T_{FlRet} + T_{Shift}). \quad (3-35)$$

Die zu $t_{DepRet,1}$ gehörige frühestmögliche Ankunftszeit am Heimatort ist:

$$t_{ArrRet,1} = t_{DepRet,1} - T_{Shift} + T_{FlRet} \quad (3-36)$$

Bei allen denkbaren Arten der Rückreise wird im Folgenden angenommen, dass der „pflichtbewusste Passagier“ vor einem Rückflug, welcher nicht unmittelbar angetreten werden kann, noch einmal eine Ruhe- oder Arbeitsphase im Hotel in Anspruch nimmt, weil andernfalls diese Zeit unproduktiv verloren ginge.

b) Ansetzung weiterer Rückflüge

Analog zum oben beschriebenen Schema werden Test-Rückflüge angesetzt, und zwar bis hin zu $T_{FlRscd,max}$ nach dem frühestmöglichen Flug.

³¹ Tag des Terminendes plus vom Ankunftszeitpunkt zurückgerechnete Uhrzeit. Beachte Abrundungsklammer.

³² Tag nach Terminende plus entsprechende Uhrzeit. Beachte Aufrundungsklammer.

c) Simulation möglicher Rückreisen

Aufbauend auf die zum Ende der Termine festgestellten Parameterwerte der bestmöglichen Hinreise werden alle Test-Rückreisen analog zum oben beschriebenen Schema simuliert³³:

- Genug Zeit zwischen Terminende und Rückflug für Ruhephase im Hotel?

$$t_{WkEnd,n} + \frac{T_{Transfer}}{2} + T_{Prep} < t_{DepRet,1} - T_{CurbToDep} - T_{Transfer} - T_{Prep} \quad ? \quad (3-37)$$

(+) Fortschreiben von S_{WkEnd} bis zum Beginn verfügbarer Zeit im Hotel, Bestimmung von Schlaf- und Arbeitszeiten sowie des homöostatischen Levels zum Ende der Hotelperiode S_{HPEnd} mit *SleepWorkEstim*, Fortschreiben von S_{HPEnd} bis zum Beginn verfügbarer Zeit im Flugzeug $t_{FPstart}$.

(-) Fortschreiben von S_{WkEnd} bis zum Beginn verfügbarer Zeit im Flugzeug $t_{FPstart}$.

- Bestimmung von Schlaf- und Arbeitszeiten während der verfügbaren Zeit im Flugzeug sowie des zu t_{FPEnd} vorliegenden S_{FPEnd} durch *SleepWorkEstim*.
- Fortschreiben des homöostatischen Levels bis zum Eintreffen zuhause beziehungsweise dem Ende der Reise t_{JrnEnd} :

$$t_{JrnEnd} = t_{ArrRet} + T_{ArrToCurb,ret} + T_{Transfer} \quad (3-38)$$

$$S_{JrnEnd} = 1 - (1 - S_{FPEnd}) \cdot 0,973^{(2 \cdot (t_{JrnEnd} - t_{FPEnd}))} \quad (3-39)$$

- *Bestimmung des 1. Zielwerts:*
Gesamtdauer der Rückreise T_{JrnRet} :³⁴

$$T_{JrnRet} = t_{JrnEnd} - T_{Shift} - t_{WkEnd,n} \quad (3-40)$$

- *Bestimmung des 2. Zielwerts:*
Berechnung der regulären Schlafdauer während des Zeitraums der Rückreise RST_{JrnRet} aus den regulären Schlafzeiten zwischen $t_{WkEnd,n}$ und t_{JrnEnd} .

³³ Auf einen Index für die verschiedenen Rückreisen wird verzichtet.

³⁴ Die Dauer der Rückreise entspricht per Definition der Zeit zwischen dem Ende des letzten Termins $t_{WkEnd,n}$ und dem Zeitpunkt der Rückankunft zuhause t_{JrnEnd} .

Ermittlung des Schlafdefizits zum Ende der Reise SD_{JrnEnd} durch $StoSleepDeficit$, mit t_{JrnEnd} und S_{JrnEnd} als Inputs.

- *Bestimmung des 3. Zielwerts:*

Berechnung des Arbeitszeitverlusts auf der Rückreise WTL_{JrnRet} durch Subtraktion der geleisteten, durch $SleepWorkEstim$ bestimmten Arbeit WT_{JrnRet} von der regulären Arbeitszeit der Rückreise RWT_{JrnRet} . Letztere summiert sich aus der Arbeitszeit am Heimatort zwischen $t_{WkEnd,n}$ und t_{JrnEnd} .

Die Zeit-Kosten $TCT_{JrnRet,i}$ der Rückreise i bestimmen sich zu:

$$TCT_{JrnRet,i} = w_{Time} \cdot (T_{JrnRet,i} - w_{Sleep} \cdot RST_{JrnRet,i} - w_{Work} \cdot RWT_{JrnRet,i}) + w_{Sleep} \cdot SD_{JrnEnd,i} + w_{Work} \cdot WTL_{JrnRet,i} \quad (3-41)$$

Als beste Rückreise wird schließlich diejenige mit dem niedrigsten TCT_{JrnRet} ausgewählt. In Kombination mit der besten Hinreise (auf welcher die Rückreise-Simulationen basieren) steht damit die Reiseplanung fest.

3.3.1.5 Bilanzierung und Post-Processing

Zur Bilanzierung der Reisen werden noch Reisedauer und Arbeitszeitverlust berechnet.

Die *Gesamt-Reisedauer* ist:

$$T_{Jrn} = t_{JrnEnd} - t_0 \quad (3-42)$$

Während des Terminzeitraums sei der Arbeitszeitverlust per Definition Null. Also müssen für den *gesamten Arbeitszeitverlust auf der Reise* WTL_{Jrn} nur die Verluste der Hin- und der Rückreise addiert werden:

$$WTL_{Jrn} = WTL_{JrnOut} + WTL_{JrnRet} \quad (3-43)$$

Zuletzt wird für die Ausgabe eine Übersicht zum Reiseverlauf zusammengestellt, welche gegebenenfalls auch verschiedene Reisearten mit ihren jeweils eigenen Gewichtungsfaktoren aufführt. Beispiele hierfür sind in Kapitel 3.4.1 zu finden.

3.3.2 Hilfsroutinen

3.3.2.1 Homöostatische Schwellen (SleepWakeThresholds)

Die in Kapitel 2.2.2 eingeführten, von Daan et al. (1984) verwendeten regulären Schwellwerte des homöostatischen Levels beim Aufwachen und beim Einschlafen, S_0 bzw. S_{32} , gelten für eine reguläre Nachtruhe von acht Stunden. In der besprochenen Arbeit wird die Möglichkeit erwähnt, diese Schwellen zu variieren, um auch andere Schlafdauern abbilden zu können. Dies ist in *SleepWakeThresholds* realisiert.

Der Algorithmus berechnet nach Eingabe der regulären Schlafdauer TST die Schlaf-Schwellwerte S_{SStart} und S_{SEnd} sowie einen Mittelwert L und einen Kalibrierungsfaktor C für die Aufwachschwelle auf numerische Weise neu. Die 24-stündige Dauer des homöostatischen Zyklus‘ bleibt dabei bestehen.

Das Beispiel in Abb. 3.3-3 zeigt den Unterschied zwischen endogener, regulärer Schlafdauer von acht und sechseinhalb Stunden. Nach der vorliegenden Modellierung liegt bei kürzerem Schlaf zu jedem Tageszeitpunkt ein erhöhter homöostatischer Druck vor. Dieser Effekt erscheint plausibel aufgrund der Tatsache, dass in der Realität die Leistungsfähigkeit von Kurz-Schläfern im Vergleich zu jener von Normal-Schläfern abfällt (Kronholm et al. 2009).

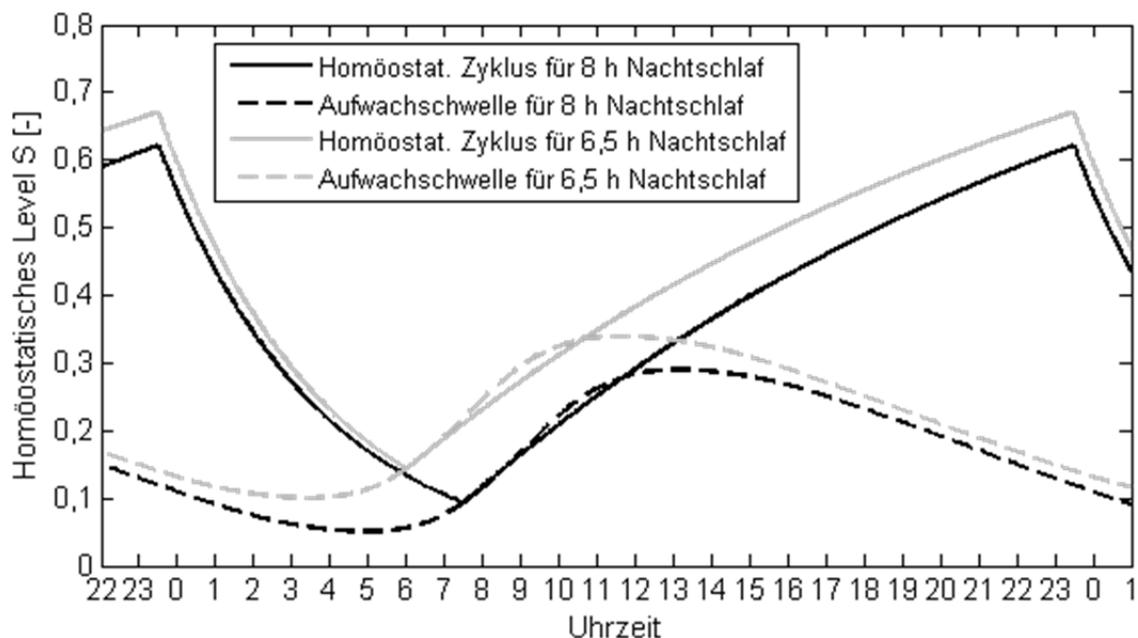


Abb. 3.3-3 – Zusammenhang zwischen Nachtschlafdauer u. homöostatischem Zyklus

3.3.2.2 Anpassungsparameter nach Jetlag (JetlagAdaption)

Die Routine *JetlagAdaption* berechnet Anpassungsparameter des zirkadianen Rhythmus auf einer Reise zwischen verschiedenen Zeitzonen. Dafür wird angenommen, dass sich der zirkadiane Rhythmus ab dem Zeitpunkt der Ankunft am Ziel gleichmäßig verschiebt, bis die Anpassung vollständig abgeschlossen ist. Als Beginn des Anpassungsvorgangs wurde die Ankunft gewählt, weil von diesem Moment an das – vorhandene oder fehlende – Tageslicht beziehungsweise der geänderte Tag-Nacht-Zyklus als neuer äußerer Zeitgeber vorliegt. (Die beginnende Rückabwicklung des Anpassungsprozesses nach Rückankunft wird vernachlässigt, weil die Simulation alsbald endet und ohnehin kein Schlaf mehr angesetzt ist.)

Zunächst wird hierfür die – hiermit eingeführte – *bio-effektive* Zeitverschiebung $T_{ShiftBE}$ sowie die damit einhergehende Anpassungsrate des Organismus an die neue Zeitzone bestimmt. Die Vorgehensweise ist wie folgt:

Die *echte* Zeitverschiebung bemisst sich aus der Differenz der Ortszeiten (*local times*, t_{local}) von Start- und Zielort (*origin/destination*):

$$T_{Shift} = t_{local,D} - t_{local,O} \quad (3-44)$$

So betragen beispielsweise die echten Zeitverschiebungen zwischen New York ($t_{NYC} = UTC - 5 \text{ h}$) und Tokio ($t_{TYO} = UTC + 9 \text{ h}$) und umgekehrt:

$$T_{Shift,NYC-TYO} = t_{TYO} - t_{NYC} = +14 \text{ h} \quad (3-45)$$

$$T_{Shift,TYO-NYC} = t_{NYC} - t_{TYO} = -14 \text{ h} \quad (3-46)$$

Die *effektive* Zeitverschiebung T_{ShiftE} vernachlässigt den Datumsprung und zählt lediglich die überquerten Zeitzonen:

$$\text{Wenn } T_{Shift} > +12 \text{ h, dann } T_{ShiftE} = T_{Shift} - 24 \text{ h.}$$

$$\text{Wenn } T_{Shift} < -12 \text{ h, dann } T_{ShiftE} = T_{Shift} + 24 \text{ h.}$$

$$\text{Sonst} \quad T_{ShiftE} = T_{Shift}. \quad (3-47)$$

Für das vorliegende Beispiel betragen die effektiven Zeitverschiebungen

$$T_{ShiftE,NYC-TYO} = T_{Shift,NYC-TYO} - 24 \text{ h} = -10 \text{ h} \quad (3-48)$$

$$T_{ShiftE,TYO-NYC} = T_{Shift,TYO-NYC} + 24 \text{ h} = +10 \text{ h} \quad (3-49)$$

Die *bio-effektive* Zeitverschiebung berücksichtigt zusätzlich, dass der menschliche Organismus sich aufgrund der asymmetrischen Verarbeitung des Jetlags bei besonders großen Zeitverschiebungen in Ostrichtung eher durch Verlängerung des Tag-Nacht-Zyklus‘ anpasst als durch Verkürzung, wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben. Die Zeitverschiebung für paritäre Anpassungsdauer des Organismus an den Jetlag in Ostrichtung $T_{ShiftPar,E}$, also jene, bei welcher eine Verlängerung und eine Verkürzung des Zyklus zur gleichen Anpassungsdauer führen, wird berechnet durch:

$$T_{ShiftPar,E} = \frac{dT_{Adapt,E}}{dT_{Adapt,E} - dT_{Adapt,W}} \cdot 24 \text{ h} = +9,6 \text{ h} \quad (3-50)$$

Im Umkehrschluss geschieht in Westrichtung die Anpassung an die neue Zeitzone durch Zyklus-Verlängerung sogar über 12 Stunden echte Zeitverschiebung hinaus, weil dies bis hin zur paritären Anpassungsdauer $T_{ShiftPar,W}$ effektiver ist als eine Verkürzung. $T_{ShiftPar,W}$ wird bestimmt durch

$$T_{ShiftPar,W} = \frac{dT_{Adapt,W}}{dT_{Adapt,E} - dT_{Adapt,W}} \cdot 24 \text{ h} = -14,4 \text{ h} \quad (3-51)$$

Die bio-effektive Zeitverschiebung und die zugehörige Jetlag-Adaptionsrate dT_{Adapt} sind demnach:

$$\begin{aligned} \text{Wenn } T_{Shift} \leq T_{ShiftPar,W} : & \quad T_{ShiftBE} = T_{Shift} + 24 \text{ h}, & \quad dT_{Adapt} = dT_{Adapt,E}. \\ \text{Wenn } T_{ShiftPar,W} < T_{Shift} \leq 0 : & \quad T_{ShiftBE} = T_{Shift}, & \quad dT_{Adapt} = dT_{Adapt,W}. \\ \text{Wenn } 0 < T_{Shift} \leq T_{ShiftPar,E} : & \quad T_{ShiftBE} = T_{Shift}, & \quad dT_{Adapt} = dT_{Adapt,E}. \\ \text{Wenn } T_{Shift} > T_{ShiftPar,E} : & \quad T_{ShiftBE} = T_{Shift} - 24 \text{ h}, & \quad dT_{Adapt} = dT_{Adapt,W}. \end{aligned}$$

Für unser Beispiel berechnen sich die bio-effektiven Zeitverschiebungen und die zugehörigen Adaptionsraten zu

$$T_{ShiftBE,NYC-TYO} = T_{Shift,NYC-TYO} - 24 \text{ h} = -10 \text{ h}; \quad dT_{Adapt,NYC-TYO} = dT_{Adapt,W}.$$

$$T_{ShiftBE,TYO-NYC} = T_{Shift,TYO-NYC} = -14 \text{ h}; \quad dT_{Adapt,TYO-NYC} = dT_{Adapt,W}.$$

Entsprechend den Anpassungsraten werden die Aufwachsweite $S_{aw}(t)$, die regulären Zeitpunkte des Schlafbeginns $t_{SlStart}$ und des Aufwachens t_{SlEnd} , die zugehörigen homöostatischen Levels $S_{SlStart}$ und S_{SlEnd} sowie die Zonen des Wachbleibens $t_{NoSl,i}$ verlagert. So verzögern oder verfrühen sich diese Ereignisse bei positiver beziehungsweise bei negativer Anpassungsrate.

Abb. 3.3-4 zeigt als Beispiel die Änderung der Aufwachswellen für beide lateralen Flugrichtungen. Bei negativer bio-effektiver Zeitverschiebung wird die Kurve zeitlich auseinandergezogen, bei positiver gestaucht. Die Abbildungen Abb. 3.3-5 und Abb. 3.3-6 zeigen die reguläre Anpassung des homöostatischen Zyklus an eine neue (unterkritische) Zeitzone. In Ostrichtung verringert sich vorübergehend die Bandbreite der homöostatischen Levels, während sie sich in Westrichtung erhöht.

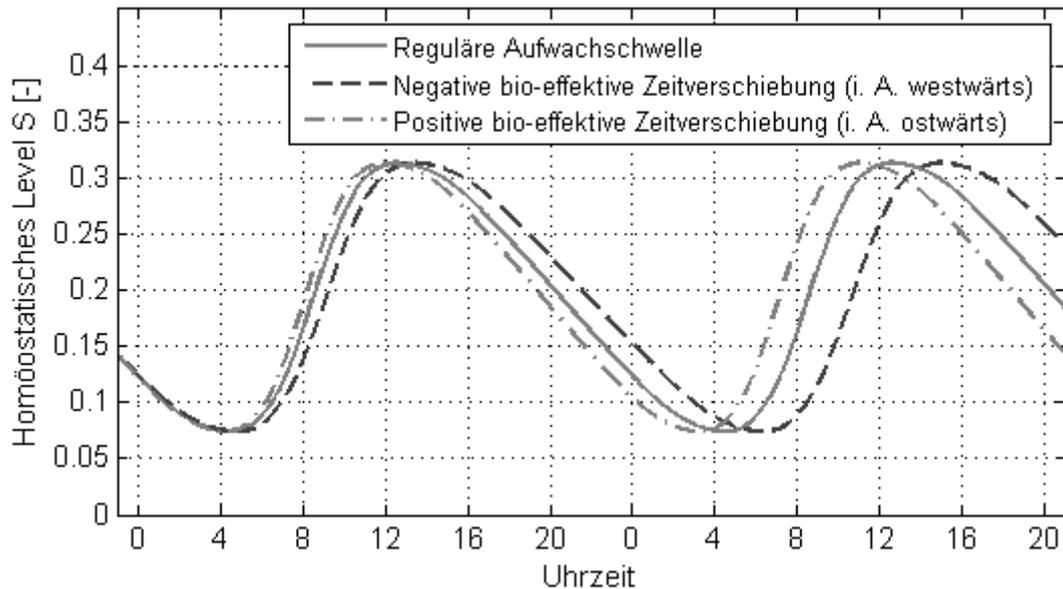


Abb. 3.3-4 – Aufwachswellen nach Ankunft am Zielort

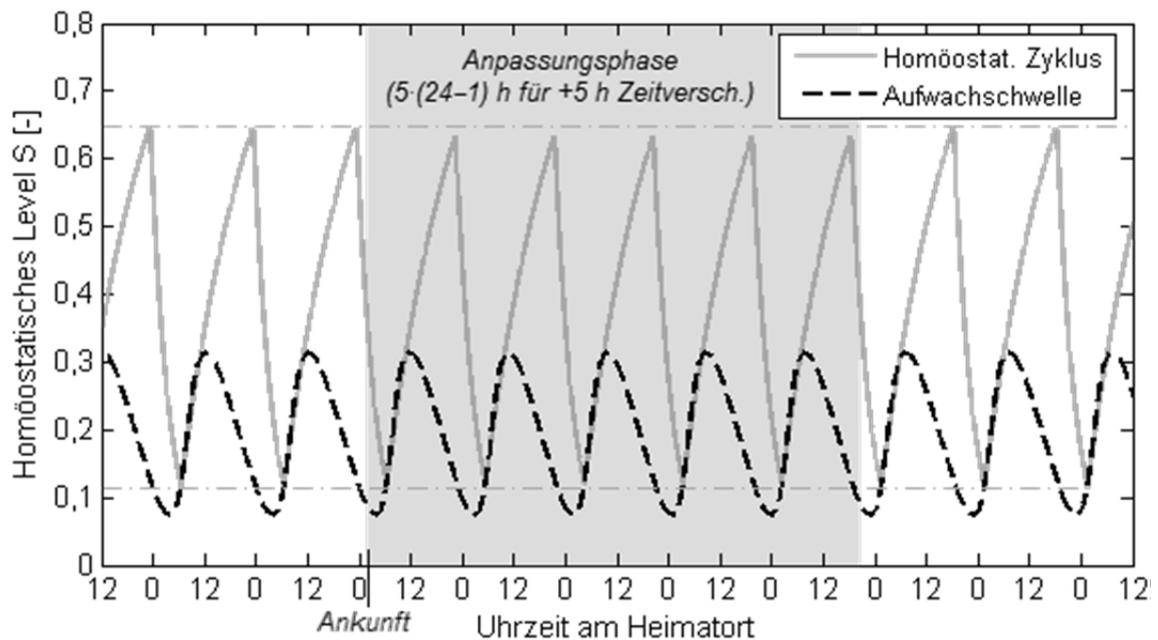


Abb. 3.3-5 – Regulärer homöostatischer Zyklus nach Ostflug über 5 Zeitzonen

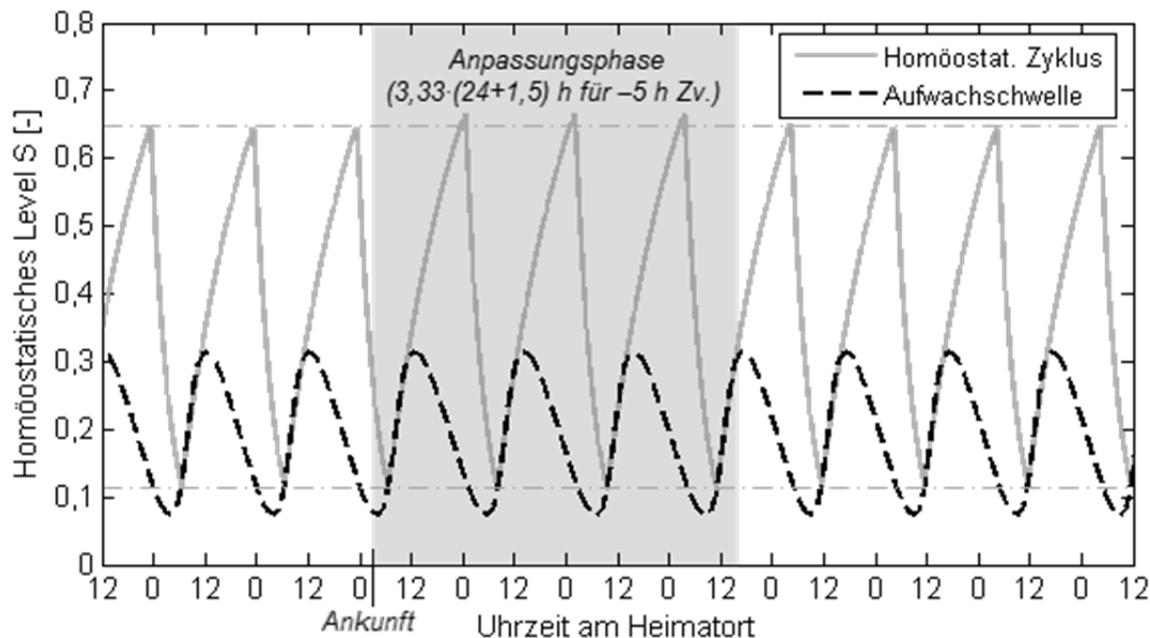


Abb. 3.3-6 – Regulärer homöostatischer Zyklus nach Westflug über 5 Zeitzonen

3.3.2.3 Schlaf- und Arbeitsdauern (SleepWorkEstim)

Mit der Routine *SleepWorkEstim* werden die in einem vorgegebenen Zeitraum auftretenden Schlafzeiten und Arbeitsdauern sowie das am Ende vorliegende homöostatische Level berechnet. Dabei wird der Algorithmus nur außerhalb der festen Terminzeiten eingesetzt, weil während jener logischerweise nur gearbeitet wird. Es werden folgende Grundsätze festgelegt:

- Schlaf hat (für den *prototypischen Passagier*) Priorität vor Arbeit.
- Geschlafen wird außerhalb der regulären Nacht nur, wenn ein erhöhtes homöostatisches Level vorliegt.
- Gearbeitet wird nur, wenn sich sowohl die zirkadiane Phase als auch die Homöostase innerhalb der während des Arbeitstages gewohnten Bandbreiten befinden.
- Innerhalb der Zonen des Wachbleibens wird nicht eingeschlafen.

Die No-Sleep-Zonen dienen ferner als Trennung zwischen zwei verschiedenen Varianten des Schlafs: Beginnt er nach der abendlichen und vor der mittäglichen Zone, so ist es per Definition Nachtschlaf und wird, wenn nicht „durch den Wecker“, durch das Erreichen der Aufwachschwelle beendet. Am Nachmittag hingegen findet lediglich ein Mittagsschlaf (engl.: *nap*) statt: Für diese Art des Schlafs dient das zu dem gegebenen Tageszeitpunkt reguläre homöostatische Level als Aufwachschwelle (siehe Abb. 3.3-7). Diese letztere Funktion der Schlafregulierung ist hypothetisch und wird nach bestem Wissen des Autors bislang in keiner Forschungsschrift erwähnt.

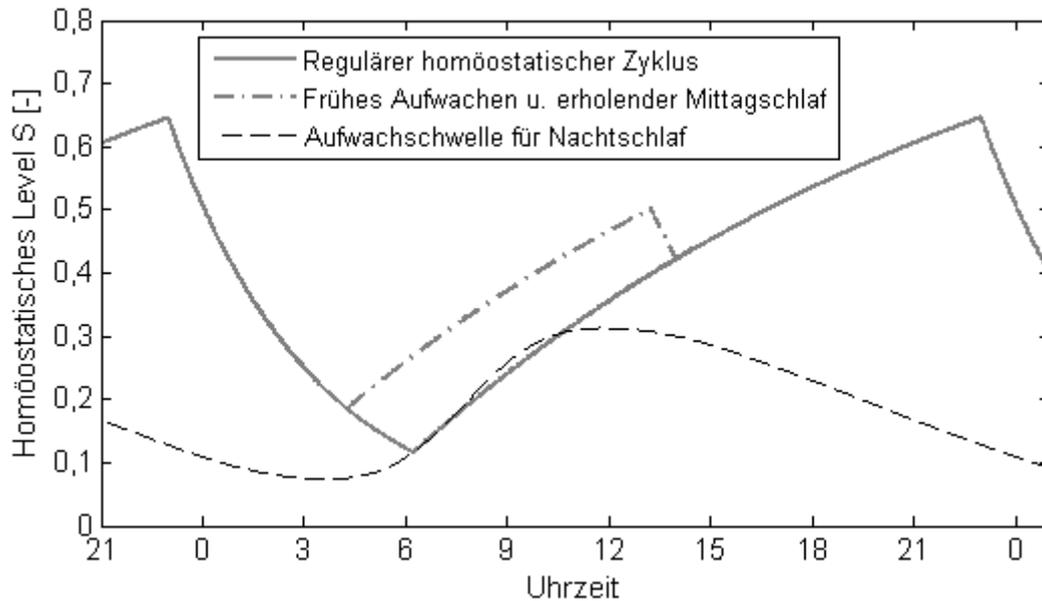


Abb. 3.3-7 – Regulierung des homöostatischen Levels durch Mittagschlaf

Weiterhin muss erwähnt werden, dass weder die Schlafeffizienz SE noch die damit zusammenhängende Wachzeit nach Schlafbeginn $WASO$ durch den Algorithmus berücksichtigt werden. Des Mangels an Vorhersagemethoden für zwischenzeitliches Aufwachen halber wird angenommen, dass der Nachtschlaf ein homogener Block ist und während dieser Phase das homöostatische Level exponentiell absinkt. Die Schlafeffizienz wird also ausgeblendet, während in der Folge die Güte des Schlafs durch den Parameter der *Schlafqualität* QS abgebildet wird. So entspricht für unseren prototypischen Passagier eine Schlafqualität von 100 % seiner regulären Schlafeffizienz von 90 %. Die Schlafeffizienz SE_{eco} von 50 % in Economy-Class-Sitzkomfort beispielsweise ist somit gleichwertig mit

$$QS_{eco} = \frac{SE_{eco}}{SE_{reg}} = 56 \% . \quad (3-55)$$

Die Schlafqualität findet Eingang in die Fortschreibung der homöostatischen Levels während der Schlafzeiten: Ausgehend vom anfänglichen S_0 entsteht eine modifizierte Schlafkurve durch die Summe aus regulärer Schlafkurve, multipliziert mit QS , und regulärer Wachkurve, multipliziert mit $(1 - QS)$:

$$S(t) = QS \cdot [S_0 \cdot 0.888^{2t}] + (1 - QS) \cdot [1 - (1 - S_0) \cdot 0.973^{2t}] \quad (3-56)$$

Abb. 3.3-8 zeigt, wie sich im Modell eine abgeschwächte Schlafqualität auf eine festgelegte Schlafphase auswirkt: Müdigkeit wird weniger effizient abgebaut.

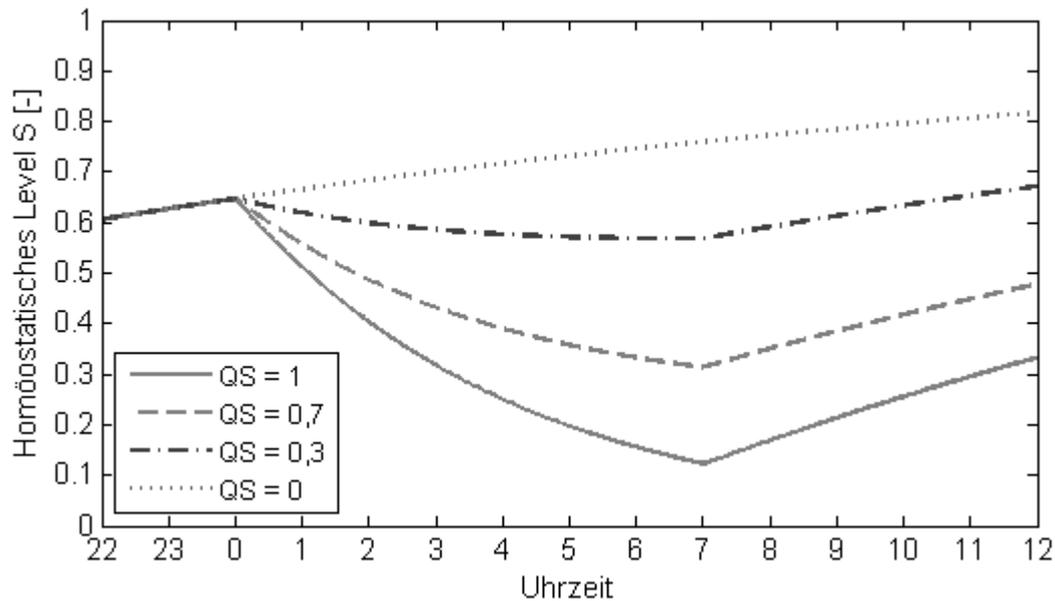


Abb. 3.3-8 – Feste Schlafphase von 0 – 7 Uhr mit variiertes Schlafqualität QS

3.3.2.4 Schlafdefizit (StoSleeDeficit)

Schlafdefizit steht in diesem Zusammenhang nicht für chronischen, regelmäßigen Schlafausfall, wie es im überwiegenden Teil der Fachliteratur der Fall ist, sondern für akute Störungen des Schlafrythmus' aufgrund widriger Reiseplanung und durch Jetlag. In diesem Sinne wird Schlafdefizit als eine bestimmte Differenz – oder als ein Potential – zwischen dem aktuellen, erhöhten homöostatischen Level und einem Normalwert gesehen und als Zeitwert ausgedrückt. Schlafdefizit tritt immer dann auf, wenn Schlaf zu spät begonnen oder zu früh beendet wird. Wenn der reguläre homöostatische Zyklus wiederhergestellt ist, endet das Schlafdefizit. In diesem Zusammenhang erscheint es ungenügend, einfach die Stunden verpassten Schlafs zu addieren, weil Schlaf, wie oben ausgeführt, je nach Timing unterschiedlich effektiv sein kann und dementsprechend ein Schlafdefizit nicht einfach mit derselben Menge an Schlaf auszugleichen ist.

Auf Basis dieser Voraussetzungen wurden drei Methoden als prinzipiell geeignet befunden, Schlafdefizit für ein zu einem bestimmten Zeitpunkt gegebenes homöostatisches Level zu quantifizieren:

Methode A beantwortet im Grunde die Frage, wie viel zu spät eingeschlafen oder wie viel zu früh aufgewacht wurde. Durch die betrachtete Position aus Zeit und homöostatischem Level werden sowohl eine Schlaf- als auch eine Wachkurve gelegt und mit der Extrapolation der vergangenen regulären Wachkurve beziehungsweise mit der vergangenen regulären Schlafkurve geschnitten (siehe Abb. 3.3-9; X und Y sind Beispielpositionen). Das Schlafdefizit entspricht dem zeitlichen Abstand der Schnittpunkte entweder zum letzten regulären

Schlafbeginn („Wie viel zu spät eingeschlafen?“) oder zum benachbarten regulären Schlafende („Wie viel zu früh aufgewacht?“). Schließlich wird das Minimum der beiden berechneten Werte als Schlafdefizit gemeldet; man hätte nämlich entweder früher ins Bett gehen oder länger schlafen können, je nachdem, was weniger Defizit verursacht. Im Beispiel der Abb. 3.3-9 wird als Schlafdefizit $SD_{1,X}$ für den Punkt X und $SD_{2,Y}$ für den Punkt Y ausgegeben.

Von einer einfachen Zählung der verpassten Schlafstunden unterscheidet sich diese Methodik dadurch, dass sie sich auf das homöostatische Level stützt und damit auch die Effektivität von Schlaf berücksichtigt, welcher zu irregulären Zeiten stattgefunden hat. Der ausgegebene Wert ist damit gleichwertig mit zu spätem Einschlafen beziehungsweise zu frühem Aufwachen; er kann jedoch auch durch eine ganz andere Schlafsequenz zustande gekommen sein.

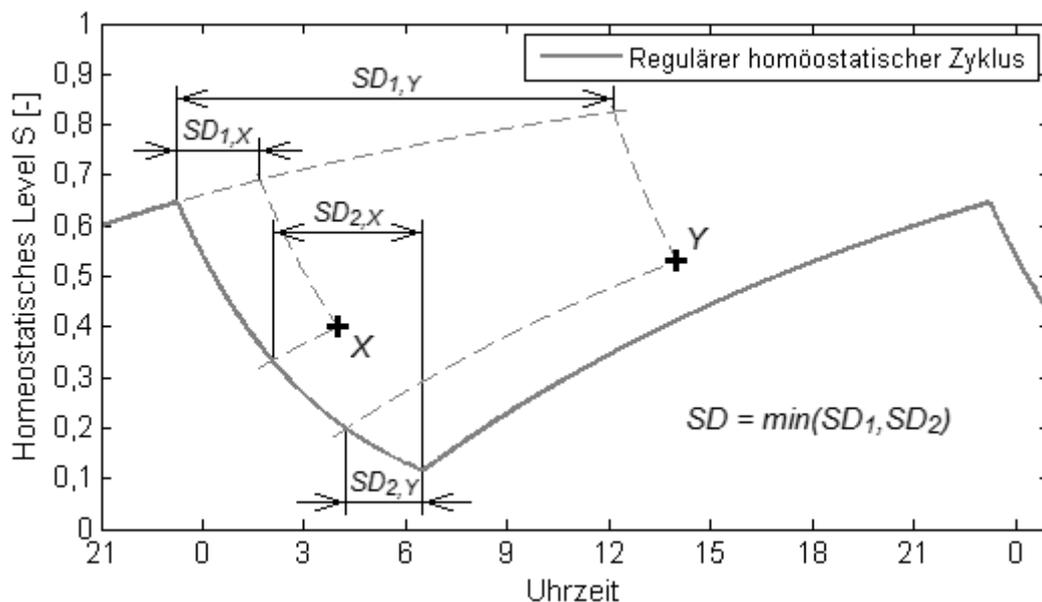


Abb. 3.3-9 – Methode A zur Bestimmung des Schlafdefizits SD

Trotz der Plausibilität ihrer Ergebnisse ist der Nachteil der Methode A, dass sie nicht aussagt, wie groß das homöostatische Potential *gegenwärtig* ist, sondern nur, wie viel Schlaf in der Vergangenheit verpasst wurde. Diesen Misstand aufgreifend, untersucht *Methode B*, mit wie viel „instantanem“ Schlaf das zum momentanen Zeitpunkt reguläre homöostatische Level $S_{reg}(t)$ erreicht werden kann, ausgehend vom vorliegenden Level $S(t)$ (vgl. Abb. 3.3-10):

$$S_{reg}(t) = S(t) \cdot 0,888^{2 \cdot SD(t)} \quad \Rightarrow \quad SD(t) = \frac{\ln\left(\frac{S_{reg}(t)}{S(t)}\right)}{2 \cdot \ln 0,888} \quad (3-57)$$

$SD(t)$ rechnet in diesem Fall die augenblickliche homöostatische Differenz in einen Zeitwert um; somit liegt eine Art „technisches“ Schlafdefizit vor. Während regulärer Wachzeiten sinkt es kontinuierlich, weil Schlaf mit steigender Ermüdung effizienter wird.

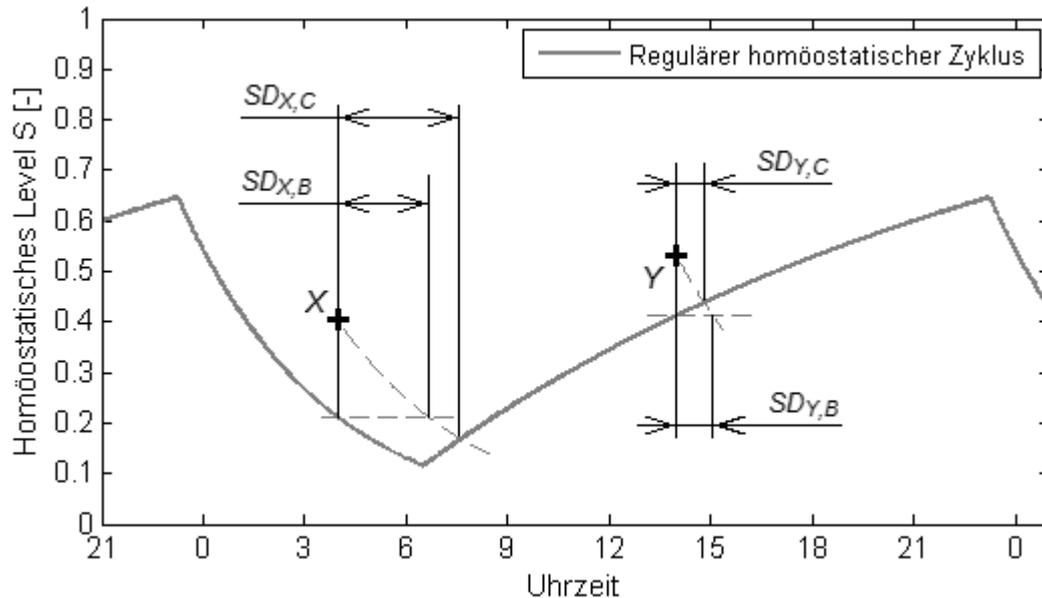


Abb. 3.3-10 – Methoden B und C zur Bestimmung des Schlafdefizits SD

Methode C berechnet die Schlafdauer, die zur Rückkehr in den normalen homöostatischen Zyklus notwendig ist, indem es eine Schlafkurve durch den betrachteten Punkt bis zur regulären Wachkurve verlängert (siehe Abb. 3.3-10). Gleichzeitig wird dadurch die zuvor aufgeworfene Frage nach der echten Erholungsdauer beantwortet. Diese etwas simplistische Methode produziert jedoch einen unmittelbaren Sprung im Schlafdefizit, sobald die reguläre Schlafkurve (oder ihre obere Extrapolation) im Wachzustand überschritten wird. Auf Bilanzierungen wirkt sich dieser Effekt schädlich aus, weil auch bei geringfügigem Verpassen des optimalen Einschlafzeitpunkts ein großes Schlafdefizit entsteht, welches erst langwierig abgebaut werden muss.

Die Abbildungen Abb. 3.3-11 und Abb. 3.3-12 zeigen einen Ergebnisvergleich zwischen den drei Arten der Schlafdefizit-Bestimmung. Das Defizit resultiert jeweils aus dem Potential zwischen dem regulären und einem irregulären homöostatischen Zyklus, im ersten Beispiel zustande gekommen durch totalen Schlafentzug sowie im zweiten Beispiel durch zu spätes Einschlafen, zu frühes Aufstehen und erholenden Mittagschlaf. Dabei werden die Eigenheiten der jeweiligen Methoden ersichtlich. So entspricht das Schlafdefizit nach Methode A am ehesten dem allgemeinen Verständnis, wobei sein Wert alleine keine Aussage

über die nötige Erholungsdauer trifft; dies wird beispielsweise am steilen Abbau des Schlafdefizits durch Mittagschlaf deutlich. Methode B ist etwas schlechter greifbar und liefert zumeist geringere Durchschnittswerte; durch ihre „Normierung“ mit der regulären Homöostase erlaubt sie allerdings einen validen Vergleich zwischen Schlafdefiziten zu verschiedenen Phasen im homöostatischen Zyklus. Methode C erscheint ob ihrer Sprunghaftigkeit höchstens geeignet, um die zur vollständigen Erholung nötige Schlafdauer anzugeben.

Tatsächlich bewerten die Methoden A, B und C in dieser Reihenfolge Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft aus homöostatischer Perspektive. Welche letztlich zur Anwendung kommt, ist zweckgebunden zu entscheiden. Im Folgenden wird jedoch aufgrund ihrer intuitiven Verständlichkeit Methode A verwendet.

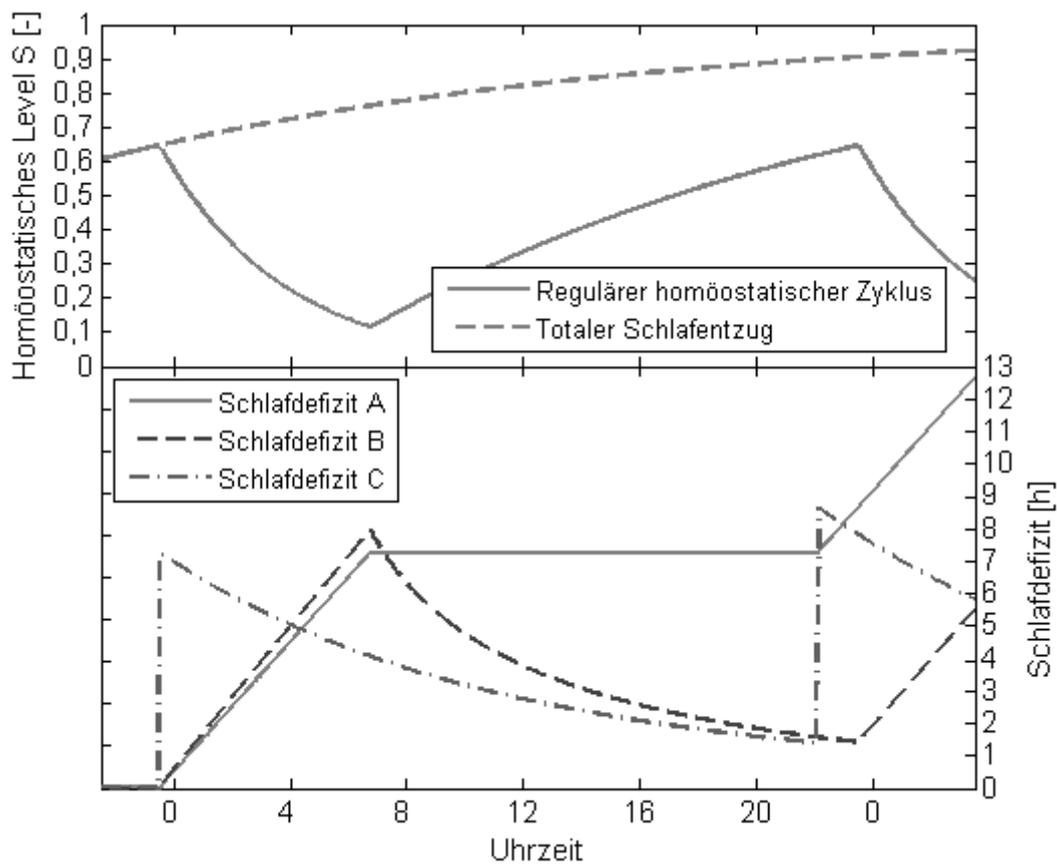


Abb. 3.3-11 – Ergebnisvergleich der Methoden zur Schlafdefizitbestimmung (1)

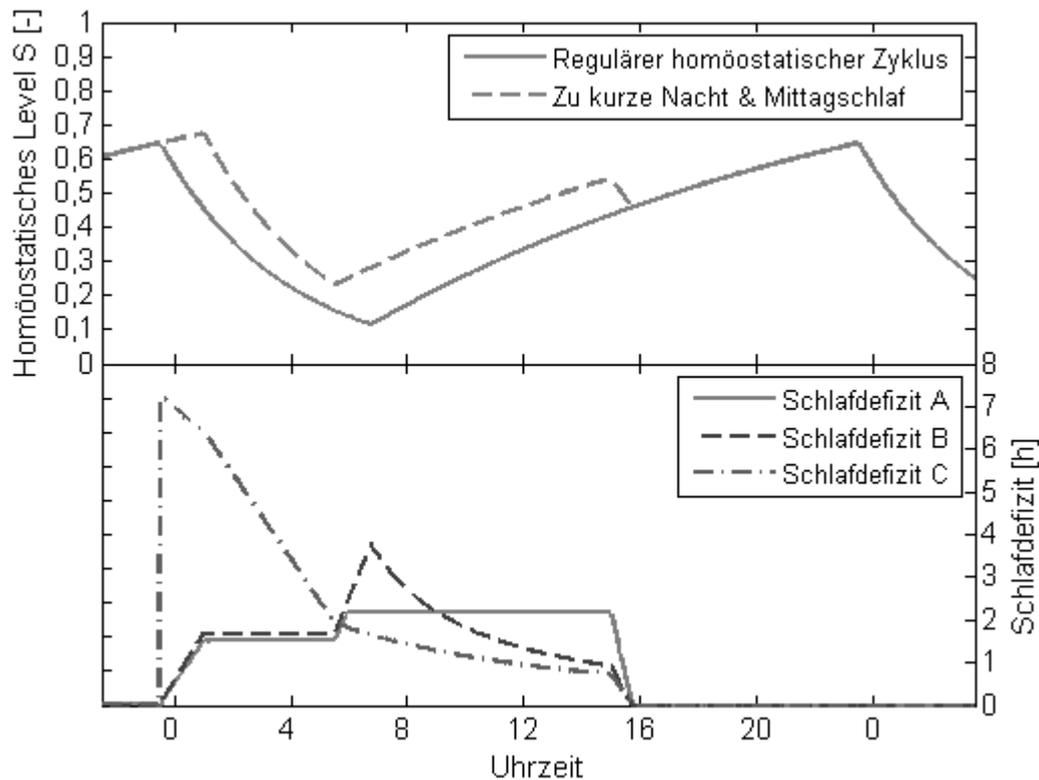


Abb. 3.3-12 – Ergebnisvergleich der Methoden zur Schlafdefizitbestimmung (2)

3.3.3 Weitere Routinen

In großen Teilen identisch mit *JourneyPlanner* ist die Routine *JourneyAnalyzer*. Letztere bestimmt die Flugzeiten jedoch nicht selbständig, sondern verarbeitet sie als Eingabe. Dadurch können beliebige vorgeplante Reisen simuliert werden, um Dauern, Schlafdefizite und Arbeitszeitverluste festzustellen, beispielsweise auf Basis echter Flugverbindungen. Zusätzlich werden die Reiseverläufe grafisch dargestellt, was beispielsweise hilfreich ist, um in *JourneyPlanner* gefundene Reiseplanungen nachzuvollziehen. Beispiele für derartige Grafiken sind in Abschnitt 3.4.1 zu finden.

Zusätzlich existieren noch die Routinen *JourneyPlanner_OutOnly* und *JourneyAnalyzer_OutOnly*, welche jeweils mit dem Zeitpunkt des Terminbeginns schließen. Dadurch können optimale Hinreisen bestimmt beziehungsweise Hinreisen analysiert werden, unabhängig von allen Umständen der Rückreise.

3.4 Verifizierung und Validierung

3.4.1 Plausibilitätsbetrachtungen

Zahlreiche Fallbeispiele wurden gerechnet und ausgewertet, um die Funktionalität der Algorithmen und die Plausibilität der berechneten Ergebnisse, allen voran der Schlafdefizite, zu überprüfen. Dieses Vorgehen ermöglichte es, das Modell schrittweise zu verbessern. Einzelne Beispiele werden nachfolgend diskutiert.

3.4.1.1 Unterschiedliche Arten der Reiseplanung

An einem generischen Beispiel soll verdeutlicht werden, welche unterschiedliche Reisen für verschiedenartige Nutzwertprioritäten entstehen können:

Es sei eine zweitägige Konferenz an einem Zielort geplant, welcher zehn Flugstunden entfernt und drei Zeitzonen östlich liege. Der erste Konferenztag beginne um 9 Uhr und ende nach einem Abendessen um 21 Uhr. Der zweite Konferenztag beginne ebenfalls um 9 Uhr und ende um 18 Uhr. Der Reisende verfüge frei über einen Businessjet; Start- und Zielflughafen besäßen kein Nachtflugverbot. Gemäß seiner Erfahrung könne der Reisende im Flugzeug recht gut schlafen ($SE_{Fl} = 0,7$).

Auf Basis dieser Eingaben und der sonstigen Standard-Parameter plant *JourneyPlanner* nun vier verschiedene Reisearten, nämlich die *schnellste* ($w_{Time} = 1$, $w_{Sleep} = 0$, $w_{Work} = 0$), die *schonendste* ($w_i = [0\ 1\ 0]$) und die *arbeitsamste* ($w_i = [0\ 0\ 1]$) Reise sowie die *ausgeglichenste* ($w_i = [1\ 1\ 1]$) als Kompromiss.

Abb. 3.4-1 zeigt eine Zusammenfassung der Simulationsergebnisse. So verfügt die schnellste Reise tatsächlich über die geringste Dauer, sowohl auf Hin- und Rückreise ($OutJourney_T$, $RetJourney_T$) als auch insgesamt ($Journey_T$); die schonendste über das geringste Schlafdefizit zum Ende der Hinreise ($OutJourney_SDEnd$) wie auch zum Zeitpunkt der Rückankunft ($RetJourney_SDEnd$); und die arbeitsamste über den geringsten Arbeitszeitverlust auf Hin- und Rückreise ($JourneyOut_WTL$, $JourneyRet_WTL$) wie auch insgesamt ($Journey_WTL$). Die Zielwerte der ausgeglichenen Kompromissreise befinden sich innerhalb der durch die ersten drei Reisearten vorgegebenen Bandbreiten.

w_Time:	{ ' 1 ' ' 0 ' ' 0 ' ' 1 ' }
w_Sleep:	{ ' 0 ' ' 1 ' ' 0 ' ' 1 ' }
w_Work:	{ ' 0 ' ' 0 ' ' 1 ' ' 1 ' }
OutFlight__tDep:	{ '18:00 -1' '18:10 -2' '09:30 -1' '09:50 -1' }
OutFlight__TSleep:	{ ' 3:45 h ' ' 3:55 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
OutFlight__TWork:	{ ' 0:14 h ' ' 0:05 h ' ' 8:43 h ' ' 8:24 h ' }
OutFlight__tArr:	{ '07:00 +0' '07:10 -1' '22:30 -1' '22:50 -1' }
OutHotel__TSleep:	{ ' 0:00 h ' ' 8:09 h ' ' 5:09 h ' ' 5:09 h ' }
OutHotel__TWork:	{ ' 0:00 h ' ' 7:03 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
OutJourney__T:	{ '13:45 h ' '37:35 h ' '22:15 h ' '21:55 h ' }
OutJourney__SDEnd:	{ ' 4:22 h ' ' 1:16 h ' ' 1:55 h ' ' 1:55 h ' }
OutJourney__WTL:	{ ' 3:01 h ' ' 5:57 h ' ' 1:17 h ' ' 1:36 h ' }
OutJourney__TCT:	{ '13:45 h ' ' 1:16 h ' ' 1:17 h ' ' 8:47 h ' }
Meetings__tStart:	{ '09:00 +0' '09:00 +0' '09:00 +0' '09:00 +0' }
Meetings__TWork:	{ '21:00 h ' '21:00 h ' '21:00 h ' '21:00 h ' }
Meetings__SDmean:	{ ' 3:12 h ' ' 1:26 h ' ' 1:44 h ' ' 1:43 h ' }
Meetings__tEnd:	{ '18:00 +1' '18:00 +1' '18:00 +1' '18:00 +1' }
RetHotel__TSleep:	{ ' 0:00 h ' ' 6:28 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
RetHotel__TWork:	{ ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
RetFlight__tDep:	{ '19:45 +1' '08:55 +2' '19:45 +1' '19:55 +1' }
RetFlight__TSleep:	{ ' 4:52 h ' ' 0:22 h ' ' 5:00 h ' ' 5:10 h ' }
RetFlight__TWork:	{ ' 0:00 h ' ' 8:25 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
RetFlight__tArr:	{ '02:45 +2' '15:55 +2' '02:45 +2' '02:55 +2' }
RetJourney__T:	{ '13:15 h ' '26:25 h ' '13:15 h ' '13:25 h ' }
RetJourney__SDEnd:	{ ' 3:49 h ' ' 0:00 h ' ' 3:33 h ' ' 3:26 h ' }
RetJourney__WTL:	{ ' 3:30 h ' ' 4:00 h ' ' 3:30 h ' ' 3:30 h ' }
RetJourney__TCT:	{ '13:15 h ' ' 0:00 h ' ' 3:30 h ' ' 9:49 h ' }
Journey__T:	{ '60:00 h ' '97:00 h ' '68:30 h ' '68:20 h ' }
Journey__WTL:	{ ' 6:31 h ' ' 9:57 h ' ' 4:47 h ' ' 5:06 h ' }
Journey__TCT:	{ '27:00 h ' ' 1:16 h ' ' 4:47 h ' '18:36 h ' }

Abb. 3.4-1 – JourneyPlanner-Ausgabe: Ablaufplan der verschiedenen Reisearten ³⁵

Um die Ausgabewerte besser nachvollziehen zu können, werden im Folgenden die Verläufe aller vier Reisen mit Hilfe von *JourneyAnalyzer* grafisch dargestellt (siehe Abb. 3.4-2) und anschließend diskutiert. ³⁶

³⁵ *OutFlight*: Hinflug; *OutHotel*: Hotelaufenthalt nach dem Hinflug; *OutJourney*: Hinreise; *Meetings*: Zeitraum des Arbeitsaufenthalts; *RetHotel*: Hotelaufenthalt vor dem Rückflug; *RetFlight*: Rückflug; *RetJourney*: Rückreise; *Journey*: Gesamte Reise.

tDep: Abflugzeit; *TSleep*: Schlafdauer; *TWork*: Arbeitsdauer; *tArr*: Ankunftszeit; *T*: Gesamtdauer; *WTL*: Arbeitszeitverlust; *tStart*: Beginn des Arbeitsaufenthalts; *SDmean*: gemittelttes Schlafdefizit während des Arbeitsaufenthalts; *tEnd*: Ende des Arbeitsaufenthalts; *SDEnd*: Schlafdefizit zum Ende der Reise

³⁶ Arbeitszeitverluste, welche auf Basis der in Kapitel 3.3.2.3 getroffenen Annahmen relativ trivial zu berechnen sind, werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht grafisch abgebildet.

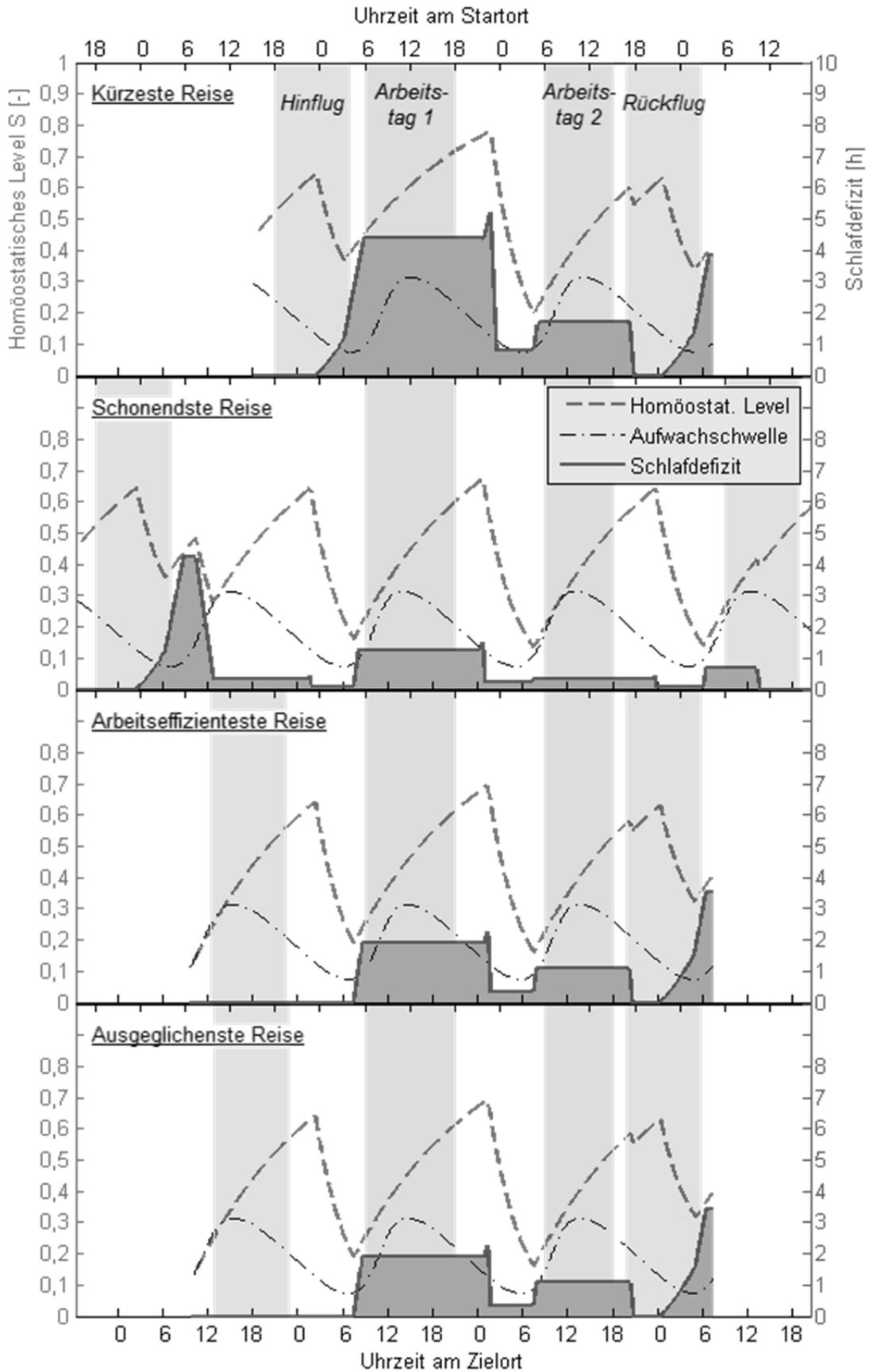


Abb. 3.4-2 – Ausgabe von *JourneyAnalyzer*: Reisearten für feste Terminserie

Kürzeste Reise (Abb. 3.4-3): Der Hinflug geht über Nacht und landet spätestmöglich zum Erreichen des ersten Termins. Das zirkadiane Schlaffenster des Passagiers öffnet sich erst spät auf dem Flug und das Defizit steigt wegen der suboptimalen Schlaffeffizienz auch während seines Schlafs an. Deshalb schafft es der Passagier nicht, sich vollständig auszuruhen, und trägt ein beträchtliches Schlafdefizit durch den ersten Arbeitstag. Später im Hotel kann er zunächst nicht einschlafen, weil er sich in der abendlichen Zone des Wachbleibens befindet. Zu deren Ende steigt das Schlafdefizit kurz an, da die obere Verlängerung der regulären homöostatischen Schlafkurve wegen des Jetlag-Anpassungsvorgangs überschritten wird (vgl. Kapitel 3.3.2.2 und 3.3.2.4). Nach dem Einschlafen wird das vom letzten Tag übriggebliebene Schlafdefizit sehr schnell abgebaut und das Niveau stabilisiert sich auf dem kurz vor dem Einschlafen angefallenen Defizit; bevor auch dieses zum Ende der Nacht angegriffen werden kann, klingelt jedoch der Wecker für den nächsten Arbeitstag. Aufgrund des verfrühten Schlafendes, veranschaulicht durch die nicht erreichte Aufwachschwelle, wächst bis zum regulären Aufwachzeitpunkt das Defizit erneut an und bleibt während des zweiten Arbeitstages erhalten. Auf dem unmittelbar danach erfolgenden Rückflug wird es durch einen kurzen Mittagschlaf vollständig ausgeglichen. Später steigt das Schlafdefizit während des suboptimalen Nachtschlafs langsam und nach dem nächtlichen Aufwachen vor dem Ende des Fluges schnell an.

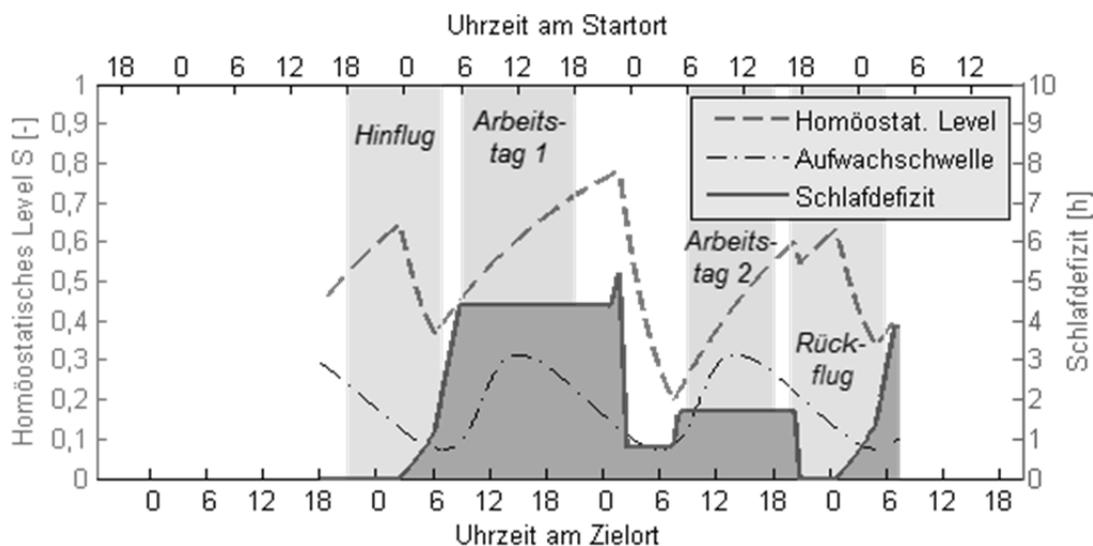


Abb. 3.4-3 – Kürzeste Reise

Schonendste Reise (Abb. 3.4-4): *JourneyPlanner* setzt den Hinflug fast einen Tag vor dem spätestmöglichen an. Dies ermöglicht dem Passagier drei Schlafphasen vor dem ersten Arbeitstag – eine im Flugzeug und zwei im Hotel –, was schließlich im geringstmöglichen Schlafdefizit während der Arbeitstage resultiert.

Vollständige Ausgeruhtheit wird nicht erreicht, weil der Reisende zum einen nicht einschlafen kann, bevor sich das abendliche Schlafenster öffnet, und zum anderen vor dem regulären Aufwachen aufstehen muss, um rechtzeitig zur Arbeit zu kommen. Aufgrund des sich anpassenden Biorhythmus‘ gelingt das Ausschlafen vor dem zweiten Arbeitstag schon fast gänzlich. Das geringe Schlafdefizit, das der Passagier sich durch das frühe Aufstehen vor dem Rückflug einhandelt, gleicht er durch einen kurzen Mittagschlaf im Flugzeug vollständig aus.

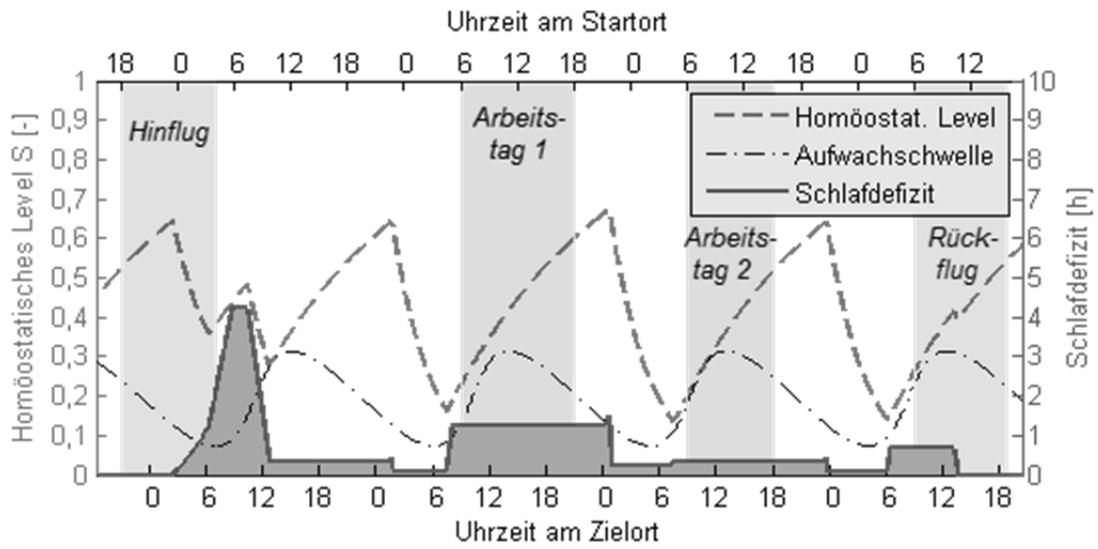


Abb. 3.4-4 – Schonendste Reise

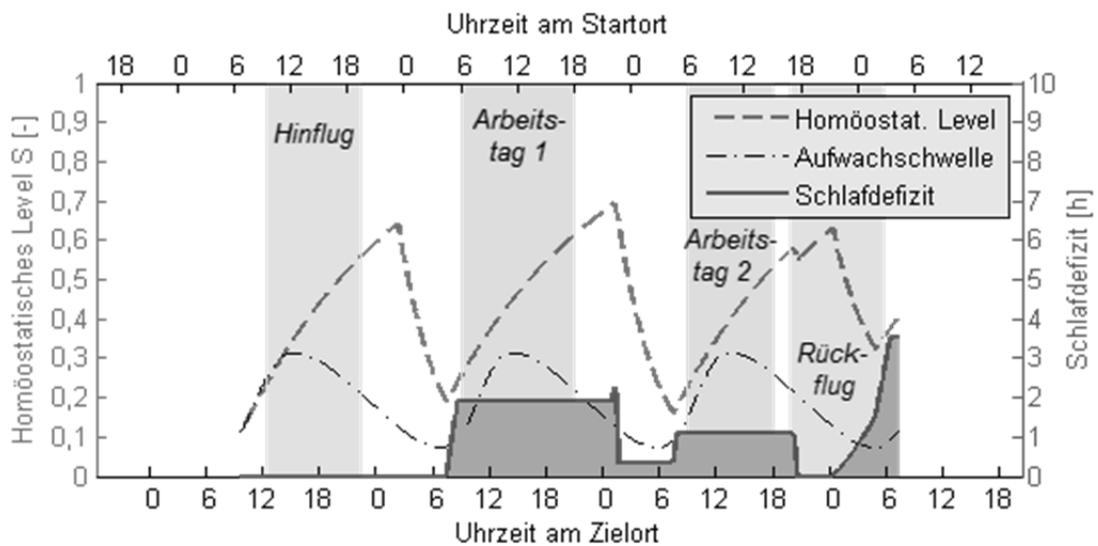


Abb. 3.4-5 – Arbeitseffizienteste Reise

Arbeitseffizienteste Reise (Abb. 3.4-5, oben): Der Hinflug wird so gelegt, dass der Passagier den größten Teil seines Arbeitstages im Flugzeug verbringen kann und somit der Arbeitszeitverlust begrenzt wird. Zwischen dem Beginn und dem Ende der Termine wird per Definition kein Arbeitszeitverlust bilanziert. Der Rückflug startet unmittelbar nach Terminende und führt größtenteils durch die Nacht, in der ohnehin nicht gearbeitet wird.

Ausgeglichenste (Kompromiss-)Reise (Abb. 3.4-6): Der Verlauf unterscheidet sich nur unwesentlich von dem der arbeitseffizientesten Reise. Mit der etwas späteren Hinreise wird Arbeitszeit gegen geringfügig weniger Reisedauer eingetauscht und mit der ebenfalls etwas späteren Rückreise Reisedauer gegen etwas weniger Schlafdefizit.

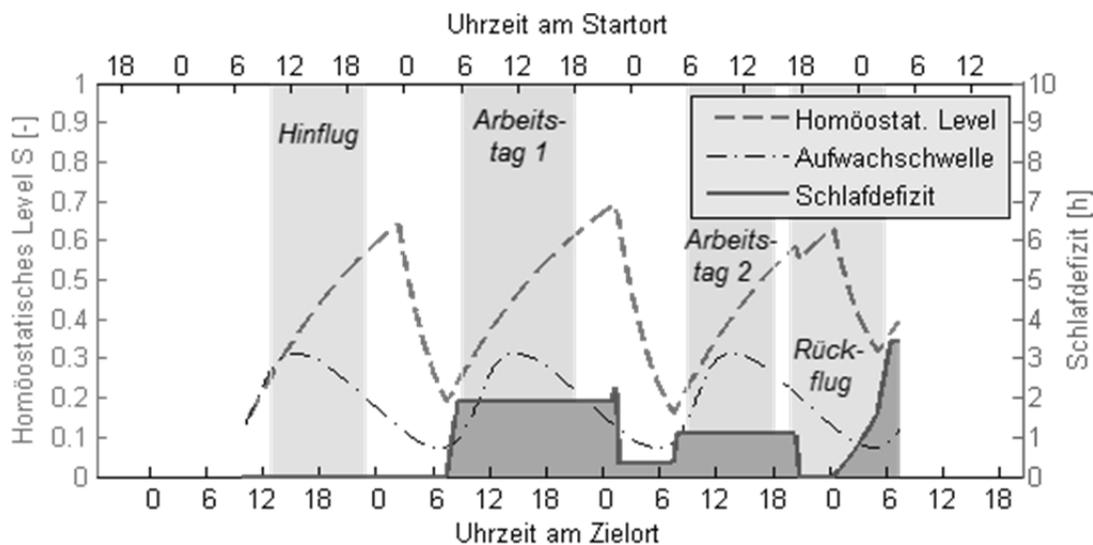


Abb. 3.4-6 – Ausgeglichenste Reise

3.4.1.2 Variation der Schlafqualitäten

Die Schlafqualität auf den Flügen hat – bis auf die Planung der schnellsten Reise – prinzipiell Einfluss auf alle Reiseplanungen, da Arbeit durch ausreichend Schlaf erst ermöglicht wird.

Obiges Beispiel aufnehmend, sei die Schlafqualität auf den Flügen nun $QS_{Fl} = 0$, der Passagier könne also überhaupt nicht schlafen. Nun wäre eigentlich zu erwarten, dass die Schlafdefizite der einzelnen Reisen allgemein höher ausfallen; dem ist hier jedoch nicht so (vgl. Abb. 3.4-7 mit Abb. 3.4-1 oben).

w_Time:	{ ' 1 ' ' 0 ' ' 0 ' ' 1 ' }
w_Sleep:	{ ' 0 ' ' 1 ' ' 0 ' ' 1 ' }
w_Work:	{ ' 0 ' ' 0 ' ' 1 ' ' 1 ' }
OutFlight__tDep:	{ '18:00 -1' '22:00 -2' '09:30 -1' '09:50 -1' }
OutFlight_TSleep:	{ ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
OutFlight_TWork:	{ ' 0:14 h ' ' 0:00 h ' ' 8:43 h ' ' 8:24 h ' }
OutFlight__tArr:	{ '07:00 +0' '11:00 -1' '22:30 -1' '22:50 -1' }
OutHotel_TSleep:	{ ' 0:00 h ' '11:16 h ' ' 5:09 h ' ' 5:09 h ' }
OutHotel_TWork:	{ ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
OutJourney__T:	{ '13:45 h ' '33:45 h ' '22:15 h ' '21:55 h ' }
OutJourney_SDEnd:	{ ' 6:30 h ' ' 0:36 h ' ' 1:55 h ' ' 1:55 h ' }
OutJourney__WTL:	{ ' 3:01 h ' '10:00 h ' ' 1:17 h ' ' 1:36 h ' }
OutJourney__TCT:	{ '13:45 h ' ' 0:36 h ' ' 1:17 h ' ' 8:47 h ' }
Meetings__tStart:	{ '09:00 +0' '09:00 +0' '09:00 +0' '09:00 +0' }
Meetings__TWork:	{ '21:00 h ' '21:00 h ' '21:00 h ' '21:00 h ' }
Meetings__SDmean:	{ ' 4:56 h ' ' 1:01 h ' ' 1:44 h ' ' 1:43 h ' }
Meetings__tEnd:	{ '18:00 +1' '18:00 +1' '18:00 +1' '18:00 +1' }
RetHotel_TSleep:	{ ' 0:00 h ' ' 7:04 h ' ' 0:00 h ' ' 6:49 h ' }
RetHotel_TWork:	{ ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
RetFlight__tDep:	{ '19:45 +1' '09:45 +2' '19:45 +1' '09:55 +2' }
RetFlight_TSleep:	{ ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
RetFlight_TWork:	{ ' 0:00 h ' ' 8:30 h ' ' 0:00 h ' ' 8:20 h ' }
RetFlight__tArr:	{ '02:45 +2' '16:45 +2' '02:45 +2' '16:55 +2' }
RetJourney__T:	{ '13:15 h ' '27:15 h ' '13:15 h ' '27:25 h ' }
RetJourney_SDEnd:	{ ' 8:59 h ' ' 0:01 h ' ' 8:06 h ' ' 0:19 h ' }
RetJourney__WTL:	{ ' 3:30 h ' ' 4:45 h ' ' 3:30 h ' ' 5:05 h ' }
RetJourney__TCT:	{ '13:15 h ' ' 0:01 h ' ' 3:30 h ' '12:22 h ' }
Journey__T:	{ '60:00 h ' '94:00 h ' '68:30 h ' '82:20 h ' }
Journey__WTL:	{ ' 6:31 h ' '14:45 h ' ' 4:47 h ' ' 6:41 h ' }
Journey__TCT:	{ '27:00 h ' ' 0:37 h ' ' 4:47 h ' '21:09 h ' }

Abb. 3.4-7 – JourneyPlanner-Ausgabe: Ablaufplan der Reisearten für $QS_{Fl} = 0$

Auf der kürzesten Reise ergeben sich deutlich höhere Schlafdefizite als im obigen Beispiel sowohl während der Termine als auch bei der Rückkehr (4:56 h vs. 3:12 h bzw. 8:59 h vs. 3:49 h), was nicht überrascht, da auf den unmittelbar an die Termine anschließenden Flügen nicht geschlafen wird. Die schonendste Reise weist jedoch sowohl ein geringeres Schlafdefizit nach Ankunft (0:36 h vs. 1:16 h) und während der Meetings (1:01 h vs. 1:26 h) als auch eine kürzere Hinreise (33:45 h vs. 37:35 h) auf, wenngleich auch mit größerem Arbeitszeitverlust (10:00 h vs. 5:57 h).

Die Erklärung hierfür lässt sich anhand der homöostatischen Kurven veranschaulichen (Abb. 3.4-8): Nach dem schlaflosen Nachtflug findet im Hotel ein langer Erholungsschlaf statt, welcher die Homöostase deutlich unter das Level der oben behandelten schonendsten Reise bringt (vgl. Abb. 3.4-4). Da der anschließende Nachtschlaf vor dem ersten Arbeitstag fast zum gleichen Zeitpunkt,

aber mit viel niedrigerer Müdigkeit beginnt, fallen die gemittelten Schlafdefizite der nächsten Tage etwas geringer aus. Der hohe Arbeitszeitverlust rührt daher, dass ein großer Teil des potentiellen Arbeitstages im Hotel verschlafen wird.

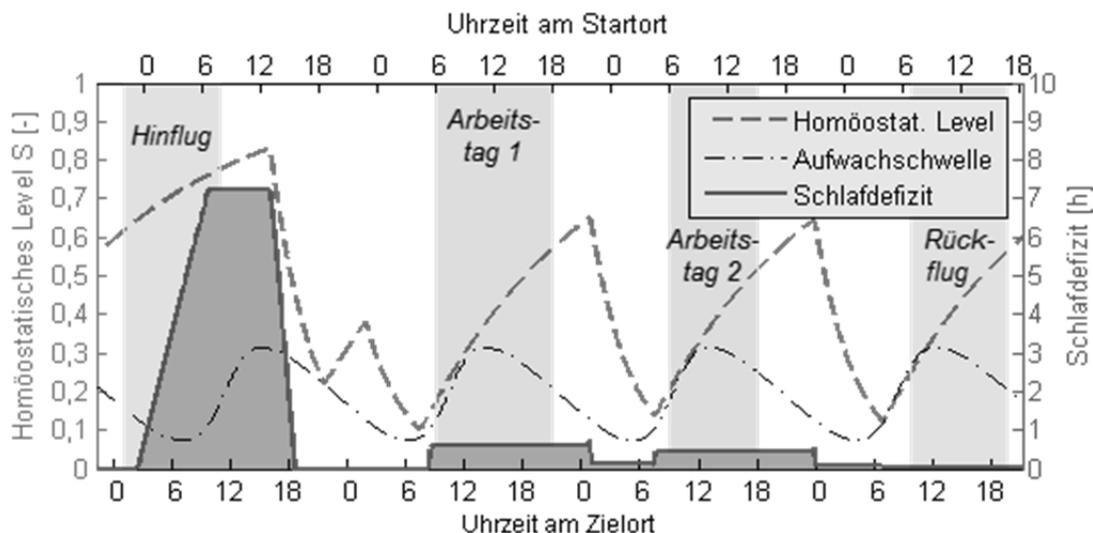


Abb. 3.4-8 – Schonendste Reisen mit schlaflosen Flügen

Die arbeitseffizienteste Reise verläuft für beide Schlafqualitäten gleich. Bei der Kompromissreise wird derjenige Rückflug gewählt, welcher vollständiges Ausschlafen im Hotel ermöglicht, weil ja auf dem Flug nicht geschlafen wird.

Zuletzt wird noch optimale Schlafqualität auf den Flügen angenommen³⁷, siehe Abb. 3.4-9. Auf der schnellsten Reise fallen die Schlafdefizite wie erwartet geringer aus als bei schlechteren Schlafqualitäten. Die schonendste Reise ist besonders kurz, weil vor dem Rückflug kein Hotelaufenthalt angesetzt werden muss und nur der Flug für eine vollständige Erholung benötigt wird. Die arbeitseffizienteste Reise hingegen dauert mehr als vier Stunden länger, um geringfügig weniger Arbeitszeitverlust zu erreichen. Die Kompromissreise verwendet erneut den denselben Hinflug, so wie überhaupt die Ansetzungen der Hinflüge über alle Schlafqualitäten konstant bleiben. Der Rückflug verbindet ein geringes Schlafdefizit mit einer relativ kurzen Reisezeit.

³⁷ Optimale Schlafqualität in Flugzeugkabinen dürfte in der Realität wegen technisch bedingter Abstriche an der Luftqualität auch in luxuriösen Businessjets kaum vorkommen.

w_Time:	{ ' 1 ' ' 0 ' ' 0 ' ' 1 ' }
w_Sleep:	{ ' 0 ' ' 1 ' ' 0 ' ' 1 ' }
w_Work:	{ ' 0 ' ' 0 ' ' 1 ' ' 1 ' }
OutFlight__tDep:	{ '18:00 -1' '18:10 -2' '09:30 -1' '09:50 -1' }
OutFlight_TSleep:	{ ' 3:45 h ' ' 3:55 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
OutFlight_TWork:	{ ' 0:14 h ' ' 0:05 h ' ' 8:43 h ' ' 8:24 h ' }
OutFlight__tArr:	{ '07:00 +0' '07:10 -1' '22:30 -1' '22:50 -1' }
OutHotel_TSleep:	{ ' 0:00 h ' ' 7:41 h ' ' 5:09 h ' ' 5:09 h ' }
OutHotel_TWork:	{ ' 0:00 h ' ' 7:31 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
OutJourney__T:	{ '13:45 h ' '37:35 h ' '22:15 h ' '21:55 h ' }
OutJourney_SDEnd:	{ ' 3:26 h ' ' 1:16 h ' ' 1:55 h ' ' 1:55 h ' }
OutJourney__WTL:	{ ' 3:01 h ' ' 5:29 h ' ' 1:17 h ' ' 1:36 h ' }
OutJourney__TCT:	{ '13:45 h ' ' 1:16 h ' ' 1:17 h ' ' 8:47 h ' }
Meetings__tStart:	{ '09:00 +0' '09:00 +0' '09:00 +0' '09:00 +0' }
Meetings__TWork:	{ '21:00 h ' '21:00 h ' '21:00 h ' '21:00 h ' }
Meetings__SDmean:	{ ' 2:38 h ' ' 1:26 h ' ' 1:44 h ' ' 1:43 h ' }
Meetings__tEnd:	{ '18:00 +1' '18:00 +1' '18:00 +1' '18:00 +1' }
RetHotel_TSleep:	{ ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
RetHotel_TWork:	{ ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' }
RetFlight__tDep:	{ '19:45 +1' '21:35 +1' '00:05 +2' '21:45 +1' }
RetFlight_TSleep:	{ ' 4:43 h ' ' 7:08 h ' ' 6:59 h ' ' 6:39 h ' }
RetFlight_TWork:	{ ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:18 h ' ' 0:00 h ' }
RetFlight__tArr:	{ '02:45 +2' '04:35 +2' '07:05 +2' '04:45 +2' }
RetJourney__T:	{ '13:15 h ' '15:05 h ' '17:35 h ' '15:15 h ' }
RetJourney_SDEnd:	{ ' 2:44 h ' ' 0:00 h ' ' 0:00 h ' ' 0:28 h ' }
RetJourney__WTL:	{ ' 3:30 h ' ' 3:30 h ' ' 3:17 h ' ' 3:30 h ' }
RetJourney__TCT:	{ '13:15 h ' ' 0:00 h ' ' 3:17 h ' ' 8:41 h ' }
Journey__T:	{ '60:00 h ' '85:40 h ' '72:50 h ' '70:10 h ' }
Journey__WTL:	{ ' 6:31 h ' ' 8:59 h ' ' 4:34 h ' ' 5:06 h ' }
Journey__TCT:	{ '27:00 h ' ' 1:16 h ' ' 4:34 h ' '17:28 h ' }

Abb. 3.4-9 – JourneyPlanner-Ausgabe: Ablaufplan der Reisearten für $QS_{Fl} = 1$

3.4.1.3 Unterschiede zwischen Ost- und Westreisen

Um die Auswirkungen der longitudinalen Flugrichtung auf den Reiseablauf zu verdeutlichen, wird nun ein konkreteres Beispiel angeführt: Es seien London und New York jeweils Ziel eines fünftägigen Aufenthalts mit regulärem Arbeitstag für einen Reisenden aus der jeweils anderen Stadt. Der Hinflug komme am Vorabend an, um dem Reisenden eine Nacht zur Erholung im Hotel zu ermöglichen. Der Rückflug gehe möglichst bald nach dem Ende der Termine. Dementsprechend wurden anhand realer Flugpläne ausgesucht ³⁸:

³⁸ Nach dem Winterflugplan 2014/2015; Quelle: ADI (Sabre Corp. 2015).

- Für erstere Reise: hin von London Heathrow (LHR) nach New York John F. Kennedy (JFK) mit Flug British Airways BA179, Sonntag, 18:00-21:00 Uhr; zurück JFK-LHR, BA116, Freitag 21:00 Uhr bis Samstag 8:50 Uhr.
- Für letztere Reise: hin JFK-LHR, BA178, Sonntag 8:30-20:15 Uhr; zurück LHR-JFK, BA183, Freitag 20:00-22:55 Uhr.

Für das erste Beispiel stellt sich heraus, dass während des Aufenthalts nur am ersten Arbeitstag überhaupt ein geringfügiges Schlafdefizit vorliegt (siehe Abb. 3.4-10). Dadurch, dass der Arbeitstag für den Reisenden zwar „zirkadian“ spät angesetzt ist, aber anfangs nur kaum und später gar nicht mehr in dessen biologische Nacht hineinreicht, erscheinen die Reise und der Jetlag relativ gut erträglich. Allerdings ist anzunehmen, dass die Arbeit zum Ende des Tages hin immer weniger produktiv wird.

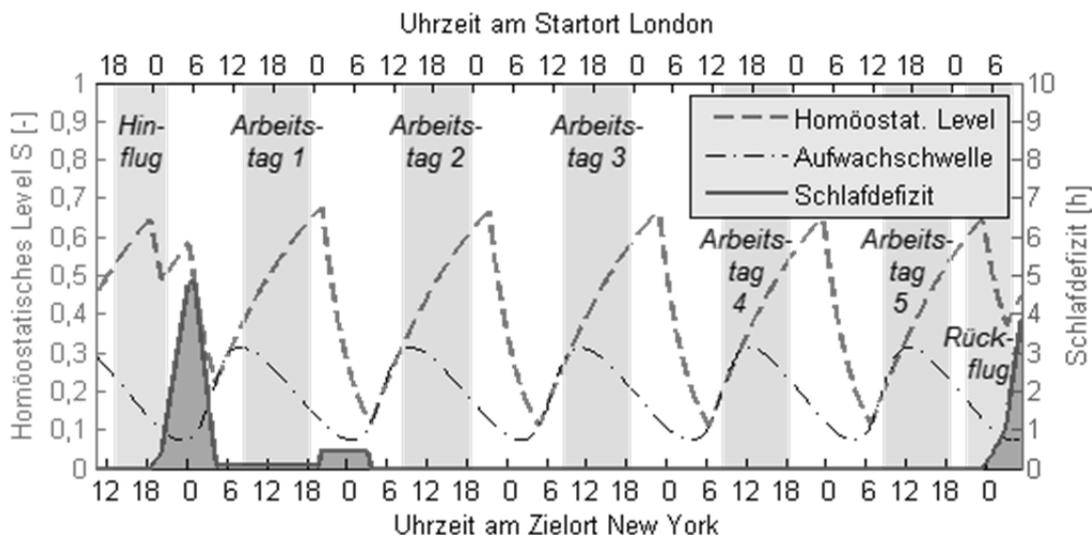


Abb. 3.4-10 – Fünftägige Arbeitsreise von London nach New York

In der Gegenrichtung, also nach Osten, sind deutlich höhere Schlafdefizite zu verzeichnen (siehe Abb. 3.4-11). In der ersten Nacht steigt es – trotz Hotelaufenthalts – auf über vier Stunden, weil der Schlaf gemäß des zurückhängenden Biorhythmus erst spät einsetzt. Die folgenden beiden Nächte weisen zunächst einen Schlaf auf, welcher aufgrund der circadianen Phase als Mittagschlaf behandelt wird und welcher das gesamte Defizit ausgleicht. Später folgt ein zu kurzer Nachtschlaf. Die maximalen Schlafdefizite liegen fast während des gesamten Arbeitstages vor. Gleichzeitig ist jedoch zu beobachten, dass sie immer geringer werden, während sich der Organismus an die neue Zeitzone anpasst. Ohne es direkt implementiert zu haben, stellt sich heraus, dass Jetlag durch die Art der Modellierung quasi automatisch abgebaut wird.

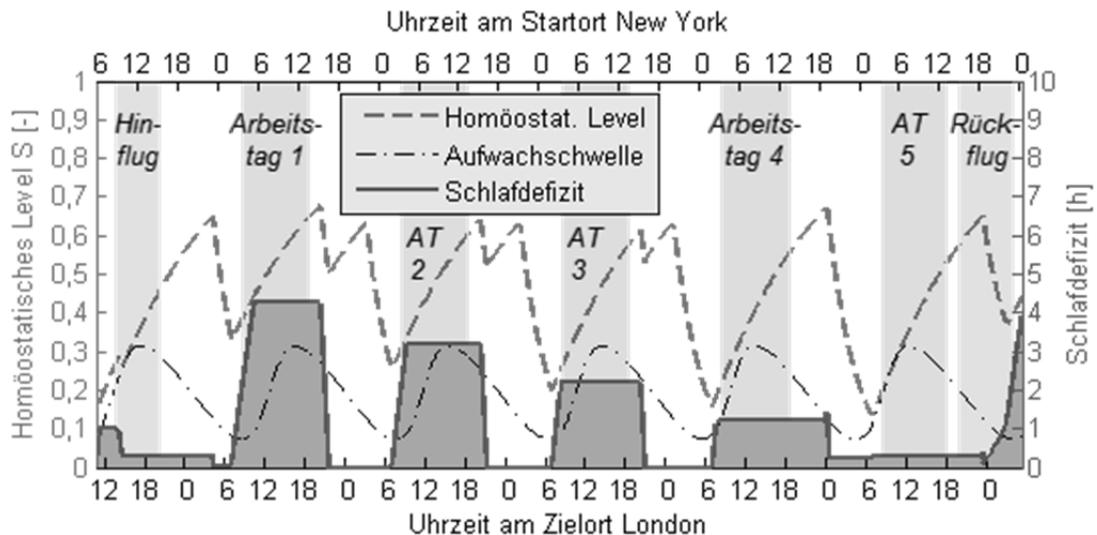


Abb. 3.4-11 – Fünftägige Arbeitsreise von New York nach London

Dieses Beispiel geht konform sowohl mit der Lehrmeinung als auch mit dem oft geäußerten subjektiven Eindruck, dass Westreisen für den Organismus leichter zu verarbeiten sind als solche in Ostrichtung. Auch wenn zur Probe die Jetlag-Abbaurrate in Westrichtung $dT_{Adapt,W}$ auf eine Stunde pro Tag heruntersetzt wird, ändert das fast nichts am homöostatischen Reiseverlauf.

Würde der Arbeitstag am Zielort jedoch hypothetischerweise auf das Ende des Tages verlagert statt auf den Anfang, also beispielsweise auf 12-22 Uhr, fielen die Schlafdefizite in Ostrichtung deutlich geringer aus, weil sich der Reisende ausschlafen könnte. Gleichwohl wird typischerweise nach dem lokalen Arbeitstag gearbeitet, wie in Kapitel 3.2.1.1 dargelegt.

3.4.2 Abgleich mit dokumentierten Reisedaten

3.4.2.1 Eine Geschäftsreise nach Tokio

Ein Bekannter des Autors dieser Arbeit dokumentierte seine Geschäftsreise nach Tokio, Japan, und zwar die Flugansetzungen sowie seine Arbeits- und Schlafzeiten³⁹. Daraufhin wurde auf der einen Seite der homöostatische Zyklus anhand der dokumentierten Schlafzeiten nachvollzogen und auf der anderen Seite die Reise nur anhand der Flug- und Arbeitszeiten mit dem vorliegenden Simulationsmodell simuliert (vgl. Abb. 3.4-12).

³⁹ Siehe Anhang B.

Dabei stellte sich zunächst heraus, dass die Berührungspunkte der nachvollzogenen homöostatischen Zyklen (durchgezogene Linie) und der Aufwachschwelle unter Annahme einer regulären Bettzeit (*TIB*) von 8 Stunden optimal sind. Diese Nachtdauer ist angesichts des damaligen Alters des Probanden von 27 Jahren absolut plausibel (vgl. Kapitel 2.2.1).

Die Abweichungen des simulierten (gestrichelte Linie) von dem aus den Realdaten nachvollzogenen homöostatischen Zyklus ergeben sich vor allem dadurch, dass sich der Proband nicht verhält wie der definierte prototypische Passagier. Er geht zunächst erst zu Nachtbeginn am Zielort zu Bett, statt dem eigenen Schlafdrang nachzugeben, und hält nach dem Ende der Termine (wohl aus touristischen Gründen) nicht sofort Erholungsschlaf, wie ihn die Simulation vorsähe.

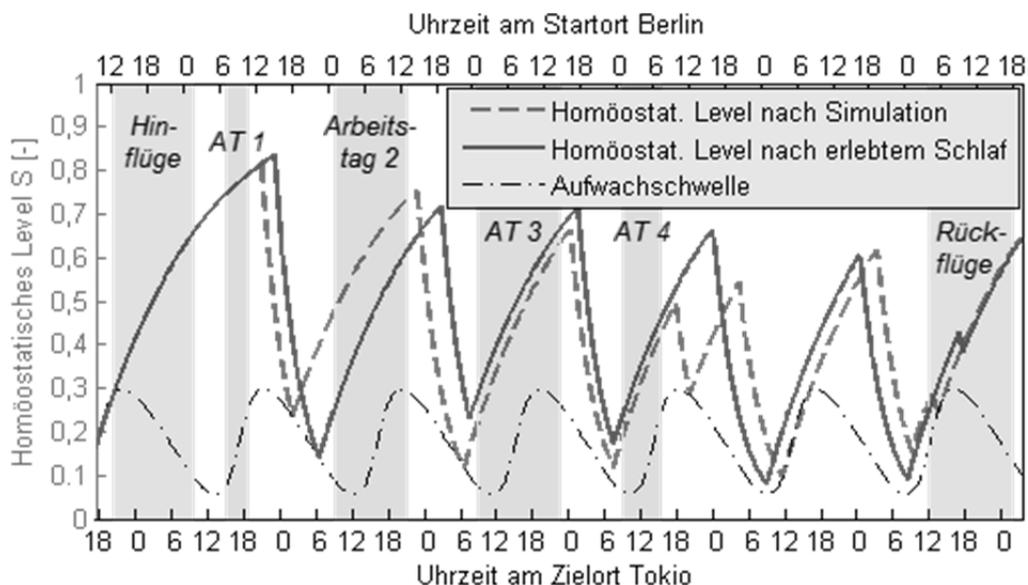


Abb. 3.4-12 – Vergleich von realen und simulierten Homöostasen der Tokio-Reise

Jedoch stimmt die nachvollzogene Kurve zum Ende der Reise nach spontanem Aufwachen von einem Mittagschlaf fast genau mit der simulierten überein, was zum einen die angenommene Anpassungsrate des Biorhythmus und zum anderen die in dieser Arbeit postulierte Funktion nachmittäglichen Aufwachens bestätigt. Gleichzeitig ist jenes Aufwachen das laut Dokumentation einzige ohne Wecker, was sich darin widerspiegelt, dass die durchgezogene Linie die Aufwachschwelle (abgesehen von der anfänglichen Berührung, welche zufällig auf die Weckzeit fällt) nie erreicht.

Insofern kann dieser Vergleich als eine Bestärkung der methodischen Validität gewertet werden.

3.4.2.2 Zwei Rückreisen aus Atlanta nach Hamburg

Zwei Kollegen des Autors dieser Arbeit dokumentierten ihre Schlafzeiten im Rahmen ihrer Rückreise von einem zweiwöchigen Aufenthalt an der Ostküste der USA zu ihrem Heimatort Hamburg, wo eine reguläre Arbeitswoche vor ihnen lag.⁴⁰ Es soll diskutiert werden, inwiefern die nachvollzogenen homöostatischen Verläufe (siehe Abb. 3.4-13 und Abb. 3.4-14) mit dem vorliegenden Modell in Einklang gebracht werden können.

Bei den beiden Probanden „B“ und „W“, zur Reisezeit 28 bzw. 27 Jahre alt, erbrachte eine Kalibrierung der Modellparameter auf eine reguläre Bettzeit *TIB* von 8 bzw. 8,5 Stunden die beste Plausibilität des homöostatischen Zyklus‘.

Zunächst kann angenommen werden, dass sich der Biorhythmus durch die Dauer des Aufenthalts vollständig an das Reiseziel angepasst hatte. Dementsprechend gut fielen auch die spontanen Aufwachzeiten dort mit den Aufwachschwellen zusammen. Beide Probanden schlafen auf den Flügen ungefähr zum Nachtbeginn ein, wachen jedoch vorzeitig wieder auf, was vom Modell nicht hätte vorhergesagt werden können. Während der Arbeitswoche waren sie auf die Hilfe eines Weckers angewiesen, wodurch dieses Aufwachen im Modell abgebildet worden wäre, abgesehen von jeweils einem spontanen, vorzeitigem Aufwachen. Nur am Wochenende wurde die Aufwachschwelle jeweils zwei Mal überschritten; dies hat zum einen für den eigentlichen Zweck der Modellierung wenig Relevanz (es wird die Arbeitswoche betrachtet) und erscheint zum anderen durch die in Abschnitt 2.2.3 erwähnten Beobachtungen verlängerten Schlafs am Wochenende plausibel.

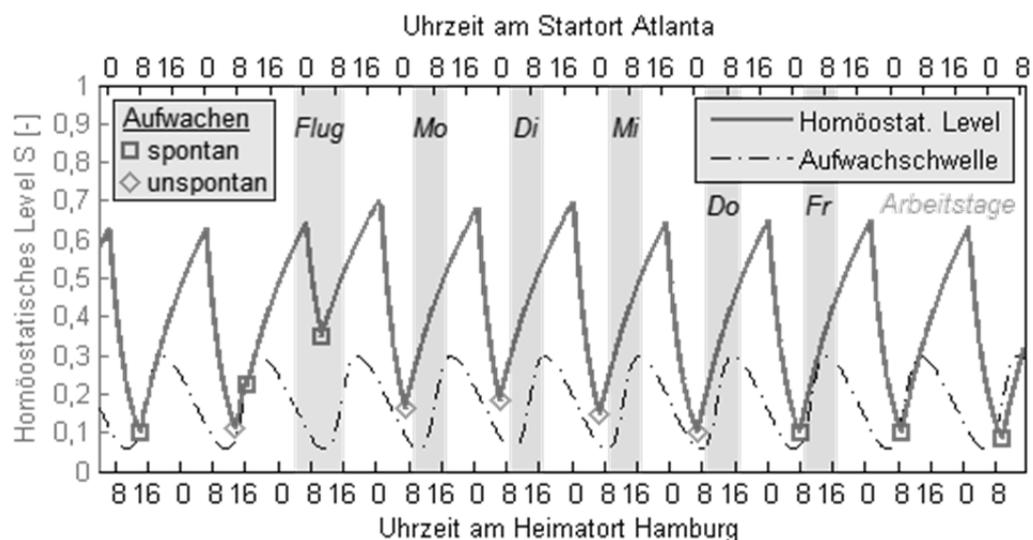


Abb. 3.4-13 – Nachvollzogene Homöostase des Probanden B im Zuge der Rückreise

⁴⁰ Originaldokumentation siehe Anhänge C und D.

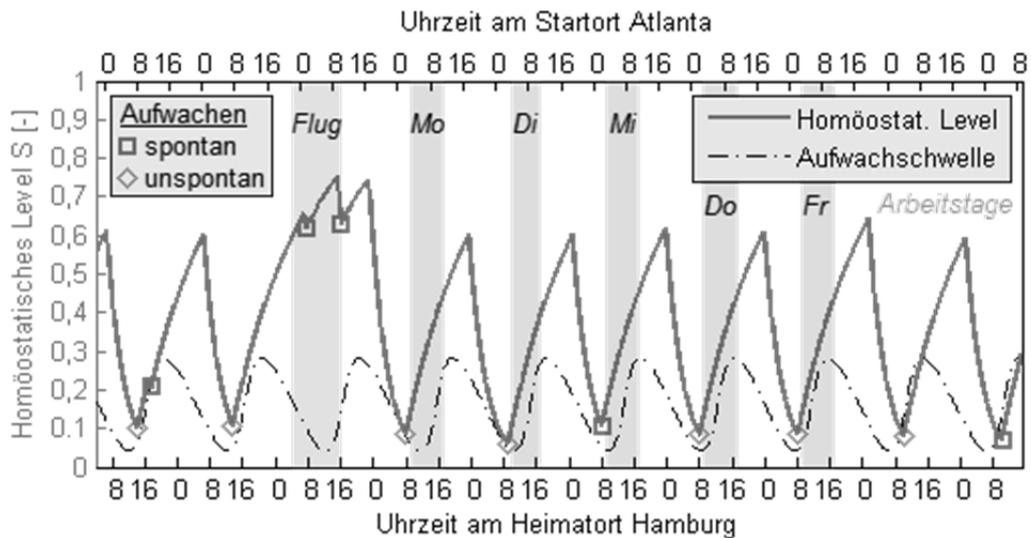


Abb. 3.4-14 – Nachvollzogene Homöostase des Probanden W im Zuge der Rückreise

Zusammenfassend können die gut vorherzusagenden anfänglichen Aufwachpunkte sowie die Integrität der sich an die neue Zeitzone anpassenden Aufwachschwelle (bis auf die wenig relevanten Wochenenden) als Unterstützung für die Validität des Modells gewertet werden. Auf der anderen Seite wird letztere durch die kaum vorherzusagenden Aufwachzeiten während der Flüge beschränkt.

3.4.2.3 Sleep After Transmeridian Flights (Nicholson et al. 1986)

Im Jahr 1986 veröffentlichten Nicholson und Roehrs eine Studie zu Schlaf im Rahmen von Flugreisen über mehrere Zeitzonen. Dafür flogen sechs männliche, gesunde, durchschnittlich 21,8 Jahre alte Testpersonen von London nach Detroit (-5 Stunden Zeitverschiebung), blieben dort eine Woche lang und kehrten dann zurück. Ihr Nachtschlaf vor beiden Flügen sowie in den fünf darauffolgenden Nächten wurde in Schlaflabors analysiert. Dabei war Schlaf immer nur zwischen 23:30 und 7:30 Uhr Ortszeit erlaubt, nicht jedoch im Flugzeug. Zusätzlich wurden im Untersuchungszeitraum, tagsüber von 10-20 Uhr in Zwei-Stunden-Intervallen, die momentanen Schlaflatenzen gemessen, wobei die Probanden sich zur Ruhe begaben und direkt nach dem Einschlafen wieder geweckt wurden. Nach Detroit wurde tagsüber geflogen, während der Rückflug eine (schlaflose) Nacht umspannte. Die Testpersonen verbrachten die angesetzte Nachtruhe ausschließlich im Bett; ein verfrühtes freiwilliges Aufstehen war nicht vorgesehen. Insofern wurde weniger die Dauer der Nachtruhe untersucht – sie war schließlich vorgegeben – als vielmehr die Schlaffeffizienz.

So kam für die Westrichtung heraus, dass bei vier der sechs Probanden in der ersten Nacht nach dem Flug die Schlafdauer und die Schlaffeffizienz hinter der

Referenznacht zurücklagen. Dass nicht die deutlich reduzierte Schlafzeit von 340 Minuten aus der Simulation zustande kam, (vgl. Tab. 3.4-1), liegt vermutlich einerseits am robusten Schlaf der jungen Probanden und andererseits am Bettzwang im völlig abgedunkelten Schlaflabor. Andere Quellen bestätigen jedenfalls deutlich kürzeren Schlaf nach verzögertem Einschlafen (Torsvall et al. 1989; Åkerstedt et al. 1991). Normaler Schlaf stellte sich in der Studie schon in der zweiten Nacht ein, was in der Simulation erst in der vierten Nacht geschieht. (Siehe auch Abb. 3.4-15.)

	Westwärts					Ostwärts						
	Referenz-Nacht	Nacht					Referenz-Nacht	Nacht				
		1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
<i>TST</i> real [min]	455	438	453	456	455	446	447	465	451	442	437	428
<i>SL</i> real [min]	18	7	14	17	14	14	18	17	30	31	38	37
<i>SE</i> real [%]	94	91	94	95	95	93	92	96	93	92	90	88
<i>TST</i> sim. [min]	465	340	390	442	465	465	465	465	465	305	365	425
<i>SL</i> sim. [min]	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
<i>SE</i> sim. [%]	97	96	96	97	97	97	97	97	97	96	96	96

Tab. 3.4-1 – Reale durchschnittliche Schlafdaten gegenüber jenen aus der Simulation
(*TST*: Gesamt-Schlafdauer; *SL*: Schlaflatenz; *SE*: Schlafeffizienz)

Für die Ostrichtung brachte die Simulation in den Nächten 3-5 eine deutlich verringerte Schlafdauer, weil zu Beginn der Bettzeit durch die Jetlag-Anpassung die abendliche Zone des Wachbleibens erreicht wurde, welche sich erst graduell auf den Londoner Abend zurückverschieben musste (vgl. Tab. 3.4-1 und Abb. 3.4-16). Größere Schwierigkeiten einzuschlafen erlebten allerdings auch die Probanden an den Tagen 2-4 mit Schlaflatenzen von durchschnittlich mindestens 30 Minuten, vermutlich aus der gleichen Ursache. Nur konnten sie schließlich doch einschlafen, was erneut den idealen Umständen im Schlaflabor sowie ihrer Jugend zugeschrieben werden kann.

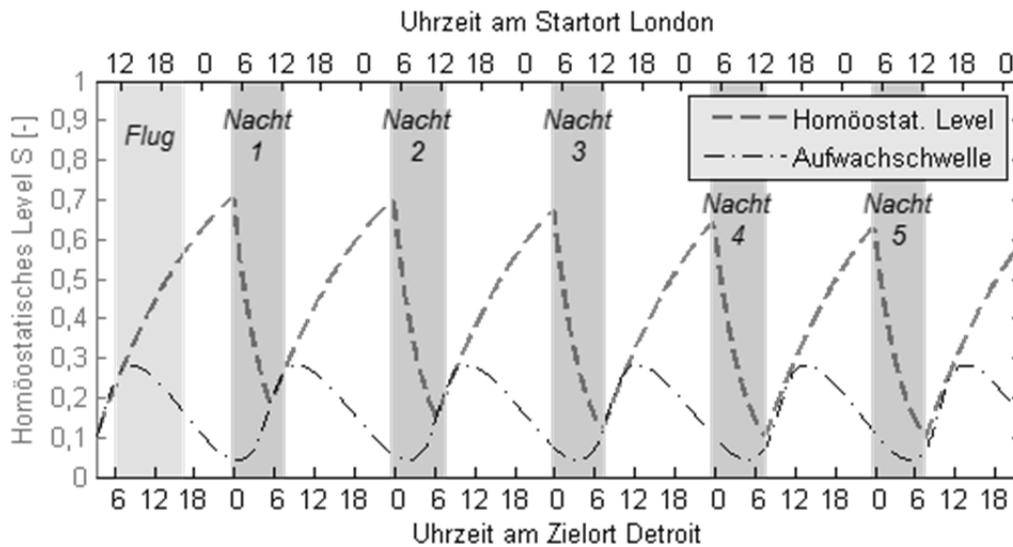


Abb. 3.4-15 – Simulierter Nachtschlaf nach Westflug

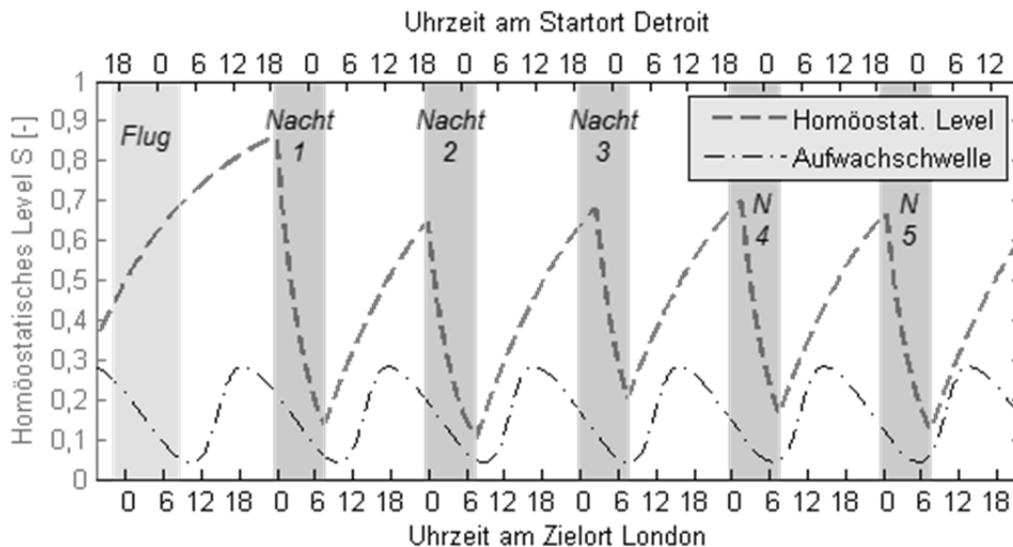


Abb. 3.4-16 – Simulierter Nachtschlaf nach Ostflug

Letztendlich ist zu vermerken, dass das Modell zwar die Phänomene verkürzten Schlafs nach Westflügen und schwierigen Einschlafens nach Ostflügen abbilden kann, nicht jedoch die gemessenen Schlaflatenzen und -effizienzen. Es ist aber denkbar, dass die Übereinstimmungen im Falle nicht-idealen Laborschlafs ähnlich gut wären wie in den Reiseberichten aus 3.4.2.1 und 3.4.2.2.

3.4.2.4 Sleep of aircrew following a 12-h time zone change (Robertson et al. 2006)

Robertson et al. berichteten in einer kurzen Forschungsnotiz über selbst dokumentierten Schlaf von 196 Singapur-Airlines-Piloten während ihres 75-stündigen Aufenthalts in New York nach einem Ultra-Langstreckenflug aus Singapur, letzterer gleichbedeutend mit 17:40 Stunden Flugzeit und 12 Stunden Zeitverschiebung. Dabei trat am Zielort extrem unterschiedlicher Schlaf auf. Die Piloten berichteten von 3 bis 9 Schlafepisoden (durchschnittlich 5,1), welche zwischen 15 min und 13 h (im Mittel 4,6 h) und in Summe durchschnittlich 23 h andauerten. Letzteres entspricht 7,5 h Schlaf pro 24 Stunden. Es wurde konstatiert, dass die Piloten auf eine nahezu normale Anzahl an Schlafstunden kämen, wenn auch auf verschiedenartige Weise.

Zum Nachvollziehen per Simulation fehlen in der Quelle verschiedene Daten, so dass Annahmen getroffen werden müssen. Zunächst wird davon ausgegangen, dass die Piloten zum Reisebeginn ausgeruht und an die Singapur Zeitzone angepasst waren. Ferner fliegen auf derartigen Ultra-Langstreckenflügen immer zwei Pilotenpaare mit, die abwechselnd das Flugzeug steuern und sich ausruhen. Da der Flug laut historischen Flugplänen (Sabre Corp. 2015) um die Mittagszeit in Singapur startete und nach Singapur Zeit frühmorgens New York erreichte, muss davon ausgegangen werden, dass jeweils ein Pilotenpaar während seiner biologischen Nacht Dienst hatte und eines in den Crew-Ruheräumen schlafen konnte. Deshalb wird sowohl eine schlaflose Nacht als auch eine mit angenommenem Business-Class-Komfort ($SE = 0,7$) simuliert. Das durchschnittliche Alter der Piloten wird mangels Angaben auf 45 Jahre gesetzt.

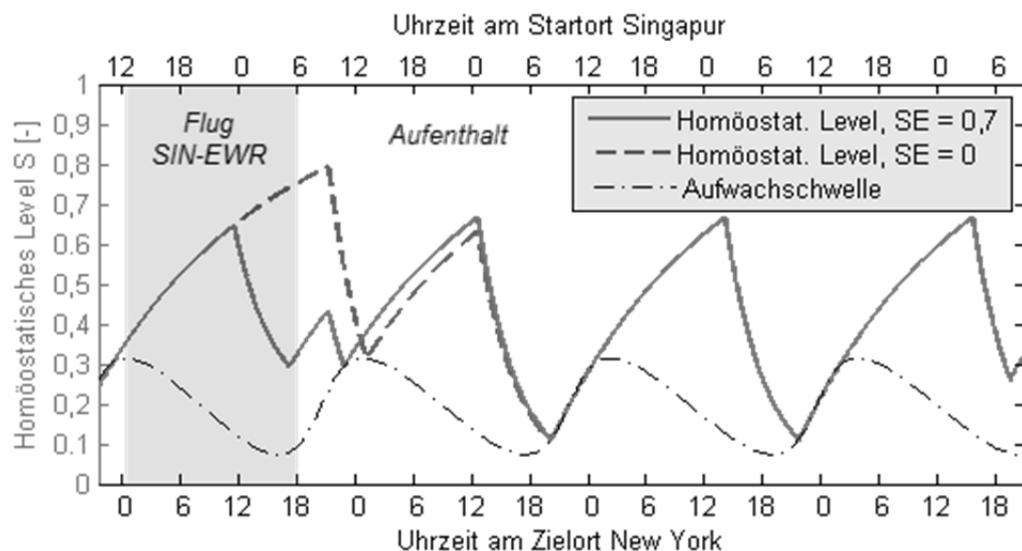


Abb. 3.4-17 – Simulierte Dienstflüge und Aufenthalte zw. Singapur und New York

Gemäß der Simulation des Fluges und des Aufenthalts entstehen 5 ($SE = 0,7$) bzw. 4 ($SE = 0$) Schlafepisoden zwischen 1,6 bzw. 3,9 und 7,6 Stunden Länge (siehe Abb. 3.4-17). Bereits in der dritten Nacht haben sich die homöostatischen Levels trotz sehr unterschiedlicher Ausgangslage zu Aufenthaltsbeginn angeglichen, was auf eine gewisse Robustheit der Basismethodik wie auch mutmaßlich des menschlichen Schlafs hinweist. Insgesamt summiert sich der Schlaf auf 20,7 ($SE = 0,7$) bzw. 22,9 ($SE = 0$) Stunden.

Es ist zu konstatieren, dass die dokumentierte Variabilität der Schlafphasen durch die Methodik nicht eingefangen werden kann, weil durch die Eingabeparameter der Ablauf eines homöostatischen Zyklus‘ und folglich das Ergebnis der Simulation vollständig determiniert sind. Das „generische“ Ergebnis, nämlich die Schlafstunden für den „durchschnittlichen Piloten“ analog zum „prototypischen Passagier“, wird jedoch gut abgebildet.

3.4.2.5 Eastward long distance flights, sleep and wake patterns in air crews ... (Lowden et al. 1999)

Lowden et al. untersuchten den Schlaf von Airline-Besatzungen in Verbindung mit Langstreckenflügen von Skandinavien nach Tokio und zurück inklusive eines zweitägigen Aufenthalts. 49 Piloten und Flugbegleiter dokumentierten Schlafzeiten, Aktivitäten und subjektives Wohlbefinden ab 2 Tage vor dem Hinflug.

So wurde berichtet, dass vor dem Flug der Nachtschlaf in der Regel innerhalb regulärer Parameter ablief. Direkt nach dem Hinflug, auf welchem 2/3 der Crew kurzen Schlaf hielten und welcher erst zumitten der skandinavischen Nacht endete, erlebten 87 % der Probanden eine durchschnittlich knapp 5 Stunden lange Schlafphase am Tokioter Nachmittag. Während der beiden folgenden langen Schlafphasen, welche eindeutig zu den lokalen, biorhythmisch um 8 Stunden verfrühten Nachtzeiten stattfanden, wurde durchschnittlich 7,5 bzw. 6,9 h geschlafen, wenn auch mit verringerter Schlafeffizienz. Dazwischen legte die Hälfte der Probanden einen durchschnittlich 65-minütigen Mittagschlaf ein. Nach dem Rückflug, welcher vom späten Tokioter Morgen in den skandinavischen Nachmittag reichte und auf welchem die allermeisten Crew-Mitglieder kurzen Schlaf fanden, begann der erste Nachtschlaf etwa eine Stunde früher als sonst. Der reguläre Schlafrhythmus stellte sich aber schon am zweiten Tag wieder ein.

Die berichteten Schlafphasen sind durch die Simulation nicht ohne weiteres nachzuvollziehen. Zunächst sind die Uhrzeiten des kurzen Schlafs nicht angegeben, weshalb über ihre homöostatische Wirkung keine belastbare Aussage getroffen werden kann; deswegen und aufgrund ihrer nachrangigen Bedeutung

werden sie an dieser Stelle vernachlässigt. Dann schaffen es die meisten Crew-Mitglieder, beide Nächte in Tokio jeweils an ihrem zirkadianen Nachmittag fast wie eine normale Nacht durchzuschlafen, obwohl nach den bisherigen Annahmen höchstens ein kurzer „Mittagschlaf“ notwendig gewesen wäre (vgl. Abb. 3.4-18). Die Simulation trifft die drei berichteten Tokioter Schlafphasen jedoch relativ gut, wenn die „Napping“-Funktion, also das Aufwachen bei Erreichen der regulären Homöostase, abgeschaltet und der Schlaf gezielt durch „Pseudo-Arbeit“ in die lokale Nacht gezwungen wird, wie es in Realität auch durch bewusste Freizeitplanung geschehen sein könnte.

Der Grund für die Fähigkeit der Crews, ihren Nachtschlaf in die lokale Nacht vorzuverlegen, könnte ein existierendes chronisches Schlafdefizit sein, welches mit dem normalen Schlafrhythmus interferiert. Andere Studien, eine über den Schlaf von Akademikern auf Konferenzreisen (Takahashi et al. 2002)⁴¹ und eine weitere über Airline-Crews (Graeber 1986), berichten von deutlich kürzerem und ineffizienterem Schlaf zu den Nachtzeiten des Zielorts nach Ostflügen, was sich viel eher mit regulär konfigurierten Simulationen deckt (vgl. Kapitel 3.4.1.3).

Es bleibt festzustellen, dass es anscheinend möglich ist, auch weit vor der biologischen Nacht einen Nachtschlaf in normaler Länge abzuhalten. Dies kann von der momentanen Methodik nicht erfasst werden. Eventuell müsste dafür die Napping-Funktion im *SleepWorkEstim*-Algorithmus geändert oder abgeschaltet werden. Vorläufig wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die Anpassungsfähigkeit des durchschnittlichen Reisenden dafür nicht ausreicht.

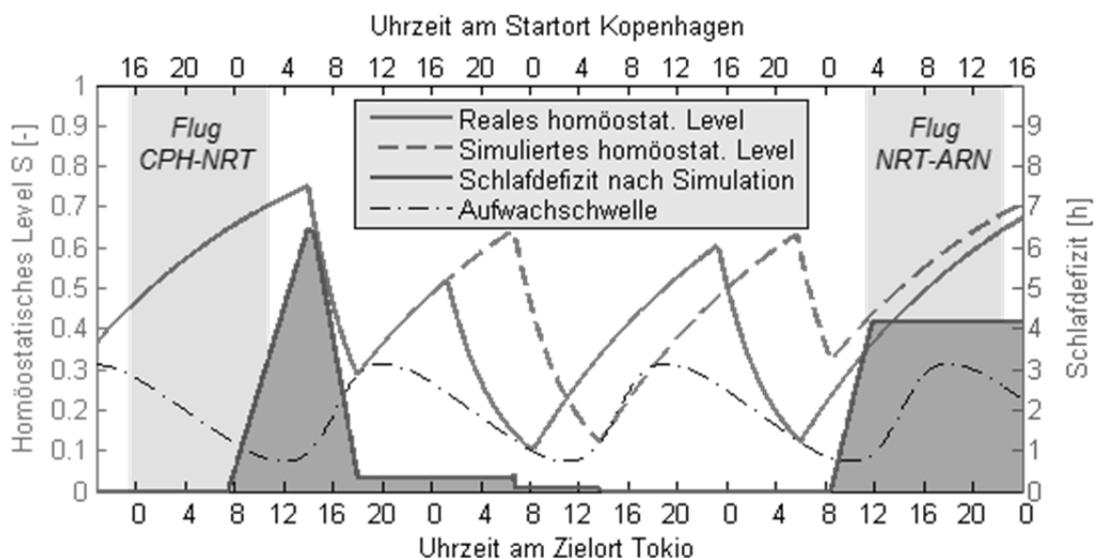


Abb. 3.4-18 – Nachvollzogene und simulierte Homöostase von Airline-Crews in Tokio

⁴¹ Diese Studie gibt durchschnittlich 4:36 h Schlaf in der ersten Nacht am Zielort an. Jedoch erwies sie sich aufgrund fehlender Daten als ungeeignet zur ausführlicheren Auswertung.

3.4.3 Beschränkungen des Modells

Eine große Einschränkung der Modellgültigkeit stellt das individuelle Verhalten des Passagiers auf seiner Reise dar. Der eine wird auf dem Flug auch zu ungewohnten Zeiten arbeiten, während der andere sich ausruht; einer passt seine Schlafzeiten der örtlichen Nacht an, der andere versucht, seinen alten Rhythmus beizubehalten. Es ist mangels Daten oft auch nicht klar, welche Präferenzen mehrheitlich vorliegen. Insofern können die Ergebnisse immer nur für einen Satz an Verhaltensweisen und die entsprechenden Steuerparameter als valide gelten, solange sie nicht durch Empfindlichkeitsanalysen auf Robustheit geprüft sind.

Ferner ist die Schlaffähigkeit des Passagiers im Flugzeug Gegenstand weiterer Unsicherheit. Zum Schlaf von Passagieren in Flugzeugkabinen auf echten Flügen, also nicht in Labors, existieren so gut wie keine wissenschaftlichen Daten. Das Modell kann deshalb, wie in 3.4.2.1 gezeigt, Zeitpunkt und Länge von Schlafphasen im Flugzeug kaum vorhersagen und muss deshalb mit herabgesetzten Schlafeffizienten auskommen. Zudem vernachlässigt es die Auswirkungen der Reiseanstrengungen selbst (Flughafen-An-/Abreise, suboptimaler Kabinenkomfort, Aufmerksamkeitsstress) auf die homöostatischen Levels, welche dadurch in Realität möglicherweise schneller ansteigen.

Weiterhin stellt sich besonders auf Reisen gen Osten die Schlafvorhersage schwieriger dar. In der Literatur wird von fragmentiertem Schlaf zu uneinheitlichen Zeiten berichtet. Diese Unsicherheit kann vom Modell nicht abgebildet werden, in welchem der Reiseablauf durch einen festen Parametersatz determiniert ist. Es kann höchstens ein Abgleich zwischen verschiedenen Schlaf-Strategien stattfinden, also, ob eine Anpassung an die lokale Nacht stattfindet oder nicht. Momentan sind die Algorithmen wegen der oben dargelegten Trägheit des Biorhythmus auf die Beibehaltung heimatlicher Schlafzeiten eingestellt.

Um die besprochenen Unsicherheiten zu verringern, ist vor allem die Auswertung weiterer speziell von Passagieren absolvierter Reisen notwendig. Für Airline-Besatzungen existieren zwar mehrere Studien; doch ist in jenem Fall der Reisezweck dem hier relevanten genau entgegengesetzt, denn die Arbeit findet auf den Flügen statt und der Aufenthalt besteht aus Freizeit. Zudem erscheint es zumindest denkbar, dass Crews ein durch chronisches Schlafdefizit bedingtes irreguläres Schlafverhalten an den Tag legen.

Ferner wäre die Implementierung möglichen Schlafs in Lounges auf Umsteigeflughäfen im Falle längerer Aufenthalte wünschenswert. Außerdem verzichtet das Modell auf die Simulation der Tage nach der Rückkehr bis zum Zeitpunkt des vollendeten Jetlag-Abbaus, während derer auch noch geringfügige Zeit-Kosten entstehen können.

Zusammengefasst liefert das Modell korrekte Ergebnisse, wenn

- die Flug-, Transfer- und Arbeitszeiten stattfinden wie geplant,
- der Schlaf stattfindet wie vorhergesagt, und
- der Passagier sich in seiner Freizeit „diszipliniert“ verhält.

Aufgrund der hohen Wahrscheinlichkeit widriger Einflüsse auf realen Reisen – beispielsweise Störung des Schlafs, Verspätung eines Fluges oder ungeplante Freizeitaktivitäten – sollte das Modells zunächst vorwiegend für akademische Studien verwendet werden, bis ausreichend dokumentierte Reisedaten zur Bemessung der Vorhersagegenauigkeit und zur Verbesserung der Methodik vorliegen.

4 Erster Anwendungsfall: Bewertung von Flugverbindungen

4.1 Problemstellung

Die vorgestellten Algorithmen erlauben es, zum Zwecke der Reiseplanung aus einer Reihe von vorgegebenen Flugverbindungen die aus zeitlicher Sicht besten zu bestimmen, was hier anhand eines Fallbeispiels verdeutlicht wird.

Ein Geschäftsmann aus Hamburg, der die Eigenschaften des in 3.2.1.2 definierten prototypischen Passagiers aufweist, steht vor einem dreitägigen Aufenthalt in New York. Er hat am Dienstag, dem 5. Mai 2015, Termine von 14 bis 21 Uhr, am Mittwoch von 9 bis 19 Uhr, und am Donnerstag von 9 bis 14 Uhr. Hierfür sucht er die zeitlich günstigsten Flugverbindungen.

Der Reisende fliegt Business-Klasse, achtet auf kurze Umsteigezeiten, will frühestens am Montagnachmittag ankommen und nach dem letzten Termin schnellstmöglich zurückfliegen. Unter diesen Vorgaben wurden für Hin- und Rückflug jeweils fünf Flugverbindungen vorausgewählt, welche in Tab. 4.1-1 aufgeführt sind. Seine Gewichtungsfaktoren für Reisedauer, Ausgeruhtheit und Arbeitszeitersparnis schätzt der Reisende auf $w_{Time} = 2/3$, $w_{Sleep} = 1$ und $w_{Work} = 1/3$.

Hinflug (<i>i</i>) (Flughäfen)	Flugnummern	Abflug [d, h:min]	Ankunft [d, h:min]	Flugdauer [min]	Aufenthalt [min]
HAM-MUC-EWR	LH2069/LH412	Mo., 13:00	Mo., 18:35	80, 540	75
HAM-AMS-EWR	WA1782/WA643	Mo., 15:05	Mo., 19:20	65, 480	70
HAM-LHR-JFK	BA975/BA181	Mo., 16:50	Mo., 22:00	100, 480	90
HAM-LHR-JFK	BA963/BA117	Di., 6:50	Di., 11:05	100, 455	60
HAM-EWR	UA75	Di., 9:00	Di., 12:00	540	-
Rückflug (<i>j</i>)					
EWR-HAM	UA74	Do., 17:35	Fr., 7:30	475	-
EWR-CPH-HAM	SK910/SK1641	Do., 17:40	Fr., 8:55	455, 55	45
JFK-ZRH-HAM	LX17/4U3030	Do., 18:10	Fr., 10:30	470, 85	65
JFK-AMS-HAM	WA6007/WA1179	Do., 20:20	Fr., 11:50	450, 65	55
EWR-ZRH-HAM	LX19/LX1056	Do., 21:50	Fr., 14:10	465, 90	65

Tab. 4.1-1 – Flugverbindungen für Aufenthalt in New York

Hinflug (<i>i</i>) (Flughäfen)	Flugnummern	Abflug [d, h:min]	Ankunft [d, h:min]	Flugdauer [min]	Aufenthalt [min]
EWR-ZRH-HAM	LX19/LX1056	So., 21:50	Mo., 14:10	465, 90	65
JFK-AMS-HAM	WA644/WA1781	So., 22:50	Mo., 14:30	440, 65	75
EWR-ARN-HAM	SK904/SK2645	Mo., 17:20	Di., 10:00	475, 95	70
EWR-HAM	UA74	Mo., 17:35	Di., 7:30	475	-
JFK-AMS-HAM	UA9168/UA107	Mo., 20:20	Di., 11:50	100, 455	60
Rückflug (<i>j</i>)					
HAM-LHR-JFK	BA975/BA181	Do., 16:50	Do., 22:00	100, 480	90
HAM-LHR-JFK	BA963/BA117	Fr., 6:50	Fr., 11:05	455, 55	45
HAM-EWR	UA75	Fr., 9:00	Fr., 12:00	540	-
HAM-MUC-JFK	LH2063/LH410	Fr., 10:00	Fr., 15:15	80, 555	40
HAM-FRA-JFK	LH23/LH404	Fr., 15:00	Fr., 19:50	70, 520	60

Tab. 4.1-2 – Flugverbindungen für Aufenthalt in Hamburg

Da der Passagier sich bei der Wahl seiner Gewichtungsfaktoren nicht ganz sicher ist, soll die Auswirkung leichter Variation getestet werden. Zudem ist der Fall zu untersuchen, dass der Passagier im Flug wider Erwarten nicht schlafen kann.

Um eventuelle Unterschiede zwischen den Flugrichtungen herauszuarbeiten, wird parallel eine Reise von New York nach Hamburg, welche ansonsten unter den gleichen Voraussetzungen wie oben stattfindet, simuliert. Die hier zu bewertenden Flugverbindungen sind in Tabelle Tab. 4.1-2 angegeben.

4.2 Methodischer Ansatz

Im ersten Schritt werden in *JourneyAnalyzer_NoReturn* die Hinflüge (Index *i*) und der darauffolgende Aufenthalt untersucht. Für jede dieser Hinreisen werden die Zeit-Kosten TCT_{JrnOut} berechnet, welche die Qualität der Flugansetzung aus Sicht des Passagiers determinieren.

Als Hinflug wird derjenige mit dem minimalen TCT_{JrnOut} gewählt. In *JourneyAnalyzer* werden dann unter Eingabe dieses Hinfluges und jeweils einer Rückflugmöglichkeit (Index *j*) die gesamten Reisen simuliert, um schließlich für die Rückreise die Zeit-Kosten TCT_{JrnRet} zu berechnen und damit den besten Rückflug zu finden.

4.3 Ergebnisse

Die Zeit-Kosten und die zugrundeliegenden Zielwerte sind in Tab. 4.3-1 aufgelistet. Es ist zu sehen, dass jeweils der späteste Hin- und der früheste Rückflug eindeutig die geringsten Kosten ergeben. Im Falle der Reise nach New York sind dies die (von Reisenden im Allgemeinen bevorzugten) Direktflüge, bei Reise nach Hamburg jedoch nicht. Der Abfall der Kosten hin zu den Flügen, die den Terminen am nächsten liegen, ist in beide Reiserichtungen eindeutig, wenn auch nicht immer monoton. Die beste Reise nach New York weist sowohl hin als auch zurück geringere Zeit-Kosten auf als die beste nach Hamburg.

[h:min]	Reise v. Hamburg nach New York					Reise v. New York nach Hamburg				
<i>Hinflug i</i>	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
T_{JrnOut}	32:45	30:40	28:55	14:55	12:45	35:55	34:55	16:25	16:10	13:25
$SD_{WkStart}$	0:00	0:03	0:08	0:00	0:30	0:01	0:00	6:12	3:47	4:32
WTL_{JrnOut}	6:43	6:52	6:13	6:29	2:00	5:19	4:50	3:00	3:00	0:55
TCT_{JrnOut}	15:02	14:13	13:23	8:06	7:07	13:59	13:09	12:29	9:50	8:44
<i>Rückflug j</i>	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
T_{JrnRet}	13:00	14:25	16:00	17:20	19:40	15:30	28:35	29:30	32:45	37:20
SD_{JrnEnd}	3:27	5:11	5:04	3:41	2:35	2:47	0:00	0:21	0:00	2:27
WTL_{JrnRet}	0:30	1:55	3:30	4:27	6:47	10:00	7:54	5:58	8:32	11:26
TCT_{JrnRet}	8:47	10:40	11:05	10:36	11:19	11:48	13:52	13:59	15:56	20:22

Tab. 4.3-1 – Zielwerte und Zeit-Kosten der Transfers zw. Hamburg und New York⁴²

[h:min]	Reise v. Hamburg nach New York					Reise v. New York nach Hamburg				
<i>Hinflug i</i>	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$\Delta SD_{WkStart}$	+0:01	+0:02	-0:08	+2:41	0	+0:12	+0:12	+1:01	+0:42	+2:42
ΔWTL_{JrnOut}	+0:06	+0:15	+1:14	-0:18	0	+4:41	+5:10	0	0	0
TCT_{JrnOut}	15:05	14:20	13:39	10:41	7:07	15:44	15:04	13:30	10:42	10:27
	(+0:03)	(+0:07)	(+0:16)	(+2:35)	(±0:00)	(+1:45)	(+1:55)	(+1:01)	(+0:52)	(+1:43)
<i>Rückflug j</i>	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
ΔSD_{JrnEnd}	+2:38	+1:19	+2:30	+3:53	+4:59	+3:44	+4:50	+2:19	+1:40	+0:04
ΔWTL_{JrnRet}	0	0	0	0	0	-0:06	+1:53	-0:31	-0:14	-0:11
TCT_{JrnRet}	10:25	11:59	13:35	14:29	16:18	15:30	19:20	16:08	17:31	20:23
	(+1:38)	(+1:19)	(+2:30)	(+3:53)	(+4:59)	(+3:42)	(+5:32)	(+2:09)	(+1:35)	(+0:01)

Tab. 4.3-2 – Änderung d. Zeit-Kosten und Zielwerte im Falle v. Flügen ohne Schlaf⁴²

⁴² Minimale Zeit-Kosten sind grau unterlegt.

Schlaflose Flüge beeinflussen das Resultat kaum (Tab. 4.3-2). Die Schlafdefizite fallen zwar fast durchgängig höher und nach den meisten Rückflügen deutlich höher aus; die Arbeitszeitverluste stagnieren oder steigen meist, was vermutlich auf den erhöhten homöostatischen Druck und die damit verbundene Arbeitsunfähigkeit zurückzuführen ist; die Zeit-Kosten steigen oder stagnieren. Jedoch bleibt der klare Vorteil der spätesten Hin- und der frühesten Rückflüge bestehen.

Um schließlich die Gültigkeit des Ergebnisses gegenüber einer leichten Änderung der Gewichtungsfaktoren zu testen, werden letztere jeweils um $\pm 1/3$ variiert (bis auf w_{sleep} mit $2/3$ als einziger Variation) und Simulationen für die 17 neuen Kombinationen durchgeführt⁴³. Hiernach weisen in den meisten Fällen weiterhin der späteste Hin- und der früheste Rückflug die beste Güte auf (siehe Tab. 4.3-3)⁴⁴:

Bei der Hinreise von Hamburg nach New York sind die Zeit-Kosten der beiden späten, am Tag des Terminbeginns startenden Flüge (im Mittel 7:45 h) jeweils deutlich geringer als bei den Flügen am Vortag (im Mittel 15:02 h). Wird die Gewichtung der Arbeitszeit auf null gesenkt, ist der zweitspäteste Hinflug gleichwertig und in vier von sechs Fällen sogar vorteilhaft. In Rückrichtung gewinnen im speziellen Fall minimaler Reisezeit-, maximaler Schlaf- und minimaler Arbeitsgewichtung die zwei spätesten Flüge, jedoch nur mit geringem Vorsprung.

Der späteste Flug der Hinreise von New York nach Hamburg hat in allen Fällen die wenigsten Zeit-Kosten, wobei der Unterschied zum zweitspätesten mit durchschnittlich 74 min noch am geringsten ausfällt. Im Falle des Rückfluges stellt sich für drei Sätze mit niedriger Reisezeitgewichtung der Direktflug nach Übernachtung als optimal heraus.

Zusammengefasst sind dem Reisenden in diesem Fall also vorwiegend der späteste Hin- und der früheste Rückflug zu empfehlen. Als Alternativen kommen für den Hinflug nach New York der zweitspäteste Flug in Frage, wenn ihm die Arbeitszeit doch nicht so wichtig sein sollte, und der Direktflug zurück nach New York, falls er beschließen sollte, die längere Reisedauer zu ignorieren. Zudem ist jeweils der zweitspäteste Hinflug zu empfehlen, wenn dem Passagier beim spätesten Flug die recht kurzen Zeitfenster zwischen Ankunft und Arbeitsbeginn (2:00 h bzw. 2:10 h) als zu riskant erscheinen.

⁴³ Die Schlaffeffizienz im Flugzeug beträgt nun wieder die regulären 0,7.

⁴⁴ Es ist zu beachten, dass immer nur Reisen gleicher Gewichtungsfaktoren untereinander verglichen werden. Dadurch werden nur die jeweils Zeit-günstigsten Flugverbindungen gefunden; wenig sinnvolle Vergleiche der absoluten Zeit-Kosten verschieden gewichteter Reisen werden vermieden.

					Hamburg – New York					New York – Hamburg				
Nr.	w_{Time}	w_{Sleep}	w_{Work}	i / j	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	2/3	1	1/3	Hinreise: TCT_{JrnOut}	15:02	14:13	13:23	8:06	7:07	13:59	13:09	12:29	9:50	8:44
2	2/3	1	0		16:51	15:32	14:31	8:10	8:40	14:26	13:45	12:21	9:39	8:38
3	2/3	1	2/3		13:13	12:55	12:15	8:03	5:33	13:32	12:32	12:37	10:01	8:51
4	2/3	2/3	1/3		16:42	15:52	14:58	8:42	7:03	17:09	16:19	12:01	10:13	8:51
5	2/3	2/3	0		18:31	17:10	16:06	8:46	8:37	17:36	16:56	11:53	10:02	8:44
6	2/3	2/3	2/3		14:53	14:34	13:50	8:38	5:30	16:42	15:42	12:09	10:24	8:57
7	1/3	1	1/3		8:38	8:17	7:48	5:08	4:08	7:53	7:23	9:51	7:14	6:47
8	1/3	1	0		8:26	7:47	7:19	4:05	4:35	7:13	6:53	9:17	6:38	6:35
9	1/3	1	2/3		8:51	8:46	8:16	6:11	3:42	8:33	7:53	10:24	7:49	6:59
10	1/3	2/3	1/3		9:28	9:06	8:34	5:26	4:02	9:28	8:58	8:34	6:49	6:05
11	1/3	2/3	0		9:15	8:36	8:06	4:23	4:28	8:48	8:28	8:01	6:13	5:53
12	1/3	2/3	2/3		9:41	9:35	9:02	6:29	3:35	10:08	9:28	9:08	7:24	6:17
13	1	1	1/3		21:26	20:10	18:58	11:05	10:05	20:04	18:55	15:08	12:27	10:42
14	1	1	0		25:17	23:16	21:42	12:15	12:45	21:38	20:38	15:26	12:40	10:42
15	1	1	2/3		17:36	17:04	16:14	9:54	7:25	18:31	17:11	14:49	12:13	10:42
16	1	2/3	1/3		23:56	22:38	21:22	11:58	10:05	24:50	23:40	15:27	13:37	11:36
17	1	2/3	0		27:46	25:44	24:06	13:08	12:45	26:24	25:24	15:46	13:50	11:36
18	1	2/3	2/3		20:05	19:32	18:38	10:48	7:25	23:16	21:57	15:09	13:23	11:36
1	2/3	1	1/3	Rückreise: TCT_{JrnRet}	8:38	9:36	10:17	9:56	10:48	11:55	14:12	14:19	16:04	20:04
2	2/3	1	0		8:35	9:26	9:55	9:26	10:12	10:56	14:22	15:19	17:09	20:43
3	2/3	1	2/3		8:41	9:49	10:40	10:28	11:26	12:54	14:02	13:19	14:59	19:24
4	2/3	2/3	1/3		8:40	9:40	10:32	10:39	11:47	11:43	15:46	15:46	17:38	21:27
5	2/3	2/3	0		8:36	9:28	10:09	10:07	11:10	10:44	15:56	16:46	18:42	22:07
6	2/3	2/3	2/3		8:43	9:53	10:56	11:11	12:24	12:42	15:36	14:46	16:33	20:47
7	1/3	1	1/3		6:24	7:32	7:51	7:13	7:34	8:46	8:35	8:29	9:31	12:42
8	1/3	1	0		6:18	7:09	7:07	6:10	6:10	6:40	7:11	7:49	8:34	11:09
9	1/3	1	2/3		6:31	7:57	8:38	8:17	8:59	10:52	9:59	9:09	10:28	14:16
10	1/3	2/3	1/3		5:45	6:46	7:16	7:06	7:42	8:16	9:22	9:10	10:18	13:08
11	1/3	2/3	0		5:38	6:22	6:31	6:02	6:18	6:10	7:58	8:30	9:21	11:35
12	1/3	2/3	2/3		5:52	7:11	8:03	8:10	9:08	10:22	10:45	9:50	11:15	14:42
13	1	1	1/3		10:51	11:40	12:42	12:39	14:03	15:03	19:49	20:08	22:37	27:25
14	1	1	0		10:53	11:44	12:44	12:41	14:14	15:11	21:33	22:48	25:43	30:18
15	1	1	2/3		10:51	11:40	12:42	12:39	13:52	14:56	18:05	17:28	19:30	24:32
16	1	2/3	1/3		11:34	12:35	13:48	14:13	15:52	15:10	22:10	22:22	24:57	29:46
17	1	2/3	0		11:34	12:35	13:48	14:13	16:02	15:17	23:54	25:02	28:04	32:39
18	1	2/3	2/3		11:34	12:35	13:48	14:13	15:41	15:02	20:26	19:42	21:51	26:53

Tab. 4.3-3 – Zeit-Kosten für variierte Gewichtungsfaktoren [h:min]

(Optima dunkel, Optimum plus maximal 30 min hell unterlegt).⁴⁴

5 Zweiter Anwendungsfall: Vergleich von Unter- und Überschallflug

5.1 Problemstellung

5.1.1 Einleitung

Da Überschallflug, wie in 5.1.3 ausgeführt, Kompromisse in Kosten, Komfort und Reichweite erfordert, ist sein einziger greifbarer Nutzen der Geschwindigkeits- und Reisezeitvorteil. Jedoch sind die Umstände, unter welchen die Verkürzung der Flugdauer für den Reisenden einen Nutzen in zeitlicher Gesamtsicht erbringt, weitgehend ungeklärt. Jene Umstände und Zusammenhänge zu analysieren, ist Motivation und Anlass der in dieser Arbeit vorgestellten Bewertungsmethodik.

Zu diesem Zweck wird nun ein Vergleich der zeitbezogenen Güten von Unterschall- und Überschallflügen angestellt. Dafür müssen diese unter gleichen oder ähnlichen Voraussetzungen stattfinden, was bedeutet, dass die Flüge dieselben Start- und Zielpunkte haben, dieselben Zeitzonen überwinden und dieselben Passagiersegmente ansprechen müssen.

Gleichzeitig muss die Herangehensweise wegen der Vielzahl potentiell relevanter Variablen (unter anderem Flugleistungsspezifika, mögliche Kombinationen aus Distanz und Zeitverschiebung, Ansetzung der Arbeitstermine, Schlafqualität im Flugzeug) vernünftig eingegrenzt und konkretisiert werden.

5.1.2 Der Schallknall als Rahmenbedingung

Ein Objekt, das sich innerhalb der Erdatmosphäre überschallschnell bewegt, sendet unweigerlich und unablässig Druckwellen aus, welche den Boden unterhalb des Flugpfades innerhalb eines Landstreifens gewisser Breite („Knallteppich“; siehe Abb. 5.1-1) erreichen und als plötzlicher, lauter Doppelknall wahrgenommen werden. Dieser „Schallknall“ (engl.: *sonic boom/sonic bang*) ist der Grund, weshalb alle entwickelten Länder zivilen Überschallflug über Land beschränken. Meistens, so beispielsweise in Deutschland (LuftVO §11a) und im restlichen Europa, sehen die Regularien vor, dass der Schallknall den Boden nicht erreichen darf, was Geschwindigkeiten bis zur sogenannten Cutoff-Machzahl (ca. 1,15, lufttemperaturabhängig) ermöglicht. Die USA untersagen zivilen Überschallflug in Gänze (FAR 91, Section 817).

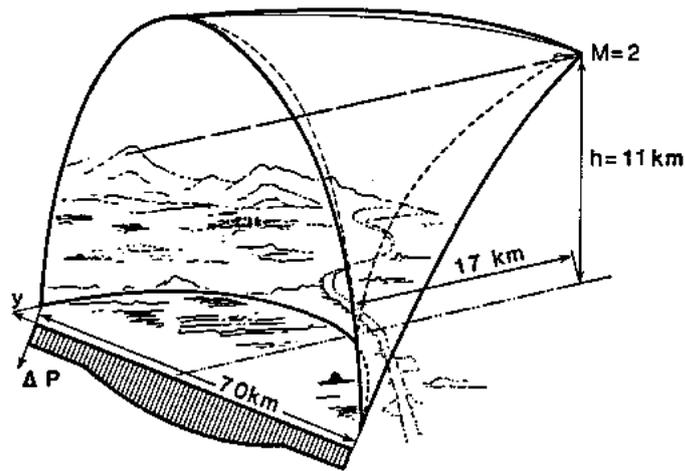


Abb. 5.1-1 – Knallteppich bei Mach-2-Flug in 11 km Höhe (aus Mancini et al. 1988)

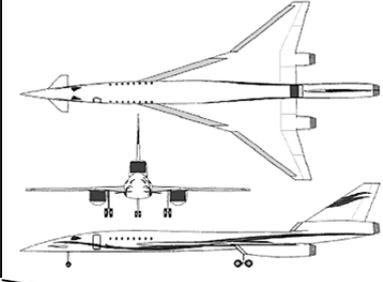
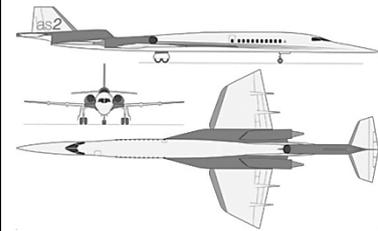
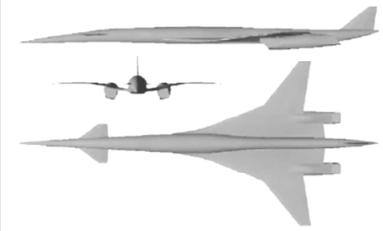
Der Schallknall und die daraus resultierenden Verbote stellen, neben hohen Betriebskosten, das wohl größte Hindernis für den nachhaltigen Durchbruch zivilen Überschallfluges dar. Es existieren zwei Ansätze zur Lösung des Problems:

Die Concorde befolgte ihrerzeit die Beschränkungen, indem sie über Land hohen Unterschall flog und erst weiter beschleunigte, sobald sie sich über dem Meer befand. Zudem umflog sie Landmassen in einem Sicherheitsabstand, so dass der Knallteppich nicht auf Land traf. Diese Art der Abhilfe ist schon heute relativ einfach umzusetzen, wenn auch nicht auf Intracontinental-Strecken. Auf der anderen Seite wird der Zeitgewinn von Überschallflug – und damit dessen einziger Nutzen – umso stärker vermindert, je größer die benötigten Umwege werden.

Als zweite Möglichkeit kann der als besonders schädlich geltende Effekt des Schallknalls, nämlich die menschliche Schreckreaktion, durch geschickte Formgebung der Flugzeughülle und eine daraus resultierende günstige Knallcharakteristik abgemildert werden. An entsprechenden Technologien wird – vor allem unter Wegbereitung der US-amerikanischen Nationalen Aeronautik- und Raumfahrtbehörde (NASA) – seit mehr als drei Jahrzehnten geforscht (NASA 2011). Dennoch erscheint ein Durchbruch, welcher uneingeschränkten zivilen Überschallflug über Land ermöglichen würde, noch immer weit entfernt und insgesamt unsicher: Weder für das Problem der durch die Druckwelle verursachten Schwingungen von Gebäuden (Cliatt et al. 2014) noch für jenes des fokussierten Schallknalls bei Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen zu Beginn beziehungsweise Ende einer Flugmission (Coulouvrat 2009) existieren bislang befriedigende Lösungsansätze.

5.1.3 Flugzeugtechnische Vorgaben

Es wird sich in dieser Arbeit a priori auf die vermutlich realistischsten Überschallflugzeuge beschränkt, also jene, die in neuerer Zeit vorgestellt wurden und mit geringen Technologiesprüngen einführbar erscheinen. Dies schließt ausdrücklich Entwürfe aus, welche unter Vorgabe einer niedrigen Schallknall-Signatur konzipiert wurden. Beispiele relevanter Flugzeuge sind in Tab. 5.1-1 aufgeführt. Die meisten heutigen Überschall-Entwürfe, welche zum Zwecke möglichst zeitnaher Realisierbarkeit auf erprobten technischen Systemen aufbauen, weisen Auslegungsreichweiten zwischen 4000 und 5000 Seemeilen, Reiseflug-Machzahlen zwischen 1,4 und 1,8 sowie einen sehr schlanken Rumpf auf. Im Folgenden sollen die physikalisch-technischen Ursachen sowie deren Auswirkungen auf den vorliegenden Anwendungsfall erörtert werden.

	HISAC-A (Stoufflet et al. 2008)	Aerion AS2 (Aerion Corp. 2016)	Boeing 765-072B (Welge et al. 2010)
			
Typ. Sitzplatzanzahl	8 (Privatflug-Konfig.)	8 (Privatflug-Konfig.)	100 (2 Klassen)
Auslegungsreichweite	4000 nm	4750 nm	4000 nm
Reisegeschwindigkeit	Mach 1,6	Mach 1,4	Mach 1,6
Länge × Spannweite	36,8 m × 18,5 m	48,8 m × 21,3 m	71,6 m × 35,1 m
Kabine (L×B×H) ⁴⁵	7,7 m × 2,0 m × 1,9 m	9,1 m × 2,2 m × 1,9 m	34 m × 2,5 m × 1,8 m
Max. Abflugmasse	51.095 kg	52.163 kg	132.042 kg
Treibstoffkapazität	26.900 kg	29.575 kg	61.295 kg
Startbahnlänge ⁴⁶	1981 m (6500 ft)	2286 m (7500 ft)	3048 m (10.000 ft)

Tab. 5.1-1 – Relevante Überschallflugzeug-Entwürfe

⁴⁵ Die Kabinenquerschnitte aller aufgeführten Modelle variieren. Angegeben sind die minimalen Höhen und Breiten.

⁴⁶ Benötigte Startbahnlänge (sog. Balanced Field Length, BFL) bei lärmkonformem Startschub, maximaler Abflugmasse, Meereshöhe und Internationaler Standardatmosphäre (ISA).

Allgemein gilt: Je schneller ein Flugzeug, desto höher seine Produktivität. Jedoch wachsen mit der Geschwindigkeit auch die physikalisch-technischen Hürden.

Zum einen ist aufgrund des Rückstoßprinzips die benötigte Geschwindigkeit des Triebwerkstrahls proportional zur Reisegeschwindigkeit. Gleichzeitig bedeutet ein schneller Abgasstrahl jedoch hohen Lärm beim Start. Die Musterzulassungskriterien bezüglich Flughafenlärms, welche sich zum Jahr 2018 nochmals verschärfen werden (Dickson 2013), müssen aller Voraussicht nach auch Überschallflugzeuge ohne Abstriche erfüllen. Deswegen beschränken sich die neuesten Entwürfe auf die oben genannten relativ moderaten Reisemachzahlen zwischen 1,4 und 1,8 und planen zusätzlich mit deutlich gedrosseltem Startschub sowie fallweise mit variablen Triebwerkszyklen.

Ferner wird ein geringes Volumen, ein geringer Kabinenquerschnitt sowie eine hohe Schlankheit des Flugzeugrumpfs benötigt, um den im Überschall-Regime dominierenden aerodynamischen Wellenwiderstand zu minimieren. Dadurch kommen relativ enge Kabinen zustande. Wie schon im Falle der Concorde sind Fluggesellschaften außerdem auf eine möglichst enge Bestuhlung angewiesen, um die von beträchtlichem Treibstoffverbrauch beherrschten Betriebskosten durch ausreichenden Ticketumsatz wettzumachen (vgl. Bestuhlungsplan des Boeing-765-072B-Entwurfs, Abb. 5.1-2). Der dadurch eingeschränkte Komfort wird durch den Umstand gerechtfertigt, dass sich die Reisedauer erheblich verkürzt.

Anders verhält es sich freilich für Privatflugzeuge, sogenannte Überschall-Businessjets (*engl.: supersonic business jet, SBJ*), wie das HISAC-A- oder das Aerion-AS2-Modell. Diese verfügen zwar nicht über die Kabinenvolumina der größten Geschäftsreiseflugzeug-Modelle; weil jedoch die potentiellen Privateigentümer der überaus teuren Flugzeuge (Aerion AS2: \$110 Mio. (Aerion Corp. 2016)) höchste Komfortstandards gewohnt sein dürften, werden eine Bestuhlung nach Art mittelgroßer Businessjets (vgl. Abb. 5.1-3), Stehhöhe im Gang sowie breite Sitze geboten, welche nach Bedarf paarweise zu Betten umgebaut werden können (Aerion Corp. 2016).

Zuletzt hat der hohe Treibstoffverbrauch zur Folge, dass die hohen Missionsreichweiten der in dieser Hinsicht besten derzeit in Planung befindlichen Unterschall-Pendants (Businessjet Bombardier Global 8000: 7.900 nm; Linienflugzeug Boeing 777-8X: 9.300 nm) nicht erreicht werden können. Das entscheidende Hindernis stellt hier die Länge regulärer Startbahnen dar: Mit den für höhere Reichweiten benötigten signifikanten Massenzuwächsen sowie den prinzipbedingt langen Startstrecken ließe sich von dort aus nicht mehr operieren. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass Überschallflugzeuge bisweilen einen Zwischenstopp einlegen müssen, um längere Missionen zu absolvieren, welche ein Unterschalljet nonstop fliegt; dies wiederum kompromittiert ihren Geschwindigkeitsvorteil.

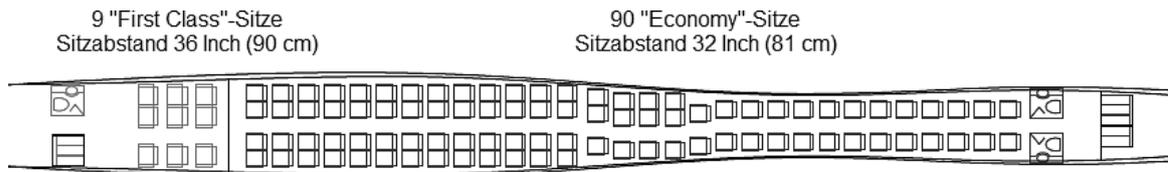


Abb. 5.1-2 – Kabine der Boeing 765-072B (Obersicht; aus Welge et al. 2010, modif.)

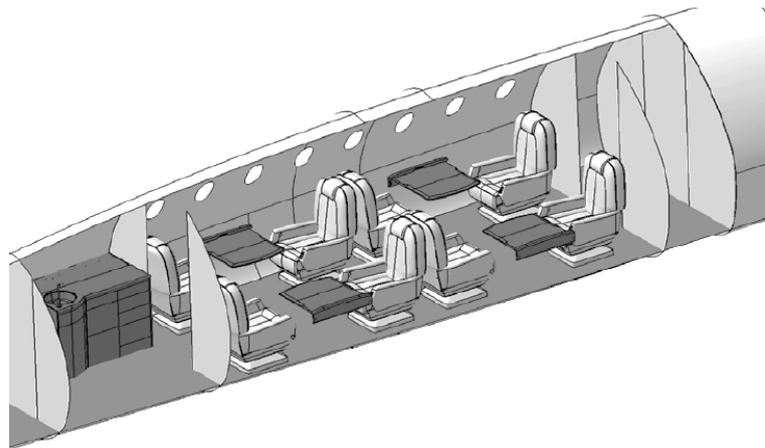


Abb. 5.1-3 – Kabine des HISAC-A-Jets (Schrägansicht; aus Deremaux et al. 2009)

5.1.4 Marktökonomische Aspekte

Da Überschallflug beträchtliche Betriebskosten mit sich bringt und nur auf längeren Strecken Sinn macht, da nur dort beträchtliche Flugzeitverkürzungen erfolgen werden können, ist davon auszugehen, dass Linienflüge bevorzugt zwischen interkontinentalen Zielen stattfinden werden, die ein hohes Aufkommen an Business- und First-Class-Passagieren aufweisen. Zudem gibt es unter letzteren vermutlich zahlreiche Geschäftsreisende, welche den (vermeintlichen) Zeitgewinn zu schätzen wüssten.

Für Businessjets im Privatbetrieb existieren keine festen Flugziele. Sie fliegen nicht selten an Orte, welche geringen Flugverkehr oder schlechte Verbindungen aufweisen, was sie an sich schon zu einem Mittel zur Zeitersparnis macht. Überschall-Businessjets hingegen weisen auch im Direktvergleich mit Linienflugzeugen auf regulären Routen beträchtliche Geschwindigkeitsvorteile auf, wodurch sie auch für ansonsten gut angebundene Städtepaare attraktiv werden. Auch für SSBJs haben Interkontinentalflüge höchste Relevanz; diese wiederum müssen wegen Zoll- und Einreisebestimmungen zwingend an internationalen Flughäfen enden wie auch die oben beschriebenen Linienflüge. (Siehe auch Liebhardt et al. 2011b.)

5.2 Methodischer Ansatz

5.2.1 Einleitung

Für diesen Anwendungsfall wird der Algorithmus *JourneyPlanner* verwendet; Flugpläne bzw. -zeiten stehen nämlich nicht zur Verfügung⁴⁷ und müssen deshalb in Bezug auf generische Arbeitstermine individuell festgelegt werden, was gut mit dem Flugzeug-Betriebsmodell Privatflug korreliert. Der Vergleich soll insofern zwischen Unterschall- und Überschall-Geschäftsreiseflugzeugen stattfinden. Als jeweilige Referenzflugzeuge werden die Dassault Falcon 7X⁴⁸ sowie der HISAC-A-Entwurf gewählt, da für beide detaillierte Flugleistungsdaten vorliegen.

Prinzipiell ist es wünschenswert, mit Simulationen den gesamten Variationsraum aller Hauptparameter möglichst engmaschig abzudecken, um generische Antwortflächen zu erzeugen. Jedoch brächte diese Vorgehensweise einen überaus hohen Rechenaufwand mit sich, zumal längst nicht alle möglichen Kombinationen aus Flugdistanz, Flugdauer und Zeitverschiebung sinnvoll sind – so beispielsweise nicht 2000 km Distanz und 10 h Zeitverschiebung, weil ein solches Städtepaar nicht existiert. Außerdem ist in der Realität der Zusammenhang zwischen Flugdistanz und Flugdauer kein trivialer, was unten ausführlicher begründet wird. Nicht zuletzt würde der Rechenaufwand ohne weitere Begrenzung des Parameter-raums zu groß.⁴⁹

Als Versuch eines möglichst pragmatischer Ansatzes wird zunächst eine feste Auswahl an Städtepaaren herangezogen, nämlich die umsatzstärksten Destinationen für Premium-Langstreckenflug im Linienbetrieb; von diesen wird angenommen, dass sie auch für Überschall-Privatflug höchste Relevanz haben. Die nötigen Daten wurden der kommerziellen Web-Plattform Aviation Data Intelligence (ADI) entnommen, welche vielfältige Leistungsdaten des globalen Airline-Flugbetriebs zur Verfügung stellt (Sabre Corp. 2015). So wurde eine Rangliste der Städtepaare aufgestellt, welche den größten Umsatz im Verkauf von Flugtickets des Premium-Bereichs (Business Class und First Class) aufweisen. Die wichtigsten 10 Städtepaare des Jahres 2012 sind in Tab. 5.2-1 aufgeführt. (Siehe auch Liebhardt et al. 2011a.)

⁴⁷ Historische Flugpläne der Concorde und ihrer Unterschall-Pendants sind zwar erhältlich. Jedoch liegt die Reisegeschwindigkeit der Concorde, Mach 2, oberhalb der als realistisch angenommenen Geschwindigkeiten. Zudem flog sie nur wenige Ziele an.

⁴⁸ Langstrecken-Businessjet; 5800 nm Reichweite, Mach 0,9 Höchstgeschwindigkeit, typischerweise 12 Sitze

⁴⁹ Ausführliche Begründung im Anhang F.

Für besagte Destinationen müssen nun Missionsdauern gefunden werden. Im Falle eines Unterschall-Businessjets könnte dafür in erster Näherung der Quotient aus Großkreisdistanz und Reisefluggeschwindigkeit gebildet werden, was jedoch mehrere Faktoren vernachlässigen würde, beispielsweise die Rollzeiten auf den Flughäfen, verringerte Geschwindigkeiten während des Steigens bzw. Sinkens sowie Winde. Bei einem Überschallflugzeug würden zusätzlich die Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Überlandsegmenten vernachlässigt, was diese Vorgehensweise unplausibel macht. Um realistische Flugdauern für Überschalljets zu erhalten, muss zudem berücksichtigt werden, dass diese zumindest mittelfristig auf umgeleiteten Flugrouten verkehren werden.

Start	Ziel	Passagiere (Tsd.)	Umsatz (Mio. USD)	Großkreisdistanz (nm)
New York	London	388	874	2.999
London	New York	392	872	
London	Singapur	105	343	5.878
Singapur	London	110	380	
Paris	New York	104	311	3.158
New York	Paris	103	311	
Dubai	London	119	287	2.972
London	Dubai	122	298	
Los Angeles	London	99	293	4.741
London	Los Angeles	99	291	
Hongkong	London	74	218	5.209
London	Hongkong	75	213	
Johannesburg	London	72	206	4.884
London	Johannesburg	75	214	
London	San Francisco	72	201	4.664
San Francisco	London	71	207	
Houston	London	60	200	4.201
London	Houston	61	207	
London	Sydney	41	184	9.187
Sydney	London	42	194	

Tab. 5.2-1 – Die 10 umsatzstärksten Städtepaare bzgl. Premium-Flugtickets, 2012

5.2.2 Konzeption von Überschall-Flugpfaden

Wie oben ausgeführt, müssen Überschallflugzeuge sich über Land aller Voraussicht nach an Geschwindigkeitsbegrenzungen halten und umgeleitete Flugrouten verwenden, um die Flugdauer zu minimieren. Zu diesem Zweck

wurden derartige Flugpfade auf Basis der frei erhältlichen Software Google Earth⁵⁰ entworfen und zur Weiterverarbeitung exportiert.

Zunächst wurde dafür angenommen, dass existierende Luftstraßen und Anflugverfahren ignoriert werden können, weil die dadurch zustande kommenden finalen Umwege auf der Langstrecke gering ausfallen. Zudem werden schon seit längerer Zeit Pläne zur Harmonisierung der Luftverkehrsüberwachung verfolgt (nämlich durch die Projekte SESAR⁵¹ in der Europäischen Union und NextGen⁵² in den Vereinigten Staaten), was in Zukunft direktere Flugrouten ermöglichen soll und insofern diesem Ansatz entgegenkommt.

Basierend auf der Reichweite des HISAC-A-Entwurfs wurden bei Entfernungen deutlich unter 4000 nm lediglich direkte Flugpfade entworfen (also solche ohne Zwischenstopp), bei über 4000 nm nur indirekte Flugpfade und im Übergang beide Arten. Wo der beste Zwischenlandeflughafen nicht offensichtlich war, wurden mehrere einbezogen. Für jeden nötigen Flugabschnitt wurden bis zu drei „konservative“ und drei „optimistische“ Flugpfade⁵³ erstellt, jedoch nur, wenn eine vernünftige⁵⁴ Routenführung machbar schien.

Zu Küsten beziehungsweise zu Siedlungen wird ein Abstand von 50 km eingehalten. Die maximale Breite des Knallteppichs bei idealer Atmosphäre, Mach 1,6 sowie einer aus internen Dokumenten als maximal bekannten Flughöhe von 17.700 m beträgt ca. 75 km⁵⁵; dadurch verbleibt eine Pufferzone von mindestens 12,5 km, um widrigen Wind- oder Temperatureinflüssen vorzubeugen.

Neben den umgeleiteten wurden jeweils auch entsprechende Großkreis-Flugrouten erstellt, also kürzestmögliche Verbindungen. Schließlich entstanden insgesamt über 3000 Flugrouten zwischen den 250 wichtigsten Städtepaaren. Abb. 5.2-1 zeigt als Beispiel umgeleitete Flugpfade zwischen London und San Francisco, jeweils mit einem Zwischenstopp.

Das gesamte Verfahren, einschließlich desjenigen im nachfolgenden Abschnitt, wird ausführlich in Liebhardt et al. (2014) beschrieben.

⁵⁰ Erhältlich unter www.google.com/earth [Stand: 15.04.2016].

⁵¹ Projekt-Webseite: www.sesarju.eu [Stand: 15.04.2016].

⁵² Projekt-Webseite: www.faa.gov/nextgen [Stand: 15.04.2016].

⁵³ „Konservative“ Flugpfade sind hier solche, deren Überschall-Anteile streng auf Meere und Ozeane beschränkt sind. „Optimistische“ Flugpfade erlauben unbeschränkten Überschallflug über dünn oder gar nicht besiedelten Gebieten wie Nordkanada oder Teile Australiens

⁵⁴ „Vernünftig“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass hinsichtlich der angenommenen Reiseflugmachzahlen immer noch signifikante Zeitersparnisse gegenüber Großkreis-Unterschallflug bei etwa Mach 0,85 erwartet werden können. So wurde beispielsweise eine Routenführung zwischen New York und Houston um Florida herum wegen 57 % Distanzzuwachses aussortiert.

⁵⁵ Nach Coulouvrat et al. 2009, Schaubild S. 6.



Abb. 5.2-1 – Überschall-Flugpfade zw. London und San Francisco [Google Earth].
 (Weiß: geschwindigkeitsbegrenzt; schwarz: konservativ; grau: optimistisch. Mögl. Zwischenstopps: Calgary (YYC), Saskatoon (YXE), Winnipeg (YWG), Churchill (YYQ), Keflavik (KEF).)

5.2.3 Berechnung von Missionsdauern

Um Flugmissionsdauern auf den umgeleiteten Routen relativ genau berechnen zu können, wurde das eigene, auf Flugphysik basierende Flugleistungswerkzeug SuperTraC (*Supersonic Trajectory Calculation*, Überschall-Trajektorienrechnung) geschrieben. Es simuliert Missionen in beliebiger Unterschall-Überschall-Segmentierung, indem es die Bewegungsgleichungen des Flugzeuges numerisch-iterativ löst:

$$F = W + m \cdot g \cdot \sin(\gamma) + m \cdot \frac{dv}{dt} \quad 56 \quad (5-1)$$

$$A = m \cdot g \cdot \cos(\gamma) + m \cdot v \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad 57 \quad (5-2)$$

Zusammengenommen werden folgende Eingaben verarbeitet:

- Die aus Google Earth exportieren Flugrouten.
- Eine Atmosphären-Datenbank aus über ein Jahr gemittelten Luftdrücken, -dichten, -temperaturen sowie Windstärken und -richtungen.
- Eine eigens kompilierte Flughafen-Datenbank (inklusive durchschnittlicher Rollzeiten, welche von der europäischen Flugüberwachungsbehörde EUROCONTROL bereitgestellt werden⁵⁸).

⁵⁶ Kräfte parallel zur Flugbahn. F: Schub; W: aerodynamischer Widerstand; m: Flugzeugmasse; g: Erdbeschleunigung; γ : Steigwinkel; dv/dt : Beschleunigung.

⁵⁷ Kräfte senkrecht zur Flugbahn. A: Auftrieb; m: Flugzeugmasse; g: Erdbeschleunigung; γ : Steigwinkel.

⁵⁸ Abrufbar unter www.eurocontrol.int/articles/coda-publications [Stand: 15.04.2016].

- Die aus proprietären Quellen zusammengestellten Flugleistungsdaten des HISAC-A-Überschalljets (aerodynamische Polaren, Triebwerksschub und Treibstoffverbrauch, Massen, Missionsprozeduren).

Abb. 5.2-2 zeigt das Beispiel einer generischen simulierten Überschallmissions-Trajektorie. Sie enthält ein anfängliches, ein zwischenliegendes sowie ein abschließendes Überland-Segment mit Geschwindigkeitsbeschränkungen sowie zwei Überwasser-Anteile mit Überschall-Reiseflug und konstantem Steigen.

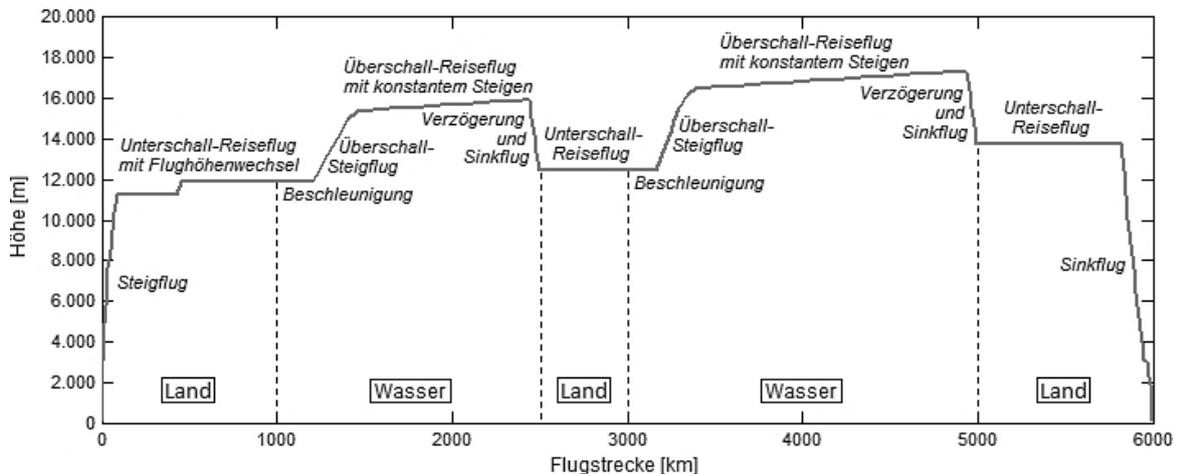


Abb. 5.2-2 – Generische mit SuperTraC simulierte Überschall-Mission

Folgende Annahmen hinsichtlich der geltenden Regularien wurden für den vorliegenden Anwendungsfall getroffen: Über Land sei stets Reiseflug mit der Cutoff-Machzahl erlaubt und die optimistischen Flugpfade seien gültig. Daraufhin wurden Missionen auf allen erstellten Flugrouten in beiden Richtungen simuliert. Dazu gehören auch alle Großkreispfade, was zum einen notwendig ist, falls keine vernünftigen umgeleiteten Flugrouten existieren, und zum anderen, um den vermeintlichen Geschwindigkeitsvorteil der Umleitungen zu überprüfen.

Für die auf Großkreisrouten begrenzte Missionssimulation des Unterschall-Businessjets wurde das institutseigene Berechnungswerkzeug TCM (Trajectory Calculation Module) verwendet (Lührs et al. 2014). Dieses stützt sich auf die Base of Aircraft Data (BADA), eine von der EUROCONTROL herausgegebene Flugleistungsdatenbank gängiger Flugzeugmodelle⁵⁹, welche unter anderen die Falcon 7X führt. Zudem verwendete es die oben genannten Atmosphärendaten.

Als Reisefluggeschwindigkeit wurde für den HISAC-A-Jet Mach 1,6 und für die Falcon 7X Mach 0,9 gewählt. Für Zwischenstopps wurden bei beiden Flugzeugen

⁵⁹ Abrufbar unter www.eurocontrol.int/services/bada [Stand: 15.04.2016].

mindestens 10 Minuten und höchstens 30 Minuten angesetzt; die Differenz macht die Auftankdauer aus, welche über einen einfachen linearen Zusammenhang mit dem für den nächsten Flug benötigten Treibstoff errechnet wird.

5.2.4 Auswahl von Städtepaaren

Aus allen für ein Städtepaar berechneten Missionen wurde für beide Flugzeuge jeweils diejenige mit der kürzesten Dauer ausgewählt⁶⁰. Dabei stellte sich heraus, dass der Überschalljet zuweilen nur sehr geringe Flugzeitvorteile erzielt, so im Extremfall 10 Minuten zwischen Chicago und New York. Daraufhin wurde eine Signifikanzschwelle von 120 Minuten eingeführt, um solche Städtepaare auszuschließen, auf welchen die Schwelle nicht in mindestens in einer der beiden Flugrichtungen übertroffen wird. In der Folge fielen 82 Paarungen aus der Betrachtung heraus, 168 blieben übrig.

5.2.5 Aufbau der Testreihen

Zum Zwecke der Reisesimulation beider Businessjets mit *JourneyPlanner* werden folgende Parametervarianten bestimmt:

Flugdauern (T_{BlOut} , T_{BlRet}) und Zwischenlandezeiten (T_{LoOut} , T_{LoRet}) sowie die Zeitverschiebung T_{Shift} sind für jede Reise ein fester Datensatz aus der vorab durchgeführten Flugmissionssimulation beziehungsweise der Flughafen-Datenbank. Insgesamt sind $168 \cdot 2 = 336$ Reiseziele zu untersuchen (beide Richtungen für jedes Städtepaar).

Unter der Annahme, dass bei zeitsensiblen Langstreckenreisen der erste Termin kaum spät am Tag stattfinden wird, weil dies eine Übernachtung und eine unnötig lange Reisedauer nach sich zöge, werden mögliche Arbeitsbeginne frühestmöglich auf den regulären Start des Arbeitstages ($t_{WDStart}$, 8:30 Uhr), spätestmöglich auf die Mitte des Arbeitstages (13:30 Uhr) und stündlich dazwischen gesetzt. Somit hat $t_{WkStart}$ sechs Varianten.

Mit analoger Begründung wird auch ein morgendliches Ende des letzten Termins ausgeschlossen, so dass mögliche Arbeitsenden auf die Mitte des Arbeitstages (13:30 Uhr), auf dessen reguläres Ende (t_{WDEnd} , 18:30 Uhr) und stündlich

⁶⁰ In Anhang E sind die kürzesten Flugzeiten auf den 40 wichtigsten Städtepaaren aufgelistet.

dazwischen gelegt werden, und zwar in jedem der maximal 5 Arbeitstage. Es gibt also $6 \cdot 5 = 30$ Varianten von t_{WkEnd} .⁶¹

Ferner wird angenommen, dass die Businessjets über vollwertigen Betten verfügen. In diesem Sinne werden drei Varianten der Schlafqualität im Flugzeug festgelegt: Guter ($QS = 0,8$)⁶², schlechter ($QS = 0,4$) sowie kein Schlaf ($QS = 0$).

Schließlich werden noch sieben Sätze von Gewichtungsfaktoren untersucht, welche in Tab. 5.2-2 aufgeführt sind. Satz 1 findet die schnellste Reise, Satz 2 die schonendste und Satz 3 die arbeitsamste, während Satz 4 den besten Kompromiss für alle drei Zielwerte darstellt. Da Satz 5 die eigene Freizeit ignoriert und vollen Wert auf Schlaf und Arbeit legt, um die Aufgaben am Zielort optimal zu erfüllen, wird dieses Passagierverhalten im Folgenden als „ambitioniert“ bezeichnet. Satz 6 bewertet Schlaf als unwichtig sowie Zeit und Arbeit als sehr wichtig, ohne zu erkennen, dass letztere in unausgeschlafenem Zustand in der Regel wenig effektiv ist; er wird deshalb „überambitioniert“ genannt. Im Satz 7 wünscht der Reisende eine kurze Dauer, genügend Schlaf und keine Arbeit auf der Reise; dies soll als „unterambitioniert“ bezeichnet werden.

<i>Satz</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>WTime</i>	1	0	0	1	0	1	1
<i>WSleep</i>	0	1	0	1	1	0	1
<i>WWork</i>	0	0	1	1	1	1	0

Tab. 5.2-2 – Untersuchte Sätze der Gewichtungsfaktoren

Insgesamt werden also $336 \cdot (6 \cdot 30 - 15) \cdot 3 \cdot 7 = 1.164.240$ Reisen simuliert, und zwar jeweils für die Über- und für die Unterschall-Missionsdauern.

Zuletzt wird noch angenommen, dass Geschäftsreiseflugzeuge – im Gegensatz zu Linienflugzeugen – zu jeder Nachtzeit starten, wenn es der Mission des Passagiers zuträglich ist (zumal die große Mehrheit der betrachteten Städte über einen rund um die Uhr geöffneten Flughafen verfügt). Deswegen werden die bevorzugten Abflugzeiten am Startort, $t_{DepoStart}$ und $t_{DepoEnd}$, für diesen Anwendungsfall ignoriert.

⁶¹ 15 Kombinationen von $t_{WkStart}$ und t_{WkEnd} werden ausgeschlossen, da in jenen Fällen die Termindauer unter der minimal erlaubten, $T_{Wk,min}$, läge.

⁶² Bezüglich des „guten Schlafs“ wird angenommen, dass seine Qualität wegen suboptimaler Kabinenluft (geringer Druck, geringe Feuchtigkeit) nicht an die reguläre heranreicht.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Einleitung

Als Zwischenschritt werden aus allen Reisen von gleicher Termindauer, die sich ansonsten lediglich um die Terminansetzung unterscheiden, diejenigen mit den geringsten TCT – also die optimalen – zur Analyse ausgewählt⁶³. Dadurch wird die Anzahl untersuchter Reisen auf 324.576 reduziert.

Das Ergebnis des Anwendungsfalls ist prinzipiell die Differenz ΔTCT der Zeit-Kosten zwischen Über- und Unterschallflügen mit gleichen Voraussetzungen:

$$\Delta TCT_i = TCT_{Supersonic,i} - TCT_{Subsonic,i} \quad (5-3)$$

Positive ΔTCT bedeuten geringere Zeit-Kosten und mithin einen Vorteil des Unterschallfluges, negative ΔTCT bedeuten einen Vorteil für Überschall.

5.3.2 Allgemeine Betrachtungen

Der Durchschnitt aller gefundenen ΔTCT beträgt -163 Minuten bei einer Standardabweichung von 202 min (vgl. Abb. 5.3-1). In $12,1$ % aller Fälle ist ΔTCT exakt Null. Minimal beträgt ΔTCT -1.101 min und maximal 376 min.

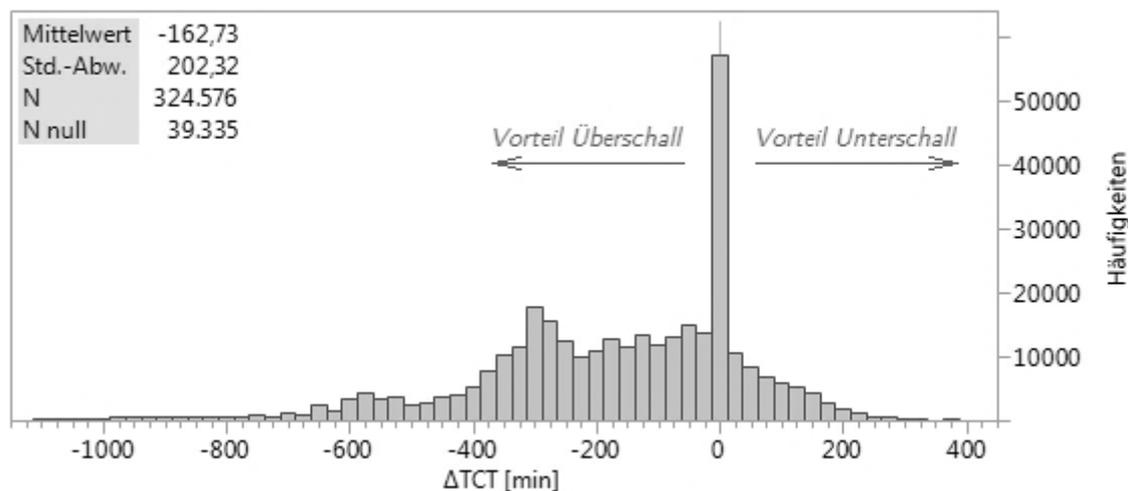


Abb. 5.3-1 – Verteilung aller gefundenen ΔTCT

⁶³ Dieser Schritt wird für Unter- und für Überschall getrennt durchgeführt und fußt auf der Annahme, dass die Uhrzeiten der Termine nach den Wünschen des speziell anreisenden Gastes justiert werden können und lediglich die Termindauer feststeht.

Zunächst soll der Einfluss der einzelnen Gewichtungsfaktoren betrachtet werden. So zeigt sich, dass ΔTCT sehr stark von der Gewichtung der Reisedauer abhängt (vgl. Abb. 5.3-2). Ist $w_{Time} = 1$, so ist ΔTCT in 96 % aller Fälle negativ. Ist hingegen $w_{Time} = 0$, so ist ΔTCT zu 39,5 % negativ, zu 32,4 % positiv und zu 28,1 % Null, was ein recht ausgeglichenes Bild darstellt.

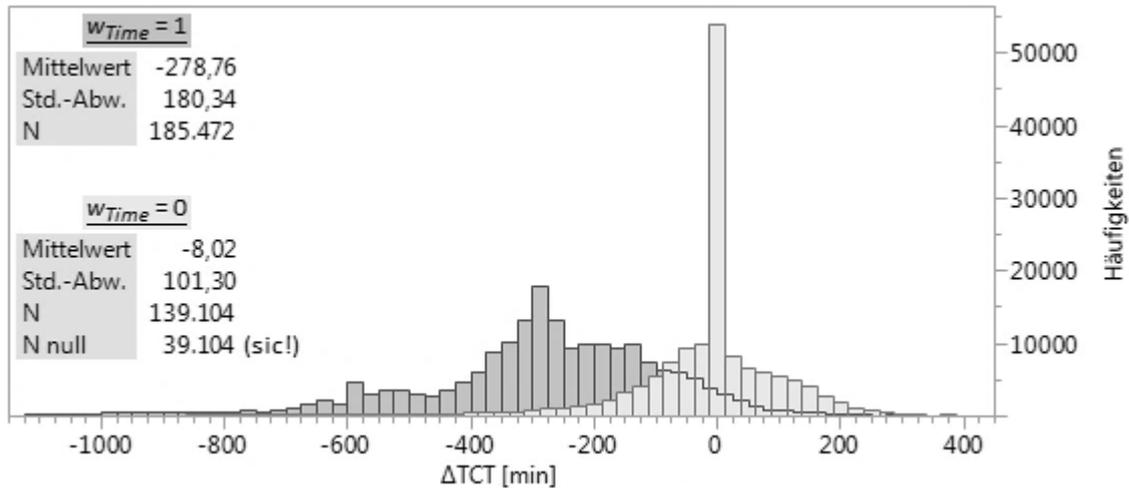


Abb. 5.3-2 – ΔTCT -Verteilung für unterschiedliche Gewichtung der Reisedauer

Für die Gewichtung der Ausgeruhtheit (vgl. Abb. 5.3-3) stellt sich heraus, dass bei der vollen Gewichtung der Mittelwert von ΔTCT deutlich höher liegt und die Standardabweichung geringer ist als bei der Null-Gewichtung. Außerdem tritt viel öfter ein TCT -Gleichstand auf. Viel Wert auf Schlaf verschiebt die Gunst also tendenziell vom Überschallflug weg.

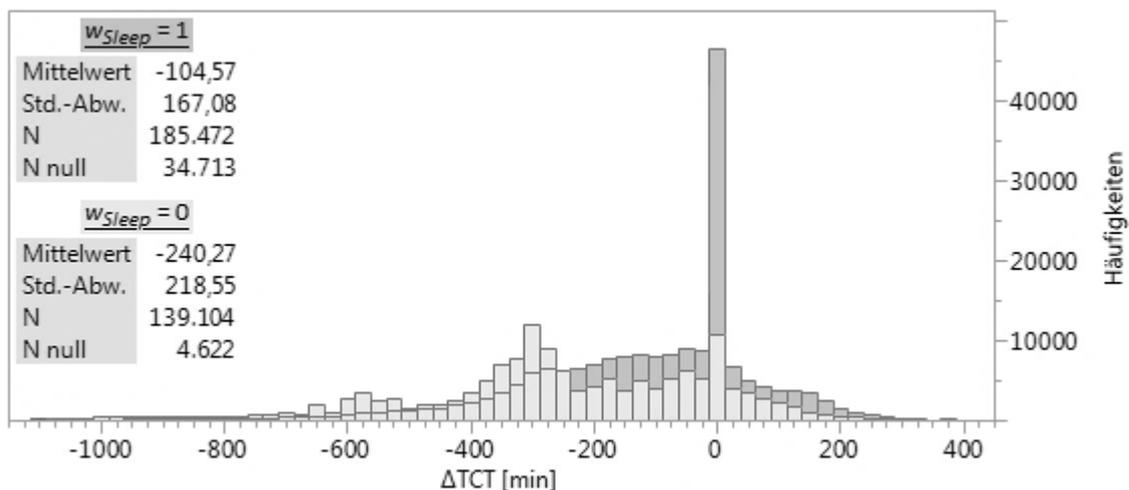


Abb. 5.3-3 – ΔTCT -Verteilung für unterschiedliche Gewichtung der Ausgeruhtheit

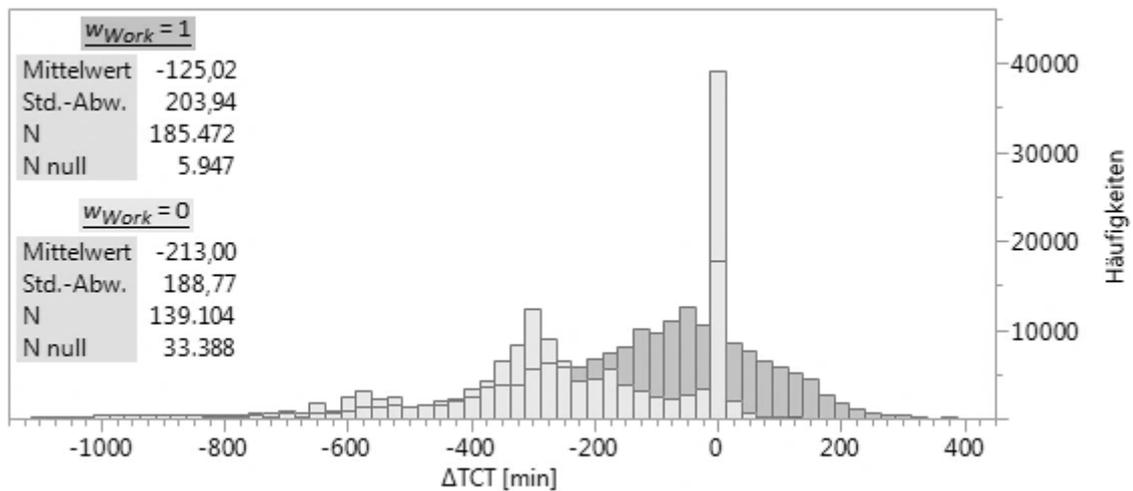


Abb. 5.3-4 – ΔTCT -Verteilung für unterschiedliche Gewichtung der Arbeitszeit

Ähnlich verhält es sich für die Gewichtung der Arbeitszeit (vgl. Abb. 5.3-4): Bei Null-Gewichtung liegen durchschnittlich viel negativere ΔTCT -Werte vor als bei voller Gewichtung; jedoch ist in diesem Fall die Standardabweichung höher und exakter TCT -Gleichstand seltener. Gleichwohl verschiebt sich auch hier bei niedriger Gewichtung die Tendenz zum Überschall hin.

Zusammengefasst ist die Bilanz zwischen Unter- und Überschall also nur für $w_{Time} = 0$ einigermaßen ausgeglichen; ansonsten dominiert die Überschall-Option.

Zwischen ΔTCT und der Großkreisdistanz von Start- zu Zielort $Dist_{GC}$ (*great circle distance*) bzw. dem Flugzeitvorteil des Überschalljets T_{FLAdv} (*flight time advantage*) bestehen nur schwache Zusammenhänge. Höhere Distanzen bzw. Flugzeiten bringen jedoch tendenziell negativere ΔTCT hervor. (Siehe Abb. 5.3-5.)

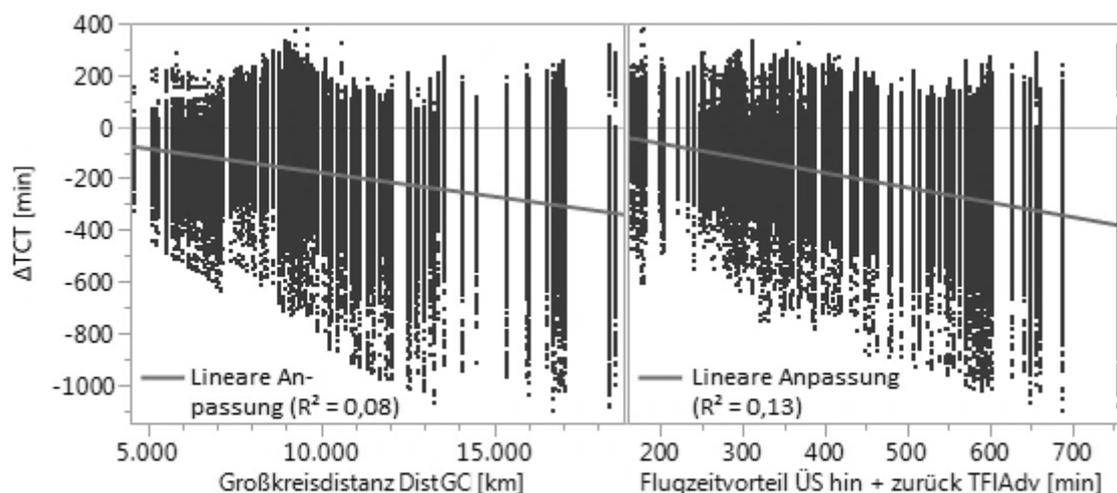


Abb. 5.3-5 – Streudiagramme für ΔTCT und Großkreisdistanz bzw. Flugzeitvorteil

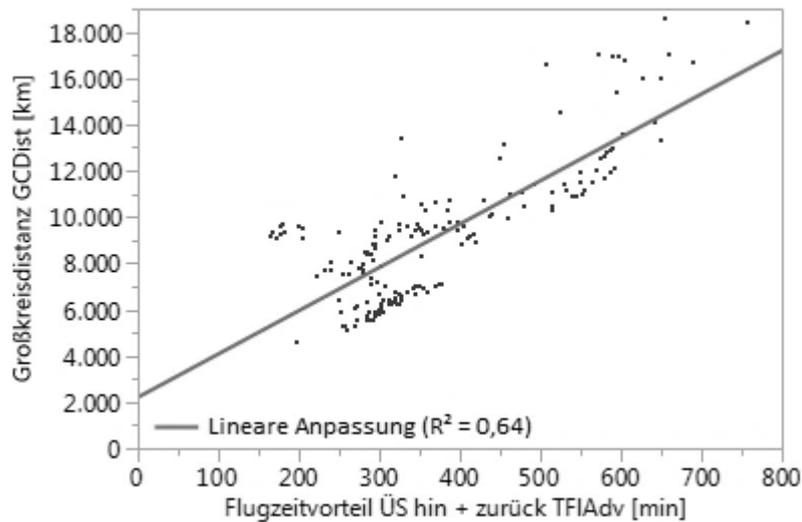


Abb. 5.3-6 – Korrelation von Flugzeitvorteil ÜS und Großkreisdistanz

Großkreisdistanz und Flugzeitvorteil korrelieren stark (siehe Abb. 5.3-6), wobei die Korrelationsgüte durch die Überschall-Umleitungen und entsprechende Flugzeiteinbußen beeinträchtigt wird. Obschon Großkreisdistancen in der Ergebnisbetrachtung möglicherweise anschaulicher wären als Flugzeitvorteile, werden im Folgenden nur noch letztere verwendet, weil diese direkt in die Simulationen eingehen und eindeutig besser mit ΔTCT korrelieren.

Sehr uneindeutig sind die Zusammenhänge zwischen ΔTCT und der Bio-effektiven Zeitverschiebung $T_{ShiftBE}$ beziehungsweise der Schlafqualität QS oder der Termindauer T_{Wk} (vgl. Abb. 5.3-7). Die höhere Streuung bei extremen Zeitverschiebungen ist wahrscheinlich hauptsächlich den tendenziell langen Flugzeiten geschuldet. Die höchste Schlafqualität bewirkt die geringste ΔTCT -Streuung. Die Termindauer zeigt keinen sichtbaren Einfluss auf ΔTCT .

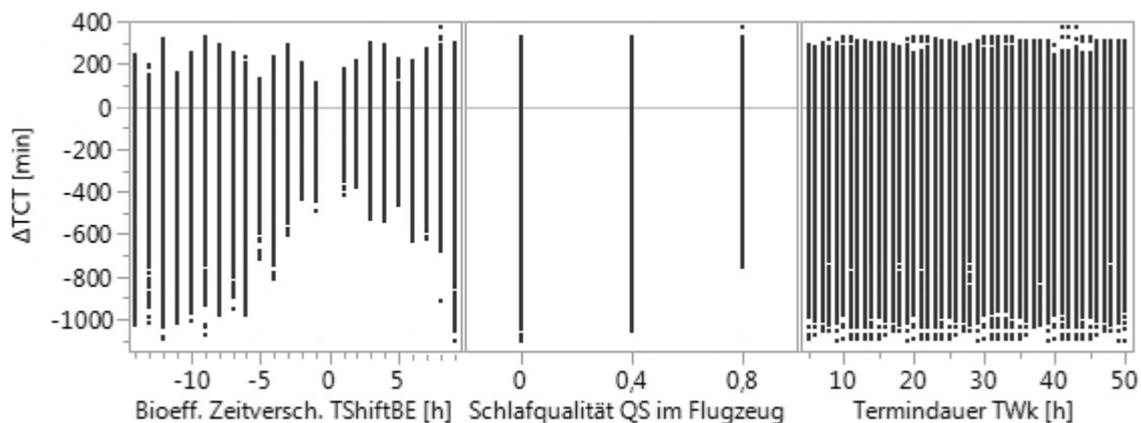


Abb. 5.3-7 – Streudiagramme für ΔTCT bezüglich Bio-effektiver Zeitverschiebung, Schlafqualität im Flugzeug und Termindauer

5.3.3 Einzelbetrachtung der Gewichtungssätze

Da sich durch den Aufbau der TCT -Formel die Aussage von ΔTCT in verschiedenen Gewichtungssätzen deutlich unterscheidet, müssen diese im Folgenden einzeln behandelt werden.

1. Gewichtungssatz (1-0-0, Fokus auf Minimierung der Reisedauer)

Durch volle Gewichtung der Reisedauer sowie Vernachlässigung von Ausgeruhtheit und Arbeitszeiterhaltung zählt stets nur die schnellste Reise. Da, wie in 5.2.5 erklärt, keine Flughafenschließzeiten und auch keine sonstigen Beschränkungen bei der Flugansetzung bestehen, ist ΔTCT stets negativ und das Überschallflugzeug überlegen (vgl. Abb. 5.3-8). Bei Betrachtung der Streudiagramme ist die einzige klare Korrelation diejenige zwischen ΔTCT und dem Überschall-Flugzeitvorteil T_{FLAdv} (s. Abb. 5.3-9).

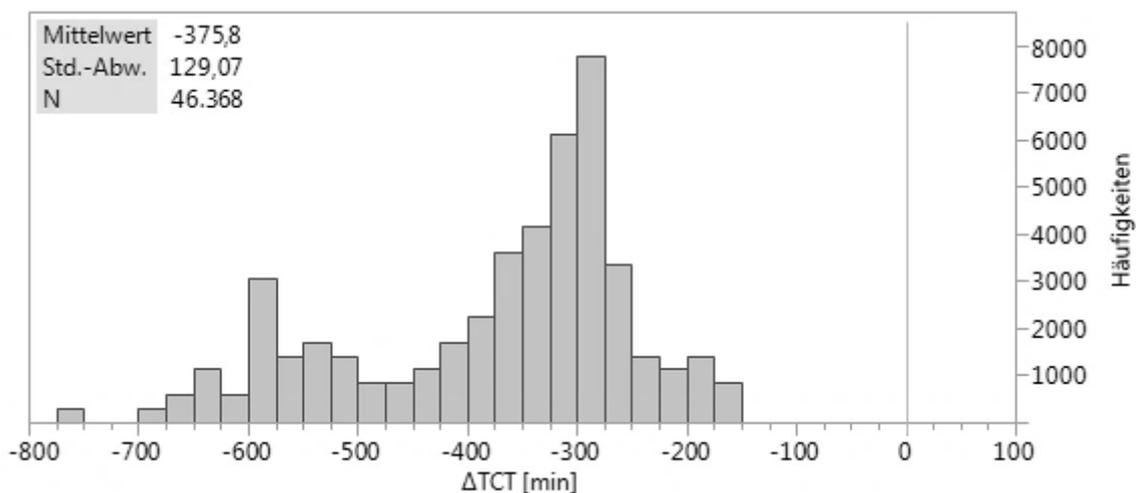


Abb. 5.3-8 – ΔTCT -Verteilung für den 1. Gewichtungssatz (1-0-0)

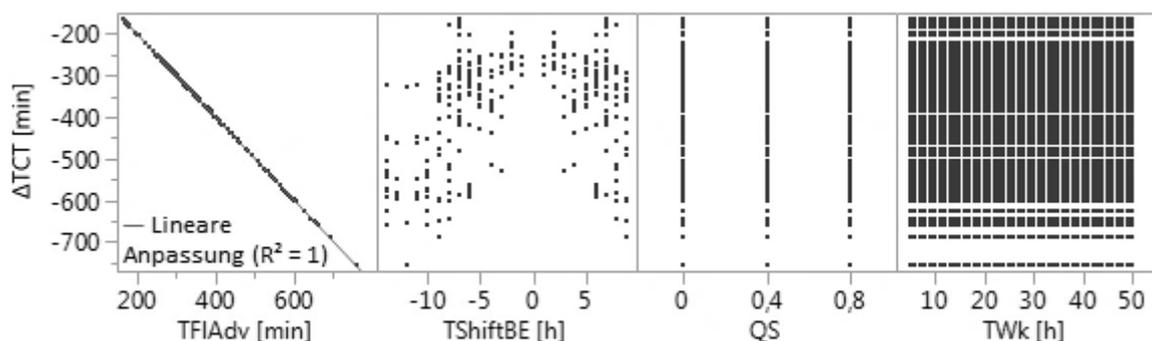


Abb. 5.3-9 – Streudiagramme für den 1. Gewichtungssatz (1-0-0)

2. Gewichtungssatz (0-1-0, Fokus auf Ausgeruhtheit)

ΔTCT ist in 72 % aller Fälle exakt Null, zu 20,2 % negativ und zu 8,8 % positiv (siehe Abb. 5.3-10). Sein Betrag ist in 93,2 % aller Fälle kleiner als 60 min. Bei steigendem Flugzeitvorteil T_{FLAdv} wie auch extremen Bio-effektiven Zeitverschiebungen $T_{ShiftBE}$ streut ΔTCT immer tiefer ins Negative (s. Abb. 5.3-11). ΔTCT ist für die Schlafqualität $QS = 0,4$ stets größer gleich Null (Mittelwert $\emptyset = 1,7$ min, Standardabweichung $\sigma = 7,7$ min) und für $QS = 0,8$ meist negativ ($\emptyset = -4,7$ min, $\sigma = 12,1$ min), mit jeweils relativ geringer Streuung (zum Vergleich $QS = 0$: $\emptyset = -36,2$ min, $\sigma = 81,9$ min). T_{Wk} zeigt erneut keinen distinktiven Einfluss.

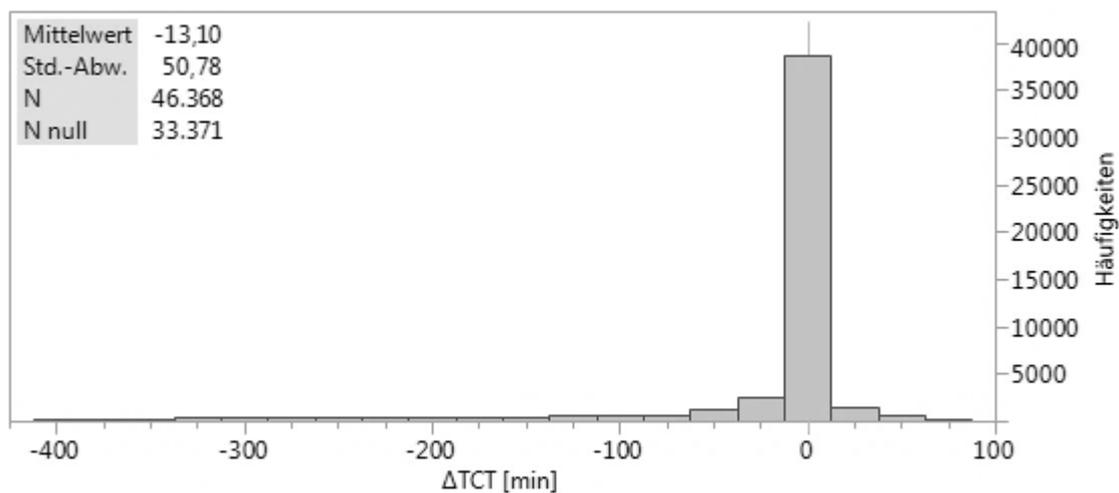


Abb. 5.3-10 – ΔTCT -Verteilung für den 2. Gewichtungssatz (0-1-0)

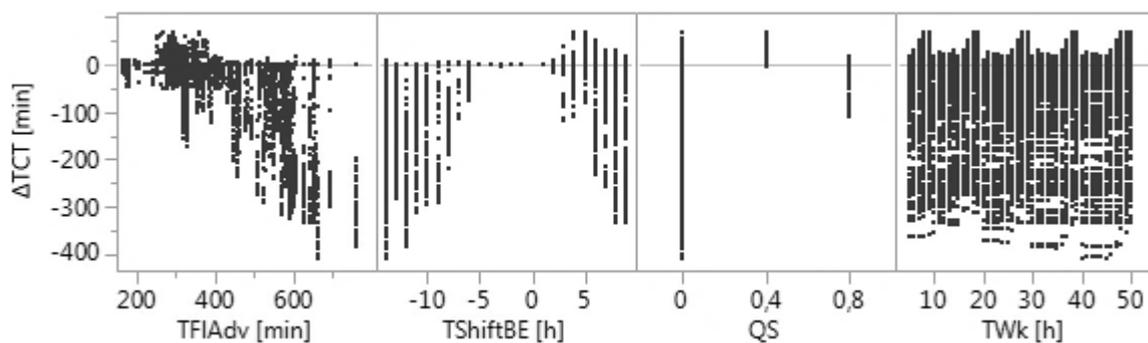


Abb. 5.3-11 – Streudiagramme für den 2. Gewichtungssatz (0-1-0)

3. Gewichtungssatz (0-0-1, Fokus auf Arbeitszeiterhaltung)

ΔTCT ist in 53,5 % aller Fälle negativ, zu 10 % Null und zu 36,5 % positiv (vgl. Abb. 5.3-12). Auf keinen der Hauptparameter bezogen zeigt ΔTCT besondere Auffälligkeiten, außer vielleicht eine größere Streuung mit steigendem T_{Wk} und eine geringere beim höchsten QS (s. Abb. 5.3-13). Durchschnittlich ist ΔTCT nur leicht negativ.

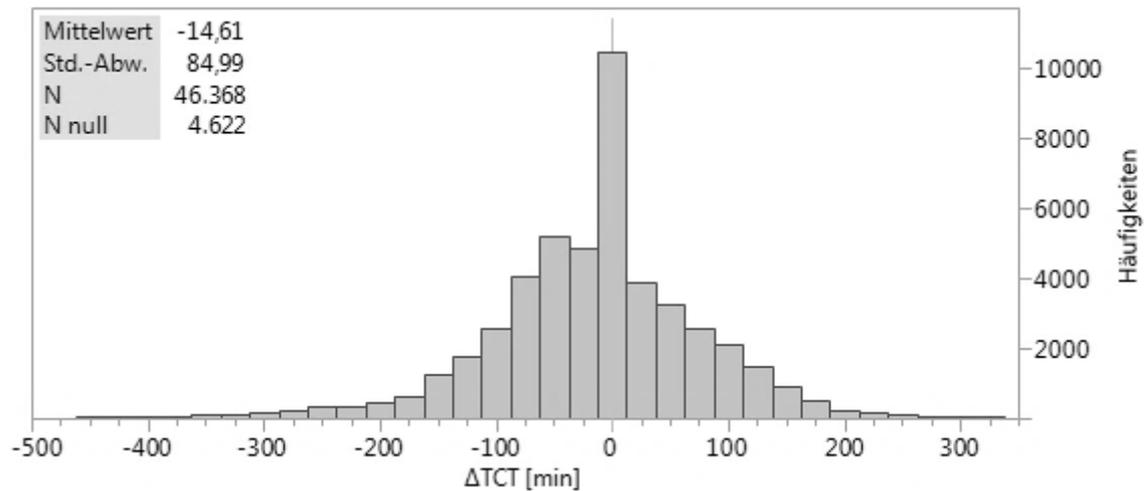


Abb. 5.3-12 – ΔTCT -Verteilung für den 3. Gewichtungssatz (0-0-1)

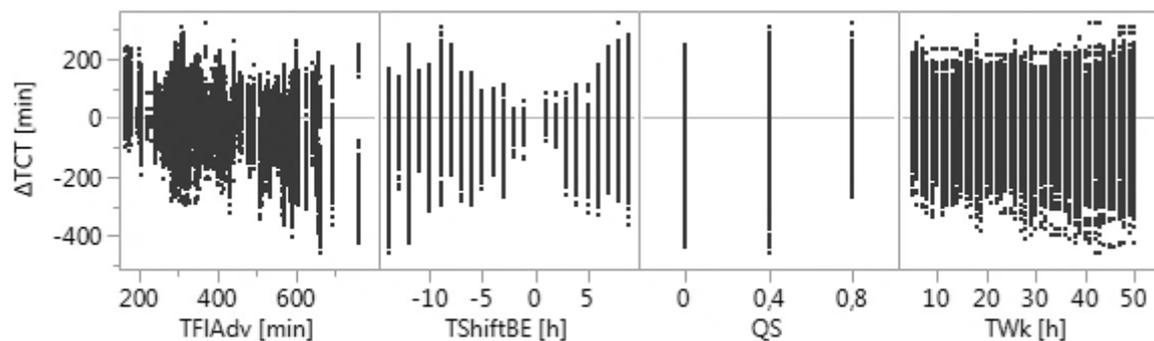


Abb. 5.3-13 – Streudiagramme für den 3. Gewichtungssatz (0-0-1)

4. Gewichtungssatz (1-1-1, alle Zielwerte sind relevant)

ΔTCT weist eine rechtsschiefe Normalverteilung auf (vgl. Abb. 5.3-14). Es ist in 86,8 % aller Fälle negativ und zu 12,8 % positiv (Null: 0,4 %). Mit steigendem T_{FIAdv} wird ΔTCT negativer und mit steigendem QS eindeutiger (s. Abb. 5.3-15).

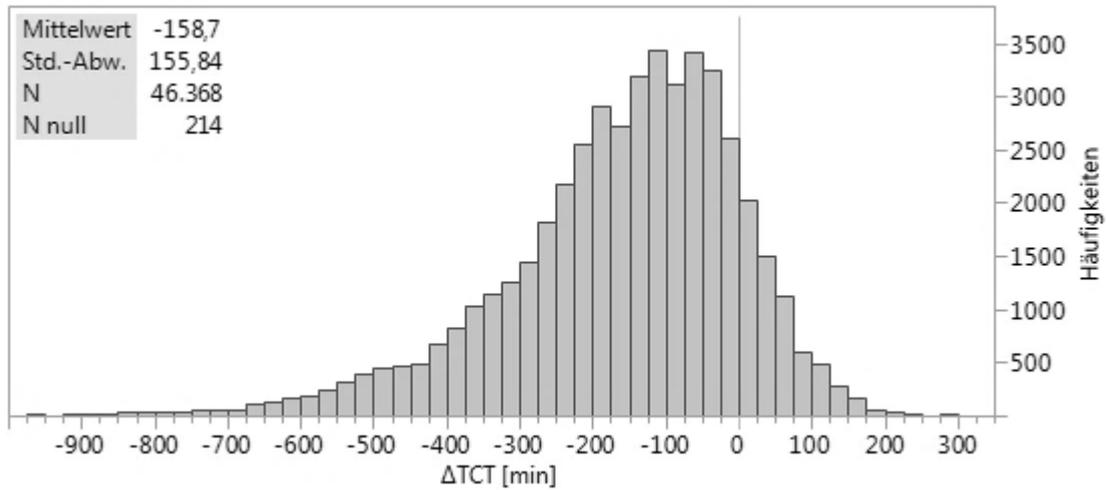


Abb. 5.3-14 – ΔTCT -Verteilung für den 4. Gewichtungssatz (1-1-1)

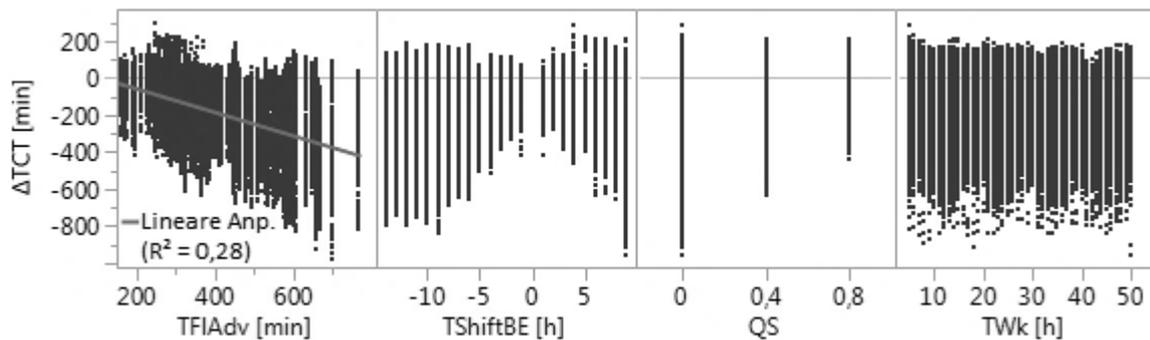


Abb. 5.3-15 – Streudiagramme für den 4. Gewichtungssatz (1-1-1)

5. Gewichtungssatz (0-1-1, „ambitionierter“ Reisender)

Dies ist der einzige Gewichtungssatz, der mit +3,7 min einen – wenn auch nur leicht – positiven ΔTCT -Durchschnitt aufweist (vgl. Abb. 5.3-16). In 44,8 % aller Fälle ist ΔTCT negativ, zu 2,4 % Null und zu 52,8 % positiv. Trotz Null-Gewichtung der Reisedauer streut ΔTCT erneut bei steigendem T_{FLAdv} , bei extremen $T_{ShiftBE}$ und bei steigendem T_{Wk} tiefer ins Minus (s. Abb. 5.3-17). ΔTCT wird mit steigendem QS positiver und variiert weniger. Für $QS = 0,8$ liegt der Mittelwert von ΔTCT mit 43,8 min erstmals deutlich im positiven Bereich.

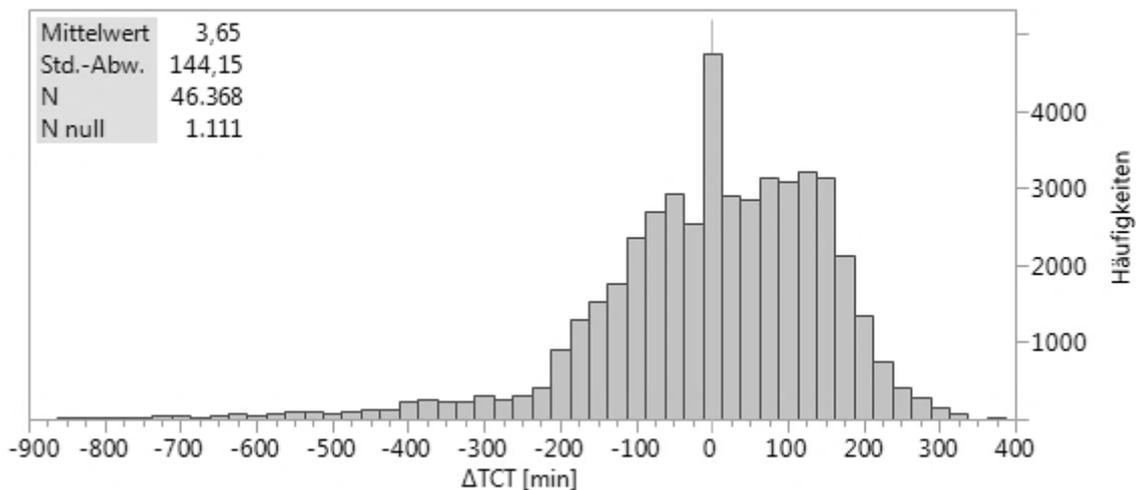


Abb. 5.3-16 – ΔTCT -Verteilung für den 5. Gewichtungssatz (0-1-1)

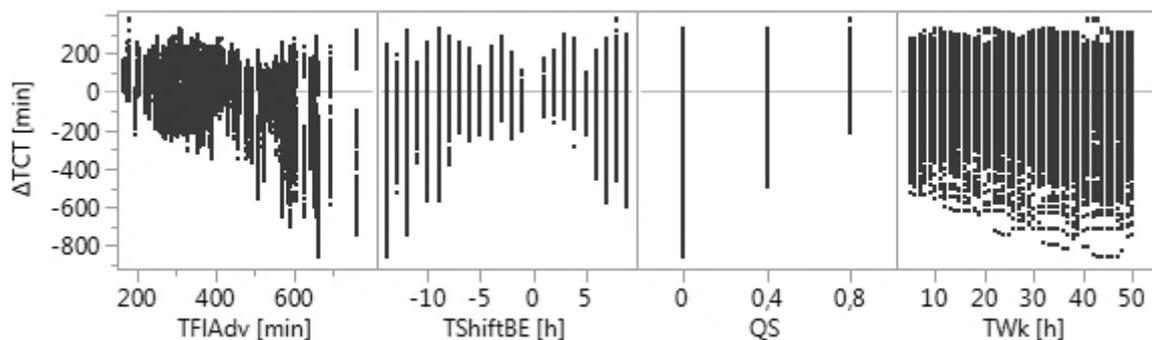


Abb. 5.3-17 – Streudiagramme für den 5. Gewichtungssatz (0-1-1)

6. Gewichtungssatz (1-0-1, „überambitionierter“ Reisender)

ΔTCT ist fast durchweg negativ, nämlich in 99,6 % aller Fälle (vgl. Abb. 5.3-18). Lediglich bei geringeren T_{FLAdv} , positiv-extremen $T_{ShiftBE}$, $QS = 0,8$ und T_{Wk} zwischen 10 und 16 Stunden kommen positive ΔTCT gehäuft vor (s. Abb. 5.3-19).

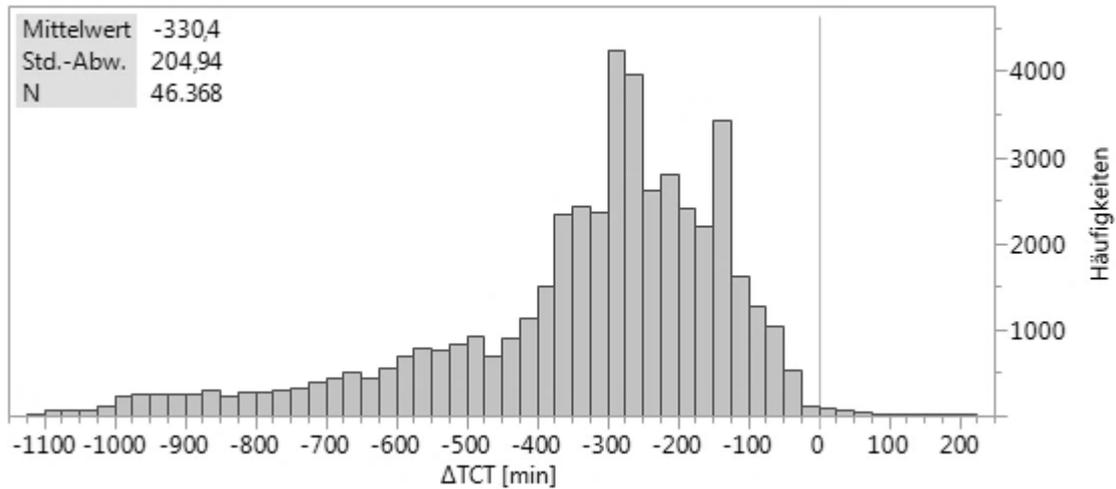


Abb. 5.3-18 – ΔTCT -Verteilung für den 6. Gewichtungssatz (1-0-1)

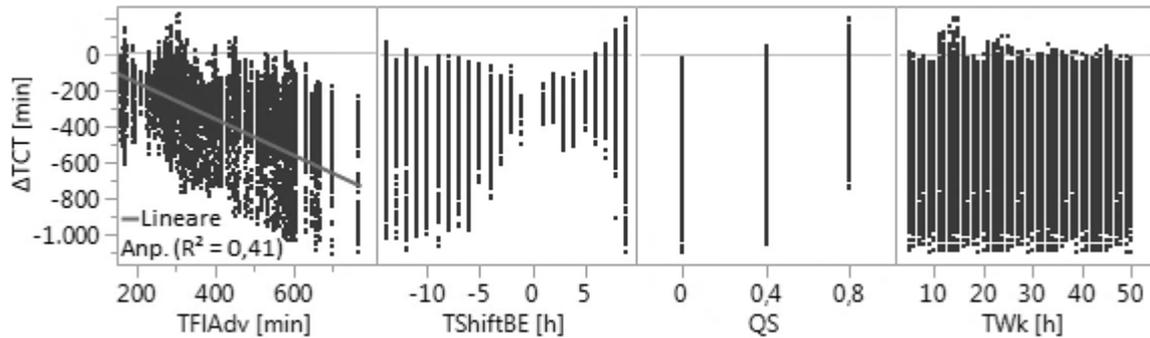


Abb. 5.3-19 – Streudiagramme für den 6. Gewichtungssatz (1-0-1)

7. Gewichtungssatz (1-1-0, „unterambitionierter“ Reisender)

Auch hier ist ΔTCT in fast allen Fällen (97,6 %) negativ (vgl. Abb. 5.3-20). Wie auch sonst bei $w_{Time} = 1$ geht ΔTCT mit steigendem T_{FlAdv} immer weiter ins Minus (siehe Abb. 5.3-21). Mit wachsendem QS steigt auch der jeweilige Durchschnittswert von ΔTCT .

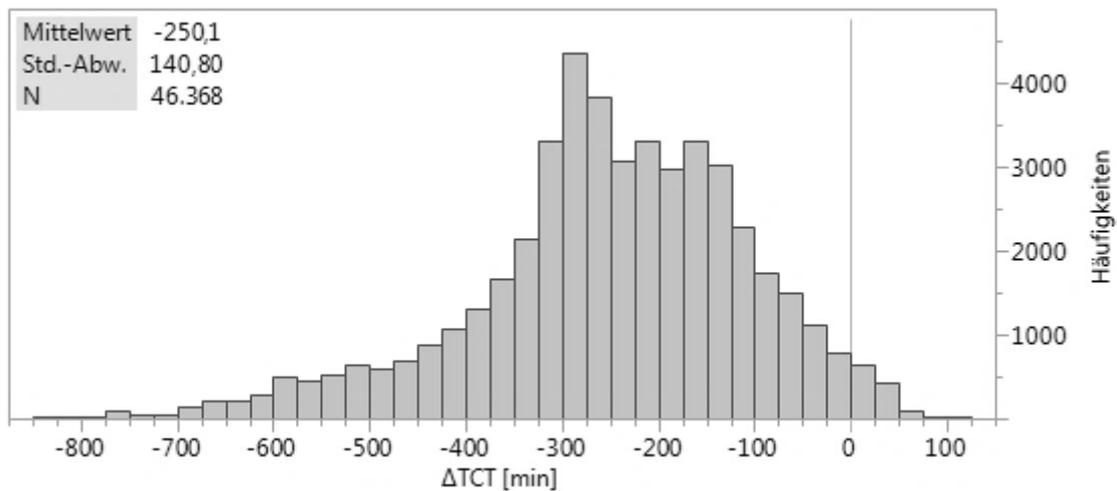


Abb. 5.3-20 – ΔTCT -Verteilung für den 7. Gewichtungssatz (1-1-0)

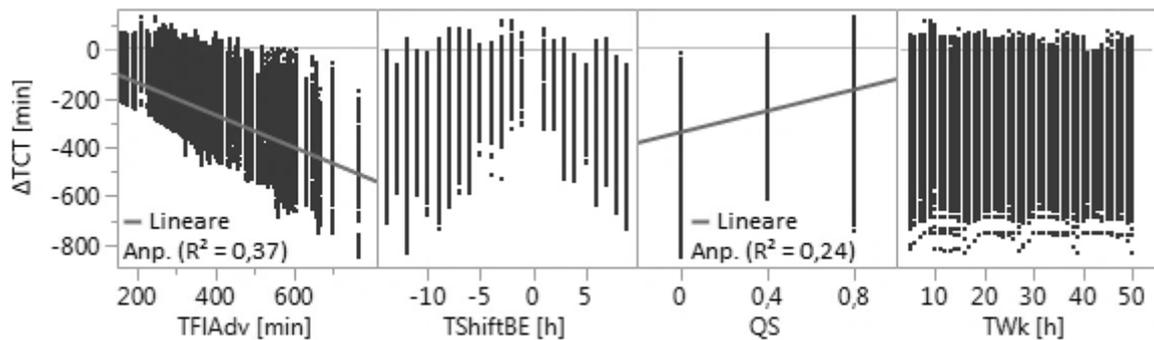


Abb. 5.3-21 – Streudiagramme für den 7. Gewichtungssatz (1-1-0)

5.3.4 Einzelbetrachtung von Städtepaaren

In diesem konkreten Anwendungsfall kann die Zeitkosten-Differenz auch für einzelne Städtepaare betrachtet werden. Tab. 5.3-1 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen von ΔTCT für die 20 wichtigsten Städtepaare und die sieben verschiedenen Gewichtungssätze.

So wurde beispielsweise gefunden, dass für die ökonomisch eminent wichtigen Nonstop-Atlantikquerungen (zwischen New York/Washington/Boston/Chicago/Miami/Toronto und London/Paris/Zürich/Frankfurt) in Westrichtung ΔTCT im Mittel für alle Gewichtungssätze deutlich negativ (insgesamt $\emptyset = -146$ min) oder Null (beim Satz 0-1-0) ist.

In transatlantischer Ostrichtung besteht beim auf Ausgeruhtheit fokussierten Satz 0-1-0 stets ein geringfügiges Plus für Unterschallflug ($\emptyset = 7$ min); insgesamt ist Überschall jedoch etwa genauso vorteilhaft wie nach Westen ($\emptyset = -150$ min). Obwohl oben im Satz 0-1-1⁶⁴ durchschnittlich positiv, ist ΔTCT hier stets negativ.

Für Reiseziele, deren Flugdistanz die Reichweite des Überschallflugzeuges knapp übertrifft und wo deshalb ein technischer Stopp eingelegt werden muss (zwischen London/Paris und Los Angeles/San Francisco/Houston/Hongkong/Kapstadt), ergeben sich für den „ambitionierten“ Passagier (Satz 0-1-1) in beide Flugrichtungen erhebliche Zeitkosten-Vorteile durch Unterschallflug ($\emptyset = 159$ min, maximal 275 min).

Bei weit entfernten Städtepaaren wie London – Sydney, New York – Hongkong oder Los Angeles – Sydney kommt die höhere Geschwindigkeit des Überschallflugzeuges über alle Gewichtungssätze hinweg besonders positiv zum Tragen (\emptyset nach Osten: $-313/-264/-232$ min; \emptyset nach Westen: $-261/-246/-240$ min)⁶⁵.

⁶⁴ Siehe Kapitel 5.3.3.

⁶⁵ Als Ausnahme wird für den „ambitionierten“ Passagier (Gewichtungssatz 0-1-1) der Unterschallflug von Los Angeles nach Sydney als günstiger konstatiert.

Gewichtung		1-0-0		0-1-0		0-0-1		1-1-1		0-1-1		1-0-1		1-1-0	
Start	Ziel	\emptyset	σ												
New York	London	-284	0	9	18	-13	30	-182	76	-17	29	-255	47	-237	53
London	New York	-284	0	0	0	-39	42	-107	89	-118	51	-196	126	-179	71
London	Singapur	-331	0	-26	39	-16	51	-141	65	-97	86	-174	37	-262	67
Singapur	London	-331	0	0	0	11	24	-240	175	23	9	-471	152	-166	113
Paris	New York	-305	0	0	0	-64	44	-95	81	-131	43	-198	111	-189	82
New York	Paris	-305	0	10	16	-33	49	-173	82	-25	33	-260	51	-268	46
Los Angeles	London	-293	0	-6	10	59	100	-16	64	152	84	-89	62	-251	49
London	Los Angeles	-293	0	0	0	78	61	19	111	239	32	-211	156	-131	98
Hongkong	London	-180	0	0	0	83	41	-86	118	114	14	-316	142	-73	74
London	Hongkong	-180	0	-11	18	89	35	-16	42	75	78	-63	47	-144	43
London	Sydney	-572	0	-94	135	-145	172	-351	191	-245	281	-707	237	-389	127
Sydney	London	-572	0	-85	120	-45	151	-248	140	-179	264	-488	208	-472	118
London	San Francisco	-295	0	0	0	73	61	19	110	242	39	-196	161	-135	97
San Francisco	London	-295	0	-7	12	63	99	-16	64	156	83	-90	62	-256	47
Houston	London	-277	0	-7	16	-21	50	-37	100	102	46	-181	53	-217	70
London	Houston	-277	0	0	0	7	48	-44	111	92	45	-245	120	-126	92
Washington	London	-300	0	10	20	-16	36	-187	75	-18	29	-274	45	-251	54
London	Washington	-300	0	0	0	-51	50	-126	94	-125	51	-229	121	-187	76
Boston	London	-269	0	8	19	-11	21	-184	76	-17	28	-239	47	-221	54
London	Boston	-269	0	0	0	-38	35	-103	78	-110	51	-178	114	-176	63
London	Chicago	-305	0	0	0	-67	58	-108	94	-115	44	-224	128	-184	80
Chicago	London	-305	0	4	18	-38	53	-165	68	-16	34	-252	45	-271	43
Hong Kong	New York	-590	0	-49	74	-14	43	-346	227	-113	60	-531	248	-323	117
New York	Hongkong	-590	0	-35	57	-37	30	-341	245	-100	44	-685	261	-327	159
Los Angeles	Sydney	-592	0	-4	10	-23	68	-286	161	98	29	-690	162	-360	174
Sydney	Los Angeles	-592	0	-55	79	-88	83	-265	102	-138	126	-350	52	-432	89
London	Miami	-378	0	0	0	-62	39	-227	141	-86	48	-429	153	-220	103
Miami	London	-378	0	5	18	-34	52	-211	80	-5	29	-356	31	-316	70
New York	Zürich	-318	0	4	19	-38	53	-169	85	-18	34	-265	47	-282	45
Zürich	New York	-318	0	0	0	-67	57	-110	98	-119	44	-227	132	-190	82
Kapstadt	London	-326	0	0	0	-40	38	-144	71	117	47	-321	17	-211	91
London	Kapstadt	-326	0	0	1	-42	31	-97	58	148	25	-328	22	-210	102
Paris	Los Angeles	-313	0	0	0	124	82	4	125	275	33	-223	166	-142	107
Los Angeles	Paris	-313	0	-5	11	131	70	-12	69	191	51	-81	71	-268	53
London	Toronto	-285	0	0	0	-38	43	-105	88	-116	52	-197	119	-179	71
Toronto	London	-285	0	9	19	-14	34	-180	74	-18	29	-258	45	-238	52
Singapur	Sydney	-286	0	0	1	1	7	-191	47	-43	39	-285	11	-211	70
Sydney	Singapur	-286	0	0	0	-15	26	-208	84	-120	56	-304	35	-190	72
Frankfurt	New York	-312	0	0	0	-69	55	-106	93	-122	44	-221	127	-189	82
New York	Frankfurt	-312	0	4	19	-38	52	-165	84	-17	34	-258	47	-277	44

Tab. 5.3-1 – *ATCT*-Mittelwerte u. -Standardabweichungen [min], Top-20-Städtepaare

5.4 Sensibilitätsanalyse

Um die Variabilität der Ergebnisse bezüglich der Änderung innerer Modellparameter zu untersuchen, wird eine Empfindlichkeitsanalyse durchgeführt. Dafür wird die gesamte Simulationsreihe neu gerechnet, wobei in jeder Einzelsimulation die ausgewählten Parameter zufällig jeweils auf einen oberen oder unteren als gerade noch plausibel angenommenen Wert variiert werden. Die zu variiierenden Parameter samt ihrer neuen Ausprägungen sind in Tab. 5.4-1 aufgeführt.

Parameter	Standardwert	Untere Variante	Obere Variante
$t_{WDStart}$	8:30 Uhr	8:00 Uhr	9:00 Uhr
T_{WD}	10 h	9 h	11 h
$T_{DepToBed}$	15 min	5 min	30 min
$T_{BedToArr}$	45 min	30 min	60 min
$T_{Transfer}$	60 min	30 min	90 min
$T_{CurbToDep}$	45 min	30 min	60 min
$T_{ArrToCurb,out}$	60 min	30 min	90 min
$T_{ArrToCurb,ret}$	30 min	15 min	45 min
T_{Prep}	60 min	30 min	90 min
$T_{SINight}$	7,25 h	6,5 h	8 h
$t_{NoSINStart}$	11:00 Uhr	10:15 Uhr	11:45 Uhr
$t_{NoSINEnd}$	13:00 Uhr	12:15 Uhr	13:45 Uhr
$t_{NoSIEStart}$	20:00 Uhr	19:15 Uhr	20:45 Uhr
$t_{NoSIEEnd}$	23:15 Uhr	22:30 Uhr	24:00 Uhr
$T_{Adapt,W}$	90 min/d	60 min/d	120 min/d
$T_{Adapt,E}$	60 min/d	30 min/d	90 min/d

Tab. 5.4-1 – In der Sensibilitätsanalyse variierte Parameter

Anschließend werden die zusammengehörigen Zeit-Kosten verglichen, indem die Werte aus der neuen Simulation ΔTCT_{var} von jenen aus der ursprünglichen Simulation subtrahiert werden. Somit entsteht die Differenz $d\Delta TCT$:

$$d\Delta TCT_i = \Delta TCT_i - \Delta TCT_{var,i} \quad (5-4)$$

Im Ergebnis beträgt der Durchschnittswert von $d\Delta TCT$ 2 min, die Standardabweichung 88 min, das Minimum -766 min und das Maximum 767 min; Abb. 5.4-1 zeigt die relativ symmetrische der Verteilung mit den vereinzelten deutlichen Ausreißern nach unten wie nach oben.

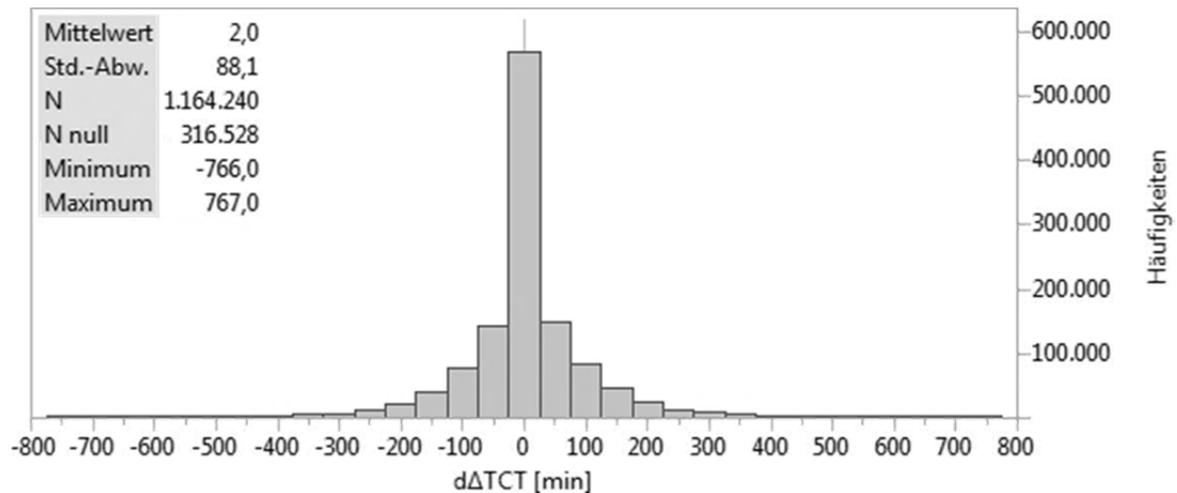


Abb. 5.4-1 – Verteilung von $d\Delta TCT$

In Tab. 5.4-2 sind detaillierte Statistiken zu $d\Delta TCT$ bezogen auf die einzelnen variierten Parameter als auch auf die Gewichtungssätze aufgeführt. Darin ist in der Gesamtperspektive zu erkennen, dass durch den Einfluss einzelner Parametervariationen die Änderung des Erwartungswerts⁶⁶ zwischen ± 10 min beträgt und die Standardabweichung sich zwischen 45 und 47 min bewegt.

In den einzelnen Gewichtungssätzen sind die Standardabweichungen geringer, nämlich bis zu 24 min (5. Satz). Dafür treten höhere Änderungen des Durchschnittswerts auf, was in einer Abweichung von ± 32 min im 4. Satz durch den variierten Parameter T_{WD} kulminiert. Die Sätze 1, 2 und 7 erscheinen (bis auf einzelne ausgenommene Parameter wie $T_{Transfer}$ im 2. Satz sowie $T_{SINight}$ im 7. Satz) relativ robust gegenüber Variationen. In den anderen Sätzen bewirken zwischen drei und sieben variierte Parameter eine Änderung des Erwartungswerts von mehr als 5 min.

Die insgesamt größten Änderungen des Mittelwerts entstehen, in aufsteigender Reihenfolge, durch die variierten Parameter T_{Prep} ($-5,0$ min bei \emptyset_u / $+5,2$ min bei \emptyset_o), $T_{SINight}$ ($-5,0$ / $+5,4$ min), $t_{WDstart}$ ($+6,5$ / $-6,0$ min), T_{WD} ($+8,6$ / $-9,0$ min) sowie $t_{NoSIEEnd}$ ($-10,0$ / $+9,7$ min): Diesen Parametern sollte sowohl bei der Validierung als auch in künftigen Sensibilitätsanalysen die größte Aufmerksamkeit zuteilwerden. Kaum messbaren Einfluss zeigen $T_{ArrToCurb,ret}$, $t_{NoSINstart}$, $t_{NoSINend}$, $t_{NoSIEstart}$ sowie $T_{Adapt,W}$.

⁶⁶ Erwartungswert, Durchschnittswert und Mittelwert werden hier synonym verwendet.

		$t_{WDStart}$	T_{WD}	$T_{DepToBed}$	$T_{BedToArr}$	$T_{Transfer}$	$T_{CurbToDep}$	$T_{ArrToCurb,out}$	$T_{ArrToCurb,ret}$	T_{Prep}	$T_{SINight}$	$t_{NoSINStart}$	$t_{NoSINEnd}$	$t_{NoSIEStart}$	$t_{NoSIEEnd}$	$T_{Adapt,W}$	$T_{Adapt,E}$
Alle Sätze: $\emptyset = 2$ min	\emptyset_u	9	11	3	5	0	1	3	2	-3	-3	2	2	2	-8	2	1
	\emptyset_o	-4	-7	1	-1	4	3	1	2	7	7	2	2	2	12	2	3
	σ_u	47	46	46	46	46	46	47	46	45	46	46	46	46	46	47	47
	σ_o	46	47	47	46	47	47	46	46	47	47	47	47	46	47	46	46
1. Satz (1-0-0): $\emptyset = 0$ min	\emptyset_u	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	\emptyset_o	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	σ_u	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	σ_o	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2. Satz (0-1-0): $\emptyset = 3$ min	\emptyset_u	3	3	2	2	-2	2	2	2	0	0	3	3	3	4	4	3
	\emptyset_o	3	3	4	4	8	4	4	4	6	6	3	4	3	3	2	4
	σ_u	7	7	6	7	6	6	7	6	6	6	7	7	7	7	7	7
	σ_o	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6
3. Satz (0-0-1): $\emptyset = 14$ min	\emptyset_u	25	16	11	15	12	12	16	15	13	-3	14	14	14	-2	16	15
	\emptyset_o	4	12	18	13	17	16	12	14	16	31	15	15	14	30	13	13
	σ_u	20	19	19	19	19	19	19	19	18	18	19	19	19	18	19	19
	σ_o	19	19	20	19	20	19	19	19	20	20	19	19	19	20	19	19
4. Satz (1-1-1): $\emptyset = -8$ min	\emptyset_u	4	24	-3	2	-10	-9	-5	-8	-26	-5	-9	-9	-8	-25	-8	-10
	\emptyset_o	-20	-40	-13	-18	-6	-7	-11	-9	10	-11	-8	-7	-8	9	-8	-6
	σ_u	23	22	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	σ_o	23	23	23	23	23	23	22	23	23	23	23	23	23	22	23	23
5. Satz (0-1-1): $\emptyset = 17$ min	\emptyset_u	33	28	18	23	17	16	20	18	15	-6	16	17	17	-6	13	17
	\emptyset_o	2	6	16	11	17	18	14	16	19	40	19	17	17	40	21	18
	σ_u	24	24	23	23	22	23	23	23	22	22	23	23	23	22	23	23
	σ_o	22	23	23	23	24	24	23	23	24	25	23	23	23	24	23	23
6. Satz (1-0-1): $\emptyset = -10$ min	\emptyset_u	-5	3	-8	-6	-16	-13	-10	-10	-19	-20	-9	-12	-10	-18	-10	-14
	\emptyset_o	-15	-23	-11	-14	-3	-7	-9	-10	-1	0	-11	-8	-10	-2	-10	-5
	σ_u	21	21	22	22	23	22	22	22	22	23	22	22	22	23	22	22
	σ_o	22	23	22	22	21	22	21	22	21	21	22	22	22	21	22	22
7. Satz (1-1-0): $\emptyset = -2$ min	\emptyset_u	0	0	1	1	1	0	-2	-2	-5	9	-2	-2	-2	-6	-1	0
	\emptyset_o	-4	-5	-6	-5	-5	-4	-2	-3	1	-14	-2	-3	-2	1	-3	-4
	σ_u	14	14	14	14	15	14	14	14	15	14	14	14	14	15	14	15
	σ_o	15	14	15	15	14	14	14	14	14	15	14	14	14	14	15	14

Tab. 5.4-2 – $d\Delta TCT$ -Statistiken für Gewichtungssätze und Parametervarianten [min]
(Abweichungen ab 5 min vom Durchschnittswert der jeweiligen Sätze sind grau unterlegt.)

5.5 Diskussion

Auf Basis aller getroffenen Annahmen und Einschränkungen können für die Differenz der Zeit-Kosten zwischen den behandelten Überschall- und Unterschall-Geschäftsreiseflugzeugen folgende Schlüsse gezogen werden (vgl. Tab. 5.5-1):

<i>Satz</i>	<i>1 (1-0-0)</i>	<i>2 (0-1-0)</i>	<i>3 (0-0-1)</i>	<i>4 (1-1-1)</i>	<i>5 (0-1-1)</i>	<i>6 (1-0-1)</i>	<i>7 (1-1-0)</i>
\emptyset	-376	-13	-15	-159	4	-330	-250
σ	129	51	85	156	144	205	141

Tab. 5.5-1 – ΔTCT -Mittelwerte, -Standardfehler in versch. Gewichtungssätzen [min]

Der Überschalljet bietet, über alle Simulationen gesehen, im Mittel einen deutlichen Zeitkosten-Vorteil gegenüber seinem Unterschall-Pendant, bei gleichzeitig starker Streuung der Einzelergebnisse. Volle Gewichtung der Reisedauer wirkt sich stets zum Vorteil des Überschallfluges aus, wohingegen volle Gewichtung von Ausgeruhtheit oder Arbeitszeit die Tendenz, wenn auch in geringerem Ausmaß, zum Unterschall hin verschiebt.

Es gibt explizite Ausnahmen von der Überschall-Dominanz, insbesondere jene des „ambitionierten“ Reisenden (Satz 5). Zudem fällt die Streuung von ΔTCT in der Regel relativ hoch aus, so dass für die meisten Betrachtungsweisen auch positive Werte existieren. Deshalb müssen für eventuelle konkretere Vergleichsfragen auch stets eigene Simulationen durchgeführt werden, um fallweise entscheiden zu können, wodurch der größte zeitliche Nutzen für den Passagier erzielt wird.

Weiterhin konnten regionale sowie spatiale Besonderheiten festgestellt werden, beispielsweise die Überlegenheit des Überschallflugzeuges auf Nonstop-Transatlantik-Routen in beiden Richtungen und seine Schwäche bei Distanzen knapp über seiner Reichweite.

Für die vorangegangenen Analysen wurden von den simulierten Reisen, bei denen alles gleich ist außer dem Terminzeitpunkt, jeweils nur diejenigen mit den bestmöglichen TCT berücksichtigt. Dies geschah unter der Annahme, dass nur die nötige Termindauer feststehe und der Zeitpunkt variabel sei. Wenn man jedoch ebendiese ähnlichen Reisen untereinander vergleicht, kann der implizit wohlbekannte, jedoch selten explizit formulierte Grundsatz, dass das Timing einer Reise entscheidend für ihre Qualität ist, bestätigt werden: Die Differenz zwischen best- und schlechtestmöglichem TCT der verschiedenen Reisemöglichkeiten beträgt für den Überschalljet im Mittel 783 min und maximal 2489 min sowie für den Unterschalljet durchschnittlich 939 min und maximal 3143 min. Diese

erheblichen Unterschiede unterstreichen die Sinnhaftigkeit einer sorgfältigen Reiseplanung.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Ergebnisunsicherheit angesichts der Variabilität innerer Parameter in der Regel relativ gering ausfällt. Vereinzelt jedoch können Parameteränderungen größere Diskrepanzen bewirken, so dass allgemein für jeden speziellen Anwendungsfall eine geeignete Sensibilitätsanalyse vorgesehen werden muss.

Bislang unerwähnt ist die Tatsache, dass der behandelte Überschalljet HISAC-A – wie auch andere jüngere Überschall-Entwürfe – per Design über zwei effiziente Reisegeschwindigkeiten verfügt, um seine Auslegungs-Flugdistanz zu erreichen: Eine im Überschall und eine im hohen Unterschall, in diesem Fall Mach 0,95. Das bedeutet, dass ein Überschallflugzeug, falls opportun, die Möglichkeit hätte, in etwa so langsam wie ein Unterschallflugzeug zu fliegen und dadurch einen eventuellen Zeitkosten-Nachteil größtenteils auszugleichen. Auf diese Weise könnte Passagieren beispielsweise ein voller Nachtschlaf im Flug ermöglicht werden. Für Linienflüge käme dieses Verfahren wegen zweifelhafter Wirtschaftlichkeit kaum in Frage – man könnte schließlich gleich ein deutlich kostengünstigeres Unterschallflugzeug einsetzen. Ein derartig flexibles Überschall-Geschäftsreiseflugzeug beließe seinem Unterschallpendant in zeitlicher Hinsicht, *ceteris paribus*, lediglich die Missionsreichweite als möglichen Vorteil.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit erörtert eine Methodik zur Quantifizierung des zeitbezogenen Nutzens beziehungsweise der konkreten Zeit-Kosten von Flugreisen aus der Perspektive eines Passagiers.

Letzterer wird hauptsächlich als Geschäftsreisender gesehen; zum einen erscheinen nämlich zeitliche Aspekte für diese Gruppe als besonders wichtig, zum anderen stellen Geschäftsleute das relevanteste Passagiersegment für die ursprüngliche motivierende Fragestellung: Unter welchen Umständen bringt Hochgeschwindigkeits- beziehungsweise Überschallflug für Reisende den größten zeitlichen Nutzen?

Um diese und ähnliche Fragestellungen zu untersuchen, wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher die Reise eines einzelnen Passagiers vom Start bis hin zur Rückankunft zuhause mit Hilfe zahlreicher Parameter wie Flugdauer oder Zeitverschiebung simuliert. Dafür werden als Basis feste Termine am Zielort bestimmt, welche der Passagier wahrnehmen muss und um welche Hin- und Rückflug gelegt werden.

Die Simulation verfolgt insbesondere die homöostatische Verfassung des Reisenden, das heißt, seinen körperlichen Zustand der Ausgeruhtheit beziehungsweise des Schlafdefizits. Dafür werden die Schlafphasen während der Reise – also vor allem deren Zeitpunkt, Dauer und Intensität – auf Basis recherchierter Erkenntnisse aus der Schlafwissenschaft abgeschätzt. Ebenso werden Arbeitszeiten des Passagiers auf der Reise nachverfolgt. Aus den drei Zielwerten Reisedauer, Schlafdefizit und Arbeitszeitverlust, welche nach den Präferenzen des Passagiers einzeln gewichtet werden können, wird schließlich ein vereinigtes Gütemaß gebildet, nämlich die *Zeit-Kosten des Reisens TCT* (engl.: *Time Cost of Travel*). Je geringer *TCT*, desto größer die zeitbezogene Güte beziehungsweise der zeitliche Nutzwert einer Reise aus Passagiersicht.

Der Algorithmus wurde in einem ersten Anwendungsfall eingesetzt, um die zeitlich günstigste Flugverbindung für eine bestimmte Geschäftsreise zwischen Hamburg und New York zu finden. Dafür wurden jeweils fünf mögliche Hin- und Rückflüge vorgegeben, für welche die Zeit-Kosten *TCT* einzeln bestimmt wurden. Die Flüge mit den geringsten *TCT* waren schließlich diejenigen, die dem Reisenden empfohlen werden sollten. Diese stellten sich meist als der späteste Hin- und der früheste Rückflug heraus, und zwar sowohl unter den ursprünglichen als auch unter abgewandelten Gewichtungen der Zielwerte. Einzig bei niedriger Gewichtung der Reisedauer fand sich in einer Übernachtung in Hamburg mit anschließendem direktem Rückflug nach New York eine gleichwertige Alternative.

Im zweiten Anwendungsfall wurde schließlich die motivierende Forschungsfrage, nämlich die Umstände zeitbezogener Überlegenheit von Hochgeschwindigkeitsflügen, behandelt. Dafür wurden zunächst die physikalisch-technischen, die regulatorischen sowie die marktökonomischen Rahmenbedingungen des Überschallfluges beschrieben. Danach wurde der gewählte methodische Ansatz erläutert, welcher zwei Geschäftsreiseflugzeug-Pendants – eines Unter- und eines Überschall – auf Flügen zwischen den weltweit wichtigsten Wirtschaftsmetropolen konkurrieren ließ. Als Voraussetzung dafür wurden gesetzeskonforme Überschall-Flugrouten entworfen und anschließend alle Missionsdauern durch physikalisch-numerische Simulationen bestimmt. Dabei stellte sich heraus, dass Überschallflug im Mittel für vier der sieben betrachteten Zielwert-Gewichtungssätze deutlich geringere Zeit-Kosten bot (durchschnittlich 376/159/330/250 min geringer); für die drei Sätze, die die Reisedauer vernachlässigen, war Unterschall für den Passagier etwa gleichwertig (durchschnittlich 13/15/-4 min höhere Zeit-Kosten). Für die wirtschaftlich wichtigen Nonstop-Transatlantikquerungen wurde in Westwie auch in Ostrichtung stets ein Vorteil für Überschallflug festgestellt (durchschnittlich ca. 2,5 h), unter Ausnahme auf Ausgeruhtheit fokussierter Reisen, wo nur unwesentliche Unterschiede auftraten. Schließlich traten die größten Diskrepanzen bezüglich Zeit-Kosten nicht zwischen Unter- und Überschall auf, sondern zwischen Reisen, die sich durch nichts unterschieden außer ihrer Terminansetzung (bei gleicher Termindauer): im Mittel 13 h und maximal 41 h bei Überschall sowie im Mittel 16 h und maximal 52 h bei Unterschall. Dies bedeutet, dass für den Passagier im Zweifel eine kluge Reiseplanung wichtiger sein sollte als die Geschwindigkeit des Flugzeuges. Die generell auftretenden signifikanten Streuungen in den Ergebnissen haben zur Folge, dass letztere nicht verallgemeinert werden dürfen und dass spezielle Fragestellungen individuell und inklusive ihrer eigenen Unsicherheiten zu betrachten sind.

Um diese Unsicherheiten des Modells zu verringern und es dementsprechend aussagekräftiger zu machen, müssen zunächst die getroffenen Grundannahmen weiter validiert werden. Die größten Herausforderungen stellen individuelle Verhaltensweisen des Passagiers auf der Reise sowie die Modellierung seines Schlafs dar. Um beides besser zu erforschen, sind derartige Studien, wie sie in dieser Arbeit zur vorläufigen Validierung durchgeführt wurden, unter Teilnahme zahlreicher Flugreisender erforderlich.

Das Modell sollte, solange seine Validierung nicht fortgeschritten ist, weniger als Grundlage für Aussagen allgemeiner Art, sondern eher für akademische Vergleichsstudien auf Basis zugrunde gelegter innerer Parametersätze dienen. Vorläufig sind also keine vermeintlich genauen Vorhersagen zu treffen, sondern vielmehr Zusammenhänge zwischen verschiedenen Einflussfaktoren sowie Hinweise auf Trends und Tendenzen aufzudecken.

Davon unabhängig existieren einige Möglichkeiten zur kurzfristigen punktuellen Verbesserung des Modells. So kann beispielsweise aufgrund aus der Literatur bekannter Zusammenhänge die Schlaflatenz als Funktion von Tageszeit und Homöostase formuliert werden, wodurch gleichzeitig die umständlich implementierten und „absolutistischen“ Zonen des Wachbleibens mithilfe hoher Schlaflatenzen abgebildet und ersetzt werden könnten. Weiterhin könnte eine unabhängige Gewichtung der Zielwerte für Hin- und Rückreise vorgesehen werden, um verschiedene Präferenzen abbilden zu können.

Aus Sicht der Forschung kann das Modell für ähnliche Fragen des Luftfahrtbetriebs eingesetzt werden, wie sie in dieser Arbeit behandelt wurden, nämlich für die Aufschlüsselung der Zusammenhänge zwischen Reiseziel, Reiseplan, Flugplan, Biorhythmus und zeitbezogene Reisegüte. Als Anwender kommen neben der öffentlich-rechtlichen Forschung auch Airlines in Frage, welche den Algorithmus beispielsweise verwenden könnten, um ihren Flugplan mit dem Nutzwert für Passagiere bestmöglich in Einklang zu bringen.

Eine interessante mittelfristige Einsatzmöglichkeit des Modells wäre ein kommerzieller Dienst zur individuellen Reiseplanung. Dieser könnte entweder im Rahmen von Flugbuchungen als Zusatzservice oder als alleinstehende Anwendung („App“) angeboten werden. Für jeder Passagier bzw. Kunden wäre dabei die Möglichkeit vorzusehen, das Modell so auf seine persönlichen Gegebenheiten und Präferenzen einzustellen, wie es letztendlich auch zum Zwecke plausibler Aussagekraft und Validität notwendig ist.

Literaturverzeichnis

Achermann, Peter/Borbély, Alexander A. (2003): „Mathematical models of sleep regulation“. In: *Frontiers in Bioscience* 8, S. s683-93

Aerion Corp. (2016): „Aerion supersonic business jet“. URL: www.aerionsupersonic.com [Stand: 15. April 2016]

Aeschbach, Daniel et al. (1994): „Sleep in a sitting position - effect of triazolam on sleep stages and EEG power spectra“. In: *Psychopharmacology* 114, H. 2, S. 209–214

Aeschbach, Daniel (2013): „Jetlag - Grundlagen und Behandlungsansätze“. In: *Schlaf* 2, H. 1, S. 30–35

Aguilera, Anne (2008): „Business travel and mobile workers“. In: *Transportation Research Part A* 42, H. 8, S. 1109–1116

Åkerstedt, Torbjörn (1995): „Work hours, sleepiness and the underlying mechanisms“. In: *Journal of Sleep Research* 4, H. Suppl. 2, S. 15–22

Åkerstedt, Torbjörn/Folkard, Simon (1981): „Circadian Variation of Experimentally Displaced Sleep“. In: *Sleep* 4, H. 2, S. 159–169

Åkerstedt, Torbjörn/Folkard, Simon (1996): „Predicting Sleep Latency From the Three-Process Model of Alertness Regulation“. In: *Psychophysiology* 33, H. 4, S. 385–389

Åkerstedt, Torbjörn/Folkard, Simon (1997): „The three-process model of alertness and its extension to performance, sleep latency, and sleep length“. In: *Chronobiology international* 14, H. 2, S. 115–123

Åkerstedt, Torbjörn/Folkard, Simon/Portin, Christian (2004): „Predictions from the Three-Process Model of Alertness“. In: *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 75, H. 3, S. A75-A83

Åkerstedt, Torbjörn/Kecklund, Göran/Knutsson, Anders (1991): „Spectral analysis of sleep electroencephalography in rotating three-shift work“. In: *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 17, H. 5, S. 330–336

Arendt, Josephine et al. (1995): „Melatonin and adjustment to phase shift“. In: *Journal of Sleep Research* 4, H. 2, S. 74–79

- Aschoff, Jürgen et al. (1975): „Re-entrainment of circadian rhythms after phase shifts of the zeitgeber“. In: *Chronobiologia*, H. 2, S. 2–23
- Beersma, Domien G. M./Gordijn, Marijke C. M. (2007): „Circadian control of the sleep–wake cycle“. In: *Physiology & Behavior* 90, H. 2-3, S. 190–195
- Belenky, Gregory et al. (2003): „Patterns of performance degradation and restoration during sleep restriction and subsequent recovery: a sleep dose-response study“. In: *Journal of Sleep Research* 12, H. 1, S. 1–12
- Bloch, Konrad E. (1997): „Polysomnography: a systematic review“. In: *Technology and Health Care* 5, H. 4, S. 285–305
- Borbély, Alexander A. (1982): „A two process model of sleep regulation“. In: *Human neurobiology* 1, H. 3, S. 195–204
- Borbély, Alexander A. et al. (1989): „Sleep initiation and initial sleep intensity: interactions of homeostatic and circadian mechanisms“. In: *Journal of biological rhythms* 4, H. 2, S. 149–160
- Borbély, Alexander A./Achermann, Peter (1999): „Sleep homeostasis and models of sleep regulation“. In: *Journal of biological rhythms* 14, H. 6, S. 557–568
- Breure, Adrienne/van Meel, Juriaan (2003): „Airport offices: facilitating nomadic workers“. In: *Facilities* 21, H. 7/8, S. 175–179
- Brey, Raúl/Walker, Joan L. (2011): „Latent temporal preferences: An application to airline travel“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45, H. 9, S. 880–895
- BTN Group (Hg.) (2012): „The Frequent Traveler. Finding a Balance“ (= Business Travel News). URL: <http://businesstravelnews.texterity.com/businesstravelnews/20121022> [Stand: 15. April 2016]
- Burgess, Helen J./Eastman, Charmane I. (2005): „The dim light melatonin onset following fixed and free sleep schedules“. In: *Journal of Sleep Research* 14, H. 3, S. 229–237
- Buscemi, N. et al. (2006): „Efficacy and safety of exogenous melatonin for secondary sleep disorders and sleep disorders accompanying sleep restriction: meta-analysis“. In: *BMJ (British Medical Journal)* 332, H. 7538, S. 385–393

- Carrier, Julie et al. (1997): „Sleep and morningness-eveningness in the 'middle' years of life (20-59 y)“. In: *Journal of Sleep Research* 6, H. 4, S. 230–237
- Ciobanu, Catalin/Fallert, Stefan/Lebunetel, Vincent (Hg.) (2012): „Stress Triggers for Business Travelers (Survey) [CWT Solutions Group, 2012]“. CWT Solutions Group. URL: http://www.carlsonwagonlit.com/export/sites/cwt/de/countries/de/downloads/Stress_Triggers_for_Business_Travelers.pdf [Stand: 15. April 2016]
- Cliatt, Larry J. et al. (2014): „A Flight Research Overview of WSPR, a Pilot Project for Sonic Boom Community Response“. In: *32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference*
- Coulouvrat, François (2009): The Challenges of Defining an Acceptable Sonic Boom Overland. AIAA paper 2009-3384
- Coulouvrat, François/Makino, Yoshikazu/Sparrow, Victor W. (2009): Status of Sonic Boom Knowledge. ICAO Information Paper CAEP/8-IP/99
- Czeisler, Charles A. et al. (1980): „Human Sleep - Its Duration and Organization Depend on Its Circadian Phase“. In: *Science* 210, H. 12, S. 1264–1267
- Daan, Serge/Beersma, Domien G. M./Borbély, Alexander A. (1984): „Timing of human sleep: recovery process gated by a circadian pacemaker“. In: *American Journal of Physiology* 246, H. 2 Pt 2, S. R161-83
- Davies, Ronald E. G. (1998): *Supersonic (Airliner) Non-Sense. A Case Study in Applied Market Research*. McLean, Virginia, USA: Paladwr Press
- Deremaux, Yann/Stoufflet, Bruno/Saint Martin, Philippe de (2009): Executive Public Summary: Final aircraft configuration families. HISAC consortium.
- Dickson, Neil (2013): „ICAO Noise Standards“. International Civil Aviation Organization. URL: www.icao.int/Meetings/Green/Documents/day%201pdf/session%202/2-Dickson.pdf [Stand: 15. April 2016]
- Dijk, Derk-Jan (2005): „Timing and Consolidation of Human Sleep, Wakefulness, and Performance by a Symphony of Oscillators“. In: *Journal of Biological Rhythms* 20, H. 4, S. 279–290
- Dijk, Derk-Jan/Czeisler, Charles A. (1994): „Paradoxical timing of the circadian rhythm of sleep propensity serves to consolidate sleep and wakefulness in humans“. In: *Neuroscience Letters* 166, H. 1, S. 63–68

Doganis, Rigas (2010): *Flying Off Course. Airline Economics and Marketing*. 4th ed. London, New York: Routledge

DRV (Hg.) (2013): „Studie Business Travel 2013“. Berlin: Dt. Reiseverband. URL: http://www.chefsache-businessstravel.de/wp-content/uploads/2015/09/DRV_130306_Studie_Business_Travel_2013_Kurz.pdf [Stand: 15. April 2016]

DRV (Hg.) (2014): „Studie Business Travel 2014“. Berlin: Dt. Reiseverband. URL: http://www.chefsache-businessstravel.de/wp-content/uploads/2015/09/DRV_Business_Travel_2014_final_WEB.pdf [Stand: 15. April 2016]

Eastman, Charmane I. et al. (2005): „Advancing Circadian Rhythms Before Eastward Flight: A Strategy to Prevent or Reduce Jet Lag“. In: *Sleep* 28, H. 1, S. 33–44

Eastman, Charmane I./Burgess, Helen J. (2009): „How to Travel the World Without Jet Lag“. In: *Sleep Medicine Clinics* 4, H. 2, S. 241–255

Endo, Shiro/Yamamoto, Takuji/Sasaki, Mitsuo (1975): „Effects of time zone changes on sleep“. In: *Jikeikai Medical Journal*, H. 25, S. 249–268

Flight International (2013): „Concorde Special Report“. In: *Flight International* 184, H. 5412

Flower, David J. C./Irvine, David/Folkard, Simon (2003): „Perception and Predictability of Travel Fatigue after Long-Haul Flights“. In: *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 74, H. 2, S. 173–179

Gaillaud, Elodie et al. (2008): „Sharp and sleepy: evidence for dissociation between sleep pressure and nocturnal performance“. In: *Journal of Sleep Research* 17, H. 1, S. 11–15

Gollnick, Volker (2004): *Untersuchungen zur Bewertung der Transporteffizienz verschiedener Verkehrsmittel (Dissertation)*. Technische Universität München

Graeber, R. Curtis (Hg.) (1986): *Crew Factors in Flight Operations: IV. Sleep and Wakefulness in International Aircrews*. Washington, D.C.: NASA (= Technical Memorandum TM-88231)

Gundel, A./Spencer, M. B. (1999): „A Circadian Oscillator Model Based on Empirical Data“. In: *Journal of Biological Rhythms* 14, H. 6, S. 517–524

- Gustafson, Per (2012): „Travel time and working time: What business travellers do when they travel, and why“. In: *Time & Society* 21, H. 2, S. 203–222
- Haimov, Iris/Arendt, Josephine (1999): „The prevention and treatment of jet lag“. In: *Sleep Medicine Reviews* 3, H. 3, S. 229–240
- Hayashi, Mitsuo/Abe, Akiko (2008): „Short daytime naps in a car seat to counteract daytime sleepiness: The effect of backrest angle“. In: *Sleep and Biological Rhythms* 6, H. 1, S. 34–41
- Hensher, David A. (2001): „Measurement of the Valuation of Travel Time Savings“. In: *Journal of Transport Economics and Policy* 35, H. 1, S. 71–98
- Herxheimer, Andrew/Petrie, Keith J. (2002): „Melatonin for the prevention and treatment of jet lag“. In: *The Cochrane Library*, H. 2
- Hess, Stephane/Adler, Thomas (2011): „An analysis of trends in air travel behaviour using four related SP datasets collected between 2000 and 2005“. In: *Journal of Air Transport Management* 17, H. 4, S. 244–248
- Hess, Stephane/Adler, Thomas/Polak, John W. (2007): „Modelling airport and airline choice behaviour with the use of stated preference survey data“. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 43, H. 3, S. 221–233
- Hess, Stéphane/Bierlaire, Michel/Polak, John W. (2005): „Estimation of value of travel-time savings using mixed logit models“. In: *Transportation Research Part A* 39, H. 2, S. 221–236
- Holley, David/Jain, Juliet/Lyons, Glenn (2008): „Understanding Business Travel Time and Its Place in the Working Day“. In: *Time & Society* 17, H. 1, S. 27–46
- Horne, James (2004): „Is there a sleep debt?“. In: *Sleep* 27, H. 6, S. 1048–1049
- Horne, James/Anderson, Clare/Platten, Charlotte (2008): „Sleep extension versus nap or coffee, within the context of ‘sleep debt’“. In: *Journal of Sleep Research* 17, H. 4, S. 432–436
- Hume, Kenneth I./Van, Fiona/Watson, Alison (1998): „A field study of age and gender differences in habitual adult sleep“. In: *Journal of Sleep Research* 7, H. 2, S. 85–94

- Jain, Juliet/Lyons, Glenn (2008): „The gift of travel time“. In: *Journal of Transport Geography* 16, H. 2, S. 81–89
- Jewett, Megan E. et al. (1999): „Dose-response relationship between sleep duration and human psychomotor vigilance and subjective alertness“. In: *Sleep* 22, S. 171–179
- Kolla, Bhanu P./Auger, R. Robert (2011): „Jet lag and shift work sleep disorders: How to help reset the internal clock“. In: *Cleveland Clinic Journal of Medicine* 78, H. 10, S. 675–684
- Kronholm, Erkki et al. (2009): „Self-reported sleep duration and cognitive functioning in the general population“. In: *Journal of Sleep Research* 18, H. 4, S. 436–446
- Kryger, Meir H./Roth, Tom/Dement, William C. (2011): *Principles and practice of sleep medicine*. 5th ed. Philadelphia, PA: Saunders/Elsevier
- Lamond, Nicole et al. (2007): „The dynamics of neurobehavioural recovery following sleep loss“. In: *Journal of Sleep Research* 16, H. 1, S. 33–41
- Lassen, Claus (2010): „Individual Rationalities of Business Travel“. In: Beaverstock, Jonathan V. et al. (Hg.): *International Business Travel in the Global Economy*. ebrary, Inc. Farnham, Surrey, Burlington, VT: Ashgate (= Transport and mobility), S. 177–194
- Lavie, Peretz (1986): „Ultrashort sleep-waking schedule. III. ‘Gates’ and ‘Forbidden zones’ for sleep“. In: *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 63, H. 5, S. 414–425
- Lazar, Alpar S. et al. (2013): „Circadian period and the timing of melatonin onset in men and women: predictors of sleep during the weekend and in the laboratory“. In: *Journal of Sleep Research* 22, H. 2, S. 155–159
- Liebhardt, Bernd/Gollnick, Volker/Luetjens, Klaus (2011a): Estimation of the Market Potential for Supersonic Airliners via Analysis of the Global Premium Ticket Market. AIAA Aviation Conference 2011, Virginia Beach, Virginia, USA. URL: <http://elib.dlr.de/75274/>
- Liebhardt, Bernd/Linke, Florian/Dahlmann, Katrin (2014): „Supersonic Deviations: Assessment of Sonic-Boom-Restricted Flight Routing“. In: *AIAA Journal of Aircraft* 51, H. 6, S. 1987–1996

- Liebhardt, Bernd/Lütjens, Klaus (2011b): An Analysis of the Market Environment for Supersonic Business Jets. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK) 2011, Bremen. URL: <http://elib.dlr.de/75275/>
- Littner, Michael et al. (2003): „Practice parameters for the Role of Actigraphy in the Study of Sleep and Circadian Rhythms: An Update for 2002“. In: *Sleep* 26, H. 3, S. 337–341
- Lowden, Arne/Åkerstedt, Torbjörn (1998): „Retaining home-base sleep hours to prevent jet lag in connection with a westward flight across nine time zones“. In: *Chronobiology international* 14, H. 4, S. 365–376
- Lowden, Arne/Åkerstedt, Torbjörn (1999): „Eastward long distance flights, sleep and wake patterns in air crews in connection with a two-day layover“. In: *Journal of Sleep Research* 8, H. 1, S. 15–24
- Lührs, Benjamin/Linke, Florian (2014): Erweiterung eines Trajektorienrechners zur Nutzung meteorologischer Daten für die Optimierung von Flugzeugtrajektorien. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (Hg.). Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014, Augsburg. URL: <http://elib.dlr.de/90935/>
- Lyons, Glenn (2013): „Business travel — The social practices surrounding meetings“. In: *Research in Transportation Business & Management* 9, S. 50–57
- Lyons, Glenn/Urry, John (2005): „Travel time use in the information age“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 39, H. 2-3, S. 257–276
- Mackie, Peter J./Jara Díaz, Sergio/Fowkes, Anthony S. (2001): „The value of travel time savings in evaluation“. In: *Transportation Research Part E* 37, H. 1, S. 91–106
- Manci, Karen M. et al. (1988): *Effects of Aircraft Noise and Sonic Booms on Domestic Animals and Wildlife: A Literature Synthesis*. U.S. Fish and Wildlife Service (Hg.). URL: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA201966> [Stand: 15. April 2016]
- Mason, Keith J. (2002): „Future Trends In Business Travel Decision Making“. In: *Journal of Air Transportation* 7, H. 1, S. 47–68
- Mason, Keith J./Dudley, Ian (2006): „Transatlantic business traveller decision drivers: Nationality & product attribute differentials“. New York City: Cranfield University (= 47th TRF Conference). URL: http://www.trforum.org/forum/downloads/2006_5AMason_presentation.pdf [Stand: 15. April 2016]

McKenna, Benjamin S. et al. (2007): „The effects of one night of sleep deprivation on known-risk and ambiguous-risk decisions“. In: *Journal of Sleep Research* 16, H. 3, S. 245–252

Mokhtarian, Patricia L./Salomon, Ilan (2001): „How derived is the demand for travel? Some conceptual and measurement considerations“. In: *Transportation Research Part A* 35, H. 8, S. 695–719

Morris, Peter (2012): „Ascend Corporate Travel Survey 2012“. Flightglobal Insight Group (Hg.). URL: www.ascendworldwide.com/download/Corporate_TravelSurvey_2012.pdf [Stand: 15. April 2016]

Morris, Peter (2014): „Ascend Corporate Travel Survey 2014“. Flightglobal Insight Group (Hg.). URL: www.itm.org.uk/resources/doc/events/event-presentations/Ascend_Presentation_Peter_Morris.pdf [Stand: 15. April 2016]

NASA (2011): „Fixing the Sound Barrier. Three Generations of U.S. Research into Sonic Boom Reduction“. URL: http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/noise_emissions/supersonic_aircraft_noise/media/NASA%20Presentation.pdf [Stand: 25. Juni 2015]

Nicholson, A. N. et al. (1986): „Sleep After Transmeridian Flights“. In: *The Lancet* 328, H. 8517, S. 1205–1208

Nicholson, A. N./Stone, Barbara M. (1987): „Influence of back angle on the quality of sleep in seats“. In: *Ergonomics* 30, H. 7, S. 1033–1041

Ohayon, Maurice M. et al. (2004): „Meta-analysis of Quantitative Sleep Parameters From Childhood to Old Age in Healthy Individuals: Developing Normative Sleep Values Across the Human Lifespan“. In: *Sleep* 27, H. 7, S. 1255–1273

Oshagbemi, Titus (1995): „Management development and managers' use of their time“. In: *Journal of Management Development* 14, H. 8, S. 19–34

Pompl, Wilhelm/Schuckert, Markus/Möller, Claudia (2007): *Luftverkehr. Eine ökonomische und politische Einführung*. 5., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (= Springer-Lehrbuch)

Rechtschaffen, Allan/Kales, Anthony (1968): *A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office

Robertson, K. A./Spencer, M. B./Foster, S. P. (2006): „Sleep of aircrew following a 12-h time zone change“. In: *Journal of Sleep Research* 15, H. 1, S. 186

Rockwell, Donald A. (1975): „The 'Jet Lag' Syndrome“. In: *Western Journal of Medicine* 122, H. 5, S. 419

Sabre Corp. (2015): „Aviation Data Intelligence (ADI)“.

URL: http://www.sabreairlinesolutions.com/home/software_solutions/airports/
[Stand: 15. April 2016]

Samel, Alexander/Wegmann, Hans M./Vejvoda, Martin (1995): „Jet lag and sleepiness in aircrew“. In: *Journal of Sleep Research* 4, H. 2, S. 30–36

Selvi, Yavuz et al. (2007): „Mood changes after sleep deprivation in morningness-eveningness chronotypes in healthy individuals“. In: *Journal of Sleep Research* 16, H. 3, S. 241–244

Senna, Luiz A. D. S. (1994): „The influence of travel time variability on the value of time“. In: *Transportation* 21, H. 1, S. 203–228

Shephard, Roy J. (1984): „Sleep, Biorhythms and Human Performance“. In: *Sports Medicine* 1, H. 1, S. 11–37

Signal, T. Leigh/Gale, Jesse/Gander, Philippa H. (2005): „Sleep Measurement in Flight Crew: Comparing Actigraphic and Subjective Estimates to Polysomnography“. In: *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 76, H. 11, S. 1058–1063

Spiegel, Karine/Leproult, Rachel/van Cauter, Eve (1999): „Impact of sleep debt on metabolic and endocrine function“. In: *The Lancet* 354, H. 9188, S. 1435–1439

Stoufflet, Bruno et al. (2008): *Design of a Small Supersonic Transport Aircraft with High Environmental Constraints*. Red Hook, NY: Curran Associates, Inc.: Curran Associates, Inc. (= Proceedings of the 2008 International Council of Aeronautical Sciences (ICAS))

Strogatz, Steven H./Kronauer, Richard E./Czeisler, Charles A. (1987): „Circadian pacemaker interferes with sleep onset at specific times each day: role in insomnia“. In: *American Journal of Physiology* 253, H. 1 Pt 2, S. R172-8

Suhner, Andrea et al. (1998): „Comparative Study to Determine the Optimal Melatonin Dosage form for the Alleviation of Jet Lag“. In: *Chronobiology International* 15, H. 6, S. 655–666

- Taillard, Jacques/Philip, Pierre/Bioulac, Bernard (1999): „Morningness/eveningness and the need for sleep“. In: *Journal of Sleep Research* 8, H. 4, S. 291–296
- Takahashi, Masaya/Nakata, Akinori/Arito, Heihachiro (2002): „Disturbed sleep-wake patterns during and after short-term international travel among academics attending conferences“. In: *International archives of occupational and environmental health* 75, H. 6, S. 435–440
- Teichert, Thorsten/Shehu, Edlira/Wartburg, Iwan von (2008): „Customer segmentation revisited: The case of the airline industry“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 42, H. 1, S. 227–242
- Torsvall, Lars et al. (1989): „Sleep on the Night Shift: 24-Hour EEG Monitoring of Spontaneous Sleep/Wake Behavior“. In: *Psychophysiology* 26, H. 3, S. 352–358
- Urry, John (2002): „Mobility and Proximity“. In: *Sociology* 36, H. 2, S. 255–274
- van Dongen, Hans P. A. et al. (2003a): „The Cumulative Cost of Additional Wakefulness: Dose-Response Effects on Neurobehavioral Functions and Sleep Physiology From Chronic Sleep Restriction and Total Sleep Deprivation“. In: *Sleep*, H. 2, S. 117–126
- van Dongen, Hans P. A./Rogers, Naomi L./Dinges, David F. (2003b): „Sleep debt: Theoretical and empirical issues“. In: *Sleep and Biological Rhythms* 1, H. 1, S. 5–13
- Wardman, Mark (1988): „The Value of Travel Time“. In: *Journal of Transport Economics and Policy* 32, H. 3, S. 285–316
- Welge, Harry R. et al. (2010): N+2 Supersonic Concept Development and Systems Integration. NASA/CR-2010-216842. National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Hg.). URL: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100030607.pdf> [Stand: 15. April 2016]
- Wilkinson, R. T./Edwards, R. S./Haines, E. (1966): „Performance following a night of reduced sleep“. In: *Psychonomic Science* 5, H. 1, S. 471–472
- Winfrey, Arthur T. (1983): „Impact of a circadian clock on the timing of human sleep“. In: *American Journal of Physiology* 245, H. 4, S. R497-504
- Zhou, Xuan et al. (2012): „Mismatch between subjective alertness and objective performance under sleep restriction is greatest during the biological night“. In: *Journal of Sleep Research* 21, H. 1, S. 40–49

Anhang

Anhang A. Fragebogen der Passagierumfrage

Umfrage zur zeitlichen Flugpräferenzen von Geschäftsreisenden auf der Langstrecke



1. Wohin fliegen Sie heute?

2. Wie oft und wohin fliegen Sie geschäftlich auf der Langstrecke in der Business- oder First-Klasse?

3. Wie viel Zeit benötigen Sie durchschnittlich für den Weg vom Wohnort zum Flughafen und für den Weg vom Flughafen zum Arbeitsort am Zielort?

4. Wählen Sie bitte für folgende Flüge jeweils eine Abflug- und Ankunftszeit nach Ihrem Wunsch und unabhängig voneinander.

Flug 1

Lokale Abflugzeit

06:00 07:00 08:00 09:00 10:00

Lokale Ankunftszeit

06:00 07:00 08:00 09:00 10:00

Flug 2

Lokale Abflugzeit

18:00 19:00 20:00 21:00 22:00

Lokale Ankunftszeit

18:00 19:00 20:00 21:00 22:00

Flug 3

Biologische Ankunftszeit (innere Uhr)

06:00 07:00 08:00 09:00 10:00

Lokale Ankunftszeit

06:00 07:00 08:00 09:00 10:00

5. Geben Sie bitte für jeden Flug aus Frage 4 an, welche der beiden Zeiten für Sie wichtiger sind. Gehen Sie dabei vom Hinflug einer Geschäftsreise aus (Abflugzeit oder Ankunftszeit).

6.1 Können Sie im Businessclass-Sitzkomfort eine erholsame Nacht verbringen? Wenn ja, wie viele Flugstunden benötigen Sie für eine erholsame Nacht in Businessclass-Komfort, wenn am folgenden Tag wichtige Termine anstehen?

_____Stunden

6.2. Können Sie sich vorstellen, einen Nachtflug in Economy-Class-Komfort zu verbringen? Wenn ja, wie viele Flugstunden bräuchten Sie, um sich zu erholen und am folgenden Tag wichtige Termine wahrnehmen zu können?

_____Stunden

6.3 Bis zu wie viele Flugstunden würden Sie sich in der Businessclass zumuten, um am selben Tag noch Arbeitstermine wahrzunehmen?

_____Stunden

6.4 Bis zu wie viele Flugstunden würden Sie sich in der Economyclass zumuten, um am selben Tag noch Arbeitstermine wahrzunehmen?

_____Stunden

6.5 Würden Sie in Economy-class Komfort reisen, wenn sie mit einem Überschallflug bis zu 50% der aktuellen Flugdauer sparen könnten?

a Ja b Nein

6.6 Bevorzugen Sie bei langen Flügen einen Nachtflug? Wenn ja ab wie viele Flugstunden fliegen Sie lieber nachts?

_____Stunden

7. Welchen Anteil der Flugdauer eines Tagesfluges verbringen Sie mit Arbeit?

_____Prozent

8. Stellen Sie sich vor, Sie hätten die Wahl, statt eines normalen Business-Class-Fluges, ein deutlich schnelleres Überschallflugzeug zu buchen, jedoch mit Economyclass-Sitzkomfort. Welchen Anteil des normalen Businessclass-Ticketpreises wären Sie bereit zu zahlen, wenn Sie bei einem 10 stündigen Flug zwei Stunden sparen könnten?

_____Prozent

vier Stunden sparen könnten?

_____Prozent

sechs Stunden sparen könnten?

_____Prozent

9. Arbeiten Sie am Zielort nach den örtlichen Arbeitszeiten, oder richten Sie sich nach Ihrer inneren biologische Uhr?

a Ich orientiere mich nach der lokalen Arbeitszeit

b Ich orientiere mich nach meiner inneren biologische Uhr

10. An wie vielen Tagen haben Sie durchschnittlich Termine, wenn Sie geschäftlich (auf der Langstrecke) reisen?

_____Tage

11. Bewerten Sie bitte in Skalen von 1 bis 5 folgende Kriterien:

Ihre Belastung durch die Symptome des Jetlags

Es ist mir egal 1 2 3 4 5 Es ist mir sehr wichtig

Den Grad Ihrer Belastung durch die reine Flugdauer

Es ist mir egal 1 2 3 4 5 Es ist mir sehr wichtig

Wie wichtig Ihnen eine signifikante Verkürzung der Gesamt-Reisedauer von mehreren Stunden bis hin zu einem Tag wäre, wenn Sie mit Überschallgeschwindigkeiten fliegen könnten?

Es wäre mir egal 1 2 3 4 5 Es wäre mir sehr wichtig.

12. Wenn Sie die Möglichkeit hätten, am gleichen Tag der Anreise (vorausgesetzt Sie haben nur einen Termin am Zielort zu erledigen) zurück zu fliegen, würden Sie es tun, wenn die Flugdauer des Hin- und Rückfluges jeweils 2 Stunden dauert?

Ja Nein

4 Stunden dauert?

Ja Nein

6 Stunden dauert?

Ja Nein

13. Tragen Sie bitte Ihr Alter ein

_____Jahre



Anhang B: Reisedokumentation des Probanden A

<u>Hinflug 23.03.2014</u>	<u>Rückflug 29.03.2014</u>
Abflug: 12:05 TXL; Ankunft: 15:00 HEL	Abflug: 11:55 NGO; Ankunft: 15:10 HEL
Abflug: 17:15 HEL; Ankunft: 9:45 NGO	Abflug: 17:00 HEL; Ankunft: 18:00 TXL

Datum	Schlaf / Arbeit?	Heimatortszeit (H)/ Zielortszeit (Z=H+8)?	Anfang	Ende
23.03.2014	Abfahrt Dtl.		10.00 (H)	
24.03.2014	Ankunft Hotel JP			12.00 (Z)
	Mittag/Warten auf Check-In		12.00(Z)	15.00(Z)
	Arbeit		15.00(Z)	18.30(Z)
	Schlaf		23.00(Z)	06.30(Z)
25.03.2014	Meeting		09.00(Z)	18.00(Z)
	Business-Dinner		18.30(Z)	21.00(Z)
	Arbeit		22.00(Z)	01.30(Z)
26.03.2014	Schlaf		01.45(Z)	06.30(Z)
	Meeting		09.00(Z)	18.00(Z)
	Business-Dinner		19.00(Z)	22.30(Z)
	Arbeit		23.00(Z)	24.00(Z)
27.03.2014	Schlaf		00.30(Z)	6.30(Z)
	Meeting		9.00(Z)	15.30(Z)
	Schlaf		23.00(Z)	08.00(Z)
28.03.2014	Freizeit		08.00(Z)	23.30(Z)
	Schlaf		23.30(Z)	07.30(Z)
29.03.2014	Transfer Hotel -> Flughafen		08.45(Z)	10.00(Z)
	Flug NGO>TXL		12:00(Z)	18.00(H)
	Schlaf im Flugzeug		~16:00-16:30(Z) (irgendwann mal mittendrin nach ~4h Flugzeit)	

Anhang C: Reisedokumentation des Probanden B

Bitte die Dokumentation zwei Nächte vor dem Rückflug beginnen und eine Woche danach beenden! Danke! (Heimat: HAM; Ziel: ATL)	<u>Rückflug 28.06.2014 – 29.06.2014</u> Abflug: 22:15 ATL; Ankunft: 11:00 LHR. Abflug: 13:30 LHR; Ankunft: 16:05 HAM.
--	---

Beginn d. Einschlafversuchs (Datum, Uhrzeit; Heimat- oder Zielortszeit?) [DD:MM hh:mm (Z/H)]	Ungefähre Einschlafverzögerung [min]	Schlafende (Datum, Uhrzeit; Heimat- oder Zielortszeit?) [DD:MM hh:mm (Z/H)]	Spontan aufgewacht ? [Ja/Nein]
27.06.14, 0:30, Z	1	27.06.14, 8:10, Z	Ja
28.06.14, 0:15, Z	10	28.06.14, 7:30, Z	Nein
28.06.14, 10:15, Z	1	28.06.14, 10:30, Z	Ja
29.06.14, 0:45, Z	5	29.06.14, 4:45, Z	Ja
30.06.14, 1:00, H	10	30.06.14, 7:10, H	Nein
01.07.14, 0:50, H	10	01.07.14, 6:20, H	Nein
02.07.14, 0:20, H	10	02.07.14, 6:55, H	Nein
02.07.14, 23:00, H	30	03.07.14, 6:50, H	Nein
04.07.14, 0:05, H	5	04.07.14, 7:55, H	Ja
05.07.14, 1:05, H	1	05.07.14, 8.50, H	Ja
06.07.14, 1:10, H	1	06.07.14, 9:35, H	Ja

Anhang D: Reisedokumentation des Probanden W

Bitte die Dokumentation zwei Nächte vor dem Rückflug beginnen und eine Woche danach beenden! Danke! (Heimat: HAM; Ziel: ATL)	<u>Rückflug 28.06.2014 – 29.06.2014</u> Abflug: 22:15 ATL; Ankunft: 11:00 LHR. Abflug: 13:30 LHR; Ankunft: 16:05 HAM.
--	---

Beginn d. Einschlafversuchs (Datum, Uhrzeit; Heimat- oder Zielortszeit?) [DD:MM hh:mm (Z/H)]	Ungefähre Einschlafverzögerung [min]	Schlafende (Datum, Uhrzeit; Heimat- oder Zielortszeit?) [DD:MM hh:mm (Z/H)]	Spontan aufgewacht ? [Ja/Nein]
27.06. 00:30 (Z)	1	27.06. 08:10 (Z)	Nein
27.06. 11:00 (Z)		27.06. 11:30 (Z)	Ja (Auto)
28.06. 00:15 (Z)	5	28.06. 07:30 (Z)	Nein
29.06. 07:00 (H)	?	29.06. 07:30 (H)	Ja (Flugzeug)
29.06. 15:30 (H)	0	29.06. 16:15 (H)	Ja (Flugzeug)
29.06. 22:50 (H)	0	30.06. 08:00 (H)	Nein
30.06. 23:15 (H)	5	01.07. 09:00 (H)	Nein
02.07. 00:40 (H)	0	02.07. 08:00 (H)	Ja
02.07. 23:35 (H)	0	03.07. 08:00 (H)	Nein
03.07. 23:40 (H)	0	04.07. 08:00 (H)	Nein
05.07. 01:15 (H)	5	05.07. 10:00 (H)	Nein
06.07. 01:00 (H)		06.07. 10:00 (H)	Ja

Anhang E. Missionsspezifika der HISAC-A- und Falcon-7X-Businessjets auf den 40 wichtigsten Städtepaaren

Start - Ziel	Vorsprung Übersch. vs. Unterschall [min]	Missions- dauer HISAC-A [min]	Zwischen- stopps HISAC-A	Missions- dauer Falcon 7X [min]	Zwischen- stopps Falcon 7X
New York - London	121	247		368	
London - New York	163	266		429	
London - Singapur	147	590	Dubai	737	Taschkent
Singapur - London	184	616	Dubai	800	Taschkent
Dubai - London	101	311		412	
London - Dubai	77	288		365	
Paris - New York	176	271		447	
New York - Paris	129	258		387	
Los Angeles - London	129	442	Winnipeg	571	
London - Los Angeles	164	463	Winnipeg	627	
Hongkong - London	128	621	Astana	749	Astana
London - Hongkong	52	563	Astana	615	
Johannesburg - London	79	537	Tripolis	616	
London - Johannesburg	69	528	Lagos	597	
London - Sydney	258	853	Dubai, Cocos	1111	Chengdu
Sydney - London	314	884	Xmas I., Du.	1198	Chengdu
London - San Francisco	165	446	Saskatoon	611	
San Francisco - London	130	440	Saskatoon	570	
Houston - London	110	387	Jacksonville	497	
London - Houston	167	404	Jacksonville	571	
New York - Los Angeles	57	270		327	
Los Angeles - New York	39	230		269	
Washington - London	128	254		382	
London - Washington	172	276		448	
New York - San Francisco	59	276		335	
San Francisco - New York	42	243		285	
Boston - London	116	224		340	
London - Boston	153	251		404	
London - Chicago	169	302		471	
Chicago - London	136	281		417	
Hongkong - New York	300	596	Anadyr	896	Anadyr
New York - Hongkong	290	630	Anadyr	920	Tiksi
Los Angeles - Sydney	333	549	Kiritimati	882	Samoa
Sydney - Los Angeles	259	525	Kiritimati	784	Kiritimati
Sao Paulo - New York	117	417	Belém	534	
New York - Sao Paulo	107	406	Belém	513	

London - Miami	220	317		537	
Miami - London	158	290		448	
New York - Zürich	135	275		410	
Zürich - New York	183	293		476	
Kapstadt - London	200	509	Dakar	709	Luanda
London - Kapstadt	126	507	Lagos	633	
Luanda - Lisbon	118	277		395	
Lisbon - Luanda	107	283		390	
Paris - Los Angeles	176	471	Winnipeg	647	
Los Angeles - Paris	137	457	Winnipeg	594	
London - Toronto	161	271		432	
Toronto - London	124	251		375	
Singapur - Sydney	127	281		408	
Sydney - Singapur	159	280		439	
London - Lagos	82	273		355	
Lagos - London	85	264		349	
Frankfurt - New York	178	289		467	
New York - Frankfurt	134	276		410	
Paris - Singapur	168	569	Dubai	737	Neu-Delhi
Singapur - Paris	220	602	Dubai	822	Neu-Delhi
New York - Tel Aviv	147	430	Barcelona	577	
Tel Aviv - New York	265	466	Barcelona	731	Paris
London - Melbourne	266	834	Dubai, Cocos	1100	Dhaka
Melbourne - London	325	869	Cocos, Dubai	1194	Dhaka
London - Tokio	162	469	Norilsk	631	
Tokio - London	243	458	Norilsk	701	Norilsk
Sao Paulo - London	164	447	Sal	611	
London - Sao Paulo	234	466	Sal	700	Sal
New York - Singapur	283	770	Anad., Tokio	1053	Norilsk
Singapur - New York	313	738	Tokio, Anad.	1051	Magadan
Paris - Sao Paulo	228	465	Sal	693	Sal
Sao Paulo - Paris	155	453	Sal	608	
New York - Tokio	292	515	Anadyr	807	Anadyr
Tokio - New York	254	478	Fairbanks	732	Anadyr
Paris - Dubai	76	267		343	
Dubai - Paris	100	298		398	
Hongkong - Sydney	104	385	Mokmer	489	
Sydney - Hongkong	119	375	Mokmer	494	
Paris - Washington	186	280		466	
Washington - Paris	136	265		401	
Mumbai - London	72	453	Dubai	525	
London - Mumbai	47	421	Dubai	468	
Neu Delhi - London	49	451	Kiew	500	
London - Neu Delhi	74	366		440	

Anhang F. Begründung der Entscheidung gegen einen generischen Ansatz im Anwendungsfall B (Kapitel 5)

Der in 5.2.1 angedachte Ansatz, mit Simulationen den gesamten Variationsraum aller Hauptparameter möglichst engmaschig abzudecken, um generische Antwortflächen zu erzeugen, wurde aus folgenden Gründen verworfen:

Es müssten allein für den Überschall-Fall die in Tabelle F1 aufgeführten Parametervarianten untersucht werden, von welchen wir annehmen, dass sie eine minimale Variationstiefe für plausible Ergebnisse darstellen. Die benötigte Anzahl an Simulationen beträgt ca. $6,4 \cdot 10^7$, was bei der Dauer einer Einzelsimulation auf einem herkömmlichen Prozessor von ca. 3 Sekunden auf einem parallelisierten Rechencluster immer noch mehrere Wochen in Anspruch nehmen würde.

Zudem erscheint der Variantenreichtum trotz allem noch spärlich, und es müssten für Unterschall noch weitere Blockzeitvarianten simuliert werden. Zuletzt ist die Vergleichbarkeit von Unter- und Überschall erst durch die jeweiligen streckenspezifischen Flugzeiten gegeben. Im Falle von Überschall können diese jedoch nur unter Kenntnis der verwendeten Flugrouten bestimmt werden.

<u>Parameter</u>	<u>Varianten</u>	<u>Erklärung/Annahmen</u>
$t_{WkStart}$	3	Entweder zu $t_{WDStart}$, am frühen Nachmittag, oder dazwischen, also 8:30/11/13:30 Uhr (1. Tag).
t_{WkEnd}	$3 \cdot 5 = 15$	Entweder am frühen Nachmittag, zu t_{WDEnd} , oder dazwischen, also 13:30/16/18:30 Uhr, 1. bis 5. Tag.
$T_{BlockOut}$	$\left(\frac{360 - 60}{60} + 1\right)^3 = 216$	Überschall: Zwischen 60 und 360 Minuten pro Flug auf bis zu drei Flugabschnitten, 60-Minuten-Schritte
$T_{BlockRet}$	1	Unter Vernachlässigung von Winden: $T_{BlockRet} = T_{BlockOut}$ (ggf. in umgekehrter Reihenfolge).
$T_{LayoverOut}$	$3^0 + 3^1 + 3^2 = 13$	Zwischenstopp dauert 30, 60 oder 90 min, bis zu zwei Zwischenstopps.
$T_{LayoverRet}$	1	$T_{LayoverRet} = T_{LayoverOut}$ (ggf. in umgekehrter Reihenfolge).
T_{Shift}	24	-12 h bis +11,5 h in 1-h-Schritten; nur effektive Zeitverschiebung T_{ShiftE} relevant.
SE_{Out}	3	$SE = 0, SE_{Eco}, SE_{Biz}$.
SE_{Ret}	1	Gleich wie SE_{Out} .
w_i	7	Siehe Kapitel 4 (Anwendungsfall A).

Tab. F1 - Minimalplausible Parametervarianten für generische ÜS-Simulationen